

# 基于高级过程仿真软件 APROS 的燃气轮机性能分析

朱正香<sup>1</sup>, 韩朝兵<sup>1</sup>, 司凤琪<sup>1</sup>, 黄志军<sup>2</sup>

(1. 东南大学 能源热转换及其过程测控教育部重点实验室, 江苏 南京 210096;

2. 大唐苏州热电有限责任公司, 江苏 吴江 215214)

**摘要:** 采用高级过程仿真软件 APROS(多功能工艺模拟)软件对燃气轮机进行模块化仿真建模, 将仿真结果与现场稳态数据进行对比, 验证了仿真模型的准确性。以某 PG9171E 型燃气轮机为研究对象, 定量分析了环境条件变化对燃气轮机性能的影响。结果表明: 环境温度对燃气轮机的运行特性以及经济性影响较大, 标准工况下, 环境温度每上升 1 °C, 燃机热耗率上升约 0.2%; 环境湿度对燃气轮机性能的影响程度会随着环境温度的上升而增加, 当环境温度上升到 40 °C 时, 相对湿度每增加 10%, 燃机热耗率会上升约 0.12%。

**关键词:** APROS; 燃气轮机; 仿真模型; 环境条件

**中图分类号:** TP273; TK471 **文献标识码:** A

**DOI:** 10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.04.014

## 引言

燃气轮机作为燃气-蒸汽联合循环系统的核心设备, 对联合循环系统的经济性及稳定性起到关键性的影响<sup>[1]</sup>。由于燃气轮机的热力循环一般为开式循环, 故环境条件对其运行状态的影响很大。随着季节和地域的不同, 环境条件发生变化, 导致燃气轮机往往偏离设计工况运行。因此, 研究环境条件对燃气轮机性能的影响, 对提高燃气轮机装置效率及安全运行具有重要的指导意义。

在环境温度对燃气轮机性能影响方面, 国内外研究者们开展了大量的研究工作。文献[2]通过数值模拟方法建立了重型燃气轮机天然气模型和合成气模型, 利用合成气模型计算了在环境温度变化过程中燃气轮机整机的性能曲线; 文献[3]研究了在偏离设计工况时, 环境温度变化对燃气轮机出力及燃机热效率的影响; 文献[4]采用动力机械变工况性能解析分析方法, 研究了环境温度变化对燃气轮机和联合循环装置性能的影响, 指出燃气轮机在带有余热利用的条件下, 环境温度的影响明显减弱。但是现有阶段对燃气轮机运行特性的研究主要集中在

于环境温度的影响, 对于其它环境条件, 如大气压力以及环境湿度的影响分析并不深入。因此, 为全面获取机组运行过程中的变工况特性, 急需针对性地研究其它环境因素变化对燃气轮机性能的影响。

本研究采用 APROS 软件建立了 PG9171E 型燃气轮机系统仿真模型, 着重研究了环境条件变化对燃气轮机性能的影响, 并重点分析了不同环境温度条件下, 环境湿度对燃气轮机运行参数及经济性指标的影响。研究结果可为燃气轮机电站的设计和运行提供参考。

## 1 APROS 计算模型

APROS 是由芬兰国家科学院(VTT)和芬兰富腾公司(FORTUM)联合开发的应用于热力系统工程分析的仿真支撑软件<sup>[5]</sup>。其仿真系统由图形界面、模型库、仿真实时数据库、热力计算库以及仿真引擎等几部分组成。其中热力计算库中提供了3种计算模型, 包括一维水/水蒸气/气体流动模型、单相流模型以及水箱动力学的稳态模型<sup>[6]</sup>。

### 1.1 APROS 计算基础模型

APROS 中均质流体模型主要包括一维质量守恒、动量守恒以及能量守恒方程<sup>[6]</sup>。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

式中:  $x$ —空间坐标, m;  $t$ —时间坐标, s;  $\rho$ —流体密度, kg/m<sup>3</sup>;  $u$ —沿  $x$  方向上的速度, m/s。

动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial x} = \rho g_x + F_w \quad (2)$$

式中:  $p$ —压力, Pa;  $g_x$ —重力加速度, m/s<sup>2</sup>;  $F_w$ —

收稿日期: 2014-11-18; 修订日期: 2014-12-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51176030)

作者简介: 朱正香(1991-), 女, 江苏南通人, 东南大学硕士研究生。

壁面摩擦力, N。

能量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u h)}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial t} + Q_w \quad (3)$$

