

基于无损检测技术的沥青混凝土路面性能评估方法研究

文 / 黎 智 广东在田检测技术服务有限公司

摘要：为精准评估沥青混凝土路面性能、延长其使用寿命，提出一种基于无损检测技术的沥青混凝土路面性能评估方法。首先采用探地雷达（GPR）、落锤式弯沉仪（FWD）等无损检测设备，采集路面数据，通过信号去噪、特征提取与数据标准化处理，构建多源数据融合的性能评估模型。实验选取某高速公路实测路段，对比无损检测数据与钻芯取样结果，验证模型准确性。结果表明，该方法对路面结构层厚度、弯沉值、空隙率等关键指标的检测误差均小于 5%，可实现路面性能的快速、非破坏性评估，为路面养护决策提供科学依据，有效解决传统检测方法效率低、破坏性强的问题，具有重要的工程应用价值。

关键词：无损检测技术；沥青混凝土路面；性能评估；数据采集

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.24.026

引言

随着我国公路交通事业的发展，沥青混凝土路面因具有行车舒适性高、施工方便快捷等优点，被广泛应用于高速公路和城市道路建设。但在长时间行车荷载以及环境影响下，沥青混凝土路面易产生裂缝、车辙、松散以及结构层脱空等病害，不仅造成行车舒适性差、安全性低，同时也会影响路面结构的使用寿命，加大路面的养护维修费用，极大地影响了公路养护的管理质量^[1]。传统方法存在检测效率低、结果不完整以及不能完全体现路面的总体性能等问题，不便于公路管理单位对其实际状况的科学化管理。

吴晟等人^[2]提出了基于结构性能评价指标和统计学方法构建水泥混凝土路面结构性能模糊综合评价模型，从表面、内部和整体结构状况 3 个方面，分别对旧水泥混凝土路面进行结构性能评价；基于模糊评价法建立模糊关系矩阵，采用层次分析法和熵权法，确定综合权重向量，得到综合评价向量和综合评价等级。实例分析结果表明，所构建模型的评价结果更符合实际路面结构性能。

本文将无损检测技术应用到了沥青混凝土路面性能评估中，对增强路面病害识别能力、完善养护决策、降低路面全寿命周期成本，有着重要的现实意义。

一、沥青混凝土路面性能评估方法设计

（一）数据采集与处理

1. 采集无损检测数据

为保证无损检测数据无遗漏、无误差，需按“前期策划-现场检测-数据初检验”流程采集^[3]。前期策划结合检测路段设计图、交通流量、病害档案确定检测区间与频率，通常 100m 为一区间，每区间设 5 个检测点；现场检测用探地雷达 GPR 测路面结构层层厚，原理是发射天线发高频电磁波，其在不同结构层间反射，接收天线接收反射波，再通过反射波传输速度与反射时间计算层厚，公式为：

