

基于灰色理论的高速公路路基施工过程质量评价方法

兰富安

(深圳市路桥建设集团有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要: 随着新材料、新工艺、新设备的发展,路基施工技术和质量评价方法也在不断更新,如何及时适应新技术,保持评价方法的先进性和有效性,是一个持续的挑战。为此,选取高速公路路基施工过程质量评价指标,并应用基于冲突性指标相关性的权重分配方法(CRITIC法)计算评价指标权重,提出了结合灰色系统理论和聚类分析方法的高速公路路基施工过程质量评价方法。实践结果表明:按照所提出的方法进行评价时,“优”灰色聚类系数高于0.8,说明该评价方法整体表现达到了“优”的水平,且方法权重系数也更高,说明该方法选取的指标贡献更大,能够获得更好的路基施工过程质量评价结果。

关键词: 灰色理论;高速公路;路基施工;质量评价

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)10-0298-05

Evaluation Method for Construction Process Quality of Expressway Subgrade Based on Grey Theory

LAN Fuan

(Shenzhen Road and Bridge Construction Group Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: With the development of new materials, new processes and new equipment, the subgrade construction technology and the quality evaluation methods are also constantly updated. How to adapt to new technologies in time and maintain the advancement and effectiveness of evaluation methods is a continuous challenge. Therefore, the quality evaluation indicators of the expressway subgrade construction process are selected, and the weight distribution method (CRITIC method) based on the correlation of conflicting indicators is used to calculate the weights of the evaluation indicators. A quality evaluation method for the construction process of expressway subgrade combining the grey system theory and the cluster analysis method is proposed. The practice results show that when evaluated according to the proposed method, the "excellent" grey clustering coefficient is higher than 0.8, which indicates that the overall performance of this evaluation method has reached an "excellent" level, and the weight coefficient of the method is also higher, which indicates that the selected indicators of this method contribute more and can obtain better quality evaluation results for the subgrade construction process.

Keywords: grey theory; expressway; subgrade construction; quality evaluation

0 引言

随着高速公路网络的扩展,路基作为道路的基础部分,其施工质量直接影响到道路的稳定性、使用寿命和安全性。然而,路基施工涉及多个复杂环节和多种材料,施工过程中易受地质条件、气候变化等多种因素影响,导致质量波动^[1-2]。因此,如何

科学、系统地评价路基施工过程质量,已成为确保高速公路建设质量、提升道路安全性和耐久性的研究重点。

在此背景下,出现了一些较好的研究成果。文献[3]结合数据挖掘和层次分析法,设计了一种道桥施工质量评价模型。但是,数据挖掘技术依赖于大量高质量的数据,如果数据收集不全面或存在偏差,将直接影响评价结果的准确性。基于此,文献[4]为了研究公路路基工程施工风险,以沙漠公路为研究对象,构建了路基工程施工风险的结构方程模型

收稿日期: 2024-12-06

作者简介: 兰富安(1987—),男,学士,工程师,从事道路桥梁研究工作。

(Structural Equation Modeling, SEM)。但是,该模型忽略了施工现场的动态变化和不确定性,如环境变化、施工技术的更新等,这些因素可能对施工风险产生重要影响,但在模型中可能没有得到充分考虑。在文献[5]中,先是运用工作分解结构(WBS)把项目或者任务逐步细分,使其成为规模更小且更为具体的工作单元,也就是工作包;接着,利用风险分解结构(RBS)依据特定规则对可能存在的因素进行分解,从而形成具体的影响元素;最后,将WBS和RBS相互耦合,构建出WBS-RBS耦合矩阵,借助这个矩阵来对项目里每个工作单元面临的风险加以识别与评估。不过,由于外部环境和内部条件处于不断变化之中,项目面临的风险也会随之改变,所以这种方法在动态评估与管理方面存在着一定的局限性。文献[6]提到,将建筑信息模型(BIM)技术和传感器等设备相结合,能够对建筑物的运行状态进行实时监测,并且开展数据分析工作。通过对相关数据的分析与评估,在施工过程中一旦出现问题就能及时发现并予以处理,进而提升建筑物的安全性与可靠性。此外,BIM技术还能够为施工质量提供实时反馈,辅助施工人员及时调整施工方案,以确保建筑工程的质量能够得到全方位的控制。然而,当前市场上BIM软件的种类十分繁杂,不同软件之间的文件格式存在差异,这就导致在进行数据转换时会产生问题,从而对数字化建模和管理的效果产生了限制作用。

