

电厂汽轮机本体吊装工程中的稳定性控制研究

姚国洋 杨兵维 杨 硕

北京兴电国际工程管理有限公司 北京 100000

摘要：随着电力行业的快速发展，电厂汽轮机本体吊装工程的稳定性控制日益受到重视。本文深入探讨了汽轮机吊装过程中的潜在风险及其对稳定性的影响，包括振动、冲击和安装误差等。通过理论分析与实证研究，提出了多项稳定性控制措施，旨在确保吊装作业的安全性与精确性。研究成果对于提高电厂建设质量和保障汽轮机长期稳定运行具有重要意义，为相关工程实践提供了有价值的参考。

关键词：电厂汽轮机本体；吊装工程；稳定性控制

引言：电厂汽轮机本体吊装工程是电力设施建设中的核心环节，其稳定性控制直接关系到机组的安装质量和长期运行安全。汽轮机结构复杂、重量巨大，吊装过程中任何微小的偏差都可能引发严重的安全事故。因此，对吊装过程中的稳定性进行严格控制，确保每一步操作都符合规范，是保障电厂建设和运行安全的关键。本文旨在深入探讨电厂汽轮机本体吊装工程的稳定性控制策略，为实际工程提供理论指导和技术支持。

1 电厂汽轮机本体吊装工程概述

1.1 汽轮机本体结构与特点

(1) 汽轮机的组成部分及其功能。汽轮机主要由转动部分和静止部分构成。转动部分包含主轴、叶轮、动叶片等，主轴是核心，带动叶轮和叶片旋转实现能量转换；叶轮用于安装叶片，动叶片则直接吸收蒸汽能量推动转动。静止部分有汽缸、隔板、静叶片等，汽缸形成封闭汽室，隔板固定静叶片并分隔汽室，静叶片引导蒸汽流向动叶片。各部分协同工作，将蒸汽热能转化为机械能，驱动发电机发电。(2) 汽轮机吊装工程的技术要求。吊装需保证设备轴线精度，偏差控制在 $0.05\text{mm}/\text{m}$ 内；吊装过程中起吊速度平稳，加速度不超过 0.1g ；承重结构强度需达设计值1.2倍以上；需采用专用吊装工具，且经载荷试验合格；吊装环境温度在 $-10^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$ 之间，风力不大于6级。

1.2 吊装工艺流程分析

(1) 基础项目安装。先对基础进行验收，检查其平整度、标高及混凝土强度，合格后清理基础表面杂物，按图纸弹设安装基准线，然后进行基础二次灌浆前的准备，确保基础与设备贴合紧密。(2) 垫铁、台板及轴承底座安装。根据设备找平需求选择合适垫铁，分组放置在基础指定位置，用水平仪调整垫铁平整度；台板放置在垫铁上，紧固螺栓后检查水平度；轴承底座安装时，

需与台板精准对位，保证其中心位置偏差不超过 0.1mm 。

(3) 下汽缸放置等关键步骤。下汽缸吊装前检查内部清洁度，起吊时保持水平，缓慢放置于轴承底座上，调整其水平度和标高，使汽缸结合面间隙符合要求，随后安装定位销固定^[1]。

1.3 吊装过程中的潜在风险

(1) 振动与冲击对汽轮机稳定性的影响。吊装时的振动可能导致零部件松动，影响配合精度；冲击载荷会使设备结构产生应力集中，长期可能引发裂纹，降低汽轮机运行稳定性，甚至造成停机事故。(2) 安装误差导致的潜在故障。安装时若轴线偏差过大，会使转子运行时产生附加力，加剧轴承磨损；标高误差可能导致汽封间隙不均匀，造成蒸汽泄漏，降低机组效率，严重时引发设备故障。

