



同濟大學

TONGJI UNIVERSITY

硕士学位论文

常规沥青路面表面特性对行车噪声
的影响研究

姓名：徐婷怡

学号：1132609

所在院系：交通运输工程学院

学科门类：交通运输工程

学科专业：道路与铁道工程

指导教师：陈长

二〇一四年六月



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

A dissertation submitted to

Tongji University in conformity with the requirements for
the degree of Master

**The Research on the Effect of Surface
Characteristics of Conventional Asphalt
Pavement on Road Noise**

Candidate: Xu Tingyi

Student Number: 1132609

School: School of Transportation Engineering

Discipline: Transportation Engineering

Major: Road and Railway Engineering

Supervisor: Chen Zhang

June, 2014

常规沥青路面表面特性对行车噪声的影响研究

徐婷怡

同济大学

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本；学校有权保存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：

年 月 日

同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所提交的学位论文，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责任由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日

摘要

随着城市路网扩张,道路噪声污染愈发成为城市生活环境的重要污染源。由于是针对声源的降噪措施,改善路面,选用低噪声路面对于降低噪声污染有非常显著的效果。因此,科学地分析路面噪声产生机理,研究常规沥青路面表面特性对行车噪声的影响十分重要。

在实际驾驶过程中,常常出现路面平整度相近,行车无明显颠簸感,但噪声明显不同的问题。因此,有必要深入分析常规沥青路面表面特性,找出影响行车噪声的主要因素。

首先,透彻说明轮胎-路面噪声的产生和放大机理,从而确定影响行车噪声的路面表面特性参数;

其次,行车噪声及路面参数采集。包括车内噪声采集、滑行法车外噪声采集、路面平整度、构造深度及路面抗滑值采集,为后续研究做好准备;

再次,数据分析。包括两个部分,第一部分确定路面构造对车内噪声的影响,第二部分确定路面构造对车外噪声的影响,并分析抗滑值是否和车外噪声有矛盾;

最后,根据数据分析结果,得出常规沥青路面表面特性对行车噪声的影响。结果为:当平整度 IRI 在 $1.52\sim 2.91\text{m/km}$,构造深度 TD 在 $0.47\sim 1.68\text{ m/km}$ 的范围内,车内噪声随道路平整度指数 IRI 的增大而增大,且有较好的线性关系;根据本文全部试验数据的拟合结果可看到平整度 IRI 及构造深度 TD 的乘积与车外噪声有关,不能说明车外噪声仅仅只和平整度 IRI 或构造深度 TD 两者之一有关,即车外噪声与平整度 IRI 及构造深度 TD 都有相关性,也反映了平整度 IRI 与构造深度 TD 之间也有相关性;本文试验中没有发现路面抗滑值对车外噪声有决定性影响,即本文不支持若要降低路面噪声则必须放弃路面抗滑性能的观念。

关键词: 沥青路面, 行车噪声, 平整度, 构造深度

ABSTRACT

With the expansion of city road network, road noise pollution has become an important source of pollution of the city environment. The noise reduction measures, according to the acoustic source improve pavement, selection of low noise road surface has a very significant effect for reducing noise pollution. Therefore, the scientific analysis of pavement noise generation mechanism and research on the effect of surface characteristics of conventional asphalt pavement on road noise is very important.

In the actual driving process, the pavement roughness is similar, driving without obvious bumpy, but the noise significantly different. Therefore, it is necessary to analysis of surface characteristics of conventional asphalt pavement, and find out the main factors influencing the road noise.

First of all, a thorough description generation and amplification mechanism of tire pavement noise, so as to determine the effect of surface characteristics parameters of road noise.

Secondly, do road noise and road parameter acquisition, including the vehicle interior noise acquisition, sliding method of external vehicle noise acquisition, road surface roughness, texture and skid resistance value acquisition, prepare for the follow-up study;

Again, analyze data. Includes two parts, the first part to determine the pavement structure effect on the noise inside the car, the second part to determine the effect of noise pavement structure on the outside of the vehicle, resistance value and whether there are contradictions and analysis of vehicle exterior noise;

Finally, according to the results of the data analysis, the effect of surface characteristics of conventional asphalt pavement on traffic noise shows: when the roughness in the 1.52~2.91m/km depth, texture depth in 0.47~1.68 m/km range, increase in car noise well along with the whole index of IRI increased, and there is a good linear relationship; according to the results of fitting the experimental data, we can see the product roughness and texture depth is related to exterior vehicle noise, and, we also cannot explain the car noise is only related to roughness or texture depth, means exterior vehicle noise and roughness and texture depth are related, but also there is a correlation between the roughness and texture depth; this paper's tests found

no pavement anti slide has a decisive effect on the value of noise outside the car, which means this article does not support to the concept that reducing road noise must give up the pavement anti slide performance.

Key Words: asphalt pavement, road noise, road roughness, road texture depth

目录

第 1 章 引言	1
1.1 问题的提出	1
1.2 国内外研究概况	3
1.2.1 道路噪声源的构成	3
1.2.2 轮胎-路面噪声检测方法	4
1.2.3 道路噪声评价及降噪措施研究	6
1.2.4 已有研究存在的问题	9
1.3 研究内容和技术路线	9
1.4 本章小结	12
第 2 章 轮胎-路面噪声产生及放大机理	13
2.1 轮胎-路面噪声产生机理	13
2.1.1 轮胎振动噪声	13
2.1.2 轮胎花纹槽空气泵噪声	16
2.1.3 空气动力性噪声	20
2.2 轮胎-路面噪声放大机理	20
2.2.1 号筒效应	20
2.2.2 共振效应	21
2.3 影响行车噪声的常规沥青路面表面特性参数的提出	22
2.4 本章小结	23
第 3 章 行车噪声及路面表面特性参数采集	25
3.1 路段选取原则	25
3.2 仪器选用及评价方法	26
3.2.1 测试仪器	26
3.2.2 测量及评价方法	27
3.3 现场试验难点	32
3.4 测量结果	33
3.4.1 车内噪声测量结果	33
3.4.2 车外噪声测量结果	36
3.4.3 道路平整度测量结果	39
3.4.4 路面构造深度测量结果	40
3.4.5 路面抗滑值测量结果	43
3.5 本章小结	46
第 4 章 路面表面特性对车内噪声影响研究	47
4.1 数据汇总	47
4.2 数据分析思路	48
4.3 基于数理统计的车内噪声分析	48
4.4 本章小结	51
第 5 章 路面表面特性对车外噪声影响研究	53
5.1 数据汇总	53

5.2 数据分析思路.....	54
5.3 基于数理统计的车外噪声分析.....	54
5.4 抗滑值对车外噪声影响分析.....	57
5.5 本章小结.....	59
第 6 章 结论与展望.....	61
6.1 成果与结论.....	61
6.2 不足与展望.....	61
致谢	63
参考文献	65
个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果.....	69

第 1 章 引言

1.1 问题的提出

随着城市路网扩张，道路噪声污染愈发成为城市生活环境的重要污染源^{[1][4]}。NCAT(National Center for Asphalt Technology)的研究报告中指出，道路噪声污染降低了周围人们的生活质量，已成为当今社会的严重问题^[2]。为了控制道路噪声污染，FHWA 出台了现行的降噪准则^[3]，并且也指出了路面是道路噪声的影响因素之一。而 NCHRP(National Cooperative Highway Research Program)的更深入研究表明，轮胎-路面噪声在道路噪声污染中确实占有很大比重^[4]。轮胎-路面噪声的影响因素包括轮胎状况、车速以及路面状况，而其中路面状况又可细分为路面平整度，路面粗糙度以及路面结构类型，而路面结构类型涉及道路表面构造形式、路面材料和排水性能等^[5]。当前道路噪声的防治对策主要有改善路面，合理设计改造车辆，运用交通管制，设置声屏障等措施^[3]。由于是针对声源的降噪措施，改善路面，选用低噪声路面对于降低噪声污染有非常显著的效果^[6]。因此，科学地分析路面噪声产生机理，研究常规沥青路面表面特性对行车噪声的影响十分重要。

根据陈城^[7]的研究结果，总体来说，随着路面平整度指数 IRI 的增长，车辆噪声增加；而当 IRI 小于一定值时，车辆噪声值比较稳定，即车辆噪声并没有随着 IRI 的增加而增加，这个 IRI 的临界值大约在 4.5 左右。于是，在针对高架道路的噪声进行检测和评价的过程中发现：在 IRI 基本相同时，噪声值却有所差异，并且在 IRI 处于优级（ $IRI \leq 2.6$ ）时，车辆噪声并没有随着 IRI 的增长而增长。以上海市南北高架东侧临汾路出口-共江路出口及延安高架南侧江苏路入口-华山路入口这两个路段为例，其路段平均 IRI 分别为 1.66m/km 和 1.69m/km（激光平整度仪的检测结果）均为优级（依据建设部《城镇道路养护技术规范》（CJJ36-2006）的评价结果），其平整度评价结果非常好，且十分相近，但实际行驶中普遍感觉南北高架东侧临汾路出口-共江路出口路段车辆噪声明显大于延安高架南侧江苏路入口-华山路入口路段。经实地踏勘发现，虽然两者平整度相近，但路表结构十分不同。如图 1.1，图 1.2 所示。故车辆经过时的噪声有很大差异，说明了在路面平整度评价结果非常好时，其 IRI 大小并非影响行车噪声的唯一因素。



图 1.1 南北高架东侧临汾路出口-共江路出口路面

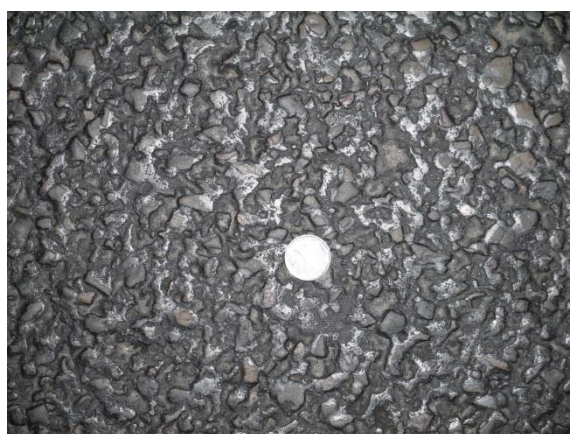


图 1.2 延安高架南侧江苏路入口-华山路入口路面

反思上述情况：路表纹理特性作为轮胎-路面噪声的影响因素之一是十分复杂的^[8]。PIARC(World Road Association's Permanent International Association of Road Congresses)路表特征技术委员会定义了四种不同的路面构造波长：微观纹理 ($<0.5\text{mm}$)，宏观纹理 ($0.5\sim 50\text{mm}$)，粗大纹理 ($50\sim 500\text{mm}$)，路面平整度 ($0.5\sim 50\text{m}$)。而 ISO (International Standards Organization)^[9]对上述四类不同波长路表纹理进行研究，发现微观纹理对路面抗滑有重要作用但对轮胎-路面噪声影响甚微，而宏观纹理及粗大纹理对路面抗滑及轮胎-路面噪声都有重要作用。不难发现，在路面平整度优级时，宏观纹理及粗大纹理才是轮胎-路面噪声的主要影响因素。所以，在实际驾驶过程中，常常出现路面平整度相近，行车无明显颠簸感，但噪声明显不同的问题。因此，有必要深入分析常规沥青路面表面特性，找出影响轮胎-路面噪声的路面构造因素，针对路面表面特性检测数据进行深入分析，提出能够更加准确反映噪声特性的主要影响因素。这对于道路建设及养护管理的优化，使用者及周边居民满意度的提升都有重要的理论和实践意义。

1.2 国内外研究概况

对于轮胎-路面噪声这一重要特性，国内外已进行了大量研究，本节针对道路噪声源的构成，轮胎-路面噪声检测方法，评价方法等方面内容进行综述。

1.2.1 道路噪声源的构成

道路噪声主要是车辆行驶时车辆本身以及轮胎与路面间的相互作用产生的随机非稳态的流动噪声，主要由动力噪声、车体噪声和轮胎-路面噪声三部分构成。动力噪声(又称驱动噪声)主要指动力系统辐射的噪声，包括进气噪声、排气噪声、冷却风扇噪声、燃烧噪声及传动机械噪声等。车体噪声是指汽车车厢、配件、货物在汽车行驶中碰撞、摩擦引起的噪声。轮胎-路面噪声是由车辆轮胎在滚动的过程中与路面表面接触产生的非稳态随机噪声^[10]。

上世纪八九十年代的研究一般认为，小汽车速度大于 40~50km/h、卡车速度大于 60~70km/h 时，轮胎-路面噪声将成为道路噪声的主要部分^[11]。而本世纪初的研究确定了当小汽车车速在 50km/h 以上时，轮胎-路面噪声是最主要的噪声源^[12]。

由于近代汽车工业发展，对于发动机、传动系产生的噪声，已通过采取隔声、吸声、消声等降噪措施使其降低到了一定程度，这部分噪音的所占比重有所减少。目前欧洲对于轮胎-路面噪声将成为道路噪声的主要部分的分界速度为：小汽车 30km/h，卡车 50km/h，且仍有降低的趋势^{[11] [13]}。日常车辆行驶速度大多大于上述界限速度。也有研究表明，车辆加速行驶时，轮胎-路面噪声大约占车辆行驶噪声的 23%，匀速行驶时，轮胎-路面噪声更是大约占车辆行驶噪声的 80%^[14]。这些都表明轮胎-路面噪声已经成为道路噪声最主要的来源。

改进轮胎设计来降低轮胎-路面噪声确实有效，但并不能保证所有汽车的轮胎都能得到改进，所以不如改变路面特性降噪的效果显著，因而改进路面设计，即设计低噪声路面已成为降低轮胎-路面噪声最主要的途径。

本文主要开展有关轮胎-路面噪声机理及常规沥青路面表面特性对行车噪声的影响研究，这对于更准确地预测及评价道路噪声，从而能更进一步寻求降低噪声的有效措施具有重要的意义。

1.2.2 轮胎-路面噪声检测方法

目前，用于测量道路噪声的方法：主要分为两大类^[15]：(1)远场或者称之为路边测量法，该方法是把麦克风放置在路边来测量噪声。(2)近场或者称之为近距离测量法，这种方法是把麦克风放在接近轮胎路面的接触处来测量噪声。

远场法测量主要有三种方法：(1)统计通过法 SPB (Statistical Pass-By)(2)控制通过法 CPB(Control Pass-By)(3)时间平均法 TAP(Time-Averaged Procedures)。这三种方法都要求把麦克风放置在路边距车辆行驶轨迹一定距离处^[15]。统计通过法和控制通过法主要用于科研研究用，而时间平均法则被广泛的用于与高速公路的设计有关的研究中^[16]。

(1).统计通过法 SPB (Statistical Pass-By)

统计通过法 SPB 经多年发展比较成熟，该法从 1970 年就开始应用，影响比较广泛而且已经成为国际标准。SPB 方法测量得到的是实际人们听到的噪声（轮胎-路面噪声和车辆发动机、机械噪声），且反映不同交通流组成的变化状态，该方法测量得到的噪声是最大 A 声级计权声压水平。SPB 方法在 ISO 11819-1 中有详细的叙述，将传声器放置在车辆行驶通过中线两侧 7.5m，离地面高 1.2m 处，半径 50m 范围内不得有反射障碍物。这种方法将车辆分为 3 类：要求至少有 100 辆小轿车和 80 辆双轴或多轴重型车混合通过。测试条件必须严格要求，测试路面必须特别平直，对背景噪声有较高的要求，测试区域方圆 50m 不得有噪声反射障碍，而且通过车辆的速度要求较高，通常不能用于任何特定场所的某些工程的评价^[15]。

由于车辆交通流噪声对人的影响不仅仅与声级、频谱有关，还与它的持续时间、起伏变化幅度有关，可以采用统计方法的进行相关测试，从一段时间测量的大量变化的数据中，按统计学方法求出几个统计参数来表示这段时间的噪声，即统计交通噪声指数 (SPBI)；且 SPB 方法考虑的是随机的交通流噪声的量测，多用来测不变速度的车辆交通流噪声，例如在 50~60mp/h 的自由交通流状况下，预测交通噪声指数最少需要 200 个随机样本^[17]。

(2).控制通过法 CPB (Control Pass-By)

CPB 法可选定单个车辆或特定的交通流构成来进行车辆噪声评价，同时还可以控制车辆行驶状态。车辆行驶状态可分为三种：一是通过测试点时是滑行状态(车辆以预定的车速通过试验点时关闭发动机，变速器至空挡位置通过测试点，主要是为了避免发动机对轮胎-路面耦合噪声测试的影响)；二是驱动状态(在驱

动状态下以规定的速度通过测试点)；三是加速状态(当车辆通过测试点时，突然调节气门，以最大的加速度通过测试点，得到测试点出最大的车辆噪声水平，主要是为了比较测试过程中发动机噪声对轮胎-路面耦合噪声的影响程度)。常用方法是单个车辆在滑行或驱动状态下以规定的速度通过测试点的测试方法，这种方法较统计噪声法 SPB 方法更经济，更容易操作控制^[18]。

(3).时间平均法 TAP(Time-Averaged Procedures)

此方法是由美国联邦公路局(FHWA)规定的人工测量道路噪声的方法。在这种方法中，现有交通流的噪声级是由某一测试路段一段时间内(如 15 分钟、30 分钟或 1 小时)的噪声所确定的，其中，声压是平均的，并换算为等效噪声级或等效连续声级^[19]。美国和欧洲一些研究中曾用到此方法测量道路交通噪声^[10]。

近场法测量主要有四种方法^[20]：(1)近场拖车法 CPX(Close-Proximity)(2)近场声强法 CPI(Close-Proximity Sound Intensity)(3)近场声压法 CPP(Close-Proximity Sound Pressure)(4)室内转鼓法 LDM(Laboratory Drum Method)。

(1).近场拖车法 CPX (Close-Proximity)

拖车法 CPX 是一种半消声室的测试方法，测量的是近场噪声源处的噪声，适用于测量轮胎-路面接触区域的噪声，测试过程在 ISO 11819-2 中有详细的说明：为了降低背景噪声尤其是牵引车噪声及周围其他车辆噪声的影响，对测量过程作了多重保护，主要有：一是测试轮胎和传声器都放在拖车车罩内部，由另外一辆车作为牵引车拖行，拖车车罩是一个半消声室，用来隔离环境噪声以及其他车辆噪声的影响，内部安装吸声材料以减少反射声；二是牵引车的排气串联有两个消声器，排气管采用了屏蔽措施。该方法至少放置两个传声器，对于轿车轮胎按一定的角度置于距离轮胎中心大概 20cm，离路面表面 10cm 处。测试时，待测轮胎由牵引车牵引按预定的车速在测试路面上匀速行驶，由传声器测量 A 声级或频谱^[21]。

(2).近场声强法 CPI (Close-Proximity Sound Intensity)

近场声强法测试仪器安装类似于 CPX 法，采用两个平行的声强传声器，并在声强传声器前端放置风罩或鼻锥，测量得到的声强是距离轮胎侧壁 10cm，离路面与轮胎的接触点 7~8cm 处发出的噪声，而且不需要消声罩，主要是两个传声器的距离已知，相对相位固定不变，通过一定的计算方法可以消除背景噪声、风噪等影响。这种方法可在任何车辆及轮胎上使用^[10]。

(3).近场声压法 CPP (Close-Proximity Sound Pressure)

近场声压法是国内研制成功的方法。该法是布置两路传声器，一路布置在轮侧，该路测得稳定性较差的数据，主要用来测量声源向四周辐射的情况。另一路布置在轮后，该路测得稳定性较好的数据，主要是用来测量不同车速下的噪声。该法能建立起车速，路面与噪声三者间的关系^[22]。

(4).室内转鼓法 LDM(Laboratory Drum Method)

