

同济大学交通运输工程学院

博士学位论文

沥青路面温度场预估方法及其应用

姓名：贾璐

申请学位级别：博士

专业：道路与铁道工程

指导教师：孙立军

20080301

摘 要

沥青路面完全暴露于自然环境的影响中，受到持续变化气候因素的影响，路面结构内因此产生了不稳定热传导。大量工程实践也已表明，沥青路面温度状况对于沥青路面结构的承载能力和使用性能有重要的影响，而我国沥青路面设计方法对于沥青路面结构内复杂温度场分布影响的考虑十分有限，同时在路面力学分析中对于温度因素的认识也很不足，如何在路面力学分析以及路面设计中考虑温度因素的影响已成为一个亟待解决的难题，因此准确预估沥青路面温度场的分布特征和变化规律并在实际问题对其加以运用，具有重要的理论和现实意义。

本文以沥青路面温度场实测研究为基础，对于沥青路面温度场预估方法及其在实际工程中的运用展开了系统研究，建立了沥青路面温度场预估方法及其应用框架体系，主要研究内容包括以下几个方面

(1) 沥青路面温度场实测与分析：结合沥青路面温度场试验实测结果，分析不同地区不同季节沥青路面温度场的变化规律与分布特征，为建立沥青路面温度场预估模型奠定了基础；

(2) 沥青路面温度场理论预估模型研究：基于传热学基本理论，通过对比分析理论法预估方法中解析法、有限差分法和有限单元法的优缺点，选定有限差分方法为沥青路面温度场理论预估的基本方法，并结合路面表面及底面边界条件，建立了准确有效的沥青路面温度场有限差分预估模型；

(3) 沥青路面温度场统计预估模型研究：以沥青路面温度场实测数据和气象资料为基础，探讨国外现有统计回归模型在我国气候条件下的适用情况；提出原始数据插值处理方法，有效降低了由于原始实测数据引起的模型预估误差；引入“交叉互分析”方法对于不同深度处的路面温度数据和气温及太阳辐射的相关性进行分析，并据此选定合适的自变量，建立沥青路面温度场统计预估模型；通过引入地区修正系数，消除统计预估模型中的地区差异性。

(4) 通过不同温度状态下沥青混合料力学参数的试验研究，建立沥青混合料力学参数随温度变化规律，为研究不同温度状况下沥青路面的力学响应奠定了基础。

(5) 以沥青路面温度场预估模型和沥青混合料力学参数随温度变化规律为

摘要

基础, 结合我国常见沥青路面结构形式和材料类型, 建立了适用于我国实际情况的沥青路面回弹弯沉温度修正方法。

关键词: 道路工程, 沥青路面, 沥青路面温度场, 理论预估模型, 有限差分法, 统计预估模型, 交叉互分析, 逐步线性回归, 沥青混合料力学参数, 回弹模量, 泊松比, 回弹弯沉, 温度修正

ABSTRACT

Asphalt pavement structure is directly exposed to natural environmental conditions. It endures the influences of climatic factors, and has unstable heat transfer. It has been known that the temperature profiles in asphalt pavement have a great effect upon the bearing capacity and performance of pavement structure by a number of engineering experiences. It will have great theoretical and practical significants to predict exactly the temperature profiles in asphalt pavement structure and apply it in the engineering projects. However, in fact, there are only limited considerations of temperature profiles in asphalt pavement structure in Chinese asphalt pavement design system, while temperature profile is rarely considered in mechanical analysis of asphalt pavement and is almost neglected in engineering projects. In sum, temperature profile in asphalt pavement structure has become a very important encumbrance in asphalt pavement engineering.

Therefore, in this dissertation the asphalt pavement prediction models have been carefully investigated, researched and discussed, based on asphalt pavement in-site monitoring programs. The researches are including:

1. Monitoring program and analysis about temperature profile in asphalt pavement structures: combining with the in-site asphalt pavement temperature monitoring program, the measured asphalt pavement temperature data are detailed investigated to demonstrate its' variation and features, and base for following researches about asphalt pavement temperature prediction models.

2. Researches about theoretical temperature prediction models of asphalt pavement: based on the primary theories of thermology, the analytic method, finite difference method and finite element method, belonging to theoretical methods, are detailed investigated and compared, then the finite difference method is selected to establish the temperature prediction models of asphalt pavement. After calibrate the surface boundary conditions and the bottom boundary conditions in model, a valid asphalt pavement temperature prediction model is developed.

3. Researches about statistical temperature prediction models of asphalt pavement: based on in-site measured asphalt pavement temperature data and related climate data, the application of some statistical temperature prediction models in China developed by other countries is verified. A pretreated interpolation method is provided to eliminate the negative influences of sample data to prediction model. The “cross-correlation method” is introduced to select the most appropriate independent variables, such as air temperature and solar radiation, in asphalt pavement prediction model. After that, a valid statistical temperature prediction model is developed too. After induce the regional correction coefficient, the regional problem in statistical model is erased.

4. The mechanical characteristics of asphalt mixture under different temperature conditions are researched, besides that a relationship between mechanical characteristics of asphalt mixture and temperature is established, which will provide basic datas for mechanical analysis for asphalt pavement.

5. Based on asphalt pavement temperature prediction models and relationship between mechanical characteristics of asphalt mixture and temperature, the temperature correction method for deflection on asphalt pavement surface is developed to solve the related problems in asphalt pavement engineerings.

Key Words: Pavement Engineering, Asphalt Pavement, Temperature Profile in Asphalt Pavement, Theoretical Temperature Prediction Models of Asphalt Pavement, Finite difference method, Statistical Prediction Model, Cross-Correlation Analysis, Stepwise Linear Regression, Mechanical Parameters of Asphalt Mixture, Resilinet Modulus, Poisson's Ratio, Rebound Deflection, Temperature Correction

学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版；学校有权保留学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：




2008年4月27日

同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律 responsibility 由本人承担。

学位论文作者签名：



08年4月28日

第1章 引言

1.1 概述

自1940年美国工程兵首次将加州承载比试验和布辛耐斯克弹性半空间体系理论分析方法引入沥青机场道面设计中之后，沥青路面（包括沥青机场道面）设计摆脱了以往单纯依靠经验的做法，进入了以力学分析为基础的时代。随着两层、三层及多层弹性体系理论求解方法的出现与电子计算机技术的迅猛发展，力学分析在沥青路面设计方法中的地位也日益重要。但是大量工程实践表明，基于力学分析的沥青路面设计方法并没有避免沥青路面出现损坏。国外沥青路面的使用寿命一般在10-12年，距离15年的设计寿命尚存在一定的差距；而我国的情况则更为糟糕，沥青路面往往在竣工半年至一年之内大量出现开裂、车辙、坑槽等破坏现象。这表明采用基于力学的设计方法，并未完全能考虑到所有的影响因素，温度就是最具代表性的因素之一。

温度对于沥青路面的影响非常直接。温度升高，沥青混合料的模量、强度会随之降低；温度降低，沥青混合料的模量、强度则会提高。此外，高温会引起沥青路面的车辙，低温会引起沥青路面的开裂。在设计中对引发路面破损的温度因素并未能充分考虑，通常做法只是根据各种标准温度、等效温度，结合轮迹试验、蠕变试验、马歇尔稳定度试验等一系列试验来控制沥青路面的高温性能，通过选择较软沥青等手段来减少沥青路面的低温开裂，这些措施取得的效果相当有限，这说明亟需在现有设计框架中考虑温度对路面寿命的影响。

虽然目前在各类沥青路面设计体系和设计方法中大都涉及了温度的影响，但这些考虑仍过于简单，不够全面，其原因主要有以下三点：

首先，目前仍缺乏对于沥青路面结构温度分布的准确认识。沥青路面结构完全暴露于自然环境中，受到持续变化的气候因素的影响，如太阳辐射、天空辐射、外界气温、降水等因素的影响。太阳辐射与天空辐射的一部分被路表反射，余下的部分被吸收并转变为热能，这部分热能与外界气温相叠加，由此产生了可观的路表温度，由于热传导作用，使得热量沿路面厚度方向向温度较低处传递。路面温度变化充分反映了短期内的气温波动对于沥青路面结构温度的

影响。同时沥青路面结构还吸收从路面底部传入的热量，这部分热量主要反映了长期的周期性气候作用下，地温作用对于沥青路面结构内温度分布状况的影响。因此，沥青路面结构内部的温度分布是不均匀和不稳定的。以往研究简单地认为沥青路面各个深度处温度变化的影响因素是完全一致的，因而仅着眼于从路面表面进入的能量，而忽视地温的作用，导致沥青路面温度场预估精度随深度的增加而降低。



其次，在进行沥青路面材料设计和力学分析时对于温度的考虑也相当有限。由于我国现行沥青路面设计中缺乏对沥青混合料在不同温度下力学参数的认识和反映，因此在设计规范中仅采用了15℃和20℃两种温度状态时，沥青混合料设计的力学参数对于路面结构进行设计。且不论对低温的控制除了选用合适的沥青外是否存在更好的办法，也不论温度变化造成的路面翘曲疲劳损伤（尤其是半刚性基层），单就关于温度影响的最基本问题，如路面结构是夏天（高温）更安全还是冬天（低温）更安全，或是其他季节更安全，目前也无确切解答。温度的变化导致路面结构内力分布变化，当通过材料设计控制了高温下不产生过量的车辙时，并未考虑高温下路面结构的内力状况，而是想当然地认为此时的应力分布不会比标准状态下的应力更危险。因此，有必要通过分析确认上述结果的可靠性，即分析不同路面结构在不同温度条件下的应力应变分布，考虑荷载-温度的耦合作用，这对于完全弄清路面结构的临界状态并进行安全合理的路面设计十分必要和重要的。

最后，我国现行规范在处理工程实际问题时对于温度的考虑也过于简单。例如目前对于沥青路面实测弯沉值的温度修正问题，仍采用《公路工程路基路面现场测试规程》(JTJ059)中T095的规定^[2]或《公路沥青路面设计规范》(JTGD50-2006/JTJ014-97)中的规定^[3]，虽然二者存在差异，但都对于温度问题进行了简化处理，并只能适用于薄沥青面层，对于目前经常采用的厚沥青路面应用效果较差。

因此，沥青路面温度场的研究十分重要。只有在建立了准确的路面温度场预估方法，并通过实验研究不同温度状况下沥青混合料力学参数之后，才能在工程实际问题中真实地反映温度因素的影响，才能在设计中充分地考虑温度因素的影响。

1.2 沥青路面温度场预估方法研究

影响路面温度状况的因素有两大类，即外部因素和内部因素。外部因素包括温度、太阳辐射、风速、降雨量、地温等气象因素，其中气温是最关键的因素，其次为太阳辐射。内部因素包括路面的热传导、热容量、对辐射热的吸收能力以及路面结构组合、厚度等。确定路面温度的方法通常可分为两类：一是根据气象学和传热学的基本原理采用数值分析方法建立沥青路面温度场的预测模型，可称之为理论分析法；二是根据路面温度的实测数据和气象资料采用统计回归的方法建立路面温度场与环境因素之间的定量关系，可以称之为统计分析法。

1.2.1 国外相关研究

关于路面温度场的工作最初是由 Barber (1957) 开展的^[4]，他根据气象报告建立了沥青路面温度场的预估模型：

$$T_a = T_m + T_v \sin 0.262t \quad (1.1)$$

式中：

T_a ——空气温度，℃；

t ——从温度变化周期起点开始的时间；

T_m ——考虑平均有效空气温度，℃。可用下式估计：

$$T_m = T_A + R \quad (1.2)$$

式中：

T_A ——在时间间隔(t_1, t_2)内的平均空气温度，℃；

R ——由于路面长波辐射所以引起的平均温度损失，℃，且：

$$R = a \cdot f_s \cdot I_s \quad (1.3)$$

式中：

a ——路面表面对于短波辐射的吸收率（对于沥青路面为 0.95）；

f_s ——太阳热流辐射修正因子= $0.03200^\circ\text{C} \cdot \text{m}^2/\text{W}$ ；

I_s ——在时间间隔(t_1, t_2)内的平均太阳热流辐射， W/m^2 ；

T_v ——空气温度最大均方差，℃，可以下式计算：

$$T_v = 0.5T_r + 3R \quad (1.4)$$

式中:

T_r ——空气温度日温差, °C;

然后可根据在时间间隔 (t_1, t_2) 内的实测空气温度来预估沥青路面温度:

$$T_{(t,z)} = T_m + T_v \frac{He^{-zA}}{\sqrt{(H+a)^2 + A^2}} \sin\left(0.262t - zA - \arctan \frac{A}{H+A}\right) \quad (1.5)$$

式中:

$T_{(t,z)}$ ——沥青路面在 t 时刻深度 z 处的温度, °C;

z ——路面表面以下的深度, m;

$$H = h/k \quad (1.6)$$

式中:

h ——对流系数, $W/m^2 \cdot K$;

k ——表面材料的热传导系数, $W/m \cdot K$;

$$A = \sqrt{f/\alpha} \quad (1.7)$$

α ——表面材料的热传导率, m/s;

f ——时间转化因子=471.6s;

在 Barber 提出的模型中仅考虑了日辐射总量而并未考虑小时辐射量, 因此该模型的预估精度有限。

1968年, Straub 等人对沥青路面的温度状况进行了试验研究^[5]。分别观测了6英寸和12英寸厚的密级配沥青混凝土路面在不同深度处的温度状况, 根据实测结果建立了路面温度状况的预估模型。根据 Straub 的研究, 可得出如下结论:

(1) 沥青路面中不同深度处的温度状况与路面厚度无关; (2) 太阳辐射对路面表面温度的影响比气温的影响大得多。

1969年, Rumney 和 Jimenez 针对炎热沙漠气候中沥青路面的最高温度进行了实测^[6], 并建立了预估2英寸和4英寸深处沥青路面温度的诺莫曲线。

Dempsey 和 Thompson 在1970年采用了与 Straub 类似的方法, 建立了理论预估模型^[7]。他们提出在缺乏足够精确的实测气温数据时, 可通过正弦曲线拟合日最高气温和日最低气温来粗略考虑每个计算时刻的气温。

1969年, Southgate 和 Deen 根据马里兰州的实测数据发现^[8], 在一定深度处沥青路面的温度与路面表面温度之和与前五天平均气温之间存在较好的线性关

系，以此预估沥青路面沥青层内的平均温度。

1972 年，Christison 和 Anderson 研究了低温环境对于沥青路面的影响^[9]，将路面假定为均质体，采用了一维非稳态计算方法结合隐式格式求解热传导方程，从而得到沥青路面各个深度处的温度状况。该模型的预估结果与加拿大阿尔贝塔实验路实测温度数据符合较好。

Schenk 于 1963 年利用有限差分方法开发了求解一维热传导方程的 FORTRAN IV 程序。1972 年，Williamson 对该程序进行了一系列改进，使其能够计算沥青路面温度场变化情况^[10]。在此基础上，Williamson 建立了适用于南非的路面温度预估模型。通过对 Pretoria 沥青混凝土路面的实测温度和使用上述模型预估得到的路面温度进行对比表明二者具有较高的一致性。

挪威的 Noss 在 1973 年研究了路面温度与路基中冰冻深度的关系^[11]。采用 Vormsund 实验路实测数据，通过多元回归方法预测寒冷天气气温与路面温度的差值，针对不同月份分别得到了不同的回归模型。

在 1987 年之前，由于缺乏大规模长期的路面温度观测数据，对于路面温度的研究并不多，直到长期路面性能研究项目(Long Term Pavement Performance, LTPP)开展之后，这种情况才得到了改善。随着人们对于路面结构温度和湿度状况的日益重视，SHRP 于 20 世纪 90 年代初在长期路面性能研究项目中开展了专项的季节观测项目 (Seasonal Monitor Program, SMP)^[12]。SMP 项目（第一阶段研至 1995 年完成）最初在美国和加拿大布设了大约 30 个测点，后期增设至 63 个，其分布基本上代表了美国和加拿大的所有环境情况。所有 SMP 观测实验段均安装有路面温度、湿度以及气象观测仪器，并自动记录每小时的路面温度、湿度以及气象数据。利用 SMP 项目收集数据，沥青路面温度场预估方法的研究进入了新的阶段。

Solaimanian 和 Kennedy (1993) 根据路面表面的能量平衡原理，用最高气温以及每小时的太阳辐射来确定沥青路面极端温度范围^[13]，研究表明，在大多数情况下该模型的预估结果与实测值之间的误差小于 3 度。该方法后来被 SHRP 项目所采用，用一年中温度最高连续 7 天的路面 20mm 深处的平均最高温度 $T_{20\text{mm}}$ （即温度最高的 7 天的平均温度值）作为沥青路面高温设计温度^[14]：

$$T_{20\text{mm}} = (T_{ar} - 0.00618Lat^2 + 0.2289Lat + 42.2) \times 0.9545 - 17.78 \quad (1.8)$$

式中：

T_{air} ——连续7天最高气温平均值，以℃计；

T_{20mm} ——路面以下深度20mm处温度，以℃计；

Lat ——纬度，以度计。

Alaeddin Mohseni (1997) 根据 LTPP-SMP 研究第一阶段收集到的温度数据，对于 SHRP 的高温预估模型进行了验证，发现 SHRP 沥青路面高温预估模型得到的结果比 SMP 实测温度要高，特别是对于高温和高纬度地区，其误差最大为 6°C ^[15]。

此后，LTPP 利用更新后的实测数据提出了新的沥青路面高温预估模型^[16]：

$$T_{pav} = 54.32 + 0.78T_{air} - 0.0025Lat^2 - 15.141g(H + 25) + z(9 + 0.61S_{air}^2)^{0.5} \quad (1.9)$$

T_{pav} ——沥青路面最高设计温度，以℃计；

T_{air} ——年最高气温，以℃计；

Lat ——纬度，以度计；

H ——路面深度，以 mm 计；

S_{air} ——空气温度的标准差；

z ——正态分布的概率， $z=0$ 为 50% 置信度， $z=2.055$ 为 98% 置信度。

Superpave 研究以冬季最低气温直接作为沥青路面最低设计温度，其预估公式为：

$$T_{pav} = T_{surf} = T_{air} \quad (1.10)$$

式中：

T_{pav} ——沥青路面设计最低温度，以℃计；

T_{surf} ——沥青路面表面最低温度，以℃计；

T_{air} ——年最低气温，以℃计。

加拿大 C-SHRP 的研究表明该模型预估温度比实测温度低，并提出其低温预估模型^[17]：

$$T_{PAV} = 0.859T_{air} + 0.17 \quad (1.11)$$

式中：

T_{pav} ——沥青路面设计最低温度，以℃计；

T_{air} ——年最低气温，以℃计。

考虑到 C-SHRP 的模型（式 1.11）是根据加拿大高纬度地区的数据所得来，

因此 SHRP 并没有直接采用该预估模型，而是结合 SMP 研究所提供的新数据，结合过去 20 年的气象资料提出了新的沥青路面最低温度预估模型^[18]：

$$T_{PAV} = -1.56 + 0.72T_{air} - 0.004Lat^2 + 6.26\lg(H + 25) - z(4.4 + 0.52\sigma_{air}^2)^{1/2} \quad (1.12)$$

式中：

T_{pav} ——沥青路面设计最低温度，以℃计；

T_{air} ——年最低气温，以℃计；

Lat ——纬度；

H ——路面深度，以 mm 计；

σ_{air} ——空气温度的标准差；

z ——正态分布的概率， $z=0$ 为 50% 置信度， $z=2.055$ 为 98% 置信度。

Inge 和 Kim(1995)对于 AASHTO 设计方法中用于实测弯沉修正的温度预估模型进行了研究，提出可预估沥青路面各深度处温度状况的 BELLS 模型。与传统的 AASTHO 温度预估模型相比，新模型不但不需要考虑五天前的气温状况，而且可以预估一天内不同时刻沥青路面温度场延深度方向的分布状况^[19]。

1998 年，Lukanen 等人以 LTTP-SMP 实测的路面温度状况为基础，采用统计方法分析了路面温度分布状况、极端空气温度以及纬度之间的相关关系，并根据分析结果建立了沥青路面温度场预估模型^[20]。

Mohsemi 在 1998 年以 LTTP-SMP 的温度数据为基础，修正了 SHRP 的沥青结合料 PG 分级体系，特别是其低温分级指标^[21]。

1998 年 Bosscher 等人在威斯康星州进行了沥青路面温度场实测研究^[22]。该研究采用统计方法，建立了沥青路面温度场预估模型。通过与 Superpave 预估模型、LTTP 预估模型进行比较，发现 LTTP 的低温预估模型与新预估模型的预估结果都与实测数据符合较好，但在气温超过 30℃ 时，LTTP 模型和 Superpave 模型都会低估沥青路面中的最高温度。

Hermansson 在 2000 年提出了预估沥青路面在夏季高温时温度分布状况的新模型^[23]。通过与瑞典 Linkoping 地区的实测路面温度数据相比，发现该模型具有较高的预估精度。在 2001 年，Hermansson 将研究继续深化^[24]，建立新的计算模型来考虑风引起的热损失，提高了预估结果精度。同时也证明了 SHRP 高温预估模型中所采用的沥青路面表面热能平衡表达式存在较大缺陷。

2002 年，B. K. Diefenderfer 等人以 Virginia Smart 试验路上实测得到的路面

温度数据和气温数据为基础,采用统计回归方法建立了路面日最高和最低温度预测模型^[25]。为了使模型具有更为广泛的适用性,B. K. Diefenderfer 等将日太阳辐射总量和纬度引入模型,提出了改进后回归模型。

2005年,Minhoto Manuel 等人采用三维有限元方法来预估沥青路面不同深度的温度状况,与 Portugal 北部 Bragança 地区实测路面温度数据的比较显示该预估模型具有较高的精度^[26]。

1.2.2 我国相关研究

国内关于沥青路面温度场较为系统的研究始于 20 世纪 80 年代。大多数研究者都采用理论分析法作为研究的主要方法。1982 年,严作人^[27]将路表热平衡分量归结为气温、太阳辐射和地面有效辐射,使用两个正弦波的叠加来模拟气温变化,使用傅立叶级数模拟太阳辐射日变化,并通过增大气温振幅的办法近似地考虑地面有效辐射,建立了求解路面温度场的边界条件。根据传热学原理建立路面的导热方程组,并求解出在各类边界条件下方程组的解。从而解决了周期性环境因素作用下层状路面温度场的热传导问题,提出了沥青路面日最高和最低温度预估模型。

吴赣昌^[28-30]于 20 世纪 90 年代的研究认为:一方面,在高等级公路中,仅将路面结构视为二层或三层体系是不够的,而应将路面视为多层体系进行研究;另一方面,路面结构的温度场不仅沿深度方向变化,而且也沿水平方向变化,应将沥青路面结构温度场的分布视为二维分布。从气象学和传热学的基本理论出发,建立了半刚性基层沥青路面二维非线性不稳定温度场的计算理论,对不同气候条件下路面温度、土基温度和沿深度和水平方向的温度场分布给出了相应的计算方法。结合二维粘弹性层状体系沥青路面温度松弛应力的计算理论,分析了外界气候条件和路面材料温度场与温度应力场之间的关系。

1991 年,徐世法以近两年的气温和路面温度实测数据为依据,分析了北京地区沥青路面温度的分布规律。使用统计回归方法,建立了路面各层温度与路表温度、平均气温、最高气温、最低气温这 4 种特征温度之间的回归关系^[31]。

谈至明、孙立军(1999)从研究冬季气温与地温、地温与路表温度之间的关系着手,归纳了冬季路表温度日交换和降温过程的变化规律,进而推导和给出了相应的路面结构温度场计算公式和使用图表^[32]。

秦健、孙立军(2004)等人在上海、石家庄、新疆等地区的沥青路面实验段上埋设了温度传感器,实测了大量的沥青路面温度场数据,并且根据试验段当地的气象资料,建立了预估沥青路面不同深度处温度变化的统计回归方程。同时将各地区30年来历史月平均气温引入预估方程,克服了统计回归模型存在的地区差异问题^[33~34]。

贾璐、黄立葵等(2004)根据传热学基本理论,详细分析了二维非稳态温度场导热问题,建立了显式格式的沥青路面体热能平衡方程,建立了沥青路面高温温度场数值预估模型。并利用遗传算法对沥青路面材料热物理参数和边界条件参数进行反分析,进一步提高了模型的计算精度^[35]。

1.2.3 沥青路面温度场研究评述

1. 沥青路面温度场研究历程

纵观上世纪50年代至今国外研究者对于沥青路面温度场所做的观测、分析和研究工作,可以LTPP-SMP项目为界,将沥青路面温度场的研究分为两个阶段:

第一阶段,20世纪50年代至80年代。研究者根据各自所关心的问题,从不同角度对沥青路面温度场进行了研究。但是由于实测数据数量有限,并且数据局限于部分地区,其代表性不高。因此在这个阶段关于沥青路面温度场的研究不够系统和全面。

第二阶段,20世纪80年代至今。在1988年美国启动了SHRP研究计划之后,在北美各地进行了大规模的实测工作,收集了大量实测路面温度数据和气象资料,为沥青路面温度场的进一步研究提供了充分的数据基础。研究者除了可以对于沥青路面所经历的极端高温和极端低温进行研究之外,还可以模拟沥青路面温度场在较短的时间间隔下的变化情况。此外,研究者还纷纷利用LTPP-SMP研究所提供的沥青路面温度数据和相应的气象数据,检验和修正以往的温度场预估模型,使其具有更高的精度和更为广泛的适用性。

在这一阶段,对于沥青路面温度场的研究已经不再简单的局限于预估沥青路面内的温度状况,而是更多地考虑如何应用沥青路面温度预估模型,在沥青路面的设计、计算以及分析中充分考虑温度因素对于沥青路面材料、路面结构承载力和应力响应状况的影响,以期更为真实地理解沥青路面在实际环境影响

下的状态，对于车辙等效温度、疲劳等效温度以及沥青路面弯沉值的温度修正均已经成为研究的热点。

2. 沥青路面研究方法分类

综合各国学者对于沥青路面温度场的研究方法，从其采用的方法入手大致可以将其分为两类：一是根据传热学的基本原理采用数值分析方法建立沥青路面温度场的预测模型，可以称之为理论法；二是根据路面温度的实测数据和气象资料采用统计回归的方法建立路面温度场与环境因素之间的定量关系，可以称之为统计法。这两种方法各有优缺点：

理论法是根据气象资料和路面材料的热物理参数，应用传热学的有关理论和假设边界条件，求解路面温度场的一种方法。在求解时常把路面简化为均质半无限体或层状体系，并且需要将沥青路面表面复杂热传导边界条件进行简化处理以方便求解。**该方法对于路面材料的热力学参数精度要求较高，但是这些参数的实测试验却相当复杂，这成为困扰理论分析法的最大问题。**在实际处理中，只能根据经验或者有限的试验确定材料热学参数的大致取值范围或近似估算方法，但这样做难以避免的降低了模型的预测精度。同时求解路面温度场的解析式过于复杂，其数值计算过于繁琐，通常要借助计算机来完成，使其推广应用受到了一定的限制。**该方法的最大优点是具有较强的适应性，即不受地区、路面结构类型的限制。**

统计法是根据实测的路温和气象资料，通过回归分析建立路面温度预估模型。因为其理论基础仅仅是路面温度场与各影响因素之间的统计关系，所以该方法仅能从现象上反映二者的表面联系，并不能解释其内部传热机理。另外，统计分析法一般只考虑作用在路面表面的环境因素，如空气温度、太阳辐射等等，忽略了来自于深处地温对于路面温度场的影响，同时也忽略了路面材料的结构变量，热力学参数的影响，因此，采用该方法建立的预估模型一般来说都存在地区适应性问题。此外，统计法还需要大量的、长期的路面温度和气象观测资料，数据样本的大小直接影响到预估模型的适应性。统计法的优势也是十分明显的，那就是预估模型的形式和求解过程都比较简单，**输入参数少且容易获得**，其预测精度可以满足工程的需要。

3. 我国沥青路面温度场研究

我国在沥青路面温度场的研究方面起步较晚，并且缺乏象 LTPP-SMP 研究一样的覆盖范围广、时间跨度长的沥青路面温度场数据积累，使得我国现有温度场预估方法存在地域局限性，使用一个地区的在某段时间内的温度场数据所得到的预估模型在用于其他地区时，往往会存在预估精度不高等问题。

目前，在工程实际和理论研究中只能依靠国外现有的沥青路面温度场预估模型，但是考虑到我国与北美地区存在较大的气候差异，同时因为我国地理条件复杂，也使得不同地区之间的气候存在较大的差异，这些温度预估模型能否适用于我国各个不同地区尚值得商榷。

综合以上内容，为建立可以适用于我国不同地区的沥青路面温度场预估模型，首先要在全国部分有条件的地区开展沥青路面温度场的实测工作，分析沥青路面温度场的分布特性和变化规律，并借助各地气象部门提供的标准气象资料来建立沥青路面温度场的预估模型，然后通过进一步的研究消除模型中的地区差异，使得模型具有更为广泛的适用性。

1.3 研究内容与技术路线

1.3.1 本文主要内容

(1) 在我国部分地区进行沥青路面温度场实测研究，收集相关的气象数据为沥青路面温度场分析奠定基础；

(2) 拟通过对路面温度场实测结果进行初步分析，研究路面温度场分布特征及变化规律；

(3) 拟以传热学基本理论为基础，采用理论法建立沥青路面温度场预估模型，并对模型的特点及应用条件进行探讨；

(4) 拟结合实测路面温度场数据和气象资料，采用统计方法建立沥青路面温度场预估模型，并对模型的特点及应用条件进行探讨；

(5) 拟通过不同温度下沥青混合料力学参数的室内测试试验，建立沥青混合料力学参数随温度的变化规律；

(6) 拟结合室内试验结果和沥青路面温度场预估模型，提出合理有效的沥

青路面回弹弯沉温度修正方法。

1.3.2 本文技术路线

- (1) 通过大量现场实测沥青路面温度场数据和相应的气象数据,对于沥青路面温度场的变化规律与特征进行研究;
- (2) 通过分析比较解析法、有限差分方法和有限元方法之间的区别,选择合理的边界条件,以建立准确有效的沥青路面温度理论预估模型;
- (3) 通过分析现有温度场统计预估模型中存在的缺陷,采用了更为合理有效的交叉互相关分析方法建立沥青路面温度场统计回归模型;
- (4) 在广泛收集国内外相关研究文献的基础上,通过大量室内试验建立沥青混合料力学参数与温度的关系;
- (5) 通过分析沥青路面回弹弯沉的温度修正原理,结合沥青路面温度场预估模型以及沥青混合料力学参数与温度的关系,确定适应我国设计体系的沥青路面回弹弯沉温度修正方法。

第2章 沥青路面温度场实测结果与分析

沥青路面温度场的实测研究是建立沥青路面温度场预估模型的基础，结合同济大学自2001年以来在我国部分城市开展的沥青路面温度场实测工作^[34]，本章将分析、探讨沥青路面温度场的变化规律以及其特征。

2.1 沥青路面温度场实测研究简介

2.1.1 观测地点的选择

自2001年以来，同济大学在上海市、新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市、河北省石家庄市、唐山市、张家口市、青海省西宁市、湖南省长沙市、湖北省武汉市进行沥青路面温度场实测，如图2.1中所示。

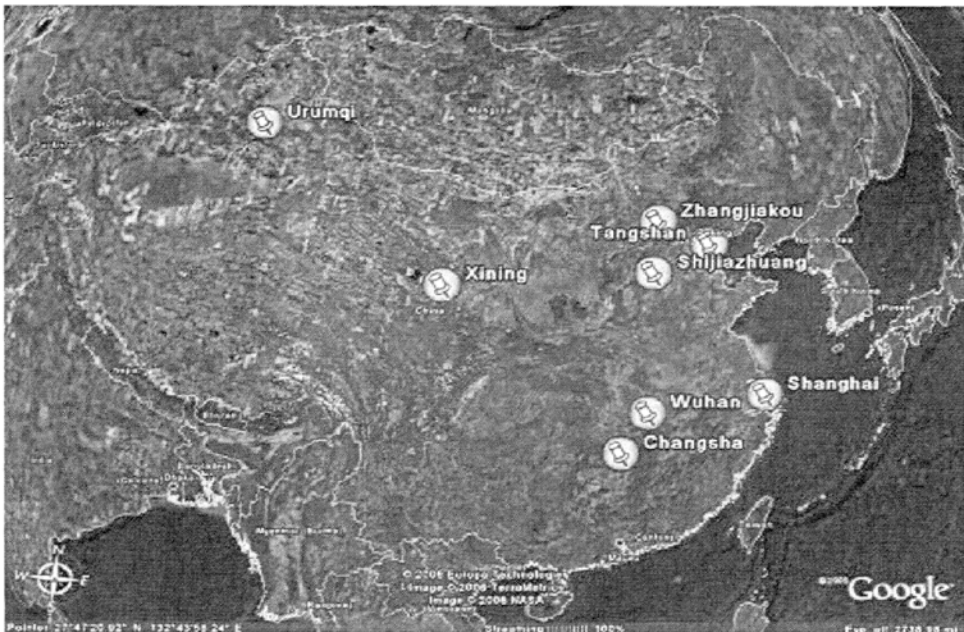


图2.1 沥青路面温度场实测地点

以上各试验观测段的路面结构形式与具体的地理位置如表 2.1 所列:

表 2.1 沥青路面温度场实测试验段详细信息

试验地点	路面结构		地理位置		观测时间	气象资料
	沥青层 (cm)	基层 (cm)	北纬 (°)	东经 (°)		气温/辐射
上海	15	20	31.25	121.47	2002.7-8	小时气温/辐射
	15	20			2003.11-2004.1	小时气温/辐射
	15	20			2005.8	小时气温/辐射
	18	20			2006.6-8	无
石家庄	15	40	38.07	114.47	2005.1-6	小时气温/无辐射
唐山	15	30	39.62	118.18	2004.7-8	小时气温/辐射
张家口	15	30	40.82	114.88	2005.11-12	无
武汉	14	40	36.74	101.77	2005.8-11	小时气温/辐射
长沙	15	40	28.20	112.97	2003.7-8	小时气温/辐射
乌鲁木齐	15	30	43.77	87.50	2003.3-4	小时气温/辐射
西宁	15	40	36.62	101.77	2003.1-3	小时气温/无辐射

2.1.2 沥青路面温度场实测仪器与观测方法

本文采用 Pt100 铂电阻温度传感器测量沥青路面温度。Pt 100 铂电阻温度传感器是一种高精度的温度传感器，其使用的量程范围是-130~400℃，精度为 0.1℃。同时采用了 En880 无纸数据记录仪记录并存储在不同时间 Pt100 铂电阻温度传感器观测到的沥青路面温度数据。Pt100 铂电阻温度传感器和 En880 无纸记录仪如图 2.2 所示。

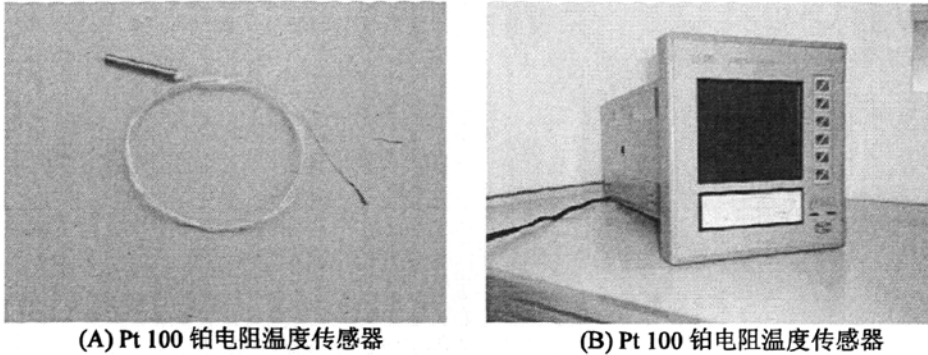
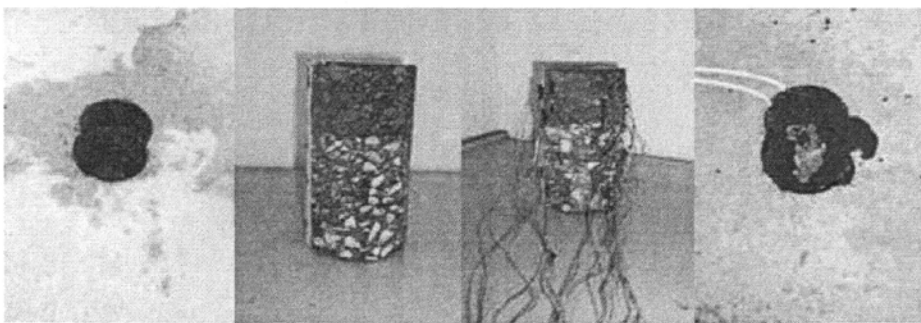


图2.2 沥青路面温度场观测设备

En880 无纸记录仪是一种高性能的数据记录存储设备,使用 220V 市电作为电力支持,可以自动连续记录和存储 12 个通道的路面温度观测数据。在搭配使用 Pt100 铂电阻温度传感器的情况下,记录误差为 $\pm 0.2\%$ 。一般来说,路面温度的变化范围在 $-30\sim 70^{\circ}\text{C}$ 之间,由此可知 En880 无纸记录仪的记录误差最大为 $\pm 0.14^{\circ}\text{C}$ 。En880 无纸记录仪的记录间隔时间可以在 0.5~1800 秒范围内选择。在本文中记录时间间隔选择为 600 秒,即每 10 分钟内 En880 将会记录一次 12 个通道的数据。

Pt100 铂电阻温度传感器和 En880 无纸记录仪之间用普通 24 芯电缆连接。温度传感器的埋置过程如图 2.3 所示,沥青路面温度场观测示意图如图 2.4 所示:



(A) 取芯样 (B) 打孔 (C) 安装传感器 (D) 回填路面

图2.3 沥青路面温度传感器安装

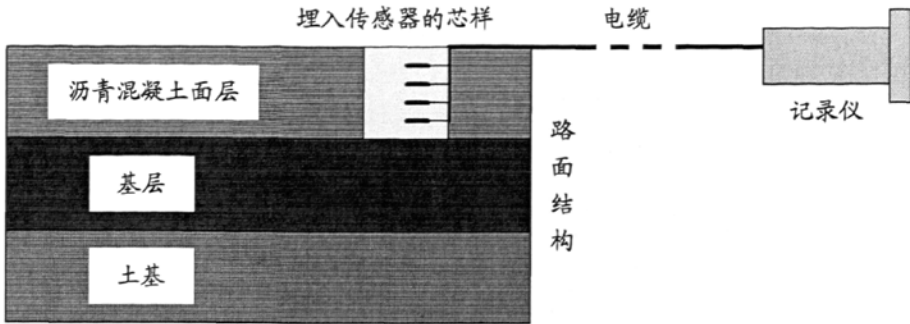


图2.4 沥青路面温度场观测示意图

在预先计划的观测期内，En880 无纸记录仪全天 24 小时连续观测路面温度。采样频率为每 10 分钟记录一组路面温度数据，并取每小时 6 次记录的平均值为该小时的路面温度观测值。

2.1.3 主要环境因素的收集

影响沥青路面温度场的主要环境因素包括气温、太阳辐射、风速、相对湿度、云量、降水量等气象因素。这些数据的准确性和精度直接关系到本文成果的可靠性和其使用效果。

在 LTPP-SMP 研究中 SHRP 从一开始就严格制定了环境因素观测、收集以及处理方法，以保证在后续研究中可以准确地将环境因素对于路面损坏造成的影响从交通荷载对于路面造成的影响中分离出来 (SHRP-P-621) [36]。在 LTPP 研究的前期计划中，要求要为每一个试验路段都要选择最为合适的气象站点来观测相应的环境因素数据，其必须满足以下两个要求：

- (1) 该气象站点必须距离路面试验段 8km(5miles)以内；
- (2) 气象站点的观测数据精度必须满足国家级气象站的要求。

但是随着 LTPP 研究的深入，发现绝大部分试验路段的 8 公里以内没有满足要求的气象站点，为了解决这一问题，LTPP 研究提出了虚拟气象站 (Virtual Station) 的概念。其基本意义就是根据距离实验路段距离最为接近的 5 个气象站点的观测数据来估计试验地点的环境数据。

目前，我国只有很少地区的国家级气象站点可以提供包括每小时气温和每

小时太阳辐射强度以及日平均风速等在内的较为完备的气象资料，对于大部分地区的气象站点仅仅能提供每小时的气温和日太阳辐射总量，或者提供日最高和最低气温以及日太阳辐射总量。但是对于相对湿度、云量以及降水等其他外部环境因素并没有完备的观测资料，考虑到这些气象因素的日变化和年变化均可以由气温或者太阳辐射的变化而反映，因此在本文中并未详细考虑。

由于我国气象观测站数量有限，不可能建立起同美国 LTPP 研究所采用的虚拟气象站技术，为了最大程度得使得本文所受的气象资料可以更为真实、准确地反映试验路段的实际气象状况，在本文中所有的试验路段均距离该地区国家气象观测站 10km 以内。

2.2 沥青路面温度场实测结果分析

2.2.1 沥青路面温度场沿深度分布特征

在不同季节典型的沥青路面温度场分布与气温的变化规律如图 2.5 和图 2.6 中所示。

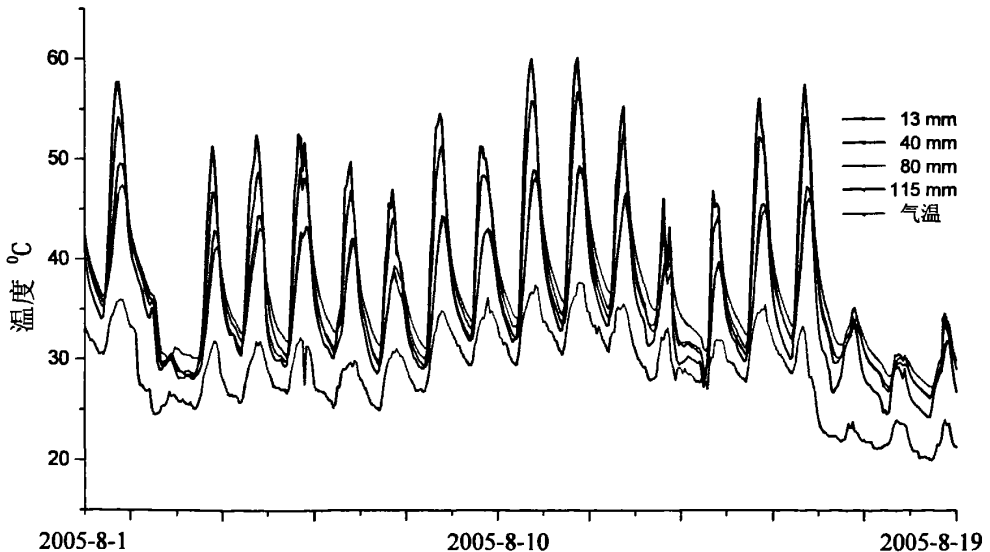


图2.5 武汉地区沥青路面温度场与气温变化规律（夏季）

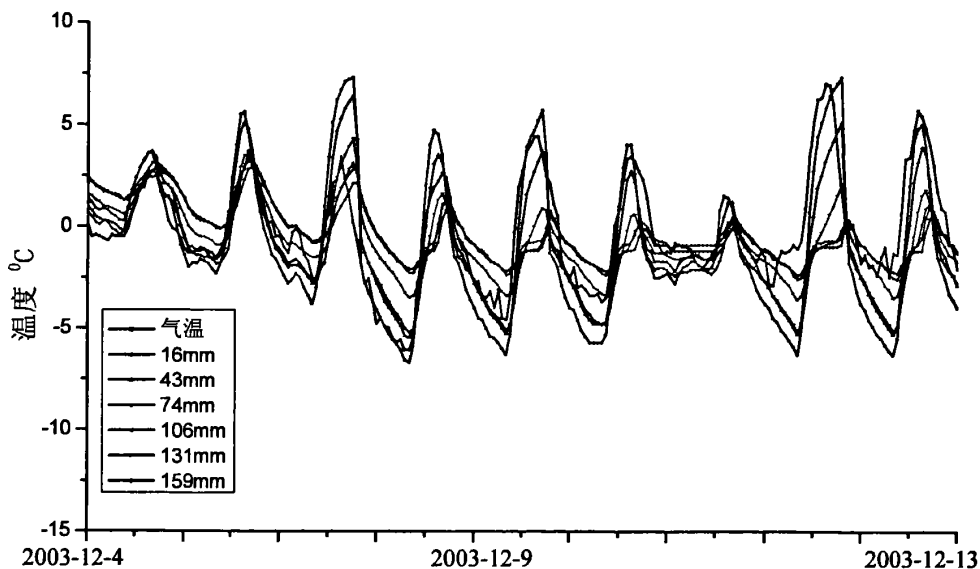


图2.6 上海地区沥青路面温度场与温度变化规律（冬季）

1 夏季高温季节

根据夏季高温时实测沥青路面温度场数据可以发现，日最高气温一般出现在每天的11:00-15:00，而日最低气温一般出现在每天的4:00-6:00。从图2.5中可以看出，路面温度的变化规律和气温的变化规律是基本一致的，两者之间存在较好的相关性。

在绝大部分时间，接近沥青路面表面处路面温度的变化情况几乎与气温的变化情况同步，随着深度的增加，路面温度场的变化与气温的变化相比出现了明显的滞后。一天之中路面表面的最高温度几乎与日最高气温同时出现。根据统计可以发现，路面结构中在7月至8月的时间内最高温度的时间基本上比较稳定，在路面上面层其出现时间也是在每日的12:00-15:00，随着深度的增加出现日最高温度的时间也发生变化对于中面层其出现时间为14:00-16:00，而对于下面层其出现时间则会推迟至每日的16:00-17:00。

如图2.7所示，在晴好天气随着深度的增加路面各个深度处的日最高温度逐渐减少，这主要是因为太阳辐射和气温的作用下，热量从路面外部进入路面结构，而随着深度的增加被吸收的热量逐渐增加而使下一层次接受自沥青路面表面进入的热量逐渐减少，受到沥青路面结构层底部得的影响逐渐增大，从

而造成了日最高温度随着深度的增大而减少。在阴雨天气中，因为进入沥青路面结构内得热量有限，因此在沥青路面结构内各个深度的温度基本上保持一致。

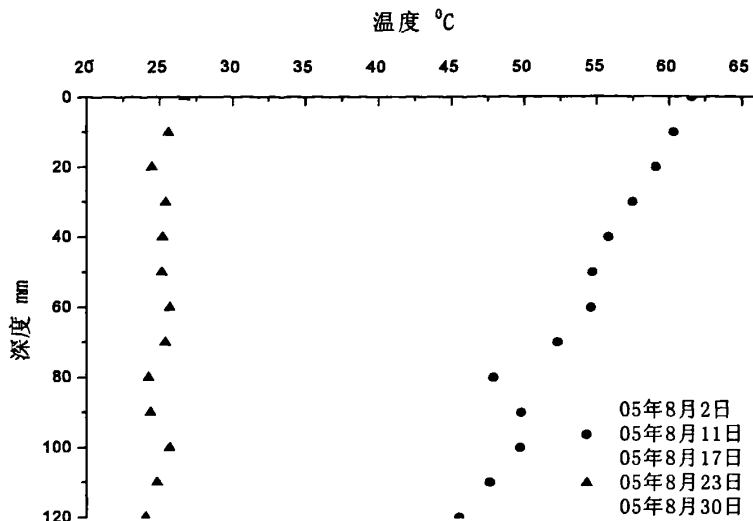


图2.7 沥青路面夏季日最高路面温度随深度变化图（武汉）

路面表面的最低温度也几乎与日最低气温同时出现。根据统计可以发现，路面结构中在7月至8月的时间内出现最低温度的时间基本比较稳定，一般都是在每天的5:00-7:00，气温也都是在该段时间内到达最低温度的。同时随着深度的增加在不同深度处出现日最低温度的时间也基本上是在同一时间，并不像路面日高温温度一样存在着时间上的较大差异，其沿深度方向的分布如图2.8中所示。

在每天的日出和日落时段（7:00和18:00），路面内部各个深度处的温度总是大致相等的。在一天之内沥青路面各个深度处的温度变化状况如图2.9所示。因此，路面的表层在一天之内经历的温度变化幅度是最大的：经历了一天之内的最高和最低温度。

2 冬季低温季节

根据冬季低温季节的实测沥青路面温度场资料可以发现，即使是在低温季节，日最高气温一般也是出现在每天的14:00-15:00，但是其日最低气温的出现则显得并没有很多的规律性，其中出现较多的时间段为6:00-8:00或者每天的23:00-次日的2:00。

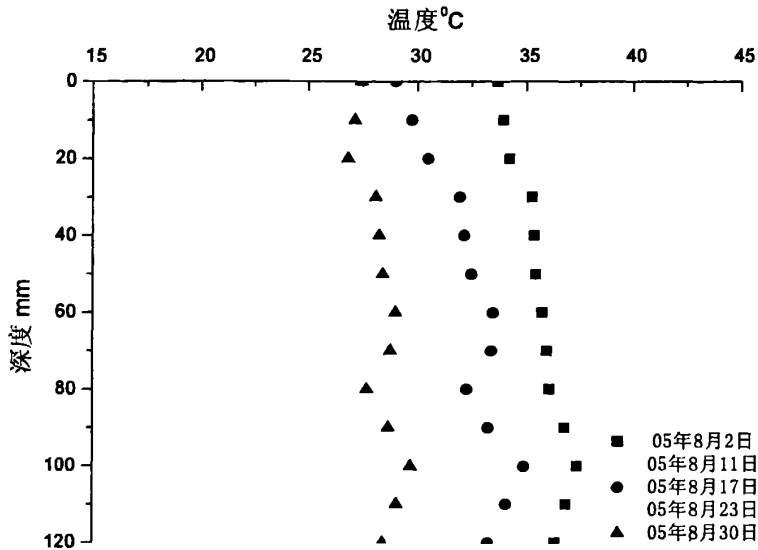


图2.8 沥青路面夏季日最低温度随深度变化图（武汉）

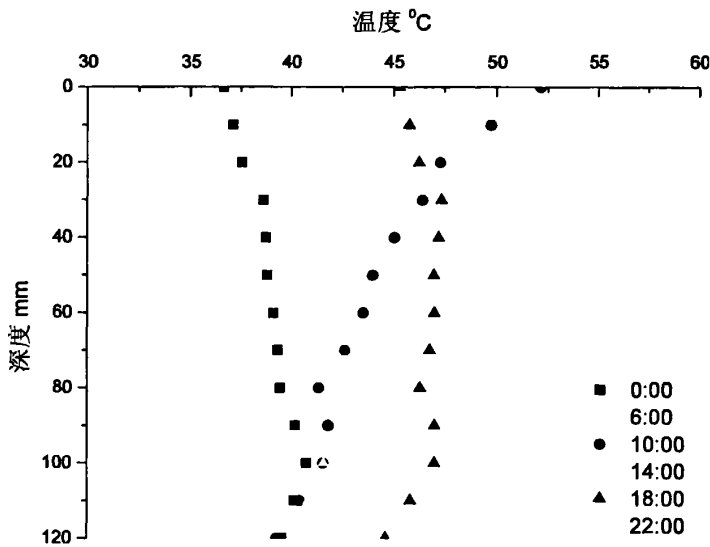


图2.9 夏季沥青路面温度场日变化情况图（武汉）

从图 2.6 中可以看出，路面温度的变化规律和气温的变化规律也是一致的，两者之间存在较好的相关性质。并且在绝大部分时间，接近沥青路面表面处路面温度的变化情况几乎与气温的变化情况同步，随着深度的增加，路面温度场的变化与气温的变化相比出现了明显的滞后。一天之中路面表面的最高温度也

是几乎与日最高气温同时出现。根据统计可以发现，路面结构中在 12 月至 3 月的时间内最高温度的时间基本上比较稳定，在路面上面层其出现时间也是在每日的 14:00-15:00，随着深度的增加出现日最高温度的时间也发生变化对于中面层其出现时间为 15:00-16:00，而对于下面层其出现时间则会推迟至每日的 16:00-18:00。

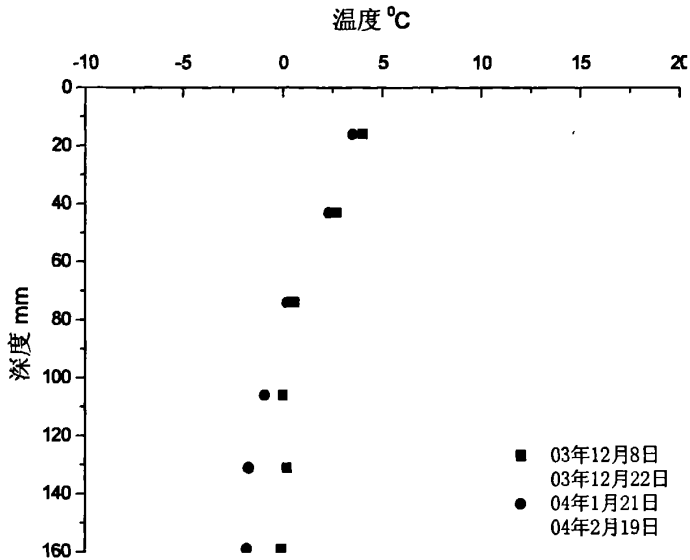


图2.10 沥青路面冬季日最高路面温度随深度变化图(上海)

如图 2.10 中所示，沥青路面温度场在冬季寒冷季节的变化规律与其在夏季高温季节的变化规律是一致的，即随着深度的增加被路面吸收的热量逐渐增加，使得下一层次接受自沥青路面表面进入的热量逐渐减少；随着深度地增加沥青路面的温度变化受到沥青路面结构层底部得的影响逐渐增大，从而造成了日最高温度随着深度的增大而减少。

如图 2.11 中所示，沥青路面表面的最低温度也几乎与日最低气温同时出现。根据统计可以发现，路面结构中在 12 月至 3 月的时间内出现最低温度的时间不是很稳定，基本上是在每天的 6:00-8:00 或者每天的 23:00-次日的 2:00，但是气温也都是在该段时间内到达最低温度。随着深度的增加，在不同深度处出现日最低温度的时间也基本上是在同时一时间，并不像沥青路面高温温度一样存在着时间上的较大差异。

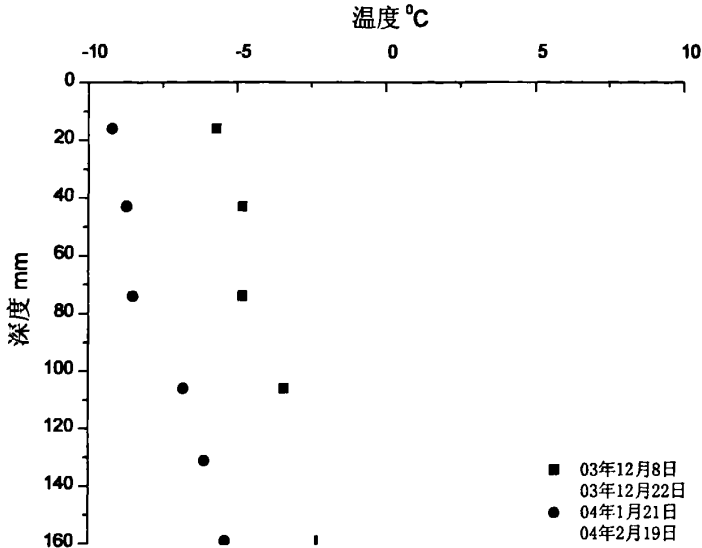


图2.11 沥青路面冬季日最低路面温度随深度变化图（上海）

同高温季节类似，在冬季寒冷季节每天的日出和日落时段（7:00 和 18:00），路面内部各个深度处的温度也总是大致相等的。在一天之内沥青路面各个深度处的温度变化状况如图 2.12 所示。因此，路面的表层在一天之内经历的温度变化幅度是最大的：经历了一天之内的最高和最低温度。

