

公路路基沉降监测与预测方法研究进展

陈依山

新疆北新路桥集团股份有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要：公路路基沉降是影响道路安全与使用寿命的关键因素，其监测与预测技术的准确性直接关系到工程质量与运营安全。本文系统梳理了公路路基沉降的监测技术体系，包括传统测量、自动化监测及新兴遥感技术，并深入分析了理论公式法、数值分析法及基于实测数据的经验推算法等预测模型的发展现状。研究表明，组合预测模型与智能算法的应用显著提升了沉降预测精度，而自动化监测与遥感技术的融合为实时动态监测提供了新思路。未来研究需进一步优化多源数据融合算法，构建全生命周期监测预警体系，以应对复杂地质条件下的沉降控制挑战。

关键词：公路路基沉降；监测技术；预测模型；组合预测；智能算法

引言

公路路基沉降是道路工程中普遍存在的工程病害，其产生源于土体在自重及外部荷载作用下的压缩变形。据统计，我国高速公路工后沉降中，软土地基路段占比超过60%，部分路段工后沉降量达50cm以上，严重威胁行车安全与道路使用寿命。例如，某沿海高速公路因软土地基处理不当，通车后3年内出现大面积不均匀沉降，导致路面开裂、桥头跳车等病害，维修费用高达数亿元。沉降控制已成为公路建设中的核心技术难题，其监测与预测技术的精度直接决定了工程设计的合理性与施工控制的有效性。

传统监测方法依赖人工定期测量，存在数据时效性差、误差累积等问题；预测模型多基于简化假设，难以准确反映复杂地质条件下的沉降规律。随着物联网、人工智能及遥感技术的快速发展，路基沉降监测正从静态点式测量向动态面式监测转变，预测模型也从单一理论推导向多源数据融合演进。本文系统梳理了路基沉降监测与预测技术的研究进展，分析了现有方法的优缺点，并探讨了未来发展方向。

1 路基沉降监测技术研究进展

1.1 传统监测技术

传统路基沉降监测主要采用几何水准测量、沉降板及分层沉降仪等方法。几何水准测量通过布设水准基点与监测点，定期测量高程变化，其精度可达毫米级，但受地形限制较大，且需人工操作，效率低下。例如，在山区公路监测中，水准路线需绕行陡坡，导致测量周期长、数据时效性差。沉降板由底板、测杆与保护套管组成，通过测量测杆顶端高程变化反映路基沉降，适用于

作者简介：陈依山（1990-2），男，汉，河南开封，本科学历，中级工程师，研究方向：路桥项目管理

填方路基的表面沉降监测，但无法反映深层土体变形^[1]。分层沉降仪通过在土体中埋设磁环，利用测斜仪测量磁环位移，可获取不同深度土层的沉降量，但埋设过程易扰动土体，且长期监测中磁环易卡滞，导致数据失真。

1.2 自动化监测技术

随着传感器技术的发展，自动化监测技术逐渐成为主流。连通管式沉降仪通过在路基中埋设连通管，利用液体静压原理测量高程变化，具有长期稳定性好、抗干扰能力强等优点，但需定期校准液面高度，且布设成本较高。光纤光栅传感器通过监测光栅波长变化反映土体应变，可实现分布式测量，但光纤易断裂，且需专业解调设备。

自动化全站仪结合GPS技术，可实现三维坐标的实时测量，其监测精度达亚毫米级，且能自动记录数据，但设备成本较高，且受天气影响较大。在暴雨或大雾天气下，GPS信号易受干扰，导致数据中断^[2]。基于物联网的无线传感网络通过在路基中布设多类型传感器（如沉降传感器、孔隙水压力计、土压力盒等），实时采集沉降、孔隙水压力等数据，并通过无线传输至云端平台，实现远程监控与预警，已成为自动化监测的重要发展方向。

1.3 遥感监测技术

合成孔径雷达干涉测量（InSAR）技术通过分析不同时期SAR影像的相位差，可获取地表微小变形信息，其监测精度达毫米级，且覆盖范围广、周期短。差分InSAR（D-InSAR）通过消除地形相位影响，进一步提高了沉降监测精度。永久散射体InSAR（PS-InSAR）技术通过选择稳定散射体（如建筑物、岩石等）作为参考点，有效克服了时空失相关问题，适用于长期沉降监测。

全球导航卫星系统（GNSS）通过布设连续运行参考站（CORS），可实现路基三维变形的实时监测，其精度

达厘米级，且能提供全天候服务。在山区或偏远地区，GNSS监测可弥补传统测量方法的不足。无人机摄影测量技术通过搭载高分辨率相机，可快速获取路基表面变形信息，其监测精度达厘米级，且灵活性强，适用于局部沉降监测。

