

燃油计量组件试验液压控制系统研究

盛世伟,李军伟,朱汉银,杨佳丽

(中国航发北京航科发动机控制系统科技有限公司,北京 102200)

摘要:为了准确测试航空发动机燃油计量组件的性能状态,对其性能试验的控制系统进行研究。基于燃油计量组件的结构、工作原理以及试验要求设计液压控制系统,采用由伺服电机、丝杠和光栅传感器组成的位移伺服控制系统实现计量组件阀芯位移的精确控制,提出“泵阀复合控制+进、出口压力协调控制”的控制策略,以实现计量组件出口压力和进、出口压差的精确控制。结果表明:该燃油计量组件阀芯位移控制精度可达到 ± 0.001 mm,计量组件后压力及前后压差的控制精度均可达到 ± 0.002 MPa,该燃油计量组件性能试验控制系统可以满足性能试验的需求。

关键词: 燃油计量组件; 性能试验; 液压控制系统; 航空发动机

中图分类号: V 217

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2020.01.013

Study on Hydraulic Control System of Fuel Metering Component Test

SHENG Shi-wei, LI Jun-wei, ZHU Han-yin, YANG Jia-li

(AECC Beijing Hangke Engine Control System Science and Technology CO., LTD., Beijing 102200, China)

Abstract: In order to test the performance of the fuel metering component of the aeroengine exactly, the control system of the performance test was studied. The hydraulic control system was designed based on the structure, working principle and test requirements of the fuel metering component. The displacement servo control system composed of servo motor, lead screw and grating sensor was used to realize the precise control of the valve core displacement of the metering component. The control strategy of "compound control of pump and valve+ coordinated control of inlet and outlet pressure" was put forward, so as to realize the precise control of the outlet pressure and the pressure difference of the inlet and outlet of the metering component. The results show that the displacement control accuracy of the valve core of the fuel metering component can reach ± 0.001 mm. The control accuracy of post pressure and pressure difference before and after metering component can reach ± 0.002 MPa. The performance test control system of fuel metering component can meet the requirements of performance test.

Key words: fuel metering component; performance test; hydraulic control system; aeroengine

0 引言

现代航空发动机要求对燃油流量精确控制,以期在充分发挥发动机性能潜力的同时,保障其安全^[1]。燃油控制系统被喻为航空发动机的心脏^[2],其功能是根据飞机的飞行条件和飞行状态按需求提供相应压力和流量的燃油,从而保证发动机正常工作^[3]。燃油计量组件是燃油控制系统的重要功能部件,经计量组件计量后的燃油被输送到发动机燃烧室参与燃烧^[4]。

燃油计量组件作为航空发动机中燃油计量装置

的重要功能部件,其性能好坏直接影响到航空发动机乃至整个飞机的控制特性。计量组件的性能试验具有控制精度高、各被控参数相互耦合的特点。为提高燃油控制系统整机性能调试的效率和可靠性,在燃油控制系统装配调试前需对燃油计量组件进行性能测试^[5]。然而,国内外学者的研究重点多在整个燃油计量装置特性上^[6-10],而对燃油计量组件性能试验的研究鲜有报道。余玲等^[11]研究了温度对航空发动机整个燃油计量装置特性的影响规律;曹启威等^[12]基于 AMESim 对

收稿日期:2019-02-24

基金项目:航空动力基础科研项目资助

作者简介:盛世伟(1989),男,硕士,工程师,从事航空发动机燃油控制工作;E-mail:908497868@qq.com。

引用格式:盛世伟,李军伟,朱汉银,等.燃油计量组件试验液压控制系统研究[J].航空发动机,2020,46(1):65-69. SHENG Shiwei, LI Junwei, ZHU Hanyin, et al. Study on hydraulic control system of fuel metering component test[J]. Aeroengine, 2020, 46(1): 65-69.

步进电机和燃油计量装置机械液压组件进行仿真,验证了仿真模型的准确性,但未涉及试验相关内容;刘铁庚^[3]介绍了1种新颖且适于中小型航空发动机数控系统的燃油计量装置设计方案,并在科研实践中得到应用,但未涉及燃油计量组件性能试验方面的内容。为了准确测试航空发动机燃油计量组件的性能状态,以某航空发动机为例,对其燃油计量组件性能试验的控制系统进行研究。该发动机的燃油泵和计量装置是在引进法国某型发动机燃油控制系统液压执行机构生产专利基础上进行国产化研制的,其计量组件是该燃油泵和计量装置的重要功能部件。