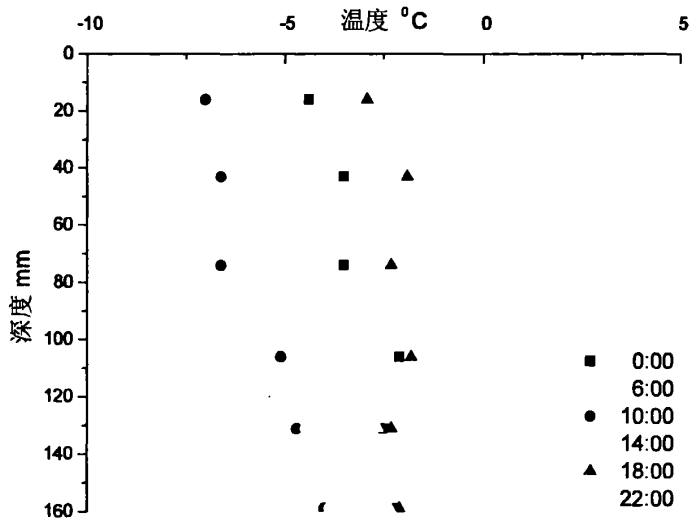


图2.12 冬季沥青路面温度场日变化情况图（上海）

2.2.2 沥青路面温度场频率分布特征

从以上分析可以看出，沥青路面在不同深度处的温度分布状况存在较大的差异，越接近路面表面的位置其受到外界环境因素的影响也越大，从而引起其温度日变化范围也越大；但是随着深度地增加，环境因素对于路面温度变化的影响逐渐衰减，路面温度更多的是受到自下而上的地温影响，这就造成在路面结构深度较大处，其温度日变化范围比较小。

如果可以根据实测数据确定出沥青路面不同结构层次的温度在不同的季节是主要出现在何种温度范围之内，可以更为准确、合理地在沥青路面结构设计和材料设计中考虑温度因素的影响。在 NCHRP1-37A 提出的力学经验设计方法 (AASHTO2002) 中^[37]，假定在一个月內（或者一个分析期 15 天内）不同深度处沥青路面温度的出现频率都是服从于正态分布 $N(\mu, \sigma)$ ，其中 μ 为温度平均值， σ 为温度的均方差。根据正态函数的两个变量：平均值 μ 和方差 σ ，可以定性地描述在一段时间内不同深度处的沥青路面温度变化的大致趋势。对于不同地区不同时间段内沥青路面不同深度处的温度平均值 μ 与深度的关系如图 2.13 中所示，不同深度处的温度方差 σ 与深度的关系如图 2.14 中所示

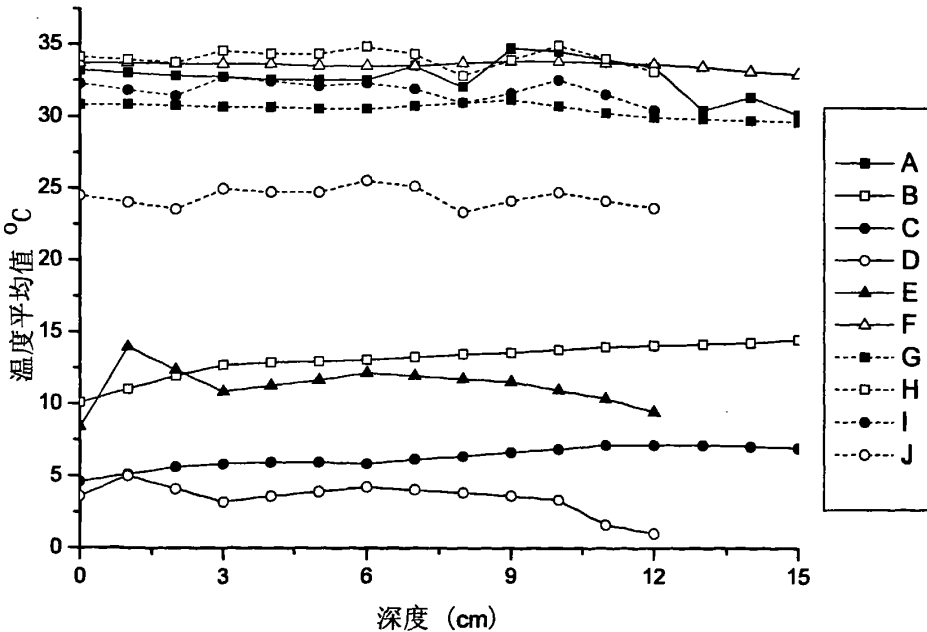


图2.13 沥青路面温度分布频率平均值与深度关系图

图中:

- | | |
|-----------------------|-----------------------|
| A组—上海 2002年 8月实测路面温度 | F组—唐山 2003年 7月实测路面温度 |
| B组—上海 2003年 11月实测路面温度 | G组—唐山 2003年 8月实测路面温度 |
| C组—上海 2003年 12月实测路面温度 | H组—武汉 2005年 8月实测路面温度 |
| D组—乌鲁木齐 03年 11月实测路面温度 | I组—武汉 2005年 9月实测路面温度 |
| E组—乌鲁木齐 03年 12月实测路面温度 | J组—武汉 2005年 10月实测路面温度 |

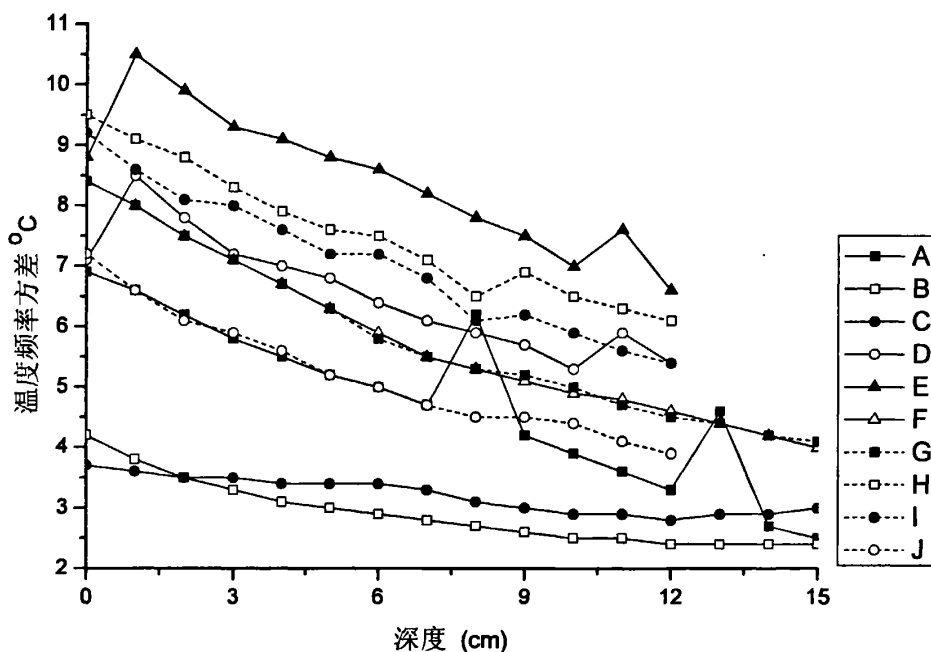


图2.14 沥青路面温度分布频率方差与深度关系图

图中:

- | | |
|-----------------------|-----------------------|
| A组—上海 2002年 8月实测路面温度 | F组—唐山 2003年 7月实测路面温度 |
| B组—上海 2003年 11月实测路面温度 | G组—唐山 2003年 8月实测路面温度 |
| C组—上海 2003年 12月实测路面温度 | H组—武汉 2005年 8月实测路面温度 |
| D组—乌鲁木齐 03年 3月实测路面温度 | I组—武汉 2005年 9月实测路面温度 |
| E组—乌鲁木齐 03年 4月实测路面温度 | J组—武汉 2005年 10月实测路面温度 |

由以上各图可知:

- (1) 在分析期内, 沥青路面不同深度处温度分布频率的平均值会随着深度的增加发生变化, 在夏季或者路面温度比较高的季节, 其平均值随深度增加而呈现出递减的规律, 并且在一定深度处保持为常数不再发生变化; 在冬季或者路面温度比较低的季节其平均值会随深度的增加而呈现出截然不同的两种规律, 递增或者递减, 与高温季节相同, 随着深度变化, 在一定深度处总是会保持为常数不再变化;
- (2) 如图 2.13 中所示, 在上海地区和乌鲁木齐地区的不同深度处的路面温度平均值与深度之间的关系却是截然相反的: 一个是递增, 另一个是递减。这也说明了上海地区在该分析期内的地温对于沥青路面深处温度的影响要大于外界环境因素的影响, 而乌鲁木齐地区的地温对于沥青路面深处温度的影响要小于外界环境因素的影响, 因此呈现出了截然不同的变化规律;
- (3) 在分析期内, 沥青路面不同深度处温度分布频率的方差总是会随着深度的增加而逐渐降低, 并且会在一定深度保持为常数不再发生变化, 这也再次说明了气温等外部环境因素对于沥青路面的影响会随深度的增加而衰弱;

2.3 本章小结

在介绍了本文最为基础的沥青路面温度场的实测方法之后, 通过对沥青路面温度场数据和相应的气象数据进行初步分析后可得到以下结论:

- (1) 无论是夏季高温季节还是冬季寒冷季节, 沥青路面温度场的变化规律和气温的变化规律基本一致, 两者之间存在较好的相关性质; 接近沥青路面表面处路面温度的变化情况几乎与气温的变化情况同步, 随着深度的增加, 路面温度场的变化与气温的变化相比出现了明显的滞后;
- (2) 沥青路面温度场日最高温度和最低温度的出现具有一定的规律性, 日最高温度出现时间也会随着深度的增加而出现延迟, 但不同深度处日最低温度出现时间则比较接近;
- (3) 沥青路面温度场的平均值会随深度增加而呈现出递减的规律, 并

且在一定深度处保持为常数；同时沥青路面不同深度处温度分布频率的方差总是会随着深度的增加而逐渐降低，并且会在一定深度保持为常数不再发生变化。这充分说明了气温等外部环境因素对于沥青路面的影响会随深度的增加而衰弱；

- (4) 上海地区和乌鲁木齐地区的不同深度处的路面温度平均值与深度之间存在截然相反的变化规律关系，表明在某些地区地温对于沥青路面深处温度的影响要大于外界环境因素的影响，而其它地区，因此在沥青路面温度场分析中必须考虑地温的地域性差异。

第3章 沥青路面温度场理论预估方法研究

沥青路面温度场理论预估方法是根据外界的气候、环境因素资料和沥青路面结构参数路面材料的热物理参数,应用传热学的有关理论和假设边界条件,预估路面温度场变化的一种方法。该方法具有较强的适应性,不受地区、路面结构类型的限制等优点。本章拟对沥青路面温度场理论预估方法进行分析和探讨。

3.1 沥青路面温度场理论预估方法基本原理

沥青路面温度场理论预估方法的基本原理主要是传热学理论,根据傅立叶定律以及热力学第一定律,即能量守恒与转化定律,来描述热流密度矢量和温度梯度之间的关系,可以将热传导的过程采用微分方程的形式表达出来^[39, 40]:

$$\alpha\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + \frac{q_v}{\rho c} = \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (3.1)$$

式中:

α ——热扩散率, $\alpha = \lambda / (\rho c)$, 它表征了物体被加热或冷却时,物体内部各个部分温度趋向均匀一致的能力, m^2/s ;

T ——物体内部某一确定位置 (x, y, z) 在 τ 时刻的温度, $T = f(x, y, z, \tau)$;

λ ——导热系数,是指在稳定传热条件下,1m厚的材料,两侧表面的温差为 1°C 时,在1小时内通过1平方米面积传递的热量, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{k})$;

c ——比热容,是指使单位质量物体升高一度所需的热量 $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$;

ρ ——材料密度, kg/m^3 ;

q_v ——物体内部发热源单位体积单位时间内所发出的热量。

导热微分方程(式 3.1)表示了物体温度随空间和时间变化而变化的关系,全然没有涉及某一特定导热过程的具体特点,因此它是所有导热过程的通用表达式。欲从众多不同的导热过程中区分出沥青路面结构在环境因素影响下的导热过程,还需要对该求解过程作进一步的具体说明,这些补充说明条件总称为单值性条件:

1. 几何条件,确定所研究问题的空间区域;

2. 物理条件, 说明参与导热过程物体的物理特性, 如材料的导热系数 λ 、比热容 c 和密度 ρ , 以及它们是否随着温度发生变化; 是否有内热源, 以及它的大小和分布情况;
3. 时间条件, 说明导热过程在时间过程上的特点。对于沥青路面温度场预估模型来说, 时间条件即为开始时刻路面结构内的温度分布;
4. 边界条件, 反映沥青路面结构与周围环境之间的热传导相互作用。

只有在确定了以上单值性条件之后才能对于描述沥青路面温度场在环境的影响下的导热微分方程做出准确地求解。

3.2 沥青路面温度场导热微分方程求解方法

沥青路面温度场热传导方程常用的求解方法主要有以下三种^[40]: 解析法、有限差分法和有限单元法。

3.2.1 解析法

所谓解析法, 就是根据抛物线型微分方程分离变量基本求解方法结合一些假设条件, 将复杂沥青路面热传导问题转化为简单层状体系的热传导问题。一般假设该问题满足以下条件:

- (1) 各层之间为均匀的各向同性体;
- (2) 路面各层材料之间紧密结合, 层间温度以及热流密度为连续分布;
- (3) 不考虑沥青路面各层材料的热物理参数受温度变化的影响;
- (4) 假设第 i 层材料的热物理参数分别为: 导热系数 λ_i , 热扩散率 α_i , 层厚为 h_i ; 该层内的温度场函数为 $T_i(x, y, z, \tau)$, 则该 n 层体系的热传导方程为:

$$\begin{cases} \frac{\partial T_1}{\partial \tau} = \alpha_1 \nabla^2 T_1(x, y, z) & 0 \leq y \leq h_0 \\ \frac{\partial T_2}{\partial \tau} = \alpha_2 \nabla^2 T_2(x, y, z) & h_1 \leq y \leq \sum_1^2 h_i \\ \dots \dots \dots \\ \frac{\partial T_n}{\partial \tau} = \alpha_n \nabla^2 T_n(x, y, z) & \sum_1^{n-1} h_i \leq y \leq \sum_1^n h_i \end{cases} \quad (3.2)$$

式中:

$$\nabla^2 \text{——拉普拉斯算子, } \nabla^2 T_i(x, y, z) = \left(\frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2} \right)。$$

由于层间接触良好, 层间温度以及热流密度为连续分布, 即在接触面上应满足如下的边界条件:

$$\begin{cases} T_i = T_{i+1} & z = \sum_1^i h_j \\ \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial \tau} & z = \sum_1^i h_j \end{cases} \quad (3.3)$$

上述温度场的数学模型实际上是一个偏微分方程组的非线性边值问题, 将路面周围介质的温度按照 $A \sin \omega \tau$ 或者 $A \cos \omega \tau$ 的形式变化时, 就可以对于上述偏微分方程组进行理论推导, 得到路面温度场的解析表达式。

若将假设不考虑沥青路面温度场在沿行车方向和垂直于行车方向的横向分布, 仅仅考虑温度场沿深度方向的一维变化, 那么上式(3.2)和(3.3)中的温度场函数可以改写为:

$$T_i = T_i(z, \tau) \quad (3.4)$$

式(3.2)可以简化为:

$$\frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \alpha_i \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2} \quad \sum_1^{i-1} h_j \leq y \leq \sum_1^i h_j \quad (3.5)$$

采用分离变量法求解, 设沥青路面温度场在复平面中解的形式为:

$$T_i(z, \tau) = T_i(z) e^{j\omega\tau} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (3.6)$$

式中: z ——沥青路面路表以下深度;

τ ——时间;

j ——纯虚数;

ω ——角频率。

将式(3.6)带入式(3.5)中, 有:

$$\frac{d^2 T_i(z)}{dz^2} = \frac{j\omega\tau}{\alpha_i} = -\beta_i^2 \quad (3.7)$$

因此特征方程的根为:

$$\beta_i = \pm \sqrt{\frac{j\omega}{\alpha_i}} \quad (3.8)$$

考虑到:

$$\sqrt{j} = \exp\left(\frac{\pi j}{4}\right) = \frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2}j \quad (3.9)$$

所以:

$$\beta_i = \pm \left(\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_i}} + j \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_i}} \right) \quad (3.10)$$

因此, $T_i(z)$ 的表达式为:

$$T_i(z) = A_i \exp\left(\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_i}} + j \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_i}}\right) + B_i \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_i}} - j \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_i}}\right) \quad (i=1,2..n) \quad (3.11)$$

将式(3.11)带入式(3.7)中可得到各层热传导方程的基本解:

$$T_i(z, \tau) = B_i \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_i}}z\right) \cos\left(\omega\tau - \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_i}}z\right) \sum_{j=1}^{i-1} h_j \leq z \leq \sum_{j=1}^i h_j \quad (i=1,2..n) \quad (3.12)$$

再结合式(3.3)等沥青路面温度场层间边界条件或者表面边界条件即可得到对于一维沥青路面温度场预估问题的最终解析解答。对于二维热传导沥青路面温度场预估问题,吴赣昌等人也通过类似步骤给出了解析解答^[28, 29]。

3.2.2 有限差分法

解析方法的求解过程是应用数学物理方法来求解偏微分方程,得到温度 T 与空间变量 (x, y, z) 和时间变量 τ 之间的函数关系式 $T = f(x, y, z, \tau)$, 通过这种函数关系, 就可以获得物体内部在任意位置任意时刻的温度值。

基于有限差分的数值解法, 则是把物体分割为有限数目的网格单元, 把原来在空间和时间上连续物理量的场, 转变为有限个离散网格单元节点, 然后用数值方法求解针对于各个节点的离散方程, 得到在各个节点上被求物理量的集合。

如果对于一个二维热传导问题, 在沿 x 轴方向和沿 y 轴方向分别按间距 Δx 和 Δy 用一系列与坐标轴平行的网格线, 把求解区域分割成许多小的矩形网格, 称为子区域, 如图 3.1 (A) 所示。网格线的交点称为节点, 各节点的位置用 $p(i, j)$

表示, i 表示沿 x 方向节点的顺序号, j 表示沿 y 方向节点的顺序号。相邻两节点的距离, 即 Δx 或者 Δy , 称为步长。每一个网格都可以看作是以它为中心的一个小区域的代表, 如图 3.1 (B) 中所示, 这些小区域称为微元体。每一个节点的温度就代表了它所在微元体的温度。

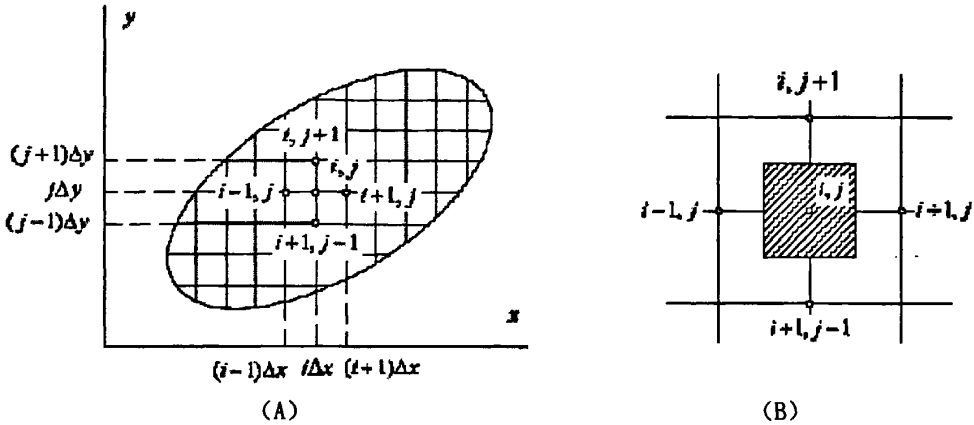


图 3.1 二维热传导问题的有限差分网格

沥青路面内温度场在自然环境因素下产生的变化属于非稳态导热问题, 其节点的温度不但随着位置而变化, 而且会随着时间发生变化。也就是说, 网格单元不仅仅与相邻的网格单元之间有热量导入或者导出, 而且网格单元本身的内能也将随着时间而变化。因此对于沥青路面温度场来说, 在进行有限差分方法进行分析时除了要在空间上把物体分割为网格单元外, 还要把时间分割为许多间隔 $\Delta \tau$, 时间间隔的顺序号用 k 表示。非稳态导热问题的求解过程就是从初始时刻 $\tau = 0$ 出发, 以此求得 $\Delta \tau, 2\Delta \tau \dots k\Delta \tau$ 时刻物体中各个节点的温度值, 这样所得到的温度分布在时间上也是不连续的。若将时间间隔 $\Delta \tau$ 划分得越小, 所得到的结果也越准确。

在完成了对于分析域的网格划分和时间划分之后, 通常需要根据泰勒级数展开法或者热平衡法建立热传导微分方程的离散方程形式:

- (1) 泰勒级数展开法, 就是把导热方程中的各阶导数用相应的差分表达式来代替, 例如, 用节点 (i, j) 的温度参数来表示节点 $(i+1, j)$ 的温度 $T(i+1, j)$ 忽略其中的高阶微量即可建立热传导方程的离散方程形式;
- (2) 热平衡法, 就是认为相邻节点间的温度分布是线性的, 然后根据

傅立叶定律建立对于节点 $p(i, j)$ 所代表的微元向周围各节点的导热热量；然后结合热力学第一定律（能量守恒定律），即可建立热传导方程的离散方程形式。

虽然两种方法的基本原理并不相同，但是最后所建立起来的热传导离散方式在数学上却是相互等价的。

对于沥青路面温度场的热传导问题，如果忽略其沿行车方向的温度传导和变化，而将其简化为二维热传导问题，以垂直于行车方为 x 轴方向，以深度方向为 z 轴方向，则对于温度场的内节点可以根据泰勒级数法或者热平衡法建立如下的离散方程：

$$t_{i,j}^{k+1} = \frac{a\Delta\tau}{\Delta x^2}(t_{i-1,j}^k + t_{i+1,j}^k) + \frac{a\Delta\tau}{\Delta z^2}(t_{i,j-1}^k + t_{i,j+1}^k) + \left[1 - 2a\Delta\tau\left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta z^2}\right)\right]t_{i,j}^k \quad (3.13)$$

如果网格的划分是均匀的，即 $\Delta x = \Delta z = \Delta$ ，那么上式可以简化为：

$$t_{i,j}^{k+1} = \frac{a\Delta\tau}{\Delta^2}(t_{i-1,j}^k + t_{i+1,j}^k + t_{i,j-1}^k + t_{i,j+1}^k) + (1 - 4\frac{a\Delta\tau}{\Delta^2})t_{i,j}^k \quad (3.14)$$

式中：

$t_{i,j}^k$ ——表示在在 k 时刻节点 $p(i, j)$ 处的节点温度。

如果 $\Delta x, \Delta z$ 和 $\Delta\tau$ 都很小，则计算结果会比较精确。值得注意的是，为了加快计算的速度或者改进计算结果精度而调整 $\Delta x, \Delta z$ 和 $\Delta\tau$ 大小的时候，必须保证式 (3.13) 或者式 (3.14) 中 $1 - 2a\Delta\tau\left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta z^2}\right)$ 大于或者等于零：

$$\text{即：} \quad a\Delta\tau\left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta z^2}\right) \leq \frac{1}{2} \quad (3.15)$$

否则，式 (3.13) 或者式 (3.14) 中 $t_{i,j}^k$ 的系数为负数，这样在不同的计算时刻就会出现很大的温度波动，称为数值解的不稳定性，并会导致出现违反热力学第二定律的结论。式 (3.15) 就是控制数值解稳定的条件。所以在应用差分格式预估沥青路面温度场时，一旦选定了 Δx 和 Δz ， $\Delta\tau$ 的选择就不能是任意的，要受到稳定条件式 (3.15) 的限制。

对于沥青路面温度场中的边界节点，其热传导离散方程为：

(1) 对于第一类边界条件：

第一类边界条件是已知在任何时刻物体边界界面上的温度值，即

$$t|_s = t_w \quad (3.16)$$

式中:下标 s 表示界面, t_w 是温度在界面 s 的给定值。

因为边界节点的温度是已知的,可以直接进行计算,无需继续进行离散分析;

(2) 对于第二类边界条件:

第二类边界是已知任何时刻物体边界面上的热流密度值,可以表示为:

$$q|_s = q_w \quad (3.17)$$

或者

$$-\frac{\partial t}{\partial n}|_s = \frac{q_w}{\lambda} \quad (3.18)$$

式中:

q_w ——是给定的通过界面 s 的热流密度;

对于具有第二类边界条件的边界节点 $t_{(i,j)}^k$, 设边界上的热流密度为 q_w , 且 $\Delta x = \Delta z = \Delta$, 则针对边界网格单元写出的热平衡微分离散方程如下:

$$q_w \Delta + \frac{\lambda}{2}(t_{i-1,j}^k - t_{i,j}^k) + \lambda(t_{i,j+1}^k - t_{i,j}^k) + \frac{\lambda}{2}(t_{i+1,j}^k - t_{i,j}^k) = \frac{\rho c}{2\Delta\tau} \Delta^2 (t_{i,j}^{k+1} - t_{i,j}^k) \quad (3.19)$$

如假定 $Fo = \frac{\lambda \Delta \tau}{\rho c \Delta^2}$, 该边界节点离散方程即为:

$$t_{i,j}^{k+1} = Fo \left[(t_{i-1,j}^k + t_{i,j-1}^k + 2t_{i,j+1}^k) + 2\frac{q_w \Delta}{\lambda} \right] + (1-4Fo) t_{i,j}^k \quad (3.20)$$

其数值解稳定条件为:

$$1-4Fo \geq 0 \quad (3.21)$$

即:

$$a \frac{\Delta \tau}{\Delta^2} \leq \frac{1}{4} \quad (3.22)$$

对于绝热边界条件,边界上的热流密度 $q_w = 0$, 所以其离散方程如下:

$$t_{i,j}^{k+1} = Fo(t_{i-1,j}^k + t_{i,j-1}^k + 2t_{i,j+1}^k) + (1-4Fo) t_{i,j}^k \quad (3.23)$$

其数值解稳定条件也为式 (3.22)。

(3) 对于第三类边界条件:

第三类边界条件是已知界面周围流体温度 t_f 和边界面上与流体之间的表

面放热系数 h 。根据牛顿冷却定律，第三类边界条件可以表达为

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \Big|_s = h(t|_s - t_f) \quad (3.24)$$

对于第三类边界条件, $q_w = h(t_f^k - t_{i,j}^k)$, $Bi = h\Delta / \lambda$ 其差分格式离散方程如下:

$$t_{i,j}^{k+1} = Fo \left[(t_{i-1,j}^k + t_{i,j-1}^k + 2t_{i,j+1}^k) + 2Bi \cdot t_f^k \right] + (1 - 2BiFo - 4Fo)t_{i,j}^k \quad (3.25)$$

其数值解稳定条件为:

$$Fo \leq \frac{1}{2Bi + 4} \quad (3.26)$$

只有建立了沥青路面温度场全部内部节点和边界节点的离散方程之后, 才能对沥青路面温度场进行数值求解。在对于沥青路面温度场进行数值求解之前, 必须先假定沥青路面温度场在初始时刻 ($\tau = 0$) 各个节点的温度状况, 结合各个边界条件在 $\tau = 1$ 时刻状况, 然后将其代入式(3.14)、(3.20)、(3.23)和(3.25), 即可求出各个节点在 $\tau = 1$ 的温度分布状况; 重复该过程即可求出沥青路面温度场在外界环境因素影响下不同时刻各个节点的温度变化状况。

3.2.3 有限单元法

有限单元法也是偏微分方程组的一种数值求解方法, 其基本原理是利用加权余量法将对于场函数连续性要求较高的偏微分方程“强”形式组转化为对于场函数连续性要求不高的微分方程组和边界条件等效积分的弱形式, 从而进行求解。

对于一般的三维热传导问题, 瞬态温度场变量 $T(x, y, z, \tau)$ 必须满足式(3.1)的热传导微分方程^[41]:

$$\alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{\rho c} = \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (3.1)$$

同时在域 Ω 内应满足以下边界条件:

$$t|_s = t_w \quad \text{在第一类边界 } \Gamma_1 \text{ 上} \quad (3.16)$$

$$q|_s = q_w \quad \text{在第二类边界 } \Gamma_2 \text{ 上} \quad (3.17)$$

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \Big|_s = h(t|_s - t_f) \quad \text{在第三类边界 } \Gamma_3 \text{ 上} \quad (3.24)$$

边界条件应该满足:

$$\Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_3 = \Gamma \quad (3.27)$$

其中 Γ 是域 Ω 的全部边界。

首先将空间域 Ω 离散为有限个单元体,在典型单元内温度 t 仍可以用节点温度 t_i 插值得到,但要注意此刻的阶段温度是时间的函数:

$$T = \tilde{T} = \sum_{i=1}^n N_i(x, z) t_i(\tau) \quad (3.28)$$

式中,插值函数 N_i 只是空间域的函数,也具有插值函数的基本性质。构造 \tilde{T} 时以满足 Γ_1 上的所有边界条件,因此将式(3.28)代入退化为2维问题的式(3.1)和边界条件式(3.17)(3.24)时,会产生余量:

$$R_\Omega = \frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tau} - \alpha \left(\frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial z^2} \right) - \frac{q_v}{\rho c} \quad (3.29)$$

$$R_{\Gamma_2} = \lambda \left(\frac{\partial \tilde{T}}{\partial x} n_x + \frac{\partial \tilde{T}}{\partial z} n_z \right) - q_w \quad (3.30)$$

$$R_{\Gamma_3} = \lambda \left(\frac{\partial \tilde{T}}{\partial x} n_x + \frac{\partial \tilde{T}}{\partial z} n_z \right) - h(T - \tilde{T}) \quad (3.31)$$

另加权余量的积分为零,即:

$$\int_{\Omega} R_\Omega W_1 d\Omega + \int_{\Gamma_2} R_{\Gamma_2} W_2 d\Gamma_2 + \int_{\Gamma_3} R_{\Gamma_3} W_3 d\Gamma_3 = 0 \quad (3.32)$$

按伽辽金方法选择权函数

$$\begin{cases} W_1 = N_j & j = 1, 2, \dots, n \\ W_2 = W_3 = -W_1 \end{cases} \quad (3.33)$$

代入(3.32),经分步积分后即可得到用于确定 n 个节点温度的 T_i 的矩阵方程:

$$\mathbf{CT} + \mathbf{KT} = \mathbf{P} \quad (3.34)$$

式中:

C——热容矩阵;

K——热传导矩阵; **C**、**K**都是对称正定矩阵;

P——温度荷载列阵;

\mathbf{T} ——节点温度矩阵， $\dot{\mathbf{T}}$ 是节点温度对于时间的导数矩阵。

矩阵 \mathbf{K} 、 \mathbf{C} 和 \mathbf{P} 的元素由单元相应的矩阵元素集成：

$$\mathbf{K}_{ij} = \sum_{\epsilon} \mathbf{K}_{ij}^{\epsilon} + \sum_{\epsilon} \mathbf{H}_{ij}^{\epsilon} \quad (3.35)$$

$$\mathbf{C}_{ij} = \sum_{\epsilon} \mathbf{C}_{ij}^{\epsilon} \quad (3.36)$$

$$\mathbf{P}_i = \sum_{\epsilon} \mathbf{P}_{q,i}^{\epsilon} + \sum_{\epsilon} \mathbf{P}_{q,i}^{\epsilon} + \sum_{\epsilon} \mathbf{P}_{hi}^{\epsilon} \quad (3.37)$$

单元的矩阵元素由下式给出：

$$\mathbf{K}_{ij}^{\epsilon} = \int_{\Omega^{\epsilon}} \lambda \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) d\Omega \quad (3.38)$$

为单元对热传导矩阵的贡献；

$$\mathbf{H}_{ij}^{\epsilon} = \int_{\Gamma_3^{\epsilon}} h N_i N_j d\Gamma_3 \quad (3.39)$$

为单元热交换边界对于热传导矩阵的贡献；

$$\mathbf{C}_{ij}^{\epsilon} = \int_{\Omega^{\epsilon}} \rho c N_i N_j d\Omega \quad (3.40)$$

为单元对于热容矩阵的贡献；

$$\mathbf{P}_{q,i}^{\epsilon} = \int_{\Omega^{\epsilon}} \rho q_v N_i d\Omega \quad (3.41)$$

为单位热源产生的温度荷载；

$$\mathbf{P}_{q_w,i}^{\epsilon} = \int_{\Gamma_1^{\epsilon}} \rho q_w N_i d\Gamma \quad (3.42)$$

为单元给定热流边界的温度荷载；

$$\mathbf{P}_{hi}^{\epsilon} = \int_{\Gamma_1^{\epsilon}} h T_a N_i d\Gamma \quad (3.43)$$

为单元对流放热边界的温度荷载。

对于给定温度值的边界 Γ_1 上的 n 个节点来说，方程(3.34)对应的式子应为

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}_i \quad (3.44)$$

所取代。式中 i 为边界 Γ_1 上的 n 个节点的编号。

然后将沥青路面温度场的初始状态和不同时刻的边界条件带入以上各个方程，即可求出在环境因素影响下其各个单元与节点的温度变化状况。Manuel J.C.

等人对此方法进行了较为深入的研究^[26]。

3.2.4 各种方法的比较

从以上对于解析法,有限差分方法以及有限单元方法的介绍可以看出,采用特殊函数简化边界条件后(如将路面周围介质的温度按照 $A\sin\omega t$ 或者 $A\cos\omega t$ 的形式变化),沥青路面热传导微分方程理论上是可以采用解析方法求出其准确解的,但是由于对沥青路面温度场的复杂边界进行了简化处理,不能反映环境因素的真实变化情况,因此其预估结果精度并不高。文献[35]对于有限差分方法和解析法进行了对比研究,发现采用有限差分方法在预估沥青路面结构中的面层和基层温度时,其预估精度要远远高于解析方法。同时解析法计算过程复杂,计算结果是一个无穷级数解,在实际应用中并无价值。

采用数值法求解沥青路面温度场时,可以根据热传导微分方程得到分析域内一些离散点(内节点)在不同时刻的温度值。与解析方法相比采用数值方法在工程应用领域具有更大的优势,其计算方法简单,同时计算结果也具有相当高的精度,完全可以满足工程应用方面对于沥青路面温度场预估模型的要求。

相比有限差分法,有限单元法在计算过程中略显复杂,需要引入大量矩阵元素计算。但是有限单元法在处理具有复杂几何形状以及复杂边界条件的热传导问题时,却比有限差分法具有优势。但是对于沥青路面温度场这一具体问题来说,其模型几何特征比较简单,边界条件较为单一,采用有限差分方法就可以得到精度足够高的预估结果,因此在本文中,将有限差分方法作为沥青路面温度场理论预估方法的主要求解方法。

3.3 沥青路面温度场有限差分预估模型

3.3.1 有限差分预估模型概述

对于沥青路面温度场有限差分预估模型来说,如何确定沥青路面温度场的几何特征是非常重要的问题,即沥青路面温度场是属于一维热传导问题还是二维热传导或者三维热传导问题?其实这个问题不单单存在于有限差分方法中,在解析求解以及有限单元方法中,该问题都是属于最为基本的问题之一。对此,

不同的学者在各自的研究过程中对于该问题有完全不同的认识,如表 3.1 所示:

表 3.1 沥青路面温度场研究几何特征汇总表

模型	求解方法	几何特征
Christison, Anderson ^[9]	有限差分法	一维
ICM (Integrated Climatic Model) ^[42]	有限差分法	一维
EICM (Enhanced Integrated Climatic Model) ^[43]	有限差分法	一维
Joseph Roca ^[44]	有限差分法	一维
严作人 ^[27]	解析法	一维
吴赣昌 ^[28]	解析法	二维
谈至明、孙立军 ^[32]	解析法	一维
贾璐 ^[35]	有限差分法	二维
Hermansson ^[23, 24]	有限差分法	一维
Khaled K., Cenk Y. ^[45]	有限差分法	二维
韩子东 ^[46]	解析法	一维
Manuel J. C. ^[26]	有限元法	三维

从上表可以看出,沥青路面温度场研究极少采用三维模型,大部分研究都是采用的一维模型。

对于沥青路面温度场三维模型来说,其三个坐标尺度分别代表了路面沿行车方向和路面垂直于行车方向以及沿深度方向。由于沥青路面在沿行车方向的几何尺寸要远远大于其它两个方向,如果不考虑遮荫或者线形等因素的变化,只选取与行车方向垂直的截面进行研究已经足够精确,这也是为什么大多数研究都未采用三维模型的主要原因。

对于如何在一维模型和二维模型之间进行选择,目前存在较大的争议。一般认为,沥青路面在沿着垂直于行车方向的截面内在同一深度位置的各个点之间是存在温度差的,但是对于沥青路面温度场在整个二维截面内的具体分布仍缺乏实测资料的说明。

根据 1988 年交通部重点科技项目 85-65J 课题组在广东惠州市郊的实验路上进行的沥青路路面温度实测研究,发现路面中间的温度与相邻路面两侧的温度在面层同一深度处相差可达 5-10℃^[47]。在吴赣昌等人研究过程中,假定沥青路面温度场在横向分布可以简化为沿道路中心的对称函数^[29]:

$$f(x) = \exp(-\alpha x^2) \tag{3.45}$$

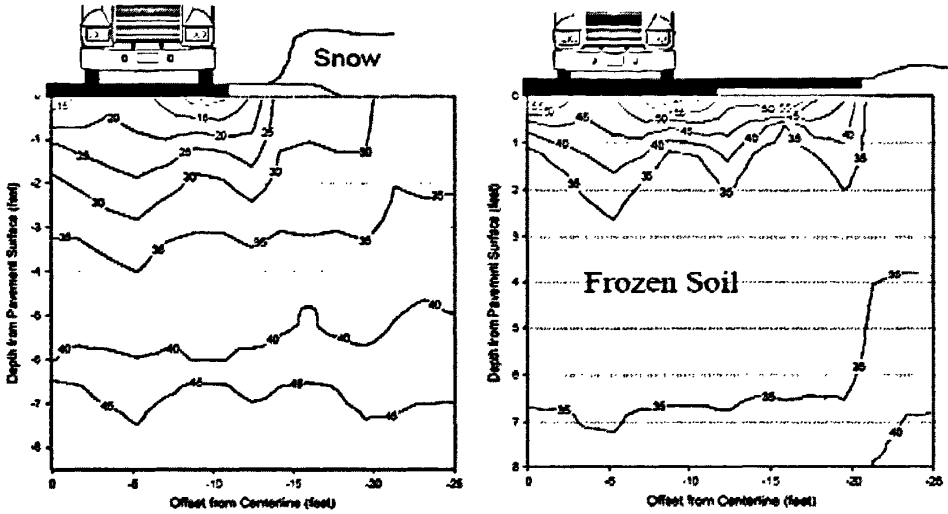


式中:

x ——距道路中心的水平距离, m ;

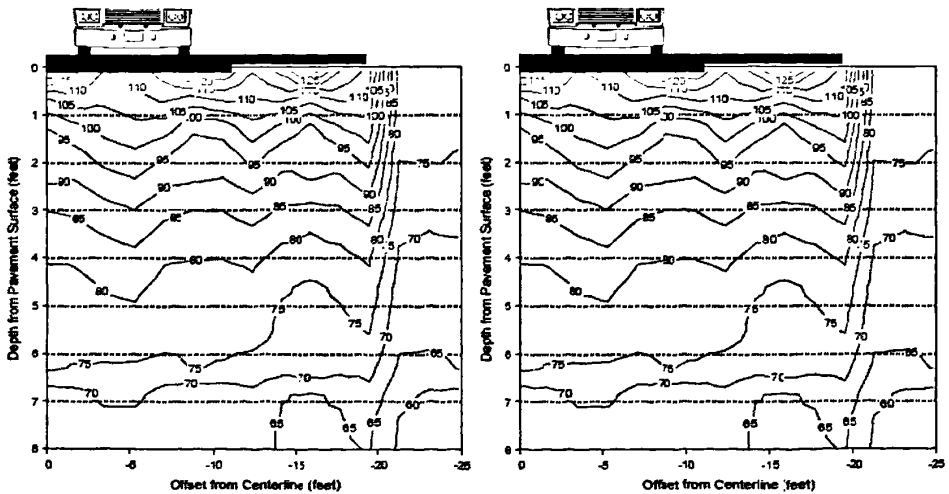
a ——待定系数, 一般取值 $a=0.001-0.002$ 。

美国明尼苏达州交通局在2001年对于沥青路面二维截面进行了较为详细的温度场分布研究, 其深度范围从路面表面到2.4m深处(8英尺), 宽度范围从路面中线至7.6m(25英尺)以外, 其测试结果如图3.2中(A)~(D)所示^[48]。



(A) 冬季

(D) 春季



(C) 夏季

(D) 秋季

3.2 沥青路面温度场二维温度等值线图(°F)^[48]

从图中可以看出，沥青路面温度场在二维横截面内的分布状况是相当复杂的，在垂直于行车方向温度并不是单调递增或者单调递减的，因此式(3.45)并不能很好的描述沥青路面温度场沿垂直于行车方向的变化。在冬季，沿水平方法温度场的变化幅度较大，这主要是因为路面结构附近的路肩和边沟中的积雪所引起的。而在其他季节，温度场沿水平方向的变化还是相当平缓的，其波动幅度要远远小于路面温度场沿深度方向的变化，同时其水平方向的波动也可以被视为是由于水平方向材料的非均质所引起的。因此如果仅将沥青路面温度场的研究放在远离道路横向边界条件或者远离外界因素影响的道路中心区域，那么将其简化为只沿深度方向一维热传导问题是合理的，具体的有限差分离散模型如图3.3所示，将沥青路面结构沿深度 z 方向划分为 n 层，每层的厚度假设均为 Δ ，在第 i 层其材料热物理参数为 λ_i, ρ_i, c_i 。每一层均只能沿 z 轴向上或者向下传递热能。

要对以上模型进行求解，只需将本文3.2.2中对于二维有限差分计算公式(式(3.13)~(3.26))进行退化处理即可得到。

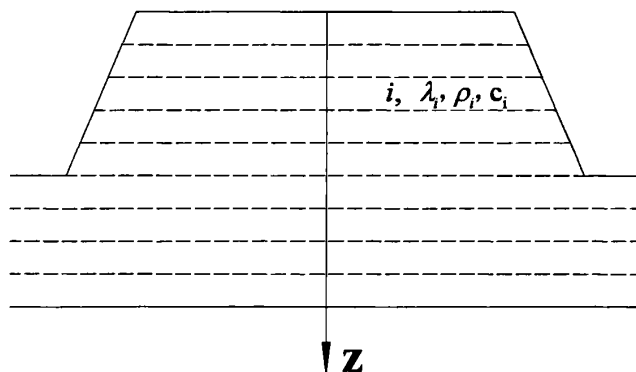


图 3.3 沥青路面温度场一维有限差分计算模型

3.3.2 有限差分预估模型边界条件

沥青路面结构处于自然环境之中，经受着各种自然因素周期性的影响，如太阳辐射、气温、风速、降雨、降雪的影响。这些因素与沥青路面表面进行热能交换，使得沥青路面温度场内产生不稳定的热流。只有在确定了这些自然因素对于沥青路面温度场的影响之后，才有可能精确地预估沥青路面温度分布状

况。在有限差分方法中考虑这些因素对于沥青路面温度场的影响，主要是通过边界条件的确定来实现的。

1. 表面边界条件

发生在沥青路面表面的热能交换主要有三种传递方式：传导、对流和辐射，如上图 3.4 中所示。

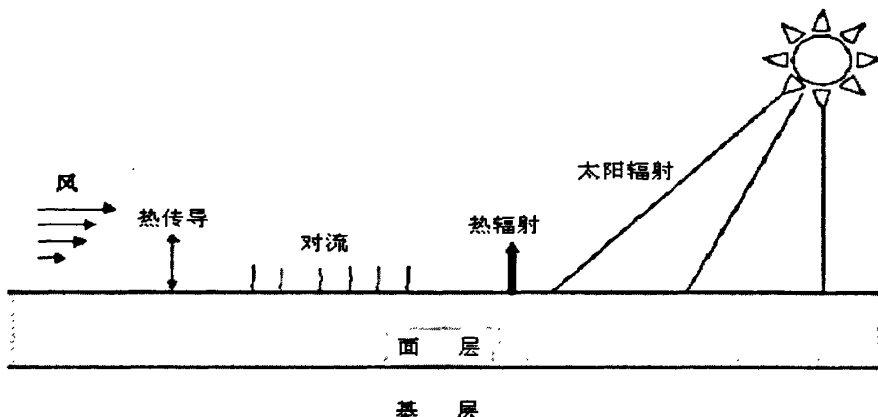


图 3.4 沥青路面表面的热能传导

当沥青路面温度低于外部自然环境温度的时候，沥青路面表面通过这三种方式从外界环境中得到热能，并向沥青路面内部传递；当沥青路面温度高于外界温度的时候，沥青路面表面通过这三种方式向外界环境中散发热能：

- (1) 根据传热学基本理论，流体在与固体直接接触时所发生的热传导和热对流称合称对流传热，可以根据牛顿冷却公式计算，其计算公式为^[39]：

$$q_r = h_r(T_{surf} - T_{air}) \quad (3.46)$$

式中：

q_r ——对流传热产生的热流密度， $W/(m^2 \cdot s)$ ；

T_{surf} ——沥青路面表面温度， K ；

T_{air} ——空气温度， K ；

h_r ——对流传热表面传热系数， $W/(m^2 \cdot s \cdot K)$ ，其计算公式为^[24]：

$$h_r = 698.24 \left[0.00144 \left(\frac{T_{surf} + T_{air}}{2} \right)^{0.3} v^{0.7} + 0.00097 (T_{surf} - T_{air})^{0.3} \right] \quad (3.47)$$

式中：

T_{surf} ——沥青路面表面温度，K；

T_{air} ——空气温度，K；

v ——路面表面风速，m/s；

h_r ——对流换热表面传热系数， $W/(m^2 \cdot s \cdot K)$ 。

从式(3.46)中可看出，当沥青路面表面温度大于空气温度时，即 $T_{surf} > T_{air}$ ， $q_r > 0$ ，它代表了沥青路面会向空气中传递热量；当沥青路面表面温度小于空气温度时，即 $T_{surf} < T_{air}$ ， $q_r < 0$ ，它代表了沥青路面会从空气中吸收热量。

- (2) 发生在沥青路面表面的辐射换热十分复杂，天空中的云量以及路面表面的纹理和路面表面的温度均会影响能量的吸收与发射。沥青路面表面的热辐射可以依据波长分类：对于进入路面辐射能量来说，分为入射短波辐射和入射长波辐射，沥青路面发散的能力则主要是长波辐射，在沥青路面表面发生的热辐射如图 3.5 所示。

短波辐射：

根据《地面气象观测规范》^[49]，气象站观测到的短波辐射包括：垂直于太阳入射光的直射辐射 S 、水平面太阳直接辐射 S_L 、散射辐射 E_d 和总辐射 E_g 。其中 $E_g = S_L + E_d$ ，即总辐射包括了在水平面上天空 2π 立体角内所接收到的太阳直接辐射和大气散射辐射。

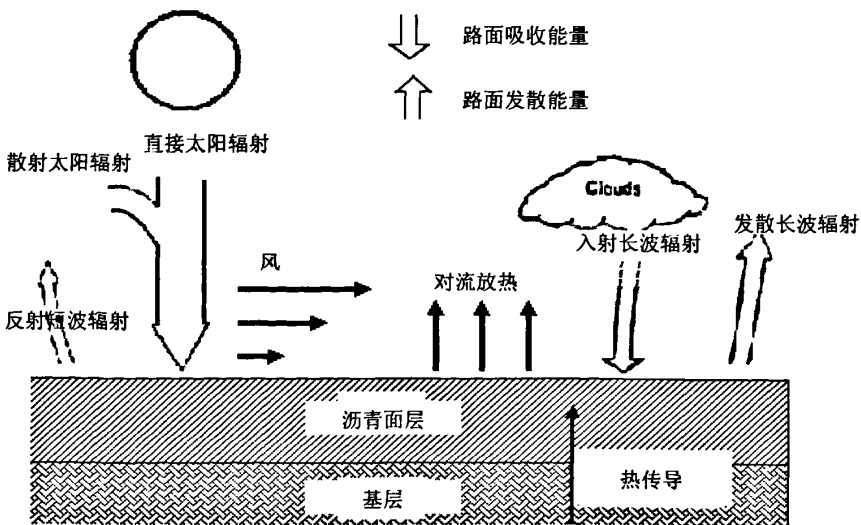


图 3.5 沥青路面表面的辐射换热与对流放热

如果缺乏相应的气象参测资料,也可以根据如下方法计算得到^[25]:

某一地点大气上空的日太阳辐射量 H_0 为:

$$H_0 = \left(\frac{1}{\pi}\right) \times I_{sc} \times E_0 \times \sin(\phi) \sin(\delta) \times \left(\frac{\omega_s \times \pi}{180} - \tan(\omega_s)\right) \quad (3.48)$$

式中:

H_0 ——某一水平面上的日太阳辐射总量, $MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$;

I_{sc} ——太阳常数,指的是平均日地距离时,在地球大气层上方,垂直于太阳投射方向,单位面积在单位时间内所接受到的太阳辐射能量,其值一般为 $1367 W \cdot m^{-2}$,相当于 $118.108 MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ 。

E_0 ——地球轨道偏心率修正因子,可以通过下式求出:

$$E_0 = 1.000110 + 0.034221 \cos \Gamma + 0.0001280 \sin \Gamma + 0.000719 \cos 2\Gamma + 0.000077 \sin 2\Gamma$$

式中:

Γ ——日角度,单位为弧度,其计算公式为 $\Gamma = \frac{2\pi(d_n - 1)}{365}$, d_n 为自元旦之

日起一年中的日序数。

ϕ ——纬度,其所在地点的地理纬度;

δ ——太阳赤纬,可以由下式求得:

$$\delta = \frac{180}{\pi} \left(\begin{aligned} &0.006918 - 0.29912 \cos \Gamma + 0.070257 \sin \Gamma - 0.006758 \cos 2\Gamma \\ &+ 0.000907 \sin 2\Gamma - 0.002697 \cos 3\Gamma + 0.00148 \sin 3\Gamma \end{aligned} \right)$$

ω_s ——时角(度),当太阳处于每天最高位置时所在的角度设为0度,时角就是太阳每天处于最高位置时与日出或者日落位置的夹角。日出方向的小时角为正,日落方向的小时角为负, $\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta)$ 。

根据以上公式,既可以计算出在一年之内任何一天,任一地点的大气上空的日太阳辐射量 H_0 。对于到达沥青路面表面并被吸收的入射短波辐射 E_g 则必须对日太阳辐射量 H_0 进行修正^[37]:

$$E_g = \varepsilon_e H_0 \times \left(A + B \frac{S_c}{100} \right) \quad (3.49)$$

式中:

ε_e ——沥青路面表面短波辐射吸收率；

A, B ——经验系数，用于考虑大气对于太阳直接辐射的散射作用和吸收作用；对于华东地区可取 $A=0.202$ ， $B=0.539$ ；

S_c ——云量系数。

长波辐射：

对于入射长波辐射，可以使用以下经验公式计算天空无云时的 E_l [49]：

$$E_l = \varepsilon_a \sigma_{sb} T_{air}^4 \quad (3.50)$$

式中：

E_l ——入射长波辐射， $w/(m^2 \cdot s)$ ；

σ_{sb} ——黑体辐射常数， $C_b = 5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$ ；

ε_a ——大气长波辐射发射率，其计算公式为[50、51]：

$$\varepsilon_a = 1 - 0.261 \exp(-7.77 \times 10^{-4} (T_{air} - 273.15)^2) \quad (3.51)$$

对于沥青路面发射的长波辐射，可以根据以下公式计算：

$$q_l = \varepsilon \sigma_{sb} T_{surf}^4 \quad (3.52)$$

式中：

q_l ——沥青路面发射长波辐射， $w/(m^2 \cdot s)$ ；

T_{surf} ——沥青路面表面温度，K；

ε ——沥青路面表面的长波辐射发射率，其一般取值为 0.93，在数值上它等于沥青路面对于长波辐射的吸收率。

(3) 将以上各个部分求和即可得到进入沥青路面表面的热能总量 q ：

$$q = \varepsilon_e E_g + \varepsilon E_l - q_l - q_r \quad (3.53)$$

式中：

E_g ——太阳短波辐射总量， $w/(m^2 \cdot s)$ ；

E_l ——入射长波辐射， $w/(m^2 \cdot s)$ ；

q_l ——路面长波辐射， $w/(m^2 \cdot s)$ ；

q_r ——对流换热产生的热流密度， $w/(m^2 \cdot s)$ ；

ε_e ——沥青路面对于太阳短波辐射的吸收系数，对于新建成的沥青路面 $\varepsilon_e = 0.90 - 0.98$ （黑色表面），对于已建成的沥青路面 $\varepsilon_e = 0.80 - 0.90$ （灰色表面）；

ε ——沥青路面表面长波辐射吸收率，一般取 0.93。

2. 底面边界条件

根据本文 2.2 节对于沥青路面温度场实测数据的研究可以发现，沥青路面的温度场不仅仅受到了来自表面的外界自然环境影响，而且还受到了来自土基深处地温的影响。因此合理确定数值模型的底面边界条件是得到准确预估结果的必要条件之一。目前对于底面边界条件主要存在以下两种不同的观点：

第一种观点，认为随着深度的增加，沥青路面温度场沿深度方向的热传导可以忽略不计，因此可以假定在一定深度时模型可以采用绝热边界，即在该深度不存在热传导；

第二种观点，认为随着深度的增加，沥青路面温度场在短期内的变化逐渐趋于缓慢，但是在一定深度处仍然会受到以年为周期变化的外界环境因素的影响，因此应该选择恒温边界条件，即在某一深度处温度是某一常数，或者在某一时期内是固定值。

根据相关研究^[35]，如果数值模型仅仅包括了沥青面层或者基层时，如果采用绝热边界条件，会造成沥青路面深度较大处温度预估值偏大，但是如果数值模型的深度足够深，（一般认为要超过 4m^[42]，）那么采用绝热边界条件是不会对于预估结果产生较大影响。如果采用恒温边界，那么预估模型的深度只需要 1m 左右即可得到较为准确的结果。所谓恒温边界并非指温度一直保持恒定，而是根据不同月份选择不同的温度，其具体计算方法可以参照文献^[29]确定。在本文中主要采用了此方法来确定底面边界条件，并将数值预估模型的深度确定为 1.5m。

3.4 基于有限差分方法沥青路面温度场数值理论预估方法的验证

根据各个地区试验段的路面结构建立了沥青路面温度场有限差分数值预估模型，在数值模型中沥青路面材料和基层材料的热物理参数依据表 3.2 确定。将各个地区在试验期间每小时的太阳辐射量、空气温度和风速输入沥青路面温度场数值预估模型即到沥青路面各个深度在不同时间的温度预估值。

表 3.2 沥青路面材料和基层材料热物理参数表^[29]

材料类型	导热系数 λ W/(m·K)	比热容 c J/kg·K	热扩散率 α $\times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$
沥青混合料	0.76~1.40	920~1700	0.70~1.20
水泥稳定碎石	1.10~1.30	750~890	0.81
二灰碎石	1.00~1.10	790~870	0.70
二灰土	0.90~1.20	690~920	0.84
石灰土	1.00~1.20	800~960	0.78
粘土	1.30	860	0.89

注：对于密级配 HMA 和 SMA 导热系数取小值，比热容、热扩散率取大值。

3.4.1 上海地区 2002 年 8 月-9 月

2002 年 8 月 20 日至 9 月 2 日，在上海地区某厂区道路上进行了沥青路面高温温度场实测工作。其路面结构为 15cm 中粒式沥青混合料+20cm 水泥稳定基层，其计算参数如下：

