

Verticality Control Technology and Error Analysis of Chimney Wall of 100 m High Thermal Power Plant

Chaogang Hu

China Power Construction Group Hebei Engineering Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050021, China

Abstract

Verticality control of super-high chimney walls represents a critical technical challenge in thermal power plant construction, with errors stemming from the coupling of environmental disturbances, structural deformation, and measurement system precision. This study investigates a 240-meter reinforced concrete chimney project at a Huaneng Power Plant. A benchmark transfer system integrating laser plumb line and zenith instrument was established, while intelligent platform-based template center positioning and leveling technologies were developed. High-precision total stations were employed for real-time 3D coordinate verification. Systematic analysis of deviation characteristics caused by wind loads, solar thermal variations, platform eccentricity, and concrete creep led to the establishment of a mathematical model for measurement error propagation. A predictive model-based template pre-bias compensation process and environmental sensitive period avoidance strategy were proposed. Post-construction 3D laser scanning validated that the final verticality deviation remained within 62% of the specified limit.

Keywords

Super high chimney; Verticality control; Datum transfer; Error analysis; Pre-bias compensation

超百米火电厂烟囱筒壁垂直度控制技术及其误差分析

胡朝刚

中国电建集团河北工程有限公司, 中国·河北 石家庄 050021

摘要

超高烟囱筒壁垂直度控制是火电厂建设中的关键技术难题, 其误差来源涉及环境扰动、结构变形与测量系统精度的多重耦合。本研究以华能某电厂240米钢筋混凝土烟囱工程为对象, 构建激光铅直仪与天顶仪联测的基准传递体系, 开发基于智能平台的模板中心定位与调平技术, 并采用高精度全站仪实施三维坐标实时校核, 系统分析风荷载、日照温差、平台偏心及混凝土徐变等因素引起的偏差特征, 建立测量误差传播数学模型, 提出基于预测模型的模板预偏置补偿工艺与环境敏感时段测量规避策略, 通过成筒后三维激光扫描验证最终垂直度偏差控制在规范限值的62%以内。

关键词

超高烟囱; 垂直度控制; 基准传递; 误差分析; 预偏置补偿

1 引言

火电厂烟囱高度突破 200 米后, 筒壁垂直度控制的技术难度呈现非线性增长态势, 传统依靠经验调整的施工方法已难以满足精度要求。华能某电厂 240 米烟囱工程的设计垂直度限值为 $H/1000$, 即全高偏差不得超过 240 毫米, 而实际施工中环境扰动与结构变形产生的动态误差往往在数十毫米量级波动, 若不能建立系统的误差识别与补偿机制, 累积偏差极易突破控制阈值。筒壁垂直度偏差的形成机理涉及多个物理过程的叠加, 风荷载使筒身产生弹性挠曲, 日照温差导致向阳面与背阴面产生差异伸长, 施工平台的偏心荷载引起筒顶倾斜, 混凝土的徐变与收缩则造成长期累积变形,

这些因素在时间尺度上表现出不同的特征频率, 短周期扰动可能在单次测量中引入数毫米的随机误差, 长周期变形则形成系统性偏差趋势。垂直度控制技术的核心在于将这些误差源分离识别并采取针对性的补偿或规避措施, 最终实现筒壁几何中心与设计轴线的高精度吻合。

2 筒壁垂直度控制核心技术体系

2.1 激光铅直仪与天顶仪联测基准传递技术

垂直度控制的首要环节是将地面控制点的平面坐标精确传递至施工作业面, 传统方法采用单台激光铅直仪向上投点, 其缺陷在于仪器自身的轴系误差无法自校, 且易受筒内上升气流扰动影响, 华能 240 米烟囱工程采用激光铅直仪与天顶仪联测的双重校核体系。激光铅直仪安置于筒底基准点, 向上发射激光束在各施工层的接收靶上成像, 天顶仪则从地面通过光学系统观测筒顶标志点的天顶距与方位角, 两

