

基于平整度指标的农村公路路面使用性能评价方法

朱洁^{1,3}, 俞佳辉², 余昆³, 杜卫峰³

[1.交通运输部科学研究院,北京市100029;2.上海大学力学与工程科学学院,上海市200044;

3.交科院(北京)检测技术有限公司,北京市100013]

摘要: 为了应对全国农村公路网较大体量的检测,提高低等级农村公路(三级公路及以下)检测的低成本、便捷性、易操作性,开发了一套基于3轴MEMS陀螺、3轮内置MEMS加速度计、双GNSS导航模块的低成本、高可靠性的低等级农村公路平整度检测原型系统。通过分析8000多km农村公路沥青路面和水泥混凝土路面的检测数据,对于低等级农村公路,当路况较差时,执行单一的平整度检测即可通过数学模型较为可靠地得到路面使用性能评价结果,并提出了农村公路大范围路网检测的检测策略和方案,将RQI作为农村公路普遍检测指标,对路况较好的路段,在RQI检测的基础上进行PCI抽检,提高路面使用性能评价的准确性,从而保证良好的检测效果的同时降低农村公路的检测成本。

关键词: 道路工程;农村公路;平整度检测;加速度计;北斗导航;使用性能预测

中图分类号: U418.6

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2022)06-0201-06

0 引言

路面平整度是路面施工质量控制和路面运营服务水平评价的重要内容,它直接反映了路面的行驶舒适性及行车安全性,是一个涉及人、车、路三方面的综合性指标,路面平整度对行车速度、通行能力、行车舒适性、经营经济性及交通安全等技术经济性能产生直接影响。路面平整度反映的是路表面纵向的凹凸不平通过车轮传导到车体,对车辆上乘坐人员感受行车安全性以及车辆自身动力特性产生影响。路面平整度不仅是一个舒适程度的感性认识指标,也是一个关系行车安全的重要因素,因此,对路面平整度的科学检测与量化评价是公路养护管理的一个重要环节。

从20世纪20年代开始,世界各国对道路平整度检测技术开展了大量的研究,相继推出一系列检测装备和相应的评价方法。我国道路平整度检测装备技术的研究,是从20世纪80年代,依据国家重点科技攻关项目开始实施的,同时也大量引进了多种平整度检测装备,这些装备在我国路面状况的快速检测说和路面管理系统数据采集发挥了重要的作用。

目前实际应用的平整度指标分为3类:断面类,

反应类,主观评估类^[1]。断面类指标是路面纹理的综合性统计量,包括高程标准差、坡度变化、功率谱密度(Power Spectral Density, PSD)等。反应类数据考虑人和车辆的振动反应、统计位移量、加速度、竖向力等物理量。常见的反应类指标包括国际平整度指数(International Roughness Index, IRI)、断面指数、半车平整度指数等。主观类指标是乘客对车辆振动、颠簸情况的主观评价,比如现时服务等级,平均评分等级,行驶质量数RN等。我国的测试方法基本都是基于断面类或反应类的平整度评价指标。

我国农村公路里程达到400多万km,截止2020年底,三级公路、四级公路及等外公路占全国公路的比例高达86.5%以上,对大量的农村公路网级检测任务艰巨,有必要探索成本低廉、检测迅速、稳定性较好的适用于三级及以下农村公路的检测装备、评价方法和科学化决策方法。

1 公路平整度使用性能评价理论

农村公路技术状况评定采用农村公路技术状况指数(PQI),由两项分项指标组成,分别为农村公路路面损坏状况和农村公路行驶质量,分别用于评价农村路面损坏和路面平整度的技术状况。道路平整度描述的是道路路面纵向的高程变化情况,它从行车舒适性、安全性和车辆运营经济性等方面影响路面行驶质量和服务水平。国内外主要采用的平整度评价指标有:国际平整度指数IRI、行驶质量指数RQI和直尺

