

路面破损状况检测、评价、 预测与管理系统的研究进展

蒋阳升^{1,2} 彭 博^{1,2,3} 韩世凡¹ 罗楠欣¹

1. 西南交通大学, 交通运输与物流学院, 成都 610031

2. 西南交通大学, 综合运输四川省重点实验室, 成都 610031

3. School of Civil & Environmental Engineering,

Oklahoma State University, OK, 74078-5013, USA

摘 要: 高效而准确地对路面破损状况进行评价分析, 是路面养护管理的基础和关键。本文对路面破损的数据采集关键技术、评价指标与方法、预测和数据库决策支持系统 4 个方面进行综述, 分析了现有技术和方法的利弊, 指出了粗放化管理的问题, 提出了建立路面破损状况信息环境的展望。该法有利于建立从数据采集、破损评价分析到预测管理的一整套有机体系, 全面准确地掌握路面破损状况。

关键词: 公路运输; 路面养护; 破损状况; 数据采集; 评价模型; 预测模型; 决策支持系统

中图分类号: U416.01

文献标识码: A

文章编号: 1672-4747(2013)04-0001-09

DOI: 10.3969/j.issn.1672-4747.2013.04.001

Review of the Research on Inspection, Evaluation, Prediction and Management Systems of Pavement Distress Condition

JIANG Yang-sheng^{1,2} PENG Bo^{1,2,3} HAN Shi-fan¹ LUO Nan-xin¹

1. School of Transportation and Logistics,

Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China

2. Key Laboratory of Integrated Transportation of Sichuan Province,

Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China

收稿日期: 2013-01-20.

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金科技创新项目(A0920502051208-99); 国家自然科学基金(51108391)。

作者简介: 蒋阳升(1976-), 男, 湖南衡阳市人, 博士, 西南交通大学教授, 交通运输与物流学院交通工程系主任。

3. School of Civil & Environmental Engineering,
Oklahoma State University, OK, 74078-5013, USA

Abstract: It is a fundamental and essential procedure for pavement maintenance to evaluate and analyze pavement distress condition effectively and precisely. In this paper, the research on four aspects related to pavement distresses were reviewed, that is, key technologies of data acquisition, evaluation indicators and methods, prediction and decision support database systems. The advantages and disadvantages of these technologies and approaches were analyzed, then, the problem of extensive management was put forward and the prospect of establishing a sufficient information environment for pavement distress condition, which was conducive to constructing an organic system integrating data collection, distress evaluation, prediction and management, was presented. Therefore, the pavement condition can be observed comprehensively and accurately.

Key words: Highway transportation, pavement maintenance, distress condition, data acquisition, evaluation model, prediction model, decision support system

0 引言

我国公路交通正处于高速发展时期,在新建、改扩建公路特别是高等级公路的同时,路面养护管理的重要性和紧迫性也日渐凸显出来^[1]。由于车辆荷载、施工、气候、天气等因素,路面会出现各种破损,常见的沥青路面破损有裂缝、坑槽、松散、沉陷、车辙、波浪拥包、泛油、修补等,水泥混凝土路面则包括板角断裂、裂缝、破碎板、坑洞、拱起、露骨等。我国公路运输需求旺盛,有些路面破损情况严重,这对路面承载力、耐久性、行车舒适性、行车速度、交通安全、油耗等造成诸多不利影响,亟待有效地管理与控制。高效而准确地对路面破损状况进行评价分析,是路面养护管理的基础和关键,并为路面养护决策提供理论基础和科学依据。

准确高效地掌握路面破损状况,首先依赖于真实有效的实测数据。目前,国内高等级公路状况的主要检测手段是人工检测和半自动检测^[2],这两种方法效率较低、劳动强度大、耗时多、误差高,难以保障调研安全性^[3],获取的数据准确性与全面性较差,不能对路面状况进行科学合理的评价和管理。近年来,路面破损的高精快速自动检测与识别技术

开始崭露头角,有望建立路面破损的充分信息环境,具有广阔的前景^[2,4]。其次,需要合理可行的评价分析体系。国内现行的路面破损评价指标比较单一,滞后于路面管理的发展需求;路面破损状态的评价和预测模型各有优劣,但它们所依据的数据质量较差,均不能适应破损数据越发完善而精确的充分信息环境。最后,掌握路面破损状态还需要精细化的管理。目前,国内还没有专门针对破损状态的数据库。路面破损状态数据库决策支持系统可以适应高速、高精度和海量信息的发展趋势,为路面养护管理提供决策依据。

