

不同路面平整度检测设备及其相关性研究

陆键¹ 赵吉广¹ 项乔君¹ 李俊² 潘宝堂³

(¹东南大学交通学院 江苏 南京 210096)

(²上海市市政工程研究院 上海 200031)

(³上海普勒斯道路交通技术有限公司 上海 200092)

摘要: 本文系统介绍了路面平整度检测相关理论,并重点就不同路面平整度检测设备、路面平整度指标与路面波波长之间的关系进行了分析。从平整度检测的目的出发,指出国际平整度指数 IRI 能最大程度的模拟行车过程中的人体舒适性,应作为首选的路面平整度指标。对选定的试验路段进行不同路面平整度检测仪的对比试验,结果表明,不同路面平整度检测设备具有较好的相关性,在实际路面平整度检测过程中可进行替换。

关键词: 路面平整度 路面平整度检测 断面类路面平整度仪 路面波波长 相关性 国际平整度指标

中图分类号: U418.6 **文献标识码:** A

Abstract: Theories related to pavement roughness detecting are discussed systematically, and emphasis is on the analysis of the relationship among different pavement roughness detecting devices, pavement roughness indexes and length of pavement wave. From the point of view of meeting the object of pavement roughness detecting, it is proved that IRI can simulate the comfort of passengers mostly, and should be selected as the best pavement roughness index. Comparing tests among different pavement roughness detecting devices are carried out on selected pavement sections, and results show that there are high correlation coefficients among different pavement roughness detecting devices. In practical pavement roughness detecting, one type of device can be substituted by another one in condition of absence.

Key words: pavement roughness, pavement roughness detecting, pavement profiler, length of pavement wave, correlation, IRI

Property and Correlation Research on Different Pavement Roughness Detecting Devices

Lu Jian¹ Zhao Jiguang¹ Xiang Qiaojun¹ Li Jun² Pan Baotang³

(¹Transportation College Southeast University, Nanjing Jiangsu Province, 210096)

(²Shanghai Municipal Engineering Research Institute, Shanghai, 200031)

(³Shanghai PRES Highway and Traffic Technology Inc., Shanghai, 200092)

引言

路面平整度是反映公路与城市道路路面使用性能与养护质量的重要指标。路面平整度直接影响路面行驶舒适性。研究表明,路面平整度与路面抗滑性能、路面破损状况均具有一定的相关性。与其余路面使用性能指标检测相比,路面平整度指标检测具有方便、快捷、准确的特性,自动化程度高。世界发达国家如美国、日本等均将路面平整度作为衡量路面使用性能与养护质量的主要指标而加以定期检测,并作为制定公路与城市道路路面养护管理对策的重要依据。我国道路交通工程领域目前正处于由建设期向管理期的转变,随着我国公路建设里程的不断增长和公路网的不断完善,公路与城市道路养护管理已成为我国道路交通工程领域的一项重要任务。从国际发展趋势来看,路面平整度将成为衡量我国公路与城市道路路面

基金项目: 交通部科技项目(200335332210)、上海市建设与交通委员会项目(A0300452)联合资助。

作者简介: 陆键(1957—),男,上海市人,博士,“长江学者奖励计划”特聘教授,博士生导师,主要从事智能运输系统、交通安全、路面性能检测技术的研究工作。

使用性能与养护质量的重要指标。因此如何选择科学合理的路面平整度指标和路面平整度检测设备极其关键。本文将就路面平整度指标与检测仪器的相关问题进行探讨，以期推动我国路面平整度检测技术的发展。

路面平整度指标可用于衡量路面施工质量和路面养护质量水平，更重要的是，路面平整度指标可用于反映行车过程中的人体舒适性程度。因此路面平整度指标及其检测设备应以最大程度上模拟车辆在路面纵断面曲线上行驶过程中车辆的激振响应及人体的舒适性程度为目标。理想的路面平整度指标及其检测设备应能最大程度的实现上述目的。

