

沥青路面施工质量综合评价指标及模型研究

邓星鹤^{1,2,3}, 陈富廉^{1,2,3}

(1. 广东交科技术研发有限公司, 广东 广州 510550; 2. 广东华路交通科技有限公司, 广东 广州 510420;
3. 公路交通安全与应急保障技术及装备交通运输行业研发中心, 广东 广州 510550)

摘要: 沥青路面均匀性与路面使用性能及寿命紧密相关, 业内在近10年来对沥青路面施工质量多从单指标进行评价, 评价结果不全面, 存在较大的局限性。基于压实厚度、密度、表观纹理、渗水状况和平整度等技术指标, 结合层次分析-熵值组合赋权法研究了施工质量综合评价指标及模型, 并证明其可以对沥青路面施工质量进行量化的综合评价。该综合评价指标及模型结合相应的奖惩制度, 成功应用在R高速工程项目, 获得了良好的效果, 建议在同类项目中推广。

关键词: 沥青路面; 施工质量; 组合赋权; 评价指标; 评价模型

中图分类号: U416.217

文献标识码: A

Research on Comprehensive Evaluation Indicators and Models for Asphalt Pavement Construction Quality

DENG Xinghe^{1,2,3}, CHEN Fulian^{1,2,3}

(1. Guangdong Transportation Science Technology R&D Co., Ltd., Guangzhou 510550, Guangdong, China;
2. Guangdong Hualu Transport Technology Co., Ltd., Guangzhou 510420, Guangdong, China; 3. Research and Development Center on Road Transport Safety and Emergency Support Technology & Equipment, Ministry of Transport, Guangzhou 510550, Guangdong, China)

Abstract: The uniformity of asphalt pavement is closely related to pavement performance and service life. In the past ten years, the construction quality of asphalt pavement is mostly evaluated from a single index, and the evaluation results are not comprehensive and have high limitations. Based on the technical indexes such as compaction thickness, density, apparent texture, water seepage and flatness, the comprehensive evaluation index and evaluation model of construction quality with the combination of AHP and entropy was proposed in this paper. The results show that the index and model can evaluate the construction quality of asphalt pavement quantitatively and comprehensively. The comprehensive evaluation index and model combined with the corresponding reward and punishment system have been successfully applied in R high-speed engineering project, and obtained good results, and it is recommended to popularize in similar projects.

Key words: asphalt pavement; construction quality; combinatorial empowerment; evaluation index; evaluation model

沥青混合料是由粗细集料、沥青胶浆以及空隙组成的多相颗粒复合材料^[1], 在施工过程中, 混合料容易受到环境、设备以及人的影响, 进而导致沥青路面存在部分质量缺陷, 沥青路面质量缺陷是早期路面病害发生的重要原因。此外, 沥

青路面缺陷会随着动车荷载的增加而进一步恶化, 导致坑槽、车辙以及网状裂缝的产生与恶化^[2]。因此, 全面而客观的沥青路面施工质量评价对指导沥青路面施工和提高沥青路面使用寿命具有重要意义。目前沥青路面施工质量评价主要

收稿日期: 2024-07-22

作者简介: 邓星鹤, 高级工程师, 博士, 研究方向为道路建养技术

集中在厚度和密度方面,按单一指标进行评价,没有基于路面的层位功能、路用性能进行多指标的综合评定;现有的标准、规范以及质量评定标准也未对沥青路面施工质量综合评价做出明确要求,因此,有必要就沥青路面施工质量综合评价进行研究。

本课题组以广东省R高速项目为依托,通过对影响路面质量的多个评价指标进行量化及等级划分,再基于AHP-熵权组合赋权理论,对单一指标进行主客观结合的赋权,进而形成一个量化表达的沥青路面施工质量综合评价模型。

1 单指标评价量化

1.1 厚度

沥青路面厚度是影响整个路面结构体系的重要因素,也是评估路面隐形病害的关键参数,厚度均匀性与路面力学及路用性能密切相关^[3-6],厚度的均匀性检测可以为后续路面维修提供重要参考资料。采用三维探地雷达可快速、全覆盖地对路面厚度进行连续检测,每1 m²范围出具厚度平均值作为1个实测值。本课题组根据在广东省收集的近5年建设数据,结合公路工程质量评定标准,以实测值与设计厚度偏离程度进行对路面厚度进行等级划分(见表1),统计各等级厚度所占比例,并按式(1)进行量化处理。

