

一种基于燃气轮机实时模型的硬件在回路平台集成与验证

沈立锐,胡忠志,房娟,郑前钢

(南京航空航天大学 能源与动力工程学院,江苏 南京 210016)

摘要:为了研究基于燃气轮机模型的先进控制算法和故障诊断技术,需要建立准确性和实时性更好的燃气轮机实时模型。采用基于模型的设计方法,在 Simulink 中建立燃气轮机分段线性化实时模型,通过代码生成技术和封装技术,将模型集成在南京航空航天大学航空发动机/燃气轮机全数字仿真平台和硬件在回路平台。在硬件在回路仿真试验中,燃气轮机实时模型与非线性模型的最大相对误差不超过 3%;单位步长内,实时模型在数字电子控制器中计算平均耗时为 0.126 ms,最大耗时为 0.131 ms,精确性和实时性均满足控制系统的要求。

关键词:燃气轮机;实时模型;全数字仿真平台;硬件在回路平台;集成验证

中图分类号:TK47;TP15

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2021.08.007

[引用本文格式]沈立锐,胡忠志,房娟,等.一种基于燃气轮机实时模型的硬件在回路平台集成与验证[J].热能动力工程,2021,36(8):42-47. SHEN Li-rui, HU Zhong-zhi, FANG Juan, et al. Integration and verification on hardware-in-the-loop platform based on gas turbine real-time model[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(8): 42-47.

Integration and Verification on Hardware-in-the-loop Platform based on Gas Turbine Real-time Model

SHEN Li-rui, HU Zhong-zhi, FANG Juan, ZHENG Qian-gang

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, China, Post Code: 210016)

Abstract: In order to develop the advanced control algorithms and fault diagnosis technologies based on the gas turbine model, it is necessary to establish a real-time model with higher accuracy and real-time performance. The model-based design method is used to construct the gas turbine piecewise linear model with Simulink, and by using the embedded code generator and encapsulation technologies, which is then integrated with the aeroengine and gas turbine full-digital simulation platforms and the hardware-in-the-loop platform at Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. In the hardware-in-the-loop simulation experiment, the maximum relative error of the gas turbine real-time model and nonlinear model is less than 3%, the average time consumption of the model in the digital electronic controller is 0.126 ms, and the maximum operating time is 0.131 ms, which meet the accuracy and real-time requirements of the control system.

Key words: gas turbine, real-time model, full-digital simulation platform, hardware-in-the-loop platform, integration and verification

引言

现代燃气轮机向着高可靠性、安全性和经济性

方向发展,使得控制系统愈发复杂,出现了许多先进的控制算法^[1]。

实时模型是燃气轮机实时仿真系统的重要组成部分

部分,也是一些先进控制算法、故障诊断、容错控制和健康管理的基础^[2]。实时模型能够以一定的精度实时地计算出燃气轮机工作包线内的稳态和动态特性。国内外学者对燃气轮机实时模型展开了广泛的研究,实时模型的建立方法主要包括:准部件模型法,通常是简化部件级模型(Component Level Model, CLM)非线性方程组,减少迭代以达到实时性和精确性要求^[3-5];模型辨识法,通过对燃气轮机试验数据辨识以获得实时模型的一种方法^[6];分段线性化法,对 CLM 线性化处理,并通过一定的调度机制建立分段线性化(Piecewise Linear Model, PLM)实时模型^[7-8]。

基于模型的设计(Model Based Design, MBD)能够缩短燃气轮机控制系统研发周期且降低成本^[9]。从国内外发表的文献来看,对于燃气轮机实时模型的研究鲜有从系统工程“V”字流程的角度按照 MBD 方法对所设计的实时模型进行软硬件平台集成及开环和闭环验证。因此,研发人员很难将设计的控制系统软件快速移植到真实的控制器中,并进行集成和验证(Integration and Verification, I&V)。

目前,我国在燃气分布式能源领域虽处于起步阶段但市场发展空间巨大^[10]。为研究燃气轮机配套控制系统和全生命周期健康管理系统开发方案,基于 MBD 的方法建立燃气轮机 40% ~ 100% 负载实时模型,并设计了转速负荷串级 PI 控制器,分别在全数字仿真平台(简称 FWORKS 平台)和硬件在回路平台(简称 HIL 平台)中进行了开环和闭环仿真试验,为下一步工作奠定了基础。