收稿日期:2021-12-07

作者简介:朱洁(1984—),女,博士,副研究员,从事道路养护管理研究工作。

测定最大间隙与平整度标准差 σ 、功率谱密度 PSD、平均评分等级 MPR 和竖向加速度均方根 RMSVA 等。其中,IRI 可以通过广泛使用的仪器测量得到,其结果可以在世界范围内进行转换,是目前国际上运用最广泛的平整度指标。我国《公路技术状况评定标准》(JTG 5210—2018)中^[2],给出通过 IRI 计算路面行驶质量指数 RQI 的公式方程,并给 RQI 的评价分级方法。

1.1 国际平整度指数 IRI

sayers 等人于 1982 年在世界银行资助下在巴西等国进行路面平整度试验,经过一系列平整度试验和分析比较,考虑各国推荐的平整度指标,提出了国际平整度指数 IRI 作为反映乘客感受的标准平整度指标^[3-5]。IRI 以四分之一车辆模型(见图 1)来计算国际平整度指数,该车以规定速度(80 km/h)行驶在路面断面上,在行驶距离内由动态反应悬挂系统的累积竖向位移量作为 IRI 值,单位为 m/km。

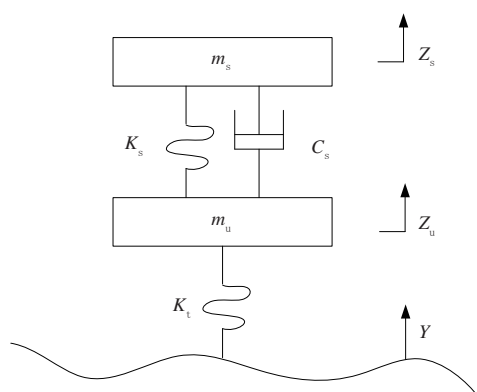


图 1 二自由度四分之一车模型

图 1 中: Y 为路面断面高程; Z_s 为簧载质量 m_s 的绝对位移; Z_u 为非簧载质量 m_u 的绝对位移; K_s 为悬架系统刚度; K_t 为轮胎刚度; C_s 为阻尼系数。

其定义的国际平整度指数为^[6-8]:

$$IRI = \frac{1}{L} \int_0^L |Z_s - Z_u| dx = \frac{1}{vt} \int_0^t |\dot{Z}_s - \dot{Z}_u| dt \quad (1)$$

式中: L 为所测路段长度; v 为行驶速度; t 为行驶时间。

1.2 路面行驶质量指数 RQI

路面行驶质量指数 RQI 按下式表示^[2]:

$$RQI = \frac{100}{1 + a_0 e^{a_1 IRI}} \quad (2)$$

式中:IRI 为国际平整度指数(m/km); a_0 为高速公路和一级公路采用 0.026,其他等级公路采用 0.018 5; a_1 为高速公路和一级公路采用 0.65,其他等级公路采用 0.58。

1.3 功率谱密度 PSD

功率谱密度是国际标准化组织 ISO 提出的道路平整度判定指标。该指标把道路断面的高程假设为随机过程,在频域内分析路面的平整度,应用于道路工程中描述道路的平整度时,将路表看作若干正弦函数的叠加,并通过傅里叶变换实现这个叠加过程功率谱密度 PSD 实现了不同尺度下对路表断面的纹理进行评价^[9,10]。

根据国际标准协会在 ISO/TC108/SC2N67 中提出的“路面不平度方法草案”和国内长春汽车研究所起草制定的“车辆振动输入—路面平度表示方法”的标准,路面功率谱密度可用下式拟合表达:

$$S_x(n) = S_x(n_0) \left(\frac{n}{n_0} \right)^{-w} \quad (3)$$

式中: n 为空间频率,它是波长的倒数,表示每米长度中包括几个波长,单位为 m^{-1} ; n_0 为参考空间频率, $n_0=0.1 m^{-1}$; 为参考空间频率下的路面谱值; w 为频率指数。

