DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2025.05.007 文章编号:1671-2579(2025)05-0061-14

中外路面技术状况评价指标体系综述

陈磊磊,杨李文韵,黎威,Muhammad Talha,钱振东
(东南大学 智能运输系统研究中心,江苏 南京 211189)

摘要:随着道路运行条件日益复杂,提升养护决策的准确性与系统性已成为各国共识。路面技术状况评价指标体系作为支撑方案判断的核心工具,其构建方式与适用能力直接影响养护效率与资源配置水平。该文从指标模型构建逻辑、等级划分评分机制及适配道路等级条件出发,对中外典型国家评价指标体系特征进行对比梳理,并从管理理念、制度安排等深层角度揭示影响指标体系特征的内在成因。研究发现:国外部分体系强调结构分层响应或公众体验感受,而中国体系则强调统一部署和分层级向下管理。就中国而言,体系在通用性和标准化方面具备一定基础,但在阈值调整、场景适应与制度融合等方面存在明显短板。因此,该文提出结合养护目标设置动态阈值、增强对多类型道路运行环境的适应能力,以及推动评价结果与实际管理过程的有效融合等建议,为评价体系的结构优化与制度协同提供了思路支撑。

关键词:路面技术状况评价;指标体系;制度适应性;国际比较;养护管理
中图分类号:U418.6 **文献标志码:**A

A Review of Pavement Condition Evaluation Index Systems in China and Abroad

CHEN Leilei, YANG-LI Wenyun, LI Wei, Muhammad Thlha, QIAN Zhendong
(Intelligent Transportation Systems Research Center, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 211189, China)

Abstract: With the increasingly complex operating conditions of roads, it has become a consensus among countries to improve the accuracy and systematicness of maintenance decisions. Since the pavement condition evaluation index system is the core tool supporting the judgment of schemes, its construction method and applicable ability directly affect the maintenance efficiency and resource allocation level. Based on the construction logic of the index model, the scoring mechanism of grade division, and the conditions of road grade adaptation, the characteristics of the evaluation index systems in typical countries in China and abroad were compared and sorted out. The internal causes affecting the characteristics of the index system were discussed from in-depth perspectives such as management concepts and institutional arrangements. Research findings show that some systems abroad emphasize hierarchical structural response or public experience, while in China, unified deployment and hierarchical downward management are emphasized. In China's case, the system has a certain foundation in terms of universality and standardization, but there are obvious shortcomings in threshold adjustment, scene adaptation, and system integration. Therefore, suggestions are proposed including setting dynamic thresholds in combination with maintenance goals, enhancing the adaptability to various types of road operating environments, and promoting the effective integration of evaluation results with the actual management process, which provides ideological support for the structural optimization and institutional coordination of the evaluation system.

Keywords: pavement condition evaluation; index system; institutional adaptation; international comparison; maintenance management

0 引言

随着道路使用年限的增长和交通荷载的累积作用,路面性能逐渐下降。为了使路面性能维持在较高的安全性与舒适性水平,需要在有限成本内制定高效、准确的路面养护决策方案[1]。养护方案的选取很大程

收稿日期:2025-05-12 **修回日期:**2025-09-02
基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51308116);江苏省自然科学基金资助项目(编号:BK20191267)
作者简介:陈磊磊,男,博士,副教授.E-mail:chenleilei@seu.edu.cn

度上依赖于当前路面技术状况评价结果，因此，构建合理的路面技术状况评价指标体系是重要工作之一。

早在20世纪60年代，美国便根据AASHTO试验结果，探讨了交通负荷与路面技术状况之间的关系，建立了最初的评价指标[2]。在此基础上，不同国家开启了评价指标体系的构建，并在不断修正中趋于完善。然而，现有体系并不能完全适用路面养护时期的评价需求[3-4]。根据各国学者研究，评价指标体系普遍存在指标选取不合理、阈值设置不科学、养护决策影响因素考虑不完善、适用道路等级单一等问题[5-7]。Chen[8]通过分析国际平整度指数（International Roughness Index，I_{IRI}）实际分布规律，指出固定阈值会对路面养护方案制定产生较大误差，有必要根据地区实际路况，调整I_{IRI}建设与翻修阈值标准；Pan[9]采用I_{IRI}和路面状况指数（Pavement Condition Index，I_{PCI}）构建路面性能预测模型，强调不同区域之间的道路性能演化差异，提出因区制宜的建模需求；Li[10]对不同省份的路面行驶质量指数（Roughness Quality Index，I_{RQI}）和I_{PCI}进行区域性对比分析，发现统一的评价指标模型在不同省份间存在预测误差，并且现有I_{RQI}阈值在农村路段存在误判风险，建议调整划分界限。因此，有必要在满足养护需求的基础上对评价指标体系进行改良。评价指标体系的构建不仅取决于路面表面状态，还与国家政策、管理机制导向息息相关。为使改良效果更具有针对性，需要总结当前各国评价指标体系的组成与特征，并从政策制度、管理导向等方面分析当前体系无法满足养护需求的原因，从而为体系改良提供政策部署与管理偏好方面的深层指导方向。

基于此，本文根据结构类、功能类、综合类3种指标类型，对各国评价指标组成依次展开介绍。由于指标的完整定义和准确使用需要考虑指标模型构建逻辑、指标不同等级阈值划分、指标适配的道路等级或荷载强度，本文从指标模型构建逻辑、阈值划分评分机制、适配道路等级条件3个维度出发，对各国评价指标体系进行特征归纳，并对差异性进行深层成因分析。最后，为了更好地辅佐养护决策方案生成，本文对中国评价指标体系的局限性进行归纳，并对未来优化改良提出建议与思考。

1 路面技术状况评价指标体系的组成与典型特征

根据已有标准文件与研究成果的系统整理，各国在路面状况评价指标体系中采用3类指标[11-12]：① 结构性指标，通过力学响应评估路面承载能力和稳定性，重点反映路面结构的疲劳性能与荷载承受能力；② 功能类指标，通过评估路面的使用性能，反映道路的舒适性和行车安全性；③ 综合类指标，通过整合多维度信息，全面评估路面综合状况。由于不同国家在路面状况评价指标体系的构建上存在显著差异，本节将重点讨论各国评价指标组成，分析不同国家的指标特征，并总结不同国家路面质量等级划分依据。

1.1 结构类评价指标

结构类评价指标主要包括基于力学响应测试的弯沉参数与源于表观检测识别的结构性病害，二者均用于反映路面结构层在荷载作用下的刚度状态与承载能力，为道路服役寿命评估、层间作用机制分析及养护策略制定提供关键依据[13]。其中，结构性病害包括裂缝、车辙、剥落及坑槽等，反映了结构层疲劳、沉降或黏结失效等内部性能退化过程[14-15]。

1.1.1 基于力学响应的弯沉类指标

在各类结构性评价指标中，弯沉类指标作为反映路面结构层力学响应的核心指标，被广泛应用于道路服役状态的判定与结构性能退化的诊断[16]。该类指标通过测量车辆荷载作用下的竖向变形，间接揭示不同结构层次的刚度状态与承载能力[17]。各国在指标构成、评价模式等方面形成了多元发展路径，如表1所示。除法国采用理论模型进行弯沉计算外，其他各典型国家均将较为常见的弯沉测量仪（Falling Weight Deflectometer，FWD）作为检测工具。此外，部分国家也采用交通速度弯沉测量仪（Traffic Speed Deflectometer，TSD）进行辅助测量。由此可知，中外典型国家在弯沉类指标体系的构建与应用上，既存在一定的共性特征，也体现出显著的体系差异。