本文对燃油计量组件试验液压控制系统和控制方法进行设计,以实现计量组件出口压力和进出口压差的精确控制,采用高精度位移伺服控制系统实现计量组件阀芯位移的精确控制,可为国防领域内类似产品的高精度性能试验提供参考。

1 燃油计量组件试验条件

该航空发动机燃油计量装置主要由计量组件、步进电机、位移传感器、压差活门以及增压活门等元部件组成,如图1所示。步进电机、角位移传感器与航空发动机控制器共同构成计量组件阀芯位移的闭环控制;增压活门保证计量组件的出口压力保持恒定;压差活门调定计量组件前后压差。

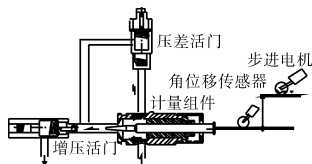


图1 燃油计量装置

为了准确模拟航空发动机在运行过程中燃油计量组件的性能状态,其性能试验需满足以下条件:

- (1)燃油计量组件前后压差实现精确控制,稳态误差为 ± 0.003 MPa。
- (2)燃油计量组件后的压力实现精确控制,稳态误差为 ± 0.005 MPa。
- (3)燃油计量组件阀芯位移实现精确控制,稳态误差为 ± 0.005 mm。

2 试验液压原理与控制策略

2.1 试验液压原理

为模拟计量组件出口压力,在计量组件出口设置1个背压阀,将计量组件和背压阀等效为可调节节流阀,阀芯位移分别用 x_v 和 x_o 表示,如图2所示。

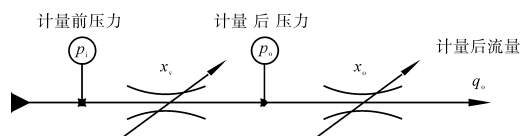


图2 试验液压原理

根据节流口的流量方程,通过计量组件的流量为

$$q_o = C_d W_v x_v \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p} \quad (1)$$

式中: C_d 为流量系数,无量纲; W_v 为阀口的面积梯度; $\Delta p = p_i - p_o$,为计量前、后的压力差; ρ 为燃油密度。

从式(1)中可见, q_o 与 Δp 及 x_v 相关。在温度和 x_v 不变的情况下, q_o 与 $\sqrt{\Delta p}$ 成正比。

假设背压阀后的压力为0,则通过背压阀的流量

$$q_o = C_d W_o x_o \sqrt{\frac{2}{\rho} p_o} \quad (2)$$

式中: W_o 为背压阀阀口的面积梯度。

由式(1)、(2)得

$$p_o = C \left(\frac{x_v}{x_o} \right)^2 \Delta p \quad (3)$$

式中: C 为常数。

从式(3)中可见,在计量组件位移一定的情况下,即 x_v 不变时,调节 x_o 时,同时影响 Δp 和 p_o 的值,即调节 x_o 时, p_i 和 p_o 同时变化。从式(2)可知,若保持 p_o 不变,在 W_o 一定的情况下, q_o 与 x_o 成正比。

为满足试验条件,需对 p_o 与 Δp 进行协调控制。为保证压力控制系统的稳定性,通过自动闭环控制 p_o 始终保持某一定值,通过调节 x_o 实现流量 q_o 的调节,进而改变计量油针活门压差 Δp 。

通常,液压系统的压力调节可利用溢流阀、减压阀等压力调节阀实现,也可以通过节流、调速等流量控制手段实现。而目前的压力调节阀受限于频响、滞环等因素,其压力控制精度很难达到试验所需的高精度控制要求。由于变频电机具有极高的转速控制精度,采用变频电机参与压力的闭环控制可以满足所需的高精度要求。考虑到变频电机低速稳定性不高,且定量泵在低速运转时存在较大的压力脉动,因此为增大压力的控制范围,采用变频电机与旁路比例流量阀协调配合的方式对 p_o 进行闭环控制。综上所述,本文的液压控制系统原理如图3所示。

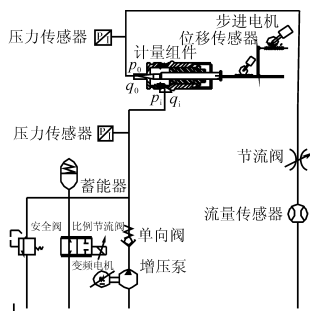


图3 液压控制系统原理

该液压控制系统由定量泵、变频电机、比例节流阀、计量组件、节流阀以及流量传感器等组成,其中定量泵 + 变频电机与比例节流阀协调控制 p_o ,通过节流阀控制 q_o ,从而控制 Δp ,流量传感器实时监测系统的流量。