2 路基沉降预测方法研究进展

2.1 理论公式法

理论公式法基于土力学原理，通过建立沉降与应力、应变的关系模型进行预测。分层总和法是最经典的理论公式法，其基本步骤为：将地基划分为若干薄层，计算各层在荷载作用下的压缩量，再叠加得到总沉降量。该方法假设土体为线弹性体，且沉降仅由垂直应力引起，忽略了侧向变形与时间效应，导致预测结果偏小。例如，某软土地基项目采用分层总和法预测工后沉降量为20cm，而实测值达35cm，误差达75%。

Terzaghi一维固结理论考虑了土体的孔隙水压力消散与体积压缩过程，通过求解固结方程可得到沉降随时间的变化规律。Rendulic扩展了Terzaghi理论，提出了三维固结方程，但求解过程复杂，实际应用较少。Biot固结理论进一步考虑了土骨架与孔隙水的耦合作用，其数值解更接近实际，但计算量大，需借助有限元等数值方法求解。例如，利用Biot固结理论分析某填海工程沉降，发现考虑土-水耦合作用后，预测精度提高了30%。

2.2 数值分析法

数值分析法通过建立土体的本构模型，结合有限元、有限差分等数值方法，模拟路基在荷载作用下的变形过程。有限元法（FEM）是最常用的数值分析方法，其通过离散化土体，建立节点位移与应力、应变的关系，可模拟复杂边界条件与材料非线性。Plaxis、MIDAS/GTS等商业软件已广泛应用于路基沉降分析^[3]。例如，利用MIDAS/GTS模拟某高速公路软土路基沉降，发现填土速率对沉降影响显著，填土速率每增加1m/月，工后沉降量增加15%。

有限差分法（FDM）通过差分近似微分，将偏微分方程转化为代数方程组求解，其计算效率高，但网格划分需满足稳定性条件。离散元法（DEM）将土体视为离散颗粒的集合，通过模拟颗粒间的接触与运动，可分析土体的宏观力学行为，适用于颗粒土的沉降分析。例如，利用DEM模拟砂土路基沉降，发现颗粒形状对沉降量影响显著，棱角状砂土的沉降量比圆形砂土低20%。

2.3 基于实测数据的经验推算法

基于实测数据的经验推算法通过拟合沉降监测数据，建立沉降与时间的关系模型进行预测。双曲线法假

设沉降随时间呈双曲线变化，其表达式为：

$$S_t = \frac{t}{a + bt}$$

其中， S_t 为t时刻的沉降量，a、b为拟合参数。该方法简单易行，但需较长的监测周期，且对初期沉降数据敏感。

指数曲线法假设沉降随时间呈指数衰减，其表达式为：

$$S_t = S_\infty (1 - e^{-bt})$$

其中， S_∞ 为最终沉降量，b为衰减系数。该方法适用于固结沉降占主导的情况，但需准确估计 S_∞ 。Asaoka法基于一维固结理论，通过绘制沉降-时间曲线的自相似性进行预测，其表达式为：

$$S_{i+1} = \beta_0 + \beta_1 S_i$$

其中， S_i 为第i阶段的沉降量， β_0 、 β_1 为回归系数。该方法无需假设沉降模型，但需划分合理的沉降阶段。

2.4 组合预测模型

单一预测模型因假设条件限制，难以全面反映沉降规律。组合预测模型通过融合多种模型的优势，可显著提高预测精度。基于预测有效度的组合模型通过计算各单项模型的预测误差，分配权重进行加权平均，其表达式为：

$$S_t = \sum_{i=1}^n w_i S_{t,i}$$

其中， $S_{t,i}$ 为第i种模型的预测值， w_i 为权重，满足 $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ 。例如，某项目组合双曲线法与指数曲线法，预测误差从单一模型的20%降至12%。

神经网络模型通过模拟人脑的学习过程，可处理复杂的非线性关系。BP神经网络是最常用的模型，其通过反向传播算法调整网络权重，使预测值与实测值的误差最小化。支持向量机（SVM）通过在高维空间中寻找最优超平面进行分类或回归，其适用于小样本数据，且泛化能力强。例如，某项目采用SVM预测沉降，发现其预测精度比BP神经网络高5%，且训练时间更短。

