

基于 FTA 方法的燃气轮机涡轮出口温度场不均故障诊断

吴 森¹, 徐 鑫²

(1. 海军驻沈阳地区发动机专业代表室, 沈阳 110000;

2. 中航工业沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)

摘 要:本文基于故障树分析(FTA)方法以某型燃气轮机发电机组并网发电过程中,涡轮出口温度场出现不均匀现象为顶事件,建立故障树,通过设计复查、质量复查、孔探仪检视和机理分析对故障树底事件进行逐一排除,并对比排故措施贯彻前后涡轮出口温度离散度,最终确定天然气含水引发喷嘴结垢是导致涡轮出口温度场不均的原因。

关 键 词:发电机组;燃气轮机;故障树;涡轮出口温度场

中图分类号:V239

文献标志码:A

文章编号:1009-2889(2018)02-0051-05

故障树分析(FTA)是系统自上而下的一种演绎分析方法。通过对可能或已经造成系统故障的各种因素(包括硬件、软件、环境、人为因素)进行分析,按照一定事件逻辑关系,绘出逻辑相关图(故障树图),从而确定系统故障原因的各种可能组合方式或发生概率,并采取相应的改进措施^[1]。

本文主要针对某型燃气轮机机组在并网发电过程中出现的涡轮出口温度场不均现象进行定性分析,并作为顶事件,按照一定事件逻辑关系,绘出故障树,确定可能引发故障的各种原因,作为底事件进行清查。

1 故障现象描述

某型燃气轮机发电机组见图1,燃气轮机压气机为轴流式,9级,压比13,进口处设置4级可调导叶;涡轮1级,动力涡轮2级。减速器为GSC375-WX,发电机为BDAX6-155EH。机组并网发电过程中,燃气轮机涡轮出口温度场出现不均匀现象,并随发电时间的增加不均匀度持续恶化,最严重时,涡轮出口温度8支电偶温差最大超过210℃,机组停车排故。

结合故障现象,现场维护人员采取了如下措施:

1) 燃气轮机定检,孔探检查发现3支喷嘴的天然气喷口出现结垢堵塞。

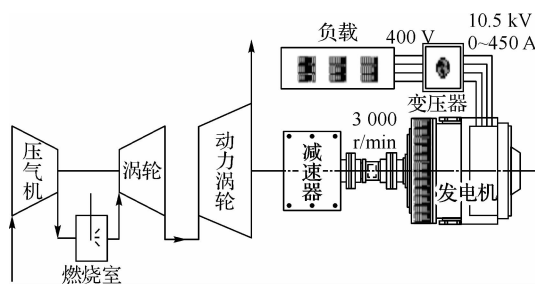


图1 某型燃气轮机发电机组

2) 喷嘴一次清理后恢复试车,涡轮出口温度场不均匀度未得到明显改善。

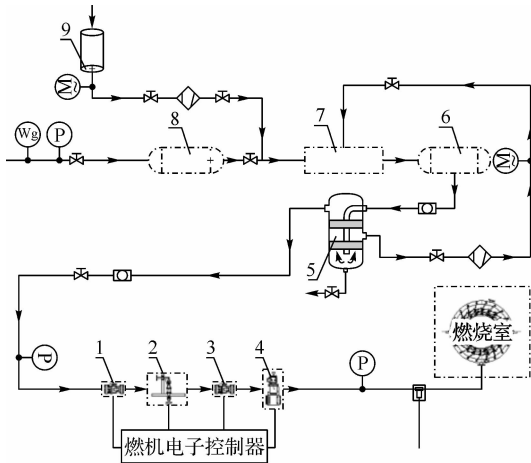
3) 喷嘴二次清理并调整周向位置后恢复试车,涡轮出口温度 T_p 离散度减小。

2 故障原因分析

2.1 燃气轮机相关情况

某型燃气轮机机组燃用天然气发电时,其天然气供气原理如图2所示。天然气经螺杆压缩机压缩、气液分离器分离后,经速关阀Ⅱ、排空阀、速关阀Ⅰ、燃调阀进入燃气轮机供气管,天然气进口压力应保持在1.0~1.5MPa范围内。

