



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2404005

引用格式:董坤,丛波日,赵书凝,等. 沥青路面内部病害注浆修复效果评价综述[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(6): 2207-2217.

Dong Kun, Cong Bori, Zhao Shuning, et al. Review of grouting repair effectiveness evaluation for internal diseases in asphalt pavement[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(6): 2207-2217.

化学工业

## 沥青路面内部病害注浆修复效果评价综述

董坤<sup>1</sup>, 丛波日<sup>2,3</sup>, 赵书凝<sup>1</sup>, 傅锐<sup>4</sup>, 李鹏<sup>1\*</sup>, 王俊杰<sup>1</sup>

(1. 中国海洋大学工程学院, 青岛 266100; 2. 山东省高速公路技术和安全评估重点实验室, 济南 271299;  
3. 山东高速集团有限公司创新研究院, 济南 250000; 4. 山东省路桥集团有限公司, 济南 271502)

**摘要** 沥青路面注浆修复效果的评价方法多种多样,但大多依赖单一指标的现场检测,多指标综合评价方面则鲜见相关报道。为全面了解沥青路面注浆修复效果检测方法,促进单指标评价向多指标评价方法的发展和应用,分别综述了钻孔取芯法、注浆塞尺法、弯沉检测法、模量反算法、探地雷达法和瞬态瑞雷面波法在注浆填充质量、路面强度、路面模量、压实度、空隙率以及注浆修复程度等指标检测中的研究与应用;进而借鉴隧道注浆、采空区注浆等领域研究现状,分析了模糊层次分析法、灰色关联度法、主客观赋权云模型在沥青路面内部病害注浆修复效果评价中的应用前景,展望了沥青路面注浆修复效果评价精确化、客观化和信息化的发展趋势。为沥青路面内部病害注浆修复效果评价提供多元的方法指导。

**关键词** 沥青路面; 注浆修复效果; 指标检测; 评价模型; 多指标综合评判

中图分类号 TQ172; 文献标志码 A

## Review of Grouting Repair Effectiveness Evaluation for Internal Diseases in Asphalt Pavement

DONG Kun<sup>1</sup>, CONG Bo-ri<sup>2,3</sup>, ZHAO Shu-ning<sup>1</sup>, FU Rui<sup>4</sup>, LI Peng<sup>1\*</sup>, WANG Jun-jie<sup>1</sup>

(1. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;  
2. Shandong Key Laboratory of Highway Technology and Safety Assessment, Jinan 271299, China;  
3. Shandong Hi-speed Group Co., Ltd., Innovation Research Institute, Jinan 250000, China;  
4. Shandong Road and Bridge Group Co., Ltd., Jinan 271502, China)

**[Abstract]** There are various evaluation methods for the effectiveness of asphalt pavement grouting repair, most of which rely on on-site testing of a single indicator. Up to now, there are few related reports in the comprehensive evaluation of multiple indicators. In order to comprehensively understand the detection methods of asphalt pavement grouting repair effect and promote the development and application from single index evaluation to multi index evaluation methods, the research status of relative methods were summarized including drilling core method, grouting plug gauge method, deflection detection method, modulus inverse algorithm, ground penetrating radar method, and transient Rayleigh surface wave method in the detection of grouting filling quality, pavement strength, pavement modulus, compaction degree, void ratio, and grouting repair degree and other indicators. Furthermore, drawing on the current research status in the fields of tunnel grouting and goaf grouting, the application prospects of fuzzy analytic hierarchy process, grey correlation degree method were analyzed, as well as subjective and objective weighting cloud model in the evaluation of grouting repair effect of internal diseases in asphalt pavement, and looks forward to the development trend of precision, objectivity, and informatization in the evaluation of grouting repair effect of asphalt pavement were forecasted. Diversified method guidance is provided for evaluating the grouting repair effect of internal diseases in asphalt pavement.

**[Keywords]** asphalt pavement; grouting repair effect; metric detection; evaluation model; multi-indicator comprehensive evaluation

收稿日期: 2024-05-29; 修订日期: 2024-11-25

基金项目: 国家自然科学基金(52279115); 山东高速集团创新研究院委托科研项目(SDGS-2022-0455-09)

第一作者: 董坤(1987—), 男, 汉族, 山东青岛人, 博士, 副教授。研究方向: 高速公路沥青路面注浆修复效果评价。E-mail: doku121314@163.com。

\* 通信作者: 李鹏(1989—), 男, 汉族, 山东青岛人, 博士, 副教授。研究方向: 高速公路固废再生材料研发与应用体系。E-mail: lp@ouc.edu.com。

投稿网址: www.stae.com.cn

随着“交通强国”上升为国家战略,中国公路建设发展迅猛。截至2022年底,全国公路总里程达到 $535 \times 10^4$  km左右,其中高速公路 $17.7 \times 10^4$  km。高速公路的快速发展为中国人民带来了极大的便利<sup>[1]</sup>。由于沥青路面具有平整度好、行车舒适和噪声小等优点,中国大多数高速公路采用了这种路面形式<sup>[2]</sup>。然而,随着全国公路覆盖范围日趋广泛,某些路段在施工质量、交通量、运营期荷载以及建成运营时间等因素的影响下,开始爆发多种道路病害,如基层脱空、空洞、疏松及压实度不足等,严重影响了公路的行车舒适、服役寿命与国民的人身安全<sup>[3]</sup>。

注浆修复技术作为一项实用性极强的技术被广泛运用于高速公路沥青路面病害修复的实际工程中。该技术在道路病害修复中具有重大意义,不仅实现了高速公路非开挖快速加固,而且节约了资源,提高了施工效率<sup>[4]</sup>。随着注浆修复技术的广泛应用,修复效果的有效评价方法受到越来越多的重视。近年来,中外许多学者基于不同理论和方法提出了多种注浆修复无损检测手段,如弯沉检测、探地雷达检测等,这些方法既可用于高速公路沥青路面病害的快速检测,也同样适用于注浆修复后道路性能的检测<sup>[5]</sup>。但是注浆工程本身和其修复效果评价是一个多维度、多因素交织的复杂系统工程,并非简单地依赖于单一指标或参数的衡量,而是需要综合考虑多种因素与指标的协同作用。目前,基于层次模糊分析、灰色关联度和云评价等方法的多指标注浆效果综合评判法多应用于采空区注浆、煤层底板注浆、隧道帷幕注浆等<sup>[6-9]</sup>,沥青路面内部病害注浆修复效果的评价在实际施工中的应用要滞后很多,仍处于目前的薄弱环节。

因此,首先对现有的检测评价方法进行综述,主要包括钻孔取芯法、注浆塞尺法、弯沉检测法、模量反算法、探地雷达法和瞬态瑞雷面波法,这些方法大多通过检测路面一个或两个路面的性能指标(如路面强度、模量、压实度和空隙率等)来评价注浆修复效果;随后,借鉴了隧道注浆、采空区注浆等领域内注浆修复评价手段,分析了层次模糊分析法、灰色关联度法、云模型法在沥青路面注浆修复效果评价方面的应用前景,以期对沥青道路的养护和修复效率提供参考和指导。

