

流量计、浓度计、泥位计、压力变送器这些设备的信号，都是通过它接入系统的；模拟量输出（AO）模块：用来输出4-20mA信号，主要是控制变频器的运行频率；数字量输入（DI）模块：用来接收各种状态信号，比如阀门有没有开到位/关到位、设备有没有故障、急停信号等；数字量输出（DO）模块：用来输出控制信号，比如控制泵的启动停止、阀门的开关等。

4.2 软件与控制逻辑设计

控制程序是在TIA Portal博途平台上做的，用了梯形图（LAD）和结构化文本（STL）混合编程的方式。核心控制逻辑主要分两部分：加药控制和排泥控制。药控制系统，用的是“前馈+反馈+模型”的复合控制策略，具体是：1. 前馈控制：根据进水流量和设定好的目标加药系数，算出基础加药量，公式就是 $Q_{\text{药前馈}}=K \times Q_{\text{进水}}$ （K是可以调整的系数）；2. 反馈控制：把磷酸盐分析仪测出来的实际浓度和设定值的偏差，作为PID控制器的输入，动态修正之前算出来的前馈加药量，让投加更精准；3. 模型辅助修正：程序里嵌了个简单的经验模型，会根据进水浊度、水温这些参数，再对最终的加药量做微调。最后确定好的控制量，通过AO模块输出给加药泵的变频器。

排泥控制系统，用的是“定时+条件”的间歇自动运行模式：1. PLC会按照工艺设定的排泥周期（比如4小时一次）和单次排泥时长（比如每次15分钟），自动生成排泥指令；2. 安全连锁和条件判断：发出排泥指令之前，程序会先检查泥位计和MLSS浓度计的读数。如果泥位低于设定的下限，或者MLSS浓度不够，就会暂停这次排泥，还会生成报警，提醒操作人员去检查工艺状态；3. 顺序控制：排泥指令发出后，PLC会按预设的顺序，自动打开对应的二沉池排泥阀，再启动排泥泵。等运行到设定的时间，就自动关闭阀门和泵。

上位机的监控界面是用组态软件（比如WinCC）开发的：主工艺流程画面会动态显示设备的运行状态和实时工艺参数，一眼就能看清；有专门的参数设置画面，授权人员可以在里面修改PID参数、各种设定值、排泥周期这些；报警管理画面会集中记录所有报警事件，还能设置不同的报警级别，方便区分紧急程度；趋势曲线画面能查询关键参数的历史变化情况，不管是做工艺分析还是故障诊断都很方便^[5]。

5 系统实施与效益分析

5.1 运行效果评估

这套系统在某污水处理厂完成改造并投用后，我们跟踪监测了三个月，运行效果明显。

加药系统：改造前，除磷药剂（比如PAC）都是靠人工经验投加，每天的投加量波动很大，导致出水总磷浓度也时高时低。改造后就不一样了，系统能快速响应进水的磷酸盐负荷变化——要是进水流量变大、磷酸盐浓度达到峰值，加药泵的速率会马上提升，自动增加投药量；等负荷降下来，投药量也会跟着自动减少。这样一来，出水总磷浓度能稳定控制在0.3mg/L以下，比国家一级A排放标准（0.5mg/L）还优秀。同时，因为不会再长期过量投药，PAC的吨水平均消耗量从改造前的35g/m³降到了28g/m³，降幅达到20%。排泥系统：以前是人工不定时操作，现在换成了自动化间歇运行。系统会根据实时监测的污泥浓度和泥位，智能判断什么时候该排泥、排多久，让好氧池的MLSS浓度稳定在2500-3500mg/L的理想范围里。这不仅有效避免了因为排泥不及时可能引发的污泥膨胀问题，也防止了过度排泥导致的活性污泥流失，生化系统的处理效率也跟着提上来了。而且排泥泵的日均运行时间比改造前缩短了大约30%，节省了电费。

