

DOI: 10.19666/j.rlfed.202209196

瞬态变工况下电厂燃气轮机气路故障诊断方法研究

梁芒¹, 应雨龙², 赵素强¹, 钟磊¹, 郭佳晖¹, 徐搏超³, 王新友²

(1.浙江大唐国际绍兴江滨热电有限责任公司, 浙江 绍兴 312366;

2.上海电力大学能源与机械工程学院, 上海 200090;

3.大唐集团科学技术研究总院有限公司华东电力试验研究院汽轮机技术研究所, 安徽 合肥 230031)

[摘要] 为避免失修和过修, 提高电厂燃气轮机可靠性和可用性, 降低运维成本, 确保其安全稳定、绿色高效运行, 提出了一种适用于瞬态变工况且包含可变几何压气机的电厂燃气轮机气路故障诊断方法。推导了压气机 IGV 开度变化对压气机流量特性线和效率特性线的影响数学关系式, 建立了以燃气轮机性能分析与气路故障诊断为目的的高精度燃气轮机热力模型, 并提出了适用于瞬态变工况且包含可变几何的电厂燃气轮机气路故障诊断策略。通过现场实际机组运行测试, 验证了所提出的方法具有良好的诊断准确性与实时性, 实现了在瞬态变工况下的故障辨识。

[关键词] 燃气轮机; 瞬态变工况; 热力建模; 可变几何压气机; 气路诊断

[引用本文格式] 梁芒, 应雨龙, 赵素强, 等. 瞬态变工况下电厂燃气轮机气路故障诊断方法研究[J]. 热力发电, 2022, 52(5): 29-36. LIANG Mang, YING Yulong, ZHAO Suqiang, et al. Study on gas path fault diagnosis method for gas turbine in power plant under transient operating condition[J]. Thermal Power Generation, 2022, 52(5): 29-36.

Study on gas path fault diagnosis method for gas turbine in power plant under transient operating condition

LIANG Mang¹, YING Yulong², ZHAO Suqiang¹, ZHONG Lei¹, GUO Jiahui¹,
XU Bochao³, WANG Xinyou²

(1. Zhejiang Datang International Shaoxing Jiangbin Thermal Power Co., Ltd., Shaoxing 312366, China;

2. School of Energy and Mechanical Engineering, Shanghai Electric Power University, Shanghai 200090, China;

3. Steam Turbine Technology Research Institute of East China Electric Power Test and Research Institute, East China Electric Power Research Institute, Datang Group Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Hefei 230031, China)

Abstract: In order to avoid disrepair and overrepair, improve the reliability and availability of gas turbine, reduce operation and maintenance cost, and ensure its safe, stable, green and efficient operation, a novel approach is proposed for fault diagnosis of gas turbine in power plants under transient operating condition with variable geometry compressor. The mathematical relationship of the influence of the compressor inlet guide vane position on compressor flow and efficiency characteristics is deduced. A high-precision thermodynamic model for the purpose of performance analysis and gas-path fault diagnosis is established. Moreover, the gas path fault diagnosis strategy of power plant gas turbine, which is suitable for transient and variable conditions and includes variable geometry, is proposed. Through actual operation test, it is verified that the proposed method has high diagnostic accuracy and good real-time performance, and the fault identification under transient and variable conditions is realized.

Key words: gas turbine; transient conditions; thermodynamic modeling; variable geometry compressor; gas-path diagnosis

收稿日期: 2022-09-02 网络首发日期: 2022-10-18

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (62076160, 51806135)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (62076160, 51806135)

第一作者简介: 梁芒 (1983), 男, 高级工程师, 主要研究方向为燃机运行管理, 47863690@qq.com。

燃气轮机运行过程中,由于其内部极端的运行工况条件,各种各样的部件性能衰退或故障情况会随着运行时间的增加而产生。根据故障机理,燃气轮机的故障可以分为机械故障和气路故障 2 类。气路故障诊断是一种对正在演变的恶化情况进行有效诊断的技术手段。根据诊断机理,气路故障诊断方法可以分为基于热力模型的方法和基于人工智能的方法。

基于人工智能的气路故障诊断方法通常需要建立在来自机组历史运行数据的故障数据样本集的基础上,对于未涉及的故障类型,这些方法通常难以给出准确的诊断结果。

在电厂燃气轮机运行过程中,当某些气路部件性能衰退或故障时,部件性能参数会发生变化,并引起外部气路可测量参数的微小变化。基于热力模型的气路故障诊断方法的数学过程是在与燃气轮机热力模型的热力学耦合关系的基础上,根据气路测量参数计算气路部件健康参数。与基于人工智能的方法相比,基于热力模型的方法的特点不需要对各类故障数据样本集进行标定,且可以定量评估故障严重程度;此外,还可以诊断部件性能缓变恶化的情况。根据所使用的热力学模型特点,有 2 种方法:一种是小偏差线性化方法,另一种是非线性方法^[1-2]。由于小偏差线性化诊断方法的诊断准确性受边界条件(环境条件和操作条件)扰动及传感器测量噪声影响较大,因此非线性气路诊断方法是研究的主流。非线性气路诊断方法的驱动求解算法有局部优化算法(如牛顿-拉普森算法^[3]、卡尔曼滤波器算法^[4]和粒子滤波器算法^[5])与全局优化算法(如遗传算法^[6]和粒子群优化算法^[7])。这些算法对解决诊断准确性和可靠性受传感器噪声与偏差^[8]、测量参数选择^[9]、操作条件及环境条件^[10]影响敏感的问题有了长足的改善。Najjar 等人通过热力建模仿真手段模拟了重型燃气轮机在基本负荷以及各个部分负荷下的性能衰退情况,并定量分析了在不同负荷、不同环境条件下其对整机及各个部件性能的影响^[11]。Zhou 等人提出了一种基于空间变换网络的小偏差线性化气路诊断方法,来改善边界条件扰动对故障诊断可靠性的影响,并通过仿真分析论证了该方法能一定程度地提高传统小偏差线性化气路诊断方法的诊断准确性^[12]。经过多年的发展,气路故障诊断方法在燃气轮机稳态工况下,通过理论仿真手段得出许多诊断结果。然而,由于电厂频繁调