## 1 注浆修复效果评价指标检测方法

随着注浆技术的广泛应用,注浆效果检测技术也随之日益完善。不同的检测方法可以检测注浆修复后道路不同的性能指标,既包括强度、变形和

模量等力学性能指标,也包括表观质量、压实度和空隙率等物理指标。根据这些指标的实测数据可以对注浆工程做出较为客观的评价。根据检测方法的检测形式,大体上可将其分为有损检测和无损检测。各项检测技术以及对应的检测指标总结如表1所示。

表1 各项检测技术对应检测指标

Table 1 Corresponding detection indicators for various detection technologies

检测形式	检测方法	检测指标
有损检测	钻孔取芯法	芯样完整性
		注浆填充效率
	注浆塞尺法	抗压强度 抗劈裂强度 裂缝填充率
无损检测	弯沉检测法	弯沉值
		弯沉盆
	道路模量反算法	路面结构强度指数
		面层模量
		基层模量
探地雷达法	土基模量	
	图谱分析	
瞬态瑞雷面波法	压实度	

### 1.1 有损检测

#### 1.1.1 钻孔取芯法

钻孔取芯法是目前公路注浆修复施工验收时最为常用的方法,也是最直观有效的注浆效果评价手段。其通过钻孔取芯机取得道路芯样,通过观察芯样填充效果、检测芯样强度,对注浆修复后道路的力学性能进行评价。芯样填充效果图如图1所示<sup>[10]</sup>。

在实际工程中,马磊<sup>[11]</sup>对存在层间脱空以及裂缝等病害的高速路段进行高聚物注浆修复,修复后通过钻孔取芯观察路面基层芯样的完整性,发现层间脱空区域与裂缝区域已充满注浆材料,达到预期修复目的。祝争艳等<sup>[12]</sup>针对注浆修补裂缝进行取



图1 芯样填充效果图<sup>[10]</sup>

Fig. 1 Renderings of core filling<sup>[10]</sup>

芯,对注浆修复后的芯样分别进行附着力拉拔强度、复合件拉拔强度、劈裂抗拉强度检测,由试验结果得出,高性能聚合物注浆材料具有较好的修补粘结水稳基层裂缝的效果。Lu等<sup>[13]</sup>在注浆地进行了岩心钻孔,对岩样进行了检查,结果表明:注浆后,岩体平均强度达到3 MPa,有效提高了其稳定性和安全性。由此可见,钻孔取芯法可通过观察芯样外观和检测力学性能来反映修复效果。徐永丽<sup>[14]</sup>将钻孔取芯法分为现场外观检查和室内物理试验两部分,提出了一套完整的芯样评价指标体系,具体流程如图2所示。

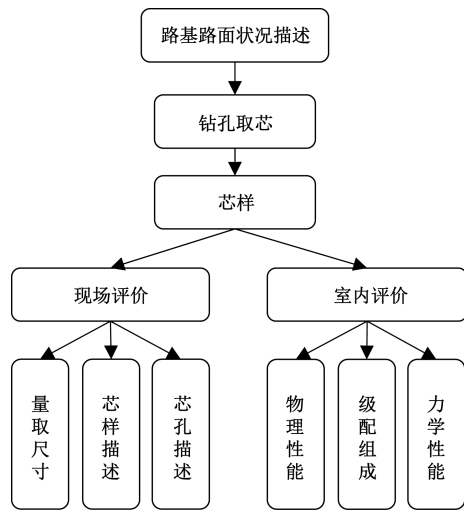


图2 取芯评价流程图

Fig. 2 Core evaluation process diagram

### 1.1.2 注浆塞尺法

注浆塞尺法是一种直接、简单的测量方法,通过使用塞尺工具,可以直观地了解注浆后裂缝或间隙的宽度情况,主要用于评估注浆后裂缝或结构间隙的宽度,从而判断其注浆效果。这种方法在注浆工程中广泛应用,特别是在需要对注浆效果进行快速评估的场合。

注浆塞尺检测的原理是利用塞尺的尺片之间的可移动性,通过调节尺片之间的距离来适应不同宽度的裂缝或间隙。在测量时,将塞尺的一端与裂缝或间隙的一端对齐,然后用另一端对准另一端,确保塞尺与裂缝或间隙平行且紧密接触。通过读取尺片之间的距离,即可得到裂缝或间隙的宽度值。周健楠<sup>[15]</sup>利用塞尺进行检测,结果表明,注浆后的塞尺深度明显小于注浆前,裂缝得到了一定的填充,裂缝两侧得到了明显的提升。由此可见,塞尺检测可以作为注浆效果的评价指标。

## 1.2 无损检测法

无损检测法一般需要对路面进行破坏性试验,难以在运营期的公路中进行大规模应用。因此,无

损探测技术应运而生,其可以在不破坏路面结构的情况下有效评估道路路面状态和性能<sup>[16-18]</sup>。

近年来,无损检测技术有了很大的发展,许多无损检测方法被应用于道路状况评估中。诸如弯沉检测法、探地雷达法(ground penetrating rada, GPR)、道路模量反算法、瞬态瑞雷面波法等是目前常见的注浆效果检测方法。这些方法具有一些共同的优点,如检测设备的高便携性和检测过程的快速性。因此,无损检测方法快速受到研究人员和工程师的青睐,在评估道路性能指标方面越来越受欢迎<sup>[19]</sup>。

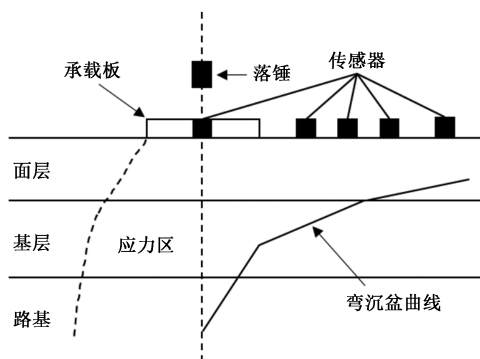
### 1.2.1 弯沉检测法

在无损检测中,对路面进行加载,而后进行挠度响应测量的弯沉检测技术是目前极为有效并广泛应用的方法。同时,在沥青路面注浆修复效果检测中,弯沉值也是非常重要的一项检验指标,弯沉值不仅可以体现路面的力学性能,如结构层的刚度和强度、路面结构承载力等,而且也与路面的使用性能存在一定的联系。因此,弯沉试验在注浆修复效果评价中具有极其重要的作用<sup>[20]</sup>。

贝克曼梁法(Benkelman beam method, BB)是一种传统的静态弯沉检测方法,虽然检测速度慢,但技术比较成熟,是目前标准的弯沉测试方法,所用仪器为贝克曼梁弯沉仪。程俊夕等<sup>[21]</sup>在注浆工作完成三天后利用贝克曼梁法对注浆效果进行检测,根据规范要求,弯沉值小于0.2 mm,则可认为混凝土面板未发生脱空现象。但由于该方法的工作效率低受人为因素影响较大等问题,目前较多地应用于低等级公路的施工、日常养护及旧路评价的检测。