对于我国路面养护管理,需要积极改进路面破损信息采集关键技术,为客观准确地判定路面状况提供数据支撑,在此基础上,完善路面破损评价指标、评价模型和预测管理方法,最终建立路面破损状况从数据采集、破损评价分析到预测管理的一整套有机体系。

1 路面破损信息采集关键技术的研究

国内外常用的路面破损状况检测技术有步行人眼观察法、坐车录像测读法、超声波法、激光法、

探地雷达和摄像测量法^[5-6]。人工检测安全性差、效率低、劳动强度大；坐车录像测读法效率低、误差大、劳动强度高；超声波法通常只用于水泥混凝土路面；激光法目前处于研发阶段^[5-9]。探地雷达法和摄像测量法相对成熟，前者能检测路面厚度、脱空、裂缝、陷落、空洞等^[5]，但在全面识别路面裂纹、坑槽、拥包、泛油等破损状况方面表现不佳；摄像测量法能全面地采集路面裂缝、坑槽、松散、车辙、平整度等信息。

目前，摄像测量法的软硬件得到了长足的发展。首先，图像处理速度和识别精度显著提高，主要体现在以下研究成果中：Chou Ch.-P.的图像分割和分类算法^[10]、施树明基于 64×64 像素子块的路面破损图像测量方法^[11]、韩杰的路面病害自动识别分类方法^[12]、Rajan Krithika 基于图像处理和识别算法的路面裂缝自动识别^[13]、欧阳琰的图像模糊增强算法^[4]等。其次，已有许多投入使用的或正在研发的基于图像测量的路面信息检测系统，已投入使用的如日本 Komatsu 系统、美国 PCES 系统、瑞士 CREHOS 系统、美国伊利诺伊州的自动路面检测系统。许多学者也在进一步研发：Wang K.C.P.提出新一代公路状况数字化检测车的设计因素^[14]，Wang K.C.P.设计了多功能路面检测车^[15]，胡曦研究了高速公路路面检测系统的裂缝自动检测定位和体系结构设计^[16]，王吉林研究了路面智能集成检测车的发展现状和趋势^[5]，王晨对“N-1”型道路状况智能检测车的智能病害识别系统进行改进^[17]。

综合前述内容可知，基于图像测量的路面信息检测的图像处理算法和硬件设备已有很大的改善，逐渐成为路面破损检测的主流趋势。尽管如此，其在实际运行成本、图片处理速度、系统检测速度和检测精度等方面仍存在较多问题，许多学者进行了针对性的研究，主要有：Nallamothe S.嵌入人工神经网络晶片以加速路面破损识别^[18]；Wang K.C.P.应用高性能数字化线扫描摄像机设计了新的检测系统^[19]；Wang K.C.P.设计了多功能路面检测车并阐释了全信息采集系统的优点^[15]；Wang K.C.P.提出多 CPU 并行计算加速数

据处理速度^[20]；Wang K.C.P.应用高分辨率数字化摄像机及相关技术实现全车道的三维表面重建^[21]；Hou Zhiqiong 开创性地应用立体视觉技术完成路面 3D 重建，纵向上能达到 5mm 的精度^[22]；Wang K.C.P.开发了实时自动的破损分析器^[23]；Wang K.C.P.基于立体视觉跟踪技术建立了道路资产管理系统^[24]；Wang K.C.P.的研究表明，路面裂缝全自动检测和识别系统能达到人工识别的功能，同时节省大量资源^[25]。这些研究提出了改善或解决上述问题的方法，结果显示，基于高精数字化摄像技术和立体视觉的路面破损三维检测速度快、精度高、信息全面，可以建立路面的充分信息环境，具有广阔的前景。

综上所述，目前绝大部分检测技术只能提取路面的二维信息，不能直接获取坑槽、车辙和平整度，而基于高分辨率数字化摄像机和立体视觉技术的三维重建能实现破损全信息化^[22]，改善路面破损检测的速度、效率和质量，对于精细化的路面管理至关重要，具有较好的发展前景。

2 路面破损状况评价指标和评价方法研究

2.1 路面破损状况评价指标研究

《公路技术状况评定标准》提出了我国沥青路面和水泥路面破损类型，人工检测、半自动和全自动检测方式能以不同的精度和效率实现破损数据的采集处理。基于这些数据，可以提出多种指标表征路面破损状况。