为此,本文提出一种基于灰色理论的高速公路

路基施工过程质量评价方法。该方法首先将灰色理论引入高速公路路基施工过程质量评价,因为灰色理论能够有效处理信息不完全、数据有限的情况,这为路基施工质量评价提供了新的思路;其次,运用基于冲突性指标相关性的权重分配方法(CRITIC法)计算评价指标权重,该方法相较于传统权重确定方法,能综合考虑指标间的对比强度和冲突性等多种因素,使权重确定更为科学合理;最后,结合聚类分析方法,能够依据评价结果对路基施工质量进行分类,从而更精准地识别不同质量水平的施工状态,实现从多个维度对高速公路路基施工过程质量进行全面、系统且精准的评价,克服了传统评价方法单一性、准确性不足的缺陷。

1 方法设计

1.1 高速公路路基施工过程质量评价指标选取

在高速公路路基施工过程质量评价中,选取合适的评价指标至关重要,因为这些指标是衡量施工质量的基础和标准。评价指标的选取直接影响到施工过程的监控、质量控制的有效性以及最终工程的安全性和耐久性。通过科学合理地选择评价指标,可以确保施工过程中的每一个环节都能得到精确的评估,及时发现和纠正可能存在的问题。此外,明确的评价指标还有助于施工团队明确质量目标,为后续的路面铺设和整体工程的顺利完成打下坚实的基础。高速公路路基施工过程质量的评价指标体系如图1所示。

