

精密机电设备的故障诊断与维护策略研究

段先萍

360313*****3514

摘要: 随着智能制造产业的蓬勃发展, 精密机电设备已成为现代工业生产体系的核心支撑, 其运行稳定性直接决定生产效率与产品质量。该类设备结构集成化、控制智能化程度不断提升, 导致故障诱因更趋复杂, 传统诊断与维护模式难以满足精准化、高效化需求。本文聚焦精密机电设备故障诊断与维护核心问题, 剖析设备故障的典型特征与形成机理, 明确诊断与维护的核心目标。系统探究主流故障诊断技术的应用场景与适配性, 重点分析数据驱动方法突破传统诊断局限的优势。结合全生命周期管理理念, 构建覆盖预防、诊断、修复的一体化维护体系, 提出针对性优化策略, 为提升设备运行可靠性、降低运维成本提供参考。

关键词: 精密机电设备; 故障诊断; 维护策略; 数据驱动

DOI: 10.64216/3104-9664.25.02.018

引言

在工业 4.0 与中国制造 2025 战略推动下, 精密机电设备在航空航天、高端装备制造等关键领域应用愈发广泛。这类设备融合多学科技术, 具有精度高、响应快等特点, 但也面临工况复杂、故障排查难度大等问题。设备故障可能导致生产中断, 造成经济损失, 甚至引发安全隐患。传统“事后维修”与“定期保养”模式已难以适应设备运行的动态需求。如何实现故障早期预警、精准定位及维护科学规划, 成为行业亟待解决的课题。基于此, 本文开展相关系统性研究, 旨在为运维管理提供新的思路与方法。

1 精密机电设备故障的特征与机理

1.1 故障的多维特征表现

精密机电设备的故障特征呈现多维度、关联性强的特点, 这与其集成化的结构设计密切相关。从机械结构层面来看, 常见的特征包括振动异常、磨损加剧, 部分设备还会出现噪声增大、间隙变化等情况。这些机械故障特征往往较为直观, 但容易与其他系统故障相互混淆。电子系统的故障特征则表现为信号紊乱、参数漂移, 部分关键元器件损坏还会导致电路通断异常。控制系统作为设备的核心, 其故障特征主要体现在响应延迟、逻辑错误, 严重时会出现控制失灵的情况。这些不同系统的故障特征并非孤立存在, 机械结构的振动会影响电子元件的稳定性, 而电子系统的参数异常又会导致控制系统发出错误指令, 形成复杂的故障表象, 增加诊断难度。

1.2 故障的核心诱发因素

故障诱发因素可清晰划分为内部因素与外部因素, 两类因素相互作用, 共同影响设备的运行状态。内部因素主要源于设备自身的特性变化, 设备零部件的自然老化是不可避免的因素, 随着使用时间延长, 材料性能会逐渐下降。材料疲劳也是重要内部诱因, 在长期交变载荷作用下, 零部件容易出现裂纹等损伤。装配精度下降则可能由初期装配工艺缺陷或长期运行中的振动导致, 进而引发一系列故障。外部因素中, 运行环境的影响最为直接, 温度波动会改变零部件的配合间隙, 湿度变化易导致金属部件锈蚀和电子元件受潮, 粉尘污染会加剧机械磨损, 电磁干扰则会干扰电子信号传输。操作过程中的人为误操作、负载突变等因素, 也会对设备造成瞬时冲击, 诱发故障。

1.3 故障的传导与演化机理

故障的发生与发展遵循一定的传导规律, 其演化过程具有阶段性和关联性。通常情况下, 故障从设备的局部薄弱环节开始, 这些薄弱环节可能是设计上的短板, 也可能是易损耗的零部件。随后, 故障通过能量传递或信号关联逐步扩散至整个系统。以机械轴承为例, 初期的轻微磨损在设备运行中不易被察觉, 但会导致局部振动幅度小幅增加。随着磨损加剧, 振动能量不断传递, 引发轴系偏心, 轴系的异常又会影响与之连接的其他部件, 导致设备运行精度下降。若未及时干预, 最终会造成关键部件损坏, 使设备陷入停机状态, 形成完整的故障链式演化过程, 每个阶段的故障特征都与前一阶段存在直接关联。

