

王蕊,王琴,韩晓坤,等.基于数据挖掘的公路交通逆反射量值计量技术[J].长安大学学报(自然科学版),2023,43(3):76-84.
WANG Rui,WANG Qin,HAN Xiao-kun,et al.Retroreflective technology of highway traffic retroreflective value based on data mining[J].
Journal of Chang'an University(Natural Science Edition),2023,43(3):76-84.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2023.03.008

基于数据挖掘的公路交通逆反射量值计量技术

王蕊¹,王琴²,韩晓坤¹,王露婉¹,何华阳¹

(1. 交通运输部公路科学研究所,北京 100088; 2. 长安大学 电子与控制工程学院,陕西 西安 710064)

摘要:为了探索将数据挖掘技术引入公路交通计量领域的必要性和全面了解标志、标线和突起路标逆反射测量仪的准确性、可靠性以及衰减规律,在分析公路交通逆反射计量技术的发展现状及存在问题的基础上,指出引入数据挖掘的必要性,分析数据挖掘技术在其他领域的应用现状,从数据分析角度探讨了数据挖掘技术在公路交通逆反射计量领域应用的可行性,并进一步总结分析标志、标线和突起路标的计量测试数据结果,并从量化不同因素对逆反射性能的影响、设备寿命预测、设备关键参数优化、计量性能指标优化等方面提出进一步的研究方向。结果表明:标志、标线及突起路标逆反射测量仪的准确性和可靠性随时间呈现衰减趋势,并且二次和三次模型均有较好的拟合效果;标志、标线和突起路标逆反射测量仪的准确性和可靠性在前 7 年衰减比较缓慢,在第 7 年之后,其准确性和可靠性衰减加快;根据回归分析结果,预测标志、标线和突起路标逆反射测量仪的寿命分别为 13.2、11 和 11.1 年;通过理论、试验分析及简单数学模型拟合分析的传统方法考虑因素少、使用的数据量小、研究结果具有一定的片面性,难以发现大量数据中潜在的知识模式,存在模型预测精度低、量化仪器设备影响因素难、被送检设备时空特征分析难等问题,未来将结合数据挖掘技术,推动公路交通计量领域的发展。

关键词:交通工程;公路交通;逆反射;计量;数据挖掘;结构化数据

中图分类号:U411

文献标志码:A

文章编号:1671-8879(2023)03-0076-09

Retroreflective technology of highway traffic retroreflective value based on data mining

WANG Rui¹, WANG Qin², HAN Xiao-kun¹, WANG Lu-wan¹, HE Hua-yang¹

(1. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China; 2. School of Electronic and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to explore the necessity of introducing data mining technology into the field of highway traffic metrology and comprehensively understand the attenuation law of the accuracy and reliability of signs retroreflectometer, markings retroreflectometer, and raised pavement marker retroreflectometer, the current development status and existing problems of highway traffic retroreflective metrology technology were analyzed, and the necessity of introducing data mining was pointed out, the application status of data mining technology in other fields was

收稿日期:2022-12-07

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(2021-9035a)

作者简介:王蕊(1977-),女,山西祁县人,副研究员,工学硕士,E-mail:r.wang@rioh.cn。

analyzed. From the perspective of data analysis, the feasibility of the application of data mining technology in the field of highway traffic retroreflection metrology was discussed. The metrology and test data of signs, markings and raised pavement markers were analyzed and the analysis results were summarized, and further research directions were pointed out from quantifying the impact of different factors on retroreflective performance, equipment life prediction, optimization of equipment key parameters, optimization of metrological performance indicators, and so on. The results show that the accuracy and reliability of signs, markings and raised pavement markers show a declining trend over time, the quadratic model and the cubic model have good fitting effects. The accuracy and reliability of signs retroreflectometer, markings retroreflectometer and raised pavement marker retroreflectometer decrease slowly in the first seven years, and decrease rapidly after the seventh year. According to the regression analysis results, the predicted lifespan of signs retroreflectometer, markings retroreflectometer, and raised pavement marker retroreflectometer is 13.2, 11 and 11.1 years, respectively. Through theoretical, experimental analysis and simple mathematical model fitting analysis, few factors are considered and the amount of data used is small. Therefore, the research results are one-sidedness and difficult to find potential knowledge patterns in a large amount of data. There are some problems, such as low prediction accuracy of the model, difficult to quantify the influencing factors of instruments and equipment, and difficult to analyze the space-time characteristics of the equipment submitted for inspection. In the future, data mining technology will be combined to promote the development of highway metrology. 2 tabs, 5 figs, 38 refs.

