

特高压 GIS 机械传动机构故障模式识别与可靠性评估研究

薛阳艳

湖南平高开关有限公司 湖南长沙 410006

摘 要：特高压输电技术是我国自主创新的重要成果，其大功率、远距离、高效率的输电特性决定了对关键设备安全性和稳定性的极高要求。气体绝缘金属封闭开关设备（GIS）因其占地小、可靠性高、环境适应性强而成为特高压变电站的核心装备。GIS 的机械传动机构作为其实现断路器、隔离开关及接地刀闸动作的核心执行单元，其性能稳定性在很大程度上决定了设备的整体运行可靠性。本文以故障模式识别与可靠性评估为主线，采用模糊层次分析法与 Bayesian 网络建模相结合的方法，构建了特高压 GIS 机械传动机构的故障识别模型，并结合多源实测数据进行了验证，最终提出了可靠性提升的设计与运维建议。

关键词：特高压 GIS 机械；传动机构；故障模式

前言：

在汽车制造、航空航天等工业领域，机械压力机至关重要。随着制造业对产品精度要求攀升，传统机械压力机传动机构在精度、效率和动态性能方面存在提升空间，其高精度传动机构设计需兼顾传动效率、能耗、动态性能优化及材料结构强度等多方面需求，同时满足重复定位与运动精度要求。作为 GIS 关键子系统，机械传动机构负责驱动断路器等部件可靠操作，其稳定性关乎 GIS 整体可靠性与操作安全。在特高压环境下，机械传动机构长期承受高负载与复杂应力，易出现润滑失效、结构疲劳等隐蔽性故障。传统基于巡检和经验的运维模式难以精准识别早期故障，存在误判、漏判风险。

1 特高压 GIS 机械传动机构的特性与运行原理

机械压力机传动系统是一个复杂而精密的动力传输网络，主要包括伺服电机、偏心轴、连杆、传动齿轮、传动皮带以及滑块等。通过坚固耐用的连杆机构进一步放大并最终作用于安装有模具的滑块上，实现对材料的有效压制。特高压 GIS（气体绝缘金属封闭开关设备）机械传动机构作为其完成分合闸操作的核心部件，承担着对断路器、隔离开关、接地开关等元件的驱动任务，是实现设备机械动作可靠性的关键环节。其结构主要由储能弹簧、电动机、离合机构、传动轴、连接杆组、凸轮系统、锁扣结构及缓冲器等部件组成，各元件之间通过精密配合，形成一个能量积蓄—释放—动作执行的完整机械链条。运行原理方面，GIS 机械传动机构通

常通过电动机驱动储能弹簧实现能量蓄积，在控制系统发出指令后，释放储能弹簧的机械能，推动传动杆系完成断路器或开关的合闸或分闸操作。整个过程需在几十毫秒内完成，具有响应速度快、传动链条复杂、力矩变化剧烈的特点。为确保操作的同步性与稳定性，传动系统往往设计有双稳态机构、速度控制凸轮、缓冲阻尼系统等结构，用以保障动作的协调与机构部件的保护。在特高压工况下，由于操作电压高、开断容量大，机械传动机构需承受更大的动能冲击与环境耦合负载，必须具备极高的机械强度、耐久性与动作一致性。同时，其结构布置需兼顾空间紧凑性、气密性与绝缘协调要求，在 SF₆ 气体封闭环境中长期运行，传动机构在设计中需充分考虑摩擦副磨损、润滑状态退化、高频操作疲劳、低温条件下机械特性变化等因素，以保障其在全生命周期内的动作可靠性。正因如此，对机械传动机构运行特性的深入理解，是开展故障模式识别与可靠性评估的前提基础。

2 特高压 GIS 机械传动机构失效机理分析

2.1 润滑系统退化与摩擦副磨损效应

在特高压 GIS 机械传动机构里，润滑系统的性能对于摩擦副的磨损速度以及动作响应的精准程度有着直接的关联，随着长时间的运行，润滑油或者润滑脂会因为高电压环境中 SF₆ 气体分解产物的侵蚀、温度的循环变化以及机械振动等原因，导致其黏度出现下降、增稠或者产生沉积的情况，使得润滑膜的完整性受到削弱。一旦润滑膜破裂，金属接触面之间就会出现边界润滑或者干摩擦的状态，导致齿轮啮合以

及滑动部件之间的摩擦系数迅速上升,这种摩擦系数的突然变化,会让设备启动电流以及合闸分闸所需要的扭矩增大,还会在啮合表面产生高应力集中区域,加快材料表面的塑性变形以及疲劳剥落。

