



同濟大學

TONGJI UNIVERSITY

硕士学位论文

考虑路面局部不平整的城市道路行驶质量评价方法研究

姓名：黄 舫

学 号：1234528

所在院系：交通运输工程学院

学科门类：工学

学科专业：交通运输工程

指导教师：陈 长 副教授

二〇一五年六月



同濟大學

TONGJI UNIVERSITY

硕士学位论文

考虑路面局部不平整的城市道路行驶质量评价方法研究

姓名：黄 舫

学 号：1234528

所在院系：交通运输工程学院

学科门类：工学

学科专业：交通运输工程

指导教师：陈 长 副教授

二〇一五年六月



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

A dissertation submitted to
Tongji University in conformity with the requirements for
the degree of Master of Philosophy

**Study on the Method of Evaluation of Riding
Quality of the Urban Road which Involving the
Local Roughness of Pavement**

Candidate: Huang Fang

Student Number: 1234528

School: School of Transportation Engineering

Discipline: Engineering

Major: Traffic and Transportation Engineering

Supervisor: Associate Professor Chen Zhang

June, 2015

考虑路面局部不平的城市道路行驶质量评价方法研究 黄舫 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：

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

路面行驶质量是路面重要的使用性能，而路面平整度决定了路面行驶舒适性，但是在对城市道路研究的过程中发现：一些平整度处于优级的路段但是其实际行驶感受却很不舒适，经过分析，产生该问题的原因是现有城市道路平整度评价方法不适合城市道路，因为城市道路上存在大量的局部不平整（例如窞井和修补），这些局部不平整严重影响了道路行驶舒适性，而现有城市道路平整度评价方法来自于公路系统，是用以路段为单位的 IRI 值代表该路段平整度平均水平，而该值并不能反应出局部不平整。

本文首先对上海市道路进行调查，统计出各类型局部不平整所占百分比，虽然有学者做过类似工作，但其调查的样本数量较少，本研究调查了上海市 400 多条路段得出统计结果，结果显示窞井和修补是所占比例最大的两类局部不平整，其他类型局部不平整相对来说所占比例非常小。。

为解决路面局部不平整对城市道路平整度评价造成影响的问题，本文提出 IRI 修正公式，该公式的基本思想是：当路面上出现局部不平整时，把原有路段 IRI 值加上局部不平整的影响得到修正后的 IRI 值使其符合实际路面行驶舒适性。而不同高程差的局部不平整对 IRI 的影响是不同的，为了量化各等级局部不平整对 IRI 的影响，需要知道路面上局部不平整的个数并按高程差对局部不平整分级。

要获得路段上局部不平整个数的数据可以通过路况标记法，但该方法对人的主观意识要求高并且效率低，本文希望通过分析路面的数据指标（IRI 值或高程值）的方法，找出局部不平整处的数据特征，则可以通过分析数据获得路段上局部不平整的数量信息。最后本文得出窞井处高程值的特征，提出相邻高程差的概念，并依据得出的结果编写出 Matlab 程序用计算机自动计算出路段上窞井个数及其位置。但是对于其他类型的局部不平整（如修补）并没有得出明确的数据特征，本文只对窞井进行研究。

为了对各窞井按高程差分级，本文引用了同济大学彭华在其博士论文中的研究成果：按窞井高程差把窞井分为 6 个等级，每个等级窞井对行驶舒适性的影响不同。并分析了窞井高程差与相邻高程差的差异，得出二者之间的差异在误差允许的范围之内。

至此，路面上窞井个数及按高程差对窞井分级两个问题都已解决，然后提出对现有路段 IRI 值的修正公式，并通过舒适性评分实验标定公式中的系数。利用该修正公式可以修正当路面上只存在窞井这类局部不平整时的 IRI 值，使

修正后的 IRI 更符合乘客的行驶舒适性感受。本文把该方法称为路面存在窞井时城市道路平整度评价新方法，即当路面出现窞井时，其 IRI 值用修正公式计算；当路面平整无任何局部不平整时，其 IRI 值为仪器测量结果。

关键词：城市道路，行驶质量，平整度，窞井，评价方法

ABSTRACT

Road driving quality is important using performance of road, and road roughness determines road driving comfort, but on the city road research we find: the flat degrees of some road is in excellent level of sections but its actual driving feel is not comfortable. After analysis, it is because the method of evaluation of urban road is not suitable for road in city. A large number of local irregularities (such as manhole and repair) exist on the city pavement, and such irregularities affect comfort of road seriously. Meanwhile, the method of evaluation of urban road references from the system of highway depend on a index of IRI represent the average level of roughness of road but the local irregularities on the road is ignored.

Above all, road in Shanghai is surveyed to count the percentage of every local irregularities in the article. Although scholar have done similar work, the number of samples of their work is small. We have surveyed more than 400 road in Shanghai and found that manhole and repaire occupy more proportion than others.

To solve the problem that local irregularities impact the eevaluation of roughness of urban road, a formula whose basic idea is when there are local irregularities on the road, IRI value of the road is old IRI value plus the impact of local irregularities to conform to actual driving comfort of road, is proposed. And the compact of different elevation gap is different. To quantify the impact of every level local irregularities, we must get the number of local irregularities on the road and classificate the local irregularities according to elevation gap.

The method of noting every local irregularities will help us get the number of local irregularities, but the method depend highly on subjective awareness and with low efficiency. We want to use the method that finding the feature of index(IRI value or elevation value) on the location of local irregularities, then we can only analyze the data of road to get imformation of local irregularities. We have found the feature of data in the manhole location. And the concept of gap of adjacent elevation is proposed, a program written by Matlab is written to calculate the amount of manhole and locate of it. But we have not found similar result of other local irregularities.

We quote the result of Penghua of Tongji University in his doctor article that classificate the manhole to 6 levels, each level make different impact on the driving comfort. And the difference between elevation gap and gap of adjacent elevation is

analyzed.

The two problems of number of manhole and classification of manhole is solved. The formula is proposed and a experiment is done to calculate the coefficients of formula. The fomula is used to correct old IRI value of road and calculate a new IRI value that fitting the driving comfort of passenger. We call the method that a new method to evaluate the roughness of urben road, that is when there is manhole on the pavement, IRI of the road is calculate by the formula, and when there is no local irregularities, IRI of the road is measuring by apparayus.

Key Words: urban roads, driving quality, roughness, manhole, method of evaluation

目录

第 1 章 引言.....	1
1.1 问题的提出.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 路面平整度的定义.....	2
1.2.2 路面平整度的检测方法.....	2
1.2.3 路面平整度评价指标.....	3
1.2.4 国内外对行驶舒适性评价的研究.....	3
1.3 研究内容和技术路线.....	7
第 2 章 各类局部不平整类型百分比统计.....	11
2.1 数据采集.....	11
2.2 统计结果.....	12
2.3 本章小结.....	14
第 3 章 基于国际平整度指数 IRI 值研究城市道路局部不平整.....	15
3.1 国际平整度指数 IRI 的计算过程.....	15
3.2 国际平整度指数 IRI 数据的获取.....	18
3.3 局部不平整处 IRI 值的特征.....	19
3.4 本章小结.....	20
第 4 章 基于高程数据研究城市道路局部不平整.....	21
4.1 高程数据的获取.....	21
4.2 局部不平整处高程值的特征.....	22
4.3 基于相邻高程差研究道路局部不平整.....	27
4.3.1 理论上局部不平整处相邻高程差的特征.....	27
4.3.2 高程测量实验.....	29
4.3.3 临界值.....	34
4.3.4 窞井不平处相邻高程差的数据特征.....	37
4.4 利用 Matlab 程序识别窞井位置.....	39
4.5 本章小结.....	41
第 5 章 根据行驶舒适性对窞井不平整分级.....	42
5.1 窞井不平的分级标准.....	42
5.2 相邻高程差与窞井高差的关系.....	43
5.3 本章小结.....	44
第 6 章 考虑窞井的城市道路平整度评价方法.....	46
6.1 修正公式.....	46
6.2 舒适性评分实验.....	47

6.2.1 实验路段选择.....	47
6.2.2 车辆选择.....	48
6.2.3 表格设计.....	48
6.2.4 实验过程.....	49
6.2.5 实验结果.....	50
6.3 城市道路平整度评价流程.....	54
6.4 本章小结.....	54
第7章 结论与展望.....	55
7.1 研究结论.....	55
7.2 不足与展望.....	55
致谢.....	57
参考文献.....	58
附录 A 各类型局部不平整数量统计结果表格.....	60
附录 B 输出窞井个数、位置及等级的 Matlab 程序.....	71
个人简历、在读期间发表的学术论文和研究成果.....	78

第1章 引言

1.1 问题的提出

众所周知，路面行驶质量 RQI 与国际平整度指数 IRI 存在线性对应关系，即 $RQI=5.05-0.57IRI$ 。影响路面行驶质量的主要因素为平整度，其他因素可以忽略不计^[1]，当 IRI 处于某一范围时，可以判断路面行驶质量是可接受、不确定或者不可接受，如表 1-1^[2]。但是，在对城市道路平整度研究的过程中发现，一些 IRI 值良好的路段，其实际行驶舒适性却并不好，以上海市长宁区天山路（中山西路—遵义路）和天山路（古北路—芙蓉江路）两个路段为例^[3]，其 IRI 值分别为 3.47m/km 和 4.40m/km，按照规范两段路平整度均为 A 级，但是其实际行驶舒适性却屡遭诟病。

表 1-1 行驶质量评价标准

评价指标	可接受	不确定	不可接受
RQI	≥ 3.6	$>2.0, <3.6$	≤ 2.0
IRI	≤ 2.5	$>2.5, <5.3$	≥ 5.3

分析该问题产生的原因，发现城市道路因其自身的特点，在路面经常会有一些附属设施，比如窨井，桥梁伸缩缝等，也会存在一些修补或者过街掘路后回填的情况^[4]，修补后的路面经常会比原路面高出一部分，这些因素都会导致城市道路出现局部不平整。路面不平整是指路面表面相对于基准平面的偏离^[5]，这些局部不平整的存在影响着城市道路行驶舒适性^[6]，当车辆驶过这些局部不平整区域时，车辆不可避免地会产生瞬时振动，使道路的行驶质量特别差^[7]。

而现有城市道路舒适性评价方法来源于公路体系，公路体系以一段道路的国际平整度指数 IRI 来反应该段道路的行驶舒适性^[8]，该 IRI 值反应的是整段路面的平均情况，公路上不存在窨井和修补等局部不平整，所以能较好地反应实际情况，但是城市道路中含有大量局部不平整，用路段 IRI 值不能反应局部不平整对行驶舒适性的影响，即局部不平整产生的局部 IRI 突变对整条路段 IRI 影响不大，但对行驶舒适性影响很大。要解决这个问题，就要在现有 IRI 值的基础上，附加上局部不平整的影响，使其更能表示实际情况。而平整度是路面重要的使用性能，AASHTO 实验表明约 95% 的路面服务性能来自于道路表面的平整度^[9]；LTPP 研究表明，路面平整度严重影响其使用寿命，初始平整度对其影响更为明显^[10]；NCHRP（National Cooperative Highway Research Program）在

275 号研究报告中指出, 车辆的行驶品质与舒适性都与平整度有关^[11]。因此, 有必要深入研究城市道路的特点, 找出局部不平整处的数据特征, 对数据特征进行深入分析, 找出更加适合评价道路行驶舒适性的指标, 这对于道路工程的研究具有重要意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 路面平整度的定义

平整度是影响行车安全、行车舒适性及运输效益的重要指标^[12], 评价路面平整度首先要了解其完整而准确的定义。路面平整度大致由三种剖面的竖向变形构成: 纵向的、横向的、水平向的。车辆垂直方向的加速度主要是由纵向变形引起, 所以, 在道路工程中, 研究人员将道路的纵向变形作为道路行驶舒适性的主要影响因素^[13]。

路面纵向变形按波长可分为长波、短波和粗糙纹理三种类型。其中长波引起车辆的低频振动, 而粗糙纹理则引起轮胎的行驶噪声。

由于路面平整度问题本身的复杂性, 从不同的角度出发, 对路面不平整度所下的定义就有多种^[14]。中华人民共和国交通运输部标准《公路工程名词术语》(JTJ 002—87) 及国家标准《道路工程术语标准》(GBJ 124—88) 将“路面平整度”定义为: 路表面纵向凹凸量的偏差值^[15]。该定义比较模糊, 只涉及路的特性, 而对人车方面涉及较少, 且由于没有设定参照高程, 不利于测定。美国实验与材料协会 (ASTM) 对“道路平整度”的定义为: 路面表面相对于理想平面的竖向偏差, 而这种偏差会影响到车辆动力特性、行驶质量、路面所受荷载及排水 (ASTM, 1999 年)^{[16][17]}。这个定义更加合理, 它明确了路面平整度测量的参照系, 利于测定; 而且定义中将人一车一路三方面因素综合起来考虑, 并对其所导致的影响论述清楚。

1.2.2 路面平整度的检测方法^{[18][19]}

目前世界各国都极为重视对路面整体平整度的研究, 也相继提出了包括断面类平整度仪、反应类平整度仪、以及主观评估法在内的多种测定方法。

反应类的平整度仪通过测量车辆的振动来衡量铺面的平整性, 反应类平整度仪的设计思想一般有两种, 一种是测量车身和车轴之间的位移量, 另一种是用加速度计测量车辆对车轴或本身的反应。反应类平整度仪价格低廉、操作简单、可用于大规模的路面平整度测定, 但是其并未直接测量铺面表面的高程变

化且时间稳定性差^[20]。

断面类的平整度仪测量车辆行驶轨迹下铺面表面的高程或者高程变化量，通过对高程变化的数学分析，得出铺面平整度值^[21]。常用的断面平整度仪包括：水准仪、3m直尺或梁式断面仪、惯性断面仪、纵断面分析仪，现在广泛应用的激光平整度仪也属于断面类的平整度仪，本研究中路面平整度数据的获得就是利用激光平整度仪。断面类平整度仪的主要优点是能够直接测得铺面的实际纵断面高程，可以据以进行铺面平整度特性指标分析。其主要缺点是大多为精密仪器，价格昂贵，操作和维修要求高。

主观评估法是根据评估指南和自身经验进行评估的方法。这种方法耗费较大，同时评价的结果易受外在因素的影响，因此不能用作经常性的例行检测，只能在特殊的情况下使用。

1.2.3 路面平整度评价指标

各国也相对应提出了国际平整度指数 IRI、纵断面指数 PI、功率谱密度 PSD、平均评分等级 MPR、行驶质量指数 RN、竖向加速度均方根 RMSVA 等多类评价指标^[22]。但是，在各国大力研究路面整体平整度的同时，却普遍忽视了对路面局部异常不平整的重视，也缺乏对局部不平整对驾驶员和乘客行驶舒适性所造成的影响的研究。

本研究所用的平整度评价指标是国际平整度指数 IRI，IRI 是由美国国家公路研究计划 (NCHRP)，于 1978 年最先在反应类平整度系统的标定和关系研究项目中提出^[23]。而在 1982 年，世界银行在巴西等国进行了国际平整度的相关实验，并系统提出了针对 IRI 的计算模型及计算方法：IRI 由一条单向纵断面计算得到，采用 1/4 车模型（由固定弹簧体质量与非弹簧体质量以及弹簧和阻尼组成），以 80km/h 速度在已知断面上行驶，计算出一定行驶距离内悬挂系统的累积位移作为 IRI。由于 IRI 具有许多优点，目前已经成为国际上运用最广泛的路面平整度指标，包括美国 AASHTO2002 设计指南和大部分欧洲国家在内，均一致采用 IRI 作为平整度的验收指标^[24]。IRI 直接与路段断面高程相关，保证结果具有时间稳定性；IRI 可以通过最广泛使用的仪器测量得到，结果具有有效性；IRI 有标准计算程序，可以在世界范围内进行转换^[25]。我国从“七五”开始，也逐渐在路面管理系统中采用 IRI 作为路面平整度指标^[26]。

1.2.4 国内外对行驶舒适性评价的研究

行驶舒适性是指汽车在一般行驶速度范围内行驶时，能保证乘员不会因为

车身振动而引起不舒适和疲劳的感觉^[27]。实际上,最早在人类修建道路的时候,我们对道路路面的行驶舒适性就非常敏感,各种措施被用于提高路面的行驶舒适性,包括改善行驶工具的行驶平顺性,提高路面的平整程度^[28]。

由日常生活和驾车经验可知,车辆驾驶人员对行车舒适性的感受取决于三个方面因素:道路状况、车辆性能和驾驶员自身情况^[29],其中道路状况主要指路面平整程度地连续变化和路面凹凸的突然波动。因此,道路的行驶舒适性评价,既要考虑道路工程领域内的路面平整度评价指标,又要考虑车辆工程的平顺性要求和人体生理、心理对振动的感受,可以说,道路的行驶舒适性评价是一个涉及“人—车—路”系统的复杂评价过程^[30]。

现有的对行驶舒适性的评价方法中,最普遍的依据乘客的主观感受对路段打分,结合该路段的平整度值,建立两者之间的关系;也有采用与振动有关的加权加速度均方根值来表示行驶舒适性;随着生理检测仪器的应用,有些学者也开始研究道路行驶舒适性对乘客的影响与其心理生理指标的关系;也有基于城市道路纵向线型的特点,对其行驶舒适性进行研究。现把这些研究领域主要成果归纳如下。

1、基于乘客主观感受的舒适性评价方法

基于乘客主观感受的专家打分法(PSI法)最早地反应了道路使用者对路面平整度的要求,该方法为:分别由不同行业的人士组成调查组进行乘车体验,再根据个人感受对路面的服务性能以5分制进行评价,最后通过数学方法建立主观感受(PSI)与路面性能参数之间的关系^[31]。其优点是把运行参数——车和人的感觉纳入了路面平整度的评定;缺点是评价具有不稳定性,即评价结果受车辆状况、驾驶技术和评价人员判断的影响^[32]。

早在上个世纪九十年代,长安大学的高增礼、张玉芬、王钧利等^[33]便确定了路面的不平整对乘坐舒适性影响的测试和舒适性的量化方法,最后得出了在同样的测试运行系统和行驶速度的情况下,运行系统在柔性路面上行驶时,乘客由于行车振动而引起的不舒适程度随路面不平整度的增加而增大的结论。不过,这项研究并没有系统深入地分析建立各类不同因素导致的不平整与行驶舒适性之间的关系,也没有能够根据舒适性的不同对不平整度进行分级。

2、运用加权加速度均方根值表示行驶舒适性

长安大学的杨万桥^[34]在他的硕士论文中,采用了与车辆振动有关的加权加速度均方根值作为人体振动舒适性的评价指标。这涉及到汽车平顺性领域,汽车平顺性是保持汽车在行驶过程中乘员所处的振动环境具有一定行驶舒适性的性能^[35]。对于载货车辆,平顺性还包括保持货物完好的性能^[36]。但是,该研究并未对路面局部不平整产生的瞬时加速度均方根值进行研究,也无法反应路面

出现局部不平整的情况。

同济大学的彭华^[37]在他的博士论文中利用数学方法推导出铺面连续不平整和偶然不平整情况下，车辆驶过铺面所产生的加权加速度均方根值公式，并且依据实际情况建立桥头跳车和井盖跳车情况下的数学模型，推导出其两种情况下加权加速度均方根值的计算公式。但是，该研究只是停留在理论分析，并未做实验验证是否符合实际情况。

3、基于心理生理指标的行驶舒适性评价方法

北京理工大学的王书云等人^{[38][39]}，利用 AYTOSTIM 驾驶模拟舱和 KF2 多参数动态生理检测仪进行市内驾驶模拟实验，得出心电（ECG）随速度和平整度变化的趋势及受其影响的程度。但是，其只分析了市内模拟实验，并没有通过室外实验进行验证。

北京工业大学的苏蕊崴^[40]在市内驾驶模拟舱进行仿真实验，发现了基于市内实验的心率变异性指标与平整度及速度的定量关系，得出基于心率变异性分析的路面平整度评价指标界值。但是，该实验并未针对城市道路特点对其进行实验和分析。

北京工业大学的张晨^[41]利用激光道路断面测试系统（用来测量平整度）和 KF2 型动态多参数生理检测仪（用来测试心电指标）做实验，发现人体的心率极差与路面平整度具有良好的相关性，同时，通过回归分析得出 IRI 均值与心率样本的极差之间存在着对数函数的关系。该实验虽验证了路面平整度生理评价方法的可行性，但得出的 IRI 均值与心率极差之间的关系模型还没有经过实际工程验证。

4、基于城市道路纵向线型特点研究行驶舒适性

上海市路政局的张钢以及董茂强、王冠男等^{[42][43]}先后就城市道路平整度达标路段实际行驶舒适性不佳的原因展开了研究，提出采用更短距离为单位（每 10m 为单位）的分析方法比以路段为单位的网级平整度分析方法能更合理的对城市道路平整度作出评价。同时也发现对行驶舒适性影响较大的局部不平整有以下因素：横沟不平、窞井不平、修补沉陷、交叉口、公交停靠站、路面与桥面连接处不均匀沉降（桥头跳车）和地面不均匀沉降等。尽管这项调研有效的在大量影响城市道路行驶舒适性的路面局部不平整因素中，筛选出了其中几类影响较大也较为典型的因素。但该调研未能够将城市道路的局部各类局部异常不平整同驾驶员和乘客主观上的舒适度建立联系，也并没有能够很好的对各类局部异常不平整的产生机理和应对策略提供解决方案。