Key words: traffic engineering; highway traffic; retroreflection; metrology; data mining; structured data

0 引言

随着“交通强国”战略的深入落实与持续推进,中国公路交通发展进入了快车道,在行业需求引领下,各种公路交通检测设备迎来了不同程度的迭代升级;在“质量强国”战略的指导下,公路交通计量技术机构致力于推动公路交通专业领域的量值统一和计量测试技术工作,通过对比示值误差、重复性等指标与相关技术要求的符合性,评估公路用试验检测设备性能状态,为使用单位提供参考,提高公路交通基础设施质量。计量检定校准工作作为行业发展的质量“标尺”,保障了每台试验检测设备性能的准确性和可靠性,对提高公路交通行业检测质量整体水平具有重要作用。

逆反射是道路交通领域与安全直接相关的专业技术,应用于交通安全设施中的标志、标线和突起路标相关产品中,其计量测试技术是保障交通工程质量的重要手段。《公路水运工程试验检测机构等级标准》、《公路工程试验检测仪器设备服务手册》等将道路交通标线的逆反射亮度系数测试装置作为关键仪器设备配置要求提出,体现了道路交通标线光度

性能的重要性。逆反射测量设备是测量交通安全设施逆反射光度性能的专用计量器具,包括交通标志、标线和突起路标逆反射测量仪。

目前中国常用交通标志、标线和突起路标逆反射测量仪的产品质量、测试原理不尽相同,缺乏统一的量值溯源途径,导致同一产品在不同测量条件下测量结果不同等问题,对此,一些学者开展了逆反射性能测试装置的研究。王伟杰等基于相对测量法研制了便携式逆反射系数测试仪,主要用于测量交通标志、车身标识等材料的逆反射系数^[1]。郑春弟等基于照度法建立了逆反射系数测量标准装置,测量范围覆盖 $0.05 \sim 1\,999.00 \text{ (cd} \cdot \text{lx}^{-1})/\text{m}^2$,测量不确定度 U_r 为 $3.0\% \sim 8.2\%$,包含因子 $k=2$,表示置信率为 95% ^[2]。王露婉等进一步通过静态试验和动态试验,对比了便携式和车载式道路交通标线逆反射测量仪采集的成都市内某路段的标线逆反射亮度系数,验证了车载式道路交通标线逆反射测量仪测量逆反射亮度系数的可靠性^[3]。

逆反射测量设备的原理是模拟汽车在夜间公路上行驶时,汽车前照灯照射路面上的逆反射材料制作的标线、标志信息板等引导设施,经其反射后,被

驾驶室內的驾驶人观察到,从而使其具有良好的视认效果,保障交通安全。因交通标志、标线、突起路标所处的环境差异,其逆反射性能并不是一成不变的。杨学政等分析了影响逆反射性能的因素,发现反光膜的种类、交通标志的使用时间及使用环境等均对标志逆反射性能有影响^[4]。夏云峰等运用理论分析的研究方法,采用光线追踪的思想,研究了逆反射材料参数、结构参数对玻璃微珠逆反射效率的影响,结果表明,材料折射率对微珠的逆反射效率影响显著,折射率为 1.93 时玻璃微珠逆反射效率最高^[5]。孙晓龙等通过文献分析,研究了标线材料钛白粉和玻璃微珠比例、粒径大小、折射率等对其逆反射性能的影响^[6]。韩海龙等对施工完成后的路面热熔标线性能衰减情况进行跟踪观测,结果显示,交通量的大小对标线性能影响很大,交通量越大,路面标线逆反射系数、厚度下降速度越快,性能衰减变化规律性越明显^[7]。杨勇等研究了多种光源条件下红、黄、白、绿、蓝 5 种逆反射材料标志逆反射系数变化趋势,发现不同的光源及标志逆反射材料对其逆反射系数有不同的影响^[8]。

也有学者初步研究了交通标志标线逆反射性能随时间的衰减规律。陈艳艳等采用对数模型、二次函数模型、三次函数模型等对北京试验场连续 13 年观测的 230 个交通标志反光膜逆反射系数随时间的衰减状况进行拟合,结果表明,二次函数模型和三次函数模型拟合效果较好,但是模型决定系数均较低,主要在 0.4~0.6^[9],这与文献[10]的研究结果一致。姜明等研究指出,二次函数模型和三次函数模型对交通标志反光膜逆反射系数衰减随时间的衰减状况拟合效果较好,决定系数低于 0.7^[10]。郝晓燕等研究了山西省内 3 条高速公路的标志标线可视性,采用回归分析方法分析了标志标线逆反射亮度系数随时间的变化,发现其呈指数衰减趋势^[11]。

上述研究通过理论和试验分析了影响逆反射性能的因素,包括路段交通量、反光膜材料、使用时间及所处环境条件等。然而,上述研究仅对影响逆反射性能的因素做了定性分析,以及通过回归分析方法研究了交通标志标线逆反射性能随时间的变化趋势,并没有对逆反射性能表征值——逆反射系数的准确性、可靠性进行研究,也没有进一步系统分析时间因素对逆反射测量设备计量特性的影响变化趋势。

测量仪器示值与对应输入量的参考值之差称为示值误差。示值误差应符合《逆反射测量仪检定规程》(JJG 059—2004)要求,即标志、标线及突起路标

逆反射测量仪的最大示值误差分别不超过 $\pm 2\%$ 、 $\pm 5\%$ 和 $\pm 8\%$ 。示值误差的变化可以反映出逆反射测量设备准确性和可靠性。通过对公路交通行业计量技术机构在日常工作中获取的逆反射测量设备的计量测试数据进行分析,利用数学模型进行拟合,研究建立逆反射测量设备重复性、稳定性等关键量值监测模型,确立关键量值的变化规律,实现对逆反射测量设备计量特性主观评价的客观化,从而完成对逆反射测量仪定期维护节点、设备更新节点、设备报废节点等全寿命周期的预测。