式中:  $h$ —流体比焓, kJ/kg;  $Q_w$ —壁面热流量, W/m<sup>2</sup>。

### 1.2 燃气轮机各子模块计算模型

#### 1.2.1 压气机模块

燃气轮机仿真建模过程中,压气机特性的获取一直是直接影响仿真结果的重点和难点<sup>[7-8]</sup>。本研究采用文献[9]提出的压气机特性线分段计算法得到 PG9171E 型燃气轮机压气机特性曲线图。压气机入口折合转速、折合质量流量、压比与绝热压缩效率之间的关系为:

$$\frac{q_{m,c} \sqrt{T_1}}{p_1} = f_1(\pi_c, \frac{n}{\sqrt{T_1}}) \quad (4)$$

$$\eta_c = f_2(\pi_c, \frac{n}{\sqrt{T_1}}) \quad (5)$$

式中:  $q_{m,c}$ —压气机入口质量流量, kg/s;  $T_1$ —压气机入口温度, K;  $p_1$ —压气机入口空气压力, Pa;  $n$ —压气机转速, r/min;  $\frac{q_{m,c} \sqrt{T_1}}{p_1}$ —压气机入口折合质量流量;  $\frac{n}{\sqrt{T_1}}$ —压气机入口折合转速;  $\pi_c$ —压气机的压比;  $\eta_c$ —压气机的绝热压缩效率。

#### 1.2.2 燃烧室模块

压缩后的空气在燃烧室中与燃料进行混合燃烧,释放出燃料的反应热,从而产生高温燃气。APROS 仿真平台内嵌了燃料成分定义、化学反应机理方程及多种组物性模块,用户只需设置燃料组分,即可模拟燃料的燃烧过程。燃气轮机采用“西气东输”的天然气为燃料,其成分如表 1 所示。

表 1 天然气成分

Tab.1 Description of natural gas composition

天然气成分/%								低位热值/
C1	C2	C3	C4	C5	C6 +	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	MJ · kg <sup>-1</sup>
97.60	0.62	0.41	0.21	0.01	0.05	0.65	0.45	48.69

#### 1.2.3 燃气透平模块

##### (1) 压力与流量的计算关系

类似于水蒸气在汽轮机中的膨胀做功,烟气在燃气轮机中膨胀做功时,级组烟气流量与级组前后

参数的近似关系可由 Flügel 公式表示<sup>[10]</sup>:

$$\frac{G_1}{G_0} = \sqrt{\frac{P_1^2 - P_2^2}{P_{10}^2 - P_{20}^2}} \sqrt{\frac{T_{10}}{T_1}} \quad (6)$$

式中:  $G_1$ —透平进口烟气流量, t/h;  $P_1$ 、 $P_2$ —透平进出口压力, MPa;  $T_1$ —透平进口初温, K; 下标 0 表示已知的额定工况或设计工况下的参数;

##### (2) 级组焓降的数学计算

燃气透平中做功的工质为混合气体,主要包含 O<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、A<sub>r</sub>、H<sub>2</sub>O 等 5 种气体。在 APROS 仿真平台中,对于燃气透平中气体功量的计算可以近似的看作是几种单一气体单独做功量的叠加。

对于单一气体,压力和比容的乘积与比焓可以表示为<sup>[11]</sup>:

$$pv = (h - h_0)/A \quad (7)$$

式中:  $h_0$ —参考点比焓,对于不同气体,其取值有差异;  $A$  近似的认为是常数。

根据式(7)可推得级组的出口焓  $h_2$  与入口焓  $h_1$  之比为:

$$\frac{h_1 - h_0}{h_2 - h_0} = \frac{p_1 v_1}{p_2 v_2} \quad (8)$$

将在燃气透平中的工质视为理想气体混合物,其在级组内的热力过程可以近似的认为是一个多变过程,即满足  $pv^n = const$ ,其中  $n$  为多变指数。因此,可进一步得到:

$$\frac{h_1 - h_0}{h_2 - h_0} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{1-1/n} \quad (9)$$

从而计算得到燃气透平中的级组焓降:

$$\Delta H = \sum_{i=1}^5 (h_{1i} - h_{0i}) [(1 - (p_{2i}/p_{1i})^{1-1/n}) G_i] \quad (10)$$

式中:  $i = 1, 2, \dots, 5$  分别表示 O<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、A<sub>r</sub>、H<sub>2</sub>O 这 5 种气体。