2 农村公路平整度检测原理设计

高速公路和二、一级公路利用激光断面采集装置,集成了加速位移(车辆减震系统导致的车体与路面的相对运动)和补偿装置(纵向加速度计)等各种距离测量装置,以车流速度自动检测并存储路面纵断面高程变化信息,通过纵断面信息处理获得路面平整度数据^[11],农村公路存在体量大、等级低、路况差、检测环境多变的特点。传统的平整度检测方法对检测车辆行驶速度、工作稳定性等具备较高要求,在农村公路检测环境下将面临较大挑战。因此,有必要探索鲁棒性更强、成本更低的替代性平整度检测方案。

系统设计的思路:基于加速度传感器和 GPS,实时获取路面平整度信息;采用功率谱密度分析方法来拟合推算 IRI 值,用加速度传感器代替激光断面采集装置,在保证检测精度的前提下大幅降低农村公路平整度检测的成本。

系统的主要功能模块:Z 轴加速度计模块、GPS 模块、无线通讯模块、数据处理模块。

系统设计的构架:面向农村公路的平整度检测测试系统主要由 3 轴 MEMS 陀螺、3 轮内置 MEMS 加速度计、双 GNSS 导航模块组成。系统设计见图 2。

其平整度检测原理通过陀螺仪和加速度计获得车辆的三轴角加速度和加速度值、GPS 地理信息数

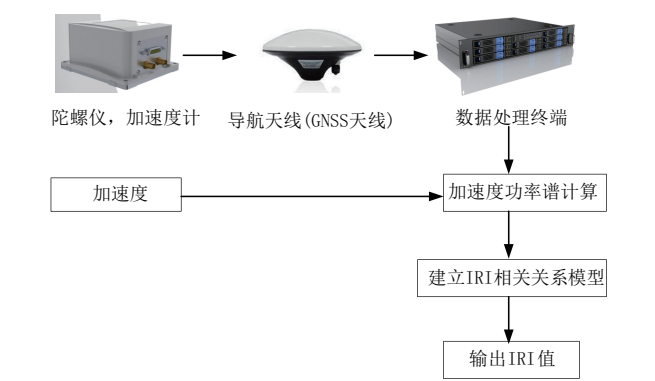


图2 低等级农村公路平整度检测原理

据,通过无线传到数据处理终端,计算加速度功率谱密度,建立与IRI相关关系模型,最后输出IRI值。

3 农村公路使用性能评价方法数据验证

3.1 数据概况

本研究共收集某省8个地级市的三级、四级公路检测数据,共8 147.375 km,其中沥青路面3 822.584 km,水泥路面4 324.791 km。其路面使用性能指数(PQI)等级分布情况见图3、图4。沥青路面和水泥混凝土路面的PQI等级分布趋势完全相反。沥青路面路况较好路段占主导,而水泥路面普遍路况较差。这可能是由于农村公路路网中水泥路面多为等级更低的支路,且大部分处于失养状态。