沥青层：导热系数 1.35 W/(m·K)；比热容 1500 J/kg·K；

水稳层：导热系数 1.40 W/(m·K)；比热容 1000 J/kg·K；

底面边界条件采用了恒温条件。

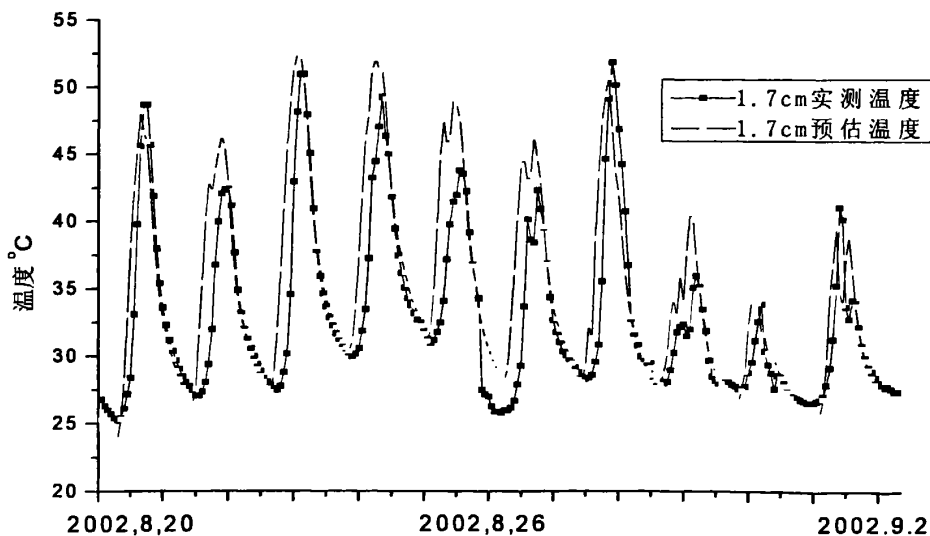


图 3.6 上海地区2002年8月沥青路面实测温度与预估温度比较@1.7cm

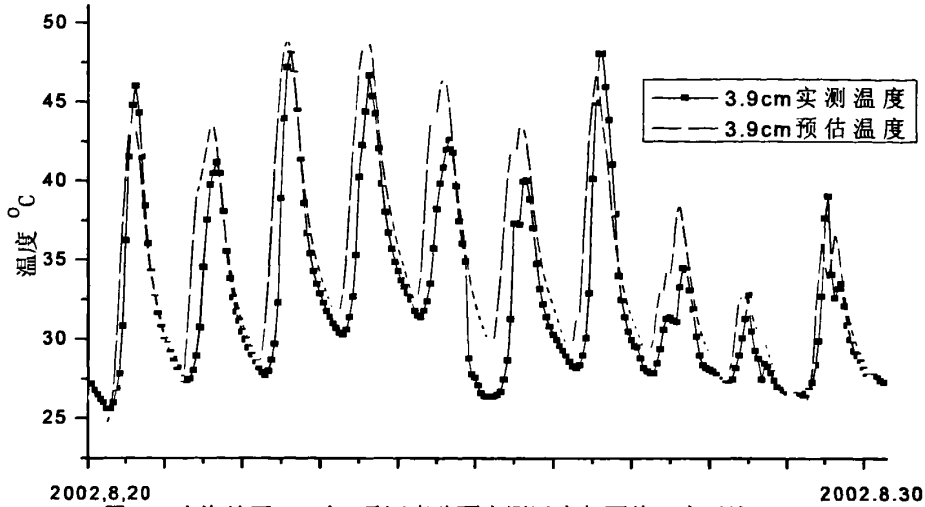


图 3.7 上海地区2002年8月沥青路面实测温度与预估温度对比@3.9cm

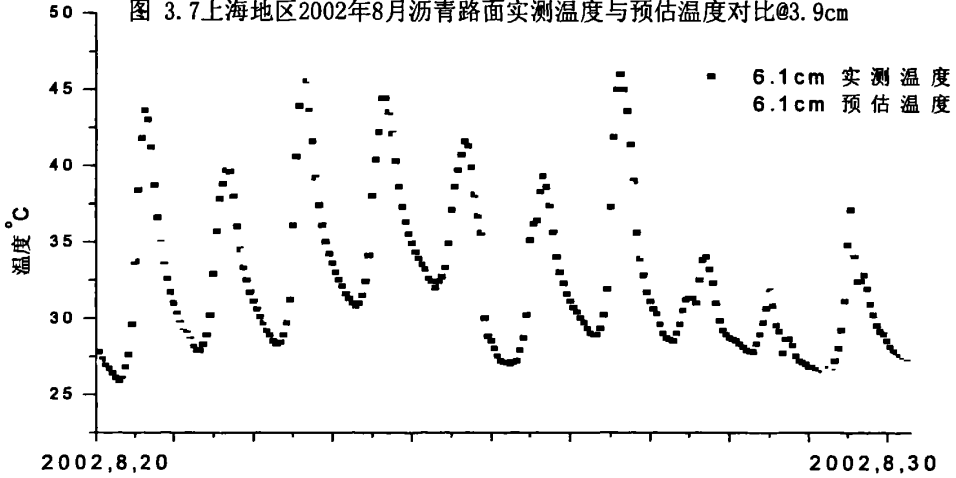


图 3.8 上海地区2002年8月沥青路面实测温度与预估温度对比@6.1cm

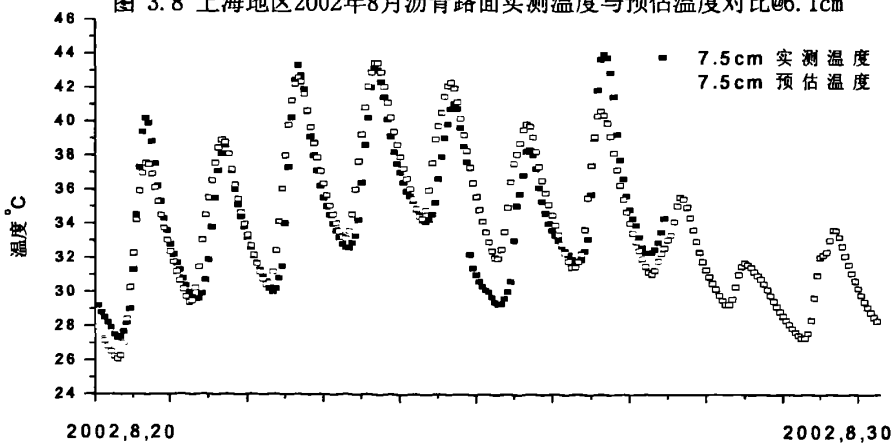


图 3.9 上海地区2002年8月沥青路面实测温度与预估温度对比@7.5cm

在观测期间不同深度处的实测沥青路面温度与预估沥青路面的对比如图 3.6-图 3.11 所示；根据气象资料，在 8 月 25 日至 28 日，上海地区持续阴雨天气，在此时间段内理论预估值和实测之间存在较大的差异，在其他时间段内，沥青路面温度场预估值与实测值之间相差不大。

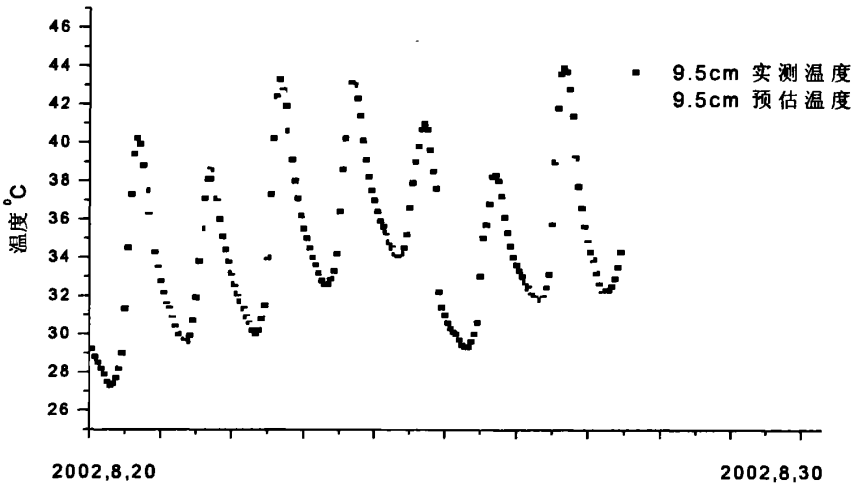


图 3.10 上海地区2002年8月沥青路面实测温度与预估温度对比@9.5cm

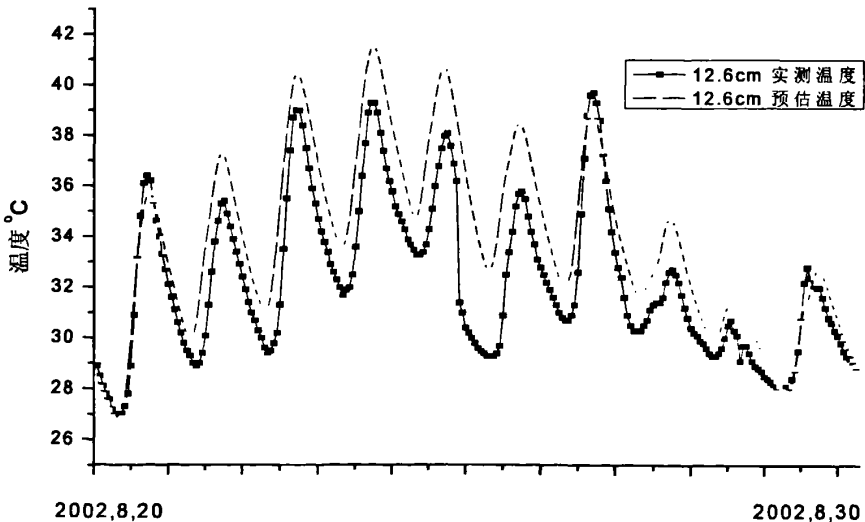


图 3.11 上海地区2002年8月沥青路面实测温度与预估温度对比@12.6cm

3.4.2 上海地区 2003 年 8 月-9 月

2003 年 11 月 2 日至 12 月 30 日, 在上海地区某厂区道路上进行了沥青路面冬季温度场实测工作。其路面结构为 15cm 中粒式沥青混合料+20cm 水泥稳定基层, 其计算参数同上。在观测期间不同深度处的实测沥青路面温度与预估温度的对比如图 3.12-图 3.15 所示。



图 3.12 上海地区2003年11月-12月沥青路面实测温度与预估温度对比@1.4cm

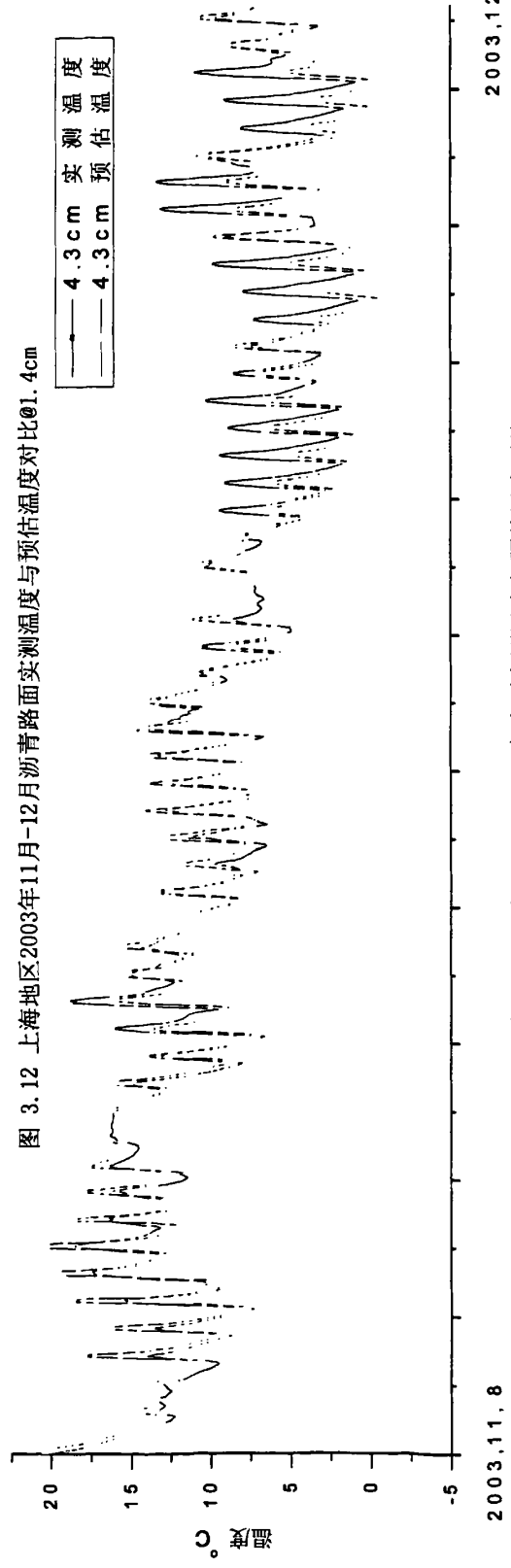


图 3.13 上海地区2003年11月-12月沥青路面实测温度与预估温度对比@4.3cm

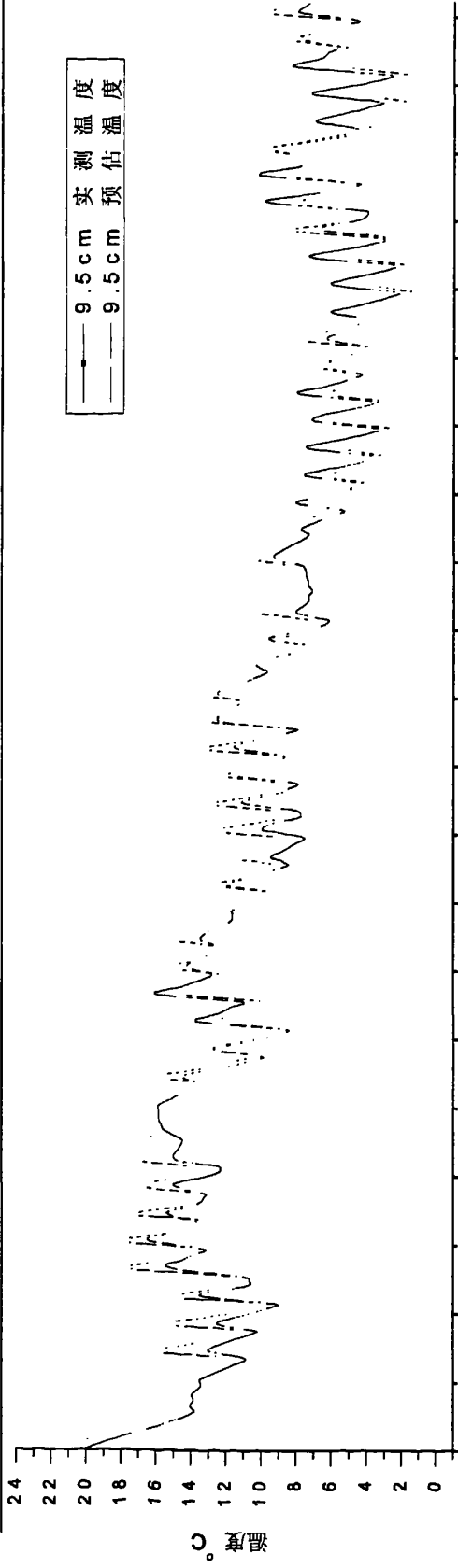


图 3.14 上海地区2003年11月-12月沥青路面实测温度与预估温度对比@9.5cm

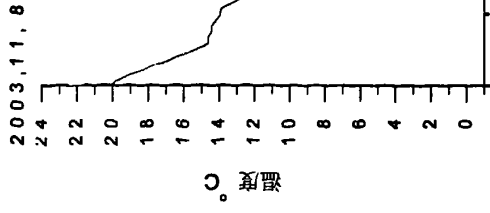


图 3.15 上海地区2003年11月-12月沥青路面实测温度与预估温度对比@13.8cm

3.4.3 乌鲁木齐地区 2003 年 4 月

2003 年 4 月期间, 在新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市附近的高速公路上进行了沥青路面温度场实测工作。其路面结构为 18cm 沥青面层+50cm 水泥稳定基层, 其计算参数如下:

沥青层: 导热系数 $1.30 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; 比热容 $1000 \text{ J}/\text{kg}\cdot\text{K}$; 水稳层: 导热系数 $1.20 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; 比热容 $900 \text{ J}/\text{kg}\cdot\text{K}$; 底面边界条件采用了恒温条件。

在观测期间不同深度处的实测沥青路面温度与预估温度的对比如图 3.16-图 3.18 所示:

3.4.4 唐山地区 2004 年 7 月-8 月

2004 年 7 月 18 日至 8 月 31 日, 在河北省唐山地区某高速公路上进行了沥青路面温度场实测工作。其路面结构为 15cm 沥青面层+60cm 水泥稳定基层, 其计算参数如下:

沥青层: 导热系数 $1.00 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; 比热容 $1200 \text{ J}/\text{kg}\cdot\text{K}$;

水稳层: 导热系数 $1.30 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; 比热容 $900 \text{ J}/\text{kg}\cdot\text{K}$;

底面边界条件采用了恒温条件。

在观测期间不同深度处的实测沥青路面温度与预估温度对比如图 3.19-图 3.21 所示;

3.4.5 武汉地区 2005 年 8 月-10 月

2005 年 8 月 1 日至 11 月 27 日, 在湖北省武汉地区某高速公路上进行了沥青路面温度场实测工作。其路面结构为 14cm 沥青面层+40cm 水泥稳定基层, 其计算参数如下:

沥青层: 导热系数 $1.20 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; 比热容 $1200 \text{ J}/\text{kg}\cdot\text{K}$; 水稳层: 导热系数 $1.10 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; 比热容 $1000 \text{ J}/\text{kg}\cdot\text{K}$; 底面边界条件采用了恒温条件。

在观测期间不同深度处的实测沥青路面温度与预估沥青路面温度的对比如图 3.22-图 3.25 所示; 在观测期间不同时刻沥青路面温度场实测温度沿深度分布状况与预估温度沿深度分布状况对比如图 3.26 中所示。

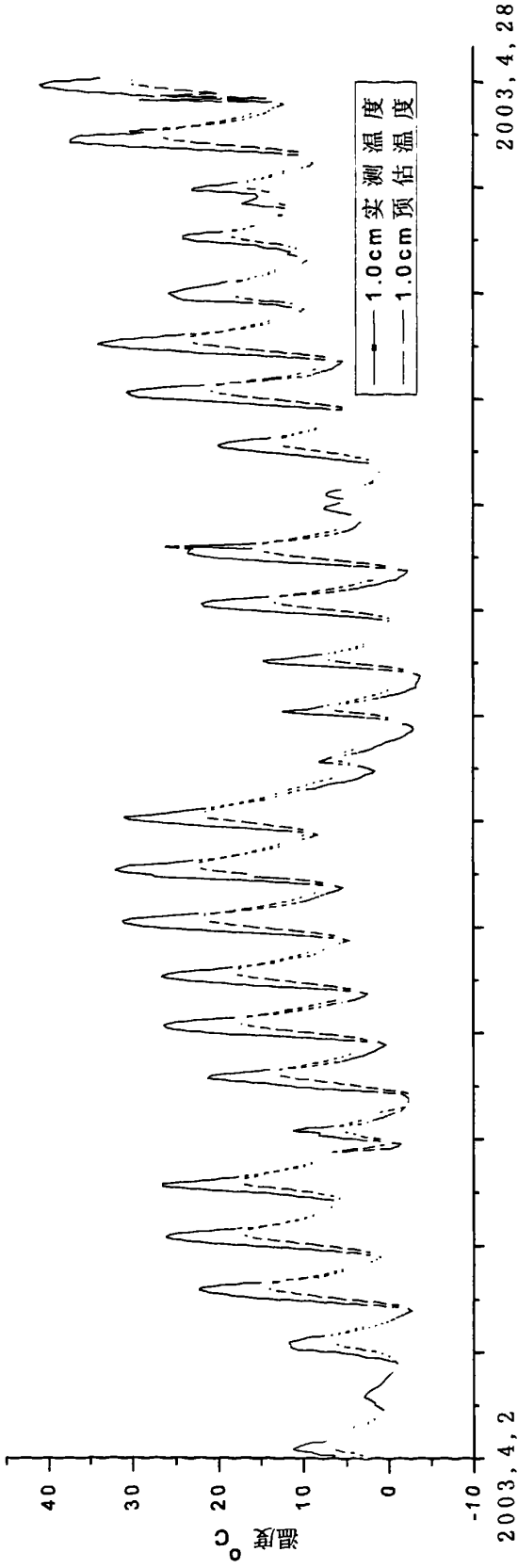


图 3.16 乌鲁木齐地区2003年4月沥青路面实测温度与预估温度对比@1cm

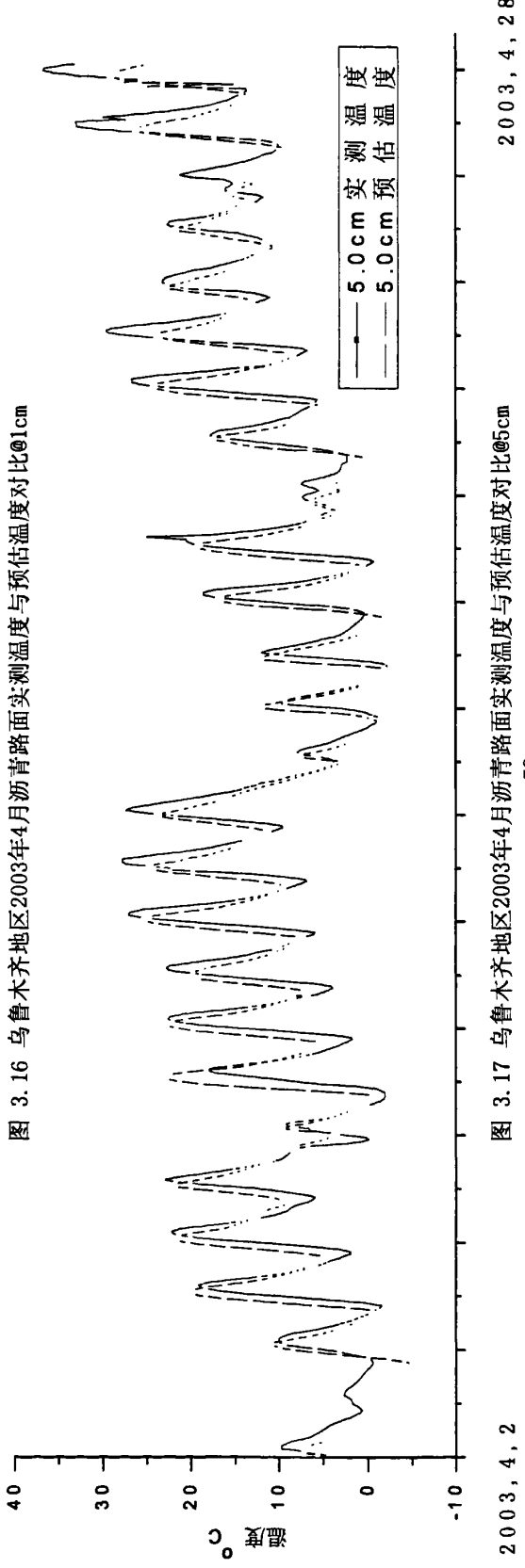
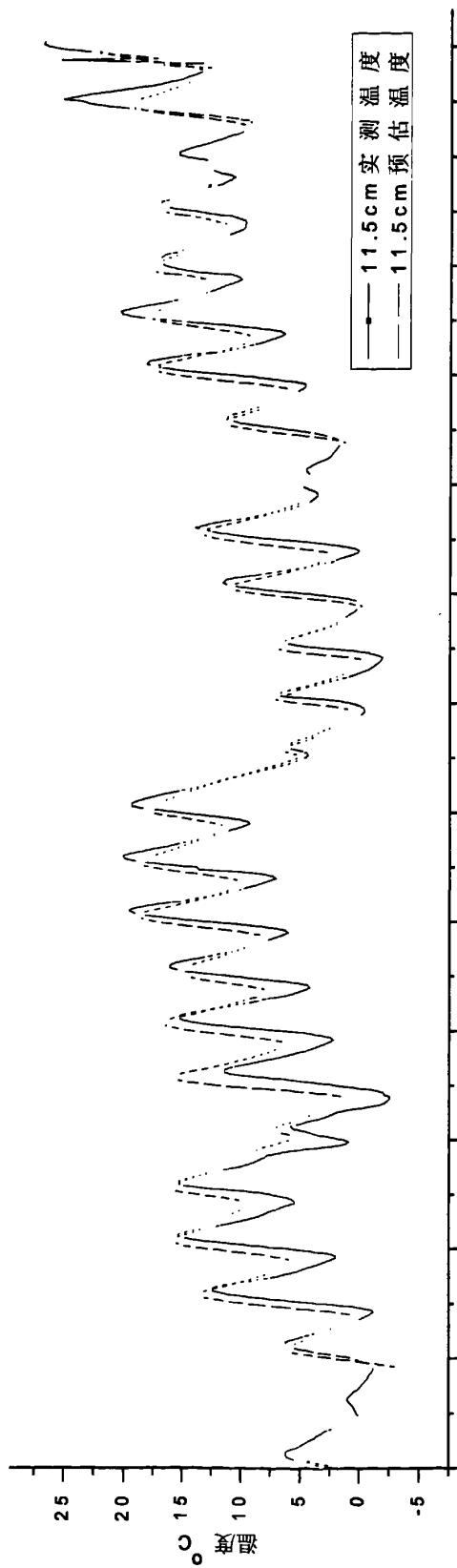


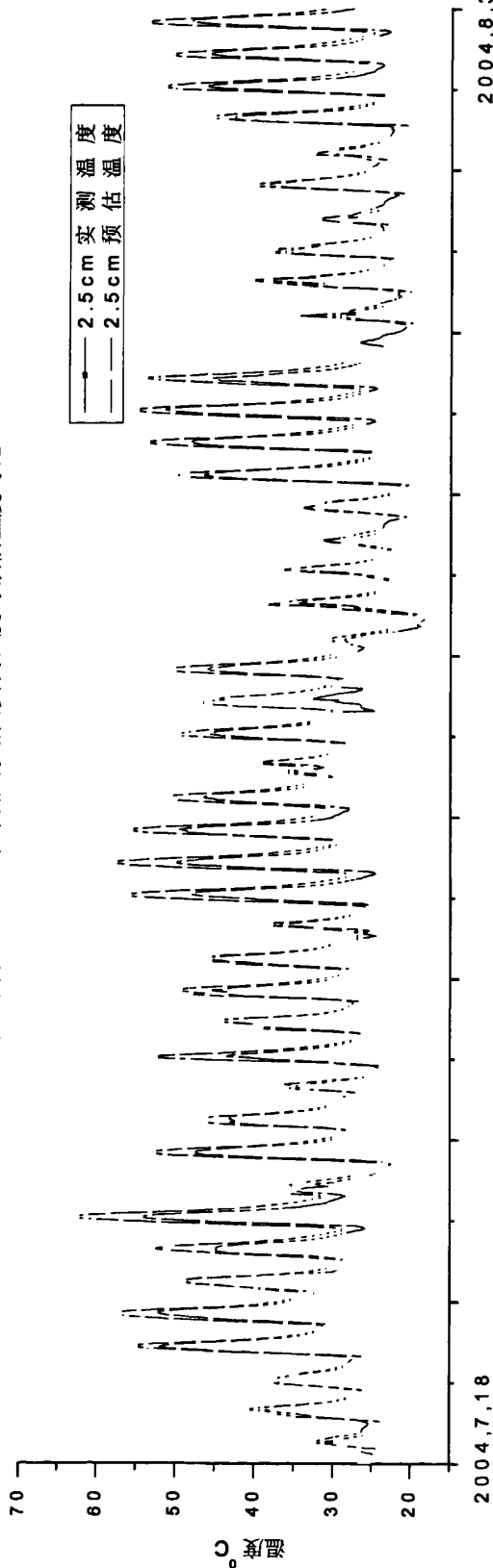
图 3.17 乌鲁木齐地区2003年4月沥青路面实测温度与预估温度对比@5cm



2003, 4, 2

2003, 4, 28

图 3.18 乌鲁木齐地区2003年4月沥青路面实测温度与预估温度对比@11.5cm



2004, 7, 18

2004, 8, 31

图 3.19 唐山地区2004年7月-8月沥青路面实测温度与预估温度对比@2.5cm

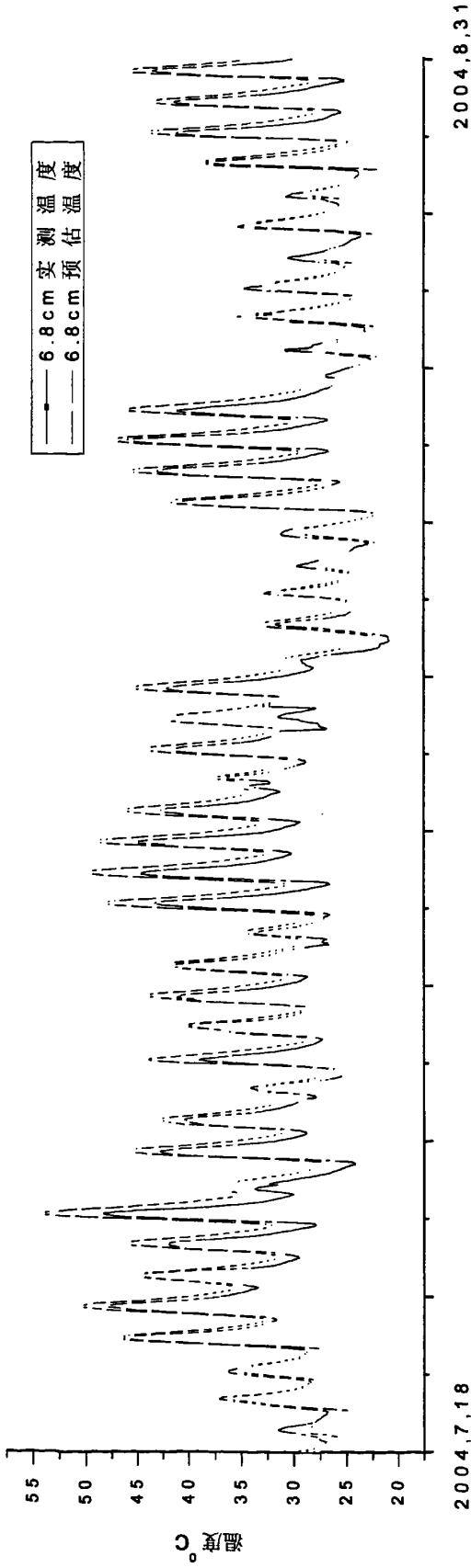


图 3.20 唐山地区2004年7月-8月沥青路面实测温度与预估温度对比@6.8cm

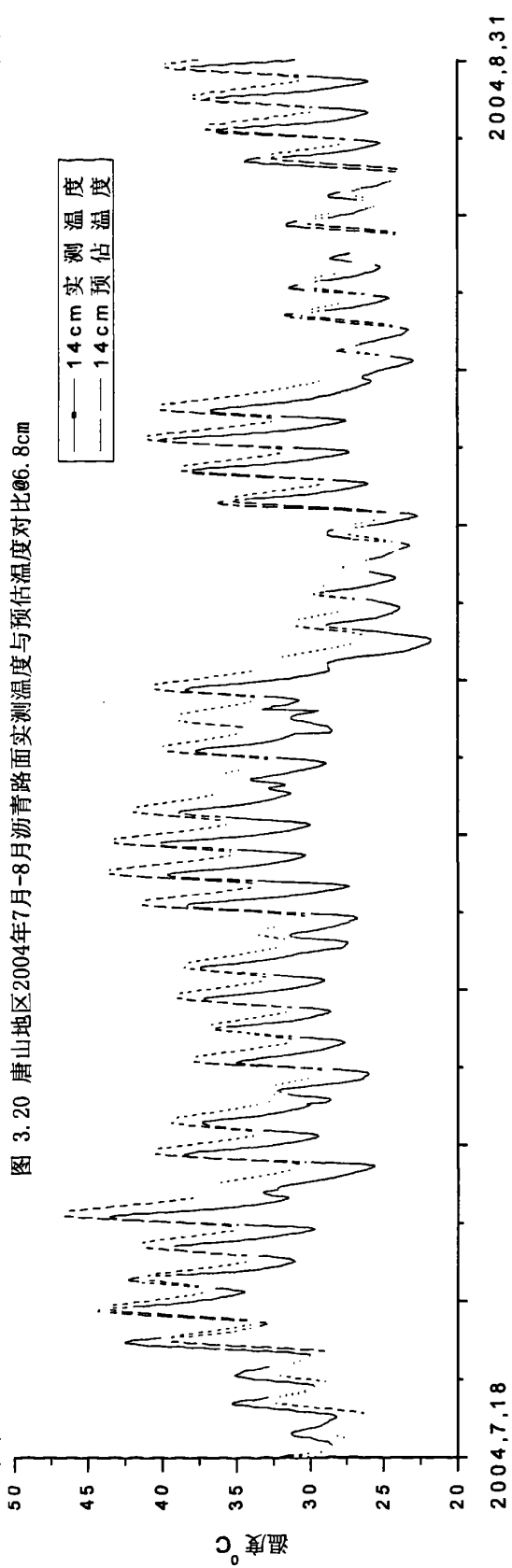


图 3.21 唐山地区2004年7月-8月沥青路面实测温度与预估温度对比@14cm

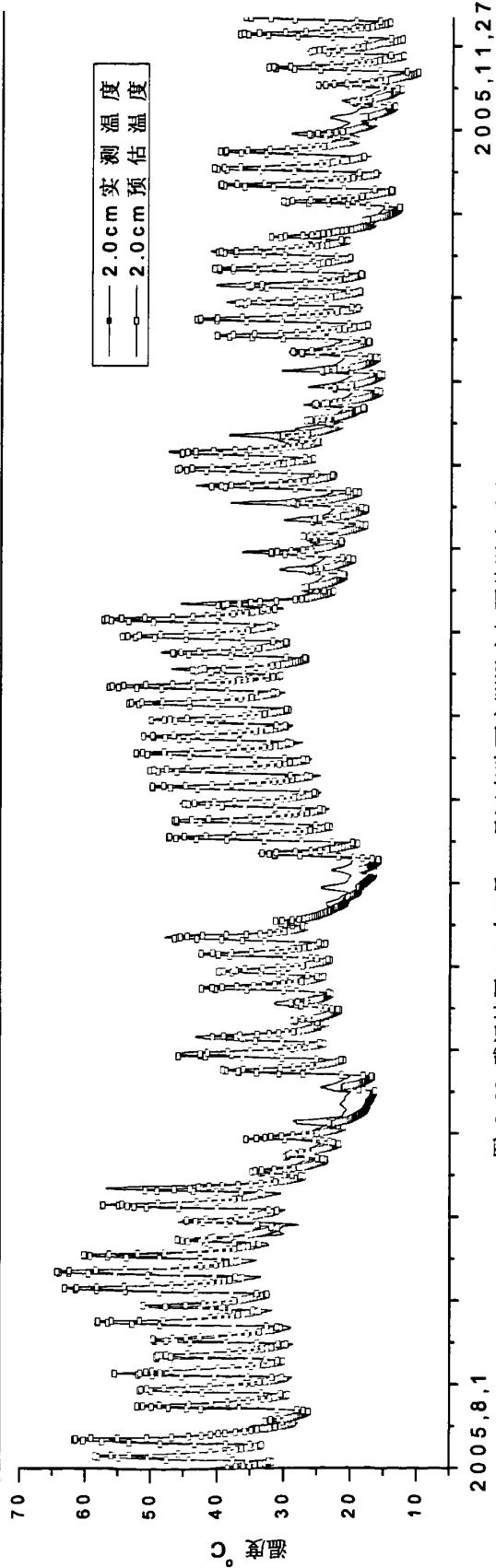


图 3.22 武汉地区2005年8月-11月沥青路面实测温度与预估温度对比@2.0cm

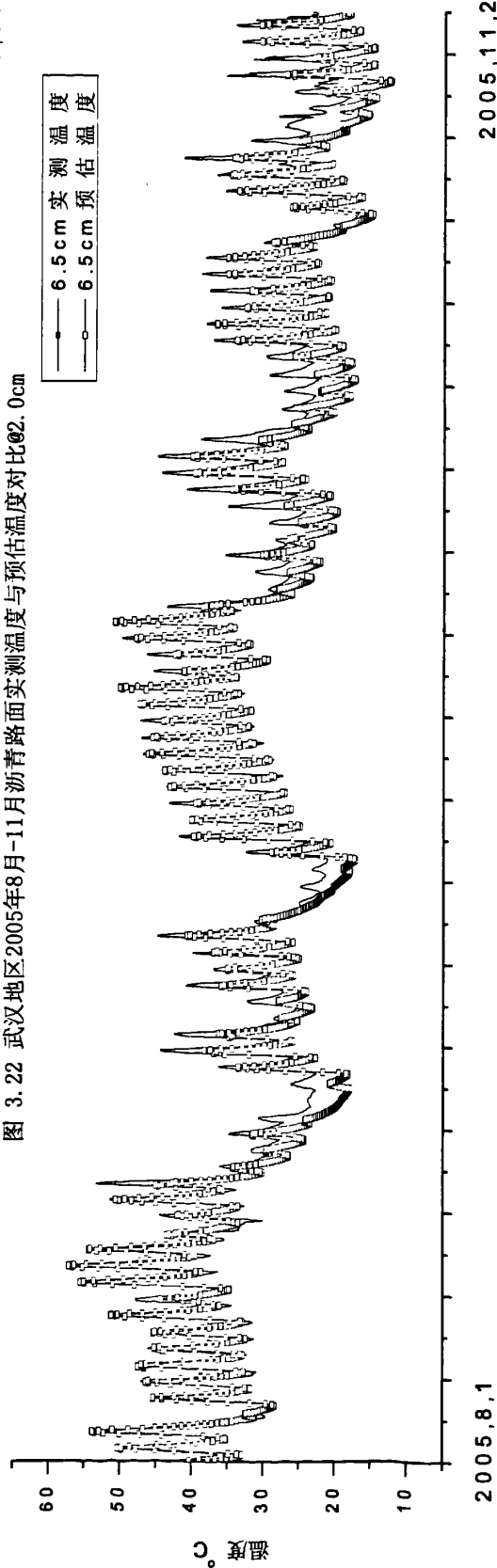
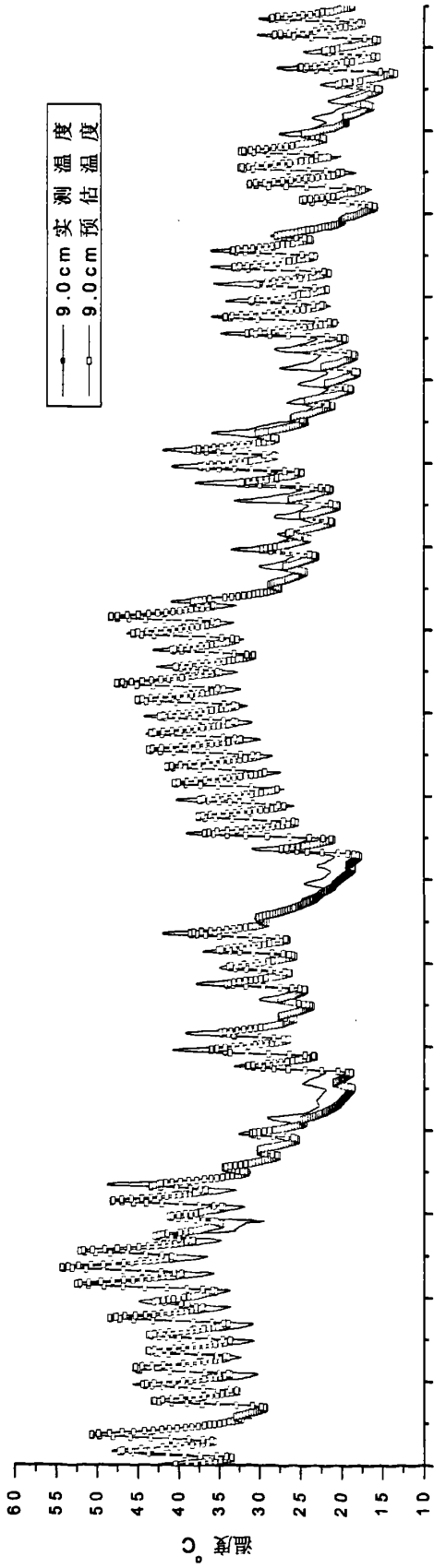


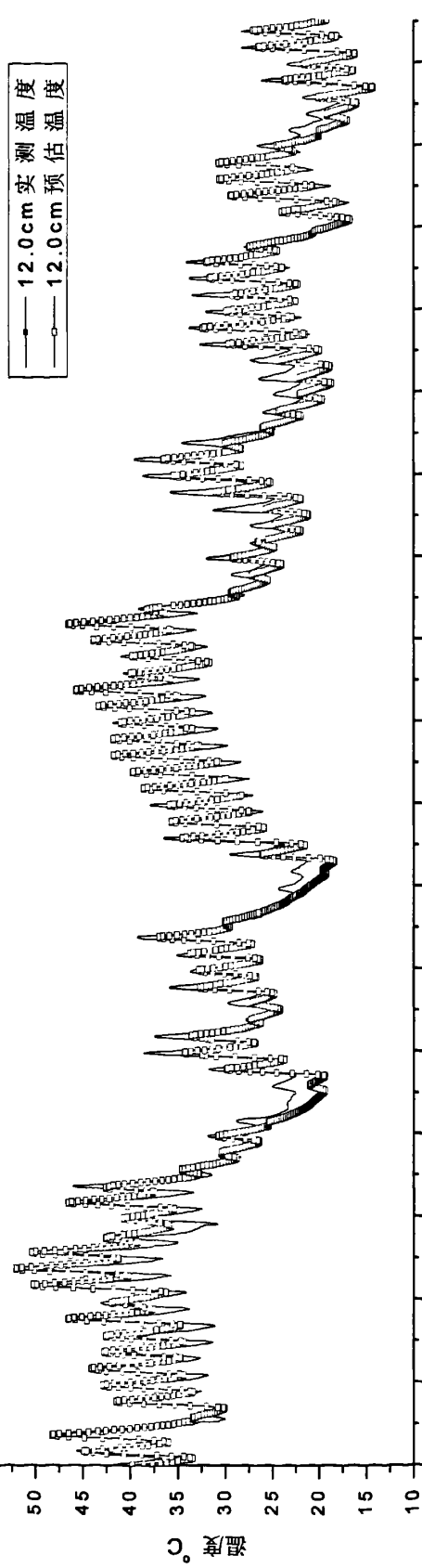
图 3.23 武汉地区2005年8月-11月沥青路面实测温度与预估温度对比@6.5cm



2005, 11, 27

图 3.24 武汉地区2005年8月-11月沥青路面实测温度与预估温度对比@9.0cm

2005, 8, 1



2005, 11, 27

图 3.25 武汉地区2005年8月-11月沥青路面实测温度与预估温度对比@12.0cm

2005, 8, 1

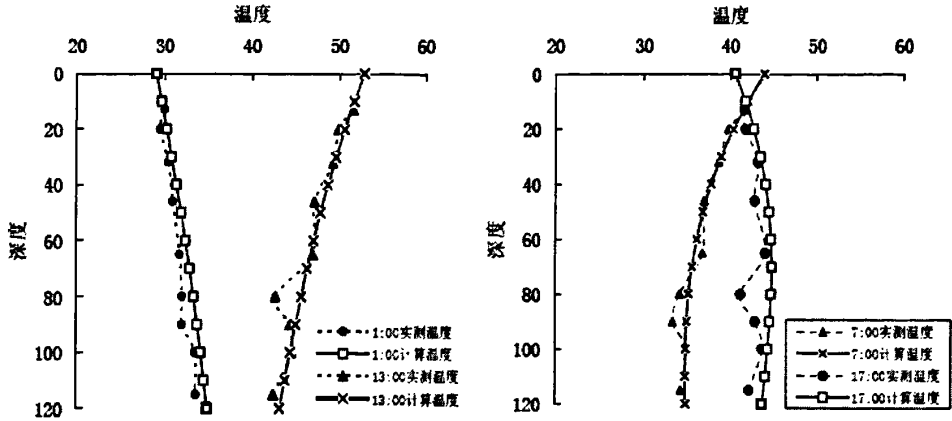


图 3.26 武汉地区沥青路面实测温度与预估温度延深度方向的分布 (2005-8-6)

3.4.6 结果汇总

在各个深度处实测沥青路面温度与预估沥青路面温度之间的相关系数和方差如表 3.3 所示:

表 3.3 各试验段不同深度处预估温度与实测温度的比较

上海	深度 (mm)	17	39	61	75	95	126	145		
	相关系数	0.930	0.942	0.945	0.926	0.929	0.926	0.925		
2002.8	均方差	3.200	2.832	2.560	2.807	2.910	2.310	3.333		
上海	深度 (mm)	14	25	43	59	98	115	138		
	相关系数	0.916	0.931	0.938	0.928	0.927	0.924	0.918		
2003.11-12	均方差	1.796	1.558	2.282	2.312	2.899	2.838	2.790		
乌鲁木齐	深度 (mm)	10	20	35	50	80	90	100	115	
	相关系数	0.964	0.963	0.961	0.956	0.945	0.938	0.933	0.935	
2003.4	均方差	2.991	2.811	2.641	2.548	2.441	2.465	2.451	2.270	
唐山	深度 (mm)	25	54	68	89	115	140			
	相关系数	0.964	0.954	0.948	0.923	0.877	0.851			
2004.7-8	均方差	3.297	2.959	2.832	2.627	3.275	3.525			
武汉	深度 (mm)	13	20	32	46	65	80	90	100	115
	相关系数	0.967	0.967	0.965	0.968	0.961	0.963	0.964	0.964	0.964
2005.8-11	均方差	2.742	2.644	2.593	2.327	2.434	2.278	2.181	2.156	2.098

由本章 3.4.1-3.4.6 的预估结果发现：

- (1) 本文提出的沥青路面温度场有限差分预估方法可以根据每小时的空气温度、太阳辐射和风速较为准确地预估沥青路面各个深度处的温度，并且预估精度较高，与实测温度的相关系数大部分都大于 0.90；本文提出预估方法具有广泛的适用性，可以用于不同气候类型地区和不同的季节；
- (2) 由于在预估过程中，每小时的风速资料是根据一天之内的平均风速得到的，而实际上风速总是在某一时段偏大而在其他时段则会减弱，所以在部分时刻存在预估温度略高于实测温度，而在一天之内的另外时刻预估温度则略低于实测温度的情况，但是一天之内的平均预估温度却较为准确。
- (3) 考虑到在预估模型中采取了一些简化方法来表征沥青路面表面复杂的传热情况，由于自然因素对于深度较浅位置的影响较大，而对于深度较深位置的影响较小，因此预估模型在深度较浅位置的预估精度会略低于深度较深位置的精度；但是随着深度增加该预估模型的精度会有所下降，这是因为在越接近模型底面的位置，模型底部假设边界条件对于预估结果的影响也越显著。
- (4) 由于在预估模型中并未考虑降雨降雪或者强对流天气的影响，所以在这些时段预估温度与实测温度之间存在较大的差异。

3.5 本章小结

1. 根据传热学基本原理，分析比较各种沥青路面温度场理论预估方法的优缺点，最终选定一维有限差分数值方法来预估沥青路面温度场在环境因素影响下的变化过程；

2. 在确定有限差分方法中沥青路面表面边界条件和底面边界条件之后，对于各个地区的沥青路面温度场进行预估研究，对比实测温度数据表明本文提出的沥青路面温度场预估方法可以根据每小时的空气温度、太阳辐射和风速较为准确地预估在晴好天气时沥青路面各个深度处的温度，并且预估精度较高；

第 4 章 沥青路面温度场统计预估方法研究

沥青路面温度场统计预估方法是根据实测的路温和气象资料，通过回归分析建立路面温度预估模型。虽然其理论基础是路面温度场与各影响因素之间的简单统计学关系，但是其预估模型的形式和求解过程都比较简单，输入参数少且容易获得，计算结果精度基本可以满足实际工程需要，因此沥青路面温度场统计方法在工程应用方面具有较大优势。

本章拟以实测沥青路面温度场数据和气象资料为基础，对于现有统计回归模型在我国气候条件下的适用性进行探讨。并拟采用交叉互分析的方法确定沥青路面温度场相关变量，根据统计回归方法建立准确性较高的沥青路面温度场预估模型，同时尽量消除模型中存在的地区差异问题，使其具有更为广泛的使用性能。

4.1 现有沥青路面温度场统计预估方法适用性研究

如前文所述，沥青路面温度场统计预估方法的兴起是以 AASHTO 的 SHRP 研究计划以及长期路面性能研究项目(Long Term Pavement Performance, LTPP)为契机的。从 20 世纪 90 年代至 21 世纪初，LTPP 项目收集了大量路面温度实测数据和气象资料，建立了庞大的路面温度和气象资料数据库，为沥青路面温度场统计预估模型的建立提供了充分的数据基础。同时在这阶段，沥青路面温度场统计预估方法的研究目的也十分明确，即确定沥青路面在其使用年限内可能经受的最低和最高温度。

在该研究阶段，研究者提出了许多预估沥青路面极端低温或者极端高温的树立统计模型，其中较为成功有 SHRP 的 SUPERPAVE 模型，LTPP 模型^[52-53]以及 Bosscher 等人建立的 UW 模型 (University of Wisconsin Model)。2003 年 Donald E. Watson 等人在对于 NCAT 试验段的沥青路面现场温度实测研究中发现^[54]：

- (1) SUPERPAVE 高温预估模型以及 LTPP 高温预估模型在 50%可靠度时低估沥青路面极端高温；在 98%的可靠度时，高温预估结果又有

所偏高;

- (2) SUPERPAVE 低温预估模型在 50%和 98%可靠度时都会过低的估计沥青路面极端低温;而 LTPP 低温预估模型在 98%的可靠度时也会过低的估计沥青路面极端低温,而 LTPP 低温预估模型在 50%可靠度时其预估结果与实测结果相差不大。

虽然我国目前在沥青路面设计规范中直接采用 SUPERPAVE 模型来预估我国沥青路面在设计使用期内的年极端高温和极端低温^[3],但是考虑到美国和我国的气候条件、地理特征等方面存在较大的差异,本文将根据我国实测沥青路面温度和相关气象资料,对于模型在我国气候状况下的适用性进行研究。

4.1.1 SUPERPAVE 模型

SHRP 项目提出的 SUPERPAVE 模型采用一年中温度最高的连续 7 天路面表面的最高温度 T_{surf} (即温度最高的 7 天的平均温度值) 做为沥青路面高温设计温度:

$$T_{surf} = T_{air} - 0.00618Lat^2 + 0.2289Lat + 24.4 \quad (4.1)$$

式中:

T_{air} ——连续 7 天最高气温平均值,以 °C 计;

T_{surf} ——路面表面最高温度,以 °C 计;

Lat ——纬度,以度计。

同时认为沥青路面结构内不同深度处的最高温度满足以下关系式:

$$T(d) = T_{surf}(1 - 0.0063d + 0.007d^2 - 0.0004d^3) \quad (4.2)$$

式中:

$T(d)$ ——在深度处 d 英寸处的沥青路面最高温度,以 °F 计;

T_{surf} ——沥青路面表面最高温度,以 °F 计;

d ——深度,英寸。

将可靠度指标引入高温预估模型可得:

$$T_{pav} = T(d) + z \cdot S_{air} \quad (4.3)$$

式中:

T_{pav} ——考虑了可靠度水平的沥青路面最高温度,以 °C 计;

$T(d)$ ——在深度处 d 英寸处的沥青路面最高温度，以℃计；

S_{air} ——最高连续 7 天平均气温的均方差，以℃计；

z ——可靠度系数，对于 50% 的可靠度水平， $z=0$ ；对于 98% 的可靠度水平， $z=2.055$ 。

SUPERPAVE 以冬季沥青路面表面的最低温度作为设计温度，不同深度处的最低温度预估模型为：

$$T(d) = T_{surf} + 0.051d - 0.000063d^2 \quad (4.4)$$

式中：

$T(d)$ ——在深度处 d 英寸处的沥青路面最低温度，以℃计；

T_{surf} ——沥青路面表面最低温度，SUPERPAVE 模型中认为 T_{surf} 在数值上等于最低气温 T_{air} ，以℃计；

d ——深度，mm。

结合可靠度指标，低温预估模型表达为：

$$T_{pav} = T(d) - z \cdot S_{air} \quad (4.5)$$

式中：

T_{pav} ——考虑了可靠度水平的沥青路面最低温度，以℃计；

$T(d)$ ——在深度处 d 英寸处的沥青路面最低温度，以℃计；

S_{air} ——最高连续 7 天平均气温的均方差，以℃计；

z ——可靠度系数，对于 50% 的可靠度水平， $z=0$ ；对于 98% 的可靠度水平， $z=2.055$ 。

4.1.2 LTPP 模型

LTPP 提出的沥青路面高温预估模型为：

$$T_{pav} = 54.32 + 0.78T_{air} - 0.0025Lat^2 - 15.141g(H + 25) + z(9 + 0.61S_{air}^2)^{0.5} \quad (4.6)$$

式中：

T_{pav} ——沥青路面最高设计温度，以℃计；

T_{air} ——年最高气温，以℃计；

Lat ——纬度，以度计；

H ——路面深度，以 mm 计；

S_{air} ——最高连续 7 天平均温度的标准差;

z ——可靠度系数, 对 50%可靠度, $z=0$; 对于 98%可靠度, $z=2.055$ 。

LTPP 所提出的沥青路面极端低温温度预估模型为:

$$T_{PAV} = -1.56 + 0.72T_{air} - 0.004Lat^2 + 6.26\lg(H + 25) - z(4.4 + 0.52\sigma_{air}^2)^{1/2} \quad (4.7)$$

式中:

T_{pav} ——沥青路面设计最低温度, 以 $^{\circ}\text{C}$ 计;

T_{air} ——年最低气温, 以 $^{\circ}\text{C}$ 计;

Lat ——纬度;

H ——路面深度, 以 mm 计;

σ_{air} ——空气温度的标准差;

z ——可靠度系数, 对于 50%的可靠度水平, $z=0$; 对于 98%的可靠度水平, $z=2.055$ 。

4.1.3 UW 模型

1998 年, Bosscher 等人在美国 Wisconsin 州 Trempealeau 郡使用不同 PG 分级的沥青结合料修建了 6 段试验路, 通过对于路面温度以及气候状况进行了实测, 验证 SUPERPAVE 和 LTPP 的沥青路面极端温度预估模型的有效性。其研究发现^[22]: SHRP 的 SUPERPAVE 模型对于路面低温设计温度的估算过于保守, 而 LTPP 模型推荐的模型得到的结果与该研究提出的模型具有较好的一致性。同时 SUPERPAVE 和 LTPP 的高温预估模型均低估气温高于 30°C 时路面结构内的最高温度。

Bosscher 提出的沥青路面极端低温预估模型为:

$$T_{pav@6.4mm(\min)} = -1.001 + 0.422T_{air(\min)} + 0.359T_{air-01} \quad (4.8)$$

式中:

$T_{pav@6.4mm(\min)}$ ——沥青路面在 6.4mm 深度处的最低温度, $^{\circ}\text{C}$;

$T_{air(\min)}$ ——最低空气温度, $^{\circ}\text{C}$;

T_{air-01} ——最低路面温度出现前 24 内的平均空气温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

对于不同深度处的沥青路面最低温度, 则可根据下式计算:

$$T_{d(\min)} = T_{pav@6.4mm(\min)} - \left[0.00123T_{pav@6.4mm(\min)}(d-6.4) \right] + 0.0146(d-6.4) \quad (4.9)$$

式中:

- $T_{d(\min)}$ ——沥青路面在深度 d 处的最低温度, °C;
- $T_{pav@6.4mm(\min)}$ ——沥青路面在 6.4mm 深度处的最低温度, °C;
- d ——深度, mm。

Bosscher 提出的沥青路面极端高温预估模型为:

$$T_{pav@6.4mm(\max)} = -8.4828 + 0.716\sqrt{\text{Solar}_0 \cdot T_{air(\max)}^2} + 0.489T_{air-01} + 0.261\sqrt{\text{Solar}_0 \cdot MS_0} \quad (4.10)$$

式中:

- $T_{pav@6.4mm(\max)}$ ——沥青路面在 6.4mm 深度处的最高温度, °C;
- $T_{air(\max)}$ ——最高空气温度, °C;
- T_{air-01} ——最高路面温度出现前一天的平均空气温度, °C;
- Solar_0 ——日太阳辐射总量, $W \cdot hr / m^2$;
- MS_0 ——日太阳辐射峰值, $Watt / m^2$ 。

对于不同深度处的沥青路面最高温度, 则建议采用下式计算:

$$T_{d(\max)} = T_{pav@6.4mm(\max)} - 2.68 \times 10^3 (d-6.4) T_{pav@6.4mm(\max)} + 4.25 \times 10^{-4} (d-6.4)^2 \quad (4.11)$$