基于此,本文在上述研究现状分析的基础上,借鉴数据挖掘在其他领域研究应用的思想,进一步探讨数据挖掘在公路交通计量领域的研究可行性,总结相关研究结果并展望未来研究方向。

1 数据挖掘研究现状

现代社会正处于新一代互联网技术、信息爆发式增长、数据量激增的时代。大数据指无法用现有的软件工具提取、存储、搜索、共享、分析和处理的海量、复杂的数据集合。数据挖掘指分析大量数据中的每个数据,探索数据中存在的一般规律。

信息科技发展的潮流下,数据挖掘技术深化了在各行各业的应用,有效提高了模型预测准确度和精确度,量化了各因素间的关系,发现了各因素之间的潜在相互作用。Shehadeh 等提出了 3 种基于机器学习的修正决策树(MDT)、轻量级梯度提升机(LightGBM)和极端梯度提升(XGBoost)回归方法来预测重型建筑设备的残值,结果表明,MDT 算法的预测精度最高^[12]。Bao 等提出了一种时空卷积长短时记忆网络(STCL-Net),基于碰撞数据、大规模出租车数据等预测全市短期碰撞风险^[13]。Zhang 等提出了一种基于隐马尔可夫模型的设备运行状态认知方案,并提出了一种分析级联失效的方法,得到了网络物理系统在随机攻击下的临界阈值^[14]。Bao 等利用 Twitter 签到数据、出租车出行记录和地铁乘客记录等数据,通过建立地理加权泊松回归(GWPR)模型,研究了人类活动对城市交通事故的空间影响,并建立了碰撞数与人类活动之间的关系模型^[15]。Qin 等量化供需比、搜索距离、搜索强度、票价和接送速度对出租车收入的影响,结果表明,搜索距离和接送速度对出租车收入水平的贡献占主导地位,如果能平衡这 2 个因素,出租车处于低需求地区也能获得高收入^[16]。杨捷等基于主成分分析和 k-平均聚类方法对电力负荷数据进行分析,有效挖

掘了电网用户不同类别的用电行为模式^[17]。

目前,在公路交通行业,数据挖掘技术已成为研究热点,已成功应用于交通流预测^[18-20]、出租车需求预测^[21-22]、城市功能划分^[23-24]、交通碳排放估计^[25-26]、交通拥堵分析^[27]及交通事故风险预测^[28-29]等领域。然而,数据挖掘在公路交通行业专业计量领域中的应用相对滞后。经过十余年的发展,公路交通行业专业计量技术机构已拥有大量的逆反射测量设备计量数据。相关研究^[30-33]表明,数据挖掘的应用,有利于对设备故障原因进行溯源,分析设备在不同时间、空间上影响因素的差异,提高设备故障识别效率和准确性,为设备的维修和更换提供理论基础。因此,结合公路交通行业逆反射测量设备在实际工作的经验,应用数据挖掘发现,计量校准数据存在的规律和潜在的知识模式,对进一步促进公路交通计量领域的发展具有重要意义。

2 数据挖掘在公路交通逆反射计量中的应用分析

2.1 可行性分析

社会经济数字化不断发展,各行各业数据量激增。基于大数据计量校准服务平台的建立为计量校准服务资源整合、数据收集提供了保障^[34]。以高速度、高可靠性、低延迟性、高链接密度为特点的 5G 技术的发展^[35],保障了计量数据的可靠性和准确性,为进一步分析数据并挖掘数据背后的信息提供了坚实基础。近年来,数据挖掘在计量其他相关领域算法优化、提高模型准确度和仪器设备工作性能方面得到了广泛应用。陈红岩等提出了基于灰狼优化算法的支持向量机回归模型,该模型适用于小样

本数据,提高了红外甲烷传感器对标准甲烷气体的预测精度^[36]。孔德明等提出了基于自适应网格聚类的障碍物检测方法,提高了 16 线激光雷达点云数据中障碍物检测准确性^[37]。张旭飞等基于遗传算法优化了簧片式低频电磁振动台水平及测簧片宽度及厚度尺寸结构,扩展了振动台的有效工作频率范围^[38]。在公路交通行业日常使用的试验测试设备、工程设备、养护设备,工作环境复杂,专业集成程度较高,多参量、复合参量等技术特性明显,无法实时捕捉仪器设备性能变化的关键节点,因此,有必要通过数据挖掘对仪器设备关键量值的计量特性变化进行实时追踪。