1. 路面平整度检测设备

路面平整度检测设备主要包括断面类和响应类两大类。断面类路面平整度检测设备是采用机械、光学等手段直接获取路面纵断面曲线，这类平整度检测设备的代表有澳大利亚ARRB断面仪和我国自行研制的达普勒斯手推式断面仪（DAPRES）、厉普勒斯平整度仪（LIPRES）等^[1]。由于断面类路面平整度检测设备是直接获取路面纵断面曲线，因此断面类路面平整度检测设备检测值具有时间稳定性。响应类路面平整度检测设备则无法直接获取路面纵断面曲线，又称间接式平整度仪。该类设备一般通过量测装载车的响应量如竖向位移、垂直加速度等间接反映路面平整度。这类平整度检测设备的代表有交通部公路科学研究所引进的车载机械式颠簸累积仪和我国自行研制的巴普勒斯车载式颠簸累积仪（BIPRES）、瑞普勒斯电子式颠簸累积仪（RAPRES）等^[1]。响应类路面平整度检测设备其检测值受装载车性能影响，不具有时间稳定性。除此以外，还有一类路面平整度检测设备，如连续式平整度仪、3米直尺等。这类路面平整度检测设备无法直接获得路面纵断面曲线形状，而是通过量测路面纵断面曲线的某些几何特征量如路表面曲线的最大偏差来表征路面平整度状况，因而与路面纵断面曲线直接相关，且具有时间稳定性。断面类和其它类平整度仪合称直接式路面平整度仪。

断面类路面平整度检测设备可直接获取路面纵断面曲线形状，以作为进一步分析路面平整度的基础，但断面类路面平整度检测设备仪器结构复杂，价格昂贵。响应类路面平整度检测设备仪器结构一般较简单，价格低廉，但无法直接获取路面纵断面曲线形状，其检测值不具有时间稳定性，且需经常进行标定。不同类型路面平整度检测设备其检测速度、检测结果精度、检测原理上均有较大差别，见表1。在实际应用中，可根据应用目的选择合适类型的路面平整度检测设备。

表1 国内现有不同路面平整度检测设备及其平整度指标

检测设备类型	检测设备	代表产品	直接检测指标	转换指标	主要性能特点
断面类	手推式断面仪	DAPRES	IRI	σ	低速检测，精度较高
	激光惯性断面仪	LIPRES	IRI	σ	高速检测，精度较高
响应类	车载机械式颠簸累积仪	BIPRES	VBI	σ 、IRI	高速检测，对装载车性能变化较敏感
	车载电子式颠簸累积仪	RAPRES	RMSVA	σ 、IRI	高速检测，对装载车性能变化不敏感
其它类	3米直尺	—	Δ	—	精度低，检测速度慢，人工操作
	连续式平整度仪	—	σ	IRI	低速检测

2. 路面平整度指标

路面平整度指标可分为断面类、响应类与其它类等。断面类路面平整度指标主要是国际平整度指数IRI，响应类路面平整度指标包括颠簸累积值VBI、竖向加速度RMSVA等，其它类路面平整度指标包括3米直尺值 Δ 、平整度标准差 σ 等^[2]。

从世界范围来看，国际上普遍采用世界银行1982年巴西对比试验建立的国际平整度指数（International Roughness Index，简称IRI）作为路面平整度指标^[3]。所谓国际平整度指数，是指采用一具有特定悬挂系统参数的四分之一车模型，模拟车辆在路面纵断面行驶过程，并

以车身相对于后轴之间的累计相对位移的大小表征路面平整度状况。国际平整度指数从本质上来讲是一响应类路面平整度指标，但由于模型车的悬挂系统参数为一定常数，因而其计算结果与路面纵断面曲线直接相关，且具有时间稳定性。此外，国际平整度指数与路段行驶舒适性直接相关，因而在世界范围内被广泛采用。

3. 路面波波长与平整度检测设备

本节对路面波波长与路面平整度检测设备之间关系的分析仅限于直接式路面平整度检测设备。响应类路面平整度检测设备由于其无法直接获得路面纵断面曲线形状，因此不涉及到路面波波长的相关问题。

