

# 某间冷燃气轮机台架试验控制系统总体设计方案研究

刘 凯

(中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

**摘要:** 为了研究某间冷燃气轮机的性能, 需要研制 1 套控制系统完成燃气轮机在台架上的试车验证, 并视情对燃气轮机的控制规律及参数进行修改。介绍了某间冷燃气轮机台架试验控制系统总体设计方案, 详细地阐述该系统的组成、功能实现方案及控制逻辑、对燃气轮机的安全保护及数据监控等方面。描述了此系统的“六性”设计准则、研制风险、关键技术等。研究结果表明, 该间冷燃气轮机控制系统的特点结构简单、原理合理、功能完善、技术成熟、工作安全可靠, 证明该系统总体设计方案可行。

**关键词:** 间冷燃气轮机; 控制系统; 设计方案; 航空发动机

中图分类号: V323

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2017.05.009

## Research on Overall Design Scheme of Control System of Test Bed Experimental for a Intercooled Gas Turbine

LIU Kai

(AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

**Abstract:** In order to investigate a intercooled gas turbine performance, a control system was developed to complete experimental validation of gas turbine on the test, and the system control law and main parameters could be modified according to working condition. The overall control design scheme of the test bed was introduced for a intercooled gas turbine, and system components, realization scheme, control logic, safety protect and data controlling of gas turbine control function are expatiated. Moreover, the six performance design, the development risk and the main technology are also expatiated. The results show that the control system of the intercooled gas turbine has the characteristic of simple structure, reasonable principle, general function, mature technology, working safety and feasible system plan.

**Key words:** intercooled gas turbine; control system; design scheme; aeroengine

## 0 引言

某航改间冷燃气轮机是国内首台间冷型燃气轮机, 是中国在某简单循环航改燃气轮机的基础上, 开发的大功率舰用间冷燃气轮机。为验证其性能, 需研制 1 套控制系统对台架上的燃气轮机进行试车验证, 并视情对燃气轮机的控制规律及参数进行修改。

国外有大功率舰用间冷燃气轮机, 但由于技术保护等原因, 只能接触有限的外围技术, 而对间冷燃气轮机控制系统、控制规律及控制关键参数等从来没有相关介绍。国内之前对简单循环的燃气

轮机控制系统有一定的研制经验, 而对间冷燃气轮机控制的相关研究一直处于原理及部件试验状态, 从未进行试车验证。从控制角度上看其与简单循环燃气轮机主要区别是增加了燃气轮机间冷系统。本文研究的控制系统设计方案的主导思想是从最大限度满足间冷燃气轮机的使用要求出发, 并考虑设计周期及成熟度, 满足间冷燃气轮机演示验证试验时台架调试要求。

本文介绍了某间冷燃气轮机台架试验控制系统总体设计方案, 对燃气轮机控制系统的组成、功能实现方案及控制逻辑、燃气轮机的安全保护、数据监控等方面进行了较为详细的阐述。对燃气轮机控制系统

收稿日期: 2017-03-29 基金项目: 燃气轮机研究项目资助

作者简介: 刘凯(1974) 男, 高级工程师, 从事航空发动机和燃气轮机控制系统设计工作, E-mail: 18642093785@163.com。

引用格式: 刘凯. 某间冷燃气轮机台架试验控制系统总体设计方案研究[J]. 航空发动机, 2017, 43(5): 48-53. LIU Kai. Research on overall design scheme of control system of test bed experimental for a intercooled gas turbine[J]. Aeroengine, 2017, 43(5): 48-53.

的“六性”设计准则、研制风险、关键技术等也进行了初步描述。

1 控制系统总体方案

1.1 设计思想

在方案设计中,从最大限度满足间冷燃气轮机的使用要求出发,并考虑设计周期及成熟度,突出以下设计思想 (1) 继承以往燃气轮机控制系统的方案和部件方案,提高技术成熟度 (2) 间冷系统控制部分单独可调,提高控制系统的灵活性 (3) 充分消化和吸收间冷系统资料,提高控制系统的可靠性和可实现性。