目前,公路交通计量相关部门借助相关的分析软件进行数据采集,已初步完成二十余型、累计几万台套道路与桥梁工程检测设备历年检校数据的汇总,并以结构化数据体现,如图 1 所示,图 1 中, X_i 表示检测设备的第 i 条计量测试数据, a_i, b_i, \dots, p_i 为第 i 条数据的机构名称,证书编号, \dots ,校准结果。随着数据挖掘、人工智能等技术的发展,从大量计量校准数据中提取特征,挖掘数据背后的信息,已成为公路交通逆反射计量领域发展的必然趋势。

2.2 逆反射测量设备检有效数据分析

2.2.1 数据来源及预处理分析

公路交通计量测试数据主要来源于全国各个省计量检测机构每年被送检设备的计量检测数据,以原始记录和证书报告的方式存储,包括器具名称、型号、校准日期、校准结果等有效数据。数据可以追溯到 2012 年,在 2020 年之前,主要通过手工记录、纸质证书报告的方式保存数据;2020 年后,主要通过电子记录、电子证书报告的方式保存数据。

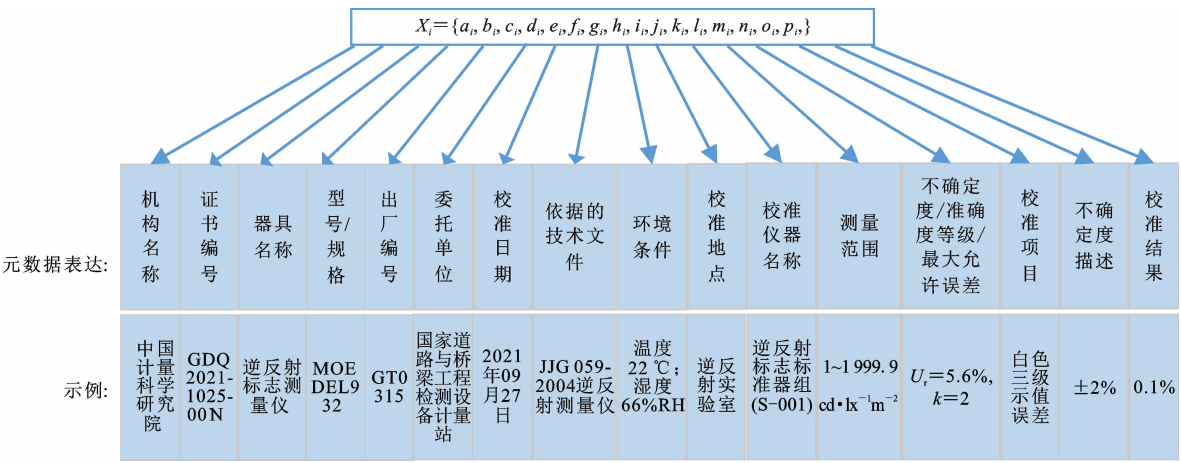


图 1 公路计量结构化元数据及示例

Fig. 1 Structured metadata and example of highway metrology

在公路交通计量数据采集、录入和传输等过程中存在仪器校准检测错误、网络延误,会出现数据冗余、数据错误和数据缺失等。因此,在对数据进行深入分析研究之前,一般需要先对数据进行预处理,数据预处理包括筛选数据、删除冗余数据和处理缺失值,如图 2 所示。首先,筛选与研究内容相关的数据项和字段,并删除多余的数据。以标志逆反射测量仪的寿命预测为例,首先根据字段器具名称筛选包含标志逆反射测量仪的所有数据项。其次,图 1 中一些字段对研究标志逆反射测量仪的寿命没有任何帮助,因此,需要进一步筛选出校准日期、校准项目、不确定度描述、校准结果等与设备寿命有关的字段进一步分析,筛选后数据示例如表 1 所示。由表 1 可知,第 1 和第 2 行数据一致,应该删除。最后,处理缺失值。数据缺失值的处理较为复杂,一般有以下 3 种方法:①直接使用含有缺失值的特征,但这种方法仅适用于对缺失值有容忍度或灵活处理方法的模型,如 k-近邻、决策树、随机森林和基于密度的聚类方法等;②删除含有缺失值的特征,适用于包含大量缺失值而仅包含少量有效值;③缺失值补全,常用的方法有采用均值或众数插补、模型预测、

高维映射等。第 5 行的校准结果缺失,这里采用均值填补,则填补值为 0.2%。

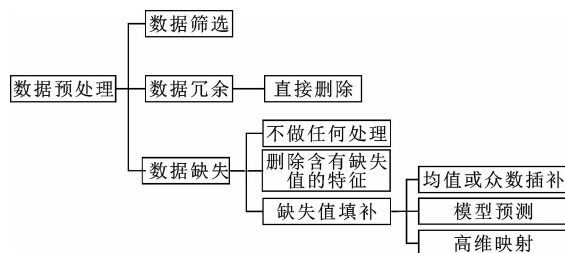


图 2 计量校准数据预处理

Fig. 2 Metrology calibration data preprocessing

2.2.2 方法论

为了获得标志、标线、突起路标逆反射测量仪的使用寿命,本文选择具有 2012~2022 年计量测试数据的 3 台逆反射测量设备的使用时间为自变量,相应示值误差的绝对值为因变量,绘制散点图,并选择线性函数、对数函数、指数函数等模型对数据进行拟合分析。此过程使用 SPSS 27 进行相关数学回归分析。根据显著性结果和判定系数 R^2 选择具有统计学差异的回归模型,且判定系数最大的回归模型作为最终的寿命预测模型,一般以显著性 P 值小于 0.05 为有统计学差异。