#### 1.2.4 转子模块

在 APROS 中利用 Shaft 模块来模拟转子特性。将压气机与透平同时连接到转子模块上,利用透平输出功率来驱动压气机和负载,当透平输出功率与压气机和负载消耗的功率之和相等时,转子处于平衡状态,系统也处于某个稳定工况。当输出和消耗的功率不相等时,转子就会产生不平衡,这种不平衡使整个系统处于一种动态过渡过程。可将转子转速  $n$  作为一个与透平输出功率、压气机耗功和负载有关的状态变量<sup>[12]</sup>。

$$\frac{dn}{dt} = \frac{900(P_{wt}\eta_{mt} - P_{wc}/\eta_{mc} - P_{wl})}{I\pi^2 n} \quad (11)$$

式中:  $I$ —转轴的转动惯量;  $P_{wt}$ —透平输出功率, kW;  $P_{wc}$ —压气机的耗功, kW;  $P_{wl}$ —负载消耗的功率, kW;  $\eta_{mt}$ —透平的机械效率;  $\eta_{mc}$ —压气机的机械效率。

## 2 燃气轮机模型搭建

### 2.1 压气机进口导叶角度 IGV 开度的变化

现代重型燃气轮机压气机进口普遍都装有可转动导叶,其目的是通过改善燃气轮机的排气参数来提高由燃气轮机组成的联合循环装置的整体性能<sup>[13]</sup>。当燃气轮机负荷变化时,其压气机进口导叶角度 IGV 开度的变化规律由燃气轮机负荷控制系统决定。图 1 给出了 ISO 工况(环境温度为 15 °C,大气压力为 101.3 kPa,相对湿度为 60%)不同燃气轮机负荷对应的 IGV 开度设定值。

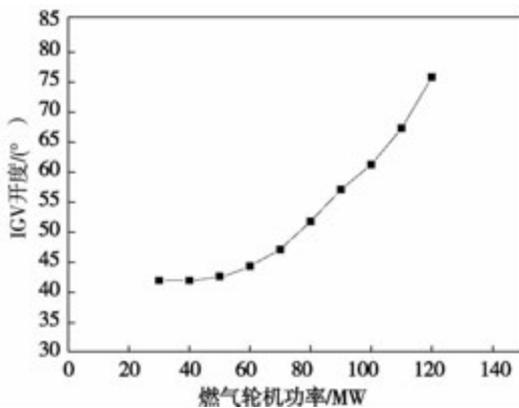


图 1 IGV 开度设定值

Fig. 1 Setting values of the IGV opening

由于 APROS 中压气机模块不包含 IGV 角度属性项,无法直接考虑因 IGV 角度变化所导致的压气机特性曲线变化。为此,在压气机进口设置阀门模块来代替压气机 IGV 开度变化,利用厂级信息监控系统 SIS 系统中筛选出的大量稳定运行工况参数,通过调整阀门开度使得主要参数的仿真值与实测值在允许误差限内,从而近似模拟 IGV 角度变化对燃气轮机过程参数的影响。

### 2.2 燃气轮机冷却空气流量

冷却空气量对燃气轮机的性能有较大影响,为了建立准确的燃气轮机仿真模型,必须考虑冷却空气量变化对机组性能的影响。图 2 给出了燃气轮机

空气具体流程图。冷却喷嘴的空气从压气机末级后抽出,分别冷却第 1 级和第 2 级喷嘴。冷却动叶及叶轮的空气从压气机第 16 级后抽出,分别冷却第 1 级和第 2 级动叶。冷却透平 3 级护环以及用于所有透平转子轴瓦密封的冷却空气从压气机第 4 级后抽出。

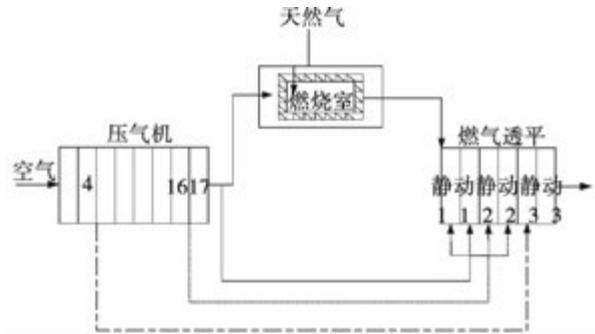
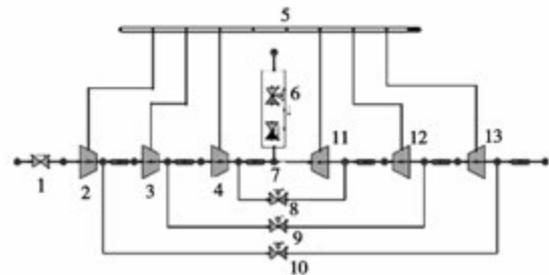