2 稳定性控制理论与技术在吊装工程中的应用

2.1 稳定性控制基础理论

(1) 稳定性定义与重要性。稳定性指吊装系统在载荷作用和外界干扰下，保持设备平衡状态或预定运动轨迹的能力。其是吊装工程的核心保障，直接决定设备安全、施工效率及工程质量。一旦稳定性失控，可能导致汽轮机本体变形、部件损坏，甚至引发安全事故，造成巨大经济损失。(2) 动态特性与稳态特性的分析。动态特性反映系统在起吊、移动等过程中的瞬时响应，如振动频率、冲击加速度等，需通过动力学模型分析其瞬态变化规律。稳态特性体现系统在静止或匀速运动时的平衡状态，如设备水平度、吊索受力分布等，可通过静力学计算确定稳定临界条件。二者结合为稳定性控制提供理论依据。

2.2 控制技术在吊装工程中的实践

(1) 先进吊装设备的选择与使用。选用带无级调速和负载反馈功能的液压吊装设备，其可根据载荷自动调

整起吊速度，减少冲击。设备额定起重量需超过汽轮机本体重量1.2倍，且配备防倾覆装置，使用前需进行载荷试验和精度校准。（2）传感器与监控系统的应用。在吊点安装拉力传感器，实时监测载荷分布；在设备本体布设倾角传感器和振动传感器，采集姿态数据。监控系统将数据整合分析，当参数超限时自动报警，精度控制在 $\pm 0.1^\circ$ （倾角）和 $\pm 1\%$ （拉力）以内。（3）调整与控制策略的制定。制定分级控制策略：轻度偏差时，通过微调吊点位置或起吊速度修正；较大偏差时，暂停作业并启用备用吊具。针对振动问题，采用柔性吊索减少共振，同时预设应急停机程序，确保异常时快速制动。

3 电厂汽轮机本体吊装工程中的稳定性控制措施

3.1 安装前准备阶段的稳定性控制

（1）设计方案的优化与验证。设计方案需结合汽轮机本体重量分布、重心位置等参数优化吊点布局，确保各吊索受力均衡（偏差 $\leq 5\%$ ）。通过BIM技术模拟吊装全流程，校验设备起吊角度、旋转半径等关键参数，排查与周边设施的碰撞风险。验证环节采用“理论计算+模型试验”双验证：理论上核算吊装系统安全系数（ ≥ 1.5 ），模型试验按1:5比例模拟起吊过程，测试不同工况下的结构稳定性，确保方案可行性。（2）吊装设备的检查与维护。建立设备检查清单，对起重机液压系统、制动装置、吊索具等进行全面检测。起重机需校验起升速度稳定性（波动 $\leq \pm 3\%$ ）、回转定位精度（偏差 $\leq 10\text{mm}$ ）；吊索选用高强度钢丝绳，检查断丝数（单股 ≤ 2 根）、磨损量（直径减少 $\leq 7\%$ ），并进行载荷试验（1.25倍额定载荷静载测试）。维护工作包括润滑关键部件、紧固连接螺栓，确保设备性能符合吊装要求^[2]。

（3）操作人员的培训与考核。培训内容涵盖汽轮机结构特性、吊装方案要点、应急处置流程等。实操培训重点练习吊点对位（偏差 $\leq 15\text{mm}$ ）、起吊速度控制（0.1-0.3m/min）等技能，采用虚拟现实系统模拟突发状况（如吊物倾斜）的处置。考核实行“理论+实操”双达标制，理论成绩 ≥ 85 分且实操连续3次无失误者方可上岗，确保操作人员具备稳定控制能力。

3.2 吊装过程中的稳定性控制

（1）精确的定位与对中技术。采用“激光+全站仪”联合定位系统，在汽轮机基础台板设置基准坐标点，吊装时实时监测设备中心轴线与基准线的偏差值（控制在 $\leq 0.5\text{mm}/\text{m}$ ）。下汽缸就位时，通过可调式支撑装置进行三维微调：水平方向利用液压千斤顶（精度 $\pm 0.1\text{mm}$ ）调整，垂直方向通过增减垫铁（厚度误差 $\leq 0.02\text{mm}$ ）控制标高，确保汽缸结合面平面度 $\leq 0.1\text{mm}/\text{m}$ 。转子吊