路面破损状况能以一个综合指标进行评定，如我国的路面状况指数(PCI, pavement condition index)、英国和加拿大的路面服务指数(PSI, pavement serviceability index)^[26]、日本交通部的路面修复指数(PRI, pavement rehabilitation index)^[27]。许多学者也提出了路面破损状况的综合评定指标，典型的如 Iijima T 提出的维护控制指数(MCI, maintenance control index)^[28]、Baladi Gilbert Y.提出的剩余使用寿命^[29]、Saraf C. L.提出的路面状况评分(PCR, pavement

condition rating)^[30]、蒋红妍提出的体积破损率^[31]。这些综合指标虽然具有相似性，但也具有一定差异，因此，各有其适用范围。

同时，路面破损状况也可以由多个指标共同表征，如潘玉利提出的纵向平整度指数和病害折合破损率^[32]，王茵的路面破损状态(裂缝率和车辙深度)、行驶质量和整体结构强度^[33]，王惠勇的路面状况指数、行驶质量指标、路面强度系数、路面抗滑能力系数^[34]，李志远的车辙指数、路面等效裂缝率指数和路面等效修补率指数^[35]，曾江洪的路面车辙深度、路面裂缝率、路面坑槽率和路面修补率^[36]，李星的裂缝度、坑槽度、松散度和车辙度^[37]。

根据前述分析，路面状况评定指标多样化，侧重点和适用条件各不相同。目前，我国路面破损使用PCI作为评定指标，未考虑车辙深度、路面平整度，也没有理清路面破损与平整度之间的关系，不利于掌握路面破损情况。同时，随着路面信息采集技术的改进、数据种类和质量的完善^[19]，既有的评价指标相对滞后。因此，有必要对路面破损状况评定指标进行改进研究。

路面破损指标可从如下三个方面进行改进：(1)充分研究路面破损与平整度之间的关系，完善既有的路面性能评价模型；(2)在对比分析前述各类指标的基础上，建立一套能适应不同道路等级和路面类型的破损状况评定指标体系，以及相应的评价模型，从而根据具体情况合理地评判路面状况；(3)路面破损除了二维特征以外，还具有三维特征，因此，破损的三维指标也是一个研究方向。

2.2 路面破损状况评价方法研究

路面破损状态的判断需要采集一定样本量的路面状况数据，计算相应评价指标，确定判定结果，这对路面管理和维护具有指导意义。路面破损状况的确定主要会受到取样方法、评价指标和评价模型的影响，因此，要客观而合理地判断路面破损状况，需要充分探究这些因素对评定结果的影响。

路段或路网路面的破损状态的判断结果，与取样

方法、检测频率有关。样本量越大，越有可能获得真实的路面破损信息，Templeton J.^[38]、Shahin M.Y.^[39]对此展开了研究，显示了路面状况指数评定结果对于样本量的敏感性。取样方法同样会影响路况评定结果，这在Shalaby Ahmed^[40]、关长禄^[41]和Dean C.M.^[42]的研究中得到了证实。此外，Haider Syed^[43]与Haider Syed Waqar^[44]提出，检测频率会影响路面维修范围、养护类别和时间。

评价模型会影响路面破损状态的判断结果。目前，国内外学者提出了许多路面破损评价模型，如Sandhwalia P.S.的PCI经验评估方法^[45]、人工神经网络方法^[46-47]、模糊评价方法^[48-49]、灰色评价^[51-53]、关联因素分析法^[54]、物元分析法^[55]、层次分析法^[56-57]等，熊辉^[58]和董丽娜^[59]回顾了这些模型的优劣与适用条件，结果表明，对于相同的输入数据，不同模型获得的评价结果不尽相同，证实了评价模型对路况判断结果的影响。同时，由于各种破损状况指标侧重点与适用范围不同，路面破损状态的判断结果也会因评价指标的不同而有所区别。

前述分析表明，判断路面破损状态，需要充分考虑检测取样方法、检测频率、评价模型和评价指标等因素的影响，研究路面破损状态合理而客观的判断机制。

3 路面破损状况预测

合理的路面破损状况预测对于路面维护管理具有重要意义。进行破损状况预测，需要大量实测数据和实用的预测模型。路面的充分信息环境能提供大量可用数据，解决了数据来源问题；在预测模型方面，虽然从20世纪50年代国外开始对路面使用性能进行研究，至今发展起来了确定型模型、概率型模型及神经网络模型等^[60]。

