

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2013.04.022

基于Modelica/Dymola的小型燃气轮机 建模与仿真

张 杰¹, 张雪梅^{1*}, 沈 岑¹, 胡艳军¹, 吴 亮²

(1. 浙江工业大学 能源与动力工程研究所, 浙江 杭州 310014;

2. 杭州松下电化住宅设备机器有限公司, 浙江 杭州 310018)

摘要: 为了研究小型燃气轮机在不同环境下的动态特性,采用模块化建模方法,并根据质量和能量守恒原理,对小型燃气轮机进行了合理划分,建立了压气机、燃烧室、透平等单元部件的数学模型,并将这些部件划分为容积模块和流动模块。采用面向对象的、多领域的物理系统建模语言 Modelica 和 Dymola 编译器编制了各部件的仿真程序,建立了 SmallGasTurbine 通用模型库,以方便不同结构系统的小型燃气轮机的模型搭建。以川崎 M1A-13D、M7A-01 小型燃气轮机为例,搭建了它们的系统模型,将厂家给定基本数据与仿真结果进行了对比。研究表明,小型燃气轮机模型模拟仿真误差较小,具有很高的精确度。

关键词: Modelica/Dymola; 小型燃气轮机; 仿真; 模块化建模

中图分类号: TM61; TK47; TK121

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2013)04-0476-04

Modeling and performance simulation for small gas turbines based on Modelica/Dymola

ZHANG Jie¹, ZHANG Xue-mei¹, SHEN Cen¹, HU Yan-jun¹, WU Liang²

(1. Institute of Energy and Power Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;

2. Hangzhou Panasonic Home Appliances Co.Ltd., Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at researching the dynamic characteristic of a small gas turbine in different kinds of environment, and on the basis of the laws of the conservation of mass and energy, a blocking modeling method was employed to reasonably carve up the small gas turbine. The math models of compressor, combustion chamber and turbine were built. Modelica and Dymola with multi-domain language, which is an object-oriented, were used to program and build relative simulation models. Taking a lab-scale of gas turbine as an example, simulating results were compared with actual plant's performance. The research results indicate that the errors of the built models of the lab-scale of gas turbine are small enough for further general and expansible application.

Key words: Modelica/Dymola; small gas turbine; simulation; modular modeling

0 引 言

小型燃气轮机是一类新型发动机,其单机功率范围通常在 300 kW~20 000 kW^[1]。由于其发电系统能同时产生热能和电能,具有排放少、效率高、安装方便、维护简单等特点,成为天然气分布式能源系统的

核心^[2]。由于直接对小型燃气轮机进行实验的成本高,而且也不容易得到完整的数据,并且需要花费大量的时间、财力和物力,利用计算机的仿真技术建立模型来研究小型燃气轮机是目前最常用的手段之一^[3]。

目前已有的关于燃气轮机的仿真语言和程序,有 Fortran, Matlab/Simulink 等。Fortran 语言不具有图形

收稿日期: 2012-11-27

作者简介: 张 杰(1988-),男,湖北天门人,主要从事分布式能源系统方面的研究。E-mail: zhangjie1988927@163.com

通信联系人: 张雪梅,女,副教授,博士,硕士生导师。E-mail: zhangxuemei@zjut.edu.cn

用户界面,因而很难学习应用^[4]。Matlab/Simulink不能很好地模拟流体流动以及突然改变方向的特殊流动,而且其方框图描述的系统需要有确定的因果关系,要获得这些有因果关系的输入/输出,不仅耗时,还会失去方程原有的、特定的物理表示。

基于Modelica语言非因果特性、面向对象特性^[5]和多领域混合建模特性的三大特性,本研究利用Dymola编译器建立的小型燃气轮机通用模型库,并根据该模型库搭建M1A-13D、M7A-01型燃气轮机的模型,与厂家提供数据对比,以验证模型的准确性和可靠性。

1 小型燃气轮机通用模型的建立

依据模块化建模的思想,本研究对小型燃气轮机的实际组成进行模块化分解,分别建立压气机、透平、燃烧室等部件,并将这些部件划分为流动模块和容积模块。容积模块是具有一定控制容积的模块,如燃烧室,并在其中考虑质量和能量的积聚;而流动模块是只考虑质量和能量流动的模块,例如压气机、透平^[6]。为了方便计算,该模型作以下假设:

(1) 压气机、透平机被认为是绝热的,忽略进出口烟气流的高差以及进出口的动能差。

(2) 推导燃烧室模型时,忽略能量守恒方程中动能和势能的变化。

(3) 气体介质均当做理想混合气体,其中空气介质含有N₂、O₂、Ar、CO₂、H₂O 5种气体组分;燃气介质含有CO₂、C₂H₆、C₃H₈、CH₄、N₂ 5种气体组分;烟气介质含有CO₂、H₂O、N₂、O₂、Ar 5种气体组分。理想混合气体的热力参数焓,熵,热容的计算根据各部件模块中温度(200 K ≤ T ≤ 6 000 K)计算获得,具体计算公式^[7]如下:

$$h(T) = RT \left(-\frac{a_1}{T^2} + a_2 \frac{\log(T)}{T} + \sum_{i=3}^7 a_i \frac{T^{i-3}}{i-2} + \frac{b_1}{T} \right) \quad (1)$$

$$s(T) = R \left(-\frac{a_1}{2T^2} - \frac{a_2}{T} + a_3 \log(T) + \sum_{i=4}^7 a_i \frac{T^{i-3}}{i-3} + b_2 \right) \quad (2)$$

$$c_p(T) = R \left(\sum_{i=1}^7 a_i T^{i-3} \right) \quad (3)$$

1.1 压气机模型

本研究通过基于相似定律外推通用特性曲线的办法^[8],将修正质量流量、修正转速、修正轴功、修正功率归一化,然后改变相似定律的转速比的指数,则质量流量、轴功和转速之间的关系为:

$$\frac{\overline{m}_{c1}}{\overline{m}_{c2}} = \left(\frac{\overline{n}_{c1}}{\overline{n}_{c2}} \right)^x \quad (4)$$

$$\frac{\overline{w}_{c1}}{\overline{w}_{c2}} = \left(\frac{\overline{n}_{c1}}{\overline{n}_{c2}} \right)^y \quad (5)$$

$$\frac{\overline{P}_{comp,c1}}{\overline{P}_{comp,c2}} = \left(\frac{\overline{n}_{c1}}{\overline{n}_{c2}} \right)^z \quad (6)$$

式中: m —质量流量, n —转速, W —单位质量流体所需的压缩轴功, N —轴功率。

其中:

$$\overline{m}_c = m_c/m_{c,0}, \overline{n}_c = n_c/n_{c,0}, \overline{W}_c = W_c/W_{c,0}, \overline{N}_c = N_c/N_{c,0}$$

式中:下角标0—设计工况。

轴功是速度三角形的函数,与流体是否可压缩无关, y 等于2。本研究根据绝热压缩比功和式(1~5),100%修正转速线上的压比值和设计工况点的流量和已知的压比,绘制修正质量流量—压比曲线,推算出式(1~4)中的 x 值和其他修正转速线上的质量流量。同理,计算出 z 值和其他修正转速线上的绝热效率,采取插值办法读取压气机运行点。

1.2 透平模型

由于透平的进口参数和设计工况点参数未知,本研究在已推算出压气机特性曲线的前提下,将压气机模块结合设计工况点数据模拟出压气机出口的气流状态,再通过燃烧室燃烧模拟,获得燃烧室出口的烟气状态参数,从而获得透平的入口烟气参数,再推导透平的通用特性曲线。

1.3 燃烧室模型

本研究近似认为燃烧室容积内压力不变,以及温度不变^[9]。其能量守恒式为:

$$\frac{dE}{dt} = m_{ia} \cdot h_{ia} + m_{if} \cdot h_{if} - m_{out} \cdot h_{out} + HR \quad (7)$$

式中: HR —燃气的化学热; m —质量流量; h —焓;下角标ia,if,out—空气,燃气,出口烟气。

1.4 其他部件模型

基于现有的标准库和ThermoPower库,本研究建立气源、管道、温度传感器等部件模块^[10]。

1.5 系统仿真模型

基于上述部件模型,本研究将其组成单轴小型燃气轮机框架模型,模型示意图如图1所示。

2 小型燃气轮机的样本数据

M1A-13D型燃气轮机基本参数如表1所示,它是单轴模式,转速为22 000 r/min,压气机是2级离心压缩,压气比为9.6,透平是3级轴流透平,发电机效率是0.95。