表1 厚度等级划分标准				单位: %
正常	偏薄	薄	过薄	不合格
≥设计值	-3 ~ 0	-5 ~ -3	-10 ~ -5	< -10

为了对厚度均匀性进行量化评价,采用专家打分法对厚度每一分级进行奖惩性的正负向权重确定,得到厚度均匀性评价公式见式(1):

$$H = 1.0h_z + 0.5h_p - 0.2h_b - 0.5h_g - 1.0h_f \quad (1)$$

其中, h_z 为正常等级的区域比例; h_p 为偏薄等级的区域比例; h_b 为薄等级的区域比例; h_g 为过薄等级的区域比例; h_f 为不及格等级的区域比例。

1.2 密度

沥青路面的密度与压实度成正比关系,压实度直接影响整个路面的承载能力与稳定性^[7],密度的离析意味着压实度的不均匀,是裂缝、沉降及松散等病害的关键原因,也是导致路面使用寿命下降的重要原因。采用无核密度仪对路面密度及其均匀性进行评价是较为成熟的做法,统计方法不再赘述,其评价标准见表2。

表2 密度离析评价标准

空隙率范围/%	离析程度
0 ~ 3	细离析
3 ~ 6	非离析
6 ~ 9	中度粗离析
大于9	重度粗离析

按式(2)对密度均匀性进行量化评价,密度均匀性评价模型在业内已使用超10年,属于较为成熟的评价模型。

$$P = 0.5\rho_x + 1.0\rho_f + 0.5\rho_m - 1.0\rho_z \quad (2)$$

其中, ρ_x 为细离析比例; ρ_f 为非离析比例; ρ_m 为中度粗离析比例; ρ_z 为重度粗离析比例。

1.3 表观纹理

道路表面相对于基准平面的竖向偏差形成道路表面纹理^[8],表观纹理的均匀性用于表征粗细集料、沥青胶浆分布的合理性,反映混合料的表面离析程度;表观纹理对路面的表面功能具有重要意义^[9]。因此,对表面纹理的准确评价是改善施工质量与路面表面功能的基础。采用高精度激光纹理仪可准确获取沥青路面表观纹理,测试中以横向1 m作为测试间距,纵向为连续测试,纵向1 m范围内的平均值作为单点测试值。参考现有文献的路面表面离析评判标准^[10],通过统计学手段,以表观纹理的测量值与期望值的比值作为分级的定量界限,假定表观纹理深度期望值为A mm,则评判标准见表3。

表3 表观纹理离析划分标准

离析级别	细离析	非离析	轻微粗离析	中度粗离析	重度粗离析
上限		$0.80 \times A$	$1.00 \times A$	$1.40 \times A$	$1.70 \times A$
下限	$0.80 \times A$	$1.00 \times A$	$1.40 \times A$	$1.70 \times A$	

采用专家打分法,得到表观纹理各离析等级的权重,评价公式见式(3)。

$$T = -0.5t_x + 1.0t_f + 0.9t_q + 0.5t_m - 1.0t_z \quad (3)$$

其中, t_x 为细离析比例; t_f 为非离析比例; t_q 为轻离析比例; t_m 为中度粗离析比例; t_z 为重度粗离析比例。

1.4 渗水状况

路面渗水状况是反映路面抗水损的直接指标^[11]。采用常规的路面渗水仪仅可对路面进行有限的点状检测,采用基于红外成像仪的全断面渗水状况快速检测车可对路幅全断面进行渗水系数检测^[12]。路面饱和面干后,在阳光辐射下升温,或在其他条件下降温,透水区域与密水区域表现

出明显的温度差异,通过红外成像仪进行路面温度扫描后,可建立渗水系数与温度的关系,得到全断面的路面渗水系数,每 1 m^2 范围出具渗水系数平均值作为1个实测值。以AC-16为例,制定的划分标准见表4。

表4 AC-16 渗水系数范围划分标准

单位: mL/min				
渗水系数	0~120	120~200	200~400	>400
等级	优	良	中	差

采用专家打分法,得到各等级渗水等级的权重,渗水状况均匀性评价公式见式(4)。

$$S = 1.0s_1 + 0.5s_2 - 1.0s_3 - 2.0s_4 \quad (4)$$

其中, s_1 为优等级比例; s_2 为良等级比例; s_3 为中等级比例; s_4 为差等级比例。

1.5 平整度

平整度是衡量路面质量、评价行车舒适度的重要指标。平整度的不均匀会增加车辆对路面的冲击与磨损,降低驾驶员的舒适性,也会造成区域性的滞积雨水,影响行车安全以及路面服役寿命^[13]。采用多功能道路检测车及手推式高精度激光平整度测试仪均可较好地获取路面平整度数据,如采用多功能道路检测车进行平整度检测,则分车道进行检测,以100 m为计算区间长度,用IRI的标准计算程序计算IRI测值,如采用高精度激光平整度测试仪,则横向以1 m间距进行测试,纵向连续测试,以纵向10 m为计算区间长度出具平均值作为单点测值。试验段、大面积施工分别推荐采用高精度激光平整度仪器和多功能道路检测车。基于近5年高速公路建设实际情况及《公路工程质量检验评定标准》(JTG F80-1—2017)相关要求,将平整度划分为表5中的等级。

