电气装备制造过程质量检测技术升级与智能化改造分析

陈　辉
天津航海仪器研究所　天津　300131

摘　要：电气装备制造是国民经济的基础性、战略性产业，其产品质量直接关系电力系统运行安全。传统质量检测以人工目视、手动量具和离线抽检为主，存在效率低、覆盖不全面、数据价值未挖掘等突出问题。本文系统分析了电气装备制造过程质量检测面临的技术瓶颈，梳理了机器视觉、数字化测量、在线监测和智能分析等核心技术及其适用场景，围绕检测方式从人工向自动、检测形态从离线向在线、检测职能从把关向预防的三重升级路径构建智能化改造框架，并从技术选型、数据贯通和组织变革三个维度提出推进策略，为电气装备制造企业质量检测升级提供参考。

关键词：电气装备制造；质量检测；智能化改造；机器视觉；在线检测

引言：电气装备制造涵盖变压器、开关设备、电力电缆、控制设备等关键产品，是电力工业和重大基础设施建设的重要支撑。随着我国电力装机规模持续扩大、新能源装备需求快速增长以及“双碳”目标驱动下的电网升级改造加速，电气装备制造行业迎来了广阔的市场空间，同时也对产品质量提出了更高要求。以机器视觉、智能传感、工业互联网为代表的新一代信息技术为质量检测的智能化升级提供了技术条件。本文旨在分析电气装备制造过程质量检测的现状与瓶颈，探讨技术升级与智能化改造的可行路径。

1 电气装备制造过程质量检测的现状与瓶颈

1.1 电气装备制造的产品特点与质量要求

电气装备制造涵盖变压器、开关设备、电力电缆、控制设备、绝缘子等产品类型，是电力系统安全运行的基础保障。其关键质量特性包括电气性能（绝缘强度、耐压能力、通断能力）、机械性能（操作寿命、机构强度）、尺寸精度（配合公差、安装尺寸）和外观质量（表面缺陷、标识规范）等多个维度。行业标准体系涵盖GB、IEC、DL等多个层级，对各类产品的出厂检验项目、试验方法和判定准则作出了详细规定。电气装备的质量问题可能导致电力事故、设备损坏甚至人身伤亡，后果极为严重，因此质量检测在电气装备制造过程中具有不可替代的地位。

1.2 传统检测方式的主要问题

传统电气装备制造质量检测高度依赖人工目视检查、手动量具测量和离线抽样检验，存在多重局限。人工目视检测受主观因素影响大，长期重复劳动易导致视觉疲劳，漏检率和误判率难以稳定控制。手动量具测量效率低、数据记录环节多，人为读数误差和转录错误难以完全避免。对复杂参数及隐蔽缺陷缺乏有效检测手段，许多关键质量特性仅依靠最终成品试验确认，缺少过程控制。检测数据零散、纸质记录为主，难以进行系统化统计分析，质量改进缺乏数据基础。离线抽检方式无法及时发现偶发性质量波动，不合格品产生后才被发现，造成返工或报废损失，各检测环节形成信息孤岛，质量问题难以快速定位和追溯[1]。

1.3 智能化改造的驱动力与紧迫性

智能化改造的驱动力来源于多个方面。市场层面，用户对电气装备产品质量和可靠性的要求持续提升，质量已成为企业获取订单和维持客户信任的核心竞争力。竞争层面，行业同质化竞争加剧，质量检测能力正在成为区分企业制造水平的关键标识。政策层面，《中国制造2025》等文件明确将智能检测装备和在线检测系统列为重点发展方向。技术层面，机器视觉、智能传感、工业互联网等新一代信息技术日趋成熟，为检测智能化提供了可行路径。效益层面，一次合格率提升可显著减少返工浪费、降低质量成本、提升盈利能力，智能化检测投入可在较短时间内获得可观回报。

2 质量检测技术升级的核心方向

2.1 检测方式：从人工检测向自动检测转变

人工检测的固有局限—— 主观性强、重复劳动疲劳、一致性难以保证—— 决定了其无法适应现代制造对检测质量和效率的要求。机器视觉检测技术通过高分辨率工业相机配合图像处理算法，可实现电气装备外观缺陷的自动识别，如绝缘子表面裂纹、气泡、麻面，PCBA焊点质量，铭牌标识和接线端子位置尺寸的自动校验。在复杂几何量测量场景中，基于机器人和柔性夹具的自动测量系统可替代人工操作，实现多尺寸参数的快速自动采集。检测结果自动判定并与分拣装置联动，合格品与不合格品自动分流，检测效率较人工方式提升数倍至