1.2 方案概述

某间冷燃气轮机控制系统由电子控制柜、控制软件、监控系统、起动系统、燃油系统、传感器和电气系统等组成,控制原理如图 1 所示,其中间冷系统控制原理如图 2 所示。

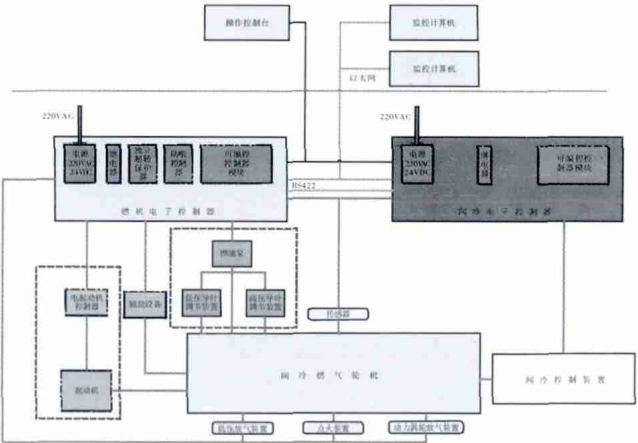


图 1 间冷燃气轮机控制系统原理

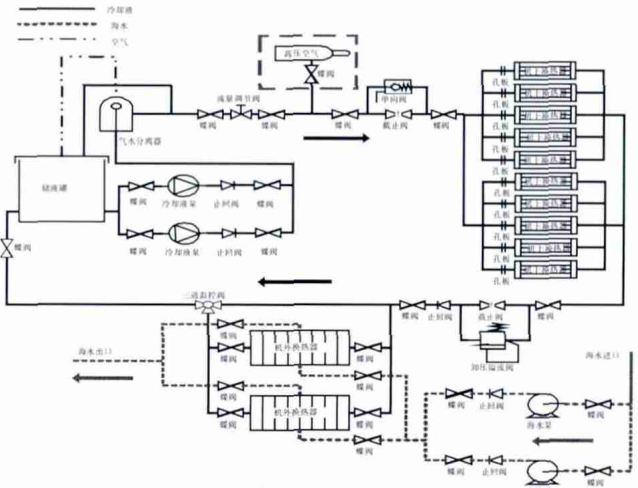


图 2 间冷系统控制原理

从图中可见,电子控制柜通过传感器、开关量及通讯数据接收燃气轮机状态信息及指令,由电子控制柜(含控制软件)按照燃气轮机调节计划、控制规律和控制模式计算出所需的主燃油流量、压气机可调叶片角度以及相应的电磁阀等开关量信号。电子控制柜输出信号到燃油调节装置、导叶调节装置,给出燃气轮机状态的主燃油流量、压气机导叶角度,同时通过位移传感器将信号反馈到电子控制器,构成闭环控制。

控制系统采用单通道、重要参数双余度的全权限数字电子控制形式。该系统包括 2 个电子控制器(燃气轮机控制器和间冷控制器),每个电子控制器各有 1 个 CPU。燃气轮机控制器实现燃气轮机除间冷系统以外全部控制和参数限制的功能,间冷控制器实现间冷系统的控制功能和参数监控(包括机间冷器进口温度控制和机外间冷系统控制)。2 个控制器之间通过 RS422 总线及以太网总线交换信息。重要的控制回路采用双线圈的双电液伺服阀,传感器采用双余度。

(1)控制系统通过控制线路和以太网总线接收来自监控台的操作命令,对燃气轮机的起动、加速、减速、稳态工况运行以及停车和重要参数限制实施全面的自动控制和保护,能实现对燃气轮机辅助系统的监测和控制,能实现对燃气轮机的故障诊断和重要参数的记录、存储和通讯。

(2)燃油系统主要由高压齿轮泵、高压油滤、燃油控制装置、低导控制装置、高导控制装置、停车开关、燃油分配装置组成,为燃烧室提供计燃油并控制高、低压气机可调导叶角度。燃油系统如图 3 所示。

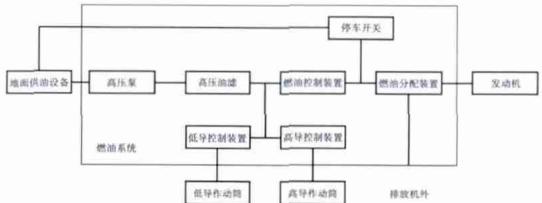


图 3 燃油系统

起动系统采用电起动方案,电起动机系统由电机、电机控制器、膜片联轴器和电源控制盒组成,完成发动机的起动功能的要求,电起动机系统原理如图 4 所示。

1.3 控制功能实现方案

间冷燃气轮机控制系统需要实现油封、启封、冷吹、清洗和假开车功能、起动控制、压气机叶片角控

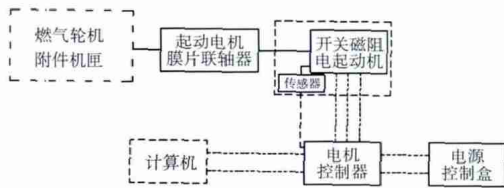


图 4 电起动机系统原理

制、放气控制、燃油流量控制、转速闭环控制、间冷系统控制、停车控制、消喘控制、安全保护、数据监控等控制功能,其控制功能实现方案如下:

### 1.3.1 油封、启封、冷吹、清洗和假开车功能控制方案

油封、启封、冷吹、清洗和假开车等由起动机带动压气机转子转动,燃气轮机不点火、不供油。

### 1.3.2 起动控制方案

起动过程由起动机带动压气机转子转动,按  $W_f=f(N_{2r25})$  起动供油规律向燃烧室供油;当  $N_{2r25}$  达到“设定点火转速”时进行点火,点火持续“设定点火时间”后停止点火;当  $N_2$  达到“设定脱开转速”时,起动机脱开;当  $N_{2r25}$  达到慢车转速,完成起动控制。在起动过程中,根据需要对高、低压压气机叶片角进行控制,对低压压气机出口进行放气,并对滑油系统进行控制。

### 1.3.3 点火系统方案

点火系统采用高能点火方案,由电子控制柜提供工作电源。在燃气轮机起动过程,当  $N_{2r25}$  达到“设定点火转速”时进行点火,电子控制柜通过开关量输出,提供点火系统工作电源,点火系统开始工作。点火系统共 2 套并联工作,主要包括点火装置、点火电缆、点火电嘴。

### 1.3.4 放气控制

某间冷燃气轮机在低压压气机出口及动力涡轮过渡段上有高温大流量燃气阀安装于燃气轮机机匣安装座上。放气系统主要由控制阀、放气阀和地面供气设备组成。

### 1.3.5 压气机叶片角控制

燃气轮机按确定的控制规律调节压气机可调叶片角度,保证燃气发生器稳定工作,不发生喘振。根据燃气发生器转速和进口温度的变化规律给出导叶给定值,由电子控制柜通过控制射流管式电液伺服阀(电气双余度)对压气机叶片角控制作动筒进行位置闭环控制。导叶控制逻辑图如图 5 所示。

### 1.3.6 燃油流量控制

由燃气轮机带动齿轮泵提供高压油源。压差活门保证计量活门前后的压差恒定,使供油流量与计量活

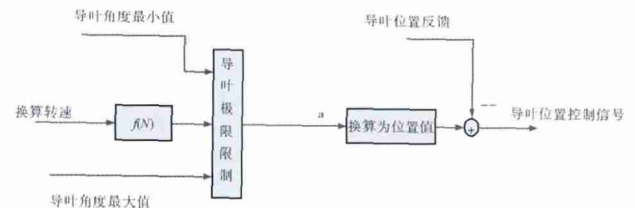


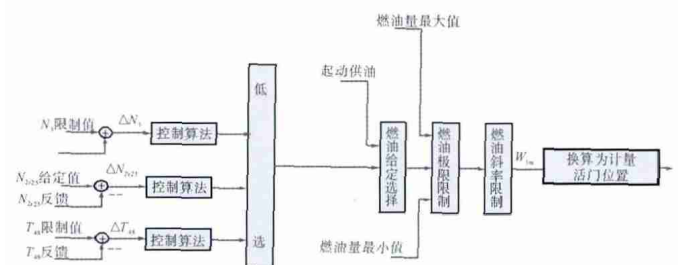
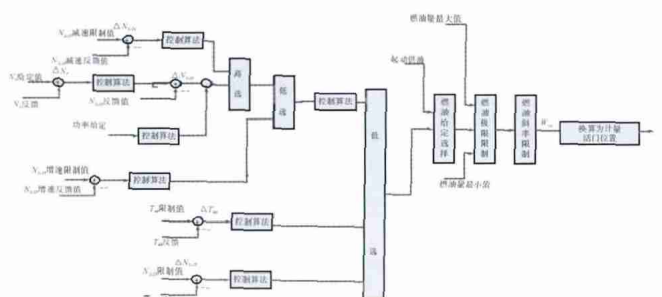
图 5 导叶控制逻辑