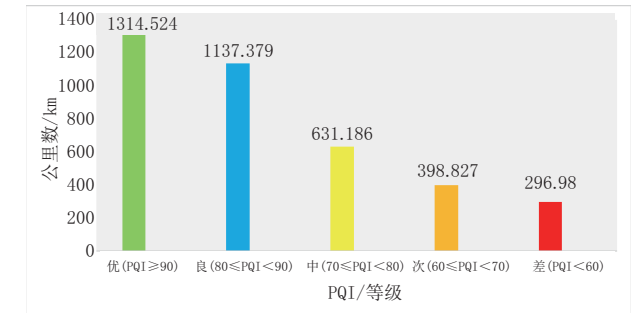


图3 沥青路面 PQI 等级分布

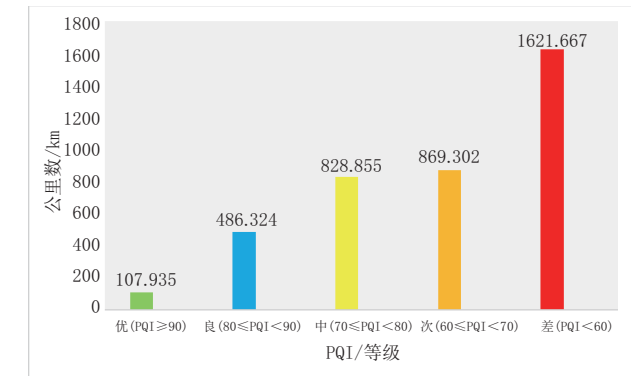


图4 水泥路面 PQI 等级分布

3.2 农村公路路况指标分析研究

3.2.1 路况指标趋势分析

较之普通公路,农村农路通常路况更差,各类病

害伴生出现。为了探究农村公路平整度与PCI以及PQI之间的关联,本研究同时采集了多个路况指标,包括PCI、PQI、RQI等。以下将对沥青路面和水泥路面的RQI与PCI的关系、以及两项指标对于PQI等级的贡献程度分别进行研究。表1、表2为不同RQI等级下和PCI等级下PQI平均值与标准差。

表1 不同RQI等级下的PQI平均值与标准差

	RQI 等级	PQI 平均值	PQI 标准差	样本个数	相关系数
沥青路面	RQI < 60(差)	60.201(次)	15.357	704	0.702
	60 ≤ RQI < 70(次)	76.031(中)	7.899	305	0.190
	70 ≤ RQI < 80(中)	80.142(良)	8.144	514	0.171
	80 ≤ RQI < 90(良)	85.738(良)	8.087	1 117	0.301
	RQI ≥ 90(优)	92.737(优)	5.752	1 403	0.256
水泥路面	RQI < 60(差)	59.201(差)	15.357	2 965	0.712
	60 ≤ RQI < 70(次)	76.031(中)	7.899	572	0.314
	70 ≤ RQI < 80(中)	78.142(中)	8.144	517	0.151
	80 ≤ RQI < 90(良)	85.738(良)	8.087	397	0.276
	RQI ≥ 90(优)	92.737(优)	5.752	96	0.365

表2 不同PCI等级下的PQI平均值与标准差

	PCI 等级	PQI 平均值	PQI 标准差	样本个数	相关系数
沥青路面	PCI < 60(差)	50.540(差)	13.242	292	0.771
	60 ≤ PCI < 70(次)	65.35(次)	9.244	264	0.204
	70 ≤ PCI < 80(中)	72.76(中)	9.345	549	0.308
	80 ≤ PCI < 90(良)	81.55(良)	8.354	1031	0.286
	PCI ≥ 90(优)	90.31(优)	4.752	1907	0.333
水泥路面	PCI < 60(差)	60.201(次)	13.424	687	0.660
	60 ≤ PCI < 70(次)	44.13(差)	10.248	684	0.217
	70 ≤ PCI < 80(中)	62.49(次)	8.965	1 006	-0.155
	80 ≤ PCI < 90(良)	69.35(次)	7.244	1 372	0.194
	PCI ≥ 90(优)	77.51(中)	5.231	798	0.346

从表1和表2中可以看出,对于沥青路面,PCI和PQI的等级是协调的,不管路况如何,二者总是处于同一等级。而当RQI处于“差”、“次”和“中”时,PQI均值并不能很好的与之对应,且在各个等级范围内PCI与PQI的相关系数均要大于RQI。也即,对沥青路面而言,PCI对PQI的影响程度更大。而对于水泥路面,PQI对PCI的等级变化并不敏感,此时RQI绝大部分等级范围均与PQI相同,且相关系数普遍高于PCI。因此,对水泥路面来说,RQI对于PQI的影响程度更大。

对于PQI等级为差的水泥和沥青路面,PCI和RQI与PQI的相关性系数都很大,说明当路面损坏到一定程度时,各项指标下降均会很明显,此时PCI

和 RQI 均可较好的反应路面使用性能。

3.2.2 路况指标关联性分析

PQI 等级在一定程度可以反应路面当前的使用性能,不同的 PQI 等级的路面,其各个路面性能指标的分布情况及规律可能也不相同。因此,有必要进一步分析不同 PQI 等级下的 PCI、RQI 分布状况,结果见表 3、表 4 和图 5、图 6。