峰的需求,燃气轮机越来越需要在电网支持模式下更加灵活地运行。在瞬态工况下,燃气轮机的使用寿命比基荷工况消耗得更快。但是,燃气轮机的维修仍然严格按照燃气轮机制造商提供的技术文件和相关规范要求的时间间隔进行,维修成本极高。此外,变几何压气机的广泛应用在实际诊断过程中引入了新的不确定因素,使得原有气路诊断方法的适用边界越来越窄。另外,机组抽气冷却技术的进步以及日益复杂的控制系统增加了热力建模的复杂度。为延长燃气轮机的使用寿命,提高可用性,降低维护成本,应高度重视电厂燃气轮机在瞬态工况下故障诊断的研究。虽然已有少数学者开展了相关研究,但他们的研究主要集中在仿真测试上,且没有考虑变几何压气机的影响^[13-14]。针对上述问题,本文以解决电厂燃气轮机瞬态变工况下气路故障诊断的基础问题为研究目的,首次提出了一种适用于瞬态变工况且包含可调静叶压气机的电厂燃气轮机气路故障诊断方法,以期拓宽原有诊断方法的适用边界。

1 瞬态变工况下燃气轮机气路故障诊断方法

1.1 以气路故障诊断为目的燃气轮机热力建模

燃气轮机机组热端冷却技术的进步以及日益复杂的控制系统增加了热力建模的复杂度。以意大利 Ansaldo Energia 公司生产的 F 级 AE94.3A 重型燃气轮机(图 1)为例,该机组的压气机共有 5 条冷却空气抽气流路(即 Ea1、Ea2、Ea3、Ei1 和 Ei2),其中 3 股(即 Ea1、Ea2 和 Ea3)是从压气机外缸流出的外部冷却流路,另外 2 股(即 Ei1 和 Ei2)是从压气机内部轮盘孔引出的内部冷却流路。此外,还有从压气机出口引出的 2 股冷却流路(即 Ea4 和 KE)用于燃烧室和透平第 1 级冷却。其中: Ea1、Ea2、Ea3 为压气机第 5、9、13 级抽气,为透平第 2、3、4 级静叶提供冷却空气; Ei1、Ei2 为压气机第 10、12 级抽气,为透平第 2、3、4 级动叶提供冷却空气。

考虑到上述压气机级间抽气和透平级间冷却情况,以及燃气轮机热力模型的复杂度,基于详细通流设计的一维热力建模方法会破坏压气机和透平部件特性线的完整性,且不能满足实时诊断的计算要求。为便于气路部件故障诊断,根据 ISO2314 准则(电厂燃气轮机验收测试的国际标准),采用等效冷却流处理技术进行燃气轮机性能建模,如图 2 所示。

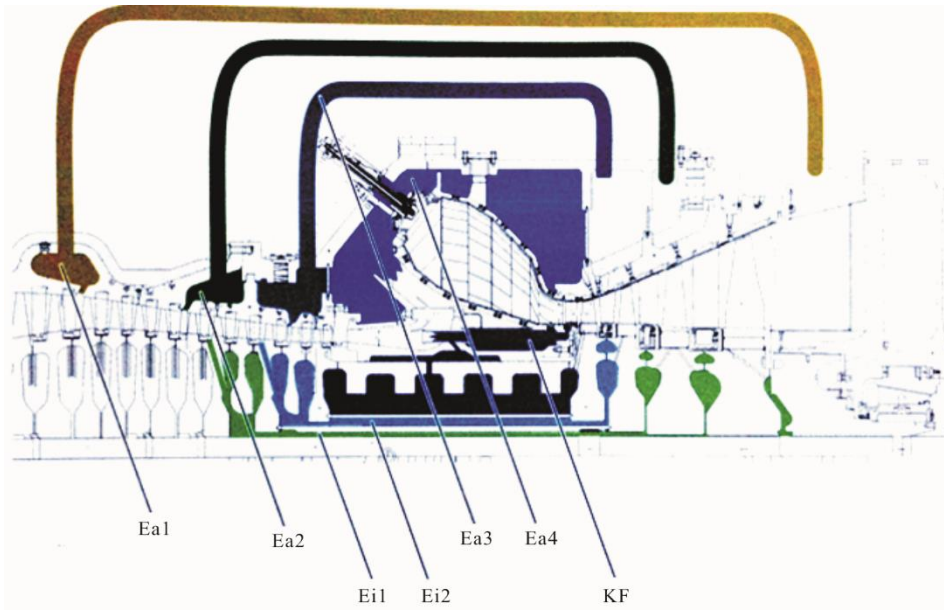


图 1 AE94.3A 重型燃气轮机
Fig.1 The AE94.3A heavy duty gas turbine

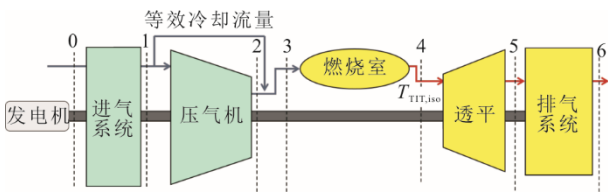


图 2 等效冷却流量处理方式
Fig.2 Equivalent cooling flow processing method

该方法不仅可以简化一维热力模型的复杂度，保证实时诊断的计算性能，而且在存在压气机抽气和透平冷却的情况下，能保持部件特性线的完整性，为后续气路故障诊断工作带来方便。但是，等效冷却流量处理技术的介入会导致热力模型中的某些气路部件进出口参数具有“等效”的含义，不再与机组传感器测点参数一一对应；并且给后续利用燃气轮机实际传感器测点参数通过热力模型的迭代计算实现气路部件故障诊断带来困难。为了使热力模型中的部件特性与燃气轮机中的实际部件特性相匹配，等效冷却流量处理技术应满足以下原则：