燃气轮机涡轮出口8支温度传感器呈逆气流顺时针均布(见图3),受感部插入至主流道中心区域,可精确探测排气温度。



1-速关阀II；2-排空阀；3-速关阀I；4-天然气调节阀；
5-气液分离器；6-高压分离器；7-螺杆压缩机；
8-低压分离器；9-软化水管

图2 燃气轮机发电机组天然气供气原理图

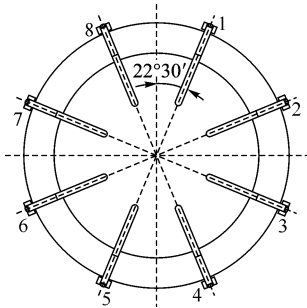


图3 T_p 温度传感器周向分布示意图

2.2 顶事件的确定

顶事件是故障树分析中所关心的最后结果事件。此次排故过程中,以某型燃气轮机涡轮出口温度场不均作为顶事件进行故障树定性分析。

2.3 故障树的建立

基于已有故障案例和运维经验,整理出温度传感器故障、喷嘴积炭、天然气品质问题、燃烧室气流结构偏离设计要求、排气通道回火等 17 条燃气轮机涡轮出口温度场不均故障底事件,如表 1 所示。

基于表 1 分析结果,然后建立故障树,如图 4 所示。将导致燃气轮机涡轮出口温度场不均匀的故障原因分为设计缺陷、加工质量因素和工作异常两方面,然后再针对性地排查,最终对应 17 条底事件,即 $X_1, X_2, \dots, X_{17}$ 。下面对这 17 条底事件的排查工作进行详细分析。

2.4 底事件分析

2.4.1 设计缺陷分析、加工质量分析

针对某型燃气轮机涡轮出口温度场不均的故障现象,开展设计复查和加工生产质量复查。

表 1 故障树底事件排查表

序号	子节点	排查说明	排查结果
X_1	喷嘴设计缺陷	设计复查(图纸、文件)	排除
X_2	火焰筒设计缺陷	设计复查(继承原型机)	排除
X_3	天然气含杂质颗粒,喷嘴积炭	孔探检视,喷嘴头部附着物呈白色	排除
X_4	天然气含水,喷嘴结垢	孔探仪检视,电站其它机组喷嘴经常堵塞	初步确定
X_5	火焰筒内壁积炭	孔探仪检视	排除
X_6	压气机损伤,叶片积垢	孔探仪检视	排除
X_7	火焰筒变形(局部掉块、裂纹等)	孔探仪检视	排除
X_8	掺混孔位置变化	—	—
X_9	气膜孔流量差异	—	—
X_{10}	排气通道回火	未见爆燃、罩壳火情传感器测量值未见异常波动	排除
X_{11}	信号通道故障	通道校检未见异常	排除
X_{12}	线路电缆故障	温度信号未中断	排除
X_{13}	温度传感器故障	更换温度传感器(对比前后测量值)	排除
X_{14}	喷嘴流量差异	质量复查(流量试验)	排除
X_{15}	喷口倒角不均匀	质量复查(喷嘴出厂交付检查项目)	排除
X_{16}	喷嘴流道表面光洁度	质量复查(喷嘴出厂交付检查项目)	排除
X_{17}	喷嘴组装质量	质量复查(燃气轮机装配卷综)	排除

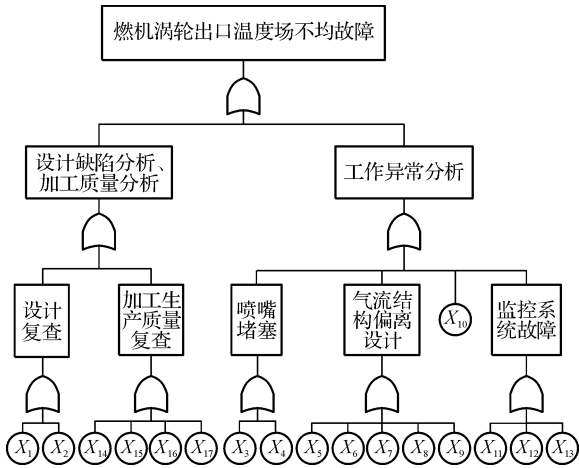


图4 燃气轮机涡轮出口温度场不均故障树

1) 设计复查

某型燃气轮机设计生产过程中,对燃烧室方案进行 CFD 数值模拟计算及优化,喷嘴和燃料总管进行喷嘴试验和扇形燃烧室点火试验。

其中,喷嘴试验内容包括喷雾角度、雾化质量和气体喷嘴流量试验;燃烧室点火试验包括燃烧室的点火/熄火特性试验、基本负荷状态下校核燃烧室性能参数(燃烧效率、温度场分布、壁温等)。