转鼓法是一种消声室试验方法，测量得到的是近场噪声结果。它可以对轮胎-路面噪声机理、轮胎辐射噪声能力及各种因素的影响进行评价研究。试验中使用一个固定的转鼓(转鼓直径一般为 1.5~3.0m)，将测试路面铺筑在转鼓周围模拟实际路面状况，为研究不同的路面影响，需要预制不同的路面型式。其中转鼓放在四个壁面均附有高吸声系数的吸声材料的消声室中，转鼓驱动源安放于试验室外，避免转鼓转动噪声和动力源噪声对测量的影响。测试时，在加载装置作用下，试验轮胎以一定的压力与转鼓接触，并按预定的转速在已安装有模拟路面的转鼓上滚动，记录噪声级或频谱^[23]。

1.2.3 道路噪声评价及降噪措施研究

有关道路噪声评价方面：

Kuijpers A.等^[24]系统地介绍了三类轮胎-路面噪声模型。物理模型包括 Kropp 模型、TRIAS 模型及 Bremner/Huff/Bolton 模型；统计模型包括 Sandberg/Descornet 模型及 TINO 模型；混合模型包括 Fong 模型、PREDIT/SI.R.U.US 模型及 SPERON 模型。客观地比较这些模型后发现，其各自的目的略有不同。有些模型是为了解释轮胎的影响，而另一些模型主要考虑路面因素。三种物理模型都集中在轮胎上，统计模型主要在路面上，而混合模型尽可能地考虑轮胎和路面的组合。因此，可以说：物理模型主要用于轮胎设计，统计模型主要用于路面设计，而混合模型则是考虑轮胎和路面的最优组合。但由于轮胎-路面噪声机理十分复杂，到目前为止，还没有任何一种模型可直接用于轮胎和路面设计。但从物理意义和使用的角度来看，统计-物理混合模型应当最有发展前景。

孙立军等^[25]认为对于水泥和沥青路面而言，其国际平整度指数 IRI 的增加都会加剧行驶车辆的轮胎和车体的振动，从而使车辆匀速行驶噪声增加。相对于沥青路面，水泥路面的模量较大且结构连续性较差，从而会使轮胎和车体产生更强的振动。因此在 20~50km/h 的速度范围内，对于平整度相同的水泥路面和沥青路面，前者的车辆匀速噪声要高于后者。

王华^[26]从轮胎噪声的测试与评价、轮胎道路噪声的产生，噪声的数学模型和

仿真以及轮胎道路纹理耦合的噪声模型等几个方面进行了研究。根据现有的一些研究结论,提出了轮胎花纹与路面纹理“耦合”会对噪声产生影响这一假设。对轮胎道路噪声的测试和客观评价进行了系统的归纳和总结。深入研究了轮胎花纹块噪声、花纹槽泵浦噪声、气柱共鸣噪声以及道路噪声的发声机理,在此基础上建立了轮胎道路噪声的数学模型。并在综合考虑了轮胎与道路对噪声的影响后,引入了时域耦合矩阵和频域耦合矩阵,初步建立了轮胎道路噪声的数学模型。最后采用类似德国测试中心测试轮胎花纹噪声的方法,对轮胎进行40行扫描拾取轮胎花纹信息,并以此原理建立了仿真模型,完成了轮胎花纹噪声仿真分析软件。并利用轮胎花纹噪声仿真软件分别验证了两种简单的纹理耦合会对噪声产生影响。

张翠梅等^[27]综合考虑几种车辆噪声预测模型后进行对比,并克服了以往的缺陷,即噪音预测中只采用某一种模型进行预测,误差较大。在已有研究成果的基础上,提出了以下几方面的改进:关于路面坡度方面,在车型修正的基础上又考虑了交通量修正,在一定程度上降低了误差;关于地面植被及路两旁修正项方面,加入了地面覆盖率的影响,更贴近于实际;对路面类型修正项做了较大的改变,改变了以往经验估计的缺点,同时考虑了路面孔隙率与路面厚度的影响。该模型的使用范围更为广泛,尤其对于低噪音路面的噪声估计。以往的模型都是针对一般路面建立的,所以该模型的提出具有一定的参考价值。

有关道路降噪措施方面:

高明星^[28]认为与普通沥青路面相比,橡胶颗粒沥青路面具有更好的减振和吸声性能。橡胶颗粒掺量越多,路面中集料的最大粒径和橡胶颗粒的粒径越大,路面的减振降噪性能则越好。仅橡胶颗粒掺量和级配类型对橡胶颗粒沥青路面的吸声性能有明显的影响,综合考虑路面的力学性能和声振性能,在合理的橡胶颗粒掺量范围内,橡胶颗粒沥青路面主要以减振降噪为主。

孔静静^[29]认为微表处路面的表面开口孔隙体积低于普通沥青路面(AC路面)的表面开口孔隙体积,当声波入射到微表处路面表面时,通过表面开口孔隙入射到微表处路面内部,发生多次折射和反射,声波多次折射和反射后所损失的能量要低于普通沥青路面(AC路面),反射到空气中的声波能量相对高于普通沥青路面(AC路面)。因此普通沥青路面(AC路面)对噪声的消减效果要优于微表处路面。这从微表处路面表面孔隙对轮胎-路面噪声的消减方面阐述了微表处路面的轮胎-路面噪声高于普通沥青路面轮胎-路面噪声的原因。微表处路面产生的总的声源强度要高于AC路面;表征路面表面粗糙度的指标平均断面深度(MPD)

是影响微表处轮胎-路面噪声必须考虑的因素。微表处路面的平均吸声系数大小与原路面类型有很大关系，原路面平均吸声系数愈大，微表处路面的平均吸声系数愈大，吸声效果愈好；微表处路面平均吸声系数峰值有向 1200~2000Hz 区间偏移的趋势，对频率在 1200~2000Hz 区间的噪声的吸收效果最佳。

张冉^[30]对加铺微表处的公路路面的构造深度、车内噪声、车外噪声及车身振动垂向加速度进行了测量与分析。微表处路面行车噪声大的主要影响因素是由构造深度和路面表面特性决定的轮胎与路面接触区的状况。微表处路面的构造深度大于普通沥青混凝土路面的构造深度，且构造深度与车内噪声有较好的正相关性。不同路面的表面特性对轮胎路面噪声及行驶其上车辆的车身振动产生不同的效果，微表处路面路表构造深度大，表面粗糙。行驶在微表处路面上的车辆车身振动大于未加铺微表处原路面的车身振动，车内噪声与车身振动直接相关，导致微表处路面的车内噪声高于普通沥青路面。

孙晓立^[31]等以华南理工大学开发的轮胎驱动式路面功能加速加载试验系统为模拟试验研究平台，开发了微表处噪声测试系统，研究了微表处噪声产生机理，根据试验，得出主要结论：微表处混合料的轮胎-路面噪声不随使用时间的增加而增长，噪声声压级始终在某一数值上下波动。对比 AC-13 沥青混凝土，微表处混合料初期噪声水平远大于沥青混凝土，而随着使用时间的增加这一差别逐渐缩小。而路面构造参数中，微表处的构造深度是影响路面噪声的主要因素，级配较细的微表处混合料其噪声小于级配较粗糙的微表处混合料，声压级降低约 1.4 dB (A)；轮胎作用次数是影响微表处噪声大小的一个客观因素，试验末期所测得的噪声声压级比试验初期降低约 0.4dB(A)。因此，低噪声微表处技术的关键是通过控制关键筛孔的通过量来将微表处的构造深度控制在合理范围内。

有关抗滑与噪声的关系：

Sandberg U.等^[32]指出，有时认为当试图降低车外噪声时，会和路面抗滑产生冲突，即在不牺牲车辆行驶安全的情况下，不可能进一步减少车外噪音。因此，研究抗滑和车外噪声之间的关系十分重要。

Sandberg U.^[33]认为以道路表面特性而言，摩擦和噪音之间没有一贯冲突。

Denker D.^[34]通过 12 种轮胎测试 5 种路面后，没有发现明显的噪声与摩擦的相关性，直到他以一种不寻常的方式归一化摩擦值后，才发现两者之间极弱的冲突。

Nelson P.^[35]的试验对象为 16 辆小汽车和 9 辆卡车轮胎，试验结果显示噪声与摩擦之间有比较弱的相关性，表明了噪声与摩擦之间的冲突，但这很可能是由

于轮胎宽度在试验中影响较多。

Sandberg U.等^[36]进行了试验研究,结论表明摩擦和噪音之间没有明显的冲突。

1.2.4 已有研究存在的问题

通过对国内外相关研究情况的文献调研,发现对道路噪声这一路面评价的重要内容,已从不同角度和不同方面出发,进行了大量的研究。然而,已有的研究中针对路面表面特性对噪声的影响分析研究非常有限。虽然研究人员对于相关技术进行了很多有益的尝试和探索,但由于轮胎-路面噪声的复杂性、试验方法的多样性等原因,对轮胎-路面噪声的评价仍面临较多问题,主要有:

(1). 轮胎-路面噪声系统复杂,且各个因素之间亦有耦合影响,故难以提出纯粹的理论预测模型;

(2). 轮胎-路面噪声在实际检测当中,经常受到试验场地、行车状况等条件的影 响,故很少有研究能进行数量较多且试验条件能较为统一的试验;

(3). 从路面角度考虑,轮胎-路面噪声研究结论存在矛盾,例如:彭彬等^[37]调查研究了微表处实施后车内、外噪声的变化情况,发现微表处路段车内噪音大于普通路段,车外噪声无明显降低。而王海有^[38]则认为微表处路面构造深度较大,可以吸收部分行车噪声,因此可作为降噪路面使用;

(4). 现有研究亦借助仿真拟合以求得到更好的轮胎-路面噪声的有关结论,但由于轮胎-路面噪声机理的复杂性,以及其结果与现场试验方法有极强的相关性,故仿真拟合的结果有待更多试验验证;

(5). 只针对某一种路面的研究较为普遍,例如研究中只包含微表处或普通沥青路面,故所得的评价方法与降噪方法亦只能运用在此种路面上,普适性较差。

1.3 研究内容和技术路线

本文拟从轮胎-路面噪声产生机理出发,对常规沥青路面表面特性对行车噪声的影响进行更深入的研究,力求通过对路面构造的检测分析,确定车内外噪声的影响因素,最终提出符合降噪路面的路面表面特性。主要通过现场试验以及数理统计方法,对沥青路面噪声产生机理及评价的研究工作从以下几个方面开展:

首先,透彻说明轮胎-路面噪声的产生和放大机理,从而确定影响行车噪声的路面表面特性参数。

其次,行车噪声及路面参数采集。包括车内噪声采集、滑行法车外噪声采集、

路面平整度、构造深度及路面抗滑值采集，为后续研究做好准备；

再次，数据分析。包括两个部分，第一部分确定路面构造对车内噪声的影响，第二部分确定路面构造对车外噪声的影响，并分析抗滑值是否和车外噪声有矛盾；最后，根据数据分析结果，得出常规沥青路面表面特性对行车噪声的影响。

本文共分为六章来阐述以上研究内容，依次为：

第一章提出问题；

第二章分析轮胎-路面噪声的产生和放大机理，确定影响行车噪声的路面参数；

第三章采集车内外噪声及路面参数；

第四章通过数理统计方法分析路面表面特性对车内噪声的影响；

第五章通过数理统计方法分析路面表面特性对车外噪声的影响，并分析抗滑值是否和车外噪声有矛盾；

第六章结论与展望。

本文的技术路线如图 1.3：

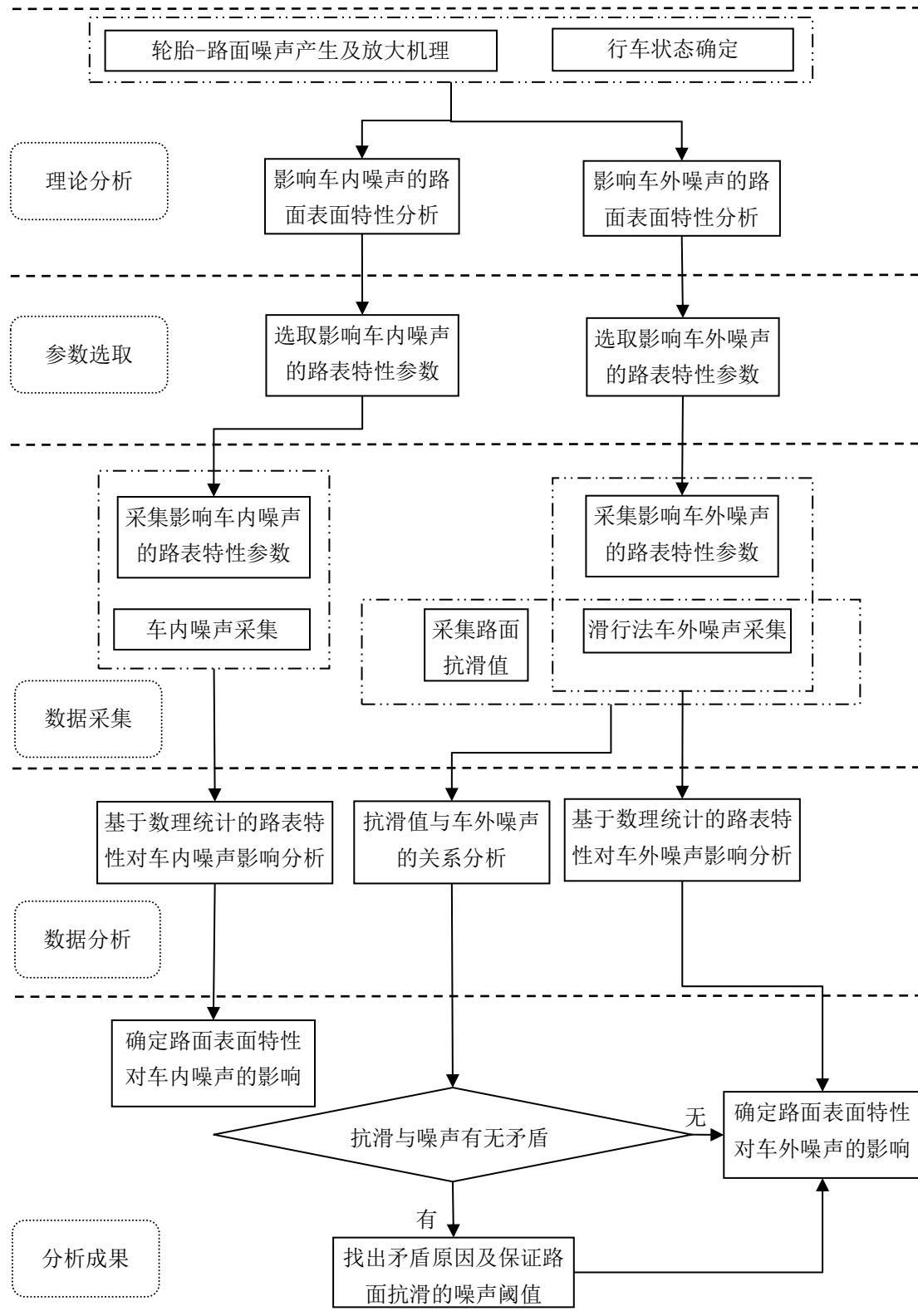


图 1.3 技术路线

1.4 本章小结

本章从论文的研究背景出发，分析了道路噪声源的构成和轮胎-路面噪声检测方法。从道路噪声评价、道路降噪措施研究及抗滑与车外噪声关系三大角度，对国内外学者道路噪声评价研究进行了文献综述。结合当前相关研究的成果和不足，明确了本文的研究内容和研究方向。对研究思路进行了系统分析，梳理了本文研究的技术路线。

第2章 轮胎-路面噪声产生及放大机理

轮胎-路面噪声是由滚动轮胎与路面两者复杂地相互作用而产生的。国内外学者已对此展开了广泛的研究，但是对噪声机理的分类方法不一。以下，本文从噪声产生和放大的角度，将机理分为噪声产生机理和噪声放大机理两大类。而为了能够了解常规沥青路面表面特性对行车噪声的影响，必须透彻说明轮胎-路面噪声的产生和放大机理。

2.1 轮胎-路面噪声产生机理

2.1.1 轮胎振动噪声

(1). 轮胎花纹块径向振动

轮胎在行驶过程中，如图 2.1，当轮胎胎面与地面在 A 点接触时，假设轮胎胎面与路面间并无滑动，由于车速并未改变，所以轮胎花纹块在 A 点的速度大小不变，而方向突变，即从 \vec{v}_0 突变成 \vec{v}_1 ，而 $|\vec{v}_0| = |\vec{v}_1|$ 。而根据矢量合成法则，在 A 点必存在一个速度 \vec{v}_2 ，以及因速度突然改变而生成的 \vec{v}_2 方向的加速度，而此加速度便是由一个在 A 点指向轮胎圆心的径向的力 \vec{F} 产生，而此力的产生便是由于轮胎花纹块与地面的相互作用，由此花纹块撞击地面产生径向振动噪声。同样，当此花纹块在 B 点离开地面时，也会像在 A 点一样，因速度方向发生突变而产生径向振动噪声。

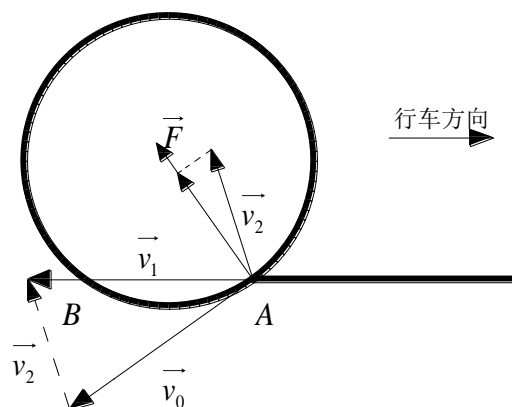


图 2.1 轮胎径向振动

轮胎径向振动噪声可从动力学角度进行数值计算^{[26] [43]}，如图 2.1。设轮胎半径为 r ，胎痕长为 l ，花纹块面积为 s ，块高度为 h ，块密度为 ρ_b ，则花纹块的等效质量为：

$$m_b = \rho_b s h \eta_b \quad (2.1)$$

式中： η_b —转换系数。

由加速度计算公式可得 \vec{v}_2 方向的加速度为：

$$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}_2}{\Delta t} \quad (2.2)$$

由于 $\Delta t = \frac{d}{|v_0|}$ ， d 为花纹块完全接地的宽度，故：

$$\vec{a} = \frac{\vec{v}_2 |v_0|}{d} \quad (2.3)$$

花纹块撞击地面产生的力 $F = ma$ ，故：

$$|\vec{F}| = \frac{\rho_b s h \eta_b}{d} \sqrt{2 - \sqrt{4 - \left(\frac{r}{l}\right)^2}} |v_0|^2 \quad (2.4)$$

其中 $v = \frac{p}{\rho_0 c_0}$ ， $\xi = \frac{v}{\omega} e^{-i(kx_0 + \frac{\pi}{2})}$ ， $F = K\xi$ ， $\omega = \sqrt{\frac{K}{m}}$ ， $K = \frac{Es}{h}$ 。可以推导得，

声压为：

$$p = \frac{\rho_0 c_0 \sqrt{\rho_b h^2 \eta_b}}{d \sqrt{E}} \sqrt{2 - \sqrt{4 - \left(\frac{r}{l}\right)^2}} |v_0|^2 e^{i(kx_0 + \frac{\pi}{2})} \quad (2.5)$$

式中： ρ_0 —空气静态密度；

K —轮胎弹性系数。

上述方法从动力学角度考虑能得到一些关于径向振动的有用结论，如振动噪声声压与花纹块面积的开方近似成正比。这与实测结果一致；声压与速度的平方成正比，因此声压级与速度的对数成正比。这与现有的许多研究结果一致^[43]。

其中上式是假设路面为平面的情况，所以上式花纹块面积实际应为花纹块接触路面的面积。

但实际路面由于在使用中的磨损,所以道路表面崎岖不平,即道路表面纵向存在凹凸量的偏差值,即道路的平整度,美国试验与材料协会(ASTM)的定义(E867)为:道路平整度(Traveled surface roughness)是路面表面相对于理想平面的竖向偏差。而在上式中并没有考虑到道路不平整所造成的噪声,假设路面表面相对于理想平面的竖向偏差为 Δh 。故有必要对此更进一步进行计算,示意图如图2.2。