具体而言，各国体系的差异主要体现在以下几个方面：① 在指标体系类别方面，美、加等国家以弯沉盆参数为核心，强调通过分层模量反演实现结构状态识别；德国在此基础上进一步细化，形成以中心弯沉与分层评估的多层级指标体系；中国、南非以经验指标或R_{CBR}为主，适合构建规范化管理体系。相比之下，法国采用基于理论推导的应力-应变控制指标，弱化对实测数据的依赖，而英国、澳大利亚采用多源检测提升结果准确性；② 在指标构建逻辑方面，大多数国家已从传统静态点测过渡至动态与连续响

表1　典型国家弯沉测量方式与指标选取

Table 1　Deflection measurement methods and index selection in typical countries

国家/地区	指标体系类别	指标模型构建逻辑	适配道路等级条件	阈值划分评分机制
中国[18]	路面结构强度指数	路面弯沉标准值与实测值之比	适配高等级公路	≥90优、80～90良、70～80中、60～70次、<60差
美国[19-20]	弯沉盆参数[Deflection Basin Parameters，DBP]体系	分层模量反演	覆盖国省道与高速	依据道路等级设置最大阈值
德国[21]	中心弯沉值、分层强度评估体系	FWD＋TSD测量计算	适配各等级道路	根据1.5目标值、3.5预警值、4.5阈值分为5个等级
英国[22]	连续检测模量拟合体系	TSD连续拟合＋FWD校验	城市道路与高速路网	未进行明确划分
法国[23]	应力-应变控制指标体系	理论推演控制，无需现场实测	应用于各等级道路	根据不同道路等级进行波段评分
加拿大[24]	DBP体系	力学－经验耦合＋FWD反演	适配主干道和次干道	作为综合性指标的子项，服务综合性指标等级划分
澳大利亚[25]	弯沉与模量反演融合	多源检测互补	适配各等级道路	采用代表弯沉值与经验目标值进行区间判断
南非[26]	设计R_{CBR}	FWD测量计算	适配高等级公路	根据R_{CBR}把路基分为S1～S6

应相结合的综合建模模式；③ 在适配道路等级方面，德国、美国、英国的体系适用于干线、高速与城市道路等多类型路段，中国与南非的体系主要应用于分级道路系统的结构状态评定，法国、澳大利亚的体系适用于统一标准下的结构分析；在评分机制方面，美国、法国基于不同道路等级进行等级划分，中国、德国、南非采用明确的分级标准，英国、加拿大则未设定分级标准。

1.1.2　基于表观病害的结构性损伤指标

相较于弯沉类力学响应参数，结构性损伤指标通过量化表面病害的空间分布与形变特征，间接反映了结构层疲劳、沉降及层间破坏等性能退化过程[27-28]。该类指标虽来源于表观信息，但在结构状态识别中的应用价值已获得广泛关注。然而，不同类型病害在各国指标体系中的归属存在较大分歧。车辙在部分体系中被单独设定为结构性损伤指标，识别路面结构层剪切破坏、疲劳沉降等退化特征，具体如表2所示。与之不同的是，裂缝、坑槽、剥落等病害虽可能源于结构性损伤机制，但多数国家并未将其设定为独立的结构类指标，而是作为功能类综合评价中的服务性子项处理，其详细内容将在功能类指标章节中进一步展开介绍。

当前体系普遍以结构层累积变形与疲劳响应为核心。在模型构建方面，美国、加拿大、澳大利亚考虑长期荷载下的疲劳影响，侧重结构响应机制的解释能力。中国以层间压应变限值为判据，评价体系更依赖规范设定阈值。日本与南非则直接依据车辙测值进行分级，侧重检测效率与实用性。适配道路等级方面，美国、加拿大、日本同时适用于高等级道路与城市次干线或一般道路，具备良好的评估灵活性，中国、澳大利亚、南非更贴近高速公路或高等级干道等规范化管理体系，对车辙控制标准化要求较高。在评分机制方面，中国、澳大利亚、南非采用统一的3级车辙标准；日本、加拿大基于管理与养护需求设定阈值；美国结合道路等级设定阈值上限，实现了结构设计与路面评价一体化。

表2　典型国家结构类车辙评价方式

Table 2　Structural rutting evaluation methods in typical countries

国家/地区	指标模型构建逻辑	适配道路等级条件	阈值划分评分机制
中国[18]	层间压应变限值判据	高速公路、高等级公路	10～15 mm轻度，大于15 mm重度
美国[19,29]	基于疲劳裂缝－车辙联动建模	高等级道路、重载干线	依据道路等级设置最大阈值
加拿大[30]	结构应变－荷载效应累积建模，重视长期状况	适配主干道和次干道	根据路面评价和维修管理分别分为5等级和3等级
澳大利亚[31]	应变累积－疲劳响应联合评估	高等级道路、重载干线	5～10 mm轻度、11～15 mm中度、>15 mm重度
日本[32]	直接测量＋阈值划分	高速公路、一般道路	根据道路等级和维修项目确定最大车辙深度
南非[33]	直接测量＋阈值划分	高等级公路	根据车辙深度和长度划分3个等级

1.2 功能类评价指标

在路面状况评价体系中，功能类指标用于衡量道路在服役阶段的运行表现，侧重于交通通行能力与使用者体验的综合反映[34]。相较于强调结构响应的结构类指标，功能类指标更关注路面表观特征、车辆-路面相互作用以及运行状态的动态反馈，体现出以运行效率与服务质量为导向的管理理念[35]。根据评价目标的不同，功能类指标主要分为两类：① 以I_{IRI}、I_{RQI}、粗糙度状况指数（Roughness Condition Index，I_{RCI}）为代表的行驶舒适性指标，评估道路对驾驶稳定性与乘坐感受的影响；② 以I_{PCI}为代表的病害评估类指标，通过病害类型、数量与分布综合评估道路安全性与驾驶稳定性，进一步反映驾驶体验优劣。本文将从这两类指标出发，系统分析功能类指标的构建逻辑、适用差异及其在不同国家道路管理体系中的应用阶段。

1.2.1 行驶舒适类指标

行驶舒适类指标主要用于衡量车辆在路面行驶过程中的振动响应特征与乘坐舒适性，其核心在于量化路面不平整对交通运行稳定性的影响[36]。在国际通行体系中，常以平整度指数作为主要评价手段。各国在平整度指标选用与标准设定方面存在一定差异，如表3所示。

典型国家在路面平整度评价指标构建上呈现出I_{IRI}为主的发展趋势。中国整合多项特征指标构建I_{RQI}，强调评价维度的广度与评价指标的本土化融合。英国、德国引入附加波形信息或增强型轮廓方差，以适应城市道路系统中对乘坐舒适性与维护管理的复合目标。在适配道路等级方面，多数国家的平整度指标广泛应用于国家级道路与高速公路体系中，澳大利亚、加拿大、日本将其应用于城市道路与二级道路系统，实现管理覆盖面的拓展。在评分机制方面，中国、日本、德国、南非划分为3～5级，体现规范的统一化治理。美国、英国、法国依据管理部门或道路等级进行差异化划分。

1.2.2 路面服务状态类指标

在功能类评价体系中，除以车辆响应为基础构建的平整度类指标外，另一类关键指标类型是以表层病害表征为基础、构建综合评分模型的路面服务状态指标。该类指标通过对裂缝、坑槽、剥落、车辙等表面损坏的类型、分布与严重程度进行量化评价，反映道路在服役期内维持服务能力的整体水平，广

表3 典型国家平整度评价指标对比

Table 3 Comparison of pavement smoothness evaluation indexes in typical countries