而落锤弯沉法(falling weight deflectometer, FWD)则是通过自由落下的重锤在路面上施加动态荷载,通过记录每个路面层受到冲击荷载时的响应值,自动测定弯沉值,属于动态弯沉。该方法被认为是一种极其有效的无损检测方法,在国际上被广泛应用。马建等<sup>[22]</sup>提出了一种可以快速精准检测路面回弹弯沉、动弯沉的检测装置,该装置基于激光技术,实现了弯沉值的快速检测。但动态弯沉数据并不能直接应用到路面承载能力的评价中,使用时需要借助贝克曼梁法进行标定换算,刘忠根等<sup>[23]</sup>分析并建立了静态弯沉与动态弯沉之间的关系,该换算关系可直接应用于实际工程。FWD弯沉测试示意图<sup>[24]</sup>如图3所示。

王复明等<sup>[25]</sup>在落锤式弯沉仪检测的基础上,建立了针对半刚性基层路面的弯沉盆指数评价方法。吴小恋<sup>[26]</sup>基于室内试验、弯沉盆等效原理、动态模量阈值确定,建立了根据当量模量标准值和当量模

图3 FWD弯沉测试示意图<sup>[24]</sup>Fig. 3 FWD bending and sinking test<sup>[24]</sup>

量衰减两者比值同阈值比较大关系,对沥青路面结构承载力强弱进行评价的方法,该评价方法实现了利用FWD快速检测沥青路面承载力。林有贵等<sup>[27]</sup>利用FWD弯沉检测法对沥青路面注浆后的路面强度进行评价,注浆补强后路表弯沉显著降低,路面结构强度显著提高,加固效果良好。Xiao等<sup>[28]</sup>根据弯沉盆检测数据对路面结构性能进行评价,填补了现有规范只考虑功能性能,很少涉及基层结构性能的内容空白。

综上所述,弯沉检测法是目前道路检测中不可或缺的检测方法,其检测技术和检测装置在不断地发展更新。同时,通过对弯沉值进行分析,可以获得注浆修复后路面结构强度、路面承载力等注浆修复效果评价指标的相关信息,弯沉值仍是目前高速公路病害检测及高速公路沥青路面注浆修复效果检测中非常重要的评价指标。

### 1.2.2 道路模量反算法

在沥青路面运营阶段,尽管区域气候条件、交通流量负荷以及路面构造特征的获取相对便捷,但深入掌握路面材料的特性信息则面临较大挑战。为了应对这一难题,当前中外广泛采用的一种高效手段是利用FWD弯沉检测来采集路面在受力下的弯沉盆数据。随后,基于这些详尽的弯沉盆数据,通过反演分析方法,较为准确地推算出路面材料的模量参数,从而为路面性能评估与维护决策提供科学依据<sup>[29]</sup>。陈光伟等<sup>[30]</sup>基于FWD弯沉盆参数,建立路面结构三维动力有限元模型,在此基础上对既有路面耐久性进行了评估。在模量反算方法上,可大体划分为传统算法与智能算法两大类<sup>[31]</sup>。

传统算法技术依赖于几种核心方法,包括回归分析<sup>[32]</sup>、迭代求解及数据库检索法<sup>[33]</sup>,这些方法均展现出对既定问题与条件的高度明确性。其共通之处在于它们拥有既定的算法框架与参数配置,这种固定性为从计算复杂度与收敛特性两个维度进

行深入的理论分析铺设了坚实基础,使得理论探讨更为严谨与可行。但无论是回归分析中的模型拟合、迭代求解中的重复计算过程,还是数据库检索策略中的大规模数据遍历,这些传统算法在处理复杂或大规模数据时,往往面临较高的计算复杂度和较低的效率。这可能导致算法在实际应用中响应时间较长,难以满足实时性要求。

智能算法,则是指利用神经网络法和智能群体算法反算道路模量,随着计算机计算速度与计算能力不断提升,智能算法成为模量反算领域的关键技术<sup>[34-35]</sup>。居政<sup>[36]</sup>在原有数据库检索传统算法的基础上,利用穷举法提高模量反算的精确性。杨国良<sup>[37]</sup>通过反向传播神经网络分析路面弯沉盆与沥青路面基层参数的数据库,建立起沥青路面基层弹性模量预测模型。Fakhri等<sup>[38]</sup>提出了一种实用的道路评价方案,该方案利用人工神经网络(artificial neural network, ANN)和回归模型,建立了弯沉与路面性能之间的关系。Fileccia等<sup>[39]</sup>提出的基于蚁群优化算法的路面层属性反演算法,该模型具有强大的全局搜索能力。巩金芝<sup>[40]</sup>萤火虫算法进行了优化与革新,通过融入多样化的策略机制,旨在增强搜索过程的效率并有效缓解算法早期收敛的问题,从而实现了模量反演精度的显著提升。

在道路性能评估与注浆效果评价领域,模量反算展现出了更为广阔的发展前景与显著的应用价值。随着神经网络技术的飞速进步,特别是遗传算法(genetic algorithm, GA)与反向传播神经网络(back propagation neural network, BP)以及粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)与BP神经网络的结合应用,在处理复杂的非线性问题上展现出了前所未有的能力。这一技术革新极大地拓宽了路面材料性能反算的边界,预示着模量反算的精确性存在着巨大的提升空间,为实现更加精准的道路性能评估与注浆效果评价提供了强有力的技术支持。

### 1.2.3 探地雷达法

探地雷达(GPR)是一种非破坏性物理方法,因其操作成本低、省时、非侵入性和低劳动力而被广泛应用于基础设施评估,尤其是道路路面性能检测。其工作原理是在地下一定深度内如果存在有空洞或该处注浆体充填率小于周围的土体的充填率,由地质雷达天线在地表向地下发射的高频电磁波就会被反射回地表,根据介质中电磁波传播速度和接收的反射信号,便可确定地下空洞的位置和深度。图4所示为探地雷达工作原理。通过探地雷达图谱分析可以对注浆效果的优劣进行评价<sup>[41]</sup>。

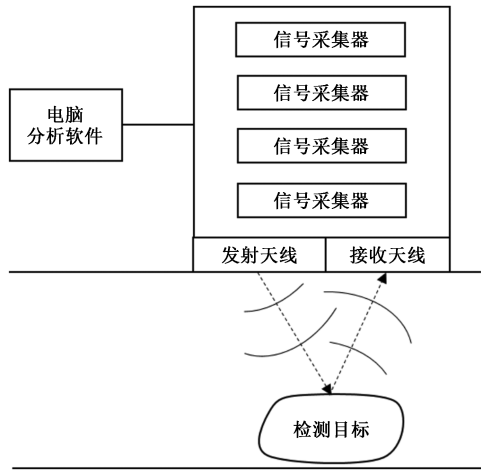


图4 探地雷达工作原理<sup>[41]</sup>

Fig. 4 Working principle of ground penetrating radar<sup>[41]</sup>

符艳<sup>[42]</sup>通过 GPR 物探扫描得到的注浆后道路内部雷达图,发现电介质对比度越大,反射幅度越高,因此脱空位置往往会出现非常复杂的波形,修复后同一位置会出现较大的变动,这是因为脱空处被注浆材料所修复。所以可以通过对比注浆前后雷达图,对高速公路的注浆效果进行评价。Zhu 等<sup>[43]</sup>通过雷达模拟与实测相结合,分析了灌浆前后的时频域信号特征。基于数据敏感性,选取 13 个时频域信号特征作为分级评价指标。依托工程实例,建立了路面基层裂缝注浆处理效果的分级评价方法。Zhao 等<sup>[44]</sup>基于 GPR 和 FWD 的基础模型对路面疲劳应力进行分析,提出了一种基于探地雷达法和 FWD 方法的路面内部强度和损伤状况的评价体系。与传统的基于室内试验和路面观测的评价方法相比,Zhao 等<sup>[44]</sup>所提出的基于路面疲劳应力的评价方法显著提高了注浆效果评价的准确性。同时,为高速公路注浆效果评价提供了一种新的方法和思路。

