

基于余弦定理的燃气轮机燃烧故障诊断方法

胡志鹏¹, 何 皑²

(1. 重庆天骄航空动力有限公司设计中心, 重庆 401135;

2. 北京天骄航空产业投资有限公司工程技术部, 北京 100084)

摘 要:基于“模式识别”思想,本文提出了一种基于余弦定理的重型燃气轮机燃烧室故障诊断方法。该方法通过用余弦角度表征燃烧室正常及不同故障下的透平出口温度分散度,从而可以让真正的燃气轮机燃烧室故障和传感器本身故障能够被快速识别并区分出来,最后以GE公司的6FA重型燃气轮机为对象进行了数字仿真验证,试验结果表明该方法具有良好的诊断精度和实时性。

关 键 词:重型燃气轮机;故障诊断;温度分散度;燃烧室故障

中图分类号:TK472

文献标志码:A

文章编号:1009-2889(2019)01-0021-05

随着现代燃气轮机技术的发展和效率提高的需求,重型燃气轮机的透平前温度越来越高,以GE公司的重型燃气轮机为例,目前F级重型燃气轮机的透平前温度就高达1 300℃,新一代G/H级重型燃气轮机的透平前温度更是高达1 450℃。在如此高的温度下,重型燃气轮机热端部件如燃烧室或过渡段等部件长期运行也难免出现一些破裂和损坏等故障^[1-2],而燃烧室的故障又容易对机组造成重大事故,因此监测燃烧室的健康状态成了燃气轮机研制过程中一个不得不考虑的问题。

然而,燃烧室内过高的温度环境又使得传感器在该区域无法长期可靠的工作,目前工业上较为常用且经济的方法就是通过燃烧室后端透平排气温度热电偶来间接的监测燃烧室的健康状态^[3]。因为重型燃气轮机环管型燃烧室有一个重要特征:当重型燃气轮机多个环管型燃烧室中的一个出现燃烧不稳定、燃烧室破裂、燃烧温度不均匀或过渡段破裂时,都会引起透平的进口流场和温度不均匀,影响排气端的温度分布。传统的方法就是在透平排气通道中尽可能多地布置测温热电偶,然后检测这些热电偶所测温度是否都相同,但在实际工业中,由于干扰和噪声的存在,即使重型燃气轮机处于稳定正常运行状态下,这些热电偶所测温度也不可能绝对相同。

而且,因为重型燃气轮机在不同的工况运行时,透平前温和排气温度都是不同的。当机组并网发电时,若所带负荷较多发电量大时,重型燃气轮机需要的燃料量多,透平前温也必然高些。相反,若机组所带负荷较少时,则透平前温低,排气温度也低。而排气温度的不同也影响排气温度的不均匀程度:当排气温度高,其相应的热电偶所测量到的偏差也大,不均匀程度也大;相反,排气温度低,则这些热电偶在不同地点所测量到的排气温度的偏差值也就较少,不均匀程度低。因此如何利用排气温度构造适当的指标,准确反映燃烧室状态是在线燃烧故障诊断的难点。

此外,重型燃气轮机的排气端测温热电偶一般都在几十个,对每一个测温热电偶设置阈值并进行监测,不利于修改和维护,给用户和工程师都带来了较大的设计负担和使用维护不便。虽然目前的智能算法如神经网络、机器学习等已经有了很大的发展^[4-5],但这些智能算法一般运算复杂,需要高性能的芯片作为载体,难以实现低成本、高效率的实时性计算。因此燃气轮机的在线燃烧监测保护算法需要一种简便而准确度又高的算法。

针对上述问题,本文对GE的V1e控制系统的在线燃烧诊断方式进行了分析,并提出了一种基于

收稿日期:2018-07-09 改稿日期:2018-08-06

作者简介:胡志鹏(1986—),男,重庆人,产品设计部副部长,主任设计师,学士,研究方向为燃气涡轮发动机总体性能及故障诊断,E-mail:huzhipeng@skyrizon.com.cn。