2.2 疲劳裂纹的萌生与扩展机理

在高频次操作以及大冲击荷载交替发挥作用的情况下,像弹簧、凸轮以及连接杆等关键的零部件很容易出现微观疲劳裂纹,当机械传动机构在合闸或者分闸的瞬间承受上百牛·米的扭矩冲击之时,零件的表面以及近表层会反复承受拉压、剪切等复杂的应力场,在微不平整度或者材料内含杂质的地方产生微裂纹萌生源。随着循环次数不断累积,这些微裂纹会沿着应力集中的方向逐步扩展,一直到达到临界长度,让部件截面承载面积急剧减小,出现局部断裂或者失稳的现象,和单次过载破坏相比较而言,疲劳失效更有隐蔽性,并且很难借助常规巡检发现,一般是在设备动作出现异常、振幅增大或者声音发生改变之后才会被察觉。

2.3 机械间隙变化与卡滞风险

随着机械传动机构长时间的振动以及摩擦磨损情况,连接杆销轴、凸轮轴承以及离合机构之间的配合间隙会渐渐变大,这种处于微米级别的间隙变化,看上去好像没什么关键影响,然而在高速冲击动作里会引发严重的振动,并且冲击载荷传递不均匀,造成传动链条出现错位或者瞬间卡滞现象。在低温环境的时候,润滑剂黏度升高、弹簧刚度下降以及金属热膨胀存在差异,这些因素共同发挥作用,致使部件配合更容易出现贴合不好的情况,或者导致轴承滚动体与内外圈之间的滑动阻力增大,卡滞现象会让分合闸时间变长,还可能致使主回路处于不确定的状态,对电气绝缘结构造成损害,甚至引发电弧事故。

2.4 温度—环境耦合诱发的综合失效

在特高压 GIS 运行的实际现场当中,高电压所引发的电晕放电现象会促使 SF₆ 发生分解,产生有害的副产物,这些副产物会随着气体的循环进入到机械传动机构的内部,对金属表面以及润滑剂造成化学腐蚀,另外设备在户外运行期间需要面对昼夜温差、季节性湿度变化以及雨雪侵蚀等诸多环境冲击。高低温交替会致使材料的热膨胀系数出现差异,同时还会让润滑剂的性能发生退化,湿度、腐蚀性气体以及粉尘会在密封结构较为薄弱的地方形成微量渗漏或者结露的情况,加剧齿轮与轴承表面的氧化锈蚀,温度与环境的多

重耦合作用,使得机械传动机构在复杂的工况之下容易出现异响、卡涩以及动作滞后等综合性失效问题。

3 特高压 GIS 机械传动机构故障模式识别方案

3.1 基于多源信号融合的故障特征提取机制

在特高压 GIS 机械传动机构运行的时候,故障一般会呈现出机械响应特性的异常情况,像是振动变得更加剧烈、动作时间有所延长、声音出现变化或者电机启动电流出现异常等,针对这些现象而言,构建一套多源信号融合的故障特征提取机制乃是识别模式的基础所在,在具体的方案里,应当部署多种类型的传感器,覆盖加速度传感器、微型电流互感器、声音采集单元以及位移编码器等,分别安装在传动轴承、电机端、机构箱体以及联动件的关键部位。该系统把边缘计算单元当作数据集成节点,实时采集多通道信号,并且运用小波包分解和时频谱分析技术,针对不同的故障信号进行特征提取,比如振动包络谱峰值、电流均方根、频率漂移率等特征量,借助融合加权处理,将多源数据映射到统一的特征空间,以此提高对隐性故障的感知能力。最终形成一套基于物理机理的特征指标体系,为后续的模式识别提供有高精度、高鲁棒性的输入基础,可有效应对信号噪声和环境干扰所带来的不确定性。

3.2 基于模糊层次分析法的故障模式权重构建模型

特高压 GIS 机械传动机构故障有多维属性以及模糊性,要引入模糊层次分析法也就是 F-AHP 来构建故障模式识别的决策权重体系,其具体流程有三步,首先依据传动机构的结构特点以及以往的运维数据,梳理像“传动轴偏移”“凸轮剥落”“电机卡滞”“缓冲器失效”等典型故障模式,构建包含故障模式层、指标层以及特征因子层的多级结构模型,其次借助专家打分以及一致性检验,量化各个因子对故障模式的影响程度,生成判断矩阵并计算其权重向量,最后把模糊数学引入指标判断过程,运用模糊相似关系矩阵将主观判断和客观量化结果结合起来,输出模糊综合评价结果。该模型可体现各类故障之间的相对关键性,还可以处理部分信息不确定、边界模糊的问题,在后续识别模型训练里作为先验权重输入,提升识别结果的可信度与解释性。