国家/地区	主要评价指标	指标模型构建逻辑	适配道路等级条件	阈值划分评分机制
中国[18]	I_{RQI}	综合剖面特征评分，正在标准化推广	适配各等级道路	≥90优、80～90良、70～80中、60～70次、<60差
美国[19,37]	I_{IRI}	基于路面纵断面变化的结构响应单值	适配国家公路网	依据道路等级设置最大阈值
德国[38]	波长相关平整度因子	结合不同波长信息加权建模	适配高速公路	根据1.5目标值、3.5预警值、4.5阈值分为5个等级
英国[39]	增强型纵向轮廓方差、I_{IRI}	通过纵向轮廓变化判断平整度	适配各等级道路	英国国家高速局和威尔士政府分为4级、苏格兰交通署分为3级
法国[40]	I_{IRI}	参考世界银行计算	适配各等级道路	根据不同道路等级进行波段评分
加拿大[41]	I_{IRI}	技术测量与主观感受结合的综合指标	适配洲际道路和其他道路	根据道路等级分为非常好、好、一般、差、很差
澳大利亚[42]	NAASRA粗糙度指数+I_{IRI}折算	区域标准与国际标准并行建模	适配高速公路和主干道	根据道路等级和养护需求确定最大阈值
日本[43]	I_{IRI}	采用动态响应智能系统获取	适配国家级道路与重要干线道路	0～3非常好、3～5好、5～7合格、7～10差、>10非常差
南非[44]	I_{IRI}	通过垂直加速度计算道路平整度	适配高等级道路	1～3非常好、3～4.5好、4.5～6合格、6～8差、8～10非常差

泛应用于道路等级划分、养护资源配置与资产绩效管理等场景。不同国家在该类指标上存在显著特征差异，如表4所示。

全球范围内已普遍形成以病害表征为基础的服务状态指标体系，构建逻辑趋于标准化与定量化。

中美均采用PCI体系，前者以病害种类、数量和严重度加权评分，强调标准化评估流程，后者则构建病害类型-密度-严重度的三维阵列，实现不同类型病害的综合判定。日本采用I_{MCI}指标，结合病害类型与I_{IRI}等功能性指标，构建多元综合指标体系。英国以I_{RCI}为代表，将病害权重与结构贡献进行修正加权，用于广域等级道路系统管理。南非则采用经验式病害等级打分体系，适配性强但主观性较高。在适配道路等级方面，服务状态类指标普遍具有推广性，适配多等级道路。在评分机制方面，中国、美国均构建5级划分体系，但评分区间与解释逻辑略有不同。英国、日本结合实际管理目标设置等级，强化工程响应性。南非分级标准更为粗略，以各分项指标5级视觉分为主。

1.3　综合类评价指标

在现代公路维护管理体系中，综合类评价指标正逐步成为路面技术状况评价的核心工具。相较于传统的结构类或功能类单维度指标，综合类指标整合结构、功能及潜在路面状况衰变趋势等相关数据，系统评估道路服役状态并为养护排序和投资优先级提供量化依据[51-52]。此类指标通常依托多项基础指标的加权组合、统计聚合或基于规则与学习的决策模型输出，反映道路服役状态在全生命周期维度下的演化特征。

如中国运用路面技术状况指数（Pavement Maintenance Quality Index，I_{PQI}）表征包括弯沉、平整度、车辙深度等结构类和功能类指标[18]。德国构建ZEB体系分别评估平整度、构造深度、裂缝、剥落、沉陷等指标，并通过函数转化为1～5等级评分，反映表面技术状况水平[53]。加拿大采用路面质量指数（Pavement Quality Index，I_{PQI}）衡量路面表面形态、舒适性和结构合理性[20,54]。新西兰提出路面健康指数（Pavement Health Index，I_{PHI}），综合考虑了路面的结构、功能和耐久性，提供了对路面综合健康状况的多维度评估[55]。法国采用国家道路网络质量图像指标（Image Quality of the National Road Network，I_{IQRN}）依据表面质量、结构状态进行综合评分[56]。

除各国已建立的标准化评价体系外，近年来亦有研究者提出多种综合性路面状况评价模型，尽管尚未纳入正式规范体系，但在理论建构与方法拓展方面展现出重要参考价值。综合路面状况指数（Comprehensive Pavement Performance Index，I_{CPPI}）通过主成分分析或熵权法对弯沉、裂缝、平整度等多源指标进行权重提取与线性加权，构建统一得分体系，以表征路面的整体技术状况[57]。综合服务能力指数（Comprehensive Serviceability Index，I_{CSI}）基于结构、功能与舒适性指标的归一化结果，采用加权平均

表4　典型国家路面服务状态指标选取

Table 4　Selection of pavement service condition indexes in typical countries

国家/地区	主要评价指标	指标构建逻辑	适配道路等级条件	阈值划分评分机制
中国[18]	I_{PCI}	裂缝、车辙、沉陷、坑槽等病害数量和严重度加权综合评分	高速公路、国省干道、城市道路	≥90优、80～90良、70～80中、60～70次、<60差
美国[45]	I_{PCI}	基于病害类型、密度与严重度矩阵折算	城市道路、高速公路、地方道路等多等级道路	80～100优、70～85满意、55～70一般、40～55差、25～40非常差、10～25严重、0～10失效
法国[46]	VIZIR指数	类似于美国的I_{PCI}，基于变形指数与裂缝指数两项指标的交叉表格查询结果	中小城市、地方道路、项目层面道路管理	根据劣化程度分为1～7级
英国[47]	道路状况指标[Road Condition Index，I_{RCI}]	裂缝、沉陷、剥落等表面病害加权计算综合得分	战略道路网络和干线公路网络	<40良好、40～100一般、>100差
日本[48-49]	维护控制指数[Maintenance Control Index，I_{MCI}]	裂缝率、剥落率、车辙深度、I_{IRI}等指标归一化加权综合	高速公路、城市主干路	<3立刻维修、3～4立刻修复、4～5需要修复、>5良好
南非[50]	视觉病害等级指标	按病害种类与严重度划分等级，经验式打分，无统一加权模型	适配各等级道路	各指标分为1～5等级

策略融合性能信息，适用于服务等级划分与运行能力排序[10]。此外，多准则评分模型（Multi-Criteria Scoring Model，MCSM）通过多准则决策方法对各类指标赋权评分，已广泛用于养护优先级排序与干预策略优化中[58]。作为现代公路养护管理体系中的关键组成，综合类评价指标致力于提供多维度、全过程的路面技术状况评价指标体系。该类指标融合结构响应、功能表现与路面性能衰变趋势等信息，为养护规划、资金配置与绩效评估提供系统性支撑。

1.4 各国路面质量等级划分标准

根据上述介绍，可知各国对路面技术状况评价均有面向不同类别的指标模型。为了便于直观反映路面整体质量，不同国家选取不同指标作为等级划分的依据，如表5所示。

表5 各国路面质量等级划分标准

Table 5 Classification standards for pavement quality grades in various countries

国家/地区	评价指标	等级分类及阈值
中国[18]	I_{PQI}	≥90优，80～90良，70～80中，60～70次，<60差
美国[29]	I_{IRI}	依据道路等级设置好、一般、差
德国[21]	ZEB体系	结合评估设备和测量方法划分为1～5级
英国[59]	I_{RCI}	绿色<40、黄色>40、红色>100
法国[56]	I_{IQRN}	A（20分），B（19分），C（17～18分），D（13～16分），E（<13分）
加拿大	各省、市政部门根据不同场景，选取I_{PQI}、I_{PCI}等不同指标用于等级划分	
澳大利亚[60]	根据Aurtraods指南，在不同场景选择I_{PCI}、I_{IRI}等指标用于等级划分	
日本[61]	I_{MCI}	<3立刻维修、3～4立刻修复、4～5需要修复、>5良好
南非[62]	根据TMH系列指南，在不同场景选择路面平整度、车辙、弯沉等指标用于等级划分	

从各国路面质量等级划分标准来看，大多数国家并未采用单一统一的评价指标进行等级划分，而是依据道路类型、管理目标及适用场景，灵活选取不同指标体系。以南非、加拿大和澳大利亚为代表，其标准体系强调根据场景需求选择适当的评价指标这种多指标适配机制，反映出路面评价体系向分类分级管理转变的趋势，并兼顾技术可行性与实际应用需求。