式中:

- $T_{d(\max)}$ ——沥青路面在深度 d 处的最高温度, °C;
- $T_{pav@6.4mm(\max)}$ ——沥青路面在 6.4mm 深度处的最高温度, °C;
- d ——深度, mm。

将可靠度指标引入预估模型, 可得:

$$\begin{cases} T_{pav} = T_{d(\max)} + z \cdot S_{T_d(\max)} & \text{高温} \\ T_{pav} = T_{d(\min)} - z \cdot S_{T_d(\min)} & \text{低温} \end{cases} \quad (4.12)$$

式中:

- $S_{T_d(\max)}$ ——路面最高温度标准差, $S_{T_d(\max)} = 1.694 + 1.2733S_{air(\max)}$;
- $S_{air(\max)}$ ——最高气温的标准差;
- $S_{T_d(\min)}$ ——路面最低温度标准差, $S_{T_d(\min)} = 1.170 + 0.6422S_{air(\min)}$;

$S_{air(min)}$ ——最低气温的标准差;

z ——可靠度系数, 对于 50%的可靠度水平, $z=0$; 对于 98%的可靠度水平, $z=2.055$ 。

4.1.4 模型适用性研究

1. 高温预估模型

选取上海地区 2002 年 7 月至 8 月的实测路面温度数据和唐山地区 2004 年 7 月至 8 月实测路面温度数据以及武汉地区 2005 年 8 月份的数据, 对于沥青路面极端高温预估模型在我国的不同地区、不同气候条件下的适用性进行研究, 如表 4.1~表 4.3 中所示:

表 4.1 上海地区实测沥青路面最高温度与预估温度

2002.7-8 $T_{air}=28.6^{\circ}\text{C}$	实测路面温度 ($^{\circ}\text{C}$)	SHRP Model ($^{\circ}\text{C}$)		LTPP Model ($^{\circ}\text{C}$)		UW Model ($^{\circ}\text{C}$)	
		50%可靠度	98%可靠度	50%可靠度	98%可靠	50%可靠度	98%可靠度
T_{surf}	54.9	54.1	60.3	53.0	60.8	52.9	64.2
$T_{20\text{mm}}$	51.4	50.8	57.0	49.1	56.9	50.1	61.5
$T_{40\text{mm}}$	47.9	48.1	54.3	46.7	54.5	47.8	59.1
$T_{60\text{mm}}$	46.1	45.8	52.0	45.0	52.8	45.7	57.1
$T_{80\text{mm}}$	45.0	43.9	50.1	43.6	51.4	44.0	55.3
$T_{100\text{mm}}$	42.8	42.3	48.5	42.4	50.2	42.7	54.0
$T_{120\text{mm}}$	39.7	40.9	47.1	41.4	49.2	41.6	53.0
$T_{140\text{mm}}$	34.9	39.6	45.8	40.6	48.4	40.9	52.3

2002 年上海夏季气温并不高, 最热 7 天连续高温时间出现在 8 月 18 日至 8 月 26 日, 最高连续 7 天平均气温值仅为 28.6°C 。SUPERPAVE 模型、LTPP 模型以及 UW 高温预估模型在 50%的可靠度水平时的预估结果与实测温度之间相差都小于 2°C , 但是在路面温度较深的 140mm 处, 预估温度比实测温度高 5.0°C ; 在 98%的可靠度时, SUPERPAVE 和 LTPP 的预估结果比实测温度高 $6.0\sim 9.0^{\circ}\text{C}$, 而 UW 模型的预估温度比实测温度高 $10\sim 12^{\circ}\text{C}$ 。

表 4.2 唐山地区实测沥青路面最高温度与预估温度

2004.7-8	实测路面温度 (°C)	SHRP Model (°C)		LTPP Model (°C)		UW Model (°C)	
T _{air} =27.5°C		50%可靠度	98%可靠度	50%可靠度	98%可靠	50%可靠度	98%可靠度
T _{surf}	58.0	51.3	58.5	50.7	59.0	56.6	67.9
T _{20mm}	54.7	50.9	58.1	46.8	55.1	53.6	65.0
T _{40mm}	51.9	50.6	57.8	44.4	52.7	51.1	62.4
T _{60mm}	49.1	50.3	57.5	42.6	50.9	48.8	60.1
T _{80mm}	47.5	50.0	57.2	41.2	49.5	46.9	58.3
T _{100mm}	45.9	49.6	56.8	40.1	48.4	45.4	56.7
T _{120mm}	43.9	49.3	56.5	39.1	47.4	44.1	55.5
T _{140mm}	42.3	49.0	56.2	38.3	46.6	43.3	54.6

2004 年唐山夏季气候有些反常。最热 7 天连续高温时间出现在七月的 17 日至 25 日，但是最高连续 7 天平均气温值却低至 27.5°C。SUPERPAVE 模型、LTPP 高温预估模型的预估结果和实测温度相差较大，在 50%的可靠度时，预估温度比实测温度低 2~7°C；在 98%可靠度时，预估结果却比实测温度偏高，其差值从 1°C 变化至 14°C。对于 UW 高温预估模型，在 50%可靠度时其预估温度与实测温度很接近，差值只有 1°C 左右；但是在 98%可靠度时，其预估结果要远远高于实测温度，差值多在 10°C 以上。

表 4.3 武汉地区实测沥青路面最高温度与预估温度

2005.7-8	实测路面温度 (°C)	SHRP Model (°C)		LTPP Model (°C)		UW Model (°C)	
T _{air} =28.6°C		50%可靠度	98%可靠度	50%可靠度	98%可靠	50%可靠度	98%可靠度
T _{surf}	61.6	57.3	63.7	55.5	63.4	61.1	72.5
T _{20mm}	59.1	53.9	60.3	51.7	59.6	58.0	69.3
T _{40mm}	55.8	51.1	57.5	49.2	57.1	55.2	66.5
T _{60mm}	55.0	48.7	55.1	47.5	55.4	52.7	64.0
T _{80mm}	50.8	46.7	53.1	46.1	54	50.5	61.9
T _{100mm}	48.9	45.0	51.4	44.9	52.8	48.7	60.1
T _{120mm}	46.7	43.5	49.9	44.0	51.9	47.3	58.6

2005年武汉夏季属于典型的持续高温气候。最高连续7天平均气温出现在8月4日至11日，其平均温度之高达31.7℃。SUPERPAVE模型、LTPP高温预估模型在50%的可靠度时的预估温度值比实测温度值偏小3~4℃；在98%的可靠度时，SUPERPAVE模型预估温度与实测温度比较接近，其误差在2~3℃之内，而LTPP预估模型的预估结果在沥青路面表面至6cm深度范围内的实测结果符合的很好，其误差在2~3℃之内，而在深度大于6cm的地方，LTPP高温模型的预估结果比实测温度高4~6℃。UW高温预估模型在50%可靠度时的预估结果与实测温度相当接近，其误差小于1℃；但是在98%的可靠度水平时，UW预估结果比实测温度高9~10℃。

2. 低温预估模型

选取上海地区2003年11月至12月的实测路面温度数据和西宁地区2003年12月至2004年1月的实测路面温度数据，对于现有沥青路面极端低温预估模型在我国的不同地区、不同气候条件下的适用性进行了研究。具体的计算结果如表4.4和表4.5所示。

表 4.4 上海地区实测沥青路面最低温度与预估温度

2003.11-12 $T_{air} = -2.2^{\circ}C$	实测路面 温度 ($^{\circ}C$)	SHRP Model ($^{\circ}C$)		LTPP Model ($^{\circ}C$)		UW Model ($^{\circ}C$)	
		50%可靠度	98%可靠度	50%可靠度	98%可靠度	50%可靠度	98%可靠度
	T_{surf}	-2.1	-11.7	1.7	-6.4	-1.3	-7.7
	T_{20mm}	-2.1	-11.5	1.9	-6.2	-1.0	-7.3
	T_{40mm}	-2.0	-11.4	2.1	-6.0	-0.6	-7.0
	T_{60mm}	-1.9	-11.3	2.3	-5.8	-0.3	-6.7
	T_{80mm}	-1.8	-11.2	2.4	-5.7	0.0	-6.4
	T_{100mm}	-1.7	-11.1	2.6	-5.5	0.3	-6.0
	T_{120mm}	-1.6	-11.0	2.8	-5.3	0.6	-5.7
	T_{140mm}	-1.5	-10.9	2.9	-5.2	0.8	-5.6

对于2003年上海地区沥青路面实测极端低温来说，SUPERPAVE低温预估模型在50%可靠度时的预估结果与实测结果比较接近；正如SUPERPAVE所假定的那样，沥青路面表面的最低温度与最低气温基本上一致，但是随着深度的

增加, SUPERPAVE 低温预估模型在 50%可靠度时的预估结果与实测温度之间的误差会增加到 1~3℃。而 SUPERPAVE 低温预估模型在 98%可靠度时的预估结果比实测温度低 9~10℃。LTPP 低温预估模型和 UW 低温估模型在 50%可靠度时的预估结果比实测结果大, 其中 UW 模型的结果和实测温度之间相差 1℃左右, 而 LTPP 模型的结果比实测温度高 1~4℃; 在 98%可靠度时, UW 模型和 LTPP 模型的预估结果比实测温度低 5~10℃左右。

表 4.5 西宁地区实测沥青路面最低温度与预估温度

2003.11-2004.3 $T_{air}=-19.2^{\circ}\text{C}$	实测路面 温度 ($^{\circ}\text{C}$)	SHRP Model ($^{\circ}\text{C}$)		LTPP Model ($^{\circ}\text{C}$)		UW Model ($^{\circ}\text{C}$)	
		50%可靠度	98%可靠度	50%可靠度	98%可靠度	50%可靠度	98%可靠度
$T_{12\text{mm}}$	-16.4	-18.6	-24.7	-10.9	-17.1	-12.8	-19.1
$T_{27\text{mm}}$	-15.0	-17.9	-24.0	-10.0	-16.2	-12.3	-18.7
$T_{40\text{mm}}$	-14.3	-17.3	-23.4	-9.4	-15.6	-11.9	-18.3
$T_{65\text{mm}}$	-13.2	-16.2	-22.3	-8.5	-14.7	-11.1	-17.5
$T_{77\text{mm}}$	-12.0	-15.6	-21.7	-8.2	-14.4	-10.8	-17.1
$T_{123\text{mm}}$	-13.6	-13.9	-20.0	-7.1	-13.3	-9.4	-15.7
$T_{150\text{mm}}$	-13.0	-13.0	-19.2	-6.7	-12.9	-8.5	-14.9
$T_{175\text{mm}}$	-12.7	-12.2	-18.3	-6.3	-12.5	-7.8	-14.1
$T_{200\text{mm}}$	-10.3	-11.5	-17.7	-6.0	-12.2	-7.0	-13.4

对于西宁地区 2003 年 11 月至 2004 年 1 月期间, 最低空气温度达到了 -19.2°C 。同上海地区情况类似, SUPERPAVE 低温预估模型在 50%可靠度时的预估结果与实测温度十分接近, 误差在 2°C 以内; 而 LTPP 低温预估模型和 UW 低温估模型在 50%可靠度时的预估结果比实测结果偏高, 其误差为 $4\sim 6^{\circ}\text{C}$ 。在 98%可靠度时, SUPERPAVE 低温预估模型的预估比实测温度低 $7\sim 8^{\circ}\text{C}$, 而 LTPP 低温预估模型的预估结果却与实测温度比较接近, 其误差为 2°C 左右; UW 低温估模型在 98%可靠度时的预估结果比实测温度低 3°C 左右。

3. 小结

根据沥青路面不同深度处的实测极端低温和极端高温温度值和相应的气象

资料，对于现有沥青路面极端低温和极端高温预估模型，如 SUPERPAVE 模型、LTPP 模型和 UW 模型，在我国气候状况下的适用性进行研究。将实测路面温度值与各种模型的预估结果进行比较，可以得到以下结论：

(1) 对于不同的情况下，各种模型的预估精度可以排列为：

(极端高温)

UW 模型(50%)> SUPERPAVE (50%)> LTPP(50%)>其他情况

(极端低温)

SUPERPAVE (50%)> LTPP(98%)> UW 模型(50% 或者 98%)>其他情况

造成这种精度排列顺序的原因，主要是因为是在沥青路面高温情况下，太阳辐射起了相当重要的作用，只有在 UW 模型中考虑了这一因素的影响，因此在预估沥青路面极端高温方面 UW 模型精度较高；

(2) 对于沥青路面极端高温的情况来说：在一般情况下，三种模型在 50%的可靠度水平下均可以提供较为准确预估结果；但是当温度较低时或者出现连续高温情况时，只有 UW 模型在 50%的可靠度水平下的预估结果与实测结果比较接近；在预估路面极端高温时，采用 98%的可靠度会使最终的预估结果温度远远高于实测温度；

(3) 对于沥青路面极端低温的情况来说：只有 SUPERPAVE 模型在 50%可靠度水平下的预估结果与实测温度最为接近；同样，如果在预估极端低温的情况下采用了 98%的可靠度，会造成 SUPERPAVE 模型和 UW 模型的预估结果与实测温度之间误差较大，但是此时，LTPP 模型的预估结果与实测温度比较接近；

(4) 以上各个结论与 NCAT 试验段验证 SUPERPAVE 模型和 LTPP 模型的结论之间存在较大的差异，这主要是因为以上这些模型主要是根据美国和部分北美地区的实测资料得到的，考虑到我国和美国之间存在较大的气候差异，因此这些模型模型并不能直接简单的套用于我国的沥青路面设计中。应根据我国各地区实际观测的沥青路面温度数据建立适应我国气候条件的沥青路面温度场统计预估模型。

4.2 基于我国实测路温的沥青路面温度场统计预估模型

4.2.1 线性回归基本原理介绍^[55]

在数理统计中, 变量之间具有密切关联而又不能由某一个或某一些变量唯一确定另外一个变量的关系, 称为变量间的相关关系。回归分析是研究一个变量与几个解释变量之间相关关系的重要方法。本章拟采用回归分析方法研究沥青路面温度场与各影响因素之间的相关关系, 从而建立路面温度场的预估模型。因此, 有必要在建立预估模型之前对回归分析的基本原理作一个简单的介绍。

1. 多元线性回归模型

研究一个变量与多个解释变量之间的相关关系, 称为多元回归分析。一元回归分析是多元回归分析中解释变量个数为一时的特例。描述随机变量 y 与 p 个解释变量 x_1, x_2, \dots, x_p 之间相关关系的多元线性理论回归模型可以表示为:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p + \varepsilon \quad (4.13)$$

将实际问题中变量 x_1, x_2, \dots, x_p 与 x_1, x_2, \dots, x_p 之间的相关关系用两个部分描述。一部分是由 x_1, x_2, \dots, x_p 的变化引起 x_1, x_2, \dots, x_p 线性变化的部分, 即 $\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p$; 另一部分是由其他一切随机因素引起的, 记为 ε 。在线性回归模型中, 称 y 为被解释变量 (因变量), x_1, x_2, \dots, x_p 为解释变量 (自变量); $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$ 是 $p+1$ 个未知参数, β_0 为回归常数, $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$ 为回归系数; ε 表示其他随机因素的影响。

一般情况下, 对于所研究的某个实际问题, 可以获得 n 组样本观测值 $(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{pi}, y_i)$, $i=1, 2, \dots, n$, 如果这些观测值均符合一元线性理论回归模型, 则线性回归模型可表示为

$$\begin{cases} y_1 = \beta_0 + \beta_1 x_{11} + \beta_2 x_{12} + \dots + \beta_p x_{1p} + \varepsilon_1 \\ y_2 = \beta_0 + \beta_1 x_{21} + \beta_2 x_{22} + \dots + \beta_p x_{2p} + \varepsilon_2 \\ \vdots \\ y_n = \beta_0 + \beta_1 x_{n1} + \beta_2 x_{n2} + \dots + \beta_p x_{np} + \varepsilon_n \end{cases} \quad (4.14)$$

若定义:

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \cdots & x_{1p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \cdots & x_{np} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_p \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \vdots \\ \varepsilon_p \end{bmatrix} \quad \text{和} \quad \hat{\boldsymbol{\beta}} = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_0 \\ \hat{\beta}_1 \\ \vdots \\ \hat{\beta}_p \end{bmatrix}$$

则线性回归模型的矩阵形式为

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (4.15)$$

通常假定 n 组数据是独立观测的, 因而向量 \mathbf{Y} 和 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 中的元素都是相互独立的随机变量。而矩阵 \mathbf{X} 中的元素是确定性变量, 其值是可以精确测量和控制的, 因此称之为设计矩阵。

2. 回归参数的估计

回归分析的主要任务就是通过 n 组样本观测值 $(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{pi}, y_i)$, $i=1, 2, \dots, n$, 对 $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$ 进行估计。获得参数 $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$ 的最优估计值的方法有许多种, 其中最常用的是最小二乘法。最小二乘法考虑 $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$ 个观测值的离差平方和 $Q(\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p)$:

$$Q(\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p) = \sum_{i=1}^n [y_i - (\beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \cdots + \beta_p x_{ip})]^2 \quad (4.16)$$

其直观几何意义是 n 组样本观测值 $(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{pi}, y_i)$ $i=1, 2, \dots, n$ 到超平面 $y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_p x_p$ 距离的平方和

所谓最小二乘法, 就是寻找参数 $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$ 的估计值 $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_p$, 使距离平方和 $Q(\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p)$ 最小, 即:

$$\begin{aligned} Q(\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_p) &= \sum_{i=1}^n [y_i - (\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_{i1} + \cdots + \hat{\beta}_p x_{ip})]^2 \\ &= \min_{\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p} \sum_{i=1}^n [y_i - (\beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \cdots + \beta_p x_{ip})]^2 \end{aligned} \quad (4.17)$$

由上式 (4-17) 求出的 $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_p$ 称为回归参数 $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$ 的最小二乘估计。称 $\hat{y}_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_{i1} + \hat{\beta}_2 x_{i2} + \cdots + \hat{\beta}_p x_{ip}$ 为 y_i , $i=1, 2, \dots, n$ 的回归拟合值, 简称回归值或拟合值。称 $e_i = y_i - \hat{y}_i$ 为 y_i , $i=1, 2, \dots, n$ 的残差。

当 $(\mathbf{X}\mathbf{X}^T)^{-1}$ 存在时, 上式 (4-17) 的求解结果, 即回归参数 $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$ 的最小二乘估计值为:

$$\hat{\beta} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y} \quad (4.18)$$

此时，多元线性经验回归函数也即为：

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_1 + \hat{\beta}_2 x_2 + \dots + \hat{\beta}_p x_p \quad (4.19)$$

3. 回归分析的显著性检验

F 检验

F 检验是根据平方和分解式，直接从回归效果检验回归方程的显著性。平方和分解式可表示为：

$$\begin{cases} SST = SSR + SSE \\ SST = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \\ SSR = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \\ SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \end{cases} \quad (4.20)$$

其中，总平方和 SST 反映因变量 y 的波动程度或不确定性，在建立了 y 对 x 的线性回归后，总平方和 SST 就分解为回归平方和 SSR 和残差平方和 SSE 这两个组成部分。SSR 是由自变量 x 的波动引起的，SSE 是由 x 之外的未加控制的因素引起的。也就是说，总平方和 SST 中，能够由自变量解释的部分为 SSR，不能由自变量解释的部分为 SSE。因此，回归平方和 SSR 越大，回归的效果越好，可以据此构造 F 检验统计量：

$$F = \frac{SSR/p}{SSE/(n-p-1)} \quad (4.21)$$

根据给定的显著性水平 α ，可以查得临界值 $F(p, n-p-1)$ 。

当 $F > F(p, n-p-1)$ 时，认为在显著性水平 α 下， y 与 x_1, x_2, \dots, x_p 之间具有显著的线性关系，回归方程是显著的。如表 4.6 所示的方差分析表更为清楚的给出了检验统计量 F 的计算过程。

表 4.6 方差分析表(ANOVA)

方差来源	自由度	平方和	均方	F 值	P 值
回归	p	SSR	SSR/p	SSR/p	P(F > F 值) = P 值

残差	n-p-1	SSE	SSE/(n-p-1)	SSE/(n-p-1)	
总和	n-1	SST			

拟合优度检验

拟合优度用于检验回归方程对样本观测值的拟合程度。定义判定系数

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} \quad (4.22)$$

判定系数 R^2 表示回归平方和在总平方和中所占的比例，在 $[0, 1]$ 区间内取值。 R^2 越接近 1，表示回归拟合的效果越好； R^2 越接近 0，表示回归拟合的效果越差。但是，判定系数的值随着引入回归方程的自变量的个数 p 和样本容量 n 的增加而增大，为了消除自变量个数和样本容量大小对判定系数的影响，定义经调整的判定系数：

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{n-1}{n-p-1} (1 - R^2) \quad (4.23)$$

t 检验

在多元回归中，回归方程的显著性不代表回归系数的显著性。因此，还需要对每个自变量进行显著性检验。定义检验统计量

$$t_j = \hat{\beta}_j / S(\hat{\beta}_j) \quad (4.24)$$

根据给定的显著性水平 α ，t 检验的双侧检验临界值为 $t_{\alpha/2}(n-2)$ 当 $\|t_j\| \geq t_{\alpha/2}(n-2)$ 时，认为 β_j 显著不为 0，自变量 x_j 对因变量 y 的线性效果显著。

4.2.2 对于 Tongji-04 模型的改进

1. Tongji-04 模型简介

同济大学的秦健、孙立军等在沥青路面温度场统计预估模型方面进行了大量的研究，根据现场实测沥青路面温度及相关的气象资料建立了 Tongji-04 沥青路面温度场统计预估模型^[34]。在研究中分析了路面温度与气温的 m 次方 (T_a^m) 之间的相关分析，经过比较分析，选择气温 (T_a) 以模拟路面温度场随时间变化情况。与气温的处理方法相类似，对路面温度和太阳辐射强度的 m 次方 (Q^m) 进行了相关分析，结果表明沥青路面温度与太阳辐射强度的平方 Q^2 的相关性最强。

同时采用路面深度 (H) 的三次多项式来更为准确的模拟路面温度沿深度方向的分布状况; 并引入路面深度与气温和太阳辐射的乘积 ($H \times T_a$, $H \times Q$), 以反映环境因素对于不同深度处路面温度的影响程度。

考虑到热量沿路面深度方向的传导需要一定的时间, 这种影响并不能马上反映在路面结构的下层, 对于整个路面结构而言, 温度场的分布不仅与当前气温和太阳辐射的状况密切相关, 也是二者在一段时间内的变化情况的综合作用的结果。因此在模型中采用了某段时间内气温和太阳辐射强度的平均值来反映二者在该时间段内总体变化情况的综合体现。根据相关分析确定了沥青路面温度场对 5 小时左右时间段内的气温和太阳辐射强度的变化情况最为敏感。因此, 在预估模型中, 统一取值 $n=5$ 。

基于上述考虑, 建立沥青路面温度场预估模型:

$$T_p = c_1 + (c_2 T_{a5} + c_3 Q_5^2) + H(c_4 T_a + c_5 Q) + (c_6 H + c_7 H^2 + c_8 H^3) \quad (4.25)$$

式中:

T_p ——沥青路面某一深度处的温度, $^{\circ}\text{C}$;

T_a ——当前气温, $^{\circ}\text{C}$;

Q ——当前太阳辐射强度, kW/m^2 ;

T_{a5} ——5 小时平均气温, $^{\circ}\text{C}$;

Q_5^2 ——5 小时平均太阳辐射强度, kW/m^2 ;

H ——路面深度, cm ;

$c_1 \sim c_8$ ——待定的回归系数。

地区适应性问题是沥青路面温度场统计预估研究一个不容忽视的问题, 在以往研究中只能通过尽可能收集更多地区的路面温度数据和气象资料, 通过这些数据建立覆盖所有地区的沥青路面温度场统计预估模型。

秦健等通过在路面温度场预估模型中引入地区修正系数, 选择各地不同月份的历年月平均气温作为预估模型的变量之一, 来反映不同地区的气候差异, 从而从根本上解决了统计预估模型中的地区适应性问题。最终的沥青路面温度场统计预估模型为:

$$T_p = -0.053 + (0.890 \times T_{a5} + 26.846 \times Q_5^2) + H(-0.010 \times T_a - 1.058 \times Q) + (-1.002 \times H + 0.167 \times H^2 - 0.007 \times H^3) + 0.402 \times T_m \quad (4.26)$$

式中:

T_m ——历年月平均气温， $^{\circ}\text{C}$ ；

通过对路面温度实测值和 Tongji-04 沥青路面温度场统计预估模型得到的预测结果的对比分析表明模型均具有较高的预测精度，可以在一定程度上准确模拟路面温度随时间的变化以及沿深度方向的一维分布，且具有广泛的适应性。

2. Tongji-04 模型存在的缺陷

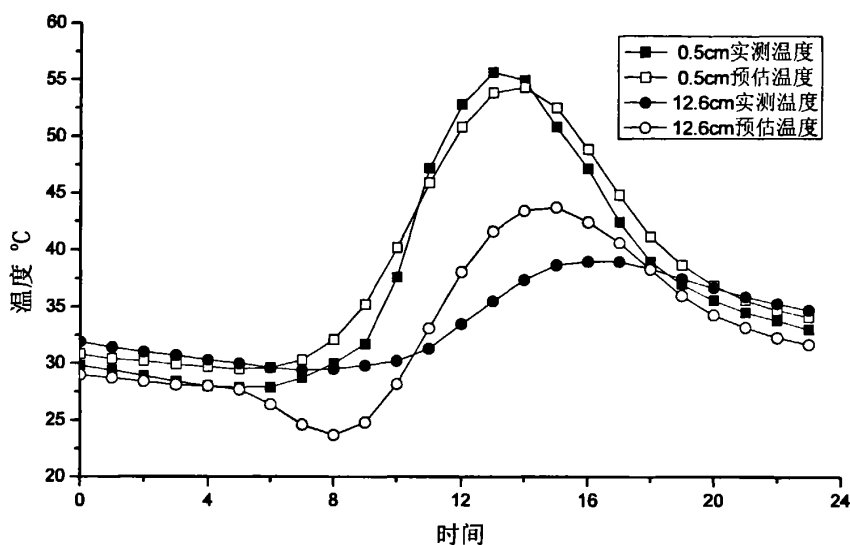


图 4.1 路面不同深度处温度实测值和预测值的日变化过程（夏季）

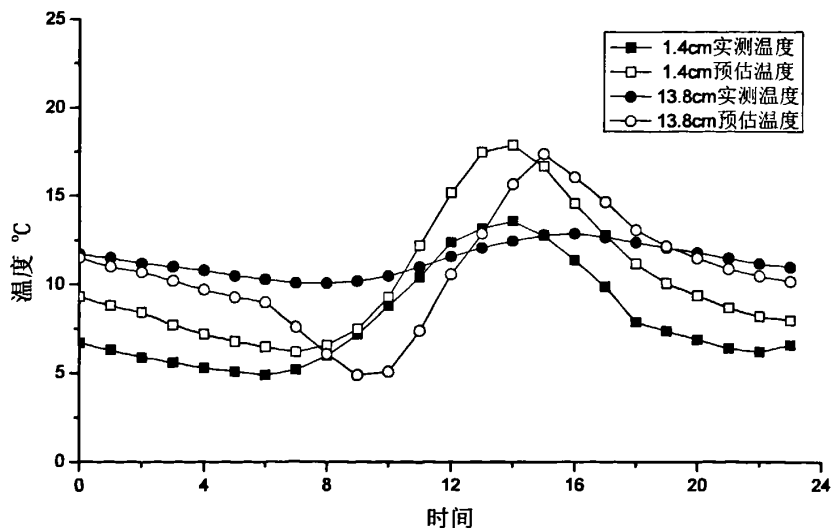


图 4.2 路面不同深度处温度实测值和预测值的日变化过程（冬季）

将上海和乌鲁木齐路面温度实测值和预测值的进行对比，路面不同深度处温度的实测值和预测值的日变化过程如图 4.1 和图 4.2 所示：

从图中可以看出尽管从总体上来说，Tongji-04 模型对于沥青层中间深度处的预估结果和日最高温度、日最低温度出现时间都和实际较为接近，但是也可以很明显的看出该模型中有一些方面还有待改进：

- (1) Tongji-04 模型对于较深位置处的温度预估值与实测值之间相差比较大，并且预估值不管是在夏季还是在冬季都是高于实测温度；虽然对于深度较浅位置，温度预估值和实测值比较接近，但是预估结果也比实测结果高一些；
- (2) Tongji-04 模型尚不能精确的预估日最高温度出现时间，对于深度较浅处的温度，其预估日最高温度出现时间要晚于实测结果；而对于深度较深的位置，其预估值日最高温度出现时间则比实际情况有所提前。

在沥青路面温度实测过程中，温度传感器并不是均匀地埋设在沥青路面的沥青层中，同时由于在实验过程中部分传感器出现了损坏等问题，各个深度处的实测温度样本数也并不相同。其具体的深度分布状况如表 4.7 所示：

表 4.7 Tongji-04 模型建立过程中使用到的沥青路面实测温度样本状况统计

上海地区			新疆地区		
深度(mm)	样本个数 (N)	分布频率(%)	深度 (mm)	样本个数 (N)	分布频率(%)
5	247	2.0	10	792	16.7
14	1272	10.5	20	792	16.7
17	624	5.2	35	792	16.7
25	1272	10.5	80	792	16.7
39	624	5.2	100	792	16.7
43	1272	10.5	115	792	16.7
59	1272	10.5			
61	624	5.2			
75	235	1.9			
95	179	1.5			
98	1272	10.5			

115	1272	10.5			
126	435	3.6			
138	1272	10.5			
145	188	1.6			

如果将所有的深度样本值按照 0~30mm; 30~60mm; 60~90mm; 90~120mm 和 120~150mm 进行分类统计, 则可以得到在建立 Tongji 统计预估模型时, 各个深度处数据所占比例, 具体结果如表 4.8 所示

表 4.8 沥青路面实测温度样本深度分布统计

上海地区			新疆地区		
深度 (mm)	样本个数 (N)	分布频率 (%)	深度 (mm)	样本个数 (N)	分布频率 (%)
0~30	3415	28.3	0~30	1584	33.4
30~60	3168	26.3	30~60	792	16.7
60~90	235	1.9	60~90	792	16.7
90~120	2723	22.6	90~120	792	16.7
120~150	1895	15.7	120~150	792	16.7

从上表中可以看出, 对于上海地区绝大部分的实测数据都是分布在 0~60mm 和 90~120mm 深度范围之内的, 对于沥青路面中间深度 60~90mm 位置和较深的位置 120~150mm, 其数据显得略为偏少, 这势必使得最终所建立的 Tongji-04 模型更多反映沥青路面深度在 0~60mm 和 90~120mm 处的实测路面温度与气象资料的关系, 而对于 60~90mm 和 120~150mm 处的实际情况反映的较少。对于新疆地区的实测数据, 实测路面温度的沿深度的分布还比较均匀, 但是在 0~30mm 内的实测温度样本数量也比其他深度范围的样本数要多出很多。

这种实测温度数据样本在深度方向上的非均匀分布势必会影响到 Tongji-04 模型在样本数量不多的深度较大位置的预估精度, 因此必须采取一定的数学方法来改善这一缺陷。在统计学上一般采用加权回归的方法来解决样本的在某一变量上的非均匀分布状况, 但是该方法存在权重值无法客观选取等缺陷, 因此在本文中推荐采用另外一种简单的方法该解决这一问题——修正实测温度样本。

3. Tongji-04 模型的改进

修正实测温度样本基本原理就是根据数值分析中的插值算法，首先根据不同时刻不同深度处的实测温度数据建立函数 $y = f(x)$ ，不同深度处的实测温度即为该函数的不同的节点值 (x_i, y_i) ，然后利用 Lagrange 插值公式：

$$L_n(x) = \sum_{k=0}^n \left(\prod_{i=0, i \neq k}^n \frac{x - x_i}{x_k - x_i} \right) y_k \quad (4.27)$$

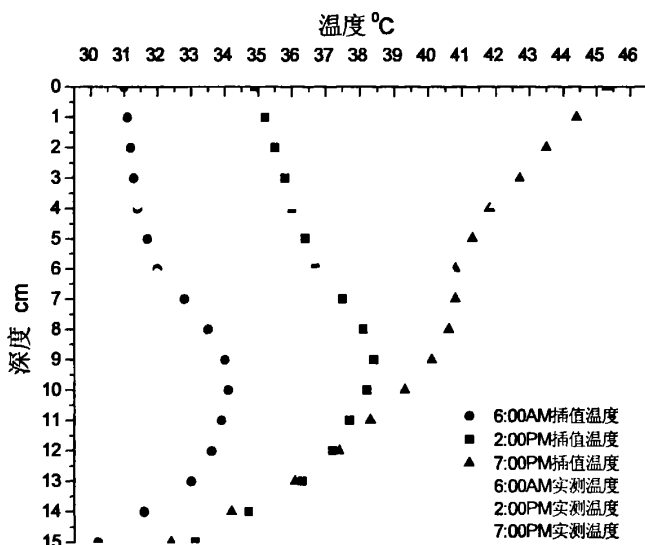


图 4.3 路面不同深度处温度实测值和插值温度值的比较

计算出在深度为 0cm, 1cm, 2cm, ..., 15cm 处的插值温度数据，得到在深度范围内均匀分布的实测温度样本，即可以解决 Tongji-04 模型中的这一问题。采用式(4.27)插值得到的结果与原实测结果之间的比较如图 4.3 所示，可以看出根据式(4.27)得到的插值温度与实测温度十分接近，可以准确的反映出实测温度沿深度的分布状况。

采用深度均匀分布的插值实测温度数据和前 n 小时平均气温 (T_m) 和 n 小时平均太阳辐射强度 (Q_n) 之间的相关关系，以选择合适的变量，使得预估模型更为准确地反映环境因素对于路面温度场影响的滞后性和累积性。其相关分析结果如表 4.9 和表 4.10 所示；表中 A 组数据为原 Tongji-04 模型采用的实测路面温度数据，B 组数据为插值温度数据。

表 4.9 沥青路面温度与 n 小时平均气温相关分析结果

地区	数据	T_{a1}	T_{a2}	T_{a3}	T_{a4}	T_{a5}	T_{a6}	T_{a7}	T_{a8}
上海	A	0.961	0.965	0.968	0.970	0.971	0.971	0.971	0.970
上海 (夏季)	B	0.682	0.731	0.768	0.794	0.760	0.803	0.786	0.637
上海 (冬季)	B	0.847	0.860	0.871	0.879	0.884	0.886	0.886	0.885
乌鲁木齐	A	0.707	0.748	0.782	0.804	0.802	0.795	0.782	0.767
乌鲁木齐	B	0.851	0.849	0.842	0.833	0.821	0.807	0.793	0.781

表 4.10 沥青路面温度与 n 小时平均太阳辐射强度相关分析结果

地区	数据	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6	Q_7	Q_8
上海	A	0.319	0.367	0.408	0.438	0.461	0.466	0.466	0.466
上海 (夏季)	B	0.333	0.442	0.540	0.624	0.692	0.743	0.775	0.760
上海 (冬季)	B	0.0079	0.0253	0.0535	0.0754	0.0896	0.0960	0.0952	0.0881
乌鲁木齐	A	0.107	0.261	0.401	0.516	0.661	0.647	0.628	0.592
乌鲁木齐	B	0.147	0.219	0.292	0.362	0.426	0.482	0.529	0.559

在 Tongji-04 预估模型中, 根据实测路面温度数据与前 n 小时平均气温 (T_m) 和 n 小时平均太阳辐射强度 (Q_n) 之间的相关关系结果, 发现路面温度与 n 小时平均气温和 n 小时平均太阳辐射强度的相关系数在 $n=4\sim 6$ 时达到最大值。因此认为沥青路面温度场对 5 小时左右时间段内的气温和太阳辐射强度的变化情况最为敏感。

对于深度分布均匀的沥青路面插值温度数据来说, 大部分路面温度与 n 小时平均气温的相关系数都是在 $n=6$ 时达到最大值, 只有乌鲁木齐地区的路面温度数据与当前时刻气温的相关关系最好, 但是考虑到乌鲁木齐地区的路面温度数据与 6 小时平均气温的相关系数仍有 0.807, 为了统一模型形式, 仍然认为沥青路面温度场对 6 小时左右时间段内的气温变化情况最为敏感。

深度分布均匀的沥青路面插值温度数据对于 n 小时平均太阳辐射强度之间的相关关系都是在 $n=6\sim 8$ 小时达到最大值, 出于统一模型形式的考虑, 认为沥青路面温度场对 7 小时左右时间段内的气温变化情况最为敏感。

综合以上分析, 对应于深度分布均匀的插值实测温度, 需要将原 Tongji-04 沥青路面温度场预估模型 (4.25) 中前 5 小时平均气温 (T_{a5}) 和 5 小时平均太阳辐射强度 (Q_5) 替换为前 6 小时平均气温 (T_{a6}) 和 7 小时平均太阳辐射强度

(Q_7), 从而得到改进后的 tongji-07 沥青路面温度场预估模型, 如下所示:

$$T_p = c_1 + (c_2 T_{a6} + c_3 Q_7^2) + H(c_4 T_a + c_5 Q) + (c_6 H + c_7 H^2 + c_8 H^3) \quad (4.28)$$

式中:

T_p ——沥青路面某一深度处的温度, $^{\circ}\text{C}$;

T_a ——当前气温, $^{\circ}\text{C}$;

Q ——当前太阳辐射强度, kW/m^2 ;

T_{a6} ——6 小时平均气温, $^{\circ}\text{C}$;

Q_7^2 ——7 小时平均太阳辐射强度, kW/m^2 ;

H ——路面深度, cm ;

$c_1 \sim c_8$ ——待定的回归系数。

分别对上海和乌鲁木齐的路面温度实测数据和气象部门提供的标准气象数据(包括气温和太阳辐射强度)进行回归分析, 即可得到沥青路面温度场预估模型式(4.28)的待定回归系数。

根据预估模型中自变量的个数和观测值的数量, 可以查得各检验统计量的临界值, 如表 4.11 所示。而上海和乌鲁木齐回归分析结果则分别如表 4.12~表 4.17 中所示:

表 4.11 检验统计量的临界值

观测值数量 n		自变量数量 p	显著性水平 α	F (p, n-p-1)	$t_{\alpha/2}$
上海	23208	7	0.05	2.01	1.96
			0.01	2.64	2.58
乌鲁木齐	14123	7	0.05	2.01	1.96
			0.01	2.64	2.58

表 4.12 上海地区式(4.28)回归结果分析表(回归结果统计)

	R	R^2	R^2_{adj}	标准差
原模型	0.978	0.956	0.956	3.540
新模型	0.957	0.916	0.916	2.635

表 4.13 上海地区式(4.28)回归结果方差分析表(ANOVA)

方差来源	自由度	平方和	均方	F 值	P 值
回归	7	1878078.5	268296.9	45268.45	0.000

残差	23208	137549.1	5.927		
总和	23215	2015627.6			

表 4.14 上海地区式 (4.28) 回归系数表

自变量	系数名	系数值	标准误差	t 值	P 值
常数	b ₁	-2.200	0.067	-32.918	0.000
T _{a6}	b ₂	1.088	0.004	278.950	0.000
Q ₇ ²	b ₃	7.438	0.280	26.604	0.000
H×T _a	b ₄	0.008	0.000	18.398	0.000
H×Q	b ₅	-0.210	0.011	-19.001	0.000
H	b ₆	0.332	0.031	10.724	0.000
H ²	b ₇	-0.020	0.005	-4.063	0.000
H ³	b ₈	0.001	0.000	0.667	0.054

表 4.15 乌鲁木齐地区式 (4.28) 回归结果分析表 (回归结果统计)

	R	R ²	R ² _{adj}	标准差
原模型	0.951	0.905	0.904	4.051
新模型	0.907	0.823	0.823	3.887

表 4.16 乌鲁木齐地区式 (4.28) 回归结果方差分析表(ANOVA)

方差来源	自由度	平方和	均方	F 值	P 值
回归	7	891328.34	127332.621	9369.022	0.000
残差	14123	191943.05	13.591		
总和	14130	1083271.4			

表 4.17 乌鲁木齐地区式 (4.28) 回归系数表

自变量	系数名	系数值	标准误差	t 值	P 值
常数	b ₁	2.659	0.107	24.772	0.000
T _{a6}	b ₂	0.841	0.007	124.287	0.000
Q ₇ ²	b ₃	31.589	0.290	109.064	0.000
H×T _a	b ₄	-0.015	0.001	-15.868	0.000
H×Q	b ₅	-0.645	0.020	-31.768	0.000
H	b ₆	-0.746	0.072	-10.343	0.000

H^2	b_7	0.185	0.014	12.961	0.000
H^3	b_8	-0.011	0.001	-14.457	0.000

从表中可以看出，采用插值温度数据之后模型的回归参数都发生了变化，对于新的上海模型 R^2 有所降低，从过去的 0.956 降至 0.916；但是其预估结果的标准差从 3.540 降低至 2.635。对于新疆模型结果也是类似的，新模型的相关系数从原来的 0.905 降至 0.823，但是预估结果的标准差从 4.051 减低至 3.887。

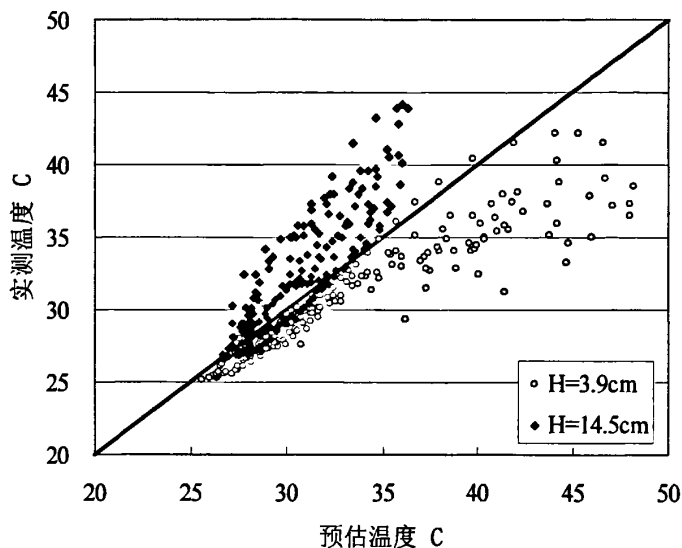


图 4.4 上海模型不同深度预估温度和实测温度比较

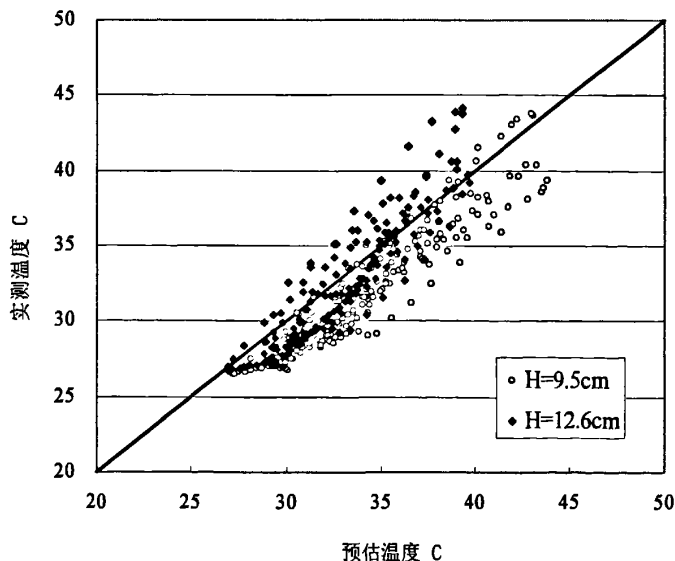


图 4.5 上海模型不同深度预估温度和实测温度比较

为了进一步分析新模型的预估结果与实测温度关系，将模型预估温度值作为 x 轴坐标，将实测温度值作为 y 轴坐标，则对于新的上海模型和乌鲁木齐模型其预估温度和实测温度的比较如图 4.4~图 4.7 中所示：

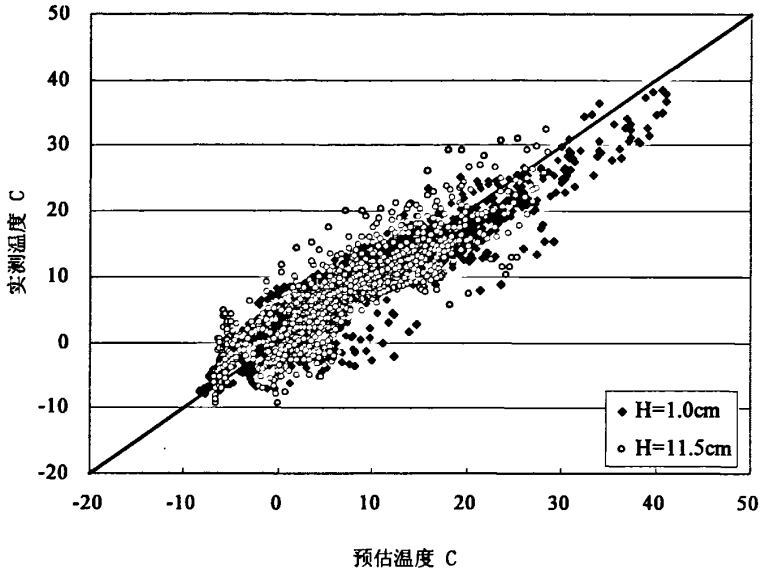


图 4.6 乌鲁木齐模型不同深度预估温度和实测温度比较

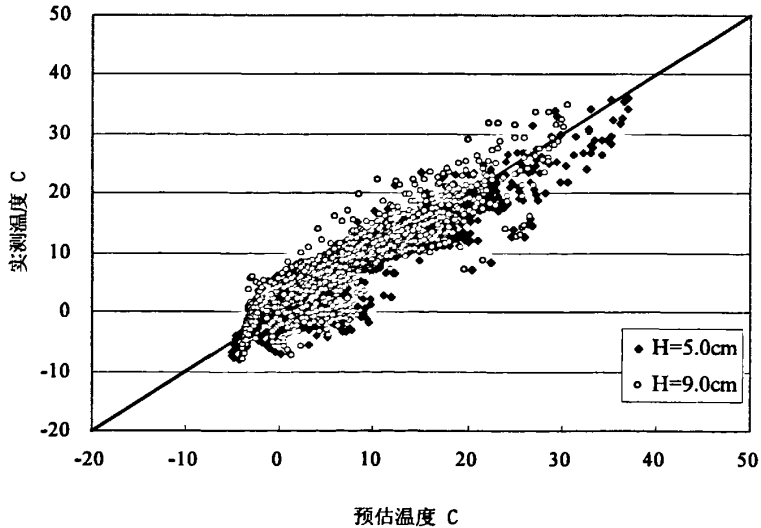


图 4.7 乌鲁木齐模型不同深度预估温度和实测温度比较

从图中可以看出,对于上海地区的新模型在深度较浅的位置($H=3.9\text{cm}$),大部分的点都位于直线 $y=x$ 之上,而对于深度较深的位置($H=14.5\text{cm}$),大部分的点都位于与直线 $y=x$ 之下;而对于位于中等深度($H=3.9\text{cm}$ 和 12.5cm),大部分的点都均匀的分布在直线 $y=x$ 的两侧。对于乌鲁木齐地区的模型,也存在同样的规律。

这也说明采用新的插值温度数据之后,虽然 tongji-07 回归模型可以均匀的反应沥青路面各个深度处的温度与气象资料之间的相关关系,但是此模型只能反映中等深度处的温度状况;对于较浅位置,模型的预估温度要小于实测温度,而对于较深的位置,模型的预估温度要大于实测温度。

综上所述, Tongji 模型采用前 n 小时平均气温 (T_m) 和 n 小时平均太阳辐射强度的平方 (Q_n^2) 来反映沥青路面各个深度处的路面温度是一种较为简化的方法,其中忽略了对于不同因素对于不同深度处的影响可能并不相同,更多的是反映外部因素对于各个深度温度的平均影响效果。虽然从整体深度范围内来说,模型的回归结果具有较高的相关系数和标准差,但是针对于各个深度处的实测温度和预估温度的对比也说明了,在深度较浅和深度较深的位置,预估值和实测值之间仍存在较大的差距。因此有必要从根本上改变 Tongji 模型的函数形式,重新选择新的自变量,以建立可以反映不同深度处温度状况的更为精细的统计回归模型。

4.3 基于互相关分析的沥青路面温度场统计预估模型

4.3.1 沥青路面实测温度与环境因素的互相关分析

根据前文所述可以认为在以往的沥青路面温度场预估模型的分析过程中存在以下几个问题:

- (1) 过去的数据大部分集中在沥青路面的中上面层,因此其分析结果不能代表整个沥青面层内温度状况与环境因素的关系,如气温、太阳辐射等;
- (2) 将各个深度处的数据放在一起与环境因素进行相关分析,不能详细考虑沿着深度的变化,存在的时间延迟问题。实际情况,对于不同深度处的沥青路面温度状况其主要影响因素的时间也应该是

不同的，越深位置与其主要环境因素之间的时间间隔越大，约浅的位置与其主要环境因素的时间间隔越短；

- (3) 对于自变量的选择过于简单，仅仅考虑了从当前时刻开始前 N 小时的平均气温和前 N 小时的平均太阳辐射对于沥青路面温度状况的影响；而实际上，对于不同深度路面温度的主要影响因素并非都是从当前时刻开始的，应该是随着深度的增加，平均太阳辐射或者平均气温的起始时间也应该发生延迟。例如，对于沥青路面表面的温度来说，其主要影响自变量可能是当前时刻到 5 小时前这段时间内的平均气温，但是对于沥青层底面的温度来说，其主要影响自变量可能为从 3 小时前开始到 8 小时前这段时间内的平均气温；

针对以上问题，在新模型建立过程中采用了如下措施进行改进：

- (1) 选择了插值温度样本数据，使得路面温度样本可以反映各个深度处的温度状况；
- (2) 同时在进行相关分析的时候，将不同深度处的数据分别进行分析，考虑其与环境因素之间的相关关系，这样可使使得我们针对不同的深度建立不同的预估模型，从而更为准确的反映实际情况；
- (3) 将原研究中的自变量进行了扩充，在原先的研究仅仅考虑了从当前时刻开始不同时间间隔 N 内的平均气温 T_{aN} 和太阳辐射 Q_{aN} ($N \leq 7$)，而本文则将自变量的选择范围进行进一步的扩充，采用如下环境因素 $T_{a(N,M)}$ 、 $Q_{(N,M)}$ ，定义如下：

$T_{a(N,M)}$ ——代表从 N 小时前为时间起点，往前 M 小时内气温的平均值，其计算公式为：

$$T_{a(N,M)} = \frac{1}{M} (T_{aN} + T_{aN+1} + \dots + T_{aN-M+1}) \quad (4.29)$$

式中：

T_{ai} ——代表 i 小时前的气温；

N ——起始时间；

M ——时间间隔。

$Q_{(N,M)}$ ——代表从 N 小时前为时间起点，往前 M 小时内太阳辐射的平均值， N 被称为起始时间， M 被称为时间间隔，其计算公式为：

$$Q_{(N,M)} = \frac{1}{M}(Q_N + Q_{N+1} + \dots + Q_{N+M-1}) \quad (4.30)$$

式中:

Q_i ——代表 i 小时前的太阳辐射;

N ——起始时间;

M ——时间间隔。

对于本文中所采用的环境自变量 $T_{a(N,M)}$ 更为直观的物理定义, 如图 4.8 所示:

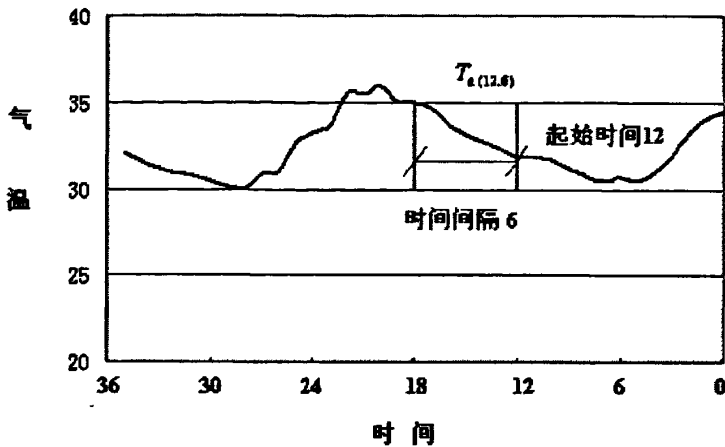


图 4.8 环境自变量定义图示

在分析过程采用互相关分析方法^[56], 所谓互相关分析 (Cross-Correlation Analysis) 是用于分析两个数据序列之间相关关系的标准方法, 对于两个序列 $x(i)$ 和 $y(i)$ ($i=1,2,\dots,n-1$), 其在时间延迟 d ($d=0,1,\dots,n-1$) 时的互相关系数序列 $r(d)$ 可以定义为:

$$r(d) = \frac{\sum_i [(x(i) - \bar{x}) \cdot (y(i-d) - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_i (x(i) - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_i (y(i-d) - \bar{y})^2}} \quad (4.31)$$

式中:

$x(i)$, $y(i)$ ——数据序列, ($i=1,2,\dots,n-1$);

\bar{x} , \bar{y} ——数据序列 $x(i)$, $y(i)$ 的平均值;

d ——互相关分析时数据序列 $x(i)$, $y(i)$ 之间的时间间隔, 其必需满足条件 $i-d < 0$ 或者 $i-d \geq n$;

$r(d)$ ——互相关系数序列;

例如对于图 4.9 中的 2 个数据序列 $x(i)$, $y(i)$ 来说, 其 4000 个单位时间延迟的相关分析结果如图 4.10 中所示, 其中相关系数最大值出现在 40 个单位时间。

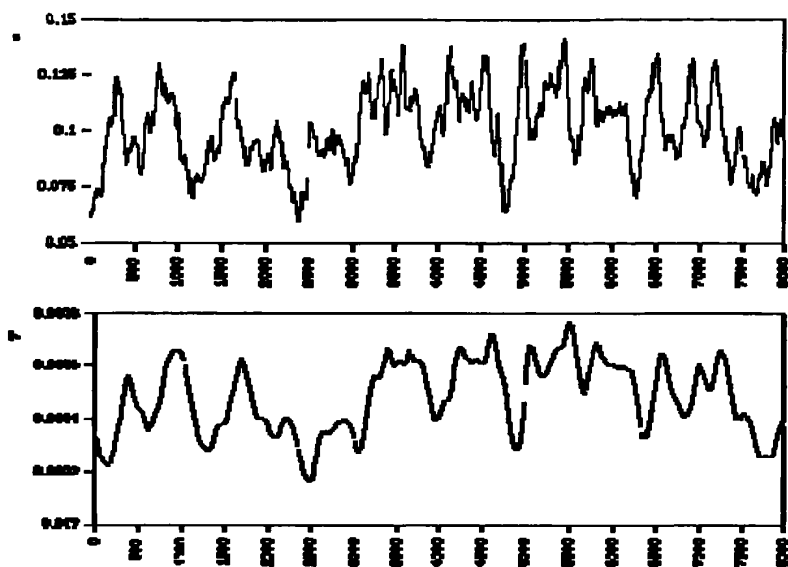


图 4.9 互相关数据序列

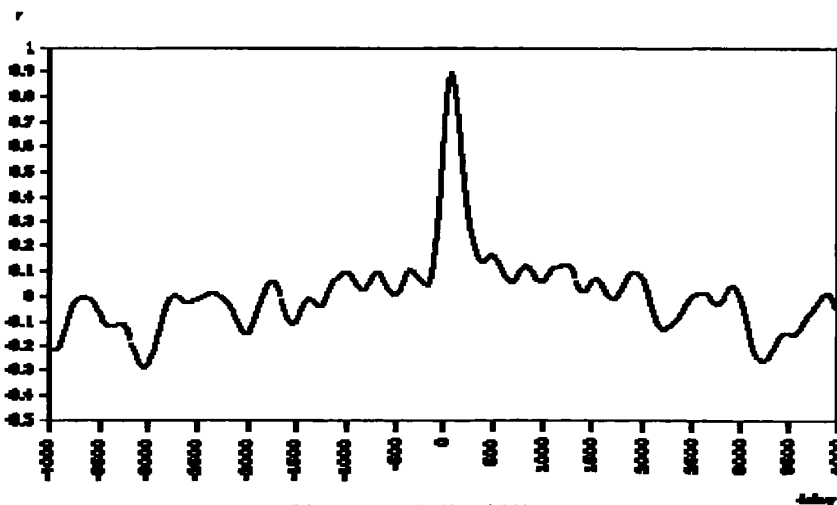


图 4.10 互相关分析结果

根据本文第二章沥青路面温度场实测研究的成果, 可以将沥青路面各个深度处的实测温度结果和相对应的气温数据和太阳辐射数据都视为不同的数据序列, 根据互相关分析理论即可以得到不同深度处的温度数据与其它深度处的温