研究表明，人体对路面波波长的敏感范围在 30 米以内，长于 30 米的路面波对行车过程中人体舒适性无太大影响。为有效反映行车过程中人体舒适性，路面平整度检测设备必须能有效检测出 30 米内路面波。

根据函数的傅立叶级数展开可知，任一路面纵断面曲线可视为由不同波长的正弦波叠加而得，故路面平整度检测可转换为正弦波检测。根据 Nyquist 定理，当采样间隔小于正弦波波长的一半时，可以完整的还原正弦波波形。此外，连续采样距离也直接影响到所能检测到的路面波波长范围。

从检测原理来看，3 米直尺、连续式平整度仪只能检测出某一路面纵断面曲线与其两端连线的最大高差值。3 米直尺直接以其高差值作为检测路段的路面平整度指标，连续式平整度仪的路面平整度检测指标是若干连续路段最大高差值的标准差。从检测结果来看，上述两种路面平整度检测设备无法直接还原出路面纵断面曲线形状。这两种平整度仪的连续采样间隔均为 3 米，故只能检测出波长小于 1.5 米的路面波。

国际平整度指数 IRI 直接将路面纵断面曲线输入模型，并采用高通滤波滤除路面纵断面曲线中的长波长因素，并计算中、短波长路面波激励下的模型车悬挂系统竖向位移值。国际平整度指数 IRI 能反映 50 米以内路面波对行驶舒适性的影响，因此国际平整度指数 IRI 最适宜用于衡量路面平整度状况。任一满足一定最大采样间隔要求的断面类路面平整度检测设备其检测值均可用于计算路面国际平整度指数 IRI。

4. 我国路面平整度检测现状与发展趋势

长期以来，受我国经济发展水平与路面施工技术水平的影 响，路面平整度检测一直未得到足够重视。我国《公路路基路面现场测试规程》(JTJ059-95)、《公路养护技术规范》(JTJ073-96)、《公路养护质量检查评定标准》(JTJ075-94)采用 3 米直尺、连续式平整度仪和车载机械式颠簸累积仪作为路面平整度检测设备，将 3 米直尺值、平整度标准差 σ 、颠簸累积值 VBI 作为路面平整度检测指标^[4-6]。我国大多数施工单位在施工过程中仍使用 3 米直尺作为路面平整度检测设备。在路面养护管理中，路面平整度检测尚未形成制度化、规范化的机制，路面平整度在路面养护对策的制定中仍处于较次要的地位，路面平整度检测也大多采用车载式颠簸累积仪等低精度检测设备。

路面平整度状况直接影响行驶舒适性、行车安全性和单位行程油耗等。随着我国经济水平的持续发展，出行者对行驶舒适性和行车安全性的要求越来越高，社会可持续发展也对能耗节约提出了更多要求。路面平整度在路面养护质量和路面使用性能状况中的地位日益突出。

受检测原理限制，车载机械式颠簸累积仪的检测精度受装载车悬挂系统性能稳定性、机械式位移传感器精度等诸多因素的影响。在使用过程中，车载机械式颠簸累积仪需经常进行标定，且要求标定路段的平整度状况具有较好的代表性。在检测过程中，需保持装载车行驶速度与标定时装载车行驶速度大致相等，在高等级公路实际路面平整度检测过程中有一定程度的困难，也直接影响路面平整度指标的检测精度。3 米直尺、连续式平整度仪的检测精度较低，且只能检测有限长度范围内的路面波，不能充分反映路面行驶舒适性状况。上述路面

平整度仪已不适当当前我国路面平整度检测的需求。

从发展趋势来看,采用快速、高精度路面平整度检测设备,对路面平整度状况进行全面、定期检测,以作为路面养护质量评价和路面养护对策制定的依据,是我国路面养护管理与路面平整度检测的发展方向。国际平整度指标将逐步取代平整度标准差 σ 、颠簸累积值 VBI 等。在路面施工阶段,手推式断面仪因其检测精度高,且检测速度满足路面施工阶段要求,将逐步取代 3 米直尺而得到大范围的应用。在路面养护管理阶段的路面平整度检测中,激光断面仪因其检测精度较高,检测速度快将逐步推广。