近年来,随着探地雷达的发展,探地雷达在沥青路面的检测,已不仅仅局限于对图谱特征的分析,通过建立混合料的介电常数与空隙率、压实度之间的数学关系模型,探地雷达可以实现沥青路面均匀性检测<sup>[45]</sup>。Georgiou 等<sup>[46]</sup>开发了一种基于探地雷达(GPR)的优化方法来准确评估热混合沥青(hot mixture asphalt, HMA)路面表层的压实度。该方法可以快速准确地检测沥青混合料空隙率、均匀度等指标,进而可间接推断注浆修复后道路的结构性能。

综上所述,探地雷达技术在道路检测领域内已实现了广泛的实践与应用研究。然而,该技术在标准图谱库建设、以及图像识别效能与精确度的提升方面,尚存若干待改进之处。鉴于计算机技术的持

续演进,人工智能(artificial intelligence, AI)和计算机视觉(computer vision, CV)技术的不断发展,基于深度学习的 GPR 图像自动检测的尝试也越来越多,未来将实现神经网络(ANN)与深度学习算法在探地雷达图像处理中的结合,力求捕获更全面详尽、高精度的病害特征图谱,并加速图谱识别效率,以促使探地雷达检测技术迈向更加成熟与完善,实现检测精度的飞跃式提升。

#### 1.2.4 瞬态瑞雷面波法

瞬态瑞雷面波法不需要进行钻孔取芯,只需用力锤在路面施加瞬时的垂直冲击,即可通过在路基上激发的瞬态瑞雷面波的频散曲线分析得到不同深度范围内的介质性质,如路基土的压实度、路面结构层动态模量。通过建立瑞雷面波速与路面介质物理力学参量之间的关系,可以实现路面工程的无损检测<sup>[47]</sup>。图 5 所示为瞬态瑞雷面波法的检测原理<sup>[47]</sup>。

张文升等<sup>[48]</sup>通过对面波频散曲线分析得出,路面脱空病害得到修复后,该位置的主频数值会发生变化,确定了瞬态瑞雷面波法对高速公路病害修复效果进行无损检测的可行性。林有贵等<sup>[49]</sup>依托于路面基层注浆加固实际工程,分别采用瞬态面波法和钻孔取芯法进行注浆效果检测并进行对比。结果表明,剪切波波速对路面结构层内部状况变化敏感,因此可以用于高速公路病害识别及注浆效果检测中。吕宇航<sup>[50]</sup>通过分析脱空状态下弹性波的传播规律及面波频散曲线特征、确定路面基层脱空范围,实现了对路面基层脱空的定性识别和定量评价。刘强<sup>[51]</sup>采用瞬态瑞雷面波技术,对公路工程中软弱路基的夯击加固成效进行了深入分析。他通过细致对比加固处理前后,面波波速的显著变化,不仅验证了加固效果的显著性,还精准地揭示了加固处理的深度范围,为评估加固质量提供了有力依据,充分展现了该方法在道路加固效果评价中的有效性和可靠性。

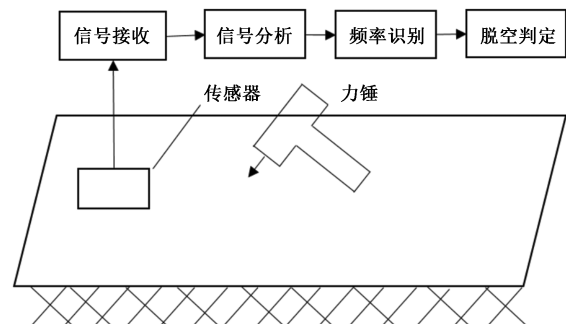


图5 瞬态瑞雷面波法的检测原理<sup>[47]</sup>

Fig. 5 Detection principle of shuntai rui rayleigh wave method<sup>[47]</sup>

综上所述,瑞雷面波法能够通过频率和波速变化快速反映路基路面的压实度,可以用于病害识别及注浆效果检测。

## 2 多指标注浆效果综合评价方法

单一的检测手段能够较好地反映道路某一特征指标,如压实度、强度等,但注浆后的道路性能往往需要从多个角度进行综合评判,单一检测手段很难实现这一目的。例如,现行公路技术状况评定标准 JTG 5210—2018 中就将根据路面损坏状况指数、路面行驶质量指数、路面车辙深度指数、路面跳车指数、路面磨损指数、路面抗滑性能指数、路面结构强度指数 7 项指标对路面技术状况进行评价<sup>[52]</sup>。道路的注浆修复将直接影响这些指标的检测结果。反之,注浆修复效果也可通过包括但不限于以上多个道路性能指标来反映。因此,对于高速公路沥青路面病害注浆修复效果来说,多指标综合评价模型是较为合理有效的评价手段。当前,沥青路面注浆修复效果评价尚缺乏系统性的评价体系,因此借助已有文献中隧道注浆、采空区注浆等领域效果评价手段,分析了模糊层次分析法、灰色关联度法、主客观赋权云模型在沥青路面内部病害注浆修复效果评价中的应用前景。

### 2.1 层次模糊分析法

层次分析法是一种多因素之间,通过两两比较重要性确定因素权重的评价方法。它的优势在于将一个复杂问题数学化、层次化、系统化,从而更为有效地分析和解决问题。但由于比较过程中主观判断的不精确性,Mardani<sup>[53]</sup>提出了层次模糊分析法。该方法将模糊集与层次分析法相结合,既保持了层次分析法的优势,同时又弥补了层次分析不准确的缺点,已被广泛应用于多个领域的复杂方案评估。总结层次分析-模糊综合评判模型构建流程如图 6 所示。

许光泉等<sup>[54]</sup>利用层次模糊评价模型构建了底板岩溶水害注浆治理效果的综合评价模型,并进行了实际应用,该模型的成功利用为注浆修复效果的评价提供了一定的借鉴。贾姆<sup>[55]</sup>通过对比煤层底板注浆前后水质变化、井身稳定性、地层渗透性等指标的方法,来评估注浆效果。王德明等<sup>[56]</sup>以永莲隧道为实例,运用注浆量分析法、检查孔分析法、P-Q-t曲线法以及 GPR 物理探测法检测道路相关指标,基于层次分析法,建立注浆效果评价指标体系,引入模糊理论,构建了注浆效果评价模型,实现了注浆效果评价从定性、经验性向科学化和半量化的转变。Fan 等<sup>[57]</sup>引入基于 D 数理论的层次分析