相较而言，中国、美国、英国、日本、法国等国家则在国家层面建立了相对统一的指标体系，并设定明确的分级阈值。这类做法强调标准的一致性与管理的制度化，便于跨区域绩效对比与资金分配。但同时也可能在复杂路况或特殊环境下存在指标适应性不足的问题。

2 中外路面技术状况评价指标体系差异成因分析

根据上文可知，中外路面技术状况评价指标体系在指标模型构建逻辑、生命周期介入阶段、适配道路等级条件等方面呈现出明显分化。上述差异不仅反映了技术路径的选择差异，还嵌入于各自制度环境与治理逻辑之中。为满足路面评价指标体系的改良更好地契合高精度养护需求，需要深层分析当前体系存在不足的制度成因，从国家政策理念上为评价指标体系的改良提供参考。

2.1 指标模型构建逻辑差异成因分析

评价模型的构建逻辑直接决定了指标体系对病害机制识别、性能衰减判断以及失效预警能力的表现形式。对于新时代要求的高精度养护决策体系而言，模型构建逻辑是否具有能反映结构状态变化，并提供准确、可解释的判断依据，直接关系到养护方案制定的科学性。因此，从不同国家模型构建逻辑入手，并分析其形成原因，有助于为未来指标模型的改良提供思路。

美国、加拿大、南非的体系普遍依赖于结构层响应与物理参数推演，强调工况真实还原与失效预警。这一逻辑源于其强问责治理体系，道路建设与养护各环节责任边界清晰，法律追责机制严格[63]。因此，道路评价需具备高度物理可解释性和数据可追溯性，以支撑工程安全判断与责任界定[64-65]。分层力学响应指标体系，如结构曲率指数、基层损伤指数等，能够直接反映不同层位的性能退化过程，成为制度责任链条中的技术支撑。这一体系优点在于物理逻辑清晰、可追溯性强，适用于责任边界明确、审计机

制健全的制度环境，但对检测能力与数据质量要求较高。

欧洲国家和澳大利亚更侧重于应力-应变理论建模，评价体系以标准化算法计算为核心，而不以检测结果为主要依据。这是由于道路评价需支撑财政预算审核、项目验收审计及绩效考核等多重治理环节，在此制度环境下，模型设计优先保障跨项目、跨区域数据的一致性与可比性，应对财政审计与跨部门监管需求[66]。标准化算法可以有效降低检测结果对局部工况差异的敏感性，提高政策执行和资源配置的流程效率。该体系保障了指标统一与跨区域可比性，匹配中央集权和预算审计需求，但对结构演化过程反映有限。

日本则形成了以快速反馈和社会响应为导向的模型逻辑[67]。其道路网络密集、交通压力大，公共管理体系强调市民体验与运行状态感知[68-69]。以I_{MCI}为代表的体系，采用移动检测与经验规则方法，不以结构物理推演为主，而强调表观病害识别与运行品质的快速评估。图像识别、经验评分等轻量化手段，能够及时捕捉道路状态变化，支持实时维护管理与公众满意度响应，体现了服务状态管理与社会反馈驱动下的模型选择特征。日本评价体系响应灵敏，适用于运行压力大、重视公众体验的管理体系，但结构识别能力偏弱。

中国的道路状况评价体系在快速道路建设扩张与国家治理体系现代化背景下，形成了标准统一与多层级协同并重的技术逻辑。面对区域发展不均与管理体系多样化的现实需求，中国通过标准化数据采集、参数归一与综合评分体系，支撑中央到地方各层级的管理要求[70]。评价模型不仅服务于技术合理性检验，还承担资源配置、绩效考核与政策执行的中介功能[71]。通过统一标准与多层结构化模型，中国的道路评价体系实现了数据兼容、管理协同与治理支撑三重目标，成为提升基础设施管理能力的重要组成部分，但在动态状态判断与结构预警方面仍有不足。

如图1所示，各国评价指标体系模型的构建逻辑，不仅体现了对工程状态识别的不同理解，更深层反映出各自治理体系对责任界定、财政决策、公众体验与多层级协调的制度预期。不同模型构建方式决定了指标对路面技术状况变化的反应能力，进而影响病害识别的深度与判断的可靠性。若模型过于依赖经验或缺乏明确的结构逻辑支撑，评价结果将难以追踪路面真实病害的发展机制，也无法为及时养护提供有力支撑。因此，需要兼顾结构响应机制和迅速反馈的社会需求，构建计算逻辑明确的指标模型，才能真正服务于新时代背景下对路面养护准确性和前瞻性的双重需求。

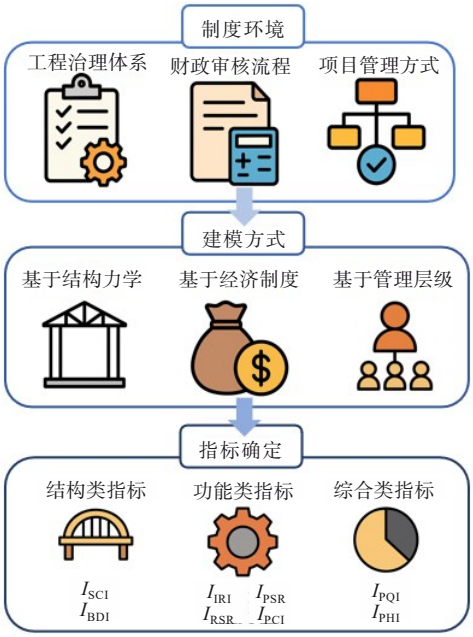

图1　制度-模型-指标耦合关系图

Figure 1　Coupling relationship between system, model, and indexes

2.2　阈值划分评分机制差异成因分析

路面技术状况评价中的等级划分评分机制，直接关系到病害状态的判断基准、干预时机的界定以及资源分配的依据。不同国家在评分体系中所采用的分级区间、评分方式和解释逻辑存在显著差异，如图2所示。这种差异并非仅由指标类型或检测手段决定，更深层地根植于各国治理体系之中。分析等级划分差异的成因，有助于改良现有评价体系，以更好地支撑养护预警及资源分配决策。

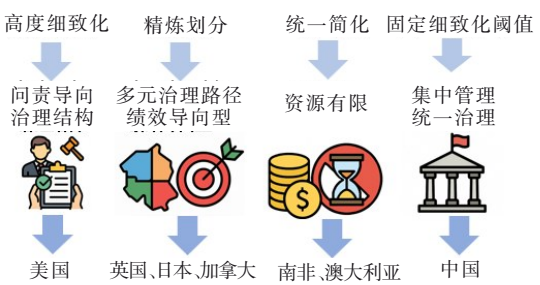

图2　各国阈值划分评分机制原理图

Figure 2　National grading and rating mechanisms for pavement evaluation

美国阈值划分呈现高细致化的特征，其根源在于公路工程领域长期建立的问责导向制度框架。在联邦-州-地方三级分权体制下，设计、施工、运行责任分工明确，评价指标不仅服务于病害识别，更承担合同验收与责任划分的职能[72]。因此，评分结果必须具备高度的物理可解释性与责任可追溯性。固定阈值、分级精细、标准统一是支撑事故归因、合同履约与绩效审计的必要条件。这类治理机制要求技术指标的输出结果在不同项目、不同机构间保持一致性和法律有效性，故评分划分趋于标准固化、计算规范化。这一规定保障评估结果标准化，适合美国强调问责和合同履约的制度环境与国情需求，但灵活性较弱。

英国、日本、加拿大划分更加精炼，不同等级的阈值跨度范围大，且根据政府部门与养护目标的区别进行差异性划分，评分机制在功能定位上更接近于管理排序与服务绩效调节工具。这类评分机制源于道路治理体系的相对分散与地方财政的独立性，在此背景下，评分结果主要用于辅助预算分配与养护优先级排序[73-75]。由于各部门管理目标各异，评分体系需兼顾排序可操作性与政策可解释性。因此，多采用简化等级区间、参考养护目标、区分所属部门的方式，提升评分在不同道路类型和治理场景中的适用性。评分等级的设定更注重在相对尺度上支持管理判断，而非与统一阈值挂钩，体现出其在财政协调与技术执行之间的中介角色。与美国标准相比，精炼的阈值划分方法更具适配性，满足不同政府部门的管理目标需求，但可能降低横向可比性。