1) 热力模型中的截面 1 和截面 2 处的工质组分、温度、压力和空气质量流量与实际燃气轮机中的压气机进出口情况相同。

2) 热力学模型中的压气机功耗与实际燃气轮机中的压气机功耗相同。此时，压气机的热力模型可以从 1 维热力模型简化为 0 维热力模型。压气机热力模型为集总参数模型，压气机级间抽气情况并不破坏压气机部件特性线的整体性，压气机热力模

型可由式(1)一式(3)表示：

$$G_{equ} = G_1 - \frac{N_c}{h_2^* - h_1^*} \quad (1)$$

$$G_{C,cor,rel} = f_1(n_{C,cor,rel}, \pi_{C,rel}, I_{IGV}) \quad (2)$$

$$\eta_{C,rel} = f_2(n_{C,cor,rel}, \pi_{C,rel}, I_{IGV}) \quad (3)$$

式中： G_{equ} 为等效冷却流量； N_c 为压气机耗功； I_{IGV} 为压气机入口导叶开度位置； $n_{C,cor,rel} = \frac{n}{\sqrt{T_1^*} \cdot R_{g,air}}$

$\frac{n_{de}}{\sqrt{T_{1,de}^*} \cdot R_{g,air,de}}$ 为压气机相对折合转速； $G_{C,cor,rel} = \frac{G_2 \sqrt{T_1^*} \cdot R_{g,air}}{p_1^*} / \frac{G_{2,de} \sqrt{T_{1,de}^*} \cdot R_{g,air,de}}{p_{1,de}^*}$ 为压气机相对折合

质量流量； $\pi_{C,rel}$ 为压气机相对压比； $\eta_{C,rel}$ 为压气机相对等熵效率； $f_1(\cdot)$ 表示压气机的流量特性函数； $f_2(\cdot)$ 表示压气机的效率特性函数；下角标 de 表示设计工况。

对于现代设计精良的压气机，通过入口可调节导叶的角度调节，在各种运行工况下动叶的入口冲角近似相等。因此，各级流量系数 ϕ 与静叶出口绝对气流角 α_1 理论上满足：

$$\text{由 } \frac{1}{\phi} = (\tan \alpha_1 + \tan \beta_1), \text{ 得 } d\left(\frac{1}{\phi}\right) = d(\tan \alpha_1) \quad (4)$$

式中： $\phi = c_d/u$ 为流量系数； β_1 为动叶入口相对气流角。

由式(4)可知，IGV 开度位置主要影响进入压气机的空气体积流量，则压气机的流量特性公式(2)可以进一步简化为：

$$G_{C,cor,rel} = f_1(n_{C,cor,rel}, \pi_{C,rel}, I_{IGV}) \approx G_{C,cor,rel, I_{IGV}=100\%}(n_{C,cor,rel}, \pi_{C,rel}) * f_3(I_{IGV} * \rho_1) = G_{C,cor,rel, I_{IGV}=100\%} * \varphi_{IGV} \quad (5)$$

式中： $\varphi_{IGV}=f_3(I_{IGV} * \rho_1)$ 为IGV开度调节下的质量流量修正系数； $G_{C,cor,rel, I_{IGV}=100\%}(n_{C,cor,rel}, \pi_{C,rel})$ 为IGV全开时的压气机的流量特性函数。

通常压气机的级效率 η 和动叶出口相对气流角 β_2 仅是气流进入动叶冲角的函数，此时级的流量系数 ϕ 与压力系数 ψ 满足以下关系式：

$$\frac{\psi}{\phi} = (\tan \beta_1 - \tan \beta_2) \cdot \eta = \text{cons} \quad (6)$$

式中： ψ 为级的压力系数； $\eta=\psi/\zeta$ 为级的等熵效率； ζ 为级的温升系数。

由式(6)可知，IGV开度位置对压气机的等熵效率影响很小，则压气机的效率特性公式(3)可以进一步简化为：

$$\eta_{C,rel} = f_2(n_{C,cor,rel}, \pi_{C,rel}, I_{IGV}) \approx f_4(n_{C,cor,rel}, \pi_{C,rel}) \quad (7)$$

方程(4)和方程(6)可以根据压气机速度三角形推导出^[15]，如图3所示。

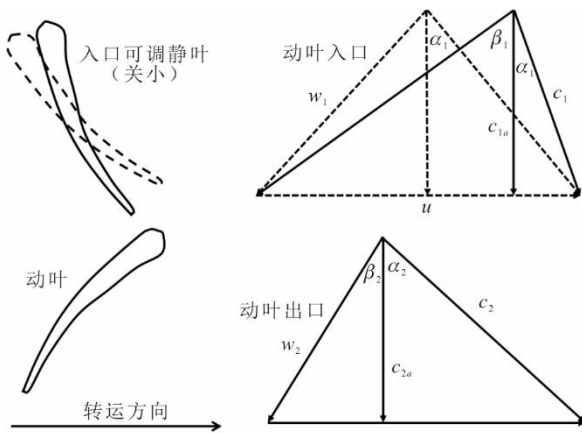


图3 压气机速度三角形
Fig.3 The compressor stage velocity triangle

3) 热力模型的截面4处的透平入口燃气组分，与热力模型的截面5处的透平出口燃气组分相同，也与实际燃气轮机的透平进出口情况相同。

4) 热力模型中的透平功率输出与实际燃气轮机中的透平功率输出相同。由于等效冷却流量在透平入口之前已经汇入，因此透平入口的质量流量与出口的质量流量相等，且透平真实入口温度 T_{TIT} 要高于 $T_{TIT,iso}$ 。