图 2 PG9171E 型燃气轮机空气流程示意图

Fig. 2 Air flow diagram of PG9171E gas turbine

综上所述,在搭建 PG9171E 型燃气轮机 APROS 仿真模型时,将压气机第 1 - 第 4 级作为一个级组,第 5 - 第 16 级作为一个级组,第 17 级单独列为一个级组。透平模块分为 3 个级组,并从每个级组后抽出部分空气作为透平冷却空气。其模型结构如图 3 所示。



1-IGV开度阀门; 2、3、4-压气机; 5-转子; 6-天然气进口阀门; 7-燃烧室; 8、9、10-冷却空气控制阀门; 11、12、13-燃机透平

图 3 PG9171E 型燃气轮机 APROS 仿真平台

Fig. 3 APROS simulation platform of PG 9171E gas turbine

## 3 燃气轮机仿真模型结果的验证与分析

为了验证仿真平台的准确性,从该燃气轮机机组 SIS 系统中选取了 10 组稳定运行工况下的参数,对其进行模拟仿真,并将仿真结果与现场实测数据

进行分析对比。表 2 为各稳定工况下燃气轮机主要过程参数仿真值与实测数据的相对误差。其中,由于在现场压气机进口并未布置流量测点,故准确的空气流量无法直接测得,本研究采用文献 [14] 提供的计算方法,利用排烟含氧量间接计算得到压气机进口流量,计算式为:

$$G = \frac{A \cdot B + \mu_{\text{air}} \cdot V_0 \cdot \eta_B / 22.41}{1 - A \cdot B} \cdot M \quad (12)$$

式中:  $A$  一排烟中与空气中氧的摩尔含量对比;  $B = \mu_{\text{air}} / \mu_{\text{gas}}$ ;  $\mu_{\text{air}}$  一空气的平均分子量, g/mol;  $\mu_{\text{gas}}$  一烟气的平均分子量, g/mol;  $V_0$  一每千克燃料完全燃烧

所需要的理论空气量,  $\text{m}^3/\text{kg}$ ;  $\eta_B$  一燃烧效率, %;  $M$  一燃料消耗量,  $\text{kg}/\text{s}$ 。

从表 2 可以看出,压气机进口空气流量的相对误差较大,在负荷为 45 MW 时,其相对误差达到最大值 3.02%。这是由于压气机进口空气流量的实测值是采用间接计算得到,其计算误差较大,影响了计算结果的准确性。除压气机进口空气流量外,其余参数的实测值与仿真数据的误差均不超过 1.2%,不超过允许误差。这表明所搭建的燃气轮机仿真模型的静态特性与现场实际运行特性相吻合。

表 2 变工况下燃气轮机主要过程参数仿真值与实测值的相对误差

Tab. 2 The relative errors between simulation values and measured values of main parameters in gas turbine off - design conditions

相对误差 / %	燃气轮机负荷 / MW									
	45	53	61	71	80	90	100	114	124	127
天然气流量	-0.75	-0.50	-0.98	0.47	-0.36	-0.89	0.53	-0.09	-0.50	-0.43
燃机负荷	0.03	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01
燃机排气温度	-0.20	-0.24	0.35	-0.44	-0.76	-0.36	-0.57	-0.76	-0.61	0.10
压气机进口空气流量	3.02	1.87	-0.86	1.78	2.11	1.57	-0.77	1.43	-1.19	1.31
压气机出口压力	0.84	0.53	0.74	0.26	0.26	1.46	-0.78	0.72	0.40	-1.01
压气机出口温度	-0.19	-0.82	0.07	1.01	0.96	1.07	0.64	1.06	1.12	0.52
燃机排气压力	0.54	0.84	0.15	0.36	0.77	1.07	0.08	0.50	0.71	0.12

此外,从压气机以及透平运行特性角度,将 APROS 仿真值与实际测量值进行对比。图 4 给出了变工况下压气机压比 - 流量对比曲线。

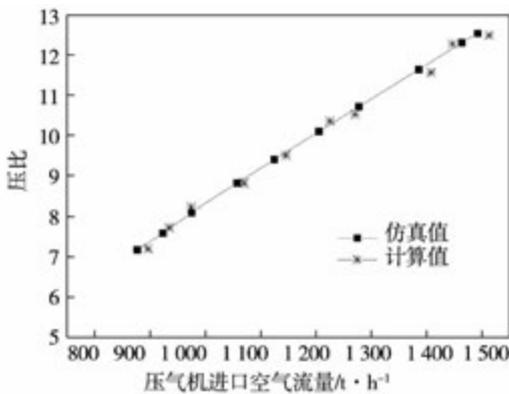


图 4 变工况下压气机压比—空气流量关系曲线  
Fig. 4 Comparison between simulation data and calculation data of compressor