1 燃气轮机线性化模型

1.1 燃气轮机部件级模型

燃气轮机 CLM 是依据气体热力学和转子动力学所建立的动态模型,动态仿真结果能够准确地反映燃气轮机真实的运行规律^[11]。一般通过求解非线性方程组(1),和表征了燃气轮机低压、高压和动涡转轴的动态特性的方程组^[12](2)来实现建模,见以下方程组:

$$\begin{cases} (W_{C2} - W_{C24map})/W_{C2} = \varepsilon_1 \\ (W_{C25} - W_{C3map})/W_{C25} = \varepsilon_2 \\ (W_{C41} - W_{C43map})/W_{C41} = \varepsilon_3 \\ (W_{C45} - W_{C47map})/W_{C45} = \varepsilon_4 \\ (W_{C48} - W_{C5map})/W_{C48} = \varepsilon_5 \\ (W_{C6} - W_{C8Q})/W_{C6} = \varepsilon_6 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{dN_L}{dt} = \left(\frac{30}{\pi}\right)^2 \frac{1}{J_L} \frac{1}{N_L} [P_{LPT} - P_{LPC}] \\ \frac{dN_H}{dt} = \left(\frac{30}{\pi}\right)^2 \frac{1}{J_H} \frac{1}{N_H} [P_{HPT} - P_{HPC}] \\ \frac{dN_P}{dt} = \left(\frac{30}{\pi}\right)^2 \frac{1}{J_P} \frac{1}{N_P} [P_{PT} - P_{LOAD}] \end{cases} \quad (2)$$

式中: ε_i ($i = 1, 2, \dots, 6$) — 压气机、涡轮等部件进出口流量偏差,表征了燃气轮机各部件的流量平衡; N —转速, P —功率, J —转轴转动惯量, W —质量流量,下标 L—低压转轴, H—高压转轴, P—动力涡轮转轴。

燃气轮机 CLM 各部件包含有复杂的热力学方程,为了保证求解精度,CLM 求解器在一个步长内可进行多次迭代,但在实际的系统中实时性难以保证。

1.2 燃气轮机分段线性化实时模型

从建立的 CLM 出发,针对 100% 负荷进行小扰动,得到一组 A 、 B 、 C 、 D 参数作为初猜,然后与 PLM 输出进行拟合计算,大大提高了线性化模型的精度。

1.2.1 燃气轮机线性化方法

燃气轮机的部件级模型方程表达为:

$$\begin{cases} \dot{X} = f(X, U) + h(W) \\ Y = g(X, U) \end{cases} \quad (3)$$

式中: X —状态变量; Y —输出变量; U —控制变量; W —外部干扰量。在燃气轮机稳态工作点(X_0, U_0, P_0)处泰勒公式展开略去二阶以上无穷小量^[13],且不考虑干扰项得到:

$$\begin{cases} \Delta \dot{X} = A \Delta X + B \Delta U \\ \Delta Y = C \Delta X + D \Delta U \end{cases} \quad (4)$$

由于三轴燃气轮机中动力涡轮转速变化对燃气发生器的影响较小,可以在动态仿真中略去^[14]。从控制器的需求出发,本文只研究了高低压转轴的惯性环节。

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} \Delta \dot{N}_L \\ \Delta \dot{N}_H \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta N_L \\ \Delta N_H \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} \Delta W_f \\ \begin{pmatrix} \Delta N_L \\ \Delta N_H \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta N_L \\ \Delta N_H \end{pmatrix} \end{cases} \quad (5)$$

对状态量扰动,以求得 A 矩阵元素;对控制量进行扰动,以求得 B 矩阵元素。通过拟合算法计算

后,得到最终的燃气轮机状态空间方程参数 A 、 B 、 C 、 D 。

1.2.2 实时模型的调度

对线性化模型调度的主要问题是如何寻找当前状态的最近稳态点。假设发动机状态可由状态量唯一确定,引入辅助向量 Z ,插值调度参数 η 和与 Z 垂直的 η 线簇,如图 1 所示。

