

天然气压缩机组变频器功率单元故障处理

罗 巍 孙 阳

国家管网集团北京管道有限公司 河北 衡水 053000

摘 要：天然气压缩机组变频器功率单元故障处理需结合电气、机械及通信故障特征进行系统排查。典型故障包括IGBT模块击穿、吸收电容失效、光纤通信中断及散热系统故障。处理时需通过示波器测试波形、红外热成像检测温度分布，结合FMEA分析确定维修优先级。预防性维护应优化备件库存管理，加强远程诊断支持，并通过机器学习模型预测故障趋势，提升系统可靠性。

关键词：天然气压缩机组；变频器功率单元；故障处理

引言：天然气压缩机组在能源领域占据关键地位，其变频器功率单元作为核心部件，对机组稳定运行起着决定性作用。但在实际运行中，该单元常因电气过载、机械磨损、通信干扰及恶劣环境等因素，出现各类故障，影响机组效率和安全。本文深入剖析功率单元工作原理与故障机理，研究针对性诊断方法和维修策略，并引入智能监测技术，为有效处理故障、保障天然气压缩机组可靠运行提供有力支持。

1 天然气压缩机组变频器功率单元工作原理与故障机理

1.1 变频器功率单元结构与工作原理

(1) 单元串联脉宽调制叠波升压技术原理：多组功率单元串联，通过脉宽调制(PWM)技术控制各单元输出电压脉冲，叠加后形成高压正弦波输出，适配天然气压缩机组高压电机需求，同时降低单元电压应力，提升系统稳定性。(2) 功率单元核心组件功能与相互作用：IGBT模块实现电能逆变与调压；熔断器起过流保护，避免故障扩散；驱动板为IGBT提供触发信号，控制其通断；光纤通信模块实现主控板与功率单元的数据传输，协调各单元运行，组件协同保障功率单元高效输出^[1]。

1.2 功率单元故障分类与机理分析

(1) 电气故障：熔断器因电网过流或元件短路熔断；IGBT模块因过压、过热或驱动信号异常击穿；驱动板元件老化导致信号失真；直流母线因整流故障或负载突变出现过压/欠压。(2) 机械故障：散热片积尘堵塞，散热效率下降；风机轴承磨损或电机故障，导致散热不足，引发元件过热故障。(3) 通信故障：光纤受外力拉扯断裂或接头污染，导致信号传输中断；主控板通信接口故障，造成与功率单元通信中断。(4) 环境因素：粉尘附着元件表面，影响散热与绝缘；温度频繁波动，加速元件老化，缩短使用寿命，增加故障概率。

2 天然气压缩机组变频器功率单元故障诊断方法

2.1 故障诊断流程设计

(1) 初步检查：优先开展外观检查，查看功率单元外壳是否破损、元件有无烧蚀痕迹，同时清理表面粉尘与油污；调取变频器报警记录，明确过流、过压、通信中断等报警类型；实时监测运行参数，对比电压、电流、温度等数据与额定值的偏差，判断是否存在异常波动，为后续诊断缩小范围。(2) 分层诊断：电气层重点检测电路通断、元件性能及电压稳定性，使用专业仪器排查短路、断路问题；机械层聚焦散热系统与运动部件，检查散热片洁净度、风机运转状态及部件连接紧固性；通信层通过信号检测设备，验证光纤传输质量与主控板通信链路，逐层定位故障所在层级。(3) 根因定位：整合历史故障数据与维护记录，分析同类故障的高发时段、工况条件，寻找共性规律；构建故障树模型，以“功率单元失效”为顶事件，逐层分解为电气、机械、通信等中间事件，直至定位熔断器老化、风机轴承磨损等底层原因，避免仅解决表面问题。

2.2 电气故障诊断技术

(1) 熔断器状态检测：断开变频器电源，采用万用表电阻档测量熔断器两端，若阻值趋近于无穷大，表明熔断器已熔断，需进一步检查电路是否存在短路以排除熔断诱因；若阻值接近零，说明熔断器正常，可排除该元件故障。(2) IGBT模块健康评估：通过万用表二极管档测试IGBT续流二极管，正向导通时阻值应在合理范围，反向截止时阻值无穷大，若出现正向阻值过大或反向漏电，提示模块性能劣化；利用专用测试仪进行极性判断，确保模块阴阳极连接正确，避免因接线错误引发故障。(3) 直流母线电压监测：使用示波器或电压检测仪实时采集直流母线电压，对比实际值与设计阈值，若电压超过上限，需检查整流电路或能量回馈系统；若低