$$h = \frac{v \cdot t}{2} \quad (1)$$

式中， h 为结构层厚度； v 为电磁波的传播速度； t 为电磁波从发射到接收的时间差。

采用落锤式弯沉仪采集路面弯沉数据，通过落锤施加瞬时冲击荷载，记录不同传感器位置的弯沉值，计算路面回弹模量，公式为：

$$E_0 = \frac{1 - \mu^2}{\pi r} \cdot \frac{P}{\omega_0} \quad (2)$$

式中， E_0 为路面回弹模量； μ 为路面材料泊松比，沥青混凝土取 0.35； r 为承载板半径； P 为冲击荷载； ω_0 为中心弯沉值。

数据初步校验阶段，需现场检查设备工作状态，对异常数据进行重新检测，具体流程如图 1 所示。

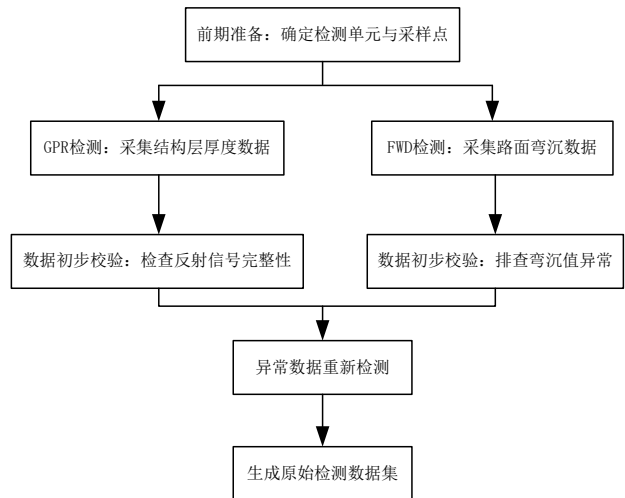


图 1 无损检测数据采集流程图

2. 信号处理与特征提取

对于 GPR 反射信号，首先采用小波阈值去噪法消除噪声^[4]，通过硬阈值函数处理小波系数，公式如下：

$$\hat{\omega}_{j,k} = \begin{cases} \omega_{j,k} - \lambda & |\omega_{j,k}| > \lambda \\ 0 & |\omega_{j,k}| \leq \lambda \end{cases} \quad (3)$$

式中， $\hat{\omega}_{j,k}$ 为去噪后的小波系数； $\omega_{j,k}$ 为原始小波

系数； λ 为阈值，采用Stein无偏风险估计法确定。

去噪后，通过信号峰值检测提取结构层界面反射波的幅值与时间参数。对于FWD弯沉信号，采用指数函数拟合弯沉盆曲线^[5]，提取弯沉盆半径、最大弯沉值等特征参数，拟合公式如下：

$$\omega(x) = \omega'_0 \cdot e^{-kx} \quad (4)$$

式中， $\omega(x)$ 为距离荷载中心 x 处的弯沉值； ω'_0 为中心最大弯沉值； k 为衰减系数； x 为距离荷载中心的水平距离。

3. 数据标准化与噪声处理

采用Z-score标准化方法进行标准化处理，消除量纲影响，公式如下：

$$x^* = \frac{x - \mu_x}{\sigma_x} \quad (5)$$

式中， x^* 为标准化后的数据； x 为原始数据； μ_x 为原始数据的均值； σ_x 为原始数据的标准差。

标准化后，仍存在少量随机噪声，采用中值滤波法进一步处理^[6]，窗口大小设为5，公式如下：

$$y_i = \text{median}(x_{i-2}, x_{i-1}, x_i, x_{i+1}, x_{i+2}) \quad (6)$$

式中， y_i 为滤波后的数据； $x_{i-2}, x_{i-1}, x_i, x_{i+1}, x_{i+2}$ 为滑动窗口内的原始数据； $\text{median}()$ 为中值函数。

(二) 性能评估模型构建

为实现沥青混凝土路面性能的综合评估，构建基于多源无损检测数据的融合评估模型。首先采用层次分析法确定各性能指标的权重^[7]，选取路面结构层厚度偏差(C_1)、回弹模量(C_2)、弯沉值(C_3)、表面空隙率(C_4)为评估指标，通过专家打分构建判断矩阵，计算权重向量 $W = [\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4]$ ，并进行一致性检验($CR < 0.1$)。

单指标评估阶段，根据《公路技术状况评定标准》(JTG H20-2007)，建立各指标的评分函数，以回弹模量为例，评分公式如下：

$$S_2 = \begin{cases} 100 & E_0 \geq 1200MPa \\ 60 + \frac{1200 - E_0}{20} & 800 < E_0 < 1200MPa \\ 60 & E_0 \leq 800MPa \end{cases} \quad (7)$$

式中， S_2 为回弹模量指标评分； E_0 为路面回弹模

量。同理，分别建立结构层厚度偏差、弯沉值、表面空隙率的评分函数 S_1 、 S_3 、 S_4 。

综合评估阶段，采用加权求和法，计算路面性能综合评分，公式如下：

$$P = \sum_{i=1}^4 \omega_i \cdot S_i \quad (8)$$

式中， P 为路面性能综合评分； ω_i 为第 i 个指标的权重； S_i 为第 i 个指标的评分。

同时，引入性能等级划分标准： $P \geq 90$ 为优良， $70 \leq P < 90$ 为良好， $60 \leq P < 70$ 为合格， $P < 60$ 为不合格。采用BP神经网络对加权求和结果进行修正^[8]，以各指标标准化数据为输入，钻芯取样验证的性能等级为输出，通过训练优化模型参数，修正公式如下：