余弦定理的燃气轮机在线故障诊断方法,最后以 GE 公司的 6FA 重型燃气轮机为测试对象,以典型的传感器故障和燃烧故障进行了仿真实验。

1 GE 机组的燃烧故障诊断原理

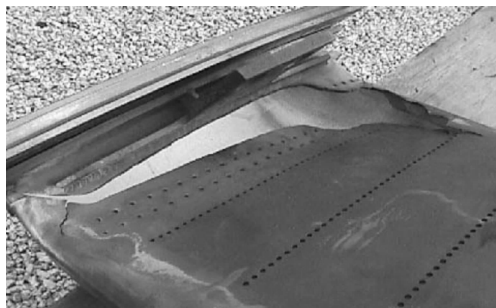
1.1 常见的燃烧故障

根据目前燃气轮机电厂用户的使用经验,常见的燃烧室故障主要有^[6]:

1) 燃烧室、过渡段烧损:通常由于启动时,燃烧室的气路通道被铁屑、焊渣、油污等异物堵塞,从而使得燃料量过于集中在燃烧室部件的某一点上,使得燃烧室和过渡态发生不同程度的裂纹,如图 1 所示。



(a) 过渡段轻微裂纹



(b) 过渡段严重裂开

图 1 燃烧室过渡段破裂

2) 喷嘴堵塞或烧灼:也是因为长期运行后,由积灰在管道壁上不断沉积,使得喷嘴和管道壁的内径缩小,产生节流,容易引起燃烧脉动压力剧烈波动,特别是各型重型燃气轮机先后采用预混喷嘴后,更加复杂的流道和结构更加容易出现该类事故。

3) 传感器故障:透平排气端的热电偶因为也工作在相对高温的环境下,传感器本身也会出现故障,容易导致控制系统误认为燃烧室故障而跳闸停机。

1.2 燃烧故障特征的观测

对于上述燃烧室故障,目前有两种通用的诊断方式^[7],第一种采用添加硬件诊断装置的方式,通过直接在燃烧室加装燃烧脉动压力传感器及分析

仪,用来捕捉燃烧脉动压力异常来监测燃烧室,但这种方式成本较高,需要购置额外的硬件设备。

另一种可行的办法就是采用软件诊断的办法,由于燃烧异常通常会影响到透平的排气温度,因此可以在控制系统中添加透平排气温度监测模块来间接的对燃烧室进行诊断,这种方法成本低,可靠性也较高,目前受到越来越多燃气轮机厂商的青睐。这种方法特别适用于采用环形管筒式燃烧结构的燃气轮机,由于多个燃烧室同时出现故障的概率极低,因此当某一燃烧室出生故障时,那必将引起透平排气分散度的不均匀。因此一种可行的办法就是在燃气轮机透平排气端均匀安装测温热电偶,来捕捉透平排气温度的不均匀程度,学术上也称温度分散度,这种诊断架构如图 2 所示。

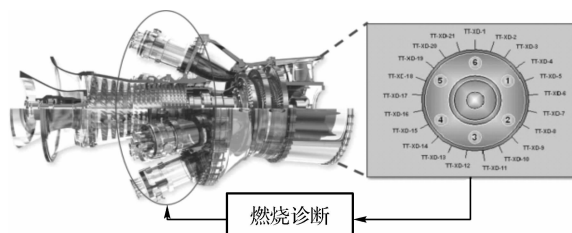


图 2 基于软件的燃烧诊断架构

从诊断的角度来看,透平排气端的热电偶个数越多,透平排气温度场的分布度获取就更准确,但从成本和燃气轮机本身安装位置考虑,其测温热电偶的安装个数是有限的,其个数通常为燃烧室的个数的 1~3 倍左右。以 GE 重型燃气轮机系列为例,燃烧室和测温热电偶个数如表 1 所示。