表 3 沥青路面 PCI 与 RQI 相关性分析表

PQI 等级	相关性系数	P(显著性)	样本个数
优	-0.290	0.00	1 408
良	-0.721	0.00	1 186
中	-0.850	0.00	647
次	-0.954	0.00	416
差	-0.349	0.00	386

由表 3 和表 4 可以看出,沥青路面和水泥路面在不同的 PQI 等级范围内,RQI 和 PCI 都呈现负相关性。当路面 PQI 等级处于“良”、“中”和“次”时相关

表 4 水泥路面 PCI 与 RQI 相关性分析表

PQI 等级	相关性系数	P(显著性)	样本个数
优	-0.401	0.00	116
良	-0.681	0.00	592
中	-0.823	0.00	1 009
次	-0.879	0.00	1 110
差	-0.396	0.00	2 020

性尤为明显,特别当 PQI 等级处于“次”时,相关性系数达到了 -0.954 和 -0.879,而当路面使用性能较好(PQI 等级为“优”和“良”)或过坏(PQI 等级为“差”)时,这种相关性相对较低。说明对于农村公路,除了路面使用性能好或过坏时,RQI 的检测结果均与 PCI 存在较好的关联性。当进行路网级检测时,甚至可以用 RQI 指标推算 PCI 检测结果,从而达到节省检测资源、提高路网检测效率的目的。因此,可以进一步建立 RQI 和 PCI 的关系模型。