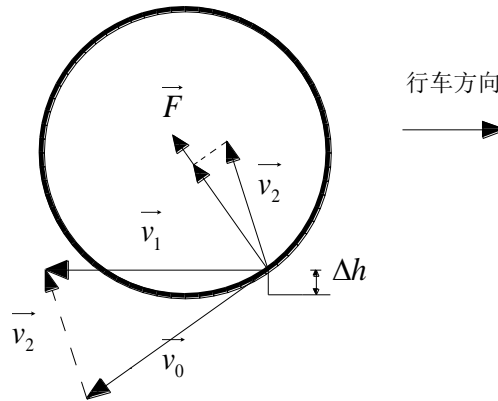


图 2.2 道路不平整示意图

与理想路面完全平整相比,路面不平整时,其瞬时的胎痕长度是发生变化的,出现 Δl ,由于变化值很小,所以在此忽略,并且 Δh 的数量级相对胎痕长度而言极小,所以假设,与平整路面相比,其噪声增加原因仅为花纹块纵向势能变化而产生,其撞击地面力的增大值为 ΔF ,沿用上述变量,可得:

$$\Delta F = \frac{m_b v}{\Delta t} = \frac{\rho_b s h \eta_b \sqrt{2g\Delta h}}{d} = \frac{\rho_b s h \eta_b |v_0| \sqrt{2g\Delta h}}{d} \quad (2.6)$$

增加的声压 Δp 与 ΔF 成正比,可得 Δp 与 $\sqrt{\Delta h}$ 成正比。

路面平整度测定的方法与仪器较多,相对应的指标也多种多样。其中国际平整度指数IRI由于具有多种优点,目前已经成为国际上运用最广泛的平整度指标,美国AASHTO 2002设计指南^[39]和大部分欧洲国家均采用IRI作为平整度验收指标。故在本文中将以所测路面的国际平整度指数IRI作为评价轮胎径向振动噪声的参数。

(2).轮胎花纹块切向振动

胎面花纹与路面接触区有“粘-滑”现象,即由于轮胎径向变形,在荷载作用下在切向和路面之间产生一个小的角度,在轮胎与路面之间产生切向力,而此力是由摩擦力和轮胎劲度来抵消,当切向力大于这两者时,花纹块发生轻微滑动,

但又很快重新粘在路面上。“粘-滑”现象实际上是由于胎面单元的滑动造成粘附的丧失和胎面变形引起滞后摩擦力的增加而产生的。这个过程便引起轮胎切向振动的噪声，它与胎面单元的滑动速度有关，特别是和车辆加速度变化有关。因此这种噪声在加速、制动及转弯时发生。

2.1.2 轮胎花纹槽空气泵噪声

轮胎胎面橡胶是弹性材料，如图 2.3，在轮胎接触路面时，花纹块压缩变形，其沟槽的容积减小，而本身槽内空气则会因压力增大而被突然压缩排出，形成类似喷射的噪声，声强度较大。而在轮胎离开路面时，花纹块回复原状，其沟槽容积又增大，槽内空气压力变小，则周围空气快速重新回到沟槽内，产生“噗”声，声强度较弱。空气不断被挤压而出而又重新流回这样的泵浦现象便产生了花纹槽空气泵噪声。其大小主要由沟槽的体积变化量决定，即与以下因素有关：沟槽长度、宽度、深度以及花纹槽角度。而根据模拟分析^[40]，沟槽的深度对轮胎噪声的影响不大，主要是花纹沟长度(宽度不变)和角度的影响。在花纹槽宽度和深度及其它情况完全不变的情况下，花纹沟角度每增大 15° ，轮胎的噪声声压将提高 110%~130%。

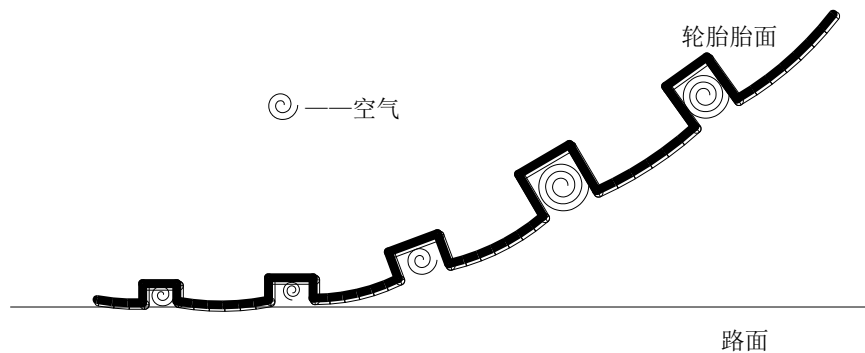


图 2.3 轮胎花纹槽空气泵现象

轮胎花纹槽空气泵噪声的产生，是由于沟槽中的空气在轮胎滚动时被挤压而出或又重新吸入而伴随的气压变化。为了进行数值计算，故作如下假设：

(1). 每一个花纹槽腔体都是单极子源

空气流动或物体在空气中运动引起空气产生涡流、冲击、或者压力突变导致空气扰动而形成的噪声，其声源一般可分为三类：单极子源、偶极子源和四极子源。

单极子源也称脉动声源，是由于媒质中流入的质量或热量不均匀是形成的。单极子源如脉动球体一样，产生的声波波阵面是同相位的，指向性图是一个圆球，

但单极子源的辐射没有指向特性，其声辐射功率与气流速度的四次方成正比。

偶极子源是当流体中有障碍物存在时，流体与物体产生的不稳定反作用力形成的。因此偶极子源属于力声源。常见的偶极子源如：乐器上振动的弦，不平衡的转子以及机翼和风扇叶片的尾部涡流脱落等。偶极子源可看做两个相位差为 180° 的单极子源形成的，指向性图呈“8”字型，其辐射声功率与气流速度的六次方成正比。

四极子源是媒质中没有质量或热量的注入，也没有障碍物存在，只是由粘滞应力辐射的声波形成的。它属于应力声源。亚声速湍流喷注噪声是最常见的四极子声源的例子。四极子可等效成是一对极性相反的偶极子组成的，指向性图呈“四叶玫瑰线性”，其辐射声功率与气流速度八次方成正比。

根据这三类声源的比对，本文假设每一个花纹槽腔体都是单极子源。以下介绍单极子源的基本理论计算方式。

在某点如有 k 个声源，而产生噪声声压级分别为 L_1 、 L_2 、 \dots 、 L_k ，则这一点的总声压级 L_{sum} 的计算方法为：

$$L_{sum} = 10 \lg \left(\sum_{m=1}^k 10^{0.1L_m} \right) \quad (2.7)$$

假设媒质是均匀的和静止的，媒质中没有反射面，非粘性，无热传导效应。限定在这种媒质中的声源区，如果源区的尺寸和声波波长相比很小，则源区中每个单元的滞后时间将大致相同。因此，没有来自声源单元之间的干涉。根据质量守恒定律、连续性方程和媒质的物态方程可以推导得到声压为：

$$p(x,t) = \frac{\rho_0}{4\pi L} \frac{\partial Q(y,t - \frac{L}{t})}{\partial t} \quad (2.8)$$

式中： L —源区和观察者之间的距离；

Q —媒质输入流量；

ρ_0 —流体密度。

(2). 花纹槽腔体中的空气完全被挤出或吸入

在轮胎滚动过程中，花纹槽腔体中的空气会被挤出或吸入，但实际情况中并不能确定每次空气完全都被挤出或吸入，只能认为接近完全被挤出或吸入，为了研究方便，故作此假设。

(3). 花纹槽腔体之间没有相互影响

现实中花纹槽腔体间会有相互影响，但在计算中可忽略。

在以上假设的基础上，轮胎花纹槽平面参数如图 2.4。

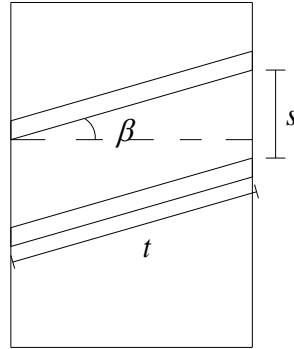


图 2.4 花纹槽平面图

$$V_1 = ast \quad (2.9)$$

$$a = \begin{cases} l_1 & \delta \geq l_1 \\ \delta & \delta < l_1 \end{cases} \quad (2.10)$$

式中： V_1 —花纹槽体积；

δ —轮胎最大下沉量；

s —花纹槽周向尺寸；

t —花纹槽向尺寸；

l_1 —花纹槽深度。

而一个花纹沟挤出（或吸入）空气所需时间 t_1 为：

$$t_1 = \frac{s + t \sin \beta}{v} \quad (2.11)$$

式中： β —花纹沟与轮胎轴线夹角；

v —轮胎滚动速度；

根据假设 2，花纹槽中的气体被完全挤出(或吸入)，及假设 3，花纹槽之间没有干涉作用，故某方向花纹沟被挤压(或吸入)的气体流量 Q_1 为：

$$Q_1 = \frac{V_1}{t_1} = \frac{astv}{s + t \sin \beta} \quad (2.12)$$

根据假设 1，花纹沟为单极子源，故将 Q_1 代入公式 2.8，得某方向花纹沟平均声压 p_1 为：

$$p_1 = \frac{\rho_0}{4\pi L} \frac{astv^2}{(s + t \sin \beta)^2} \quad (2.13)$$

式中： L —花纹沟和观察者之间的距离；

ρ_0 —空气密度。

则平均声压级 L_1 为：

$$L_1 = 20 \lg \frac{p_1}{p_0} = 20 \lg \left(\frac{\rho_0 astv^2}{4 p_0 \pi L (s + t \sin \beta)^2} \right) (dB) \quad (2.14)$$

根据上述单极子源的声学理论，可得轮胎运动时，某方向 n 个花纹槽产生的总声压级为：

$$L_{sum} = 20 \lg \left(\frac{\rho_0 n astv^2}{4 p_0 \pi L (s + t \sin \beta)^2} \right) (dB) \quad (2.15)$$

与理想路面相比，实际沥青路面存在一定构造深度，是指一定面积的路表面凹凸不平的开口孔隙的平均深度。如图 2.5，当花纹槽接触路面时，由于构造深度的存在，花纹槽的压缩量相对接触理想路面的花纹槽有所减小，即实际上减小了上式中能产生空气泵噪声的有效花纹槽深度。所以假设，与理想路面相比，其噪声减少原因为构造深度 TD 减少了有效花纹槽深度，沿用上述变量，可得：

$$L_{sum} = 20 \lg \left(\frac{\rho_0 n (a - TD) stv^2}{4 p_0 \pi L (s + t \sin \beta)^2} \right) (dB) \quad (2.16)$$

总声压级随着构造深度增加而减少。

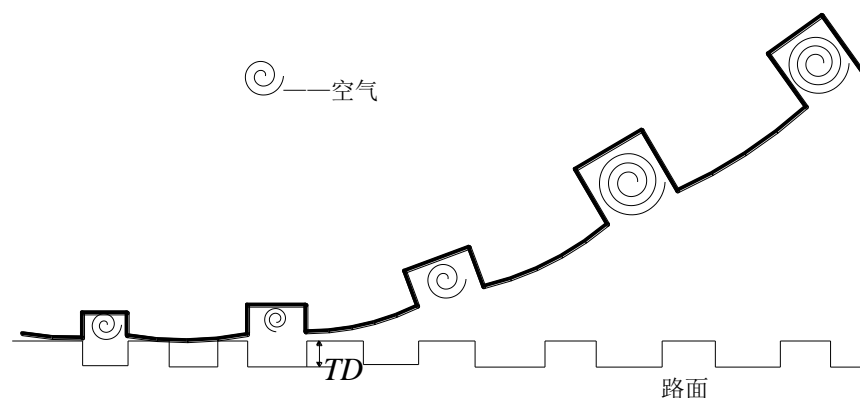


图 2.5 路面构造深度示意图

2.1.3 空气动力性噪声

轮胎滚动时，轮胎周围的气流受到干扰，在轮胎和路面之间产生湍流，引起空气压力的变化，从而产生空气动力噪声，空气动力噪声对轮胎-路面噪声的贡献微弱，只有在汽车高速行驶时（>200km/h）时，这种现象才比较明显，所以不作为本文主要考虑因素。

2.2 轮胎-路面噪声放大机理

若仅仅从上述轮胎-路面噪声产生方面考虑，由于轮胎花纹块较小，故不足以产生很大的声能量源，实际在轮胎-路面噪声中，轮胎-路面整个系统的结构组成同时也显著放大了噪声。

2.2.1 号筒效应

轮胎胎面和路面构成的几何形状成为天然的号筒，位于号筒喉部附近的任何噪声源产生的声能量将被放大，这种放大是由于声波在轮胎和路面之间的多重反射产生的，如图 2.6。学者对号筒效应进行实验^[41]，实验中扬声器置于后缘处，测量有轮胎及无轮胎时扬声器辐射的噪声。结果表明，在大于 300Hz 的频率范围内，由于号筒效应轮胎噪声辐射可提高 10dB 以上。

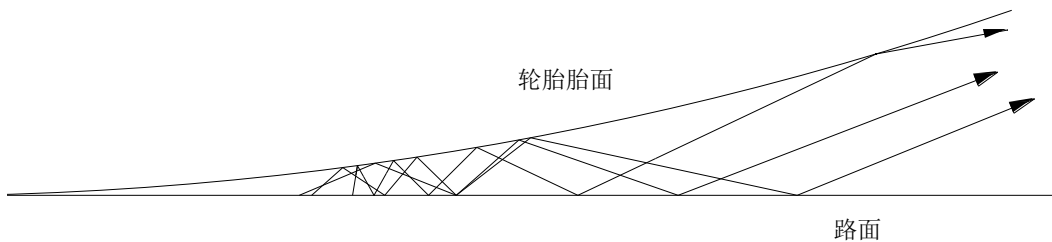


图 2.6 号筒效应

轮胎与路面在接触区附近形成了类似号筒的几何形状，这样能很显著地增加噪声。学者也通过一系列实验模拟轮胎-路面号筒效应，发现声学的射线理论能较好模拟号筒效应。

根据射线理论，声音传播路径是直线的，即“射线”，而且与频率无关；而空气中的声速的平均密度是固定的，除非被边界反射，比如轮胎胎面和路面，则射线一直是直线；边缘散射波代表一个高阶修正，因此被忽略的。

在轮胎-路面接触区附近声波多次反射路径如图 2.7。

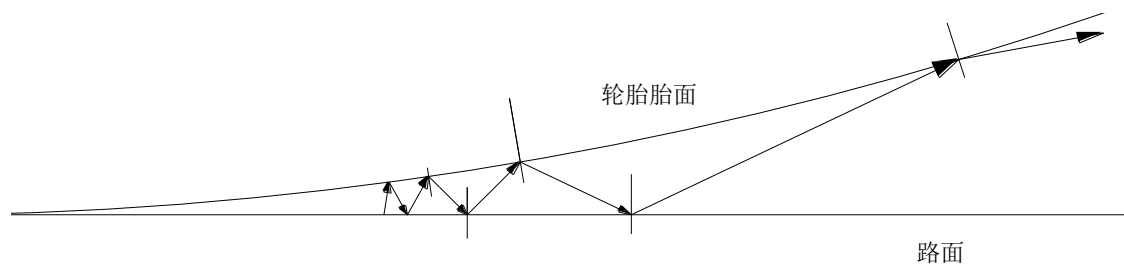


图 2.7 轮胎-路面接触区附近声波反射

在路面是平面时，上图中的声波的每次反射都是成功的，并且最终能反射集中到路边某一个接受点，假设其声压为 $p_{理想}$ 。

与理想路面相比，实际沥青路面存在一定构造深度，如图 2.8，即在射线传播中会有一部分声能传入路面，由于构造深度的存在，原先能完全反射并传播到路边某一个接收点的的声能有所减小。所以假设，与理想路面相比，构造深度带来了声能传播的损耗率为 f ，沿用上述变量，可得：

$$p_{实际} = p_{理想} \cdot (1 - f) \quad (2.16)$$

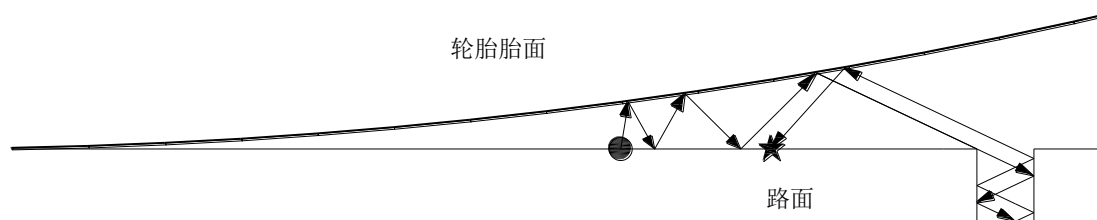


图 2.8 路面构造深度造成的声波反射示意图

2.2.2 共振效应

(1). 管柱腔体共振

在轮胎与路面的接触区内，轮胎花纹间的沟槽与路面形成充气的管柱腔体。这种腔体的共振对频率有选择性放大，在极端情况下为，如在光滑路面上，并在 $0.8\text{kHz} \sim 3\text{kHz}$ 的频率范围内，放大作用约能达到 10dB ^[42]，但在一般现实路面状态下，腔体共振因其选择性频率放大，所以并非主要噪声放大因素，并且没有号筒效应显著。

(2). 亥姆霍兹共振

当轮胎沟槽离开接触区的瞬间，沟槽内腔与胎面及路面的夹角口形成亥姆赫

兹共振腔，在较窄的频率范围内产生共振。亥姆赫兹共振的放大作用也具有较强的频率选择性。

(3). 内部声学共振

轮胎内的空气在轮胎外侧有振动时也被激励，而在某特定频率上，胎内空气也发生共振。此类现象对车外噪声基本无影响。

2.3 影响行车噪声的常规沥青路面表面特性参数的提出

轮胎-路面噪声的产生机理可分为：轮胎振动噪声（径向振动和切向振动）、轮胎花纹槽空气泵噪声、空气动力性噪声；而轮胎-路面噪声的放大机理可分为：号筒效应、共振效应（管柱腔体共振、亥姆霍兹共振和内部声学共振）。以上各类机理总结如表 2.1。

表 2.1 噪声机理总结

机理分类		机理简述	有无频率选择性	有无高车速要求
产生机理	轮胎振动噪声	径向振动	花纹块撞击地面产生径向振动噪声	
		切向振动	“粘-滑”现象	√
	轮胎花纹槽空气泵噪声		空气不断被挤压而出而又重新流回这样的泵浦现象	
	空气动力性噪声		轮胎和路面之间产生湍流，引起空气压力的变化	√
放大机理	号筒效应		声波在轮胎和路面之间的多重反射产生	
	共振效应	管柱腔体共振	轮胎花纹间的沟槽与路面形成充气的管柱腔体	√
		亥姆霍兹共振	沟槽内腔与胎面及路面的夹角口形成亥姆赫兹共振腔	√
		内部声学共振	轮胎胎内空气共振	√

虽然轮胎-路面噪声由各方面复杂因素决定，但由于本文研究一般车速且并非特殊频率下的轮胎-路面噪声，故在下文中只考虑路面对轮胎径向振动、轮胎花纹槽空气泵噪声以及号筒效应这三类的影响。本章前 2 节中分别针对这三类轮胎-路面主要噪声机理的数值计算方法进行了详细的阐述，并确定了影响各机理的重要参数，即平整度与构造深度。

2.4 本章小结

本章针对轮胎-路面系统及车辆行车规律,对轮胎-路面噪声产生和放大机理进行了详细的阐述,为进一步依据噪声产生和放大机理分析路面表面特性对噪声的影响做了充分的准备。

第3章 行车噪声及路面表面特性参数采集

研究路面表面特性与行车噪声之间的关系是十分重要的。这将对道路的评价,噪声的预测及试验路降噪效果测试等产生积极的指导意义。由于目前为止并没有比较全面的关于路面表面特性参数对行车噪声影响方面的定量研究。为了弥补这一缺陷,本章有针对性地选择了上海市高架的多条道路以进行实地检测,为后文的路面表面特性对行车噪声影响研究做准备。