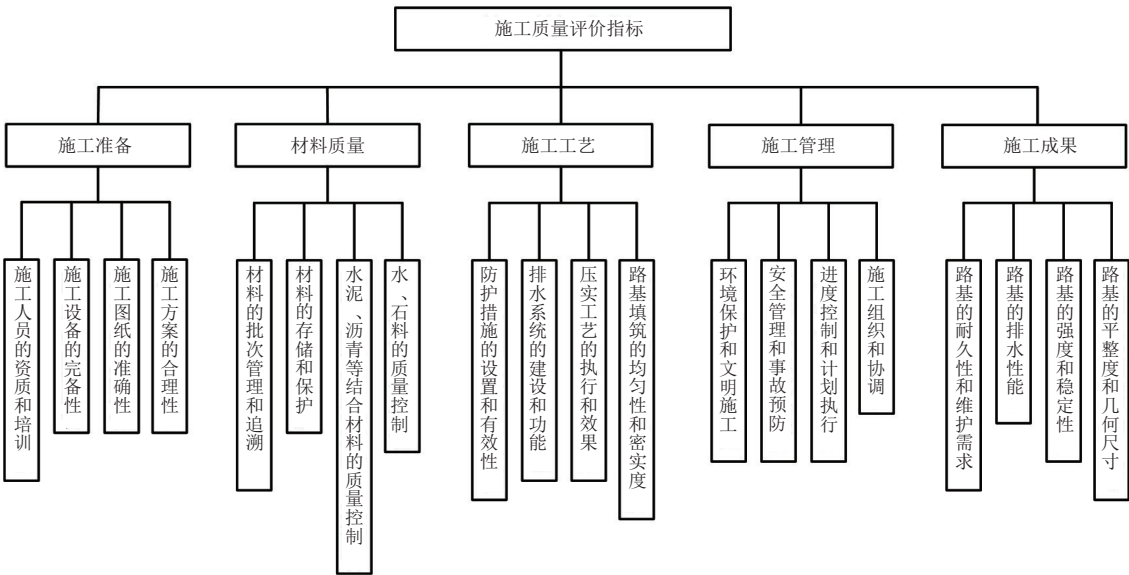


图1 高速公路路基施工过程质量评价指标

1.2 评价指标权重计算

评价指标权重反映了各个指标在整体评价体系中的相对重要性。高速公路路基施工过程涉及多方面因素,不同的指标对路基质量的影响程度存在差异。通过计算评价指标权重,可以区分出不同指标的重要性程度,使得在进行质量评价时,能够重点关注那些对路基质量起关键作用的指标。这有助于提高评价结果的准确性和可靠性,避免因同等对待所有指标而导致的评价偏差,从而更精准地反映高速公路路基施工过程的实际质量状况。因此,利用上节选取的高速公路路基施工过程质量评价指标,计算评价指标权重。假设评价指标中包括 m 个一级对象和 n 个二级指标,建立的原始指标数据矩阵用 B 表示,则针对图1所选取的指标,可建立用式(1)、式(2)表达的指标集:

$$B = \{B_1, B_2, B_3, B_4, B_5\} \quad (1)$$

$$B_1 = \{B_{11}, B_{12}, \dots, B_{14}\}$$

$$B_2 = \{B_{21}, B_{22}, \dots, B_{24}\}$$

$$B_3 = \{B_{31}, B_{32}, \dots, B_{34}\} \quad (2)$$

$$B_4 = \{B_{41}, B_{42}, \dots, B_{44}\}$$

$$B_5 = \{B_{51}, B_{52}, \dots, B_{54}\}$$

式中: B 为准则层指标; B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 、 B_5 分别表示5个指标层。

根据相关研究建立评价等级集合,对各个指标进行相对应的评价描述,将其分为不同的等级去进行评判,具体的评价等级集合为^[7-8]:

$$V = \{V_1, V_2, V_3, V_4\} = \{\text{优秀, 优好, 合格, 不合格}\} \quad (3)$$

将指标集与已建立的评价等级集合 V 相结合,利用数学排列方法,可获得相应判断矩阵 D ,见式(4):

$$D_{ij} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1j} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{i1} & d_{i2} & \cdots & d_{ij} \end{bmatrix} \quad (4)$$

在式(4)中, d_{ij} 数值越大,重要优先级越高,反之优先级越低。

由于评价指标的数据往往是通过抽样、测量等方式获取的,数据可能存在波动。例如在路基压实度这个评价指标中,不同测点的数据可能会有差异。计算标准差能够量化这种波动的大小。较小的标准差意味着数据相对集中,表明该指标在不同样本或测量中的变化较小,代表施工过程在这个指标方面

可能较为稳定和规范。反之,较大的标准差表示数据分散,可能暗示施工过程中存在更多的不确定性或者不均匀性。因此需计算标准差 z_j ,即:

$$z_j = \sqrt{\frac{1}{m-1} \cdot \sum_{i=1}^m (c_{ij} - \bar{c}_j)^2} \quad (5)$$

式中: c_{ij} 为指标的无量纲化处理结果; $\bar{c}_j$ 为指标均值。

根据标准差衡量每个指标在整体评价中的重要性,即为每个指标的最终权重。

1.3 灰色聚类评价施工过程质量

灰色聚类方法是一种基于灰色系统理论的分析技术,它适用于信息不完全或不确定的系统评价。在施工过程质量评价中,灰色聚类方法通过构建灰色关联矩阵,将多个评价指标进行聚类分析,从而识别出不同指标之间的内在联系和相似性^[9]。这种方法的核心在于利用灰色关联度来衡量指标间的关联程度,进而将相似的指标归为一类,不同类的指标则体现出差异性^[10-12]。因此,灰色聚类方法特别适合于施工过程这种信息不完全、动态变化且受多种因素影响的场景,它能够为施工过程质量提供一个全面、客观的评价,帮助识别关键质量控制点,优化施工管理,并最终提升工程质量。具体过程如下:

(1)选取评价样本,确定评价对象以及每个评价对象的评价指标。

(2)将图1中各指标评价分值转化成百分制。

(3)将施工过程质量测度结果划分为“优、良、中、差”4个灰类。

(4)同样以经费投入占比指标为例,建立三角白化权函数。三角白化权函数能够对经费投入占比这一模糊性指标进行量化处理。施工中的经费投入占比与施工质量之间的关系并非简单的线性关系,存在着许多不确定性因素。三角白化权函数通过设定函数的下限、最可能值和上限,将经费投入占比的取值范围划分为不同的灰类,从而把复杂、难以确切界定的经费投入占比与施工质量的关系转化为可计算、可比较的数值关系^[13-14]。通过三角白化权函数计算出的结果,可以明确经费投入占比在不同灰类(如投入合理、投入不足、投入过度等)中的归属程度,进而在整体的灰色聚类评价中,合理考量经费投入占比这一指标对施工过程质量评价的贡献。建立三角白化权函数如下:

$$\left\{ \begin{aligned} P_g^1 &= \begin{cases} 1, a_{mn} \in [0, 80) \\ \frac{100 - a_{mn}}{100 - 80}, a_{mn} \in [80, 100] \end{cases} \\ P_g^2 &= \begin{cases} \frac{a_{mn}}{60}, a_{mn} \in [0, 60) \\ \frac{100 - a_{mn}}{100 - 60}, a_{mn} \in [60, 100] \end{cases} \\ P_g^3 &= \begin{cases} \frac{a_{ij}}{40}, a_{mn} \in [0, 40) \\ \frac{100 - a_{mn}}{100 - 40}, a_{mn} \in [40, 100] \end{cases} \\ P_g^4 &= \begin{cases} \frac{a_{mn}}{20}, a_{mn} \in [0, 20) \\ 1, a_{mn} \in [20, 100] \end{cases} \end{aligned} \right. \quad (6)$$

式中： P_g^1 、 P_g^2 、 P_g^3 、 P_g^4 分别为评价指标 a_{mn} 属于优、良、中、差 4 个灰类的白化权函数； m, n 分别为指标矩阵的行列数量。

(5) 计算灰色聚类系数。灰色聚类系数是确定施工过程质量所属灰类的关键依据^[15-16]。施工过程质量受到多种因素影响,具有一定的不确定性和模糊性,而灰色聚类系数能够综合考虑各个评价指标的信息,通过特定的计算方法得出一个数值,这个数值反映了施工过程质量与不同灰类的关联程度。

$$Q(k) = P_g^k(a_{mn}) \cdot W_f \quad (7)$$

式中： $Q(k)$ 为第 k 个灰类的聚类系数； W_f 为第 f 个指标的综合权重。

(6) 当聚类系数达到最大值,则结束施工过程质量的评价。

2 实例验证

深圳市北园大街的综合改造项目作为一项实验性工程,涉及六大核心建设领域:地面道路网络、高架桥系统、地面桥梁结构、地下管线网络及其配套设施、快速公交线路以及两侧环境的综合整治。地面道路从二环西路向东延伸至电建路,总长度为 13.02 km。本标段为第 4 标段,桩号为 K3+872~K5+016,全长 1.144 km。主要工程内容为地面道路、高架路、西工商河地面桥梁、地下管线及设施、快速公交、两侧环境建设等。

将本文研究方法应用至北园大街道路及环境建设工程,取“优、良、中、差”4 个灰类的灰色聚类系数的最大值。取最大值意味着选择与工程实际质量状况最相符的类别。例如,如果“良”的灰色聚类系数最大,这表明工程在整体上与“良”这个质量水平的