5) 热力模型中截面5处的工质组分、温度、压力和燃气质量流量与实际燃气轮机中的透平出口

情况相同。此时，透平的热力模型可以从1维热力模型简化为0维热力模型。透平热力模型为集总参数模型，透平级间冷却情况并不破坏透平部件特性线的整体性，则透平热力模型可表示为：

$$G_{T,cor,rel} = f_5(n_{T,cor,rel}, \pi_{T,rel}) \quad (8)$$

$$\eta_{T,rel} = f_6(n_{T,cor,rel}, \pi_{T,rel}) \quad (9)$$

式中： $n_{T,cor,rel} = \frac{n}{\sqrt{T_4^* \cdot R_{g, gas}}} / \frac{n_{de}}{\sqrt{T_{4, de}^* \cdot R_{g, gas, de}}}$ 为透平

相对折合转速； $\pi_{T,rel} = \frac{\pi_T}{\pi_{T, de}}$ 为透平相对膨胀比；

$G_{T,cor,rel} = \frac{G_4 \sqrt{T_4^* \cdot R_{g, gas}}}{P_4^*} / \frac{G_{4, de} \sqrt{T_{4, de}^* \cdot R_{g, gas, de}}}{P_{4, de}^*}$ 为透平

相对折合流量； $f_5(\cdot)$ 表示透平的流量特性函数； $f_6(\cdot)$ 表示透平的效率特性函数。

此时，热力模型中截面0、1、2、5和6处的工质组分、温度、压力和工质质量流量与实际燃气轮机机组情况完全相同。

1.2 气路故障诊断策略

建立上述燃气轮机热力模型之后，提出适用于瞬态变工况且包含可调静叶的电厂燃气轮机气路故障诊断策略如下：

对于电厂燃气轮机，机组的气路可测参数情况通常见表1。其中热力模型所需的天然气组分可以通过电厂天然气化验报告获取。

表1 机组的气路可测参数情况
Tab.1 Measurable parameters of the unit gas path

可测参数	单位	可测参数	单位
IGV开度位置 I_{IGV}	%	大气相对湿度 R_H	%
燃气轮机功率 N_e	kW	压气机入口压力 p_1	Pa
转速 n	r/min	压气机入口温度 t_1	°C
天然气质量流量 G_f	kg/s	压气机出口压力 p_2	Pa
天然气入口温度 t_f	°C	压气机出口温度 t_2	°C
大气压力 p_0	Pa	透平出口压力 p_5	Pa
大气温度 t_0	°C	透平出口温度 t_5	°C

本文所提出的气路故障诊断方法，是基于部件特性线自适应修正的，利用机组实测气路参数 $Z_{deg} = [I_{IGV}, N_e, n, G_f, t_f, p_0, t_0, R_H, p_1, t_1, p_2, t_2, p_5, t_5]$ 实时诊断输出各个部件的健康参数 S （即部件特性线的偏移程度和方向）。本文采用牛顿-拉普森算法作为诊断驱动算法，牛顿-拉普森算法的数学本质是一种局部优化算法。详细的诊断驱动求解过程如下：

对于一个已知的残差方程组 $E = f(S)$ ，当各个

部件的健康参数向量（即方程组的自变量向量） $\mathbf{S} \in R^5$ 变化一个微小量 $\Delta \mathbf{S}$ 时，对应的残差向量 \mathbf{E} 也会改变一个微小量 $\Delta \mathbf{E}$ 。若 $\Delta \mathbf{S}$ 足够小，则 $\Delta \mathbf{E}$ 与 $\Delta \mathbf{S}$ 的数学关系可以足够精确的用式(10)表示。

$$\Delta \mathbf{E} = \mathbf{J}(\mathbf{E}, \mathbf{S}) \cdot \Delta \mathbf{S} \quad (10)$$

其中：

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} E_1 = t_{2,meas} - t_{2,cal} \\ E_2 = p_{1,meas} - p_{1,cal} \\ E_3 = G_{3,cal} + G_{f,meas} - G_{4,cal} \\ E_4 = t_{5,meas} - t_{5,cal} \\ E_5 = p_{5,meas} - p_{5,cal} \\ E_6 = (N_T * \eta_{T,m} - N_C / \eta_{C,m}) * \eta_{gen} - N_{e,meas} \end{bmatrix};$$

$$\Delta \mathbf{E} = \mathbf{J}(\mathbf{E}, \mathbf{S}) \cdot \Delta \mathbf{S}。$$

式中： $S_{FC} = G_{C,cor,rel,deg} / G_{C,cor,rel}$ 为压气机的流量特性指数； $G_{C,cor,rel,deg}$ 为压气机性能衰退或故障时的相对折合质量流量； $S_{EC} = \eta_{C,rel,deg} / \eta_{C,rel}$ 为压气机的效率特性指数； $\eta_{C,rel,deg}$ 为压气机性能衰退或故障时的相对等熵效率； $S_{EB} = \eta_{B,deg} / \eta_B$ 为燃烧室的燃烧效率指数； $\eta_{B,deg}$ 为燃烧室性能衰退或故障时的燃烧效率； $S_{FT} = G_{T,cor,rel,deg} / G_{T,cor,rel}$ 为透平的流量特性指数； $G_{T,cor,rel,deg}$ 为透平性能衰退或故障时的相对折合质量流量； $S_{ET} = \eta_{T,rel,deg} / \eta_{T,rel}$ 为透平的效率特性指数； $\eta_{T,rel,deg}$ 为透平性能衰退或故障时的相对等熵效率； $\eta_{T,m}$ 为透平的机械效率； $\eta_{C,m}$ 为压气机的机械效率； η_{gen} 为发电机效率；下角标 meas 表示机组测量值，cal 表示热力模型计算值。