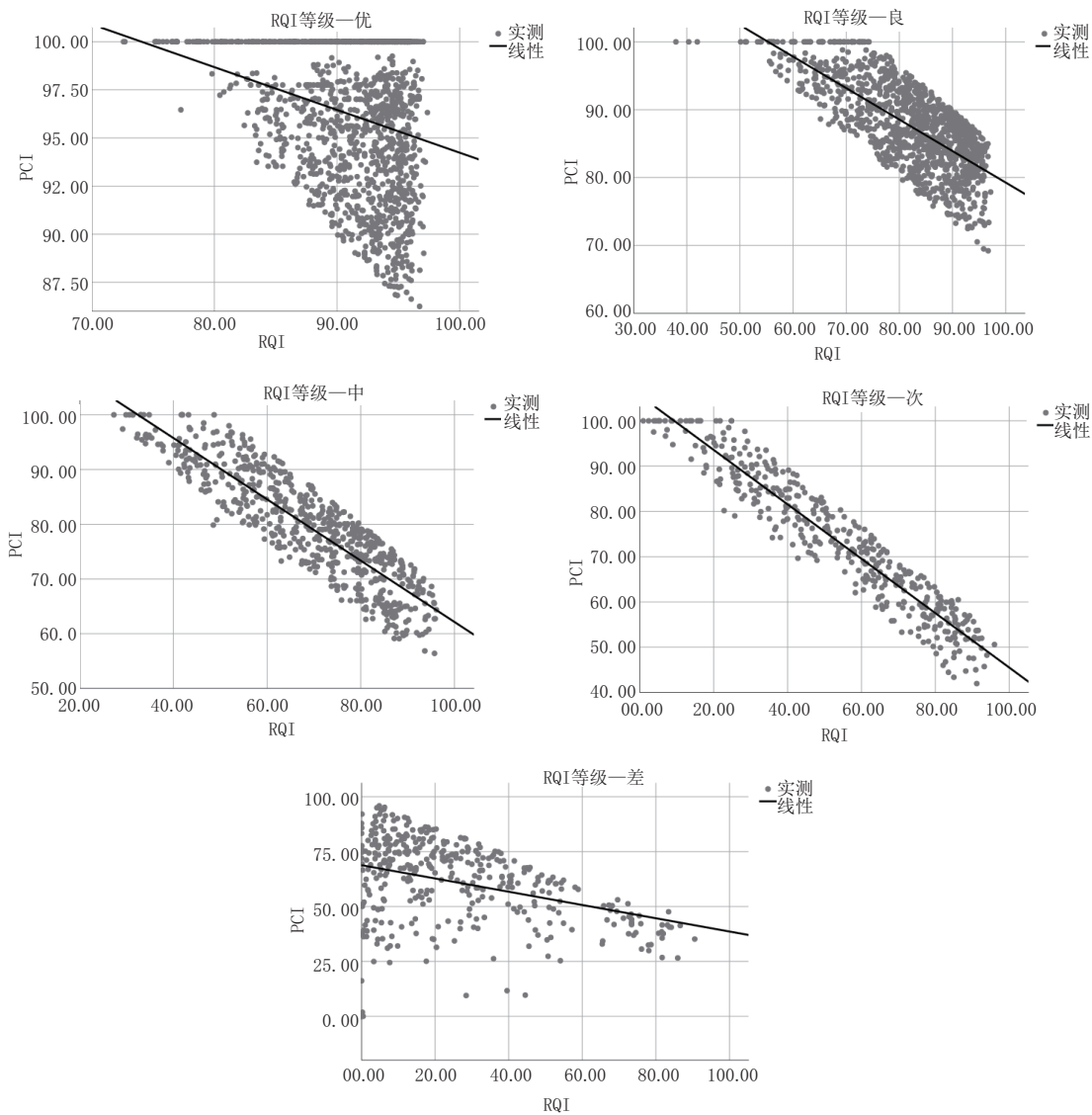


图 5 沥青路面 PCI 与 RQI 的分布特征

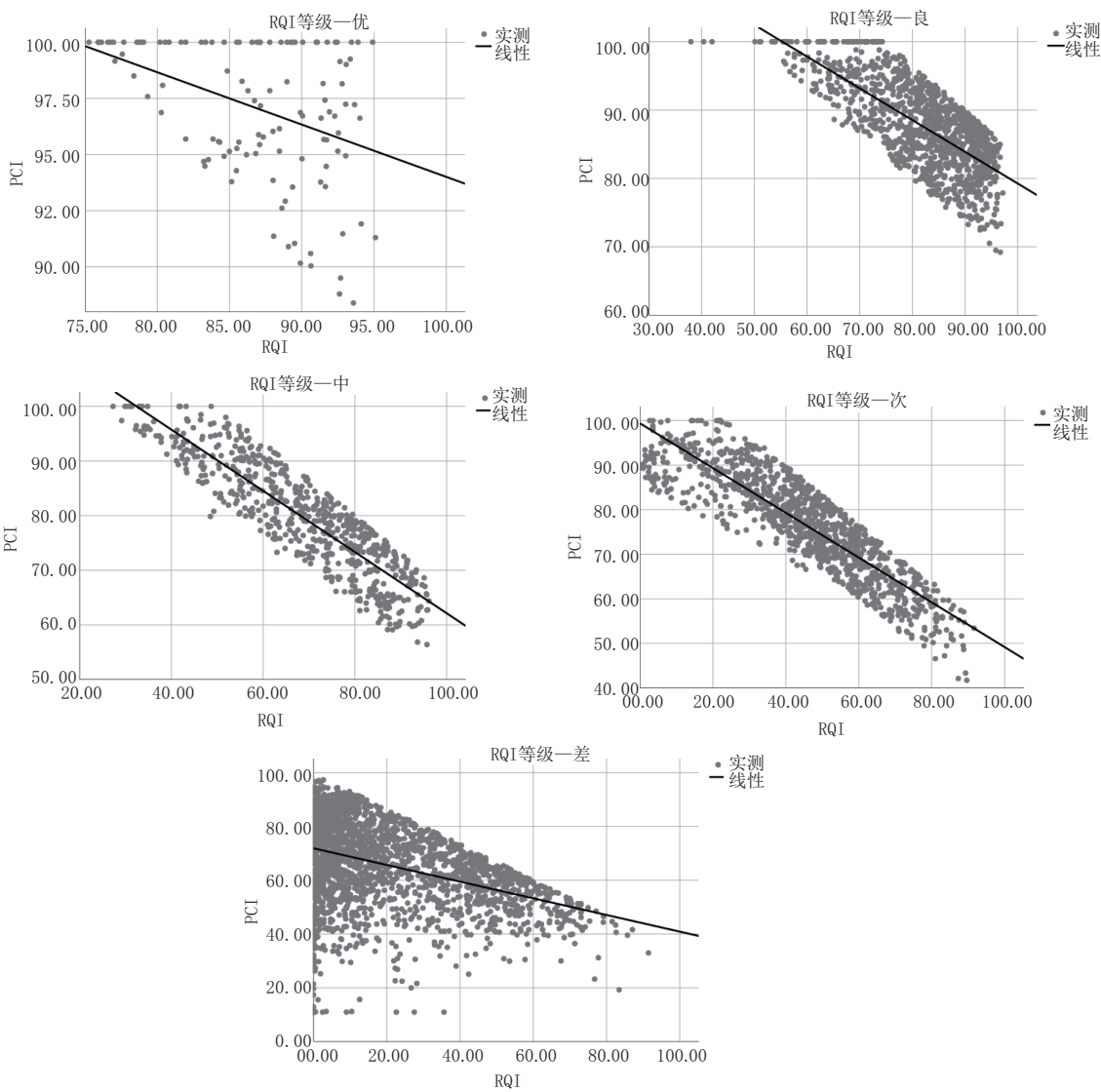


图6 水泥路面 PCI 与 RQI 散点图

4 农村公路使用性能预测模型

通过上述研究可以发现,对于处于一般状态($60 < PQI < 80$)以及过差($PQI < 60$)的农村公路来说,尤其是水泥路面,仅通过对 RQI 的检测便能很好的反应路面的使用性能。为了验证这一发现,本研究利用上述农村公路检测数据,通过机器学习的方式,分别建立了基于 RQI 指标的沥青路面和水泥路面的路面使用性能等级预测模型,以 RQI 作为输入变量,路面使用性能 PQI 等级作为输出变量,模型预测结果见图 7、图 8。

可以看出,模型 1 的总体精度为 79.3%,对于 PQI 等级为“中、次、差”的路段,预测精度分别为 78.1%、74.0%和 90.8%,对于“优”和“良”路段的预测精度略低,为 59%和 57.3%;模型 2 的总体精度为 68.2%,对于 PQI 等级为“中、次、差”的路段,预测精度分别为 62.0%、79.7%和 90.7%,对于“优”和“良”

		模型1(可优化树)				
真实类	1	90.8%	12.1%	2.9%	1.7%	