2 精密机电设备故障诊断的关键技术

2.1 传统诊断技术的应用与局限

传统诊断技术以人工检测、离线分析为核心，在精密机电设备发展初期得到了广泛应用。振动监测中的频谱分析通过对设备振动信号的采集和处理，判断机械结构是否存在异常，这种方法在旋转机械故障诊断中较为常用。温度监测中的热电偶测量则通过接触式测温，掌握设备关键部位的温度变化，预防因过热引发的故障。此外，还有基于油液分析的诊断技术，通过检测润滑油中的金属颗粒含量判断零部件磨损情况。这类技术操作简便，对设备的改造需求低，成本相对较低。但随着设备复杂度提升，其局限性日益凸显，诊断过程依赖人工操作导致滞后性强，难以实现实时监测，诊断精度受操作人员经验影响大，对于隐性故障的识别能力不足，无法适应复杂工况下的诊断需求。

2.2 数据驱动诊断技术的核心优势

数据驱动诊断技术是近年来随着大数据和人工智能技术发展兴起的诊断方法，其核心是依托设备运行过程中的多源传感数据。这些数据涵盖振动、温度、压力、电流等多个维度，通过传感器实时采集并传输至数据处理中心。随后，利用机器学习、深度学习等算法对数据进行分析和建模，构建能够识别故障模式的诊断模型。与传统技术相比，其核心优势十分明显。首先，能够挖掘数据中的潜在关联，捕捉到故障发生前的细微变化，实现故障的早期预警，为维护工作争取时间。其次，诊断过程自动化程度高，减少了人为干预，降低了对操作人员经验的依赖。同时，随着运行数据的不断积累，模型的诊断精度与效率会持续提升，能够适应不同工况下的诊断需求，有效解决传统技术面临的难题。

2.3 多技术融合的诊断体系构建

多技术融合的诊断体系并非简单叠加不同诊断技术，而是通过有机结合实现优势互补，形成全方位的诊断能力。传统诊断技术经过长期实践积累了丰富的经验，对一些典型故障的识别具有成熟的判断标准，这一优势在融合体系中得到保留。数据驱动技术则凭借其强大的数据处理能力和学习能力，突破传统技术的局限，实现对复杂故障的精准识别。在实际应用中，这样的融合体系展现出显著效果。例如，利用红外热成像技术获取设备温度分布数据，能够快速定位过热区域，结合振动传感数据可判断过热是否由机械振动异常引起，再配合电

流信号数据能够进一步排查是否存在电气系统故障。通过多维度数据的整合分析，构建全面的诊断特征集，大幅提升复杂故障的诊断准确性，降低误诊和漏诊概率。

3 精密机电设备维护的现状与核心问题

3.1 现有维护模式的类型与不足

当前工业领域中，精密机电设备的维护模式主要包括事后维修、定期预防性维护与状态维修三种类型，每种模式都有其适用场景，但也存在明显不足。事后维修是在设备发生故障后再进行维修，这种模式无需提前制定维护计划，日常维护成本较低，在一些非关键设备维护中仍有应用。但其弊端十分突出，故障发生往往具有突发性，会导致生产中断，造成巨大的经济损失，且故障修复周期通常较长。定期预防性维护按照固定周期开展维护工作，能够在一定程度上减少突发故障，但这种模式缺乏对设备实际运行状态的考量，容易出现“过度维修”或“维护不足”的问题，增加维护成本或无法有效预防故障。状态维修基于设备运行状态进行维护，理念更为科学，但部分企业因监测手段有限，无法及时获取准确的设备状态数据，难以实现科学的维护决策。

3.2 维护管理中的协同性难题

维护管理是一项涉及多个环节的系统性工作，包括设备采购、运行监测、故障维修、备件管理等，各环节之间的协同配合直接影响维护效率。然而在实际工作中，协同性难题普遍存在，核心问题在于各环节之间的信息孤岛现象。设备采购部门掌握设备的原始参数和性能指标，但这些信息未能及时、完整地传递给运行监测和维修部门，导致后续工作缺乏充分的基础数据支持。运行监测部门实时获取设备运行数据，却因数据传递不及时，使维修部门无法根据最新运行状态制定针对性维修方案，只能依赖过往经验，影响维修精度。备件管理部门与维修部门之间也存在信息脱节，备件库存信息更新不及时，维修时常常出现关键备件短缺，而普通备件又大量积压的情况，严重影响故障修复效率，增加管理成本。

3.3 维护资源配置的优化瓶颈

维护资源配置不合理是当前精密机电设备维护工作中面临的重要问题，这一问题在中小企业中尤为突出，形成了明显的优化瓶颈。在人力资源方面，维护人员的技能结构与设备技术需求不匹配。随着设备智能化程度提升，对维护人员的跨学科知识要求越来越高，但现有维护人员大多只掌握单一领域技能，对于融合机械、电

