

高速公路路面结构服役状态综合评价体系研究

刘尧

(江苏宁杭高速公路有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要: 近年来我国大量高速公路服役年限已接近或达到设计年限,随之带来的养护决策问题日益凸显,对路面结构服役状态进行综合评价变得非常重要。结合溧马高速养护工程,采用三维探地雷达及快速激光弯沉检测车进行道路现场检测,同时结合室内试验方法得到路面材料的关键指标,形成一套结合路面结构完整性及结构强度评价的综合服役状态评价方法,提出相应的评价分级指标阈值及养护决策体系,研究成果在实际工程中得到成功应用,为高速公路养护决策提供了科学指导。

关键词: 高速公路;探地雷达;快速检测;综合评价;养护决策

中图分类号: U416.2;TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)02-0154-04

Research on the Comprehensive Assessment System for Service Performance of Expressway Pavement Structures

LIU Yao

(Jiangsu Ninghang Expressway Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract: In recent years, a large number of highways in China have reached or exceeded their designed service life. The resulting maintenance decision-making issues have become increasingly prominent, and it has become important to conduct a comprehensive evaluation of the service condition of the pavement structure. In combination with the maintenance project of Li-Ma Expressway, three-dimensional ground-penetrating radar and rapid laser deflection detection vehicles were used for on-site road inspections. At the same time, it combines indoor test methods to obtain key indicators of pavement materials, forming a comprehensive service condition evaluation method that combines the integrity and strength evaluation of the pavement structure. It also proposes corresponding evaluation classification threshold values and maintenance decision-making systems. The research results have been successfully applied in actual engineering, providing scientific guidance for highway maintenance decisions.

Keywords: expressway; ground penetrating radar; rapid detection; comprehensive evaluation; maintenance decision-making

0 引言

在长期的荷载以及环境因素的作用下,各高速公路除了路表所反映的裂缝、车辙等表面病害以外,通常还伴随着结构强度的下降,结构内部隐性病害的增多,局部路段存在基层松散、脱空以及层间黏结不良等基层病害,具有层位较深,隐蔽性强的特点。因此,如何建立路面病害及结构性服役状态精细化评估方法,制定科学化结构补强养护对策,对于发生早期结构性病害的高速公路实现路面评估及修复,达到结构性能提升及长期保存具有重要意义。

针对我国高速公路半刚性基层为主的路面结

构,路面服役状态系统评估问题大量学者已开展了丰富的研究。吕波等^[1]通过对超过设计年限的高速公路路段取芯试验发现,长期服役后路面材料性能出现明显衰减,但由于初期建设期施工水平控制较好,整体仍可以保持稳定状态。张定一^[2]利用FWD落锤弯沉检测仪对既有高速公路路基路面提出相对对应的评价方法并对结构及材料性能发展规律展开研究。朝克图^[3]基于可靠度理论,形成基于可靠度理论的沥青混合料路用性能评价方法,为工程建设质控提出具体要求。杨鸿波^[4]通过对路面损坏状况指数、行驶质量指数和抗滑性能指数等多个指标的分析总结路段主要结构问题,并针对行提出处治方法。尚桂勇^[5]总结了路面性能评价的指标和方法,认为有效的养护技术和施工措施可以显著改善路面性能,延长使用寿命。邹缙等^[6]通过检测现状路面

收稿日期: 2026-01-13

作者简介: 刘尧(1982—),男,硕士,高级工程师,从事高速公路养护工作。

PCI、RQI、RDI、SRI 等技术指标,评价当前路面技术状况水平。段美栋等^[7]提出一种基于粒子群优化的反向传播神经网络路面性能评价算法,具有较好的可靠性和稳定性,能够准确地对高速公路沥青路面性能等级进行评价预测。杨龙军^[8]建立了沥青路面使用性能评价流程,从路面损坏、平整度、结构强度、抗滑性能等方面来评价沥青路面使用性能。

通过文献调研,我们可以发现,现有研究大部分只关注与路面常见指标的检测,如路面平整度、抗滑等常规指标,对于路面结构强度的关注较少,而对于路面结构内部的结果完整性评价更是几乎没有,但对于高速公路路面结构的失效问题来说,往往是由内向外的发展规律,结构内部病害应引起重视,在路面服役性能综合评价中需要纳入考量,同时,一般的评价方法或着重路面指标,或着重于材料性能,如何将两者融合有待研究。