度数据以及气温和太阳辐射数据之间在不同的时间延迟与时间间隔情况下的相关关系，(在这里时间延迟即为 $T_{a(N,M)}$ 、 $Q_{(N,M)}$ 中的 N，时间间隔即为 M,) 从而为新的沥青路面温度场预估模型选择合适的自变量。

本文根据互相关分析 (Cross-Correlation Analysis) 的基本原理编制了沥青路面温度场不同深度处的温度数据与其它深度处的温度数据以及和气温数据和太阳辐射数据在不同的时间延迟/时间间隔情况下的互相关分析程序，如附录二中所示，并对不同地区沥青路面温度数据和气象环境因素进行了互相关分析：

1. 上海地区 2002 年 8 月数据

采用上海地区 2002 年 8 月份实测沥青路面温度插值样本温度数据和相应的气温与太阳辐射资料，进行了互相关分析。首先分析了一小时内平均气温和平均太阳辐射辐射与不同深度处的路面温度之间的互相关关系，时间延迟从 0 小时~120 小时，具体结果如图 4.11 图 4.12 所示：

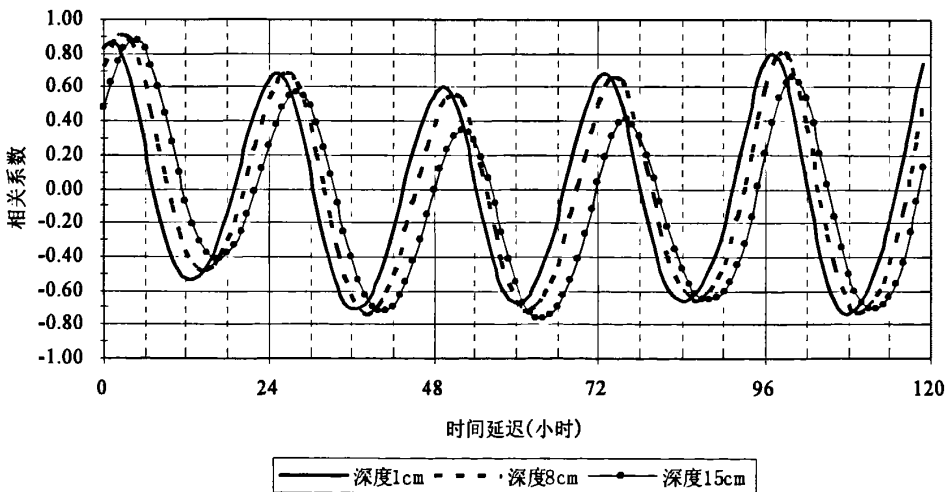


图 4.11 上海地区2002年8月路面温度与气温的互相关分析结果

从图中可知，在较长时间延迟（起始时间）0~120 小时的分析范围内，上海地区 2002 年 8 月沥青路面各个深度处的温度数据与小时气温数据之间存在较好的相关关系，并且与路面温度相关性最强的起始时间出现在 0~7 小时的范围之内。

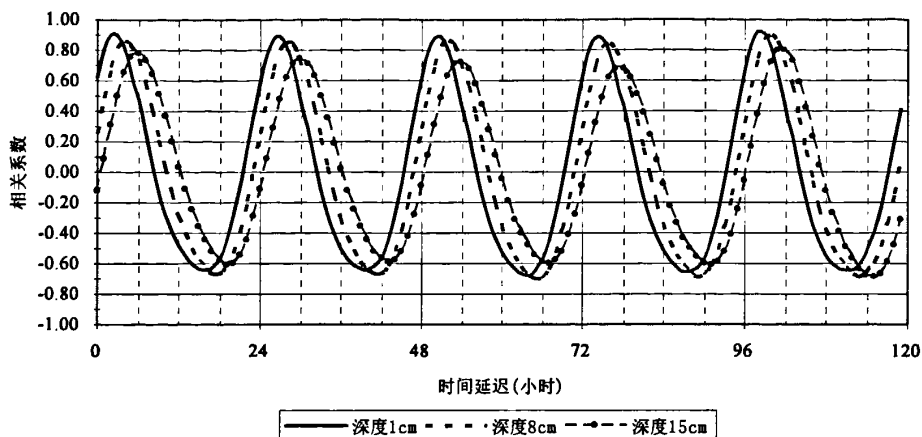


图 4.12 上海地区2002年8月路面温度与太阳辐射的互相关分析结果

将各个深度处路面温度与小时气温在起始时间为 0~7 小时的互相关分析结果列于图 4.13 之中，将各个深度处路面温度与小时太阳辐射在起始时间为 0~7 小时的互相关分析结果列于图 4.14 之中：

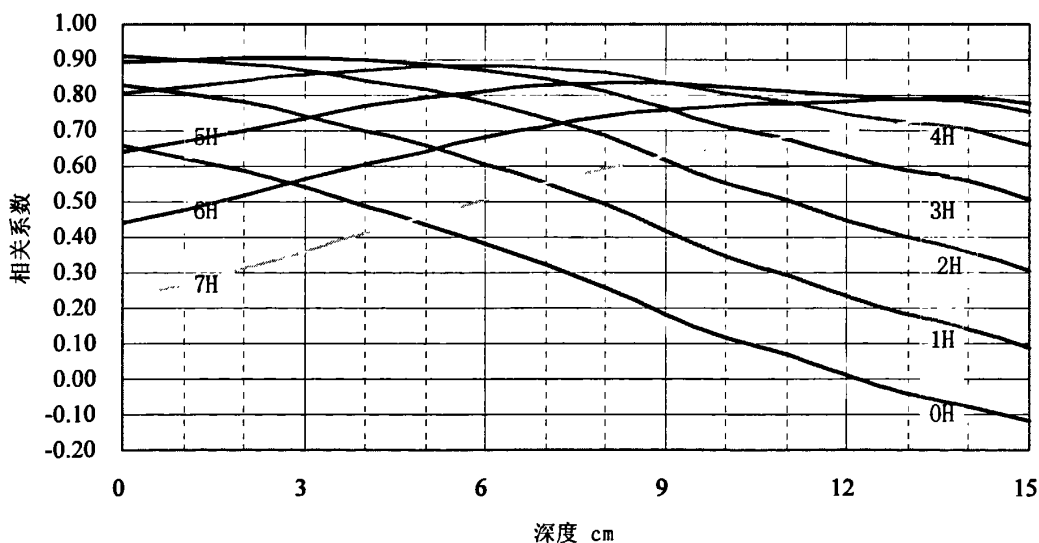


图 4.13 上海2002年不同深度路面温度与1小时平均太阳辐射0-7小时(H)延时互相关分析结果

为了简单起见对于沥青路面温度深度处的路面温度与其他不同时间间隔（如 2 小时~5 小时）的气温和太阳辐射平均值的互相关分析结果在此就不再一一详细列出。采用不同的时间间隔进行互相关分析，不同深度处沥青路面温度影响最为显著的自变量以及此时的相关系数如表 4.18 表 4.19 中所示。

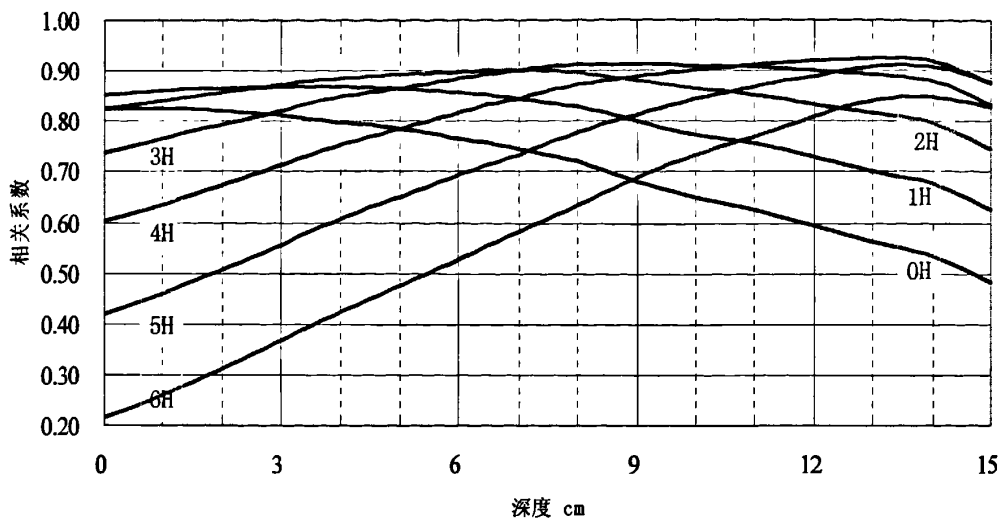


图 4.14 上海2002年不同深度路面温度与1小时平均气温0-7小时(H)延时互相关分析结果

对于不同深度处的路面温度的分析结果，将其中相关系数最大或者与最大值比较接近的不同时间间隔的平均气温自变量和太阳辐射自变量挑选出来，作为将来温度预估模型变量选择的基本依据之一。

表 4.18 上海 2002 年不同时间间隔的平均气温与不同深度处路面温度的互相关分析结果

时间间隔	1 小时		2 小时		3 小时		4 小时		5 小时	
深度	变量	相关系数	变量	相关系数	变量	相关系数	变量	相关系数	变量	相关系数
0cm	T(1,1)	0.853	T(0,2)	0.850	T(0,3)	0.858	T(0,4)	0.851	T(0,5)	0.826
1cm	T(1,1)	0.861	T(1,2)	0.862	T(0,3)	0.867	T(0,4)	0.864	T(0,5)	0.844
2cm	T(1,1)	0.867	T(1,2)	0.873	T(0,3)	0.872	T(0,4)	0.875	T(0,5)	0.861
3cm	T(2,1)	0.873	T(1,2)	0.882	T(1,3)	0.879	T(0,4)	0.885	T(0,5)	0.877
4cm	T(2,1)	0.885	T(1,2)	0.888	T(1,3)	0.891	T(0,4)	0.891	T(0,5)	0.890
5cm	T(2,1)	0.892	T(2,2)	0.890	T(1,3)	0.899	T(1,4)	0.893	T(0,5)	0.899
6cm	T(2,1)	0.897	T(2,2)	0.902	T(1,3)	0.904	T(1,4)	0.905	T(0,5)	0.904
7cm	T(3,1)	0.900	T(2,2)	0.911	T(1,3)	0.907	T(1,4)	0.915	T(0,5)	0.908
8cm	T(3,1)	0.911	T(2,2)	0.914	T(2,3)	0.918	T(1,4)	0.920	T(1,5)	0.919
9cm	T(3,1)	0.912	T(3,2)	0.912	T(2,3)	0.920	T(2,4)	0.917	T(1,5)	0.922

第 4 章 沥青路面温度场统计预估方法研究

10cm	T(3,1)	0.908	T(3,2)	0.916	T(2,3)	0.916	T(2,4)	0.922	T(1,5)	0.920
11cm	T(4,1)	0.914	T(3,2)	0.921	T(3,3)	0.921	T(2,4)	0.928	T(2,5)	0.925
12cm	T(4,1)	0.921	T(3,2)	0.922	T(3,3)	0.929	T(3,4)	0.923	T(2,5)	0.934
13cm	T(4,1)	0.926	T(4,2)	0.928	T(3,3)	0.935	T(3,4)	0.935	T(2,5)	0.940
14cm	T(4,1)	0.918	T(4,2)	0.924	T(3,3)	0.927	T(3,4)	0.931	T(2,5)	0.933
15cm	T(4,1)	0.877	T(4,2)	0.887	T(3,3)	0.886	T(3,4)	0.894	T(2,5)	0.891

表 4.19 上海 2002 年不同时间间隔平均太阳辐射与不同深度处路面温度的互相关分析结果

时间间隔	1 小时		2 小时		3 小时		4 小时		5 小时	
深度	变量	相关系数	变量	相关系数	变量	变量	相关系数	变量	相关系数	变量
0cm	Q(2,1)	0.913	Q(2,2)	0.926	Q(1,3)	0.927	Q(1,4)	0.937	Q(0,5)	0.929
1cm	Q(2,1)	0.903	Q(2,2)	0.924	Q(2,3)	0.922	Q(1,4)	0.935	Q(1,5)	0.930
2cm	Q(3,1)	0.905	Q(2,2)	0.918	Q(2,3)	0.924	Q(1,4)	0.929	Q(1,5)	0.932
3cm	Q(3,1)	0.904	Q(2,2)	0.908	Q(2,3)	0.923	Q(1,4)	0.918	Q(1,5)	0.930
4cm	Q(3,1)	0.899	Q(3,2)	0.907	Q(2,3)	0.918	Q(2,4)	0.920	Q(1,5)	0.924
5cm	Q(3,1)	0.889	Q(3,2)	0.905	Q(2,3)	0.906	Q(2,4)	0.918	Q(1,5)	0.913
6cm	Q(4,1)	0.883	Q(3,2)	0.898	Q(3,3)	0.901	Q(2,4)	0.911	Q(2,5)	0.912
7cm	Q(4,1)	0.879	Q(3,2)	0.884	Q(3,3)	0.897	Q(2,4)	0.896	Q(2,5)	0.907
8cm	Q(4,1)	0.866	Q(4,2)	0.872	Q(3,3)	0.883	Q(3,4)	0.885	Q(2,5)	0.892
9cm	Q(4,1)	0.836	Q(4,2)	0.854	Q(3,3)	0.852	Q(3,4)	0.866	Q(3,5)	0.863
10cm	Q(5,1)	0.823	Q(4,2)	0.833	Q(4,3)	0.840	Q(3,4)	0.844	Q(3,5)	0.851
11cm	Q(5,1)	0.814	Q(4,2)	0.816	Q(4,3)	0.830	Q(4,4)	0.829	Q(3,5)	0.841
12cm	Q(5,1)	0.799	Q(5,2)	0.808	Q(4,3)	0.815	Q(4,4)	0.823	Q(3,5)	0.825
13cm	Q(5,1)	0.789	Q(5,2)	0.806	Q(5,3)	0.806	Q(4,4)	0.821	Q(4,5)	0.820
14cm	Q(6,1)	0.795	Q(5,2)	0.808	Q(5,3)	0.814	Q(4,4)	0.823	Q(4,5)	0.828
15cm	Q(6,1)	0.775	Q(5,2)	0.781	Q(5,3)	0.794	Q(4,4)	0.795	Q(4,5)	0.807

以上气温互相关分析结果表明：

- (1) 与路面温度相关度最高的气温为 3-5 小时内平均气温；
- (2) 对于沥青路面上面层 0-4cm 的深度范围之内，其最为显著的气温变量为 T(0,3)或者 T(0,4)，即以当前时刻为起始时间，时间间隔 3 或 4 小时内的平均气温值；
- (3) 对于深度范围为 5-9cm 范围内的路面温度，其最为显著的气温变量为 T(1,3)或者 T(1,4)，即以 1 小时前为起始时间，时间间隔为 3 或者 4 小时内的平均值气温；

- (4) 对于深度范围为 10-14cm 范围内的路面温度, 其最为显著的气温变量为 $T(2,4)$ 或者 $T(2,5)$, 也即即以 2 小时前为起始时间, 时间间隔为 4 或者 5 小时内的平均值气温;
- (5) 虽然对于 15cm 深度处的路面温度, 其最为显著的温度自变量为 $T(3,4)$, 但是其相关系数与 $T(2,4)$ 的相关系数相差不大, 因此可以将其替换为 $T(2,4)$, 以保持和其他深度路面温度规律一致。

以上太阳辐射数据互相关分析结果表明:

- (1) 绝大部分深度处的路面温度最为显著的变量是 5 小时内太阳辐射平均值, 只有部分深度处是 4 小时内的太阳辐射平均值, 但是在这些位置处, 其相关系数与 5 小时内太阳辐射平均值的相关系数, 相差不大 (<0.01)。因此可以将其统一规定为 5 小时内的太阳辐射平均值;
- (2) 在表面深度为 0 处, 其最为显著的太阳辐射为 $Q(0,5)$, 而对于 1cm-5cm 处, 其最为显著的变量为 $Q(1,5)$; 6-8cm 处, 显著变量为 $Q(2,5)$; 9-12cm 处显著变量为 $Q(3,5)$; 对于大于 12cm 的位置, 显著自变量为 $Q(4,5)$ 。

2. 上海地区 2003 年 11 月-12 月数据

将上海地区 2003 年 11 月-12 月各个深度处路面温度与不同时间间隔和不同起始时间的气温和太阳辐射平均值的互相关分析结果进行比较, 不同深度处沥青路面温度影响最为显著的自变量以及此时的相关系数如表 4.20 和表 4.21 中所示:

表 4.20 上海 2003 年不同时间间隔的平均气温与不同深度处路面温度的互相关分析结果

时间间隔	1 小时		2 小时		3 小时		4 小时		5 小时	
	变量	相关系数	变量	相关系数	变量	相关系数	变量	相关系数	变量	相关系数
0cm	$T(1,1)$	0.916	$T(0,2)$	0.918	$T(0,3)$	0.920	$T(0,4)$	0.915	$T(0,5)$	0.906
1cm	$T(1,1)$	0.924	$T(0,2)$	0.925	$T(0,3)$	0.928	$T(0,4)$	0.927	$T(0,5)$	0.920
2cm	$T(1,1)$	0.926	$T(1,2)$	0.927	$T(0,3)$	0.931	$T(0,4)$	0.931	$T(0,5)$	0.928
3cm	$T(1,1)$	0.923	$T(1,2)$	0.925	$T(0,3)$	0.928	$T(0,4)$	0.931	$T(0,5)$	0.930
4cm	$T(1,1)$	0.917	$T(1,2)$	0.921	$T(0,3)$	0.922	$T(0,4)$	0.927	$T(0,5)$	0.928
5cm	$T(2,1)$	0.913	$T(1,2)$	0.916	$T(1,3)$	0.919	$T(0,4)$	0.923	$T(0,5)$	0.926

第 4 章 沥青路面温度场统计预估方法研究

6cm	T(2,1)	0.909	T(1,2)	0.911	T(1,3)	0.915	T(0,4)	0.917	T(0,5)	0.922
7cm	T(2,1)	0.903	T(2,2)	0.905	T(1,3)	0.909	T(1,4)	0.913	T(0,5)	0.917
8cm	T(2,1)	0.895	T(2,2)	0.899	T(1,3)	0.902	T(1,4)	0.907	T(0,5)	0.910
9cm	T(3,1)	0.888	T(2,2)	0.892	T(2,3)	0.896	T(1,4)	0.900	T(1,5)	0.904
10cm	T(3,1)	0.881	T(3,2)	0.884	T(2,3)	0.889	T(2,4)	0.892	T(1,5)	0.897
11cm	T(3,1)	0.873	T(3,2)	0.878	T(2,3)	0.881	T(2,4)	0.886	T(1,5)	0.890
12cm	T(4,1)	0.867	T(3,2)	0.871	T(3,3)	0.875	T(2,4)	0.880	T(2,5)	0.885
13cm	T(4,1)	0.863	T(3,2)	0.867	T(3,3)	0.872	T(2,4)	0.876	T(2,5)	0.882
14cm	T(4,1)	0.859	T(4,2)	0.862	T(3,3)	0.867	T(2,4)	0.871	T(2,5)	0.878
15cm	T(4,1)	0.854	T(4,2)	0.857	T(3,3)	0.862	T(3,4)	0.867	T(2,5)	0.872

表 4.21 上海 2003 年不同时间间隔平均太阳辐射与不同深度处路面温度的互相关分析结果

时间间隔	1 小时		2 小时		3 小时		4 小时		5 小时	
深度	变量	相关系数	变量	相关系数	变量	相关系数	变量	相关系数	变量	相关系数
0cm	Q(2,1)	0.333	Q(2,2)	0.339	Q(1,3)	0.336	Q(1,4)	0.334	Q(0,5)	0.324
1cm	Q(2,1)	0.291	Q(2,3)	0.299	Q(1,3)	0.292	Q(1,4)	0.293	Q(0,5)	0.281
2cm	Q(3,1)	0.250	Q(2,4)	0.256	Q(2,3)	0.250	Q(1,4)	0.250	Q(1,5)	0.241
3cm	Q(3,1)	0.216	Q(2,5)	0.218	Q(2,3)	0.216	Q(1,4)	0.212	Q(1,5)	0.207
4cm	Q(3,1)	0.188	Q(2,2)	0.187	Q(2,3)	0.187	Q(1,4)	0.180	Q(1,5)	0.178
5cm	Q(3,1)	0.166	Q(3,2)	0.164	Q(2,3)	0.164	Q(2,4)	0.159	Q(1,5)	0.154
6cm	Q(3,1)	0.146	Q(3,2)	0.147	Q(2,3)	0.144	Q(2,4)	0.141	Q(1,5)	0.134
7cm	Q(3,1)	0.125	Q(3,2)	0.128	Q(2,3)	0.122	Q(2,4)	0.122	Q(2,5)	0.115
8cm	Q(4,1)	0.107	Q(3,2)	0.108	Q(3,3)	0.105	Q(2,4)	0.101	Q(2,5)	0.097
9cm	Q(4,1)	0.089	Q(4,2)	0.086	Q(3,3)	0.087	Q(3,4)	0.081	Q(2,5)	0.078
10cm	Q(4,1)	0.071	Q(4,2)	0.071	Q(3,3)	0.068	Q(3,4)	0.065	Q(2,5)	0.058
11cm	Q(5,1)	0.056	Q(4,2)	0.056	Q(4,3)	0.053	Q(3,4)	0.050	Q(3,5)	0.045
12cm	Q(5,1)	0.046	Q(4,2)	0.044	Q(4,3)	0.043	Q(3,4)	0.038	Q(3,5)	0.035
13cm	Q(5,1)	0.039	Q(4,2)	0.037	Q(4,3)	0.036	Q(4,4)	0.031	Q(3,5)	0.027
14cm	Q(5,1)	0.033	Q(5,2)	0.030	Q(4,3)	0.029	Q(4,4)	0.025	Q(3,5)	0.020
15cm	Q(5,1)	0.024	Q(5,2)	0.023	Q(4,3)	0.020	Q(4,4)	0.017	Q(3,5)	0.011

以上气温数据互相关分析结果表明:

- (1) 与路面温度相关度最高的气温为时间间隔 3-5 小时内平均气温,但是就绝大部分深度处的路面温度都是与时间间隔为 5 小时的平均气温相关度最高,只有位于 0-3cm 深度处的路面温度与时间间隔

为 3-4 小时的平均气温最为相关,

- (2) 对于上面层深度 0-3cm 范围内的路面温度, 其相关系数最高的气温变量为 $T(0,3)$ 或者 $T(0,4)$; 对于 4-8cm 深度范围内的, 最显著的气温变量为 $T(0,5)$; 对于 9-11cm 深度范围内最显著的气温变量为 $T(1,5)$; 对于 12-15cm 深度范围内最显著的气温变量为 $T(2,5)$ 。

以上太阳辐射数据互相关分析结果表明:

- (1) 其与太阳辐射的互相关分析结果比较异常, 与路面温度相关度最高的太阳辐射是时间间隔为 1-2 小时内太阳辐射平均值;
- (2) 对于深度 0-8cm 范围内的路面温度, 其相关系数最高的太阳辐射变量为 $Q(2,2)$ 或者 $Q(3,2)$; 对于深度范围为 9-15cm 的路面温度, 其最为显著的太阳辐射自变量为 $Q(4,1)$ 或者 $Q(5,1)$; 该段分析期内, 太阳辐射与路面温度相关系数普遍偏低, 都小于 <0.35 。

3. 乌鲁木齐地区 2003 年 11 月数据

将乌鲁木齐地区 2003 年 4 月各个深度处路面温度与不同时间间隔 (如 1 小时~5 小时) 的气温和太阳辐射平均值的互相关分析结果进行比较, 不同深度处沥青路面温度影响最为显著的自变量以及此时的相关系数如表 4.22 和表 4.23 中所示:

表 4.22 乌鲁木齐 2003 年不同时间间隔平均气温与不同深度处路面温度的互相关分析结果

时间间隔	1 小时		2 小时		3 小时		4 小时		5 小时	
深度	变量	相关系数	变量	相关系数	变量	相关系数	变量	相关系数	变量	相关系数
0cm	$T(0,1)$	0.834	$T(0,2)$	0.822	$T(0,3)$	0.806	$T(0,4)$	0.788	$T(0,5)$	0.768
1cm	$T(0,1)$	0.849	$T(0,2)$	0.839	$T(0,3)$	0.824	$T(0,4)$	0.807	$T(0,5)$	0.788
2cm	$T(0,1)$	0.859	$T(0,2)$	0.850	$T(0,3)$	0.837	$T(0,4)$	0.821	$T(0,5)$	0.803
3cm	$T(0,1)$	0.865	$T(0,2)$	0.857	$T(0,3)$	0.845	$T(0,4)$	0.830	$T(0,5)$	0.812
4cm	$T(0,1)$	0.869	$T(0,2)$	0.863	$T(0,3)$	0.853	$T(0,4)$	0.839	$T(0,5)$	0.823
5cm	$T(0,1)$	0.873	$T(0,2)$	0.870	$T(0,3)$	0.862	$T(0,4)$	0.851	$T(0,5)$	0.837
6cm	$T(0,1)$	0.877	$T(0,2)$	0.875	$T(0,3)$	0.869	$T(0,4)$	0.860	$T(0,5)$	0.848
7cm	$T(0,1)$	0.878	$T(0,2)$	0.878	$T(0,3)$	0.875	$T(0,4)$	0.868	$T(0,5)$	0.858
8cm	$T(0,1)$	0.877	$T(0,2)$	0.879	$T(0,3)$	0.877	$T(0,4)$	0.873	$T(0,5)$	0.865
9cm	$T(1,1)$	0.873	$T(0,2)$	0.875	$T(0,3)$	0.875	$T(0,4)$	0.871	$T(0,5)$	0.865
10cm	$T(1,1)$	0.874	$T(0,2)$	0.875	$T(0,3)$	0.876	$T(0,4)$	0.873	$T(0,5)$	0.869
12cm	$T(1,1)$	0.865	$T(1,2)$	0.869	$T(1,3)$	0.869	$T(0,4)$	0.870	$T(0,5)$	0.870

表 4.23 乌鲁木齐 2003 年不同时间间隔平均太阳辐射与不同深度处路面温度的互相关分析结果

时间间隔	1 小时		2 小时		3 小时		4 小时		5 小时	
深度	变量	相关系数	变量	相关系数	变量	相关系数	变量	相关系数	变量	相关系数
0cm	Q(2,1)	0.694	Q(3,2)	0.694	Q(3,3)	0.705	Q(3,4)	0.706	Q(2,5)	0.717
1cm	Q(2,1)	0.691	Q(4,2)	0.693	Q(3,3)	0.703	Q(3,4)	0.707	Q(2,5)	0.714
2cm	Q(2,1)	0.682	Q(4,2)	0.688	Q(3,3)	0.693	Q(3,4)	0.702	Q(2,5)	0.705
3cm	Q(2,1)	0.670	Q(4,2)	0.679	Q(3,3)	0.681	Q(3,4)	0.692	Q(3,5)	0.694
4cm	Q(3,1)	0.651	Q(4,2)	0.661	Q(4,3)	0.664	Q(3,4)	0.673	Q(3,5)	0.679
5cm	Q(3,1)	0.630	Q(4,2)	0.633	Q(4,3)	0.643	Q(3,4)	0.645	Q(3,5)	0.657
6cm	Q(3,1)	0.605	Q(5,2)	0.608	Q(4,3)	0.617	Q(4,4)	0.623	Q(3,5)	0.630
7cm	Q(3,1)	0.576	Q(5,2)	0.584	Q(4,3)	0.588	Q(4,4)	0.598	Q(4,5)	0.601
8cm	Q(4,1)	0.550	Q(5,2)	0.556	Q(5,3)	0.562	Q(4,4)	0.569	Q(4,5)	0.578
9cm	Q(4,1)	0.542	Q(5,2)	0.545	Q(5,3)	0.554	Q(4,4)	0.558	Q(4,5)	0.569
10cm	Q(4,1)	0.524	Q(6,2)	0.527	Q(5,3)	0.536	Q(5,4)	0.542	Q(4,5)	0.550
12cm	Q(5,1)	0.452	Q(6,2)	0.455	Q6-8	0.463	Q(5,4)	0.467	Q(4,5)	0.464

以上乌鲁木齐地区数据分析结果表明：

- (1) 与路面温度相关的气温主要是时间间隔 1-2 小时的平均气温；
- (2) 深度 0-7cm 范围内路面温度显著变量为 T(0,1)；对于深度 8-12cm 范围内，其显著变量为 T(0,2)，但是此时其相应的相关系数仅比采用 T(0,1)大 0.005 左右；因此可以考虑在整个深度范围内采用时间间隔为 1 小时的平均气温；0-8cm 为 T(0,1)，9-12cm 为 T(1,1)；
- (3) 与路面温度显著相关的太阳辐射为 5 小时内平均太阳辐射，
- (4) 深度 0-2cm 范围内路面温度显著变量为 Q2-6；深度 3-6cm 范围内路面温度显著变量为 Q3-7；深度 7-12cm 范围内显著变量为 Q4-8。

4. 唐山地区 2004 年 8 月数据

将唐山地区 2004 年 8 月各个深度处路面温度与不同时间间隔（如 1 小时~5 小时）的气温和太阳辐射平均值的互相关分析结果进行比较，不同深度处沥青路面温度影响最为显著的自变量以及此时的相关系数，如表 4.24 和表 4.25 中所示：

第4章 沥青路面温度场统计预估方法研究

表 4.24 唐山 2004 年不同时间间隔的平均气温与不同深度处路面温度的互相关分析结果

时间间隔	1 小时		2 小时		3 小时		4 小时		5 小时	
	深度	变量	相关系数	变量	相关系数	变量	相关系数	变量	相关系数	变量
0cm	T(0,1)	0.854	T(0,2)	0.838	T(0,3)	0.809	T(0,4)	0.770	T(0,5)	0.722
1cm	T(0,1)	0.862	T(0,2)	0.850	T(0,3)	0.824	T(0,4)	0.788	T(0,5)	0.743
2cm	T(0,1)	0.870	T(0,2)	0.861	T(0,3)	0.840	T(0,4)	0.807	T(0,5)	0.766
3cm	T(0,1)	0.876	T(0,2)	0.871	T(0,3)	0.854	T(0,4)	0.826	T(0,5)	0.789
4cm	T(0,1)	0.880	T(0,2)	0.880	T(0,3)	0.868	T(0,4)	0.845	T(0,5)	0.812
5cm	T(0,1)	0.882	T(0,2)	0.888	T(0,3)	0.881	T(0,4)	0.863	T(0,5)	0.835
6cm	T(1,1)	0.885	T(0,2)	0.887	T(0,3)	0.887	T(0,4)	0.874	T(0,5)	0.852
7cm	T(1,1)	0.884	T(0,2)	0.881	T(0,3)	0.886	T(0,4)	0.880	T(0,5)	0.863
8cm	T(1,1)	0.884	T(1,2)	0.882	T(0,3)	0.886	T(0,4)	0.883	T(0,5)	0.869
9cm	T(1,1)	0.882	T(1,2)	0.885	T(0,3)	0.885	T(0,4)	0.885	T(0,5)	0.875
10cm	T(1,1)	0.888	T(1,2)	0.893	T(0,3)	0.891	T(0,4)	0.895	T(0,5)	0.889
11cm	T(2,1)	0.892	T(1,2)	0.898	T(1,3)	0.897	T(0,4)	0.900	T(0,5)	0.898
12cm	T(2,1)	0.894	T(1,2)	0.896	T(1,3)	0.899	T(0,4)	0.899	T(0,5)	0.901
13cm	T(2,1)	0.892	T(1,2)	0.890	T(1,3)	0.896	T(0,4)	0.894	T(0,5)	0.899
14cm	T(2,1)	0.887	T(2,2)	0.888	T(1,3)	0.892	T(1,4)	0.893	T(0,5)	0.895
15cm	T(2,1)	0.881	T(2,2)	0.885	T(1,3)	0.886	T(1,4)	0.890	T(0,5)	0.889

表 4.25 唐山 2004 年不同时间间隔平均太阳辐射与不同深度处路面温度的互相关分析结果

时间间隔	1 小时		2 小时		3 小时		4 小时		5 小时	
	深度	变量	相关系数	变量	相关系数	变量	相关系数	变量	相关系数	变量
0cm	Q(2,1)	0.901	Q(1,2)	0.900	Q(1,3)	0.913	Q(1,4)	0.908	Q(0,5)	0.919
1cm	Q(2,1)	0.893	Q(2,2)	0.894	Q(1,3)	0.905	Q(1,4)	0.906	Q(0,5)	0.912
2cm	Q(2,1)	0.884	Q(2,2)	0.890	Q(1,3)	0.896	Q(1,4)	0.901	Q(0,5)	0.902
3cm	Q(2,1)	0.871	Q(2,2)	0.883	Q(1,3)	0.883	Q(1,4)	0.894	Q(1,5)	0.890
4cm	Q(3,1)	0.861	Q(2,2)	0.872	Q(2,3)	0.874	Q(1,4)	0.883	Q(1,5)	0.885
5cm	Q(3,1)	0.853	Q(2,2)	0.857	Q(2,3)	0.866	Q(1,4)	0.867	Q(1,5)	0.877
6cm	Q(3,1)	0.842	Q(3,2)	0.844	Q(2,3)	0.854	Q(2,4)	0.857	Q(1,5)	0.865
7cm	Q(3,1)	0.827	Q(3,2)	0.837	Q(2,3)	0.839	Q(2,4)	0.849	Q(1,5)	0.849
8cm	Q(4,1)	0.815	Q(3,2)	0.829	Q(3,3)	0.830	Q(2,4)	0.841	Q(2,5)	0.844
9cm	Q(4,1)	0.809	Q(3,2)	0.818	Q(3,3)	0.824	Q(2,4)	0.830	Q(2,5)	0.838
10cm	Q(4,1)	0.792	Q(3,2)	0.796	Q(3,3)	0.806	Q(2,4)	0.808	Q(2,5)	0.820
11cm	Q(4,1)	0.770	Q(4,2)	0.772	Q(3,3)	0.784	Q(3,4)	0.787	Q(2,5)	0.797
12cm	Q(4,1)	0.751	Q(4,3)	0.757	Q(3,3)	0.764	Q(3,4)	0.772	Q(2,5)	0.777

第 4 章 沥青路面温度场统计预估方法研究

13cm	Q(4,1)	0.737	Q(4,4)	0.747	Q(3,3)	0.750	Q(3,4)	0.761	Q(3,5)	0.764
14cm	Q(5,1)	0.726	Q(4,5)	0.736	Q(4,3)	0.740	Q(3,4)	0.749	Q(3,5)	0.756
15cm	Q(5,1)	0.716	Q(4,1)-9	0.721	Q(4,3)	0.730	Q(3,4)	0.734	Q(3,5)	0.745

唐山地区的数据分析结果表明：

- (1) 与沥青路面温度相关度较好的气温主要分布在时间间隔为 1-5 小时的平均气温之间：
- (2) 深度在 0-3cm 范围内路面温度最显著气温自变量为 T(0,1)；深度在 4-6cm 范围内路面温度最显著气温自变量为 T(0,2)；深度 7-8cm 范围内路面温度显著变量为 T(1,1)；在 9-12cm 范围之内，其显著变量为 T(0,4)；在 13-15cm 范围之内，其显著变量为 T(0,5)；
- (3) 如果都采用时间间隔为 1 小时的平均气温数值的话，其余显著气温的相关系数结果之间相差小于 0.01；因此对于 0-5cm 范围内路面温度可以选取 T(0,1)，对于 6-10cm 内可以选取 T(1,1)，11-15cm 内可以选取 T(2,1)；
- (4) 对于唐山地区与沥青路面温度相关度较好的太阳辐射主要分布在时间间隔为 5 小时的平均太阳辐射：
- (5) 深度 0-2cm 范围内路面温度显著变量为 Q(0,5)；3cm 处路面温度显著变量为 Q(1,5)，但是变量 Q(1,5)的相关系数为 0.890，仅相差 0.004；4-7cm 处路面温度显著变量为 Q(1,5)；8-12cm 处路面温度显著变量为 Q(2,5)；13-15cm 处路面温度显著变量为 Q(3,5)。

5. 武汉地区 2005 年 8 月数据

将武汉地区 2005 年 8 月-11 月各个深度处路面温度与不同时间间隔（如 1 小时~5 小时）的气温和太阳辐射平均值的互相关分析结果进行比较，不同深度处沥青路面温度影响最为显著的自变量以及此时的相关系数表 4.26 和表 4.27 中所示：

表 4.26 武汉 2005 年不同时间间隔的平均气温与不同深度处路面温度的互相关分析结果

时间间隔	1 小时		2 小时		3 小时		4 小时		5 小时	
深度	变量	相关系数	变量	相关系数	变量	相关系数	变量	相关系数	变量	相关系数
0cm	T(0,1)	0.846	T(0,2)	0.828	T(0,3)	0.805	T(0,4)	0.778	T(0,5)	0.749
1cm	T(0,1)	0.876	T(0,2)	0.863	T(0,3)	0.843	T(0,4)	0.820	T(0,5)	0.795

第 4 章 沥青路面温度场统计预估方法研究

2cm	T(0,1)	0.899	T(0,2)	0.890	T(0,3)	0.876	T(0,4)	0.857	T(0,5)	0.836
3cm	T(0,1)	0.903	T(0,2)	0.897	T(0,3)	0.885	T(0,4)	0.868	T(0,5)	0.849
4cm	T(0,1)	0.913	T(0,2)	0.909	T(0,3)	0.899	T(0,4)	0.886	T(0,5)	0.869
5cm	T(0,1)	0.917	T(0,2)	0.916	T(0,3)	0.908	T(0,4)	0.897	T(0,5)	0.882
6cm	T(0,1)	0.910	T(0,2)	0.909	T(0,3)	0.904	T(0,4)	0.894	T(0,5)	0.880
7cm	T(0,1)	0.916	T(0,2)	0.918	T(0,3)	0.915	T(0,4)	0.907	T(0,5)	0.896
8cm	T(1,1)	0.934	T(0,2)	0.934	T(0,3)	0.934	T(0,4)	0.930	T(0,5)	0.922
9cm	T(1,1)	0.936	T(0,2)	0.936	T(0,3)	0.937	T(0,4)	0.933	T(0,5)	0.926
10cm	T(1,1)	0.941	T(1,2)	0.941	T(0,3)	0.942	T(0,4)	0.941	T(0,5)	0.937
11cm	T(1,1)	0.942	T(1,2)	0.943	T(0,3)	0.943	T(0,4)	0.943	T(0,5)	0.940
12cm	T(1,1)	0.941	T(1,2)	0.943	T(0,3)	0.942	T(0,4)	0.943	T(0,5)	0.941

表 4.27 武汉 2005 年不同时间间隔平均太阳辐射与不同深度处路面温度的互相关分析结果

时间间隔	1 小时		2 小时		3 小时		4 小时		5 小时	
深度	变量	相关系数	变量	相关系数	变量	相关系数	变量	相关系数	变量	相关系数
0cm	Q(2,1)	0.816	Q(1,2)	0.821	Q(1,3)	0.832	Q(0,4)	0.833	Q(0,5)	0.843
1cm	Q(2,1)	0.785	Q(2,2)	0.790	Q(1,3)	0.801	Q(1,4)	0.805	Q(0,5)	0.812
2cm	Q(2,1)	0.743	Q(2,2)	0.758	Q(2,3)	0.759	Q(1,4)	0.772	Q(1,5)	0.774
3cm	Q(3,1)	0.739	Q(2,2)	0.748	Q(2,3)	0.756	Q(1,4)	0.762	Q(1,5)	0.771
4cm	Q(3,1)	0.720	Q(2,2)	0.723	Q(2,3)	0.737	Q(2,4)	0.739	Q(1,5)	0.751
5cm	Q(3,1)	0.702	Q(3,2)	0.708	Q(2,3)	0.718	Q(2,4)	0.725	Q(1,5)	0.732
6cm	Q(3,1)	0.691	Q(3,2)	0.701	Q(2,3)	0.707	Q(2,4)	0.717	Q(1,5)	0.721
7cm	Q(3,1)	0.665	Q(3,2)	0.679	Q(3,3)	0.683	Q(2,4)	0.695	Q(2,5)	0.701
8cm	Q(4,1)	0.628	Q(3,2)	0.634	Q(3,3)	0.644	Q(2,4)	0.648	Q(2,5)	0.660
9cm	Q(4,1)	0.626	Q(3,2)	0.630	Q(3,3)	0.642	Q(3,4)	0.646	Q(2,5)	0.659
10cm	Q(4,1)	0.590	Q(4,2)	0.597	Q(3,3)	0.606	Q(3,4)	0.614	Q(2,5)	0.621
11cm	Q(4,1)	0.576	Q(4,2)	0.587	Q(3,3)	0.592	Q(3,4)	0.603	Q(3,5)	0.608
12cm	Q(4,1)	0.561	Q(4,2)	0.574	Q(4,3)	0.581	Q(3,4)	0.590	Q(3,5)	0.598

武汉地区数据分析结果与新疆地区结果比较相类，与路面温度相关的气温主要分布在时间间隔为 1-2 小时的平均气温，分析结果表明：

- (1) 0-6cm 深度范围内路面温度显著变量为 T(0,1)；7-9cm 深度范围内路面温度显著变量为 T(0,2)；9-12cm 深度范围内路面温度显著变量为 T(1,2)；7-12cm 范围内采用 2 小时内平均气温的相关系数仅

比采用 $T(1,1)$ 大 0.002 左右；因此可以考虑在整个深度范围内采用 1 小时内的平均气温，即 0-7cm 范围内路面温度显著变量为 $T(0,1)$ ，8-12cm 范围内路面温度显著变量为 $T(1,1)$ ；

- (2) 与路面温度显著相关的是 5 小时内太阳辐射平均值，
- (3) 0-1cm 深度范围内路面温度显著变量为 $Q(0,5)$ ；2-6cm 深度范围内路面温度显著变量为 $Q(1,5)$ ；7-10cm 深度范围内路面温度显著变量为 $Q(2,5)$ ；11-12cm 深度范围内路面温度显著变量为 $Q(3,5)$ 。

6. 小结

不同地区沥青路面不同深度处的温度与不同时间延迟的气温和太阳辐射数据之间的互相关分析结果表明：

1. 与路面温度间具有最高相关系数的气温和太阳辐射出现的时间与路面温度之间的延迟时间会随着深度的增加而增加；同时在不同深度处，最具有高相关系数的自变量是某段时间内的平均温度和平均太阳辐射。
2. 对于上海地区不同深度沥青路面温度数据和环境因素的互相关分析结果表明，与上海地区的路面温度数据之间具有最高相关系数的平均气温起始时间随深度的变化发生较大改变（从 0 小时到 5 小时）；而同时其时间间隔也随着深度的增加而增加；对于其它地区的不同深度沥青路面温度数据和环境因素的互相关分析结果说明，具有最高相关系数的平均气温起始时间随深度变化却并不大（从 0 小时到 2 小时），而其时间间隔为 1 小时或者 2 小时；
3. 综合以上分析，建议选择 $T(0,2)$ （即当前气温和 1 小时前气温的平均值）作为沥青路面预估模型中反映一段时间内气温对于沥青路面温度场的影响；
4. 相对于不同地区的气温数据延迟时间存在不稳定性，与各个地区的路面温度数据相关关系高的太阳辐射延迟时间却比较稳定，主要集中在起始时间为 1~6 小时的太阳辐射平均值，此时其时间间隔基本上都为 5 小时，部分深度处为 4 小时，即 5 小时内的平均太阳辐射或者 4 小时内的平均太阳辐射；
5. 因此可以考虑在沥青路面温度场预估模型中采用时间间隔为 5 小时

的太阳辐射平均值（即 5 小时内的太阳辐射平均值）来反映太阳辐射因素对于沥青路面温度的影响，但是对于不同深度处的沥青路面温度需要选择具不同起始时间的 5 小时平均太阳辐射，如 $Q(0,5)$ 到 $Q(3,5)$ 。

4.3.2 不同地区沥青路面温度场统计模型的建立

1. 模型型式的选择

选择合理的统计预估模型形式是建立简洁、准确的沥青路面温度场预估模型的前提条件。考虑到沥青路面温度场沿深度的分布是十分复杂的，在目前已有的沥青路面温度场预估模型中，大部分的模型仅仅是给出了在某一确定深度处的沥青路面温度预估公式，对于其它深度处的温度也只能根据特定时刻路面温度沿深度方向的分布函数来得到。虽然 Tongji-04 模型采用了路面深度（H）的三次多项式来更为准确的模拟路面温度沿深度方向的分布状况，使得预估模型可以给出任意深度在任意时刻的温度数值，但是其内在的缺陷直接影响到预估精度。Mostafa A.H.和 Fouad M.B.分别建立了不同深度处的沥青路面温度和气温之间的预估模型，然后根据回归系数与深度的关系，将深度引入预估模型使模型可以预估各个深度处的路面温度^[57]：

$$T_p = (3E - 05H^2 - 6.1E - 03H + 1.3267) \cdot T_a + 0.0005H^2 - 0.10432H + 0.81797 \quad (4.32)$$

式中：

T_p ——深度为 H 的路面温度，℃；

T_a ——空气温度，℃；

H——深度，mm.

但是该模型的缺陷也显而易见，其不能反映随着深度的变化路面与空气温度之间的时间延迟，因此对于深度较大的位置其预估精度并不高。

根据前文有关沥青路面有限差分预估方法研究的结论，可认为沥青路面温度场仅仅是沿深度方向的一维分布。考虑到沥青路面温度场的影响因素可分为外部环境因素和内部材料因素，因此沥青路面内温度（ T_p ）可以采用如下函数：

$$T_p = f(H, X, Y) \quad (4.33)$$

式中:

X ——外部环境因素, 如气温, 太阳辐射等;

Y ——内部因素, 如路面结构和路面材料等;

H ——深度。

考虑到这些内部和外部因素之间并不存在相关关系, 同时深度 H 和路面结构和路面材料之间也不存在相关关系, 因此内部因素与外部因素分离:

$$T_p = f(H, X) + g(Y) \quad (4.34)$$

沥青路面内部因素, 如路面结构和路面材料等, 对于沥青路面温度场的影响以函数 $g(Y)$ 来表达。根据 Donald E.W 和 Jingna Zhang 等人在 NCAT 试验段上的研究成果发现^[54], 只有在沥青面层的磨耗层厚度相差较大时, 路面温度才会产生比较大的差异。考虑到本文中调查路面结构和材料基本类似, 因此可以忽略沥青路面内部因素的影响, 将上式简化为:

$$T_p = f(H, X) \quad (4.35)$$

在所有影响到沥青路面温度场的环境因素中, 太阳辐射和温度是最为重要的两个因素, 而风速、降水或者云量等因素对于沥青路面温度场的影响可以通过气温和太阳辐射体现出来, 因此在本文中外部环境因素 X 仅局限为太阳辐射和气温。因此上式可以进一步简化:

$$T_p(H) = f'(T, H) + g'(Q, H) \quad (4.36)$$

对于不同深度 H 处的沥青路面温度可根据不同的气温和太阳辐射自变量确定的。根据前文互相关分析的结果, 对于所有的深度处路面温度均可以选择 $T(0, 2)$ (即当前气温和 1 小时前气温的平均值) 作为沥青路面预估模型中的温度自变量。而对于太阳辐射自变量则必须根据 H 深度来进行具体选择。因此式 (4.36) 可以简化为

$$T_p(H) = aT_{01} + g'(Q, H) \quad (4.37)$$

如何表达不同深度处太阳辐射自变量的形式, 即确定上式中函数 $g'(Q, H)$ 的具体表达形式就成为建立模型的重点。

2. 综合太阳辐射因子

为了描述虽沥青路面深度的增加, 与路面温度最显著的太阳辐射自变量变

化状况，特引入综合太阳辐射因子的概念，其函数表达如下：

$$\bar{Q}(x, y) = \frac{1}{y} \sum_{i=x}^{x+y-1} Q_i \quad (4.38)$$

式中：

$\bar{Q}(x, y)$ ——从 x 小时前开始 y 小时内太阳辐射的平均值；

Q_i —— i 小时前太阳辐射值。

x ——整数型时间变量， x 表明综合太阳辐射因子计算时的起始时间，（即它与路面温度之间的时间延迟，）

y ——整数型时间变量， y 表明综合太阳辐射因子为 y 小时内的平均值。

根据此定义，前文对于沥青路面与太阳辐射互相关分析的结果表明，沥青路面各个深度处温度与 5 小时时间间隔的太阳辐射平均值相关性较好，即 $\bar{Q}(x, 5)$ 。从沥青路面表面到深度 15cm 处， $\bar{Q}(x, 5)$ 中的 x 大部分都为 3 或者 4。

在互相关分析中，所有的综合太阳辐射 $\bar{Q}(x, 5)$ 中的 x 都简单定义为整数，考虑到沥青路面沿深度变化过程中，综合太阳辐射自变量并不应该仅仅是处于整数状态，很有可能在部分深度处，其变化应该是位于某 2 个相邻的综合太阳辐射因子 $\bar{Q}(1, 5)$ 和 $\bar{Q}(2, 5)$ 中的一个值。因此将上式（4.38）中的定义进行扩展，将 x 定义为包含任何整数和小数。

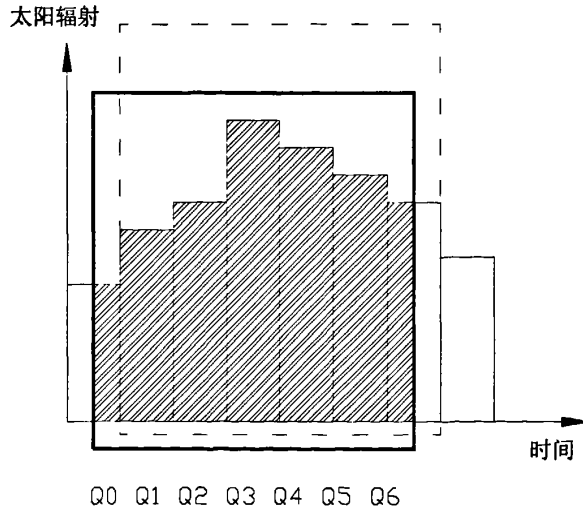


图 4.15 综合太阳辐射因子物理意义图示

图中黑色线框表示 $\bar{Q}(0.5, 5)$ ，虚线框表示 $\bar{Q}(1, 5)$ 。

当 x 为整数时, 综合太阳辐射因子为:

$$\bar{Q}(x, y) = \frac{1}{y} \sum_{i=x}^{x+y-1} Q_i \quad (4.39)$$

当 x 为非整数时, 可以将它表达为整数部分 x' 和小数部分 b 之和, 即 $x' = [x]$, $b = x - [x]$, ($[]$ 为取整算符)。对于 x 等于非整数时, 综合太阳辐射因子 $\bar{Q}(x, 5)$ 的物理定义可以如图 4.15 中所示:

根据图示综合太阳辐射因子的物理意义, 可以给出当 x 为非整数时, $\bar{Q}(x, 5)$ 的计算公式为:

$$\begin{aligned} \bar{Q}(x, 5) &= \bar{Q}(x' + b_1, 5) \\ &= \frac{1}{5} \left[(1 - b_1) Q_x + \sum_{i=x+1}^{x+y-2} Q_i + b_1 Q_{x+y-1} \right] \end{aligned} \quad (4.40)$$

式中:

$$x' = [x], \quad b_1 = x - [x];$$

3. 综合太阳辐射因子沿路面深度的变化

根据前文互相关分析结果, 可知在沥青路面表面, 即深度 $H=0$ 的位置, 沥青路面温度与综合太阳辐射因子 $\bar{Q}(0, 5)$ 相关度最好; 在沥青路面深度 $H=15\text{cm}$ 的位置, 沥青路面温度与综合太阳辐射因子 $\bar{Q}(3, 5)$ 相关度最好。假定综合太阳辐射因子 $\bar{Q}(x, 5)$ 中的延迟时间 x , 与路面深度之间呈线性关系, 则不同深度处的综合太阳辐射因子可以表达为:

$$\bar{Q}(x, 5) = \bar{Q}\left(\frac{1}{3}H, 5\right) \quad (4.41)$$

式中:

H ——路面深度, cm;

4. 不同地区回归模型的建立

综合以上各点, 不同深度处的沥青路面温度场预估模型可初步选定为:

$$T_p(H) = aT_a(0, 2) + b\bar{Q}\left(\frac{1}{3}H, 5\right) + c \quad (4.42)$$

式中:

$T_p(H)$ ——深度 $H\text{cm}$ 处的沥青路面温度, $^{\circ}\text{C}$;

$T_a(0, 2)$ ——当前气温与前 1 小时气温的平均值, $^{\circ}\text{C}$;

$\bar{Q}(\frac{1}{3}H, 5)$ ——综合太阳辐射因子，其具体计算方法参照式(4.39)和式(4.40)， kW/m^2 ；

a, b, c ——待定系数。

采用该模型形式对于不同地区不同深度处的沥青路面进行了回归分析，其具体的结果如表 4.28~表 4.35 所示：

表 4.28 上海地区不同深度沥青路面温度场预估模型

深度	CONST.		$T_a(0, 2)$		综合太阳辐射因子	
	回归系数 C 值	标准差	回归系数 a 值	标准差	回归系数 b 值	标准差
0cm	-4.4716	0.1308	-4.4716	0.0104	5.6509	0.4897
1cm	-3.5009	0.1234	1.2161	0.0098	4.1635	0.4659
2cm	-2.5299	0.1181	1.1963	0.0094	2.7129	0.4478
3cm	-1.8891	0.1160	1.1827	0.0092	1.4668	0.4397
4cm	-1.5844	0.1163	1.1757	0.0092	0.4542	0.4385
5cm	-1.5021	0.1180	1.1778	0.0093	-0.3297	0.4406
6cm	-1.4527	0.1205	1.1789	0.0095	-0.9613	0.4526
7cm	-1.1860	0.1251	1.1836	0.0098	-1.4767	0.4710
8cm	-0.8553	0.1293	1.1803	0.0102	-1.9791	0.4855
9cm	-0.4432	0.1328	1.1669	0.0104	-2.4643	0.4950
10cm	0.0393	0.1350	1.1414	0.0105	-2.7041	0.4972
11cm	0.5761	0.1347	1.1061	0.0105	-2.8097	0.4988
12cm	0.9182	0.1345	1.0790	0.0104	-2.8502	0.4983
13cm	1.1380	0.1330	1.0503	0.0103	-2.7857	0.4908
14cm	1.4657	0.1306	1.0069	0.0100	-2.6279	0.4779
15cm	1.7854	0.1309	0.9648	0.0100	-2.5310	0.4730

表 4.29 上海地区不同深度沥青路面温度场预估模型检验结果

深度	CONST.		$T_a(0, 2)$		综合太阳辐射因子		模型检验结果		
	T 检验值	显著度水平	T 检验值	显著度水平	T 检验值	显著度水平	相关系数 R^2	Adj- R^2	标准差
0cm	-34.189	0.000	119.281	0.000	11.540	0.000	0.928	0.928	2.788
1cm	-28.375	0.000	124.341	0.000	8.936	0.000	0.932	0.932	2.630
2cm	-21.423	0.000	127.772	0.000	6.058	0.000	0.934	0.934	2.517
3cm	-16.282	0.000	128.641	0.000	3.336	0.001	0.934	0.934	2.473

