

新型电机试验检测方法的创新探索

张阳平 李希明 赵 伟 马燕君

浙江方圆检测集团股份有限公司 浙江 杭州 310018

摘 要：传统电机试验检测依赖离线静态架构，存在动态响应不足、场景匹配度低等局限。新型方法通过智能传感器与物联网构建实时监测网络，结合深度学习与强化学习算法挖掘多源数据，开发多物理场耦合虚拟测试技术，拓展超声相控阵等无损检测应用。这些创新能提升电机制造质量、推动运维智能化、促进技术创新，满足新能源汽车等新兴产业对电机性能的高要求，为电机测试领域提供更精准高效的解决方案。

关键词：新型电机；试验检测方法；创新探索

引言

电机作为关键动力设备，其性能检测对制造、运维及技术发展至关重要。传统检测方法在动态响应、场景模拟等方面的局限，难以适应新型电机及新兴产业需求。为此，本文探索新型电机试验检测方法，从智能传感与物联网监测、先进数据分析算法、虚拟测试与仿真技术、无损检测拓展应用等方面展开研究，旨在突破传统局限，为电机领域发展提供技术支撑。

1 传统电机试验检测方法及其局限性

1.1 传统检测方法概述

传统电机试验检测多依赖离线式静态测试架构，通过搭建固定电路拓扑，采用接触式传感器采集电压、电流、转速等关键参数，结合人工读数或简易数据记录仪完成基础性能评估。这类方法常以额定工况为核心测试点，通过调节外接负载模拟不同运行状态，利用功率分析仪、示波器等仪器实现电参数同步测量，同时借助温度传感器阵列监测绕组与铁芯的热分布特性。在机械性能检测环节，普遍采用扭矩传感器直接耦合的方式获取输出力矩，配合转速测量装置计算效率曲线，部分场景下会引入振动加速度传感器捕捉机械振动频谱，以此判断转子动平衡状态与轴承磨损程度。对于绝缘性能测试，则主要依靠兆欧表和耐压测试仪，通过施加恒定直流电压或短时工频高压，评估绝缘电阻与击穿强度等指标，测试过程中需人工干预完成接线切换与工况调整，数据处理多依赖事后离线分析软件进行曲线绘制与参数计算。

1.2 传统方法的局限性

传统检测方法在动态响应能力上存在显著不足，由于依赖固定测试工装与手动调节机制，难以实时跟踪电机在宽频域、变工况下的瞬态特性，尤其在处理变频驱动电机的谐波损耗与高频电磁兼容问题时，测试数据的

时间分辨率无法满足精准分析需求。静态测试环境与实际运行场景存在明显差异，外接负载的惯性匹配偏差会导致动态效率测试结果失真，而接触式传感器的安装位置限制，使得关键部位的温度场与应力场分布难以被完整捕捉，容易遗漏局部过热或机械共振等潜在风险点。测试流程的串行化操作模式极大制约了检测吞吐量，单次试验需经历多次接线调整与工况稳定过程，数据采集与分析的非实时性导致试验周期冗长，且人工介入环节的增多不仅增加了操作误差累积概率，也使得多参数同步采集的时间同步精度难以控制在毫秒级以内。传统方法对新型电机拓扑的适应性较弱，面对永磁同步电机的弱磁控制特性或无刷直流电机的换相转矩脉动测试时，现有检测架构的参数调节范围与采样率往往无法覆盖其特殊运行区间，导致部分关键性能指标的评估存在盲区。

2 新型电机试验检测方法的创新思路

2.1 基于智能传感器与物联网技术的监测

采用具备自校准、自适应调节功能的智能传感器，可实时精准捕捉电机运行中的微弱信号变化，如在绕组关键部位嵌入光纤光栅温度传感器，利用其高灵敏度与抗电磁干扰特性，能精确感知细微温度波动，为绕组热故障早期预警提供关键数据。借助微机电系统（MEMS）加速度计与陀螺仪组成的复合传感器，可全方位监测电机振动与姿态变化，通过先进的信号调理与数据融合算法，获取电机运行状态的多维特征信息。将这些智能传感器接入物联网架构，利用低功耗广域网（LPWAN）技术，如窄带物联网（NB-IoT）或LoRa，实现传感器数据的远距离、低功耗传输，突破传统有线传输的布线繁琐与空间限制。在电机群监测场景中，通过构建边缘计算节点，对海量传感器数据进行实时预处理与初步分析，提取关键特征参数后再上传至云端服务器，既能减轻网络传输压力，又能实现本地快速决策，例如在检测到异常振动