门的窗口开度成正比,通过对计量活门的位置控制实现对燃油流量的控制,计量活门的位置用伺服电机进行控制。电子控制柜计算出给定燃油流量,通过对伺服电机的控制实现对计量活门的位置闭环控制,进而实现对燃油流量的控制。

### 1.3.7 转速闭环控制

燃气轮机进入慢车闭环后采用  $N_{2r25}$  转速闭环控制,在慢车以上到达一定转速转为  $N_3$  控制。在燃气轮机起动前,控制软件应能根据需要进行配置,选择燃气轮机控制模式。可选控制模式:  $N_{2r25}$  转速闭环控制;  $N_3$  转速闭环控制。  $N_{2r25}$  闭环控制逻辑如图 6 所示,  $N_3$  闭环控制逻辑如图 7 所示。

动力涡轮带动大惯性负载,在转速  $N_3$  变化的反应比对供油量变化的反应慢,为避免出现大的转速超调,在  $N_3$  转速控制模块中应引入负载工况变化的信

图 6  $N_{2r25}$  闭环控制逻辑图 7  $N_3$  闭环控制逻辑



号,在变化时,根据其变化率提早改变进入燃气轮机的供油量,减少转速超调和过渡过程的时间。当负载不变化时,此路补偿信号为零。在加减载过程中,软件根据负载的变化率直接修正供油给定。

### 1.3.8 间冷系统控制

电子控制器根据燃气轮机工况对应的低压压气机出口到高压压气机进口空气的温度规律,通过控制流量调节阀的开度控制进入机上换热器的冷却剂流量从而控制低压压气机出口到高压压气机进口空气的温度,同时通过温度传感器采集实际温度信号,构成温度闭环控制,间冷系统控制逻辑如图8所示。

### 1.3.9 停车控制

停车控制分为正常停车、紧急停车、终止起动。

#### (1)正常停车控制

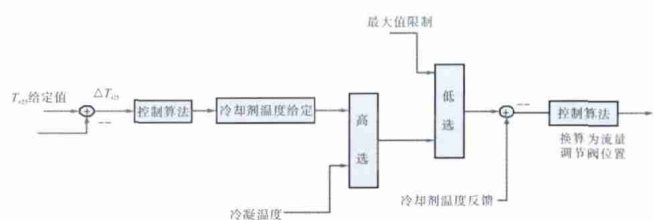


图8 间冷系统控制逻辑

接收到正常停车信号后,退出 $N_3$ 转速闭环控制,以不大于“设定减速速率”,把 $N_{2r25}$ 转速减到慢车转速。在慢车状态燃气轮机冷机3 min。在冷机过程中有“起动按钮”输入则终止正常停车控制。冷机完成后,燃油流量控制到最小位置,停车开关断电,将计量后的燃油切换到低压回油,此时燃油分配活门关闭切断燃气轮机供油,主、副燃油总管中的燃油通过停车放油活门排放到机外。正常停车后进行5 min冷运转。

#### (2)紧急停车控制

收到紧急停车指令或报警信号后,停车开关断电,主、副燃油总管中的燃油通过停车放油活门排放到机外。控制供油到最小位置(若在起动过程,关闭点火器、关闭起动机)。当 $N_2 \leq 500$  r/min时,如无紧急停车信号及故障信息,转为待机状态,否则保持紧急停车状态,显示不许起动。

#### (3)终止起动控制

接收到终止起动的信号后,控制供油到最小位置、关闭点火系统、断开起动机。待接收复位信号后,转为待机状态,否则保持紧急停车状态,不许起动。

### 1.3.10 消喘控制

当燃气轮机由于意外进入喘振时,喘振压差传感器感受到高压压气机后压力脉动,并通过喘振信号解调器对信号进行整理判断,确认燃气轮机喘振后通过开关量信号通知电子控制柜。电子控制柜收到喘振信号后通过调整压气机叶片角度、切断燃油供给、低压压气机出口及动力涡轮前放气等方法使燃气轮机消喘,在消喘过程中还要进行点火以防止发动机熄火。

### 1.3.11 安全保护

系统的故障可分为控制器故障、传感器故障、执行机构故障、燃气轮机故障等几类。对不同的故障根据其对于燃气轮机安全的影响,采取不同的处理措施。

故障可分为I级报警(告警)、II级报警(燃气轮机降至慢车)、III级报警(紧急停车)等措施。

### 1.3.12 数据监控

监控软件对控制器上传的数据进行显示、判断、储存等处理。通过软件可对燃气轮机的工作状态进行控制,对各监测的系统采用图文动画显示。根据故障信息通过信号灯或其他方式显示故障位置。

