

基于非线性模型的燃气轮机热参数故障诊断及仿真

于美玲, 刘永文

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘要: 燃气轮机气动部件故障的发生会导致机组性能参数的变化, 且为复杂的非线性变化。在建立燃气轮机标准模型的基础上, 研究了系统的故障性能参数的变化及建立了系统的故障模型。首先通过标准模型仿真数据和机组故障运行数据的对比分析, 初步定位机组的故障部件, 进而提出了修正部件特征性能参数的方法, 通过模块实现机组故障的非线性表达, 在 EASY5 仿真平台上建立了燃气轮机系统的故障模型。利用该模型可通过机组非线性模型定量表达部件性能参数的变化, 准确地实现机组的故障定位和仿真。以某联合循环机组的燃气轮机为例对此方法进行了验证, 实现了机组故障工况的重现, 为机组性能特性研究、故障诊断和故障分析奠定了一定的基础。

关键词: 燃气轮机, 标准模型, 故障修正因子, 故障模型

中图分类号: TK472 文献标识码: A

引言

在燃气轮机运行过程中, 人们总是不断地采集一些热力参数, 但是由于结构安全等方面的考虑, 运行时可测量的参数数量较少, 然而这些定期不断采集、不断积累的参数中蕴藏着丰富的验证机组技术状态的信息, 能否直接利用这些信息来判断机组技术状态, 作为状态检测、状态预测、故障诊断的依据, 是国内外研究的一个热点^[1~4]。

不同于以往热参数故障仿真模型, 本研究提出一条新思路, 基于燃气轮机系统的标准模型, 采用故障修正因子初值多次逼近的方法, 仿真流程如图 1 所示, 对机组进行故障仿真研究, 并分析了性能参数与故障之间的对应关系, 这对燃气轮机及联合循环系统的故障研究具有重要的意义。

1 燃气轮机模型

研究对象是燃气—蒸汽联合循环机组中的燃气

轮机系统(燃料为高炉煤气, 简称为 BFG), 主要包括燃气透平、压气机、单筒燃烧室、高低压煤气压缩机及中冷器等一些辅助部件。其中, 气动部件燃气透平、压气机, 高、低煤气压缩机发生故障均引起热力参数和部件特性参数的变化, 燃烧室故障一般仅燃气透平进口温度的变化, 在输出功率不变的情况下, 引起燃料流量的增加, 使机组的煤耗增大, 不会引起各部件特性参数的变化, 本研究主要针对前者气动部件故障进行了分析研究。

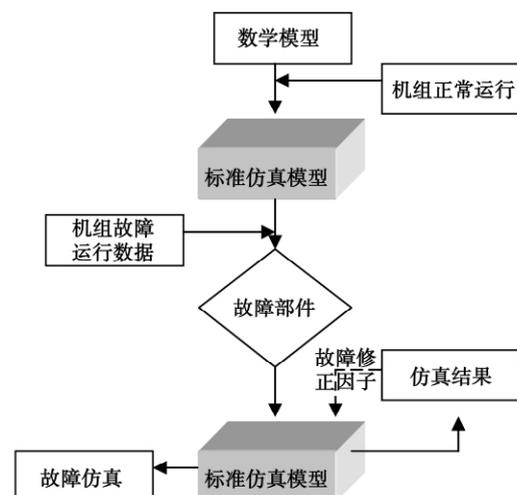


图 1 故障仿真流程图

Fig. 1 Flow chart of the fault simulation

目前, 燃气轮机气动部件的故障发生大都表现在性能参数的相对变化量上, 因此性能参数的相对变化量一般都用来作为故障发生的依据。为了清晰的表达部件故障与部件性能变化量之间的关系, 引入了故障修正因子(标准工况值为 1.0):