3.1 路段选取原则

为比较全面地分析常规沥青路面表面特性对行车噪声的影响,故进行现场试验,选取试验路段主要原则有:

(1).由于各高架路段车道数不同,并不是所有路段都能达到滑行法实验要求,即行车中线与噪声仪距离为7.5m,故选取单向四车道的高架路段;

(2).根据上海路政局每天发布的高架封路计划,选择当晚封路路段进行测量;

(3).夜间封路时,会有专业清扫车等设备对高架进行清扫,此时会产生较大噪声,应对远离清扫队伍的路段进行检测;

(4).选取路段应尽可能平整度较好,线形平直,表面干燥无积水,无小石块等障碍物,以避免路面的不平整而影响噪声测量结果,如遇到特别颠簸路段,应去除其测试结果。

为了叙述方便并统一编号,下文将运用“高架拼音简写+试验次数+数字”为检测路段编号。即:

南北高架第一次试验路面: NB101、NB102、NB103……

延安高架第一次试验路面: YA101、YA102、YA103……

南北高架第二次试验路面: NB201、NB202、NB203……

延安高架第二次试验路面: YA201、YA202、YA203……

3.2 仪器选用及评价方法

3.2.1 测试仪器

HS5660C 型精密噪声频谱分析仪是一种袖珍式的智能化噪声测量仪器，它集噪声采集、积分测量、噪声统计、频谱分析等几种功能于一体，主要性能指标符合 IEC61672 标准和 JJG188-2002 声级计检定规程对 1 级声级计的规定要求。见图 3.1。



图 3.1 HS5660C 声级计

A 声级是模拟人耳听到噪声的最好评价方法，因此在测试时，选择 A 档，该仪器会自动输出 A 声级。仪器还可以提供存储功能。最多可存储 500 组单组数据、4 组整时数据和 50 组滤波器自动测量数据，并且可以通过 RS-232C 口把数据传输给 HS4784 打印或传输给计算机进行处理。这样可以减少因人员记录失误所引起的误差，同时可以减少测试时间，提高测试速度。即测试人员只需测试，可到室内通过 RS-232C 口把数据传输给 HS4784 打印或传输给计算机进行处理。

本文通过 HS5660C 型精密噪声频谱分析仪来获得检测数据。系统检测界面如图 3.2 所示。检测过程中，系统可根据设定自动测量，自动采集 L_{eq} 、 L_{AE} 、 SD 、 L_N (L_{95} 、 L_{90} 、 L_{50} 、 L_{10} 、 L_5)、 L_{max} 、 L_{min} 、 L_{dn} 、 L_d 、 L_n 等信息，检测结束后，系统自动生成检测数据文件保存在仪器中。获得检测数据后，通过 RS-232C 口把数据传输给计算机进行处理，通过配套的分析软件对数据进行分析。这为本文更为细致地分析预防性养护路面噪声特征提供了最基本的支持和保障。如图 3.3。



图 3.2 数据采集界面

索引	Leq	Lae	SD	Lmax	Lmin	L95	L90	L50	L10	L5	采样起始时间	采样点号	频
1	76.3	79.7	2.6	79.8	72.9	72.9	72.9	77.6	79.8	79.8	2013.12.4/1	0	AF
2	77.0	80.5	1.5	79.9	75.4	75.4	75.4	78.4	79.2	79.2	2013.12.4/1	0	AF
3	76.4	79.5	2.7	79.4	72.7	72.7	72.7	76.4	79.4	79.4	2013.12.4/1	0	AF
4	74.7	78.5	4.8	78.7	66.2	66.2	66.2	70.6	78.7	78.7	2013.12.4/1	0	AF
5	68.9	73.2	0.5	70.3	68.6	68.6	68.6	69.4	69.8	69.8	2013.12.4/1	0	AF
6	69.4	72.4	0.3	69.9	68.9	68.9	68.9	69.4	69.9	69.9	2013.12.4/1	0	AF
7	76.0	80.4	4.0	80.2	69.5	69.5	69.5	73.5	79.3	79.3	2013.12.4/1	0	AF
8	72.9	76.1	2.0	75.7	70.4	70.4	70.4	72.9	75.7	75.7	2013.12.4/1	0	AF
9	75.6	78.2	1.7	78.4	74.5	74.5	74.5	74.5	78.1	78.1	2013.12.4/1	0	AF
10	74.9	79.1	2.8	78.6	72.1	72.1	72.1	72.3	78.4	78.4	2013.12.4/1	0	AF
11	70.2	74.5	1.5	73.6	69.6	69.6	69.6	69.6	72.4	72.4	2013.12.4/1	0	AF
12	70.7	73.6	0.6	71.9	70.3	70.3	70.3	70.3	70.9	70.9	2013.12.4/1	0	AF
13	75.0	77.3	1.3	77.2	74.3	74.3	74.3	74.3	77.1	77.1	2013.12.4/1	0	AF
14	77.0	78.7	1.9	79.7	75.2	75.2	75.2	75.2	78.9	78.9	2013.12.4/2	0	AF
15	76.9	79.0	1.9	79.9	75.3	75.3	75.3	75.3	78.8	78.8	2013.12.4/2	0	AF
16	76.1	77.8	2.1	78.7	74.0	74.0	74.0	74.0	78.6	78.6	2013.12.4/2	0	AF
17	70.5	71.2	0.0	71.2	71.1	71.1	71.1	71.1	71.2	71.2	2013.12.4/2	0	AF
18	69.9	72.3	0.6	70.9	69.4	69.4	69.4	69.4	70.2	70.2	2013.12.4/2	0	AF
19	75.1	77.6	1.1	77.5	75.0	75.0	75.0	75.0	77.2	77.2	2013.12.4/2	0	AF
20	74.4	77.3	0.7	77.0	75.3	75.3	75.3	75.3	76.5	76.5	2013.12.4/2	0	AF
21	73.2	76.4	2.4	76.0	69.9	69.9	69.9	74.4	76.0	76.0	2013.12.4/2	0	AF
22	74.4	76.4	1.6	77.3	73.3	73.3	73.3	73.3	75.9	75.9	2013.12.4/2	0	AF
23	66.1	69.4	0.5	67.7	66.4	66.4	66.4	66.5	67.7	67.7	2013.12.4/2	0	AF
24	65.1	65.6	0.5	66.0	65.0	65.0	65.0	65.0	66.0	66.0	2013.12.4/2	0	AF
25	75.0	77.4	0.9	77.1	74.9	74.9	74.9	74.9	76.6	76.6	2013.12.4/2	0	AF
26	77.7	80.1	0.8	79.9	78.1	78.1	78.1	78.1	79.7	79.7	2013.12.4/2	0	AF
27	77.2	79.2	0.9	78.9	76.8	76.8	76.8	76.8	78.9	78.9	2013.12.4/2	0	AF
28	77.8	79.5	0.1	79.9	79.7	79.7	79.7	79.7	79.9	79.9	2013.12.4/2	0	AF
29	69.2	71.0	0.4	70.5	69.3	69.3	69.3	69.3	70.0	70.0	2013.12.4/2	0	AF
30	67.2	77.6	5.0	74.8	55.7	57.8	58.7	67.2	70.7	74.6	2013.12.4/2	0	AF

图 3.3 分析评价结果报表

3.2.2 测量及评价方法

行车噪声测量可分为车内噪声测量和车外噪声测量，前者影响车内驾驶员及乘客，后者影响车外环境，如居民、行人等，其影响对象不同，噪声评价侧重点不同，故有必要分别制定测试及评价方法。

而第2章中研究可得道路平整度及路面构造深度对行车噪声有重要影响，本节也详细介绍两者的检测方法。而路面抗滑值是否和噪声有矛盾也是本文的讨论内容，故本节也详细介绍了路面抗滑值的检测方法。

3.2.2.1 车内噪声测量

车内噪声影响了驾驶员及乘客的行车感受,若汽车在匀速连续行驶的情况下,车内噪声是持续不间断的,虽然随着路面状况的变化会有噪声极值出现,但对驾驶员及乘客而言,某一路段平均噪声值更接近人的主观感受。

噪声测量场地见图 3.4。

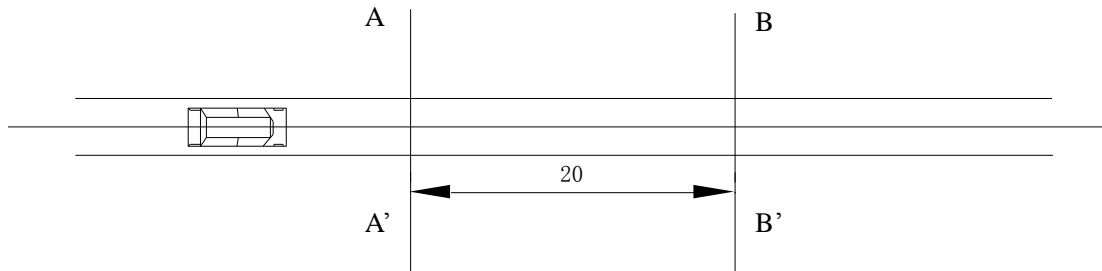


图 3.4 车内噪声测量场地

故结合一般的《GB-1496 机动车辆噪声测量方法》及实际试验条件,制定以下车内噪声测量条件及评价方法:

选取上海出租车作为实验车辆,在发动机关闭和变速器空挡的情况下进入图 3.4 中的 A-A'或 B-B'线,并沿中间线位置前行,速度为 80km/h。用声级计“慢”档测量 A 计权声级,取平均值。

测量跑道应有足够试验需要的长度,并且平直、干燥。

测量时车辆门窗应关闭。车内带有其他辅助设备是噪声源,测量时是否开动应按正常使用情况而定。

车内本底噪声比所测车内噪声至少低 10 dB,并保证测量不被偶然的其他声源所干扰。

车内除驾驶员和测量人员外,不应有其他人员。

在驾驶员耳朵附近布置测点。话筒朝车辆前进方向。

3.2.2.2 滑行法车外噪声测量

滑行法测量场地见图 3.5。

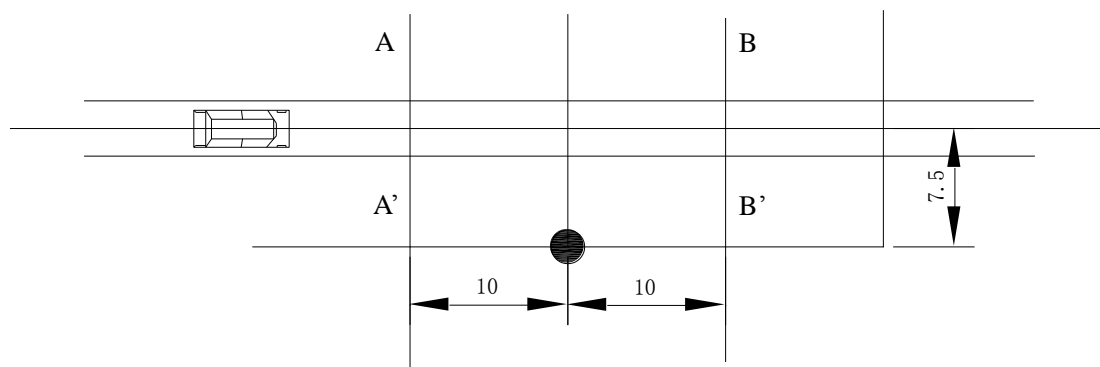


图 3.5 滑行法车外噪声测量场地

具体测量规范与要求详见《GB/T 22036-2008 轮胎惯性滑行通过噪声测试方法》^[44]。在本章测试中，声级计布置在离地面高 1.2m 的三脚架上，如图 3.6(左)，距离车辆行驶中心线 7.5m，如图 3.6(右)。在实验过程中同时对空气和地面温度都进行了测量。



图 3.6 声级计布置位置

选取上海出租车作为实验车辆，在发动机关闭和变速器空挡的情况下进入图 3.5 中的 A-A'或 B-B'线，并沿中间线位置前行，速度为 80km/h。声级计用 A 计权网络，“快”档进行测量，读取车辆驶过时声级计的最大读数。

每次测量的声压级为 L_m ，实际声压级应按下式进行修正：

$$L = L_m + k\Delta T \quad (3.1)$$

式中： L —实际声压级；

k —系数：

参考规范标准，对于本文中轮胎，20℃以上， k 为-0.03dB/℃；20℃以下， k 为-0.06dB/℃；

ΔT —路面参考温度 20°C 与实验时路面实际温度 t 的差值: $\Delta T = 20^{\circ}\text{C} - t$ 。

3.2.2.3 道路平整度测量

本章通过丹麦格林伍德 (Greenwood) 公司的激光平整度检测系统来获得高架路面平整度的检测数据。该设备是一台装备有激光传感器、加速度计和陀螺仪的测试仪器,它同时备有先进的数据采集和处理系统,能够提供有关路面状况的详尽信息。

欧洲的一些著名的和权威的机构选择了 Greenwood 的路面激光断面仪,包括了丹麦国家交通研究院,克罗地亚政府,西班牙政府,俄罗斯政府,波兰政府,以及英国运输研究试验室 (TRRL)。其中英国运输研究试验室 (TRRL) 向 Greenwood 公司购买了一整套有 25 个激光传感器和两个宏观纹理传感器的激光断面仪。英国运输研究试验室 (TRRL) 是世界上最著名的道路检测研究机构之一,他们也生产激光断面仪,但是他们还是选择购买 Greenwood 的产品。Greenwood 的路面激光断面仪检测性能有目共睹,所以这次对道路平整度的测量结果有十分高的可信度。

在检测过程中,系统可自动采集路面高程、实测距离和行驶车速等信息,检测结束后,系统自动生成检测数据文件保存在硬盘指定位置。获得检测数据后,可通过配套的分析软件对数据进行分析。

3.2.2.4 路面构造深度测量

本章运用手工铺砂法测定沥青路面表面构造深度,用以评定路面表面的宏观粗糙度、路面表面的排水性能及抗滑性能。具体规范要求详见《JTG E60-2008 公路路基路面现场测试规程》^[45],本文测量步骤如下:

1、量砂准备:取洁净的细砂晾干、过筛,取 $0.15\sim 0.30\text{mm}$ 的砂置适当的容器中备用。量砂只能在路面上使用一次,不重复使用。

2、测点所在横断面位置为行车线距离声级计最近点,即理论上声级计最大值时车辆的通过点。测点应选在行车道的轮迹带上,距路面边缘不应小于 1m 。

3、用毛刷子将测点附近的路面清扫干净,面积不小于 $30\text{cm}\times 30\text{cm}$ 。

4、用小铲装砂沿筒向圆筒中注满砂,手提圆筒上方,在硬质路面上轻轻地叩打 3 次,使砂密实,补足砂面用钢尺一次刮平。

5、将砂倒在路面上,用底面粘有橡胶片的推平板,由里向外重复做摊铺运动,稍稍用力将砂细心地尽可能地向外摊开,使砂填入凹凸不平的路表面的空隙中,尽可能将砂摊成圆形,并不得在表面上留有浮动余砂。注意摊铺时不可用力过大或向外推挤。

6、用钢板尺测量所构成圆的两个垂直方向的直径，取其平均值，准确至 5mm。

7、按以上方法，同一处平行测定不少于 3 次，3 个测点均位于轮迹带上，测点间距 3~5m。该处的测定位置以中间测点的位置表示，测量现场如图 3.7。

路面表面构造深度测定结果按下式计算：

$$TD = \frac{1000V}{\pi D^2 / 4} = \frac{31831}{D^2} \quad (3.2)$$

式中：TD—路面表面构造深度（mm）；

V—砂的体积（25cm³）；

D—摊平砂的平均直径（mm）。



图 3.7 手工铺砂法测量构造深度

3.2.2.5 路面抗滑值测量

本章运用摆式摩擦系数测定仪测定沥青路面的抗滑值。具体要求详见《JTG E60-2008 公路路基路面现场测试规程》^[45]，本文测量步骤如下：

- 1、清洁路面：用扫帚或其他工具将测点处的路面打扫干净。
- 2、仪器调平。将仪器置于路面测点上，并使摆的摆动方向与行车方向一致。转动底座上的调平螺栓，使水准泡居中。
- 3、调零。
- 4、校核滑动长度 126mm。
- 5、将摆固定在右侧悬臂上，使摆处于水平释放位置，并把指针拨至右端与摆杆平行处。
- 6、用喷水壶浇洒测点，使路面处于湿润状态。
- 7、按下右侧悬臂上的释放开关，使摆在路面滑过。当摆杆回落时，用手接住，读数但不记录。然后使摆杆和指针重新置于水平释放位置。
- 8、重复步骤 6 和 7 的操作 5 次，并读记每次测定的摆值。单点测定的 5 个值中最大值与最小值的差值不得大于 3。如差值大于 3 时，应检查产生的原因，并再次重复上述各项操作，至符合规定为止。取 5 次测定的平均值作为单点的路

面抗滑值（即摆值 BPN_t ），取整数。

9、在测点位置用温度计测量潮湿路表温度，准确至 1°C 。

10、每个测点由 3 个单点组成，即在 3.2.2.4 章节中的测点旁测量，测量现场如图 3.8。

当路面温度为 t ($^\circ\text{C}$) 时，测得的摆值为 BPN_t 必须按下式换算成标准温度 20°C 的摆值 BPN_{20} ：

$$BPN_{20} = BPN_t + \Delta BPN \quad (3.3)$$

式中： BPN_{20} —换算成标准温度 20°C 时的摆值；

BPN_t —路面温度 t 时测得的摆值；

ΔBPN —温度修正值依据表 3.1，中间值依据线性差值。

表 3.1 温度修正值

温度 ($^\circ\text{C}$)	0	5	10	15	20	25	30	35	40
温度修正值 ΔBPN	-6	-4	-3	-1	0	2	3	5	7



图 3.8 摆式仪测路面抗滑值

3.3 现场试验难点

根据本文 3.1 节的路段选取原则以及 3.2 节的试验仪器选用及测量方法，本文的现场试验均按照《GB/T 22036-2008 轮胎惯性滑行通过噪声测试方法》^[44]和《JTG E60-2008 公路路基路面现场测试规程》^[45]。

为了能得到准确并且尽量精确度高的试验结果，在正式试验前，高架测试路

段都经过精心选取，而在试验过程中，试验方法也严格按照规范。

路段选取难度主要体现在：

(1). 试验场地要求单向四个车道。虽然上海的高架道路较多，如内环高架、中环高架等，但是真正能满足《GB/T 22036-2008 轮胎惯性滑行通过噪声测试方法》^[44]中要求行车线与噪声仪相距 7.5 米的高架路段、线形较为平直且能安排试验的只有延安高架及南北高架。仅此条件就已大量缩小可检测的样本数；

(2). 试验时间限制。试验时间为高架路段夜间养护封路期间，封路计划可通过上海路政局网站查询，而封路计划将上海中心城快速路分段，每段平均两周轮到一次，并且实际封路路段也将有可能在当天变换。若是当晚能顺利试验，为了安全考虑，其试验时间只能为凌晨一点至四点。试验时间的不确定性及每次试验的时间较短，也减小了样本数；

(3). 环境要求较高。试验要求路面干燥并且温度适中，而路段封路为两周一轮，当天不能有降雨，这两个条件同时必须保证，这也减小了样本数；

(4). 车辆行车线要平直。由于《GB/T 22036-2008 轮胎惯性滑行通过噪声测试方法》^[44]中建议的车速为 80km/h，而达到此车速要有大约 500 米以上的加速距离，加速路段与试验滑行路段线形要求平直，而高架道路线形中要找到路线较长而又平直的试验路段也十分有限。