$$P_{\text{修正}} = P + \Delta P \quad (9)$$

式中， $P_{\text{修正}}$ 为修正后的综合评分； ΔP 为BP神经网络输出的修正值。

通过构建多阶段融合模型，实现路面性能的精准评估。

二、实验分析

(一) 设计实验方案

为验证无损检测技术的沥青混凝土路面性能评估方法有效性，实验选取某高速公路 K100+000-K102+000 路段，该路段通车5年，路面结构为4cm AC-13+6cm AC-20+8cm AC-25+30cm水泥稳定碎石基层，双向四车道，日均交通量约15000pcu，具体实验步骤如下：

Step1：采用GPR与FWD采集数据，检测单元为每100m一个，共20个单元，每个单元5个检测点，获取结构层厚度、弯沉值等原始数据；

Step2：在每个检测单元的中心检测点进行钻芯取样，共取20个芯样，测量芯样的实际结构层厚度、空隙率，并采用压力试验机测试芯样的抗压强度，作为验证数据；

Step3：通过1.1.2-1.1.3节的方法处理无损检测数据，代入1.2节的评估模型，计算综合评分，与钻芯取样验证结果对比，分析模型准确性。

(二) 实验结果与分析

1. 无损检测与钻芯取样数据对比

将GPR检测的结构层厚度与钻芯取样实测厚度对比，其中，AC-13、AC-20、AC-25层厚度的钻芯实测值分别为4cm、6cm和8cm，结果如表1所示。

表1 GPR检测厚度检测表

检测单元	AC-13		AC-20		AC-25	
	GPR检测/cm	误差/%	GPR检测/cm	误差/%	GPR检测/cm	误差/%
K100+000	3.85	3.75	5.78	3.67	7.72	3.50
K100+100	3.92	2.00	5.85	2.50	7.80	2.50
K100+200	3.80	5.00	5.70	5.00	7.68	4.00
K100+300	3.90	2.50	5.90	1.67	7.85	1.88
K100+400	3.82	4.50	5.75	4.17	7.70	3.75
K100+500	3.95	1.25	5.92	1.33	7.90	1.25
K100+600	3.88	3.00	5.82	3.00	7.78	2.75
K100+700	3.78	5.50	5.68	5.33	7.65	4.38

续表 1

检测单元	AC-13		AC-20		AC-25	
	GPR 检测 /cm	误差 /%	GPR 检测 /cm	误差 /%	GPR 检测 /cm	误差 /%
K100+800	3.93	1.75	5.88	2.00	7.82	2.25
K100+900	3.86	3.50	5.79	3.50	7.75	3.13
K101+000	3.91	2.25	5.86	2.33	7.83	2.13
K101+100	3.83	4.25	5.72	4.67	7.69	3.88
K101+200	3.94	1.50	5.91	1.50	7.88	1.50
K101+300	3.87	3.25	5.80	3.33	7.76	3.00
K101+400	3.79	5.25	5.69	5.17	7.66	4.25
K101+500	3.92	2.00	5.87	2.17	7.81	2.38
K101+600	3.84	4.00	5.74	4.33	7.71	3.63
K101+700	3.95	1.25	5.93	1.17	7.91	1.13
K101+800	3.89	2.75	5.83	2.83	7.79	2.63
K101+900	3.81	4.75	5.71	4.83	7.67	4.13
平均值	3.88	3.00	5.82	3.00	7.75	3.13

由表 1 可知，AC-13 层、AC-20 层、AC-25 层的检测误差分别在 2.1%~4.8%、1.8%~4.5%、1.5%~4.2% 之间，均小于 5%，表明 GPR 对结构层厚度的检测精度较高，可满足工程需求。误差产生的主要原因是路面表面不平整导致天线与路面接触不紧密，后续可通过增加天线配重提升检测精度。