M7A-01型燃气轮机基本参数如表2所示^[12]。

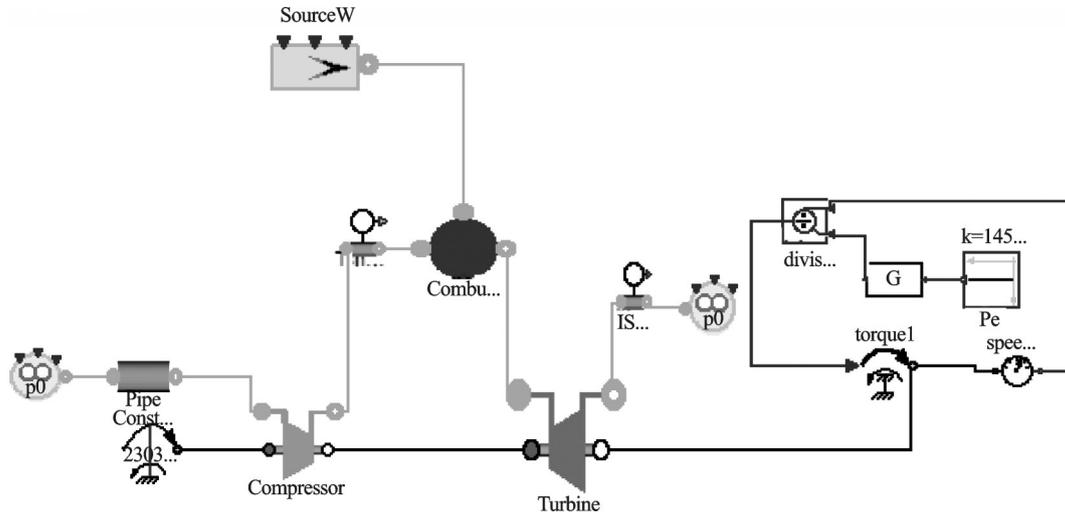


图1 小型燃气轮机框架模型

表1 M1A-13D产品样本数据

环境温度 /°C	部分负荷 / (%)	发电功率 /kW	热耗 /kW	排烟质量流 量/(kg·s ⁻¹)	排烟温度 /°C
0	100	1 630	6 700	8.53	526
5	100	1 580	6 539.4	8.33	528
	100	1 450	6 150.4	7.917	534
15	75	1 090	5 038.2	8.055 6	448
	50	730	4 035.28	8.166 7	374
25	100	1 320	5 815.3	7.5	543
35	100	1 180	5 441.1	7.11	552

表2 M7A-01产品样本数据

环境温度 /°C	部分负荷 / (%)	发电功率 /kW	热耗 /kW	排烟质量流 量/(kg·s ⁻¹)	排烟温度 /°C
0	100	5 950	19 783.75	22.583	539
5	100	5 770	19 329.5	22.222	542
	100	5 410	18 480	21.556	548
15	75	4 060	15 191.2	21.472	465
	50	2 700	11 925	21.417	403
25	100	4 830	17 146.5	20.194	560
35	100	4 240	15 794	18.750	575

3 小型燃气轮机的模拟仿真

在小型燃气轮机模型框架搭建之后,本研究根据M1A-13D型号的燃气轮机设计参数推断出压气机的修正质量流量、绝热效率和压比的特性矩阵为:[0, 95, 100, 105; 1, 0.825, 0.81, 0.805; 2, 0.84, 0.829, 0.82; 3, 0.832, 0.822, 0.815; 4, 0.825, 0.812, 0.79; 5, 0.795, 0.78, 0.765][0, 95, 100, 105; 1, 0.0383, 0.043, 0.046 8; 2, 0.039 3, 0.043 8, 0.047 9; 3, 0.040 6, 0.045 2, 0.048 4; 4, 0.041 6, 0.046 1, 0.048 9; 5, 0.042 3, 0.046 6, 0.049 3] [0, 95, 100, 105; 1, 22.6, 27, 32; 3, 20.8; 25.5; 29; 4, 19, 24.3, 27.1; 5, 17, 21.5, 24.2];透平的修正质

量流量和绝热效率矩阵特性矩阵分别为:[1, 90, 100, 110; 2.36, 0.004 68, 0.004 68, 0.004 68; 2.88, 0.004 68, 0.004 68, 0.004 68; 3.56, 0.004 68, 0.004 68, 0.004 68; 4.46, 0.004 68, 0.004 68, 0.004 68], [1, 90, 100, 110; 2.36, 0.89, 0.895, 0.893; 2.88, 0.90, 0.906, 0.905; 3.56, 0.905, 0.906, 0.905; 4.46, 0.902, 0.903, 0.90]。部分负荷时的绝热效率变化规律可参照文献[13],结合压气机特性曲线模块计算获得,可加快计算速度。