5. 不同路面平整度检测仪对比试验

为实现不同类型路面平整度检测仪的相互替换,提高不同类型路面平整度检测仪的使用效率,本文在上海及其周边地区进行了大量的对比试验^[7]。对比试验在选定的试验路段上进行,对同一路段,选用对比试验的各种路面平整度检测设备对其进行路面平整度检测,以获得不同路面平整度检测设备条件下的路段路面平整度检测值。受试验路段条件的影响,本次试验路段路面波长一般较短。应该指出,本文基于对比试验结果提出的不同路面平整度指标的相关性具有一定的局限性,其使用范围也具有一定的限定性。

5.1 对比试验仪器的选择

本文采用手推式断面仪—DAPRES 自动化路面纵断面剖面仪和精密水准仪作为标准平整度检测仪。用于对比的路面平整度检测仪包括机械式颠簸累积仪、澳大利亚 ARRB 激光惯性断面仪、瑞普勒斯电子式颠簸累积仪、连续式平整度仪等。

5.2 标准路面平整度检测设备对比试验

对试验路段,两种标准路面平整度检测仪的相关性如图 1 所示。从图 1 不难发现,两种标准路面平整度检测的相关性较好,相关系数 $R^2=0.9693$ 。这表明,本文所选用的手推式断面仪—DAPRES 自动化路面纵断面剖面仪具有较好的精度。