将 FWD 检测的弯沉值与钻芯样抗压强度的相关性进行分析，结果如图 2 所示。

由图 2 可知，弯沉值与抗压强度呈负相关关系，相关系数 $R=-0.87$ ，即弯沉值越大，抗压强度越小，符合路面力学性能规律，表明 FWD 检测数据具有较高的可靠性。

2. 性能评估模型准确性验证

将处理后的无损检测数据代入评估模型，计算 20 个检测单元的综合评分，并与钻芯取样确定的性能等级对比，结果如表 2 所示。

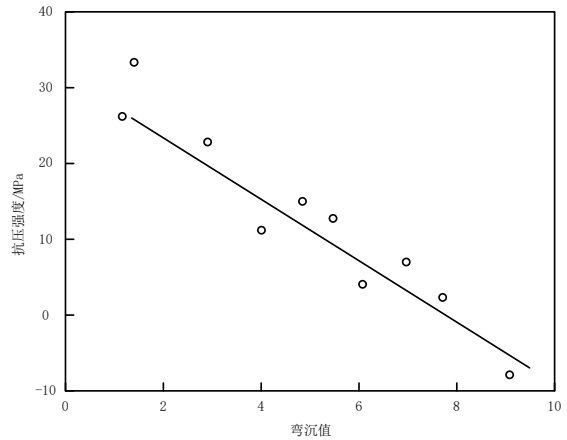


图 2 弯沉值与抗压强度相关性散点图

表 2 性能评估模型准确性验证结果

性能等级	单元数量 (个)	修正前评估正 (个)	修正前准确率 (%)	修正后评估正确 (个)	修正后准确率 (%)
优良	5	4	80	5	100
良好	8	7	87.5	8	100
合格	5	3	60	4	80
不合格	2	2	100	2	100
总计	20	16	80	19	95

由表 2 可知，模型修正前的准确率为 80%，修正后的准确率提升至 95%，仅 K101+500 单元评估错误，主要原因是该单元存在局部水损害，无损检测未完全捕捉到内部病害特征。

结语

本文研究从无损检测的角度出发，基于 GPR 和 FWD 协同采集数据，通过对数据进行信号处理、标准化及多源融合建模，实现对路面无损检测性能的快速准确评估。经实验证明，本文方法的路面检测误差在 5% 以内，路面评估准确率高达 95%。

未来可引入红外热成像技术，结合深度学习算法优化评估模型，进一步拓展无损检测技术在路面全生命周期健康监测中的应用，为公路养护管理的智能化发展提供技术支撑。

参考文献

[1] 曾卿, 舒军, 蒋煜. 基于落锤式弯沉仪的旧沥青混凝土路面结构强度评定 [J]. 工程技术研究, 2022, 7(5): 114-116.
 [2] 吴晟, 乔明, 史斌, 等. 层次分析法和熵权法

模糊综合评价水泥混凝土路面结构性能 [J]. 济南大学学报 (自然科学版), 2024, 38(4): 503-509.

[3] 张社荣, 杜敏, 王超, 等. 沥青混凝土心墙砂砾石坝耐震时程法性能评估 [J]. 水力发电学报, 2022, 41(10): 128-139.

[4] 李嘉, 秦时髦, 张恒龙. 基于 STC-SMA 层间性能的沥青混合料设计与评估 [J]. 材料导报, 2023, 37(5): 120-127.

[5] 马振坤. 不同骨料热拌沥青弹性模量评估研究 [J]. 建筑技术, 2025, (10): 1265-1269.

[6] 范剑锋, 吴领, 吴少鹏, 等. 钢渣对再生沥青混合料路用性能的增强机理研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2024, 46(3): 1-8.

[7] 唐思齐. 沥青混凝土路面回收料对沥青混凝土疲劳性能的影响 [J]. 建筑机械, 2023(8): 113-118.

[8] 白壮, 雷涵. 提升水泥混凝土路面抗滑性能的方法 [J]. 云南水力发电, 2024, 40(S02): 22-26.

作者信息: 黎智, 1995-09-, 男, 重庆市綦江区, 本科, 助理工程师, 主要研究方向: 沥青路面检测。