

一种 LVDT 加万向节防止连杆断裂的方法

王靖怡 王颢睿

华电潍坊发电有限公司 山东潍坊 261000

DOI: 10.12238/ems.v7i11.16091

[摘要] 在工业设备的传动与检测系统中, 连杆作为关键连接部件, 常因承受复杂载荷、存在安装偏差及振动冲击等因素发生断裂, 严重影响设备运行稳定性与安全性。本文提出一种结合 LVDT (线性可变差动变压器) 与万向节的连杆断裂预防方法。该方法通过 LVDT 实时监测连杆的位移变化, 精准捕捉潜在的应力集中和变形异常, 同时利用万向节的多角度传动特性, 降低因安装偏差和运动不协调产生的附加力矩。实际应用表明, 此方法能有效减少连杆所受的附加应力, 提前预警断裂风险, 将连杆的使用寿命延长 2-3 倍, 显著提升设备的运行可靠性, 具有较高的工程应用价值。

[关键词] LVDT; 万向节; 连杆断裂; 应力监测; 传动优化; 设备防护

一、引言

(一) 研究背景

在众多工业设备中, 如脱硫系统的浆液循环泵、烟气净化系统的传动机构等, 连杆作为传递运动和动力的关键部件, 其工作状态直接关系到整个设备的正常运行。连杆通常需要在高速、重载、变工况的环境下工作, 承受拉伸、压缩、弯曲等多种复杂载荷的作用。

然而, 在实际运行过程中, 连杆断裂是一种常见的故障形式。据统计, 在相关设备的故障中, 因连杆断裂导致的停机事故占比可达 20%-30%, 不仅造成了巨大的经济损失, 还可能引发安全事故。例如, 在脱硫浆液循环泵的传动系统中, 连杆断裂可能导致泵体运行失衡, 进而引发设备振动加剧、部件磨损加快, 甚至造成泵体损坏, 影响脱硫系统的正常运行, 违背环保要求。

(二) 研究意义

深入研究连杆断裂的原因, 并探索有效的预防方法, 对于保障工业设备的安全、稳定、高效运行具有重要意义。

从经济角度来看, 减少连杆断裂故障可降低设备的维护成本和停机损失。一次因连杆断裂导致的设备停机, 可能造成数万元甚至数十万元的经济损失, 而有效的预防方法能显著减少此类故障的发生, 为企业节约大量资金。

从安全角度来讲, 防止连杆断裂可避免因故障引发的安全事故, 保障操作人员的安全和设备的完好。在一些高危行业, 如化工、电力等, 设备故障可能引发严重的安全后果, 因此连杆断裂的预防尤为重要。

此外, 该研究还能对相关设备的设计与优化提供参考, 推动工业设备向更可靠、更高效的方向发展。

(三) 国内外研究现状

目前, 国内外针对连杆断裂的预防方法已有一定的研究。在结构设计方面, 通过优化连杆的几何形状、采用高强度材料等方式, 提高连杆的承载能力。例如, 采用高强度合金材料制造连杆, 可增强其抗拉伸和抗弯曲性能。

在监测技术方面, 一些研究采用振动监测、应变片监测

等方法, 对连杆的运行状态进行实时监控。振动监测通过分析连杆的振动信号, 判断其是否存在异常; 应变片监测则直接测量连杆表面的应变, 了解其受力情况。

然而, 这些方法存在一定的局限性。结构设计优化往往难以应对复杂多变的工况和安装偏差带来的影响; 传统的监测方法在精度和响应速度上有待提高, 且难以与传动系统进行有效的协同优化。

因此, 探索一种结合监测与传动优化的连杆断裂预防方法具有重要的现实意义。

二、连杆断裂原因分析

连杆断裂是多种因素共同作用的结果, 主要包括以下几个方面:

(一) 载荷因素

连杆在工作过程中承受的载荷是导致其断裂的主要原因之一。设备运行时, 连杆需要传递动力和运动, 所承受载荷随工况变化而波动。当载荷超过连杆的承载极限时, 就会导致连杆发生塑性变形甚至断裂。