	2	8.6%	74.0%	9.7%	9.4%	4.1%
	3	0.5%	11.2%	78.1%	19.2%	2.0%
	4	0.1%	2.4%	7.5%	57.3%	34.7%
	5		0.2%	1.7%	12.4%	59.2%
PPV		90.8%	74.0%	78.1%	57.3%	59.2%
FDR		9.2%	26.0%	21.9%	42.7%	40.8%
		1	2	3	4	5
		预测类				

图7 水泥路面使用性能预测模型混淆矩阵

路段的预测精度为 70.3%和 56.9%。
以上结果表明,单独使用 RQI 进行路面使用性能等级预测时,水泥路面的预测效果明显好于沥青路面,尤其是对路况较差路段,预测精度超过了90%,与

模型2(可优化树)					
真实类	1	2	3	4	5
	90.7%	2.7%	1.8%	1.0%	0.1%
	3.8%	79.7%	8.8%	4.4%	1.8%
	2.3%	8.0%	62.0%	9.4%	3.3%
	2.9%	7.0%	20.5%	56.9%	24.5%
	0.3%	2.6%	7.0%	28.3%	70.3%
预测类					
PPV	90.7%	79.7%	62.0%	56.9%	70.3%
FDR	9.3%	20.3%	38.0%	43.1%	29.7%

