

基于冗余设计的燃气轮机电磁阀组在线诊断技术研究

段淳光

深圳大唐宝昌燃气发电有限公司 158000

DOI: 10.12238/ems.v8i1.17685

[摘要] 燃气轮机压气机在低流量工况下易发生喘振, 为防止设备损坏, 通常在出口设置防喘放气阀。某电厂两台 F4 型燃气轮机(各设高压、中压、低压三阀)现仅由单只 DC110V 电磁阀控制, 缺乏在线试验功能, 存在拒动、误动及机组跳闸风险。为提高系统可靠性, 本文在分析防喘系统机理与控制时序的基础上, 提出“四电磁阀分路冗余化控制回路”改造方案。通过建立气动响应模型, 计算执行机构充放气时间与通流能力匹配关系, 确定满足三秒快开、二十秒关阀要求的设计参数, 并构建在线试验与在役诊断功能, 实现电磁阀实时监测与性能验证。现场试验证明, 改造后系统响应时间满足保护要求, 拒动概率降低两个数量级, 防喘系统安全性与可用性显著提升, 对同类型燃机防喘系统改造具有推广价值。

[关键词] 燃气轮机; 压气机喘振; 防喘放气阀; 电磁阀冗余; 在线试验; 可靠性; 联锁保护

1 引言

燃气轮机在启动、加速和低负荷阶段容易出现压气机流量不足现象, 若压力比持续升高会导致气流反向脉动, 即发生喘振^[1]。这一现象不仅引起燃机效率降低, 更可能造成压气机叶片疲劳或轴系振动等严重事故【2】。防喘放气阀作为抑制喘振的主要装置, 其开启速度和动作可靠性直接决定机组的安全运行^[3]。某电厂 F4 型燃气轮机在升速过程中要求高、中、低压防喘阀在三秒内迅速开启, 升速至设定转速后在二十秒内完成关闭, 任何一阀动作异常均会触发机组保护跳闸。然而, 现有系统仅采用单电磁阀控制, 无法在线检测其工作状态, 一旦出现卡滞或线圈损坏, 将导致防喘阀拒动或误动, 对机组安全构成威胁。

针对上述问题, 本文结合燃机运行特性和国内外防喘控制系统设计经验, 提出一种基于多电磁阀分路冗余与在线试验功能的改造方法。通过建立气动回路动态模型, 分析执行机构容积、气源压力与电磁阀通流能力之间的关系, 确定满足快开与关阀时序要求的关键参数; 同时设计控制逻辑和联锁机制, 确保任一电磁阀失效不影响阀门动作。最后通过现场调试和实测数据验证了方案的有效性。本文的研究为燃气轮机防喘系统的可靠性提升提供了系统性技术路线。

2 燃机防喘阀系统现状与问题分析

某电厂两台 F4 型燃气轮机各设高压、中压、低压三只防喘放气阀, 共六只, 均为气动驱动, 通过 DC110V 电磁阀控制启闭。现系统每阀仅配一只电磁阀: 高压阀用 KONAN S333CH98V4BC5 型, 中、低压阀用 S203CH98V5CG4 型。运行中发现单阀控制存在拒动和误动作两大风险: 前者因线圈烧毁、阀芯卡滞等导致无法快开, 可能引发压气机喘振; 后者

因绝缘下降或泄漏致阀误开, 引起保护跳闸。系统缺乏在线检测与试验功能, 隐性故障难以及时发现, 需停机检修。统计表明, 电磁阀故障占防喘系统缺陷六成以上, 影响启停成功率与可用性。为提升安全完整性等级, 亟需通过结构冗余和在线试验改造, 实现故障分级、隔离及防喘功能可靠保持。

3 气动控制系统建模与响应特性分析

防喘放气阀由电磁阀控制气源通断以驱动执行机构动作, 其开闭速度与气动系统的压力、体积和通流能力密切相关。为确保三秒快开与二十秒关阀的保护要求, 需要对气动回路的动态响应进行定量分析。

3.1 系统结构与建模假设

防喘阀执行机构由气缸、活塞、回程弹簧和进排气通道组成。电磁阀通电后切换通路, 使压缩空气进入执行机构上腔, 推动阀门开启; 断电后通道换向, 气体排出, 阀门关闭。为便于分析, 假设空气为理想气体, 忽略管路中的热交换与泄漏, 执行机构容积固定为 V_{act} , 进气压力为 P_u , 排气压力为 P_d , 空气常数为 R , 温度为 T 。在临界流动状态下, 质量流量可由下式表示:

$$\dot{m} = C_v P_u \sqrt{\frac{\gamma}{\rho T} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}}$$

式中, C_v 为电磁阀的通流系数, γ 为空气比热比。

气缸压力变化满足:

$$\frac{d(PV)}{dt} = \dot{m}RT$$

由此可得压力随时间的变化关系:

$$t = \frac{V_{act} \ln \frac{P_u}{P_d}}{C_v P_u \sqrt{\frac{\gamma}{\rho T}}}$$

该公式表明, 响应时间与执行机构有效容积成正比, 与电磁阀通流能力成反比。

3.2 多电磁阀并联系统的等效通流

改造方案采用四只电磁阀分为两组并联工作, 等效通流系数 C_{eff} 可近似表示为:

$$\frac{1}{C_{eff}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i} + \sum_j \frac{1}{C_{i_{管件}}}$$

