

# 含水率与压实功耦合作用下路基压实度检测误差修正研究

张 欣

宁夏宝丰集团有限公司 宁夏 银川 750001

**摘要：**路基压实度是保障公路工程承载性能与稳定性的重要指标，其检测精度直接影响工程质量评估。含水率与压实功的耦合作用易导致压实度检测出现显著误差，成为工程质量管控的痛点。本文系统研究该耦合作用下的检测误差修正方法，先阐述压实度检测基本原理与方法；再剖析含水率、压实功单独及耦合作用对压实度的影响机制；随后识别仪器、操作、环境等误差来源；最后构建基于耦合作用的误差修正模型并验证。研究表明，修正模型可将检测误差控制在2%以内，为提升路基压实度检测精度提供科学依据，对强化公路工程质量管控具有重要实践意义。

**关键词：**含水率；压实功；路基压实度；检测误差

引言：路基压实质量直接决定公路的承载能力与使用寿命，压实度作为评估压实质量的关键指标，其检测结果的准确性至关重要。在路基施工中，含水率决定土颗粒间黏结状态，压实功则影响颗粒密实程度，二者的耦合作用常导致压实度检测值与实际值偏差较大，易引发工程质量误判。当前多数误差修正研究仅关注单一因素影响，忽视耦合效应，修正效果有限。本文聚焦含水率与压实功的耦合作用机制，深入分析检测误差来源，构建针对性修正模型，旨在解决压实度检测精度不足的问题，为公路工程路基施工质量管控提供可靠技术支撑。

## 1 路基压实度检测的基本原理与方法

### 1.1 压实度概念

路基压实度是指路基土压实后的干密度与该土样在标准击实试验下获得的最大干密度的比值，以百分比表示，是反映路基密实程度的核心指标。其本质是通过外力压实减小土颗粒间的孔隙率，提升土的承载能力、抗变形能力与水稳定性。压实度越高，路基的压缩沉降量越小，抗渗性能与整体稳定性越强。根据公路等级与路基部位不同，压实度要求存在差异，如高速公路路基下路床压实度需不低于96%，上路床需达到98%以上。压实度的检测与控制贯穿路基施工全流程，是保障公路工程长期稳定运行的关键环节，其检测精度直接关系到工程质量评估的科学性与可靠性。

### 1.2 常见检测方法概述

当前路基压实度常见检测方法各有适用场景与技术特点，核心方法包括灌砂法、环刀法、核子密度仪法与贝克曼梁法等。灌砂法作为行业基准方法，通过标准砂置换试坑体积，结合土样含水率计算干密度，适用于各类土质路基，检测精度高，但操作繁琐、耗时较长，对施工进度有一定影响。环刀法通过环刀切割土样获取体

积与质量，计算密度，适用于黏性土路基，设备简单但易因取样扰动产生误差。核子密度仪法利用放射性元素检测密度与含水率，实现快速检测，适用于大面积连续检测，但设备成本高，受土质均匀性影响较大。贝克曼梁法通过检测路基回弹弯沉间接反映压实度，适用于现场快速评估，但结果易受温度、荷载等因素干扰。实际应用中需根据土质、施工阶段与精度要求选择适配方法<sup>[1]</sup>。

## 2 含水率与压实功对路基压实度的影响机制

### 2.1 含水率的影响

含水率是影响路基压实度的核心内在因素，通过改变土颗粒间的作用力与孔隙状态影响压实效果。在含水率较低时，土颗粒间摩擦力与黏结力较大，外力难以克服颗粒阻力，压实后孔隙率高，干密度小，压实度偏低；随着含水率增加，水在颗粒间形成润滑作用，减小摩擦力，同时水填充部分孔隙，使颗粒更易重新排列，压实干密度逐渐提升；当含水率达到最优值时，土颗粒排列最密实，干密度达到最大值，此时压实度最高；若含水率继续增加，多余水分占据颗粒间空间，受水的不可压缩性影响，颗粒无法进一步密实，干密度反而下降，压实度随之降低。不同土质的最优含水率存在差异，黏性土最优含水率通常为12%-18%，砂性土则为8%-12%，含水率偏离最优值越多，对压实度的负面影响越显著。

### 2.2 压实功的影响

压实功是外力作用于路基土的能量体现，直接决定土颗粒的密实程度，其大小与压路机吨位、碾压遍数、行驶速度等参数相关。在一定范围内，压实功与压实度呈正相关关系：初始阶段，土颗粒松散，孔隙率高，增加压实功可有效克服颗粒间阻力，推动颗粒填充孔隙，压实度快速提升；当压实功达到一定阈值后，土颗粒已基本排列密实，孔隙率降至较低水平，此时继续增加压

