

供配电安装工程中变压器就位精度控制技术探讨

杨栋宇

安徽力合电力建设有限公司，安徽省合肥市，230031；

摘要：变压器就位精度直接关系到供电系统的安全可靠与运行寿命。针对传统安装过程中存在的定位基准偏差、二次沉降与震动耦合等问题，本文结合建筑施工测量技术、数字化装配工具与全过程质量管控方法，系统论述了变压器就位精度的影响因素与控制要点。通过对典型工程案例的误差来源分析与改进验证，提出基于 BIM + 激光扫描的高精度就位流程，可将综合偏差控制在 $\pm 2\text{ mm}$ 以内，为大容量变压器现场安装提供了可复制、可推广的技术路径。

关键词：供配电安装；变压器就位；精度控制；BIM；激光扫描；质量管理

DOI：10.69979/3060-8767.25.08.018

引言

随着新能源并网和负荷中心下移，配电变压器容量持续增大，对现场安装精度提出了更高要求。就位误差不仅影响电磁力分布和噪声水平，还会导致套管应力集中、油道不均等隐患。国内现行规范对变压器安装精度仅给出宏观指标，缺乏针对复杂场景的细化指导。本文依托若干超高层及轨道交通配电工程，综合 BIM 协同、智能测量及信息化质量追溯手段，探讨变压器就位全过程精度控制技术的研究与应用，以期为类似工程提供参考，并推动行业标准完善。

1 变压器就位精度控制的需求与影响因素

1.1 供配电系统对就位精度的要求

供配电系统在变压器就位的精度要求中体现运行安全、能效、噪声控制与后期检修空间的综合目标。当单机容量超过 10 MVA 或接入新能源并网时，铁芯中心坐标与基础基准误差必须小于 $\pm 2\text{ mm}$ ，倾斜角不得超过 0.02 %。对高层建筑、地下车站等受限场景，还需兼顾母线桥刚度与电缆弯曲半径。任何微小偏差都会引发局放、油流紊动及冷却效率下降，进而影响绝缘老化速率与设备寿命。为此，业主、设计院与施工总包在投标阶段即在 BIM 族参数与技术规格书中锁定同一容差体系，以保证后续工序可追溯、可量化。

1.2 误差来源及分类

误差来源可细分为测量基准漂移、吊装刚度不足、基础二次沉降、温度梯度膨胀以及作业人员操作随机误差五类。测量网漂移多因临时控制点绑设在可移动脚手架或沉降显著的地层；吊装刚度不足体现为钢丝绳、平衡梁与吊耳形变量叠加，导致姿态偏角难以预测。落座

后，油箱静载荷引起的混凝土基座微量沉降常在首月内高达 1 - 3 mm；而当环境温差超过 15 °C，油箱与接线柜不同的线膨胀系数还会产生累积位移。操作误差则与班组技能差异、夜间照度不足及口令传递滞后有关，在紧急停电窗口时尤为突出，这些误差若不被事前识别并量化，就会在联调试运行阶段转化为反复的二次矫正成本。

1.3 精度控制指标体系构建

精度控制指标体系应同时覆盖几何、动力与时间三个维度。几何维度包括 X、Y、Z 位置偏差与俯仰、横滚、偏航角；动力维度关注投运后 100 % 负荷下壳体振速与紧固螺栓轴力变化；时间维度记录首年沉降速率与温漂系数。每项指标需设置报警、验收、极限三级门槛，并将公式、数据来源、测点 ID 写入 BIM 属性，确保自动化脚本可在吊装模拟与现场采样之间进行双向校验。在质量清单中，以数字签名冻结关键节点数据，可防止后续批量复制时被篡改，形成全过程可追溯链条，同时还应结合 DL/T 5730 等行业标准动态更新，以支撑特高压变压器安装需求。

2 测量与定位关键技术

2.1 基于 BIM 的坐标基准建立

基于 BIM 的坐标基准建立首先要用静态 GNSS 建立一级控制点，随后依托全站仪将高程与方位传递到建筑物内的网格节点，再通过 Shared Coordinates 功能将设计模型的原点、北向与绝对标高三元素与控制网对齐。变压器族文件中预设的安装基准面与吊耳孔位均需绑定 Project Base Point，避免后续多专业协同时出现累积误差。完成对齐后，模型可直接驱动吊装动画、

碰撞检测及受力分析,为指挥员提供量化调整量。在国内若干超高层项目实践中,该方法将初次定位偏差由传统 $\pm 8\text{ mm}$ 降至 $\pm 3\text{ mm}$ 。