## 2 系统六性设计

### 2.1 可靠性设计

(1)关键部件采用余度设计;

(2)满足设计要求的条件下,贯彻简化优化设计的原则,尽量减少零部件(元器件)的数量和种类。

### 2.2 测试性设计

发动机在停车状态情况下,给控制系统上电,通过控制器自检测开关控制,进行系统的自检测。自检状态结束后,可通过通讯接口与外围设备进行通讯。

### 2.3 安全性设计

(1)对故障进行检测、管理和自动报警;

(2)具有容错功能;

(3)控制系统的设计和构造保证不会由于控制系统的单个失效或故障,或可能发生的组合故障,而导致燃气轮机不安全状态的发生;

### 2.4 维修性设计

根据指标要求,开展控制系统的维修性设计工作,并遵守如下设计准则:

(1)所有电气接头和管接头均应有明显的规定记号,管接头的数量应最少,电气接头应有防错设计;

(2)传感器的安装方式要简便,容易标定;

(3)系统各部件、模块应具有互换性,任何组件、部件、模块更换时应考虑方便、省时和快捷;

## 2.5 综合保障性设计

数控系统在设计中需满足如下保障性设计要求:

(1)实行通用化、系列化、组合化;

(2)设计要考虑尽可能降低对使用和维修人员及技术等的需求;

(3)在设计中考虑系统配套综合保障设备的设计与使用。

## 2.6 环境适应性设计

(1)燃油系统设计满足要求,当温度低时要求选用满足相应温度的燃油;

(2)电子控制模块工作可以满足  $0\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$  工作,可以满足架台式车需求,电控系统其他附件满足环境要求。

## 3 风险分析

由于此项目研制周期较短,燃气轮机对控制系统的技术指标要求与以往燃气轮机项目新增很多技术要求,一些关键技术还需要解决,这些都为控制系统的研制带来一定的风险。针对控制系统的研制中存在的风险进行分析,以期在今后的研制过程中,相应地加强技术攻关力度,将系统风险降到最低。

### 3.1 系统研制风险

结合系统方案分析和关键技术的识别,风险在数控系统研制中主要与以下几个方面关联:

#### (1)燃气轮机数学模型

主机无法提供燃气轮机数学模型和必要的数据,造成数学模型与燃气轮机特性不一致,仿真验证效果与真实试车存在一定的差距,数控系统的设计和验证存在一定风险。

#### (2)需求的不确定性

燃气轮机对控制系统的部分技术要求没有明确,部分技术要求尚在待定中,在项目研制过程中,需求的更改可能对系统研制造成一定的影响。

### 3.2 研制风险分析

#### (1)燃气轮机数学模型

加强与总体部门沟通和协调,让其提供数学模型或提供真实必要的数据进行修模,保证半物理仿真和真实试车的一致性;

#### (2)对于需求的不确定性问题

积极与总体部门沟通与协调,尽快消除需求的不确定性;

## 3.3 风险分析结论

综合以上分析,控制系统的研制风险是可控的。

## 4 关键技术及解决途径

为满足某间冷燃气轮机对控制系统的要求,在进行控制系统的设计时,应着重解决好关键技术——间冷控制。

对于间冷控制关键技术,可以通过与国内各相关单位的合作,攻克研制过程中的难题。

## 5 可行性分析

在控制系统中大部分附件为其他型号燃气轮机及航空发动机控制系统使用的附件或在其基础上改进的附件,有很好的技术基础。间冷系统控制部分为新研部件,经前期试验验证,其控制特性满足总体要求。

对于燃气轮机慢车以上的状态,经采用 MATLAB 进行数值仿真,其控制规律及控制特性满足总体要求;对于慢车及以下特性,由于缺乏相应发动机数学模型,因此,未对其进行仿真,结合其他型号研制经验分析,认为其特性可以满足总体要求。

## 6 结束语

燃气轮机数控系统经过几十年的研发,已取得了一定的成果,该方案尽量继承燃气轮机数控系统的成熟技术、部件和产品,保证了该系统方案具有一定的继承性。该系统中的关键元件采用双余度设计,提高了系统功能的可靠性。综上所述,某间冷燃气轮机控制系统具有结构简单、原理合理、功能完备、技术成熟、工作安全可靠等优点,最终确定该系统方案可行。