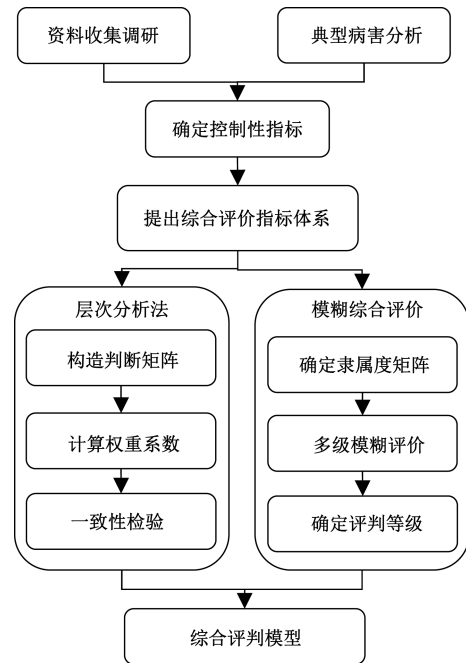


图 6 层次分析-模糊综合评判模型构建流程

Fig. 6 Construction process of analytic hierarchy process fuzzy comprehensive evaluation model

法方法(D-analytic hierarchy process, D-AHP),将传统的层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)扩展为 D 数,提出了一种综合考虑浆液帷幕渗透性和密闭性的浆液帷幕灌浆效率的混合模糊综合评价方法。可以更有效地处理不确定问题。

层次模糊分析法通过引入模糊数替代传统的精确数,这一转变使得评价过程能够容纳模糊性的判断,进而提升了效果评估的精确度。在未来的研究中,可以将更多的检测方法,如 GPR 图像检测、弯沉检测等,结合到所提出的层次模糊分析法中,以获得更有效的注浆评价。

### 2.2 灰色关联度法

灰色关联度分析(grey relational analysis, GRA)是邓聚龙<sup>[58]</sup>于 1984 年提出的一种分析系统中各个因素之间相互关联程度的评价方法。其基本思路是依据系统历史有关统计数据的几何关系和相似程度来判断因素之间的关联程度。总结关联度计算步骤如图 7 所示。

杨永超<sup>[59]</sup>探讨了采空区地基注浆处治效果的灰色关联度评价方法,并结合工程实例进行了应用分析。利用灰色关联理论分别对注浆前后地基稳定性、承载能力、变形特性等指标进行评价。潘旺等<sup>[60]</sup>根据改进的灰色理论,提出了基于沥青路面裂缝率的路况评价模型,该模型同样适用于沥青路面注浆修复效果评价。后钱峰等<sup>[61]</sup>提出了一种基于灰色关联度的模糊综合评价方法,依据注浆施工流

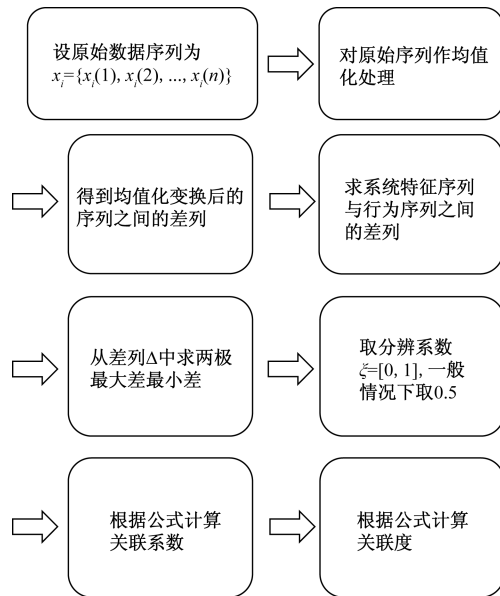


图7 关联度计算步骤

Fig. 7 Steps for calculating correlation degree

程,从注浆过程控制、注浆结束控制条件、注浆检测及注浆可靠度4个方面建立2级3层的注浆效果评价体系,建立了优、良、合格、不合格4个注浆效果评价等级。并结合贵阳地铁隧道注浆堵漏工程,进行注浆效果评价。

灰色关联度分析法与传统的分项评价、赋权综合方法相比,后者的权重赋予具有较大的主观性,而灰色关联度评价模型能系统反应量化和非量化指标的不同特性,评价结果更加真实。灰色关联度分析虽然在理论研究方面成果丰硕,但在评价沥青路面注浆效果的应用方面研究较少,未来研究中将其与注浆修复效果模糊综合评价相结合,可进一步完善沥青路面注浆修复效果评价理论。

### 2.3 云模型法

鉴于沥青路面注浆修复效果评价中普遍存在的模糊性和随机性,引入云模型能够有效获取全面且客观的评价结果。云模型这一理论最初由李德毅院士提出,它基于概率论和模糊数学,通过期望值  $E_x$ 、熵  $E_n$  和超熵  $H_e$  来表征客观事物不确定性研究中的随机性和模糊性的关系<sup>[62-63]</sup>。

在此基础上,许多学者进一步论证和发展了云模型,并将其运用于风险评估、适宜性评估和效果评价等领域。郭德赛<sup>[64]</sup>、李梦<sup>[65]</sup>、于景飞等<sup>[66]</sup>和贺佳伟等<sup>[67]</sup>通过云模型分别对敞开式掘进机施工法(tunnel boring machine, TBM)施工风险、地铁施工风险、变电站的检修风险、车载动力锂电池火灾风险进行了评价;Deng等<sup>[68]</sup>、朱倩等<sup>[69]</sup>和冯辉红等<sup>[70]</sup>利用云模型分别对地下空间的地质适宜性、果园运输小车适应性、既有公路服务区设施配置适宜

性进行了评估;金圆等<sup>[71]</sup>采用改进的云模型对隧道爆破效果进行了综合评价;在采用云模型执行效果评价的流程中,赋予评价指标权重是一个至关重要的环节,它深刻影响着评价结果的可信度。传统的赋权方法大致可以划分为主观赋权法与客观赋权法两类。为了应对单一赋权方法所固有的局限性,众多学者逐渐倾向于采用博弈论理论进行组合赋权,以期将决策者的主观认知与指标的客观数据进行合理的权重分配。目前,博弈论组合赋权-云模型在注浆修复研究中已成功应用,贺琳<sup>[7]</sup>基于博弈论组合赋权-云模型评价体系,对高铁采空区地基注浆治理后的效果进行评价,并以具体工程案例为对象,验证了该评价方法的科学适用性。但是,组合赋权-云模型评价体系在高速公路注浆修复领域中的应用尚属空白。这些评价模型的成功应用,意味着注浆修复效果评价同样可以借鉴这种方法,综合考虑多种因素对修复效果的影响。对于注浆修复效果评价中可能涉及的复杂因素具有一定的借鉴意义,有助于更全面地评估注浆效果。

当前,云模型评估理论体系在道路注浆修复领域的实践应用尚属空白,这一现状凸显了其在该领域内未被充分挖掘的潜力与广阔的发展空间。鉴于其前瞻性与创新性,未来在道路注浆修复效果的评价过程中,引入并融合组合赋权云模型理论,有望带来显著的性能提升与评估精度的飞跃。此举不仅能够填补现有技术空白,还能为道路修复工程提供更为科学、全面的决策支持。

## 3 结论

注浆修复作为一项实用性强且广泛应用于道路病害修复的重要技术,其修复效果的评价研究具有极其重要的意义。然而,目前中外在注浆修复效果评价方面仍存在诸多空白和挑战,亟待进一步深入研究。本文综合分析了现有沥青路面注浆修复效果评价的研究方法和应用实例,分析探讨了较为可行的发展方向,得出如下结论。