经济效益主要体现在两方面，一方面是省钱，另一方面是提效。药剂节约的账：改造前PAC吨水耗量35g，改造后降到28g，每天处理5万吨水，一年下来能省 $(35-28) \text{ g/m}^3 \times 50000 \text{ m}^3/\text{天} \times 365 \text{ 天} = 127.75 \text{ 吨 PAC}$ 。按市场价2000元/吨算，一年光药费就能省25.55万元。电耗节约：排泥泵运行时间少了30%，一年大概能省4.8万度电，按每度电0.8元算，电费能省3.84万元。人工成本：系统自动化程度提高后，不用再依赖熟练操作工频繁手动操作，这个岗位能优化1-2个人，一年下来能省10-20万元人工费。综合算下来，这个项目初始投资大概80万元，靠这些运行成本的节约，2-3年就能收回成本。社会和环境效益：系统让出水水质更稳定，减少了对接收水体的污染风险。药耗和电耗降下来，也直接减少了化学品生产和发电过程中产生的碳排放，符合绿色低碳的发展理念。

5.2 经济效益与社会环境效益

经济效益主要体现在两方面，一方面是省钱，另一方面是提效。药剂节约的账：改造前PAC吨水耗量35g，改造后降到28g，每天处理5万吨水，一年下来能省 $(35-28) \text{ g/m}^3 \times 50000 \text{ m}^3/\text{天} \times 365 \text{ 天} = 127.75 \text{ 吨 PAC}$ 。按市场价2000元/吨算，一年光药费就能省25.55万元。电耗节约：排泥泵运行时间少了30%，一年大概能省4.8万度电，按每度电0.8元算，电费能省3.84万元。人工成本：系统自动化程度提高后，不用再依赖熟练操作工频繁手动操作，这个岗位能优化1-2个人，一年下来能省10-20万元人工费。综合算下来，这个项目初始投资大概80万元，靠这些运行成本的节约，2-3年就能收回成本。社会和环境效益：系统让出水水质更稳定，减少了对接收水体的污染风险。药耗和电耗降下来，也直接减少了化学品生产和发电过程中产生的碳排放，符合绿色低碳的发展理念。

6 结论与展望

本文针对传统生活污水处理厂加药、排泥系统的短板，设计并落地了一套基于PLC和自动化仪表的综合改造方案。实际使用下来证明，这套设计通过整合先进的在线监测仪表、搭建可靠的控制网络，再加上智能化的控制策略，成功实现了加药精准、排泥合理、运行高效的目标，方案技术成熟、配置灵活，对于其他同类型污水处理厂做自动化升级，有很高的参考价值和推广意义。

参考文献

- [1] 刘单浩泰,魏东. 基于PLC技术的电气工程自动化控制分析[J]. 科学技术创新, 2025, (22): 221-224.
- [2] 许国栋,蔡志军,徐云龙. 低C/N农村污水处理技术探讨-以贵州省某农村污水厂为例[J/OL]. 清洗世界, 1-5[2025-11-23]. <https://link.cnki.net/urlid/11.4834.TQ.20251118.1046.062>.
- [3] 李晶磊. 优化旋转式负压排泥装置应用的策略分析[J]. 现代制造技术与装备, 2025, 61 (09): 109-111. DOI:10.16107/j.cnki.mmte.2025.0612.
- [4] 陈汪洋,张孝洪,柳景青,等. 基于混合模型的平流沉淀池泥位时空分布预测[J]. 净水技术, 2025, 44 (08): 69-77. DOI:10.15890/j.cnki.jsjs.2025.08.009.
- [5] 吴朋. 中国自动化仪表行业发展回顾与展望[J]. 自动化仪表, 2025, 46 (11): 1-10+16. DOI:10.16086/j.cnki.issn1000-0380.2025070193.

Comparative analysis and optimization suggestions of bearing capacity testing methods for building foundation engineering

Bin Yan

Yangzhou Jianwei Construction Engineering Testing Center Co., Ltd., Yangzhou, Jiangsu, 225000, China

Abstract

This paper systematically addresses challenges in foundation load-bearing capacity testing, including methodological selection ambiguity, insufficient accuracy, and ambiguous application scenarios. It provides a comprehensive review of the technical principles and operational procedures for static load testing and high-strain testing, conducting comparative analyses across four dimensions: measurement accuracy, efficiency, cost, and applicability. The study demonstrates that static load testing offers high precision and reliable results, making it suitable for final load verification in critical projects. Conversely, high-strain testing excels in operational efficiency and user-friendliness, ideal for preliminary investigations and large-scale inspections. Based on these findings, the paper proposes optimization strategies encompassing method selection adaptability, standardized testing protocols, intelligent data interpretation, and multi-method validation. It establishes a "scenario-method-accuracy" matching framework to facilitate the transition from single-method testing to multidimensional collaborative verification, ultimately enhancing construction safety and structural durability.