查阅燃气轮机燃烧室零组件图纸及相关技术文件,重点检查喷嘴装配尺寸、喷嘴密封性及气体喷嘴流量试验等相关技术要求。复查表明某型燃气轮机特别是燃烧室设计状态有效、受控,相关图纸文件完整、准确、有效。

2) 加工生产质量复查

分析认为,如果喷嘴喷孔与旋流器不同心,喷口倒角不均匀,加工面光洁度不够,喷嘴组装质量不高,工艺性能不良,易引起天然气浓度场不均,形成火焰筒局部过热、掉块、裂纹,导致火焰筒局部变形,气流结构、天然气浓度场和燃气温度场的变化,引起涡轮出口温度场不均。

喷嘴出厂交付时,喷口孔径、喷口倒角、加工面光洁度等都在合格范围之内。喷嘴流量试验的结果表明气体喷嘴流量不均匀度满足 $\pm 1.5\%$ 要求值。查阅燃气轮机装配卷综,喷嘴的安装过程有效、受控,符合装配工艺要求。

2.4.2 工作异常分析

1) 喷嘴堵塞

分析认为,当某个喷嘴出现堵塞时,由于该喷嘴天然气流量的减少,使得其对应火焰筒出口区域的燃气温度下降。但是,由于燃气轮机在某一状态下总天然气量是一定的,部分喷嘴流量下降,必然导致其它喷嘴流量的增加,从而使这些喷嘴对应火焰筒出口区域气流的温度升高。随着运行时间的增长,结焦/结垢颗粒聚积,堵塞越来越严重,流量下降越来越大,而其它喷嘴相应的温度也越来越高^[2-6]。

(a) 天然气含水,喷嘴结垢

了解到由于现场设备老化,天然气经螺杆压缩机增压、气液分离器分液后,进入燃气轮机的天然气内仍有少量残存的水,易引起喷嘴结垢堵塞。

燃气轮机定检日,孔探检视,喷嘴天然气喷口结垢堵塞,附着物呈白色。

(b) 天然气含杂质颗粒,喷嘴积炭

燃气轮机定检日,孔探检视,喷嘴头部附着物呈白色。

2) 排气通道回火

分析认为,在燃烧室内未完全燃烧的部分天然

气在排气通道内聚积,受热爆燃,火焰自下游传递到 T_p 测温区域,造成 T_p 局部温度场过热。

了解到,试车过程中排气通道内未发现因天然气聚积爆燃产生的明火、火星,罩壳火情温度传感器测量值未见异常波动。

3) 监控系统故障

监控系统如果出现故障,可能引起控制系统显示的各支 T_p 温度出现偏差,造成 T_p 温度场不均匀的假象。对造成 T_p 监控系统故障的几个方面一一排查:

(a) 线路电缆检查

当传感器连线烧断或接触不良时, T_p 传感器温度信号会瞬间中断,从试验现场数据看, T_p 各支传感器一直有温度信号显示,未出现中断现象,因此排除传感器连线故障的可能。

(b) 信号通道检查

如果通道有误,会导致控制器采集到的 T_p 出现异常。在燃气轮机调试前,已经进行了标定,并进行了 T_p 通道校检,未发现异常。

(c) 传感器检查

停机对 T_p 温度值最高、最低的两支传感器进行更换,燃气轮机再次开车运行发现涡轮出口温度场不均匀现象依然存在,并且示数与传感器更换之前的相近,说明 T_p 传感器未发生故障。

4) 火焰筒气流结构偏离设计要求

分析认为,发动机工作过程中,压气机损伤、叶片积垢引起出口流场畸变,火焰筒内壁积炭,因热疲劳产生的局部变形(如掉块、裂纹及烧伤变形),掺混孔位置变化,气膜孔流量差异等均可引发燃烧室内的空气量分配及燃烧区、掺混区射流穿透深度的变化,引起气流结构偏离设计要求,导致燃烧室出口燃气温度分布变化,造成 T_p 温度场不均^[7]。