(1)有损检测技术的优缺点:有损检测技术通过直接对路面进行破坏取样,能够获取道路内部的真实信息,其检测结果通常较高的准确性。但由于需要对道路进行破坏,因此其难以在运营期的公路中进行大规模应用。

(2)无损检测技术的进一步发展:无损检测技术,如弯沉检测、探地雷达(GPR)、瞬态瑞雷面波法等,在注浆修复效果评价中展现了巨大潜力。然而,现有技术在检测精度、数据处理及图像分析等方面仍需进一步提升。未来应致力于发展更为精

确、高效的无损检测技术,并结合人工智能、深度学习等先进技术,提高检测的自动化和智能化水平。

(3) 系统性评价体系的缺失: 当前, 注浆修复效果评价缺乏系统性的评价体系。现有的模糊层次分析法、灰色关联度分析、云模型仍未应用于沥青路面注浆修复效果评价中, 未来的研究应着重于构建一套科学、全面、具有可操作性的注浆修复效果评价体系, 综合考虑多个指标和参数的协同作用, 以提高评价的准确性和可靠性。

### 参 考 文 献

- [1] 交通运输部. 2023 年交通运输行业发展统计公报[EB/OL]. (2024-06-18)[2024-11-27]. [https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202406/t20240614\\_4142419.html](https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202406/t20240614_4142419.html).  
Ministry of Transport. Statistical bulletin on the development of transportation industry in 2022[EB/OL] (2024-06-18)[2024-11-27]. [https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202406/t20240614\\_4142419.html](https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202406/t20240614_4142419.html).
- [2] 徐鹏, 祝轩, 姚丁, 等. 沥青路面养护智能检测与决策综述[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(7): 2099-2117.  
Xu Peng, Zhu Xuan, Yao Ding, et al. Review on intelligent detection and decision-making of asphalt pavement maintenance[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2021, 52(7): 2099-2117.
- [3] 杨美群, 邹友泉, 刘静. 探地雷达在高速公路路面隐性病害检测的应用[J]. 公路, 2022, 67(8): 86-91.  
Yang Meiqun, Zou Youquan, Liu Jing. Application of GPR in the detection of hidden diseases on highway pavement[J]. Highway, 2022, 67(8): 86-91.
- [4] 赵宏昊, 刘宪明, 李鹏, 等. 考虑道路层间脱空病害的地聚合物注浆材料性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(12): 4559-4571.  
Zhao Honghao, Liu Xianming, Li Peng, et al. Properties of geopolymer grouting material considering road interlayer hollowing diseases[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(12): 4559-4571.
- [5] Zhao W, Yang Q, Wu W, et al. Structural condition assessment and fatigue stress analysis of cement concrete pavement based on the GPR and FWD[J]. Construction and Building Materials, 2022, 328: 127044.
- [6] 曾艳铭. 地铁隧道注浆堵漏处理评价体系应用研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019.  
Zeng Yanming. Application research on evaluation system of grouting leakage stoppage treatment in metro tunnel[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019.
- [7] 贺琳. 高铁采空区地基注浆治理效果影响因素评价研究[D]. 郑州: 河南理工大学, 2023.  
He Lin. Evaluation study on factors influencing the effect of foundation grouting treatment in goaf of high-speed railway[D]. Zhengzhou: Henan Polytechnic University, 2023.
- [8] 苑尚志, 王精华, 张伟杰, 等. 基于组合赋权的 TOPSIS-RSR 法的煤层底板注浆效果评价体系[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2024, 6(3): 140-151.  
Yuan Shangzhi, Wang Jinghua, Zhang Weijie, et al. Evaluation
- system of grouting effect of coal seam floor based on TOPSIS-RSR method with combination weighting[J]. Journal of Mining And Strata Control Engineering, 2024, 6(3): 140-151.
- [9] 陈军涛, 李文昕, 薛峰, 等. 主客观组合赋权的 TOPSIS-RSR 注浆效果综合评价方法[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(S2): 191-199.  
Chen Juntao, Li Wenxin, Xue Feng, et al. Comprehensive evaluation of TOPSIS-RSR grouting effect based on subjective and objective combined weights[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S2): 191-199.
- [10] 余万福, 曹明明, 李绍安, 等. 沥青路面反射裂缝快速注浆修复的应用效果分析[J]. 公路与汽运, 2024, 40(3): 81-84.  
Yu Wanfu, Cao Mingming, Li Shaoan, et al. Analysis of the application effect of rapid grouting repair of asphalt pavement reflection cracks[J]. Highways and Automotive Applications, 2024, 40(3): 81-84.
- [11] 马磊. 高聚物注浆技术在高速公路路面深层病害处治中的应用研究[J]. 科学技术创新, 2022(26): 100-103.  
Ma Lei. Research on application of polymer grouting technology in expressway pavement deep disease treatment[J]. Scientific and Technological Innovation, 2022(26): 100-103.
- [12] 祝争艳, 周文, 刘海婷, 等. 半刚性基层裂缝注浆材料性能及其机理研究[J]. 公路工程, 2020, 45(6): 185-189.  
Zhu Zhengyan, Zhou Wen, Liu Haiting, et al. Study on properties and mechanism of grouting material in semi-rigid base layer[J]. Highway Engineering, 2020, 45(6): 185-189.
- [13] Lu W, Guo Z, Hu H, et al. Stability evaluation of mined-out area and borehole grouting treatment: a case study in China[J]. Case Studies in Construction Materials, 2023, 19: e02596.
- [14] 徐永丽. 沥青混凝土路面芯样评价指标体系的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.  
Xu Yongli. The study on evaluation, target system of asphalt pavement core[D]. Haerbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [15] 周健楠. 高速公路半刚性基层沥青路面裂缝注浆技术研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2020.  
Zhou Jiannan. Study on the treatment of crack grouting in highway asphalt pavement[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2020.
- [16] 王剑, 臧国帅, 刘黎萍, 等. 改建工程半刚性基层损坏状况评估方法[J]. 中外公路, 2017, 37(6): 61-65.  
Wang Jian, Zang Guoshuai, Liu Liping, et al. A method for assessing the damage condition of semi-rigid base in a reconstruction-project[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2017, 37(6): 61-65.
- [17] 连萌, 吴羨. 基于半刚性基层的预防性养护理念及技术探讨[J]. 中外公路, 2013, 33(5): 59-62.  
Lian Meng, Wu Xian. Discussion on the concept and technology of preventive maintenance based on semi-rigid baselayer[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2013, 33(5): 59-62.
- [18] 李细伟, 陈敏. 基于无损检测技术的半刚性基层沥青路面损伤状态分析[J]. 公路, 2017, 62(8): 40-43.  
Li Xiwei, Chen Min. Analysis of damage state of semi-rigid base asphalt pavement based on non-destructive testing technology[J]. Highway, 2017, 62(8): 40-43.
- [19] 朱洪洲, 阳绪缘. 沥青路面内部缺陷无损检测技术研究综述[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(25): 10588-10604.