或温度突变时,及时触发本地报警并采取初步保护措施,提升电机运行的可靠性与安全性^[1]。

2.2 引入先进的数据分析算法

运用深度学习中的卷积神经网络(CNN)与循环神经网络(RNN)相结合的混合模型,对电机运行的多源异构数据进行深度挖掘。CNN擅长处理传感器采集的图像化数据,如振动频谱图、红外热像图等,能够自动提取数据中的局部特征;RNN则对时间序列数据具有强大的处理能力,可捕捉电机运行状态随时间的动态变化趋势,如电流、电压的波动规律。通过将两者有机结合,模型能够更全面、准确地学习电机正常与故障状态下的特征模式,实现对电机故障类型与程度的精准诊断。在模型训练过程中,采用迁移学习技术,利用大量已有的电机运行数据对模型进行预训练,然后针对特定类型电机与应用场景,使用少量现场数据进行微调,既能减少训练时间与数据需求,又能提高模型的适应性与泛化能力。引入强化学习算法,根据电机实时运行状态与性能指标,动态调整电机的控制策略与运行参数,以实现电机在不同工况下的最优运行,例如在电机负载频繁变化时,通过强化学习自动优化变频驱动的输出频率与电压,提高电机的运行效率与稳定性。

2.3 开发虚拟测试与仿真技术

构建电机的多物理场耦合虚拟模型,综合考虑电机运行中的电磁、热、机械等多种物理过程的相互作用。利用有限元分析(FEA)技术对电机内部电磁场进行精确求解,模拟不同工况下的磁场分布与电磁力特性;通过计算流体力学(CFD)方法分析电机散热通道内的流体流动与传热过程,预测电机的温度分布与热性能;结合多体动力学理论对电机的机械结构进行动力学仿真,评估转子的动平衡状态与轴承的受力情况。将这些多物理场仿真结果进行耦合分析,能够更真实地模拟电机在实际运行中的复杂行为。在虚拟测试环境中,设置多种极端工况与故障场景,如电机堵转、绕组短路、轴承失效等,通过虚拟模型的快速迭代计算,提前评估电机在这些异常情况下的性能变化与可靠性,为电机设计优化与故障预防提供有力依据。利用虚拟现实(VR)与增强现实(AR)技术,为测试人员提供沉浸式的测试体验,使其能够在虚拟环境中直观地观察电机内部结构与运行状态,实现对电机测试过程的可视化交互操作,提高测试效率与准确性。

2.4 无损检测技术的拓展应用

将超声相控阵检测技术应用于电机绕组与铁芯的内部缺陷检测,通过精确控制超声换能器阵列的发射与接

收时间,实现对检测区域的多角度、高分辨率扫描,能够有效检测出绕组内部的断股、虚焊以及铁芯的裂纹、松动等缺陷,且检测精度可达毫米级。采用X射线计算机断层扫描(CT)技术对电机的关键部件进行三维成像分析,获取部件内部的详细结构信息,可用于检测复杂结构部件的内部缺陷与制造工艺缺陷,如永磁体的内部气孔、绕组的绕制质量等,为电机的质量评估与故障诊断提供全面、准确的信息。拓展微波检测技术在电机绝缘性能检测中的应用,利用微波与绝缘材料相互作用时的反射、透射特性,检测绝缘材料的老化程度、受潮情况以及内部的分层缺陷等,相比传统的绝缘电阻与耐压测试方法,微波检测技术具有非接触、快速、可在线监测等优势,能够更及时、准确地评估电机绝缘系统的健康状况,保障电机的安全可靠运行^[2]。

3 新型电机试验检测方法的应用前景

3.1 助力电机制造企业提升产品质量

(1)新型检测方法通过构建全流程数字化测试闭环,可在产品试制阶段实现多维度性能参数的并行采集与实时分析,借助智能算法对电机关键指标进行溯源性诊断,精准定位设计缺陷与工艺偏差,例如在永磁体充磁均匀性检测中,利用三维磁场扫描技术与多物理场仿真模型的耦合分析,能识别出微观磁性能波动对电机空载损耗的影响机制,为磁路优化提供量化依据。(2)基于虚拟测试平台的数字化样机验证,可在物理样机制造前完成多工况下的性能模拟与极限工况验证,通过仿真数据与实测数据的动态比对,实现设计参数的快速迭代优化,减少因原型机反复试制带来的资源消耗,同时借助无损检测技术的在线集成应用,可在生产过程中对绕组绕制精度、铁芯叠压密度等关键工艺节点进行100%全检,消除传统抽检模式下的质量盲区。(3)通过建立电机性能数字孪生体,将检测数据与制造过程参数进行深度融合,形成覆盖原材料特性、加工工艺、装配精度的关联分析模型,能在批量生产阶段实现质量波动的早期预警,例如通过分析绝缘材料介损因子与固化工艺参数的映射关系,可提前调整烘焙曲线以规避绝缘性能离散性问题,最终实现产品一致性与可靠性的显著提升。