图8 沥青路面使用性能预测模型混淆矩阵

之前研究的结论相符合。因此,在农村公路的部分路段上探索用 RQI 指标进行单一检测是可行的。

5 结 语

农路公路体量巨大,对其进行全面的网级检测具备良好的技术前景,但同时也是艰巨的任务。因此,有必要探索成本相对低廉、操作简便、检测迅速、且兼容性和稳定性均较好的检测技术与检测策略。常规的路面技术状况指标 PCI 需要采集路面图像,检测成本和数据处理成本均相对较高,与之相比,路面平整度检测则更易操作,且不需要进行复杂的后续数据处理。尤其是基于本研究所提出的简化的平整度测试方案,则更能显著降低平整度指标的获取难度。

同时,针对实际农村公路检测数据的分析结果也表明,对于低等级农村公路,当路况较差时,执行

单一的平整度检测,即可通过数学模型较为可靠地得到路面使用性能评价结果。因此,对农村公路可以设计针对性的检测方案,也即:将 RQI 作为普遍检测指标,通过模型计算分析路面使用性能;对路况较好的路段,在 RQI 检测的基础上进行 PCI 抽检,提高路面使用性能评价的准确性,从而在保证良好的检测效果的同时降低总体的农村公路检测成本。

参考文献:

- [1] 王大为,王宪惠,STEINAUER Bernhard,等.德国不限速高速公路路面平整度评价方法综述[J].中国公路学报,2019,132(4):129-133.
- [2] GB/T 26764—2011,多功能路况快速检测设备[S].
- [3] JTG 5210—2018,公路技术状况评定标准[S].
- [4] 许海亮,何兆才,何炼.车路耦合条件下沥青混凝土路面变形特性时域分析[J].公路交通科技,2017,34(12):16-22.
- [5] 张建莉,陈榕峰,姚奇.公路路面不平平整度对汽车振动的影响分析[J].公路交通科技,2019,36(11):129-133.
- [6] PRASAD J R, KANUGANTIS, BHANEGAONKARP n, et al. Development of Relationship Between Roughness (IRI) and Visible Surface Distresses: A Study on PMGSY Roads[J]. Procedia-Social and Behavioral Science, 2013(104):322-331.
- [7] SANDRA A K, SARKAR A K. Development of Model for Estimating International Roughness Index from Pavement Distresses[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2013, 14(8):715-724.
- [8] 杜豫川,刘成龙,吴荻非,等.基于车载多传感器的路面平整度检测方法[J].中国公路学报,2015,28(6):1-5.
- [9] 孙立军.道路与机场设施管理学[M].北京:人民交通出版社,2009.
- [10] 周晓青,颜利,孙立军.国际平整度指数与路面功率谱密度相关关系研究及验证[J].土木工程学报,2007,40(1):99-104.
- [11] 陈洪兴.基于国际平整度指数 IRI 的路面不平度仿真研究 [J].公路,2008(11):155-160.

(上接第 195 页)

参考文献:

- [1] DGJ 08-102—2003,城镇高压、超高压天然气管道工程技术规程[S].
- [2] 中华人民共和国国务院令 593 号.公路安全保护条例[S].
- [3] 沪建交[2010]511 号.城市桥梁、隧道安全保护区技术标准[S].
- [4] 中华人民共和国国务院令 198 号.城市道路管理条例[S].
- [5] DGJ 08-2106—2012,城市道路设计规程[S].
- [6] 中华人民共和国国务院令 639 号.铁路安全管理条例[S].
- [7] 上海市人民政府令 22 号.上海市轨道交通运营安全管理办法[S].
- [8] GB 50545—2010,110 kV~750 kV 架空输电线路设计规范[S].
- [9] 上海市人民政府令 46 号.上海市燃气管道设施保护办法[S].