第 4 章 沥青路面温度场统计预估方法研究

4cm	-13.619	0.000	127.721	0.000	1.036	0.300	0.932	0.932	2.479
5cm	-12.725	0.000	126.350	0.000	-0.748	0.454	0.929	0.929	2.516
6cm	-12.059	0.000	124.083	0.000	-2.124	0.034	0.926	0.926	2.567
7cm	-9.479	0.000	120.187	0.000	-3.136	0.002	0.921	0.921	2.665
8cm	-6.614	0.000	116.263	0.000	-4.076	0.000	0.915	0.915	2.754
9cm	-3.337	0.001	112.284	0.000	-4.978	0.000	0.909	0.909	2.827
10cm	0.291	0.771	108.493	0.000	-5.438	0.000	0.902	0.902	2.872
11cm	4.276	0.000	105.622	0.000	-5.633	0.000	0.896	0.896	2.866
12cm	6.826	0.000	103.542	0.000	-5.720	0.000	0.892	0.892	2.860
13cm	8.555	0.000	102.335	0.000	-5.676	0.000	0.889	0.889	2.826
14cm	11.220	0.000	100.335	0.000	-5.498	0.000	0.885	0.885	2.773
15cm	13.640	0.000	96.399	0.000	-5.352	0.000	0.875	0.875	2.777

表 4.30 乌鲁木齐地区不同深度沥青路面温度场预估模型

深度	CONST.		$T_a(0,2)$		综合太阳辐射因子	
	回归系数 C 值	标准差	回归系数 a 值	标准差	回归系数 b 值	标准差
0cm	1.566	0.186	0.911	0.016	19.737	0.593
1cm	0.770	0.161	0.864	0.014	18.233	0.520
2cm	-0.018	0.146	0.820	0.013	16.593	0.476
3cm	0.678	0.143	0.806	0.013	15.611	0.470
4cm	1.390	0.144	0.799	0.013	14.124	0.477
5cm	2.108	0.148	0.800	0.014	12.168	0.490
6cm	2.326	0.147	0.784	0.014	10.491	0.493
7cm	2.547	0.147	0.770	0.014	8.731	0.498
8cm	2.766	0.148	0.757	0.014	6.924	0.505
9cm	2.698	0.143	0.712	0.013	6.108	0.489
10cm	1.237	0.160	0.794	0.015	5.786	0.550
12cm	1.469	0.157	0.738	0.015	1.771	0.548

表 4.31 乌鲁木齐地区不同深度沥青路面温度场预估模型检验结果

深度	CONST.		$T_a(0,2)$		综合太阳辐射因子		模型检验结果		
	T 检验值	显著度水平	T 检验值	显著度水平	T 检验值	显著度水平	相关系数 R^2	Adj- R^2	标准差

第 4 章 沥青路面温度场统计预估方法研究

0cm	8.435	0.000	55.598	0.000	33.291	0.000	0.842	0.841	4.332
1cm	4.787	0.000	60.469	0.000	35.042	0.000	0.863	0.863	3.758
2cm	-0.122	0.903	62.851	0.000	34.844	0.000	0.872	0.871	3.411
3cm	4.753	0.000	62.580	0.000	33.208	0.000	0.870	0.870	3.351
4cm	9.636	0.000	60.891	0.000	29.588	0.000	0.860	0.860	3.397
5cm	14.275	0.000	58.998	0.000	24.852	0.000	0.846	0.846	3.491
6cm	15.867	0.000	57.858	0.000	21.300	0.000	0.836	0.836	3.470
7cm	17.359	0.000	56.393	0.000	17.536	0.000	0.823	0.823	3.478
8cm	18.702	0.000	54.663	0.000	13.704	0.000	0.806	0.806	3.512
9cm	18.925	0.000	52.949	0.000	12.496	0.000	0.796	0.796	3.394
10cm	7.715	0.000	52.169	0.000	10.525	0.000	0.787	0.787	3.827
12cm	9.365	0.000	49.071	0.000	3.230	0.001	0.746	0.745	3.747

表 4.32 唐山地区不同深度沥青路面温度场预估模型

深度	CONST.		$T_a(0,2)$		综合太阳辐射因子	
	回归系数 C 值	标准差	回归系数 a 值	标准差	回归系数 b 值	标准差
0cm	3.708	0.645	0.970	0.028	23.486	0.416
1cm	4.017	0.629	0.969	0.028	21.523	0.409
2cm	4.201	0.612	0.975	0.027	19.470	0.399
3cm	4.329	0.593	0.983	0.026	17.400	0.388
4cm	4.478	0.575	0.989	0.025	15.391	0.374
5cm	4.730	0.560	0.991	0.025	13.522	0.362
6cm	5.982	0.551	0.951	0.024	12.205	0.359
7cm	7.642	0.553	0.895	0.024	11.202	0.361
8cm	8.351	0.557	0.878	0.025	10.722	0.364
9cm	8.966	0.560	0.864	0.025	10.200	0.364
10cm	8.360	0.554	0.885	0.024	8.977	0.357
11cm	7.952	0.558	0.895	0.024	8.061	0.362
12cm	8.258	0.561	0.877	0.025	7.500	0.364
13cm	9.215	0.555	0.833	0.024	7.250	0.360
14cm	10.199	0.550	0.788	0.024	7.020	0.355
15cm	11.215	0.547	0.742	0.024	6.814	0.350

表 4.33 唐山地区不同深度沥青路面温度场预估模型检验结果

深度	CONST.		$T_a(0,2)$		综合太阳辐射因子		模型检验结果		
	T 检验值	显著度水平	T 检验值	显著度水平	T 检验值	显著度水平	相关系数 R^2	Adj- R^2	标准差
0cm	5.751	0.000	34.284	0.000	56.516	0.000	0.925	0.925	2.332
1cm	6.389	0.000	35.081	0.000	52.673	0.000	0.923	0.923	2.248
2cm	6.870	0.000	36.223	0.000	48.766	0.000	0.920	0.920	2.166
3cm	7.298	0.000	37.623	0.000	44.897	0.000	0.917	0.916	2.085
4cm	7.790	0.000	39.072	0.000	41.100	0.000	0.913	0.913	2.011
5cm	8.453	0.000	40.207	0.000	37.346	0.000	0.908	0.908	1.954
6cm	10.852	0.000	39.135	0.000	33.984	0.000	0.898	0.898	1.925
7cm	13.819	0.000	36.716	0.000	30.990	0.000	0.882	0.882	1.936
8cm	14.994	0.000	35.811	0.000	29.466	0.000	0.873	0.872	1.960
9cm	16.016	0.000	35.091	0.000	28.013	0.000	0.863	0.862	1.986
10cm	15.089	0.000	36.368	0.000	25.114	0.000	0.853	0.853	1.985
11cm	14.251	0.000	36.558	0.000	22.266	0.000	0.839	0.839	2.019
12cm	14.732	0.000	35.697	0.000	20.583	0.000	0.822	0.822	2.053
13cm	16.616	0.000	34.345	0.000	20.148	0.000	0.807	0.806	2.059
14cm	18.541	0.000	32.831	0.000	19.777	0.000	0.788	0.788	2.073
15cm	20.492	0.000	31.141	0.000	19.474	0.000	0.767	0.766	2.094

表 4.34 武汉地区不同深度沥青路面温度场预估模型

深度	CONST.		$T_a(0,2)$		综合太阳辐射因子	
	回归系数 C 值	标准差	回归系数 a 值	标准差	回归系数 b 值	标准差
0cm	3.594	0.268	0.957	0.012	2.749	0.032
1cm	2.192	0.254	1.023	0.011	2.351	0.030
2cm	0.758	0.254	1.089	0.011	1.959	0.030
3cm	2.755	0.249	1.064	0.011	1.782	0.030
4cm	2.809	0.245	1.068	0.011	1.531	0.029
5cm	3.062	0.245	1.064	0.011	1.332	0.029
6cm	4.401	0.262	1.034	0.012	1.269	0.031
7cm	4.281	0.255	1.031	0.011	1.071	0.031
8cm	2.720	0.240	1.055	0.011	0.746	0.029

第 4 章 沥青路面温度场统计预估方法研究

9cm	2.702	0.243	1.092	0.011	0.753	0.029
10cm	3.292	0.247	1.115	0.011	0.535	0.029
11cm	3.407	0.242	1.080	0.011	0.471	0.029
12cm	3.542	0.240	1.044	0.011	0.411	0.029

表 4.35 武汉地区不同深度沥青路面温度场预估模型检验结果

深度	CONST		$T_0(0,2)$		综合太阳辐射因子		模型检验结果		
	T 检验值	显著度水平	T 检验值	显著度水平	T 检验值	显著度水平	相关系数 R^2	Adj- R^2	标准差
0cm	13.410	0.000	81.941	0.000	87.135	0.000	0.932	0.932	2.514
1cm	8.616	0.000	91.962	0.000	77.735	0.000	0.934	0.934	2.374
2cm	2.980	0.003	64.458	0.000	97.768	0.000	0.930	0.930	2.362
3cm	11.047	0.000	97.175	0.000	59.696	0.000	0.927	0.927	2.307
4cm	11.473	0.000	99.297	0.000	52.361	0.000	0.924	0.924	2.257
5cm	12.513	0.000	98.940	0.000	45.881	0.000	0.919	0.919	2.250
6cm	16.767	0.000	89.454	0.000	40.395	0.000	0.903	0.903	2.406
7cm	16.790	0.000	91.729	0.000	34.936	0.000	0.900	0.900	2.333
8cm	11.349	0.000	99.835	0.000	25.872	0.000	0.903	0.903	2.190
9cm	11.106	0.000	101.850	0.000	25.816	0.000	0.906	0.906	2.222
10cm	13.311	0.000	102.352	0.000	18.187	0.000	0.898	0.898	2.260
11cm	14.074	0.000	101.211	0.000	16.234	0.000	0.895	0.894	2.212
12cm	14.778	0.000	98.808	0.000	14.277	0.000	0.888	0.888	2.192

根据以上分析结果可知：

1. 针对式 4.43，可以建立各个地区不同深度处沥青路面温度场预估模型，经过 F 检验确定各个预估模型都显著有效；
2. 上海地区预估模型的相关系数为 0.875~0.928，预估方差为 2.516~2.872；乌鲁木齐地区预估模型的相关系数为 0.871~0.745，预估方差为 3.351~4.332；唐山地区预估模型相关系数为 0.766~0.934，预估方差为 1.925~2.332；武汉地区预估模型相关系数为 0.888~0.934，预估方差为 2.190~2.514；略高于 Tongji-04 预估模型的预估精度；
3. 在以上各个预估模型中，除了上海地区 4cm 和 5cm 的预估模型中变量 $\bar{Q}(\frac{1}{5}H, 5)$ ，上海地区 10cm 预估模型和乌鲁木齐地区 2cm 预估模型中常数项无法通过 T 检验，说明这些变量在预估模型中并不显著；为了对于不同地区分别建立形式上更为统一的沥青路面温度场预估模型，

将以上各个地区的温度预估模型中不同变量的回归系数与深度的关系汇入图中，如图 4.16、图 4.17 和图 4.18 中所示：

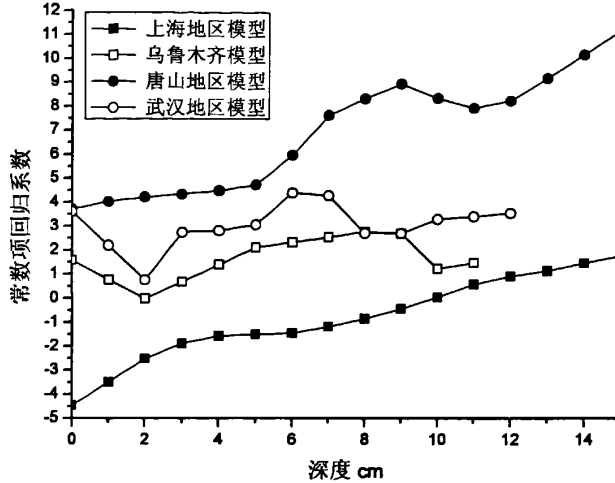


图 4.16 不同地区回归模型常数项回归系数与深度关系

从图 4.16 中可以看出，对于不同地区的预估模型，其中的常数项变化较大，并且可以采用可以使用沿深度深度变化的二次函数来近似表述其变化规律，因此可以考虑在模型中引入反应其沿深度的变化 H^2 和 H 。

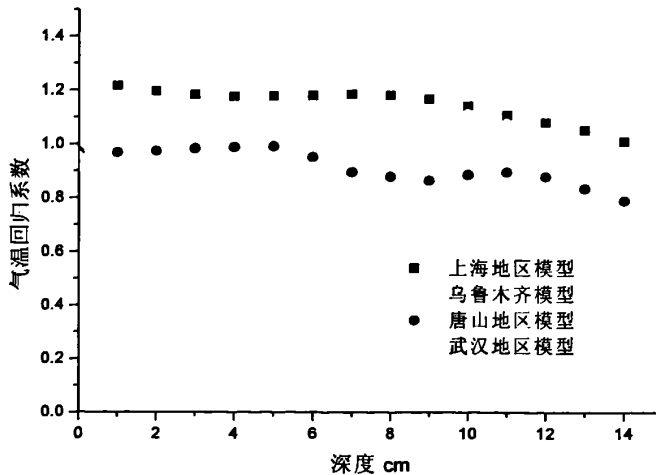


图 4.17 不同地区回归模型气温回归系数与深度关系

从图 4.17 中可以发现，模型中自变量 T_{0-1} 的回归系数变化不大，除了上海

地区 0cm 处的回归模型之外，其他模型中的回归系数都是在 0.7-1.2 之间并且随深度增加呈现出减少的趋势，同时该趋势可以使用深度的二次函数来描述，因此可以考虑在模型中引入反映其沿深度非线性变化 $H^2 \cdot T_a(0,2)$ 和 $H \cdot T_a(0,2)$ 。

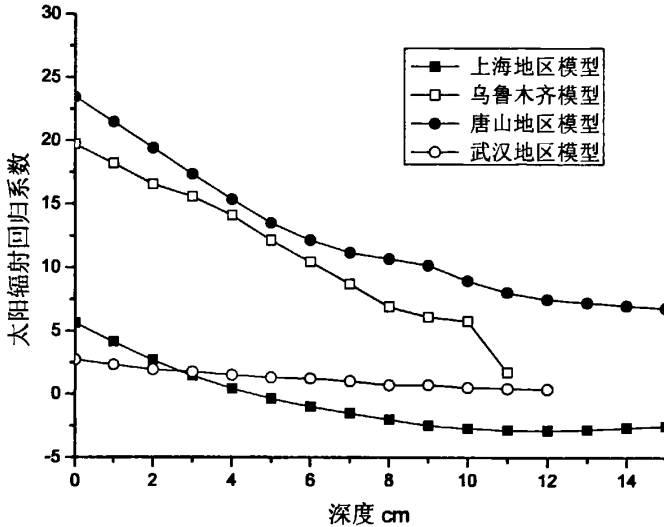


图 4.18 不同地区回归模型综合太阳辐射因子回归系数与深度关系

图 4.18 可以发现，对于自变量 $\bar{Q}(\frac{1}{5}H, 5)$ ，除了上海地区模型中得回归系数与深度之间呈现非线性关系之外，其它模型的回归系数都随深度的增加呈现出线性减少的趋势，因此可以认为自变量 $\bar{Q}(\frac{1}{5}H, 5)$ 的回归系数与深度 H 之间存在一定线性函数关系，因此可以考虑在模型中引入反映其沿深度非线性变化的自变量 $H \cdot \bar{Q}(\frac{1}{5}H, 5)$ ；

考虑以上各点可以将模型 (4.43) 进行修正，改进后的预估模型为：

$$T_p(H) = (aH^2 + bH + c)T_a(0,2) + (dH + e)\bar{Q}(\frac{1}{5}H, 5) + fH^2 + gH + h \quad (4.43)$$

式中：

$T_p(H)$ ——深度 H 处的沥青路面温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

H ——深度， cm ；

H^2 ——深度的平方；

$T_a(0,2)$ ——以当前时间为起始时间，以 2 小时作为间隔时间的平均气温，即气温与前 1 小时气温的平均值， $^{\circ}\text{C}$ ；

$\bar{Q}(\frac{1}{5}H, 5)$ ——综合太阳辐射因子，其具体计算方法参照式 (4.39) 和式

(4.40), kW/m^2 ;

a, b, c, d, e, f, g, h ——待定回归系数。

采用逐步 (STEPWISE) 回归方法, 可以得到不同地区的沥青路面温度场预估模型(4.44)的具体结果如表所示:

表 4.36 不同地区沥青路面温度场预估模型回归结果

回归系数	上海地区模型	乌鲁木齐地区模型	唐山地区模型	武汉地区模型
a	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
b	0.004	-0.012	-0.010	0.013
c	1.208	0.864	1.002	1.008
d	-0.511	-1.487	-1.087	-0.188
e	3.275	19.660	20.738	2.432
f	-*	-*	-*	-*
g	0.365	0.115	0.3863	0.1931
h	-3.512	0.988	0.5989	2.3411
Adj- R^2	0.914	0.830	0.884	0.911
标准差	2.716	3.676	2.096	2.376

注: 表中-*表示变量深度的平方 H^2 在 STEPWISE 逐步线性回归过程中, 由于显著度不满足要求而被剔除出模型。

从上表中的回归结果看出, 在采用了形式统一的沥青路面温度场预估模型之后, 对于不同的地区都可以得到较为满意的结果, 各个模型的回归系数都在 0.830~0.911 之间, 同时模型预估结果的标准差, 除乌鲁木齐地区结果大于 $3^{\circ}C$ 之外, 其他地区的预估结果标准差都小于 $3^{\circ}C$, 各个地区的预估值与实测值之比如图 4.19~图 4.22 中所示:

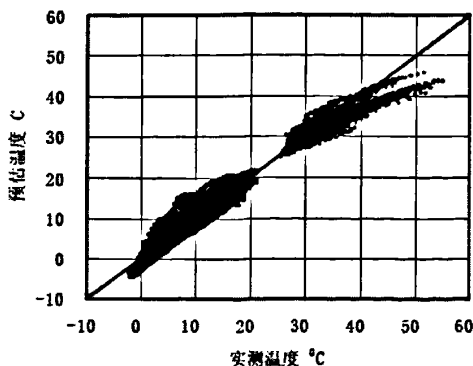


图 4.19 上海地区实测路面温度与模型预估结果比较

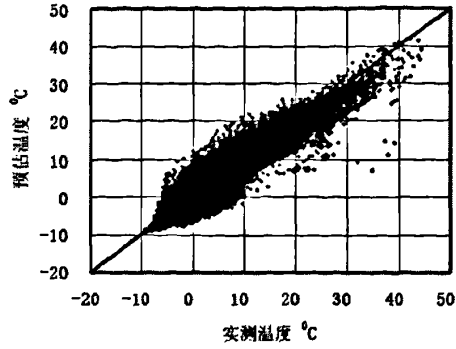


图 4.20 乌鲁木齐地区实测路面温度与模型预估结果比较

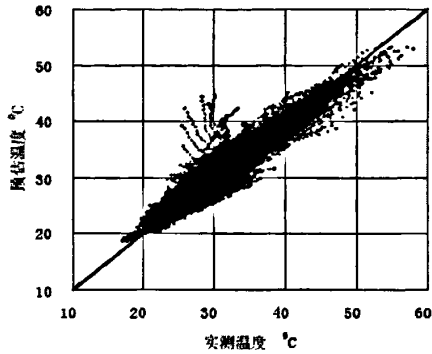


图 4.21 唐山地区实测路面温度与模型预估结果比较

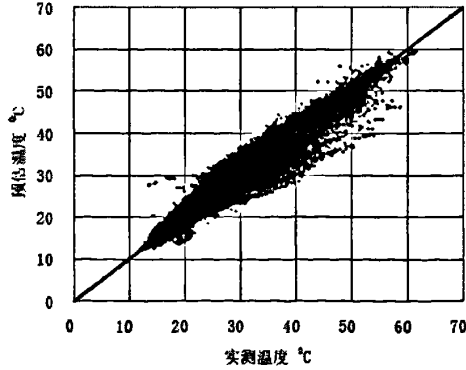


图 4.22 武汉地区实测路面温度与模型预估结果比较

从图中可以看出，采用式(4.43)的预估模型得到的预估温度结果与实测温度在图中均匀的分布在直线 $Y=X$ 两侧，证明该模型是显著有效的。

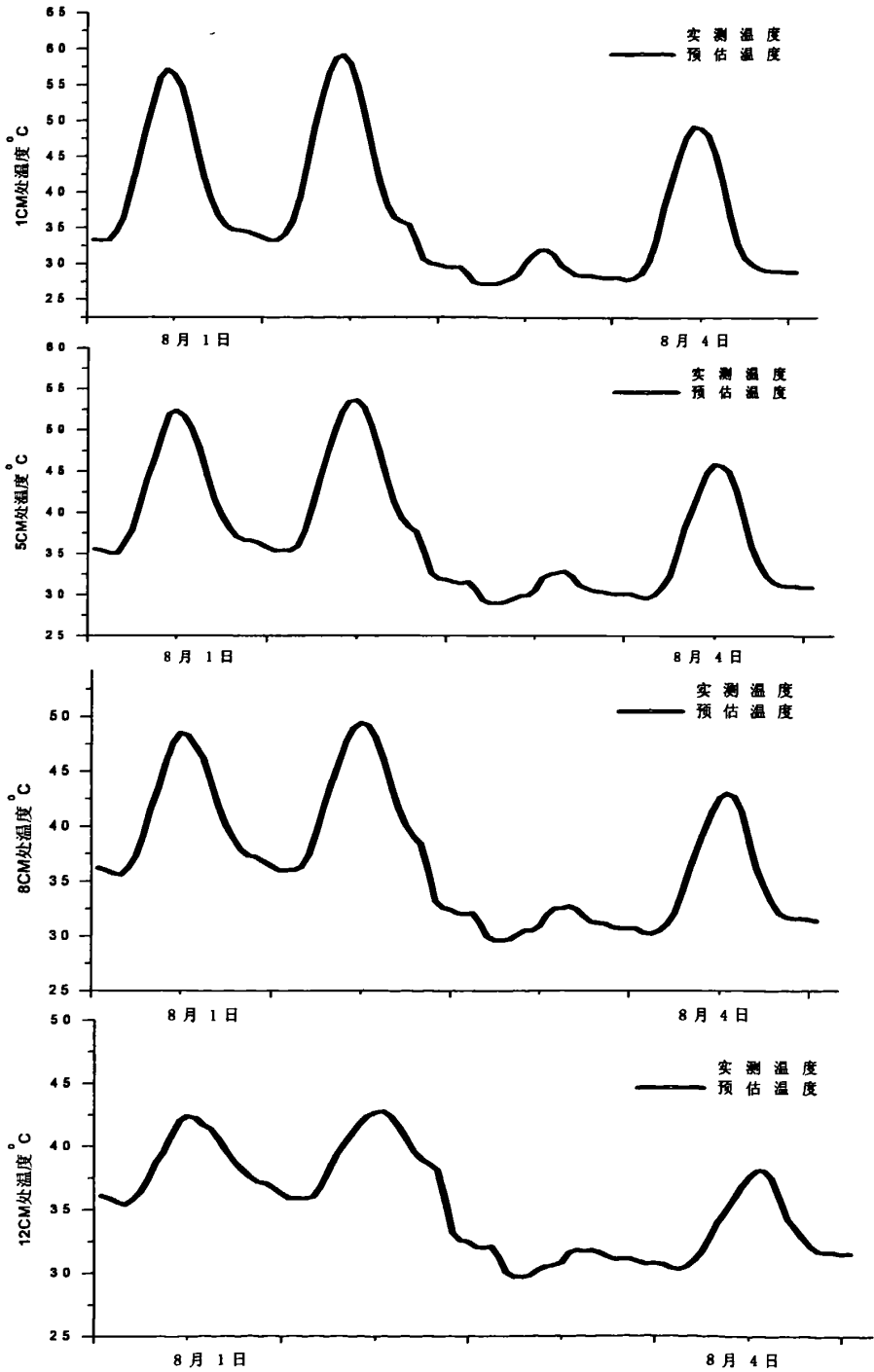


图 4.23 武汉地区不同深度处实测路面温度与模型预估结果比较

将该模型在武汉地区不同深度处的预估结果与实测温度的比较汇于图 4.23 中；从图中可以看出，采用该模型不但可以准确的预估不同深度处路面温度具体数值，同时也可更为准确地真实地反映出不同深度处的日最高温度出现时间的，克服了以往模型的不足之处。

4.3.3 沥青路面温度场统一预估模型

如前文所述，使用统计回归方法得到沥青路面温度场预测方程一般都存在地区适用性的问题，根据一个地区实测沥青路面温度和相关气象资料回归出来的模型并不能直接用于其它地区的温度预估。

前文沥青路面温度场实测分析研究和沥青路面温度场有限差分模型边界条件研究均表明，沥青路面结构内的温度不但受到周期性变化环境因素的影响，还受到路面结构下方地温的影响。从表 4.28~表

4.35 中不同地区各个深度处的温度预估模型回归结果表中也可以发现，随着深度的增加，预估模型的回归系数呈现减小的趋势，这也说明随着深度的增加，自变量对于沥青路面温度场变化的解释能力也在逐渐降低；考虑到在模型 (4.43) 中的自变量都是反映了外部环境因素对于路面温度场自上而下的影响，忽视了路面以下的地温温度环境对于路面温度场自下而上的影响，因此对于沥青路面的温度回归来说地温是一个不可忽视的重要变量。

考虑到地温主要是受到不同地区长期气候条件的影响，这就决定了地温在相当成的一段时间内是一个稳定的数值，它对于路面温度场的影响在较长的时间内也可以视为恒定。秦健^[34]等引入了可以反映不同地区地温长期变化的自变量——不同月份历年月平均气温 T_m ，也解决了回归模型中的地区差异问题，因此在本文中仍然采用该变量来反映地温对于沥青路面温度场的影响。同时根据前文的分析可知随深度增加 T_m 对于模型的影响也会逐渐增加，因此在模型中增加变量 $H \cdot T_m$ 以反映这种非线性变化的趋势。

综合以上各点，提出了改进后的预估模型形式应如下：

$$T_p(H) = a_1 H^2 \cdot T_a(0,2) + a_2 H \cdot T_a(0,2) + a_3 T_a(0,2) + a_4 H \cdot \bar{Q}(\frac{1}{5}H,5) + a_5 \bar{Q}(\frac{1}{5}H,5) + a_6 H + a_7 H \cdot T_m + a_8 T_m + a_9 \quad (4.44)$$

$T_p(H)$ ——深度 H 处的沥青路面温度，℃；

H ——深度，cm；

$T_o(0,2)$ ——当前气温与前1小时气温的平均值, $^{\circ}\text{C}$;

$\bar{Q}(\frac{1}{3}H,5)$ ——综合太阳辐射因子, 其具体计算方法参照式(4.39)和式(4.40), kW/m^2 ;

T_m ——历年月平均气温, $^{\circ}\text{C}$;

$a_1 \sim a_5$ ——待定系数。

由于上式(4.44)已经考虑了不同深度处的温度预估模型的差异, 因此可以将不同地区不同深度的数据放在一起进行回归分析, 最终可以得到统一的不同地区不同深度沥青路面温度场回归模型, 采用逐步回归方法可以得到其具体的回归结果如表4.37表4.39所示:

表 4.37 模型 4.44 的回归分析结果 (回归统计)

R	R ²	R ² -adj	标准误差
0.978	0.956	0.956	2.851

表 4.38 模型 4.44 的回归分析结果 (方差分析)

方差来源	平方和	自由度	均方值	F检验值	P检验值
回归	12376789.144	8	1547098.643	146376.86	0.000
残差	846557.376	80096	10.569		
总和	13223346.520	80104			

表 4.39 模型 4.44 的回归分析结果 (回归系数)

自变量	回归系数名	回归系数值	标准误差	T检验值	P检验值
$H^2 \cdot T_o(0,2)$	a_1	0.0001	0.000	-14.756	0.000
$H \cdot T_o(0,2)$	a_2	—*	—*	—*	—*
$T_o(0,2)$	a_3	1.004	0.002	426.527	0.000
$H \cdot \bar{Q}(\frac{1}{3}H,5)$	a_4	-0.167	0.002	-70.518	0.000
$\bar{Q}(\frac{1}{3}H,5)$	a_5	2.314	0.017	133.400	0.000

H	a_6	-0.785	0.007	17.918	0.000
$H \cdot T_m$	a_7	0.003	0.000	5.983	0.000
T_m	a_8	0.327	0.004	78.353	0.000
常数	a_9	-3.359	0.061	-59.640	0.000

表中——*: 由于在回归过程中变量 $H \cdot T_a(0,2)$ 并非显著有效变量, 因此被排除模型之外

STEPWISE 回归分析结果与检验统计量的对比分析表明, 预估模型 4.45 中除了变量 $H \cdot T_{0-1}$ 以外, 其他变量及其回归系数在相应的显著度水平下均通过显著性检验。因此不同地区沥青路面温度场统一预估模型可以表达为:

$$T_p(H) = 0.0001H^2 \cdot T_a(0,2) + 1.004T_a(0,2) - 0.167H \cdot \bar{Q}(\frac{1}{5}H,5) + 2.314\bar{Q}(\frac{1}{5}H,5) - 0.785H + 0.003H \cdot T_m + 0.327T_m - 3.359 \quad (4.45)$$

式中:

$T_p(H)$ ——深度 H 处的沥青路面温度, $^{\circ}\text{C}$;

H ——深度, cm ;

$T_a(0,2)$ ——当前气温与前 1 小时气温的平均值, $^{\circ}\text{C}$;

$\bar{Q}(\frac{1}{5}H,5)$ ——综合太阳辐射因子, 其具体计算方法参照式 (4.39) 和式 (4.40), kW/m^2 ;

T_m ——历年月平均气温, $^{\circ}\text{C}$;

统一预估模型的复相关系数 R 、相关系数 R^2 和调整后的相关系数 $R^2 - adj$ 与各个地区分别得到的预估模型相当, 同时还略有提高。这说明, 引入地区修正系数 $H \cdot T_m$ 和 T_m 可以从一定程度上解决困扰沥青路面温度场统计回归方法的地区差异性问题。

对于采用插值后的沥青路面温度场原始数据, 模型 (4.45) 与修正后的 tongji-07 与模型 (4.28) 相比, 其回归结果的相关系数从原来的 0.916(上海地区) 和 0.823(新疆地区) 提高到 0.956 (包含所有地区), 回归标准误差从原来的 2.635(上海地区) 和 3.877(新疆地区) 变化至 2.851 (包含所有地区), 新模型在预估精度和准确性上都有所改进。

4.4 模型气象参数研究

本文提出的沥青路面温度场预估模型虽然预估精度比较高，但是模型本身需要较为完备的气象参数：小时气温和小时太阳辐射数据。而在我国的大部分地区很难获取这些气象资料，甚至在部分地区部分数据是缺乏的。根据中国国家气象局发布的地面气象信息，我国各地区的气象资料可以按照其精度分为以下四个等级，其具体参数如表 4.40 所示：

表 4.40 我国各地区地面气象资料精度分类

气象资料精度等级	气温资料	太阳辐射资料
A	小时气温	小时太阳辐射
B	小时气温	日太阳辐射总量
C	日最高和最低气温	日太阳辐射总量
D	日最高和最低气温	无辐射资料

其中 A 级资料精度最高，而 D 级气象资料最低。对于具有 A 级气象资料的地区可以直接采用本文提出的沥青路面温度场预估模型进行温度的预估，对于其他精度等级的地区，必要要对气象资料进行进一步的处理，从而得到每小时的气温与辐射数据，进而使用本文提出的预估模型。

4.4.1 日最高和最低气温

由于在统计预估模型中需要的是每小时的气温资料，因此需要采用插值的方法将日最高和日最低拟合出 24 小时之内的温度变化情况。根据相关的气象资料分析，气温一般在下午 2 点左右达到日最高温度，在清晨 5-6 点降至日最低气温，其日变化的周期性以及非对称性，可以用三角函数的线性组合来拟合：

$$T_a = \frac{T_{\min} + T_{\max}}{2} + \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2} \left[0.96 \sin(\omega(t - t_0)) + 0.14 \sin(2\omega(t - t_0)) \right] \quad (4.46)$$

式中：

T_{\max} ——日最高气温，℃；

T_{\min} ——日最低气温，℃；

t_0 ——初相位，一般取 9.0；

t ——时间，从 0 点-23 点；

ω ——角频率， $\omega = 2\pi/24$ (rad)。

4.4.2 日太阳辐射总量

对于预估模型中的每小时太阳辐射则可以根据日太阳辐射总量采用如下方法计算, 根据相关气象资料我国各地区在夏季高温季节日最大日照时数为 11~13 小时, 采用如下分段函数来拟合入射段波辐射的日变化过程, 即:

$$Q(t) = \begin{cases} 0 & \left[0, \frac{\pi}{\omega} \left(1 - \frac{m}{2}\right)\right] \\ Q_0 \cos(m\omega(t-12)) & \left[\frac{\pi}{\omega} \left(1 - \frac{m}{2}\right), \frac{\pi}{\omega} \left(1 + \frac{m}{2}\right)\right] \\ 0 & \left[\frac{\pi}{\omega} \left(1 + \frac{m}{2}\right), \frac{2\pi}{\omega}\right] \end{cases} \quad (4.47)$$

式中:

$Q(t)$ ——第 t 小时内的太阳辐射量;

Q_0 ——最大太阳辐射量, 该数值模拟过程中 $Q_0 = 0.131Q_{total}$;

Q_{total} ——日太阳辐射总量;

m ——时间参数, $m = 12/c$;

c ——日照时数;

ω ——角频率, $\omega = 2\pi/24$ (rad);

t ——时间, 从 0 点-23 点。

4.4.3 太阳辐射

如果一个地区缺乏相应的太阳辐射参测资料, 也可以根据如下方法计算得到^[25]:

某一地点大气上空的日太阳辐射总量 H_0 为:

$$H_0 = \left(\frac{1}{\pi}\right) \times I_{sc} \times E_0 \times \sin(\phi) \sin(\delta) \times \left(\frac{\omega_s \times \pi}{180} - \tan(\omega_s)\right) \quad (4.48)$$

式中:

H_0 ——某一水平面上的日太阳辐射总量, $MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$;

I_{sc} ——太阳常数, 指的是平均日地距离时, 在地球大气层上方, 垂直于太阳投射方向, 单位面积在单位时间内所接受到的太阳辐射能量, 其值一般为

$1367W \cdot m^{-2}$, 相当于 $118.108 MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ 。

E_0 ——地球轨道偏心率修正因子, 可根据下式计算:

$$E_0 = 1.000110 + 0.034221 \cos \Gamma + 0.0001280 \sin \Gamma \\ + 0.000719 \cos 2\Gamma + 0.000077 \sin 2\Gamma$$

式中:

Γ ——日角度, 单位为弧度, 其计算公式为 $\Gamma = \frac{2\pi(d_n - 1)}{365}$, d_n 为自元旦之

日起一年中的日序数。

ϕ ——纬度, 其所在地点的地理纬度;

δ ——太阳赤纬, 可根据下式计算:

$$\delta = \frac{180}{\pi} \left(\begin{array}{l} 0.006918 - 0.29912 \cos \Gamma + 0.070257 \sin \Gamma - 0.006758 \cos 2\Gamma \\ + 0.000907 \sin 2\Gamma - 0.002697 \cos 3\Gamma + 0.00148 \sin 3\Gamma \end{array} \right)$$

ω_s ——时角(度), 当太阳处于每天最高位置时所在的角度设为 0 度, 时角就是太阳每天处于最高位置时与日出或者日落位置的夹角。日出方向的小时角为正, 日落方向的小时角为负, $\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta)$ 。

根据以上公式, 既可以计算出在一年之内任何一天, 任一地点的大气上空的日太阳辐射量 H_0 。然后即可根据 4.4.2 中所述插值方法, 求出小时太阳辐射资料。

以上方法都是在缺乏精确气象资料时通过模拟气温以及太阳辐射的日变化情况得到相应的资料, 因此这些数据对多云或者阴雨天气的模拟存在较大局限。除此之外, 采用以上方法得到的小时气温和小时太阳辐射数据与真实数据之间仍有差距, 这势必会影响到沥青路面温度场预估结果的精度。

4.5 本章小结

1. 通过我国实测沥青路面温度数据, 详细分析了现有的沥青路面温度场统计预估模型在我国的适用性, 结果表明这些模型并不能直接简单应用于我国气候状况, 应根据我国各地区实际观测的沥青路面温度数据建立适应我国气候条件的沥青路面温度场统计预估模型。

2. 针对 Tongji-04 预估模型中存在的不足之处, 采用互相关方法分析了环境

变量与路面各深度处温度数据的相关关系,选择 $T(0,2)$ (即当前气温和 1 小时前气温的平均值)和综合太阳辐射因子 $\bar{Q}(\frac{1}{3}H,5)$ 建立沥青路面温度场预估模型。该模型不但可以准确的预估不同深度处温度状况,同时也可以更为准确地反映出不同深度处的日最高、最低温度出现的时间;同时将地区修正系数 $H \cdot T_m$ 和 T_m 引入模型,解决了困扰沥青路面温度场统计回归方法的地区差异性问题;

3. 为了解决我国部分城市缺乏高精度的气温和太阳辐射数据无法直接使用沥青路面温度场预估模型,本文提出了几种插值方法,可以根据不同精度等级的气象数据得到本文统计预估模型所需要的小时气温和小时太阳辐射数据。

第 5 章 不同温度状况下沥青混合料力学参数实验研究

在准确地预估沥青路面在各个深度的温度状况之后，如何将其引入沥青路面结构设计或者沥青路面结构受力分析就成为一个非常重要的问题。沥青混合料属于温度敏感性材料，其力学性质会随着温度的变化而发生改变，在低温时呈现出线弹性性质，在高温时呈现出粘弹塑性性质。在现有的沥青路面力学分析方法中，在很多情况下都是忽略了沥青混合料材料的非线性形式，无论在何种状况下都将其视为简单的线弹性材料来进行力学分析，此时其最基本的力学参数就是模量和泊松比。如果可以得到在不同温度状况下沥青混合料材料的模量和泊松比，那么就可分析不同温度状况下沥青路面结构的受力状况，从而实现将温度状况引入沥青路面结构设计和受力分析。本章拟通过室内实验研究不同温度状况下沥青混合料的模量与泊松比，以期建立沥青混合料静态回弹模量和泊松比与温度的关系。

5.1 研究背景

5.1.1 沥青混合料模量与温度关系

沥青混合料的模量可是说是道路研究中最复杂的问题之一，关于沥青混合料的定义多种多样，如最基本的动态模量、静态模量或者采用实验方法定义的抗压回弹模量、劈裂模量以及动态复模量、动态劲度模量和间接拉伸动态模量等。不同的模量定义对应于不同的实验方法、试件成型方法和施加荷载的大小与频率，在不同的设计方法和设计体系中也采用了完全不同的沥青混合料模量的定义^[58, 59]。

在 ASTM 手册中，采用的沥青混合料模量实验方法为 ASTM D 4123-82 和 ASTM D 3496-99 方法^[60]。而在 SHRP 研究中也专门提出了沥青混合料模量标准测试方法 SHRP P07^[61]，AASHTO 也提出了标准沥青混合料模量试验方法 AASHTO TP 62-03^[62]。目前在最新出版的 NCHRP 1-37A 设计方法中^[63]，也提供了适用于该设计方法的沥青混合料模量测试方法。而在我国现行的沥青路面设

计方法中^[3]，采用基于层状弹性理论的静态设计方法，其材料参数为沥青混合料在 20℃时，标准圆柱体试件无侧限抗压回弹模量和在 15℃时圆柱体试件的劈裂模量^[64]。

沥青混合料在不同温度下的模量一直是道路工程界研究的重点，从最早的 Shell 诺莫图^[65]，McLeod 诺莫图^[65]，以及由 Witczak 在 20 年前提出的沥青混合料模量预估模型(，后来被称为 AI 模型^[66])，都反映了不同温度状况下沥青混合料的模量变化趋势。

AI (Asphalt Insitutie) 所提供的沥青混合料模量预估模型，是根据沥青混合料的参数、温度以及加载频率等因素定义的，其具体形式如下所示，该计算公式最初是由 Kallas 和 Shook 作出的^[67]，随后又由 AI 的 Witczak 进行了进一步的修正，并用于 AI 设计手册(MS-1)^[66]，该公式的适用范围为-20~40℃：

$$\log E_{ac} = 5.553833 + 0.028829 \left(\frac{P_{200}}{F^{0.17033}} \right) - 0.03476V_v + 0.070377\eta_{70^{\circ}F, 10^6} + 0.000005t_p^{(1.3+0.49825\log F)} P_{ac}^{0.5} - \frac{0.00189}{F^{1.1}} t_p^{(1.3+0.49825\log F)} P_{ac}^{0.5} + 0.931757 \left(\frac{1}{F^{0.02774}} \right) \quad (5.1)$$

式中：

E_{ac} ——沥青混合料的动态模量，PSI；

P_{200} ——沥青混合料 200 号筛（0.075mm）通过率；

F ——实验中施加的荷载频率；

V_v ——沥青混合料孔隙率，%；

$\eta_{70^{\circ}F, 10^6}$ ——沥青混合料在 70°F（21℃）的绝对粘度， $\times 10^6$ Poise；

P_{ac} ——沥青混合料中的沥青含量，%；

t_p ——沥青混合料的温度，°F。

对于某一种具体的沥青混合料或者具体的试验荷载频率，模型可进一步简化为温度和沥青混合料弹性模量之间的关系，例如对于 FWD 测试，其施加荷载频率为 18Hz，持续时间为 25-40ms。如果假定沥青混合料具有以下参数：

$$P_{200}=4\%； V_v=5\%； \eta_{70^{\circ}F, 10^6}=2； P_{ac}=5\%；$$

那么沥青混合料的温度和其弹性模量之间的关系可以简化为：

$$\log E_{ac} = 6.451235 - 0.00016467t_p^{1.92544} \quad (5.2)$$

在 Seasonal Layered Elastic Design 设计方法中^[68], CRREL (美国陆军冷区研究和工程实验室)在不同温度范围采用不同的模型来预估沥青混合料的模量。在大于 1°C 时^[69]:

$$E = 15000 - 7900 \lg(T) \quad (5.3)$$

在温度低于 1 度时^[70]:

$$\lg E = 6.285 - 1.931E - 2(T) - 3.280E - 4(T^2) - 1.888E - 5(T^3) + 1.175E - 7(T^4) + 1.502E - 8(T^5) - 2.022E - 10(T^6) \quad (5.4)$$

式中:

E ——沥青混合料模量, MPa;

T ——路面温度, °C。

Parker^[71]研究了阿拉巴马州 FWD 试验中沥青混合料的模量与温度之间的关系,得到的指数关系与 Lee 等人^[72]和 Witcak^[73]等所采用沥青混合料模量预估模型很相近,其计算模型为:

$$E_1 = \frac{322000}{T^{1.591}} \quad (5.5)$$

式中:

E_1 ——沥青混合料模量, ksi;

T ——路面温度, °C;

M. Johnson 和 R. L. Baus.根据现场 FWD 测试中得到的数据,建立了不同平均路面温度时,沥青路面模量与标准参考温度时模量之间的关系^[74]:

$$\frac{E_{std}}{E_{field}} = 10^{-0.0002175(t_0^{0.886} - t^{0.886})} \quad (5.6)$$

式中:

t ——试验温度, °F;

t_0 ——标准温度, 70°F;

E_{std} ——沥青混合料在标准温度 70°F 和标准频率荷载作用下的模量;

E_{field} ——沥青混合料在试验中平均路面温度的模量。

S. Baltzer and J. M. Jansen 提出沥青混合料模量与温度关系式^[75],其适用温度范围为 5-30°C:

$$E_{ref} = 10^{-0.018(T_{ref}-T_{AC})} E_{AC} \quad (5.7)$$

式中:

T_{ref} ——参考温度, °C;

E_{ref} ——沥青混合料在参考温度时的模量, MPa;

T_{AC} ——在 FWD 测试过程中, 沥青面层 1/3 深度处的温度, °C;

E_{AC} ——根据 FWD 试验数据反算的沥青层模量, MPa。

Y. R. Kim, B. O. Hibbs and Y.-C. Lee 根据北卡莱罗纳州 FWD 试验数据, 建立了一个类似模型^[76]:

$$E_{68} = 10^{0.0153(T-68)} E_T \quad (5.8)$$

式中:

E_{68} ——参考温度时的沥青混合料模量, MPa;

E_T ——在 T°C 时 FWD 实测模量, MPa;

T——沥青层的平均温度, °C。

D.-H. Chen, et al 根据得克萨斯州的数据得到沥青混合料模量与温度的关系^[77]:

$$E_{Tw} = E_{Tc} \left(\frac{Tw}{Tc} \right)^{2.4462} \quad (5.9)$$

式中:

E_{Tw} ——温度为参考温度 Tw 时沥青混合料的模量, MPa;

E_{Tc} ——温度为 Tc 时, 沥青混合料的模量, MPa;

Tw——参考温度, °F;

Tc——FWD 实测时沥青层的平均温度, °F。

以上沥青混合料模量与温度的模型, 基本都属于动态模量与温度之间的关系, 而我国沥青路面设计规范中采用的是静态回弹模量。静态回弹模型与动态模量之间仍然存在根本性区别, 因此不能直接使用现有模型来描述沥青混合料静态回弹模量与温度的关系。在本章后续研究中将会对我国沥青混合料的回弹模量与温度之间的关系进行试验研究。

5.1.2 沥青混合料泊松比与温度关系

泊松比是描述沥青混合料力学特性的主要物理参数之一，其定义为试件在不超材料的比例极限时，横向线应变与轴向线应变之比的绝对值。有关资料表明，泊松比的变化对路面结构最大剪应力的影响较为显著，沥青混合料泊松比的取值将直接影响到沥青路面力学分析和设计的结果。因此，对于不同温度状况下沥青混合料的泊松比取值研究也是世界各国道路界研究的热点之一。

沥青混合料的泊松比，一般在 0.15~0.50 之间，在 NCHRP 1-37A 中^[37]，热拌密级配混合料（HMA）和开级配沥青处治材料(ATPB)材料在一般状况下不同温度状况时的泊松比取值如表 5.1 所示：

表 5.1 推荐沥青类材料泊松比取值

HMA		ATPB	
温度℃	泊松比	温度℃	泊松比
<-17.8	0.15		
-17.8~4.4	0.20	<4.4	0.35
4.4~21.1	0.25	4.4~37.8	0.40
21.1~37.8	0.35	>37.8	0.45
37.8~54.4	0.45		
>54.4	0.48		

考虑到上表中数据也是由动态间接拉伸试验确定的，其数值以及规律并不适合我国以静态材料参数为主的设计体系。本文将对于沥青混合料的在不同温度状况下的泊松比进行相应的实测研究。

5.2 不同温度状况下沥青混合料力学参数试验研究

5.2.1 试验材料及级配

为了获得比较好的数据平行性，本文采用了粒径比较小的最大公称粒径为 13mm 的密级配沥青混合料，其级配为《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40-2004)中推荐使用的密级配沥青混凝土混合料矿料级配范围中值^[78]。其具体的级配范围如图 5.1 所示：

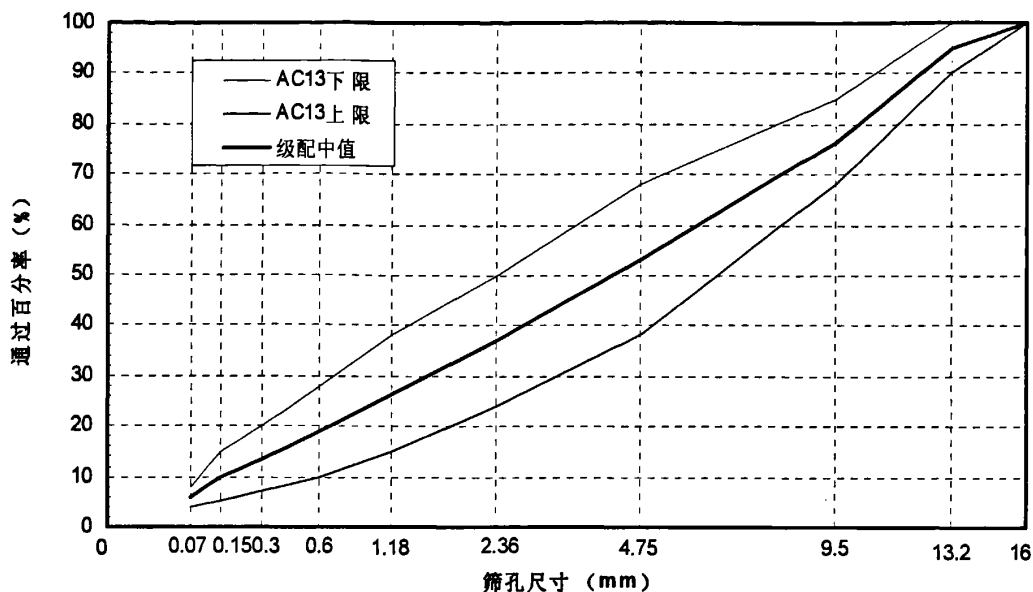


图 5.1 试验级配曲线

本文中所使用的集料为石灰岩集料，沥青为 AH-70#沥青，各种原材料的物理指标以参数如表 5.2~表 5.4 中所示：

表 5.2 粗集料基本性能

试验项目	试验值	技术标准
洛杉矶磨耗损失 (%)	8.5	≤30
压碎值 (%)	12.1	≤25
吸水率 (%)	0.45	≤2.0
针片状含量 (%)	13.2mm	≤15
	9.5mm	≤15
	4.75mm	≤15
含泥量 (%)	0.2	≤1.0

表 5.3 集料以及矿粉密度试验结果

筛孔尺寸 (mm)	表观相对密度	毛体积相对密度	吸水率 (%)
13.2	2.765	2.729	0.42
9.5	2.756	2.722	0.47

4.75	2.709	2.705	0.61
2.36	2.702	-	-
1.18	2.700	-	-
0.6	2.730	-	-
0.3	2.730	-	-
0.15	2.748	-	-
0.075	2.734	-	-
矿粉	-	2.721	-

表 5.4 AH-70#沥青基本性能

试验项目		试验值	技术标准
相对密度 (25℃)		1.033	
针入度 (100g,5s) (0.1mm)	15	18.3	
	25	76.7	60-80
	30	114	
沿度 (cm)		>150	≥100
软化点 (℃)		47.6	≥46
溶解度 (三氯乙烯) (%)		99.9	≥99.5
闪点 (℃)		300	≥260
60 度粘度 (Pa·S)		175	≥160
含蜡量		1.8	2.2
薄膜加热试 验 (163℃, 5h)	质量损失 (%)	0.1	0.8
	残留针入度比 (%)	71	≥61
	沿度 15℃ (cm)	121.4	≥15

采用标准马歇尔方法进行混合料最佳沥青用量的确定，试件的体积参数按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTJ052-2000)^[78]中的 T0705-2000 表干方法测定，并计算空隙率、沥青饱和度、矿料间隙率等物理指标，稳定度和流值参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTJ052-2000)^[3]中的 T0709-2000 方法测定。根据试验结果，本文所选用的 AC13 级配最佳沥青用量为 4.2%。

5.2.2 试验设备

试验研究中采用材料试验系统(MTS)，竖向变形使用 MTS 高精度的 LVDT 和高精度的轴向位移引伸仪(Extensometer 612.94c，如图 5.2 中所示)进行测定。

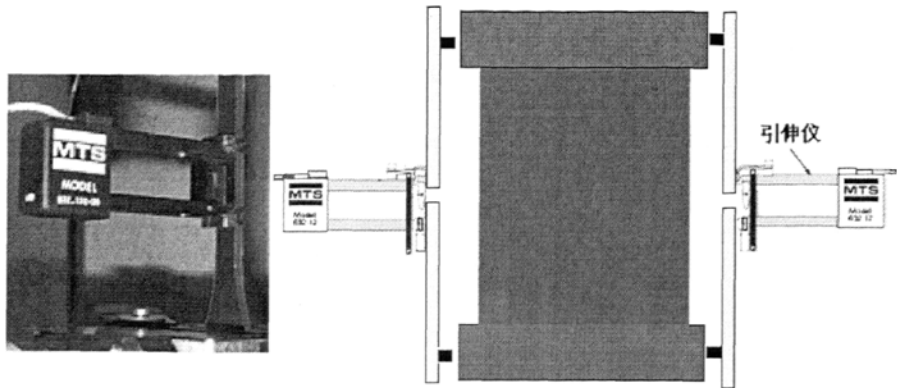


图 5.2 MTS 轴向引伸仪612.94C以及回弹模量试验示意图

对于沥青混合料泊松比的测定方法分为直接测量法和间接测量法，直接测量法是指测定材料在单向受力条件下的横向应变和纵向应变，根据泊松比的定义直接测试的方法；间接测量法是指先测定材料的其他力学参数，再根据弹性材料的特性通过计算将其转换为横向变形系数的方法，如体积法、波传法等。

对于许多弹性均质材料而言，泊松比的间接测量法较为简单。然而，沥青混合料是具有弹、粘、塑性的非均质材料，国外采用直接测量法的研究结果表明，在高温条件和较低应力水平下，即使未达到材料的比例极限，其横向应变与纵向应变的比值也会大于 0.5，间接测量法的弹性前提难以成立。因此，直接测量法才是沥青混合料横向变形系数测量的更为合理的方法。同济大学的邵显智以电阻应变测量法为基础，提出了一种新的测量方法—MTS 环向引伸仪法^[79]（Circumferential Extensometer 632.12c^[80]，如图 5.3 所示）对于沥青混合料在不同温度状况下的泊松比进行了研究。

本文在邵显志研究基础上对于其加载方式和测量方法进行改进，进一步研究在测量沥青混合料回弹变形的过程中，其回弹横向应变与回弹纵向应变的规律，以期得到不同温度状况下的沥青混合料在弹性回弹时的泊松比，试验示意图如图 5.4 所示。

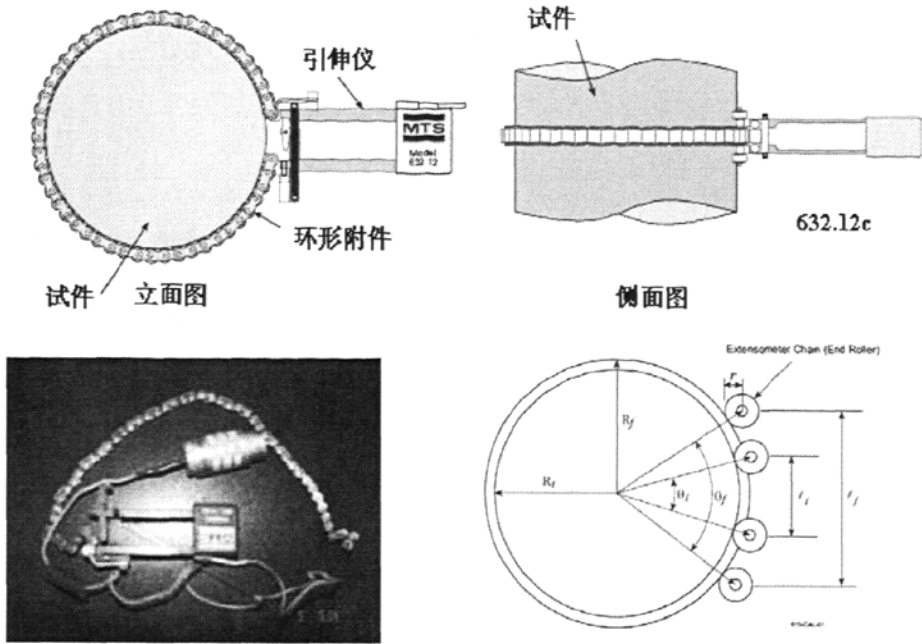


图 5.3 MTS 环向引伸仪以及工作原理示意图

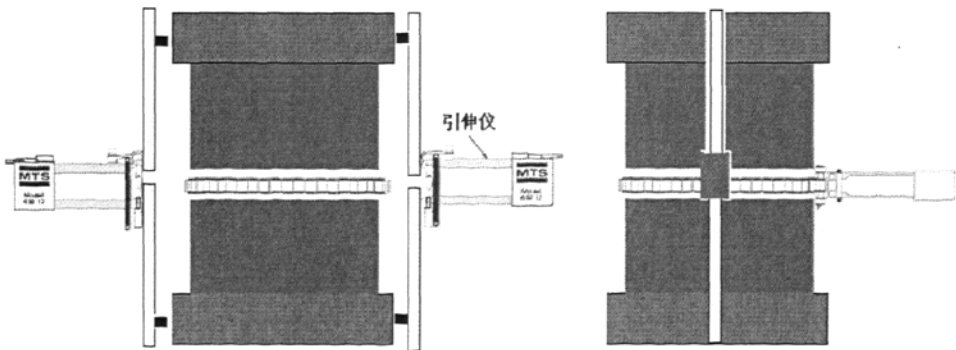


图 5.4 沥青混合料回弹模量和泊松比测定试验示意图

5.2.3 试验方法

沥青混合料试件尺寸采用高一直径比 1:1 的圆柱体试件, 直径 100mm, 高度 100mm, 其孔隙率在 4-5%之间, 采用顶面法测定沥青混合料的竖向变形, 采用环向伸仪法测量试件中部的横向变形。