表 1 GE 燃气轮机的燃烧室与排气测温热电偶数量对比

燃机机型	燃烧室个数	排气热电偶个数
6B	10	18
6FA	6	21
9E	14	24
9FA	18	31

从表 1 中可以看出,燃气轮机的功率越大,排气流量也越大,透平的排气面积圆也越大,可安装的传感器也就越多,但传感器数量越多,发生的故障概率也就越大。

1.3 基于经验公式故障诊断方法

基于经验公式的燃烧诊断在 GE 系列燃气轮机中被大量采用,其主要的诊断步骤如下:

1) 首先根据经验公式计算一个透平排气温度允许度 S_{allow} ;

2) 分别将透平热电偶最高测量值与最低测量

值之差、最高测量值与第二测量最低值之差、最高测量值与第三测量最低值之差和最高测量值与第四测量最低值之差记为分散度 S_1, S_2, S_3 和 S_4 ;

3) 设定警告值、停机值和紧急跳闸值,根据 $S_1/S_{\text{allow}}, S_2/S_{\text{allow}}, S_3/S_{\text{allow}}$ 和 S_4/S_{allow} 超过这些警告、停机、跳闸阈值的情况,以及最低度数间的是否相邻情况,得到一系列的故障标志信号 L60SP1 ~ L60SP16;

4) 根据预先制定的规则,组合 L60SP1 ~ L60SP16 的逻辑,从而得到热电偶故障和燃烧故障为真的判断。

GE 的 Mark VIe 透平排气温度允许度 S_{allow} 的公式如下:

$$S_{\text{allow}} = T_4 \times C_{\text{TL4}} - P_2 \times C_{\text{TL3}} + C_{\text{TL5}}$$

式中: T_4 为透平出口温度, P_2 为压气机出口压力, $C_{\text{TL4}}, C_{\text{TL3}}$ 和 C_{TL5} 为经验系数,对于 6FA 燃气轮机, C_{TL3} 为 0.06, C_{TL4} 为 0.155, C_{TL5} 为 -10。对于 9FA 燃气轮机, C_{TL3} 为 0.08, C_{TL4} 为 0.12 ~ 0.145, C_{TL5} 为 30。

燃烧故障诊断的规则判断如下:

燃烧故障警告:1) 两个排气温度最低的热电偶相邻,并且它们与最高值之差都超过了警告阈值;2) 第 2、3、4 低的三个热电偶相邻,且它们与最高值之差都超过了停机阈值。

燃烧故障跳闸:1) 三个排气温度最低的热电偶相邻,并且它们与最高值之差都超过了警告阈值;2) 第 2、3、4 低的三个热电偶相邻,且它们与最高值之差都超过了停机阈值。

热电偶故障:1) 最低与最高值之差超过了一个明显不可能的阈值;2) 只有一个最低与最高值之差超过了警告阈值。

这种方法的缺陷是透平排气温度允许度 S_{allow} 本身会受到测量噪声的干扰,而且燃烧故障发生,其经过透平中气流的多轮旋转、掺混和传热之后,分散度 S_1, S_2, S_3 和 S_4 并不十分明显,在实际工作过程中 GE 机组多次出现过诊断不及时的报道^[8],或者误将传感器故障当成了燃烧室故障,因此仍然依赖有经验的工程师对透平排气分散度的结果进一步分析。

2 基于余弦定理的在线故障诊断

上一节中,基于传统的经验公式的方法可以看出,其燃烧监测保护方法过于复杂,大量的经验参数需要整定。而且警告、停机阈值等参数必须随着燃

气轮机部件特性的衰竭不断地进行实时调整,否则随着燃气轮机使用寿命的延长,传统的诊断算法准确率不断下降。因此本文利用基于余弦定理的数据驱动方法,实现由一个利用正常与故障数据组的偏差角度来表征分散度的方法,从而提高燃气轮机燃烧监测保护系统的实时性和准确性。

