

电力系统自动化现场机械部件疲劳失效机理分析与寿命预测方法

宋 斌

国家能源集团宁夏煤业有限责任公司煤制油仪表管理中心 宁夏 银川 750000

摘 要: 本文聚焦电力系统自动化现场仪表机械部件,深入剖析疲劳失效机理与寿命预测方法。阐述仪表部件在复杂工况下承受多种应力,易引发疲劳失效的现状;分析裂纹萌生、扩展机制及材料性能、应力状态、环境条件等影响因素;介绍基于经验、物理模型、数据驱动及综合预测方法。研究为掌握仪表部件失效规律、精准预测寿命提供理论支撑,对保障电力系统稳定运行、优化仪表设备维护管理具有重要意义。

关键词: 电力系统自动化;仪表机械部件;疲劳失效;寿命预测

1 电力系统自动化现场仪表机械部件概述

1.1 机械部件的类型与功能

在电力系统自动化现场,仪表机械部件类型多样且功能关键,它们协同保障系统稳定运行。传动部件中,齿轮以高精度、高效率及稳定传动比,在仪表设备变速与动力传递中占据重要地位。例如,压力变送器的齿轮传动系统,能精准将膜片的微小位移转化为指针的转动,实现压力信号的直观显示。皮带和链条传动则因成本低、结构简、可远距传动,用于精度要求不高场景,如部分液位计用皮带连接浮子与显示装置。支撑部件为仪表设备提供稳固支撑,温度传感器的安装支架需有足够强度和刚度,承受设备自重、振动,同时起到减震作用,避免因振动导致的测量误差。执行部件直接参与信号转换与控制,电动调节阀的执行机构可依控制信号改变阀门开度,调节介质流量。控制部件调节设备运行,继电器依电信号变化控制电路,传感器实时监测设备参数,如流量传感器监测管道内介质流速,为系统调节提供依据。

1.2 机械部件的工作环境与应力分析

电力系统自动化现场仪表机械部件的工作环境复杂,多种恶劣条件产生的应力,影响其性能与寿命。温度方面,发电厂高温使仪表机械部件材料力学性能改变,强度硬度下降,塑性韧性上升,易导致变形损坏;寒冷地区变电站的低温会让金属变脆,降低抗冲击性,可能引发脆性断裂。湿度环境下,沿海变电站的潮湿空气易使仪表机械部件表面凝水,造成金属腐蚀,削弱钢铁部件强度,还会降低绝缘部件性能,增加电气故障风险。运行中的仪表机械部件承受多种应力,静应力源于自身重量、安装预紧力和恒定载荷,如流量计底座承载

设备重量产生静应力,强度不足会变形断裂。动应力更复杂,设备振动、启停冲击、系统故障过载等都会产生动应力,像调节阀在频繁开关过程中,阀芯和传动机构受冲击力产生疲劳损伤,致使裂纹萌生扩展^[1]。另外,仪表设备内部的电磁力也会引发部件振动变形,影响测量精度和稳定性。

2 电力系统自动化现场仪表机械部件疲劳失效机理分析

2.1 疲劳失效的定义

疲劳失效是指仪表机械部件在交变应力或应变作用下,经过一定的循环次数后,在局部高应力区产生裂纹,并随着应力循环次数的增加,裂纹逐渐扩展,最终导致部件发生断裂的现象。与静态失效不同,疲劳失效即使部件所受应力远低于材料的屈服强度,也可能发生。在电力系统自动化现场,仪表机械部件大多处于连续运行状态,不断承受着各种交变载荷,因此疲劳失效是一种常见且危害较大的失效形式。例如,液位计的浮子连杆在液位波动过程中,会承受周期性变化的拉力和压力,长时间运行后,连杆表面可能会出现疲劳裂纹,一旦裂纹扩展到临界尺寸,就会导致连杆断裂,使液位计失去测量功能。

2.2 疲劳裂纹萌生与扩展机制

在仪表机械部件表面或内部存在的缺陷,如夹杂物、气孔、加工刀痕等,会引起应力集中现象。当部件承受交变应力时,这些应力集中区域的局部应力会远高于平均应力,导致材料发生塑性变形。随着应力循环次数的增加,塑性变形不断累积,在材料表面形成滑移带,滑移带进一步发展,就会形成微裂纹,这便是疲劳裂纹的萌生。环境因素也会促进疲劳裂纹的萌生,如腐

蚀介质会侵蚀材料表面,形成腐蚀坑,这些腐蚀坑同样会成为应力集中点,加速裂纹的产生。疲劳裂纹萌生后,便进入扩展阶段。裂纹扩展可分为两个阶段。第一阶段,裂纹沿着与主应力约成 45° 的方向,以滑移的方式缓慢扩展,扩展深度较浅,通常只有几个晶粒的尺寸。当裂纹扩展到一定程度后,进入第二阶段,此时裂纹开始沿着与主应力垂直的方向扩展。在交变应力作用下,裂纹尖端不断张开和闭合,使裂纹尖端的材料发生塑性变形,同时裂纹尖端的应力集中促使裂纹向前推进。随着裂纹的不断扩展,部件的有效承载面积逐渐减小,当裂纹扩展到临界尺寸时,部件在一次加载或较低的应力循环下就会发生突然断裂,导致仪表设备故障。