(a) 压气机损伤、叶片结垢

燃气轮机定检日对压气机流道、叶片进行孔探仪检查,压气机流道、叶片表面无明显结垢痕迹。压气机出口压力试验数据较均匀。

(b) 火焰筒内壁积炭、筒体变形、掺混孔位置变化、气膜孔流量差异

燃气轮机定检日对燃烧室火焰筒头部、内外壁进行孔探检查,火焰筒未发现明显掉块、裂纹、烧伤变形。

3.5 底事件排查

通过设计复查、质量复查、孔探仪检视和机理分

析,某型燃气轮机涡轮出口温度场故障树底事件排查情况见表 1。本次故障树底事件共有 17 条,初步可确定 X_4 “天然气含水,喷嘴结垢”为故障原因,而 X_8 “掺混孔位置变化”、 X_9 “气膜孔流量差异”,由于故障发生后燃气轮机不能立即返厂分解,暂时无法排除。

4 排故措施及验证

根据故障原因分析情况,从燃烧室机匣上拆下喷嘴,目视检查发现燃气轮机水平面以下喷嘴堵塞情况严重,其中 1 支喷嘴(#15 喷嘴)几乎完全堵死,大致情况见图 5。综合各方面因素,堵塞的喷嘴不能立即返厂处理,工作人员只能对喷嘴进行现场清理,前后共计两次。

4.1 一次清理

由于燃烧室机匣上有 2 支喷嘴的拆除与电起动机干涉,一次清理不含这 2 支喷嘴,清理过程如下:

1) 用 $D=2\text{ mm}$ 的钻头对天然气喷射孔进行物理清理,去除喷嘴头部可视范围内的大块堵塞物。

2) 使用 3% 食用白醋浸泡喷嘴头进行化学浸泡,去除喷嘴头内部的碱性附着物。

3) 目视检查清理后的喷嘴。

喷嘴首次清理后恢复试车,天然气供气压力及阀门开度较之前有所下降,天然气通流能力有所回升,但燃气轮机 T_p 温度场不均匀度未明显改善,随着燃气轮机功率的升高,温度场离散度反而进一步加剧。

4.2 二次清理

二次清理对象含所有喷嘴,清理过程如下:

1) 用 $D=2\text{ mm}$ 的钻头清理喷嘴头部喷射孔。

2) 重点清理喷嘴的天然气内部流道,30% 工业醋酸化学浸泡 + 高压空气清吹 + 清洗汽油浸泡 + 高压空气清吹循环清理。

3) 人工清吹检查喷嘴天然气流道清理后流通能力。

4) 视喷嘴堵塞程度及 T_p 温度场分布情况将喷嘴周向位置进行局部调整,调整后, T_p 低温区 (T_{p6} 对应区域) 更换为大流量喷嘴, T_p 高温区 (T_{p8} 对应区域) 更换为小流量喷嘴,见图 6。

图 7 为二次清洗前后涡轮出口温度分布。清洗前 T_{p6} 对应区域堵塞,出现较大低温区,如图 7 中虚线所示。采用上述排故方案后的涡轮出口温度分布如图 7 中实线所示,涡轮出口温度离散度大幅减小,

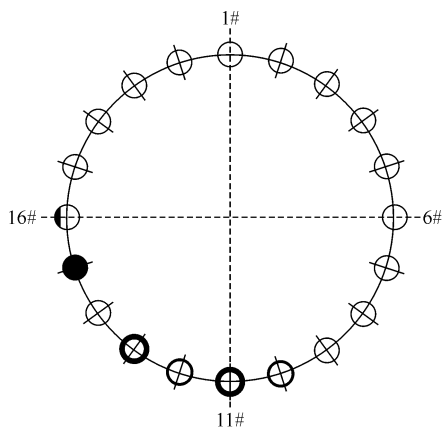


图 5 喷嘴堵塞程度(阴影代表堵塞程度)

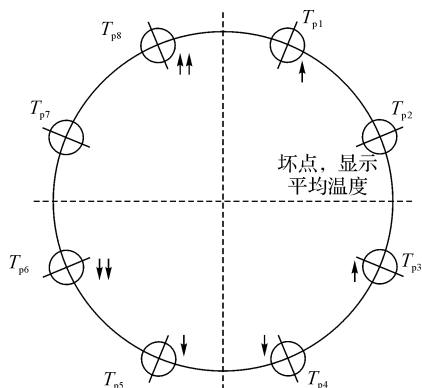


图 6 T_p 温度场分布情况(箭头向上表示高温)