2.1 余弦定理在故障诊断中的应用原理

余弦定理的原理就是多维空间中,任意两个向量都存在一个夹角。比如当燃气轮机正常运行时,一组正常的透平排气热电偶的测量数据向量为 $T_{\text{nor}} = [T_1 \ T_2 \ \cdots \ T_n]$,其中 n 表示透平排气端测温热电偶的安装数目。同样一组燃烧故障下透平热电偶数组向量为 $T_{\text{fault}} = [T_{f1} \ T_{f2} \ \cdots \ T_{fn}]$,那无故障下的透平热电偶测量数组向量 T_{nor} 和故障下透平热电偶数组向量 T_{fault} 在多维空间中张成的余弦角度可以表示为:

$$\cos \theta = \frac{\langle T_{\text{nor}}, T_{\text{fault}} \rangle}{\|T_{\text{nor}}\|_2 \times \|T_{\text{fault}}\|_2}$$

式中: $\langle T_{\text{nor}}, T_{\text{fault}} \rangle$ 表示向量 T_{nor} 和向量 T_{fault} 的内积, $\|\cdot\|_2$ 表示向量的 2 范数。

因此,如果发生故障,正常时透平热电偶数组向量 T_{nor} 和故障下透平热电偶数组向量 T_{fault} 的余弦角度 θ 就会越大,而无故障情况下 θ 会接近于 0。而且,由于燃烧室和热电偶的排列都是对称均匀式排列,因此当不同燃烧室发生同样的燃烧故障时,它们的 $\cos \theta$ 值将非常接近,可以看作一类故障。值得一提的是,由于这种基于透平排气温度场的间接燃烧诊断的方式,依赖于透平测温热电偶,而热电偶本身也会出现故障而得到不均匀的分布场,这种故障需要与燃烧本身故障区别。

2.2 故障诊断架构设计

因此,根据上述余弦定理的应用,本文设计的燃烧故障诊断流程如图 3 所示。

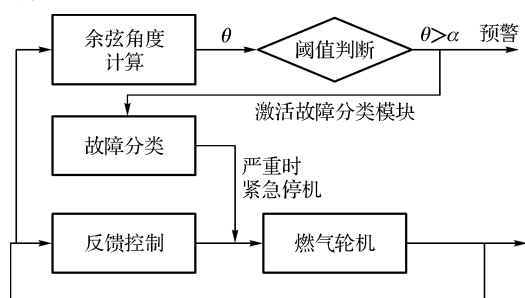


图3 基于余弦定理的燃烧诊断架构
首先通过安装在燃气轮机透平排气端同一截面

上的测温热电偶得到透平的实时测量温度 $T_{\text{fault}} = [T_{f1} \ T_{f2} \ \cdots \ T_{fn}]$ 。由于在正常状态下,透平排气端热电偶近似相当,因此在程序中设置的 $T_{\text{nor}} = [1 \ 1 \ \cdots \ 1]$ 利用前述的余弦角度。

警告机制:如果余弦角度大于 0,则认为故障存在,进行预警。考虑到噪声的存在,该预警阈值应该设计为一个约大于 0 的数。根据数据统计,建议预警阈值取 2 度。

故障分类:警告触发后激活故障分类模块,进一步根据余弦角度的不同,将故障分类,特别是将传感器类的故障区分出来,以免产生不必要的机组跳闸。

3 仿真验证

以某电厂的 6FA 燃气轮机为试验对象,选取该重型燃气轮机的真实历史数据和搭建的全数字仿真平台进行实验验证,该数字仿真平台是一种基于部件建模机理模型和真实历史数据混合的模型,机理模型首先根据燃料量和 IGV 角度计算出当前状态的 T_4 值,然后根据 T_4 值到真实历史数据中插值取出 21 个测温热电偶的实际测量值,燃烧故障和传感器故障则参考真实故障历史数据进行仿真模拟。6FA 燃气轮机的透平排气端均匀地安装了 21 个测温热电偶,平均约 1 秒刷新一次数据,数据的记录单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

图 4 给出了燃气轮机在正常无故障情况下,燃气轮机透平排气温度在不同负荷下 T_4 的变化,燃气轮机透平排气温度为 21 个测温热电偶去掉最高值和最低值取平均后的结果。从图中可以看出, T_4 还是表现出了明显的波动,这是因为测温热电偶受噪声和燃气轮机运行工况变化的干扰,不仅在不同时刻,同一测温热电偶所测温度幅值不同,而且在同一时刻,不同测温热电偶受布置位置的影响,所测温度幅值也不相同。

