先进机械制造技术及其在电力设备制造工业中的应用研究

陈文武 姜广亮
青岛金涌热电有限公司 山东 青岛 266600

摘 要 为解决电力设备制造过程中存在的加工精度低、结构复杂难装配，以及系统集成度不足等问题，本文对先进机械制造技术在电力设备制造中的应用展开系统研究，提出基于多轴加工、增材制造与智能控制系统的集成应用路径，以期为电力装备制造工程中的技术优化与效率提升提供参考。

关键词 先进机械制造技术；电力设备制造工业；应用

Advanced Mechanical Manufacturing Technology and Its Application in Power-Equipment Manufacturing Industry

Chen Wen-wu, Jiang Guang-liang
Qingdao Jinyong Thermal Power Co., Ltd., Qingdao 266600, Shandong Province, China

Abstract To overcome the problems of low machining accuracy, complex structural assembly, and insufficient system integration in power-equipment manufacturing, this paper systematically investigates the application of advanced mechanical manufacturing technologies in the power-equipment sector. An integrated implementation route based on multi-axis machining, additive manufacturing, and intelligent control systems is proposed, providing a reference for technical optimization and efficiency improvement in power-equipment manufacturing engineering.

Key words Advanced Mechanical Manufacturing Technology; Power-Equipment Manufacturing Industry; Application

电力设备作为能源输配系统中的关键载体，其制造精度与运行可靠性直接关系到电网系统的安全与稳定。近年来，传统制造工艺已难以满足高性能电力装备的发展需求，高精度、高集成度与柔性制造成为技术革新的重点方向。开展先进机械制造技术的应用研究，有助于推动电力设备制造体系的质量提升与智能化转型。

1 先进机械制造技术概述

先进机械制造技术是以高精度、高效率、智能化为核心特征的制造体系，涵盖高速高精密数控加工、金属增材制造、超精密加工与智能装配等关键工艺。高速数控技术通过多轴联动、高转速主轴及动态误差补偿算法，实现复杂曲面与异形零件的高效加工。增材制造采用激光熔融或电子束工艺，使复杂内腔结构与多功能组件一体化成形成为可能，显著提高结构集成度与材料利用率[1]。超精密加工技术利用纳米级控制与超硬刀具，突破传统加工精度瓶颈，满足电力设备关键部件微观表面质量要求。智能制造系统集成信息感知、数据驱动与过程自适应控制，在复杂制造环境下实现加工全过程的精度优化与协同管理。

2 电力设备制造工业特点分析

2.1 电力设备制造的技术特点

电力设备制造具有高定制化、高可靠性和长生命周期要求的技术特性，涉及多学科交叉、多工艺融合的复杂过程。设备结构通常尺寸庞大、部件种类繁多，制造中需实现大尺寸、高精度的协同控制，确保各功能模块在极端运行环境下保持稳定性。对绝缘性能、热稳定性与机械强度等性能指标的综合控制要求严苛，材料处理、结构成形与功能实现之间需高度协调。制造过程普遍依赖精密加工与高强度装配技术，装配过程要求高匹配度和低公差耦合，并需在各环节嵌入多层次检测技术以控制误差累积和产品一致性。

2.2 主要制造环节及技术瓶颈

电力设备制造包括原材料预处理、复杂结构件加工、精密装配与整机调试等核心环节，制造周期长、工艺流程复杂。大型零部件在高精度加工过程中易产生热变形与残余应力，造成形位偏差控制难度大。多层结构件装配中存在装配误差传递现象，严重影响整体运行稳定性。部分特殊工艺环节仍依赖人工操作，制约生产节拍与一致性控制。测试环节自动化水平不足，系统联调过程中的故障定位效率低。制造设备与过程控制