同济大学的孙立军，周晓青^[44]等吸收了前人的研究成果，并加入自己的创新研究，对国内外城市道路平整度评价方法研究以及路面平整度评价发展及趋

势进行了系统的总结和论述。但是，对于城市道路局部不平的系统研究还处于探索阶段。

综上所述，一方面，各国均意识到路面平整度的重要性，也认识到了应该将驾驶员与乘客的行驶舒适性与路面平整情况联系起来进行综合的评价；但另一方面，又普遍对其中存在的路面局部异常不平问题重视不足，也没有就路面局部异常不平对于人的行驶舒适性所造成的影响进行研究。

5、同济大学刘婷的研究成果

同济大学的刘婷在其硕士论文中系统研究了城市道路上存在的局部不平对行驶质量的影响，并专门研究了当路面只存在窞井的情况下城市道路平整度评价方法，其主要成果归纳如下：

(1) 统计各类局部不平所占百分比

对上海市中心城区的城市道路进行实地调查，统计出各类局部不平所占百分比，得出窞井所占比例为 80%，是主要研究对象。但其统计范围较小，只包含上海市区的几十条道路，样本较少。

(2) 确定以 1m 分度 IRI 值研究窞井最为合理

在对比了各分度 IRI 值的图像后，确定了以 1m 为分度的 IRI 值可以很好地反应路面局部情况，并且数据量适中。并且窞井直径范围在 0.6m 到 0.8m 之间，用 1m 分度研究窞井比较合适。

(3) 路面窞井位置的确定

通过对三种方法（统计学方法、平整度纵断面曲线法和路况标记法）分别进行研究分析，统计学方法认为一段道路其 1mIRI 值的标准差和变异系数在一定范围内则可判断路面上存在窞井，但是并没有得出明确结论；平整度纵断面曲线法是通过研究 1mIRI 在窞井处的数据特征来识别出窞井的位置，认为当某点 1mIRI 满足 $IRI_i \geq [(IRI_{i-1} + IRI_{i+1})/2] \cdot a$ (IRI_i 为该点 1mIRI 值， IRI_{i-1} 和 IRI_{i+1} 分别为该点前一点和后一点的 1mIRI 值， a 为常数，需要研究得出) 时，该点存在窞井，最后得出 a 值，但是用该方法与实际情况相差较大；最后提出用路况标记法确定窞井的位置比较准确。路况标记法是在平整度采集过程中，车辆驶过窞井产生颠簸时则人工按键标记该处位置，考虑到大脑的反应时间，标记的位置相对于实际位置有一定的延后，经过查阅资料，人的反应时间约为 0.4~0.7 秒，根据当时的行车速度，则可以确定窞井位置的大致范围。但是，路况标记法也存在问题，首先，该方法对人的主观意识要求高；其次，用该方法效率低下，不易推广；最后，用该方法所得出窞井位置也只是一个大致范围。

(4) 建立了路面窞井不平等级划分标准

根据之前平整度纵断面曲线法可知每个窞井可以算出一个 k 值 ($k = IRI_i /$

$[(IRI_{i-1} + IRI_{i+1}/2)]$), 回归 k 值与窞井高度差的线性关系, 根据人实际行驶感受的差异, 可将不同高度差的窞井分为 6 各等级, 如错误!未找到引用源。³⁷。依据错误!未找到引用源。和 k 值与窞井高度差的线性关系, 建立基于 k 值的窞井等级划分标准。

表 1-2 k 值与行驶舒适性的关系

等级	A	B	C	D	E	F
k	<1.28	1.24~1.53	1.52~1.60	1.61~1.83	1.82~2.20	>2.20
主观感受	保持舒适	稍不舒适	有些不舒适	不舒适	非常不舒适	特别不舒适

(5) 建立修正公式

通过行驶舒适性评分实验, 得到使用者主观感受与路面窞井分布之间的关系, 建立考虑不同等级窞井高度差的路段 IRI 修正公式。

但是, 该研究也有其不足之处, 首先, 由于时间有限, 其并未能对路面局部不平整位置的确定方法做更多的尝试, 而提出更加简单易推广的方法; 然后, 对于路面的局部不平整现象, 其只研究了最常见的一类——窞井不平, 对于其他局部不平整并没有过多论述。因此, 本文在其研究的基础上, 将进行进一步的研究, 使对该问题的研究更加完善。

1.3 研究内容和技术路线

本文吸收以上研究方法的优点并总结了其缺点, 运用多个指标对城市道路局部不平整进行研究, 包括国际平整度指数 (IRI)、断面高程、高程变化等指标, 以下为具体步骤:

首先, 数据采集工作。包括对路面所存在的各种局部不平整因素的数量进行统计, 并找到各道路的 IRI、高程等数据;

其次, 数据分析。分别对 IRI 图像, 高程图像, 相邻高程差进行深入研究, 研究出理论方法可以找到局部不平整位置及通过舒适性对不平整分级;

最后, 修正现有的路段平整度指标 IRI, 使其更符合实际情况。

本文分为七章来阐述:

第一章提出问题;

第二章对城市道路上存在的各类型局部不平整进行统计分析;

第三章尝试通过对 IRI 的研究找到局部不平整位置;

第四章尝试通过对高程值的研究找到局部不平整位置, 最后通过相邻高程

差的图像特征确定窞井不平位置,并运用 Matlab 程序自动识别路面上窞井位置;

第五章研究通过行驶舒适性对窞井分级;

第六章建立路面行驶舒适性与路面窞井分布的关系,提出新的更适合城市道路的行驶质量评价方法;

第七章是结论与展望。

本文的技术路线如图 1-1:

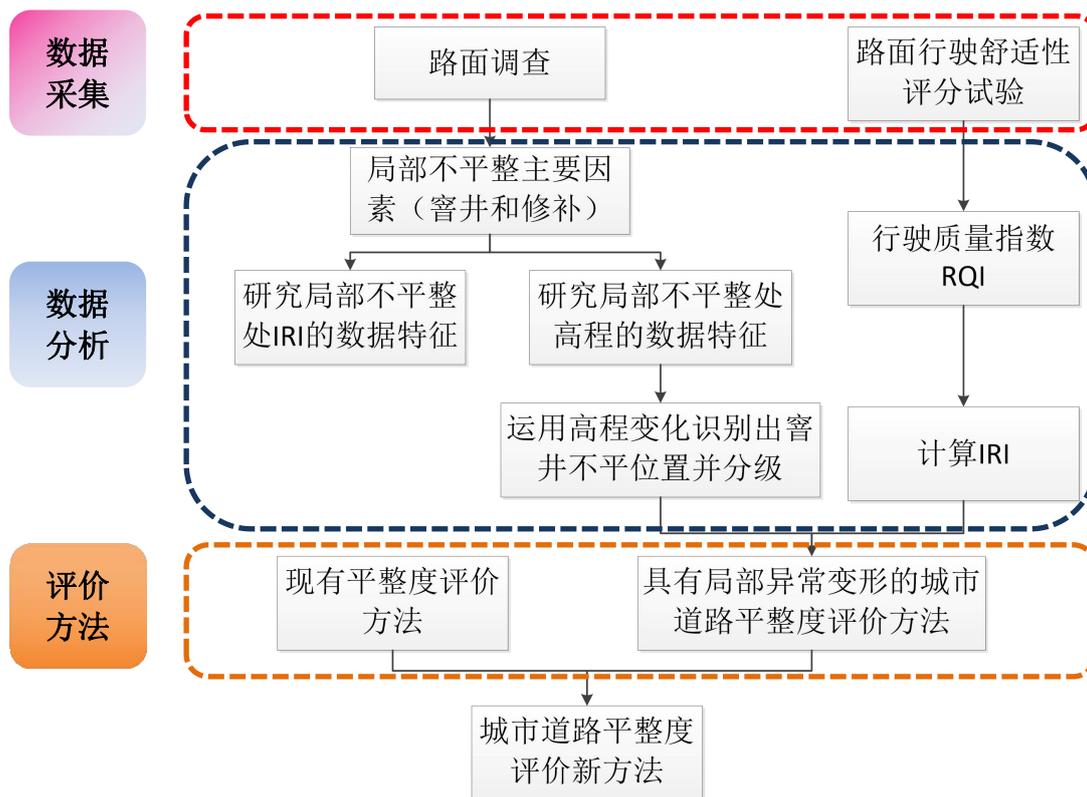


图 1-1 技术路线图

[1] 王辉,孔永健.对沥青路面行驶质量极限状态的研究.辽宁交通科技,2005(10):12-14.

[2] 孙立军等.道路与机场设施管理学.北京:人民交通出版社,2009.

[3] 刘婷.城市道路平整度评价方法研究:[硕士学位论文],上海:同济大学,2013.

[4] 郑国富.影响城市道路路面平整度的因素及控制措施.中国新技术新产品,2009(13),67.

[5] 孙璐,邓学钧.速度与车辆动态特性对于车路相互作用的影响.土木工程学报,1997,30(6):34-40.

[6] 王晓江,王光明,萧岩.检查井病害对道路平整度的影响及其对策.特种结构,2007,24(3):9-13.

[7] Alan Reggin, Ahmed Shalaby, Roger Emanuels. Urban Considerations for Using Road Roughness To Manage Road Networks,7th International Conference on Managing Pavement

- Assets, 2008.
- [8] 张贵忠, 常洪等. 高等级公路路面平整度检测方法. 东北公路, 2002, 25 (2): 21-23.
- [9] Hass Ralph, Huson W Ronald, Zaniewski John, Modern Pavement Management[M] . Malabar Florida: Krieger Publ, Co., 1994 (a).
- [10] The Effect of Initial Pavement Smoothness on Long Term Roughness Progression: Some Finding from C-LTPP and US-LTPP Studies[R] . 1999.
- [11] Janoff, M.S, Nick, J.B. and Davit Ketron, P.S.(1985).Pavement Roughness and Rideability, NCHRP Report275, TRB.
- [12] 高廷梁. 浅析城市道路沥青路面不平整的原因及其控制. 科技情报开发与经济, 2009, 19 (5): 205-207.
- [13] 王锋, 张金喜. 基于驾乘舒适性的沥青混凝土路面评价. 西南交通大学学报, 2014, 49 (4): 687-692.
- [14] 李套岭, 孙立军, 陆辉. 对路面平整度概念的粗浅理解. 上海市公路学会第五届年会学术论文集 2001:57-60.
- [15] 中华人民共和国交通部. JTJ0020-87. 公路工程名词术语. 北京:人民交通出版社,2009.
- [16] American Society for Testing and Material(ASTM) . Terminology Relating to Traveled Surface Characteristics Annual Book of ASTM Standards(1999) .
- [17] Thomas D Gillespie. Everything You Always Wanted to Know about the IRI, But Were Afraid to Ask! Road Profile Users Group Meeting[M] . 1992.
- [18] 周晓青, 孙立军, 颜利. 路面平整度评价发展及趋势. 公路交通科技, 2005, 22(10):18-22.
- [19] 陆键. 各种路面平整度仪的相关分析研究. 公路, 2002 (9): 91-94.
- [20] 张明, 叶巧玲, 冯晓. 路面平整度检测技术现状与发展. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2007, 26 (4): 112-114.
- [21] 田艳霞, 张营. 路面平整度测定方法. 技术与市场, 2011, 18 (8): 243.
- [22] 钱国超, 赵叫慈. BI 仪与三米直尺路面平整度评价指标的研究. 华东公路, 1991, 12.
- [23] NCHRP. AASHTO2002 Pavement Design Guide, Washington, D.C, AASHTO, 2003.
- [24] 孙立军等. 沥青路面结构行为理论, 上海: 同济大学出版社, 2003.
- [25] 呼六福, 蔚晓丹. 国际平整度指数 IRI 专项研究. 1998.
- [26] 蔚晓丹. 国际平整度指数 IRI 作为路面平整度评价指标的研究. 公路交通科技, 1999,16 (增1): 9-13.
- [27] 赵锐军. 高速公路行车舒适性评价体系. 交通世界, 2011 (11): 124-125.
- [28] 周晓青, 孙斌, 陈长等. 路面行驶质量水平评价标准方法研究. 同济大学学报 (自然科学版), 2007,35(2): 213-217.
- [29] 史刚雷, 玉俊杰, 庄茂丰. 沥青路面预防性养护的的行驶质量评价. 2014, 13 (3): 47-48.
- [30] 周晓青, 孙斌, 陈长等. 路面行驶质量水平评价标准方法研究. 同济大学学报 (自然科学版), 2007,35(2): 213-217.
- [31] 姚祖康. 路面管理系统. 北京: 人民交通出版社, 1993.
- [32] 盛灿花. 路面平整度特性研究: [硕士学位论文], 湖南: 湖南大学, 2005.
- [33] 高增礼, 张玉芬, 王钧利. 路面性质对乘坐舒适性影响的主观评价. 中国公路学报, 1995(1): 33-38.
- [34] 杨万桥. 基于人-车-路相互作用的沥青路面平整度评价方法的研究: [硕士学位论文]. 西

安：长安大学，2009.

[35] 加红艳，孙强. 行驶舒适性评价方法. 大观周刊，2012（26）：290.

[36] 万里翔，许明恒. 汽车行驶平顺性评价方法研究. 西南交通大学学报，2001.2.

[37] 彭华. 交通资产管理系统优化框架的研究：[博士学位论文]，上海：同济大学，2010.

[38] 王书云. 基于生心理因素的沥青路面性能关键参数研究：[博士学位论文]，北京：北京工业大学，2010.

[39] 王书云，张金喜，林翔等. 基于心电(ECC)的沥青路面平整度室内模拟实验研究. 武汉理工大学学报（交通科学与工程版），2009，33(6)：1132-1136.

[40] 苏蕊葳. 基于驾乘人员主客观反应的路面性能评价的研究：[硕士学位论文]，北京：北京工业大学，2012.

[41] 张晨. 路面平整度评价及预测理论的基础研究：[硕士学位论文]，北京：北京工业大学，2009.

[42] 张钢. 城市道路平整度指标的评价和引起异常的分析. 中国市政工程，2009，(12):14-20.

[43] 董茂强，王冠男. 城市道路平整度评价研究. 市政设施管理，2008(2)：18-20.

[44] 周晓青. 机场道面平整度评价指标研究：[博士学位论文]. 上海：同济大学，2006.

第 2 章 各类局部不平整类型百分比统计

城市道路中，存在各种类型的局部不平整，其不同程度地影响着道路的行驶舒适性。本章通过对上海市道路调查统计出影响城市道路平整度各因素及其比例，进而分析出主要因素及次要因素，确定主要研究对象。

2.1 数据采集

城市道路的路面上存在大量引起局部不平整的因素，根据上海市路政局的统计结果，这些因素包括窞井不平、修补不平、过街掘路、桥头跳车、伸缩缝，但所有因素并不是等量分布在路面上，而是有的因素所占百分比例大，有的因素所占百分比例小。所以，我们需要统计出各类影响因素所占百分比。

刘婷在其论文中曾做过该方面的工作，但其调查范围仅为上海市区的几十条道路，样本容量并不大。上海市路政局也做过类似工作，但其调查范围也仅限于上海市虹口区的道路，结果也不能代表全上海的情况。所以，本研究尝试扩大调查范围，把上海市中心城区的大部分道路作为调查对象，统计出各类局部不平整所占百分比，力求使统计结果更有说服力。

1、调查范围

上海市内环范围以内所有道路，如图 2-1。



图 2-1 上海市内环范围

2、调查表格

调查过程中的记录表格如表 2-1，表格中记录每段道路局部不平整的数量，例如路面上存在 2 个窨井则在“窨井”栏记录为 2，存在 3 出过街掘路则在“过街掘路”栏记录为 3，其余类似。

表 2-1 影响因素调查表

所在道路	路口 1	路口 2	检查井	过街掘路	修补不平	桥头跳车	伸缩缝
XX 路	XX 路	XX 路	3				
XX 路	XX 路	XX 路			5		
XX 路	XX 路	XX 路	2		3		

2.2 统计结果

该调查的部分调查数据如表 2-2，例如，曹杨路在武宁路到中山北路这一段存在 21 个检查井、3 块修补。该调查结果中含有窨井和修补较多的路段见附录 A。

表 2-2 局部不平整调查实验部分结果

所在道路	路口 1	路口 2	检查井	过街掘路	修补不平	桥头跳车	伸缩缝
武宁路	兰溪路	曹杨路	1				
曹杨路	武宁路	中山北路	21		3		
中山北路	曹杨路	延安西路	13		4	1	4
延安西路	娄山关路	古北路	21	1	4		
延安西路	外滩方向	华山路	49		10		
华山路	延安西路	武宁南路	9		5		
武宁南路	华山路	长寿路	5		2		
长寿路	武宁南路	长宁路	14		17		
长宁路	长寿路	凯旋路	7		10		
凯旋路	长宁路	延安西路	2		3		
延安西路	凯旋路	常德路	24		6		
常德路	延安西路	长寿路	15		10		

最后统计所有数据，得到各类局部不平整的总数量，如表 2-3，运用 Excel 表格统计功能统计出各局部不平整因素所占百分比，统计结果如图 2-2。

表 2-3 调查得到的各类局部不平整数量

局部不平整类型	窨井	过街掘路	修补不平	桥头跳车	伸缩缝损坏	其他	总计
数量	4885	217	1317	109	24	317	6869
百分比	71.1%	3.2%	19.2%	1.6%	0.3%	4.6%	100%

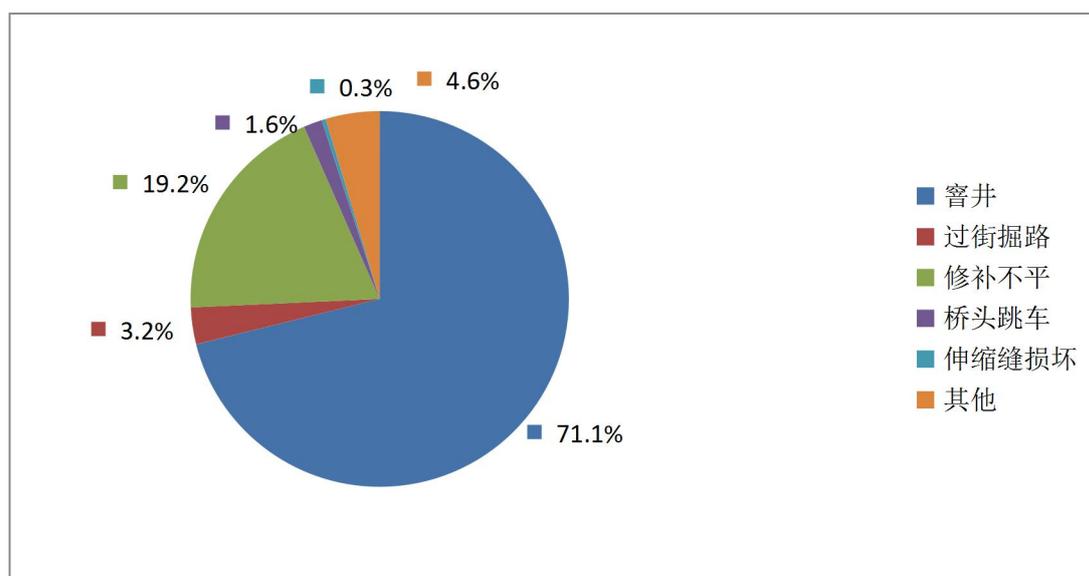


图 2-2 各影响因素数量调查结果

从该数量结果可以看出，在所调查的 428 条路（每条路包含多个路段）中，

有 4885 个窞井和 1317 块修补,则每条路平均出现了 11.4 个窞井和 3.1 块修补,可知其出现较频繁。比例图也表明,窞井和修补是占比例最大的两类局部不平整,而且,过街掘路也可以算作在修补不平的范畴,所以,影响路面行驶舒适性的主要因素有两大类——窞井和修补不平,这两大类局部不平整为本文主要研究对象,接下来将对这两大类因素具体分析。

2.3 本章小结

本章介绍了通过实地调查统计出影响城市道路局部不平整因素的百分比,得出两大主要因素:窞井和修补。

第3章 基于国际平整度指数 IRI 值研究城市道路局部不平整

为了确定局部不平整在路段上的位置，我们需要研究局部不平整处数据呈现的特征。

本章研究国际平整度指数 IRI 在路面局部不平整处的特征。首先通过力学方法推导出 1/4 车动力平衡方程，从理论上分析 IRI 值的计算过程，了解激光平整度仪的工作原理；然后简要介绍 IRI 值的获得途径；最后分析了同济大学刘婷在其论文中的研究成果。

3.1 国际平整度指数 IRI 的计算过程

路面平整度是路面评价的一个重要指标，不仅影响驾驶员及乘客行驶舒适性，而且还与车辆振动、运行速度、轮胎摩擦与磨损及车辆运营费用等有关，是一个涉及人、车、路三方面的指标。路面平整度测定的方法与仪器较多，采用的指标也各不相同，为使采用不同的方法和仪器测定的结果可以相互比较，需要寻找一个标准的可以统一的指标。

1982 年的 Sayers 等，在世界银行的资助下在巴西等国家进行了路面平整度实验，并在此基础上提出了国际平整度指数（IRI）指标。国际平整度指数是目前世界上最常用的一种评价平整度优劣的方法之一，所用的 1/4 车模型如图 3-1 所示。