表5 平整度划分标准

IRI/(m/km)	<1.0	1.0~1.5	1.5~2.3	>2.3
等级	优	良	中	差

同样采用专家打分法得到路面平整度均匀性的评价公式,见式(5)。

$$I = 1.0i_1 + 0.8i_2 - 0.3i_3 - 0.8i_4 \quad (5)$$

其中, i_1 为优等级比例; i_2 为良等级比例; i_3 为中等级比例; i_4 为差等级比例。

2 组合赋权

2.1 层次分析法(AHP法)

层次分析法是一种解决多目标复杂问题的定

性和定量相结合进行计算决策权重的研究方法。该方法可以量化主观判断,通过专家经验衡量各指标之间的相对重要程度以获取两两指标间的相对权重^[13],具体的分析步骤^[14-15]如下:①建立递阶层次结构模型;②构造各层次的判断矩阵,一般采用santy1-9标度法进行判断矩阵的构造;③利用几何平均法计算判断矩阵的权重向量;④计算一致性指数CI及一致性比例CR。当 $CR < 0.1$ 时,判断矩阵的一致性合格;若 $CR \geq 0.1$,需要对判断矩阵做出调整,直至一致性合格。

2.2 熵值法

熵值法是一种基于信息熵的多属性决策分析方法,属于客观赋权法。熵是对信息无序程度的一种度量,信息量越小,不确定性越大,熵越大,评价影响程度就越小^[15]。根据熵的特性,可以根据指标本身熵值的大小确定权重,为多指标综合评价提供依据。熵值法的步骤^[15]主要是:

1) 对数据进行归一化处理,见式(6)~(7):

$$\text{正向指标: } X'_{ij} = \frac{X_{ij} - \min\{X_j\}}{\max\{X_j\} - \min\{X_j\}} \quad (6)$$

$$\text{负向指标: } X'_{ij} = \frac{\max\{X_j\} - X_{ij}}{\max\{X_j\} - \min\{X_j\}} \quad (7)$$

2) 计算第j个指标下第i个评价者所占比重,见式(8):

$$P_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sum_{i=1}^n X_{ij}} \quad (8)$$

3) 计算指标熵值:

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln P_{ij} \quad (9)$$

4) 计算熵权:

$$S_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n 1 - e_j} \quad (10)$$

2.3 组合赋权法

层次分析法对各指标之间相对重要程度的判断具有较大的主观性,而熵值法是利用指标本身熵值确定权重,可以有效降低层次分析法带来的主观性,提高综合评价的可靠性。本课题组采用AHP-熵值组合赋权法对影响路面均匀性的各因素进行赋权,在充分考虑专家经验的同时减少主观评价的随意性^[16-18]。

首先分别通过层次分析法及熵值法计算主客观权重,然后通过式(11)计算综合权重。

$$C_j = \frac{W_j S_j}{\sum_{j=1}^n W_j S_j} \quad (11)$$

其中, C_j 为第 j 个指标的综合权重; W_j 为层次分析法计算的第 j 个指标主观权重; S_j 为第 j 个指标的客观权重。

3 沥青路面多指标均匀性评价

3.1 均匀性多指标评价模型

广东省 R 高速项目为双向六车道, 设计时速 100 km/h。在主线铺筑了 3 段 AC-16 上面层试验段。为提高施工质量, 采用探地雷达、无核密度仪、高精度激光纹理仪、全断面渗水状况快速检测车以及高精度平整度仪对试验段的铺筑效果进行检测, 评价试验段的施工质量。

对采集数据进行整理并按照上述评分公式对试验段各指标进行评分, 同时, 邀请专家对厚度、密度、表面颗粒、渗水状况及平整度进行指标相对重要程度判断, 形成层次分析法中的判断矩阵。采用 SPSS 软件, 对每试验段每个指标的评分数据进行熵值分析得到客观权重, 计算判断矩阵的权重向量并进行一致性检验进而得出主观权重, 通过式 (11) 可以计算组合权重, 结果见表 6。