数十倍，同时消除了人为因素导致的检测质量波动。

2.2 检测形态：从离线检测向在线检测转变

离线检测需要在制品从生产线上取下后送至检测区域进行，存在时间滞后和覆盖局限。在线检测将检测工位嵌入生产线，实现随行检测，可在生产节拍内完成对每个产品的质量检验，及时发现工序异常。关键技术包括在线式三坐标测量机在机加工自动线中的应用、激光轮廓扫描仪在钣金件折弯尺寸实时检测中的应用、在线耐压测试和绝缘电阻测试在装配流水线中的集成[2]。在线检测数据可实时反馈至生产设备，实现“检测-补偿-再检测”的闭环控制，当检测值偏离目标范围时自动补偿加工参数，将质量控制在生产过程中而非事后筛选。

2.3 检测职能：从质量把关向预防控制转变

传统检测的角色是末端的“把关者”—— 区分合格与不合格产品。智能化检测的转型方向是从“事后把关”走向“事前预防”。检测数据向上游反馈至设计和工艺环节，通过统计过程控制（SPC）识别过程异常趋势，在产生不合格品之前提前预警，为工艺参数调整提供依据。检测数据向下游传递至成品档案和售后服务体系，为产品追溯和故障分析提供数据基础。智能检测还可在预测性维护中发挥作用—— 通过对设备状态监测数据的分析，预测工具磨损、精度漂移等趋势，在影响产品质量之前安排维护。这一转变使检测职能从成本中心向价值创造中心演进。

3 智能化改造的关键技术与系统集成

3.1 机器视觉检测技术

机器视觉系统由光源、镜头、工业相机、图像采集卡和图像处理软件构成，通过模拟人眼视觉功能实现自动检测。在电气装备制造中，视觉检测适用于外观缺陷检测（划痕、凹坑、气泡、杂质、颜色差异）、尺寸测量（间隙、段差、位置度）以及字符识别与追溯码读取（OCR/OCV）。深度学习的引入使视觉检测能力大幅提升：对于裂纹、毛刺等随机性、非规则缺陷，传统算法编程困难，深度学习通过大量样本训练自动提取缺陷特征，显著降低漏检率。硬件选型需针对电气装备尺寸跨度大的特点，从小型元件到大型变压器合理选配相机分辨率与视野，确保检测精度和覆盖范围满足要求。

3.2 数字化精密测量技术

电气装备制造涉及大量精密几何量检测需求，如轴类件直径与圆度、触头弹簧力、平面度、同轴度等。数字化量具与测量仪器包括数显千分尺、电子比较仪、数字化硬度计、电子万能试验机等，可实现测量数据的自动采集与上传，消除人工读数与转录误差。三坐标测量机（CMM）适用于复杂几何量的高精度检测，通过探针或光学测头对工件进行三维空间坐标测量，生成完整的尺寸检测报告。激光跟踪仪在大尺寸电气装备（如变压器外壳）检测中具有独特优势，可在数米范围内实现亚毫米级测量精度。测量数据通过无线或有线网络自动上传至质量管理系统，实现数据的实时归集和分析[3]。

3.3 在线监测与传感技术

在线监测适用于产量大、节拍快的生产线场景。力觉和力矩传感器在装配质量检测中发挥重要作用—— 插拔力监测可验证连接器的装配质量，螺栓拧紧扭矩实时监控可确保每个螺纹连接点达到设计扭矩要求，防止松动或过紧。温度传感和红外热成像用于在线检测触头温升和局部过热隐患。声学和振动检测通过分析开关设备操作机构的动作声纹、监测变压器铁芯振动特征，可早期发现机械异常。电气性能在线检测将线圈匝间绝缘、耐压、电阻等测试集成到流水线中，在每个产品流转过程中同步完成电气参数验证。各类传感器的数据通过工业物联网统一采集，为质量分析和过程控制提供实时数据源。

3.4 检测数据分析与质量管理系统

检测数据的价值不仅在于合格判定，更是质量改进的核心依据。质量管理系统的核心功能包括：检测数据的自动采集、存储与结构化组织；SPC统计过程控制，实时监控过程稳定性，识别异常趋势；质量追溯，按产品批次或序列号快速定位相关检测数据；质量问题统计分析，通过柏拉图、因果图、8D报告等工具系统分析质量问题的根本原因。质量管理系统与ERP/MES系统的集成实现检测结果自动触发合格转序或不合格品处理流程，将质量管控嵌入生产管理的每个环节，变事后补救为过程控制。