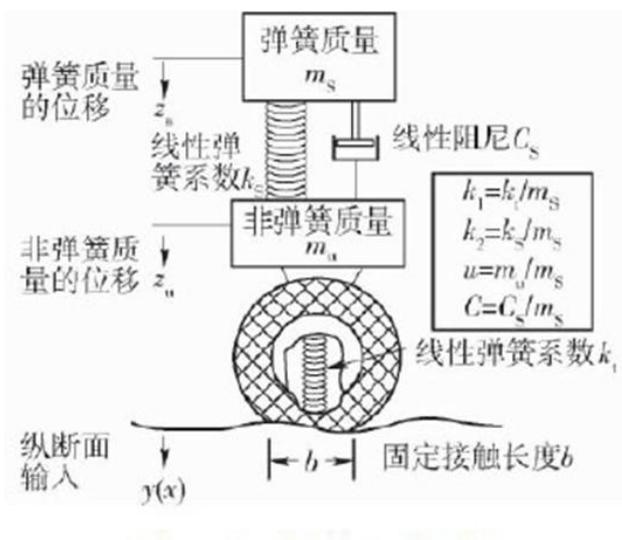


图 3-1 1/4 车模型

通过查阅国内相关文献发现，目前相关针对 1/4 车辆模型的研究多直接给出动力平衡方程，并未提到动力平衡方程的推导过程。因此，本文对 1/4 车辆模型的动力平衡方程的来历进行讨论，并利用达朗贝尔原理对其进行力学的推导和论证。

为方便计算，可以将 1/4 车辆模型理想化地简化为如图 3-2 所示的计算模型。现利用达朗贝尔原理，建立作用于体系上的所有力的动力平衡方程，加以考虑惯性的影响，进行计算求解。

1/4 车模型共计受到三种不同力的作用，分别是：惯性力、阻尼力以及弹性弹簧力。其中惯性力是质量和加速度的乘积 ($= mZ''(t)$)；弹性弹簧力是弹簧刚度和位移的乘积 ($= kZ(t)$)；阻尼力是阻尼系数 c 和速度的乘积 ($= cZ'(t)$)；而 $Z(t)$ 则代表竖向位移，图中， Y 为路面的断面高程， Z_s 为弹簧质量 m_s 的绝对位移， Z_u 为弹簧质量 m_u 的绝对位移， k_s 、 k_t 为弹簧系数， c_s 为阻尼系数。

1/4 车模型的动力平衡方程建立过程如下；将 1/4 车模型分为上下两部分当做平衡体进行计算。

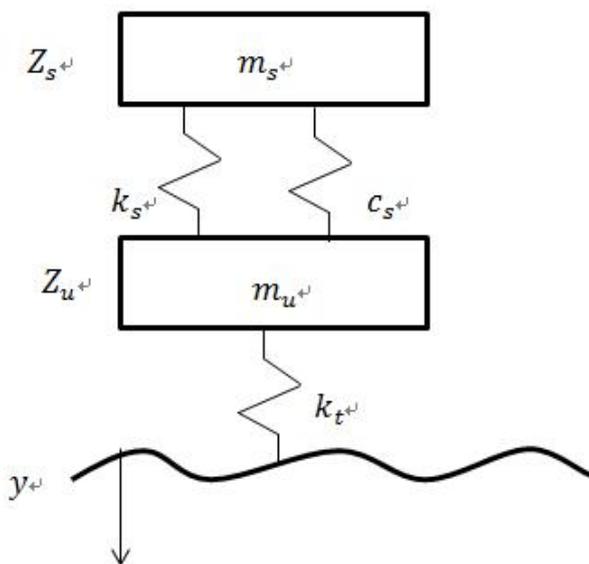


图 3-2 1/4 车简化模型

(1) 选取弹簧质量 m_s 为研究对象，建立的动力平衡方程如下：

弹簧质量 m_s 共计受到三个不同力的作用，分别是：弹簧力 F_{ks} 、惯性力 F_{ms} 、以及阻尼力 F_{cs} 。

其中， $F_{ks} = k_s(Z_u - Z_s)$ ， $F_{ms} = m_s Z_s''$ ， $F_{cs} = c_s(Z_u' - Z_s')$ 。将三者联立，建立平衡方程如下：

$F_{ks} + F_{cs} = F_{ms}$ ，带入相关关系式有：

$$m_s Z_s'' + c_s(Z_u' - Z_s') + k_s(Z_s - Z_u) = 0 \quad 3-1$$

(2) 选取非弹簧质量 m_u 为研究对象，建立动力平衡方程如下：

非弹簧质量 m_u 共计受到四个不同力的作用，即弹簧力 F_{ks} 和 F_{kt} 、惯性力 F_{mu} 、阻尼力 F_{cs} 。

其中， $F_{ks} = k_s(Z_u - Z_s)$ ， $F_{kt} = k_t(Y - Z_u)$ ， $F_{mu} = m_u Z_u''$ ， $F_{cs} = c_s(Z_u' - Z_s')$ 。将四者联立，建立的动力平衡方程如下：

$$F_{ks} + F_{mu} + F_{cs} = F_{kt}$$

带入相关关系式有：

$$m_u Z_u'' + c_s(Z_u' - Z_s') + k_s(Z_u - Z_s) + k_t(Z_u - Y) = 0 \quad 3-2$$

再将上面的动力平衡方程式 3-1、式 3-2 左右两端同时除以 m_s ，得：

$$Z_s'' + c(Z_u' - Z_s') + k_2(Z_s - Z_u) = 0 \quad 3-3$$

$$u Z_u'' + c(Z_u' - Z_s') + k_2(Z_u - Z_s) + k_1 Z_u = k_1 Y \quad 3-4$$

1/4 车标准车模型的各种车辆参数按相关规定，则分别取为： $c = \frac{c_s}{m_s} = 6.00s^{-1}$ ， $k_1 = \frac{k_t}{m_s} = 653s^{-2}$ ， $k_2 = \frac{k_s}{m_s} = 63.3s^{-2}$ 和 $u = \frac{m_u}{m_s} = 0.15$ 。

易知，式 3-3 和式 3-4 便是世界银行提出的国际平整度指数（IRI）所建立的 1/4 车模型的动力平衡方程，上面的计算和推导过程就是 1/4 车辆模型动力平衡方程的推导过程。

求解微分方程式 3-3 和式 3-4 的方法很多，可以采用数值方法，也可以采用解析法。在姚祖康老师的书中提供了调整坡（RS）解法，而交通部也提供了用 Basic 语言所编写的计算机程序。但是由于路面断面高程函数的不连续性，所以很难用统一的数学函数将其表达出来，因而一般采用数值方法来计算得到 IRI。

由以上分析可知，IRI 是通过求解式 3-3、式 3-4 来实现的。由于路面纵断面的高程是离散的，因此通常利用数值方法来求解。而目前在对 IRI 进行实际计算时，一般利用传递矩阵法计算，该数值方法是由世界银行在提出国际平整度指数（IRI）指标时一起给出的，具体采用传递矩阵法的求解过程如下：

将式 3-3 和式 3-4 的解转化为一个递归方程，如下面式 3-5、式 3-6 以及式 3-7 所示：

$$Z(i) = ST \times Z(i-1) + PR \times Y(i) \quad 3-5$$

$$Z^T = [z_s', z_s, z_u', z_u] \quad 3-6$$

$$Y(i) = [y(i+1) - y(i)]/dx \quad 3-7$$

式中： $Z(i)$ 是当前位置的状态量， $Z(i-1)$ 则是前一位置的状态量； $Y(i)$ 是当前位置前点与后点之间的纵向坡度； dx 为数据的采样间隔。

$$ST = e^{At} = I + \sum_{i=1}^n \frac{(At)^i}{i!};$$

$$PR = A^{-1} \times (e^{At} - I) \times B;$$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -K_2 & -C & K_2 & C \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ K_2/u & C/u & -(K_1 + K_2)/u & -C/u \end{pmatrix};$$

$$B = [0 \quad 0 \quad 0 \quad K_1/u]^T;$$

$$IRI = \frac{1}{n-1} \sum_{i=2}^n (|Z'_s - Z'_u|) \quad 3-8$$

上式中： n 为采样间距， I 为单位矩阵。

通过求解以上的递归方程，计算出 Z'_s ， Z'_u ，然后按式 3-8 计算出 IRI。

通过 IRI 的计算过程，能更好地理解 IRI 值表示车辆在路段上行驶一段距离时竖向的累计位移。

3.2 国际平整度指数 IRI 数据的获取

联系到上海市路政局获得其 2014 年道路检测原始数据。该数据由激光平整度仪检测得到，它使用激光传感器测量车身与路表面之间的距离，用惯性加速度计消除振动误差，从而快速地获取道路纵断面高程，根据纵断面高程计算出 IRI 值^[45]。由于精度高、速度快，该设备在我国公路养护管理中得到了较为广泛的应用^[46]。

原始数据格式为 PG2，用格林伍德软件打开文件可以生成不同分度的 IRI 值，生成的文件为 Excel 格式。如图 3-3 所示为生成的江苏路（愚园路—武定西路）路段在 0~7.5m 一小段的 IRI 值，从“实测距离”栏（图中红色区域）看出该份数据 IRI 计算分度为 0.5m，即每隔 0.5m 计算一个 IRI 值。

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	c:\Profiler\Result\30P64201412260001.dist.iriavg											
2	路段代码	段起点	段终点	实测距离	IRI1	IRI2	IRI3	IRI4	IRI5	预置	预置	IRI平均 [m/km]
3	CNS0000	愚园路	武定西路	0	0.5	0.9	0.3	1.3	0.6	0	0	0.730557995
4	CNS0000	愚园路	武定西路	0.5	0.7	3.4	0.7	15	6.8	0	0	5.244641189
5	CNS0000	愚园路	武定西路	1	4	1.5	3.9	11	4.3	0	0	4.885288352
6	CNS0000	愚园路	武定西路	1.5	11	6.4	10	9.5	2.9	0	0	7.967173384
7	CNS0000	愚园路	武定西路	2	7.7	7.8	7.7	8.7	7.2	0	0	7.827353249
8	CNS0000	愚园路	武定西路	2.5	2	1.4	1.7	13	9.7	0	0	5.638569344
9	CNS0000	愚园路	武定西路	3	4.9	1.7	4.8	3.8	4.3	0	0	3.875958623
10	CNS0000	愚园路	武定西路	3.5	9.7	1.1	11	5.2	6.6	0	0	6.704117397
11	CNS0000	愚园路	武定西路	4	15	2.7	17	5.8	11	0	0	10.2038194
12	CNS0000	愚园路	武定西路	4.5	15	0.8	17	1.7	3.5	0	0	7.593497893
13	CNS0000	愚园路	武定西路	5	9.2	0.7	8.2	3.6	8.8	0	0	6.107380369
14	CNS0000	愚园路	武定西路	5.5	2	2.1	1.8	3.5	6.5	0	0	3.158245106
15	CNS0000	愚园路	武定西路	6	2.5	5	4.2	1.9	1.7	0	0	3.050860766
16	CNS0000	愚园路	武定西路	6.5	3.5	6.5	3.3	4	4.3	0	0	4.342392275
17	CNS0000	愚园路	武定西路	7	1.5	2.4	0.9	4.6	3	0	0	2.480745727
18	CNS0000	愚园路	武定西路	7.5	3.9	3.8	2.7	0.8	1.2	0	0	2.483712615

图 3-3 激光平整度仪所测以 0.5m 为分度的 IRI 值

3.3 局部不平整处 IRI 值的特征

前面详细介绍了刘婷在研究窞井方面的成果,她提出以 1m 分度的 IRI 值研究窞井不平最为合理,并用路况标记法确定了窞井的位置。但是路况标记法是一种依靠主观感觉的方法,其效率低下,不利于推广,并且得出的位置仅为窞井大致范围,并不能确定准确位置。

本文在该研究的基础上进一步研究,希望利用分析数据特征的方法找到局部不平整的位置,该方法有以下优点:

1、若能知道局部不平整处的 IRI 值的特征,并可以用数学语言表达出来,则可以在室内通过分析路段的 IRI 值找到该段路面局部不平整的位置,甚至可以利用编程的方法批量操作,提高工作效率;

2、该方法也利于推广,不需要经过主观判断,直接分析客观数据的方式找到局部不平整的位置,虽然方法是由上海市地数据研究得到,但可以推广到全国使用该方法;

3、该方法得出的局部不平整位置精确度更高,不再是大概的位置范围,而是一个确切的位置。

因此,研究局部不平整处的数据特征是非常必要的。刘婷在其论文中尝试了统计学方法和路况标记法两种方法,但运用到实际中均与实际不符,经过分析,使用 IRI 值进行研究存在以下问题:

经过分析，用 IRI 研究局部不平整也存在以下问题：

1、IRI 值也是一种经过处理后的反应路面平整性的指标，不能直观地看出路面的实际情况；

2、运用 IRI 图像也不能判断路面是凸起还是凹陷；

3、IRI 值反应的是路面平整度整体水平，若要对路面局部进行研究，还需要其他更加直观和有效的指标。

综上所述，单独依靠国际平整度指数 IRI 对路面局部异常进行研究不可行，需要其他的更为直观地指标。

3.4 本章小结

本章尝试使用国际平整度指标 IRI 对城市道路局部平整度异常进行研究，分析了以下问题：

✓ 推导出 1/4 车模型动力平衡方程，了解了激光平整度仪的原理，为以后运用 IRI 数据建立理论基础；

✓ 介绍 IRI 数据的获得途径

✓ 总结仅利用客观数据确定局部不平整位置的方法的优点，并论述了用 IRI 值研究路面局部不平整存在的问题。

[45] 马荣贵，宋宏勋，来旭光. 激光路面平整度检测系统. 长安大学学报（自然科学版），2006，26（2）：38-41.

[46] 卢杨，张晨，白正华. 激光平断面仪检测刻槽水泥路面平整度的准确性研究. 道路工程，2012，90（6）：182-186.

第4章 基于高程数据研究城市道路局部不平整

高程数据能更加直观反映出路面局部不平整的特点，本章尝试对高程数据进行研究。首先研究高程图像，得出局部不平整处高程值的特征，然后，为了从数学上表示出该特征，提出相邻高程差的概念，先从理论分析局部凹陷与局部凸起的相邻高程差图像特征，再通过高程测量实验研究实际的局部不平整处相邻高程差图像，验证其与理论分析是否吻合，并通过大量数据找出路面平整与不平整之间的相邻高程差临界值，最后得出窞井位置路面的相邻高程差数据特征，但是对于修补不平，其数据特征不明显，并把窞井位置的数据特征编写成 Matlab 程序用来自动识别出路面上窞井的位置。

4.1 高程数据的获取

第3章已经介绍过，激光平整度仪通过测量路面高程来计算 IRI 值，所以，本研究所用高程数据也是利用激光平整度仪测量得到。用格林伍德软件可生成道路高程值，如图 4-1，其数据为 Excel 表格形式。

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	距离 [m]	速度	加速度	位移	转动	激光器1	激光器2	激光器3	激光器4	激光器5 [mm]
2	0	11	-0.118	4.7	0.04	-93.95	-12.467	-89.25	-5.866	-4.273875
3	0.1485	11	-0.118	4.8	0.03	-93.95	-12.048	-89.25	-5.9518	-4.60136458
4	0.2969	11	-0.118	4.9	0.03	-93.95	-12.101	-89.25	-6.1078	-4.5192053
5	0.4454	11	-0.118	4.9	0.04	-93.95	-11.594	-89.25	-6.1847	-4.51670116
6	0.5939	11	-0.118	5.1	0.04	-93.95	-11.879	-89.25	-6.1694	-5.07775
7	0.7423	11	-0.118	5.2	0.05	-93.95	-12.404	-89.25	-6.6601	-5.43009106
8	0.8908	11	-0.117	5.3	0.05	-93.95	-12.459	-89.25	-7.0302	-5.68203125
9	1.0393	11	-0.116	5.3	0.05	-93.95	-12.166	-89.25	-6.9738	-6.07665502
10	1.1877	11	-0.116	5.1	0.05	-93.95	-12.338	-89.25	-7.1877	-5.83012952
11	1.3362	11	-0.116	5	0.05	-93.95	-11.846	-89.25	-7.1646	-5.64780433
12	1.4846	11	-0.115	4.9	0.06	-93.95	-11.672	-89.25	-6.9644	-5.92485609
13	1.6331	11	-0.115	4.9	0.07	-93.95	-12.073	-89.25	-7.3286	-6.19235306
14	1.7816	11	-0.117	4.9	0.08	-93.95	-11.984	-89.25	-7.7247	-6.20802837
15	1.93	11	-0.116	4.9	0.08	-93.95	-12.311	-89.25	-7.6438	-6.30147972
16	2.0785	11	-0.115	4.7	0.07	-93.95	-12.195	-89.25	-7.4307	-5.94165977
17	2.227	11	-0.114	4.5	0.07	-93.95	-12.383	-89.25	-6.9315	-6.24592301
18	2.3754	11	-0.113	4.3	0.06	-93.95	-12.525	-89.25	-7.4784	-6.16090625
19	2.5239	11	-0.112	4.2	0.06	-93.95	-12.814	-89.25	-7.5856	-6.34444792
20	2.6724	11	-0.115	4.1	0.05	-93.95	-13.371	-89.25	-7.6813	-6.45535417

图 4-1 激光平整度仪所测高程数据

在 Excel 表中，“实测距离”栏数据表示该测点距起点的距离；“激光器 1”栏的数据表示由激光器 1 所测出的高程值，单位为毫米，“激光器 2~5”栏数据则类似。所用激光平整度仪如图 4-2，激光器 1~5 分布在车辆前面的横杆上，激光器 1、2 位于左轮的又有两侧，激光器 3 位于车辆的正中央，激光器 4、5 位于右轮的左右两侧，每个激光器所测数据为道路纵断面高程数据。



图 4-2 激光平整度仪

4.2 局部不平整处高程值的特征

为利用高程判断出局部不平整的位置，可通过高程图像直观地反映出局部不平整位置的图像特征，高程图像为以距离为横坐标、以高程为纵坐标绘制坐标图。整理之前踏勘过的 400 多条道路数据，生成高程图像，通过高程图像和实际道路的对比，分析高程图像的规律。如图 4-3、图 4-4、图 4-5、图 4-6 是从 400 条道路中任意选出的 4 段道路的高程图像。