由图 4 可见,机组变工况时,仿真得到的压气机

运行特性曲线与实测的特性曲线趋势一致。并且,仿真值与计算值之间的相对误差不超过 4%。

图 5 为变工况下燃气透平运行特性对比曲线。

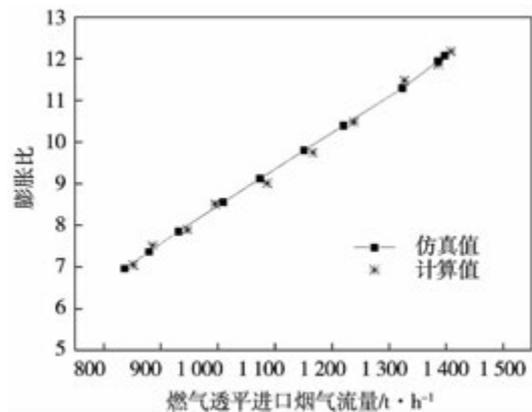


图 5 变工况下燃气透平膨胀比—进口烟气流关系曲线  
Fig. 5 Comparison between simulation data and calculation data of turbine

从图5中可以看出,燃气透平的膨胀比与燃机进口流量近似呈线性关系,计算值与仿真值之间虽然存在一定的误差,但是在工况变动情况下,参数的变化趋势保持一致。

综上所述,仿真平台在变工况时仍具有良好的适应性,可以较好的反应真实机组的运行特性。

#### 4 环境条件对燃气轮机性能的影响

基于搭建的 APROS 仿真模型,可以分析环境条件变化对燃气轮机性能的影响。以燃气轮机 100% 负荷工况为例,采用控制变量法,分别改变环境温度、大气压力、环境湿度,得到燃气轮机主要运行参数及经济性指标的定量变化关系。

##### 4.1 环境温度

环境温度上升,空气比容加大,导致进入压气机的空气质量流量减少,燃气轮机出力及效率将随之降低,最终导致燃气轮机热耗上升。同时,根据压气机特性曲线可知,压气机空气流量降低的同时,压气机的压比会呈下降趋势。图6给出了在大气压力为 101.3 kPa、环境湿度为 60% 条件下,环境温度从 -10 °C 变化至 35 °C 时,燃气轮机各主要特性参数及经济性指标的相对变化率。相对值的计算以环境温度为 15 °C 时的燃气轮机特性参数值为参考点。

可见,环境温度上升时,透平排气流量及燃机输出功率均呈下降趋势,而透平排气温度则增加。且环境温度每上升 5 °C,燃机出力下降约 3%,透平排气流量降低约 2.5%,但透平排气温度仅上升约 1%。这表明环境温度的上升导致透平做功量减少,从而使得燃机输出功率降低。

对于 PG9171E 型燃气轮机,当其它条件不变时,环境温度每上升 5 °C,燃机低位效率降低约 1%,压气机出口压力降低约 4%。仿真结果表明,降低环境温度,不仅可以提高燃气轮机的输出功,还可以提高燃气轮机的运行效率,从而其热耗率降低。同时,环境温度的降低将导致透平排气温度降低,而透平排气流量则上升。

##### 4.2 环境湿度

环境湿度直接影响压气机进口工质的成分,一定程度上改变了工质的相对分子量以及焓值。压气机进口工质成分的变化导致工质流量的改变,从而使得压气机运行工况点发生偏移。图7为环境湿度

变化时,燃气轮机各主要特性参数及其经济性指标的相对变化率曲线。其中参考点环境湿度为 0%。

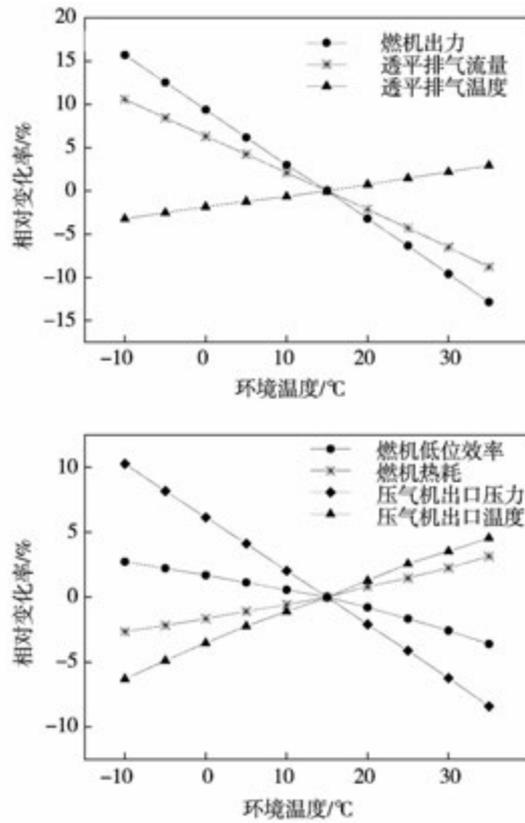


图6 环境温度变化对燃气轮机主要参数的影响  
Fig. 6 Influence of ambient temperature on main parameters of gas turbine