【作者简介】胡朝刚(1992—), 男, 中国河北石家庄人, 本科, 助理工程师, 从事火电厂土建工程研究。

套系统的测量结果相互独立又可交叉验证,当两者偏差超过3毫米时触发复测程序^[1]。基准点的布设采用中心点加对称辅助点的配置,中心点用于日常投点作业,四个对称辅助点用于仪器对中误差的检核与消除,通过正倒镜观测取平均值可将投点精度控制在 ± 1.5 毫米以内。

2.2 基于智能平台的模板中心定位与调平技术

滑模或爬模平台的中心位置与水平状态直接决定了新浇筑筒壁的几何精度,传统人工调整依赖操作者经验且效率低下,华能工程引入智能平台控制系统实现模板中心的自动定位与调平。平台上布设四组液压千斤顶,每组配备高精度位移传感器与倾角传感器,控制系统实时采集传感器数据并与目标位置比对,偏差超限时自动驱动千斤顶进行微调,调整精度可达0.5毫米与0.01度。模板中心的确定采用激光接收靶的图像识别技术,CCD相机捕捉激光光斑位置并计算其相对于靶心的偏移量,该偏移量即为模板中心与铅垂基准的偏差,系统将偏差值转换为各千斤顶的调整量并执行闭环控制。智能平台的应用使单层调整时间从传统的40分钟缩短至15分钟,且调整精度显著提升^[2]。

2.3 高精度全站仪三维坐标实时校核技术

激光铅直仪传递的是平面位置信息,高程传递与三维空间姿态的校核需借助全站仪完成。华能工程在筒外布设三个强制对中观测墩,构成边长约150米的三角形控制网,全站仪架设于观测墩上可观测筒壁各标高层预埋的反射棱镜,通过三维坐标解算获取筒壁圆心位置及其相对于设计轴线的偏差。测量时段选择在日出前或日落后的温度稳定期进行,以规避日照温差引起的筒身变形干扰,每个标高层至少观测八个均匀分布的棱镜点,通过最小二乘拟合确定该截面的圆心坐标。全站仪的测角精度为0.5秒,测距精度为1毫米加1ppm,在150米测距条件下点位精度约为 ± 2 毫米,与激光铅直仪的投点结果进行比对可有效识别系统误差。

3 垂直度偏差来源于数学模型分析

3.1 风荷载与日照温差引起的动态变形误差

风荷载使烟囱筒身产生顺风向弯曲变形,变形量与风速的平方成正比并与筒身刚度成反比,华能240米烟囱在6级风条件下的筒顶位移计算值约为35毫米,这一变形在风荷载撤除后可完全恢复,属于弹性变形范畴,然而测量期间的风速波动会导致读数的随机散布^[3]。日照温差的影响机理更为复杂,阳光照射使向阳面混凝土温度升高并产生热膨胀,背阴面温度较低膨胀量小,差异伸长导致筒身向背阴侧弯曲,夏季正午时分的筒顶热弯曲位移可达25毫米,且弯曲方向随太阳方位角变化而转动。上述动态变形若在测量数据中未加识别将直接计入垂直度偏差,实际上这些变形在长期平均意义下趋于零,不应作为施工偏差处理。

3.2 施工平台偏心荷载与混凝土徐变导致的系统偏差

滑模平台上的施工荷载难以做到完全对称分布,偏心

荷载产生的弯矩使筒顶向重载侧倾斜,倾斜角度虽小但经筒身高度放大后筒顶位移可观,华能工程监测数据显示混凝土浇筑高峰期的平台偏心引起的筒顶附加位移约为8至12毫米。混凝土徐变是另一类长周期系统偏差源,早期浇筑的筒壁在上部荷载持续作用下产生蠕变变形,若筒壁厚度或配筋存在不对称性,徐变变形将表现为筒身整体倾斜,这种倾斜随时间缓慢发展且不可逆。徐变引起的偏差在施工期间难以直接测量,需通过理论计算进行预测,华能工程采用的徐变系数为2.0,计算得到的施工期徐变附加倾斜约为 $H/8000$ 量级,相对于垂直度限值影响较小但仍需纳入综合分析^[4]。