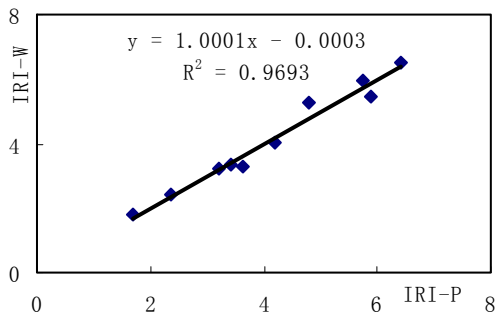


图 1 标准路面平整度检测设备相关性

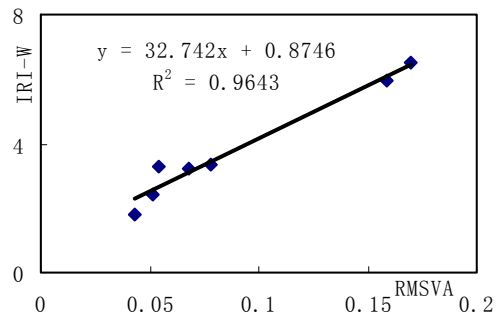


图 2 电子式颠簸累积仪—精密水准仪相关性

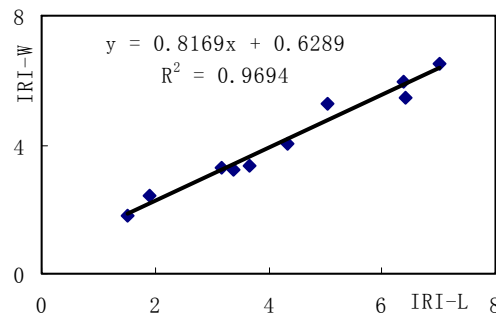


图 3 激光惯性断面仪—精密水准仪相关性

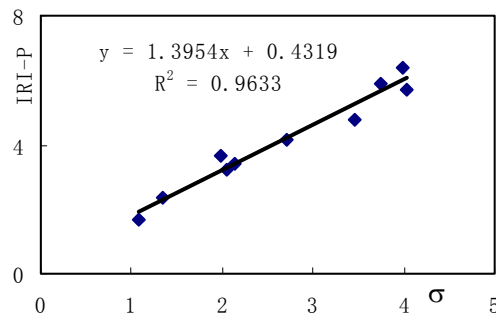


图 4 连续式平整度仪—手推式断面仪相关性

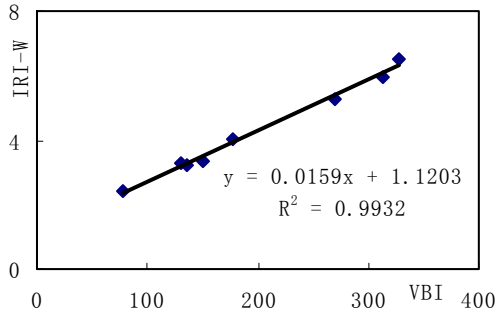


图5 机械式颠簸累积仪—精密水准仪相关性

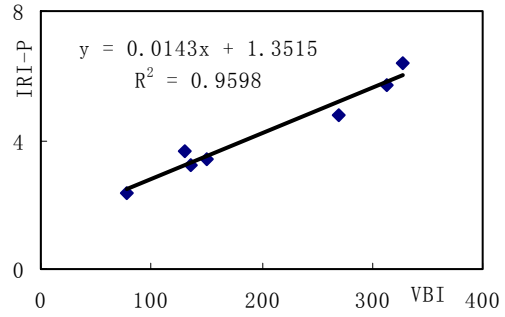


图6 机械式颠簸累积仪—手推式断面仪相关性

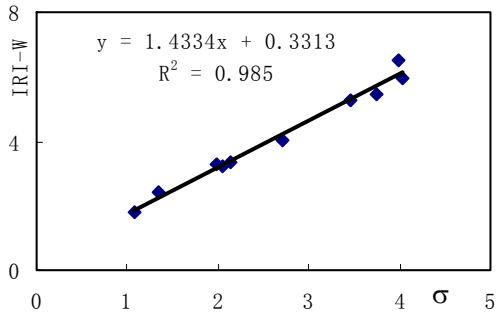


图7 连续式平整度仪—精密水准仪相关性

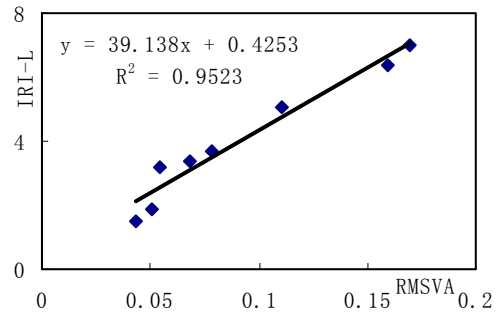


图8 电子式颠簸累积仪—激光惯性断面仪相关性

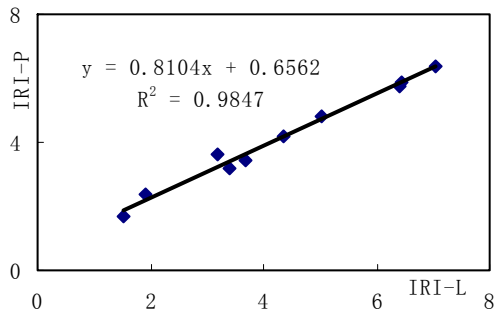


图9 激光惯性断面仪—手推式断面仪相关性

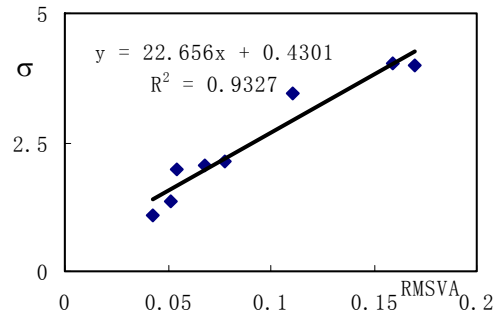


图10 电子式颠簸累积仪—连续式平整度仪相关性

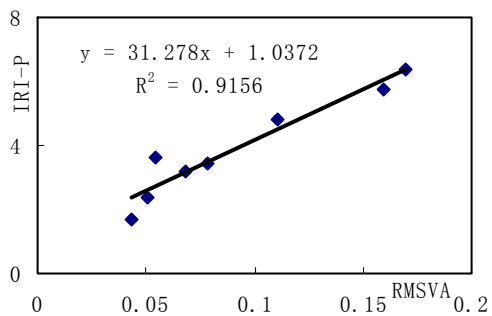


图11 电子式颠簸累积仪—手推式断面仪相关性

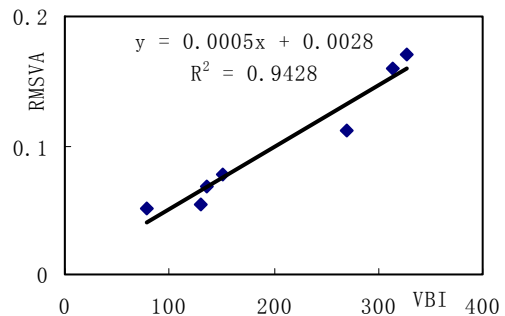