表 1 筛选后数据示例

Tab. 1 Filtered data examples

器具名称	型号/规格	出厂编号	校准日期	校准项目	不确定度描述	校准结果
标志逆反射测量仪	MOEDEL932	GT0315	2021.09.27	0.2°/-4°	±2%	0.0%
标志逆反射测量仪	MOEDEL932	GT0315	2021.09.27	0.2°/-4°	±2%	0.0%
标志逆反射测量仪	STT-101D	NF190179	2021.09.16	0.2°/15°	±2%	1.0%
标志逆反射测量仪	STT-101D	NF190179	2021.09.16	0.2°/30°	±2%	0.1%
标志逆反射测量仪	STT-101D	NF190179	2021.09.16	0.2°/-4°	±2%	
标志逆反射测量仪	STT-301C	YBX200409	2021.10.12	1.05°/88.76°	±2%	-0.1%

2.2.3 回归模型结果分析

现有研究仅考虑了标志和标线逆反射性能随时间的变化趋势,本文系统研究了逆反射测量设备量值准确性和可靠性随时间的变化趋势。回归分析结果如图 3~图 5 所示。可见:标志、标线和突起路标逆反射测量仪的示值误差随时间呈上升趋势,在开始使用的前 7 年,示值误差缓慢上升,但是均没有超过最大示值误差的一半;第 7 年之后,示值误差快速上升,标志、标线和突起路标逆反射测量仪的准确性及可靠性快速下降。因此,在其使用的第 7 年,相关计量技术机构应对达到年限的设备进行重点监测,根据检定校准情况对设备后续使用给出“继续使用”、“部分功能可用”或者“停用”的建议。设备使用单位根据建议开展相应的检测活动,以便更好地为

交通行业提供可靠、准确的测试服务,提高试验检测结果的可靠性,促进仪器设备高质量发展,同时也为交通管理部门提供政策依据。

模型回归结果如表 2 所示。由表 2 可知, R^2 大于 0.5, 显著性水平小于 0.05, 模型拟合效果较好, 其中, 标志、标线和突起路标逆反射测量仪使用二次函数模型和三次函数模型拟合效果较好, R^2 均大于 0.85, 优于以往研究中采用逆反射系数和衰减值为因变量。根据 R^2 , 最终选择模型如下。

标志逆反射测量仪

$$y = 0.003t^3 - 0.054t^2 + 0.357t - 0.220$$

标线逆反射测量仪

$$y = 0.005t^3 - 0.047t^2 + 0.363t - 0.033$$

突起路标测量仪

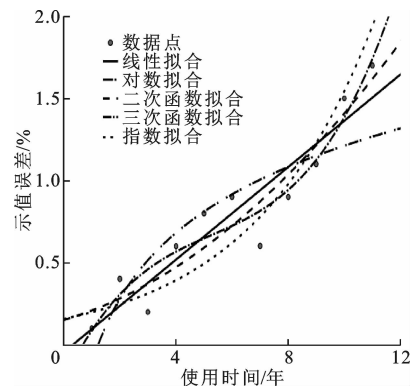


图 3 标志逆反射测量仪示值误差随时间变化趋势
Fig. 3 Trends of indication error of sign retroreflectometer over time

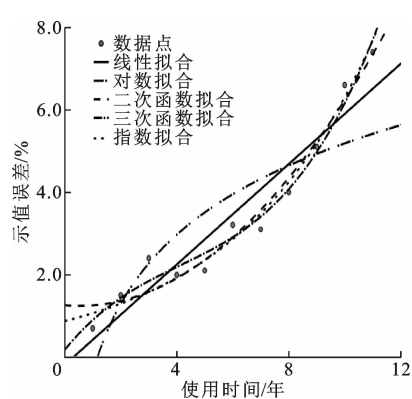


图 5 突起路标测量仪示值误差随时间变化趋势
Fig. 5 Trends of indication error of raised pavement marker retroreflectometer over time

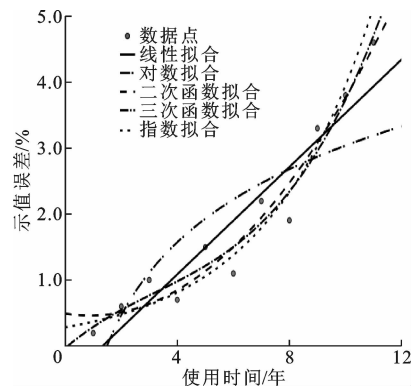


图 4 标线逆反射测量仪示值误差随时间变化趋势
Fig. 4 Trends of indication error of marking retroreflectometer over time

$$y=0.010t^3-0.123t^2+0.834t+0.176$$

式中: y 为示值误差; t 为使用时间。

根据上述模型和最大允许示值误差,预测标志、

及隐藏的有用信息具有很大局限,存在预测准确度

标线和突起路标逆反射测量仪的寿命分别为 13.2、11 和 11.1 年,建议其终止使用年限分别为 12、10 和 10 年。根据图 3~图 5 中示值误差数据点的变化趋势可见,标志和标线逆反射测量仪每 2 年波动较大,而突起路标逆反射测量仪示值误差每 3 年波动较大,因此,建议标志、标线和突起路标逆反射测量仪的定期维护年限分别为 2、2 和 3 年。