$$\text{修正因子} = \frac{\text{故障性能参数数据}}{\text{正常工况性能参数数据}} \quad (1)$$

标准模型的性能参数由厂家提供的部件特性曲

收稿日期: 2010-09-03; 修订日期: 2010-09-20

基金项目: 上海市科委基金资助项目(08DZ1204202)。

作者简介: 于美玲(1983-), 女, 山东潍坊人, 上海交通大学硕士研究生。

线和测试数据获得, 部件的故障性能参数可通过修正标准部件特性参数参数获得, 进而通过模块的部件特性关系式、参数联系方程式和热力学方程式得到相关的输出量。例如压气机部件发生故障会引起折合流量性能曲线和效率性能曲线的偏移, 可通过折合流量修正因子和效率修正因子获得, 进而可获得故障工况下的输出参数。部件故障引起性能参数的变化与故障修正因子之间的关系整理如表 1 所示^[4~7]。

表 1 故障修正因子表

Tab.1 Table of fault correction factors

部件故障	故障修正因子
压气机叶片结垢	折合流量修正因子 效率修正因子
压气机叶片表面腐蚀	效率修正因子
压气机外物损伤	效率修正因子
燃气透平叶片结垢	折合流量修正因子 效率修正因子
燃气透平喷嘴损坏	折合流量修正因子
燃气透平叶片磨损	折合流量修正因子 效率修正因子
燃气透平叶片机械损伤	效率修正因子
燃烧室喷嘴损坏	效率修正因子

采取数据来诊断机组的运行状态, 提前预测和诊断机组故障; 对于突发故障, 例如异物进入空压机等, 系统也可以直接反映到可测热力参数变化上, 及时发现和定位机组故障。

本研究从机理出发, 采用模块化建模的方法搭建含有故障修正因子的燃气轮机动态模型, 经机组正常工况运行数据校核比对, 得到的燃气轮机模型作为标准模型。EASY5 仿真平台中的燃气轮机仿真标准模型如图 2 所示, 输入参数: 燃料 BFG 入口温度 T_1 、压力 P_1 、低压煤气压缩机可变静叶 IGV 、BFG 燃气组分 S , 空气压缩机的入口温度 T_{10} , 入口压力 P_{10} , 入口导叶 VGV , 燃气透平背压 P_4 , BFG 低位热值 H_f , 中冷器冷却水量 D_w , 冷却水温 T_3 。

2 故障分析及仿真

本研究的对象是联合循环机组中的燃机部分, 但由于此机组单轴布置, 机组实验所测数据是联合循环机组运行工况下的数据, 在已知联合循环余热锅炉、蒸汽轮机正常运行的情况下, 对燃机部分进行故障诊断分析。

某次实验测取机组 110 MW 负荷的运行数据, 与相同输入条件下的标准模型仿真数据有较大差值。参数的异常说明了机组的运行状态不正常, 为了准确推断机组可能发生的故障, 需要对燃机继续进行故障仿真分析。所研究的燃气轮机系统包括高、低压煤气压缩机、空气压缩机、燃气透平以及燃烧室, 为了准确定位故障发生的位置, 需要对燃气轮机系统的各个部件分别进行仿真研究, 在与机组相应部件输入参数一致的条件下, 分别对其进行仿真, 仿真数据如表 2 所示。

表 2 中燃气轮机系统模型的输入参数为: 低压煤气压缩机的入口压力、温度、 IGV , 空压机入口压力、温度、 VGV , 燃气透平的出口压力, 以及燃料 BFG 的低位热值 H_f 。

单个部件的模型仿真输入参数除上述系统模型输入参数外, 其余模块的输入参数由其上下游的模块提供, 例如燃烧室的输入参数分别有空压机模块、高压煤气压缩机模块和燃气轮机模块提供。在保证机组各部件与对应模块在相同输入条件下运行, 通过模块内部热力参数的非线性关系式定量表达部件故障特性参数, 从而定位模型的故障位置及故障程度。从表 2 中可知, 燃气透平部件的运行数据与仿真数据有较大的差值, 故机组故障定位于燃气透平