- Zhu Hongzhou, Yang Xuyuan. Review of non-destructive testing techniques for internal defects in asphalt pavements[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(25): 10588-10604.
- [20] 徐艳玲,唐伯明,朱洪洲,等. 高速弯沉仪检测技术研究进展[J]. 公路交通科技, 2021, 38(4): 16-27.
- Xu Yanling, Tang Boming, Zhu Hongzhou, et al. Study progress of TSD detection technology[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38(4): 16-27.
- [21] 程俊夕,周茗如. 聚合物注浆技术在某二级公路水泥混凝土路面脱空病害治理中的应用[J]. 公路工程, 2019, 44(4): 174-177.
- Cheng Junxi, Zhou Mingru. Application of polymer grouting technology in treatment of cavitation diseases of cement concrete pavement of a class II highway[J]. Highway Engineering, 2019, 44(4): 174-177.
- [22] 马建,赵祥模,贺拴海,等. 路面检测技术综述[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(5): 121-137.
- Ma Jian, Zhao Xiangmo, He Shuanhai, et al. Review of pavement detection technology[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 17(5): 121-137.
- [23] 刘忠根,孟莹琳,白日华,等. 公路沥青路面动态弯沉与静态弯沉关系研究[J]. 中外公路, 2008(3): 47-50.
- Liu Zhonggen, Meng Yinglin, Bai Rihua, et al. Study on the relationship between dynamic deflection and static deflection of highway asphalt pavement[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2008(3): 47-50.
- [24] 杨美坤,李万鹏,黄卫明,等. 半刚性基层开裂的沥青路面承载力响应特性[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2024, 43(3): 310-321.
- Yang Meikun, Li Wanpeng, Huang Weiming. Response characteristics of asphalt pavement bearing capacity with cracked semi-rigid base[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 2024, 43(3): 310-321.
- [25] 王复明,李文辉,郭成超,等. 基于高聚物渗透注浆的半刚性基层路面承载性能恢复研究[J]. 北京交通大学学报, 2019, 43(3): 1-7.
- Wang Fuming, Li Wenhui, Guo Chengchao, et al. Research on bearing performance recovery of semi-rigid base pavement on the basis of permeable polymer grouting[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2019, 43(3): 1-7.
- [26] 吴小恋. 基于弯沉等效原理的沥青路面结构承载力评价研究[J]. 中外公路, 2021, 41(3): 35-40.
- Wu Xiaolian. Research on bearing capacity evaluation of asphalt pavement structure based on the principle of equivalent deflection[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2021, 41(3): 35-40.
- [27] 林有贵,栗晖,易强,等. 在役沥青路面基层地聚物注浆补强技术研究[J]. 中外公路, 2020, 40(2): 46-52.
- Lin Yougui, Li Hui, Yi Qiang, et al. Research on polymer grouting reinforcement technology for asphalt pavement base in service[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2020, 40(2): 46-52.
- [28] Xiao M, Luo R, Yu X. Assessment of asphalt pavement overall performance condition using functional indexes and FWD deflection basin parameters[J]. Construction and Building Materials, 2022, 341: 127872.
- [29] 周岚,倪富健,王浩仰. 基于弯沉盆的高速公路沥青混凝土路面结构状况评价研究[J]. 公路, 2015, 60(9): 1-6.
- Zhou Lan, Ni Fujian, Wang Haoyang. Research on evaluation of highway asphalt pavement structure based on deflection basin[J]. Highway, 2015, 60(9): 1-6.
- [30] 陈光伟,马永磊,张定一,等. 基于FWD弯沉盆参数的沥青路面层间接触状态识别方法及耐久性评估[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(24): 10508-10519.
- Chen Guangwei, Ma Yonglei, Zhang Dingyi, et al. Identification method of asphalt pavement interlayer contact state and durability evaluation based on FWD deflection basin parameters[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(24): 10508-10519.
- [31] 陈跃琳. 基于GA-BP神经网络的足尺环道沥青路面结构层模量反算方法研究[D]. 保定: 河北大学, 2024.
- Chen Yuelin. Research on back calculation method of structural layer modulus of fullscale ring road asphalt pavement based on GA-BP neural network[D]. Baoding: Hebei University, 2024.
- [32] 董倩,吕耀志,程少锋,等. 机场刚性道面基层顶面模量转换关系研究[J]. 中外公路, 2022, 42(2): 62-67.
- Dong Qian, Lü Yaozhi, Cheng Shaofeng, et al. research on the conversion relationship of modulus on the top surface of rigid pavement base in airports[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2022, 42(2): 62-67.
- [33] 田文康. 基于弯沉数据库的沥青路面混凝土结构层模量反算方法研究[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2022.
- Tian Wenkang. Research on inverse calculation method of asphalt pavement structural layer modulus based on deflection database [D]. Guilin: Guilin University of Electronic Technology, 2022.
- [34] 孙应钦. 基于动态弯沉反演的既有高速公路路面结构性能评价研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.
- Sun Yingqin. Research on performance evaluation of pavement structure of existing highway based on dynamic deflection backcalculation[D]. Nanjing: Southeast University, 2021.
- [35] 姜鹏. 基于神经网络的沥青路面模量反算方法研究[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2021.
- Jiang Peng. Research on back calculation method of asphalt pavement modulus based on neural network[D]. Guilin: Guilin University of Electronic Technology, 2021.
- [36] 居政. 基于有限元的路面模量反算研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- Ju Zheng. Research on pavement modulus back calculation based on finite element [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [37] 杨国良,钟雯,黄晓韵,等. 利用BP神经网络反算沥青路面基层弹性模量研究[J]. 路基工程, 2016(4): 78-81.
- Yang Guoliang, Zhong Wen, Huang Xiaoyun, et al. Back-calculation of elastic modulus of asphalt pavement base by BP artificial neural network[J]. Subgrade Engineering, 2016(4): 78-81.
- [38] Fakhri M, Shahni Dezfoulian R. Pavement structural evaluation based on roughness and surface distress survey using neural network model[J]. Construction and Building Materials, 2019, 204: 768-780.
- [39] Fileccia S G, Turetta T, Celauro C. Backcalculation of airport pavement moduli and thickness using the Lévy ant colony optimization algorithm[J]. Construction and Building Materials, 2016, 119: 288-295.