3 结 语

(1)现有关于仪器设备计量的研究主要通过试验方法,研究 1 种或多种因素改变对设备性能的影响或使用已知的数学模型对设备性能变化进行拟合,对于挖掘公路交通计量数据中潜在的知识模式

表 2 逆反射测量设备示值误差回归分析

Tab. 2 Regression analysis of indication error of retroreflection measuring equipments

设备示值	模型	模型估计值				R^2	统计值 F	P
		常数项	回归系数 b_1	回归系数 b_2	回归系数 b_3			
标志逆反射测量仪	线性模型	-0.045	0.141			0.874	62.223	<0.001
	对数模型	-0.121	0.579			0.744	26.146	<0.001
	二次函数模型	0.152	0.050	0.008		0.893	33.500	<0.001
	三次函数模型	-0.220	0.357	-0.054	0.003	0.922	27.538	<0.001
	指数模型	-0.158	0.228			0.787	33.238	<0.001
标线逆反射测量仪	线性模型	-0.544	0.407			0.887	70.351	<0.001
	对数模型	-0.645	1.599			0.690	20.024	0.002
	二次函数模型	0.493	-0.071	0.040		0.953	80.782	<0.001
	三次函数模型	-0.033	0.363	-0.047	0.005	0.960	55.690	<0.001
	指数模型	0.283	0.264			0.890	72.906	<0.001
突起路标测量仪	线性模型	-0.191	0.609			0.904	85.091	<0.001
	对数模型	-0.388	2.420			0.721	23.236	<0.001
	二次函数模型	1.258	-0.059	0.056		0.963	105.171	<0.001
	三次函数模型	0.176	0.834	-0.123	0.010	0.977	98.225	<0.001
	指数模型	0.873	0.198			0.911	92.489	<0.001

低、被送检设备时空可视化分析难、检测设备性能指标异常难、设备性能影响因素不明确等问题。

(2)通过对逆反射检测设备计量测试数据进一步分析,结果表明,标志、标线和突起路标逆反射测量仪的准确性及可靠性总体上呈现衰减趋势。在前7年,其逆反射性能衰减比较缓慢,但是在第7年之后,其逆反射性能衰减加快,建议在标志、标线和突起路标逆反射测量仪使用的7年后加强对其性能的监测;二次函数模型和三次函数模型对标志、标线和突起路标逆反射测量仪的准确性及可靠性随时间的变化均有较好的拟合效果,优于以往研究中采用逆反射系数和衰减值作为因变量;根据回归分析结果,建议标志、标线和突起路标逆反射测量仪的定期维护周期、更换年限和使用寿命分别为2、2、3年,7、7、8年和12、10、10年。

(3)本文所使用的回归模型仅考虑了时间因素,研究对象单一,不能准确反映逆反射检测设备准确性及可靠性的衰减规律。未来将从以下几个方面进一步开展研究:①量化设备影响因素对逆反射性能的影响;②设备寿命预测;③设备参数优化;④计量性能指标异常值识别;⑤计量性能指标优化;⑥外出集中检校地点的分析。

参考文献:

References:

- [1] 王伟杰,赵学增,潘昀路,等.便携式逆反射系数测试仪[J].光学精密工程,2017,25(12):3096-3104.
WANG Wei-jie,ZHAO Xue-zeng,PAN Yun-lu,et al. Portable retroreflection coefficient tester[J]. Optics and Precision Engineering,2017,25(12):3096-3104.
- [2] 郑春弟,冯国进,梁凤臣,等.逆反射系数测量标准装置的建立[J].计量学报,2021,42(1):16-19.
ZHENG Chun-di,FENG Guo-jin,LIANG Feng-chen,et al. Establishment of a standard device for measuring the coefficient of retroreflection[J]. Acta Metrologica Sinica,2021,42(1):16-19.
- [3] 王露婉,韩晓坤,何华阳,等.道路交通标线动静态测量比对研究[J].公路与汽运,2021(2):43-46.
WANG Lu-wan,HAN Xiao-kun,HE Hua-yang,et al. Comparative study on dynamic and static measurement of road traffic markings[J]. Highways & Automotive Applications,2021(2):43-46.
- [4] 杨学政,滕方勇.标志反光膜逆反射性能评价方法与影响因素分析[J].山东交通科技,2020(2):106-109.
YANG Xue-zheng,TENG Fang-yong. Evaluation method and influence factor analysis of retroreflection performance of sign reflective film[J]. Shandong Jiaotong Keji,2020(2):106-109.
- [5] 夏云峰,张修路,罗 雾,等.玻璃微珠逆反射系数的数值计算[J].西南科技大学学报,2019,34(2):102-106.
XIA Yun-feng,ZHANG Xiu-lu,LUO Fen,et al. Numerical calculation of retroreflection coefficient of glass beads[J]. Journal of Southwest University of Science and Technology,2019,34(2):102-106.
- [6] 孙晓龙,袁俊申,于华洋,等.反光标线材料及其逆反射性能影响因素研究进展[J].广东工业大学学报,2021,38(4):81-94.
SUN Xiao-long,YUAN Jun-shen,YU Hua-yang,et al. Research progress of reflective marking materials and influencing factors of their retroreflective properties[J]. Journal of Guangdong University of Technology,2021,38(4):81-94.
- [7] 韩海龙,龚 强,孙晓华,等.高等级公路沥青路面热熔标线性能变化规律研究[J].山东交通科技,2019(4):117-119.
HAN Hai-long,GONG Qiang,SUN Xiao-hua,et al. Study on the change law of hot melt marking performance of asphalt pavement of high-grade highway[J]. Shandong Jiaotong Keji,2019(4):117-119.
- [8] 杨 勇,张智勇,李 旭,等.光源光谱对标志逆反射系数的影响[J].光谱学与光谱分析,2014,34(1):12-15.
YANG Yong,ZHANG Zhi-yong,LI Xu,et al. Influence of light source spectrum on sign retroreflection coefficient[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2014,34(1):12-15.
- [9] 陈艳艳,姜 明.公路交通标志反光膜逆反射系数衰减规律[J].交通运输工程学报,2016,16(6):107-113.
CHEN Yan-yan,JIANG Ming. Attenuation law of retroreflection coefficient of reflective film of highway traffic signs[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2016,16(6):107-113.
- [10] 姜 明,张 帆,黎 峰.自然环境中指路标志反光膜逆反射系数衰减规律[J].公路交通科技,2012,29(3):137-141,148.
JIANG Ming,ZHANG Fan,LI Feng. Attenuation law of retroreflection coefficient of reflective film of road signs in natural environment[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2012,

- 29(3):137-141,148.
- [11] 郝晓燕,郭忠印,宋灿灿,等.基于可视性衰减的高速公路标志标线安全养护[J].公路,2019,64(1):271-277.
- HAO Xiao-yan, GUO Zhong-yin, SONG Can-can, et al. Safety maintenance of expressway signs and markings based on visibility attenuation[J]. Highway, 2019, 64(1): 271-277.
- [12] SHEHADEH A, ALSHBOUL O, AIMAMLOOK R E, et al. Machine learning models for predicting the residual value of heavy construction equipment: An evaluation of modified decision tree, LightGBM, and XGBoost regression[J]. Automation in Construction, 2021, 129: 103827.
- [13] BAO J, LIU P V, UKKUSURI S. A spatiotemporal deep learning approach for citywide short-term crash risk prediction with multi-source data[J]. Accident Analysis & Prevention, 2019, 122: 239-254.
- [14] ZHANG Q, LIU Y. Reliability evaluation of Markov cyber-physical system oriented to cognition of equipment operating status [J]. Computer Communications, 2022, 181: 80-89.
- [15] BAO J, YANG Z, ZENG W L, et al. Exploring the spatial impacts of human activities on urban traffic crashes using multi-source big data[J]. Journal of Transport Geography, 2021, 94: 103118.
- [16] QIN G, LI T, YU B, et al. Mining factors affecting taxi drivers' incomes using GPS trajectories [J]. Transportation Research Part C, 2017, 79: 103-118.
- [17] 杨捷,李沛霖,罗成臣,等.基于数据挖掘的电网用户行为分析[J].云南大学学报(自然科学版),2020,42(增2):38-43.
- YANG Jie, LI Pei-lin, LUO Cheng-chen, et al. Analysis of power grid user behavior based on data mining [J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2020, 42(S2): 38-43.
- [18] LI L, SU X, WANG Y, et al. Robust causal dependence mining in big data network and its application to traffic flow predictions[J]. Transportation Research Part C, 2015, 58: 292-307.
- [19] DO L N N, VU H L, VO B Q, et al. An effective spatial-temporal attention based neural network for traffic flow prediction[J]. Transportation Research Part C, 2019, 108: 12-28.
- [20] CHEN L, ZHENG L, YANG J, et al. Short-term traffic flow prediction: From the perspective of traffic flow decomposition[J]. Neurocomputing, 2020, 413: 444-456.
- [21] LIU T, WU W, ZHU Y, et al. Predicting taxi demands via an attention-based convolutional recurrent neural network[J]. Knowledge-Based Systems, 2020, 206: 106294.
- [22] RODRIGUES F, MARKOU I, PEREIRA F C. Combining time-series and textual data for taxi demand prediction in event areas: A deep learning approach [J]. Information Fusion, 2019, 49: 120-129.
- [23] HU S, GAO S, WU L, et al. Urban function classification at road segment level using taxi trajectory data: A graph convolutional neural network approach [J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2021, 87: 101619.
- [24] LIU X, GONG L, GONG Y, et al. Revealing travel patterns and city structure with taxi trip data [J]. Journal of Transport Geography, 2015, 43: 78-90.
- [25] FENG R, YAO B, GU X, et al. Environmental benefits mining based on data-driven taxi cruising recommendation strategy [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 326: 129376.
- [26] GROTE M, WILLIAMS I, PRESTON J, et al. A practical model for predicting road traffic carbon dioxide emissions using inductive loop detector data[J]. Transportation Research Part D, 2018, 63: 809-825.
- [27] ZHAO P, HU H. Geographical patterns of traffic congestion in growing megacities: Big data analytics from Beijing[J]. Cities, 2019, 92: 164-174.
- [28] 高珍,高屹,余荣杰,等.连续数据环境下的道路交通事故风险预测模型[J].中国公路学报,2018,31(4):280-287.
- GAO Zhen, GAO Yi, YU Rong-jie, et al. Road traffic accident risk prediction model under continuous data environment[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(4): 280-287.
- [29] 戢晓峰,谢世坤,覃文文,等.基于轨迹数据的山区危险性弯道路段交通事故风险动态预测[J/OL].中国公路学报,2022:1-15[2022-02-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1313.U.20201017.1414.002.html>.
- Ji Xiao-feng, XIE Shi-kun, QIN Wen-wen, et al. Dynamic prediction of traffic accident risk in dangerous curve sections in mountainous areas based on trajectory data[J/OL]. China Journal of Highway and Transport, 2022: 1-15 [2022-02-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1313.U.20201017.1414.002.html>.