表 6 各评价指标权重				单位: %
	指标	主观权重	客观权重	组合权重
沥青路面 均匀性评价	厚度	32.181	26.581	38.894
	密度	20.305	26.18	24.171
	表面颗粒	9.685	14.807	6.521
	渗水状况	5.649	14.216	3.628
	平整度	32.181	18.306	26.786

表 6 显示: ①层次分析法中, 权重的排序为厚度 = 平整度 > 密度 > 表面颗粒 > 渗水状况。在专家的经验中, 对于上面层, 厚度与平整度是最重要的两个评价指标, 厚度关系着路面结构体系的稳定性, 而平整度是影响车辆行驶质量的最重要因素。②熵值法中, 权重的排序为厚度 > 密度 > 平整度 > 表面颗粒 > 渗水状况。厚度权重在两种方法中均占最大, 而密度在熵值法中的权重高于平整度, 这是因为相对于平整度, 密度的离析更容易发生, 导致密度评分数据的离散程度更大, 其熵值与客观权重就越大。③通过组合赋权后, 权重的排序为厚度 > 平整度 > 密度 > 表面颗粒 > 渗水状况。通过熵值法对层次分析进行修正, 增加了厚度权重, 平整度与密度的权重下降且两者相对重要程度发生变化, 表面颗粒与渗水状况的权重下降但两者相对重要程度无变化。

为简化评价模型, 采取四舍六入五成双的规则对组合权重进行修约, 得到沥青路面施工质量综合评价模型, 见式 (12):

$$U = 0.39H + 0.24P + 0.06T + 0.04S + 0.27I$$

(12)

3 个试验段中共包含 6 种施工方案, 基于式 (12), 计算其均匀性综合评分, 结果见图 1。

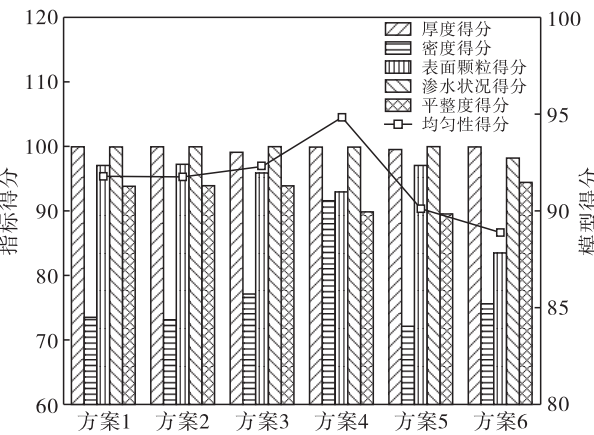


图 1 试验段施工质量评价

从图 1 可知, 该评价模型可以区分不同方案铺筑的试验段, 其中方案 4 得分最高, 方案 6 得分最低。方案 6 的试验段位于超高路段致使摊铺机参数调整不到位, 导致路面施工质量欠佳, 渗水状况、表面颗粒以及平整度得分均为最低分。

3.2 基于施工质量综合评价指标的奖惩制度

为了充分调动项目各参建单位及工程建设者的积极性, 提高工程实体质量和建设管理水平, R 高速业主基于综合评价指标制定了“优质优价”奖惩制度, 将各合同段路面优良价款的 70% 用于奖励现场技术管理人员。根据评定单元的综合得分将每个评定单元划分为优、良、中、次、差五个质量等级, 同时, 按照奖惩对等原则计算每评定单元的奖惩金额, 具体见表 7。

表 7 沥青面层均匀性评价奖惩金额计算		
质量等级	奖惩金额计算	备注
优: $U \geq 90$	评定单元奖惩金额 $\times 100\%$	全额奖励
良: $80 \leq U < 90$	评定单元奖惩金额 $\times (\text{综合得分} - 80) \div 10 \times 100$	差额奖励 (线性内插)
中: $70 \leq U < 80$	评定单元奖惩金额 $\times 0 \times 100\%$	不奖不罚
次: $60 \leq U < 70$	评定单元奖惩金额 $\times (70 - \text{综合得分}) \div 10 \times 100$	差额罚款 (线性内插)
差: $U < 60$	评定单元奖惩金额 $\times 100\%$	全额罚款, 并对不合格路段进行返工处理

根据指标评价模型对 R 高速上面层进行质量评价, 基于“优质优价”奖惩制度, 部分单元的评价及奖惩结果见表 8。

表 8 R 高速上面层“优质优价”评定

评价单元	单项得分	综合得分 U	质量等级	奖惩情况
单元 1	H: 99.8 P: 90.5	95.8	优	全额奖励
	T: 97.2 S: 99.2			
	I: 93.9			
单元 2	H: 99.2 P: 88.3	89.9	良	奖励 98.7% 奖金
	T: 83.5 S: 86.6			
	I: 79.8			
单元 3	H: 70.2 P: 80.6	77.6	中	不奖不罚
	T: 82.4 S: 85.3			
	I: 83.5			

