

重型燃机点火失败及燃烧不稳定原因分析

黄子莹 田义舒

华电福新广州能源有限公司 广东 广州 511340

摘要: 重型燃气轮机是能源电力与航空推进的核心装备,其燃烧稳定性关乎机组安全与经济性。点火失败与燃烧不稳定是运行中常见故障,成因复杂且相互关联,涉及燃料供应、点火系统、燃烧室结构、控制策略及运行环境等多因素。本文梳理重型燃机燃烧系统组成与原理,从燃料、点火、环境、控制四方面分析点火失败机理,从燃烧动力学、燃料特性、流场结构及控制调节探讨燃烧不稳定根源,提出涵盖燃料、点火、燃烧室及控制的综合优化方案,为可靠运行与故障诊断提供理论依据。

关键词: 重型燃气轮机;点火失败;燃烧不稳定;燃料供应;燃烧室设计

引言: 重型燃气轮机凭借高效率、低排放、启停快等优势,在分布式发电、管网驱动及舰船动力领域占据关键地位。但燃烧室作为能量转换核心部件,长期面临点火困难与燃烧振荡两大难题。点火失败会中断启动程序、引发燃料积聚甚至爆燃;燃烧不稳定则导致压力脉动、热声耦合振荡,严重时造成火焰筒烧蚀或叶片断裂。二者常相互诱发,如点火燃料分布不均可能引发不稳定燃烧,燃烧振荡也可能导致二次点火失败。当前研究多割裂分析,本文从多因素耦合视角剖析成因,为优化设计与运维提供一体化方案。

1 重型燃机燃烧系统概述

1.1 燃烧室结构与工作原理

重型燃气轮机的燃烧室主要采用逆流环管型或环型结构,由外壳体、火焰筒、过渡段及燃料喷嘴组成。其工作原理为:高压空气经压气机压缩后进入燃烧室,约15%-25%的空气通过旋流器进入火焰筒头部参与燃烧,形成稳定的回流区以锚定火焰;剩余空气通过火焰筒壁面的冷却孔进入,一方面冷却高温部件,另一方面与高温燃气掺混,将出口温度控制在透平叶片允许范围内。燃烧过程本质上是燃料化学能向热能的高强度转化,在数毫秒内完成放热,局部温度可达1800-2000°C。燃烧室的性能评价指标包括点火可靠性、燃烧效率、出口温度均匀性、污染物排放及振荡特性,其中点火可靠性与燃烧稳定性是最直接影响机组可用率的关键指标。

1.2 点火系统组成

重型燃机的点火系统通常由点火变压器、高能点火器、点火燃料喷嘴及火焰检测装置四部分构成。点火变压器将380V工频电升压至数万伏,通过储能电容瞬间释放高能量(通常为10-50焦耳),在点火器半导体电嘴端部产生高强度电火花。与航空发动机不同,重型燃机多采用

“先导燃料-点火火炬”方案,即先点燃一个容量较小的点火火炬,再用火炬火焰引燃主燃烧器,以此克服大尺寸燃烧室点火能量不足的问题。火焰检测装置多采用紫外光电管或电离探针,前者通过检测火焰中200-300nm波段的紫外线判断火情,后者利用高温燃气电离导电的特性,通过探针与火焰筒之间的微弱电流信号反馈火焰状态。点火系统的可靠性直接决定启动成功率,其设计需兼顾点火能量、火花频率、电嘴寿命及抗积碳能力^[1]。

1.3 燃烧稳定性评价指标

燃烧稳定性评价主要依赖时域与频域两类指标。时域指标包括燃烧室压力脉动的均方根值与峰峰值,通常要求脉动幅值低于燃烧室平均压力的2%-5%,超过该阈值即判定为不稳定燃烧。频域指标则通过快速傅里叶变换将压力脉动信号分解至不同频率成分,重点关注主频及其倍频成分的幅值。按频率范围可将不稳定燃烧分为三类:低频振荡(10-100 Hz)常与供气系统或管网耦合有关;中频振荡(100-1000 Hz)多与燃料-空气混合过程相关;高频啸叫(>1000 Hz)则对应于燃烧室的声学模态。此外,瑞利准则是最经典的不稳定判据,其指出当热释放脉动与压力脉动同相位时,声能增长,振荡加剧;反之则振荡衰减。工程中还常用火焰传递函数表征燃料脉动与热释放脉动之间的幅频特性。

2 重型燃机点火失败原因分析

2.1 燃料供应系统问题

燃料供应系统的异常是导致点火失败的首要原因。对于气体燃料,若供气管路存在泄漏、调压阀故障或过滤器堵塞,会导致喷嘴前压力低于设计值,燃料射流速度不足,无法在火焰筒头部形成可燃混合气。对于液体燃料(双燃料机组),燃油黏度过高或喷嘴内部结焦会破坏雾化效果,产生的大粒径油滴难以在点火火花持续时