3.1 小型燃气轮机的稳态验证

在标况下,M1A-13D小型燃气轮机稳态运行结果如图2、图3所示。

M1A-13D燃气轮机小型燃气轮机的空气质量流

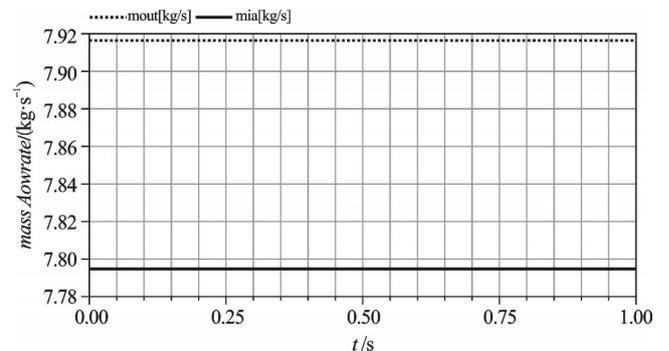


图2 空气质量流量和烟气质量流量图

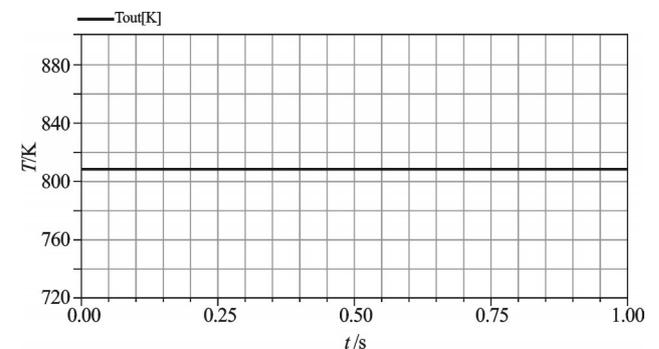


图3 排烟温度

量和烟气质量流量的模拟情况如图2所示,由图2可见,压气机中的空气流量是7.793 69 kg/s,到透平中的烟气流量是7.917 06 kg/s。与M1A-13D燃气轮机参数中的排气流量7.917 kg/s相比,相对误差近似为0。

稳态模拟所得的排烟温度如图3所示,为808.06 K,与设计排烟温度807.15 K相比,误差为-0.11%。

其他各个设计工况稳态模拟情况如表3所示。由

表3可知,在设计工况100%负荷时,稳态模拟的排烟温度、排烟质量流量与设计值误差较小,误差平均值在-0.075%。在部分负荷下,误差稍微放大,在15℃的75%负荷时,误差仍然很小,排烟温度和排烟质量流量的误差在0.8%左右,只是当50%负荷时,排烟温度的误差到了-1.772%。总的稳态误差平均值在0.292%左右。

表3 M1A-13D小型燃气轮机主要参数对比

	设计值	模拟	误差/(%)	设计值	模拟	误差/(%)	设计值	模拟	误差/(%)
环境温度/℃	0	0	0	5	5	0	15(50%)	15(50%)	0
电输出功率/kW	1 630	1 630	0	1 580	1 580	0	730	730	0
热耗/kW	6 700	6 701.88	-0.028	6 539.4	6 539.4	0	4 035.277 78	4 035.28	-0.000 055
排烟质量/(kg·s ⁻¹)	8.53	8.533 11	-0.036	8.33	8.331 89	-0.023	8.166 666 67	8.165 73	0.011
排烟温度/K	799.15	794.697	0.557	801.15	799.756	0.174	647.15	658.621	-1.772
环境温度/℃	15	15	0	25	25	0	15(75%)	15(75%)	0
电输出功率/kW	1 450	1450	0	1 320	1320	0	1 090	1 090	0
热耗/kW	6 150.4	6 151.72	-0.021 46	5 815.3	5 815.3	0	5 038.222	5 038.2	0.000 041
排烟质量/(kg·s ⁻¹)	7.917	7.917 06	0.001	7.5	7.497 47	0.034	8.055 556	8.12	0.804
排烟温度/K	807.15	808.06	-0.113	816.15	821.493	-0.655	721.15	726.735	-0.774