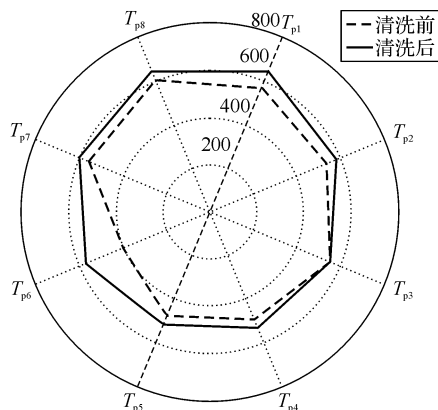


图 7 喷嘴清洗前后 T_p 温度场分布
解决了结垢对喷嘴的影响。

5 结论

本文经设计复查、质量复查、孔探仪检视和机理分析对故障树底事件进行逐一排除,并通过对比排故措施贯彻前后涡轮出口温度离散度,最终确定天然气含水引发喷嘴结垢是导致涡轮出口温度场不均的原因。结合本次故障发生原因,在发动机运行过程中应严格遵守有关规定,做好发动机的维护工作。

- 1) 保持燃料清洁,天然气必须符合《轻型燃气轮机气体燃料使用技术要求》(HB 7120-94)要求。
- 2) 加强对发动机涡轮出口温度的监控。
- 3) 加强对燃烧室火焰筒内外壁、旋流器、喷嘴及压气机叶片的孔探检查。
- 4) 严格遵守发动机操作规程,遵守发动机各工作状态下对涡轮出口温度和连续工作时间的规定,按规定进行暖机和冷机,防止温度过高、使用时间过长或燃烧室骤冷骤热。

参考文献:

[1] 刘文彬. 基于模块化思想的动态故障树分析方法研究[D]. 南京:南京理工大学,2009:10-30.

[2] 侯凌云,侯晓春. 喷嘴技术手册[M]. 北京:中国石化出版社,2007:66.

[3] 王晓琦. 压力旋流喷嘴设计和实验研究[D]. 北京:中国石油大学,2007:61-66.

[4] 杨洪磊. 双燃料喷嘴设计与燃烧流场数值模拟[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2010:52.

[5] 贺红娟. 双燃料燃烧室燃烧流场数值模拟[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2009:45.

[6] CHINN JOHN,J YULE ANDREW. Computational analysis of swirl atomizer internal flow [C]//Proceedings of the 7th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems. Seoul: Institute for Liquid Atomization and Spray System,1997,

[7] 朱达,周晓宇,潘勇进. 9FA 燃气轮机 DLN2.0 + 燃烧室燃烧异常判断及处理[J]. 电力设备, 2006, 7(10): 26-27.

Research on Fault Tree Analysis of the Uneven Distribution of Turbine Outlet Temperature Field

WU Sen¹, XU Xin²

(1. PLA Navy Engine Professional Military Representative Office in Shenyang Area, Shengyang 110000, China;
2. AVIC Shengyang Engine Design And Research Institute, Shengyang 110015, China)

Abstract: In the process of generation in a power station by the gas turbine system, the temperature distribution of turbine outlet goes wrong. So a fault tree is built, in which this fault is set as top event. Then bottom events in this fault tree are gradually eliminated by design process check, design quality check, inspection hole check and mechanism analysis. In addition, the scatter degree of turbine outlet temperature distribution is compared before and after the solution is implemented. Eventually, the natural gas with excessive water content, which leads to fuel nozzle dirty, is the cause of this fault.

Key words:generator set; gas turbine; fault tree; turbine outlet temperature

+++++
(上接第 45 页)

Analysis of Flow Calibration of 6FA Gas Turbine Intake System

XUE Jing

(Nanjing Turbine and Electric Machinery(Group) Co., Ltd., Nanjing 210037, China)

Abstract: Based on a 6FA gas turbine intake nozzle calibration device design process, the intake port model was established, flow nozzle, pressure rakes and scanning valve programs were selected and installed, which was used to explain the role of installation of intake flow calibration system and installation of calibration device pairs effect of inlet flow nozzle air flow field. It can help to improve gas turbine inlet flow measurement accuracy.

Key words: 6FA; gas turbine; compressor; air inlet;flow nozzle; scanning valve