间内完成蒸发与着火。燃料组分波动同样不容忽视——当天然气中掺入高比例氮气、二氧化碳等惰性气体或氢气含量剧烈变化时,可燃极限与火焰传播速度发生偏移,原有的当量比设定值可能偏离着火窗口。此外,多喷嘴燃烧器中各支路流量分配不均,会导致部分喷嘴处于过贫或过富状态,即使整体当量比在可燃范围内,局部区域仍无法点火成功。

2.2 点火系统故障

点火系统自身的故障是点火失败的另一直接诱因。点火变压器老化、高压电缆绝缘破损或电嘴间隙不当均会导致火花能量不足或完全无火花。高能点火器的半导体电嘴在频繁使用后表面会形成积碳层,碳粒具有导电性,使火花沿电嘴表面爬电而非在端部跳火,显著削弱点火能量。对于采用火炬点火方案的重型燃机,先导燃料阀卡滞或点火火炬喷嘴堵塞会导致火炬无法形成或火焰强度不足,无法引燃主燃料。火焰检测装置的误报或迟报也值得关注——紫外探头窗口积灰会降低灵敏度,造成“有点火但检测不到”的假性失败;电离探针则可能因接地不良或绝缘陶瓷破裂输出干扰信号,误导控制系统中止点火程序。此外,点火时序设置不当(如燃料提前到达或火花延迟开启)会造成燃料积聚或火核形成窗口错失。

2.3 环境与操作条件影响

环境条件与操作参数的偏离显著影响点火可靠性。低温环境下,燃料与空气的温度降低导致蒸发速率减慢、化学反应活性下降,可燃极限范围收窄,所需的最小点火能量呈指数级上升。高海拔地区大气压力降低,空气密度下降,旋流器产生的回流区强度减弱,火焰驻留时间缩短,同样使点火变得困难。压气机出口气流畸变是另一隐忧——在启动加速过程中,压气机可能工作在非设计工况,出现叶尖泄漏涡或旋转失速前兆,导致进入燃烧室的空气流场不均匀,局部当量比剧烈波动,火核难以稳定发展^[2]。操作层面,清吹时间不足会导致燃烧室内残留未完全置换的可燃气体,点火瞬间发生爆燃冲击,反而吹灭火核;清吹时间过长则可能造成机组转速下降,偏离点火转速窗口。

2.4 控制策略缺陷

控制策略的缺陷是点火失败中容易被忽视的系统性原因。点火程序通常按照固定的“清吹-升速-供燃料-点火-火焰确认-脱扣升载”时序执行,但该时序若采用固定的时间参数而非基于状态反馈,则难以适应环境变化与设备老化。例如,当燃料热值波动时,按固定时间开启点火火炬可能导致火炬形成时刻与火花出现时刻错位;当压气机性能衰减后,原有的点火转速对应的压比可能不

足以燃烧室提供合适的流动条件。部分老旧机组的控制逻辑采用简单的“单次尝试失败即跳机”策略,未设置自适应重试机制,将可恢复的偶发故障误判为硬故障。此外,跨燃烧器点火顺序设计不合理——对于环管型燃烧室,先点燃的火炬向相邻火焰筒传火的过程如果因间距过大或流场遮挡而中断,会造成部分火焰筒点火成功而整体机组无法带载。

3 燃烧不稳定原因分析

3.1 燃烧动力学因素

燃烧不稳定本质是热释放脉动与声学压力脉动正反馈耦合。按瑞利准则,二者相位差绝对值小于 90° 时,声能净增长,振荡加剧。常见诱因有当量比脉动,燃料喷嘴压力波动调制喷射量,延迟时间若等于声波传播周期整数倍则共振;火焰面动力学方面,火焰受上游涡旋周期性冲击,表面积变化使热释放波动;部分预混燃烧中,当量比扫过可燃边界,火焰周期性熄火与再着火,产生低频振荡。

3.2 燃料特性影响

燃料化学成分与热物理性质决定燃烧稳定性。以天然气为例,实际气源含乙烷、丙烷等,高热值组分增多缩短点火延迟,改变火焰传播速度等,可能使稳定工况变振荡。掺氢是低碳化路径,但氢气易激发高频热声振荡,掺氢体积比超15%-20%,部分机型燃烧室会出现高频啸叫。燃料黏度与挥发性对液体燃料影响大,重油高沸点组分蒸发慢,有相变延迟,易低频振荡。燃料温度变化影响喷嘴流量等,间接改变燃烧稳定性边界。

3.3 流场与结构因素

燃烧室空气流场结构及声学特性是重要边界条件。旋流器回流区锚定火焰,旋流数过高,回流区边界周期性摆动,出现“涡旋脱落”,若脱落频率与声学频率接近,激发振荡。火焰筒与过渡段连接处几何不连续点产生剪切层,卷起涡旋撞击火焰面,成热释放脉动周期性源项。从声学看,燃烧室类似声学管道,固有频率取决于长度等,热释放脉动频率与声学模态频率一致时共振。冷却孔分布不当改变局部声阻抗,影响反射波^[3]。