由式(10)可得：

$$\mathbf{E}_2 - \mathbf{E}_1 = \mathbf{J}(\mathbf{E}, \mathbf{S}) \cdot (\mathbf{S}_2 - \mathbf{S}_1) \quad (11)$$

式中： $\mathbf{J}(\mathbf{E}, \mathbf{S})$ 为雅可比矩阵，如式(12)所示。

$$\mathbf{J}(\mathbf{E}, \mathbf{S}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial E_1}{\partial S_{FC}}, \frac{\partial E_1}{\partial S_{EC}}, \frac{\partial E_1}{\partial S_{EB}}, \frac{\partial E_1}{\partial S_{FT}}, \frac{\partial E_1}{\partial S_{ET}} \\ \frac{\partial E_2}{\partial S_{FC}}, \frac{\partial E_2}{\partial S_{EC}}, \frac{\partial E_2}{\partial S_{EB}}, \frac{\partial E_2}{\partial S_{FT}}, \frac{\partial E_2}{\partial S_{ET}} \\ \frac{\partial E_3}{\partial S_{FC}}, \frac{\partial E_3}{\partial S_{EC}}, \frac{\partial E_3}{\partial S_{EB}}, \frac{\partial E_3}{\partial S_{FT}}, \frac{\partial E_3}{\partial S_{ET}} \\ \frac{\partial E_4}{\partial S_{FC}}, \frac{\partial E_4}{\partial S_{EC}}, \frac{\partial E_4}{\partial S_{EB}}, \frac{\partial E_4}{\partial S_{FT}}, \frac{\partial E_4}{\partial S_{ET}} \\ \frac{\partial E_5}{\partial S_{FC}}, \frac{\partial E_5}{\partial S_{EC}}, \frac{\partial E_5}{\partial S_{EB}}, \frac{\partial E_5}{\partial S_{FT}}, \frac{\partial E_5}{\partial S_{ET}} \\ \frac{\partial E_6}{\partial S_{FC}}, \frac{\partial E_6}{\partial S_{EC}}, \frac{\partial E_6}{\partial S_{EB}}, \frac{\partial E_6}{\partial S_{FT}}, \frac{\partial E_6}{\partial S_{ET}} \end{bmatrix} \quad (12)$$

当初始的部件健康参数 $\mathbf{S}_1 = [1, 1, 1, 1, 1]$ （表征燃气轮机健康）选定后，通过残差方程组可以得到一个残差向量 \mathbf{E}_1 。若想得到下一个迭代计算点 \mathbf{S}_2 时，对应的残差向量 \mathbf{E}_2 接近于 0，则可以得到：

$$\mathbf{S}_2 = \mathbf{S}_1 - \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{E}, \mathbf{S})_{S=\mathbf{S}_1} \cdot \mathbf{E}_1 \quad (13)$$

将式(13)进行推广泛化，则牛顿-拉普森算法可以表达为：

$$\mathbf{S}_{k+1} = \mathbf{S}_k - \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{E}, \mathbf{S})_{S=\mathbf{S}_k} \cdot \mathbf{E}_k \quad (14)$$

随着迭代计算，当满足残差准则 $\|\mathbf{E}_{k+1}\| < \varepsilon$ (ε 为特定的迭代收敛阈值) 时，就可以得到最终解 \mathbf{S}_{k+1} 。

2 应用与分析

为了验证本文所建燃气轮机热力模型的准确性，将其与某电厂 2019 年机组瞬态变工况下的全年实测数据进行了对比测试，结果如图 4 所示。

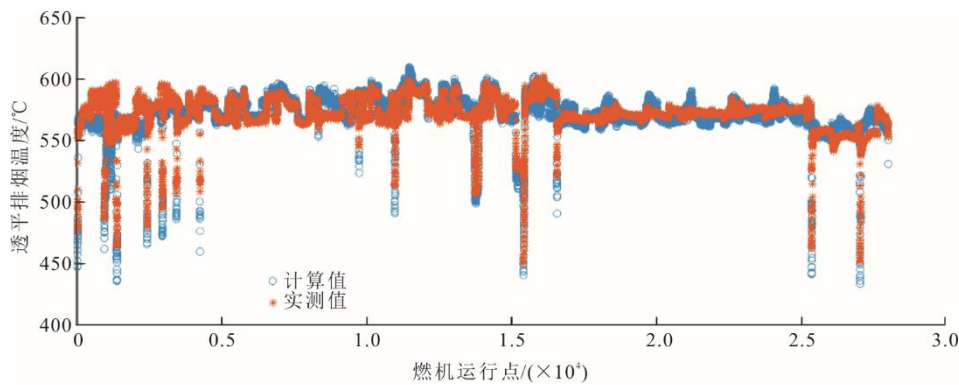


图 4 2019 年 2 月至 12 月燃气轮机透平排气温度计算值与实测值比较

Fig.4 Comparison between the calculated value and measured value of the turbine exhaust temperature from February to December in 2019