子、控制等多学科的设备维护能力不足，导致高端设备的维护过度依赖外部技术支持，增加了维护成本。在设备资源方面，维护工具与检测设备更新滞后，部分企业仍在使用传统的检测工具，无法满足精密诊断与维修的需求，影响诊断精度和维修效率。在备件资源方面，储备结构失衡问题严重，关键备件因采购周期长、成本高而储备不足，普通备件却因采购计划不合理出现积压，占用大量资金。

4 基于全生命周期的精密机电设备维护体系构建

4.1 前期预防：基于风险评估的维护规划

基于全生命周期的维护体系，将前期预防作为重要环节，核心是开展基于风险评估的维护规划。在设备全生命周期的前期阶段，即设备投入运行初期，就要建立完善的基础信息档案。收集设备的设计参数、制造标准、运行工况要求等原始数据，同时记录设备初始运行状态下的各项性能指标。结合同类设备的历史故障数据，分析不同故障类型的发生概率和造成的影响程度，构建风险评估指标体系。通过定性与定量相结合的方法，对设备各部件和系统进行风险评估，精准识别潜在故障点。根据风险评估结果，针对不同风险等级的部件制定个性化的预防维护计划，明确维护内容、周期与标准。对于高风险部件，缩短维护周期，增加监测项目；对于低风险部件，合理延长维护周期，避免过度维护。通过这种方式，实现从“被动应对”到“主动预防”的转变，有效降低故障发生概率。

4.2 中期诊断：实时监测与故障快速响应

中期诊断是维护体系的核心执行环节，重点在于搭建设备运行实时监测平台，实现故障的及时发现与快速响应。实时监测平台以物联网技术为基础，在设备关键部位部署各类传感器，包括振动传感器、温度传感器、电流传感器等，实现多源数据的实时采集。通过数据传输网络将采集到的数据实时上传至云端或本地数据中心，利用构建的智能诊断算法模型对数据进行实时分析和处理。当监测数据出现异常时，系统能够自动识别故障类型和故障位置，并立即启动预警流程。预警信息会通过多种方式推送至相关维护人员，包括手机 APP、短信、平台弹窗等。同时，系统会自动生成初步的维修建

议，明确故障原因和需要更换的备件。维护人员接到预警后，可快速携带相关工具和备件赶赴现场开展精准维修，大幅缩短故障响应和修复时间。

4.3 后期优化：基于维护数据的持续改进

后期优化是维护体系持续完善的保障，通过基于维护数据的分析总结实现体系的迭代升级。建立专门的维护数据管理系统，对设备全生命周期内的各类数据进行全面记录与分类管理。这些数据包括故障诊断结果、维修过程记录、维护时间、使用的备件型号和数量、维护效果评估等。利用数据挖掘技术对这些数据进行深入分析，总结设备故障规律，找出容易发生故障的关键部件和薄弱环节，明确故障发生与运行工况、维护周期等因素的关联关系。根据分析结果，对前期制定的预防维护计划进行优化调整，合理修改维护周期和维护内容。同时，改进维护工艺，针对常见故障制定更为高效的维修流程。完善备件管理策略，根据故障发生频率合理调整备件储备种类和数量，实现维护体系的持续优化。

5 结论

精密机电设备的稳定运行是现代工业生产的重要保障，其故障诊断与维护工作的科学性和有效性直接影响企业的生产效率和经济效益。本文通过对精密机电设备故障特征与机理的分析，明确了故障的多维表现、诱发因素及演化规律，为诊断工作提供了理论基础。对故障诊断关键技术的研究表明，多技术融合体系能够有效弥补传统技术与单一智能技术的不足，提升诊断精度与效率。

参考文献

- [1] 谢歆鑫,胡璐萍.基于模糊数学法的造纸机电设备安全故障诊断机制研究[J].造纸科学与技术,2025,44(11):100-102.
- [2] 刘羽.煤矿机电设备故障诊断系统的智能化研究[J].仪器仪表用户,2025,32(11):36-38.
- [3] 李冬.电气设备故障检测与诊断技术研究[J].船舶物资与市场,2025,33(10):89-91.
- [4] 李梅,刘云飞,李雅楠.建筑机电设备远程故障诊断模型的构建与实现[J].家电维修,2025,(11):92-94.
- [5] 张志飞.基于物联网的矿井采掘机电设备故障诊断方法研究[J].能源与节能,2025,(10):197-199+203.