确定型模型主要有力学法、力学经验法和经验回归法^[61]。前两者有较为成熟的理论基础，但计算复杂、工作量大；常用的经验回归分析法本质上是基于路面破损状况与平整度、弯沉等具有的相关关系^[62-63]建立

的回归预测模型^[64]。但陈长^[65]、孟莹琳^[66]等指出, 由于数据支撑不足、影响机理不清晰, 路面破损状况与平整度、弯沉等之间的关系并不明确, 经验回归法有本质的缺陷。

在概率型模型方面, 较为广泛的是马尔科夫模型^[67-68], 其关键是计算状态转移矩阵。马尔科夫模型有一个基本假定, 即路面恶化遵循马尔科夫静态或动态转移过程, 但这种假定尚未与其它概率预测方法进行对比验证^[69]。此外, 马尔科夫模型的状态转移矩阵计算需要大量的历史数据^[60,70], 且对于时间变化不敏感^[71]。

神经网络具有很强的非线性拟合能力, 且学习规则简单, 国内外许多学者建立了路面破损状况的神经网络预测模型^[72-73], 但它存在一些固有的缺陷: 没有严格的推理过程和推理依据, 需要充足的数据支撑。

对于路面状况的预测, 一些学者还提出了适用范围有限的组合预测模型^[74]和其他预测模型, 如灰色相关模型^[27]、灰色预测模型^[75]、线性混合效应模型^[74]、支持向量机模型^[77,78]。

综合前述分析, 路面状况预测模型多种多样、各有优劣, 随着路面破损数据越发完善和精确, 有必要建立更合理而实用的路面破损状况预测模型, 以掌握路面状况变化趋势, 指导路面管理养护工作。马尔科夫模型在路面状态变化中已广泛应用, 已经具备许多研究成果, 如果能通过大量历史数据的分析获得合理的转移概率矩阵, 该模型具有较高的应用价值。同时, 路面破损状况数据越发完善, 回归预测模型也可能具有较大前景。

4 路面破损数据库决策支持系统

合理地管理和控制路面质量, 不但需要采集大量的路面破损数据, 还需要对这些数据进行有效地存储和管理, 以辅助制定路面预防性维修计划^[79]。目前国内有许多路面养护管理数据库系统, 但在路面充分信息环境下, 国内还没有专门针对破损状况的数据库决策支持系统。

从上世纪 80 年代起, 国外学者开始陆续研究路面管理系统, 至今已积累大量研究成果, 如魁北克交通部用于路面状况评估的专家知识系统^[80], 包含路面状况评价和预测等在内的路面维护管理系统^[81], 美国伊利诺伊州交通部的路面状况评价系统^[82], 以及伊朗德黑兰建立的路面管理系统^[83], 这些管理系统在路面养护管理工作中发挥着巨大的作用。但由于路面建设标准、气候等实际情况的差异, 国外的路面管理系统不能胜任国内路面养护需求。

于是, 国内学者展开了一系列研究。孙立军开发了专家系统 PARMAS 以评价路面状况^[84], 朱障东讨论了沥青路面评价管理数据系统的设计原则和构思方法^[85], 潘玉利根据我国的具体情况建立了以路面大中修、养护需求分析模型和养护投资预算优化分配模型为中心的路面管理系统^[86], 至此, 国内第一个路面管理系统建成并投入使用。后来, 陆续出现了路面状况 E-R 关系数据库^[87]、基于 WebGIS 的路面管理系统^[88]、路基路面病害信息管理系统^[89]和基于 GIS 的路面管理系统^[90]。这些管理系统大都针对路面综合状况的评价管理, 且所需数据依靠传统的人工、半自动或自动检测, 不能适应基于高精数字化摄像技术和立体视觉的路面破损三维检测的数据管理需求。

随着路面破损数据采集技术的发展和养护需求的提高, 精细化管理已成为一种趋势, 路面破损检测逐渐具有高速、高效、高精度和海量信息的特点。因此, 有必要建立相应的数据库决策支持系统对破损数据进行专门的精细化的管理维护, 以适应未来路面管理需求。