于下限, 排查供电电源或滤波电容性能, 同时根据现场工况动态调整过压、欠压保护阈值, 适配负载波动^[2]。

2.3 机械故障诊断技术

(1) 散热系统性能测试: 通过温度传感器采集散热片、IGBT模块表面温度, 若温度超过60℃且持续上升, 需清理散热片堵塞的灰尘或更换老化散热膏; 使用转速计测量风机转速, 对比额定转速(通常为2000-3000r/min), 若转速偏差超过10%, 检查电机绕组或更换风机, 确保散热系统散热效率。(2) 机械振动分析: 采用振动传感器贴附于风机、泵体等运动部件, 通过频谱分析仪采集振动信号, 若频谱图中出现异常峰值, 且频率与轴承故障特征频率匹配, 提示轴承磨损; 若振动幅值随转速升高而增大, 需检查部件同心度与平衡状态, 避免共振引发更严重损坏。

2.4 通信故障诊断技术

(1) 光纤通信质量检测: 使用光功率计测量光纤输出光功率, 若数值低于-15dBm, 表明光信号衰减过大, 需检查光纤是否弯折过度或接头污染, 用无水乙醇清洁接头端面; 若光功率正常但通信仍中断, 排查光纤是否存在断裂, 更换受损光纤后重新测试链路。(2) 主控板与功率单元通信协议验证: 连接逻辑分析仪至通信接口, 抓取主控板与功率单元的交互数据帧, 解析数据格式、传输速率是否符合预设协议(如RS485、Profinet); 若出现数据丢失、帧错误, 检查协议配置参数或接口芯片性能, 重新匹配通信参数以恢复正常传输。

2.5 智能诊断技术应用

(1) 基于机器学习的故障预测: 收集功率单元近3-5年的运行数据(电压、电流、温度、振动等), 划分正常与故障样本集, 采用随机森林、神经网络等算法训练预测模型; 实时输入新运行数据, 模型通过对比特征差异, 提前1-2周预警潜在故障, 如IGBT老化、风机性能衰退, 为预防性维护提供依据。(2) 振动-温度-压力多参数融合诊断: 搭建数据融合平台, 同步采集振动频率、元件温度、系统压力数据, 通过加权算法融合多维度特征, 若振动异常伴随温度骤升、压力波动, 可精准识别“散热失效导致IGBT过热”等复合型故障; 相比单一参数诊断, 准确率提升30%以上, 减少误判与漏判^[3]。

3 天然气压缩机组变频器功率单元维修策略与优化

3.1 基于RCM(以可靠性为中心)的维修策略

(1) 关键部件识别: 通过分析功率单元运行数据与故障历史, 识别对机组可靠性起决定性作用的关键部件。其中, IGBT模块作为电能转换核心, 其故障会直接导致功率单元停运; 熔断器作为过流保护关键元件, 失

效会引发后续元件连锁损坏, 需将这类部件列为重点监控与维修对象, 建立专属管理台账。(2) 故障模式与影响分析(FMEA)确定维修优先级: 针对关键部件开展FMEA, 梳理各部件潜在故障模式(如IGBT模块击穿、熔断器熔断), 评估故障发生概率、严重程度及检测难度。例如, IGBT模块故障会造成压缩机组停机, 经济损失大且维修成本高, 其维修优先级设为最高; 熔断器故障虽影响较小, 但易引发次生故障, 优先级设为中高, 据此制定差异化维修计划。(3) 预防性维修周期优化: 依据功率单元各部件故障率曲线(如浴盆曲线), 结合实际运行数据(如运行时长、负荷波动、环境温度)调整维修周期。对于IGBT模块, 在故障率较低的平稳期, 可将预防性检测周期从3个月延长至6个月; 若运行环境粉尘较多, 熔断器故障率上升, 需缩短检测周期至1个月, 避免过度维修或维修不足^[4]。

3.2 典型故障维修方案

(1) 熔断器故障: 更换同规格熔断器, 检测电网电压稳定性。先断开电源, 拆除故障熔断器, 选用与原型号(如额定电流、分断能力匹配)一致的新熔断器安装; 随后使用万用表测量电网输入电压, 检查是否存在电压波动或瞬时过压情况, 必要时加装电压稳压装置, 防止熔断器再次因电压异常熔断。(2) IGBT模块故障: 模块级更换, 测试驱动板信号完整性。拆除故障IGBT模块, 清理散热底座并涂抹导热硅脂, 安装新模块并确保螺栓扭矩达标; 通过示波器测试驱动板输出信号的幅值、频率与波形, 确认信号无失真、延迟, 避免因驱动信号异常导致新模块再次损坏。(3) 光纤通信故障: 更换光纤或清洁接头, 验证通信协议。若光功率计检测显示光纤光功率异常, 检查光纤是否破损, 破损则更换同规格光纤; 若光纤完好, 用专用清洁剂擦拭接头端面去除污垢; 最后通过逻辑分析仪抓取通信数据, 验证数据帧格式、校验位与通信协议(如Modbus)一致性, 确保通信恢复正常。(4) 过热故障: 清理散热片, 检修风机, 优化环境温度控制。使用压缩空气吹扫散热片灰尘, 顽固污渍用毛刷配合酒精擦拭; 拆解风机检查轴承磨损情况, 磨损严重则更换轴承或风机; 同时调整机房通风设备, 将环境温度控制在0-40℃范围内, 避免高温环境加剧功率单元发热。