图12 电子式—机械式颠簸累积仪相关性

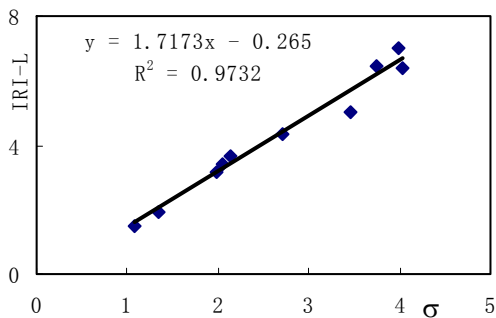


图 13 连续式平整度仪—激光惯性断面仪相关性

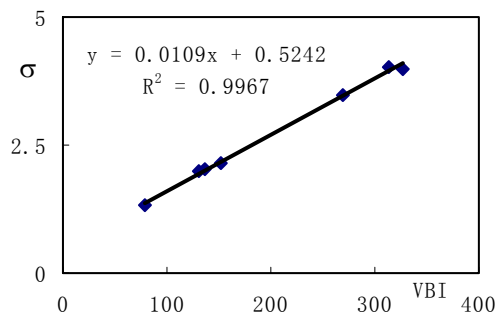


图 14 机械式颠簸累积仪—连续式平整度仪相关性

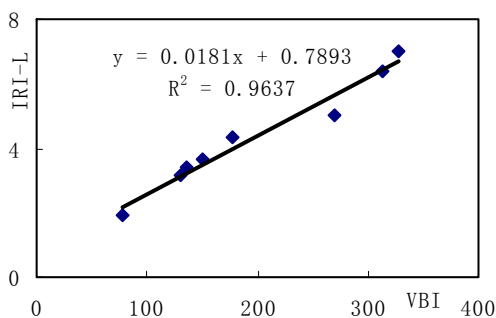


图 15 机械式颠簸累积仪—激光惯性断面仪相关性

5.3 其它路面平整度检测设备对比试验

基于试验路段不同路面平整度检测仪检测所得路面平整度指标值,本文进行了其它路面平整度检测仪的相关性分析。表 2 为试验路段不同路面平整度检测设备检测路面平整度指标值。不同路面平整度检测设备相关性如图 2~图 15 所示。

表 2 试验路段不同路面平整度检测设备路面平整度检测值

路段名称	IRI ¹	IRI ²	IRI ³	σ	RMSVA	VBI
路段 1	3.23	3.213	3.4	2.04	0.068	136
路段 2	3.36	3.420	3.68	2.13	0.078	151
路段 3	1.8	1.689	1.51	1.08	0.043	82
路段 4	2.41	2.367	1.9	1.34	0.051	78
路段 5	6.49	6.399	7.03	3.99	0.17	327
路段 6	5.97	5.734	6.39	4.04	0.159	314
路段 7	3.26	3.642	3.18	1.99	0.054	131
路段 8	4.06	4.182	4.35	2.71	0.062	178
路段 9	5.46	5.900	6.43	3.75	0.094	248
路段 10	5.3	4.792	5.04	3.46	0.111	269