实功，颗粒间难以进一步移动，压实度提升幅度明显减小，甚至出现土体结构破坏，如黏性土出现剪切裂隙，导致压实质量下降。不同土质对压实功的需求不同，砂性土颗粒间黏结力小，所需压实功相对较低；黏性土颗粒黏结力大，需更大压实功才能达到设计压实度，过量压实则易引发“弹簧土”现象。

### 2.3 耦合作用分析

含水率与压实功的耦合作用对压实度的影响呈现复杂的非线性关系，二者相互制约、相互影响。当含水率低于最优值时，土颗粒间阻力大，即使施加较大压实功，颗粒也难以充分密实，压实度提升效果有限，此时含水率成为主导影响因素；当含水率处于最优区间时，水的润滑作用使颗粒间阻力减小，压实功的功用得到充分发挥，较小压实功即可达到较高压实度，二者形成良性耦合；当含水率高于最优值时，多余水分阻碍颗粒密实，需增大压实功才能排出部分水分，推动颗粒排列，但过量压实功会导致水分在颗粒间形成压力，引发土体扰动，反而降低压实度，此时压实功的作用受含水率制约显著<sup>[2]</sup>。此外，耦合作用还体现在误差传递上：含水率检测偏差会导致干密度计算误差，而压实功不足或过量会加剧这种偏差，使压实度检测结果与实际值偏离更大，需针对性分析耦合规律以修正误差。

## 3 路基压实度检测误差来源分析

### 3.1 仪器设备因素

仪器设备的精度与状态是导致检测误差的重要客观因素，主要体现在三个方面：一是检测仪器本身精度不足，如灌砂法所用标准砂的颗粒级配不符合规范要求，会导致试坑体积测量偏差；环刀的尺寸精度不够、刃口磨损，会影响土样体积采集的准确性；核子密度仪未按周期校准，放射性检测元件老化，会导致密度与含水率检测值失真。二是辅助设备性能缺陷，如电子天平的称量精度不足、烘箱的温度控制不稳定，会影响土样含水率检测结果；压路机的吨位计量不准、碾压速度传感器故障，会导致压实功计算偏差。三是设备操作兼容性问题，不同品牌、型号的检测仪器之间存在系统误差，如不同核子密度仪在同一测点的检测结果可能相差1%~2%，若未进行统一校准，易引发检测误差。

### 3.2 操作过程因素

操作过程的规范程度对于检测结果的准确性起着决定性作用，常见的误差来源众多。在灌砂法检测中，试坑开挖形状若不规则，坑壁出现塌陷情况，那么标准砂填充的体积就会与实际试坑体积存在差异，进而导致所测压实度不准确。环刀法取样时，若未垂直切入土体，

取样后的土样受到扰动，土体原有的密实状态被破坏，使得所取土样的密度不能真实反映路基压实情况。核子密度仪检测时，探头放置位置不当或者检测时间不足，无法充分接收放射性信号，也会使检测结果出现偏差。标准击实试验中，击实筒装土不均匀、击锤落距不稳定，会造成最大干密度确定不准确，最终影响压实度的计算。此外，检测人员的技术水平和责任心也是引发误差的重要因素。比如读数时视线偏差、数据记录错误，或者未严格遵循操作规程，像灌砂法中未清理试坑内杂物、环刀法中土样未及时密封导致水分流失等，这些都会在不同程度上影响检测结果的精准度<sup>[3]</sup>。

### 3.3 环境与材料因素

环境与材料特性的波动会进一步加剧压实度检测误差。在环境因素方面，检测时气温的变化会对土样水分蒸发速率产生影响。若未采取有效的保温保湿措施，土样中的水分会加速蒸发，导致含水率检测值偏低。在雨天或者地下水位较高的情况下，路基表层土的含水率会急剧增加，与深层土的含水率差异显著，这样检测得出的结果就无法代表整个路基的压实情况。当风力较大时，灌砂法中使用的标准砂容易被吹散，从而影响体积测量的精度，使压实度检测结果出现误差。在材料因素方面，路基土的不均匀性是一个突出问题。例如，土中含有的碎石颗粒大小不一、分布不均，会导致取样缺乏代表性。土中有机质含量过高会对标准击实试验结果产生干扰，使最大干密度确定不准确。而且，施工中不同批次土料的土质存在差异，若未分别进行击实试验，会导致压实度计算基准出现偏差，这些因素在含水率与压实功的耦合作用下，会进一步放大压实度检测误差。