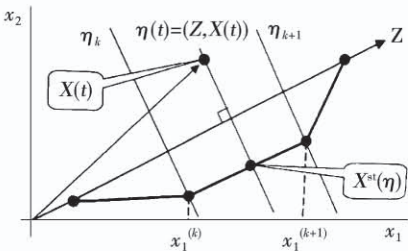


图 1 调度参数 η 与 η 线簇

Fig. 1 Scheduling the parameter η and line cluster η

可以看出, Z 向量连接了燃气轮机稳态线的起点和终点, η 为过当前时刻状态点 $X(t)$ 且垂直于 Z 的线,与稳态工作线相交 $X^{st}(\eta)$, η 计算式^[14]为:

$$\eta(t) = (Z, X(t)) = (x_{1N} - x_1)x_1(t) + (x_{2N} - x_2)x_2(t) \tag{6}$$

以 η 作为参数,对线性化模型进行调度的基本原理如图 2 所示。

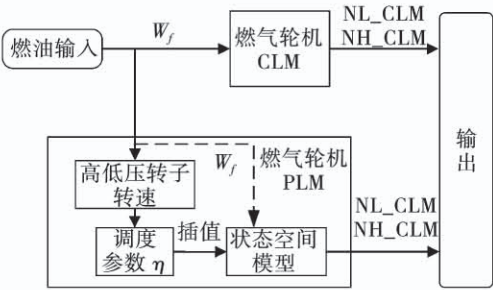


图 2 η 调度线性化模型原理

Fig. 2 Linear model principle of scheduling parameter η

在 40% ~ 100% 负载之间划分了 26 个稳态工作点,为了保证实时模型的精确性,划分时依据 CLM 稳态点处线性度酌情选取。

2 实时模型的 FWORKS 集成与验证

2.1 实时模型集成验证流程及 FWORKS 平台

实时模型的集成验证包含两部分:开环验证和

闭环验证。根据系统工程“V”字流程总结了实时模型的设计、集成及验证的流程,如图 3 所示。

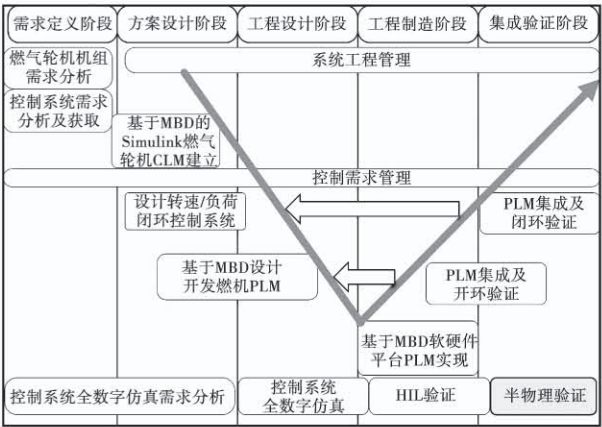


图 3 实时模型集成验证流程

Fig. 3 Integration and verification process of real-time model

FWORKS 平台是航空发动机/燃气轮机控制系统协同设计开发平台,它为用户提供了完整的数字化仿真基础,基本框架如图 4 所示。

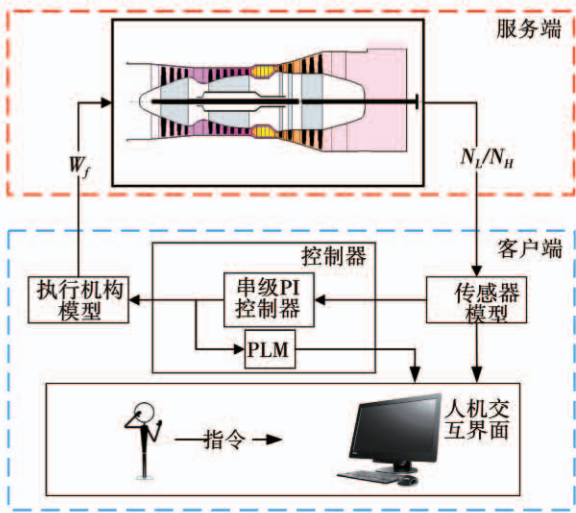


图 4 FWORKS 平台基本架构

Fig. 4 FWORKS platform basic structure