试验细节把控主要体现在：

(1). 试验器材统一。全程用同一测量仪器，同一试验车辆，车辆轮胎不变。

(2). 试验人员统一。全程驾驶试验车辆为同一驾驶员，其他测量也为全程同一试验人员。

(3). 现场试验前系统学习规范及实地操作演练。

综上所述，由于对试验场地及试验方法的极高要求，使本文所能选取的路段相对有限，但同样，也正因为对试验的高要求，在试验前对试验人员进行了非常专业的指导，并且在试验中仔细把控细节，故虽样本有限，但可信度及精确度相对较高。

3.4 测量结果

3.4.1 车内噪声测量结果

表 3.2 为在 80km/h 速度下高架路段的车内噪声检测结果。

表 3.2 车内噪声检测结果

编号	L_{eq}	L_{ae}	SD	L_{max}	L_{min}	L_{95}	L_{90}	L_{50}	L_{10}	L_5	噪声均值
NB101	73.0	76.5	0.7	75.1	73.1	73.1	73.1	73.3	75.1	75.1	72.6
	72.1	73.4	0.6	73.1	71.9	71.9	71.9	71.9	73.1	73.1	
NB102	73.6	76.8	3.4	77.7	69.0	69.0	69.0	72.7	77.7	77.7	72.3
	70.9	73.1	0.1	71.6	71.2	71.2	71.2	71.2	71.6	71.6	
NB103	69.6	72.7	0.6	71.2	69.6	69.6	69.6	69.6	71.2	71.2	69.1
	68.5	71.3	0.4	70	69.0	69.0	69.0	69.0	69.5	69.5	
NB104	69.1	71.8	0.3	70.1	69.4	69.4	69.4	69.4	70.0	70.0	68.7
	68.3	69.2	0.2	68.8	68.3	68.3	68.3	68.3	68.8	68.8	
YA101	68.6	71.4	0.4	70	69.1	69.1	69.1	69.1	69.9	69.9	68.4
	68.1	69.7	0	68.9	68.8	68.8	68.8	68.8	68.9	68.9	
YA102	68	69.2	0.1	68.6	68.4	68.4	68.4	68.4	68.6	68.6	68.9
	69.7	73.8	3.7	77.6	67.5	67.5	67.5	67.9	72	72	
YA103	69.1	71.6	1.7	72	67.7	67.7	67.7	67.7	70.5	70.5	69.7
	70.2	72.7	1.7	73.1	68.8	68.8	68.8	68.8	71.6	71.6	
YA104	71	73.1	0.2	71.8	71.2	71.2	71.2	71.2	71.8	71.8	69.5
	67.9	69.3	0.3	69.2	68.6	68.6	68.6	68.6	69.2	69.2	
YA105	70.9	72.1	0.2	71.5	71.1	71.1	71.1	71.1	71.5	71.5	69.8
	68.7	71.8	0.8	70.4	68.3	68.3	68.3	69.2	70.4	70.4	
YA201	68.1	67.4	0	68.3	68.3	68.3	68.3	68.3	68.3	68.3	68.1
	68	70.6	0.9	69.2	66.8	66.8	66.8	67.8	69.2	69.2	
YA202	69.8	71.9	0.1	70.5	70.1	70.1	70.1	70.1	70.4	70.4	68.3
	66.8	67.3	0.2	67.5	67	67	67	67	67.5	67.5	
YA203	69.4	69	0	69.7	69.7	69.7	69.7	69.7	69.7	69.7	68.4
	67.3	70.9	0.2	68.3	67.6	67.6	67.6	67.8	67.9	67.9	
YA204	68.1	65.4	0	68.9	68.9	68.9	68.9	68.9	68.9	68.9	68.8
	69.5	73.2	0.1	70	69.5	69.5	69.5	69.7	70	70	
YA205	70.2	76	1.1	74.2	70.4	70.4	70.4	70.8	71.7	71.7	69.7
	69.1	71.2	0.5	70.4	69.1	69.1	69.1	69.1	69.7	69.7	
YA206	70.6	72.6	0.6	72.1	70.6	70.6	70.6	70.6	71.1	71.1	70.7
	70.7	73.8	0.6	72	70.4	70.4	70.4	71.5	72	72	
YA207	69.6	72.1	1	71.9	69.6	69.6	69.6	69.6	70	70	69.6
	69.5	72.4	0.5	70.7	69.4	69.4	69.4	69.4	70.6	70.6	
YA208	68.8	72.3	0.1	69.2	68.9	68.9	68.9	69	69.2	69.2	68.5
	68.2	70.6	0.2	68.9	68.4	68.4	68.4	68.4	68.9	68.9	
NB201	68.9	73.2	0.5	70.3	68.6	68.6	68.6	69.4	69.8	69.8	69.2
	69.4	72.4	0.3	69.9	68.9	68.9	68.9	69.4	69.9	69.9	
NB202	70.2	74.5	1.5	73.6	69.6	69.6	69.6	69.6	72.4	72.4	70.5
	70.7	73.6	0.6	71.9	70.3	70.3	70.3	70.3	70.9	70.9	
NB203	70.5	71.2	0	71.2	71.1	71.1	71.1	71.1	71.2	71.2	70.2
	69.9	72.3	0.6	70.9	69.4	69.4	69.4	69.4	70.2	70.2	
NB204	71.3	74.6	0.5	72.9	71.6	71.6	71.6	71.7	72.9	72.9	70.8
	70.3	70.8	0.5	71.2	70.2	70.2	70.2	70.2	71.2	71.2	

续表 3.2

编号	L_{eq}	L_{ae}	SD	L_{max}	L_{min}	L_{95}	L_{90}	L_{50}	L_{10}	L_5	噪声均值
NB205	69.2	71	0.4	70.5	69.3	69.3	69.3	69.3	70	70	68.2
	67.2	77.6	5	74.8	55.7	57.8	58.7	67.2	70.7	74.6	
NB206	72.3	74.2	0.6	73.6	72.2	72.2	72.2	72.2	73.6	73.6	69.9
	67.4	77.3	5.4	74	55.8	56.1	58.1	69.3	73.9	74	
NB207	71.2	72.2	0.2	73.4	73	73	73	73	73.4	73.4	68.9
	66.6	76.5	4	71.6	57.2	61.3	62	68.1	71.5	71.6	
NB208	69.4	70	0.4	70.1	69.3	69.3	69.3	69.3	70.1	70.1	69.7
	69.9	72.9	1.4	73.1	69.2	69.2	69.2	70.2	73.1	73.1	
NB209	70.6	73	0.1	72	71.7	71.7	71.7	71.7	71.7	71.7	70.9
	71.1	72.2	2.2	75	70.6	70.6	70.6	70.6	75	75	
NB210	70.2	73.3	0.5	71.8	70.4	70.4	70.4	70.8	71.8	71.8	70.1
	70	72	0.3	71.5	70.6	70.6	70.6	70.6	70.9	70.9	
NB211	68.5	68.9	0.2	69.6	69.1	69.1	69.1	69.1	69.6	69.6	68.8
	69.1	71.8	0.8	71.4	69.4	69.4	69.4	69.4	69.8	69.8	

注：① L_{eq} 表示测量时间内的连续等效声级；

②统计声级 L_i 表示超过某声级的概率为*i*%的噪声级，*i*=95、90、50、10、5；

③SD为测量时间内的方差；

④ L_{AE} 表示暴露声级；

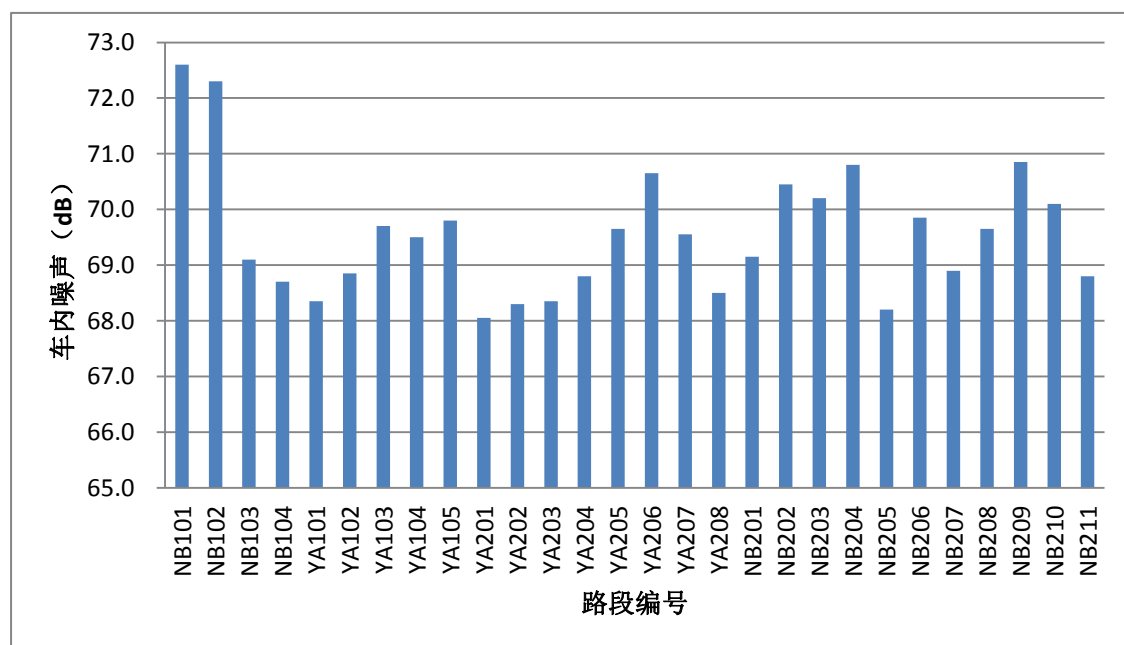


图 3.9 车内噪声统计图

图 3.9 为车内噪声统计图，从检测结果来看，车速为 80km/h 时，所测路段中，车内噪声最小值为 68.1dB，最大值为 72.6dB。

3.4.2 车外噪声测量结果

表 3.3 为在 80km/h 速度下高架路段的滑行法车外噪声检测结果。

表 3.3 车外噪声检测结果

编号	L _{eq}	L _{ae}	SD	L _{max}	L _{min}	L ₉₅	L ₉₀	L ₅₀	L ₁₀	L ₅	路面温度 (°C)	噪声均值
NB101	72.1	76.4	1.3	74.4	70.4	70.4	70.4	73.2	73.7	73.7	13	73.0
	67.8	72.3	1.1	69.9	66.7	66.7	66.7	68.4	69.8	69.8	13	
	71	76	3.2	75.4	67.6	67.6	67.6	69.4	75	75	13	
	71.1	75.7	1.8	73.9	68.8	68.8	68.8	72	73.3	73.3	13	
NB102	71.4	75.3	2.4	74.2	67.7	67.7	67.7	70.8	73.7	73.7	12	76.7
	69.3	75.3	3.2	72.9	63.6	63.6	63.6	69	72.4	72.9	12	
	74.7	76.8	0.3	76.3	75.4	75.4	75.4	75.4	75.6	75.6	12	
	74.7	85.1	8.5	85.3	60	60.2	61	69.1	82.5	82.7	12	
NB103	74.5	76.4	2.5	77.8	71.9	71.9	71.9	71.9	76.6	76.6	12	77.9
	73.5	81.6	7.3	81.3	58.1	58.1	59.3	66	78.1	78.1	12	
	74.3	76.4	2.4	77.6	71.9	71.9	71.9	71.9	76.3	76.3	12	
	73.6	77.3	2.4	76.9	70.9	70.9	70.9	74.9	76.9	76.9	12	
NB104	72.3	77	3.5	77.5	67.5	67.5	67.5	72.1	76.4	76.4	13	76.6
	73.4	74.6	0.3	75.4	74.8	74.8	74.8	74.8	75.4	75.4	13	
	76.4	78.2	0.8	78.1	76.2	76.2	76.2	76.2	78.1	78.1	13	
	75.2	77.7	0.5	77.1	75.8	75.8	75.8	75.8	76.9	76.9	13	
YA101	75.6	78.5	1.3	78.5	75.6	75.6	75.6	75.6	78.5	78.5	10	77.9
	74.8	78.8	1.1	77.2	74.3	74.3	74.3	76.8	77.2	77.2	10	
	77.5	80	1.2	80.2	77.6	77.6	77.6	77.6	80.2	80.2	10	
	76	77.8	0.9	78.1	75.7	75.7	75.7	75.7	77.3	77.3	10	
YA102	73.6	74.6	0.3	74.5	73.8	73.8	73.8	73.8	74.5	74.5	10	73.7
	72.4	75.6	2.4	75.4	69.4	69.4	69.4	73.1	75.4	75.4	10	
	69.5	72.3	1.8	72.8	68.6	68.6	68.6	68.6	72.8	72.8	10	
	72.5	73.2	0.4	74.3	73.4	73.4	73.4	73.4	74.3	74.3	10	
YA103	79	80.9	0.5	80.4	79.2	79.2	79.2	79.2	80.3	80.3	11	78.1
	78	79.9	0.5	79.4	78.2	78.2	78.2	78.2	79.3	79.3	11	
	76.9	75.7	0	77.9	77.9	77.9	77.9	77.9	77.9	77.9	11	
	75.9	75.7	0	76.9	76.9	76.9	76.9	76.9	76.9	76.9	11	
YA104	77.8	80.3	0.7	79.6	78	78	78	78	79.4	79.4	11	77.8
	75.2	76.6	0.8	78.2	76.6	76.6	76.6	76.6	78.2	78.2	11	
	74.5	76.4	2	77.4	72.7	72.7	72.7	72.7	76.5	76.5	11	
	75.7	77.9	1.2	78	75.2	75.2	75.2	75.2	77.7	77.7	11	
YA105	69.5	72	1.8	73	68.4	68.4	68.4	68.4	70.5	70.5	11	77.0
	74.4	77.2	1.9	77.9	73.4	73.4	73.4	73.4	76.9	76.9	11	
	78	80.9	1	80.8	78.6	78.6	78.6	78.6	80.8	80.8	11	
	75.1	78.1	2.7	78.4	71.3	71.3	71.3	75.5	78.4	78.4	11	

续表 3.3

编号	L _{eq}	L _{ae}	SD	L _{max}	L _{min}	L ₉₅	L ₉₀	L ₅₀	L ₁₀	L ₅	路面温度(°C)	噪声均值
YA201	74.5	77.1	2.3	78.1	72.6	72.6	72.6	72.6	76.7	76.7	12	76.5
	70.6	73.3	1.5	73.6	69.9	69.9	69.9	69.9	72.3	72.3	12	
	75	77.9	2.2	78.6	73.7	73.7	73.7	73.7	78.3	78.3	12	
	74.1	76.5	2.4	77.6	72	72	72	72	76.8	76.8	12	
YA202	76.8	79.8	2.1	80	75.5	75.5	75.5	75.5	80	80	10	77.5
	76.7	77.7	0.3	77.8	77.1	77.1	77.1	77.1	77.8	77.8	10	
	75	77	1.8	77.5	73.5	73.5	73.5	73.5	77.4	77.4	10	
	75.6	76.7	0	77	76.9	76.9	76.9	76.9	77	77	10	
YA203	71.9	75	3.5	76	67.2	67.2	67.2	70.4	76	76	11	75.7
	72.8	76.1	2.1	75.5	70.1	70.1	70.1	73.7	75.5	75.5	11	
	73.2	76.7	3.6	77	68.1	68.1	68.1	72.6	77	77	11	
	73.5	76.1	1.9	76.5	72.2	72.2	72.2	72.2	75.9	75.9	11	
YA204	75.7	78	1	77.7	75.3	75.3	75.3	75.3	77.4	77.4	10	77.1
	75	77.7	1.1	77.5	74.8	74.8	74.8	74.8	77.1	77.1	10	
	75.1	77.9	1.1	77.4	74.8	74.8	74.8	74.8	77.2	77.2	10	
	77.2	78.7	0.2	78.3	77.9	77.9	77.9	77.9	78.3	78.3	10	
YA205	75.1	78.5	3	78.8	71	71	71	75.4	78.8	78.8	9	79.2
	76.7	80.2	3	80.7	73.4	73.4	73.4	77	80.7	80.7	9	
	76.5	80	2.9	80.4	72.6	72.6	72.6	77.6	80.4	80.4	9	
	77.5	80.3	0.7	79.7	78	78	78	78.2	79.7	79.7	9	
YA206	75	79	3.2	79.2	70.4	70.4	70.4	75.2	78.7	78.7	10	79.0
	74.9	78.4	3.1	79.1	71.3	71.3	71.3	74	79.1	79.1	10	
	76.7	79.6	1.6	79.8	76.1	76.1	76.1	76.1	79.4	79.4	10	
	76.9	80.5	2.4	80.2	74	74	74	78.9	80.2	80.2	10	
YA207	73.6	77.4	4.1	79.3	68.8	68.8	68.8	72	79.3	79.3	10	79.5
	74.7	78.1	3.8	79.6	69.9	69.9	69.9	73.1	79.6	79.6	10	
	77.4	79.5	2.5	80.8	75	75	75	75	80	80	10	
	76.2	78.9	2.6	80.6	74.3	74.3	74.3	74.3	78.8	78.8	10	
YA208	76.7	77.5	0.2	78.3	77.9	77.9	77.9	77.9	78.3	78.3	10	77.2
	74	76.8	1.2	76.7	74	74	74	74	76.4	76.4	10	
	75.4	78	1.4	77.9	74.7	74.7	74.7	74.7	77.8	77.8	10	
	74.8	78.2	2.4	78.2	71.8	71.8	71.8	75.4	78.2	78.2	10	
NB201	76.3	79.7	2.6	79.8	72.9	72.9	72.9	77.6	79.8	79.8	10	78.9
	77	80.5	1.5	79.9	75.4	75.4	75.4	78.4	79.2	79.2	10	
	76.4	79.5	2.7	79.4	72.7	72.7	72.7	76.4	79.4	79.4	10	
	74.7	78.5	4.8	78.7	66.2	66.2	66.2	70.6	78.7	78.7	10	
NB202	76	80.4	4	80.2	69.5	69.5	69.5	73.5	79.3	79.3	9	77.6
	72.9	76.1	2	75.7	70.4	70.4	70.4	72.9	75.7	75.7	9	
	75.6	78.2	1.7	78.4	74.5	74.5	74.5	74.5	78.1	78.1	9	
	74.9	79.1	2.8	78.6	72.1	72.1	72.1	72.3	78.4	78.4	9	