因此,亟需开展高速公路路面结构服役状态综合评价研究,本文首先在路面结构性病害问题调查分析的基础上提出结构服役状态综合评价基本框架,之后从现场和试验两个层面对路面结构完整性、结构强度及路面材料性能提出具体评价方法,随后进行评估体系及分级指标研究,最后基于溧马高速养护工程应用提出养护对策并进行效果评估。研究形成的路面结构服役状态综合评价体系可为路面养护方案设计提供指导意义。

1 结构服役状态综合评价框架

随着高速公路路面持续在环境与交通荷载的耦合作用下服役,路面结构性病害会逐渐显现,结构完整性和结构强度分别从板体性能和承载能力两个方面去评价路面结构的总和服役状态,同时路面材料的性能衰减,如沥青老化,高温、抗裂性能衰减等问题同样也会对路面结构的总和服役性能造成影响。因此,提出结构完整性+结构强度作为一级评价,路面材料性能作为二级评价的结构服役状态综合评价框架,框架如图 1 所示。



图 1 综合评估框架

2 评价方法

结构完整性及结构强度采用现场检测方法,路面材料性能采用室内试验方法进行评价。

2.1 路面结构性能

2.1.1 结构完整性

路面结构完整性使用 3D 探地雷达进行检测,3D 雷达由多个二维天线排列组合共同进行发射接收,实现“一发多收”,即一个发射天线发射的电磁波可由多个接收天线进行接收,而这些接收的数据按照一定的顺序进行排列组合即可实现地下目标体的三维检测,示意图如图 2 所示。

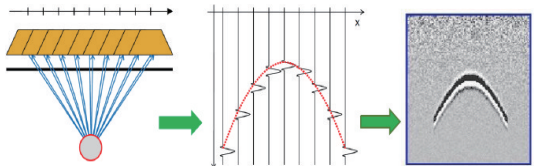


图 2 3D 探地雷达成像原理图

3D 雷达检测结果为三维立体图像,因此隐性病害可识别出其体积大小,借鉴二维雷达隐性病害评价方法,提出隐性病害的三维评价指标。

$$IDR_{3D} = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^{i_0} \sum_{j=1}^{j_0} \omega_{ij} V_{ij}}{\sum_{j=1}^{j_0} \omega_{4j} V_j}$$

式中:IDR_{3D} 为路面内部破损率,为各种路面内部损坏体积之和与路面检测体积之比,%;V_{ij} 为第 i 类的第 j 项路面内部病害的体积,m³;V_j 为调查的路面第 j 层的检测体积,m³;ω_{ij} 为第 i 类的第 j 项路面结构内部病害的权重;i₀ 为路面内部病害的总类别数;j₀ 为路面内部病害每类的总项数。

评价标准参考路面内部破损率的评定标准,评定标准如表 1 所示。

表 1 路面结构完整性评定标准

评价等级	优	中	差
IDR _{3D}	<1.50%	≥1.50%, <2.40%	≥2.40%

2.1.2 结构强度

路面结构强度一般采用弯沉值表征,路面弯沉越小,说明路面的结构承载能力越强,在交通荷载的作用下保持强度。为完成大规模连续检测,采用快速激光弯沉检测车对路面进行检测,检测速度为 90 km/h,能够实现快速、连续的结构强度检测,根据激光多普勒频移原理,通过激光多普勒测振仪测量路面在荷载作用下的垂直下沉速度,通过对沿弯沉盆分布各点速度变化的分析与计算,得到最大弯沉值以及弯沉盆,原理如图 3 所示。

参考《公路技术状况评定标准》(JTG 5210—2018),采用路面结构强度指数(PSSI)进行评价,评定标准如表 2 所示。

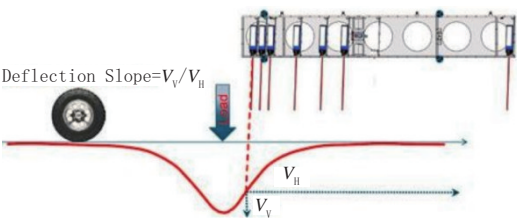


图3 激光式高速弯沉仪测量原理

表2 路面结构强度评定标准

评价等级	优	中	差
PSSI	≥90	≥60, <90	<60

2.2 路面材料性能

路面材料性能评价主要包括水稳定性、高温性能、抗裂性能和动态模量评价。水稳定性评价方式主要包括浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验、浸水汉堡车辙试验；高温性能评价主要包括标准动态蠕变试验、汉堡车辙试验(空气浴)、局部多序列加载动态蠕变试验、MMLS3加速加载试验；抗裂性能采用半圆弯曲试验；模量性能评价采用动态模量试验,试验方案如图4所示。