注: 1 为采用精密水准仪所测得路面平整度指标值, 记为 IRI-W;

2 为采用手推式断面仪所测得路面平整度指标值, 记为 IRI-P;

3 为采用激光惯性断面仪所测得路面平整度指标值, 记为 IRI-L。

表 3 为试验路段不同路面平整度检测设备路面平整度检测值相关系数值。表 3 中, 手推式断面仪、激光断面仪、精密水准仪路面平整度检测指标为国际平整度指数 IRI, 机械式颠簸累积仪路面平整度检测指标为颠簸累积值 VBI, 电子式颠簸累积仪路面平整度检测指标为 RMSVA, 连续式平整度仪路面平整度检测指标为平整度标准差 σ。从表 3 中不难发现, 对试验路段, 所有路面平整度检测设备检测路面平整度值间相关系数值均大于 0.90, 绝大多数

相关系数值均大于 0.95，所有路面平整度检测设备检测路面平整度值与精密水准仪（标准路面平整度检测设备）检测路面平整度值间相关系数均大于 0.95。根据《上海市路面平整度检测仪技术标准（试行）》的规定，上述路面平整度检测设备均为有效路面平整度检测设备，且在不具备相应路面平整度检测设备的条件下可以进行代替使用。

表 3 不同路面平整度检测设备相关性分析

仪器类型 仪器类型	精密水准仪	手推式 断面仪	激光断面仪	连续式 平整度仪	电子式颠 簸累积仪	机械式颠 簸累积仪
精密水准仪	1	0.9693	0.9694	0.985	0.9643	0.9932
手推式断面仪	0.9693	1	0.9847	0.9633	0.9156	0.9598
激光断面仪	0.9694	0.9847	1	0.9732	0.9523	0.9637
连续式平整度仪	0.985	0.9633	0.9732	1	0.9327	0.9967
电子式颠簸累积仪	0.9643	0.9156	0.9523	0.9327	1	0.9428
机械式颠簸累积仪	0.9932	0.9598	0.9637	0.9967	0.9428	1

6. 结论

公路养护管理正成为我国道路交通工程领域的一项重要任务，路面平整度检测在我国公路建设、管理中的重要性日益突出。本文通过不同路面平整度指标与路面平整度检测设备的分析，对我国路面平整度指标与路面平整度检测设备的选型进行了分析，并提出了我国今后路面平整度检测设备的发展方向。通过不同路面平整度检测设备在试验路段的对比试验，对不同路面平整度检测设备间的相关性进行了分析。试验表明，对一般路段，不同路面平整度检测设备间具有较好的相关性，在不具备相应检测设备的情况下，可以进行检测设备的替代。

致谢

本文的研究工作受交通部与上海市建设与交通委员会联合资助，研究过程中得到了上海市高速公路技术学科（专项技术）研究发展中心、上海市道路工程重点实验室的大力支持，相关协作单位为本文进行的对比试验提供了大量的仪器设备。作者对上述单位给予的帮助表示衷心感谢。

参考文献

- [1] 上海市普勒斯道路技术有限公司. 产品介绍[EB/OL] <http://www.shanghai-pres.com/fy/cpjs.htm>, 2005-10-31.
- [2] Ralph Haas, W. Ronald Hudson, John Zaniewski. Modern pavement management[M]. Malabar, Florida: Krieger Publishing Company, 1994.
- [3] Michael W. Sayers, Steven M. Karamihas. The little book of profiling: basic information about measuring and interpreting road profiles[M].
- [4] JTJ059-95. 公路路基路面现场测试规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 1995.
- [5] JTJ073-96. 公路养护技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1996.
- [6] JTJ075-94. 公路养护质量检查评定标准[S]. 北京: 人民交通出版社, 1994.
- [7] 李俊, 陆键, 王一如等. 路面平整度评价体系及其工程应用研究[R]. 南京: 东南大学交通学院, 2005.