基于 Simulink 建立的燃气轮机 CLM 和 PLM,若需要在 FWORKS 上运行则先将模型转化为 C/C++ 代码,然后进行封装。采用 MBD 方法建立的燃气轮机模型和控制律,可以方便代码生成并封装在 FWORKS 的服务端,在需要使用时则通过客户端发送指令,调用 dll 模型文件,实现调用。

2.2 实时模型的 FWORKS 开环验证

根据图 4 的结构,将 CLM 和 PLM 分别集成至 FWORKS 服务端和客户端,将串级 PI 控制器替换为一组测试用例,即给定燃油 W_f 和外部负载。

在 FWORKS 仿真平台中高低压转子转速仿真如图 5 所示。可以看出,低压转速相对误差不超过 0.4%,高压转速相对误差不超过 0.2%。

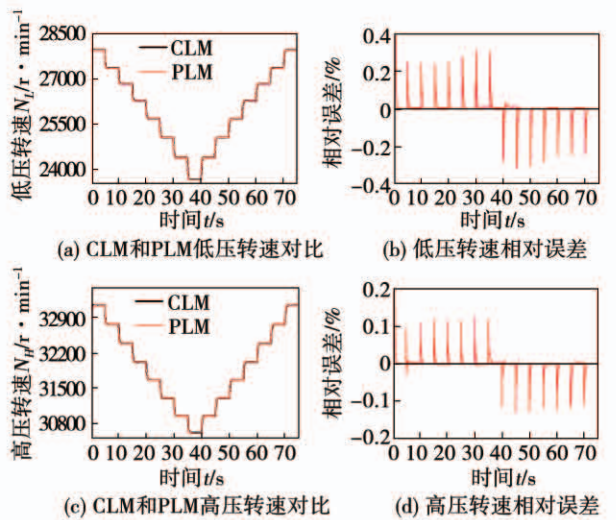


图 5 FWORKS 平台实时模型开环集成验证

Fig.5 Open-loop integration and verification of real-time model on FWORKS platform

2.3 实时模型的 FWORKS 闭环验证

燃气轮机转速负荷串级 PI 控制方案具有抗干扰能力强、动态品质良好和响应快等优点^[15]。该型燃气轮机串级转速负荷稳态控制器基本框架如图 6 所示。

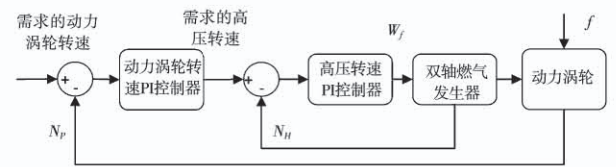


图 6 燃气轮机转速负荷串级控制器框架

Fig.6 Gas turbine speed/load cascade PI control structure

针对设计的 26 组线性化模型,分别对控制器的 K_p 、 K_i 参数进行整定。选取带宽为 1 Hz,相位裕度为 75°。将 PI 控制器和 PLM 集成至控制器内,将 PI 控制器的 W_f 输出传递给 CLM 和 PLM。运行结果如

图 7 所示。

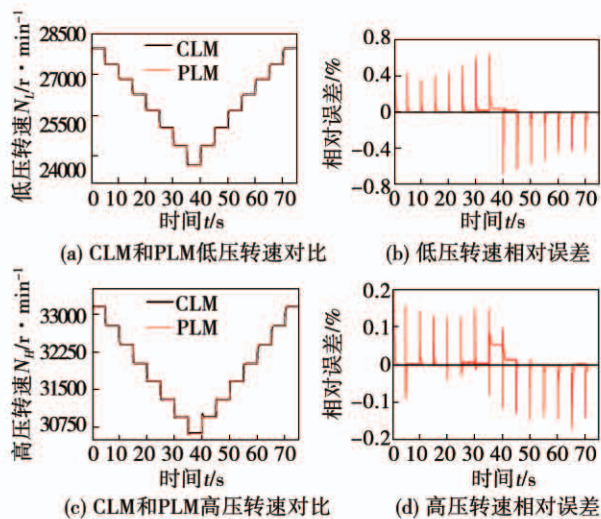


图 7 FWORKS 平台实时模型闭环集成验证

Fig.7 Closed-loop integration and verification of real-time model on FWORKS platform