3.3 测量仪器自身精度与对中误差的传播模型

测量误差的传播遵循误差理论的基本规律,独立误差源的影响可按方和根法则合成。激光铅直仪的投点误差包括仪器轴系残余与光束发散导致的光斑弥散,综合精度约为 ± 1.5 毫米;接收靶的判读误差约为 ± 1 毫米;仪器对中误差在采用强制对中装置后可控制在 ± 0.5 毫米以内,上述误差合成后单次投点的综合精度约为 ± 2 毫米。全站仪测量的误差源包括测角误差、测距误差与棱镜对中误差,在150米测距条件下综合点位精度约为 ± 2.5 毫米。两套系统相互独立,取其加权平均可进一步提高可靠性,若两者偏差超过5毫米则表明存在误差或系统误差需排查原因。误差传播模型的建立为测量方案设计与成果评定提供了理论依据。

3.4 筒壁几何中心与设计轴线的空间偏差合成分析

各标高层测得的圆心坐标与设计轴线坐标之差即为该层的平面偏差,全筒各层偏差矢量的空间分布特征反映了垂直度状态。偏差合成分析需区分随机分量与系统分量,随机分量表现为各层偏差矢量的方向散布,主要来源于测量误差与短周期环境扰动;系统分量表现为偏差矢量沿某一方向的趋势性累积,通常与施工过程中的模板调整偏差或长周期结构变形相关。华能工程的偏差分析采用最小二乘拟合方法,以设计轴线为基准拟合实测圆心坐标序列的最佳直线,该直线的倾斜度即为筒身整体倾斜,各层圆心相对于拟合直线的离散度则反映局部偏差水平。最终垂直度评定以筒顶圆心相对于筒底基准点的总偏差为判据,同时考察各层局部偏差是否存在突变。

4 误差控制工艺优化与效果验证

4.1 基于预测模型的模板预偏置补偿施工工艺

动态变形误差虽然在长期平均意义下趋于零,但施工期间的测量时机与浇筑时机往往不一致,测量时刻的筒身姿态与浇筑凝固时刻的姿态存在差异,这种差异若不加补偿将形成永久偏差。预偏置补偿工艺的理论基础在于将筒身视为弹性悬臂结构,其在外荷载作用下的变形可通过结构力学方法进行定量描述,变形量与荷载强度、作用位置及筒身刚度之间存在明确的函数关系,这一关系经过实测数据的标定后可用于变形预测。预偏置补偿工艺的核心思想是根据预测

模型估算测量时刻与浇注凝固时刻之间的筒身姿态变化量，在模板调整时预先施加反向偏置以抵消该变化量，其实施要点在于预测模型的精度与时效性，模型参数需根据工程实际进行动态修正以适应施工进度与季节变化。工程实践表明，预偏置补偿工艺将被动的事后修正转变为主动的事前控制，有效打断了偏差累积的链条，其应用使施工期偏差波动幅度显著降低^[5]。

4.2 环境敏感时段测量规避与数据滤波处理方法

测量时段的选择对数据质量具有决定性影响，风荷载与日照温差作为主要的环境扰动源，其作用强度呈现明显的日变化规律，在扰动峰值时段进行测量将导致数据离散度急剧增大。环境敏感时段的界定需结合当地气候特征与筒身的热惯性进行分析，一般而言日出前后与日落前后的温度梯度最为平缓，风速通常也处于日变化的低谷期，是最适宜开展高精度测量的时间窗口。对于无法完全规避的环境扰动，数据滤波处理提供了一种事后修正的技术手段，其基本思想是利用扰动信号与有用信号在频域上的差异进行分离，短周期的随机扰动表现为高频分量，长周期的结构变形趋势表现为低频分量，低通滤波可有效提取后者。滤波算法的选择需兼顾平滑效果与相位保持，过度平滑会模糊真实偏差的时变特征，滤波处理后的数据更能反映筒身的真实几何状态，避免将瞬时扰动误判为永久偏差。