在变载荷作用下, 连杆内部会产生疲劳应力。随着工作时间的增加, 疲劳应力不断累积, 会在连杆的薄弱部位 (如杆身与端部的过渡处、螺栓孔附近等) 产生疲劳裂纹。疲劳裂纹逐渐扩展, 最终导致连杆断裂。这种疲劳断裂在连杆故障中占比较高, 尤其是在长期运行的设备中更为常见。

(二) 安装偏差

安装过程中产生的偏差也是引发连杆断裂的重要因素。由于安装工艺不当或设备部件的制造误差, 连杆与相连部件之间可能存在同轴度偏差、平行度偏差等。这些偏差会导致连杆在运动过程中产生附加力矩, 使连杆承受额外的弯曲应力。

例如, 当连杆两端的连接轴不同轴时, 连杆在摆动或旋转过程中会受到侧向力的作用, 导致杆身产生弯曲变形。长期在这种状态下工作, 会使连杆的应力集中部位出现裂纹, 进而发生断裂。

(三) 振动与冲击

工业设备在运行过程中不可避免地会产生振动, 振动会使连杆受到周期性的冲击载荷。这种冲击载荷会加剧连杆的疲劳损伤, 缩短其使用寿命。

在设备启动、停机或变速过程中, 会产生较大的冲击载荷。例如, 浆液循环泵启动时, 电机的瞬间扭矩传递到连杆上, 会使连杆受到强烈的冲击, 容易导致其发生断裂。此外, 设备运行过程中遇到的突发故障(如卡涩)也会产生冲击载荷, 对连杆造成破坏。

(四) 材料与制造缺陷

连杆材料的质量和制造工艺也会影响其断裂情况。如果材料的强度、韧性等性能指标不达标, 或存在夹渣、气孔等内部缺陷, 会降低连杆的承载能力, 使其在正常工作载荷下就可能发生断裂。

在制造过程中, 若热处理工艺不当, 会导致连杆的硬度、韧性等性能不均匀, 存在应力集中区域。这些区域在受力时容易成为断裂的起点。此外, 加工精度不够, 如表面粗糙度较高、尺寸误差较大等, 也会加剧连杆的磨损和应力集中, 加速其断裂进程。

三、LVDT 与万向节的工作原理

(一) LVDT 的工作原理

LVDT 是一种常用的位移传感器, 由初级线圈、两个次级线圈和铁芯组成。初级线圈通入交流电后, 会产生交变磁场。当铁芯在磁场中移动时, 两个次级线圈因电磁感应产生的感应电动势会发生变化, 且两者的差值与铁芯的位移量成正比。

通过测量两个次级线圈的电动势差值, 可精确计算出铁芯的位移。LVDT 具有测量精度高、线性度好、响应速度快等优点, 能够实时监测连杆的微小位移变化, 为判断连杆的受力状态和变形情况提供准确的数据支持。

(二) 万向节的工作原理

万向节是一种实现变角度动力传递的机械零件, 主要由万向节叉、十字轴、滚针轴承等组成。它能够使两根不同轴线的轴实现连续回转, 并可可靠地传递扭矩和运动。

当主动轴与从动轴之间存在夹角时, 万向节通过十字轴的转动, 将主动轴的运动和扭矩传递给从动轴。在传动过程中, 万向节可以在一定角度范围内灵活转动, 补偿两根轴之间的角度偏差, 减少因安装偏差和运动不协调产生的附加力矩, 从而降低连杆所受的应力。

四、LVDT 加万向节防止连杆断裂的方法设计

(一) 整体结构设计

该方法的整体结构主要由连杆、LVDT 位移监测装置和万向节连接装置组成。

在连杆的两端分别安装万向节, 使连杆与相连部件之间通过万向节进行连接。这样可以利用万向节的角度补偿特性, 减少因安装偏差产生的附加力矩。万向节的选型应根据连杆的工作载荷、转速和角度变化范围等参数确定, 确保其具有

足够的承载能力和使用寿命。

LVDT 位移传感器安装在连杆的关键部位, 如杆身中部或应力集中区域附近。传感器的铁芯与连杆相连, 当连杆发生位移或变形时, 铁芯随连杆一起运动, LVDT 通过测量铁芯的位移变化, 实时输出相应的电信号。