Keywords

foundation; bearing capacity test; static load test method; high strain method

建筑地基基础工程承载力检测方法的对比分析及优化建议

颜斌

扬州市建伟建设工程检测中心有限公司, 中国·江苏 扬州 225000

摘 要

本文针对建筑地基基础工程承载力检测中存在的问题, 系统梳理了静载试验法与高应变法的技术原理与操作流程, 从检测精度、效率、成本及适用条件四个维度进行了对比分析。研究表明, 静载试验法具有精度高、结果可靠的特点, 适用于重要工程的最终承载力验证; 高应变法则在效率与操作便捷性方面表现突出, 适合初步勘察与大范围检测。基于上述结论, 本文从方法适配性选择、检测流程标准化、数据解读智能化、多方法协同验证等方面提出优化建议, 构建了“场景-方法-精度”匹配体系, 以期推动地基基础承载力检测由单一方法应用向多维度协同验证转型, 从而提升工程建设的安全性与耐久性。

关键词

地基基础; 承载力检测; 静载试验法; 高应变法

1 引言

建筑地基基础作为工程结构安全的核心支撑, 其承载力直接决定上部结构的稳定性与耐久性。在工程建设过程中, 地基基础承载力检测是评估地基工程质量、验证设计方案合理性的关键环节。当前建筑地基基础工程类型多样, 包括天然地基、复合地基、桩基等, 地质条件复杂多变, 因此需要根据实际情况选择适宜的检测方法以满足精度与效率要求。然而, 传统检测实践中仍存在方法选择缺乏系统性、

检测流程不规范、数据解读主观性强等问题。本文以静载试验法与高应变法为研究对象, 通过系统对比分析其技术特性与适用范围, 提出针对性优化建议, 为科学开展地基基础承载力检测提供理论与实践参考。

2 建筑地基基础工程承载力检测主流方法及技术原理

2.1 静载试验法

静载试验法通过在地基或基础上施加竖向或水平静荷载, 监测荷载与沉降关系以判定承载力。其技术原理基于地基土的受力变形特性, 采用分级加载方式, 精确记录各级荷载下的沉降量及稳定时间, 绘制荷载-沉降曲线, 确定曲线

【作者简介】颜斌(1979-), 男, 中国江苏扬州人, 本科, 高级工程师, 从事建筑工程质量检测研究。

拐点或规范限值对应的承载力特征值。该方法配备高精度荷载传感器及位移计,操作过程中需严格控制加载速率与稳定标准。其主要优势在于能够直接模拟上部结构荷载作用,检测数据可直观反映地基实际受力状态,是目前精度公认最高的检测方法之一。然而,该方法对设备规模与场地条件要求较高,在大型工程或复杂地质区域的适用性受到一定限制。

2.2 高应变法

高应变法通过一定质量的重锤从固定高度自由落下,冲击桩顶,使桩身产生足够的位移,将桩视为一维弹性杆,利用一维波动理论求解波动方程,直接计算桩侧及桩端土的静、动阻力,并判断桩身完整性。其技术原理基于“能量传递—桩土相互作用—波动响应”关系。落锤冲击产生的应力波沿桩身传播,在桩与土的界面发生反射和透射,通过分析力和加速度传感器记录的波形信号,可定量评价桩的极限承载力和桩身缺陷情况。

检测时将力传感器与加速度传感器对称安装在距桩顶约 2 倍桩径的桩侧表面,利用重锤自由落体冲击桩顶,使桩产生一定位移,同时采集桩身的力和加速度信号。将实测信号作为边界条件,输入假定的桩、土参数,求解波动方程,得到拟合计算结果。根据拟合情况调整桩、土参数,直至拟合曲线与实测曲线吻合度达到最佳,最终确定桩的极限承载力及完整性评价。