在 IGV 全开基本负荷瞬态变工况下, 整机热力模型透平排烟温度计算值的平均相对误差不超过 0.61%; 在最小 IGV 开度负荷至 IGV 全开基本负荷瞬态变工况下, 透平排烟温度计算值的平均相对误差不超过 1.14%, 详见文献[16]。

此外, 本文所提诊断方法的诊断精度和诊断耗时已在文献[14]中进行了瞬态变工况下的仿真测试。测试表明, 每个运行记录的诊断耗时不超过 0.139 s (在 4.0 GHz 双核处理器的笔记本电脑上), 诊断的均方根误差不超过 0.193%。因此本文不再展开论述, 直接开展现场应用测试。

采集某热电厂的实测运行数据进行测试。该电厂机组为三菱 M701F4 型燃气-蒸汽联合循环机组, 全厂配置 2 套机组; 每套机组的配置由 1 台燃气轮机、1 台余热锅炉、1 台蒸汽轮机和 1 台发电机组成。

采集从 2019-02-05 09:30 至 2019-12-08 23:30 时段的 2 号燃气轮机的正常历史运行数据作为燃气轮机性能模型中压气机与透平部件特性线自适应修正的基准数据。首先, 选取 2019-09-11 22:11 时刻的运行数据 (此时机组 IGV 全开, 且以基本负荷运行) 用于燃气轮机性能模型设计工况参数自适应修正。其次, 选取机组 IGV 全开时的剩余正常历史运行数据用于 IGV 全开时的流量特性线与效率特性曲线自适应修正。最后, 选取剩余全部的正常历史运行数据用于透平的流量特性线与效率特性曲线自适应修正。关于燃气轮机热力模型在设计工况和变工况自适应修正的详细描述可以参考文献[17]。此外, 还要考虑压气机 IGV 开度位置变化的影响, 因此还需要将上述自适应修正后的 IGV 全开时的压气机部件特性线进一步自适应修正扩展到在任意 IGV 开度位置下都与实际机组的压气机部件特性线相匹配, 所以还需得到 IGV 开度调节下的质量流量修正系数。此处, 通过把从 2019-02-05 09:30 至 2019-12-08 23:30 的 2 号燃气轮机的历史运行数据中的 ϕ_{IGV} 与 $I_{IGV} \cdot \rho_1$ 的数据关系进行线性回归, 即得到 IGV 开度调节下的质量流量修正系数, 具体如图 5 所示。

根据上述 2019 年正常历史运行数据对燃气轮机热力模型进行自适应修正后, 可以进一步用于燃气轮机气路故障诊断。采集了从 2021-05-04 05:02 至 2021-05-18 00:47 时段的 2 号燃气轮机实际运行数据 (总计 19906 个运行数据点) 作为待诊断数据,

采样间隔为 1 min。这段时间的大气温度、大气压力、IGV 开度位置以及发电机电负荷变化情况如图 6—图 9 所示。

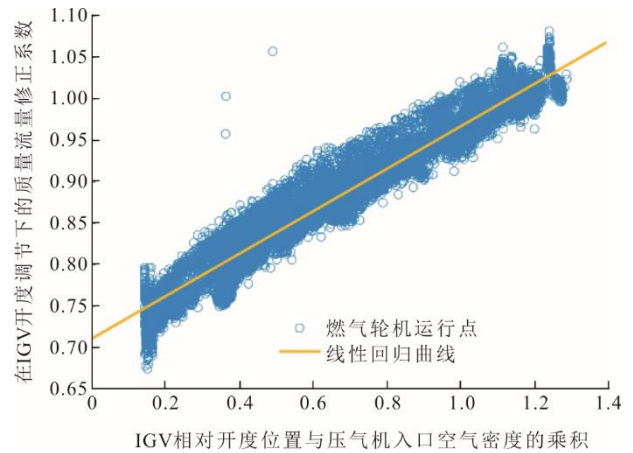


图 5 从 2019-02-05 09:30 至 2019-12-08 23:30 时段的历史运行数据中 ϕ_{IGV} 与 $I_{IGV} \cdot \rho_1$ 的数据关系

Fig.5 The relationship between ϕ_{IGV} and $I_{IGV} \cdot \rho_1$ in the normal historical operating data of the gas turbine from 2019-02-05 09:30 to 2019-12-08 23:30