系统的集成度不高，导致工艺优化依赖经验判断，缺乏基于数据驱动的智能决策机制，难以支撑高质量、高效率的稳定生产体系。

3 先进机械制造技术在电力设备制造中的应用

3.1 关键部件加工工艺优化

电力设备中的关键部件如发电机转子、变压器铁芯叠片、大型母线导体及断路器触头等，对几何精度、尺寸公差及表面完整性均有极高要求。针对转子类大尺寸旋转构件，其加工需采用多坐标联动高刚性数控车铣复合设备，配合主动热补偿与在线测量系统，实现长轴类构件在加工过程中的形位误差控制，轴向跳动需控制在0.015 mm以内。变压器铁芯叠片则依赖高精密激光切割与高速冲压设备，采用真空退火及涂层处理，确保片间绝缘性能与磁导率一致性，其叠装平整度公差要求小于 ± 0.03 mm[2]。在高导电铜母线加工中，引入高压冷却辅助切削工艺可将切削温升控制在40 ℃以内，有效防止材料软化与尺寸漂移。针对断路器触头复杂轮廓特征，采用五轴联动加工与仿真路径优化技术，结合电极蚀除精整工艺，控制表面粗糙度在Ra0.4 μm以内，显著提升电接触性能与耐电弧寿命。电力设备关键部件加工工艺及性能控制参数见表1所示。

表1 电力设备关键部件加工工艺及性能控制参数

关键部件	采用技术	控制参数	性能指标
发电机转子	多坐标联动数控加工、热补偿系统	轴向跳动≤0.015 mm	高速稳定运行、同心度提升
变压器铁芯叠片	激光切割、高速冲压、真空退火处理	叠装平整度公差 ± 0.03 mm	磁导率一致、绝缘性能稳定
铜质母线导体	高压冷却辅助切削	切削温升≤40 ℃	尺寸稳定、导电性能可靠
断路器触头	五轴加工、路径优化、电极精整工艺	表面粗糙度≤Ra0.4 μm	接触电阻小、耐电弧寿命长

3.2 装配精度控制与智能辅助装配

电力设备装配过程涉及多级结构与功能部件的高精度耦合，误差控制直接影响成套设备的电气性能与结构完整性。在大型变压器总装中，铁芯、绕组与夹件的空间配合需精确控制，采用激光测距系统配合数字装配工艺，实现三维坐标数据的实时捕捉与误差修正，定位精度可稳定保持在 ± 0.05 mm。智能拧紧系统通过扭矩与角度双重闭环控制，有效提升关键连接节点的受力一致性，典型应用中螺栓预紧力波动控制在 ± 5%以内[3]。在环节协同中，集成力控协作机器人辅助完成高重复精度的插接与配线作业，结合3D视觉识别系统进行部件姿态识别与精准定位，有效避免人工干预误差。针对高压开关设备的装配过程，引入数字化工艺仿真与虚拟装配验证机制，基于有限元数据与刚度匹配分析优化装配路径，实现装配预紧、形变控制与结构平衡的全过程可控管理。

3.3 增材制造在结构创新中的辅助作用

增材制造技术通过逐层堆积材料方式实现复杂结构的一体化成形，为电力设备轻量化与结构功能集成提供精密制造支持。针对高压开关壳体与定制连接器结构，选用激光选区熔化（SLM）工艺加工高强铝合金与不锈钢材料，可在不增加结构体积的前提下构造内置冷却通道和应力缓释结构，零件壁厚控制精度优于 ± 0.05 mm。多孔结构或功能梯度材料的引入，有效优化电场分布与热传导路径，内部复杂通道孔径精度可达 ± 0.03 mm，广泛用于高负载发热部件的结构集成设计。对比传统工艺，采用增材制造可使结构零件数量减少30%以上，装配工序压缩40%左右，同时提升单位体积内的功能密度。

3.4 表面处理与功能提升技术应用

电力设备长期运行于高压、高温、腐蚀及电蚀等复杂环境中，对关键部件表面性能提出极高要求。采用超音速喷涂、等离子熔覆及物理气相沉积（PVD）技术对接触件、导体与支撑结构表面进行功能强化，可显著提升抗电弧侵蚀性与表面电阻稳定性[4]。在高压导电部件中应用钨铜复合涂层，涂层结合强度大于80 MPa，导电性能稳定，耐电弧次数超过5 000次。对于高温工况下运行的绝缘支架，采用纳米陶瓷涂层处理，其热导率可控制在0.8 W/（m·K）以下，同时具备击穿电压高于15 kV/mm的介电强度，显著增强绝缘稳定性。在电机铁芯与发电机定子槽中实施超疏水涂层处理，有效抑制冷凝积液与粉尘沉积，表面接触角提升至140° 以上，具备长期自清洁功能。