- [30] 廖孟柯,樊冰,李忠政,等.基于改进 Apriori 算法的配电网设备退役信息挖掘[J].科学技术与工程,2021,21(24):10381-10386.
- LIAO Meng-ke, FAN Bing, LI Zhong-zheng, et al. Distribution network equipment retirement information mining based on improved Apriori algorithm[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(24): 10381-10386.
- [31] 舒珏琳,张力,胡建.基于高斯混合模型的智能电表误差数据挖掘与分析方法[J].电子测量技术,2021,44(15):56-61.
- SHU Jue-lin, ZHANG Li, HU Jian. Error data mining and analysis method of smart meter based on Gaussian mixture model[J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(15): 56-61.
- [32] 张振海,张湘婷.基于关联规则的铁路信号设备故障诊断方法[J/OL].铁道标准设计,2021:1-8[2021-12-25]. <https://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.202101050002>.
- ZHANG Zhen-hai, ZHANG Xiang-ting. Fault diagnosis method of railway signal equipment based on association rules[J/OL]. Railway Standard Design, 2021: 1-8 [2021-12-25]. <https://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.202101050002>.
- [33] 王波,何一芥.基于数据挖掘的毫米波激光通信性能分析研究[J].激光杂志,2021,42(9):104-108.
- WANG Bo, HE Yi-jie. Performance analysis of millimeter wave laser communication based on data mining[J]. Laser Journal, 2021, 42(9): 104-108.
- [34] 张修建,杨平,张鹏程.基于大数据的新兴产业计量校准服务平台研究[J].计算机测量与控制,2020,28(6):104-107.
- ZHANG Xiu-jian, YANG Ping, ZHANG Peng-cheng. Research on measurement calibration service platform of emerging industries based on big data[J]. Computer Measurement & Control, 2020, 28(6): 104-107.
- [35] 沈意吉,傅家乐,张一帆.5G 时代计量技术机构的智能场景应用前景[J].上海计量测试,2020,47(4):59-61.
- SHEN Yi-ji, FU Jia-le, ZHANG Yi-fan. Intelligent scenario application prospect of measurement technology institutions in 5G era[J]. Shanghai Measurement and Testing, 2020, 47(4): 59-61.
- [36] 陈红岩,刘嘉豪,盛伟铭,等.基于 GWO 的 SVM 在红外甲烷传感器测量误差分析中的应用[J].计量学报,2021,42(9):1244-1249.
- CHEN Hong-yan, LIU Jia-hao, SHENG Wei-ming, et al. Application of SVM based on GWO in measurement error analysis of infrared methane sensor[J]. Acta Metrologica Sinica, 2021, 42(9): 1244-1249.
- [37] 孔德明,段呈新,巴特·古森斯,等.基于车载 16 线激光雷达的障碍物检测方法[J].计量学报,2021,42(7):846-852.
- KONG De-ming, DUAN Cheng-xin, BART · Gusens, et al. Obstacle detection method based on vehicle mounted 16 line lidar[J]. Acta Metrologica Sinica, 2021, 42(7): 846-852.
- [38] 张旭飞,张锋阳,李凯,等.基于遗传算法的低频标准振动台簧片式回复结构优化[J].计量学报,2021,42(11):1459-1465.
- ZHANG Xu-fei, ZHANG Feng-yang, LI Kai, et al. Optimization of reed return structure of low frequency standard shaking table based on genetic algorithm[J]. Acta Metrologica Sinica, 2021, 42(11): 1459-1465.