从图 7 可以看出,在 FWORKS 闭环仿真过程中,控制器能够输出对应的稳定的燃油量,低压转速最大相对误差不超过 0.8%,高压转速最大相对误差不超过 0.2%。

3 实时模型的 HIL 平台集成与验证

3.1 HIL 平台

HIL 平台是一个航空发动机/燃气轮机硬件在回路仿真平台,能够对设计的模型控制律、切换逻辑、故障诊断和容错控制算法等进行全面的验证。HIL 平台仿真流程如图 8 所示。

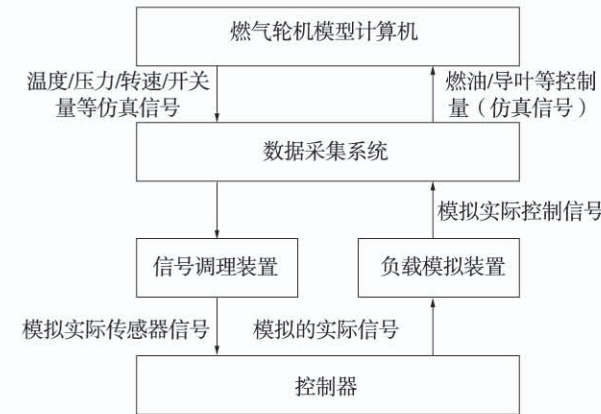


图 8 HIL 仿真流程图

Fig.8 HIL simulation flowchart

HIL 仿真主要由 5 部分组成,其中燃气轮机模型仿真计算出燃机不同工况下转速、温度和压力等信号,通过数据采集系统以线缆方式直接传递到信号调理装置,将仿真信号转换为实际传感器信号,控制器接收这些传感器信号后由控制算法计算出需求的燃油流量 W_f ,从控制器产生的信号驱动负载模拟装置,由数据采集系统返回至燃气轮机模型计算机进行仿真计算,完成闭环仿真。

为进一步验证设计的实时模型在实时仿真系统中的精确性和实时性,将图 4 中的控制器换为真实的物理部件,并将所设计的稳态控制器以及 PLM 同时集成到控制器中,并检验其精确性和实时性。

3.2 实时模型的 HIL 开环验证

FWORKS 平台搭载了 Intel i5 处理器,主频为 2.5 GHz,而 HIL 平台中该型控制器 CPU 的主频仅为 100 MHz,根据 FWORKS 开/闭环仿真的设计思路将封装好的 PLM 和 PI 控制算法集成到硬件平台中,仿真结果如图 9 所示。

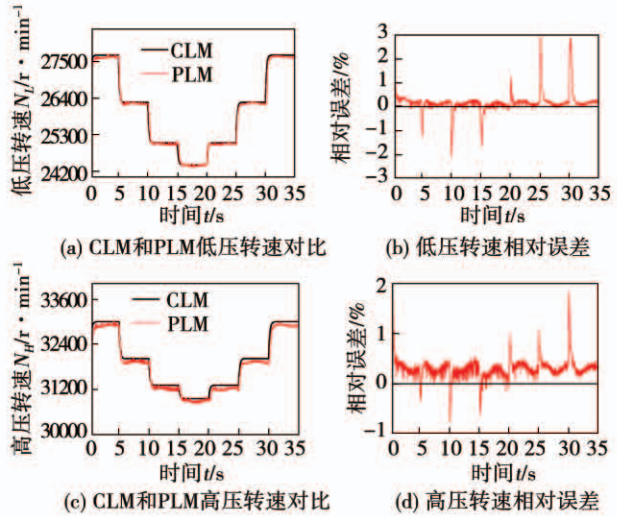


图 9 HIL 平台实时模型开环集成验证
Fig.9 Open-loop integration and verification of real-time model on HIL platform