2.2 控制策略

为实现计量组件出口压力和进、出口压差的精确控制,提出“泵阀复合控制 + 进、出口压力协调控制”的控制策略,如图 4 所示。

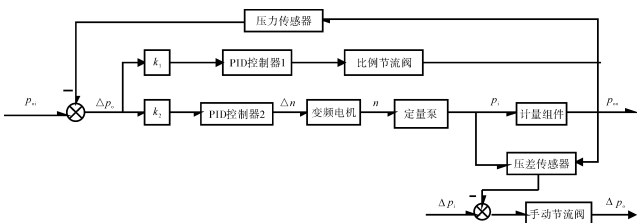


图 4 控制策略

从图中可见,泵阀复合控制策略为:当 Δp_o 大于某一设定值时,控制 $k_1=1, k_2=0$,变频电机转速维持最小值不变,通过比例节流阀、PID 控制器 1 以及压力传感器等构成的压力阀控系统进行压力粗调;当 Δp_o 小于该设定值时,控制 $k_1=0, k_2=1$,比例节流阀开口维持当前值不变,通过变频电机、PID 控制器 2 以及压力传感器等构成的压力泵控系统进行压力精调,最终通过合理匹配设置 PID 控制器 1、2 的参数实现计量组件出口压力的精确控制。计量油针活门前后压差通过手动节流阀调节。

2.3 仿真分析

基于 AMESim 搭建燃油计量组件试验液压控制系统的仿真模型^[14-15]并进行仿真。计量组件后压力控制特性、比例节流阀及变频器的响应特性如图 5 所示。

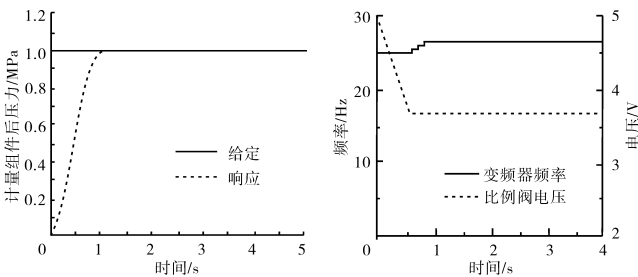


图 5 仿真曲线

从图中可见,在计量组件出口压力小于 0.8 MPa 时,即在第 0.6 s 前,仅由比例节流阀参与压力控制,

变频器频率保持在初始值 25 Hz; 当压力大于 0.8 MPa 时,即在第 0.6 s 后,仅由变频器参与压力控制,而比例节流阀开口度保持不变。压力稳态控制误差为 0.001 MPa。

经过仿真分析,验证了控制策略的有效性,为后续试验台的搭建与试验提供了理论支撑。

3 试验台概述与试验

3.1 试验台概述

试验台主要由液压系统、计量组件位移伺服控制系统、测控系统等组成,如图 6 所示。

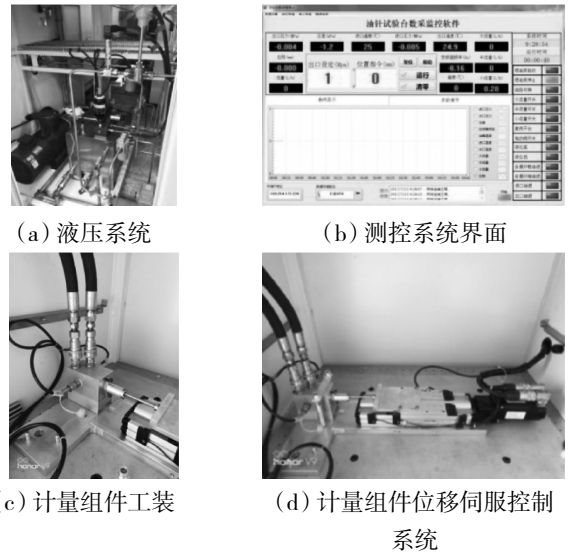


图 6 试验台

其中,计量组件位移伺服控制系统由伺服控制器、伺服电机、丝杠、光栅尺以及顶针工装组成,其控制框图如图 7 所示。

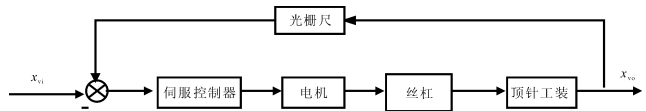


图 7 计量组件位移伺服控制系统

在计量组件位移伺服控制系统中,计量组件的线位移由伺服电机的旋转角位移通过丝杠及顶针工装转化而来,计量组件位移反馈信号由光栅尺检测并给定,通过调节伺服控制器的 PID 参数实现计量组件位移的准确控制。