装采用“双机抬吊+轴系找中”技术，利用百分表监测径向与轴向摆度（允许值 $\leq 0.03\text{mm}$ ），通过调整吊索长度实现轴系同心度控制（偏差 $\leq 0.02\text{mm}$ ）。（2）逐步加载与卸载策略。实行“分级加载”原则：初始起吊阶段（离地0.5m内）加载速度 $\leq 0.1\text{m}/\text{min}$ ，同时监测吊索受力均匀性（单根受力偏差 $\leq 3\%$ ）；设备提升至安装高度后，保持5分钟静态加载，确认无异常后再进行水平移动（速度 $\leq 0.5\text{m}/\text{min}$ ）。卸载过程采用“对称分步”方式：先解除非承重侧吊索载荷（卸载速度 $\leq 5\%/\text{min}$ ），再逐步降低主吊索张力，同时通过临时支撑装置承接设备重量，避免因载荷突变产生冲击振动（振动加速度 $\leq 0.1\text{g}$ ）。（3）实时监测与调整机制。构建“多参数联动”监测系统：在吊索安装拉力传感器（测量精度 $\pm 1\%FS$ ）、设备本体布设倾角传感器（量程 $\pm 5^\circ$ ，精度 $\pm 0.05^\circ$ ）、基础台板设置振动传感器（采样频率100Hz），数据通过无线传输至中央控制台，形成动态监测曲线。当监测值超出阈值（如倾角 $> 1^\circ$ 、振动加速度 $> 0.15\text{g}$ ）时，系统自动触发声光报警，操作人员立即执行预设调整方案：倾角超限时微调对应吊索张力，振动超标时暂停吊装并启用减振装置（如加装弹簧缓冲器），确保各项参数回归安全范围后再继续作业^[3]。

3.3 安装后验收阶段的稳定性评估

（1）静态与动态测试方法。静态测试包括：采用精密水平仪测量汽轮机台板水平度（允许偏差 $\leq 0.02\text{mm}/\text{m}$ ），通过塞尺检查汽缸结合面间隙（ $\leq 0.03\text{mm}$ ，且塞尺插入深度 $\leq 10\text{mm}$ ），利用扭矩扳手校验连接螺栓预紧力（符合设计值 $\pm 10\%$ 要求）。动态测试在空负荷试运行阶段进行：通过振动分析仪监测轴承座振动值（转速3000r/min时，双振幅 $\leq 0.03\text{mm}$ ），利用红外测温仪检测轴承温度（ $\leq 90^\circ\text{C}$ ），同时记录轴系临界转速下的振动特性，判断是否存在共振风险。（2）稳定性评估指标与标准。核心评估指标包括：①静态稳定性：设备重心偏移量 $\leq 5\text{mm}$ ，基础沉降量 $\leq 2\text{mm}/24\text{h}$ ；②动态稳定性：额定工况下振动烈度 $\leq 2.8\text{mm}/\text{s}$ （ISO标准），轴承振幅波动范围 $\leq \pm 0.01\text{mm}$ ；③结构完整性：吊装后关键部件（如主轴、汽缸）无塑性变形（通过超声波探伤检测），连接部位无松动（螺栓扭矩衰减率 $\leq 5\%$ ）。评估标准采用“一票否决制”，任何一项指标不达标即判定为验收不合格^[4]。（3）改进措施与建议的提出。针对验收中发现的问题制定分类改进方案：水平度超差时，采用环氧树脂砂浆进行基础找平（平整度控制在 $0.01\text{mm}/\text{m}$ 内）；振动值偏高时，重新进行轴系找中或更换减振垫。形成《稳定性控制报告》，包含吊装参数记录、异