2.3 影响因素分析

影响电力系统自动化现场仪表机械部件疲劳失效的因素众多,主要包括材料性能、应力状态和环境条件等方面。材料的强度、韧性、硬度等力学性能直接影响其抗疲劳能力。一般来说,强度和韧性较高的材料,能够承受更大的交变应力和塑性变形,具有更长的疲劳寿命。材料的组织结构也会影响疲劳性能,细小均匀的晶粒组织能够提高材料的抗疲劳性能,因为细小的晶粒可以阻碍裂纹的扩展。应力状态是影响疲劳失效的关键因素,应力的大小、频率和波形都会对疲劳寿命产生影响。应力幅值越大,疲劳寿命越短;应力循环频率越高,材料的疲劳损伤累积速度越快。不同的应力波形,如正弦波、方波等,对材料的疲劳性能影响也有所不同。同时平均应力的存在也会改变材料的疲劳特性,一般来说,拉应力会降低材料的疲劳寿命,而压应力则有助于提高疲劳寿命^[2]。环境条件对仪表机械部件的疲劳失效有着显著影响。前面提到的温度和湿度环境,会通过改变材料的性能和加速腐蚀来影响疲劳寿命。空气中的灰尘、化学气体等污染物,也会对部件表面造成磨损和腐蚀,进而促进疲劳裂纹的萌生和扩展。在有化学腐蚀介质存在的环境中,如化工厂附近的变电站,仪表机械部件的疲劳寿命会大幅缩短。

3 电力系统自动化现场仪表机械部件寿命预测方法

3.1 基于经验的预测方法

基于经验的预测方法是通过对大量仪表机械部件的实际运行数据和失效案例进行分析总结,建立起经验公式或图表,从而对部件寿命进行预测。这种方法简单直观,在早期电力系统仪表维护中应用较为广泛。该方法的优点是不需要复杂的理论计算和大量的试验数据,可直接利用现场积累的经验。但它也存在明显的局限性,由于经验是基于特定的运行条件和设备类型总结而来,

当运行环境或设备参数发生变化时,预测结果的准确性会受到很大影响。

3.2 基于物理模型的预测方法

基于物理模型的预测方法是依据材料的力学性能、仪表部件的结构特点以及所受的载荷情况,建立起描述部件疲劳失效过程的物理模型,通过求解模型来预测部件寿命。常见的物理模型有线性损伤累积模型、裂纹扩展模型等。线性损伤累积模型基于Miner法则,认为在交变应力作用下,材料的疲劳损伤是线性累积的。当损伤累积达到一定程度,即损伤因子等于1时,部件就会发生疲劳失效。通过计算不同应力水平下的损伤贡献,可预测仪表部件在复杂载荷谱下的寿命。裂纹扩展模型则是根据断裂力学理论,建立裂纹长度与应力强度因子之间的关系,通过监测裂纹的初始尺寸和计算裂纹扩展速率,预测裂纹扩展到临界尺寸所需的时间,从而得到部件的剩余寿命。基于物理模型的预测方法具有明确的理论基础,能够深入分析部件的失效过程,为设计优化提供理论依据。然而,该方法对材料性能参数、载荷谱等输入数据的准确性要求极高,而且在实际应用中,由于电力系统现场工况复杂多变,准确获取这些数据存在较大困难,同时模型的求解也较为复杂,计算成本较高。

3.3 基于数据驱动的预测方法

随着大数据和人工智能技术的发展,基于数据驱动的预测方法在电力系统仪表机械部件寿命预测中得到了广泛应用。数据驱动的预测方法通过收集大量的仪表部件运行数据,如振动信号、温度数据、应力应变数据等,利用机器学习和深度学习算法,挖掘数据中隐藏的规律,建立起数据与部件寿命之间的关系模型。例如,利用神经网络算法,将仪表机械部件的历史运行数据作为输入,将部件的实际寿命或失效时间作为输出,对神经网络进行训练,使其能够学习到数据与寿命之间的映射关系。训练好的模型可以根据当前的运行数据,预测部件的剩余寿命。支持向量机、随机森林等机器学习算法也常用于寿命预测,它们能够处理非线性数据,在复杂的电力系统运行环境下具有较好的预测性能^[3]。基于数据驱动的预测方法无需深入了解部件的物理失效机理,能够适应复杂多变的运行环境,具有较强的自学习和自适应能力。但它对数据的依赖性很强,数据的质量和数量直接影响预测结果的准确性。