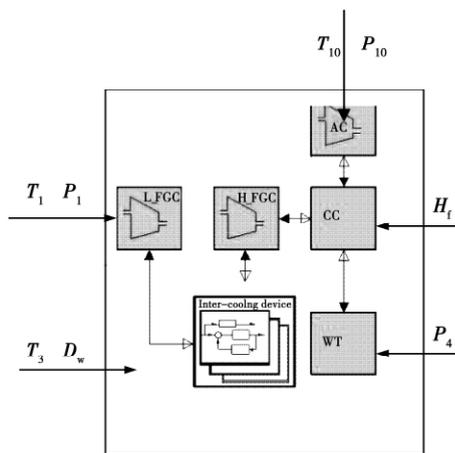


图 2 燃气轮机仿真模型图

Fig.2 Drawing showing a simulation model for gas turbines

表 1 表达了发生的部件故障与故障因子之间的对应关系。其中部件的结垢、磨损等都一个积累的过程, 基于热力参数的故障诊断可以通过不定期的

部件,利用燃气透平的折合流量修正因子(初值为 1.0,即标准模块),效率修正因子(初值为 1.0,标准模块)对燃气透平部件的性能曲线进行修正,燃气透平故障工况下,流量增大,效率降低,故增大折合流量修正因子,减小效率修正因子来匹配机组的运行数据。表 3 为燃烧室运行数据的分析。对燃气透平部件,采取故障修正因子初值多次逼近的方法建立燃气透平的故障模块,然后对整体联合循环机组的故障仿真模型进行仿真实验,通过数据校核逐步逼近,直到仿真结果与故障运行数据在一定的误差允许范围内。

表 2 燃气轮机各部件运行数据与模型仿真数据对比

Tab. 2 Comparison of the operation data and parameters of various components in a gas turbine with the model-based simulation data

	低压煤压机	高压煤压机	空气压缩机	燃气透平	
输入参数					
温度/℃	36	150	26.3	1 041.6	
入口压力/MPa	0.104 78	0.606	0.099 3	1.356 8	
出口压力/MPa	0.606	1.356 8	1.26	0.099 4	
角度 IGV/VGV	76.1	—	-33	—	
输出参数					
流量 /kg·s ⁻¹	对应标准工况	145.51	144.10	248.70	338.60
	实际工况	145.50	145.50	249.00	384.50
	误差	0.01	-0.97	-0.12	-13.56
效率/%	对应标准工况	85.49	83.54	85.71	74.7
	实际工况	86.1	83.04	85.13	73.51
	误差	-0.71	0.60	0.68	1.59
功率/MW	对应标准工况	34.0	18.94	86.8	210.1
	实际工况	33.9	19.1	86.9	204.9
	误差	0.29	-0.84	-0.12	2.48

表 3 燃气轮机燃烧室运行数据

Tab. 3 Operating data of the gas turbine combustion chamber

输入数据					
空气流量 /kg·s ⁻¹	空气温度 /℃	燃料流量 /kg·s ⁻¹	燃料温度 /℃	出口燃气流量 /kg·s ⁻¹	
239	264.9	145.5	292	384.5	
输出数据					
压力/MPa			温度/℃		
对应标准工况	实际工况	误差	对应标准工况	实际工况	误差
1.3568	1.359	-0.16	1041.6	1043.1	-0.14

针对机组负荷 110 MW 的故障工况进行仿真,

表 4 数据是在燃气透平折合流量曲线上移 12%,燃气透平效率性能曲线下降 2%,即折合流量修正因子为 1.12,效率修正因子为 0.98 时,系统故障模型的仿真数据与机组运行数据基本吻合,误差在 1.5% 以内,因此验证了故障推测的正确性。为了进一步证实故障推测及故障修正因子取值的有效性,对机组 90 MW、100 MW 负荷工况分别进行了故障仿真,仿真数据与机组运行数据吻合的比较,实现了机组故障工况的重现,有利于机组的故障研究和分析。