沥青混合料静态抗压回弹模量测试方法按《公路工程沥青及沥青混合试验规程》(JTJ 052—2000)中 T0713-2000 规定的方法进行^[64], 测试温度为-10, 0, 10, 20, 30, 40, 50 和 60℃。首先测定沥青混合料的抗压强度 P, 然后以 0.5P 为最大荷载, 按照 0.1P 逐级加载并持续一定时间, 测量卸载过程中沥青混合料所产生的竖向回弹变形和环向回弹变形。

为了对比国外动态试验方法与我国静态试验方法对测试结果的影响, 本文中采用了两种沥青混合料动态模量测试方法:

一种是按照 ASTM D 4123-82 试验规程中的加载方式^[60], 试验中施加的荷载应力水平为 241KPa, 荷载为无间歇式半正弦波, 荷载频率为 16Hz, 10Hz, 8Hz, 4Hz 和 1 Hz。

另外一种是 NCHRP 1-37 推荐采用的沥青混合料动态模量标准测试方法 DM-1^[63], 荷载波形为正弦波, 施加频率为 0.1 Hz, 0.5 Hz, 1.0 Hz, 5 Hz, 10 Hz 和 25Hz, 且为连续加载, 无间歇时间。DM-1 方法的测试温度为-10, 4.4, 21.1, 37.8 和 54.4℃, (即 14, 40, 70, 100 和 130°F) 该方法规定测试时施加的荷载和应力水平应根据实验温度进行选择, 其具体数值如表 5.5 所示:

表 5.5 沥青混合料动态模量测试荷载和应力水平

试验温度 (℃)	应力范围(KPa)		荷载范围(KN)	
	上限	下限	上限	下限
-10.0	1400	2800	11.0	22.0
4.4	700	1400	5.5	11.0
21.1	350	700	2.7	5.5
37.8	140	250	1.1	2.0
54.4	35	70	0.3	0.5

为了和不同温度情况下的沥青混合料回弹模量试验结果进行对比, 对于 DM-1 方法的试验温度进行调整, 使其保持和回弹模量的测试温度一致, 为-10, 0, 10, 20, 30, 40, 50 和 60℃, 因此上表中的试验荷载和应力水平也应进行

相应的调整, 根据线性插值的方法, 可知应采用的荷载和应力水平如表 5.6 所示:

表 5.6 修正后沥青混合料动态模量测试荷载和应力水平

试验温度 (°C)	应力范围(KPa)		荷载范围(KN)	
	上限	下限	上限	下限
-10	1400	2800	11.0	22.0
0	891	1757	7.0	13.8
10	547	1108	4.3	8.7
20	369	738	2.9	5.8
30	229	433	1.8	3.4
40	127	216	1.0	1.7
50	64	102	0.5	0.8
60	38	51	0.3	0.4

在施加不同频率荷载时, 各级荷载持续时间和周期应根据表 5.7 选择:

表 5.7 沥青混合料动态模量测试各级荷载持续时间和周期

荷载频率(Hz)	施加周期	施加时间 (s)
25	200	8
10	200	20
5	100	20
1	20	20
0.5	15	30
0.1	15	150

考虑到在沥青混合料动态模量测试过程中, 其施加的荷载水平要远远小于静态回弹模量试验过程中的荷载, 因此动态模量测试过程中的轴向应变也要小得多, 此时其轴向变形和应变值也相当小, 测试到的位移低于环向引伸仪的测量精度范围, 此时环向引伸仪的测试结果并不理想, 因此在沥青混合料动态模量测试过程中并未对沥青混合料的泊松比进行相应的对比研究。

5.2.4 试验温度监控

试验过程中的外部环境温度由 MTS 温度环境箱控制, 其温度控制精度可以达到 0.1°C。首先将环境温度箱温度设定为试验温度, 然后将试件放入环境箱内保温若干小时, (10 度以下保温 12 小时, 其余温度保温 2~6 小时)。由于在试

验过程中需要开启环境箱，安装夹具以及位移传感器，这时可能会影响到环境箱内其他试件的温度状，为了严格控制试验过程中试件内部温度达到试验要求温度，在环境箱内放置一个哑元试件。在该试件的顶面、底面和中间部位钻孔，之后将已校准的 Pt100 铂电阻温度传感器用热沥青固定于孔中，用于观测试件顶部，底部以及内部的温度变化情况，哑元试件如图 5.5 中所示。Pt100 铂电阻温度传感器和 En880-03 无纸记录仪之间用普通 24 芯电缆连接，记录仪每 10s 显示一次哑元试件内不同位置处的温度传感器的测定结果。

哑元试件并未进行任何的力学测试，仅仅用于反映环境箱内其他试件内部温度变化状况。完成一个试件的模量测试之后，需要封闭环境箱重新对于内部的试件进行保温，直至哑元试件三个位置的温度传感器均达到试验要求，认为此时在环境箱内的所有保温试件也达到了试验的要求温度。

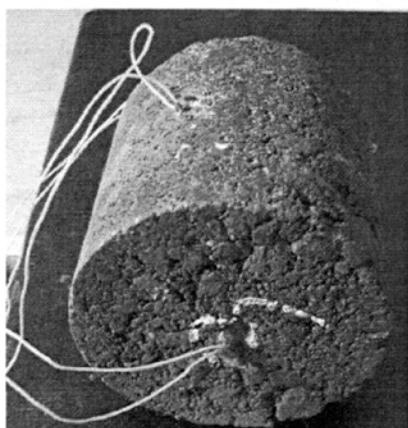


图 5.5 沥青混合料回弹模量和泊松比测定试验中的哑元试件

5.2.4 试验结果与分析

1. 沥青混合料抗压回弹模量试验结果

根据试验规程对于本文选定级配的沥青混合料进行了回弹模量的测定，在不同温度下分别进行四组试验，得到四个不同的模量值（其中 50℃ 增补一组数据），具体结果如表 5.8 中所示：

第 5 章 不同温度状况下沥青混合料力学参数实验研究

表 5.8 不同温度时沥青混合料抗压回弹模量

温度 (°C)	模量 (MPa)	平均模量 (MPa)	均方差 (MPa)	平均值±1 倍均方差 (MPa)	排出异常点之后 平均模量(MPa)
60	553.9	504.7	38.7	446.7< <562.7	504.7
	525.3				
	450.9				
	488.9				
50	905.7	839.1	51.5	756.6< <888.3	822.4
	784.7				
	864.1				
	868.1				
	772.8				
40	770.0	829.3	39.6	789.6< <908.4	829.3
	817.0				
	870.0				
	860.0				
30	1297.2	1408.0	219.1	1079.4< <1736.6	1282.5
	1784.5				
	1311.6				
	1238.7				
20	1733.6	1908.0	124.5	1721.2< <2094.8	1908.0
	1893.6				
	1920.0				
	2084.8				
10	2522.08	2617.7	93.4	2477.7< <2757.8	2617.7
	2738.64				
	2531.66				
	2678.46				
0	5838.1	5510.2	318.3	5032.7< <5988.0	5510.2
	5364.4				
	5058.6				
	5779.6				
-10	6475.0	8776.9	1456.8	6591.7< <10962.1	9544.2
	9784.6				
	8606.3				
	10241.7				

为使最终的结果具有较高的可靠度，将各个温度状况下的测试结果超过平均抗压回弹模量 ± 1 倍均方差的视为异常点，将其中差异最大的异常点，排出后重新计算的平均模量以及均方差，重复该过程，直至最终所有测试结果均处于平均抗压回弹模量 ± 1 倍均方差的范围之内，将此时的平均值视为该温度状况下的抗压回弹模量测试结果，将其汇入表 5.9:

表 5.9 不同温度沥青混合料抗压回弹模量

温度 (°C)	60	50	40	30	20	10	0	-10
抗压回弹模量 (MPa)	504.7	822.4	829.3	1282.5	1908.0	2617.7	5510.2	9544.2

2. 沥青混合料泊松比试验结果

在不同温度下得到沥青混合料在回弹变形中的泊松比测试具体结果如表 5.10 所示。为使最终的结果具有较高的可靠度，将各个温度状况下的测试结果超过平均泊松比 ± 1 倍均方差的视为异常点，将其中差异最大的异常点排出后重新计算的平均模量以及均方差，重复该过程，直至最终所有测试结果均处于平均泊松比 ± 1 倍均方差的范围之内，将此时的平均值视为该温度状况下的平均泊松比测试结果，将其汇总入表 5.11 中。

表 5.10 不同温度沥青混合料泊松比测试结果

温度 (°C)	泊松比	平均值	均方差	平均值 ± 1 倍均方差	排出异常点之后平均泊松比
60	0.741	0.683	0.054	0.737 < <0.629	0.668
	0.634				
	0.666				
	0.672				
	0.701				
50	0.593	0.582	0.064	0.646 < <0.518	0.582
	0.526				
	0.564				
	0.643				
40	0.610	0.613	0.049	0.661 < <0.563	0.612
	0.582				

	0.591					
	0.666					
30	0.540	0.584	0.106	0.689 <	<0.478	0.544
	0.701					
	0.574					
	0.519					
20	0.302	0.286	0.021	0.307 <	<0.266	0.286
	0.264					
	0.289					
	0.290					
10	0.267	0.256	0.031	0.286 <	<0.225	0.266
	0.278					
	0.255					
	0.223					
0	0.158	0.136	0.023	0.159 <	<0.114	0.136
	0.139					
	0.133					
	0.116					
-10	0.080	0.063	0.017	0.080 <	<0.046	0.057
	0.052					
	0.066					
	0.053					

表 5.11 不同温度沥青混合料泊松比

温度 (°C)	60	50	40	30	20	10	0	-10
泊松比	0.668	0.582	0.612	0.544	0.286	0.266	0.136	0.057

3. 沥青混合动态模量测试结果(ASTM 方法)

采用 ASTM D 4123-82 试验规程^[60]规定方法测的沥青混合料在荷载频率为 16Hz, 10Hz, 8Hz, 4Hz 和 1 Hz 时采用无间隔正弦波荷载得到的动态模量试验结果如表 5.12 中所示:

表 5.12 不同温度沥青混合料动态模量(ASTM) 单位: MPa

频率 (Hz)	温度 (°C)							
	-10	0	10	20	30	40	50	60
16	12837.3	8251.5	5535.2	3594.7	3025.2	1461.2	1053.9	884.0
10	11415.2	8081.1	3689.6	3153.0	2626.2	1280.0	926.1	780.5
8	10954.0	8295.9	3817.9	2996.4	2444.9	1173.1	853.3	720.9
4	9797.4	7508.1	3501.5	2515.5	2008.6	946.6	724.1	618.7
1	8464.2	6569.6	2875.8	2012.1	1377.9	705.8	577.8	501.1

4. 沥青混合动态模量测试结果(DM-1 方法)

按照 NCHRP 1-37A 推荐采用的沥青混合料动态模量标准 DM-1 测试方法采用正弦波荷载^[63], 施加频率为 0.1 Hz, 0.5 Hz, 1.0 Hz, 5 Hz, 10 Hz 和 25Hz, 并根据试验温度选择不同的荷载应力大小, 测得的沥青混合料动态模量结果如表 5.13 所示:

表 5.13 不同温度沥青混合料动态模量(DM-1) 单位: MPa

频率 (Hz)	温度 (°C)							
	-10	0	10	20	30	40	50	60
25	8288.2	6917.7	5571.2	5207.3	3451.1	2385.6	1320.0	1051.9
10	8088.6	6012.6	4536.6	4331.2	2579.0	1767.7	956.4	748.8
5	6169.1	5607.9	3985.5	3753.9	2012.9	1391.7	770.5	603.4
1	5597.9	4560.6	3217.7	2639.1	1342.3	909.2	476.0	393.9
0.5	4787.1	4458.7	2918.1	2398.6	1072.6	737.1	401.6	346.3
0.1	4572.5	4250.6	2659.6	1776.8	748.5	524.7	301.0	237.7

5. 数据分析

正如前文所述, 目前各种沥青混合料的模量—温度关系模型, 基本都是动态模量与温度之间的关系。而沥青混合料的动态模量与沥青混合料回弹模量是完全不同的力学参数, 反应沥青混合料截然不同的物理性能。将本文实测得到沥青混合料静态回弹模量与采用 AI 的沥青混合料的温度其动态模量模型式(4.2) 结果进行对比, 其结果如图 5.6 所示:

从图中可以看出, 沥青混合料回弹模量实测结果与 AI 预估模型给出的模量-温度关系之间存在明显的区别, 很显然不能直接使用 AI 模型来描述沥青混合料静态回弹模量与温度的关系。

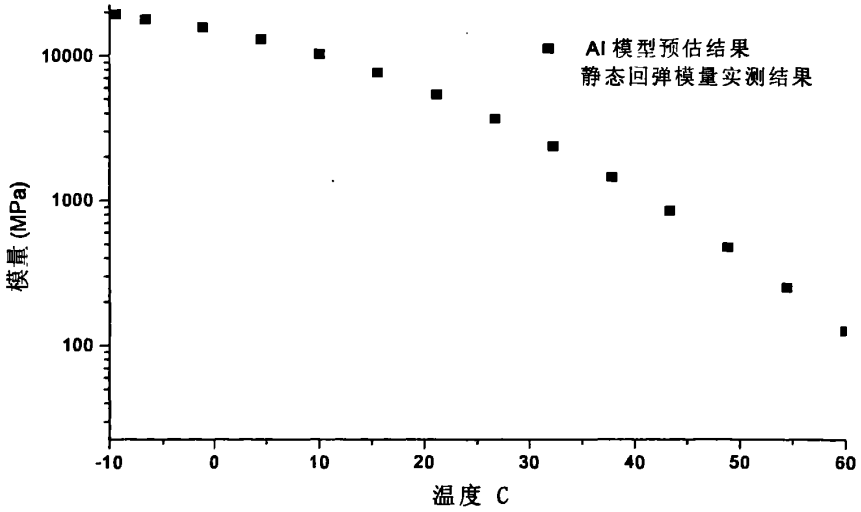


图 5.6 沥青混合料回弹模量与AI模型结果对比

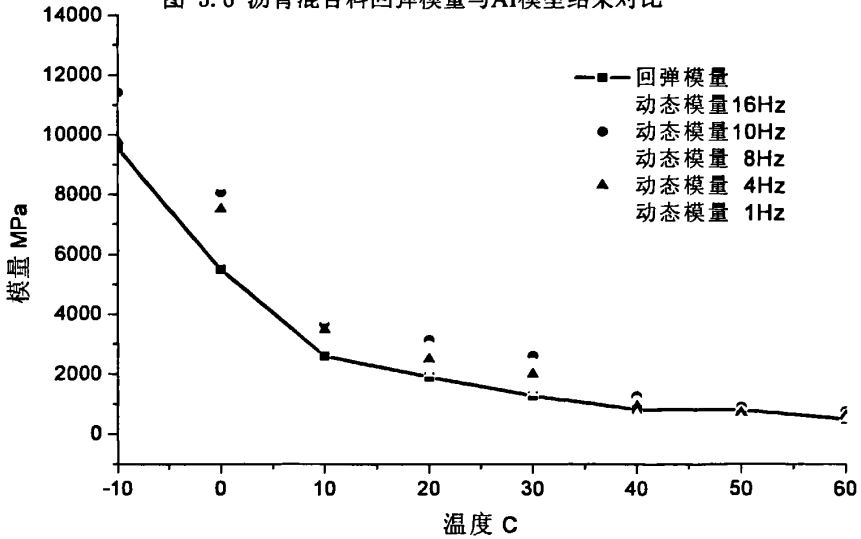


图 5.7 沥青混合料静态回弹模量与动态模量(ASTM方法)结果对比

对于本文中所使用到的相同的 AC-13 沥青混合料,其在不同温度时的实测回弹模量与动态模量 (ASTM 方法和 NCHRP 1-37A 方法) 之间的对比如图 5.7 和图 5.8 所示:

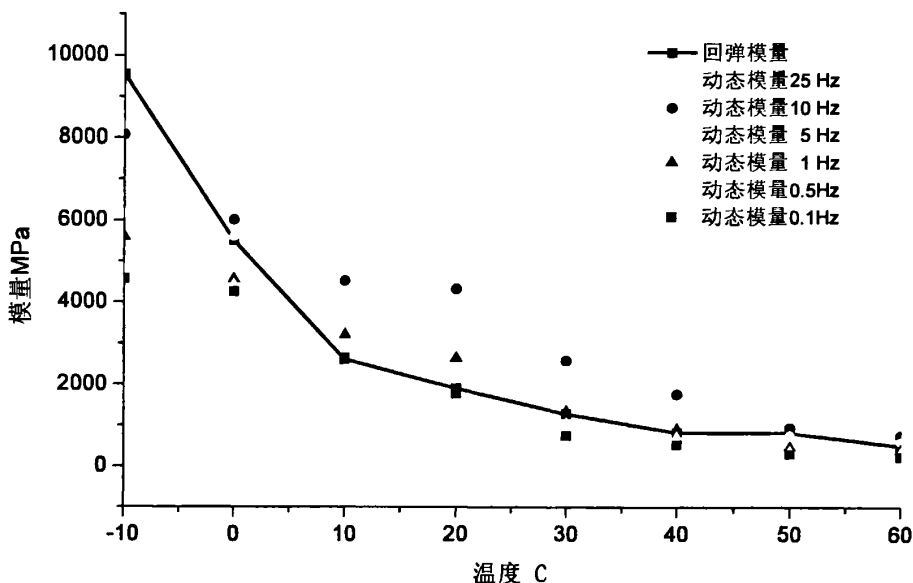


图 5.8 沥青混合料回弹模量与动态模量 (NCHRP 1-37A方法) 结果对比

从图 5.7 和图 5.8 中可知:

1. 对于同样的沥青混合料, 其静态回弹模量与动态模量之间存在一定的差异; 即便同样是动态模量也会因为其测试方法的不同得到不同的模量值;
2. 对于同一种动态模量测试方法, 其模量数值会受到施加荷载频率的影响, 随着频率增加, 沥青混合料的动态模量有增加的趋势;
3. 对于两种不同的动态模量测试方法, 由于其荷载应力水平、荷载作用周期、荷载频率并不相同, 所以即便两种试验方法都在 10Hz 在 1Hz 进行了测试, 但是其测量结果之间仍然存在一定的差异, 此时往往是荷载应力偏高的, 动态模量测试结果也比较大;
4. 荷载频率对于沥青混合料模量-温度关系影响不大, 在不同频率的实验荷载作用下, 沥青混合料动态模量与温度关系基本上都是类似的;
5. 沥青混合料的静态回弹模量与 ASTM 实验方法的低频试验结果比较接近;
6. 在温度低于 -10°C 时, 沥青混合料的静态回弹模量比采用 NCHRP 1-37A 方法测得的动态模量要大; 在温度从 $0\sim 60$ 度范围之间时, 沥青混合料的静态回弹模量与 NCHRP 1-37A 方法中采用 0.5Hz 到 5Hz

之间的荷载频率测得的动态模量比较近似;

7. 沥青混合料静态回弹模量与温度的关系与动态模量与温度的关系是完全不同的, 因此不能采用现有的动态模量与温度关系, 来反映沥青混合料静态回弹模量与温度的关系。

5.3 沥青混合料力学参数随温度变化规律

5.3.1 沥青混合料静态回弹模量与温度关系

综合前文中提及的各个温度-模量模型, 可以发现温度与沥青混合料模量之间的关系分为两类:

一种是直接将具体的模量数值和温度之间建立联系, 在模型中包括了许多用于描述沥青混合料材料组成的参数。该方法较为直接但是其适用范围相当有限, 当材料发生细微变化时, 可能就会造成整个模型的失效, 因此该类模型应用起来并不方便, 如 AI 的 Witczak 模型^[66]。

另外一种是将模量与参考温度(一般选择为 20℃)之间建立关系, 该方法使用较为广泛, 可以在仅仅进行了沥青混合料的基础力学参数试验之后就可以得到其他不同温度时的温度状况, 这些模型可以归纳简化为以下 4 种函数关系:

$$(1) \quad E_{ac}|_T = a \cdot E_{ac}|_{20} e^{bT}$$

$$(2) \quad E_{ac}|_T = a - b \log T$$

$$(3) \quad \lg E_{ac}|_T - \lg E_{ac}|_{20} = a(T - 20)$$

$$(4) \quad \lg E_{ac}|_T - \lg E_{ac}|_{20} = a(\lg T - \lg 20)$$

以上各式中:

$E_{ac}|_T$ ——沥青混合料在不同温度时的静态回弹模量, MPa;

$E_{ac}|_{20}$ ——沥青混合料在参考温度 20℃时的静态回弹模量, MPa;

T ——试验温度, ℃;

考虑到在本文中, 温度的变化范围为-10~60℃, 因此, 以上 4 种模型中仅有模型 (1)、(3) 可以被选择进行分析比较:

1. 模型 1

对于第一种模型, 沥青混合料的静态回弹模量与温度的关系为:

$$E_{ac}|_T = a \cdot E_{ac}|_{20} e^{bT} \quad (5.10)$$

将不同温度时沥青混合料的实测回弹模量值代入上式，进行回归分析便可得到回归系数 a, b 的数值，即：

$$E_{ac}|_T = 2.6065 \cdot E_{ac}|_{20} \exp(-0.0404T) \quad (5.11)$$

式中：

$E_{ac}|_T$ ——沥青混合料在温度 $T^\circ\text{C}$ 时的静态回弹模量，MPa；

$E_{ac}|_{20}$ ——沥青混合料在参考温度 20°C 时的静态回弹模量，MPa；

T ——试验温度， $^\circ\text{C}$ ；

将不同温度时的沥青混合料实测回弹模量值和采用模型 (5.11) 得到的预估结果绘入下图进行对比：

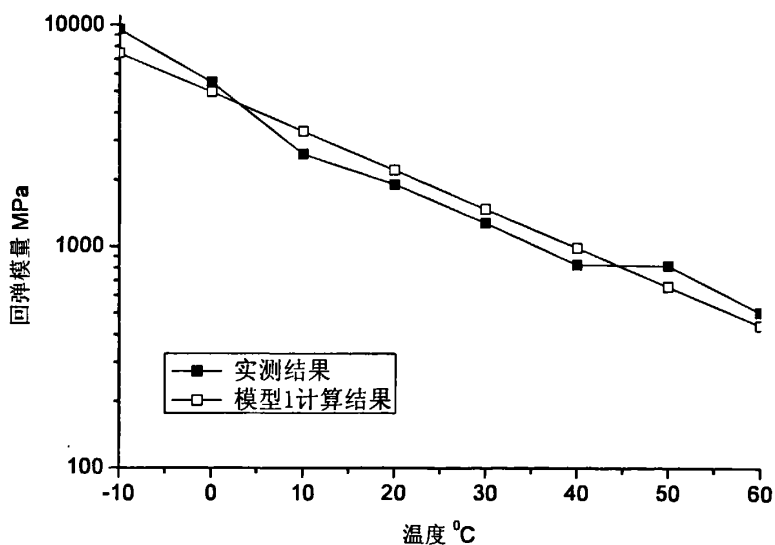


图 5.9 沥青混合料实测回弹模量与模型1预估结果对比

2. 模型 3

对于第三种模型，沥青混合料的静态回弹模量与温度的关系为：

$$\lg E_{ac}|_T - \lg E_{ac}|_{20} = a(T - 20) \quad (5.12)$$

式中：

$E_{ac}|_T$ ——沥青混合料在温度 $T^\circ\text{C}$ 时的静态回弹模量，MPa；

$E_{ac}|_{20}$ ——沥青混合料在参考温度 20℃时的静态回弹模量, MPa;

T ——试验温度, °C;

在分别计算出不同温度时 $\lg E_{ac}|_T - \lg E_{ac}|_{20}$ 的结果, 那么就可以根据简单的线性回归方法得到式 (5.12) 中的系数 a 的结果, 其具体数值如表 5.14 所示:

表 5.14 沥青混合料实测回弹模量的 $\lg E_{ac}|_T - \lg E_{ac}|_{20}$ 值

温度/°C	60	50	40	30	20	10	0	-10
回弹模量/MPa	504.7	822.4	829.3	1282.5	1908.0	2617.7	5510.2	9544.2
$\lg E_{ac} _T$	2.703	2.915	2.919	3.108	3.281	3.418	3.741	3.980
$\lg E_{ac} _T - \lg E_{ac} _{20}$	-0.578	-0.365	-0.362	-0.173	0.000	0.137	0.461	0.699

则温度与 $\lg E_{ac}|_T - \lg E_{ac}|_{20}$ 之间的关系如图 5.10 所示, 图中分别采用了线性关系和二次多项式关系, 两种不同的模型来拟合 $\lg E_{ac}|_T - \lg E_{ac}|_{20}$ 与温度 T 的关系:

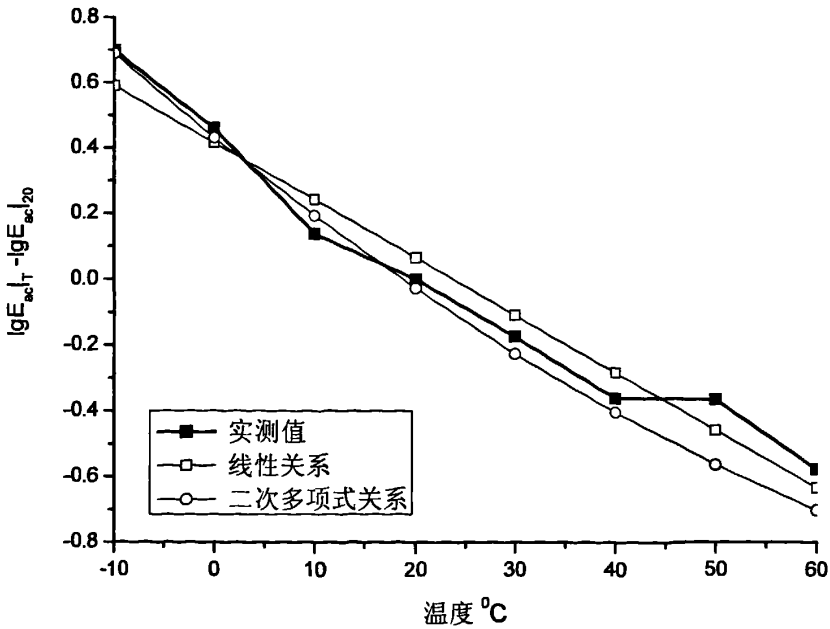


图 5.10 沥青混合料实测回弹模量 $\lg E_{ac}|_T - \lg E_{ac}|_{20}$ 值与温度关系

上图中, $\lg E_{ac}|_T - \lg E_{ac}|_{20}$ 与温度 T 的线性关系式为:

$$\lg E_{ac}|_T - \lg E_{ac}|_{20} = -0.0175T + 0.4161 \quad (5.13)$$

$\lg E_{ac}(T) - \lg E_{ac}(20)$ 与温度 T 的二次多项式关系为

$$\lg E_{ac}|_T - \lg E_{ac}|_{20} = 0.0001T^2 - 0.0249T + 0.4308 \quad (5.14)$$

3. 模型 1 和 3 的比较

将模型 1 和模型 3 (包括采用线性关系的式 5.13 和采用二次多项式关系的式 5.14) 计算结果与不同温度的实测沥青混合料回弹模量进行对比, 列于表 5.15 中:

表 5.15 沥青混合料静态回弹模量与温度关系模型对比

温度	60	50	40	30	20	10	0	-10	相关系数 R^2
实测回弹模量	504.7	822.4	829.3	1282.5	1908.0	2617.7	5510.2	9544.2	
模型 1	443.7	663.9	993.3	1486.3	2223.8	3327.4	4978.5	7449.0	0.983
模型 3 二次多项式关系	378.3	521.0	751.3	1134.5	1793.9	2970.3	5149.9	9349.8	0.998
模型 3 线性关系	437.3	655.0	981.0	1469.3	2200.8	3296.4	4937.3	7395.1	0.984

从表中可以看出采用二次多项式关系的模型 3 具有最高的相关系数, 因此采用式 (5.14) $\lg E_{ac}|_T - \lg E_{ac}|_{20} = 0.0001T^2 - 0.0249T + 0.4308$ 可以更为准确的表达沥青混合料的回弹模量与温度之间的关系。

5.3.2 沥青混合料泊松比与温度关系

将不同温度时采用 MTS 环向引伸仪法测得的沥青混合料泊松比和表 5.1 中 NCHRP 1-37A 推荐不同温度下的沥青混合料泊松比数据进行比较, 如图 5.11 所示:

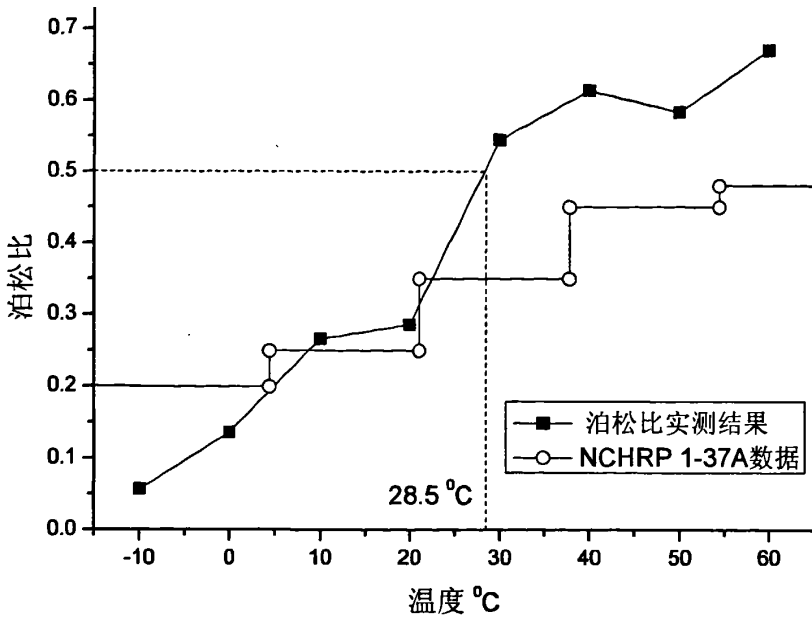


图 5.11 沥青混合料泊松比与温度关系

从图中可以发现：

1. 沥青混合料的泊松比会随着温度的增加而逐渐增大，在温度大于 28.5°C 时，沥青混合料的泊松比会大于 0.5，说明此时沥青混合料已经不再是传统意义上的弹性材料，此结果与同济大学邵显志博士的研究结果类似；这主要是因为温度较高时动态测试方法能更好地反映沥青混合料的弹性性质，而静态回弹测试方法不能很好得将沥青混合料的非弹性性质与弹性性质区分开来，因此采用静态测试方法测得的泊松比要比 NCHRP1-37A 方法中的推荐值大得多。
2. 与 NCHRP1-37A 方法中推荐的不同温度状况下沥青混合料的泊松比值相比，实测泊松比在 10~20°C 范围内与其比较接近，泊松比在 0.25~0.30 之间，在温度小于 10°C 时，实测泊松比要小于推荐值，而当温度大于 20°C 时，实测泊松比要大于推荐值；
3. 建议在我国沥青路面设计方法中，在计算 20°C 和 15°C 时的沥青路面结构位移和应力、应变时，宜采用泊松比值在 0.25~0.30 之间而取代原先的取值范围 0.30~0.35；

5.4 本章小结

本章通过大量室内试验研究了沥青混合料在不同温度状况下的力学参数变化状况,详细对比了采用我国规范规定的静态回弹模量测试方法得到的静态回弹模量和采用美国 ASTM 实验方法、DM-1 实验方法得到的动态模量,试验结果表明静态回弹模量与温度的关系和动态模量与温度的关系是完全不同的。同时采用 MTS 环向引伸仪法测定了不同温度时沥青混合料的泊松比。通过不同温度下的静态回弹模量试验数据,建立了适用于我国沥青路面设计体系的沥青混合料力学参数随温度变化规律。

第6章 沥青路面回弹弯沉温度修正问题研究

根据前文提出的沥青路面温度场预估模型和沥青混合料材料力学参数随温度变化规律,本章拟对我国沥青路面回弹弯沉的温度修正问题进行探讨。

6.1 研究背景

在我国沥青路面设计体系中沥青路面回弹弯沉仍然是沥青路面结构设计和路面检测的重要指标之一。由于沥青混合料的温度敏感性,沥青路面结构的回弹弯沉值也是会随着温度的变化而发生变化。沥青路面回弹弯沉标准值是以20℃时测定值为准,其他情况下测定弯沉值均应进行温度修正,(当沥青路面层厚度小于或者等于50mm时不需要温度修正,当路面温度在20℃±2℃的范围内时,也不需要温度修正),将非标准温度状态下测得的回弹弯沉值修正为标准温度20℃时的回弹弯沉值^[2]。不同地区沥青路面所处的温度环境千差万别,沥青面层内部的温度分布状况也相当复杂,因此沥青路面回弹弯沉的温度修正问题是我国沥青路面设计体系中一个需要详细研究的基础问题。

6.1.1 我国相关研究

在我国现行的沥青路面设计体系中有两种截然不同的回弹弯沉温度修正方法:在《公路沥青路面设计规范》(JTGD50-2006)中提出应按照原《公路沥青路面设计规范》(JTJ014-86)^[3]附录十二中的计算方法进行,另一种是按照《公路路基路面现场测试规程》(JTJ059)^[2]中T095的规定进行,其具体内容如下:

1. 《公路沥青路面设计规范》(JTJ014-86)方法:

(1) 测定时的沥青路面平均温度 T 可根据下式进行计算:

$$T = a + bT_0 \quad (6.1)$$

式中:

T ——测定时沥青面层平均温度,℃;

a ——系数, $a = -2.65 + 0.52h$;

b ——系数, $b = 0.62 - 0.008h$;

T_0 ——弯沉测定时路表温度与前五小时的平均气温之和, $^{\circ}\text{C}$;

h ——沥青面层厚度, cm ;

(2) 沥青路面弯沉的温度修正系数 K_3 , 以下式计算:

$$K_3 = \frac{l_{20}}{l_T} \quad (6.2)$$

式中:

l_{20} ——换算为 20°C 时沥青路面的弯沉值, cm ;

l_T ——测定时沥青面层内平均温度为 T 时的弯沉值, cm ;

当 $T \geq 20^{\circ}\text{C}$ 度时:

$$K_3 = e^{\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{20}\right)h} \quad (6.3)$$

当 $T < 20^{\circ}\text{C}$ 度时:

$$K_3 = e^{0.002(20-T)h} \quad (6.4)$$

该方法主要参考同济大学根据在苏丹的实验结果和国内的验证后提出的, 限于条件, 该方法没有考虑基层类型对于温度换算系数的影响, 对于路面厚度的影响也不可能考虑的太多, 对于路面平均温度的计算需采用前 5 小时气温计算, 在实际操作中存在困难, 另外计算公式也较繁琐, 因此, 此版规范(JTJ014-86) 公布后, 实际上很少使用该方法。

2. 《公路路基路面现场测试规程》(JTJ059) 中 T095 规定方法:

- (1) 计算测定时的沥青路面路表温度与 5 天前的平均气温值之和 T ;
- (2) 根据图 6.1, 由沥青层的厚度 H 和温度 T 查图确定沥青路面沥青层平均温度;
- (3) 根据基层的不同类型查图 6.2 确定弯沉的温度修正系数;

在编写该版规范的回弹弯沉修正方法时, 考虑到我国在这方面的研究甚少, 缺乏足够的数据库, 故在《公路路基路面现场测试规程》(JTJ059) 中直接采用了美国 AASHTO 路面设计指南的方法。

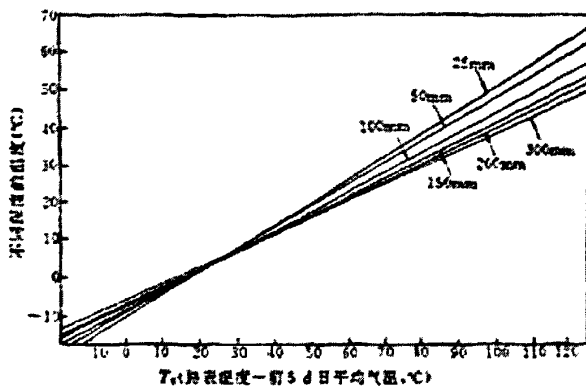


图 6.1 确定沥青路面平均温度

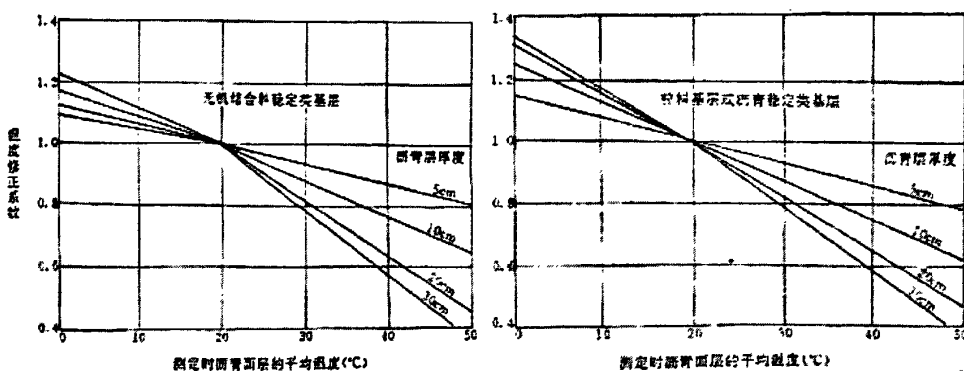


图 6.2 弯沉温度修正系数表

在 AASHTO 路面设计指南 1972 年版、1981 年版、1986 年版和 1993 年版中均对于沥青路面弯沉的温度修正方法提出了相应的规定^[81、82]。在 1972 年版和 1981 年版 AASHTO 路面设计指南中仅仅只对于采用粒料基层的沥青路面提出了温度修正方法，其中也并未考虑厚度的影响。此外，在其方法中对于沥青路面沥青层内的温度和沥青层表面温度的测定规定也相当繁琐，难以实现的。

在 1986 年版 AASHTO 路面设计指南中考虑不同种类的基层以及其温度影响。并提出了沥青面层平均温度可以根据弯沉实测时沥青层表面实测温度与前 5 天的平均气温计算得到^[81]。

考虑到 1986 年版 AASHTO 路面设计指南中的弯沉温度修正方法在基层影响上的考虑过于繁复，故在 1993 年版的 AASHTO 路面设计指南^[82]中该方法稍有改进。将基层简单分为两种不同的基层类型，同时考虑沥青层不同厚度对于弯沉温度修正结果的影响，相对来说此方法比较简单合理。因此在《公路路基

路面现场测试规程》(JTJ059)中完全采用 AASHTO 设计指南 1993 年版的方法。

6.1.2 国外相关研究

Southgate 和 Deen 通过将不同温度状况下的贝克曼梁弯沉实测结果乘上一个无量纲的修正因子,将其修正为标准温度时的弯沉值。同时发现该修正因子与沥青路面沥青层的平均温度之间存在直接关系,但是该方法在实际应用中出现了很多问题,例如对于不同的路面结构类型,即便其沥青层的厚度是近似或者相同的,修正因子与温度关系却并不相同^[83]。

Kennedy 和 Lister 引入了温度修正图表,将在 5-30℃范围内实测到的弯沉值修正至 20℃的标准弯沉。在这些图表中,弯沉与路面温度的关系主要是线性关系,同时涵盖了不同类型的路面结构是的该表格具有更为广泛的适用性能,其研究也发现沥青层的厚度对于修正结果有较大影响^[84]。

Carson 等人研究了沥青层温度和弯沉修正因子之间的关系,尽管两者之间是非线性关系,但是在一定的温度范围之内采用线性关系所引起的误差可以忽略不计^[85]。

随着落锤式弯沉仪 FWD 在道路检测中使用的日益普及,采用贝克曼梁测试弯沉的方法在国外逐渐被淘汰,相应的,对于弯沉的温度修正研究也从对于采用贝克曼梁测试方法的修正,转移到了对于 FWD 测试中的最大弯沉 D_0 值的温度修正,其弯沉的温度修正系数定于与采用贝克曼梁测试方法的定义类似,为了使得同一工程中的 FWD 实测结果具有可比性,需要将不同温度下的测定结果修正到统一的参考温度,为了和设计方法保持一致,这里将参考温度设置为 68°F,所以 FWD 测试的最大弯沉的温度修正公式可以表达为:

$$T(t) = \frac{D_0(68)}{d_0(t)} \quad (6.5)$$

式中:

$T(t)$ ——温度修正系数;

$D_0(68)$ ——参考温度 68°F(20℃)时 FWD 测试的最大弯沉值;

$d_0(t)$ ——在实测温度为 t °F 时 FWD 测试的最大弯沉。

Ehrola 等人在连续三个不同季节对于大量的沥青路面试验段进行 FWD 实测研究^[86],在每个季节中都要进行三次全日实测研究,用于研究最大弯沉值与

沥青层的平均温度之间地关系。研究发现二者之间是指数关系,根据 SHELL 的根据沥青混合料的基本物理参数来计算沥青混合料的劲度模量的公式,确定了不同温度状况下中沥青混合料的模量。根据这些模量数据,计算沥青层的厚度从 50.8mm 变化至 254mm 时,不同的路面结构组合的最大沥青弯沉。结果发现弯沉值与沥青层的平均温度之间地关系也是指数关系,其与现场实测结果非常类似。尽管沥青结合料已经沥青含量对于沥青混合料的模量存在一定的影响,但是其对于理论完成所造称的影响与沥青层的厚度所引起的影响是微乎其微的。尽管室内研究所采用的温度范围是从 0-20℃,而同时大部分的室外现场实测温度是从 20-35℃,两者之间具有较高的相关关系。

需要指出的是在 1986 年版的 AASHTO 道路设计指南中,就已经抛弃先前关于贝克曼梁测试弯沉的温度修正方法,改为采用针对于 FWD 测试的弯沉的温度修正方法。但是随后研究证明,1986 年版的 AASHTO 道路设计指南中的弯沉温度修正方法与实测结果尚存在较大差距,因此在 1993 年版的 AASHTO 道路设计指南中,采用了新的弯沉温度修正方法。

1994 年,在 SHRP 研究报告 SHRP-P-645 中也针对于 FWD 测试中的最大弯沉的温度修正问题提出了新的修正方法^[87]。根据 LTPP 研究中收集到的相关数据结合多层体系弹性半空间计算方法,结合 AI 提出的沥青混合料动态模量与温度关系式,给出了在不同温度状况下 FWD 测试中最大弯沉的温度修正算法。

Sun W. Park 和 Y. Richard KIM 等人在 1997 年根据粘弹性力学以及时温换算法则对于 FWD 实测弯沉值的温度修正方法进行研究^[88]。

在 1998 年 Erland O.Lukanen, Richard Stubstad 和 Robert Briggs 根据长期路面性能研究项目中季节观测项目 (Seasonal Monitor Program, SMP) 收集到超过 40 个试验段的沥青路面温度数据和例行 FWD 实测数据,提出了包括 FWD 试验路面温度实测、沥青路面平均温度预估以及 FWD 弯沉盆形状修正等一整套的沥青路面 FWD 实测弯沉温度修正方法^[89]。

在 2000 年 Dar-Hao Chen 等人在 Texas 州的三个试验段进行了重复的 FWD 测试,每次试验均间隔 2-3 天并且涵盖了一年之内的不同季节,提出了针对不同参考温度的 FWD 弯沉温度修正方法^[90]。

在 2001 年, Dong-Yeob Park 等人,根据提出了沥青路面有效温度概念,并据此提出了沥青路面有效温度的预估方法,以及建立了根据沥青有效温度对于沥青路面 FWD 实测弯沉值或者反算模量进行温度修正的方法,通过在 Michigan

州 6 条实验路上近 656 弯沉结果验证了该方法的有效性。与以前的方法相比,该方法不需要 5 天前的气温状况,沥青路面有效温度预估模型也更为简单,同时也可以考虑沥青层温度梯度对于弯沉结果的影响^[91]。

在 2002 年, Hee Mun Park 和 Y. Richard Kim 等人对于 North Carolina 州三个不同气候分区的 11 个试验段进行了例行的 FWD 实测, 研究发现, LTPP 研究提出的沥青路面温度预估模型具有较高的精度, 但是研究也发现 LTPP 的弯沉温度修正方法在沥青路面厚度超过 24cm 时和沥青层温度较高的情况下修正结果存在较大的误差^[92]。

6.1.3 1993 年版 AASHTO 设计方法中的温度修正方法

由于在我国沥青路面回弹弯沉的温度修正方面所做研究甚少, 缺乏足够的数 据, 在我国的《公路路基路面现场测试规程》(JTJ059) 中直接采用了美国 1993 年版 AASHTO 路面设计指南的方法^[82]。因此对于 1993 年版 AASHTO 路面设计指南中的弯沉温度修正方法进行详细介绍对于本文来说是十分必要的。AASHTO 路面设计指南中弯沉的温度修正研究主要可以分为以下几个步骤:

1. 沥青路面的温度状况

在进行弯沉测试时, 准确了解沥青路面的温度状态对于实测弯沉的温度修正是十分必要的。1993 年版 AASHTO 路面设计指南中特别指出“在进行弯沉实测试验时, 需要对于现场的温度状况进行观测, 并建立温度和沥青混合料弹性模量之间的关系”。并要求首先要在弯沉测试路段上打孔并埋入热电偶, 在每天的测试过程中至少要测量三次沥青层的温度, 从而得到沥青层内温度的日变化曲线, 并据此对于每一次弯沉测定进行温度修正。

如果无法实测现场温度状况, 那么可以采用 Southgate, SHELL 以及 AI 或者 Hoffman 和 Thompson 等人提出的沥青层温度预估方法进行。首先沥青路面的表面温度可以根据手持式红外线温度探测装置进行实测, 然后再结合弯沉实测 5 天前的日最高和最低空气温度预估沥青路面在弯沉实测过程中的温度状况。

2. 沥青混合料模量与温度关系

1993 年版 AASHTO 路面设计指南中采用的沥青混合料模量与温度关系式

是根据 AI 提供的沥青混合料模量预估公式得到的, 如式 (5.1) 所示。针对于 FWD 测试, 其施加荷载频率为 18HZ, 持续时间为 25-40ms。如果假定沥青混合料具有以下参数:

$P_{200}=4\%$; $V_V=5\%$; $\eta_{70^\circ F, 10^6}=2$; $P_{ac}=5\%$; 那么沥青混合料的温度和其弹性模量之间的关系可以简化为下式:

$$\log E_{ac} = 6.451235 - 0.00016467t_p^{1.92544} \quad (6.6)$$

式中:

E_{ac} ——沥青混合料的动态模量, PSI;

t_p ——沥青混合料的温度, $^{\circ}\text{F}$ 。

必须要注意的是, AASHTO 设计方法中专门指出, 各地公路部门应该对于该问题进行具体的研究, 建立适合各自地区的温度模量关系。同时该公式也仅仅是对于新建道路有效, 对于已经建成使用数年之后的沥青混合料, 使用该公式可能会低估沥青混合料的模量(考虑到沥青长时间之后的老化作用)或者高估沥青混合料的模量(由于水损坏或者其他因素引起破坏的沥青混合料)。

此时对根据现场钻芯得到的沥青混合料试样进行不同温度条件下的模量测试, 从而确定沥青混合料的模量与温度之间的关系。AASHTO 设计指南中推荐使用 ASTM D 4123 方法(即重复荷载间接拉伸试验)测量模量。在两个或者更多温度状况下进行, 例如(40, 70 和 90 $^{\circ}\text{F}$, 即 4.4, 21.1 和 32.2 $^{\circ}\text{F}$)以建立温度和 $\lg E_{ac}$ 之间的关系, 对于其他温度下沥青混合料的模量, 既可以根据该曲线进行插值确定。

3. 确定弯沉修正因子

1993 年版 AASHTO 设计指南的弯沉温度修正方法的主要理论基础就是先确定典型的路面结构, 然后再根据沥青混合料与温度之间的关系, 确定不同温度状态下沥青混合料的模量, 采用多层弹性体系理论分析, 确定不同温度状况下的弯沉值, 然后根据公式计算其与参考温度时计算弯沉值的比值, 得到对于不同的路面结构在不同温度状况下的弯沉修正系数。

该方法所考虑到的沥青层厚度为: 2, 4, 6, 8 和 12 英尺(即 51, 102, 152, 203, 305mm); 沥青层在不同温度的模量依据表 6.1 取值:

表 6.1 AASHTO 设计指南中沥青混合料在不同温度时的模量值

英制		国际单位制	
模量 (ksi)	温度 °F	模量 (MPa)	温度 °C
2000	30	13790	-1
1300	50	8963	10
670	68	4619	20
360	85	2482	29
132	105	910	41
55	120	379	49

该方法将基层分为两大类：粒料基层和水泥稳定基层,其厚度与模量取值分别如下：

- (1) 粒料基层：厚度为 0 或 12inch（即 0 或 305mm）；模量为 30ksi 即 206.8MPa；
- (2) 水泥稳定基层：厚度为 0 或者 10inch（即 0 或者 254mm）；模量为 850ksi 即 5860MPa；

对于土基设定其模量分别为：5, 10 或者 20 ksi 即 34, 69 或者 138MPa。

根据弹性半空间多层体系的计算结果，既可以到的 1993 年版 AASHTO 设计指南的弯沉温度修正图，如图 6.3 中所示：

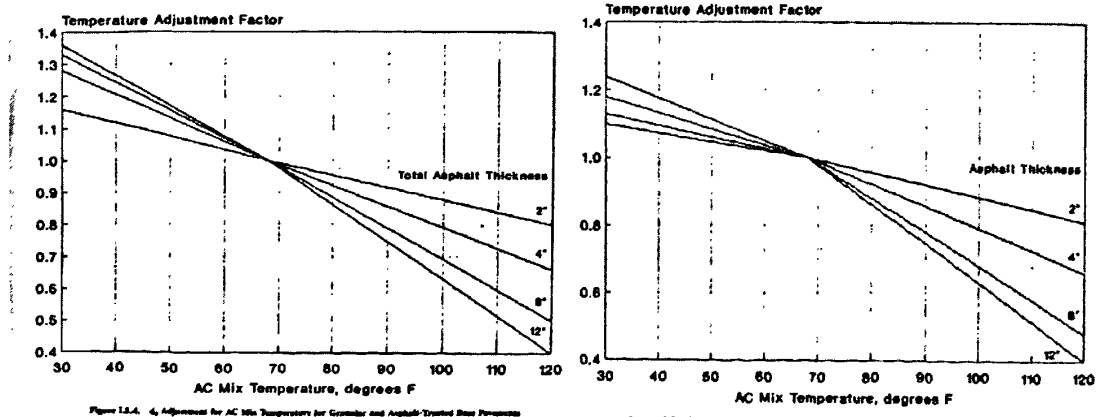


图 6.3 AASHTO设计指南的弯沉温度修正系数

6.1.4 现有研究存在的问题

经过前文对于国内外对于沥青路面弯沉的温度修正方法的综述，特别是对于我国《公路路基路面现场测试规程》(JTJ059)所直接采用的1993年版AASHTO设计指南中的方法，可以得到我国目前所采用的弯沉温度修正方法中主要存在以下几个方面的问题：

1. 1993年版的AASHTO设计方法中弯沉的温度修正方法是主要针对对于FWD的测试结果进行修正，不能直接用于我国所采用的贝克曼梁弯沉试验方法；
2. 对于沥青路面平均温度的预估方法中尚存在一定的不足，已经有文献指出，AASHTO的沥青路面平均温度预估模型中5天前平均气温与沥青路面平均温度之间并不是简单的线性关系，因此国外已经不再使用该模型，转而采用了新的沥青路面温度预估模型，如LTPP研究所采用的BELLS模型等，并在此方面继续进行了大量的相关研究；
3. 1993年版的AASHTO设计方法中弯沉的温度修正方法在分析过程中采用的路面结构过于简单，和我国的常见路面结构存在一定的差异，水泥稳定基层和粒料基层的厚度过小；
4. 1993年版的AASHTO设计方法中沥青混合料温度—模量关系是根据AI公式确定的，其所采用的模量是动态模量和我们国家在沥青路面设计过程中采用的回弹模量有本质的区别，回弹模量与温度的关系，与动态模量与温度的关系是截然不同的，不能直接套用；
5. 在路面结构理论分析的时候，AASHTO所采用参数取值是完全不同的，具体如表6.2所示；
6. 在对于沥青路面结构的弯沉值进行理论分析和计算的时候，AASHTO计算方法所考虑的弯沉和我国设计中所考虑的回弹弯沉是完全不同的体系，具体如表6.3所示；

综上所述，在我国的《公路路基路面现场测试规程》(JTJ059)中直接采用了美国1993年版AASHTO路面设计指南的方法并不合适，两者之间存在较大的差异，必须要针对我国的设计体系和材料试验方法，建立适合我国沥青路面

设计体系的沥青路面回弹弯沉温度修正方法。

表 6.2 AASHTO 设计指南方法和我国规范方法中参数取值对比表

		AASHTO 方法	我国规范方法
沥青混合料	模量(mPa)	(间接拉伸动态模量) 4600/20℃	(压缩回弹模量) 1000-2000/20℃
	泊松比	0.35	0.35
粒料柔性基层	模量(mPa)	206.8	250-400
	泊松比	0.35	0.35
水泥稳定基层	模量(mPa)	5860	1600-3000
	泊松比	0.2	0.2
土基	模量(mPa)	30-150	15-100
	泊松比	0.5	0.4-0.45

表 6.3 AASHTO 设计指南方法和我国规范方法中计算方法的比较

	AASHTO 方法	我国规范方法
模拟实验	落锤式弯沉仪测试	贝克曼梁测试方法
荷载数量	1	2
荷载大小(kN)	40	100
荷载压力(mPa)	0.5659	0.7
当量圆直径 (cm)	30	21.3
荷载间距 (cm)	-	31.95
计算结果	动态弯沉最大值	回弹弯沉最大值
材料参数	动态模量	回弹模量

6.2 沥青路面回弹弯沉温度修正方法

对于沥青路面回弹弯沉的温度修正方法可以分为两个步骤：

1. 根据已知的气温资料预估回弹弯沉测试过程中沥青路面沥青层中的温度状况或者其平均温度状况；
2. 根据沥青混合料的静态回弹模量与温度的关系，确定在不同的平均温度状况下沥青路面理论弯沉值与标准温度状况下的沥青路面理论弯沉值的比值，即回弹弯沉的温度修正系数。

在本文中也是从这两个不同方向着手：

6.2.1 用于回弹弯沉测试的沥青路面温度场预估模型

在进行沥青路面回弹弯沉测试后,可以根据本文所提供的不同地区沥青路面温度场统一预估模型对于不同深度的温度状况进行预估,从而得到在回弹弯沉测试时沥青路面内沥青层的温度状况,其具体形式如下:

$$T_p(H) = 0.0001H^2 \cdot T_{0-1} + 1.004T_{0-1} - 0.167H \cdot \bar{Q}\left[\frac{1}{5}H, \frac{1}{5}H + 4\right] + 2.314\bar{Q}\left[\frac{1}{5}H, \frac{1}{5}H + 4\right] - 0.785H + 0.003H \cdot T_m + 0.327T_m - 3.359 \quad (6.7)$$

式中:

$T_p(H)$ ——深度 H 处的沥青路面温度, $^{\circ}\text{C}$;

H ——深度, cm ;

T_{0-1} ——当前气温与前 1 小时气温的平均值, $^{\circ}\text{C}$;

$\bar{Q}\left[\frac{1}{5}H, \frac{1}{5}H + 4\right]$ ——综合太阳辐射因子,其具体计算方法参照式(4.39)和式(4.40), kW/m^2 ;