参考文献:

- [1] 李孝堂. 现代燃气轮机技术[M]. 北京:航空工业出版社, 2006:1-5.  
LI Xiaotang. Modern gas turbine technology [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2006:1-5. (in Chinese)
- [2] 梁春华. 间冷回热循环舰船用燃气轮机 WR-21 的技术特点[J]. 航空发动机, 2007, 33(1):55-58, 41.  
LIANG Chunhua. Technological feature of the WR-21 marine inter-cooled recuperated gas turbine [J]. Aeroengine, 2007, 33(1):55-58, 41. (in Chinese)
- [3] 李淑英, 王志涛, 王建清, 等. 船用间冷循环燃气轮机供油规律仿真研究[J]. 船舶工程, 2010, 32(5):15-18.

- LI Shuying, WANG Zhitao, WANG Jianqing, et al. Simulation study on fuel supply rate curve of marine inter-cooled gas turbine[J]. Ship Engineering, 2010, 32(5):15-18. (in Chinese)
- [4] 薛银春, 孙建国. 燃气轮机控制技术综述[J]. 航空动力学报, 2005, 20(6):1066-1071.
- XUE Yinchun, SUN Jianguo. A survey of gas turbine control technique [J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(6):1066-1071. (in Chinese)
- [5] 刘尚明, 何皓. 重型燃气轮机控制发展趋势及未来关机技术[J]. 热力透平, 2013, 42(4):217-224.
- LIU Shangming, HE Ai. Development trend of heavy-duty gas turbine control technology [J]. Thermal Turbine, 2013, 42(4):217-224. (in Chinese)
- [6] 姚华. 未来航空发动机控制技术的发展趋势 [J]. 航空科学技术, 2012(6):1-6.
- YAO Hua. Development trend of aircraft engine control technology[J]. Aeronautical Science Technology, 2012(6):1-6. (in Chinese)
- [7] 张建生, 吕欣荣. 浅谈燃气轮机的控制[J]. 节能, 2000(3):9-12.
- ZHANG Jiansheng, LYU Xinrong. Primary analysis on gas turbine control[J]. Energy Conservation, 2000(3):9-12. (in Chinese)
- [8] 吴石贤. 燃气轮机控制系统概况[J]. 发电设备, 2003(2):56-58.
- WU Shixian. Control systems of gas turbine [J]. Power Equipment, 2003(2):56-58. (in Chinese)
- [9] 张仁兴. 舰船燃气轮机电子控制柜设计特点的分析 [J]. 热能动力工程, 2001, 16(2):165-167.
- ZHANG Renxing. An analysis of the design features of an electronic control console for a naval gas turbine [J]. Thermal Power Engineering, 2001, 16(2):165-167. (in Chinese)
- [10] 樊思齐. 航空发动机控制(下册)[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2008:477-500.
- FAN Siqi. Aeroengine control (part ) [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2008:477-500. (in Chinese)
- [11] 孙建国, 黄金泉, 叶志峰. 现代航空动力装置控制[M]. 北京:航空工业出版社, 2009:6-12.
- SUN Jianguo, HUANG Jinquan, YE Zhifeng. Modern aviation power plant control [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2009:6-12. (in Chinese)
- [12] 姚华. 航空发动机全权限数字电子控制系统[M]. 北京:航空工业出版社, 2014:71-92.
- YAO Hua. Full authority digital electronic control system for aero-engine [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2014:71-92. (in Chinese)
- [13] 廉筱纯, 吴虎. 航空发动机原理[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2005:311-325.
- LIAN Xiaochun, WU Hu. Principle of aeroengine [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2005:311-325. (in Chinese)
- [14] 刘尚明, 何皓. 重型燃气轮机控制发展趋势及未来关机技术[J]. 热力透平, 2013, 42(4):217-224.
- LIU Shangming, HE Ai. Development trend of heavy-duty gas turbine control technology [J]. Thermal Turbine, 2013, 42(4):217-224. (in Chinese)
- [15] 张建生, 吕欣荣. 浅谈燃气轮机的控制[J]. 节能, 2000(3):9-12.
- ZHANG Jiansheng, LYU Xinrong. Primary analysis on gas turbine control[J]. Energy Conservation, 2000(3):9-12. (in Chinese)
- (编辑 张宝玲)