4 推进策略与保障措施

4.1 技术选型与分步实施路径

第一步，从技术成熟、部署周期短的机器视觉检测入手，替代重复性高、劳动强度大的人工目检环节，在较短时间内实现快速见效，同时积累数字化检测的实施经验和管理认知。第二步，将数字化量具与数据采集系统联网，打通离散检测设备之间的数据通道，消除信息孤岛，实现检测数据的电子化记录和统一管理，为后续的数据驱动决策奠定基础。第三步，打通检测数据与MES/ERP系统的双向接口，使检测结果能够自动触发合格转序、不合格品处理和质量预警等流程，实现从“检测出数据”到“数据驱动行动”的质量闭环管理。第四步，基于长期积累的历史数据建立预测性质量管控模

型，利用数据分析识别质量波动的早期征兆，实现从被动“检测”向主动“预判”的转变。改造的紧迫程度和投入产出比应作为确定优先顺序的决策依据，优先改造对最终产品质量影响最大、人工检测最困难、改造效益最显著的瓶颈工序。中小企业可选择“轻量化”改造方案，如手持式智能检测终端配合云端数据分析平台，降低一次性投入门槛，逐步积累经验后再向全流程智能化方向拓展[4]。

4.2 数据贯通与系统集成

打破“信息孤岛”是实现智能化检测价值的关键前提。检测设备与上层管理系统（MES、ERP）的深度数据集成应作为改造项目的核心内容，确保检测数据不仅用于当班产品的合格判定，更能与生产工单、设备状态、物料批次、操作人员等多维信息进行关联分析，形成完整的质量数据图谱。统一数据接口标准是系统集成的基础性工作，OPC UA、MTConnect等工业通信协议的合理选型与应用至关重要，企业应根据自身设备构成和信息化基础选择最适合的协议标准，避免因标准不统一造成的重复开发。基于统一数据平台，当质量问题发生时，质量管理人员可快速定位至具体工序、设备和批次，将问题排查时间从传统的数天大幅缩短至数小时甚至数十分钟，显著提升质量问题的响应速度和处理效率。在推进数据开放共享的同时，数据安全与工业网络安全须同步保障，应建立完善的用户访问权限分级管理体系和数据加密传输机制，确保核心生产工艺参数和产品质量信息在流转过程中安全可控，防止敏感数据泄露。

4.3 组织能力建设与人才培养

智能化检测对人才能力结构提出了全新要求——既懂电气装备制造工艺、又懂智能检测技术原理、还具备数据分析能力的复合型人才需求快速增长。企业应将“技术+管理”复合型质量工程师的培养纳入战略性人才规划，使其能够理解检测技术原理、分析质量数据规律、推动基于数据的持续质量改进。人才培养路径应坚持校企合作定向培养与在职培训相结合的双轨策略，通过与高等院校和职业院校建立产教融合合作关系，将企业岗位能力需求前置到人才培养环节，同时通过内部技术学堂、行业技术交流等方式持续提升在职人员能力。组织架构层面应逐步从独立的质量部门对质量“负全责”的传统模式，向“全员质量”文化转型，使质量意识和检测技术能力覆盖到设计、工艺、生产、设备维护等每个岗位。基层检测人员的技能升级尤为迫切，企业应通过制定系统的技能培训计划和设立技能等级晋升通道，帮助基层员工从手动操作向系统操作与数据分析转型，使其适应数字化、智能化的工作环境，实现人的智慧与系统效率的有机结合。

结束语

电气装备制造的质量检测正面临从传统人工检测向智能化检测转型升级的历史性机遇。本文系统分析了电气装备制造过程质量检测的现状瓶颈，提出了“检测方式从人工向自动、检测形态从离线向在线、检测职能从把关向预防”的三重升级路径，构建了以机器视觉、数字化测量、在线监测和智能分析为核心的技术体系，并从技术选型、数据贯通和组织变革三个维度提出了推进策略。未来，随着人工智能和工业互联网技术的持续渗透，电气装备制造质量检测将朝着更精准、更高效、更智能的方向持续演进。

参考文献

[1]冯贺平,赵伯鑫.机器视觉技术在智能制造领域中的应用研究[J].通讯世界,2024,31(10):193-195.

[2]李淳,杨帆,罗晖,等.基于工业互联网平台的工艺质量管控大数据分析研究[J].数码设计,2024(6):80-83.

[3]杜炳胜.电气产品质量检测体系与标准化建设策略[J].大众标准化,2026(7):10-12.

[4]李继宏.面向高端制造装备质量管控的智能检测系统设计与应用研究[J].现代制造技术与装备,2026,62(4):41-43.