T_m ——历年月平均气温, $^{\circ}\text{C}$;

该模型在使用过程中要求输入每小时的气温和太阳辐射数据,如果在某些地区缺乏该数据的时候,可以根据本文 4.4 的方法,对于不同等级的气象进行插值处理已得到满足温度场预估模型的输入数据。

考虑到目前在我国的例行回弹弯沉测试中手持式红外线测温计的使用日益普及,因此在回弹弯沉的测试过程中可以实时得到沥青路面表面的温度数据。此时建议参考美国 LTPP 相关研究中提出的 BELLS 模型对沥青路面温度场进行预估^[93]。

6.2.2 沥青路面回弹弯沉修正系数

1. 前提假设与基本原理

需要提前说明的是,沥青路面在不同温度状况下的回弹弯沉温度修正是一个相当复杂的问题,本文采用了以下前提假设:

1. 不考虑温度梯度对于沥青路面弯沉值的影响;
2. 沥青面层是相同的材料组成,并且其静态回弹模量随温度的变化关系是一致的;
3. 根据多层弹性体系计算出的理论弯沉值在经过弯沉 F 修正系数修正之

后既可以得到沥青路面结构在参考温度 20℃ 的实测弯沉值；

4. 弯沉的温度修正系数对于弯沉的修正仅限于由于温度所引起的沥青混合料模量改变而引起的弯沉变化，
5. 在考虑温度对于沥青路面弯沉的影响的时候，其他环境是没有发生改变的（例如土基湿度是保持不变的）；

在我国现行的沥青路面的设计体系中，以弯沉作为竣工验收的主要指标，理论弯沉与实测弯沉之间的差异采用综合弯沉修正系数 F 进行修正， F 综合弯沉修正系数的定义为路面实测弯沉值与路面理论弯沉值之比，它的提出和修正有赖于理论计算和实际结构测量值的回归。

而实际弯沉计算公式可以表示为：

$$l_s = l_e \times F \quad (6.8)$$

式中：

l_s 、 l_e 分别为实测弯沉和理论弯沉，

F 为综合弯沉修正系数。

以上所指的理论弯沉和实测弯沉都是在温度为标准参考温度 20℃ 的情况，即可以表达为：

$$l_s(20) = l_e(20) \times F \quad (6.9)$$

因此可以认为实测弯沉由两部分组成，理论弯沉和 F 修正系数。

如果根据我国沥青路面设计规范中所采用的沥青混合料回弹模量与温度之间的关系，确定同一种沥青混合料在不同温度状况下的模量值，将其带入标准双轮荷载作用下弹性多层体系中，计算出轮隙中心的弯沉值与沥青路面面层平均温度之间的关系，即建立了将不同温度 T 下的理论弯沉 $l_e(T)$ 修正为参考温度 20℃ 时的标准理论弯沉 $l_e(20)$ ，如下式所示：

$$l_e(20) = l_e(T) \times K_3(T) \quad (6.10)$$

其中， $K_3(T)$ 为对于不同温度 T ℃ 时的理论弯沉 $l_e(T)$ 的温度修正系数。

将式 (6.11) 代入式 (6.10) 中即可得到：

$$l_s(20) = l_e(T) \times K_3(T) \times F = l_e(T) \times F \times K_3(T) \quad (6.11)$$

考虑到弯沉综合修正系数 F 可以表达为：

$$F = 1.63 \left(\frac{l_s(20)}{2000\delta} \right)^{0.38} \left(\frac{E_0}{p} \right)^{0.36} \quad (6.12)$$

因此对于不同的温度状况，其弯沉修正系数应为一常数。且 $l_s(T) \times F = l_s(20)$ ；因此式 (6.9) 可以改写为：

$$l_s(20) = l_s(T) \times K_3(T) \quad (6.13)$$

根据沥青路面设计规范，若不考虑实测弯沉的保证率系数，以及季节修正的影响，不同温度 T 时的实测弯沉 $l_s(T)$ 可以表达为标准温度 20°C 时实测弯沉 $l_s(20)$ 的函数，如下式所示：

$$l_s(20) = l_s(T) \times K'_3(T) \quad (6.14)$$

其中， $K'_3(T)$ 即为实测弯沉在温度 $T^\circ\text{C}$ 时的温度修正系数，将式 (6.15) 带入式 (6.14) 中即可得到

$$K'_3(T) = K_3(T) \quad (6.15)$$

因此理论弯沉的温度修正系数也即是实测弯沉的修正系数。

按照该思路，只要建立我国常用路面结构以及参数取值，结合不同温度下的沥青混合料回弹模量取值就可以确定出实测弯沉的温度修正系数。

2. 修正方法与步骤

根据我国《公路沥青路面设计规范》中所提供的半刚性基层结构和柔性基层结构典型结构组成与厚度，以及各种材料的模量取值范围，确定出在计算沥青路面回弹弯沉修正系数时，可以按照以表 6.4 数据进行计算：

表 6.4 我国典型路面结构与材料参数

	路面结构	厚度 (cm)	模量 (Mpa)
半刚性基层结构	沥青层	5, 10, 15, 20, 25, 30	
	半刚性基层	60	1600, 2000, 3000
	土基	-	30,50,80
柔性基层结构	沥青层	5, 10, 15, 20, 25, 30	
	柔性基层	40	250,300,400
	土基	-	30, 50, 80

其中沥青层的模量取值，按照本文所提出的沥青混合料静态回弹模量与温

度的关系式采 (5.14) $\lg E_{ac}|_T - \lg E_{ac}|_{20} = 0.0001T^2 - 0.0249T + 0.4308$, 以及规范推荐沥青混合料在 20℃ 时的典型回弹模量取值, 确定出沥青混合料在不同温度状况下的回弹模量可以按照下表取值:

表 6.5 不同温度时沥青层静态回弹模量

温度 (℃)	-10	0	10	20	30	40	50	60
静态回弹 模量 (MPa)	8812	4854	2799	1691	1069	708	491	357

再确定了所有的参数之后, 即可按照预先假定的路面结构和各种材料的静态回弹模量取值, 采用三层体系弹性半空间理论计算出对不同的路面结构组合型式和路面厚度组合在不同温度状况下的理论回弹弯沉 $l_s(T)$; 则不同温度状况下适用于不同路面结构组合和厚度组合的回弹弯沉温度修正系数 $K_3(T)$ 可以按照下式计算:

$$K_3(T) = l_s(T) / l_s(20) \quad (6.16)$$

式中:

$K_3(T)$ ——温度 T ℃ 时的回弹弯沉修正系数;

$l_s(T)$ ——温度 T ℃ 时对于不同路面结构组合和厚度组合计算出的理论弯沉, 0.01mm;

$l_s(20)$ ——标准状态温度 20 ℃ 时对于不同路面结构组合和厚度组合计算出的理论弯沉, 0.01mm;

3. 回弹温度修正系数结果

根据前文提出的确定回弹弯沉温度修正系数的方法和步骤, 使用 Visual Fortran 6.0 平台编写了确定不同路面结构组合和路面厚度组合时的沥青路面回弹弯沉温度修正系数程序 TempCor.for, 如附录 3 所示。

对于本文给的路面结构组合形式和路面厚度组合形式, 其代表了我国目前最为广泛使用的路面结构形式, 其回弹弯沉温度修正系数如表 6.6~表 6.7 所示, 对于其他一些表中未给出的情况, 可以根据线性内插关系得到相应的回弹弯沉修正系数。

表 6.6 半刚性基层沥青路面回弹弯沉温度修正系数表

	沥青层厚度	温度 (°C)							
		-10	0	10	20	30	40	50	60
半刚性基层模量 1600Mpa 厚度 60cm									
土基 模量 30Mpa	5cm	1.113	1.073	1.034	1.000	0.971	0.948	0.931	0.919
	10cm	1.133	1.089	1.044	1.000	0.959	0.923	0.893	0.869
	15cm	1.149	1.101	1.051	1.000	0.950	0.903	0.860	0.820
	20cm	1.165	1.112	1.057	1.000	0.942	0.885	0.830	0.777
	25cm	1.182	1.123	1.062	1.000	0.936	0.871	0.806	0.742
	30cm	1.200	1.133	1.068	1.000	0.930	0.858	0.785	0.712
土基 模量 50Mpa	5cm	1.103	1.066	1.031	1.000	0.974	0.953	0.937	0.927
	10cm	1.125	1.083	1.041	1.000	0.962	0.929	0.900	0.877
	15cm	1.146	1.098	1.049	1.000	0.951	0.905	0.862	0.822
	20cm	1.168	1.113	1.057	1.000	0.942	0.884	0.827	0.771
	25cm	1.191	1.128	1.065	1.000	0.933	0.865	0.796	0.727
	30cm	1.213	1.142	1.072	1.000	0.926	0.849	0.771	0.691
土基 模量 80Mpa	5cm	1.092	1.059	1.028	1.000	0.976	0.958	0.944	0.935
	10cm	1.117	1.077	1.038	1.000	0.965	0.934	0.908	0.886
	15cm	1.145	1.096	1.048	1.000	0.953	0.907	0.864	0.822
	20cm	1.173	1.116	1.058	1.000	0.941	0.881	0.821	0.761
	25cm	1.201	1.135	1.068	1.000	0.930	0.858	0.784	0.709
	30cm	1.229	1.152	1.077	1.000	0.920	0.838	0.753	0.667
半刚性基层模量 2000MPa 厚度 60cm									
土基 模量 30Mpa	5cm	1.112	1.071	1.033	1.000	0.973	0.953	0.938	0.927
	10cm	1.138	1.091	1.045	1.000	0.960	0.926	0.898	0.875
	15cm	1.156	1.105	1.053	1.000	0.949	0.903	0.861	0.823
	20cm	1.173	1.117	1.059	1.000	0.941	0.883	0.829	0.777
	25cm	1.189	1.128	1.065	1.000	0.934	0.867	0.802	0.738
	30cm	1.205	1.138	1.070	1.000	0.927	0.853	0.780	0.706
土基 模量 50Mpa	5cm	1.104	1.065	1.030	1.000	0.975	0.956	0.943	0.934
	10cm	1.130	1.086	1.042	1.000	0.962	0.930	0.904	0.883
	15cm	1.153	1.102	1.051	1.000	0.951	0.905	0.863	0.824
	20cm	1.175	1.118	1.060	1.000	0.940	0.882	0.825	0.769
	25cm	1.196	1.132	1.067	1.000	0.931	0.862	0.792	0.723
	30cm	1.217	1.146	1.074	1.000	0.923	0.845	0.765	0.685
土基	5cm	1.094	1.059	1.027	1.000	0.978	0.961	0.949	0.942

第 6 章 沥青路面回弹弯沉温度修正问题研究

模量 80Mpa	10cm	1.121	1.080	1.039	1.000	0.965	0.935	0.910	0.890
	15cm	1.150	1.100	1.050	1.000	0.952	0.906	0.863	0.822
	20cm	1.178	1.120	1.060	1.000	0.939	0.879	0.818	0.757
	25cm	1.205	1.138	1.070	1.000	0.928	0.854	0.780	0.704
	30cm	1.232	1.156	1.079	1.000	0.918	0.834	0.748	0.660
半刚性基层模量 3000Mpa 厚度 60cm									
土基 模量 30Mpa	5cm	1.104	1.064	1.029	1.000	0.978	0.962	0.951	0.943
	10cm	1.143	1.092	1.043	1.000	0.963	0.933	0.909	0.891
	15cm	1.168	1.111	1.054	1.000	0.950	0.906	0.867	0.833
	20cm	1.187	1.126	1.063	1.000	0.939	0.883	0.830	0.780
	25cm	1.204	1.138	1.070	1.000	0.931	0.863	0.799	0.736
	30cm	1.220	1.149	1.076	1.000	0.923	0.847	0.773	0.701
土基 模量 50Mpa	5cm	1.098	1.060	1.027	1.000	0.979	0.964	0.954	0.948
	10cm	1.135	1.087	1.041	1.000	0.965	0.936	0.914	0.896
	15cm	1.163	1.108	1.053	1.000	0.951	0.907	0.867	0.831
	20cm	1.188	1.126	1.063	1.000	0.939	0.880	0.824	0.769
	25cm	1.210	1.142	1.072	1.000	0.928	0.857	0.788	0.718
	30cm	1.231	1.156	1.080	1.000	0.919	0.838	0.758	0.678
土基 模量 80Mpa	5cm	1.091	1.055	1.025	1.000	0.981	0.968	0.959	0.954
	10cm	1.127	1.081	1.039	1.000	0.967	0.940	0.918	0.902
	15cm	1.159	1.105	1.052	1.000	0.952	0.907	0.866	0.826
	20cm	1.190	1.127	1.064	1.000	0.937	0.876	0.816	0.755
	25cm	1.218	1.147	1.075	1.000	0.925	0.849	0.773	0.697
	30cm	1.245	1.166	1.084	1.000	0.914	0.827	0.739	0.651

表 6.7 柔性基层沥青路面回弹弯沉温度修正系数表

	沥青层厚度	温度 (°C)							
		-10	0	10	20	30	40	50	60
柔性基层模量 250Mpa 厚度 40cm									
土基 模量 30Mpa	5cm	1.057	1.036	1.018	1.000	0.982	0.964	0.946	0.928
	10cm	1.132	1.081	1.037	1.000	0.967	0.937	0.909	0.882
	15cm	1.195	1.119	1.055	1.000	0.952	0.909	0.870	0.832
	20cm	1.245	1.150	1.069	1.000	0.940	0.886	0.837	0.790
	25cm	1.286	1.175	1.081	1.000	0.930	0.867	0.809	0.754
	30cm	1.321	1.197	1.091	1.000	0.921	0.850	0.785	0.723

第 6 章 沥青路面回弹弯沉温度修正问题研究

土基 模量 50Mpa	5cm	1.051	1.031	1.014	1.000	0.987	0.974	0.961	0.949
	10cm	1.141	1.086	1.039	1.000	0.967	0.938	0.913	0.890
	15cm	1.210	1.128	1.059	1.000	0.949	0.905	0.865	0.828
	20cm	1.262	1.161	1.074	1.000	0.936	0.879	0.827	0.778
	25cm	1.304	1.187	1.086	1.000	0.924	0.857	0.795	0.736
	30cm	1.338	1.208	1.097	1.000	0.915	0.839	0.769	0.702
土基 模量 80Mpa	5cm	1.045	1.025	1.011	1.000	0.991	0.983	0.976	0.969
	10cm	1.152	1.091	1.041	1.000	0.966	0.939	0.916	0.896
	15cm	1.227	1.138	1.063	1.000	0.946	0.900	0.859	0.822
	20cm	1.281	1.173	1.080	1.000	0.931	0.870	0.815	0.763
	25cm	1.324	1.200	1.093	1.000	0.919	0.846	0.780	0.717
	30cm	1.359	1.222	1.103	1.000	0.909	0.827	0.751	0.678
柔性基层模量 300Mpa 厚度 40cm									
土基 模量 30Mpa	5cm	1.058	1.038	1.019	1.000	0.980	0.960	0.940	0.921
	10cm	1.122	1.076	1.035	1.000	0.968	0.937	0.909	0.881
	15cm	1.180	1.111	1.051	1.000	0.954	0.913	0.873	0.835
	20cm	1.229	1.140	1.065	1.000	0.943	0.891	0.842	0.794
	25cm	1.270	1.165	1.076	1.000	0.933	0.872	0.815	0.759
	30cm	1.305	1.187	1.086	1.000	0.924	0.856	0.791	0.729
土基 模量 50Mpa	5cm	1.050	1.031	1.015	1.000	0.985	0.970	0.955	0.941
	10cm	1.129	1.079	1.036	1.000	0.968	0.940	0.915	0.891
	15cm	1.194	1.119	1.055	1.000	0.952	0.909	0.870	0.833
	20cm	1.245	1.150	1.070	1.000	0.939	0.884	0.833	0.784
	25cm	1.287	1.176	1.082	1.000	0.928	0.863	0.802	0.743
	30cm	1.322	1.199	1.092	1.000	0.918	0.845	0.776	0.708
土基 模量 80Mpa	5cm	1.042	1.025	1.011	1.000	0.990	0.980	0.971	0.962
	10cm	1.137	1.083	1.037	1.000	0.969	0.942	0.920	0.899
	15cm	1.209	1.128	1.059	1.000	0.950	0.906	0.866	0.829
	20cm	1.263	1.162	1.075	1.000	0.935	0.876	0.823	0.771
	25cm	1.306	1.189	1.088	1.000	0.922	0.853	0.787	0.724
	30cm	1.343	1.212	1.099	1.000	0.912	0.833	0.758	0.685
柔性基层模量 400Mpa 厚度 40cm									
土基 模量 30Mpa	5cm	1.064	1.044	1.022	1.000	0.977	0.953	0.931	0.910
	10cm	1.112	1.071	1.034	1.000	0.967	0.936	0.905	0.876
	15cm	1.162	1.100	1.047	1.000	0.956	0.915	0.875	0.835
	20cm	1.206	1.127	1.059	1.000	0.946	0.895	0.846	0.797

第 6 章 沥青路面回弹弯沉温度修正问题研究

	25cm	1.246	1.151	1.070	1.000	0.937	0.878	0.821	0.764
	30cm	1.280	1.172	1.080	1.000	0.928	0.862	0.798	0.734
土基 模量 50Mpa	5cm	1.054	1.036	1.018	1.000	0.982	0.963	0.946	0.930
	10cm	1.115	1.072	1.034	1.000	0.969	0.941	0.914	0.889
	15cm	1.173	1.106	1.050	1.000	0.955	0.914	0.875	0.837
	20cm	1.221	1.136	1.063	1.000	0.943	0.890	0.840	0.790
	25cm	1.262	1.161	1.075	1.000	0.932	0.870	0.809	0.749
	30cm	1.297	1.184	1.086	1.000	0.923	0.852	0.783	0.715
	土基 模量 80Mpa	5cm	1.044	1.027	1.013	1.000	0.987	0.974	0.962
10cm		1.119	1.073	1.033	1.000	0.971	0.945	0.922	0.900
15cm		1.184	1.113	1.052	1.000	0.954	0.912	0.873	0.836
20cm		1.237	1.146	1.068	1.000	0.940	0.884	0.831	0.779
25cm		1.280	1.173	1.081	1.000	0.927	0.860	0.796	0.732
30cm		1.317	1.197	1.092	1.000	0.917	0.840	0.766	0.692

6.3 本章小结

本章针对我国沥青路面设计体系中采用的沥青路面回弹弯沉温度修正方法,详细研究其在沥青层平均温度预估以及模量的温度修正等方面存在的问题,并结合本文提出的沥青路面温度场预估模型以及沥青混合料力学参数随温度变化规律,建立了适合我国沥青路面设计体系和试验体系的沥青路面回弹弯沉修正系数表。

第7章 结论与展望

7.1 结论

温度是影响沥青路面性能的重要环境因素，精确的沥青路面温度场预估模型是在沥青路面设计体系和力学分析中引入温度因素的基础。本文结合同济大学在我国不同地区开展的沥青路面温度场实测工作，对于沥青路面温度场的预估方法及其应用进行了相应研究，主要研究成果如下：

1. 通过对沥青路面温度场不同深度处实测温度数据的分析，建立沥青路面温度场在环境因素影响下的变化规律：

- (1) 沥青路面温度场与气温之间存在良好的相关关系，但是随着路面深度的增加，环境因素和路面温度之间的滞后性会愈加明显。
- (2) 沥青路面不同深度处温度分布频率的平均值会随着深度的增加发生变化，其平均值随深度增加而呈现出减少或者增加的趋势，在一定深度处总是会保持为常数不再变化。
- (3) 沥青路面不同深度处温度分布频率的方差总是会随着深度的增加而逐渐降低，并且会在一定深度保持为常数不再发生变化，这也说明气温等外部环境因素对于沥青路面的影响会随深度的增加而减弱，而随着深度的增加，地温对于路面温度场的影响会逐渐显著。

2. 根据传热学基本原理，建立了沥青路面温度场有限差分预估模型，可根据每小时的空气温度、太阳辐射和风速较为准确地预估沥青路面各个深度处的温度状况。其主要研究内容为：

- (1) 根据沥青路面温度场特征，对比解析法、有限差分方法和有限单元法的优缺点，最终确定以有限差分法为基础建立沥青路面温度场理论预估模型；
- (2) 在确定了沥青路面温度场有限差分模型的几何特征、表面对流换热条件，表面辐射换热条件，底面边界条件之后，根据有限差分离散原理建立了沥青路面温度场有限差分预估模型；

- (3) 采用有限差分预估模型, 预估了上海、乌鲁木齐、唐山以及武汉地区的沥青路面温度场变化状况, 与实测路面温度数据对比结果表明, 该模型不但具有较高的预估精度, 而且具有广泛适应性。

3. 通过我国实测沥青路面温度数据, 采用互相关分析方法建立了适应我国气候条件的沥青路面温度场统计预估模型, 通过与实测数据对比表明该模型预估精度较高, 并有效克服了温度预估模型的地域差异性。其主要研究内容为:

- (1) 根据我国实测沥青路面温度数据, 详细分析了现有沥青路面统计回归模型的适应性和准确性, 结果表明现有的 SUPERPAVE 温度预估模型、LTPP 温度预估模型以及 UW 温度预估模型的预估结果精度有限并不适用于我国气候条件, 应根据我国沥青路面实测温度建立适应我国气候条件的沥青路面温度场预估模型;
- (2) 通过插值方法修正沥青路面温度场原始实测数据在深度方向分布不均匀的问题, 克服了原始沥青路面实测温度数据对于模型预估精度的影响;
- (3) 采用交叉互分析的方法分析各种环境变量与各个深度处的实测温度路面数据的相关关系, 确定了与沥青路面不同深度的温度状况最为显著相关的环境自变量:
 - 与路面温度最为显著相关的气温和太阳辐射自变量出现时间与路面温度之间的延迟时间会随着深度的增加而增加;
 - 在不同深度处, 最显著相关的环境自变量是 2 个时间内的平均温度和 5 个平均太阳辐射
- (4) 通过分析, 最终选择 $T(0,2)$ (即当前气温和 1 小时前气温的平均值) 和综合太阳辐射因子 $\bar{Q}(\frac{1}{3}H, 5)$ 建立了不同地区的沥青路面温度场的预估模型;
- (5) 通过与实测数据的对比说明本文提出的沥青路面温度场统计预估模型不但可以准确的预估沥青路面不同深度处的温度状况, 同时也可以更为准确地真实地反映出不同深度处的日最高、最低温度出现的时间, 克服了以往模型中存在的缺陷;
- (6) 通过在模型中引入地区修正系数 $H \cdot T_m$ 和 T_m , 从一定程度上解决困扰沥青路面温度场统计回归方法的地区差异性。

4. 通过大量室内试验详细研究了沥青混合料在不同温度状况下的力学参数

变化情况,详细对比了采用我国规范静态回弹模量测试方法得到的静态回弹模量和采用美国 ASTM 实验方法、DM-1 实验方法得到的动态模量之间的差异,建立了适用于我国沥青路面设计体系的沥青混合料力学参数随温度变化规律。其主要研究内容为:

- (1) 采用不同的测试方法,测定了 AC-13 沥青混合料在不同温度下的动态模量和静态回弹模量;实测结果表明,对于同一种沥青混合料,其静态模量与动态模量之间存在较大差异,即使同样是动态模量,也会因为其测试方法不同而得到完全不同的测试结果;
- (2) 现有沥青混合料动态模量与温度关系不能准确反映我国沥青路面设计体系中所使用的静态回弹模量与温度之间的关系;根据实测结果,本研究建立了适用于我国沥青路面设计体系的沥青混合料静态回弹模量与温度关系模型;
- (3) 采用环向引伸仪法测定了沥青混合料在静态回弹试验中的泊松比,试验发现沥青混合料的泊松比会随着温度的增加而逐渐增大,在温度大于 28.5℃时,沥青混合料的泊松比会大于 0.5,说明此时沥青混合料已经不再是传统意义上的弹性材料。建议在我国沥青路面设计方法中,在计算 20℃和 15℃时的沥青路面结构位移和应力、应变时,宜采用泊松比值在 0.25~0.30 之间而取代原先的取值范围 0.30~0.35;

5. 针对于我国沥青路面回弹弯沉温度修正方法中存在的问题,在本研究所建立的沥青路面温度场预估模型和沥青混合料力学参数随温度变化规律的基础上,建立了沥青路面回弹弯沉温度修正系数表。

7.2 展望

本文的研究虽然取得了一些成果,但尚有许多有待进一步深入进行的研究工作,择其要者简述如下:

1. 本文对于我国数个城市进行了沥青路面实测研究,但相对于我国众多的气候分区,这些实测地点数量上仍相当有限;同时由于研究手段所限,未能在各个实测研究地区开展一年或者一年以上的沥青路面温度场持续观测。如能广泛建立我国各地的沥青路面温度场多年实测结果数据库,并依次为依据建立和

完善沥青路面温度场预估模型，将更具备广泛意义；

2. 本文中对于沥青路面温度场的理论预估方法进行了较为详细的研究，但由于实验手段有限，尚不能针对于沥青混合料的热物理参数，如导热系数、比热容、散热率等进行实测研究，而只能根据经验进行取值，这也直接影响到了理论模型最终的预估精度，相关参数的实测研究有待在下一步继续进行；

3. 本文建立的沥青路面温度场统计预估模型对于一般气候状况下的路面温度预估效果较好，但对于特殊气候条件（如连续高温，气温骤升骤降，雨雪天气）时沥青路面温度的预估还有待进一步改进；

4. 本文建立了沥青混合料的静态回弹模量随温度变化规律，但由于时间所限，研究中仅选择了 AC13 级配中值进行了试验，这可能会造成本文的模量随温度变化关系具有一定局限性，有待选择更多不同类型的材料和级配进行试验，据以建立沥青混合料静态回弹模量随温度变化关系；

5. 本文对沥青路面回弹弯沉的温度修正方法进行了理论研究，尚需大量现场实验实测结果以对本文方法进行优化和改进。

致谢

本文是在导师孙立军教授的悉心指导下完成的。三年前，蒙恩师不弃，学生得以忝列门下。未入门下，吾尚不知天高地厚，窃以为以窥科研之初境，通晓技术之法门；初入课题组，嵌锁路面、抗剪试验、行为理论、统一设计理论，无不令我欣喜若狂；永久路面、管理系统、率变方程、智能交通平台，更令我无限神往；至此方晓“惊蛙不可语天，夏虫不可语冰”。吾自知生性驽钝，惟勤力自勉，徐图渐进。

三年来，先生无论是在学习还是在生活方面都给予了我莫大的关怀和支持，先生前瞻性的学术视角、敏锐的学术思维，严谨的治学风格，耐心细致的育人风格，都让我亲身感觉到了大家风范，值得学生在一生中去体会和学习。无论是在课题组的讨论，还是在课堂上的指导，无论是在生活中的言传，还是在无意中的身教，每次都令我醍醐灌顶，豁然开朗，更使我认识自身差距，激发继续前行的热情。三年多的时间转瞬即逝，学生实难表达对先生的感激与敬佩之情，谨以微言相谢，并祝先生身体健康、工作顺利！

我庆幸自己可以来到LJSGROUP这个优秀的研究团队，感谢刘黎萍老师、陈长老师和杜豫川老师对于我的关心和指导。感谢胡小弟、袁峻、崔鹏、苏凯、曹丽萍、杨斐、侯航舰、董文龙、胡晓，每次和你们讨论学习上的问题都会让我有所收获。感谢邵敏华、蔡晓禹、周文献、周晓鹏、姬杨蓓蓓、郝媛、徐天东、杜群乐、胡春华、邵显志以及叶筠、郑远、赵明宇、王国英、耿媛婧、白旭、彭一川、周丹、杨进、朱迪等人，让我的生活充满了欢乐。感谢课题组其他各位熟悉或者还没来得及熟悉的朋友，祝大家在以后的求学生活中一切顺利！

感谢我的朋友刘成学、王海生、梁栋、彭争光、杨迎旭和杨飞对于我鼓励和无私帮助，你们已经与我的生活紧紧地联系在一起。

感谢我的父母和家人在我的背后默默支持着我走完漫漫求学之路。你们的支持和鼓励，将是我一生勇往直前的动力！

感谢所有关心我的人！

2008年2月

参考文献

- [1] 孙立军 等著. 沥青路面结构行为理论. 北京: 人民交通出版社, 2005
- [2] 公路工程路基路面现场测试规程.(JTJ059). 北京: 人民交通出版社, 1995
- [3] 公路沥青路面设计规范.(JTGD50-2006/JTJ014-97/ JTJ014-86). 北京: 人民交通出版社, 2006&1997&1986
- [4] Barber, E.S. Calculation of Maximum Pavement Temperature from Weather Reports. Highway Research Board Bulletin, 1957, 168:1-8
- [5] Straub, A.L., H.N. Schenck Jr., F.E. Przybycien. Bituminous Pavement Temperature Related to Climate. Highway Research Record, 1968, 256:53-77
- [6] Rumney, T.N., R.A. Jimenez. Analysis of the Integrated Model of Climatic Effects on Pavements. Highway Research Record, 1969, 361: 1-19
- [7] Dempsey, B.J., H. Thompson, Characterizing Temperature Effects for Pavement Analysis and Design. Transportation Research Record, 1970, 549:39-46
- [8] Southgate, H.F. An Evaluation of the Temperature Distribution within Asphalt Pavements and its Relationship to Pavement Deflection. 1969
- [9] Christison, J.T., K.O. Anderson. The Response of Asphalt Pavement to Low Temperature Climatic Environment. Proceeding of the 3rd International Conference on the Structure Design of Asphalt Pavement. September 1972
- [10] Williamson, R.H. Effects of Environment on Pavement Temperatures. International Conference on Structural Design Proceedings, 1972
- [11] Noss. P.M. The Relationship between Meteorological Factors and Pavement Temperature. Symposium on Frost Action on Roads Conference Paper 1973, 77-87
- [12] LTPP Seasonal Monitoring Program: Instrumentation Installation and Data Collection Guidelines, FHWA-RD-94-110, McLean, VA: Federal Highway Administration, April 1994.
- [13] Kennedy, T.W., M. Solaimanian. Predicting Maximum Pavement Surface Temperature Using Maximum Air Temperature and Hourly Solar Radiation. Transportation Research Record, 1993, 1417:1-11
- [14] Huber, G.A., et al. Weather Database for the Superpave Mix Design System. SHRP-A-648A. National Research Council, Washington DC, 1994.
- [15] Alaeddin Mohseni, et al. LTPP seasonal asphalt concrete (AC) pavement temperature models. U.S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration, Research and Development, Turner-Fairbank Highway Research Center. 1997.
- [16] Mohseni, A., M. Symons. Effect of Improved LTPP AC Pavement Temperature Models on SUPERPAVE Performance Grades. Transportation Research Board 76th Annual Meeting, Washington DC, 1997

- [17] Canadian Strategic Highway Research Program (C-SHRP), Superpave VS. The Canadian Winter: Low Temperature Performance at C-SHRP Test Roads, 2002, C-SHRP Technical Brief.
- [18] Federal Highway Administration (FHWA), LTPP Data Analysis: Improved Low Pavement Temperature Prediction, 1998, FHWA-RD-97-104
- [19] Inge, E.H., Jr., Y.R. Kim. Prediction of Effective Asphalt Layer Temperature. Transportation Research Record, 1995, 1473: 93-100
- [20] Lukanen, E.O., C. Han, and E.L. Skok Jr. Probabilistic Method of Asphalt Binder Selection Based on Pavement Temperature. Transportation Research Record, 1998, 1609:12-20
- [21] Mohseni A, Symons M. Improved AC pavement temperature models from LTPP seasonal data. TRB. Transportation research board 77th annual meeting. Washington DC: Transportation Research Board, 1998.
- [22] Bosscher, P.J., H.U. Bahia, S. Thomas, J.S. Russell. Relationship between Pavement Temperature and Weather Data. Transportation Research Record. 1998, 1609:1-11
- [23] Hermansson, Ake. Simulation Model for Calculating Pavement Temperature Including Maximum Temperature. Transportation Research Record, 2000, 1699:134-141
- [24] Hermansson, Ake. Mathematical model for calculation of Pavement temperatures: Comparison of calculated and measured temperatures. Transportation Research Record, 2001, 1764:180-188
- [25] Diefenderfer, B.K., et al. Development and Validation of a Model to Predict Pavement Temperature Profile. Transportation Research Board 82nd Annual Meeting, Washington DC, 2003
- [26] Manuel J. C. Minhoto. Jorge C. Pais Predicting Asphalt Pavement Temperature with a Three-Dimensional Finite Element Method. Transportation Research Board 84th Annual Meeting, Washington DC, 2005
- [27] 严作人. 层状路面体系的温度场分析. 同济大学学报, 1984. Vol.3
- [28] 吴赣昌. 层状路面体系温度场分析. 中国公路学报 1992. Vol.5, No.4:17-25
- [29] 吴赣昌. 半刚性路面温度应力分析. 北京: 科学出版社, 1995
- [30] 吴赣昌, 张淦生. 有效辐射计算对沥青路面温度场的影响. 佛山大学学报. 1995. Vol.13, No.2:19-25
- [31] 徐世法. 沥青路面温度分布规律的研究. 北京公路. 1995 Vol. 5:15-19
- [32] 谈至明、孙立军. 路面结构低温状况分析. 同济大学学报. 1999 Vol. 27, No.5: 520-525
- [33] 孙立军, 秦健. 沥青路面温度场的预估模型, 同济大学学报, 2006 Vol.34, No.4, PP:480-483
- [34] 秦健. 沥青路面温度场的预估方法研究.[同济大学硕士论文]同济大学: 交通运输工程学院, 2004
- [35] 贾璐. 沥青路面高温温度场数值分析与实验研究. [湖南大学硕士论文] 湖南大学: 土木工程学院, 2004
- [36] Development of the LTPP Climatic Database, SHRP-P-621, Strategic Highway Research Program., National Research Council, Washington, D.C., 1992.

参考文献

- [37] Guide for mechanistic mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures. NCHRP Report 1-37A, National Research Council, Washington, D.C., 2004
- [38] 张文璋. 实用统计分析方法与 SPSS 应用. 北京: 当代中国出版社, 2004
- [39] 章熙民, 任泽霁等. 传热学(第四版). 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.12
- [40] 陶文钰等. 数值传热学. 西安: 西安交通大学出版社, 1988
- [41] 王勖成, 邵敏. 有限单元法基本原理和数值解法. 北京: 清华大学出版社, 1997
- [42] An intergrated Model of the Climatic Effects on Pavements. US Department of Transportation Federal Highway Administration, 1993
- [43] Gregg Larson, Barry J. Dempsy. Enhanced Intergrated climatic model. Department of civil engineering university of Illinois at Urbana-champaign Newmark Civil Engineering Laboratory, 1997
- [44] Joseph L. Investigation of Thermal Properties and Transient Temperature Distribution of Asphalt Concrete. MScE. Thesis, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 2003
- [45] Khaled K., Cenk Y. Assessment of Temperature Fluctuations in Asphalt Pavements Due to Thermal Environmental Conditions Using A Two-Dimensional Transient Finite Difference Approach, MPC Report NO. 02-136, 2002.10
- [46] 韩子东. 道路结构温度场研究: [长安大学硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2001
- [47] 同济大学道路与交通工程研究所, 半刚性基层沥青路面的研究. (交通部科技重点项目 85—65J) 上海: 同济大学
- [48] Greg Johnson. Environmental Factors Reports, 2nd Annual MnROAD Workshop, February 20, 2002, Minnesota Department of Transportation. http://mnroad.dot.state.mn.us/Research/mnroad_project/workshop2002/environmental_factors.pdf
- [49] 中华人民共和国行业标准.地面气象观测规范(QX/TXXXX—2005), 北京: 气象出版社, 2005
- [50] Pandey D.K.;Paden J.;Lee R.B., Effects of Atmospheric Emissivity on Clear Sky Temperature, Atmospheric Environment Vol. 29, No.16, pp.2201-2204,1995
- [51] Alaeddin Mohseni, Samuel Carpenter, John D'Angelo, Performance Based Algorithm for the Selection of SUPERPAVE High-Temperature Performance Grade (PG) for Asphalt Binders, Transportation Research Board 84th Annual Meeting, Washington DC, 2005
- [52] <http://www.fhwa.dot.gov/PAVEMENT/ltp/>
- [53] Federal Highway Administration (FHWA), LTPP Data Analysis: Improved Low Pavement Temperature Prediction, 1998, FHWA-RD-97-104
- [54] Donald E. Watson, Jingna Zhang, et al. Analysis of temperature data for the NCAT Test Track. Transportation Research Board 83th Annual Meeting, Washington DC, 2004
- [55] George A. F. Seber, Alan J. Lee. Linear Regression Analysis. Wiley-Interscience., 2003
- [56] Elson, E. L., Rigler, R., Cross-correlation analysis in FCS. Springer 2001
- [57] Development of Pavement Temperature Prediction Model for Asphalt Concrete Pavements. 6th Internation conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, 2002
- [58] Tayebali, A. A., B. Tsai, and C. L. Monismith. Stiffness of Asphalt-Aggregate Mixes.

- SHRP-A-388. Strategic Highway Research Program. National Research Council, Washington, D.C., 1994.
- [59] Monismith, C. L., R. G. Hicks, and F. N. Finn. Accelerated Load Tests for Asphalt-Aggregate Mixtures and Their role in AAMAS. Proc., Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 60, 1991, pp. 586-631.
- [60] ASTM Dictionary of ENGINEERING SCIENCE & TECHNOLOGY, 10th Edition. American Society for Testing and Materials, 2005
- [61] P07 Test Method for Determining the Creep Compliance, Resilient Modulus and Strength of Asphalt Materials Using the Indirect Tensile Test Device , U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, 2001. <http://www.fhrc.gov/pavement/ltp/pdf/ProtocolP07.pdf>
- [62] Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt Concrete Mixtures AASHTO Designation: TP 62-03. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- [63] NCHRP 1-37A Draft Test Method DM-1. Standard Test Method for Dynamic Moduouls of Asphalt Concrete Mixtures., Arizona State University., 2002
- [64] 公路工程沥青及沥青混合料试验规程. (JTJ052-2000). 北京: 人民交通出版社, 2000
- [65] Eldon J. Yoder., Matthew W. Witczak. Principles of Pavement Design 1975.
- [66] Asphalt Institute. Research and Development of the Asphalt Institute's Thickness Design Manual (MS-1). 82-2. 1982
- [67] Shook, J. F., and B. F. Kallas., Factors Influencing the Dynamic Modulus of Asphalt Concrete, Proc., Association of Asphalt Paving Technologists, Los Angeles, Calif., 1969.
- [68] S. R. Bigl and R.L.Berg. Modeling Mn/Road Test Sections with the CRREL Mechanistic Pavement Design Procedure. CRREL Special Report 96-21. 1996. US Army Corps of Engineers. Cold Regions Research & Engineering Laboratory
- [69] P. Ullidtz. Pavement Analysis. 1987. Elsevier Science.
- [70] V. C. Janoo and R.L.Berg. Layer Moduli Determination during Freeze-Thaw Periods. Nondestructive Deflection Testing and Backcalculation for Pavements, Proceedings, Transportation Research Record No. 1377, Transportation Research Board. 1991. 26-35.
- [71] H. A. Ali and N. A. Parker. Using Time Series to Incorporate Seasonal Variations in Pavement Design, Transportation Research Record 1539, 33-43. 1996. Washington, D. C., TRB, National Research Council.
- [72] S. W. Lee, J. P. Mahoney and N. C. Jackson. Verification of Backcalculation of PavementModuli. Transportation Research Record 1196 , 85-95. 1988. Washington, D. C., TRB, National Research Council.
- [73] M. W. Witczak. Design of Full Depth Air Field Pavements. Proceedings, Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements. 1972.
- [74] M. Johnson and R. L. Baus., Alternative Method for Temperature Correction of Backcalculated Equivalent Pavement Moduli, Transportation Research Record 1355, Washington, D. C., TRB, National Research Council. 1992: 75-81

参考文献

- [75] S. Baltzer and J. M. Jansen. Temperature Correction of Asphalt-Moduli for FWD Measurements., 4th International Conference on the Bearing Capacity of Roads and Airfields, Trondheim, Norway. 1994: 754-768
- [76] Y. R. Kim, B. O. Hibbs and Y.-C. Lee. Temperature Correction of Deflections and Backcalculated Asphalt Concrete Moduli. Transportation Research Record 1473, Washington, D. C., TRB, National Research Council. 1995: 55-62
- [77] D.-H. Chen, H.-H. Lin, J. Bilyeu and M. Murphy., Temperature Correction on FWD Measurements. TRB. Transportation Research Board 79th Annual Meeting. 2000.
- [78] 公路沥青路面施工技术规范 (JTG F40-2004), 北京: 人民交通出版社, 2005
- [79] 邵显智, 邵敏华, 等., 沥青混合料泊松比的测试方法, 同济大学学报 2006 Vol.34 No.11 P.1470-1474
- [80] MTS Systems Corporation.Model 815 rock and concrete mechanics test system technical description (Version 5)[R].Minnesota,USA:MTS Systems Corporation,1999.
- [81] AASHTO Guide for the Design of Pavement Structures. Rehabilitation Part. American Association of State Highway and Transportation Officials, 1986.
- [82] AASHTO Guide for the Design of Pavement Structures. American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993.
- [83] H. F. Southgate and R. C. Deen. Temperature Distribution Within Asphalt Pavements and Its Relationship to Pavement Deflection. Highway Research Record 291 , Washington, D. C., HRB, National Research Council. 1969: 116-131.
- [84] SHRP Procedure for Temperature Correction of Maximum Deflections, SHRP-P-654. Strategic Highway Research Program. National Research Council.1993
- [85] S. W. Park and Y. R. Kim. Temperature Correction of Backcalculated Moduli and Deflections Using Linear Viscoelasticity and Time-Temperature Superposition. Transportation Research Record 1570, Washington, D. C., TRB, National Research Council. 1997: 108-117

附录 A 沥青路面温度场有限差分预估模型源程序

```

!*****
!   PROJECT: PTEMP
!   CREAT: 2004-1
!   MODIFIED :2005-1-25
!   RUPOSE: MAIN DIVER PROGRAM FOR THE PAVEMENT TEMPERATURE CALCULATIONS.
!*****
INTEGER I,J,A,B      !COUNTERS
INTEGER XNODES(99)   !X NODES TO PRINT
INTEGER ZNODES(99)   !Z NODES TO PRINT
REAL PTEMP(99,99)
REAL T(99,99)
REAL TAIR(9999)      !AIR TEMPERATURE (C)
REAL SOLARRAD(9999)  !SOLAR RADIATION (W/M2 )
REAL WIND(9999)      !WIND SPEED (S/M)
INTEGER TIMESTEPS,TIME      !TIME STEP AND TIME
INTEGER TX,TZ,AS,AB
REAL HEIGHT, HEIGHT1, HEIGHT2, WIDTH
REAL PP(99,99), R(99)
!*****
!*****路面基本参数初始定义*****
WRITE(*,*)"INPUT HEIGHT AND WIDTH OF PAVEMENT(M):"
READ (*,*) HEIGHT, WIDTH
WRITE(*,*)"INPUT HEIGHT OF ASPHALT LAYER(M):"
READ (*,*) HEIGHT1
HEIGHT2=HEIGHT-HEIGHT1
!*****
!*****

```

附录

```
!GET THE WEATHER DATA
OPEN(UNIT=10, FILE='WEATHER.DAT',ACCESS='SEQUENTIAL',STATUS='OLD') ! OPEN WEATHER
DATA FILE
      READ(10,*) M           !读入终止时间
      STARTTIME=1           !START TIME
      ENDTIME=M             !END TIME
! READ WEATHER DATA
DO 5 I=STARTTIME,ENDTIME
WRITE(*,*) I
      READ(10,*) TAIR(I),SOLARRAD(I),WIND(I) 5 CONTINUE
CLOSE(10)
!*****确定竖向和横向结点个数*****
TZ=INT(HEIGHT/0.01)+1     !TOTAL HIGHT
TX=NINT(WIDTH/0.01)+1     !TOTAL WEDTH
AS=NINT(HEIGHT1/0.01)+1   !AS 沥青层
AB=NINT(HEIGHT2/0.01)     !AB 基层
!*****
!OPEN OUTPUT FILE AND WRITE TITLE HEADER
OPEN(UNIT=13,FILE='PAVETEMP.DAT',ACCESS='SEQUENTIAL',STATUS='UNKNOWN')
!START TEMMPERTATURE CALCULATIONS
DO 200 TIME=STARTTIME, ENDTIME
!DEFINE THE INTIAL TEMPERATURE IN PAVEMENT
!IN ORDER TO GET MORE ACCURACY RESLUTS, THE INTIAL TEMPERATURE IS SET TO ACTURAL
TEMPERATURE
IF (TIME.EQ.STARTTIME) THEN
      OPEN(UNIT=14, FILE='INIPAVETEMP.DAT',ACCESS='SEQUENTIAL',STATUS='OLD') ! OPEN
INITIAL PAVEMENT TEMPERATURE FILE
!      T=0.0
      DO 16 B=1,TZ
      READ(14,*) T(1,B)
      16 CONTINUE
```

```
CLOSE (14)
DO 18 A=2,TX
DO 17 B=1,TZ
    T(A,B)=T(1,B)
17 CONTINUE
18 CONTINUE

END IF

! *****ENTER THE CALCULATION PART*****
CALL OLDTYPE98 (TIME,TAIR(TIME),SOLARRAD(TIME),WIND(TIME),TX,TZ,AS,AB,T,PP)
! *****

!STORE TEMPERATURES FOR PRINTING
DO 50 A=1,TX
DO 40 B=1,TZ
    PTEMP(A,B)=PP(A,B)
40 CONTINUE
50 CONTINUE
    WRITE(*,*) "CALCUATED PAVEMENT TEMPERATURE"
    WRITE(*,90) TIME
! TO SEE STATUS ON SCREEN ONLY ASPHALT LAYER
    WRITE(13,810) TIME,(PTEMP(2,I),I=1,AS)
200 CONTINUE
810 FORMAT(14,1X,19(F6.2,1X))
90 FORMAT(18)
CLOSE(13)
CALL CORREL(R,ENDTIME)
END
```

附录 B 交叉互分析源程序

```

PROGRAM CROSS_CORRELATION ANALYSIS
USE NUMERICAL_LIBRARIES
INTEGER LDICOV, LDINCD, LDX, NVAR
PARAMETER (LDICOV=14, LDINCD=1, LDX=2104, NVAR=14)
INTEGER ICOPT, IDO, IFRQ, INCD(LDINCD,1), IWT, MOPT, NMISS,
  & NOBS, NOUT, NROW, NV
REAL COV(LDICOV,NVAR), SUMWT, XMEAN(NVAR)
REAL TA(2104),RA(2104),TP(2104,13)
REAL TEMP(2104),TEMP1(2104),TEMP2(2104),TEMP3(2104),TEMP4(2104)
REAL X(2104,14)
REAL CC(14,14,20),AP(20,14)
C  打开数据通道
  OPEN (UNIT=1, FILE='WEATHER.TXT', READONLY, STATUS='OLD')
    OPEN (UNIT=2, FILE='PAVETEMP.TXT', READONLY, STATUS='OLD')
C  OPEN (UNIT=3, FILE='APCORR.TXT', SRATUS='UNKNOWN')
C  OPEN (UNIT=4, FILE='QPCORR.TXT', SRATUS='UNKNOWN')
C  OPEN (UNIT=5, FILE='PPCORR.TXT', SRATUS='UNKNOWN')
*****
*  CORRELATION BETWEEN AIR TEMPERATURE AND PAVEMENT TEMPERATURE
*
*****
  CALL UMACH (3, NU)
  OPEN (UNIT=NU, FILE='APCORR.TXT', STATUS='UNKNOWN')

  DO 1000 I=1,LDX
    READ (1,*) TA(I),RA(I)
    READ (2,*) (TP(I,J),J=1,13)
1000 CONTINUE
CC  完成温度和辐射的不同小时叠加
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
  TEMP(1)=RA(1)
  DO 1200 I=2,LDX
    TEMP(I)=RA(I-1)
1200 CONTINUE

```

```
TEMP1(1)=RA(1)
TEMP1(2)=RA(1)
DO 1201 I=3,LDX
TEMP1(I)=RA(I-2)
1201 CONTINUE

TEMP2(1)=RA(1)
TEMP2(2)=RA(1)
TEMP2(3)=RA(1)
DO 1202 I=4,LDX
TEMP2(I)=RA(I-3)
1202 CONTINUE
TEMP3(1)=RA(1)
TEMP3(2)=RA(1)
TEMP3(3)=RA(1)
TEMP3(4)=RA(1)
DO 1203 I=5,LDX
TEMP3(I)=RA(I-4)
1203 CONTINUE
DO 1300 I=1,LDX
RA(I)=(RA(I)+TEMP(I)+TEMP1(I)+TEMP2(I)+TEMP3(I))/5

1300 CONTINUE
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
CC 设置延迟时间循环
CC
DO 9999 K=1,20
C 设置分析区, 将要分析的数据导入临时矩阵 X
DO 2000 J=1,14
DO 3000 I=1,LDX-K+1
IF (J.EQ.1) THEN
X(I,J)=RA(I)
ELSE
X(I,J)=TP(I+K-1,J-1)
ENDIF
3000 CONTINUE
2000 CONTINUE
IDO = 0
NROW = LDX-K
IFRQ = 0
```



```
IWT = 0
MOPT = 0
ICOPT = 3
CALL CORVC (IDO, NROW, NVAR, X, LDX, IFRQ, IWT, MOPT, ICOPT,
  & XMEAN, COV, LDCOV, INCD, LDINCD, NOBS, NMISS, SUMWT)
C 将 COV 导出至临时矩阵
DO 8000 I=1,14
  IF (I.EQ.1) THEN
    AP(K,I)=COV(I,1)
  ELSE
    AP(K,I)=COV(I,1)
  ENDIF
8000 CONTINUE
IOPT = -6
  ISETT = 3
  ISCOPE = 0
  CALL WROPT (IOPT, ISETT, ISCOPE)
CALL WRRRN ('XMEAN', 1, NVAR, XMEAN, 1, 0)
C
IOPT = -6
  ISETT = 4
  ISCOPE = 1
CALL WROPT (IOPT, ISETT, ISCOPE)
CALL WRRRN ('COV', NVAR, NVAR, COV, LDCOV, 0)
CALL WRIRN ('INCD', 1, 1, INCD, LDINCD, 0)
WRITE (NÜ,*) 'NOBS =', NOBS, 'NMISS =', NMISS, 'SUMWT =',
  & SUMWT
9999 CONTINUE
CALL WRRRN ('AP', 20, 14, AP, 20, 0)
END
```

个人简历 在读期间发表的学术论文与研究成果

个人简历:

贾璐, 男, 1980年4月生。

2001年7月毕业于湖南大学 土木工程学院交通土建工程专业 获学士学位。

2004年7月毕业于湖南大学 土木工程学院道路与铁道工程专业 获硕士学位。

2004年9月入同济大学交通运输工程学院攻读博士学位。

已发表论文:

- [1] Lijun SUN, Lu Jia, Qin Jian, Temperature Field Prediction for Asphalt Pavements, 10th International Conference on Asphalt Pavements, Canada, Quebec, August 2006.
- [2] Jia Lu, Lijun SUN, et al. Temperature Prediction Model Based on Finite Difference Method for Asphalt Pavement. Special ICPT Symoisum 2007 Road Construction and Maintenance Technology in China. Beijing, China. March, 2007.
- [3] Jia Lu, Sun Lijun, et al, Numerical Temperature Prediction Model and Thermal Properties for Asphalt Pavement, International Conference on Advanced Characterisation of Pavement and Soil Engineering Materials. Athens, Greece. July, 2007. (ISTP 检索)
- [4] Jia Lu, Chengxue Liu, Lijun SUN. The Preliminary Application of Element Free GALERKIN Method (EFGM) in Asphalt Pavement Mechanical Analysis, Internaional Conference of Transportation Engineering, Chengdu, China. July, 2007. (EI Compendex 检索)
- [5] Jia Lu, Lijun Sun, Yonghua Yu. Asphalt Pavement Statistical Temperature Prediction Models Developed from Measured Data in China, The 7th Internaional Conference of Chinese Transportation Professionals. Shanghai, China. May, 2007. (EI Compendex 检索)
- [6] Jia Lu, Chengxue LIU. Introduction of Element-Free Galerkin Method (EFGM) and Its Preliminary Application in Asphalt Pavement Mechanical Analysis. Transportation Research Board 87th Annual Meeting, Washington DC, 2008 (ISTP 检索)
- [7] 贾璐、孙立军等, 沥青路面温度场数值预估方法研究, 同济大学学报(自然科学版) 2007年8期 (EI Compendex 检索)
- [8] 贾璐、孙立军, 温拌沥青混合料技术现状及其路用性能研究, 2006全国博士生论坛
- [9] 黄立葵、贾璐等, 沥青路面高温温度场数值分析与试验验证, 岩土力学增刊, 2006年27卷 (EI Compendex 检索)
- [10] 黄立葵、贾璐等, 沥青路面温度状况的统计分析, 中南公路工程, 2005年03期
- [11] 黄立葵、贾璐等, 高速公路的车辆横向分布特征, 中南公路工程, 2005年01期

待发表论文:

- [1] Lijun Sun, Jia Lu, Wenlong Dong. Researches about for ultraviolet radiation aging of asphalt pavement in high elevation regions, International Society for Asphalt Pavements (ISAP) 2008, Zurich, August 18th-20th,2008 (Final Paper Submitted)
- [2] Lu Jia, Lijun Sun, Xiao Hu, Xiaodi Hu. Using Strength Theories to Explain Top-Down Cracking for Asphalt Pavement, Pavement Mechanics and Materials Symposium in the 18th ASCE Engineering Mechanics Division (EMD) Conference, ASCE. VT, USA. July, 2007. (Accepted)

研究报告:

- [1] 《重交通柔性路面设计施工成套技术研究》交通部科技项目
- [2] 《高寒、高海拔地区强紫外线环境下改性沥青路面技术研究》四川省交通科技项目
- [3] 《延长重交通沥青路面实用性能关键技术研究》河南省交通厅科技项目

作者: [贾璐](#)
学位授予单位: [同济大学交通运输工程学院](#)
被引用次数: 4次

参考文献(4条)

1. [孙立军, 秦健](#) [沥青路面温度场的预估模型](#)[期刊论文]-[同济大学学报\(自然科学版\)](#) 2006(04)
2. [邵显智, 邵敏华, 毕玉峰, 孙立军](#) [沥青混合料泊松比的测试方法](#)[期刊论文]-[同济大学学报\(自然科学版\)](#) 2006(11)
3. [孙立军, 秦健](#) [沥青路面温度场的预估模型](#)[期刊论文]-[同济大学学报\(自然科学版\)](#) 2006(04)
4. [邵显智, 邵敏华, 毕玉峰, 孙立军](#) [沥青混合料泊松比的测试方法](#)[期刊论文]-[同济大学学报\(自然科学版\)](#) 2006(11)

本文读者也读过(6条)

1. [孙立军, 秦健, SUN Li jun, QIN Jian](#) [沥青路面温度场的预估模型](#)[期刊论文]-[同济大学学报\(自然科学版\)](#) 2006, 34(4)
2. [隋向辉](#) [沥青路面温度场预测及应用](#)[学位论文]2007
3. [刘凯](#) [沥青路面温度场分布规律研究](#)[学位论文]2010
4. [孟岩](#) [沥青路面温度场预估及应用研究](#)[学位论文]2007
5. [王辉, 吴亮, 张起森](#) [沥青路面实测温度场的分析](#)[会议论文]-2007
6. [秦健, 孙立军, QIN Jian, SUN Li-jun](#) [沥青路面温度场的分布规律](#)[期刊论文]-[公路交通科技](#)2006, 23(8)

引证文献(3条)

1. [周亮, 凌建明, 林小平, 吴青峰](#) [沥青层反算模量的温度修正系数](#)[期刊论文]-[同济大学学报\(自然科学版\)](#) 2011(11)
2. [杨博](#) [基于有限元方法的沥青路面车辙影响因素分析及其应用研究](#)[学位论文]硕士 2010
3. [王健](#) [基于影因素非线性特性的沥青路面永久变形预估研究](#)[学位论文]硕士 2011

引用本文格式: [贾璐](#) [沥青路面温度场预估方法及其应用](#)[学位论文]博士 2008