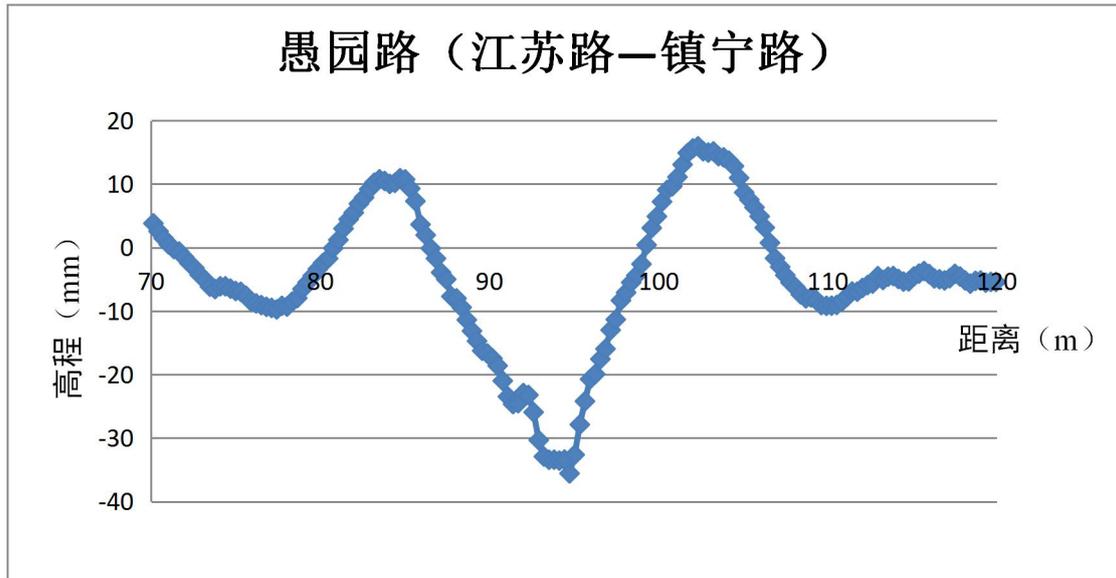


图 4-3 愚园路（江苏路—镇宁路）70m~120m 段

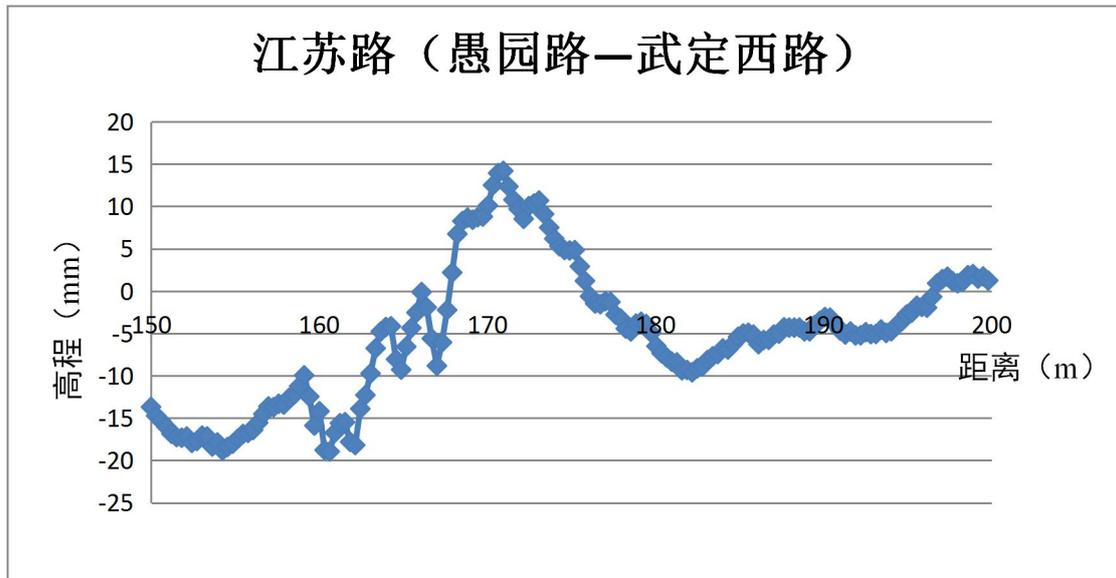


图 4-4 江苏路（愚园路—武定西路）150m~200m 段

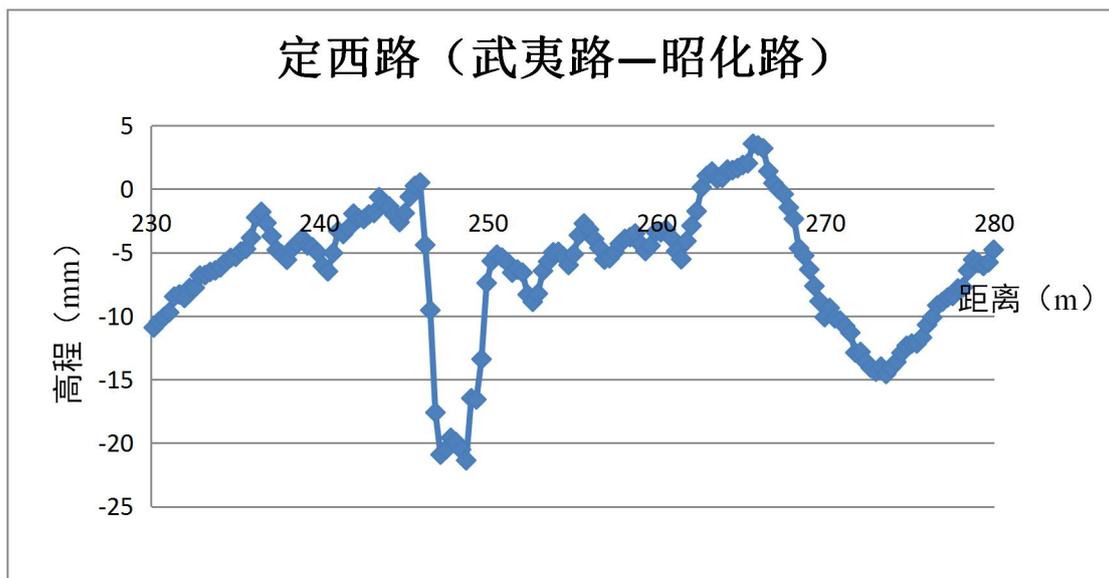


图 4-5 定西路（武夷路—昭化路）230m~280m 段

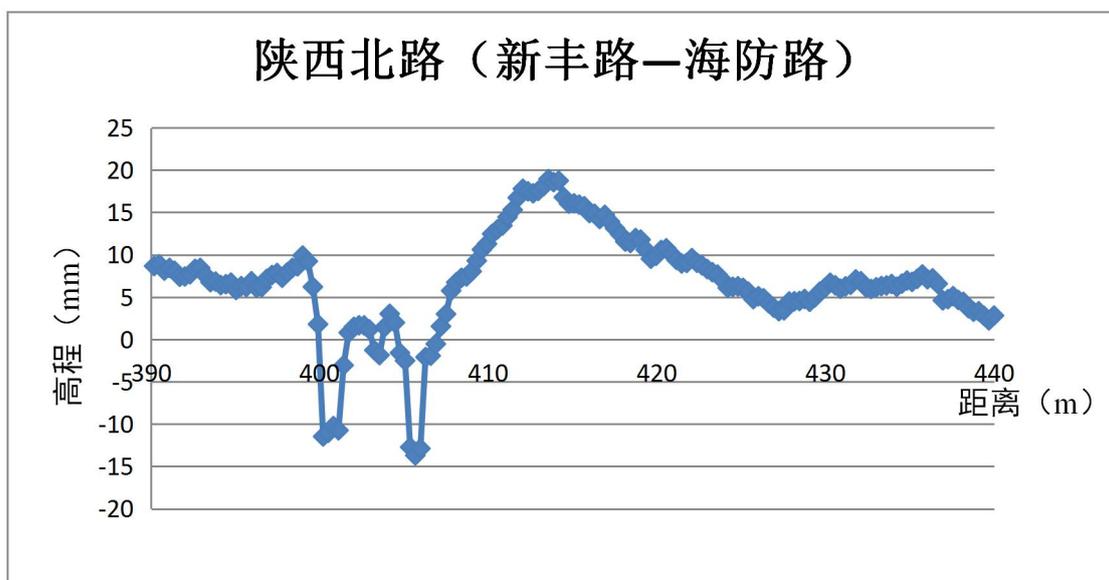


图 4-6 陕西北路（新丰路—海防路）390m~440m 段

对图像分析，我们可以发现：当路面上出现局部不平整时，该位置的高程值肯定出现在高程图像的最高点或者最低点，但是，是否所有图像的最高点和最低点都是局部不平整呢？如果该命题正确，则只要找到高程图像的最高点或者最低点就可以找到路面上的局部不平整；如果该命题不正确，则是否还要加上其他条件判断局部不平整位置。

为分析这个问题，从几百条道路中选出两段道路的数据进行对比，其中一段含有窞井，另一段路面无局部不平整。

表 4-1 为江苏路（愚园路-武定西路）路段 38m~47m 和 185m~195m 的实际检测数据，经过实地调查，38m~47m 段存在窞井盖，位于 45.0m~46.0m 之间，

而 185m~195m 段路面平整。依据这些数据生成高程图，如图 4-7、图 4-8。

表 4-1 江苏路（愚园路—武定西路）段高程数据

38m~47m 数据		185m~195m 数据	
距离 (m)	高程 (mm)	距离 (m)	高程 (mm)
38.00696423	3.852174796	185.1354859	15.07798508
38.15542893	4.084784832	185.2839506	16.35861933
38.30389364	3.713706829	185.4324153	16.55148163
38.45235834	3.866583206	185.58088	15.66166563
38.60082305	3.728128894	185.7293447	14.14534674
38.74928775	3.840931843	185.8778094	11.86024848
38.89775245	2.968311158	186.0262741	10.32085517
39.04621716	1.775738321	186.1747388	8.252455142
39.19468186	0.834642919	186.3232035	5.54330117
39.34314657	-0.001695526	186.4716682	2.588306821
39.49161127	-0.762506323	186.620133	-0.090984507
39.64007597	-1.975516253	186.7685977	-2.849378565
39.78854068	-4.205689014	186.9170624	-5.562002147
39.93700538	-7.421292028	187.0655271	-8.414806678
40.08547009	-22.05325141	187.2139918	-10.61157135
40.23393479	-27.98712054	187.3624565	-12.54774434
40.38239949	-30.67997467	187.5109212	-14.13683638
40.5308642	-34.8095583	187.6593859	-15.33397492
40.6793289	-37.05696428	187.8078506	-16.36233531
40.82779361	-41.75058798	187.9563153	-17.7919839
40.97625831	-21.41540821	188.10478	-20.04058892
41.12472301	-17.33271096	188.2532447	-22.00975652
41.27318772	-10.89974014	188.4017094	-23.32455548
41.42165242	-7.795406551	188.5501741	-23.84681116
41.57011713	-5.176929692	188.6986388	-24.08146669
41.71858183	-4.225723522	188.8471035	-24.3308856
41.86704653	-3.394447268	188.9955682	-24.19293198
42.01551124	-3.241237398	189.1440329	-24.22445101
42.16397594	-2.576614015	189.2924976	-23.66867489
42.31244065	-0.95976904	189.4409623	-23.22868586
42.46090535	-0.232155139	189.589427	-23.19202286
42.60937005	-1.231826313	189.7378917	-22.02116378
42.75783476	-2.974102482	189.8863564	-20.8275854
42.90629946	-4.636042928	190.0348211	-19.58400795
43.05476417	-4.553659021	190.1832858	-18.08921666
43.20322887	-3.26152566	190.3317506	-17.23927793

43.35169357	-2.34061375	190.4802153	-16.66395156
43.50015828	-1.164310502	190.62868	-16.14778284
43.64862298	-0.046031112	190.7771447	-15.46336674
43.79708769	-1.499555992	190.9256094	-14.26208371
43.94555239	-2.465213581	191.0740741	-12.9994798
44.09401709	-4.219357793	191.2225388	-10.74151483
44.2424818	-3.125663372	191.3710035	-8.623725174
44.3909465	-1.051606538	191.5194682	-7.203880251
44.53941121	0.071315338	191.6679329	-5.567392142
44.68787591	0.170543504	191.8163976	-4.065034692
44.83634061	-8.290259093	191.9648623	-2.679716845
44.98480532	-25.00215414	192.113327	-0.429828848
45.13327002	-26.58641478	192.2617917	1.051804464
45.28173473	-27.43893535	192.4102564	2.834758198
45.43019943	-26.06683244	192.5587211	4.457335237
45.57866413	-25.5849442	192.7071858	5.781611959
45.72712884	-24.64203016	192.8556505	6.656031103
45.87559354	-13.41673077	193.0041152	8.429241563
46.02405825	-5.981718859	193.1525799	10.09322479
46.17252295	-4.935502642	193.3010446	12.13537362
46.32098765	-3.659349753	193.4495093	13.21113803
46.46945236	-0.887045354	193.597974	13.69368651
46.61791706	1.024118594	193.7464387	14.37098215
46.76638177	2.236686237	193.8949035	14.52848764
46.91484647	3.472450247	194.0433682	14.29124838
47.06331117	4.275469705	194.1918329	14.12154831

依据这些数据生成高程图，如图 4-7、图 4-8。

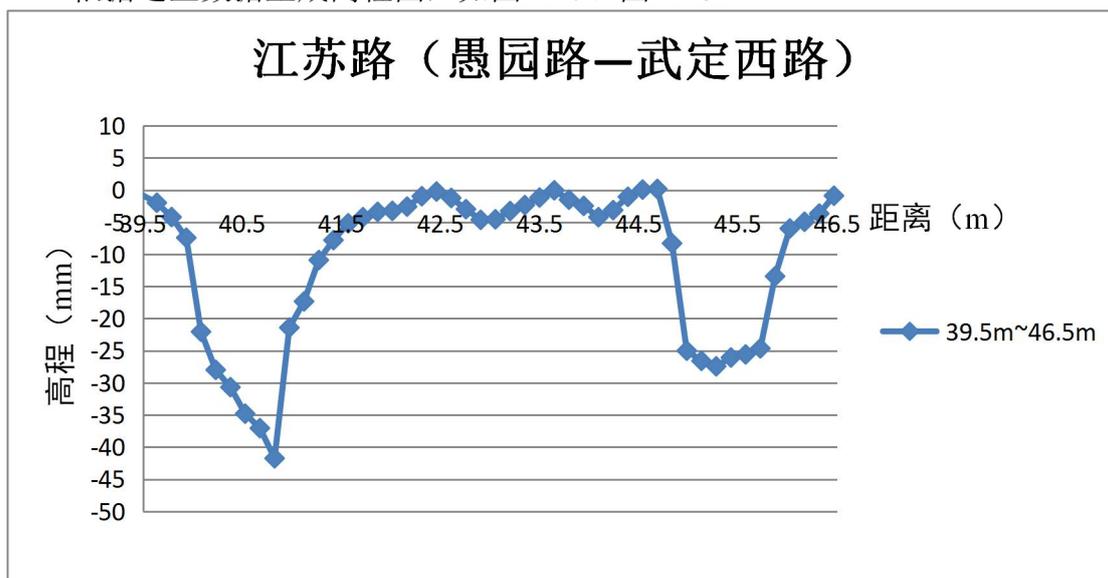


图 4-7 江苏路（愚园路—武定西路）39.5m~46.5m 高程图

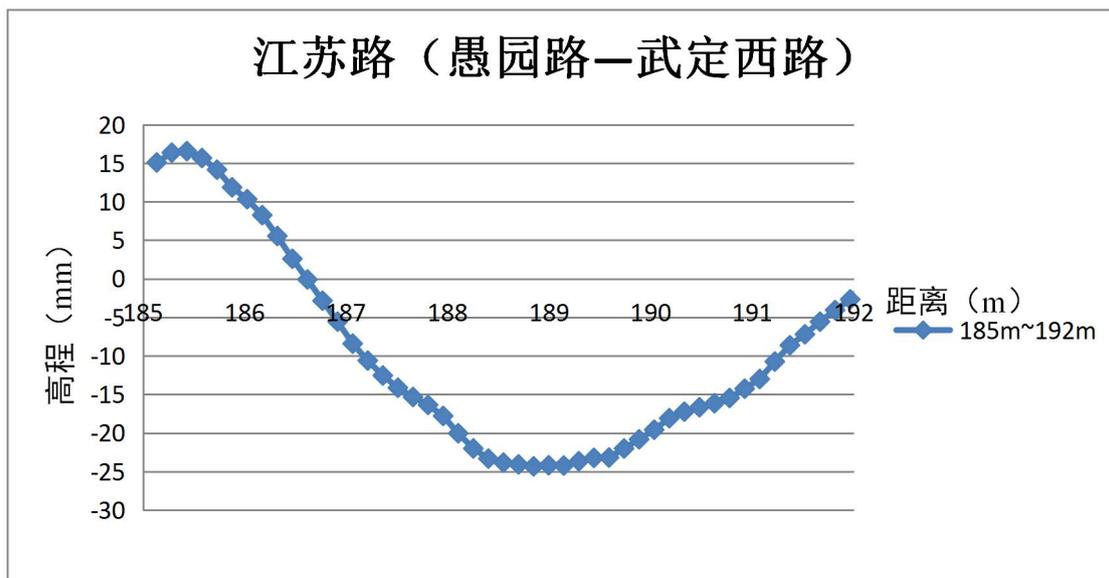


图 4-8 江苏路（愚园路—武定西路）185m~192m 高程图

分析两幅高程图，其最低点高程值均在-25mm左右，相差不大，但是图 4-7 在红色标记范围内存在窞井，图 4-8 所示路面非常平整，说明并不是所有高程图像的最高点和最低点都是局部不平整。仔细观察两张图像的区别，存在窞井不平的路面，其高程值出现突变的特征，并且高程值分布比较稀疏，而平整的路面，其高程值是连续变化的。

因此，根据以上分析结果，得出存在局部不平位置的断面高程曲线有如下 2 个特征：

- 1、局部不平整位于高程图像的最高点或者最低点；
- 2、高程值存在突变的特征。

4.3 基于相邻高程差研究道路局部不平整

为了从数学上表示出高程值突变的特征，我们用所测高程数据相邻两点间的高程差来反应局部不平整，该差值指后点的高程减前点的高程，本研究把这个差值称为相邻高程差。通常局部不平整对行车舒适性的影响多是由相邻高程差的突变所引起的，同时，运用相邻高程差受到路面本身高程情况影响也会相对较小，便于推广应用。

4.3.1 理论上局部不平整处相邻高程差的特征

通常，城市道路路面上存在局部不平整主要可分为：局部凹陷和局部凸起两大类。其中，局部凹陷包括窞井凹陷不平，路面沉陷等；而局部凸起则包括

窞井凸起不平，修补不平，以及过街掘路等。下面从理论上分析凹陷与凸起在相邻高程差图像上的表现特征。

在理想状况下，理论上路面局部凹陷的相邻高程差图像如图 4-9 所示。以距离为横坐标，相邻高程差为纵坐标绘制相邻高程差曲线，规定相邻高程差（后点高程减前点高程）对应前点距离值。当路面平整时，图像为近似与零点线重合的直线，当出现凹陷时，相邻高程差先出现一个负的很大值，后出现一个正的很大值。

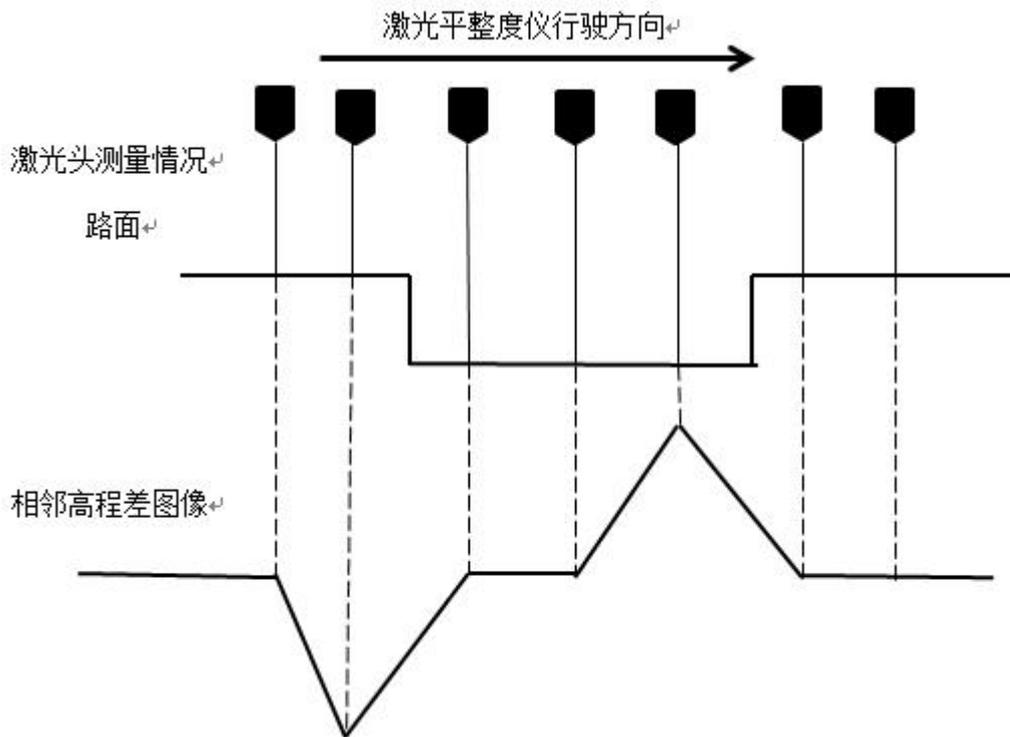


图 4-9 理论上局部凹陷的相邻高程差图像

同样，在理想状况下，理论上路面局部凸起的相邻高程差图像如图 4-10 所示。与路面凹陷有相似的规律。

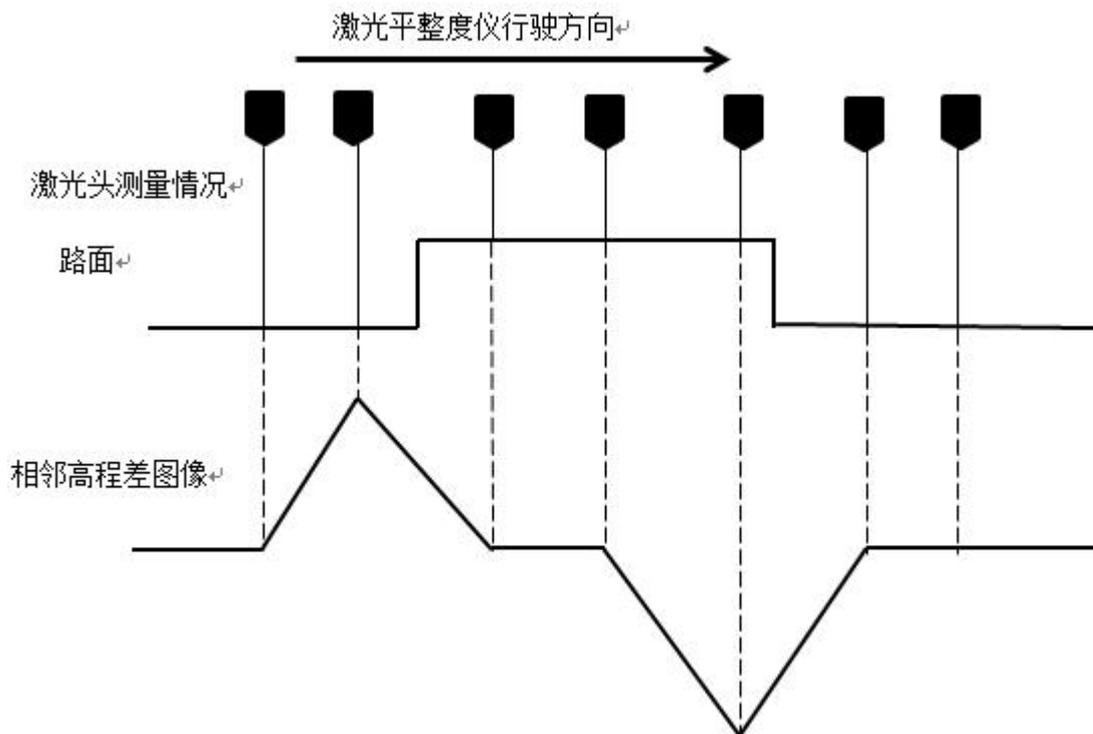


图 4-10 理论上局部凸起的相邻高程差图像

4.3.2 高程测量实验

为了验证理论分析的正确性，可以按照之前道路调查结果，找出存在窞井与修补的路段，然后依据上海市路政局提供的 2014 年道路检测数据分析，当路面上出现窞井或修补是其相邻高程差图像特征与理论分析是否一致，但是，上海市路政局提供的数据存在以下问题：