表 4 110 MW 机组运行数据与故障仿真数据对比

Tab. 4 Comparison of the operation data of a 110 MW unit with the fault simulation data

物理量	机组测取数据	故障仿真数据	误差
BFG 流量/m ³ ·h ⁻¹	375.5	371.8	-0.99
低压煤压机效率/%	0.8614	0.8588	-0.30
高压煤压机效率/%	0.8304	0.8349	0.54
空压机效率/%	0.8513	0.8483	-0.35
燃气透平效率/%	0.7357	0.7316	-0.56
燃气轮机输出功/MW	71.2	70.8	-0.56
烟气流量/kg·s ⁻¹	398.9	398.7	-0.05
发电煤耗/g·(kW·h) ⁻¹	345.9	345.7	-0.06

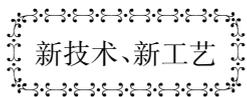
3 结 论

基于某联合循环机组 110 MW 工况下燃气轮机标准模型,通过仿真实验数据与机组故障工况运行数据的分析,定位机组的故障部件燃气透平,然后根据燃气透平折合流量修正因子和效率修正因子性能参数的变化,人工引入了修正因子,通过多次逼近的方法获得故障工况的修正因子,实现了燃气透平部件故障的非线性表达,建立了燃气轮机系统故障模型,可用于研究机组故障工况的运行特性。基于热力参数的故障积累性^[5,7-9],通过所建立的标准模型和故障模型可以对机组故障做出早期预测和诊断,并且为专家诊断系统提供有效的正常工况和故障工况下的数据。

参考文献:

[1] 黄晓光,高梅梅. 基于模糊 Petri 网的知识表示方法在燃气轮机故障诊断专家系统中的应用[J]. 动力工程,2000,20(5): 872-873.
HUANG Xiao-guang,GAO Mei-mei. Application of the method for knowledge expression based on a fuzzyPetri network in gas turbine fault diagnosis expert systems [J]. Power Engineering, 2000, 20

- (5): 72-873.
- [2] MASLOAND K J, FANTIK. Dynamic analysis of the power system [C] // Proc. Int' 2 Conf ECPS '96, Bratislava, Slovak Rep, 1996: 230-234.
- [3] 崔凝, 王兵树, 邓勇, 等. 重型燃机热力系统动态仿真模型[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(2): 110-117.
CUI Ning, WANG Bing-shu, DENG Yong, et al. Dynamic simulation model for heavy-duty gas turbine thermodynamic systems [J]. Proceedings of China Electric Machinery Engineering, 2008, 28(2): 110-117.
- [4] 夏迪, 陈矫, 王永泓, 等. 基于热力学参数的燃气轮机故障诊断系统分析软件[J]. 上海交通大学学报, 2009, 43(2): 283-287.
XIA Di, CHENG Jiao, WANG Yong-hong, et al. Thermodynamic parameter-based analytic software for gas turbines [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2009, 43(2): 283-287.
- [5] 翁史烈, 王永泓. 基于热力参数的燃气轮机智能故障诊断[J]. 上海交通大学学报, 2002, 36(2): 165-168.
WONG Shi-lie, WANG Yong-hong. Thermodynamic parameter-based intelligent fault diagnosis of gas turbines [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2002, 36(2): 165-168.
- [6] MUCLEOD J D, TAYLOR V, LAFLAMME J C G. Implanted component faults and their effects on gas turbine engine performance [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1992, 114(4): 174-179.
- [7] DIAKUNCHAK. Performance deterioration in industrial gas turbines [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1992, 114(4): 161-168.
- [8] ESCHER P C, PYTHIA. An object-oriented gas path analysis computer program for general applications [D]. UK, Cranfield University, School of Mechanical Engineering, 1995.
- [9] XWEBEK A, PILIDIS P. Degradation effects on combined cycle power plant performance - Part1: Gas turbine cycle component degradation effects [R]. ASME 2001, Paper No. 2001-GT-388.