由图7可以看出,较之于环境温度,环境湿度对燃机出力的影响较小,即使当环境温度达到40 °C 时,环境湿度每增加 10%,燃机出力只上升 0.18% 左右。此外,环境湿度的增加,会引起燃机排气温度的上升以及排气流量的下降,并且使燃气透平进口温度及压气机出口压力下降。当环境温度较低时,环境湿度的变化对机组性能的影响极小,而当环境温度上升到 40 °C 时,相对湿度每增加 10%,燃机热耗会上升 0.12% 左右。这表明,环境温度上升时,环境湿度对燃气轮机的经济性以及运行特性的影响会增加。

##### 4.3 大气压力

图8所示为在环境温度保持 15 °C,环境湿度保持 60% 的条件下,大气压力从 98.75 kPa 变化至 103.35 kPa 时,燃机主要的经济指标及运行参数的相对变化趋势。基准点取大气压力为 101.3 kPa。

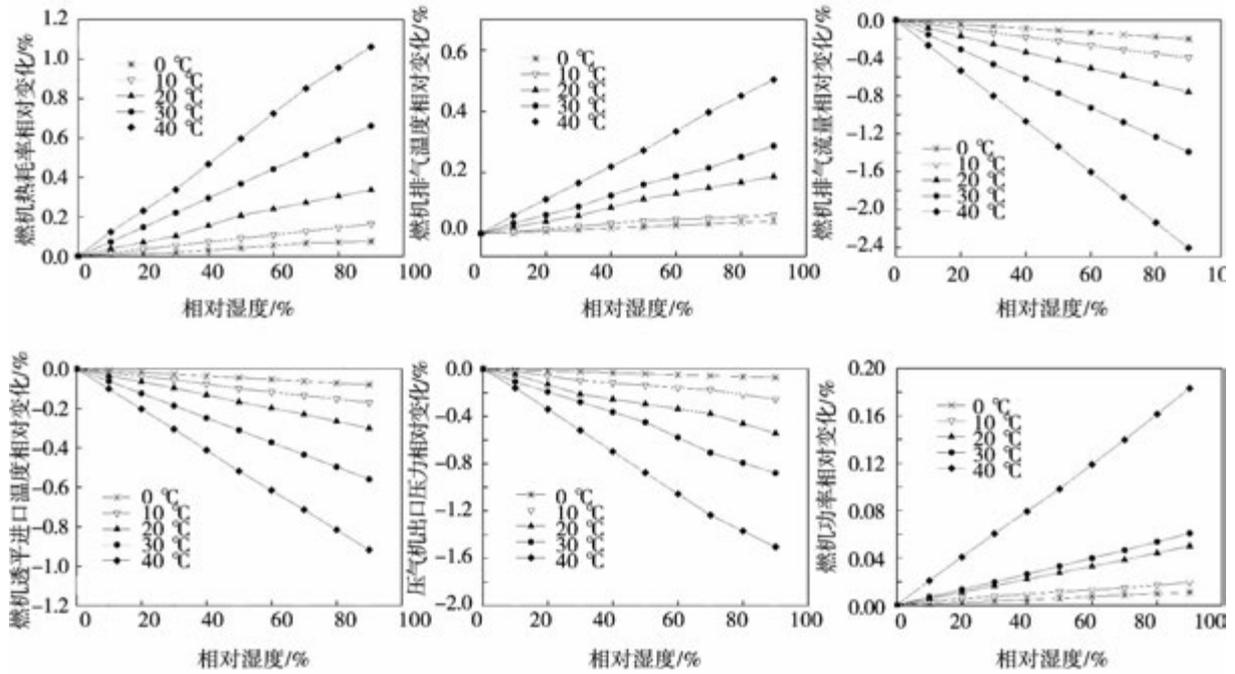


图 7 环境湿度变化对燃气轮机主要参数的影响

Fig. 7 Influence of relative humidity on main parameters of gas turbine

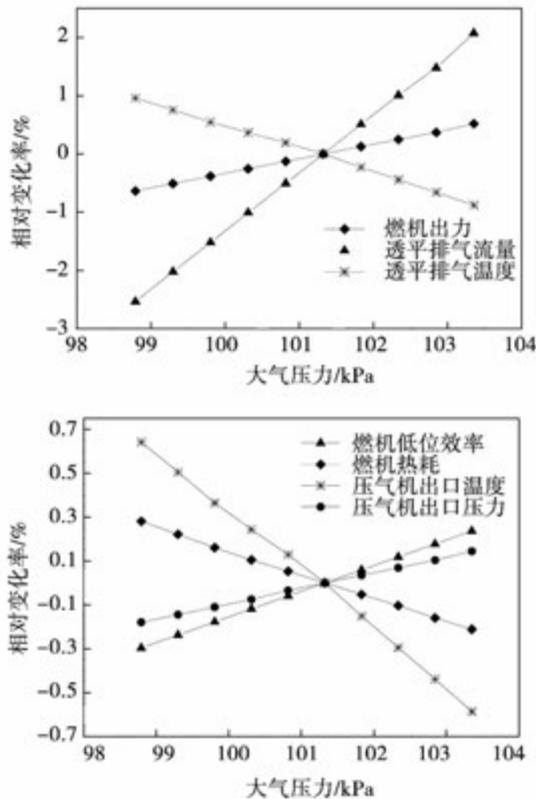


图 8 大气压力变化对燃气轮机主要参数的影响

Fig. 8 Influence of atmosphere pressure on main parameters of gas turbine