首先，上海市路政局的测量数据按路段划分，但每段路段的测量起点并不明确，这就造成实际路面上的窞井（或修补）与图像上很难对应起来；

其次，每段道路上分为多条车道，而检测数据中每段道路只测量了一组数据，即以一条车道的数据代表整段道路的数据，当时测量的是哪一条车道也没有说明，要判断哪一条车道比较困难；

最后，就算该段道路只有一条车道，路面上随机分布着窞井和修补，激光平整度仪每次测量不可能覆盖所有的窞井和修补，而当时激光平整度仪当时的行车轨迹也不得而知，所以造成数据与实际路面对应起来很困难。

因此，为精确研究路面的相邻高程差图像，本文设计了高程测量实验，该实验通过用激光平整度测量特定路段（含有窞井与修补的路段）的高程值，并保证激光平整度仪的激光头扫过事先选好的窞井和修补，分析测量所得数据在窞井和修补处的图像规律，验证之前理论分析是否正确，具体过程如下。

一、路段选择:

首先, 所选路段线路笔直, 保证在激光平整度仪测量时可沿直线行驶;

其次, 路上车辆较少, 可以保证仪器在测量过程中匀速行驶, 车辆在不同路段上行驶时速度会不断发生变化, 产生加速和减速运行的情况, 加速的变化直接影响到乘客的行驶舒适性^[47], 所以测量时应保持激光平整度仪匀速;

最后, 所选的窞井或修补凹凸量分为 3 个层次: 凹凸量明显、凹凸量稍不明显、凹凸量不明显。

前两个条件是为了排除其他因素对实验的干扰, 例如, 若线路弯曲时, 测量结果可能受路面横向凹凸量的影响。第三个条件是为了研究相邻高程差是否存在临界值, 根据理论推断, 相邻高程差存在一个临界值, 当路面高程的相邻高程差超过临界值范围时, 车辆驶过该路面会产生颠簸引起不舒适性, 当路面高程的相邻高程差在临界值范围内时, 则车辆驶过该路面不会引起不舒适的反应。因此, 本研究选择三个层次的凹凸量观察, 当路面凹凸量不明显时其图像特征是否有差异。

最后, 从上海市 400 多条道路中选出 11 条路段, 其中 7 条含有窞井, 4 条含有修补, 如表 4-2:

表 4-2 高程测量实验所选的 8 条路段

路段	局部不平整类型	局部不平整个数及位置
江苏路 (愚园路—武定西路)	窞井	40.2m, 44.9m, 302.4m
江苏路 (武定西路—愚园路)		58.3m
愚园路 (江苏路—镇宁路)		30.8m, 33.2m
新闸路 (镇宁路—万航渡路)		197.8m, 234.9m
北京西路 (温州路—长沙路)		10.9m, 14.2m
北京西路 (长沙路—新闸路)		10.4m, 12.8m, 90.2m, 95.7m
四川北路 (海伦西路—多伦路)		14.3m, 30.4m, 34.1m
新闸路 (泰兴路—石门二路)	修补	54.5m (3.7m), 82.6m (6.4m)
陕西北路 (新丰路—海防路)		30.4m (1.2m)
定西路 (武夷路—昭化路)		11.2m (5.9m), 43.7m (4.2m)
定西路 (法华镇路—新华路)		52.4m (1.4m)

表 4-2 中, “局部不平整个数及位置” 栏数据表示窞井 (或修补) 在该路段距离起点的距离及个数, 当局部不平整类型为窞井时, 该栏显示窞井到起点的距离, 每个窞井之间用逗号隔开, 例如, 在江苏路 (愚园路—武定西路) 段

存在3个窞井，其距起点的距离分别为13.4m、16.7m、37.1m；当局部不平整类型为修补时，该栏显示的数据表示修补到起点的距离及修补长度（括号内为修补长度），例如，在新闻路（泰兴路—石门二路）段存在2处修补，第一处修补开始位置距起点为54.5m，该修补长度为括号中的3.7m，第二处修补开始位置距起点为82.6m，相应的该处修补长度为6.4m。

二、实验过程：

1、在路段上规定一个起点，起点之前有一段加速距离，保证激光平整度仪加速到一定速度行驶过规定区域；

2、道路两旁安排检测人员观察，确保激光平整度仪的激光头扫过所指定的窞井（或修补），若没有扫过，则重新测量；

3、用滚轮测距仪测量起点到窞井（或修补）的距离，对于修补还要测出其长度，结果在表4-2中。

三、结果分析

分析各路段测量所得的高程值，并绘出相邻高程差图像，分析图像在窞井（或修补）出存在的特征与理论分析是否一致，首先分析窞井不平的图像特征，以下是窞井处的相邻高程差图像，其中凹凸量明显的窞井如图4-11、图4-12，凹凸量稍不明显的窞井如图4-13、图4-14，凹凸量不明显的窞井如图4-15、图4-16。

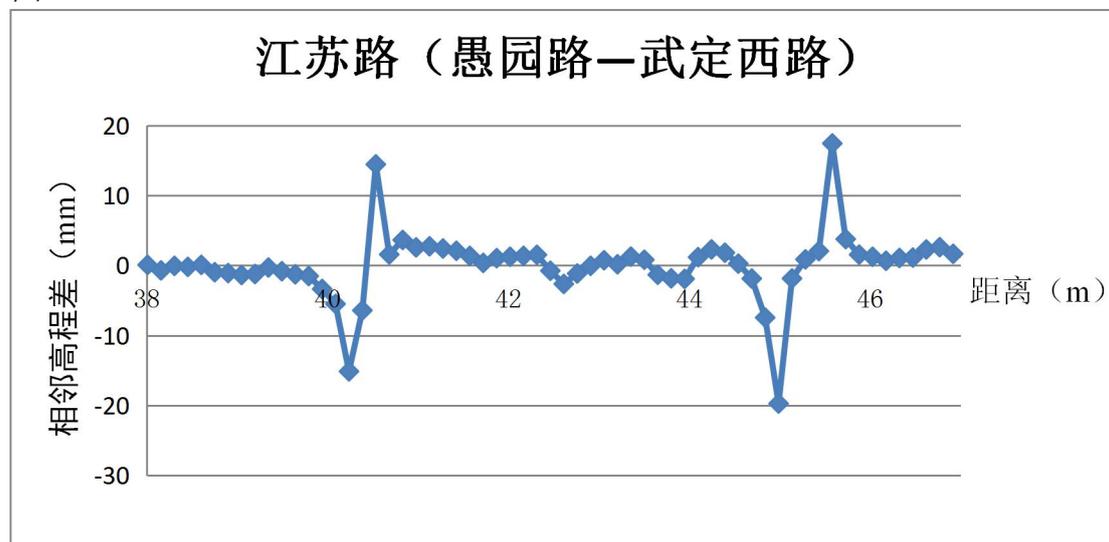


图4-11 江苏路（愚园路—武定西路）38m~47m

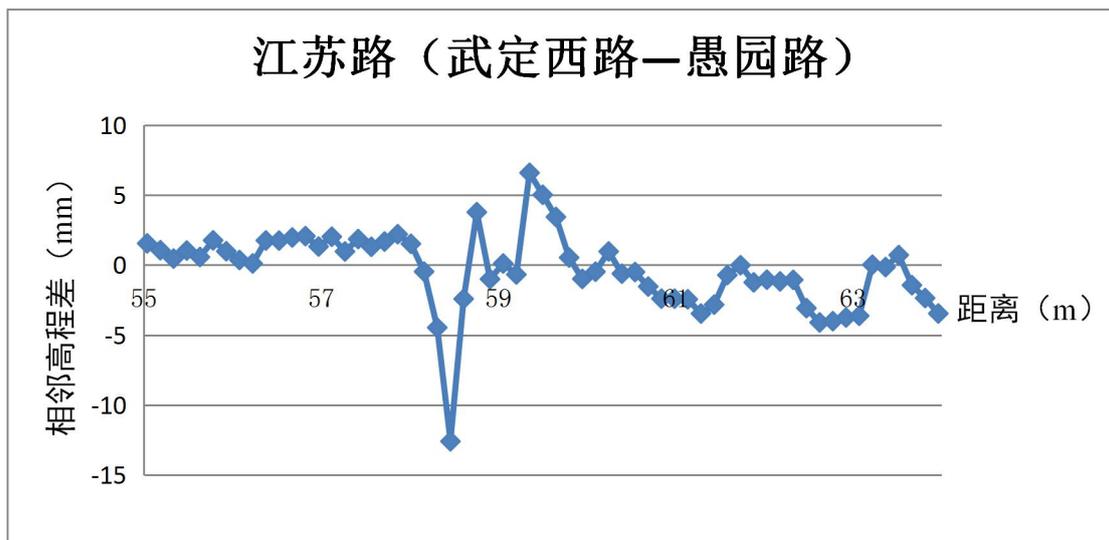


图 4-12 江苏路（武定西路—愚园路）55m~64m

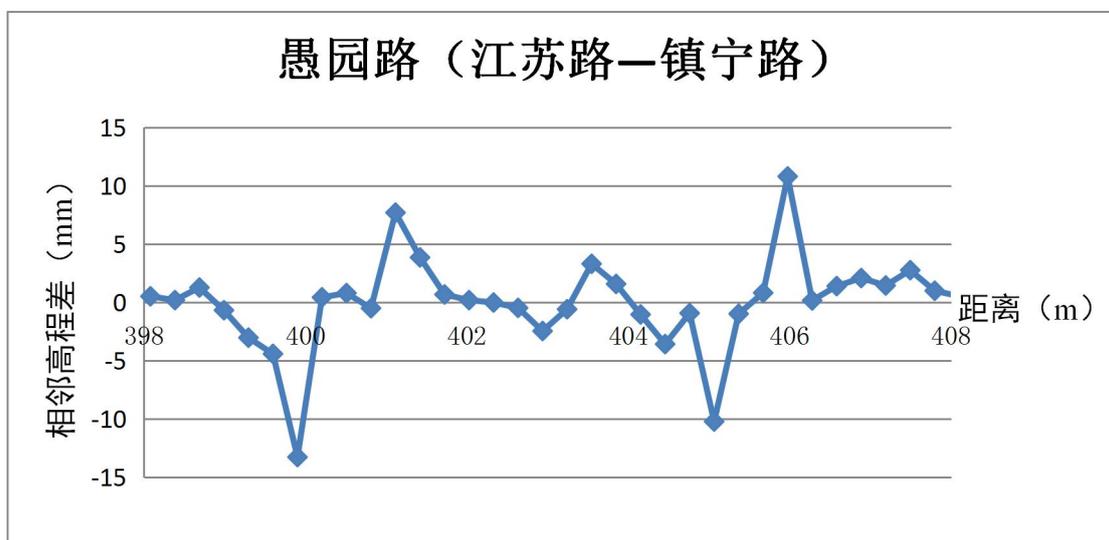


图 4-13 愚园路（江苏路—镇宁路）398m~408m

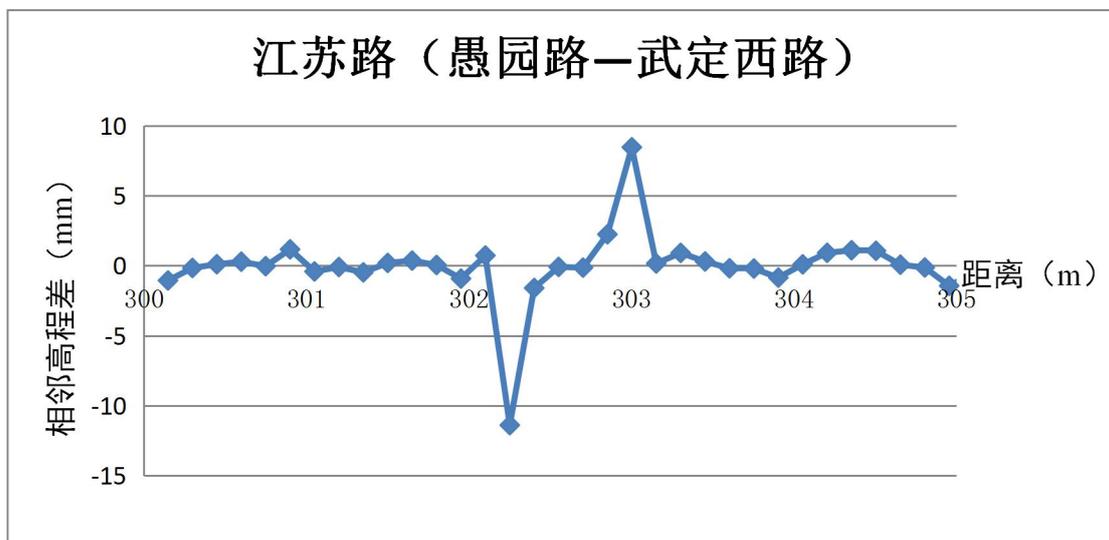


图 4-14 江苏路（愚园路—武定西路）300m~305m

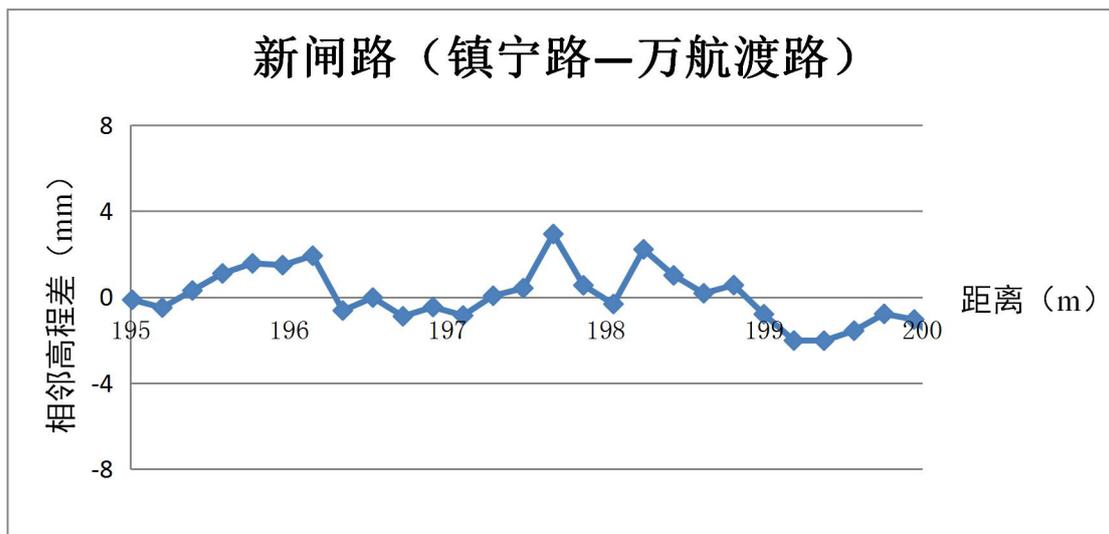


图 4-15 新闸路（镇宁路—万航渡路）195m~200m

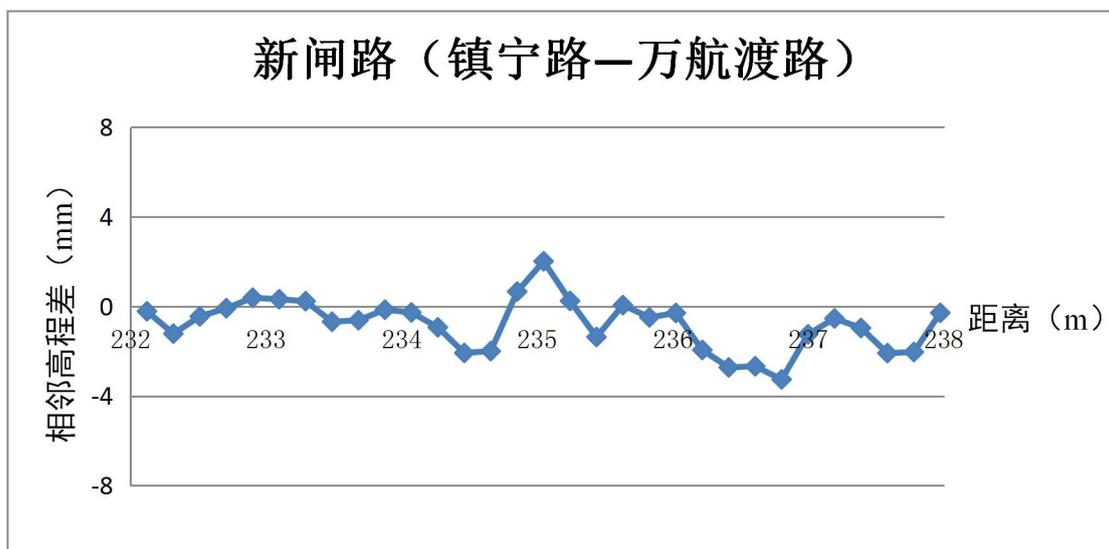


图 4-16 新闸路（镇宁路—万航渡路）232m~238m

从以上图像可以看出，当窞井凹凸量明显时，窞井不平位置处的图像与之前理论分析的相似，在其他位置（不含已经的位置），路面相邻高程差图像也有轻微的波动，这是因为沥青路面不是完全平整的，颗粒之间间距的存在，使得相邻高程差图像有轻微的波动，而在出现窞井时，其波动比较明显，并且表现出一定的规律性；当窞井凹凸量稍不明显时，在窞井不平处也表现出相似的规律性，只是最大值和最小值的绝对值比窞井凹凸明显时要小，平整路面也是相似的轻微波动；当窞井的凹凸量不明显时，窞井不平位置的图像特征不太明显，并且该处图像更像是平整路面的图像。

所以可得出结论：相邻高程差存在临界值，当路面相邻高程差超过这个临界值是，车辆驶过时会引起不舒适性，并且在图像上表现出不同于平整路面的

图像特征；当相邻高程差在临界值范围内时，车辆驶过不会引起不舒适性。而对修补不平图像特征的研究没有得出明确结论。

4.3.3 临界值

为了找到相邻高程差的临界值，从前面上海市城市道路路面情况调查的400多条路段中选出36条路面平顺且没有局部异常不平整的路段，再根据格林伍德路面激光断面测试仪所测的断面高程数据，计算出相邻两个测点之间的纵断面相邻高程差的绝对值，统计出各个路面平整的路段高程变化绝对值变化幅度的范围。从而得出正常情况下，无明显局部不平整的路段，其路面的纵断面相邻高程差变化幅度范围如表4-3所示：

表 4-3 平整路面高程变化范围统计表

序号	路段		取值范围	
			最大值	最小值
1	河南中路		最大值	1.5377
	江阴街	中华路	最小值	0.0002
2	宁夏路		最大值	3.5081
	中山北路	凯旋北路	最小值	0.0002
3	白玉路		最大值	1.7200
	顺义路	隆德路	最小值	0.0002
4	西康路		最大值	2.9492
	澳门路	宜昌路	最小值	0.0005
5	中山北路		最大值	2.8908
	武宁路	曹杨路	最小值	0.0003
6	四川中路		最大值	3.3238
	九江路	汉口路	最小值	0.0005
7	中山北路		最大值	3.2367
	武宁路	曹杨路	最小值	0.0002
8	西藏东路		最大值	3.0987
	延安东路	福州路	最小值	0.0004
9	徐家汇路		最大值	2.8783
	肇周路	顺昌路	最小值	0.0002

10	肇周路		最大值	3.6616
	大吉路	建国兴路	最小值	0.0010
11	武宁路		最大值	1.7753
	兰溪路	曹杨路	最小值	0.0004
12	北京西路		最大值	1.9457
	西康路	陕西北路	最小值	0.0002
13	南京西路		最大值	2.1530
	陕西北路	江宁路	最小值	0.0004
14	长寿路		最大值	1.5871
	江宁路	昌化路	最小值	0.0007
15	泰兴路		最大值	1.2475
	昌化路	武定路	最小值	0.0013
16	延平路		最大值	1.9840
	武定路	康定路	最小值	0.0002
17	虬江路		最大值	2.5898
	西藏北路	会文路	最小值	0.0001
18	北京西路		最大值	2.3141
	常德路	胶州路	最小值	0.0009
19	延安西路		最大值	3.1184
	石门一路	重庆中路	最小值	0.0004
20	延安西路		最大值	1.5377
	重庆中路	成都北路	最小值	0.0002
21	恒丰路		最大值	3.5081
	长安路	光复路	最小值	0.0002
22	长安路		最大值	1.7200
	恒丰路	民立路	最小值	0.0002
23	芷江支路		最大值	2.9492
	华昌路	东宝兴路	最小值	0.0005
24	塘沽路		最大值	3.7908