关联性最强,相较于“优、中、差”的类别,更符合“良”类所代表的质量特征。本文研究方法的灰色聚类系数结果如图 2 所示。

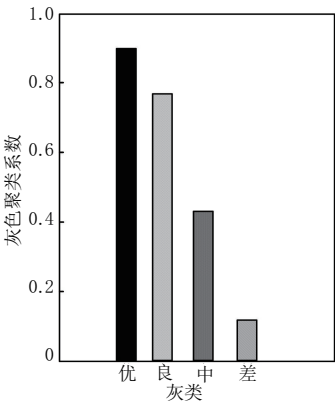


图 2 灰色聚类系数

由图 2 可见,本文研究方法的“优”灰色聚类系数最高,且高于 0.8,说明本文研究方法在施工过程质量的评估中,整体表现达到了“优”的水平。说明该方法不仅能够为施工质量提供精确、科学的量化评价,确保施工过程的每个阶段都能达到高标准,而且还能为施工方、监理方以及相关决策者提供明确的指导,帮助识别和解决潜在的质量问题,从而全面提升工程质量管理水平。此外,该方法的高效性和准确性,有助于优化资源配置,减少不必要的返工和资源浪费,最终实现经济效益和社会效益的双赢。

为了验证所提出的基于灰色理论的高速公路路基施工过程质量评价方法的有效性,统计了方法应用过程中的方法权重系数。由于不同的指标对路基整体质量的影响存在差异,权重系数就是用来量化这种差异的。权重系数是衡量每个指标在整个评价体系中的相对重要性的关键参数。当运用这一评价方法时,统计方法应用过程中的权重系数,能够直观地反映出各个指标对最终质量评价结果的贡献程度。权重系数越大,表明该方法所选取的指标在评价体系中的贡献越大,也就意味着在进行质量评价时能够更精准地反映出高速公路路基施工过程的真实质量状况,从而提高整个质量评价的准确性,这也是验证基于灰色理论的评价方法有效性的一个重要依据。以文献[3]提出的基于数据挖掘和层次分析法的施工质量评价模型以及文献[4]提出的基于 SEM 的施工质量评价模型为对比方法,最终对比结果如图 3 所示。

由图 3 可知,本研究提出的基于灰色理论的高速公路路基施工过程质量评价方法的权重系数显著高

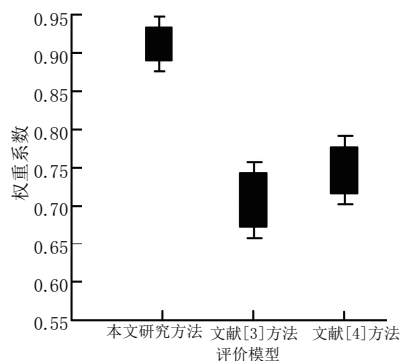


图3 权重系数对比

于文献[3]、[4]方法,这表明该方法在评价精准度方面具有明显优势。这主要是因为本文研究方法采用CRITIC法来计算评价指标权重,而CRITIC法在确定权重时综合考虑了指标间的对比强度和冲突性等多方面因素。在高速公路路基施工过程中,评价指标众多且相互关系复杂,这种综合考量能够更精准地识别每个指标对质量评价的独特贡献,从而合理地分配较高的权重。而文献[3]、[4]方法可能在权重计算时未能全面考虑这些复杂关系,导致权重分配不够合理准确。

利用本文研究方法对上述北园大街道路及环境建设工程的施工路基稳定性完成质量评估。为验证本文研究方法应用的精度,利用应变片传感器和光纤传感器确定路基所属区域中在桩基不同深度下位移和弯矩的真实变化。应变片传感器和光纤传感器所获取的数据是基于实际物理现象的精确测量结果,具有很高的准确性和可靠性,能够反映出桩基在实际工况下的真实状态。而本文研究方法所得到的位移和弯矩结果是基于理论模型和算法得出的。如果两者的对比结果高度吻合,就表明本文研究方法能够准确地反映出实际工程中的路基稳定性情况,从而证明其在计算和评估位移和弯矩等关键指标方面具有较高的精度。对比结果如图4所示。