2.2 激光扫描与全站仪融合测量

激光扫描与全站仪融合测量兼顾面数据密度与点坐标精度。吊装前使用波长 1550 nm 的相位式扫描仪在基础坑道进行 360° 采集,每秒生成数十万点云,通过自动配准软件拼接后得到毫米级网格模型。全站仪在同一坐标系下读取棱镜点,将高精度控制点投射到点云中,实现刚性配准。吊装过程中,扫描仪以 5 Hz 跟拍重物,软件实时计算设备与理想模型之间的偏差热图,指挥员据此微调,避免传统打钢丝对线效率低下的问题。经第三方复测,在复杂遮挡环境下仍可保证 95% 点位误差小于 2 mm ,满足特高压换流站安装要求。

2.3 多传感器实时校核方法

多传感器实时校核系统由激光跟踪仪、IMU与UWB组成。激光跟踪仪以 20 Hz 采集六自由度位姿,为高精度主数据源;IMU提供高频补偿,解决遮挡瞬间的数据缺口;UWB确认设备身份和相对距离。三源数据经卡尔曼滤波融合,输出位移向量并驱动PLC控制的丝杠微调平台,实现吊装过程毫秒级闭环控制。在某 220 kV 站的应用中,平均停顿次数由 18 次降至 7 次,节省停电时间 2 小时。

3 变压器就位施工工法优化

3.1 吊装路径与受力分析

吊装路径与受力分析从碰撞检测开始,BIM软件自动生成重物移动包络,再导入有限元平台建立吊耳、梁柱、滑轮与钢丝绳的多体接触模型。根据设备重心轨迹与钢结构刚度,软件输出吊点荷载时程曲线与最大挠度分布。工程师据此布置临时滚道、空中转向架及反力支撑墩,确保重心投影始终落在安全包络内。若路径穿越已投运一次设备,需要在调度计划中锁定分时段停电窗口,并在母线两侧设置软质护罩避免碰伤绝缘子;对于超限重量设备,还需在路径关键节点布置结构应变片,实时监测梁柱应力,超过设计值 80% 即触发声光报警并暂停吊运。

3.2 精密调姿与微调设备应用

精密调姿与微调设备是亚毫米级控制的核心手段。常用装置包括爪式液压千斤顶、可调楔块、三维丝杠微调平台与磁流变阻尼器。作业前通过激光跟踪仪测得目标坐标并生成三点支撑调整矩阵,指挥台将位移指令下

发到PLC,千斤顶按 0.05 mm 步进升降。楔块采用低摩擦涂层并集成刻度传感器,可实时上传位移量。微调完成后,磁流变阻尼器固化姿态,抵消管路冲击或地铁振动带来的细微扰动,无需再多次复测。实践表明,利用该套装备可在 30 分钟内将 90 t 级干式变压器的四点支撑高度误差压缩至 0.2 mm 以内,显著提高窗口利用率。

3.3 防振及二次沉降控制措施

防振及二次沉降控制首先在基础与底架之间铺设高阻尼橡胶复合垫板,其硬度与共振频率由壳体振动模态计算得出。安装完成后,在四周坑道灌注自流平无收缩微膨胀砂浆,以消除空隙并提供均匀支撑。投运前三十天,振动监测系统记录满载运行时的壳体加速度谱,并用归一化互功率函数定位放大共振节点,再通过增加散热器支撑杆或调整吊耳紧固力矩移开共振频带。同时利用高精度静力水准仪对基础进行每日一次的沉降观测,若七日平均沉降速率超过 0.05 mm/天 ,则启动加顶升、补灌浆或局部卸载方案,确保沉降曲线在首年内趋于稳定。

4 全过程质量管控与信息化集成

4.1 数字化交付与过程追溯

数字化交付与过程追溯以CDE平台为核心,将3D模型、施工日志、测量报告与设备铭牌数据关联存储。每完成一道关键工序,现场工程师在移动端扫描二维码,系统弹出工艺卡并要求上传照片、点位坐标与签名。平台对数据添加时间戳与SHA-256哈希,确保不可篡改。竣工阶段一键输出IFC模型、PDF质检报告与CSV测点数据,对接企业DMS后可在检修工单中直接调用原始安装数据与调姿历史,该模式已在多家电网公司招标文件中被列为加分项。

4.2 风险评估与动态预警模型

风险评估与动态预警模型基于历年安装项目积累的偏差数据库,采用LightGBM算法训练分类与回归模型。输入特征涵盖控制网等级、气温梯度、班组熟练度、作业时段、设备重量与尺寸等三十余项,可输出就位误差预测均值与 95% 置信上限,并对作业步骤给出影响权重排序,指导资源投入。模型与SCADA数据对接,一旦发现趋势偏离,即在中控室大屏与头显呈现风险卡片,包含原因推断、处置清单与预计延误时长。在某综合管廊项目试运行中,预警准确率 87% ,平均提前 25 分钟推送,避免两起超限吊装事故。