3.3 基于机器学习算法的故障分类与识别模型训练

为了实现对特高压 GIS 机械传动机构故障的高精度识别,应构建一套基于机器学习的多分类识别模型。具体方案是采用支持向量机(SVM)作为基础分类器,同时构建决策

树 (Decision Tree) 与随机森林 (Random Forest) 等模型进行性能比较, 并通过交叉验证法确定最优模型。在训练阶段, 利用历史设备运行数据及实验模拟故障数据作为样本库, 结合上述提取的振动、电流、声学与位移特征向量进行训练标注。采用网格搜索优化 SVM 核函数参数, 并引入 PCA 主成分分析对高维特征进行降维处理, 提高模型泛化能力。模型输出结果不仅涵盖故障类型的识别, 还可结合置信度评分输出当前状态的不确定性量化指标, 实现预警分级管理。为提高模型鲁棒性, 可引入集成学习策略, 将多个子模型识别结果进行加权融合, 提升对复合型故障 (如多部件同时劣化) 场景下的识别准确性与响应速度, 实现从“事后识别”向“前瞻感知”的智能化过渡。

4 特高压 GIS 机械传动机构的可靠性评估体系

4.1 基于状态退化曲线的寿命预测模型构建

在特高压 GIS 机械传动机构可靠性评估中, 仅依赖动作计次或定期试验已无法满足精细化运维需求。应构建基于状态退化曲线的寿命预测模型, 实现对关键部件如弹簧、离合器、齿轮传动组的剩余寿命预估。评估方案首先通过长期运行数据采集 (包括合分闸时间、运动阻力、传动冲击峰值等参数), 提取反映性能退化的趋势特征。再采用回归建模方式, 如非线性最小二乘法或指数平滑模型, 对关键性能指标随时间的变化规律进行拟合, 构建部件退化函数。还可引入灰色预测模型 (GM(1,1)) 对小样本数据进行扩展处理, 提高模型在实际工况下的适应性, 弥补数据量不足的缺陷。

4.2 基于故障树分析 (FTA) 的结构可靠性评估方法

针对机械传动机构结构复杂、故障链条多元的问题, 可采用故障树分析 (Fault Tree Analysis, FTA) 构建系统级的可靠性评估模型。具体做法是: 首先以“机构动作失败”作为顶事件, 逐层分解至中间事件和基本事件, 如“弹簧失效”“销轴断裂”“缓冲器失效”“信号执行偏差”等, 通过逻辑门连接形成完整的故障树结构。每个基本事件关联其历史失效率或样本统计概率, 结合布尔代数运算计算最小割集, 并进一步得到顶事件的发生概率。为提升评估的动态性, 可引入 Bayes 更新机制, 在监测到部件状态异常时实时调整基本事件概率, 从而动态修正系统可靠性值。此外, 还可通

过敏感度分析识别出影响系统可靠性的关键路径与薄弱环节, 为机构设计优化和预防性维护提供依据。

4.3 基于 Markov 过程的运行可靠性动态建模

考虑到 GIS 机械传动机构具有多状态运行特性, 其可靠性并非静态不变, 而是在不同运行阶段呈现动态演化趋势, 可采用离散时间 Markov 过程对机构运行状态进行建模与可靠性量化。该方法首先设定机构运行的若干状态节点, 如“正常状态”“轻度劣化”“严重劣化”“功能失效”, 并依据历史运维数据与专家经验设定状态间的转移概率矩阵。然后结合当前状态监测结果, 采用贝叶斯更新法对转移概率进行修正, 获取最优状态预测路径。模型每步迭代后输出设备在未来 n 周期内处于任一状态的概率, 从而量化其可靠性函数、失效率与平均无故障时间 (MTBF)。为了提升模型的实用性, 还可引入外部因素修正项 (如环境温度、操作频次、负荷等级), 构建环境适应型 Markov 模型。

结语: 本文围绕特高压 GIS 机械传动机构的故障模式识别与可靠性评估展开系统研究, 构建了以多源信号融合为基础的故障特征提取机制, 结合模糊层次分析法与机器学习模型, 实现高精度的故障分类识别。同时通过建立状态退化曲线、故障树分析和 Markov 动态评估模型, 搭建覆盖部件层、结构层与系统层的多维可靠性评估体系。研究发现, 机械间隙增长、润滑退化与温度—环境耦合是导致机构劣化的主要机制, 需建立前瞻性的运维干预策略, 提出的识别与评估方案具备工程可实施性与技术前沿性, 为 GIS 设备状态感知、运维决策优化及系统稳定性保障提供理论依据和实践指导。

参考文献:

- [1] 魏国静. 机械压力机高精度传动机构设计与优化研究 [J]. 装备维修技术, 2025,(01):38-41.
- [2] 唐山红. 汽车机械式变速器变速传动机构优化设计 [J]. 佳木斯大学学报 (自然科学版), 2024,42(11):51-54.
- [3] 司文. SGA3722 液力机械传动机构油温过高故障原因及解决措施 [J]. 机械研究与应用, 2011,24(03):150-151+154.
- [4] 芮锋, 占军. 首钢 SGA3722 液力机械传动机构油温过高的故障原因及解决办法 [J]. 安徽冶金科技职业学院学报, 2011,21(02):53-56.