(二) 监测系统设计

监测系统由 LVDT 位移传感器、信号处理模块、数据采集与分析模块以及预警模块组成。

LVDT 输出的电信号经过信号处理模块进行滤波、放大和整流等处理, 转化为稳定的直流信号。数据采集与分析模块对处理后的信号进行采集, 并根据预设的算法计算出连杆的位移量、变形速率等参数。

通过对这些参数的分析, 可判断连杆是否存在异常变形和应力集中。当监测到的参数超过设定的阈值时, 预警模块会发出声光报警信号, 提醒操作人员及时采取措施, 避免连杆断裂事故的发生。

(三) 协同工作机制

在设备运行过程中, 万向节实时补偿连杆与相连部件之间的角度偏差, 减少附加力矩的产生, 降低连杆所受的弯曲应力。同时, LVDT 实时监测连杆的位移变化, 将监测数据传输至数据采集与分析模块。

数据采集与分析模块对监测数据进行连续分析, 当发现连杆的位移量异常增大或变形速率加快时, 结合设备的运行工况, 判断连杆可能存在的故障风险。若风险达到预警阈值, 立即启动预警机制, 操作人员可根据预警信息对设备进行检查和维护, 及时排除故障。

此外, 监测系统还可以记录连杆的运行数据, 为设备的维护保养提供依据。通过对历史数据的分析, 可掌握连杆的磨损规律和寿命趋势, 制定合理的更换计划, 进一步提高设备的运行可靠性。

五、实验验证与效果分析

(一) 实验设计

为验证 LVDT 加万向节防止连杆断裂方法的有效性, 进行了对比实验。选取两台相同型号的设备, 一台采用传统的连杆连接方式, 另一台采用本文提出的 LVDT 加万向节的连接方式。

实验在相同的工况下进行, 对两台设备的连杆运行状态进行实时监测, 记录连杆的位移变化、应力分布以及使用寿命等参数。实验持续时间为 6 个月, 期间定期对设备进行维护和检查, 确保实验数据的准确性。

(二) 实验结果与分析

采用传统连接方式的连杆, 在运行过程中位移变化较大, 尤其是在设备启动和停机阶段, 位移波动明显。通过应力测试发现, 连杆的应力集中区域应力值较高, 且随着运行时间的增加, 应力值逐渐增大。采用 LVDT 加万向节连接方式的

连杆, 位移变化较为平稳, 在相同工况下, 位移量比传统方式减少了 30%-40%。应力监测结果显示, 连杆各部位的应力分布较为均匀, 应力集中现象明显改善, 最大应力值降低了 25%-35%。

实验结束后, 传统连接方式的连杆出现了明显的疲劳裂纹, 部分连杆已发生断裂, 平均使用寿命为 3 个月左右。而采用 LVDT 加万向节连接方式的连杆, 未出现明显的裂纹和损伤, 仍能正常工作, 预计使用寿命可达 8-10 个月, 使用寿命延长了 2-3 倍。在实验过程中, 当采用 LVDT 加万向节连接方式的设备中, 连杆的位移量和应力值接近预警阈值时, 监测系统及时发出了预警信号。操作人员根据预警信息对设备进行检查, 发现连杆与万向节的连接部位存在轻微松动, 经过及时紧固后, 设备恢复正常运行, 避免了连杆断裂事故的发生。

(三) 效果分析

实验结果表明, LVDT 加万向节的方法能有效防止连杆断裂。万向节的角度补偿作用减少了因安装偏差产生的附加力矩, 降低了连杆的弯曲应力; LVDT 的实时监测功能能够及时发现连杆的异常变形和应力集中, 提前预警断裂风险。

该方法不仅延长了连杆的使用寿命, 还提高了设备的运行稳定性和安全性, 减少了因连杆断裂导致的停机事故, 具有显著的经济效益和社会效益。

六、应用推广与注意事项

(一) 应用推广

该 LVDT 加万向节防止连杆断裂的方法适用于多种工业设备的连杆系统, 如脱硫系统的浆液循环泵、风机、压缩机等。在这些设备中, 连杆的运行环境复杂, 断裂风险较高, 采用该方法可有效提升设备的可靠性。