## 4 误差修正方法研究

### 4.1 现有修正方法综述

当前，在路基压实度检测误差修正领域，现有的方法主要聚焦于单一影响因素，尚未构建起针对含水率与压实功耦合作用的系统修正体系。针对含水率误差，常见的做法是将烘干法与酒精燃烧法进行对比修正。烘干法虽能较为准确地测定含水率，但操作繁琐、耗时较长；酒精燃烧法操作相对简便，但结果易受多种因素干扰。另外，还会采用经验公式，依据土质类型对含水率检测值进行调整，然而这些经验公式往往具有一定的局限性，适用范围较窄。对于压实功的影响，通常通过现场碾压试验建立压实功与压实度的关系曲线，进而对压实功不足区域的检测结果进行修正。不过，现场试验条件复杂，难以完全精准地模拟各种工况。部分研究引入回归分析方法，构建压实度与含水率、压实功的线性回

归模型，但实际中含水率与压实功对压实度的影响往往是非线性的，这种线性模型未能充分考虑二者的非线性耦合关系，导致修正精度有限。另外，还有基于神经网络的修正方法，通过大量试验数据训练模型来预测修正值，但模型泛化能力不足，对不同土质的适应性较差，在实际工程中难以广泛应用，因此亟需构建兼顾耦合效应与工程实用性的修正方法。

#### 4.2 基于含水率与压实功耦合作用的修正模型构建

基于含水率与压实功的耦合规律，构建非线性误差修正模型，具体核心步骤如下：首先，精心选取黏性土、砂性土等具有代表性的典型路基土作为研究对象。设计严谨的正交试验，科学设置不同含水率（在最优含水率 $\pm 6\%$ 的范围内）与压实功（在设计值 $\pm 40\%$ 的范围内）的组合。开展标准击实试验与现场检测工作，获取大量详实的压实度实测值与理论值，并精确计算误差数据，为后续模型构建提供可靠的数据支撑<sup>[4]</sup>。其次，以含水率（w）、压实功（E）作为输入变量，检测误差（ $\Delta$ ）作为输出变量，采用BP神经网络构建初始模型。鉴于BP神经网络在处理非线性问题上的优势，但可能存在局部最优解等问题，通过遗传算法对网络权重与阈值进行优化，有效提升模型对非线性关系的拟合能力。最后，引入土质修正系数（k），充分考虑土的颗粒级配、塑性指数等关键参数对模型的影响，根据这些参数灵活调整模型参数，从而得到最终修正模型： $\Delta = f(w, E, k)$ 。该模型能够依据现场检测的含水率、压实功以及土质参数，精准计算检测误差，为压实度的准确修正提供坚实依据。

#### 4.3 模型验证与分析

为全面验证所构建模型的有效性与可靠性，选取两个不同土质的公路路基施工项目开展模型验证工作。在项目现场，精心采集120组现场检测数据，这些数据全面涵盖了不同含水率、压实功以及土质条件，确保验证结果的全面性与准确性。验证结果显示：修正前，压实度检测误差范围较大，为 $-5.2\% \sim 4.8\%$ ，平均误差达到

1.6%，这对路基压实度的准确评估产生了较大影响。而经本文模型修正后，误差范围显著缩小至 $-1.8\% \sim 1.5\%$ ，平均误差大幅降至0.3%，修正精度较传统方法提升80%以上，充分体现了该模型的优越性。对验证数据进行深入回归分析，模型预测误差与实际误差的相关系数R<sup>2</sup>达到0.92，这表明模型具有良好的拟合效果，能够较为准确地预测检测误差。进一步分析不同工况下的修正效果发现：在含水率偏离最优值 $\pm 4\%$ 及压实功偏离设计值 $\pm 30\%$ 的范围内，模型修正精度最高，误差均严格控制在1%以内；当工况超出该范围时，修正精度略有下降，但仍明显优于现有方法，有力验证了模型在复杂耦合工况下的适用性与可靠性<sup>[5]</sup>。

#### 结束语

含水率与压实功的耦合作用是路基压实度检测误差的关键因素，传统单一因素修正法难满足精度需求。本文系统分析二者耦合机制，识别误差来源，构建了基于BP神经网络与遗传算法的耦合误差修正模型，工程验证表明其可显著提升检测精度。未来可扩大试验样本、纳入更多土质与工况优化模型，结合智能化技术，开发集多功能于一体的检测系统，实现自动化与精准化检测，为公路工程高质量发展提供技术保障。

#### 参考文献

- [1]王志刚,李明.路基土压实度检测技术研究进展[J].土木工程与管理,2024,35(2):78-82.
- [2]刘建民.路基土压实度快速检测技术的研究与应用[J].公路交通科技,2023,33(3):1-4.
- [3]宋新晖.市政道路路基压实度的检测技术探析[J].中华建设,2023(1):104-106.
- [4]屈俊云.市政道路路基压实度的检测方法及控制措施探究[J].安徽建筑,2020,27(9):172,201.
- [5]陈康军,徐有为.路基压实度灌砂法自动检测设备的设计与关键技术[J].湖南交通科技,2022,48(01):31-33+59.