- [40] 巩金芝. 沥青路面结构层设计参数测试与反算研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.  
Gong Jinzhi. Research on modulus tests and back calculation methods of asphalt pavement structure [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [41] Liu Z, Gu X, Wu W, et al. GPR-based detection of internal cracks in asphalt pavement: a combination method of DeepAugment data and object detection [J]. Measurement, 2022, 197: 111281.
- [42] 符艳. 沥青注浆加固维修道路应用技术[J]. 建筑科技, 2019, 3(5): 18-21.  
Fu Yan. Road strengthen and maintenance technology by asphalt grouting[J]. Building Technology, 2019, 3(5): 18-21.
- [43] Zhu H, Xu H, Wei G, et al. Evaluation of grouting effectiveness for semi-rigid pavement base layer cracks based on time-frequency domain signal characteristics of 3D GPR [J]. Measurement, 2024, 237. DOI: 10.1016/j.measurement.2024.115228.
- [44] Zhao W, Yang Q, Wu W, et al. Structural condition assessment and fatigue stress analysis of cement concrete pavement based on the GPR and FWD [J]. Construction and Building Materials, 2022, 328. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127044.
- [45] 祝丽. 基于三维探地雷达的沥青路面施工均匀性研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2018.  
Zhu Li. Research on construction uniformity of asphalt pavement based on 3D ground penetrating radar [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2018.
- [46] Georgiou P, Loizos A. Parametric optimization of Ground Penetrating Radar approach for assessing asphalt pavement surface layers compaction[J]. Journal of Applied Geophysics, 2020, 182. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2020.104187.
- [47] Fakhri M, Shahni Dezfoulian R. Pavement structural evaluation based on roughness and surface distress survey using neural network model[J]. Construction and Building Materials, 2019, 204: 768-780.
- [48] 张文升, 余淑芳. 瞬态振动信号在公路工程检测中的应用[J]. 交通建设与管理, 2014(20): 25-26.  
Zhang Wensheng, Yu Shufang. Application of transient vibration signal in highway engineering detection [J]. Transport Construction and Management, 2014(20): 25-26.
- [49] 林有贵, 周德存, 易强, 等. 路面基层注浆加固质量评价的无损检测方法应用研究[J]. 西部交通科技, 2021(2): 8-11.  
Lin Yougui, Zhou Decun, Yi Qiang, et al. Research on the application of non-destructive testing methods for quality evaluation of grouting reinforcement of pavement base [J]. Western China Communications Science and Technology, 2021(2): 8-11.
- [50] 吕守航. 基于弹性波法的道路下方脱空区探测方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.  
Lü Shouhang. The research on detection method of void area under road based on elastic wave method [D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [51] 刘强. 瑞雷面波法在公路工程质量检测中的应用研究[J]. 工程与建设, 2022, 36(5): 1376-1378.  
Liu Qiang. Application of rayleigh surface wave method in highway engineering quality inspection [J]. Engineering and Construction, 2022, 36(5): 1376-1378.
- [52] 交通运输部. 公路技术状况评定标准: JTG 5210—2018[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Highway performance assessment standard: JTG 5210—2018[S]. Beijing: China Communications Press, 2018.
- [53] Mardani A, Jusoh A, Zavadskas E K. Fuzzy multiple criteria decision-making techniques and applications—two decades review from 1994 to 2014 [J]. Expert Systems with Applications, 2015, 42(8): 4126-4148.
- [54] 许光泉, 鲍慧, 刘星, 等. 底板岩溶水害治理效果综合评价模型及应用[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2023, 43(5): 76-82.  
Xu Guangquan, Bao Hui, Liu Xing, et al. Comprehensive evaluation model and application on treatment effect of water inrush hazard from coal seam floor [J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 43(5): 76-82.
- [55] 贾梅. 煤层底板灰岩防治水井身轨迹设计及注浆效果评价[D]. 合肥: 安徽理工大学, 2022.  
Jia Mei. Well trajectory design and grouting effect evaluation of prevention and control of limestone groundwater in coal seam floor [D]. Hefei: Anhui University of Science and Technology, 2022.
- [56] 王德明, 张庆松, 张霄, 等. 隧道及地下工程注浆效果模糊评价方法的研究与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(S1): 3431-3439.  
Wang Deming, Zhang Qingsong, Zhang Xiao, et al. Research and application on tunnel and underground engineering grouting effect of the fuzzy evaluation method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(S1): 3431-3439.
- [57] Fan G, Zhong D, Yan F, et al. A hybrid fuzzy evaluation method for curtain grouting efficiency assessment based on an AHP method extended by D numbers [J]. Expert Systems with Applications, 2016, 44: 289-303.
- [58] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1987.  
Deng Julong. The basic approach to the gray system [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1987.
- [59] 杨永超. 采空区地基注浆处治效果评价方法及工程应用[D]. 郑州: 河南理工大学, 2023.  
Yang Yongchao. Evaluation method and engineering application of grouting treatment effect in goaf ground [D]. Zhengzhou: Henan Polytechnic University, 2023.
- [60] 潘旺, 严世涛, 李双蓓. 基于灰色理论的沥青路面裂缝预测模型研究[J]. 中外公路, 2020, 40(3): 54-60.  
Pan Wang, Yan Shitao, Li Shuangbei. A study on the prediction model of asphalt pavement cracks based on grey theory [J]. Journal of China and Foreign Highway, 2020, 40(3): 54-60.
- [61] 后钱峰, 陈颖辉, 欧明喜, 等. 运营隧道注浆堵漏效果的GRA模糊综合评价[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(5): 755-761.  
Hou Qianfeng, Chen Yinghui, Ou Mingxi, et al. GRA fuzzy comprehensive evaluation of grouting sealing effect in operating tunnels [J]. Tunnel Construction, 2020, 40(5): 755-761.
- [62] Ma X, Wang Y, Liu Z, et al. Comprehensive evaluation of 5G + smart distribution network based on combined weighting method-cloud model [J]. Global Energy Interconnection, 2022, 5(6): 675-691.

- [63] 梁力, 邢观华, 吴凤元. 基于云理论的评估模型和方法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2019, 40(6): 881-885.  
Liang Li, Xing Guanhua, Wu Fengyuan. The evaluation model and method based on cloud theory[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science Edition). 2019, 40(6): 881-885.
- [64] 郭德赛. 基于组合赋权法和云模型的敞开式TBM施工风险评价[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2022.  
Guo Desai. Risk assessment of open TBM construction based on combination weighting method and cloud model[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture & Technology, 2022.
- [65] 李梦. 基于组合赋权法和云模型的地铁施工风险评价[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2020.  
Li Meng. Risk assessment of metro construction based on combination weighting method and cloud model: taking Qingdao Metro Line 8 as an example[D]. Qingdao: University of Technology, 2020.
- [66] 于景飞, 刘俊俊. 组合赋权-云模型的变电站检修风险评价[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(9): 3315-3324.  
Yu Jingfei, Liu Junjun. Risk assessment of substation maintenance based on combined weighting-cloud model[J]. Journal of Safety and Environment, 2024, 24(9): 3315-3324.
- [67] 贺佳伟, 邵垒, 杨文举, 等. 基于多指标评估云模型的车载动力电池火灾风险研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(20): 8901-8906.  
He Jiawei, Shao Lei, Yang Wenju, et al. Fire safety of vehicle power lithiumbattery based on multi-index assessment cloud model[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(20): 8901-8906.
- [68] Deng F, Pu J, Huang Y, et al. 3D geological suitability evaluation for underground space based on the AHP-cloud model[J]. Underground Space, 2023, 8: 109-122.
- [69] 朱倩, 周红宇, 张敏祥. 基于改进熵权-云模型的果园运输车适应性评价研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(36): 15420-15426.  
Zhu Qian, Zhou Hongyu, Zhang Minxiang. Adaptability evaluation of orchard transporter based on improved entropy weight cloud model[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(36): 15420-15426.
- [70] 冯辉红, 卢祥花. 既有公路服务区设施配置适宜性评价模型[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(20): 8938-8946.  
Feng Huihong, Lu Xianghua. Suitability evaluation model of facility configuration in the existing highway service area[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(20): 8938-8946.
- [71] 金圆, 岳中文, 王毅, 等. 基于改进云模型的隧道爆破效果综合评价研究[J]. 工程爆破, 2024, 30(3): 8-19.  
Jin Yuan, Yue Zhongwen, Wang Yi, et al. Research on the comprehensive evaluation of tunnel blasting effect based on improved cloud model[J]. Engineering Blasting, 2024, 30(3): 8-19.