大气压力的波动同样会导致燃气轮机热经济性以及运行特性的变化。由图 8 可以看出,大气压力的上升不仅可以提高燃机的输出功率,而且使得燃机低位效率上升。大气压力每增加 1 kPa,燃机出力上升约 0.3%,燃机效率上升约 0.1%。同时,大气压力的上升会导致透平排气流量的上升以及透平排气温度的降低。大气压力每上升 1 kPa,燃机排气流量上升约 1%,燃机排气温度下降约 0.5%。这表明,大气压力的上升可以一定程度上提高燃气轮机的运行特性,但同时也会对燃气轮机的排气参数产生影响,排气参数的变化会对其后的底循环系统产生影响。

### 5 结论

(1) 采用 APROS 软件建立了 PG9171E 型燃气轮机系统仿真模型,并考虑燃气轮机进口 IGV 角度的变化以及透平冷却空气流量的影响。将仿真计算值与现场实测结果进行对比分析,从不同角度验证了仿真平台计算结果的准确性。

(2) 环境温度相比于大气压力及相对湿度而言,对燃气轮机运行特性影响较大。在设计工况下,环境温度每上升 1 °C,燃机热耗率上升约 0.2%,燃

机出力下降约 0.5%。大气压力每上升 1 kPa,燃机出力上升约 0.3%,燃机热耗率降低约 0.1%。

(3) 环境湿度对燃气轮机的影响受到环境温度的制约,在环境温度较低时,环境湿度的影响几乎可以忽略不计,但是当环境温度逐渐上升时,环境湿度对燃气轮机的经济特性及运行特性的影响将越加明显。