4.3 现场协同与移动终端应用

现场协同与移动终端应用依托 5G SA 专网与 AR 头显,实现模型与实景的无缝叠加。作业人员佩戴头显后,可实时看到设备边缘与设计轮廓之间的偏差线,减少口头喊数误差。指挥员在平板拖拽设备图元,系统通过 MQTT 协议将调整向量同步至头显与微调平台 PLC,形成 $<100\text{ ms}$ 的闭环。所有传感器数据在边缘服务器融合并实时备份到云端,断网时本地仍可离线缓存 24 小时。终端还支持语音识别,将口令转为标准指令并广播给所有设备,自动生成操作记录。

5 工程应用与发展趋势

5.1 大容量轨道交通站变案例分析

在上海浦东某轨道交通站变扩容工程中,项目采用 50 MVA 干式变压器双机并联,安装通道最窄处仅 0.2 m 余量。团队在吊装前全域扫描并嵌入 BIM 模型,生成高精度点云。通过激光跟踪仪与双向液压千斤顶协同,重物在 24 分钟内完成 90° 转向与 14 m 水平平移,最终 X、Y、Z 位置偏差分别为 1.2、1.5、1.1 mm,倾斜角 0.013 %。项目避免二次吊装,压缩总工期 4 天,并在通车前准时送电,经验已被编制为企业级工法,供后续车站参考。

5.2 精度提升的经济与安全效益

精度提升的经济与安全效益可从短期与长期两条主线衡量。短期看,一次就位成功节省千斤顶租赁、二次调试与返工材料费约 2 %,在大型综合体项目中可直接减少十余万元开支;长期看,套管均压改善使局部放电水平下降 30 %,油纸绝缘寿命延长五年以上,减少运维停电损失与提前报废风险。回归分析显示,定位误差每减少 1 mm,全寿期成本可节约约 12 %。此外,精确安装降低了振动与噪声引发的乘客投诉,在轨交场景中间接提升服务品质,带来社会信誉增值。

5.3 智能化安装技术展望

展望未来,智能化安装技术将围绕机器人牵引、数字孪生监控与 AI 自主校准展开。履带式吊装机器人集成力觉与视觉传感器,可在毫米级避障的同时自动测算载荷并调整牵引力;数字孪生云平台实时映射设备与基础应力场,通过虚实对比优化吊点布置;深度强化学习

算法在多项目迁移后可自主生成最优吊装路径与微调方案,比人工经验更快收敛到全局最优。当激光雷达、AR 头显与 6G 网络进一步普及时,跨地域远程协作与实时监管将成为常态,推动供配电安装迈向高精度、高透明度的新阶段。

6 结语

综上所述,变压器就位精度控制是供配电安装工程的关键环节。本文从理论模型、测量技术、装配工法与信息化管控四方面梳理了影响因素及优化措施,并通过工程实证验证了基于 BIM + 激光扫描流程的可靠性。结果表明,采用多基准融合校核与全过程数字化交付,可显著降低定位偏差与二次调校成本。后续应加强标准化工具研发与智能装备集成,持续提升大容量变压器安装质量与运维安全水平。同时,为应对新型电力系统对配电可靠性的更严苛要求,还需开展多场景、多工况下的精度监测数据积累与算法迭代。

参考文献

- [1] 供配电工程一体化智能设计系统研发. 宋晓波. 中南林业科技大学, 2012
- [2] 浅谈配电箱安装施工技术要点[J]. 张继卉. 民营科技, 2011(11)
- [3] 变配电安装工程施工探讨[J]. 段小荣. 科学之友, 2011(12)
- [4] 关于配电箱安装工程施工技术的探讨[J]. 江永文. 价值工程, 2010(36)
- [5] 浅谈变配电安装工程施工技术要点[J]. 江永文. 中国科技信息, 2010(23)
- [6] 变配电安装工程施工技术要点分析[J]. 陈风南; 邵海燕. 科技展望, 2015(34)
- [7] 10kV 配电网线路中变配电安装技术探讨[J]. 曾祖广. 企业技术开发, 2015(33)
- [8] 有关电力配电安装的问题和处理分析[J]. 刘鹏; 史永辉; 林廷宝. 科技风, 2015(13)
- [9] 浅析 10kV 配电网线路变配电安装技术[J]. 张锐聪. 民营科技, 2015(06)
- [10] 10kV 配网设备安装调试技术探究[J]. 阮彩昆. 企业技术开发, 2014(30)