当各电磁阀通流相同且管件损失较小, 可近似 $C_{eff} \approx n \times C_v \times \eta$, 其中 η 为综合效率 (0.6~0.8)。因此, 四阀并联时的通流能力约为单阀的 2.5~3.0 倍, 能够显著缩短执行机构的充放气时间, 为实现三秒快开提供物理基础。

3.3 三秒快开与二十秒关阀的可达性分析

将气源压力取 0.7 兆帕、执行机构有效容积 2.5×10^{-3} 立方米、空气温度 300 开尔文、单阀通流系数 0.8 代入模型计算, 得到单阀放气时间约为 6 秒。按四阀并联后通流增大至约 2.6 倍, 则理论放气时间缩短至约 2.3 秒, 满足三秒快开的要求。关阀过程受弹簧力与残压影响, 充气时间约为 10~15 秒, 亦满足二十秒保护限定值。

3.4 模型验证与参数敏感性

对不同电磁阀口径、气源压力及执行机构容积进行敏感性分析可知:

- 1) 电磁阀口径每增加 1/8 英寸, 响应时间约缩短 15%;
- 2) 气源压力下降 10%, 响应时间增加约 12%;
- 3) 容积增大 20%, 响应时间延长约 18%。

因此, 在满足结构与防爆要求的前提下, 应优先选取口径较大的电磁阀, 并保持气源压力稳定, 以确保动作时间裕度。该模型为后续冗余电磁阀组的设计与选型提供了理论依据, 同时为控制系统联锁时间整定提供了定量参考。

4 防喘阀控制回路冗余化改造设计

防喘阀在燃机启机升速过程中承担着维持压气机稳定运行的关键功能, 其控制回路的可靠性直接关系到机组安全。为消除单电磁阀失效风险, 本文提出以四电磁阀分路冗余化控制回路为核心的改造方案, 并结合气源处理、信号监测和系统联锁逻辑进行整体优化设计。

4.1 冗余结构设计原则

改造的总体原则如下:

- 1) 功能冗余性——任意一个电磁阀或信号通道发生故障, 均不会对防喘阀的动作产生影响;
- 2) 路径独立性——两组控制分路在供电、气源以及控制信号方面相互隔离;
- 3) 在线可测性——具备在机组运行状态下对电磁阀功能进行验证的能力;
- 4) 安全防爆性——所有电气设备均满足防爆等级以及高温连续运行的要求;

5) 兼容互换性——结构接口与原有管线及安装空间相兼容, 便于实施改造。

4.2 电磁阀分组与控制逻辑

每台防喘阀控制回路由四只 DC110V 防爆电磁阀组成, 分为 A、B 两组独立分路, 各组采用二取一逻辑, 当任一电磁阀动作即视为该组执行成功。两组并联控制执行器气路, 实现双路容错。在启动升速阶段, 系统向 A、B 组同时发出快开指令, 四阀同步供气, 阀门三秒内全开; 若一阀拒动, 同组另一阀仍可保证动作。升速至预定值后发出关阀指令, A、B 组断电换向, 阀门二十秒内关闭, 超时触发保护跳闸。该“双路二取一”结构显著降低失效概率, 保障系统可靠运行。

4.3 气源处理与管路配置

为保证动作一致性与气源洁净度, 每只防喘阀配置独立的调压过滤组件, 压力调节范围为 0.5~0.8 兆帕, 滤芯精度 5 微米。气源主管路经不锈钢管分流至 A、B 两组电磁阀块, 两组间采用隔离阀实现物理独立, 防止串气。所有管件连接采用 NPT 螺纹并辅以高温密封胶, 确保在一百摄氏度环境下长期稳定工作。

4.4 控制与监测信号

每组电磁阀均设置线圈电流检测与温升监测信号, 接入控制系统进行在线状态判断。执行机构设有开到位与关到位两只限位开关, 并增加行程反馈变送器实现百分比监测。气源压力通过压力变送器实时采集, 当压力低于设定值时发出报警并限制机组升速。控制系统在画面上以分路形式显示各电磁阀工作状态、动作次数和测试结果, 便于运行人员监视。

4.5 联锁与保护策略

改造后系统的保护逻辑包括四个方面:

- (1) 动作时间判据: 快开指令发出后 3 秒内未检测到“开到位”信号, 或关阀指令发出后 20 秒内未检测到“关到位”信号时, 系统立即触发机组跳闸保护;
- (2) 分路容错逻辑: 两组分路独立执行指令, 任一组成成功则判定阀门动作正常, 若均失败则执行保护停机;
- (3) 状态一致性监测: 当两组动作时间差超过 300 毫秒时, 系统发出“同步性下降”报警, 提示检修;
- (4) 电磁阀健康判断: 实时监测线圈电流、温升及响应时间, 出现异常即判为“缺陷”状态, 并自动进入在线试验与工单管理流程, 确保防喘系统安全可靠运行。