续表 3.3

编号	L _{eq}	L _{ae}	SD	L _{max}	L _{min}	L ₉₅	L ₉₀	L ₅₀	L ₁₀	L ₅	路面温度(°C)	噪声均值
NB203	75	77.3	1.3	77.2	74.3	74.3	74.3	74.3	77.1	77.1	9	78.2
	77	78.7	1.9	79.7	75.2	75.2	75.2	75.2	78.9	78.9	9	
	76.9	79	1.9	79.9	75.3	75.3	75.3	75.3	78.8	78.8	9	
	76.1	77.8	2.1	78.7	74	74	74	74	78.6	78.6	9	
NB204	75.1	77.6	1.1	77.5	75	75	75	75	77.2	77.2	9	76.3
	74.4	77.3	0.7	77	75.3	75.3	75.3	75.3	76.5	76.5	9	
	73.2	76.4	2.4	76	69.9	69.9	69.9	74.4	76	76	9	
	74.4	76.4	1.6	77.3	73.3	73.3	73.3	73.3	75.9	75.9	9	
NB205	75	77.4	0.9	77.1	74.9	74.9	74.9	74.9	76.6	76.6	10	78.4
	77.7	80.1	0.8	79.9	78.1	78.1	78.1	78.1	79.7	79.7	10	
	77.2	79.2	0.9	78.9	76.8	76.8	76.8	76.8	78.9	78.9	10	
	77.8	79.5	0.1	79.9	79.7	79.7	79.7	79.7	79.9	79.9	10	
NB206	76.7	79.1	1.5	79.6	76.1	76.1	76.1	76.1	79.1	79.1	9	78.5
	78.2	81.1	0.2	80.4	79.8	79.8	79.8	79.8	80.1	80.1	9	
	78.1	80.4	1.5	80.6	77.2	77.2	77.2	77.2	80.4	80.4	9	
	74.8	76.9	0.2	76.2	75.7	75.7	75.7	75.7	76.2	76.2	9	
NB207	78	80.3	0.9	80.4	78.1	78.1	78.1	78.1	79.8	79.8	10	79.9
	76.9	80.6	2.8	80.7	73.7	73.7	73.7	78	80.7	80.7	10	
	77.5	80.6	3.7	80.4	71	71	71	74.2	80.2	80.2	10	
	77.9	79.9	1.3	80.4	77.5	77.5	77.5	77.5	80.3	80.3	10	
NB208	77.3	80.5	3.6	81.2	72.6	72.6	72.6	75.9	81.2	81.2	8	79.1
	77.3	78.8	0.1	78.8	78.5	78.5	78.5	78.5	78.8	78.8	8	
	76.8	78.5	0.1	79.9	79.6	79.6	79.6	79.6	79.9	79.9	8	
	77.4	79.1	0.2	79.5	79.1	79.1	79.1	79.1	79.5	79.5	8	
NB209	80.7	80.3	0	82.5	82.5	82.5	82.5	82.5	82.5	82.5	8	79.3
	74.7	76	0.9	77.6	75.8	75.8	75.8	75.8	77.6	77.6	8	
	79.8	78.2	0	80.6	80.6	80.6	80.6	80.6	80.6	80.6	8	
	76.1	77.7	0.7	79.5	78.1	78.1	78.1	78.1	79.5	79.5	8	
NB210	76.9	79.7	2.3	80.7	75.6	75.6	75.6	75.6	80.7	80.7	6	80.1
	78.6	80.5	1	80.9	78.4	78.4	78.4	78.4	80.3	80.3	6	
	77.9	80.9	3.4	81.4	72.9	72.9	72.9	78.6	81.4	81.4	6	
	77.6	80.2	1.6	80.7	77.1	77.1	77.1	77.1	80.4	80.4	6	
NB211	76.5	78.5	1.5	79.1	75.4	75.4	75.4	75.4	78.2	78.2	7	78.7
	77.6	80.5	1	80.7	78.3	78.3	78.3	78.3	80.2	80.2	7	
	75.5	77.4	1.7	78.1	74	74	74	74	77.2	77.2	7	
	76.6	79.1	2	79.9	75.2	75.2	75.2	75.2	79.1	79.1	7	

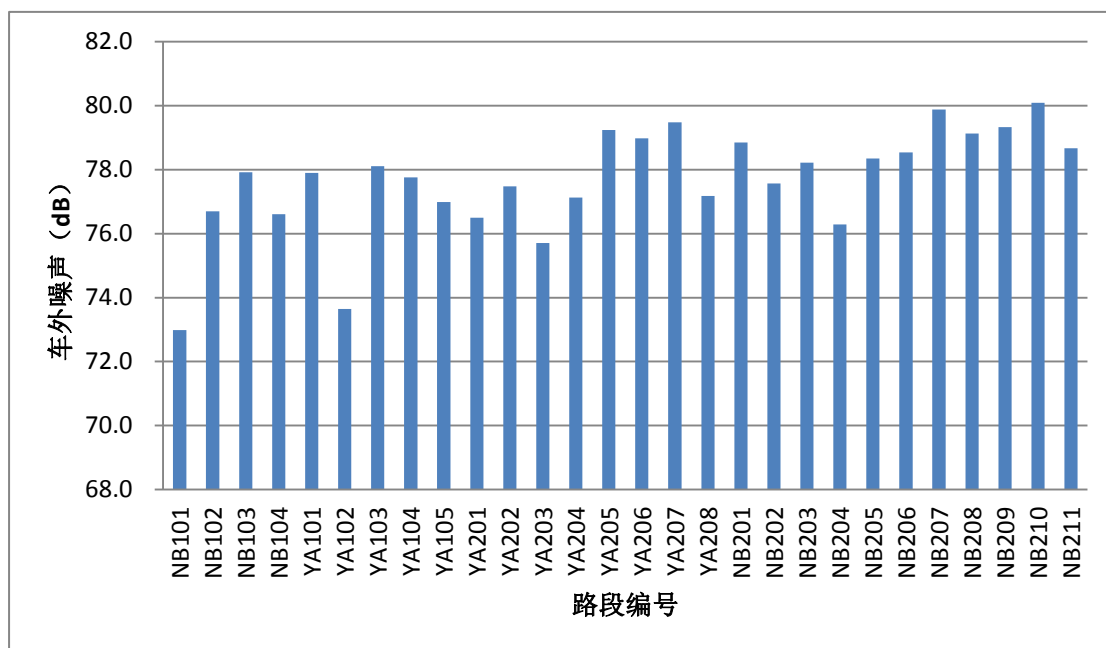


图 3.10 车外噪声统计图

图 3.10 为车外噪声统计图，从检测结果来看，车速为 80km/h 时，所测路段中，车外噪声最小值为 73.0dB，最大值为 80.1dB。

3.4.3 道路平整度测量结果

表 3.4 为通过丹麦格林伍德（Greenwood）公司的激光平整度检测系统检测得的道路平整度检测结果。

表 3.4 道路平整度检测结果

编号	国际平整度指数 IRI (m/km)
NB101	2.91
NB102	2.91
NB103	1.68
NB104	1.57
YA101	1.53
YA102	1.69
YA103	1.82
YA104	1.82
YA105	1.82
YA201	1.56
YA202	1.60
YA203	1.53
YA204	1.86
YA205	2.01
YA206	1.52

续表 3.4

编号	国际平整度指数 IRI (m/km)
YA207	1.81
YA208	1.53
NB201	2.30
NB202	2.36
NB203	1.95
NB204	2.38
NB205	1.66
NB206	1.75
NB207	1.66
NB208	1.86
NB209	2.32
NB210	2.32
NB211	1.87

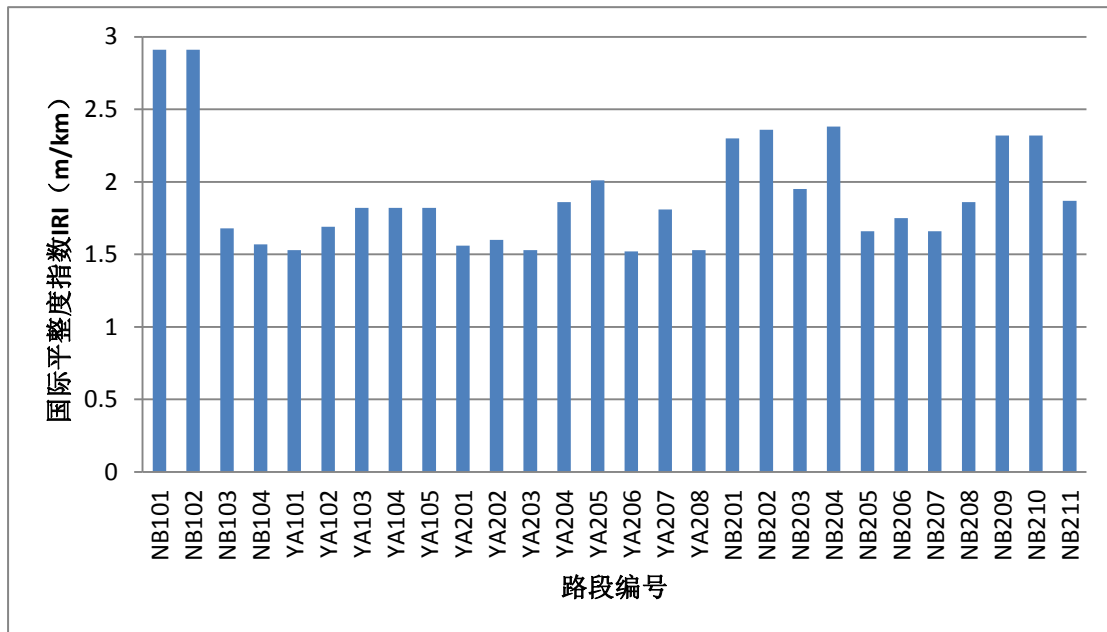


图 3.11 平整度指数 IRI 统计图

图 3.11 为平整度指数统计图，从检测结果来看，所测路段中，国际平整度指数 IRI 最小值为 1.52m/km，最大值为 2.91m/km。

3.4.4 路面构造深度测量结果

表 3.5 为运用手工铺砂法检测的道路构造深度结果。

表 3.5 道路构造深度检测结果

编号	测点号	铺砂直径 (mm)		平均直径 (mm)	构造深度 (mm)	构造深度均值 (mm)
NB101	1	176	185	180.5	0.98	1.00
	2	185	180	182.5	0.96	
	3	170	175	172.5	1.07	
NB102	1	180	184	182	0.96	1.05
	2	172	176	174	1.05	
	3	166	170	168	1.13	
NB103	1	185	180	182.5	0.96	0.99
	2	178	175	176.5	1.02	
	3	173	186	179.5	0.99	
NB104	1	175	173	174	1.05	0.99
	2	176	172	174	1.05	
	3	193	190	191.5	0.87	
YA101	1	212	206	209	0.73	0.66
	2	216	224	220	0.66	
	3	232	235	233.5	0.58	
YA102	1	179	174	176.5	1.02	1.01
	2	176	180	178	1.00	
	3	181	176	178.5	1.00	
YA103	1	282	275	278.5	0.41	0.47
	2	267	258	262.5	0.46	
	3	242	245	243.5	0.54	
YA104	1	165	174	169.5	1.11	1.09
	2	159	167	163	1.20	
	3	180	184	182	0.96	
YA105	1	180	187	183.5	0.95	0.88
	2	190	192	191	0.87	
	3	201	195	198	0.81	
YA201	1	178	180	179	0.99	0.99
	2	184	188	186	0.92	
	3	178	169	173.5	1.06	
YA202	1	195	202	198.5	0.81	0.74
	2	204	206	205	0.76	
	3	226	220	223	0.64	
YA203	1	167	178	172.5	1.07	1.02
	2	179	175	177	1.02	
	3	180	184	182	0.96	
YA204	1	194	190	192	0.86	0.95
	2	172	174	173	1.06	
	3	185	189	187	0.91	

续表 3.5

编号	测点号	铺砂直径 (mm)		平均直径 (mm)	构造深度 (mm)	构造深度均值 (mm)
YA205	1	179	185	182	0.96	0.98
	2	182	178	180	0.98	
	3	178	178	178	1.00	
YA206	1	245	242	243.5	0.54	0.59
	2	229	238	233.5	0.58	
	3	220	220	220	0.66	
YA207	1	210	216	213	0.70	0.66
	2	214	220	217	0.68	
	3	232	228	230	0.60	
YA208	1	178	182	180	0.98	0.87
	2	208	216	212	0.71	
	3	189	186	187.5	0.91	
NB201	1	172	170	171	1.09	1.02
	2	180	185	182.5	0.96	
	3	175	180	177.5	1.01	
NB202	1	160	160	160	1.24	1.26
	2	160	155	157.5	1.28	
	3	155	165	160	1.24	
NB203	1	180	190	185	0.93	0.96
	2	180	180	180	0.98	
	3	180	185	182.5	0.96	
NB204	1	240	250	245	0.53	0.49
	2	255	260	257.5	0.48	
	3	265	270	267.5	0.44	
NB205	1	165	170	167.5	1.13	1.16
	2	160	170	165	1.17	
	3	165	165	165	1.17	
NB206	1	170	165	167.5	1.13	1.17
	2	160	165	162.5	1.21	
	3	160	170	165	1.17	
NB207	1	150	145	147.5	1.46	1.48
	2	150	150	150	1.41	
	3	140	145	142.5	1.57	
NB208	1	150	160	155	1.32	1.31
	2	160	155	157.5	1.28	
	3	150	160	155	1.32	
NB209	1	180	185	182.5	0.96	0.99
	2	170	180	175	1.04	
	3	180	180	180	0.98	

续表 3.5

编号	测点号	铺砂直径 (mm)		平均直径 (mm)	构造深度 (mm)	构造深度均值 (mm)
NB210	1	140	150	145	1.51	1.68
	2	140	145	142.5	1.57	
	3	125	130	127.5	1.96	
NB211	1	150	150	150	1.41	1.42
	2	150	155	152.5	1.37	
	3	145	150	147.5	1.46	

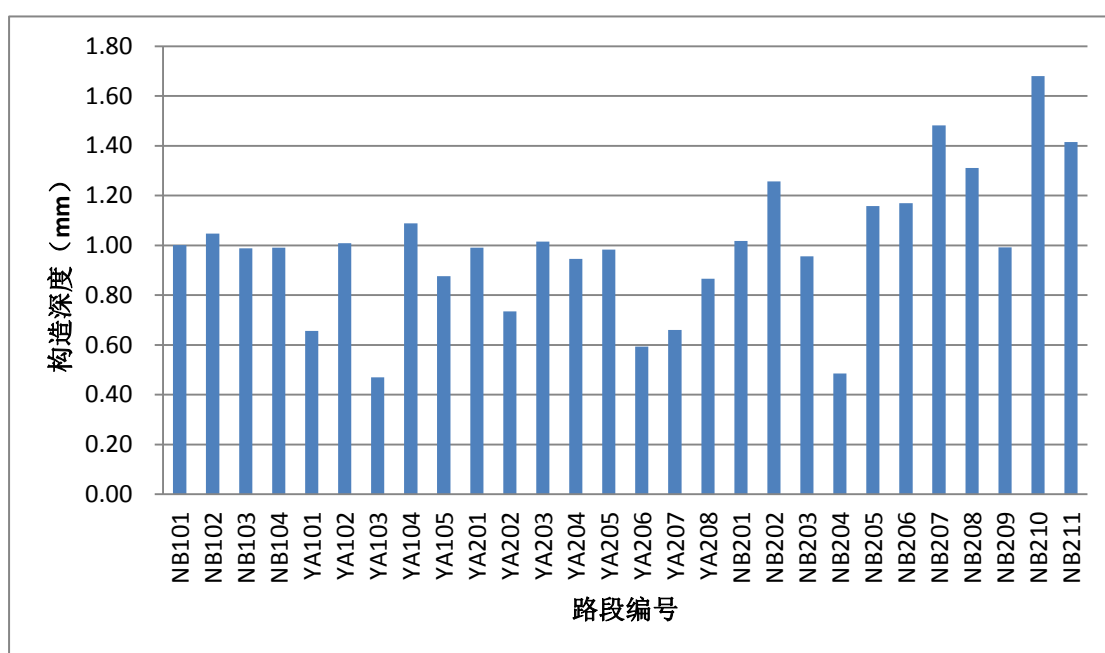


图 3.12 道路构造深度统计图

图 3.12 为道路构造深度统计图，从检测结果来看，所测路段中，道路构造深度最小值为 0.47mm，最大值为 1.68mm。

3.4.5 路面抗滑值测量结果

具体路面抗滑值测量结果如表 3.6。

表 3.6 路面抗滑值测量结果

编号	测点	摆值 (BPN)					平均摆值 (BPN)	路面温度 (°C)	温度修正值 (BPN)	20°C 摆值 (BPN)	抗滑值均值 (BPN)
		1	2	3	4	5					
NB101	1	35	34	35	36	35	35	15	-1	34	41
	2	50	52	50	49	50	50.2	15	-1	49	
	3	42	40	40	38	40	40	15	-1	39	
NB102	1	52	53	55	55	55	54	12	-2.2	52	46
	2	50	48	50	52	52	50.4	12	-2.2	48	
	3	42	44	40	42	40	41.6	12	-2.2	39	
NB103	1	40	42	39	41	40	40.4	13	-1.8	39	40
	2	42	42	44	42	42	42.4	13	-1.8	41	
	3	42	41	43	43	42	42.2	13	-1.8	40	
NB104	1	40	40	40	40	40	40	13	-1.8	38	38
	2	40	40	40	40	40	40	13	-1.8	38	
	3	40	40	40	40	40	40	13	-1.8	38	
YA101	1	47	45	47	45	47	46.2	10	-3	43	44
	2	47	47	46	46	47	46.6	10	-3	44	
	3	47	47	47	48	48	47.4	10	-3	44	
YA102	1	60	58	61	58	58	59	10	-3	56	56
	2	60	60	57	56	58	58.2	10	-3	55	
	3	60	60	58	57	60	59	10	-3	56	
YA103	1	36	33	33	33	33	33.6	9	-3.2	30	30
	2	35	35	35	34	35	34.8	9	-3.2	32	
	3	30	33	31	32	30	31.2	9	-3.2	28	
YA104	1	60	60	62	62	62	61.2	10	-3	58	58
	2	61	61	61	60	60	60.6	10	-3	58	
	3	60	60	60	62	63	61	10	-3	58	
YA105	1	56	53	56	56	55	55.2	10	-3	52	53
	2	56	56	56	55	55	55.6	10	-3	53	
	3	56	58	56	56	56	56.4	10	-3	53	
YA201	1	63	63	63	62	65	63.2	9	-3.2	60	60
	2	65	65	65	64	63	64.4	9	-3.2	61	
	3	60	63	60	60	60	60.6	9	-3.2	57	
YA202	1	60	60	60	63	63	61.2	10	-3	58	58
	2	63	63	63	60	60	61.8	10	-3	59	
	3	60	58	60	61	58	59.4	10	-3	56	
YA203	1	57	58	58	58	58	57.8	9	-3.2	55	55
	2	55	55	55	58	58	56.2	9	-3.2	53	
	3	60	60	60	58	61	59.8	9	-3.2	57	
YA204	1	56	55	56	55	56	55.6	10	-3	53	52
	2	58	55	55	55	55	55.6	10	-3	53	
	3	53	52	55	55	55	54	10	-3	51	

续表 3.6

编号	测点	摆值 (BPN)					平均 摆值 (BPN)	路面 温度 (°C)	温度 修正值 (BPN)	20°C 摆值 (BPN)	抗滑值 均值 (BPN)
		1	2	3	4	5					
YA205	1	55	56	56	56	56	55.8	9	-3.2	53	53
	2	55	55	55	54	56	55	9	-3.2	52	
	3	58	58	58	55	55	56.8	9	-3.2	54	
YA206	1	58	55	58	58	55	56.8	9	-3.2	54	55
	2	57	57	60	60	60	58.8	9	-3.2	56	
	3	59	58	58	56	58	57.8	9	-3.2	55	
YA207	1	55	57	57	57	57	56.6	10	-3	54	54
	2	57	57	58	58	58	57.6	10	-3	55	
	3	58	58	55	55	55	56.2	10	-3	53	
YA208	1	57	60	60	57	57	58.2	10	-3	55	56
	2	57	57	55	57	57	56.6	10	-3	54	
	3	61	61	61	60	61	62	10	-3	59	
NB201	1	66	64	64	64	63	64.2	10	-3	61	54
	2	58	56	58	56	58	57.2	10	-3	54	
	3	50	50	48	50	50	49.6	10	-3	47	
NB202	1	68	68	65	65	65	66.2	10	-3	63	55
	2	55	52	54	54	54	53.8	10	-3	51	
	3	55	52	52	54	52	53	10	-3	50	
NB203	1	48	50	50	50	50	49.6	9	-3.2	46	39
	2	46	48	50	50	48	48.4	9	-3.2	45	
	3	30	30	32	30	28	30	9	-3.2	27	
NB204	1	10	10	12	10	10	10.4	10	-3	7	19
	2	38	38	36	34	36	36.4	10	-3	33	
	3	20	20	20	20	20	20	10	-3	17	
NB205	1	58	56	59	56	56	57	9	-3.2	54	49
	2	48	46	49	48	48	47.8	9	-3.2	45	
	3	51	51	54	54	54	52.8	9	-3.2	50	
NB206	1	66	66	63	64	66	65	9	-3.2	62	64
	2	68	68	66	68	68	67.6	9	-3.2	64	
	3	68	70	67	68	68	68.2	9	-3.2	65	
NB207	1	51	54	54	54	54	53.4	8	-3.4	50	51
	2	50	52	52	50	50	50.8	8	-3.4	47	
	3	58	60	60	60	61	59.8	8	-3.4	56	
NB208	1	54	51	52	52	54	52.6	9	-3.2	49	54
	2	58	60	60	60	60	59.6	9	-3.2	56	
	3	58	58	55	68	56	59	9	-3.2	56	
NB209	1	48	50	48	50	50	49.2	7	-3.6	46	48
	2	48	50	50	48	50	49.2	7	-3.6	46	
	3	54	56	56	54	56	55.2	7	-3.6	52	