5 结束语

本文对路面破损状况的信息采集关键技术、评价和预测、数据库管理系统设计开发等方面进行综述分析, 指出了路面破损检测高速、高精度和海量信息的发展趋势, 提出了精细化管理的需求, 有利于建立从数据采集、破损评价分析到预测管理的一整套有机体系, 从而全面准确地掌握路面破损状况, 为路面养护管理提供科学合理而实用的决策依据。

参考文献

- [1] 田恩杰. 高等级公路路面病害自动检测方法研究[D]. 吉林: 吉林大学硕士论文, 2007.
- [2] 左永霞. 高速公路路面破损图像识别技术研究[D]. 吉林: 吉林大学硕士论文, 2008.
- [3] 王旭葵. 路面破损自动评价技术的现状和发展[J]. 黑龙江交通科技, 2006, (3): 32-33.
- [4] 欧阳琰. 道路信息自动检查中的路面破损识别方法及其实现研究[D]. 武汉: 武汉理工大学硕士论文, 2009.
- [5] 王吉林, 杜文靖, 王国强. 沥青路面检测技术现状[J]. 交通科技与经济, 2003, (3): 1-4.
- [6] Al-Qadi Imad L., Sebaaly Peter E., Wambold James C. New and old technology available for pavement management system to determine pavement condition[J]. ASTM Special Technical Publication, 1992, (1121): 437-465.
- [7] 贺安之, 徐友仁, 贺宁. 高速公路路面状况的光学智能检测与信息处理[J]. 光电子·激光, 2002, 13(12): 1281-1284.
- [8] 曹冰莹. 激光路面检测车技术集成与开发研究[D]. 西安: 长安大学硕士论文, 2006.
- [9] 王明辉. 沥青路面检测中的图像处理技术研究[D]. 武汉: 武汉理工大学硕士论文, 2006.
- [10] Chou Ch.-P., Liaw T. Development of automated algorithms for pavement condition survey[J]. Transportation Research Record, 1996, (1536): 103-109.
- [11] 施树明, 初秀民, 王荣本. 沥青路面破损图像测量方法研究[J]. 公路交通科技, 2004, 21(7): 12-16.
- [12] 韩杰. 路面病害图像自动分类方法研究与分析[D]. 南京: 南京理工大学硕士论文, 2007.
- [13] Rajan Krithika, Day Dwight D., Natarajan Balasubramaniam. Analysis of pavement condition data employing principal component analysis and sensor fusion techniques[A]. Proceedings of the 2008 International Conference on Image Processing, Computer Vision, and Pattern Recognition [C]. Las Vegas, NV, USA: IPCV 2008, , 2008: 422-428.
- [14] Wang K.C.P. Design factors for the next-generation highway data vehicle[A]. Proceedings of the Fifth Conference of Application of Advanced Technology in Transportation[C]. Newport Beach, California, USA: ASCE, 1998: 24-132.
- [15] Wang K.C.P., Li X.Y., Elliott R.P. An information system with a digital Highway Data Vehicle[C]. Auburn, Alabama, USA: 2nd International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control, 2001.
- [16] 胡曦. 路面病害自动检测技术研究及系统实现[D]. 南京理工大学硕士论文, 2003.
- [17] 王晨. 路面病害自动检测系统的改进和相关算法的研究[D]. 南京: 南京理工大学硕士论文, 2006.
- [18] Nallamothu S., Wang K.C.P. Experimenting with recognition accelerator for pavement distress identification[J]. Transportation Research Record, 1996, (1536): 130-135.
- [19] Wang K.C.P., Elliott R.P., Zaniewski J. P. Automated survey of pavement surface distress: current technologies and new approaches[A]. Proceedings of Conference on Infrastructure Condition Assessment [C]. Boston, USA: ASCE, 1997: 514-523.
- [20] Wang K.C.P., Gong W.G., Li X.Y., et al. Data analysis of a real-time system for automated distress survey[J]. Transportation Research Record, 2002, (1806): 101-109.
- [21] Wang K.C.P. Challenges and feasibility for comprehensive automated survey of pavement conditions[A]. Proceedings of the 8th International Conference on Application of Advanced Technologies in Transportation[C]. Beijing, China: AATT conference 2004, 2004: 531-536.
- [22] Hou Zhiqiong, Wang K.C.P., Gong Weiguo. Experimentation of 3d pavement imaging through stereovision[A]. Proceedings of the 1st International Conference on Transportation Engineering 2007[C]. Chengdu, China: TCTE 2007: 376-381.
- [23] Wang K.C.P., Gong Weiguo, Hou Zhiqiong. Automated cracking survey [A]. Proceedings of the Sixth RILEM International Conference on Cracking in Pavements[C]. Chicago, Illinois, USA: 6th RILEM ICCP, 2008.
- [24] Wang K.C.P., Hou Zhiqiong, Gong Weiguo.