3.4 综合预测方法

由于单一的寿命预测方法都存在一定的局限性,为了提高预测的准确性和可靠性,综合预测方法应运而生。综合预测方法是将基于经验、物理模型和数据驱动

的多种预测方法相结合,充分发挥各自的优势。例如,在预测初期,可以利用基于经验的方法快速给出一个初步的寿命估计范围;然后,结合基于物理模型的方法,深入分析部件的失效机理,对初步预测结果进行修正;最后,利用基于数据驱动的方法,根据实时监测数据,对仪表部件寿命进行动态更新预测。通过这种多方法的融合,可以弥补单一方法的不足,更准确地预测电力系统自动化现场仪表机械部件的寿命,为仪表设备的维护和管理提供更科学的依据。

4 提高电力系统自动化现场仪表机械部件寿命的措施

4.1 设计优化

在电力系统自动化现场仪表机械部件的设计阶段进行优化,能够从根本上提高部件的性能和寿命。首先,合理选择材料至关重要,根据部件的工作环境和受力特点,选择具有合适力学性能和耐环境性能的材料。对于在高温环境下工作的仪表部件,应选用高温合金或陶瓷材料,这些材料具有良好的高温强度和抗氧化性能。在潮湿或腐蚀环境中,可采用不锈钢、铝合金等耐腐蚀材料,或者对普通材料进行表面防腐处理,如镀锌、涂覆防腐涂层等,以提高部件的抗腐蚀能力。其次,优化部件的结构设计。通过合理的结构设计,可以降低应力集中,提高部件的承载能力。例如,在设计仪表的传动齿轮时,采用合理的齿形参数和过渡圆角,能够减少齿根处的应力集中,降低疲劳裂纹萌生的可能性。对于承受交变载荷的部件,避免尖锐的棱角和缺口,采用流线型结构,使应力分布更加均匀。还可以采用冗余设计,增加关键部件的备份,当一个部件出现故障时,备份部件能够及时投入运行,保证仪表设备的正常工作。

4.2 制造工艺改进

制造工艺对仪表机械部件的质量和寿命有着直接影响,改进制造工艺可以提高部件的性能。在加工过程中,提高加工精度能够减少表面粗糙度和加工缺陷,降低应力集中。例如,采用高精度的数控机床进行加工,能够保证仪表部件的尺寸精度和表面质量,减少因加工误差导致的局部应力过大问题。对于一些关键部件,如仪表的传感器探头,可以采用精密磨削、研磨等加工工艺,使表面更加光滑,提高抗疲劳性能^[4]。热处理工艺也是提高部件性能的重要手段。通过合适的热处理工艺,如淬火、回火、退火等,可以改善材料的组织结构和力

学性能。另外,采用先进的表面处理技术,如激光表面淬火、离子氮化等,能够在不改变部件基体性能的前提下,显著提高表面的硬度、耐磨性和耐腐蚀性。

4.3 运行维护策略

科学合理的运行维护策略是延长仪表机械部件寿命的重要保障。首先,要加强对仪表机械部件的运行监测,利用传感器技术实时监测部件的运行参数,如温度、振动、应力应变等,通过数据分析及时发现部件的异常状态。例如,当监测到压力仪表的振动幅值突然增大时,可能意味着内部传动部件出现松动或故障,需要及时进行检查和维修。建立仪表设备运行状态数据库,对历史数据进行分析,预测部件的发展趋势,提前采取预防措施。其次,制定合理的维护计划,根据仪表部件的类型、工作环境和运行状况,确定不同的维护周期和维护内容。对于一些易损部件,如仪表的密封件、传动皮带等,应定期进行检查和更换。对于大型复杂仪表设备,如智能流量计、多功能变送器等,可采用定期检修与状态检修相结合的方式,在设备运行一定时间后进行全面的检查和维护,同时根据实时监测数据,对设备进行有针对性的维修,避免过度维修或维修不足。还要加强对维护人员的培训,提高其专业技能和维修水平,确保维护工作的质量。

结束语

本文深入探讨了电力系统自动化现场仪表机械部件疲劳失效机理与寿命预测方法。通过剖析失效机理、分析影响因素,并介绍多种预测方法及提高寿命的措施,为保障电力系统稳定运行提供了理论依据与实践指导。未来,随着技术的不断进步,需持续优化预测方法与维护策略,以进一步提升仪表机械部件的可靠性与使用寿命。

参考文献

- [1]李华,张强.基于寿命预测的机械密封优化设计[J].机械设计与制造,2020,38(6):45-52.
- [2]刘德政,李炎,罗静,王友.T型焊接接头弯曲疲劳寿命预测方法[J].塑性工程学报,2021,28(01):172-178.
- [3]黄华颖,饶苏敏,叶锦坤.电力系统及其自动化和继电保护的关系分析[J].电工材料,2021,(1).66-67.
- [4]李明杰.机械零部件疲劳寿命预测方法研究[J].机械工程学报.2022.58(4):45-53