南非与澳大利亚部分地区采用统一简化分级，主要源于检测资源分布不均、技术能力不足与管理系统多样化等原因。评分机制需要最大程度降低数据处理与计算成本，同时提供足够的信息支持路面状况识别[76]。这导致其评价等级多以经验统计与人工判定为基础，不依赖高精度建模与力学反演。在此情境中，评分等级的意义已不是用于精准判断，而是承担预警评估、指导养护优先级排序等功能，在能力有限约束下实现对管理适应性的最大化调整。引入人工参与的阈值划分方法实施成本低，适合南非等资源有限地区，但易引入主观误差，导致最终决策方案无法满足养护预期。

德国、中国采用结构清晰、等级固定的阈值划分方式，其根本原因在于两国采取以政府主导为核心的治理模式，强调标准统一、评估结果稳定性以及行政体系的可控性。德国道路维护政策由中央统一发布，定期评价结果可作为预算安排与绩效监测的依据[77]。因此，评价指标必须具备跨区域、一致化的可比性，等级划分采用全国统一的数值阈值体系。中国技术标准与指标阈值由国家层面统一制定，通过规范化评分等级与技术等级挂钩，以保障政策下达、资金分配与考核评估之间的逻辑一致性。评分机制因此被设计为与工程建设程序及养护绩效体系双向兼容的制度工具，其等级设定更强调可追溯性与执行一致性，而非评价解释的灵活性。该体系具有统一性与可执行性优势，可以适配政府主导的治理模式，但面对多样化路况，仍缺乏因地制宜的灵活调整机制。

综上，评分等级的设定方式并非单纯的技术选择，而是深受治理结构、财政机制与管理模式的系统性约束。阈值划分的精细程度与解释逻辑，体现了不同制度体系中对工程问责、资源配置与绩效衡量的侧重点差异。后期评价指标体系改良时，需对等级划分方式及阈值进行修正，以使路面状况优劣结果更准确地服务于养护方案的选择。

2.3 适配道路等级条件差异成因分析

实现差异化养护管理有助于提升不同道路条件下养护决策方案的准确性。为实现差异化养护管理，所需的评价指标体系满足两个要求：① 能覆盖从城市主干路、高速公路到农村道路等多种场景；② 能在不同服务条件下稳定反映路面状况。如图3所示，各国指标体系在适配道路场景上展现出明显分化。分析指标适配的差异性与成因，能够为跨等级、构建广适用的评价体系提供参考。

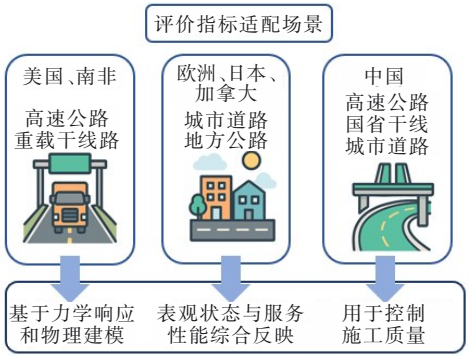

图3 适配道路场景机制匹配图

Figure 3 Road adaptation scenario mechanism matching

在美国与南非，道路网络以长距离、高速、重载通行的高速公路体系为主，因此评价指标主要应用于高速公路与重载干线道路。为满足高速公路与重载干线道路的场景需求，两国采用基于力学响应的评价指标直接反映各结构层性能退化，准确追踪重载交通引发的层间变形累积与疲劳破坏[78-79]。高等级道路主导的评价体系有助于集中资源管理，适配主干路为主的网络结构，但在城市和农村道路覆盖方面存在盲区。

欧洲国家、日本与加拿大的状况评价指标则主要应用于城市道路、地方公路及等级混合路网。这些国家道路体系结构多样，交通流动性高、负荷变化大，且普遍存在不同建设标准与维护责任主体交错的问题[80]。在这种环境下，过于依赖力学模型的评价方法，容易因结构参数不确定性而失效，故更适合采用基于表观损坏、舒适度与使用性能的指标，捕捉实际运行状态变化。因此，此类国家的规范性指标无需深入结构层建模，即可实现对多类型道路、不同服务环境下路况变化的统一评估，支撑动态运行管理与服务满意度考核，符合社会治理导向下的公共服务型设施管理体系要求。这一体系能够覆盖不同等级道路，适配多中心、结构复杂的交通系统，满足上述国家的路网需求，但对结构性能变化捕捉不够敏感。

中国评价指标体系需要构建可跨等级适配的指标体系，应对高速公路、国省干线、城市道路共存且区域发展水平差异显著的复杂网络环境。因此，在引入国际化指标的基础上发展本地化指标，实现统一采集、分级解释与适配应用的结合。通过标准统一与灵活适配并行的方式，指标体系能够在中国范围内形成可比性，同时兼顾不同地区基础设施状况与管理能力的差异，体现了适配性与统一性协同的治理目标。中国路网结构复杂、区域差异大，当前统一体系具备基础适应力，但在极端环境与特殊场景下的响应能力仍需增强。

评价指标对道路等级的适配能力，决定了其是否能准确反映不同等级道路在结构条件、使用强度下的性能退化特征。若缺乏对不同场景的适应性，评价结果在实际应用中将失真甚至失效，进而影响养护资源的配置效率与干预策略的精准度。新时代下提升养护准确性，必须依赖具备广泛适配性的指标体系，以支撑复杂路网下的分层次、分类别养护管理需求。

3　中国路面技术状况评价指标体系局限性与优化建议

在对中外典型国家路面技术状况评价指标体系进行系统比较与成因分析后可以发现，评价体系的模型构建逻辑、等级划分评分机制与适配道路场景差异，深刻映射出各国制度安排、技术路径选择与管理目标的多维差异。这些差异不仅揭示了各国在道路工程管理中的功能侧重，也为中国当前体系存在的问题识别与优化路径提供了借鉴。基于上述差异性总结与成因分析，本节聚焦中国现行评价指标体系在实际应用中暴露出的关键问题，并在比较视角下提炼出具有可行性与针对性的优化方向。

3.1　局限性分析

中国道路等级划分机制滞后于道路功能与使用环境的变化需求。目前多依赖固定阈值与经验判断，未能充分体现道路所承担的功能、交通荷载差异与区域运行特征。

以高原地区、城市快速路、农村低等级道路等特殊路网环境为例，统一的路面评价模型无法实现精细化养护分级与差异化干预决策。在高原地区，路面多出现唧泥翻浆病害，而在现有评价体系中对此类病害关注度不足[81]。在城市快速路中，I_{RQI}等舒适性指标对高频短波振动响应不敏感，难以反映微观结构变化对乘坐感受的实际影响[82]。在农村低等级道路中，通用指标对基层失稳和排水不良引起的结构性隐患反应滞后，且检测成本与周期不匹配，限制了指标体系的推广与覆盖[83]。这些问题说明当前标准虽具备统一性优势，但在多样化使用环境中存在显著滞后性，亟须在模型设定、阈值调整与使用模式上引入更强的场景适应能力。

在与养护管理决策的融合度方面，当前指标体系虽然在结构完好性和功能维度上具备一定的评估能力，但在服务于实际养护管理决策方面仍显不足。首先，目前评价结果与养护干预策略之间缺乏有效衔接，多数情况下仅用于事后描述路面状态，难以为干预时机、方式或优先级排序提供科学依据。在季节性劣化显著的区域，如高寒或干热地区，路面状况衰变过程和道路施工材料性能具有明显的阶段性特征，现有静态阈值设定难以准确反映其变化节律，导致预防性养护时效偏移[84]。其次，虽然各地公路管理机构已普遍采集I_{PQI}、I_{RQI}等指标，但在资源配置过程中，评价结果未能与年度预算形成量化映射，资金