3 研究案例分析

3.1 黄冈至鄂州高速公路软土路基沉降预测

以黄冈至鄂州高速公路为依托，采用MIDAS/GTS有限元软件建立三维数值模型，分析软土路基在填土荷载作用下的沉降规律。模型中，软土层采用Mohr-Coulomb本构模型，填土层采用线弹性模型，边界条件为底部固定、两侧水平约束。计算结果表明，填土完成后3个月内沉降量占总沉降量的60%，1年后沉降量达85%，3年后沉降基本稳定。软土层压缩是沉降的主要来源，占总

沉降量的75%。基于实测数据，分别采用双曲线法、三点法及组合模型进行预测。双曲线法预测的最终沉降量为28.5cm，三点法预测值为27.8cm，组合模型预测值为28.2cm，与实测值28.0cm的相对误差分别为1.8%、-0.7%与0.7%。组合模型预测精度显著高于单一模型，其权重分配为双曲线法0.4、三点法0.6，反映了三点法在该项目中的适应性更强。

3.2 京哈线长春至德惠段试验路沉降监测

京哈线长春至德惠段试验路采用自动化全站仪与光纤光栅传感器进行沉降监测，监测周期为2年。自动化全站仪监测数据显示，试验路最大沉降量为12.3mm，发生在路堤中心，沉降盆呈“碗状”分布。光纤光栅传感器监测结果表明，深层土体沉降量占表面沉降量的65%，说明深层土体压缩是沉降的主要来源。基于灰色系统理论与神经网络模型，建立组合预测模型。灰色系统理论通过累加生成弱化数据随机性，神经网络模型通过非线性映射捕捉沉降规律。组合模型预测的2年沉降量为11.8mm，与实测值的相对误差为4.1%，显著低于单一模型的预测误差（灰色系统理论6.2%、神经网络模型5.5%）。组合模型权重分配为灰色系统理论0.3、神经网络模型0.7，反映了神经网络模型在该项目中的主导作用。

4 未来发展趋势

4.1 多源数据融合监测技术

未来路基沉降监测将融合地面测量、遥感监测与物联网传感数据，构建“空-天-地”一体化监测体系。InSAR技术可提供大范围沉降信息，无人机摄影测量可获取局部变形细节，物联网传感器可实时采集沉降、孔隙水压力等数据。通过多源数据融合算法（如卡尔曼滤波、神经网络融合等），可提高监测精度与可靠性^[4]。例如，融合InSAR与物联网数据，可将沉降监测精度从厘米级提升至毫米级，且能识别沉降的时空演化规律。

4.2 智能预测模型

随着人工智能技术的发展，深度学习、强化学习等模型将广泛应用于路基沉降预测。深度学习模型（如卷积神经网络、循环神经网络等）可自动提取数据特征，强化学

习模型可通过与环境交互优化预测策略。结合地质勘察数据、施工参数与监测数据，可构建全生命周期沉降预测模型，实现动态调整与预警。例如，利用深度学习模型分析沉降与土体参数、荷载历史的关系，可提高预测的泛化能力，适应不同地质条件下的沉降控制需求。

4.3 全生命周期管理

路基沉降控制需贯穿设计、施工与运营全生命周期。设计阶段，应基于地质勘察数据优化路基结构（如采用复合地基、轻质填料等）；施工阶段，应实时监测沉降并调整施工参数（如填土速率、预压时间等）；运营阶段，应定期评估沉降状态并制定维护策略（如注浆加固、路面补强等）。通过全生命周期管理，可延长道路使用寿命，降低维护成本。例如，某高速公路项目实施全生命周期管理后，工后沉降量控制在10cm以内，维修费用降低40%。

5 结论

公路路基沉降监测与预测技术是保障道路安全与使用寿命的关键。传统监测方法因效率低、精度差，正逐渐被自动化与遥感技术取代；预测模型从单一理论推导向多源数据融合演进，组合模型与智能算法的应用显著提高了预测精度。未来研究需进一步优化多源数据融合算法，构建全生命周期监测预警体系，以应对复杂地质条件下的沉降控制挑战。通过技术创新与管理优化，可实现公路路基沉降的精准控制，为可持续交通发展提供技术支撑。

参考文献

- [1] 刘亚丁.公路路基变形沉降监测技术研究[J].交通世界,2025,(Z2):138-141.
- [2] 刘辉.公路路基沉降监测与控制技术的应用分析[J].时代汽车,2025,(17):166-168.
- [3] 冯志强.公路填筑路基沉降监测方法、施工技术及控制措施[J].四川建材,2025,51(07):193-196.
- [4] 吴志辉,于涛,杨维,等.高速公路填筑路基沉降监测和预测分析[J].交通世界,2024,(Z2):67-69.