3.2 试验结果与分析

给定不同计量组件阀芯位移,得到位移响应曲线如图 8 所示。

从图中可见,给定计量组件阀芯位移为 1、3、5、7

mm,位移响应的稳态控制误差均为 ± 0.001 mm,满足计量组件阀芯位移控制精度试验要求,保证了后续试验结果的准确性。

在计量组件阀芯位移一定的前提下,设定不同出口压力,同时调节计量组件前后压差为0.2 MPa,相关响应曲线如图9所示。

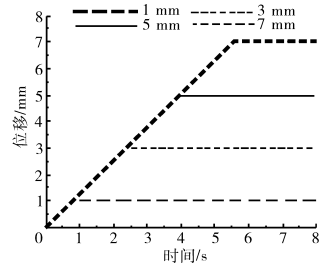


图8 不同计量组件阀芯位移响应

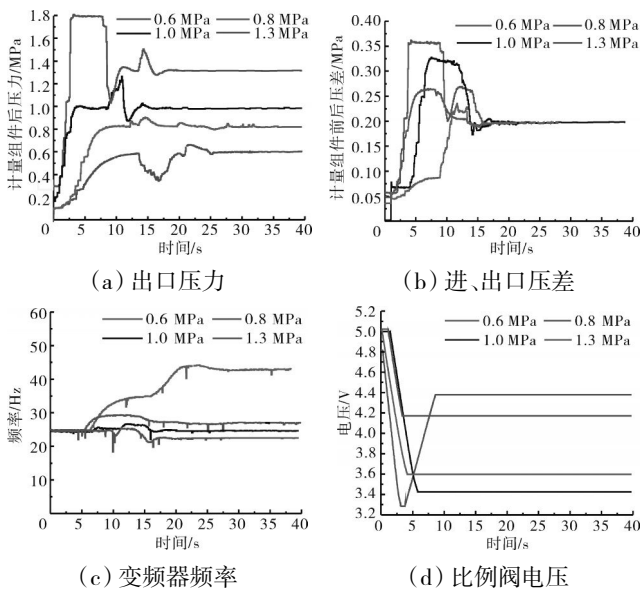


图9 不同出口压力、相同位移和压差下的响应

从图中可见,给定相同计量组件阀芯位移,控制不同的出口压力和相同的进、出口压差,均能实现稳定控制,且其稳态控制误差均可达到 ± 0.002 MPa,满足燃油计量组件性能试验的高精度控制要求,变频器频率和比例阀电压的变化趋势与仿真结果一致,进一步验证了控制策略的有效性。

保持计量组件阀芯位移不变,设定计量组件出口压力为1.0 MPa,分别调节压差为0.1、0.2、0.3、0.4 MPa,各参数的响应曲线如图10所示。

从图中可见,随着压差的变化,计量组件的出口压力稳定状态被打破,在调节压差的同时,控制系统自动回调出口压力,最终出口压力和压差同时到达控制目标并稳定;在整个调节过程中,由于出口压力偏差值始终未达到比例阀的动作条件,因此仅变频器参与自动调节;压力稳态控制误差均达到 ± 0.002 MPa,满足燃油计量组件性能试验的高精度控制要求。

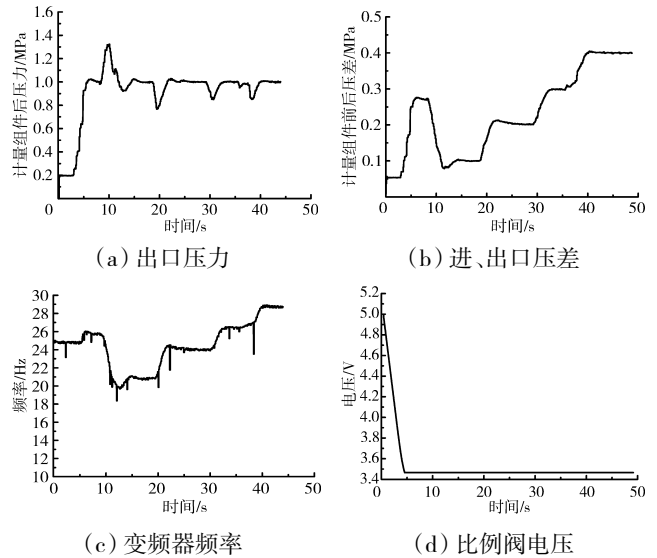


图10 相同出口压力和位移、不同压差的控制特性

设定计量组件出口压力为1.0 MPa,控制计量组件的阀芯位移分别为-2、-1、0、1 mm,并同时调节计量组件进、出口压差始终保持0.2 MPa,试验得到的响应曲线如图11所示。