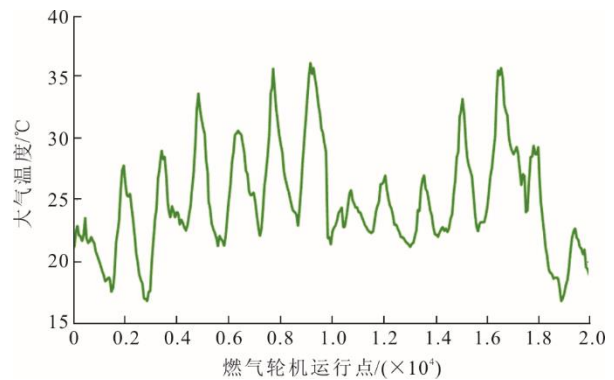


图 6 大气温度随燃气轮机运行的变化情况

Fig.6 The change of atmospheric temperature with the operation of gas turbine

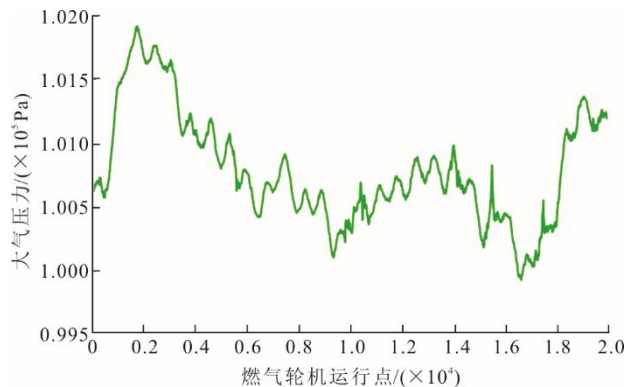


图 7 大气压力随燃气轮机运行的变化情况

Fig.7 The change of atmospheric pressure with the operation of gas turbine

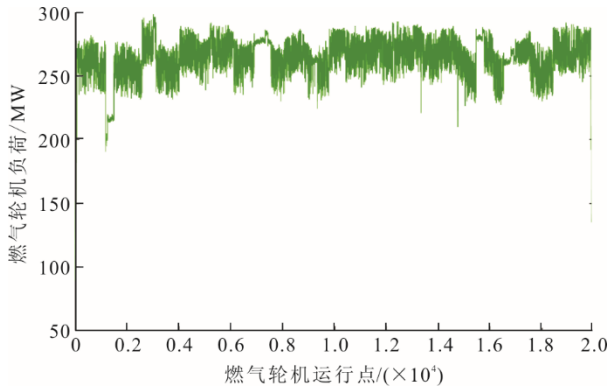


图 8 发电机电负荷随燃气轮机运行的变化情况
Fig.8 The change of generator electrical load with the operation of gas turbine

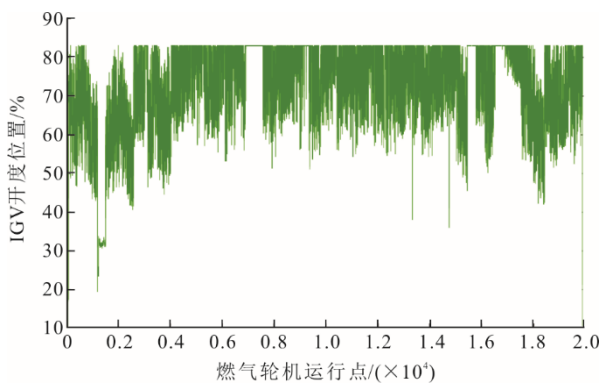


图 9 压气机 IGV 开度位置随燃气轮机运行的变化情况
Fig.9 The change of IGV opening position with the operation of gas turbine

通过对采集的从 2021-05-04 05:02 至 2021-05-18 00:47 时段的 2 号燃气轮机实际运行数据（总计 19906 个运行数据点）进行诊断，得到压气机的健康参数如图 10 所示。

从图 10 可知，压气机的 S_{FC} 从 1.002 0 逐渐降低到了 0.965 8，而 S_{EC} 从 0.998 9 逐渐降低到了 0.992 4，即 $\Delta S_{FC}:\Delta S_{EC}$ 从约 1.003: 1 逐渐增大到了 5.509: 1，符合 $\Delta S_{FC}:\Delta S_{EC}\approx 3\sim 8:1$ 的数值范围，表明压气机发生了典型的严重积垢现象。之后，该电厂选择了在 2021-05-22 18:23 时刻和 2021-07-03 16:00 时刻对 2 号压气机开展了 2 次离线水洗。在这 2 次离线水洗后，采集 2021-07-08 08:00 至 2021-07-14 14:01 的 2 号燃气轮机实际运行数据再进行诊断，得到压气机的健康参数如图 11 所示。

由图 11 可知，2 号压气机经过 2 次离线水洗，压气机的通流能力已经重新恢复到健康基准线，证明之前压气机流量特性指数 S_{FC} 的降低确实是由压气机积垢所引起，也证明了本文所提出方法的有效性和可靠性。

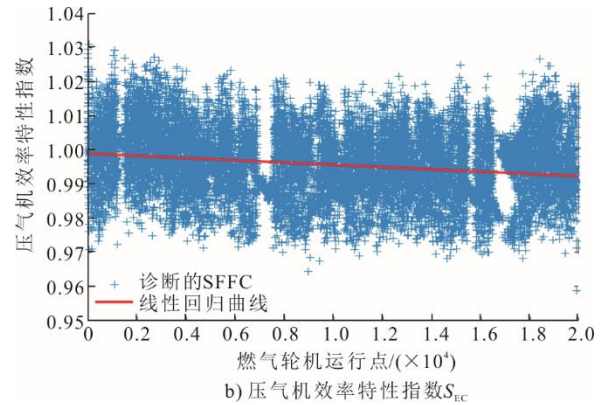
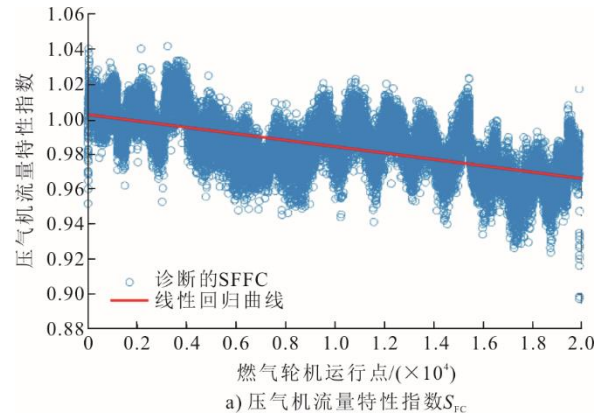


图 10 压气机健康参数随燃气轮机运行的变化情况
Fig.10 Changes of the compressor health parameters with the operation of gas turbine