新技术、新工艺

华能集团 GreenGen IGCC 项目开始交工试运行

据《Gas Turbine World》2011年3-4月刊报道, China Huaneng(中国华能)称, 其 GreenGen(绿色发电)项目内 265 MW IGCC(整体煤气化联合循环)示范电站目前正在天津进行交工试运行, 并计划于6月开始投入运行。

该装置有 2000 t/d 干粉煤的承压气化器, 该项专利技术由华能集团拥有, 西安热工研究所开发。

该示范装置为 GreenGen 项目 3 个规划开发阶段的第一阶段。

该项目第二阶段将重点放在试验并改进项目的关键技术, 包括用煤生产氢、氨和 CO₂ 气化产品在燃烧前的分离以及评定下游碳储存和利用的最佳选择方案。

第三阶段将建造商业规模的 400 MW IGCC 装置, 完全综合煤氢的气化、氢燃料的发电装置以及碳捕获和储存的能力。更大示范装置计划在 2015 年投入运行。

中国华能集团公司称, 总投资十亿美元的 GreenGen 装置最终可以使发电效率达到 60%, 脱硫率超过 99%、碳捕获率达到 90%, 并且与传统的燃煤电站比较, 能明显减少 NO_x 排放。

(吉桂明 摘译)

the probe at both sides of the blade surface and a relatively high correlation degree exists between the probe-going-around flow influencing extent and the aerodynamic load of the stator blade. A large area probe-around-going flow will exacerbate the radial migration and separation of the boundary layer at the root on the back of the blade at the downstreams of the rotor constitutues the root cause of the aerodynamic stall of the compressor at an earlier time.

Key words: blade profile probe, transonic compressor, performance characteristics, three-dimensional flow filed, numerical simulation

基于非线性模型的燃气轮机热参数故障诊断及仿真 = **Thermal Parameter Fault Diagnosis and Simulation of a Gas Turbine Based on a Non-linear Model** [刊,汉] YU Mei-ling, LIU Yong-wen (College of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011,26(6) . -651 ~654

Occurrence of various faults to the aerodynamic components of a gas turbine may invariably lead to a change of its performance parameters and such a change is a complex and non-linear one. On the basis of the establishment of a standard model for gas turbines and through a contrast analysis of the simulation data obtained by using the model in question and the operating data of the unit when a fault is happening, the faulty component could be preliminarily located and a method for correcting the characteristic and performance paramerters of the component could be further presented. Through various modules, a non-linear expression of the fault of the unit was realized. On the EZSY5 simualtion platform, a model for faults of a gas turbine system was established. The amount of a change in a performamnce parameter of the component can be quantitatively expressed by using the model under discussion through a non-linear model for gas turbine units, thus accurately realizing a location and simulation of the fault. With a gas turbine in a combined cycle unit serving as an example, the method under discussion was verified, realizing the reappearance of the operation conditions of the fault and laying a definite foundation for study of the performance characteristics, fault diagnosis and analysis of a unit. **Key words:** gas turbine, standard model, fault correction factor, fault model

燃气机热泵改变制冷剂流量的增益调度控制 = **Gain Dispatchment Control of a Gas-engine-driven Heat Pump by Changing the Flow Rate of Its Refrigeration Agent** [刊,汉] WANG Ming-tao, YANG Zhao (College of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin, China, Post Code: 300072) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(6) . -655 ~659

The systematic capacity of a gas-engine-driven heat pump can be regulated by changing the rotating speed of the gas engine. However, the regulation of the systematic capacity and the change of the rotating speed of the compressor are necessarily matched with the electronic expansion valve taking an action to regulate the flow rate of the refrigeration agent. By adopting an experimental method, the authors established a model of the superheating degree of an evaporator and through a theoretical analysis and experiment testing, studied the variable rotating speed regulation