从全负荷运行或者部分负荷下稳态验证中,可以看出本研究建立的压气机特性曲线图模块比较精确,因而质量流量没有带来较大的误差。

3.2 小型燃气轮机的动态模拟

将环境温度在0~35℃之间变化,可见排烟质量流量如图4所示,排烟温度的变化如图5所示,图中横坐标均为环境温度。

当环境温度升高时,燃气轮机排烟质量流量下降,排烟温度升高情况如图4、图5所示。这是由于环境温度升高,压气机单位工质耗功增加,从而导致燃气轮机效率下降。

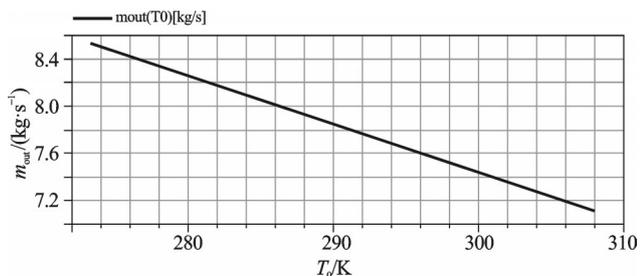


图4 排烟质量流量的变化

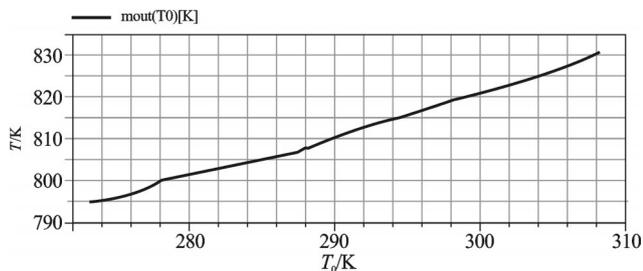


图5 排烟温度的变化

M7A-01小型燃气轮机在环境温度0~35℃之间变化时,全负荷稳态工况时,烟气质量流量平均误差为-0.005%,烟气温度平均误差在0.996%;部分负荷稳态工况下,烟气质量流量平均误差为-0.03%,烟气温度平均误差在0.11%左右。所以笔者可以确定小型燃气轮机模型是通用的,适用于不同功率小型燃气轮机的仿真。

4 结束语

根据模块化建模方式,本研究将小型燃气轮机划分为不同的组件,建立各部件的数学模型,基于非因果建模的可重用性及面向对象的Modelica语言,利用Dymola编译器建立了小型燃气轮机的通用模型库SmallGasTurbine。

结合两种型号小型燃气轮机基本参数,本研究搭建其模型框架,在设定发电功率的前提下,对小型燃气轮机进行稳态验证和动态模拟仿真,研究结果表明,模拟结果和厂家数据相比误差较小,证明了该模型库的准确性和可扩展性,具有一定的推广价值。

参考文献(References):

- [1] 孔祥强. 冷热电联供[M]. 北京:中国电力出版社,2011:43-44.
- [2] 杜建一,王云,徐建中. 分布式能源系统与微型燃气轮机的发展与应用[J]. 工程热物理学报,2004,25(5):786-788.

(下转第484页)

损伤经过风险评估后,各种损伤情况按风险高低排序,研究者在监督、运行和检修中就可以区别对待,突出重点,根据风险评估等级,采取不同预控措施,具体措施如表3所示。

表3 锅炉受热面管损伤风险等级表

风险分数值R	危险程度	风险等级
>0.32	高度危险,立即换管	一级(黑色)
0.08~0.32	显著危险,割管检查	二级(灰色)
0.02~0.08	一般危险,需要注意,可以继续使用	三级(白色)
<0.02	稍有危险,可以正常使用	四级(阴影)

4 结束语

本研究将风险评估应用于电站锅炉受热面管损伤评估中,提出并讨论了电站锅炉受热面管损伤状态风险评估基本方法和基本过程,分析了电站锅炉受热面现行检验标准存在问题,提出了电站锅炉受热面管风险评估的必要性和可行性。通过用风险评估方法对电站锅炉受热面管损伤潜在危险进行分析、评估、控制,可以根据具体情况做出科学的决策,有计划、有针对性、经济合理地进行预防和处理;结合电站锅炉受热面检验标准,讨论并确定了风险矩阵评估过程中概率标度和后果严重程度的赋值及量化取值范围;利用锅炉受热面管损伤风险评估方法,科学地反映了锅炉受热面损伤的风险等级,制定了不同预控措施,并为电站设备状态维修决策提供了依据。