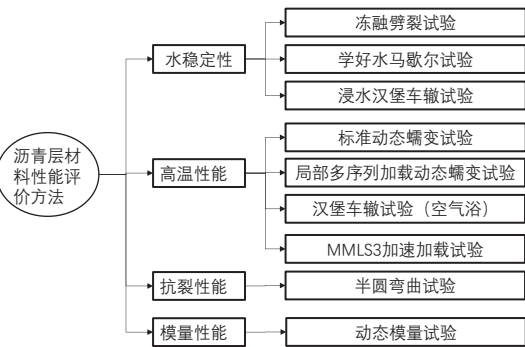


图4 路面材料性能评价方法

具体试验及评价方法可参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)、《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)等现行规范的规定。

动态蠕变试验结果提出的流变次数指数分级标准如表3所示。

表3 动态蠕变分级标准

评价等级	1	2	3
流变次数指数 $Fi/(μ\epsilon \cdot 次^{-1})$	<150	150~360	>360

汉堡车辙深度分级标准见表4。

半圆弯曲试验分级标准见表5。

表4 汉堡车辙深度分级标准

评价等级	1	2	3
标准	20	80	100
车辙深度/mm	<1.1	1.1~2.0	>2.0

表5 临界应变能分级标准

评价等级	1	2	3
标准	20	80	100
临界应变能/(kJ·m ⁻²)	>0.5	0.2~0.5	<0.2

3 路面结构服役状态综合评价模型

在高速公路养护设计中,采用基于路面结构完整性、路面结构强度、材料性能评价的路面结构服役状态综合评价模型,并结合交通量、环境等外界因素,制定合理、科学、客观、可行的养护规划方案。评价模型如图5所示。

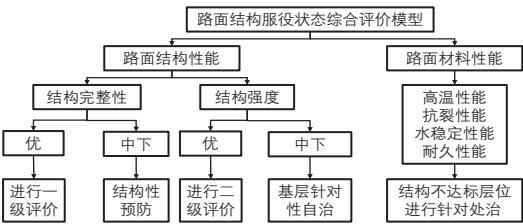


图5 综合评价模型

3.1 一级评价:路面结构完整性、强度

将路面结构完整性作为一级决策指标,其决策条件为:(1)当路面完整性评价为优时,进入二级决策;(2)当路面结构强度评价为中级以下,需采取一定的补强措施。

将路面结构强度作为一级决策指标,其决策条件为:(1)当路面结构强度评价为优时,进入二级决策;(2)当路面结构强度评价为中级以下,需采取一定的补强措施。

3.2 二级评价:路面材料性能

重点评价面层混合料高温性能、低温抗裂性能和中温耐久性。对于不满足阈值或出现显著衰减的路段,应结合对应不达标层位采用铣刨重铺的方案进行针对处治。

4 工程应用

溧马高速于2013年建成通车,路龄已达8年,全长35.6 km。溧马高速由于建设期原材料先天不足,自建成通车以来,局部路段就出现了一定的早期病害,并随着通车时间的延长,集中表现为早期水损害、横向裂缝密集、车辙等问题。同时,溧马高速局部路段存在基层松散、脱空以及层间黏结不良等基层病害,具有层位较深,隐蔽性强的特点。使用本研究提出的路面结构服役状态综合评价方法对大修养护路段进行分级评价如图6所示。