3.3 维修资源优化

(1) 备件库存管理: 基于故障发生率与采购周期, 设定关键部件安全库存。例如, IGBT模块采购周期长且故障影响大, 安全库存设为3-5个; 熔断器采购便捷, 安全库存设为10-15个, 同时采用信息化系统实时监控库存

水平,库存低于阈值时自动触发采购,避免备件短缺导致维修延误。(2)维修人员技能培训:制定年度培训计划,涵盖电气故障检测(如万用表、示波器使用)、机械部件拆装(如风机、散热片维护)、通信故障排查(如光纤测试、协议验证)等内容。通过理论授课与实操演练结合的方式,每季度开展1次培训,考核合格后方可上岗,提升维修人员综合技能。(3)远程诊断支持:搭建远程诊断平台,将功率单元运行数据实时传输至云端。维修人员现场遇到复杂故障时,可通过平台上传故障现象与检测数据,专家系统基于故障数据库自动匹配解决方案,同时专家可远程操控设备进行数据采集与分析,辅助现场人员快速定位故障,缩短维修时间。

4 天然气压缩机组变频器功率单元预防性维护与状态监测技术应用

4.1 在线监测系统设计

(1)温度、振动、电压、电流多参数实时采集:在功率单元关键部位部署传感器,温度传感器贴装于IGBT模块、散热片表面,实时捕捉元件温升;振动传感器安装在风机轴承处,监测机械振动幅值与频率;电压、电流传感器接入直流母线及IGBT输出端,同步采集电压波动、电流变化数据,所有参数通过数据采集卡实时传输至监测平台,实现全方位状态感知。(2)边缘计算模块实现本地预警:在监测系统中集成边缘计算模块,将采集的原始数据在本地进行预处理与分析,如对比温度阈值、判断振动频率是否异常,一旦发现参数超标,立即触发本地声光预警,无需等待数据上传云端处理,大幅缩短预警延迟,为故障处置争取时间。

4.2 预测性维护模型构建

(1)基于LSTM神经网络的故障预测:收集功率单元过往3-5年的运行数据(正常工况与故障数据),构建数据集并划分训练集、验证集,利用LSTM神经网络对数据进行训练,建立故障预测模型;实时运行时,将在线监测的参数输入模型,模型输出故障发生概率与剩余寿命,同时通过验证集持续优化模型精度,提升预测准确性。(2)健康指数(HI)评估:选取温度偏差率、

振动超标次数、电压稳定系数等关键指标,设定各指标权重,通过加权计算得出功率单元健康指数(HI),HI取值0-1,1代表完全健康,0代表故障状态;实时跟踪HI变化趋势,当HI降至0.6以下时,判定单元进入亚健康状态,启动预防性维护流程。

4.3 维护策略动态调整

(1)根据运行工况动态调整维护周期:当压缩机组处于高负荷运行(负荷率超80%)或环境温度高于35℃时,功率单元损耗加快,将预防性维护周期从原6个月缩短至4个月;若工况平稳(负荷率60%-80%、环境温度20-30℃),则延长周期至8个月,避免不必要的维护成本。

(2)故障风险矩阵更新:定期收集新发生的故障案例,分析故障类型、诱因及影响,同时汇总维修过程中的数据(如维修时长、备件更换效果),更新故障风险矩阵,调整不同故障类型的风险等级与应对措施,确保维护策略与实际故障情况精准匹配。

结束语

天然气压缩机组变频器功率单元故障处理是一项系统性工程,需融合故障诊断、维修策略与预防维护技术。通过分层诊断流程精准定位电气、机械及通信故障,结合RCM维修策略实现差异化维护,并依托智能诊断与在线监测技术提升故障预测能力,可显著降低非计划停机风险。未来,随着物联网与人工智能技术的深化应用,故障处理将向智能化、预测性维护方向演进,为天然气压缩机组的高效稳定运行提供更坚实的技术保障。

参考文献

- [1]王鑫.天然气压缩机的故障处理[J].建筑技术科学,2024,(04):42-44.
- [2]邢娜.天然气压缩机的故障处理[J].市政工程,2024,(12):126-127.
- [3]张洪建,王林峰,蒋红魁.天然气压缩机组自控系统故障诊断技术[J].工程地质学,2023,(11):108-109.
- [4]许光礼.天然气压缩机故障分析及处理措施[J].建筑技术科学,2020,(05):60-61.