3.5 数字化与智能制造系统建设

电力设备制造向高可靠性与多品种柔性化方向发展，需构建基于模型驱动与数据融合的智能制造系统。通过三维数字建模与虚拟装配，制造过程在设备投产前实现仿真验证，典型流程优化后生产准备时间缩短35%以上。采用基于CPS（Cyber-Physical System）的数字孪生平台，对设备制造全过程建立数字镜像，实现对关键工艺参数（如刀具磨损、加工温升与装配误差）的动态感知与实时调整。在制造执行层，引入边缘计算终端与工业物联网架构，实现关键节点如焊接、绝缘固化与高压

测试的精准工况控制，参数响应时间控制在200 ms以内。质量追溯体系通过二维码与RFID技术标识组件全生命周期信息，支持基于数据分析的失效预测与维保优化[5]。

4 实施难点与发展趋势

4.1 技术集成难度与标准体系缺失

电力设备制造涉及机械加工、热处理、绝缘处理、自动化装配与性能检测等多个技术模块，各环节之间存在工艺逻辑复杂、接口标准不统一等问题，造成先进制造技术在系统层面难以高效集成。尤其在智能制造与信息系统融合过程中，不同设备之间通信协议不兼容，工艺参数接口缺乏统一标准，导致数据孤岛现象普遍，严重制约流程自动化与质量闭环管理的落地实施。未来需推动制造标准的体系化建设，包括零部件接口规范、工艺流程数据标准、智能设备通信协议等方面的统一，以提升异构系统的兼容性与可扩展性。同时，应建立以行业为导向的智能制造集成验证平台，推动关键技术从点式应用向系统级融合演进，提高整个制造链的集成度与响应能力。

4.2 高端设备依赖与核心技术受制

高端数控机床、精密测量设备、智能控制系统等是保障电力设备高质量制造的关键支撑，但在多个核心领域仍存在对国外进口产品的依赖，尤其在五轴加工中心、高速主轴、动态补偿控制器等方面自主化程度偏低。进口设备在关键应用中受制于技术封锁与供应链不稳定，增加了制造过程的不确定性与成本风险。此外，高端软件系统如CAD/CAM一体化平台、虚拟调试工具及工业仿真引擎在算法性能和工业适配性方面仍存在明显差距。未来发展方向应聚焦核心装备的自主可控攻关，推动精密制造装备国产替代，通过材料、结构与控制一体化设计提升国产装备稳定性与精度控制能力，同时加快构建国产工业软件生态体系，实现全流程平台化和自主可控的技术闭环。

4.3 人才体系与技术转化效率

电力设备制造的高端化发展对复合型技术人才提出更高要求，当前在高精度加工、智能制造集成、系统建模与工业软件开发等领域存在明显的人才缺口。现有技能结构难以满足多学科交叉与系统性工程实施的需求，导致新技术转化效率低下、生产线升级周期过长。在科研与产业之间，缺乏高效的技术转化机制，创新成果难以快速嵌入现有制造流程。未来需构建以企业为主体、产学研协同为支撑的高层次技术人才培养体系，强化在岗工程技术人员的复合能力训练，提升新技术落地执行力。同时，需建立技术孵化与试验验证机制，推动制造工艺与装备在中试阶段的迭代优化，形成从实验室到工程现场的快速闭环，提升整体制造系统的技术吸收与创新能力。

5 结束语

总而言之，先进机械制造技术正逐步重构电力设备制造的工艺基础与技术体系，从高精度加工、增材制造到数字化协同系统，各类技术在提升制造质量、效率与稳定性方面发挥了核心作用。面对结构复杂、精度要求极高的电力装备制造任务，这些技术提供了有力支撑，推动产品性能持续优化与生产方式深度转型。未来，应进一步加强关键技术集成与装备自主化发展，构建面向智能化、柔性化的新型制造体系。

参考文献

[1]刘威.先进制造技术及其在电力设备制造工业中的应用[J].现代制造技术与装备,2020(3):168-169.

[2]夏中坚.试论先进制造技术在电力设备制造工业中的应用[J].新疆有色金属,2022,45(6):103-104.

[3]董磊.先进机械制造技术及其在电力设备制造工业中的应用研究[J].城市建设理论研究(电子版),2019(34):28.

[4]郑潇潇.电力设备制造企业供应链管理的优化策略[J].商业2.0,2025(19):163-165.

[5]张轶东.电力设备智能制造过程中异常数据检测方法研究[J].电工技术,2025(9):186-189,193.

（本文编辑 曹 阳）