注: H、P、T、S、I 分别代表前文中的厚度、密度、表观纹理、渗水、平整度。

从表 8 可知: 单元 1、2、3 综合得分分别为 95.8、89.9、77.6, 质量等级分别判定为优、良、中; 单元 1 发放了全额奖励, 单元 2 奖励按 98.7% 发放, 单元 3 则无奖励。综合评价指标模型可以实现对工程质量的量化评价, 对加强施工质量控制具有较高的指导意义。

4 结语

本文在沥青路面施工质量单项评定指标量化的基础上, 采用专家打分法和 AHP-熵值组合赋权法构建了沥青路面施工质量综合评价模型, 提出了施工质量综合评价指标, 并在实体工程项目中进行应用, 得到以下结论: AHP-熵值组合赋权法可有效减少专家打分法的主观性, 使评价结果更为客观; 构建的沥青路面施工质量综合评价模型及提出的综合评价指标, 与单一指标评价相比, 评价结果更为准确; 施工质量综合评价结合“优质优价”实行奖惩制度, 可有效提升路面施工质量, 激发工程管理人员的积极性; 该模型建立及验证均是基于 AC-16 上面层路用性能及实测数据, 用于评价其他层位时, 需根据层位功能定位进一步调整。

参考文献:

[1] 裴建中, 樊泽鹏, 薛斌, 等. 沥青路面材料的颗粒物物质视域: 理论、方法与进展[J], 中国公路学报, 2023, 36(8): 121-136.

[2] JIA X D. Evaluation of compaction uniformity of asphalt pavement based on construction depth variation [J]. Journal of Applied Mathematics, 2022; 5732050.

[3] 虞将苗, 唐嘉明, 张肖宁, 等. 基于三维探地雷达的沥青路面厚度动态调整技术研究[J], 中外公路, 2020, 40(3): 70-75.

[4] 林锦腾, 祝轩. 沥青路面压实过程均匀性评价与影响因素分析[J], 中外公路, 2021, 41(2): 56-61.

[5] 李晖. 基于三维探地雷达的沥青路面面层厚度与密度无损检测技术研究[D], 南宁: 广西大学, 2020.

[6] 陈成勇, 马士杰, 张艳, 等. 基于三维探地雷达技术的沥青路面施工质量研究[J], 公路工程, 2023, 48(5): 108-115.

[7] 徐召滨, 谭华. 高速公路路面压实度检测中无核密度仪的应用[J], 交通世界, 2023(10): 59-61.

[8] Characterization of Pavement Texture by Use of Surface Profiles-Part 1: Determination of Mean Profile Depth: ISO13473-1[S]. 2019.

[9] 董仕豪, 韩森, 宿金菲, 等. 沥青路面表面纹理三维评价方法及其计算边界条件分析[J], 材料导报, 2024, 38(18): 84-92.

[10] 迟凤霞, 张肖宁, 薛忠军, 等. 基于激光纹理仪的沥青路面表面离析评价方法[J], 中国公路学报, 2008(5): 1-5.

[11] 王玉林, 徐宁, 卢东. 提升沥青路面抗水损害能力措施综述[J], 中外公路, 2022, 42(1): 66-71.

[12] 陈楚鹏, 李浩. 基于红外温差的沥青路面渗水状况快速评价技术[J], 公路, 2020(3): 14-18.

[13] 韦威. 沥青路面平整度评价及预测研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2020.

[14] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(7): 93-100.

[15] 马成文, 苏薇. 基于 AHP-熵值法对区域中国式现代化水平测度的研究[J]. 长春工程学院学报(社会科学版), 2023, 24(3): 22-28.

[16] 王晓天, 张英华, 秦挺鑫, 等. 基于熵值法改进层次分析法马拉松急救能力评价模型的构建[J] 中国安全生产科学技术, 2021, 17(9): 169-174.

[17] 陶梦欣. 基于组合赋权云模型的就地热再生绿色施工综合评价[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.

[18] 杨晓松, 许杰, 查旭东, 等. 应用组合赋权法和云模型评价山区营运高速公路岩质边坡稳定性[J], 2021, 46(6): 34-40

[19] 交通部公路科学研究所. 公路沥青路面施工技术规范: JTG F40-2004[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.

[20] 交通部公路科学研究所. 路基路面现场测试规程: JTG3450-2019[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.