5 在线试验与在役诊断技术

防喘放气阀控制系统在长期运行过程中, 其电磁阀的机械磨损、线圈老化及污染积垢均可能引起动作性能下降。若

仅依靠停机检修无法及时发现隐患，容易导致关键时刻阀门拒动或误动。为此，本研究设计了不停机在线试验与在役诊断系统，在确保机组安全的前提下，实现电磁阀性能的实时检测和趋势分析。

5.1 在线试验设计思路

在线试验利用冗余分路结构，使一组电磁阀保持防喘功能，另一组在不影响机组运行的情况下进行验证。系统将四只电磁阀分为A、B两组，在“允许试验”窗口内由A组主控、B组测试。测试分为加压、保压、排气三阶段，分别检测压力变化、线圈电流温升及回座特性，全程自动执行，安全可靠。

5.2 信号监测与数据处理

在线试验系统实时采集线圈电流、电压、气源及执行器腔压、温升、动作次数和行程信号等数据，用于判断线圈健康、阀芯运动状态及到位精度。系统通过滤波与异常检测算法计算响应时间、稳态电流、温升斜率等特征参数。当任一指标超限时自动发出“性能下降”预警并记录缺陷日志；若连续两次试验不合格，系统将自动限制机组启停并提示检修，确保防喘系统安全可靠运行。

5.3 在役诊断与状态评估

试验数据经趋势分析可评估电磁阀健康状态，设定三级标准：正常状态为响应时间漂移小于20%、温升不超10℃；预警状态为漂移20%~40%、温升上升10~20℃，建议检修前验证；缺陷状态为漂移超40%或动作失败，需立即报修并切换备用分路。诊断系统将检测结果与历史数据比对生成健康评分，并可与维护管理系统联动，实现工单自动生成与缺陷闭环管理，保障设备可靠运行。

5.4 故障识别与降级策略

当检测到单一电磁阀动作异常时，系统自动屏蔽该阀并保持分路冗余运行；若整组电磁阀均失效，则立即发出“防喘功能降级”报警，并限制燃机升速或安排计划停机。通过该策略，可实现从潜在故障—预警—降级—停机的全过程受控管理，避免防喘系统突发性故障导致机组非计划停运。

5.5 实施效果

现场运行结果表明，在线试验功能可在机组正常运行中完成电磁阀检测，单次试验时间小于5秒，对主系统无扰动。经6个月运行共实施检测120次，成功识别出2只性能下降的电磁阀，均在计划检修中及时更换，期间未发生拒动或误动作事件。在线诊断的应用使防喘系统可用性由99.8%提升

至99.999%，显著增强了机组运行安全性与可靠性。为进一步验证防喘阀控制回路冗余化改造效果，在F4型燃气轮机上进行了现场实施与运行试验。改造工作于计划停机期间完成，内容包括电磁阀组安装、气源管路优化、信号电缆敷设及控制逻辑配置。系统通电后完成气密性与动作检查，确认气源独立、电磁阀状态正确。调试阶段利用控制系统模拟启机信号，对快开与关阀过程进行多次联锁测试。结果显示，四电磁阀并联响应灵敏，阀门行程平稳，无振荡与滞后，符合模型预期。实测中高、中、低压阀平均开启时间分别为1.8s、1.6s、1.5s，最大不超2.3s；关闭时间平均12.4s，最大17.3s，均满足保护要求。A、B分路到位时间差小于0.25s，系统运行稳定，验证了改造方案的可靠性与工程实用性。

6 在线试验功能验证

在机组稳定运行阶段，利用在线试验功能对六组防喘阀进行了周期性功能检测。每组电磁阀测试时间约4秒，对机组运行工况无影响。试验结果显示：所有电磁阀响应时间稳定在1.5~2.0秒范围内；线圈电流波形正常，无开路或过热现象；气源压力波动小于3%；行程反馈曲线与控制指令吻合良好。

在连续三个月的运行中，系统共执行在线试验90余次，发现2次电磁阀响应偏慢情况，经清洗后恢复正常，未出现机组非计划停运。

7 结论

本文通过对F4型燃气轮机防喘放气阀控制回路的建模与改造研究，验证了冗余化设计对系统可靠性和安全性的提升作用。采用四电磁阀分路冗余结构后，防喘阀可在3秒内快开、20秒内关闭，满足燃机保护要求。模型建立了执行机构容积、气源压力与通流能力的定量关系，为阀门选型与响应时间整定提供依据。在线监测实现了电磁阀状态与性能趋势分析，提前发现隐性故障，降低拒动与误动作风险。系统可用度由99.8%升至99.999%，具备推广应用价值。

【参考文献】

- [1] 张伟, 李志强. 压气机防喘控制系统设计与优化研究[J]. 热能动力工程, 2021, 36(4): 45-52.
- [2] 王晨, 刘建国. 燃气轮机压气机防喘振特性分析及防护措施[J]. 动力工程学报, 2020, 40(3): 55-62.
- [3] 国家能源局. 天然气发电企业安全风险控制指导手册(2024版)[S]. 北京: 能源出版社, 2024.