- Automated road sign inventory system based on stereo vision and tracking [J]. *Journal of Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering (CACIE)*, 2010, 25(6): 468-477.
- [25] Wang K.C.P., Hou Zhiqiong, Stacy Williams. Precision test of cracking surveys with the automated distress analyzer[J]. *ASCE Journal of Transportation Engineering*. 2011, 137(8): 571-579.
- [26] Roberts Freddy L., Hudson W. Ronald. Pavement serviceability equations using the surface dynamics profilometer[R]. Austin: Center for Highway Research, University of Texas at Austin. 1970.
- [27] Qin Renjie, Li Yuzhi, Liu Hanzhong. Study of the evaluation model about old asphalt pavement service performance of freeway[A]. 2009 International Conference on New Trends in Information and Service Science[C]. Beijing, China: NISS 2009, 2009: 187-190.
- [28] Ijima T, Ikeda T. Optimization in pavement design and maintenance[A]. Fourth Conference of the Road Engineering Association of Asia and Australasia[C]. Jakarta, Indonesia: 4th REAAA, 1983: 229-249.
- [29] Baladi Gilbert Y., Novak Jr. Edwin C., Kuo Wen-Huo. Pavement condition index-remaining service life[J]. *ASTM Special Technical Publication*, 1992, (1121): 63-90.
- [30] Saraf, C. L. Pavement condition rating system review of PCR methodology[R]. USA: Ohio Department of Transportation, Columbus, 1998.
- [31] 蒋红妍. 路面破损调查方法研究[J]. *内蒙古公路与运输*, 2008, (1): 5-7.
- [32] 潘玉利, 郑安福, 鲍世恩. 杭州市路面状况评价模型[J]. *公路交通科技*, 1990, 7(2): 1-4.
- [33] 王茵, 胡昌斌, 才华, 等. 高速公路沥青路面使用性能综合评价指标的研究[J]. *沈阳建筑工程学院学报*, 2000, 16(4): 264-268.
- [34] 王惠勇, 陈宇亮, 芮勇勤. 基于物元模型分析方法的 pavement 状况综合评价[J]. *交通运输工程学报*, 2004, 4(2): 6-9.
- [35] 李志远. 高速公路沥青混凝土路面破损状况评价[J]. *河北交通科技*, 2009, 6(2): 17-20.
- [36] 曾江洪, 许佳. 高速公路沥青路面破损状况评价方法[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2009, 6(2): 18-22.
- [37] 李星. 基于 Matlab 的高速公路路面状况分类评价[J]. *广州建筑*, 2010, 38(1): 42-45.
- [38] Templeton J., Lytton R.L., Garcia-Diaz A. Network sampling to estimate distribution of pavement condition and costs[J]. *Transportation Research Record*. 1985, (1048): 8-14.
- [39] Shahin M.Y., Stock Chad, Crovetti Mercedes, et al. Effect of sample unit size and number of surveyed distress types on pavement condition index for asphalt-surfaced roads[J]. *Transportation Research Record*, 1995, (1508): 60-71.
- [40] Shalaby Ahmed, Reggin Alan. Optimization of data collection needs for manual and automated network-level pavement condition ratings based on transverse variability and neural networks[J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2007, 34(2): 139-146.
- [41] 关长禄, 吕得保, 孙秀东, 等. 行车道设计宽度对沥青混凝土路面病害的影响及改进措施的探讨[J]. *公路*, 2010, (5): 91-94.
- [42] Dean C.M., Baladi G.Y., Dawson T.A., et al. The effect of pavement condition data sampling on project boundary selection[A]. *Proceedings of the 1st Congress of the Transportation and Development Institute of ASCE*[C]. Chicago, Illinois, USA: T and DI Congress 2011: Integrated Transportation and Development for a Better Tomorrow. 2011: 11-21.
- [43] Haider Syed, Baladi Gilbert Y., Chatti Karim, et al. Effect of frequency of pavement condition data collection on performance prediction[J]. *Transportation Research Record*, 2010, (2153): 67-80.
- [44] Haider Syed Waqar, Baladi Gilbert Y., Chatti Karim. Impact of pavement surface monitoring frequency on pavement management decision making[A]. *Proceedings of the 1st Congress of the Transportation and Development Institute of ASCE*[C]. Chicago, Illinois, USA: T and DI Congress 2011: Integrated Transportation and Development for a Better Tomorrow 2011: 656-666.
- [45] Sandhawalia P. S. Experience-based pavement condition evaluation[J]. *Airport forum*, 1988, (4): 58-59.