3.2 推动电机运行维护的智能化发展

(1)新型检测方法构建的分布式监测网络,可实现电机在役运行状态的持续感知与远程诊断,智能传感器采集的振动、温度、局部放电等特征量通过边缘计算节点进行实时分析,能在故障萌芽阶段识别出轴承早期磨损、绕组绝缘老化等潜在风险,通过构建基于运行大数据的健康度评估模型,为维护策略制定提供精准依据。

(2) 将无损检测技术与在线监测系统相结合,可在不断电机运行的前提下完成绝缘性能与机械状态的动态评估,例如采用超声波相控阵技术对定子绕组进行周期性扫描,结合微波检测获取的绝缘介质损耗数据,构建绝缘系统剩余寿命预测模型,实现从定期维护向预测性维护的转型,显著降低非计划停机时间。(3) 基于增强现实技术的可视化维护平台,能巧妙地将检测数据与电机三维模型进行实时无缝叠加,把复杂抽象的电机内部信息以直观形象的方式呈现出来,为运维人员提供清晰明确的故障定位与维修指引。结合数字孪生体的仿真推演功能,它还能在实施维护前模拟不同维修方案对电机性能的影响,进而优化维修流程与备件更换策略,提升维护效率与修复质量。

3.3 促进电机技术的创新与发展

(1) 新型检测方法提供的宽频域、高精度测试能力,为新型电机拓扑结构的研发提供了关键技术支撑,例如在轴向磁通电机的性能评估中,利用多通道同步采集技术与三维力场测量系统,可精准捕捉不同负载下的转矩脉动特性与端部漏磁效应,为磁路结构优化与控制策略改进提供量化数据。(2) 通过将先进数据分析算法与测试系统深度融合,我们得以深入挖掘电机运行过程中那些潜藏的隐性关联规律。以高温超导电机的试验为例,利用深度学习模型细致分析液氮冷却系统参数与超导绕组载流能力之间的动态关系,能够精准揭示超导材料在复杂电磁环境下的性能衰减机制。这一突破将为超导电机的优化设计提供依据,有力推动超导电机实用化进程。(3) 虚拟测试与物理测试的协同联动,形成了快速迭代的研发闭环,研发人员可通过虚拟平台验证新型冷却结构、新型绝缘材料的应用效果,再通过实物测试进行验证与修正,这种虚实结合的研发模式大幅缩短了新技术从概念提出到产品落地的周期,加速了高效节能、高功率密度电机的技术突破。

3.4 适应新兴产业对电机性能的高要求

(1) 针对新能源汽车驱动电机的高转速、高动态

响应需求,新型检测方法可实现宽转速范围内的瞬态性能精准测试,通过高频响传感器与实时数据处理系统,捕捉电机在急加速、急减速过程中的电流谐波与转矩波动特性,为电机与整车动力系统的匹配优化提供关键参数,满足车辆动力性能与续航能力的双重要求。(2) 在工业机器人伺服电机领域,借助先进的微振动检测技术与高精度多轴动态测试平台,可实现纳米级定位精度下的转矩脉动与定位误差精准测试。结合电磁兼容测试系统对高频开关噪声的细致捕捉与深度分析,可全方位确保电机在精密控制场景下的运行稳定性,完美适应机器人末端执行器对动态响应与控制精度的严苛要求。(3) 面对航空航天领域特种电机的极端环境适应性需求,新型检测方法可模拟高温、低温、高海拔等特殊工况,通过集成式传感器阵列与多物理场同步测试技术,评估电机在极端条件下的绝缘性能、机械强度与效率特性,为电机在恶劣环境下的可靠运行提供全面的性能保障,满足新兴产业对电机高性能、高可靠性的多元化需求^[3]。

结语

综上所述,新型电机试验检测方法通过融合智能传感、物联网、先进算法、虚拟测试及无损检测等技术,有效克服了传统方法的诸多局限。这些创新不仅能助力电机制造企业提升产品质量,推动运行维护智能化,还能促进电机技术创新,满足新兴产业的高要求。未来,随着技术不断发展,新型检测方法将更加完善,为电机领域的持续进步提供更坚实的保障。

参考文献

- [1] 李佳桐,张跃,符栋梁,等.发电机螺栓松动故障特征检测方法及其试验研究[J].噪声与振动控制,2021,41(2):136-139.
- [2] 白国军,葛亮.非车载充电机检测试验台方案设计[J].大众标准化,2024(10):181-183.
- [3] 何剑.新能源汽车电池包电机电控试验检测[J].车时代,2021(1):37.