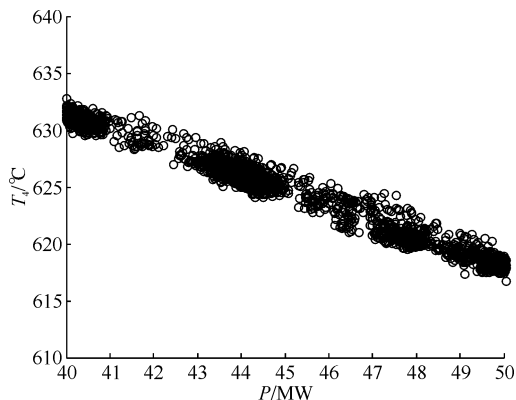


图 4 6FA 燃气轮机排气温度

在本次仿真验证中,模拟了燃气轮机在不同时刻发生的三类情况:正常情况、热电偶故障和燃烧故障,并采用单位 $^{\circ}\text{C}$,其透平排气温度场在这三种情况下的分布如图 5 所示。从图 5 中可以看出,当无故障时,21 个测温热电偶的值非常接近,因此在雷达图中张成一个近似圆形;当测温热电偶故障时,则除了该测点出现温度过低外,其他温度都近似相等;当一个燃烧室的燃烧故障时,透平排气端会出现低温区,21 个测温热电偶的值张成的圆在某一段会出现内凹。

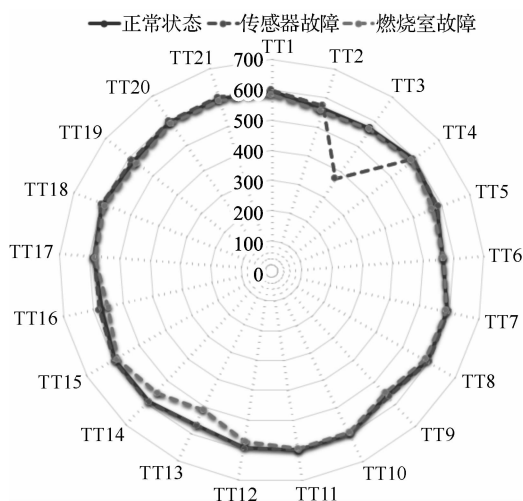


图 5 燃气轮机在不同状态下的排气温度场

在判断阈值的选择上,有凭经验的简单阈值选择方法,和基于模式识别等人工智能的自适应阈值法^[9],从本文的方法来看,由于正常、燃烧室故障和传感器故障状态下分别张成的余弦定理区别较为明显,本仿真实验仅选择简单的阈值 1 和阈值 2 作为这些状态区分的阈值。

基于本文的方法得到整个燃气轮机在不同状态下的余弦角度如图 6 所示。从图中可以看出,在前

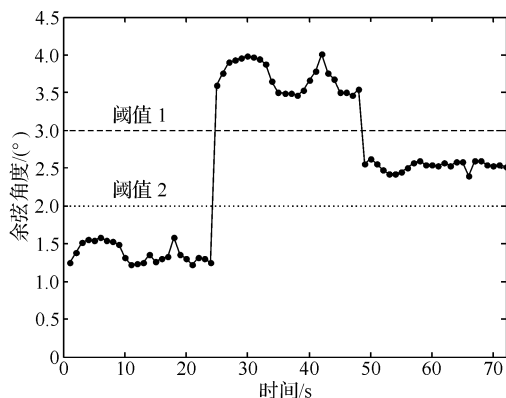


图 6 燃气轮机在不同状态下的余弦角度

24 s 无故障时,排气温度分散度的变化较小,其值约等于 1° ,在 25 s 后出现热电偶故障后,余弦角度有了明显的向上跳变趋势,如果设定一个角度为 3° 的阈值 1,可以很容易的把这个故障识别出来。