在 HIL 开环仿真中,PLM 低压转速响应与 CLM 重合度较好,其最大相对误差不超过 2%,高压转速存在一定的稳态误差,但动态过程最大相对误差也不超过 3%。

3.3 实时模型的 HIL 闭环验证

HIL 平台中对于实时模型的闭环集成验证要求

更高,因为控制器在控制步长内既要完成控制任务又要完成实时模型的计算。HIL 平台中发动机模型运行周期为 20 ms,数字电子控制器控制周期为 5 ms,且控制器为硬件延迟预留了 2 ms,所以设计的控制律必须能够在 3 ms 内完成一次计算。HIL 闭环仿真结果如图 10 所示。

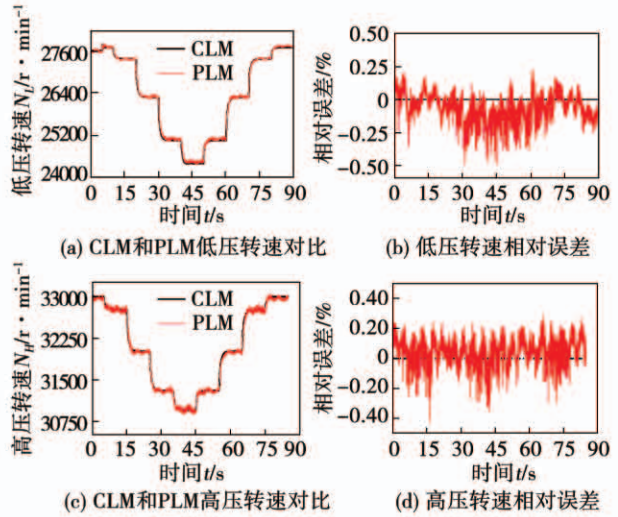


图 10 HIL 平台实时模型闭环集成验证
Fig.10 Closed-loop integration and verification of real-time model on HIL platform

从图 10 可以看出,在控制器一次运行周期内,数字电子控制器完成了一次控制和 PLM 的计算,其中高低压转速最大相对误差均不超过 0.4%。满足实时性和准确性要求。

实时模型闭环仿真时,对数字电子控制器每个单位步长内调用控制算法所消耗的时间进行统计,结果如图 11 所示。

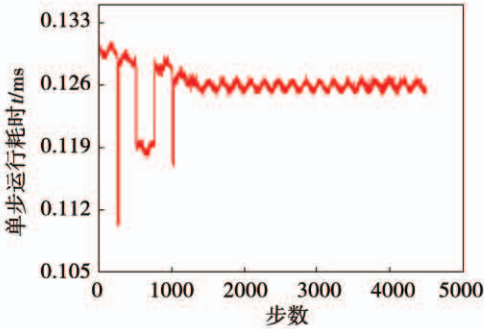


图 11 单位步长内算法运行时间
Fig.11 Algorithm operation time in unit step

在单个步长内算法耗时最长为 0.131 ms,算法平均耗时为 0.126 ms,满足实时模型的实时性要求。

4 结 论

结合小扰动和拟合法建立线性化模型,提出了一种以 η 作为参数调度的燃气轮机线性化模型的方法,采用 MBD 方法建立了燃气轮机分段线性化实时模型。按照“V”字流程对所设计的实时模型在 FWORKS 平台和 HIL 平台上进行集成和验证。结论为:

(1) 在 FWORKS 平台,燃气轮机 PLM 开环和闭环仿真中,PLM 最大相对误差 0.8%,满足实时模型精确性要求。

(2) 在 HIL 平台,PLM 的开环仿真最大相对误差不超过 3%,闭环仿真最大相对误差不超过 0.4%,满足实时模型精确性要求。

(3) 在一个控制周期内,HIL 平台中的数字电子控制器完成一次控制和实时模型的计算平均耗时为 0.126 ms,最大不超过 0.131 ms,满足实时模型的实时性要求。