分配仍以传统计划方式为主，无法充分体现按需配置的管理导向。有必要将资产状况评价与年度预算及维修策略结合，以实现维护效率最大化[85]。评价结果在处治效果评估中的作用也尚未建立闭环机制，未能对原有指标模型进行反作用修正与优化。这些问题在一定程度上限制了现行指标体系在全过程养护管理中的功能发挥，也表明其在工程治理场景下的适应性仍有待加强。

此外，在中国养护资金相对紧张、道路建设规模不断扩大的背景下，现行评价体系在成本控制与适应性提升之间的矛盾也日益凸显。多数地方养护单位在资源调配中倾向于选择检测频次低、评价手段简单的方案，导致部分指标获取周期长、数据更新滞后，难以支持动态干预与精准预警。同时，由于统一评价模型多以全国尺度为设定依据，未能充分兼顾地方管理能力差异，在欠发达地区和低等级道路上更容易出现因资源不足而无法落地的问题。这种技术标准与现实条件的错配，进一步削弱了评价体系的可操作性与覆盖范围，导致评价结果难以有效指导养护管理。

3.2 优化改进建议

为增强评价指标体系在道路养护中的贡献价值，本文提出以下优化改进建议，使其更贴近工程管理的实际需求。

（1）在道路类型和服务环境不断多样化的背景下，评价体系需要具备更灵活的适应能力。目前通用的评价指标在应对不同道路等级时针对性不足。因此，有必要构建一种按需组合的评价体系，使其能根据道路等级、交通流量、地形条件等因素，灵活调整所选指标的类型、判别阈值和计算参数。这种方式有助于提高指标在实际工程中的响应速度和准确性，增强体系在典型道路环境中的诊断能力。

（2）针对当前道路等级划分无法充分反映道路功能和使用环境的问题，应推动道路分级方式从静态的行政管理，转向动态的交通需求、服务功能和运行特征分析，使评价结果更贴近道路的真实服务状态。在此基础上，建立具备区域调节能力的评价标准体系，引入可根据交通量、车型结构、地形气候及路网结构等因素灵活调整的分级阈值机制，提升对复杂交通环境的适应性。

（3）评价结果能否有效参与管理决策，是衡量体系价值的关键。受中国现阶段养护资金不足与任务繁重的现实，理想的养护方案难以实施，部分地区评价结果并未真正成为决策生成、分配预算或评估效果的主要依据。为提升评价结果在养护管理体系的使用效率，可以根据道路等级和管理目标选择不同的评价指标，实现指标体系在不同应用场景下的资源适配与成本控制，避免统一评价体系造成的资源浪费。此外，提升指标结果的排序能力与财政联动性，使评价结果能够直接参与干预优先级设定与经费分配过程，强化其在养护资源配置中的决策支撑功能。

4 结论

本文围绕中外典型国家路面技术状况评价指标体系，从指标类型构成入手，系统梳理了结构类、功能类与综合类指标的选取逻辑与应用特征。在此基础上，进一步从模型构建方式、等级划分评分机制与道路场景适配能力3个维度，对中外路面技术状况评价指标体系的差异来源进行了机制层面的分析，得出以下结论：

（1）研究发现，部分国家在评价体系构建中更加注重结构响应的细化表达与模型的工程可解释性，等级划分精细统一，便于问责管理。也有国家更重视社会响应驱动下的道路运行状态与公众使用体验，指标体系侧重于功能表征与服务反馈，等级划分更关注养护目标和财政绩效。中国当前评价指标体系已具备初步标准框架与运行管理基础，但仍面临等级划分固定、应用场景局限与管理制度衔接不足等问题。

（2）针对上述问题，本文提出了动态跳转等级划分阈值、增加道路适配条件，加强评价参与力度的优化方向，旨在从政策角度提升评价结果对养护优先级排序、预算配置与执行效率的支撑能力，推动评价体系向更具针对性、实用性与规范性的方向发展。研究成果可为中国构建覆盖全生命周期、适应多道路场景并有效支撑管理决策的评价指标体系提供理论参考与路径启发。

参考文献：

References：

[1] 欧建西，张健钦，段彬，等．沥青路面养护决策技术研究进展[J/OL]．北京工业大学学报，1-12[2024-10-15]．https://kns. cnki. net/KCMS/detail/detail. aspx? filename=

BJGD20241015002&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ.
OU Jianxi, ZHANG Jianqin, DUAN Bin, et al. Progress in research on asphalt pavement maintenance decision-making technology[J/OL]. Journal of Beijing University of Technology, 1-12[2024-10-15]. https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail. aspx? filename=BJGD20241015002&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ.

[2] HALLIN J, TENG T, SCOFIELD L, et al. Pavement design in the post-AASHO road test era[J]. Interstate Highway System,2007,1:1-16.

[3] HAN C J, HAN T, YANG S X, et al. Data-driven methods for data quality evaluation, maintenance assessment and decision model fusion in asphalt pavement management system[J]. Road Materials and Pavement Design, 2025: 1-28.

[4] 《中国公路学报》编辑部. 中国道路工程学术研究综述·2013[J]. 中国公路学报,2013,26(3): 1-36.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's road engineering research: 2013[J]. China Journal of Highway and Transport,2013,26(3): 1-36.

[5] BAO S T, HAN K Y, ZHANG L, et al. Pavement maintenance decision making based on optimization models[J]. Applied Sciences,2021,11(20): 9706.

[6] HUANG J D, HAN C, WEI W J, et al. Analysis of long-term maintenance decision for asphalt pavement based on analytic hierarchy process and network level optimization decision[J]. Electronic Research Archive,2023,31(9):5894-5916.

[7] 邹祎. 公路路面养护资金动态分配优化研究[J]. 中外公路,2023,43(1): 247-252.
ZOU Yi. Study on dynamic allocation optimization of highway pavement maintenance funds[J]. Journal of China & Foreign Highway,2023,43(1): 247-252.

[8] CHEN S L, LIN C H, TANG C W, et al. Research on the international roughness index threshold of road rehabilitation in metropolitan areas: A case study in Taipei City[J]. Sustainability,2020,12(24): 10536.

[9] PAN W H, NIE M Y, SU P, et al. Prediction of regional highway pavement performance[J]. Available at SSRN 2023.

[10] LI L, LIU D D, TENG L, et al. Development of a relationship between pavement condition index and riding quality index on rural roads: A case study in China[J]. Mathematics,2024,12(3): 410.

[11] XIAO M Z, LUO R, LIU W C. Comprehensive performance ranking and impact analysis using the best approximation matter-element model and combined weights[J]. Construction and Building Materials,2023,364: 129917.

[12] XIAO M Z, LUO R, YU X H. Assessment of asphalt pavement overall performance condition using functional indexes and FWD deflection basin parameters[J]. Construction and Building Materials,2022,341: 127872.

[13] GOEL A, DAS A. Nondestructive testing of asphalt pavements for structural condition evaluation: A state of the art[J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2008, 23(2): 121-140.

[14] 董是,芮晓芳,左琛,等. 路面破损智能检测与分析算法研究进展[J]. 东南大学学报(自然科学版),2025,55(4): 1131-1153.
DONG Shi, RUI Xiaofang, ZUO Chen, et al. Research progress on intelligent detection and analysis algorithms for pavement damage[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition),2025,55(4): 1131-1153.

[15] FLORA W. Development of a structural index for pavement management: An exploratory analysis[M]. West Lafayette:Purdue University,2009.