续表 3.6

编号	测点	摆值 (BPN)					平均摆值 (BPN)	路面温度 (°C)	温度修正值 (BPN)	20°C 摆值 (BPN)	抗滑值均值 (BPN)
NB210	1	38	40	40	40	40	39.6	9	-3.2	36	46
	2	47	48	48	48	50	48.2	9	-3.2	45	
	3	60	60	60	63	63	61.2	9	-3.2	58	
NB211	1	38	35	38	37	36	36.8	7	-3.6	33	35
	2	42	43	40	40	40	41	7	-3.6	37	
	3	38	40	40	38	40	39.2	7	-3.6	36	

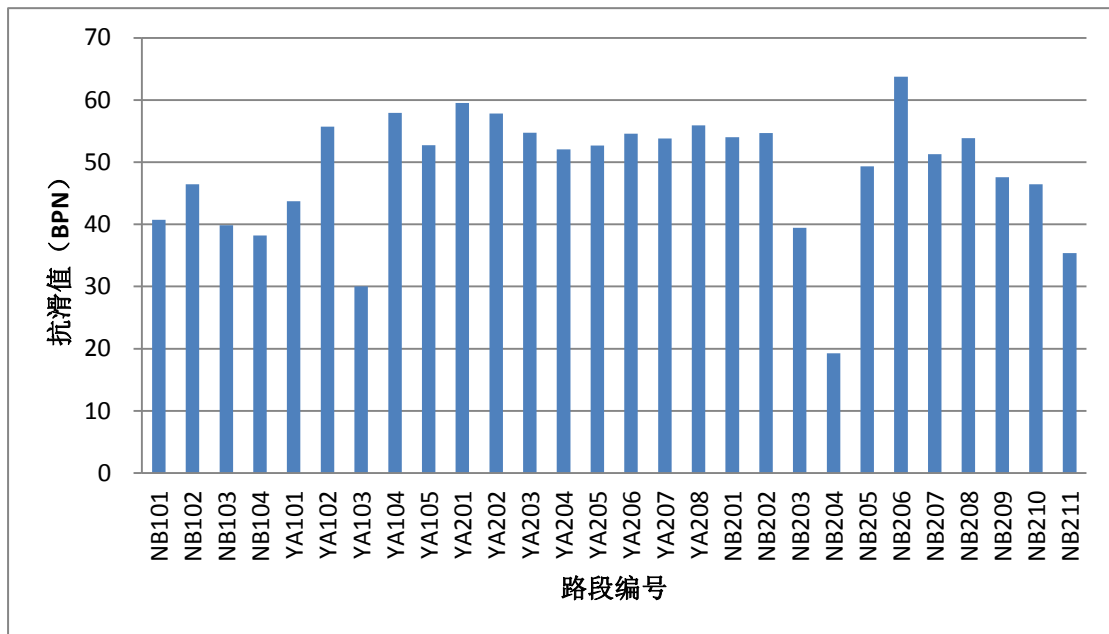


图 3.13 道路抗滑值统计图

图 3.13 为道路抗滑值统计图，从检测结果来看，所测路段中，道路抗滑值的最小值为 20BPN，最大值为 64BPN。

3.5 本章小结

本章根据轮胎-路面噪声产生及放大机理，有针对性地对上海市高架多条道路的车内外噪声、道路平整度、构造深度及抗滑值进行了实地的检测。通过实地检测，为进一步进行数理统计分析做了充分的准备。

第4章 路面表面特性对车内噪声影响研究

研究路面表面特性与车内噪声之间的关系是十分重要的。本章根据轮胎-路面噪声产生及放大机理，并运用 matlab 软件对第3章的采集数据有针对性地进行数理统计，从而分析路表特性对车内噪声的影响。这将对道路的评价，噪声的预测及试验路降噪效果测试等产生积极的指导意义。

4.1 数据汇总

表4.1为车内噪声与路面构造检测原始结果汇总。

表4.1 车内噪声与路面构造检测原始结果汇总

编号	平整度	构造深度 (mm)	车内噪声 (dB)
NB101	2.91	1.00	72.6
NB102	2.91	1.05	72.3
NB103	1.68	0.99	69.1
NB104	1.57	0.99	68.7
YA101	1.53	0.66	68.4
YA102	1.69	1.01	68.9
YA103	1.82	0.47	69.7
YA104	1.82	1.09	69.5
YA105	1.82	0.88	69.8
YA201	1.56	0.99	68.1
YA202	1.6	0.74	68.3
YA203	1.53	1.02	68.4
YA204	1.86	0.95	68.8
YA205	2.01	0.98	69.7
YA206	1.52	0.59	70.7
YA207	1.81	0.66	69.6
YA208	1.53	0.87	68.5
NB201	2.3	1.02	69.2
NB202	2.36	1.26	70.5
NB203	1.95	0.96	70.2
NB204	2.38	0.49	70.8
NB205	1.66	1.16	68.2
NB206	1.75	1.17	69.9
NB207	1.66	1.48	68.9
NB208	1.86	1.31	69.7
NB209	2.32	0.99	70.9
NB210	2.32	1.68	70.1
NB211	1.87	1.42	68.8

4.2 数据分析思路

本章的数据使用 matlab 软件进行分析。为比较全面地评价路面表面特性对车内噪声的影响，数据分析的主要思路为：

- (1).对原始数据进行预处理，将一些不正确的数据剔除，具体原则为：
数据采集时，车辆压过伸缩缝导致噪声值明显上升；
背景噪声突然变大导致噪声值明显上升；
其他的突发事件导致噪声值异常。
- (2).结合第 2 章的噪声产生和放大机理，选取适当的路面表面特性参数进行回归分析；
- (3).对回归分析结果进行评价，并比较不同回归模型；
- (4).得出路面表面特性对车内噪声影响的研究结果。

4.3 基于数理统计的车内噪声分析

表 4.2 为车内噪声与路面构造参数的预处理结果，原始数据有 28 组，其中一组数据由于在测试时压过了伸缩缝，而另一组数据由于当时清扫车发出了较大背景噪声，所以剔除这两组数据后剩下 26 组有效数据。

表 4.2 车内噪声与路面参数预处理

编号	平整度 IRI	构造深度 (mm)	车内噪声 (dB)	备注
NB101	2.91	1.00	72.6	—
NB102	2.91	1.05	72.3	—
NB103	1.68	0.99	69.1	—
NB104	1.57	0.99	68.7	—
YA101	1.53	0.66	68.4	—
YA102	1.69	1.01	68.9	—
YA103	1.82	0.47	69.7	—
YA104	1.82	1.09	69.5	—
YA105	1.82	0.88	69.8	—
YA201	1.56	0.99	68.1	—
YA202	1.6	0.74	68.3	—
YA203	1.53	1.02	68.4	—
YA204	1.86	0.95	68.8	—
YA205	2.01	0.98	69.7	—
YA206	1.52	0.59	70.7	有伸缩缝，剔除
YA207	1.81	0.66	69.6	—

续表 4.2

编号	平整度 IRI	构造深度 (mm)	车内噪声 (dB)	备注
YA208	1.53	0.87	68.5	—
NB201	2.3	1.02	69.2	背景噪声过高, 剔除
NB202	2.36	1.26	70.5	—
NB203	1.95	0.96	70.2	—
NB204	2.38	0.49	70.8	—
NB205	1.66	1.16	68.2	—
NB206	1.75	1.17	69.9	—
NB207	1.66	1.48	68.9	—
NB208	1.86	1.31	69.7	—
NB209	2.32	0.99	70.9	—
NB210	2.32	1.68	70.1	—
NB211	1.87	1.42	68.8	—

首先, 将上表预处理后数据输入 matlab 软件:

```
>>IRI=[2.91 2.91 1.68 1.57 1.53 1.69 1.82 1.82 1.82 1.56 1.6 1.53 1.86 2.01 1.81 1.53
2.36 1.95 2.38 1.66 1.75 1.66 1.86 2.32 2.32 1.87];
```

```
>>pnei=[72.6 72.3 69.1 68.7 68.4 68.9 69.7 69.5 69.8 68.1 68.3 68.4 68.8 69.7 69.6
68.5 70.5 70.2 70.8 68.2 69.9 68.9 69.7 70.9 70.1 68.8];
```

```
>>TD=[1 1.05 0.99 0.99 0.66 1.01 0.47 1.09 0.88 0.99 0.74 1.02 0.95 0.98 0.66 0.87
1.26 0.96 0.49 1.16 1.17 1.48 1.31 0.99 1.68 1.42];
```

其次, 选用不同模型形式后的回归结果如表 4.3。

表 4.3 模型回归结果

模型形式	回归系数		T 值检验	P 值检验	R ²
$p_{\text{车内}} = a \cdot \text{IRI} + b \cdot \text{TD} + c$	a	2.8560	1	0.0000	0.8995
	b	-0.4187	0		
	c	64.5087	1		
$p_{\text{车内}} = a \cdot \text{IRI} + b$	a	2.8207	1	0.0000	0.8895
	b	64.1534	1		
$p_{\text{车内}} = a \cdot e^{\text{IRI}} + b$	a	0.2892	1	0.0000	0.8521
	b	67.4146	1		
$p_{\text{车内}} = a \cdot \ln \text{IRI} + b$	a	5.9091	1	0.0000	0.8854
	b	65.8205	1		

注: ①T 值检验值为 0 或 1, 当 T 值为 1 是说明回归系数与噪声有显著线性关系, 当 T 值为 0 时说明回归系数与噪声无显著线性关系;

②P 值检验越小说明方程越显著, 一般以 $P < 0.05$ 时为显著, 以 $P < 0.01$ 时为非常显著;

③R² 越接近 1 说明回归方程越显著。

从上表中发现，当平整度 IRI 在 $1.52\sim 2.91\text{m/km}$ ，构造深度 TD 在 $0.47\sim 1.68\text{m/km}$ 的范围内，构造深度 TD 在模型中的 T 值检验为 0，即构造深度 TD 与车内噪声并无显著的线性关系；而平整度 IRI 在模型中的 T 值检验始终为 1，即平整度 IRI 与车内噪声有显著的线性关系，而且线性拟合效果很好，通过四种模型比较，发现 $p_{\text{车内}} = a \cdot IRI + b$ 线性模型拟合效果最好，且模型最为简单。以上回归的残差图见图 4.2，从残差图可以看出，除第 21 个数据外，其余数据的残差离零点均较近，且残差的置信区间均包含零点，这说明回归模型 4.2 能较好的符合原始数据，其中第 21 组数据为异常值，但在实际试验中势必会有外部情况导致异常值的出现，但总体拟合较好，故结果可信。

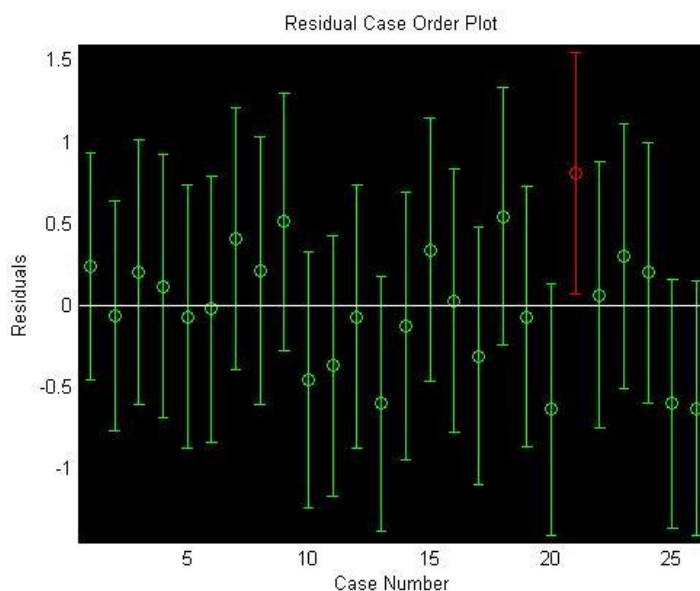


图 4.2 车内噪声与平整度拟合残差图

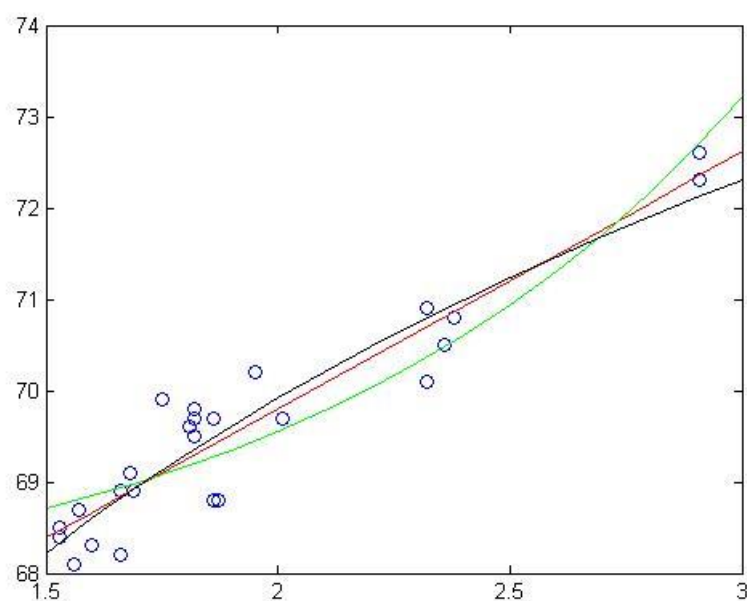


图 4.1 车内噪声与平整度关系

图 4.1 为以道路平整度 IRI 为横坐标、以车内噪声为纵坐标所做的点图，以及三种拟合模型的曲线图，红色为 $p_{\text{车内}} = 2.8207IRI + 64.15$ 模型，绿色为 $p_{\text{车内}} = 0.2892e^{IRI} + 67.41$ 模型，黑色为 $p_{\text{车内}} = 5.9091 \cdot \log IRI + 65.8205$ 模型，从上图中可以明显看出车内噪声值随着平整度的增大而增大，且模型都拟合较好。

4.4 本章小结

本章考虑道路平整度指数作为车内噪声的影响参数，通过设计方程模型，运用 matlab 软件进行数理统计，并对结果进行分析，得出结论：当平整度 IRI 在 $1.52 \sim 2.91 \text{ m/km}$ ，构造深度 TD 在 $0.47 \sim 1.68 \text{ m/km}$ 的范围内，车内噪声随道路平整度指数 IRI 的增大而增大，且有较好的线性关系。

第5章 路面表面特性对车外噪声影响研究

研究路面表面特性与车外噪声之间的关系是十分重要的。本章根据轮胎-路面噪声产生及放大机理，并运用 matlab 软件对第3章的采集数据有针对性地进行数理统计，从而分析路表特性对车外噪声的影响。这将对道路的评价，噪声的预测及试验路降噪效果测试等产生积极的指导意义。

5.1 数据汇总

表 5.1 为车外噪声与路面构造检测原始结果汇总。

表 5.1 车外噪声与路面构造检测原始结果汇总

编号	平整度	构造深度 (mm)	车外噪声 (dB)
NB101	2.91	1.00	73.0
NB102	2.91	1.05	76.7
NB103	1.68	0.99	77.9
NB104	1.57	0.99	76.6
YA101	1.53	0.66	77.9
YA102	1.69	1.01	73.7
YA103	1.82	0.47	78.1
YA104	1.82	1.09	77.8
YA105	1.82	0.88	77.0
YA201	1.56	0.99	76.5
YA202	1.6	0.74	77.5
YA203	1.53	1.02	75.7
YA204	1.86	0.95	77.1
YA205	2.01	0.98	79.2
YA206	1.52	0.59	79.0
YA207	1.81	0.66	79.5
YA208	1.53	0.87	77.2
NB201	2.3	1.02	78.9
NB202	2.36	1.26	77.6
NB203	1.95	0.96	78.2
NB204	2.38	0.49	76.3
NB205	1.66	1.16	78.4
NB206	1.75	1.17	78.5
NB207	1.66	1.48	79.9
NB208	1.86	1.31	79.1
NB209	2.32	0.99	79.3
NB210	2.32	1.68	80.1
NB211	1.87	1.42	78.7

5.2 数据分析思路

本章的数据使用 matlab 软件进行分析。分为两个部分，第一部分为分析路面特性对车外噪声的影响，第二部分为分析抗滑值对车外噪声的影响。数据分析的主要思路为：

- (1). 对原始数据进行预处理，将一些不正确的数据剔除，具体原则为：
数据采集时，车辆压过伸缩缝导致噪声值明显上升；
背景噪声突然变大导致噪声值明显上升；
其他的突发事件导致噪声值异常。
- (2). 结合第 2 章的噪声产生和放大机理，选取适当的路面表面特性参数进行回归分析；
- (3). 对回归分析结果进行评价，并比较不同回归模型；
- (4). 分析抗滑值对车外噪声的影响；
- (5). 得出抗滑值对车外噪声影响的研究结果；
- (6). a. 若抗滑值与车外噪声存在矛盾关系，则找出矛盾原因及保证路面抗滑的噪声阈值，并得出路面表面特性对车内噪声影响的研究结果。
b. 若抗滑值与车外噪声不存在矛盾关系，则直接得出路面表面特性对车内噪声影响的研究结果。

5.3 基于数理统计的车外噪声分析

表 5.2 为车外噪声与路面参数的预处理结果，原始数据有 28 组，第一次试验后了解到驾驶员并未理解试验车速，在试验时未达 80km/h 车速，剔除，第二次试验、及第四次试验开始时背景噪声过大，也剔除后，有效数据为 17 组。

表 5.2 车外噪声与路面参数预处理

编号	平整度	构造深度 (mm)	车外噪声 (dB)	备注
NB101	2.91	1.00	73.0	驾驶员经验不足，未能达 80km/h 车速，剔除第一次试验结果
NB102	2.91	1.05	76.7	
NB103	1.68	0.99	77.9	
NB104	1.57	0.99	76.6	

续表 5.2

编号	平整度	构造深度 (mm)	车外噪声 (dB)	备注
YA101	1.53	0.66	77.9	背景噪声过大, 剔除第二次试验结果
YA102	1.69	1.01	73.7	
YA103	1.82	0.47	78.1	
YA104	1.82	1.09	77.8	
YA105	1.82	0.88	77.0	
YA201	1.56	0.99	76.5	第三次试验
YA202	1.6	0.74	77.5	
YA203	1.53	1.02	75.7	
YA204	1.86	0.95	77.1	
YA205	2.01	0.98	79.2	
YA206	1.52	0.59	79.0	
YA207	1.81	0.66	79.5	
YA208	1.53	0.87	77.2	
NB201	2.3	1.02	78.9	背景噪声过大, 剔除
NB202	2.36	1.26	77.6	
NB203	1.95	0.96	78.2	第四次试验
NB204	2.38	0.49	76.3	
NB205	1.66	1.16	78.4	
NB206	1.75	1.17	78.5	
NB207	1.66	1.48	79.9	
NB208	1.86	1.31	79.1	
NB209	2.32	0.99	79.3	
NB210	2.32	1.68	80.1	
NB211	1.87	1.42	78.7	

首先, 将上表预处理后数据输入 matlab 软件:

```
>> pwai=[76.5 77.5 75.7 77.1 79.2 79 79.5 77.2 78.2 76.3 78.4 78.5 79.9 79.1 79.3
80.1 78.7];
>>IRI=[1.56 1.6 1.53 1.86 2.01 1.52 1.81 1.53 1.95 2.38 1.66 1.75 1.66 1.86 2.32 2.32
1.87];
>>TD=[0.99 0.74 1.02 0.95 0.98 0.59 0.66 0.87 0.96 0.49 1.16 1.17 1.48 1.31 0.99
1.68 1.42];
```