而当 48 s 后发生燃烧故障时,可以看到余弦角度有明显的下降但不会回到正常条件下的 1° 左右,再设定一个阈值 2,当余弦角度在 $2^\circ \sim 3^\circ$ 时,判断为燃烧故障。

从图 6 不同故障下的排气温度余弦角度来看,能明显的区分热电偶故障和燃烧故障,从而证明了本文方法的有效性。

值得注意的是,上述试验中的热电偶故障为突发性传感器故障,如果热电偶故障为漂移性传感器故障,并且漂移幅度低于 25% 时,它的余弦角度将与燃烧故障时的状态相近,这时会难以区分,需要工程师进行人工分析或设置更加复杂的判断逻辑。

4 结论

本文提出了一种基于余弦定理的燃烧诊断方法。通过利用燃气轮机透平排气温度向量与理想正常状态下透平排气温度向量在不同状态下的空间余弦夹角来监测燃烧故障。通过基于电厂真实运行数据和搭建的数字仿真平台验证,其结果表明本文提出的算法能很好地区分热电偶故障和燃烧故障,并且保持了较好的抗干扰能力,而且整个算法计算简单,易于工程实现,可以为燃气轮机控制系统设计和运行提供参考。后续可以进一步细分不同的燃烧室

部件故障生成的余弦夹角,提高该算法的故障分离能力。

参考文献:

- [1] 清华大学热能工程系动力机械与工程研究所,深圳南山热电股份有限公司. 燃气轮机与燃气-蒸汽联合循环装置[M]. 北京:中国电力出版社,2007:96-135.
- [2] ZINN B T. Lecture on combustion dynamics[R]. Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, USA, 2009.
- [3] 中国华电集团公司. 大型燃气-蒸汽联合循环发电技术丛书:控制系统分册[M]. 北京:中国电力出版社,2009.
- [4] THOMAS PALME, MAGNUS FAST, MOHSEN ASSADI et al. Different condition monitoring models for gas turbines by means of artificial neural networks[C]. Proceedings of ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea and Air. Orlando Florida USA, GT2009-59364. 2009.
- [5] MEL MAALOUF PE, THOMAS ELDRIDGE P E. Gas turbine and driven machinery management and diagnostics[C]. Proceedings of ASME Turbo Expo 2011, Vancouver, British Columbia, Canada. GT2011-45759, 2011.
- [6] 胡欣. 燃气轮机燃烧故障的原因分析[J]. 燃气轮机技术, 2003, 16(3):52 - 53.
- [7] 杨志鹏,杨景祺,章伟杰. 国外燃气轮机燃烧监测系统的分析对比[J]. 发电设备,2017,31(4):234-239.
- [8] 俞立凡,杨燕岚. 9F 燃气轮机燃烧故障分析[J]. 发电设备. 2008(3):219-223.
- [9] PERHINSCHI M G, NAPOLITANO M R, CAMP A G, et al. An adaptive threshold approach for the design of an actuator failure detection and identification scheme[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2006, 14(3):519-525.

A Fault Diagnosis Algorithm of Gas Turbine Combustions based on the Law of Cosines

Hu Zhipeng¹, He Ai²

(1. Design Center, Chongqing Skyrizon Aviation Power Co., Ltd., Chongqing 401135, China;

2. Engineering Department, Beijing Skyrizon Aviation Industry Investment Co., Ltd., Beijing 100084, China)

Abstract: Based on the concept of “pattern recognition”, this paper proposes a fault diagnosis method of heavy gas turbine combustions based on the law of cosines. By using cosine angle to characterize turbine outlet temperature dispersion under normal and different faults, failures of gas turbine combustion and sensor can be quickly identified and distinguished. Finally, this algorithm has been verified in the GE 6FA heavy duty gas turbine under simulation platform. The experimental results show that the method has good diagnostic accuracy and real-time performance.

Key words: heavy duty gas turbine; fault diagnosis; temperature dispersion; combustion failure