基于 MBD 设计的燃气轮机 PLM,可快速从全数字仿真应用到硬件在回路仿真平台中。并且经过 FWORKS 和 HIL 平台的全面集成验证,证明了所设计的 PLM 满足控制系统实时性和精确性要求,为进一步研究基于燃气轮机模型的先进控制算法和故障诊断技术研究奠定了基础。

参考文献:

- [1] 王 威. 航空发动机控制系统仿真技术研究[D]. 西安:西北工业大学,2006.
WANG Wei. Research on simulation technology of aeroengine control system[D]. Xi'an: NPU,2006.
- [2] INTERNATIONAL S. Real-time modeling methods for gas turbine engine performance[J].
- [3] 苏 明,翁史烈,张伯年. 船用三轴燃气轮机动态过程实时仿真的数学模型[J]. 上海交通大学学报,1990(3):4-11.
SU Ming,WENG Shi-lie,ZHANG Bo-nian. Mathematical model of real-time real simulation of marine three-axis gas turbine dynamic process[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University,1990(3):4-11.
- [4] 王雪瑜,朱行健. 局部相似理论在双轴燃气轮机实时建模中的

应用[J]. 航空动力学报,1990(2):159-162.

WANG Xue-yu,ZHU Xing-jian. Application of local similarity theory in real-time modeling of twin-shaft gas turbines[J]. Journal of Aerospace Power,1990(2):159-162.

- [5] 赵 巍,苏 明. 高精度燃气轮机控制器在回路的仿真研究[J]. 动力工程学报,2009,29(2):145-149.
ZHAO Wei,SU Ming. Simulation study of high precision gas turbine controller in loop[J]. Journal of Power Engineering,2009,29(2):145-149.
- [6] 殷 锴,周文祥,乔 坤,等. 航空发动机部件级模型实时性提高方法研究[J]. 推进技术,2017,38(1):199-206.
YIN Kai,ZHOU Wen-xiang,QIAO Kun,et al. Research on real-time improvement method of aero-engine component level model[J]. Journal of Propulsion Technology,2017,38(1):199-206.
- [7] 王 斌,王 曦,石玉麟,等. 一种航空发动机的分段实时线性动态模型[J]. 航空动力学报,2014,29(3):696-701.
WANG Bin,WANG Xi,SHI Yu-lin,et al. A piecewise real-time linear dynamic model of aeroengine[J]. Journal of Aerospace Power,2014,29(3):696-701.
- [8] 蒲星星,刘尚明,周 媛,等. 重型燃气轮机分段线性化模型的建立[J]. 热力透平,2010,39(4):221-225.
PU Xing-xing,LIU Shang-ming,ZHOU Yuan,et al. Establishment of piecewise linearization state space model for heavy duty gas turbines[J]. Thermal Turbine,2010,39(4):221-225.
- [9] 周文祥,黄金泉,窦建平,等. 面向对象的涡扇发动机及控制系统仿真平台[J]. 航空动力学报,2007,22(1):119-125.
ZHOU Wen-xiang,HUANG Jin-quan,DOU Jian-ping,et al. Object-oriented turbofan engine and control system simulation platform[J]. Journal of Aerospace Power,2007,22(1):119-125.
- [10] 钟 妍. 分布式能源市场需求及发展前景分析[J]. 广西电力,2013(10):70-70.
ZHONG Yan. Analysis of demand and development prospects of distributed energy markets[J]. Guangxi Electric Power Industry,2013(10):70-70.
- [11] 郑卫东,王培红. 双轴燃气轮机高精度建模方法研究[J]. 热能动力工程,2016,31(12):19-24.
ZHENG Wei-dong,WANG Pei-hong. Research on high precision modeling method of biaxial gas turbines[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2016,31(12):19-24.
- [12] 张亚东,姜里运,宋少华,等. 三轴燃气轮机发电机组突变负载控制策略研究[J]. 热能动力工程,2016,31(11):26-31.
ZHANG Ya-dong,JIANG Li-yun,SONG Shao-hua,et al. Study on abrupt load control strategy of three-axis gas turbine generator sets[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2016,31(11):26-31.