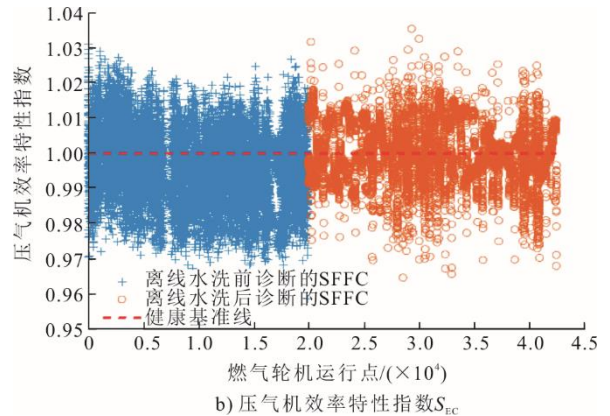
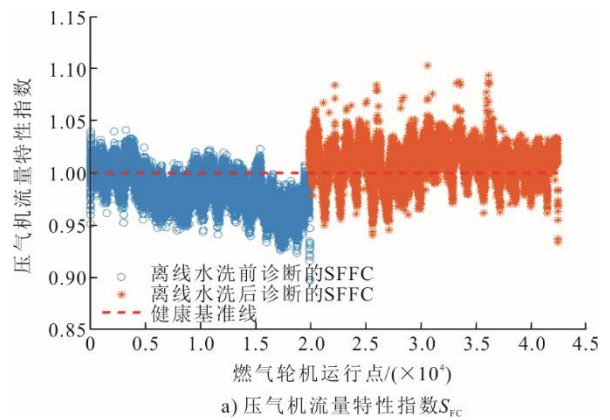


图 11 离线水洗后压气机健康参数随燃气轮机运行的变化情况
Fig.11 Changes of the compressor health parameters with the operation of gas turbine

3 结 语

本文广泛讨论了现有气路故障诊断方法的优缺点。针对上述问题,本文首次提出了一种适用于瞬态变工况且包含可变几何压气机的电厂燃气轮机气路故障诊断方法,推导了压气机进口可调导叶位置对压气机流量和效率特性影响的热力学关系式,建立了用于性能分析和气路故障诊断的高精度热力学模型。

实际电厂燃气轮机运行测试表明,所提出的方法可以在瞬态工况下,对包含可变几何压气机的电厂燃气轮机进行气路故障诊断,得到量化的部件健康参数,并且诊断得到的结果与实际情况相吻合,验证了本文所提出方法的有效性与可靠性。

[参 考 文 献]

- [1] LEON L S D, RODRIGO J, VEGA J M, et al. Gradient-like minimization methods for aeroengines diagnosis and control[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2020, 235(4): 1-24.
- [2] 应雨龙, 李靖超, 庞景隆, 等. 基于热力模型的燃气轮机气路故障预测诊断研究综述[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(3): 731-743.
YING Yulong, LI Jingchao, PANG Jinglong, et al. Review of gas turbine gas-path fault diagnosis and prognosis based on thermodynamic model[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(3): 731-743.
- [3] YING Y L, CAO Y P, LI S Y, et al. Study on gas turbine engine fault diagnostic approach with a hybrid of gray relation theory and gas-path analysis[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2016, 8(1): 1-14.
- [4] YANG Q C, LI S Y, CAO Y P. Multiple model-based detection and estimation scheme for gas turbine sensor and gas path fault simultaneous diagnosis[J]. *Journal of Mechanical Science & Technology*, 2019, 33(4): 1959-1972.
- [5] ZENG L, DONG S J, LONG W. The rotating components performance diagnosis of gas turbine based on the hybrid filter[J]. *Processes*, 2019, 7(11): 1-14.
- [6] SAFIYULLAH F, SULAIMAN S A, NAZ M Y, et al. Prediction on performance degradation and maintenance of centrifugal gas compressors using genetic programming[J]. *Energy*, 2018, 158: 485-494.
- [7] YING Y L, CAO Y P, LI S Y, et al. Nonlinear steady-state model based gas turbine health status estimation approach with improved particle swarm optimization algorithm[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015(3): 1-12.
- [8] LI J C, YING Y L. A method to improve the robustness of gas turbine gas-path fault diagnosis against sensor faults[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2018, 67(1): 3-12.
- [9] CHEN M, HU L Q, TANG H L. An approach for optimal measurements selection on gas turbine engine fault diagnosis[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines & Power*, 2015, 137(7): 1-9.
- [10] AMIRKHANIAB S, CHAIBAKHSHAB A, GHAFARIC A. Nonlinear robust fault diagnosis of power plant gas turbine using Monte Carlo-based adaptive threshold approach[J]. *ISA Transactions*, 2020, 100: 171-184.
- [11] NAJJAR Y S H, ALALUL O F A, SHAMLEH A A. Degradation analysis of a heavy duty gas turbine engine under full and part load conditions[J]. *International Journal of Energy Research*, 2020, 44(6): 4529-4542.
- [12] ZHOU D J, HUANG DW, HAO J R, et al. Fault diagnosis of gas turbines with thermodynamic analysis restraining the interference of boundary conditions based on STN[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 191: 1-17.
- [13] TSOUTSANIS E, MESKIN N. Derivative-driven window-based regression method for gas turbine performance prognostics[J]. *Energy*, 2017, 128: 302-311.
- [14] LI J C, YING Y L. Gas turbine gas path diagnosis under transient operating conditions: a steady state performance model based local optimization approach[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 170: 1-14.
- [15] LEE J J, KANG D W, KIM T S. Development of a gas turbine performance analysis program and its application[J]. *Energy*, 2011, 36(8): 5274-5285.
- [16] LI J C, WANG F, YING Y L, et al. A novel industrial gas turbine thermodynamic modeling approach based on adaptive gas path analysis[J]. *Energy Reports* (accepted).
- [17] LI X, YING Y L, WANG Y Y, et al. A component map adaptation method for compressor modeling and diagnosis[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, 10(3): 1-13.

(责任编辑 刘永强)