常处理台账、设备状态评估等内容，为后续机组运行维护提供依据。建议建立“定期回访”机制，在机组运行1个月、3个月后进行二次检测，验证稳定性控制措施的长期有效性。

4 稳定性控制技术的创新与发展趋势

4.1 现有技术的局限性与改进方向

(1) 分析当前稳定性控制技术的不足之处。当前技术存在三方面局限：一是监测系统集成度低，多为单一参数监测，难以综合判断整体稳定性；二是动态响应滞后，传统传感器与控制系统的信号传输延迟达0.3-0.8秒，应对突发振动时调整不及时；三是适应性差，在复杂工况（如强风、地面沉降）下，控制算法易出现参数失配，依赖人工干预比例高。此外，对大型构件吊装时的弹性变形考虑不足，导致稳定性预判偏差较大。(2) 提出针对性的改进建议。建议构建多参数融合监测系统，整合力、位移、振动等数据，建立耦合分析模型；采用边缘计算技术缩短信号传输延迟至50毫秒内，提升动态响应速度；开发自适应控制算法，通过实时工况识别自动优化控制参数。同时，增加弹性变形补偿模块，引入有限元实时计算，提高复杂载荷下的控制精度。

4.2 新兴技术在吊装工程中的应用前景

(1) 智能化、自动化技术的发展趋势。智能化方面，AI视觉导航将实现吊点自动识别与定位（精度 $\pm 3\text{mm}$ ），结合数字孪生技术可虚拟预演吊装全过程，提前规避稳定性风险。自动化领域，无人吊装机器人将实现全流程自主作业，通过多机协同控制算法保证集群吊装的同步性，预计未来10年智能化吊装设备市场占比将超50%。(2) 新材料、新工艺对稳定性控制的影响。碳纤维增强复合材料吊索强度比钢索高2倍，自重降低40%，可减少吊具弹性形变对稳定性的影响；记忆合金驱动的调平装置响应速度提升3倍，能快速补偿微小位移偏差。3D打印工艺可定制轻量化吊具，优化载荷分布，配合激光焊接技术提高连接部位的稳定性，降低结构变形

风险。

4.3 未来研究方向与展望

(1) 预测吊装工程稳定性控制的发展趋势。未来稳定性控制将呈现“全域感知、智能决策、自愈控制”三大特征：分布式传感器网络实现从吊具到基础的全维度监测；数字孪生与强化学习结合，构建自主决策的控制中枢；自修复材料的应用使关键部件在微损伤时自动补偿，提升系统容错能力。预计到2030年，智能化吊装系统的事故率将较当前降低80%。(2) 提出值得进一步研究的问题与领域。需重点研究的方向包括：极端环境(-30°C以下、台风工况)下的稳定性控制机理；多场耦合(力、热、磁)作用下的动态平衡模型；基于区块链的吊装过程溯源与参数加密技术。此外，人机协同控制的伦理边界、稳定性控制与施工效率的平衡优化也是亟待探索的领域。

结束语

综上所述，电厂汽轮机本体吊装工程中的稳定性控制是确保机组安全运行的关键。通过深入研究与实践，我们提出了一系列稳定性控制措施，并在实际应用中取得了显著成效。未来，随着技术的不断进步和工程需求的日益增长，稳定性控制将面临更多挑战与机遇。我们将继续探索创新，不断优化控制策略，为电厂汽轮机本体吊装工程提供更加高效、安全的解决方案，推动我国电力行业持续健康发展。

参考文献

- [1] 郑文臣.对火电厂汽轮机安装工艺的研究与探讨[J].科技创业家,2020,(09):84-85.
- [2] 刘波,王佳玉,田丽丽.电厂汽轮机安装过程中的质量对策[J].科技创新与应用,2021,(13):125-126.
- [3] 程维青.电厂汽轮机安装过程中的质量对策[J].科技创新与应用,2020,(07):69-70.
- [4] 洪钦.探析电厂汽轮机安装过程中的质量保障措施[J].内燃机与配件,2021,(14):160-161.