[16] 汪海年,赵云飞,杨旭. 基于道路结构承载力及环境严酷程度的服役寿命评价指标研究[J]. 中国公路学报,2024,37(12): 210-227.
WANG Hainian, ZHAO Yunfei, YANG Xu. Study on service life evaluation indexes based on road structure bearing capacity and environmental severity[J]. China Journal of Highway and Transport,2024,37(12): 210-227.

[17] 于新,陈晨,董夫强,等. 长期服役状态下既有沥青路面结构延寿关键技术综述[J]. 中国公路学报,2024,37(12): 161-181.
YU Xin, CHEN Chen, DONG Fuqiang, et al. Review on critical technologies for the service life extension of existing asphalt pavement structures under long-term service conditions[J]. China Journal of Highway and Transport,2024,37(12): 161-181.

[18] 交通运输部公路科学研究院. 公路技术状况评定标准: JTG 5210—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司,2018.
Research Institute of Highway Ministry of Transport. Highway performance assessment standards: JTG 5210—2018[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2018.

[19] VON H, SIMPSON A, HOERNER T, et al. Mechanistic-empirical pavement design guide: A manual of practice: AASHTO R 27-08[S]. Washington, D. C.: American Association of State Highway and Transportation Officials,2008:73-76.

[20] SIMPSON A, ALAVI H, WISER L, et al. Long-term pavement performance (LTPP) manual for falling weight deflectometer measurements: Operational field guidelines: FHWA-RD-00-085[S]. Washington, D.C.: Federal Highway Administration,2000:Chapter 1.1.

[21] RABE R. Structural pavement monitoring with non-destructive measuring devices at traffic speed-Current research and experience in Germany[Z]. German Federal Highway Research Institute BASt4th European Pavement and Asset Management Conference EPAM4.2012.

[22] MORRIS P, JOHNSON D, LEE R, et al. CS 229 data for pavement assessment: DMRB CS 229[S]. London: Highways England,2020.

[23] Technical Studies Department for Roads and Motorways (Sétra). Road pavement structural design-application to new pavement: NF P98-086: 2019-05-17 [S]. Paris: Association Française de Normalisation(AFNOR), 2019: Chapter3.7.

[24] Transportation Association of Canada(TAC). Pavement asset design and management guide[S]. Ottawa: Transportation Association of Canada,2013.

[25] AUSTROADS. Guide to pavement technology part 5: Pavement evaluation and treatment design: AGPT05/19 [S].Sydney:Austroads,2019.

[26] 王晓帆,徐淼.基于中国与南非规范的FWD旧路评测及改建设计研究[J].公路交通科技(应用技术版),2017,13(5): 90-92,147.
WANG Xiaofan, XU Miao. Research on evaluation and reconstruction design of FWD old road based on China and South African codes[J]. Journal of highway and transportation research and development(Applied Technology Edition),2017,13(5): 90-92,147.

[27] 叶宏宇,周及,王选仓.考虑施工期荷载作用的再生路面疲劳损伤分析[J].武汉大学学报(工学版),2022,55(12): 1229-1240.
YE Hongyu, ZHOU Ji, WANG Xuancang. Fatigue damage analysis of recycled pavement considering load during construction period[J]. Engineering Journal of Wuhan University,2022,55(12): 1229-1240.

[28] 卢天翔,李祖仲,卢晓琪.国省道沥青路面裂缝分布评价指标与处治技术[J].中外公路,2014,34(1): 99-102.
LU Tianxiang, LI Zuzhong, LU Xiaoqi. Evaluation index and treatment technology of crack distribution in asphalt pavement of national provincial highway[J]. Journal of China & Foreign Highway,2014,34(1): 99-102.

[29] DIEFENDERFER B, VITILLO N, MAHONEY J, et al. Pavement performance measures and forecasting and the effects of maintenance and rehabilitation strategy on treatment effectiveness(revised): FHWA-HRT-16-048 [S]. Washington, D. C.: Federal Highway Administration, 2017.

[30] Alberta Transportation and Utilities. Pavement design manual. Edition 1[S]. Edmonton: Alberta Transportation and Utilities,1997.

[31] AUSTROADS. Austroads guide to asset management part 5C:Rutting:AGAM05C/07[S].Sydney:Austroads,2007.

[32] 丛菱,杨军.日本道路车辙调查研究[J].中外公路,2009,29(1): 73-78.
CONG Ling, YANG Jun. Research on road rutting in Japan [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2009, 29(1): 73-78.

[33] Committee of Transport Officials(COTO). Automated road condition assessments part D: Rutting: TMH 13A[S]. Pretoria: The South African National Roads Agency SOC Ltd(SANRAL),2016.

[34] 黄文雄.高速公路沥青路面使用性能评价指标[J].中外公路,2003,23(4): 74-76.
HUANG Wenxiong. Evaluation index of asphalt pavement performance of expressway[J].Journal of China & Foreign Highway,2003,23(4): 74-76.

[35] GUO N N, YOU L Y, LONG Z W, et al. Computationally-affordable unsupervised machine learning algorithm to identify the level of distress severity in pavement functional performance[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,2023,24(7): 7342-7356.

[36] 王浩仰.基于路面平整度指标的农村公路变形类病害判别研究[J].中外公路,2022,42(2): 78-82.
WANG Haoyang. Study on rural highway deformation distresses identification based on pavement evenness[J]. Journal of China & Foreign Highway,2022,42(2): 78-82.

[37] HALL K, SMITH G, SNYDER M, et al. Measuring and specifying pavement smoothness: FHWA-HIF-16-032[S]. Washington,D.C.:U.S.Department of Transportation,2016.

[38] Committee Motorways, Federal Highway Research Institute(FGSV). Guidelines for the design of motorways: RAA 2008[S].Bonn:FGSV,2008.

[39] CARSWELL I, LAWRENCE D, Marsh S, et al. Benchmarking the condition of highway networks[R]. London:Office of Rail and Road(ORR),2023.

[40] Technical Studies Department for Roads and Motorways (Sétra). Road tests-tests related to longitudinal evenness-Part 3: Determination of longitudinal evenness quantifiers from profilometric surveys: NF P98-218-3[S]. Paris: AFNOR,December 1995.

[41] MCNEIL S, KANG K, Holmes M, et al. International roughness index: Uses and comparison of IRI in other jurisdictions[S]. Alberta, Canada: Alberta Transportation, 2000.

[42] SANDAMAL R M K, PASINDU H R. Development of pavement roughness prediction model for national highways in Sri Lanka[J]. Engineer: Journal of the Institution of Engineers,Sri Lanka,2021,53(4).

[43] National Institute for Land and Infrastructure Management (NILIM), Public Works Research Institute (PWRI). Pavement inspection guidelines[S]. Tokyo: Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT),2016.

[44] Committee of Transport Officials(COTO). Automated road condition assessments-Part C: Roughness: TMH 13[S]. Pretoria: The South African National Roads Agency SOC Ltd(SANRAL),2016.

[45] ASTM Committee D04 on Road and Paving Materials. Standard practice for roads and parking lots pavement condition index surveys: ASTM D6433-20[S]. West Conshohocken,PA: ASTM International,2023.

[46] ORTEGA RENGIFO D M, CAPA SALINAS J, PEREZ CAICEDO J A, et al. Unmanned aircraft systems in road assessment: A novel approach to the pavement condition index and VIZIR methodologies[J].Drones,2024,8(3): 99.

[47] Highways England. Pavement maintenance assessment procedure:CS 230[S].London:Highways England,2022.

[48] MISAWA T,TAMURA T.On quantification of user costs of road management in Japan[J].Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies,2003.

[49] SHIMADA H,DOI T,LEE S,et al.Reversible predictors of reversion from mild cognitive impairment to normal cognition: A 4-year longitudinal study[J]. Alzheimer's Research & Therapy,2019,11(1): 24.

[50] Committee of Transport Officials(COTO). Manual for visual assessment of road pavements part B: Flexible pavements: TMH 9[S]. Pretoria: The South African National Roads Agency SOC Ltd(SANRAL),2016.