#### 参考文献:

- [1] 赵巍. 燃气轮机建模仿真一体化支持系统的研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2008.  
ZHAO Wei. Research of an integrated support system for gas turbine modeling and simulation [D]. Shanghai Jiao Tong University, 2008.
- [2] 郭磊, 崔玉峰, 林飞宇, 等. 某型燃气轮机燃烧中低热值燃料随环境温度变化的控制规律分析 [J]. 工程热物理学报, 2009, 30(4): 577-580.  
GUO Lei, CUI Yu-feng, LIN Fei-yu, et al. System performance analysis and control strategy study of gas turbine burning syngas fuel with variation of ambient temperature [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2009, 30(4): 577-580.
- [3] De Sa A, Al Zubaidy S. Gas turbine performance at varying ambient temperature [J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(14): 2735-2739.
- [4] 张娜, 蔡睿贤. 环境温度对燃气轮机功热并供装置及联合循环变工况性能的影响 [J]. 工程热物理学报, 2001, 22(5): 529-532.  
ZHANG Na, CAI Rui-xian. The influence of ambient temperature variation on the performances of gas turbine cogeneration set and combined cycle [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2001, 22(5): 529-532.
- [5] Technical research centre of Finland. APROS overview [EB/OL]. [http://www.apros.fi/en/brochures\\_paper](http://www.apros.fi/en/brochures_paper), 2009-09.
- [6] 屈天章. 热电厂母管制给水系统静态特性仿真及优化运行的研究 [D]. 南京: 东南大学, 2011.  
QU Tian-zhang. Research on the static characteristics simulation and optimal operation of the header type feed-water system in thermal power plant [M]. Nanjing: Southeast University, 2011.
- [7] Kim J H, Song T W, Kim T S, et al. Model development and simulation of transient behavior of heavy duty gas turbines [J]. Journal of engineering for gas turbines and power, 2001, 123(3): 589-594.
- [8] Song T W, Kim T S, Kim J H, et al. Performance prediction of axial flow compressors using stage characteristics and simultaneous calculation of interstage parameters [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2001, 215(1): 89-98.
- [9] 夏迪, 王永泓. PG9171E 型燃气轮机变工况计算模型的建立 [J]. 热能动力工程, 2008, 23(4): 338-343.  
XIA Di, WANG Yong-hong. The establishment of PG9171E type gas turbine varying condition calculation model [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2008, 23(4): 338-343.
- [10] 深士一, 康松. 汽轮机原理 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1992.  
SHEN Shi-yi, KANG Song. Theory of steam turbine [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1991.
- [11] 曹祖庆. 汽轮机变工况特性 [M]. 南京: 东南大学出版社, 1991.  
CAO Zu-qing. Variable load operation performance of steam turbine [M]. Nanjing: Southeast University Press, 1991.
- [12] 刘冰, 彭淑宏. 某重型燃气轮机动态建模及性能仿真研究 [J]. 计算机仿真, 2012, 29(9): 335-338.  
LIU Bing, PENG Shu-hong. Dynamic modeling and simulation on heavy duty gas turbine [J]. Computer Simulation, 2012, 29(9): 335-338.
- [13] 赵士杭, 叶海文. 压气机静叶可调对燃气轮机和联合循环变工况性能的影响 [J]. 热能动力工程, 1990, 5(6): 1-4.  
ZHAO Shi-hang, YE Hai-wen. The effect of variable compressor vanes on gas turbine and combined cycle power plant off-design performance [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 1990, 5(6): 1-4.
- [14] 郑蕾燕, 姚秀平, 齐进, 等. 确定运行中的燃气轮机初温的方法探讨 [J]. 燃气轮机技术, 2005, 18(1): 57-59.  
ZHENG Pu-yan, YAO Xiu-ping, QI Jin, et al. Research on the methods of determining the initial temperature of gas turbine in operation [J]. Gas Turbine Technology, 2005, 18(1): 57-59.

(丛敏 编辑)

noise in the open impeller. The quadruple sound source in the blade trailing is dissipated quickly, and can not able to be transferred to the downstream. The quadruple sound is not found in the open impeller downstream region. The main part of the open impeller noise is monopole noise, an important part of that is dipole noise, which is mainly concentrated in the tip region of the leading edge and the trailing edge. Sound Pressure (SP) of leading edge is greater than SP of trailing edge and SP of suction surface is greater than SP of pressure surface. **Key words:** open impeller, aerodynamic noise, Large Eddy Simulation, FW-H equation

基于高级过程仿真软件 APROS 的燃气轮机性能分析 = **Analysis of Gas Turbine Performance Based on the Advanced Process Simulation Software** [刊,汉] ZHU Zheng-xiang, HAN Chao-bing, SI Feng-qi, (Key Laboratory of Energy Thermal Conversion and Control of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096), HUANG Zhi-jun (Datang Suzhou Thermal Power Co. Ltd., Wujiang, China, Post Code: 215214) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015, 30(4). -551 -557

This paper gives a complete introduction of the simulation model of gas turbine and through comparing the simulation results with steady-state data on the spot, the accuracy of the simulation model is verified. Taking the PG9171E gas turbine as the object of study, the effect of the environment conditions on gas turbine performance was studied in this paper. Results indicate that the environment temperature has the biggest effect on the working characteristic and economy of the gas turbine. In the standard operating conditions, the heat consumption of gas turbine will increase by 0.2% with the ambient temperature rising one degree centigrade. In addition, the influence of air humidity will increase with the rising of temperature. When the environment temperature rises to 40 degrees, as the humidity increasing by each 10%, the heat consumption of gas turbine will increase by 0.12%. **Key words:** APROS, gas turbine, simulation model, ambient conditions

催化-预混混合燃烧室反应特性分析 = **A Study of Catalytic-premixed Hybrid Combustor Reaction Performance** [刊,汉] WANG Yue (Faculty of Petroleum & Nature Gas Engineering, Liaoning Shihua University, Liaoning Fushun, China, Post Code: 113001), LIU Ai-guo (Faculty of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University, Liaoning Shenyang, China, Post Code: 110136) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015, 30(4). -558 -563

The structure of catalytic-premixed hybrid combustor has been mentioned which combines the catalytic combustion