- [46] 胡霞光, 王秉纲. 两种基于遗传算法的路面性能综合评价方法[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2002, 22(2): 6-9.
- [47] 黄文雄, 谭利英, 吴明威. 混合模型在路面评价中的应用[J]. 交通科技, 2005, (1): 1-3.
- [48] Fwa T.F., Liu S.B., Teng K.J. Airport pavement condition rating and maintenance-needs assessment using fuzzy logic[A]. Airfield Pavements: Challenges and New Technologies, Proceedings of the Specialty Conference[C]. Las Vegas, NV, United states: SC of Airfield Panement 2003. 2003: 29-38.
- [49] 丁闪闪, 刘小勇, 柴干, 孙明义. 基于模糊综合评判的桥梁设计阶段的风险估计[J]. 交通运输工程与信息学报, 2013, (1) .
- [50] 温胜强. 基于组合预测与模糊优化的高速公路路面养护决策研究[D]. 大连理工大学博士学位论文, 2009.
- [51] 胡群芳, 刘文, 李清富. 公路沥青路面使用性能灰色综合评估[J]. 公路交通科技, 2006, 23(1): 12-16.
- [52] 周静, 虞豪. 基于灰色加权关联度的区域运输通道规划方案优选研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2013, (2) .
- [53] Wang K.C.P., Li Q. Gray clustering based pavement performance evaluation[J]. ASCE Journal of Transportation Engineering, 2010, 136(1): 38-44.
- [54] 张绍阳, 马玉兰, 王选仓. 基于关联分析的路面病害成因确定方法[J]. 中国公路学报, 2008, 21(2): 98-103.
- [55] 魏连雨, 彭海霞, 许素兰. 路面使用性能评价的物元分析方法[J]. 华东公路, 2007, (2): 51-53.
- [56] Ramadhan Rezaqallah H., Al-Abdul Wahhab Hamad I., Duffuaa Salih O. Use of an analytical hierarchy process in pavement maintenance priority ranking[J]. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 1999, 5(1): 25-39.
- [57] 吴建良. 旧沥青路面评价与加铺设计方法研究[D]. 长沙: 湖南大学硕士学位论文, 2008.
- [58] 熊辉, 史其信, 潘先榜. 路面管理理论与方法的研究进展及趋势[J]. 土木工程学报, 2004, 37(1): 65-70.
- [59] 董丽娜. 沥青路面使用性能评价方法的分析研究[D]. 大连: 大连理工大学硕士学位论文, 2006.
- [60] 王佳. 高速公路沥青路面使用性能评价与预测决策研究[D]. 长沙: 长沙理工大学硕士学位论文, 2006.
- [61] Ullidtz P. Mathematical model of pavement performance under moving wheel load[J]. Transportation Research Record, 1993, (1384): 94-99.
- [62] Al-Suleiman Turki I., Basma Adnan A., Ksaibati Khaled. Examination of pure environmental effects on pavement condition[J]. Transportation Research Record, 1993, (1388): 52-59.
- [63] 雷超旭, 王端宜. 基于统计学原理的沥青混凝土路面病害分布规律研究[J]. 公路, 2009, (7): 359-363.
- [64] 孙立军. 沥青路面结构行为理论[M]. 上海: 同济大学出版社, 2003.
- [65] 陈长, 孙立军, 董茂强. 基于现代检测技术的沥青路面评价新方法[J]. 公路交通科技, 2006, 23(9): 1-5.
- [66] 孟莹琳, 闫红梅, 白日华. 路面弯沉与平整度及破损关系研究[J]. 吉林交通科技, 2007, (4): 3-6.
- [67] 陈新, 曾沛霖, 朱障东. 预测沥青路面状况的马尔柯夫链模型[J]. 公路交通科技, 1990, 7(3): 1-5.
- [68] Marzouk Mohamed, Awad Ehab, El-Said Moheeb. Assessment of pavement performance using Markov model[A]. Canadian Society for Civil Engineering Annual Conference 2009[C]. St. Johns, NL, Canada: Canadian Society for ECAC, 2009: 994-1002.
- [69] Paramapathy P.A., Pandey M.D. Time dependent structural reliability model for pavement condition assessment[A]. 2000 Annual Conference Abstracts - Canadian Society for Civil Engineering[C]. Canada: Canadian Society for ECAC 2000.
- [70] 张晓华. 高速公路路面管理系统[D]. 成都: 西南交通大学硕士学位论文, 2002.
- [71] Yang Jidong, Gunaratne Manjriker, Lu Jian John, et al. Use of recurrent markov chains for modeling the crack performance of flexible pavements[J]. Journal of Transportation Engineering, 2005, 131(11): 861-872.
- [72] 倪富健, 屠伟新, 黄卫. 基于神经网络技术的路面性能预估模型[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2000, 30(5): 91-95.