其次, 选用不同模型形式后的回归结果如表 5.3。

表 5.3 全部试验数据回归结果

全部试验结果回归, 其中 $IRI \in [1.52, 2.32]$ $TD \in [0.47, 1.68]$					
模型形式	回归系数		T 值检验	P 值检验	R^2
$p_{\text{车外}} = a \cdot IRI + b \cdot TD + c \cdot IRI \cdot TD + d$	a	-2.8387	0	0.1586	0.2447
	b	-7.3895	0		
	c	4.5177	0		
	d	82.2478	1		
$p_{\text{车外}} = a \cdot IRI + b \cdot TD + c$	a	1.3710	0	0.1862	0.1622
	b	1.4143	0		
	c	74.0696	1		
$p_{\text{车外}} = a \cdot IRI \cdot TD + b$	a	0.8517	0	0.0808	0.1598
	b	76.6075	1		
$p_{\text{车外}} = a \cdot (IRI \cdot TD)^2 + b \cdot IRI \cdot TD + c$	a	1.9317	1	0.3727	0.0190
	b	-5.7722	0		
	c	81.7463	1		
$p_{\text{车外}} = a \cdot (e^{IRI \cdot TD})^2 + b \cdot e^{IRI \cdot TD} + c$	a	0.0121	0	0.2506	0.0861
	b	-0.0198	0		
	c	77.5694	1		
$p_{\text{车外}} = a \cdot (\ln(IRI \cdot TD))^2 + b \cdot \ln(IRI \cdot TD) + c$	a	56.2075	1	0.4411	0.0071
	b	-12.3139	1		
	c	77.8979	1		

注：①T 值检验值为 0 或 1，当 T 值为 1 是说明回归系数与噪声有显著线性关系，当 T 值为 0 时说明回归系数与噪声无显著线性关系；

②P 值检验越小说明方程越显著，一般以 $P < 0.05$ 时为显著，以 $P < 0.01$ 时为非常显著；

③ R^2 越接近 1 说明回归方程越显著。

从上表中发现，当平整度 IRI 在 1.52~2.91m/km，构造深度 TD 在 0.47~1.68 m/km 的范围内， $\ln(IRI \cdot TD)$ 在二次方程模型中通过了 T 值检验及 P 值检验，即

$p_{\text{车外}} = a \cdot (\ln(IRI \cdot TD))^2 + b \cdot \ln(IRI \cdot TD) + c$ 形式的模型拟合效果较好。

结合上述结果进一步分析：

根据全部试验结果拟合车外噪声的模型如下：

$$p_{\text{车外}} = 56.2075 \cdot (\ln(IRI \cdot TD))^2 - 12.3139 \cdot \ln(IRI \cdot TD) + 77.8979 \quad (5.1)$$

根据 5.1 式可得全部试验结果拟合时：平整度 IRI 及构造深度 TD 的乘积能拟合车外噪声，且为二次抛物线拟合的形式。

抛物线开口向上，且当 $\ln(IRI \cdot TD) = 0.1095$ 时，即 $IRI \cdot TD = 1.1158$ 时，车外噪声达到最小值。

有学者认为路面构造深度的增大能有效减少轮胎花纹槽空气泵噪声和号筒效应所产生的噪声^[38]，故可以将构造深度作为路表特性参数来反映噪声大小，甚至可以作为噪声评价依据，但根据以上结果可见，这种必然性并不存在。就本文所测路面而言，当路面表面平整时，例如第三次试验所测路面表面特性，构造深度的增大能有效减少轮胎花纹槽空气泵噪声和号筒效应所产生的噪声。而第四次试验所测路面表面特性（如图 5.1），图中可见路面集料飞散剥落严重，表现为构造深度增大，但同时也导致了路的凹凸不平，增加了车辆行驶时轮胎径向振动噪声，所以，所测路面噪声值并没有随构造深度增大而减小。

而根据本文全部试验数据的拟合结果也可看到平整度 *IRI* 及构造深度 *TD* 的乘积与车外噪声有关，不能说明车外噪声仅仅只和平整度 *IRI* 或构造深度 *TD* 两者之一有关，即车外噪声与平整度 *IRI* 及构造深度 *TD* 都有相关性，也反映了平整度 *IRI* 与构造深度 *TD* 之间也有相关性。



图 5.1 路面集料剥落图

5.4 抗滑值对车外噪声影响分析

根据测量结果，本节将对抗滑值、车外噪声的数据进行综合分析。表 5.3 为上述数据的汇总结果。

表 5.3 抗滑值及车外噪声汇总结果

编号	抗滑值 (BPN)	车外噪声 (dB)	备注
NB101	41	73.0	驾驶员经验不足， 未能达 80km/h 车速，剔除第一次 试验结果
NB102	46	76.7	
NB103	40	77.9	
NB104	38	76.6	
YA101	44	77.9	背景噪声过大， 剔除第二次试验结 果
YA102	56	73.7	
YA103	30	78.1	
YA104	58	77.8	
YA105	53	77.0	
YA201	60	76.5	第三次试验
YA202	58	77.5	
YA203	55	75.7	
YA204	52	77.1	
YA205	53	79.2	
YA206	55	79.0	
YA207	54	79.5	
YA208	56	77.2	
NB201	54	78.9	背景噪声过大， 剔除
NB202	55	77.6	
NB203	39	78.2	第四次试验
NB204	19	76.3	
NB205	49	78.4	
NB206	64	78.5	
NB207	51	79.9	
NB208	54	79.1	
NB209	48	79.3	
NB210	46	80.1	
NB211	35	78.7	

常规沥青路面的设计中安全性为首要考虑因素，而在安全性的评价中，路面抗滑值是其重要指标，某些观点认为路面抗滑性能与降噪能力存在矛盾^[32]，即车外噪声越小，抗滑值也相应减小，这为研究和推广低噪声路面带来了阻碍。故本文也对试验场地的抗滑值进行了检测，试图研究抗滑值与车外噪声之间的关系。

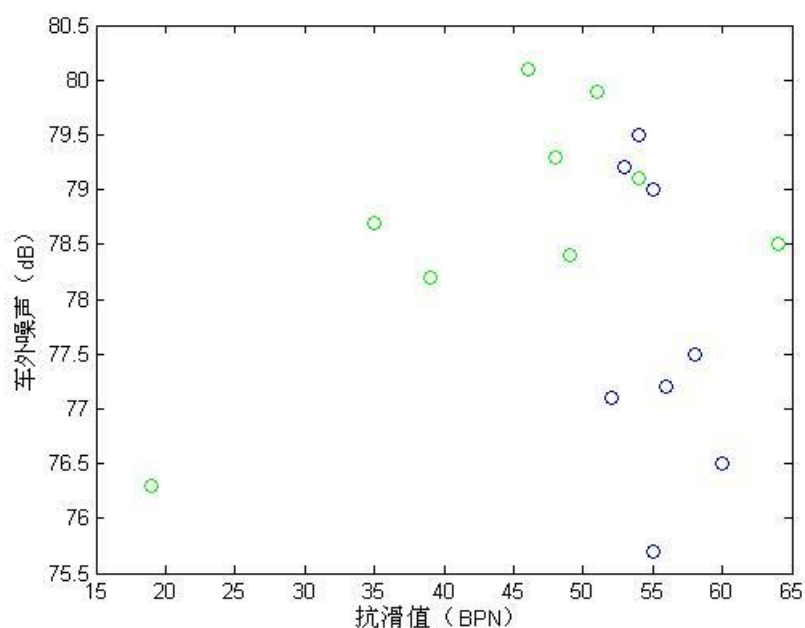


图 5.5 车外噪声与抗滑值关系

图 5.5 为以抗滑值为横坐标、以车外噪声为纵坐标所做的点图。蓝色点图为第三次试验的结果，而绿色点图为第四次试验的结果。皆不能反映出车外噪声值与抗滑值之间有矛盾关系。

5.5 本章小结

本章考虑道路平整度指数及路面构造深度作为车外噪声的影响参数，通过设计多元线性方程模型，运用 matlab 软件进行数理统计，并对结果进行分析，得出结论：

根据本文全部试验数据的拟合结果可看到平整度 IRI 及构造深度 TD 的乘积与车外噪声有关，不能说明车外噪声仅仅只和平整度 IRI 或构造深度 TD 两者之一有关，即车外噪声与平整度 IRI 及构造深度 TD 都有相关性，也反映了平整度 IRI 与构造深度 TD 之间也有相关性。

本文现场试验并不能发现路面抗滑值对车外噪声有决定性影响，即本文不支持若要降低车外噪声则必须放弃路面抗滑性能的观念。

第6章 结论与展望

6.1 成果与结论

本文针对常规沥青路面表面特性对行车噪声的影响开展研究,通过现场试验和分析计算,找出了影响行车噪声的主要因素。

本文主要工作可总结为以下几个方面:

①对轮胎-路面噪声产生和放大机理进行了详细的阐述,并就关键机理进行了分析,由此确定了主要影响轮胎-路面噪声的路面表面特性参数,即平整度及构造深度。

②根据轮胎-路面噪声机理所确定的路面表面特性参数,有针对性地对上海市高架多条道路进行现场试验,包括车内噪声测量、滑行法车外噪声测量、道路平整度、构造深度及抗滑值测量。

③通过数理统计方法,进行路面表面特性对行车噪声影响的研究。

④通过数理统计方法,进行路面抗滑值对车外噪声影响的研究。

本文主要研究成果可总结为以下几个方面:

①根据轮胎-路面噪声机理,确定了在车辆匀速直线行驶时,行车噪声的主要影响因素。

②通过数理统计方法得,本文试验路面中,当平整度 IRI 在 $1.52\sim 2.91\text{m/km}$,构造深度 TD 在 $0.47\sim 1.68\text{m/km}$ 的范围内,车内噪声随道路平整度指数 IRI 的增大而增大,且有较好的线性关系。

③通过数理统计方法得,本文试验路面的平整度 IRI 及构造深度 TD 的乘积与车外噪声有关,不能说明车外噪声仅仅只和平整度 IRI 或构造深度 TD 两者之一有关,即车外噪声与平整度 IRI 及构造深度 TD 都有相关性,也反映了平整度 IRI 与构造深度 TD 之间也有相关性。

④通过数理统计方法得,本文试验中没有发现路面抗滑值对车外噪声有决定性影响,即本文不支持若要降低路面噪声则必须放弃路面抗滑性能的观念。

6.2 不足与展望

由于时间和精力有限,本文在解决了主要问题的同时,还有一些问题没有兼顾,可在日后研究中继续深入完善:

①对于路面种类，本文只研究了常规沥青路面，对其他路面等并未涉及，有待日后研究中对更多类型路面建模分析，补充完善。

②由于试验条件有限，试验难度很高，故本文所做试验数量有限，未能对更多路面做更多地尝试，可在后续研究中进行更多试验，提出更加完善的常规沥青路面表面特性对行车噪声的影响研究。

③本文的评价条件是鉴于匀速直线行驶的车辆噪声，而在现实中，车辆会有加速、转弯等车况，因此，仍需根据车辆行驶的不同情况对其进行补充理论研究及现场试验，并加以完善。

致谢

两年多的研究生生活倏然而逝，值此之际，向所有关心和帮助过我的人表示真诚的感谢和祝福！

论文的研究过程一直是在陈长老师的悉心指导下完成的，陈老师敏锐的学术思维、前瞻性的学术视角、扎实的学术功底、严谨的学术作风和平易近人的学术态度让我受益良多！硕士期间也感谢孙立军老师及邵敏华老师在各方面的亲切帮助！感谢课题组对论文试验的资金支持！并向课题组所有的老师们表示衷心的感谢和崇高的敬意！

非常感谢王慧师姐帮忙购买试验器材。感谢路管方向的各位同学在硕士期间的陪伴。感谢各位师弟：余欢，黄舫，杨雪峰，伍洋洋，刘力源，袁昱，吴邦伟等，感谢你们帮助我完成大量的试验，论文的完成你们的辛苦汗水功不可没。

论文是在大量试验数据的基础上完成的，在实验的进行过程中，遇到了非常多的困难，课题组的兄弟姐妹们给我提供了无私的帮助，感谢他们是我学习和生活中的良师益友，在此对你们表示深深的谢意！

感谢钟鼎文、刘俐、吉婉欣、惠彦彦、朱靛雯、潘磊、陈赣浙、徐周聪、何尧等同学多年的陪伴。感谢课题组所有的兄弟姐妹，是你们让我的研究生生活绚丽多彩，终生难忘。感谢沈俊一直以来的理解和支持，感谢亲人们对我的关怀、鼓励和鞭策，你们永远是我的最坚强的依靠。

徐婷怡

2014.06.16

参考文献

- [1] D. Ouis. Annoyance from Road Traffic Noise: a Review[J]. Journal of Environmental Psychology, 2001(21):101-120.
- [2] Hanson D I, James R S, NeSmith C. Tire/pavement noise study. NCAT Report 04-02[J]. National Center for Asphalt Technology. Auburn University, Alabama, 2002.
- [3] United States, Federal Highway Administration, Office of Environment and Planning, Noise and Air Quality Branch. Highway Traffic Noise Analysis and Abatement: Policy and Guidance[M]. Federal Highway Administration, Office of Environment and Planning, Noise and Air Quality Branch, 1995.
- [4] Wayson, R.L. Relationship Between Pavement Surface Texture and Highway[M]. NCHRP Synthesis of Highway Practice 268, Transportation Research Board, National Research Council , 1998.
- [5] 谭中杰. 影响公路路面噪声的主要因素探讨[J]. 科技信息, 2011(7): 301-302.
- [6] 王晟. 道路交通噪声评价及防治对策[J]. 魅力中国, 2010(16): 164.
- [7] 陈城. 道路噪声与路表径流污染的评价[D]. 上海:同济大学硕士学位论文, 2007.6.
- [8] Cackler E T, Harrington D S, Ferragut T. Evaluation of US and European Concrete Pavement Noise Reduction Methods[J]. Federal Highway Administration, National Concrete Pavement Technology Center, Iowa State University. 2006.
- [9] Intenational Standards Organization. Characterization of Pavement texture by Use of Surface Profiles-Part 1,2 and 3[S]. ISO/TC 43/SC 1/WG 39, 1997.
- [10] 刘莲馥. 道路噪声测量与评价研究[D]. 长安:长安大学硕士学位论文, 2009.5.
- [11] Sandberg U. Tyre/road Noise: Myths and Realities[R]. Swedish National Road and Transport Research Institute, 2001.
- [12] Sandberg U, Ejsmont J A. Tyre/road Noise Reference Book[M]. Kisa, Sweden: Informex, 2002.
- [13] 苗英豪, 王秉纲. 沥青路面降噪性能研究综述[J]. 中外公路, 2006, 26(4): 65-68.
- [14] Nakaiima Y. Theory on Pitch Noise and its Application[J]. Journal of vibration and acoustics, 2003, 125(3): 252-256.
- [15] Intenational Standards Organization. Acoustics-Measurement of the Influence of Road Surfaces on Traffic Noise-Part 1:Statistical Pass-By method[S]. ISO 11819-1, 1997.
- [16] Kuemmel D A, Sontag R C, Crovetti J A, et al. Noise and Texture on PCC Pavements, Results of a Multi-State Study: Final Report[R]. Report WI/SPR-08, 1999.
- [17] Hanson D I, Waller B. Evaluation of the Noise Characteristics of Minnesota Pavements[M]. National Center for Asphalt Technology, 2005.
- [18] 白志文, 田波, 孔永健. 路面/轮胎噪声测试方法综述[J]. 公路交通科技 (应用技术版), 2007, 11: 64-68.
- [19] Lee C S Y, Fleming G G. Measurement of highway-related noise[R]. Federal Highway Administration, 1996.
- [20] Sandberg U, Ejsmont J A. The Art of Measuring Noise from Vehicle Tires[J]. SAE 1993 Transaction Journal of Passenger Car,1993, 102: 1677-1695.

- [21] International Standards Organization. Acoustics-Measurement of the Influence of Road Surfaces on Traffic Noise-Part 1:The Close Proximity Method[S]. ISO 11819-2, 2000.
- [22] 程诚. 道路噪声测量与评价方法研究[D]. 长安:长安大学硕士学位论文, 2011.4.
- [23] Sandberg U, Ejsmont J A. Development of Three Methods for Measurement of Tire/road Noise Emission: Coast-by, Trailer and Laboratory Drum[J]. Noise Control Engineering Journal, 1986, 27(3): 68-88.
- [24] Kuijpers A, Van Blokland G. Tyre/road noise models in the last two decades: a critical evaluation[C]. Proceedings of Internoise. 2001: 2494-2499.
- [25] 孙立军, 耿媛婧, 周晓青. 车辆噪声与城市道路路面平整度关系的试验研究[J]. 公路交通科技, 2007, 24(6): 24-28.
- [26] 王华. 轮胎与道路噪声的模型建立及仿真分析[D]. 武汉:武汉理工大学, 2007.
- [27] 张翠梅, 孔永健. 低噪声路面噪声预测模型的研究[J]. 黑龙江工程学院学报, 2005, 19(1): 21-24.
- [28] 高明星. 连续级配橡胶颗粒沥青路面降噪特性的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学博士学位论文, 2009.
- [29] 孔静静. 微表处路面/轮胎发生机理及改进措施研究[D]. 北京:北京工业大学硕士学位论文, 2010.
- [30] 张冉. 微表处路面噪声机理与减噪技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学硕士学位, 2011.
- [31] 孙晓立, 张肖宁, 蔡旭. 不同类型微表处噪声特性的室内试验[J]. 公路交通科技, 2012, 29(002): 18-22.
- [32] Sandberg U, Ejsmont J A. Noise Emission, Friction and Rolling Resistance of Car Tires: Summary of an Experimental Study[M]. Swedish National Road and Transport Research Institute, 2000.
- [33] Sandberg U. Noise and the road-is there a conflict between requirements for safety and noise?[J]. Ingenieurs De L'automobile , 1987(1): 76-84.
- [34] Denker D. Tread noise and driving safety[R]. Transport Research Laboratory Report, 1989.
- [35] Nelson P. An examination of the relationship between tire noise and safety performance [R]. Transport Research Laboratory Unpublished Report, 1993.
- [36] Sandberg U, Ejsmont J A, Mioduszewski P, et al. Relation between noise emission, friction and rolling resistance of car tyres-A pilot study[C], INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings. Institute of Noise Control Engineering, 1998(4): 1303-1308.
- [37] 彭彬, 黄晓明. 微表处路面噪音调查与研究[J]. 中外公路, 2008(4): 66-69.
- [38] 王海有. 微表处特殊性能分析及其合理应用[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2011(2): 69-72.
- [39] NCHRP.AASHTO2002 Pavement Design Guide, Washington, D.C, AASHTO, 2003.
- [40] 李福军, 吴桂忠. 轮胎花纹沟的发声模拟计算[J]. 轮胎工业, 2006, 26(4): 203-207.
- [41] Iwao K, Yamazaki I. A Study on the Mechanism of Tire/road Noise[J]. JSAE review, 1996, 17(2): 139-144.
- [42] Heckl M. Tyre Noise Generation[J]. Wear, 1986, 113(1): 157-170.
- [43] 张丽宏. 轮胎-路面噪声产生机理研究[D]. 南京:东南大学硕士学位论文, 2009.1.
- [44] GB/T 22036-2008, 轮胎惯性滑行通过噪声测试方法[S]. 2008.

[45] JTG E60-2008, 公路路基路面现场测试规程[S]. 2008.

个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果

个人简历:

徐婷怡, 女, 1989年5月生。

2011年7月毕业于同济大学交通工程专业, 获学士学位。

2011年9月进入同济大学道路与铁道工程专业, 攻读硕士学位。

已发表论文:

徐婷怡, 陈长, 孙立军. 沥青路面预防性养护降噪机理与效果研究. 第二十届海峡两岸都市交通学术研讨会论文集. 2012. 7: 68~70.