	长治路	大名路	最小值	0.0003
25	浙江中路		最大值	3.3238
	宁波路	湖北路	最小值	0.0005
26	人民大道		最大值	3.2367
	福州路	西藏中路	最小值	0.0020
27	长阳路		最大值	3.0987
	周家嘴路	保定路	最小值	0.0004
28	通北路		最大值	2.8783
	唐山路	长阳路	最小值	0.0002
29	黄兴路		最大值	3.6616
	眉州路	长阳路	最小值	0.0010
30	长岭路		最大值	1.7753
	抚顺路	延吉路	最小值	0.0004
31	延吉路		最大值	1.1422
	长岭路	黄兴路	最小值	0.0002
32	南昌路		最大值	2.1856
	重庆中路	重庆南路	最小值	0.0003
33	番禺路		最大值	3.0845
	南丹东路	虹桥路	最小值	0.0007
34	瑞金南路		最大值	1.2087
	中山南二路	翟溪路	最小值	0.0004
35	重庆中路		最大值	2.1987
	陆家浜路	建国东路	最小值	0.0002
36	中华路		最大值	2.7825
	肇周路	方斜支路	最小值	0.0008

由表格可知，正常情况下，无明显局部不平整的路段，其平整路面的纵断面相邻高程差变化幅度在 0.0001mm 到 3.7908mm 之间，相邻两点间的相邻高程差绝对值最大不超过 4mm，而临界值的精度不需要太精确，可以规定为 1mm，因此，根据以上统计分析得出，选用纵断面相邻高程差为 4mm 作为路面局部不

平整存在与否的临界值,也即相邻两测点间相邻高程差绝对值不超过 4mm 的路面,可以视为较平整且无明显局部异常不平整的路面状况良好路段。

4.3.4 窞井不平处相邻高程差的数据特征

根据以上分析结果,我们可以得出当路面出现窞井时,该处路面相邻高程差值的特征:(在此以凹陷的窞井为例进行说明,)

1、用 y 表示相邻高程差值, y 从 $(-4, 4)$ 范围变化到 $(-\infty, -4)$ 范围,在后面 1m 区域内,存在 y 从 $(-4, 4)$ 变化到 $(4, +\infty)$,如图 4-17;

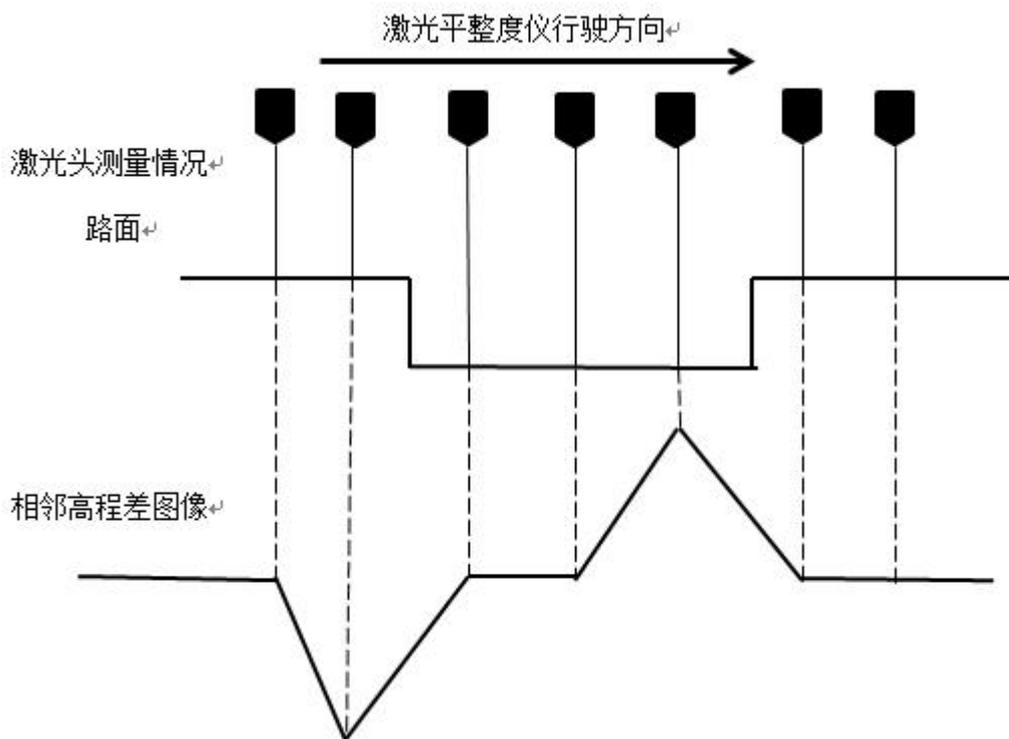


图 4-17 窞井凹陷时相邻高程差图像特征

2、另一种情况, y 从 $(-4, 4)$ 向下突变到 $(-\infty, -4)$, 然后直接突变到 $(4, +\infty)$, 如图 4-18。

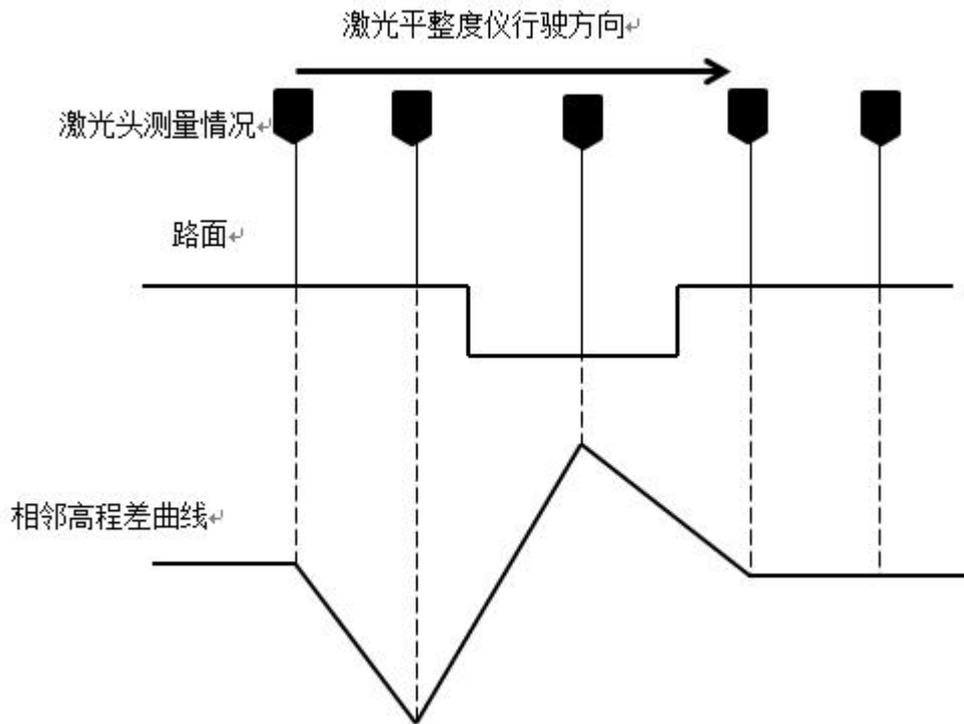


图 4-18 情况 2 的实际测量情况

这种情况可认为当窨井较小时，或者激光扫过窨井的边缘，激光只在窨井凹陷部分留下一个测量的点，所以才会在最高点和最低点之间没有过渡的点。

但是，对于路面上的修补不平，目前还没有明确的数据特征。经过分析，以下几个原因导致数据特征不明确：

- 1、路面上修补的长度是不确定的，而窨井的直径是确定在 1m 范围内，这导致相邻高程差图像上两个相反的尖角之间不知道是修补还是在两块修补之间；
- 2、修补的边缘也并不是和窨井一样的高程直接变化，而是有有一段缓和段，其高程是缓和变化的，如图 4-19；



图 4-19 路面修补

3、路面上的交通标志及斑马线对判断也有影响，因为交通标志及斑马线的边缘和修补的边缘相似，如图 4-20。



图 4-20 路面交通标志线

所以，要得出修补不平处路面相邻高程差的数据特征还需要更加深入的研究。本文接下来仅研究当路面存在窞井时的城市道路。

4.4 利用 Matlab 程序识别窞井位置

根据上一节得出的窞井位置高程值的数据特征，可设计出 Matlab 程序自动识别路段上窞井位置并得出窞井个数，则只要将一段道路的高程值输入该程序，输出的是路段上窞井的个数及位置，这样可以提高人工分析数据的工作效率，并且该方法利于推广，Matlab 程序见附录 B。

为了验证 Matlab 程序计算的准确性，本研究从上海市市区道路中选出 4 条存在不同程度凹陷的窞井的路段，联系到上海市路政局借出其激光平整度仪，类似上述高程测量实验的实验方法测量该 7 段路段的高程数据，具体操作方法如下：

- 1、选择实验路段的条件同上述高程测量实验，所选路段如表 4-4。

[47] 黄艳国，康裕荣，许伦辉. 基于道路线型的加速度干扰与行车舒适性分析. 中外公路, 2011,31 (3): 287-290.

表 4-4 程序验证实验路段

路段	窞井个数及位置
北京西路（黄河路—温州路）	12.3m, 15.5m
西藏北路（永兴路—虬江路）	6.8m
西藏北路（青云路—芷江中路）	12.5m, 15.1m
威海路（成都北路—重庆北路）	24.8m, 26.4m

表中“窞井个数及位置”栏的数据意义同表 4-2 中“局部不平整个数及位置”栏的数据意义。

2、实验过程同上述高程测量实验，得出 7 段路段的高程数据，把高程数据输入 Matlab 程序，得出结果，结果与实际情况对比如表 4-5 所示。

表 4-5 Matlab 程序计算结果与实际情况对比表

路段	窞井位置	所用激光器	程序输出位置	相差
北京西路（黄河路—温州路）	12.3	4	10.1536	2.1464
	15.5	4	13.6586	1.8414
西藏北路（永兴路—虬江路）	6.8	5	5.3456	1.4544
西藏北路（青云路—芷江中路）	12.5	2	13.3789	0.8789
	15.1	2	17.5772	2.4772
威海路（成都北路—重庆北路）	24.8	4	27.4226	2.6226
	26.4	4	29.3164	2.9164

表 4-5 中，“窞井位置”栏数据为用滚轮测距仪人工测得的窞井距起点的距离，单位为米；“所用激光器”栏数据表示经过该窞井的激光器编号；“程序输出位置”栏数据为用 Matlab 程序分析高程数据所得窞井位置，单位为米，“相差”栏数据为“窞井位置”与“程序输出结果”两栏数据之差的绝对值。

从该表可以看出，4 段路共 7 处窞井，该 Matlab 程序也识别出 7 处窞井，但是程序所识别出的窞井是否就是实际的窞井（有可能程序识别出错误的窞井），为了验证程序识别出的窞井位置与实际窞井位置是否一致，从“窞井位置”与“程序输出位置”两栏数据对比发现，程序计算出的窞井的位置与实际位置相比有误差，误差最大为 2.9164 米，最小为 0.8789 米，误差来源主要包括：

1、在相邻高程差图像中，规定相邻高程差是与前点的距离值对应，这种规定就存在一定误差；

2、程序得出的窞井位置是按激光平整度仪的行驶轨迹计算出的长度，而实际窞井位置是用滚轮测距仪按映像中的激光平整度仪行驶轨迹测出的长度，映

像中的行驶轨迹与原行驶轨迹肯定存在误差。

基于以上两个原因，程序计算出的窞井位置与人工所测窞井位置存在误差是正常现象，由表 4-5 可看出二者相差并不大，因此可以判断用程序计算出的窞井就是实际存在的窞井，该程序正确率 100%。

4.5 本章小结

本章主要研究通过高程数据分析局部不平整的数据特征，主要运用图像的方法，以期找到出现局部不平整时的图像特征来直观找到局部不平整的位置。

- ✓ 对高程图像进行研究，找到局部不平整出高程图像的特征；
- ✓ 提出相邻高程差的概念，并且找到路面平整与不平整之间的相邻高程差临界值；
- ✓ 总结出窞井不平的相邻高程差图像特征。
- ✓ 设计出 Matlab 程序识别出路面上窞井的位置，并用实例验证该程序的可行性。

第 5 章 根据行驶舒适性对窨井不平整分级

通过上一章介绍的内容可以确定每一段路面上窨井的个数，由于不同高程差的窨井对路面行驶舒适性的影响并不相同，所以需要把不同高程差的窨井对行驶舒适性的影响进行分级，才能分清各等级窨井对行驶舒适性造成的影响，本章主要介绍这方面内容。

本章引用同济大学彭华在其论文中的研究成果，把窨井按行驶舒适性分为 6 个等级，并从人体反应时间的角度，论述实际对窨井不平整分等级时应注意的问题；然后分析了相邻高程差与窨井高差的关系。

5.1 窨井不平的分级标准

道路平整度不仅是车辆在行驶过程中的主要激励和振源，而且是车辆产生行驶阻力和振动的主要原因^[48]。在城市道路地下管线设计中，如果用地范围有限，为保证地下管线的合理布设，常常不得不将管线检查井设置在行车道上，行车道上的井盖周边由于存在填土难以压实的问题而经常出现不均匀沉降，使得行驶在行车道上的车辆在井盖位置经常发生跳车现象，这类现象大大降低了车辆行驶的舒适性，因此，道路行驶舒适性的评价应必须对井盖引起的跳车现象给予足够重视^[49]。

根据同济大学彭华论文的结论，窨井处的路面高程差与行驶舒适性存在如下关系：

表 5-1 窨井不平处的路面高差与行驶舒适性的关系

等级	A	B	C	D	E	F
窨井周围高程差 (cm)	0~0.3	0.3~0.5	0.5~0.8	0.8~1.5	1.5~2.1	>2.1
主观感受	保持舒适	稍不舒适	有些不舒适	不舒适	非常不舒适	特别不舒适

根据表 5-1 可以看出，不同高差的窨井不平整对路面的行驶舒适性影响不同，按照这个标准，可以按高程差对路面的窨井不平分成 6 级，不同等级对行驶舒适性影响不同，高程差越大，路面行驶越不舒适。并且，为以后表述和计算方便，表中把各等级命名为 A~F 等级，A 等级为最舒适的等级，F 等级为最

不舒适的等级。

车辆驶过窞井盖的时候会经历连续两次跳车,人体会产生两次不舒适反应,但是车辆在井盖表面停留时间非常短,例如,当车辆以行车速度 80km/h 驶过井盖,井盖宽度为 60cm,车轮仅在井盖上停留 0.027 秒,而人的反应时间最短为 0.1 秒,所以,在车轮驶过井盖的时候,人体会经历非常快速的两次振动,但是只能人体只能感受到其中一次振动,也即车辆驶入井盖表面时的振动。在实际确定窞井盖不平整等级时,以车辆行驶方向为方向,以车辆驶入井盖表面时的高程差所对应的不平整等级为该窞井盖的不平整等级。

5.2 相邻高程差与窞井高差的关系

前面已经介绍过,相邻高程差为用激光平整度仪测得的路面相邻两点间高程差,窞井高差是窞井最低位置与路面之间的高差,相邻高程差和窞井高程不一定相等,因为相邻高程差是用激光平整度仪测量出的数据所得,精度较高,即使是路面构造深度引起高程的微小波动也能表现出来,所以得出的相邻高程差值包含了路面构造深度的影响;而窞井高差指路面的一般高程与窞井高程差,它是一个宏观量,不涉及路面构造深度的影响,因此,需要知道两者相差是否很大,才能确定是否可通过相邻高程差值判断窞井等级。

为研究相邻高程差与窞井高差的关系,人工测量之前做高程测量实验所选出的窞井高差,测量方法是把长直尺横跨窞井放在路面上,用另一短直尺垂直长直尺并垂直地面放置,读取短直尺上井盖表面到直尺的长度。测得高程后与激光平整度仪所得相邻高程差值对比,分析两个值之差,若两个值相差较大,则可考虑通过回归确定一个关系式;若两个值相差较小,则可以认为两个值相等。测量值(窞井高差)与激光平整度仪测量值(相邻高程差)对比如表 5-2,单位:毫米。

表 5-2 窞井高差与相邻高程差对比表

路段	窞井序号	窞井高差	相邻高程差	差异
江苏路(愚园路—武定西路)	1	7.9	7.52	0.38
	2	12.1	12.59	0.49
江苏路(武定西路—愚园路)	1	9.8	10.21	0.41
愚园路(江苏路—镇宁路)	1	8.5	8.82	0.32
	2	9.3	9.86	0.56
北京西路(黄河路—温州路)	1	7.4	7.23	0.17
	2	7.9	7.69	0.21

北京西路（温州路—长沙路）	1	8.5	8.92	0.42
	2	7.3	7.76	0.46
北京西路（长沙路—新闻路）	1	8.4	8.56	0.16
	2	7.6	7.21	0.39
	3	7.9	7.36	0.54
	4	5.1	4.95	0.75
西藏北路（永兴路—虬江路）	1	6.5	6.90	0.40
西藏北路（青云路—芷江中路）	1	6.8	6.97	0.17
	2	7.3	7.58	0.28
四川北路（海伦路—多伦路）	1	6.4	6.68	0.28
	2	14.8	14.46	0.34
	3	5.1	5.24	0.14
威海路（成都北路—重庆北路）	1	5.7	5.89	0.19
	2	6.3	6.74	0.44

表 5-2 中，“窞井序号”栏表示该窞井处于该段道路第几个，从路段起点开始数第 1 个窞井则序号为 1，以此类推；“窞井高差”栏表示人工用直尺测得的数据；“相邻高程差”栏表示激光平整度仪所测数据；“差异”栏表示前两者之差的绝对值。从“差异”栏数据可以看出窞井高程与相邻高程差相差不大，其差值最大不超过 1 毫米，在误差允许范围内，因此可认为二者相等。

因此，根据该分级方法，也可设计出 Matlab 程序判断路面上窞井处于哪个等级，并可与上一章的识别程序合并为一个程序，见附录 B。

5.3 本章小结

本章主要介绍把不同高程差的窞井对行驶舒适性的影响进行分级，引用了同济大学彭华的研究成果，并研究了是否可用激光平整度仪所测的相邻高程差来表示窞井高程差，具体内容如下：

✓ 以加权加速度均方根值为桥梁，推导出窞井周围铺面高程差与行驶舒适性的关系，并且从人体反应时间的角度，论述了车辆驶过窞井盖的两次振动简化为一次振动；

✓ 通过实际测量的窞井高程差与激光平整度仪所测的相邻高程差进行对比，分析二者的差异性，得出二者之差在误差允许范围内。

至此，路面窞井不平整的位置及其不平整等级都可以通过以上所论述的理

论方法确定，并且可以运用 Matlab 程序批量计算，接下来将研究路面国际平整度指数 IRI 的修正公式。

[48] 王超逸. 基于多重分形特征的道路平整度评价研究[硕士学位论文]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2012.

[49] 单景松, 元松. 局部不平整引起的车路动态响应分析. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2010, 34 (5) 990-994.