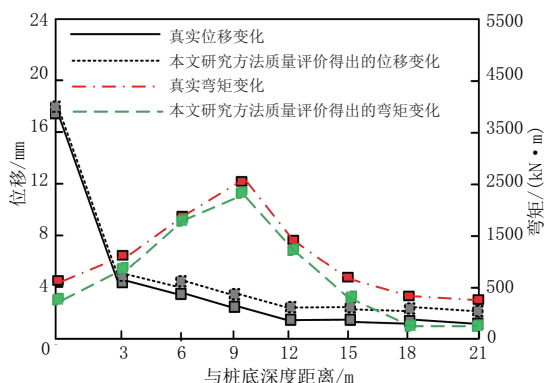


图4 质量评价结果与实际测量结果的拟合程度

由图4可知,采用本文研究方法得到的桩基不同深度下位移和弯矩数据与实际数据具有高度拟合度,说明应用本文研究方法进行的评价具有很高精度。

3 结 语

本研究提出的基于灰色理论的高速公路路基施工过程质量评价方法不仅在理论层面体现了创新性,而且在实际应用中也展现出了显著的优势,特别是在处理复杂多变的施工环境和质量指标时,其评价结果的准确性和可靠性得到了实测数据的有力支持。

参考文献:

- [1] 周南杰,颜俊键,李伟雄,等.基于三维探地雷达和数字图像分析的沥青路面施工质量评价研究[J].公路,2022,67(12):100-106.
- [2] 肖丽平,田紫君,田景文.基于隐马尔科夫算法的课程施工过程质量评价的研究[J].黑龙江高教研究,2022,40(1):151-155.
- [3] 陈志杰.基于数据挖掘的道桥施工质量评价模型构建研究[J].四川水泥,2022(4):236-238.
- [4] 王首绪,韩凌云.基于SEM的沙漠公路路基工程施工风险研究[J].中外公路,2024,44(1):9-15.
- [5] 宁占智,孙开畅.基于WBS-RBS耦合矩阵法的水利工程洞室施工作业人因风险评估[J].三峡大学学报(自然科学版),2024,46(2):42-46;54.
- [6] 韦俊春.基于BIM技术的建筑工程施工质量控制研究[J].工业建筑,2023,53(7):277.
- [7] 吴林娟,赵国俊.基于结构CRITIC法的学术期刊评价指标的赋权方法及比较[J].统计与决策,2024,40(1):56-62.
- [8] 和焯龙,张鹏飞,赵永娟,等.基于CRITIC和AHP组合赋权的TOPSIS法蜂群威胁评估研究[J].火炮发射与控制学报,2024,45(1):28-35.
- [9] 罗慧丰,陈菊香.基于AHP-模糊综合评价法煤化工储运装置安全风险评价研究[J].化工管理,2022(7):129-133.
- [10] 王智涵,汪西华,黄运林,等.基于变异函数模型的钢桥面防腐层施工质量评价[J].武汉大学学报(工学版),2023,56(3):322-328.
- [11] 邵玲,李美转,李永康,等.基于Grubbs规则的化学专业课程施工过程质量评价探究——分析化学课程[J].化学教育(中英文),2023,44(22):23-29.
- [12] 张志雄,叶雪云,罗鹏辉,等.系统科学视角下的工程造价专业课程施工过程质量评价[J].系统科学学报,2023,31(4):113-119.
- [13] 焦红,于莹莹,王松岩,等.基于IAHP-FUZZY的装配式建筑施工质量风险评价[J].建筑技术,2023,54(11):1381-1386.
- [14] 周伟威,刘波,杨辉,等.临江富水高渗透性卵砾石地层基坑止水帷幕施工质量检测及其评价[J].工业建筑,2023,53(增刊2):553-555;582.
- [15] 李美欣,邵志国,于德湖.近距离下穿既有运营地铁站的换乘车站施工风险评价研究[J].铁道标准设计,2022,66(4):155-161.
- [16] 王建军,谢灿荣,何建乔,等.大跨径钢管混凝土拱桥管内混凝土施工质量分析与评估[J].公路,2023,68(11):172-175.