[51] REZA F, BORIBOONSOMSIN K, BAZLAMIT S. Development of a composite pavement performance index [R]. Department of Civil Engineering, Ohio Northern University Ada,OH,2005.

[52] 袁大伟,闫亚鹏,曹海波.高速公路沥青路面综合养护决策指标及标准研究[J].公路,2024,69(9): 331-336.
YUAN Dawei, YAN Yapeng, CAO Haibo. Research on decision-making indicators and standards for comprehensive maintenance of highway asphalt pavement [J].Highway,2024,69(9): 331-336.

[53] BMDV, Additional technical contract conditions and guidelines for the survey and evaluation of road conditions:ZTV ZEB-StB[S].Cologne:FGSV Verlag,2018.

[54] KIRIMA D.Investigation of the performance of pavement founded on reinforced earth sections along Outer Ring Road,Nairobi[D].Nairobi:University of Nairobi,2023.

[55] BENEPAL S.Refining the benchmarking of new zealand RCAs through the data envelopment analysis technique [D].Auckland:University of Auckland,2024.

[56] Institute for Roads,Streets and Infrastructures for Mobility (IDRRIM).National road network observatory report 2017 [R].Paris:IDRRIM,2017.

[57] ELMANSOURI O, ALOSSTA A, BADI I. Pavement condition assessment using pavement condition index and multi-criteria decision-making model[J].Mechatronics and Intelligent Transportation Systems,2022,1(1): 57-68.

[58] MARZOUK M, ASHMAWY M M. Assessment of highways concrete and asphalt pavements using superiority inferiority ranking technique[J]. Construction Innovation,2021,21(2): 259-278.

[59] Transport Research Laboratory(TRL). PAS 2161: 2024 – Road condition monitoring(RCM) data. Specification[S]. London:British Standards Institution,2024.

[60] WANG J Z, CHEN M, GAO W, et al. A comparison of network level pavement condition assessment in road asset management[J]. International Journal of Transportation Engineering and Technology,2020,6(3): 95.

[61] 董是,徐琢,王建伟,等.中、日、美、加沥青路面技术状况评价标准比较与对接研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2023,42(2): 44-51.
DONG Shi, XU Zhuo, WANG Jianwei, et al. Comparison and conversion study on asphalt pavement technical status assessment standards between China, Japan, America, and Canada[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences),2023,42(2): 44-51.

[62] Committee of Transport Officials(COTO).Automated road condition assessments-Part A: General: TMH 13[S]. Pretoria: The South African National Roads Agency SOC Ltd(SANRAL),2016.

[63] VESILIND P A.Evolution of the American society of civil engineers code of ethics[J].Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice,1995,121(1): 4-10.

[64] GRIGGS F E Jr.New look at the code of ethics[J].Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice,2009,135(1): 40-46.

[65] CHANCE S, LAWLOR R, DIREITO I, et al. Above and beyond: Ethics and responsibility in civil engineering[J]. Australasian Journal of Engineering Education, 2021, 26 (1): 93-116.

[66] 刘琍琍.地方政府债务融资及其风险管理:国际经验[M].北京:经济科学出版社,2011.
LIU Lili. Subnational debt finance and risk management [M].Beijing: Economic Science Press,2011.

[67] MORIYOSHI A,JIN T,NAKAI T,et al.Evaluation methods for porous asphalt pavement in service for fourteen years [J].Construction and Building Materials,2013,42: 190-195.

[68] NODA Y.Citizen expectations and satisfaction of service performance: lessons from subnational governments in Japan[J]. Asia Pacific Journal of Public Administration, 2019,41(3): 142-156.

[69] YEAN YNG LING F, TAT NG W.Boosting performance of road infrastructure: A case study based on motorist satisfaction in Singapore[J].Built Environment Project and Asset Management,2011,1(2): 211-225.

[70] 郑健龙,陈梦洁,刘超超.公路基础设施智能建造发展与展望综述[J].中外公路,2025,45(2): 1-20.
ZHENG Jianlong, CHEN Mengjie, LIU Chaochao. Review of intelligent construction development of highway infrastructures and its prospects[J]. Journal of China & Foreign Highway,2025,45(2): 1-20.

[71] 朱贵莹.基于机器学习的路面使用性能评价与预测研究[D].广州:华南理工大学,2021.
ZHU Guiying. Research on evaluation and prediction of pavement performance based on machine learning[D]. Guangzhou: South China University of Technology,2021.

[72] MULLIN M, DALEY D M. Working with the state: Exploring interagency collaboration within a federalist system[J]. Journal of Public Administration Research and Theory: J-PART,2010,20(4): 757-778.

[73] HAAS R, FELIO G, LOUNIS Z, et al. Measurable performance indicators for roads: Canadian and international practice[C]//Vancouver: Proceedings of the 2009 Annual Conference of the Transportation Association of Canada,Vancouver,British Columbia,2009.

[74] MORISUGI H. Evaluation methodologies of transportation projects in Japan[J].Transport Policy,2000,7(1): 35-40.

[75] WHEAT P. Scale, quality and efficiency in road

maintenance: Evidence for English local authorities[J]. Transport Policy,2017,59: 46-53.

[76] OLIVIER P,EMERY S,HORAK E,et al.Holistic pavement management-experiences with performance based pavement management in Australia and South Africa[C]// Somerset West: Proceedings of the 2010 SARF/IRF conference,Somerset West,South Africa,2010.

[77] KNOLL E. Road maintenance management in the federal republic of Germany[J]. Transportation Research Record, 1984 (951):58-60.

[78] SOULIMAN M, ROMANOSCHI S, DESSOUKY S, et al. Simplified approach for structural evaluation of flexible pavements at the network level[R]. Transportation Consortium of South-Central States,2018.

[79] HORAK E,HEFER A,EMERY S,MAINA J.Flexible road pavement structural condition benchmark methodology incorporating structural condition indices derived from falling weight deflectometer deflection bowls[J]. Journal of Civil engineering and Construction,2015,4(1):1-14.

[80] HAAS R, KAZMIEROWSKI T. Canada's new pavement design and management guide[C]//New Zealand: Proceedings of the Combined 18th ARRB Transport Research Conference and Transit New Zealand Land Transport Symposium. Christchurch, New Zealand: ARRB Transport Research Ltd,1996:F1 – F10.

[81] 张军辉,陈志德,高峰,等.交通荷载下高原公路翻浆病害机理与处治对策[J].中外公路,2025,45(1): 1-10.
ZHANG Junhui,CHEN Zhide,GAO Feng,et al.Mechanism of mud pumping on plateau highway under traffic loads and its treatment strategy[J]. Journal of China & Foreign Highway,2025,45(1): 1-10.

[82] LOPRENCIPE G, ZOCCALI P. Ride quality due to road surface irregularities: comparison of different methods applied on a set of real road profiles[J]. Coatings, 2017, 7 (5): 59.

[83] OTTO A,ROLT J,MUKURA K.The impact of drainage on the performance of low volume sealed roads[J]. Sustainability,2020,12(15):6101.

[84] 张大为,牟超,崔广炎,等.高寒区上覆岩石层膨胀土边坡开挖稳定性分析[J/OL].中外公路,1-8[2024-11-29].https://link.cnki.net/urlid/43.1363.U.20241129.1434.008.
ZHANG Dawei,MOU Chao,CUI Guangyan,et al.Stability analysis of expansive soil slope excavation in overlying rock layer in alpine region[J/OL]. Journal of China & Foreign Highway, 1-8[2024-11-29]. https://link. cnki. net/urlid/43.1363.U.20241129.1434.008.

[85] MA L, CAO J, PAN Z J, et al. Use of condition-based valuation approach to evaluate the maintenance decision of pavement assets: A case study of Yunnan Province in China[J].Frontiers in Energy Research,2024,11: 1346005.