该方法操作简便,无需复杂反力系统,能够快速获取桩身受力和土层阻力信息,适用于场地勘察阶段的初步检测及桩基施工质量抽检。但受土层均匀性、传感器安装精度、锤击能量稳定性等因素影响,检测结果易出现波动,尤其在软土、有机质土等特殊土层中需结合地区经验进行修正。

3 建筑地基基础工程承载力检测方法的多维度对比分析

3.1 检测精度对比

检测精度是衡量承载力检测结果真实性的核心指标。静载试验法通过直接加载获得荷载-沉降曲线,能够精确捕捉地基土的屈服点及极限承载力,误差控制在较小范围,被视为重要工程或复杂地质条件下的“基准方法”^[1]。在实际工程应用中,其精度优势主要体现为加载方式与建筑物实际受力状况高度一致,能够反映地基在长期荷载作用下的变形特性;采用多通道数据采集系统,可同步监测荷载、沉降、时间等参数,为分析地基稳定性提供丰富数据支撑;只要严格遵循规范操作,不同检测机构获得的结果具有良好的致性。

高应变法的精度受地质条件及操作规范性影响较大。在均匀砂土及碎石土中,承载力与锤击数相关性较强,检测结果较为可靠;但在软土与黏性土等高压缩性土层中,能量易被吸收,数据离散性显著增加,精度下降。此外,锤击能量稳定性、探头与土层接触状态、数据采集系统响应速度等

因素也会影响检测精度。因此,在采用高应变法时,应根据工程地质条件合理选择设备参数,并通过多次测试验证结果的可靠性。

高应变可以同时检测桩身完整性和竖向抗压承载力,但需注意,其结果的准确性依赖于一系列的假设和模型(如桩土模型、阻尼系数的选取等)。尽管可以通过 Case 法和曲线拟合法进行分析,但其绝对精度远远低于静载。

对操作人员经验和分析水平要求高。从传感器安装、锤击操作到后期数据的分析、拟合整个过程都非常依赖工程师的经验和判断。不同的分析人员可能会对同一组数据得出不完全一致的结果。另外桩身的浅部缺陷和桩头加固质量对检测结果也存在不同程度的影响。

3.2 检测效率对比

检测效率直接影响工程建设进度。静载试验法需进行分级加载与稳定,每级荷载稳定时间通常为 1-2 小时,单次检测耗时可达 1-3 天,仅适用于精度要求高且工期宽松的工程。尽管效率较低,但其结果的可靠性使其在重大工程中仍不可或缺^[2]。为提高静载试验效率,工程实践中常优化加载方案,在保证精度的前提下适当缩短稳定时间。采用自动化加载与数据采集系统,减少人为操作时间;合理安排检测顺序,实现多测点并行作业。

高应变法的效率显著高于静载试验法,设备搭建简单,单人即可操作,能够快速完成大范围场地勘察,适用于工期紧张的工程。其高效率主要体现在设备轻便,易于运输与安装,数据采集速度快,可实时获得检测结果。

在追求效率的同时不可忽视操作规范性,否则将导致结果精度下降,反而增加后续验证工作的时间成本。

3.3 适用条件对比

适用条件的选择需综合考虑工程阶段、地基类型及地质条件。静载试验法适用于各类地基类型,尤其在重要工程的最终承载力验证中具有不可替代的作用。但该方法需要足够空间搭建反力系统,不适用于狭窄场地或既有建筑周边检测。在软土地基中,需控制加载速率以防地基失稳^[3]。在实际应用中,还需满足地基土性质均匀,避免局部异常导致结果失真;加载设备与场地条件匹配,确保试验安全可靠;测试点具有代表性,能够反映整个场地的承载力状况。

高应变法适用于砂土、碎石土、黏性土等多种地质条件,但对软土、有机质土、淤泥质土适应性较差,易因能量吸收导致数据失真。在桩基检测中,仅能初步判断桩身完整性,难以评估桩端承载力。此外,该方法对土层均匀性要求较高,避免土层突变影响能量传递;场地条件需允许重锤自由落下,确保冲击能量稳定;测试深度需适中,过深或过浅均会影响结果精度。

3.4 成本效益对比

从成本角度分析,静载试验法设备投资大、人力需求多、测试周期长,单次检测成本较高。但考虑到其结果的高精度