- [73] Gupta Ankit, Kumar Praveen, Rastogi Rajat. Pavement deterioration and maintenance model for low volume roads[J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2011, 4(4): 195-202.
- [74] 杨 亮. 遗传算法在路面管理系统中的应用研究[D]. 成都: 西南交通大学硕士论文, 2008.
- [75] 王国晓, 安景峰, 陈荣生. 灰色理论在路面使用性能预测中的应用[J]. 公路交通科技, 2002, 19(3): 16-19.
- [76] Yu Jianxiong, Chou Eddie J., Luo Zairen. Development of linear mixed effects models for predicting individual pavement conditions[J]. Journal of Transportation Engineering, 2007, 133(6): 347-354.
- [77] 曾庆霞. 基于支持向量机的水泥路面使用性能评价与预测的研究[D]. 长沙: 长沙理工大学硕士论文, 2008.
- [78] Yan Ke-Zhen, Zhang Zou. Research in analysis of asphalt pavement performance evaluation based on PSO-SVM[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 97-98: 203-207.
- [79] 康彦民, 张 虎, 潘玉利, 等. 河北省高速公路路面管理系统[J]. 公路交通科技, 2000, 17(3): 18-20.
- [80] Pehlivanidis Michalis, Larose Gaston. ARC. A knowledge-based expert system for pavement condition evaluation[J]. VTT Symposium (ValtionTeknillinenTutkimuskeskus), 1990, 1(116): 337-352.
- [81] Berger Louis, Greenstein Jacob, Hoffman Mario, et al. Practical applications of models for pavement maintenance management[J]. Journal of Transportation Engineering, 1991, 117(4): 382-397.
- [82] Zimmerman Kathryn A., Knox Ronald. Improving IDOT's pavement condition rating process[J]. Journal of Infrastructure Systems, 1998, 4(2): 79-85.
- [83] Moazami Danial, Muniandy Ratnasamy, Hamid Hussain Bin, et al. Developing a comprehensive pavement management system in Tehran, Iran Using MicroPAVER[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2010, (15): 1782-1792.
- [84] 孙立军, 姚祖康, 胡东明, 等. 沥青路面评价与对策确定的专家系统[J]. 土木工程学报, 1991, 24(2): 28-36.
- [85] 朱障东. 沥青路面评价管理数据库系统设计与研讨[J]. 中国公路学报, 1992, 5(4): 61-67.
- [86] 潘玉利, 曾沛霖, 浦成修, 等. 路面管理系统在天津市公路管理中的应用[J]. 公路交通科技, 1992, 9(4): 1-7.
- [87] 兰 波. 路面评价系统研究[D]. 成都: 西南交通大学硕士论文, 2002.
- [88] 侯 静. 基于 WebGIS 的路面管理系统及人工神经网络在路面性能预测中的应用[D]. 石家庄: 河北工业大学硕士论文, 2004.
- [89] 王道远. 路基路面病害信息管理系统研究[D]. 长春: 吉林大学硕士论文, 2007.
- [90] 甄 侦. 基于 GIS 的路面管理系统框架研究[D]. 成都: 西南交通大学硕士论文, 2007.

(中文编辑: 吴继屏)