在推广应用过程中, 可根据不同设备的特点和要求, 对万向节的型号和 LVDT 的安装位置进行适当调整, 以确保方法的适用性和有效性。同时, 结合设备的控制系统, 实现监测数据的自动分析和预警, 提高设备的智能化管理水平。

(二) 注意事项

在安装过程中, 应确保万向节和 LVDT 的安装位置准确, 连接牢固。万向节的角度偏差应控制在允许范围内, 避免因安装不当影响其角度补偿效果。LVDT 的铁芯与连杆之间应保持良好的连接, 确保位移测量的准确性。安装完成后, 需对监测系统进行调试, 校准 LVDT 的测量精度, 设定合理的预警阈值。调试过程中应模拟设备的各种运行工况, 确保监测系统在不同工况下都能正常工作。

定期对万向节进行润滑和检查, 确保其转动灵活, 避免因磨损或卡涩影响角度补偿性能。检查万向节的连接螺栓是否松动, 如有松动应及时紧固。对于 LVDT 位移传感器, 应定期清理其表面的灰尘和杂物, 防止影响测量精度。检查传感器的线路连接是否良好, 避免因线路故障导致监测

数据异常。

建立完善的监测数据管理系统, 对连杆的运行数据进行定期存储和分析。通过对历史数据的分析, 掌握连杆的运行规律和故障趋势, 为设备的维护保养提供科学依据。同时, 对监测系统的预警记录进行统计和分析, 不断优化预警阈值, 提高预警的准确性和及时性。

七、结论与展望

(一) 结论

本文提出的 LVDT 加万向节防止连杆断裂的方法, 通过万向节的角度补偿作用和 LVDT 的实时监测功能, 有效降低了连杆所受的附加应力, 提前预警了断裂风险。实验验证表明, 该方法能将连杆的使用寿命延长 2-3 倍, 显著提升了设备的运行可靠性。

该方法具有结构简单、安装方便、成本适中、效果显著等优点, 适用于多种工业设备的连杆系统, 具有较高的工程应用价值。

(二) 展望

未来, 可进一步优化该方法的性能。在 LVDT 的选型上, 可采用更高精度、更高响应速度的传感器, 提高位移监测的准确性和实时性。在万向节的设计上, 研发具有更好耐磨性和承载能力的新型万向节, 适应更恶劣的工作环境。

同时, 结合大数据和人工智能技术, 对监测数据进行深度分析, 实现连杆故障的精准预测和诊断。通过建立连杆的数字孪生模型, 模拟连杆在不同工况下的受力和变形情况, 为设备的设计优化和维护决策提供更有力的支持。

此外, 还可将该方法与设备的自动控制系统相结合, 实现故障的自动处理。当监测到连杆存在断裂风险时, 自动调整设备的运行参数, 降低连杆所受的载荷, 避免故障的发生, 进一步提高设备的智能化水平和运行安全性。

[参考文献]

- [1] 曾光明, 彭敏, 孙韬. 一种液压伺服系统中六线制交流 LVDT 的故障检测方法[J]. 中国重型装备, 2025, (03): 58-63. DOI: 10.14145/j.cnki.51-1702/th.2025.03.008.
- [2] 张岩. LVDT 信号处理电路设计及非线性补偿研究[D]. 曲阜师范大学, 2025. DOI: 10.27267/d.cnki.gqfsu.2025.000798.
- [3] 一种基于微型通道的 LVDT 位移传感器散热结构[J]. 传感器世界, 2025, 31(05): 47.
- [4] 刘志. 基于遗传算法的 LVDT 传感器参数辨识及非线性校正研究[D]. 燕山大学, 2024. DOI: 10.27440/d.cnki.gysdu.2024.000710.
- [5] 张立娟. 浅谈 LVDT 设计优化与应用[J]. 电子元器件与信息技术, 2023, 7(10): 33-36. DOI: 10.19772/j.cnki.2096-4455.2023.10.009.