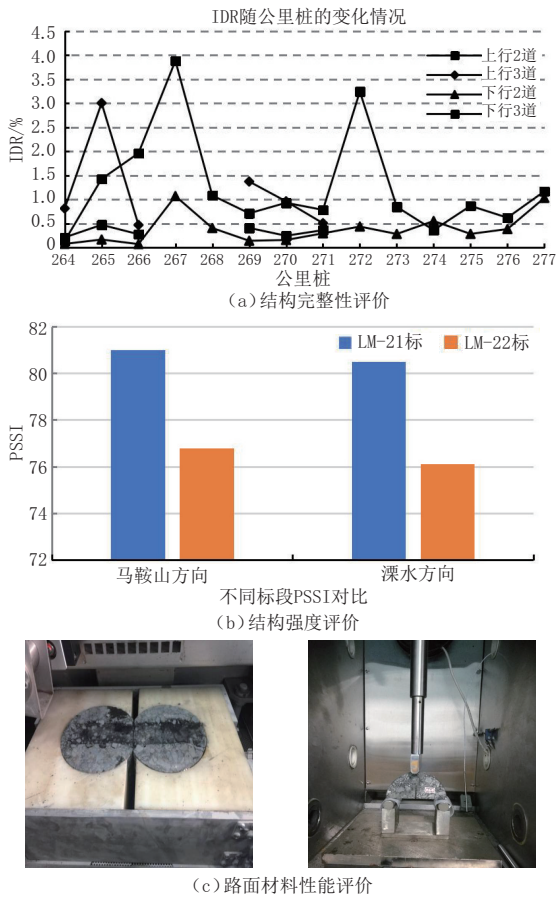


图6 漂马高速结构服役状态综合评价

漂马路面结构内部病害中,面层与基层间不良病害占比 1.21%,基层与基层间不良病害占比 38.2%,面层与基层间松散病害占比为 0.08%,基层与基层间松散病害占比为 60.5%。浸水马歇尔试验结果满足残留稳定度 $\geq 85\%$ 的技术要求,浸水汉堡车辙试验结果,满足运行 20 000 次车辙深度 $\leq 12.5\text{ mm}$ 的技术要求,汉堡车辙对分层的高温性能评价高温性能多处于 1 级,半圆弯曲试验对面层抗裂性能进行评价,抗裂性能评价结果为 2 级。相比于省内其他高速,抗裂性能相对较差,动态模量试验结果表明漂马高速相较于新建路面模量有一定程度衰减。

针对路表裂缝及结构内部隐性病害,采用非开挖注浆方案进行处理。同时,漂马高速水损害问题突出,除了与沥青路面材料抗水损害性能偏低有关,路面结构内部存在一定量的层间水,且层间水无法有效排出,而部分路段路表水排水不畅是主要原因,

因此需要针对漂马高速不同特点路段进行排水改造,提升漂马高速的路表、结构内部排水能力,降低水对漂马高速路面结构的影响。

完成养护后,注浆液饱满,总体修复率 90.9%、裂缝病害修复率 90%、隐性病害修复率 91.67%、强度恢复率 $>100\%$;抗剪强度 0.2~0.4 MPa,强度与常规黏层数据相近;针对排水改造路段,三维雷达检测发现路面无病害、积水,表明路面结构内部整体状况好,无隐性病害及水痕。

5 结 论

本文基于现有高速公路评价方法的调研,结合不同评价方法提出高速公路沥青路面结构综合评价模型,得到以下结论。

(1)提出了高速公路沥青路面结构服役状态综合评价体系和模型,涵盖了路面结构完整性、结构强度及路面材料性能,实现对路面结构全面系统的评价。

(2)明确了不同评价指标的推荐检测方法及分级阈值,为实际工程应用中路面服役状态综合评价提供明确路径。

(3)在漂马高速大修养护工程中得到成功应用,基于评价结论制定的养护决策科有效聚焦重点问题,提升了养护决策的科学性。

参考文献:

[1] 吕波,伏有才,郑炳锋,等.超设计使用年限高速公路路面材料性能试验分析研究[J].上海公路,2025(4):9-17;21.
[2] 张定一.基于FWD的既有路基路面结构及材料性能发展规律研究[D].南京:东南大学,2023.
[3] 朝克图.基于可靠度理论的沥青混合料路用性能评价指标研究[J].内蒙古公路与运输,2021(2):19-23;36.
[4] 杨鸿波.基于数据驱动的高速公路沥青路面综合性能评价研究[J].黑龙江科学,2025,16(22):141-143.
[5] 尚桂勇.公路沥青混凝土路面性能评价标准及预防性养护技术分析[J].交通建设与管理,2025(3):178-180.
[6] 邹缙,蒋煜.高速公路沥青路面技术状况检测数据的有效应用分析[J].黑龙江交通科技,2025,48(2):7-11.
[7] 段美栋,陈铮,王琳,等.基于粒子群优化的高速公路路面性能评价[J].深圳大学学报(理工版),2024,41(5):619-625.
[8] 杨龙军.高速公路沥青路面使用性能评价及预测研究[J].工程建设与设计,2024(11):70-72.