4.3 关键标高断面垂直度验收与偏差趋势评估

施工过程中设置若干关键标高断面进行阶段性垂直度验收，华能240米烟囱在60米、120米、180米及240米四个标高设置验收断面，每个断面的验收限值为该标高对应的H/1000值。验收测量采用多时段多测回的冗余观测方案，至少在三个不同时段各进行两测回观测，取各时段成果的加权平均作为最终验收值，权重依据该时段的环境条件与数据离散度确定。偏差趋势评估通过绘制各层圆心偏差的矢量图与标量图进行，矢量图显示偏差的方向分布特征，标量图显示偏差绝对值随标高的变化趋势，若出现偏差加速增长或方向突变则需排查原因并采取纠偏措施^[6]。

4.4 四成筒后实体三维激光扫描与最终偏差分析报告

烟囱筒身施工完成后采用地面三维激光扫描仪进行整体扫描，这一技术手段可在短时间内获取筒壁外表面的海量点云数据，空间分辨率可达毫米级，为几何偏差的全面评估

提供了充分的数据支撑。点云数据处理的关键环节包括多站数据的配准拼接、噪声点与离群点的剔除以及目标几何体的拟合，配准精度直接影响最终成果的可靠性，需借助高精度控制点进行约束平差。圆柱面拟合采用最小二乘准则确定各标高层的圆心坐标与半径，拟合残差的分布特征可反映筒壁表面的局部不规则性，圆心坐标序列与设计轴线的比对即为垂直度偏差的直接度量。最终偏差分析报告详细记录了各阶段的测量数据、偏差演化过程及控制措施的实施效果，报告的编制应遵循完整性与可追溯性原则，为竣工验收提供技术文件支撑并为同类工程积累经验^[7]。

5 结语

超百米烟囱筒壁垂直度控制是测量技术、施工工艺与误差分析的系统工程，华能240米烟囱工程的实践表明，激光铅直仪与天顶仪联测的基准传递体系可有效提高投点精度与可靠性，智能平台控制系统显著提升了模板调整效率与精度，基于预测模型的预偏置补偿工艺有效削减了动态变形误差的影响，环境敏感时段的测量规避与数据滤波处理保障了测量成果质量。最终垂直度偏差控制在规范限值的62%以内，验证了所采用技术体系的有效性。后续研究可关注实时监测与自适应控制技术的融合，进一步提升超高结构施工的自动化与智能化水平。

参考文献

- [1] 罗鸣.超高层建筑物垂直度控制施工技术探讨[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2025(9):005-008.
- [2] 王新鹏,黄声享,康超.BDS/GPS组合定位在超高层建筑垂直度控制中的应用[J].测绘通报,2016(S2):89-92+129.
- [3] 谢力分,孙彪.某工程超高层建筑垂直度控制方法[J].长江工程职业技术学院学报,2016,33(1):22-25.
- [4] 王宇,张佳敏.超深大直径旋喷桩垂直度检测及控制研究[J].山西建筑,2024,50(16):83-88.
- [5] 钟英卓,崔忠辉,潘冬.钢筋混凝土烟囱滑模施工筒身垂直度控制[J].中国高新技术企业,2010(12):151-153.
- [6] 李常兵.烟囱施工控制的重点及常见质量问题的防控[J].企业科技与发展:下半月,2010(3):2.DOI:10.3969/j.issn.1674-0688.2010.06.014.
- [7] 缙慧娟,杨成龙.基于间接平差法的大型烟囱垂直度监测方法的研究[J].测绘与空间地理信息,2020.