3.4 控制与调节问题

控制系统响应特性与调节逻辑会触发不稳定燃烧。负荷变化时,燃料调节阀动作引入压力扰动,伺服机构响应过快,燃料流量波动直接调制热释放。多燃烧器并联机组,燃烧器间流路耦合,一个燃烧器压力脉动会传播至相邻燃烧器,引发整机耦合振荡。主动燃烧不稳定控制系统控制带宽有限,振荡频率超出范围会加剧振荡。燃烧室出口温度探头采样频率低、滤波参数不当,控制系统无法感知快速热释放脉动,失去调节依据。

4 优化策略与解决方案

4.1 燃料系统优化

针对燃料供应引发的点火失败与燃烧不稳定,应从燃料处理与供给回路两方面优化。燃料预处理环节:易结焦的液体燃料增设加热与精细过滤装置,控制黏度在2-5cSt最佳雾化范围;燃气组分波动频繁的管网加装在线色谱仪或热值仪,实时监测低位热值与沃泊指数并接入燃料调节闭环。供给回路方面:采用双路冗余调压阀组并配快速切断阀,避免单阀卡涩导致供气中断。掺氢机组需重新标定燃料喷嘴流量特性,必要时采用微孔喷嘴或燃料分级喷射策略,通过分散注入点缩短火焰长度,降低热释放脉动的相干性。燃料集管的长度与直径需经声学计算优化,避免其固有频率与燃烧室声学频率重合,防止管路与燃烧室发生耦合振荡。

4.2 点火系统改进

提高点火可靠性的改进集中于点火能量提升、电嘴防积碳及火焰检测冗余设计。选用储能 ≥ 30 焦耳/次的高能点火变压器并缩短高压电缆,减少传输损耗。采用半导体电嘴与火花隙电嘴并联的复合点火方案,前者引燃难燃混合气,后者保持长寿命低积碳。点火火炬燃料管路增设电磁脉冲自清洁装置,每次点火前后自动通入高压气体吹除积碳与残液。火焰检测采用紫外光电管与电离探针双冗余配置,通过“或”逻辑判定火焰存在,避免单一传感器失效误判。低温点火困难机组可加装进气电加热或采用临时富燃料点火策略——点火瞬间将当量比提升至接近化学恰当比,待火核稳定后再恢复贫油设计值^[4]。

4.3 燃烧室结构优化

燃烧室结构优化旨在从流场与声学源头抑制不稳定燃烧。流场方面:重新设计旋流器叶片角度与数量,采用双级反向旋流结构使回流区紧实稳定,减少涡旋脱落周期性;火焰筒头部增设钝体稳焰器或导流环,增强火焰锚定能力。针对高频振荡,在火焰筒壁面安装1/4波长管或亥姆霍兹谐振器,根据实测主频计算谐振腔长度与颈部尺寸,吸收耗散特定频率脉动能。多喷嘴燃烧室调整各喷嘴周向间距与径向位置,破坏火焰面相位锁定关系,使不同喷嘴的热释放脉动相互抵消。冷却孔排布需

重新审视,适当增加火焰筒头部冷却空气量,通过局部温度梯度改变声速分布,打破声学驻波形成条件。结构优化的目标是拓宽燃烧室稳定工作裕度。

4.4 控制策略升级

控制策略升级是解决点火失败与燃烧不稳定问题最具成本效益的途径。点火控制方面:引入基于状态的自适应启动程序,实时监测压气机出口压力、温度、转速及燃料热值,动态计算最佳点火当量比与转速窗口,取代固定参数时序。首次点火失败后设置重试逻辑,自动增加5%-10%点火能量、微调燃料流量后再次尝试,连续三次失败方跳机报警。燃烧不稳定抑制方面:采用分级燃料供给策略,低负荷振荡区域关闭部分喷嘴,提高运行喷嘴当量比以远离贫燃吹熄边界。加装高频动态压力传感器阵列,将实时脉动反馈至燃料调节阀形成闭环主动控制,检测到特定频率振荡超限时自动施加反相小幅度燃料脉动。利用运行历史数据训练神经网络模型,在振荡幅值显著增大前5-10秒预警并自动执行降载或燃料再分配,实现从被动响应到主动规避。

结束语:

重型燃气轮机点火失败与燃烧不稳定威胁机组安全经济运行,二者根源紧密交织于燃料特性、流动条件、燃烧室结构及控制逻辑的复杂耦合。本文从燃烧系统基本构成出发,剖析了点火失败在四个维度的成因及燃烧不稳定的四层诱因,提出一体化优化方案。研究表明,解决关键在于建立全工况协同设计理念。未来低碳燃料应用下,需发展数字孪生实时诊断与自愈控制技术,保障机组可靠低排放运行。

参考文献:

- [1]东方电气.G15点火成功!我国重型燃气轮机系列化迈出坚定一步[J].中国机电工业,2025(1):22-23.
- [2]张晓毅,章旋,白涛,等.自主重型燃气轮机控制系统正向设计[J].动力工程学报,2026,46(3):201-211.
- [3]曹冰,吕迎波,高义宇,等.氢气内燃机在重型商用车上发展前景及关键技术[J].重型汽车,2023(3):12-13.
- [4]沈新军,刘永文,章旋,等.燃气轮机燃烧模式切换过程的动态建模与仿真[J].发电设备,2025,39(1):1-6.