参考文献(References):

- [1] 刘鸿国,洪道文,李耀君,等. 锅炉受热面风险维修技术的应用[J]. 浙江电力,2009(2):14-16.
- [2] 刘富君,孔 帅,凌张伟,等. 基于风险检验技术的电站锅

- 炉过热器评定方法[J]. 浙江大学学报:工学版,2011,45(10):1791-1798.
- [3] 张耀辉,郭金茂,徐宗昌,等. 基于故障风险的状态维修检测间隔期的确定[J]. 中国机械工程,2008,19(5):555-557.
- [4] 罗 云,樊运晓. 风险分析与安全评价[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
- [5] 李文沅. 电力系统风险评估模型、方法和应用[M]. 周家启,译. 北京:科学出版社,2006.
- [6] 刘富君,孔 帅,胡东明,等. 风险评估技术在我国的应用进展[J]. 无损检测,2009,31(12):953-958.
- [7] JOVANOVIĆ A. Risk-based inspection and maintenance in power and process plants in Europe[J]. **Nuclear Engineering and Design**,2003,226(2):165-182.
- [8] API. API Publication 581-2000 Risk-Based Inspection-Based Resource Document[S]. Washington DC,2000.
- [9] 国家质量监督检验检疫总局. 国家质量监督检验检疫总局关于开展基于风险的检验技术试点应用工作的通知[J]. 中国特种设备安全,2006,22(6):4-5.
- [10] 陆 东,牟善军. 欧洲设备风险检查技术发展及应用概况[J]. 安全、健康和环境,2004(1):36-39.
- [11] 陈学东,杨铁成,艾志斌,等. 基于风险的检测(RBI)在实践中若干问题讨论[J]. 压力容器,2005(7):36-44.
- [12] DESCHANELS H, ESCARAVAGE C, THIRY J M. Assessment of industrial components in high temperature plant using the ALIAS-HIDA-A case study[J]. **Engineering Failure Analysis**,2006(13):767-779.
- [13] 金承尧,赵建平. 基于RBI方法的在役安全阀风险评价技术研究[J]. 南京工业大学学报:自然科学版,2004,26(5):25-28.
- [14] 国家电网安监[2005]145号. 国家电网公司电力生产事故调查规程[S]. 北京:国家电网公司,2005.
- [15] 李 奇,李延渊,黄贤滨,等. 基于风险检测的风险评估方法[J]. 安全、健康和环境,2004(2):35-38.

[编辑:李 辉]

(上接第479页)

- [3] 奚 旺,刘永文,杜朝辉,等. Modelica/Dymola语言及其在燃气轮机动态仿真中的应[J]. 热力透平,2004,33(1):17-22.
- [4] HAUGWITZ S. Modelling of Microturbine Systems [D]. Sweden:Lund University,2002.
- [5] PÉREZ A A G. Modelling of a Gas Turbine with Modelica [D]. Sweden:Lund University,2001.
- [6] 奚 望,刘永文,杜朝辉,等. 基于Modelica语言的燃气涡轮建模及应用[J]. 动力工程,2004,24(1):41-44.
- [7] TUMMESCHIT H. Design and Implementation of Object-Oriented Model Libraries using Modelica[D]. Sweden:Lund University,2002.
- [8] 王松岭,张学镭,陈海平,等. 基于相似定律外推压气机通用特性曲线的方法[J]. 动力工程,2007,27(2):169-173.

- [9] 奚 旺. 航空发动机模块化建模与系统级仿真[D]. 上海:上海交通大学动力机械及工程学院,2004.
- [10] CASELLA F, LEVA A. Modelica Open Library for Power Plant Simulation: Design and Experimental Validation [Z]. Linköpings Universitet, Linköping, Sweden: The Modelica Association,2003.
- [11] KAWASAKI. GPB15/30 Series Gas Turbine Generator Specifications[M]. KAWASAKI,2011.
- [12] KAWASAKI. GPB60/70 Series Gas Turbine Generator Specifications[M]. KAWASAKI, 2011.
- [13] 李宇红. 不同运行方式下燃气轮机部分负荷性能的比较[J]. 燃气轮机技术,1999,12(1):28-34.

[编辑:李 辉]