第 6 章 考虑窞井的城市道路平整度评价方法

经过前面的介绍，我们已经可以通过路面高程数据得出路面上窞井的个数和位置，及其对行驶舒适性造成影响的等级，不同等级的窞井对路面行驶舒适性的影响不同，本章将根据这个原理提出路面平整度修正公式，把原有与实际情况不符的 IRI 值修正为更符合实际情况的 IRI 值，由此得出城市道路平整度评价新方法。

6.1 修正公式

本文引言部分已经提出，在运用现有城市道路平整度评价方法对城市道路平整度评价时，存在一些情况下 IRI 所反映的道路行驶舒适性情况与实际不符的问题，并得出产生该问题的原因：由于城市道路上存在大量局部不平整（如窞井），使得车辆驶过该区域产生突然振动严重影响舒适性，而现有城市道路平整度评价方法的 IRI 值是以路段为单位计算的，该 IRI 值反应的是路段平整度平均水平，局部不平整对该 IRI 值影响不大，所以会造成路面的 IRI 值表现出路面整体较平整，但是实际行驶过程的感受却并不良好的结果。本研究为了解决这个问题，对现有路段 IRI 值进行修正，即附加上局部不平整对其的影响，使其更符合实际情况，具体修正公式如下。

设路段原始 IRI 值为 IRI_0 ，修正后的 IRI 值为 IRI' ，两个值之间有如下关系：

$$IRI' - IRI_0 = \frac{B \cdot \Delta h_B + C \cdot \Delta h_C + D \cdot \Delta h_D + E \cdot \Delta h_E + F \cdot \Delta h_F}{L}$$

其中，B、C、D、E、F 分别为该等级变形所对应的系数；

而 Δh_B 、 Δh_C 、 Δh_D 、 Δh_E 、 Δh_F 分别对应 B、C、D、E、F 各等级变形的窞井高差之和；L 为该段路段长度。

因为不同等级的窞井不平对 IRI 值的影响是不同的，所以分别计算 B、C、D、E、F 等级的窞井对 IRI 的影响再把它们叠加得到局部不平整对 IRI 的影响值，式中 $B \cdot \Delta h_B / L$ 即为 B 等级窞井对 IRI 值的影响，其余类似，而 A 等级的窞井并不影响行驶舒适性，所以不考虑在影响 IRI 值的范围之内。 Δh_B 、 Δh_C 、 Δh_D 、 Δh_E 、 Δh_F 可以通过 Matlab 程序计算每个等级窞井高差之和，具体程序见附录 B。系数 B、C、D、E、F 的计算可利用修正公式反算得出，例如，当一段道路仅存在 B 等级的窞井时，可以通过舒适性评分实验得出该段道路 RQI 值，由于 RQI 与 IRI' 存在线性关系可得出 IRI' ， IRI_0 则为激光平整度仪所测为已知，该段

道路只存在 B 等级窞井则 C、D、E、F 等级窞井对 IRI 值影响均为 0，利用修正公式即可计算出 B 值，C、D、E、F 值的计算类似。下一节将具体介绍 B、C、D、E、F 值的计算过程。

6.2 舒适性评分实验

根据从上海市路政局获得的数据，用 Matlab 程序分析找出分别只含有 B、C、D、E、F 等级窞井不平的路段，并且实地探勘该段道路哪条车道符合实验要求，然后召集实验人员，对这些路段的行驶舒适性进行实际感受，得出 RQI 值，以下介绍具体实验设计。

6.2.1 实验路段选择

所选路段应具有代表性，能代表一般路面的平整度情况及路面线型，而不应找特别另类的路段，比如上下坡度大或者线型弯曲严重，本研究所选路段符合以下条件：

1、路段长度应大于 100m，并且路段上只存在 1 个某一等级的窞井，例如，一段道路上有 1 个 B 级窞井和另一段道路有 2 个 B 级窞井其 RQI 值不同，最后计算得出的 B 值不同，为了得出纯粹的 B 级窞井对 IRI 的影响，必须保证路段上只存在 1 个 B 级窞井；

2、路段线型对舒适性也有影响^[50]，因此线型尽量直线，不需要太大弯曲，也要避免上下坡的道路，上下坡会影响测试人员对行驶舒适性的感受；

3、选择车辆少的路段，因为速度会影响行驶舒适性，因此实验时应保证车辆保持在合适的速度匀速行驶，由于城市道路的一般行车速度在 30km/h 到 50km/h 之间，所以本实验所用速度为 40km/h^[51]。

根据以上条件，所选路段信息如表 6-1。

表 6-1 舒适性评分实验路段信息表

编号	窞井不平等级	路名	段起点	段终点
1	B	武宁路	曹杨路	中宁路
2	B	大渡河路	云岭东路	怒江路
3	B	长寿路	陕西北路	西康路
4	B	威海路	陕西北路	茂名北路
5	C	长宁路	威宁路	天中路

6	C	武宁路	中山北路	中宁路
7	C	花溪路	枫桥路	兰溪路
8	C	常德路	康定路	武定路
9	C	虹桥路	虹梅路	剑河路
10	D	大连西路	天宝路	四平路
11	D	四平路	新嘉路	吴淞路
12	D	平塘路	甘溪路	仙霞西路
13	D	仙霞路	可乐路	协和路
14	E	长宁路	凯旋路	中山北路
15	E	安义路	常德路	铜仁路
16	E	大连路	曲阳路	密云路
17	E	虹桥路	剑河路	程家桥路
18	E	淞虹路	甘溪路	泉口路
19	F	延安中路	常德路	铜仁路
20	多	武宁南路	长寿路	余姚路
21	多	武定西路	万航渡路	江苏路
22	多	武定路	昌化路	江宁路
23	多	延安西路	常德路	华山路

只存在 1 个某一等级窞井的道路比较稀少，每个等级的窞井只找了一段道路，表中“窞井不平等级”栏中显示“多”表示该路段含有多个等级的窞井不平，是为了验证修正公式的计算结果。

6.2.2 车辆选择

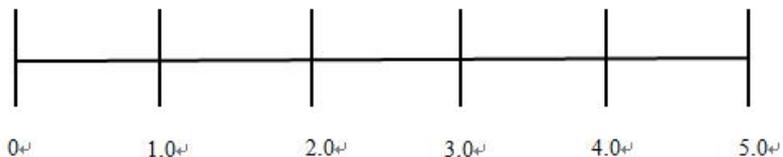
本实验所用车辆应能够代表大众所使用的车辆，不应选择客车、面包车等车型，而应该选择小汽车，本实验所选车辆为五菱宏光（1 辆）和奇瑞瑞虎（1 辆），实验车速经过前面分析为 40km/h，为保证不堵车，实验时间应避开高峰时间选择车辆较少的时间，本实验所选时间为 20 点到 24 点这段时间。

6.2.3 表格设计

上海同济大学进行 IRI 主观评价实验，其根据表 6-2 所示表格通过驾乘人

员主观意识对路段行驶质量以5分制打分，明确IRI与乘客行驶舒适性的主观感受的关系^[52]。本研究沿用该表格。

表 6-2 舒适性评分实验表格

路名:	路段起点:	路段终点:		
评分人:	座位号:	日期:	时间:	气候:
你认为路段的舒适性为: () 可接受; () 不确定; () 不可接受				
影响行驶舒适性的因素主要是: () 上下振动; () 左右摆动; () 前后晃动				
请你给出路段的评分值:				
评价等级:				
				

6.2.4 实验过程

该实验具体过程如下:

- 1、选择好实验路段，应符合以上三个条件;
- 2、召集评分人员，并对评分人员进行培训，使其了解评分标准，得以正确把握评分尺度，本研究召集了8个评分人员，分两辆车;
- 3、实验时，每个评分人员坐好位置之后不可改变，由坐在副驾驶位置的人负责提醒路段的起讫点，车辆以一定速度驶过路段，最好不要在路段当中停下，一个路段行驶结束后。车辆停于路旁，评分人员根据自己的主观感受独立评分，相互之间不能交流;
- 4、最后每段道路得出8个RQI值，计算8个值的平均值为该段路RQI值并可计算出IRI值。

舒适性评分实验结果见下一小节表 6-3，系数计算结果见下一小节表 6-4。

[50] 黄艳国，康裕荣，许伦辉. 基于道路线型的加速度干扰与行车舒适性分析. 中外公路, 2011, 31 (3): 287-290.

[51] 孙璐，邓学钧. 速度与车辆动态特性对于车路相互作用的影响. 土木工程学报, 1997, 30 (6): 34-40.

[52] 陈长. 交通基础设施管理系统技术结构研究: [博士论文], 上海: 同济大学, 2005.

6.2.5 实验结果

表 6-3 舒适性评分实验结果

路段名	段起点	段终点	评分值								平均值
武宁路	曹杨路	中宁路	3.2	3.2	3.1	3	2.8	3	2.5	3	2.975
大渡河路	云岭东路	怒江路	2.8	2.8	2.6	1.9	3.1	3	3	3.1	2.7875
长寿路	陕西北路	西康路	3	1.9	2.8	3.8	3.5	2.9	1.9	3.1	2.8625
威海路	陕西北路	茂名北路	1.8	3.2	1.5	1.9	3	2.8	1.9	1.6	2.2125
长宁路	威宁路	天中路	2.6	1.8	2	4	3.6	4.5	3	3	3.0625
武宁路	中山北路	中宁路	2.1	2.4	3.9	3.5	2.6	3.2	3.2	3.9	3.1
花溪路	枫桥路	兰溪路	2.4	2.8	1.5	3.4	1.8	2.1	2.6	1.9	2.3125
常德路	康定路	武定路	1.2		1	2.1	1.5	2.1	1.5	1.8	1.4
虹桥路	虹梅路	剑河路		0.8	0.6	1	1.5	1	2.2	1.1	1.171428571
大连西路	天宝路	四平路	2.6	2.6	3.2	2.4	3.1	2.8	2.4	1.3	2.55
四平路	新嘉路	吴淞路	2.5	2.5	1.4	2.5	2.3	3.1	2.1	3.1	2.4375
平塘路	甘溪路	仙霞西路	0.8	1.4	0.6	0.9	1.2	1.3	1.5	3.7	1.425
仙霞路	可乐路	协和路	0.5	0.8	0.4	0.1	0.6	0.5	0.6	0.6	0.5125
长宁路	凯旋路	中山北路	3.2	3.5	3.5	2.8	3.1	2.9	2.6	3.2	3.1
安义路	常德路	铜仁路	0.6	1.2	1	1.1	0.8	0.9	1.2	0.6	0.925
大连路	曲阳路	密云路	2.3	2.1	2.9	2.9	2.8	2.9	2.1	2.8	2.6
虹桥路	剑河路	程家桥路		3.1	2.6	3.6	2.1	2.4	2.1	3.4	2.757142857
淞虹路	甘溪路	泉口路	1.2	1.4	1.2	1.5	0.9	1.3	1.1	0.8	1.175
延安中路	常德路	铜仁路	1.2	0.5	0.6	0.8	0.8	0.6	0.9	0.5	0.7375

武宁南路	长寿路	余姚路	2.6	2.4	2.1	1.5	1.7	1.9	1.2	1.5	1.8625
武定西路	万航渡路	江苏路	2.6	2.1	2.7	1.8	2.1	2.5	1.6	3.1	2.3125
武定路	昌化路	江宁路	1.6	2.1	1.8	1.6	1.4	1.7	2.1	1.2	1.6875
延安西路	常德路	华山路	2.6	2.2	1.8		1.5	2.6	1.9	2.4	2.142857143

表 6-4 各等级系数计算表

等级	路段名	段起点	段终点	RQI	计算 IRI	实测 IRI	Δh_B	Δh_C	Δh_D	Δh_E	Δh_F	系数 B
B	武宁路	曹杨路	中宁路	2.98	3.64	3.57	14.51	0.00	0.00	0.00	0.00	1.8688
B	大渡河路	云岭东路	怒江路	2.79	3.97	3.97	22.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0563
B	长寿路	陕西北路	西康路	2.86	3.84	3.81	4.62	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0644
B	威海路	陕西北路	茂名北路	2.21	4.98	4.97	23.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.1625
B 平均											0.7474	
等级	路段名	段起点	段终点	RQI	计算 IRI	实测 IRI	Δh_B	Δh_C	Δh_D	Δh_E	Δh_F	系数 C
C	长宁路	威宁路	天中路	3.06	3.49	3.45	0.00	24.05	0.00	0.00	0.00	0.5748
C	武宁路	中山北路	中宁路	3.10	3.42	3.33	0.00	18.01	0.00	0.00	0.00	3.8431
C	花溪路	枫桥路	兰溪路	2.31	4.80	4.56	0.00	29.59	0.00	0.00	0.00	1.8257
C	常德路	康定路	武定路	1.40	6.40	6.39	0.00	34.88	0.00	0.00	0.00	0.0649
C	虹桥路	虹梅路	剑河路	1.17	6.80	6.53	0.00	62.31	0.00	0.00	0.00	3.4672
C 平均											1.9551	

等级	路段名	段起点	段终点	RQI	计算 IRI	实测 IRI	Δh_B	Δh_C	Δh_D	Δh_E	Δh_F	系数 D
D	大连西路	天宝路	四平路	2.55	4.39	4.13	0.00	0.00	19.10	0.00	0.00	3.0260
D	四平路	新嘉路	吴淞路	2.44	4.58	4.12	0.00	0.00	34.84	0.00	0.00	2.5250
D	平塘路	甘溪路	仙霞西路	1.43	6.36	6.00	0.00	0.00	28.89	0.00	0.00	3.6865
D	仙霞路	可乐路	协和路	0.51	7.96	7.49	0.00	0.00	60.92	0.00	0.00	2.0607
D 平均											2.8245	
等级	路段名	段起点	段终点	RQI	计算 IRI	实测 IRI	Δh_B	Δh_C	Δh_D	Δh_E	Δh_F	系数 E
E	长宁路	凯旋路	中山北路	3.10	3.42	3.27	0.00	0.00	0.00	15.30	0.00	4.4478
E	安义路	常德路	铜仁路	0.93	7.24	7.17	0.00	0.00	0.00	19.85	0.00	0.8776
E	大连路	曲阳路	密云路	2.60	4.30	3.93	0.00	0.00	0.00	19.27	0.00	9.0143
E	虹桥路	剑河路	程家桥路	2.76	4.02	3.72	0.00	0.00	0.00	16.94	0.00	7.7624
E	淞虹路	甘溪路	泉口路	1.18	6.80	4.83	0.00	0.00	0.00	33.30	0.00	0.0224
E 平均											4.4249	
等级	路段名	段起点	段终点	RQI	计算 IRI	实测 IRI	Δh_B	Δh_C	Δh_D	Δh_E	Δh_F	系数 F
F	延安中路	常德路	铜仁路	0.74	7.57	4.94	0.00	0.00	0.00	0.00	21.83	2.6286
F											2.6268	

表中“计算 IRI”所示数据为根据 RQI 值计算得到的 IRI 值，“实测 IRI”所示数据为用激光平整度仪所测得的结果。根据上表可

以算出各系数（B、C、D、E、F）值，利用其他数据计算各系数值。最后可得出各系数如下。

B=0.7474, C=1.9551, D=2.8245, E=4.4249, F=2.6268;

修正公式为:

$$IRI' - IRI_0 = \frac{0.7474 \cdot \Delta h_B + 1.9551 \cdot \Delta h_C + 2.8245 \cdot \Delta h_D + 4.4249 \cdot \Delta h_E + 2.6268 \cdot \Delta h_F}{L}$$

为验证该公式的误差是否在允许范围内，所选路段中还有几段包含多各窨井不平等级的路段可供验证，如表 6-5。

表 6-5 修正公式验证表

等级	路段名	段起点	段终点	RQI	计算 IRI	实测 IRI	Δh_B	Δh_C	Δh_D	Δh_E	Δh_F	修正 IRI	误差
多	武宁南路	长寿路	余姚路	1.86	5.59	5.29	4.23	5.15	14.96	15.35	0.00	5.6374	0.8%
多	武定西路	万航渡路	江苏路	2.31	4.80	4.75	0.00	5.79	0.00	0.00	0.00	4.7639	0.8%
多	武定路	昌化路	江宁路	1.69	5.90	5.49	0.00	12.34	9.45	0.00	0.00	5.7502	2.6%
多	延安西路	常德路	华山路	2.14	5.10	4.91	8.31	5.71	14.25	0.00	0.00	5.0695	0.6%

表 6-5 中各数据含义与表 6-4 相同，“修正 IRI” 栏表示通过修正公式算出的 IRI 值；最后一栏“误差” 栏表示修正 IRI 与计算 IRI 的误差，其计算方法为：计算 IRI 与修正 IRI 之差的绝对值除以修正 IRI，该栏数据显示修正后 IRI 与实际行驶感受的接近程度。从表中结果可以得出，用修正公式计算结果存在一定误差，但是在可接受的范围之内，因此该修正公式可用于实际计算。

6.3 城市道路平整度评价流程

总结以上内容可以得出城市道路平整度评价新方法，该过程可以用流程图表示，如图 6-1。

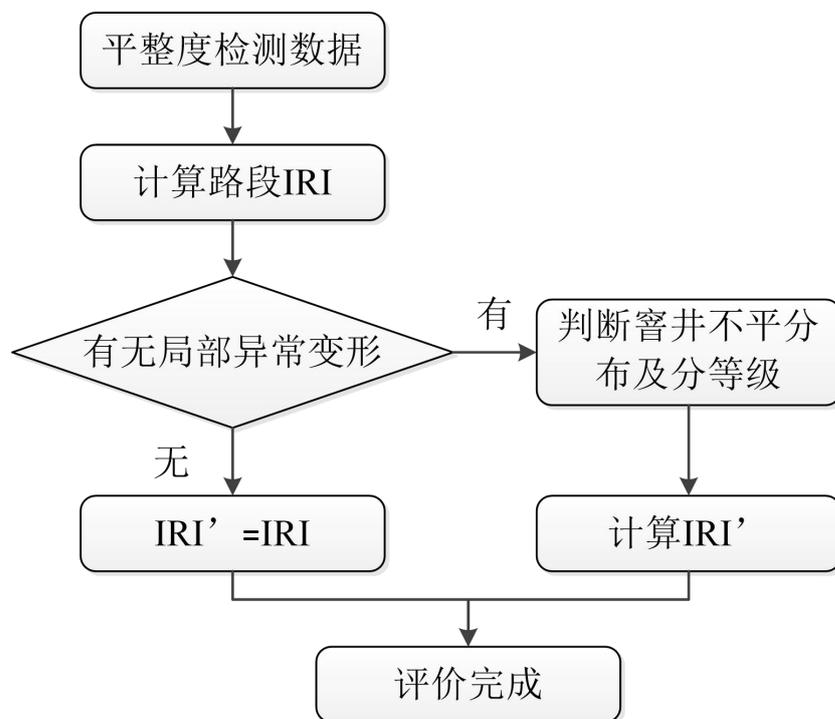


图 6-1 城市道路平整度评价方法流程图

根据该流程图，则可以对城市道路平整度评价新方法进行总结如下：

- 1、用激光平整度仪对城市道路进行检测，收集城市道路的平整度值及高程值；
- 2、分析路段的高程值，判断该段道路有无局部不平整；
- 3、根据路段是否存在局部不平整分两种情况：若该路段不存在局部不平整，则其平整度值为路段 IRI，即 $IRI' = IRI_0$ ；若该路段存在局部不平整，则通过高程值分析该路段窞井不平的个数及等级，用修正公式计算其平整度值，即 $IRI' = IRI_0 + \text{窞井不平对平整度的影响}$ 。

6.4 本章小结

本章整合前面的研究成果，提出路面平整度修正公式，对初始路段 IRI 进行修正使其更符合实际情况，并通过道路舒适性评价实验对修正公式标定，确定其系数，最后用流程图表示城市道路平整度评价新方法。

第7章 结论与展望

7.1 研究结论

本文研究的主要问题是针对城市道路平整度评价结果与实际行驶舒适性不符的情况，经过研究分析得出出现该问题的原因是路面的局部不平整，本研究提出修正公式对现有路段 IRI 值进行修正，得出城市道路平整度评价新方法，具体工作内容总结如下：

1、对上海市道路出现的各类型局部不平整数量进行统计，得出各因素所占百分比，结果显示窞井和修补所占比例明显高于其他因素，本研究的调查范围大，包含上海市市区 400 多条道路，这是其他类似调查研究所不能达到的。

2、运用力学方法及达朗贝尔原理推导出动力平衡方程，并分析了用传递矩阵法求解动力平衡方程。

3、通过研究路面局部不平整处高程值的特征得出窞井处高程值的特征，并提出相邻高程差的概念从数学上表示该特征，为了能让计算机自动化识别出路面上的窞井位置，按照所得结论编写出 Matlab 程序，并用实例验证该程序的可行性，得出可行性良好。

4、把窞井对道路行驶舒适性的影响分为 6 个等级，每个等级对行驶舒适性的影响不一样，各等级之间以窞井高程差区分。

5、提出路段 IRI 值修正公式，当路面出现窞井不平时对原始路段 IRI 值进行修正使其更符合实际行驶舒适性，并通过行驶舒适性评分实验对公式的系数进行标定。

7.2 不足与展望

当然，本文也有一些不足，由于时间和精力有限，无法面面俱到，还有一些问题需要继续研究：

1、本文对各个类型局部不平整数量的统计是基于上海市的道路进行的，只能代表上海市的情况，不能代表全国的情况。

2、本文主要研究了路面上只存在窞井的情况下窞井位置的确定及对各窞井盖分级，并提出修正公式，但是对于另一个影响路面局部不平整的重要因素——修补不平，本文虽尝试过研究其规律，但没有得出明确的结论，由于时间有限，并未作深入研究，要得出其规律还需要进一步研究。

3、各等级窞井对行驶舒适性影响的叠加本文也只是用最简单的方式叠加——各等级相加，但其实不同等级窞井对行驶舒适性影响的叠加或者同一等级窞井数量的叠加并不是简单的相加，而是有其他情况，因此，还需要对窞井对行驶舒适性影响的叠加情况进一步研究以完善修正公式。

致谢

时光如白驹过隙，转瞬即逝，眨眼间，研究生生活已近尾声，还没反应过来就已结束，但是已不可能重来，毕业后就将投入社会迎接新的挑战。

感谢我的导师陈长老师给予我极大的帮助完成这篇论文，陈老师思路开阔，见识广泛，每次在论文写作过程中遇到死胡同陈老师都能在关键点指出另一个方向，与陈老师交流过程中深深感受到他的宽容大度的个性、对学术认真严谨的态度、以及敏捷的思维，这些都让学生受益匪浅，在今后的工作或者学习当中都将是学生学习的榜样。感谢孙立军老师对我论文的指点，对我的帮助非常大，使我的研究更加完善。

工科研究总避免不了实验，我的论文也不例外，感谢课题组同门的帮助，让我顺利完成了论文的所有实验，感谢刘力源、伍洋洋、彰国帅、曹巍、方宇、韦学健、梁远路等师弟的对我实验的帮助。

当然，工作和生活是密不可分的，感谢课题组的小伙伴们还有同寝室的室友以及在上海的朋友们，有了你们让我的生活更加丰富。

也要感谢我的父母，虽然毕业没有来到现场，有了你们做我坚强的后盾让我从不孤单。

参考文献

附录 A 各类型局部不平整数量统计结果表格

1、窞井不平较多路段

所在道路	路口 1	路口 2	检查井	过街掘路	修补不平	桥头跳车	伸缩缝损坏	其他
曹杨路	武宁路	中山北路	21		3			
中山北路	曹杨路	延安西路	13		4	1	4	
延安西路	娄山关路	古北路	21	1	4			
延安西路	外滩方向	华山路	49		10			
华山路	延安西路	武宁南路	9		5			
武宁南路	华山路	长寿路	5		2			9
长寿路	武宁南路	长宁路	14		17			
长宁路	长寿路	凯旋路	7		10			
凯旋路	长宁路	延安西路	2		3			2
延安西路	凯旋路	常德路	24		6			
常德路	延安西路	长寿路	15		10			4
长寿路	常德路	西康路	3		5			
西康路	长寿路	北京西路	25					
江宁路	南京西路	长寿路	15		16			2
长寿路	江宁路	昌化路	1					
昌化路	长寿路	昌平路	12		3			
西苏州路	康定路	莫干山路	12					2
莫干山路	西苏州路	昌化路	5	1	6			1

附录 A 各类型局部不平整数量统计结果表格

昌化路	莫干山路	长寿路	6		5			1
长寿路	昌化路	胶州路	6		8			1
胶州路	长寿路	余姚路	6		5			3
昌平路	昌化路	武宁南路	19					
武宁南路	昌平路	武定路	4		1			4
武定路	武宁南路	延平路	3					
延平路	武定路	康定路	2					
康定路	延平路	泰兴路	13		4			
泰兴路	康定路	武定路	7		2			
武定路	泰兴路	延平路	7		1			
延平路	武定路	新闸路	3		5			1
新闸路	延平路	成都北路	10	5	20			3
延安西路	乌鲁木齐北路	石门一路	16					
延安西路	石门一路	重庆中路						
延安西路	重庆中路	成都北路	1					1
成都北路	延安西路	新闸路	14		2			1
曹杨路	中山北路	宁夏路	15					
宁夏路	曹杨路	武宁路	8	1				
武宁路	宁夏路	东新路	2					
东新路	武宁路	光复西路	4	1	8			
光复西路	东新路	江宁路	10	2	7		2	
江宁路	光复西路	新会路	5	1	5			1
新会路	江宁路	西康路	7		2			
西康路	新会路	澳门路	11		3			1
西藏北路	中山北路	虬江路	13		6		1	

虬江路	西藏北路	会文路	1		1		
会文路	虬江路	中兴路	5		6		3
止园路	会文路	中山北路	16		4		5
中山北路	止园路	宝昌路	5		9		
宝昌路	中山北路	青云路	5				2
青云路	宝昌路	东宝兴路	6		2		
东宝兴路	青云路	四川北路	30		5		
四川北路	东宝兴路	天通庵路	17	1	8		1
天通庵路	四川北路	东宝兴路	5		7		10
东宝兴路	天通庵路	中山北路	2		6	1	2
中山北路	东宝兴路	花园路	8		5		
花园路	中山北路	四川北路	7		13	2	
四川北路	花园路	甜爱路	2		5		
甜爱路	四川北路	四川北路	8	1	2		
四川北路	甜爱路	海宁路	20		33		2
海宁路	四川北路	天目中路	30	3	4		2
天目中路	海宁路	永兴路	23		5		9
永兴路	天目中路	宝山路	2		2		
宝山路	永兴路	中兴路	22		16		1
中兴路	宝山路	华昌路	39		19		
东宝兴路	芷江支路	衡水路	19		4		
衡水路	东宝兴路	四川北路	9		3		
四川北路	衡水路	塘沽路	15		3		1
塘沽路	四川北路	海宁路	8		6		
海宁路	塘沽路	晋元路	25		3		

附录 A 各类型局部不平整数量统计结果表格

晋元路	海宁路	光复路	6	1	2			1
光复路	晋元路	乌镇路	10		1			
乌镇路	光复路	蒙古路	4					
蒙古路	乌镇路	天潼路	12	1	2			
天潼路	蒙古路	长治路	17	3	4			2
长治路	天潼路	塘沽路	12	1	3			1
大名路	塘沽路	南苏州路	10					
南苏州路	大名路	四川中路	5		7			2
北京东路	四川中路	南北高架	25	6	2			
南北高架	北京东路	凤阳路	3		15			
凤阳路	南北高架	牛庄路	16		4			
牛庄路	凤阳路	江西中路	20	3	9			
江西中路	牛庄路	天津西路	5					
天津西路	江西中路	宁波路	14		4			
宁波路	天津西路	浙江中路	5		2			
延安东路	西藏中路	广西北路	15		4			1
广西北路	延安东路	汉口路	8					
汉口路	广西北路	中山东一路	18	1	12			
中山东一路	汉口路	延安东路	4		2			
延安东路	中山东一路	西藏东路	13		1			
许昌路	辽阳路	九江路	14	2	12			
九江路	许昌路	怀德路	10	1	2			2
怀德路	九江路	江浦路	15	5	7			
江浦路	怀德路	福宁路	13	2	6			
福宁路	江浦路	齐齐哈尔路	2		2			

齐齐哈尔路	福宁路	茭白园路	15	2	9			1
茭白园路	齐齐哈尔路	兰州路	9	2	2			
兰州路	茭白园路	昆明路	1		3			
昆明路	兰州路	东余杭路	13	2	6			
东余杭路	昆明路	唐山路	10	1	4			
唐山路	东余杭路	通北路	12		3			
淮海中路	重庆中路	乌鲁木齐中路	31	3	5			2
乌鲁木齐中路	淮海中路	安福路	10		1			
安福路	乌鲁木齐中路	重庆中路	57	6	14			4
重庆中路	安福路	南昌路	17		5			
复兴中路	重庆南路	乌鲁木齐中路	55	10	12			2
乌鲁木齐中路	复兴中路	永嘉路	18		2			
永嘉路	乌鲁木齐中路	瑞金二路	44	1	5			5
瑞金二路	永嘉路	南昌路	19	2	3			
南昌路	瑞金二路	重庆南路	17	1	3			
斜土路	鲁班路	南丹东路	92		13			3
南丹东路	斜土路	番愚路	75	3	18			3
虹桥路	番愚路	宜山路	49					
广元路	宜山路	建国路	41	1	2			
建国路	广元路	重庆南路	86	2	4			6
重庆南路	建国路	肇嘉浜路	67		5			
肇嘉浜路	重庆南路	华山路	56	2	3			
华山路	肇嘉浜路	武康路	67	4	3			2
武康路	华山路	余庆路	34	2	3			
天平路	衡山路	兴国路	28	1	3			

兴国路	淮海路	华山路	12	1	1			4
华山路	兴国路	乌鲁木齐路	21	3	7			
乌鲁木齐路	华山路	东安路	50	1	4			
东安路	乌鲁木齐路	中山南二路	40		3			
中山南二路	东安路	枫林路	7		2			2
枫林路	中山南二路	岳阳路	31	1	6			
岳阳路	枫林路	太原路	5		5			2
太原路	岳阳路	小木桥路	40		3			
小木桥路	太原路	中山南二路	33	1	4			2
中山南二路	小木桥路	瑞金南路	27		2			2
瑞金南路	中山南二路	思南路	20		4			
思南路	瑞金南路	徐家汇路	41	1	2			1
徐家汇路	思南路	打浦路	23		3			4
打浦路	徐家汇路	中山南二路	27					
中山南二路	打浦路	宛平南路	95		5			1
宛平南路	中山南二路	淮海中路	79		20			1
肇嘉浜路	高安路	虹桥路	40	1	5			1
虹桥路	肇嘉浜路	长顺路	59	1	1			
长顺路	虹桥路	杨宅路	34	2				1
杨宅路	长顺路	凯旋路	20	1	1			
凯旋路	杨宅路	番禺路	42					
番禺路	凯旋路	凯旋路	50	4	12			2
凯旋路	番禺路	法华镇路	48		2			
法华镇路	凯旋路	淮海西路	41	1	5			
淮海西路	法华镇路	新华路	19	1	7			3

江苏路	新华路	华山路	62	1	4			
吴中东路	中山西路	宜山路	13	2	1			
宜山路	吴中东路	虹桥路	53	1	6			2
虹桥路	宜山路	文定路	29		3			
文定路	虹桥路	中漕路	32		2			
中漕路	文定路	裕德路	21	1	3			
裕德路	中漕路	漕溪北路	8					
漕溪北路	裕德路	广元路	28		13			4
广元路	漕溪北路	余庆路	11					1
肇嘉浜路	正阳路	瑞金二路	18			3		
瑞金二路	肇嘉浜路	永嘉路	28			2		
永嘉路	瑞金二路	高安路	7		3	5		1
高安路	永嘉路	吴兴路	28			9		3
吴兴路	高安路	淮海中路	22		1	27		2
西藏南路	方斜支路	方斜路	6					
方斜路	西藏南路	建国新路	2		1			
建国新路	方斜路	肇周路	3					
肇周路	建国新路	济南路	2					
济南路	肇周路	湖滨路	5		2			
湖滨路	济南路	黄陂南路	5					
黄陂南路	湖滨路	金陵中路	3		2			
金陵中路	黄陂南路	普安路	2					
普安路	金陵中路	吉安路	4		4			1
吉安路	普安路	西藏南路	2		2			
西藏南路	吉安路	中山南路	9	4	6			2

附录 A 各类型局部不平整数量统计结果表格

复兴东路	光启南路	中山南路	11					
中山南路	复兴东路	耀华路	6	13	15	1	8	2
耀华路	中山南路	浦东南路	9	1	2			
浦东南路	耀华路	南泉北路	28		8	1	1	
南泉北路	浦东南路	临忻北路	20		2			
临忻北路	南泉北路	龙阳路	4					
民生路	杨高中路	浦东大道	10	1	3			
浦东大道	民生路	巨野路	4		2			
巨野路	浦东大道	灵山路	7		8			2
灵山路	巨野路	苗圃路	2		5			
苗圃路	灵山路	栖山路	12					
栖山路	苗圃路	崑山路	2		1			
崑山路	栖山路	杨高中路	10	1	5	2		4
杨高中路	崑山路	龙阳路	12		7	2		1
龙阳路	杨高中路	浦东南路	3					
浦东南路	龙阳路	峨山路	1					
峨山路	浦东南路	花木路	5	4	6	2		4
花木路	峨山路	罗山路	7		2	3	2	1
罗山路	花木路	张杨路	1		2	2		
张杨路	罗山路	浦东南路	16	2	5			2
浦东南路	张杨路	浦电路	7		2			
浦电路	浦东南路	灵山路	15					2
灵山路	浦电路	崑山路	3		2	1		1
崑山路	灵山路	羽山路	1		2	2		1
羽山路	崑山路	潍坊路	22		3		3	

潍坊路	羽山路	商城路	7		1		
商城路	潍坊路	羽山路	9		1		

2、修补不平较多路段

所在道路	路口 1	路口 2	检查井	过街掘路	修补不平	桥头跳车	伸缩缝损坏	其他
长寿路	武宁南路	长宁路	14		17			
长宁路	长寿路	凯旋路	7		10			
凯旋路	长宁路	延安西路	2		3			2
常德路	延安西路	长寿路	15		10			4
长寿路	常德路	江宁路	3		5			
江宁路	南京西路	长寿路	15		16			2
莫干山路	西苏州路	昌化路	5	1	6			1
长寿路	莫干山路	延平路	6		8			1
延平路	武定路	新闸路	3		5			1
新闸路	延平路	成都北路	10	5	20			3
成都北路	新闸路	北京西路	2		4			
北京西路	常德路	胶州路			2			
北京西路	胶州路	万航渡路	1		3			
新闸路	泰兴路	石门二路		1	4			
长安路	新闸路	长安路	2		3			
长安路	石门二路	光复路	2		3			
恒通路	梅园路	恒丰路	2		4			
东新路	武宁路	光复西路	4	1	8			
陕西北路	宜昌路	陕西北路	3		7			1
定西路	愚园路	安顺路	15	11	16			4
会文路	虬江路	中兴路	5		6			3

附录 A 各类型局部不平整数量统计结果表格

天通庵路	四川北路	东宝兴路	5		7			10
东宝兴路	天通庵路	中山北路	2		6	1		2
花园路	中山北路	四川北路	7		13	2		
四川北路	花园路	甜爱路	2		5			
四川北路	甜爱路	海宁路	20		33			2
南苏州路	大名路	四川中路	5		7			2
四川中路	南苏州路	北京东路	1		3			
南北高架	北京东路	凤阳路	3		15			
南苏州路	广东路	延安东路	2		4			
北京东路	江西中路	河南中路	2		14			1
衡水路	四川中路	吴淞路	3		4	2		
吴淞路	东长治路	汉阳路	2		4			1
东大名路	新建路	高阳路	1		3			
兰州路	茭白园路	昆明路	1		3			
通北路	平凉路	杨树浦路	2		3			
黄兴路	眉州路	长阳路			2			
长阳路	黄兴路	兰州路	2		4			
兰州路	长阳路	惠民路	1		7			
四平路	彰武路	中山北二路	4		5			
南昌路	重庆中路	重庆南路			1			
番愚路	南丹东路	虹桥路			1			
高安路	淮海中路	肇嘉浜路	9	1	12			
衡山路	余庆路	肇嘉浜路		1	3			
巨鹿路	富民路	重庆路			1	1		2
济南路	肇周路	湖滨路	1		3			

顺昌路	丽园路	自忠路	3		9			
河南南路	复兴东路	方浜中路	1		2			
中山南路	西藏南路	跨龙路		1	2			
中山南路	复兴东路	耀华路	6	13	15	1	8	2
龙阳路	临忻北路	东方路			2			
东方路	龙阳路	浦东大道	14	3	25			12
浦电路	福山路	世纪大道			1			2
世纪大道	浦电路	陆家嘴东路			2			2
浦东大道	陆家嘴东路	源深路	2		6			
巨野路	浦东大道	灵山路	7		8			2
灵山路	巨野路	苗圃路	2		5			
峨山路	浦东南路	花木路	5	4	6	2		4
崮山路	灵山路	羽山路	1		2	2		1

附录 B 输出窰井个数、位置及等级的 Matlab 程序

```
function z=y();
%输入 Excel 表数据

filename1=ls('G:\Elevation\*.xls');
filename=cellstr(filename1);
num=length(filename);
s=1;

%对文件夹中每一个 Excel 表读取距离和高程数据

for ii=1:num
    juli1=xlsread(strcat('G:\Elevation\',filename{ii}),1,'A:A');
    gaocheng1=xlsread(strcat('G:\Elevation\',filename{ii}),1,'J:J');
    %读取 Excel 第 J 列高程数据,第 J 列是激光器 5 所测数据,所以得出的结果是对激光器 5 所测数据分析后的结果,若要分析其他激光器的数据,修改 J
    juli=juli1';
    gaocheng=gaocheng1';
    n=length(juli);
    j=1;

    %分段

    qidian=[];
    for p=1:n
        if juli(p)==0
            qidian(j)=p;
            j=j+1;
        end
    end
    qidian(j)=n+1;
    for i=1:j-1
```

%建立距离与相邻高程差的函数关系

```
x=[];
y=[];
for m=qidian(i):qidian(i+1)-2
    x(m)=juli(m);
    y(m)=gaocheng(m+1)-gaocheng(m);
end
```

%判断凹陷检查井的位置及其不平整等级

```
bj1=1;
ax=[];
ax2=[];
for m=qidian(i):qidian(i+1)-2
    if y(m)<-4
        for f=m+1:qidian(i+1)-2
            if y(f)>4&x(f)-x(m)<=1
                ax(bj1)=m;
                ax2(bj1)=f;
                bj1=bj1+1;
            end
        end
    end
end
end
```

%筛选距离数据，删除无效和重复位置

```
a=length(ax);
for o=1:a-1
    w=x(ax(o+1))-x(ax(o));
    if abs(w)<1;
        ax(o+1)=ax(o);
    end
end
```

```
        end
    end
    ax1=unique(ax);
    a1=length(ax1);
    ax3=[];
    ax4=[];
    for o=1:a1
        ax3(o)=x(ax1(o));
        ax4(o)=y(ax1(o));
    end

    %对凹陷的检查井分等级

    axgrade=cell(1,a1);
    for v=1:a1
        u=abs(ax4(v));
        if u<=5
            axgrade{v}='B';
        elseif u<=8
            axgrade{v}='C';
        elseif u<=15
            axgrade{v}='D';
        elseif u<=21
            axgrade{v}='E';
        else
            axgrade{v}='F';
        end
    end

    %计算各等级凹陷检查井的累积高差

    hB=0;
    hC=0;
    hD=0
```

```

hE=0;
hF=0;
for r=1:a1
    if axgrade {r}=='B'
        hB=hB+abs(ax4(r));
    elseif axgrade {r}=='C'
        hC=hC+abs(ax4(r));
    elseif axgrade {r}=='D'
        hD=hD+abs(ax4(r));
    elseif axgrade {r}=='E'
        hE=hE+abs(ax4(r));
    elseif axgrade {r}=='F'
        hF=hF+abs(ax4(r));
    end
end

%判断凸起检查井的位置及其不平整等级

bj2=1;
tq=[];
for m=qidian(i):qidian(i+1)-2
    if ismember(m,ax2)==1
        continue;
    end
    if y(m)>4
        for f=m+1:qidian(i+1)-2
            if y(f)<-4&x(f)-x(m)<=1
                tq(bj2)=m;
                bj2=bj2+1;
            end
        end
    end
end
end
end
end

```

%筛选距离数据，删除无效和重复位置

```
b=length(tq);
for o=1:b-1
    w=x(tq(o+1))-x(tq(o));
    if abs(w)<1;
        tq(o+1)=tq(o);
    end
end
tq1=unique(tq);
b1=length(tq1);
tq3=[];
tq4=[];
for o=1:b1
    tq3(o)=x(tq1(o));
    tq4(o)=y(tq1(o));
end
```

%对凸起的检查井分等级

```
tqgrade=cell(1,b1);
for v=1:b1
    u=abs(tq4(v));
    if u<=5
        tqgrade{v}='B';
    elseif u<=8
        tqgrade{v}='C';
    elseif u<=15
        tqgrade{v}='D';
    elseif u<=21
        tqgrade{v}='E';
    else
        tqgrade{v}='F';
    end
```

```
end

%计算各等级所有检查井的累积高差

for r=1:b1
    if tqgrade{r}=='B'
        hB=hB+tq4(r);
    elseif tqgrade{r}=='C'
        hC=hC+tq4(r);
    elseif tqgrade{r}=='D'
        hD=hD+tq4(r);
    elseif tqgrade{r}=='E'
        hE=hE+tq4(r);
    elseif tqgrade{r}=='F'
        hF=hF+tq4(r);
    end
end

h=[hB,hC,hD,hE,hF];

%显示运算结果

disp(filename{ii});
disp(i);
disp(a1);
disp(ax3);
disp(ax4);
disp(b1);
disp(tq3);
disp(tq4);
disp(axgrade);
disp(tqgrade);

%把运算结果输出到 Excel 表
```

```
xlswrite('G:\P5.xls',ii,1, strcat('A',num2str(s)));
xlswrite('G:\P5.xls',{filename{ii}},1, strcat('A',num2str(s+1)));
xlswrite('G:\P5.xls',i,1, strcat('A',num2str(s+2)));
xlswrite('G:\P5.xls',juli(qidian(i+1)-1),1, strcat('A',num2str(s+3)));
if a1~=0
    xlswrite('G:\P5.xls',a1,1, strcat('A',num2str(s+4)));
    xlswrite('G:\P5.xls',ax3,1, strcat('A',num2str(s+5)));
    xlswrite('G:\P5.xls',ax4,1, strcat('A',num2str(s+6)));
    xlswrite('G:\P5.xls',axgrade,1, strcat('A',num2str(s+7)));
else
    xlswrite('G:\P5.xls',0,1, strcat('A',num2str(s+4)));
    xlswrite('G:\P5.xls',0,1, strcat('A',num2str(s+5)));
    xlswrite('G:\P5.xls',0,1, strcat('A',num2str(s+6)));
    xlswrite('G:\P5.xls','无',1, strcat('A',num2str(s+7)));
end
if b1~=0
    xlswrite('G:\P5.xls',b1,1, strcat('A',num2str(s+8)));
    xlswrite('G:\P5.xls',tq3,1, strcat('A',num2str(s+9)));
    xlswrite('G:\P5.xls',tq4,1, strcat('A',num2str(s+10)));
    xlswrite('G:\P5.xls',tqgrade,1, strcat('A',num2str(s+11)));
else
    xlswrite('G:\P5.xls',0,1, strcat('A',num2str(s+8)));
    xlswrite('G:\P5.xls',0,1, strcat('A',num2str(s+9)));
    xlswrite('G:\P5.xls',0,1, strcat('A',num2str(s+10)));
    xlswrite('G:\P5.xls','无',1, strcat('A',num2str(s+11)));
end
xlswrite('G:\P5.xls',h,1, strcat('A',num2str(s+12)));
s=s+14;
end
end
```

个人简历、在读期间发表的学术论文和研究成果

个人简历:

黄舫, 男, 1990年8月生。

2012年6月毕业于华东交通大学土木工程专业, 获工学学士学位。

2012年9月进入同济大学交通运输工程学院攻读硕士学位。

已发表论文:

Huang Fang, Chen Zhang. Sequence of Urban Bridge Maintenance and Repair Based on Multiple Factors. Progress in Industrial and Civil Engineering II(Part 2) [C]; 2013

参与课题:

[1] 上海市桥梁技术状况分析研究

[2] 上海市城市快速路技术状况分析研究

[3] 上海市城市道路路面技术状况分析研究