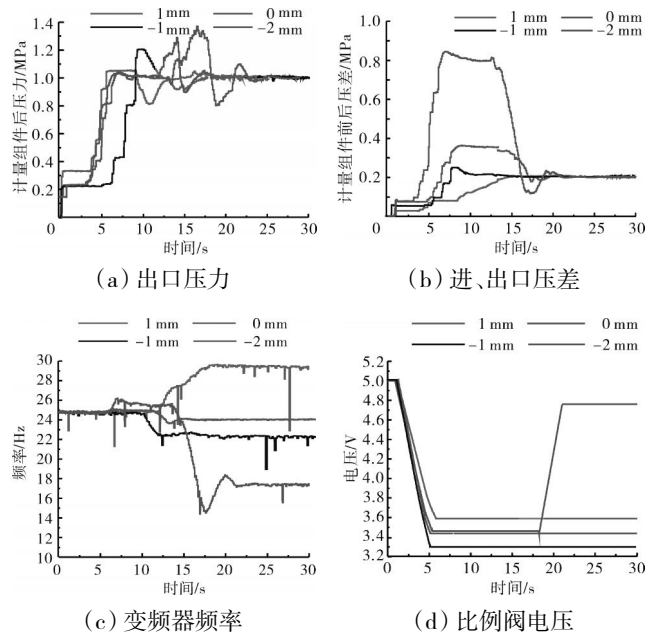


图11 相同出口压力和压差、不同位移的控制特性

从图中可见,不同计量组件阀芯位移出口压力和进、出口压差均能实现稳定控制,且其稳态控制误差均可达到 ± 0.002 MPa。

综上所述,所研究的燃油计量组件控制系统以及“泵阀复合控制+进、出口压力协调控制”的控制策略,在不同计量组件阀芯位移、不同出口压力和进、出

口压差的控制要求下均能实现计量组件出口压力和进、出口压差的精确控制,具有较好的鲁棒性,从而保证了燃油计量组件性能试验结果的可靠性。

4 结论

为了准确测试航空发动机燃油计量组件的性能状态,对其性能试验的控制系统进行研究,得到如下结论:

(1)基于燃油计量组件的结构、工作原理以及试验要求,设计了液压控制系统,从理论上分析了该系统的可实施性;

(2)提出“泵阀复合控制+进、出口压力协调控制”的控制策略,实现了计量组件出口压力和进、出口压差的精确控制,控制精度均可达到 ± 0.002 Pa,满足了燃油计量组件性能试验的功能要求以及高精度要求;

(3)采用由伺服电机、丝杠和光栅传感器组成的位移伺服控制系统,实现了计量组件阀芯位移的精确控制,计量组件阀芯位移控制精度可达到 ± 0.001 mm,保证了燃油计量组件性能试验结果的可靠性。

本研究方法和结论可为国防领域内类似产品的高精度性能试验提供参考。

参考文献:

- [1] 张绍基. 航空发动机燃油与控制系统的研究与展望 [J]. 航空发动机, 2003, 29(3): 1-5.
ZHANG Shaoji. Recent research and development of the fuel and control system in an aeroengine [J]. Aeroengine, 2003, 29 (3): 1-5. (in Chinese)
- [2] 傅强, 樊丁, 彭凯. 航空发动机主供油计量活门故障主动容错控制器设计[J]. 航空动力学报, 2014, 29(4): 973-979.
FU Qiang, FAN Ding, PENG Kai. Active fault tolerant controller design of aero-engine main fuel metering valve [J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(4): 973-979. (in Chinese)
- [3] Wagdy, Mohamed K, Vanstaen, et al. Actuation structure for internal fuel cell metering valve and associated combustion tool [J]. United States Patent, 2009, 34(2): 85-92.
- [4] 尚洋, 郭迎清, 王骥超, 等. 涡扇发动机加力燃油计量装置建模与性能分析[J]. 航空发动机, 2013, 39(5): 47-50.
SHANG Yang, GUO Yingqing, WANG Jichao, et al. Modeling and performance analysis of turbofan afterburner [J]. Aeroengine, 2013, 39 (5): 47-50. (in Chinese)
- [5] 曾德堂, 赵威力, 王曦, 等. 回油型面结构对计量装置特性影响研究 [J]. 航空发动机, 2012, 38(1): 41-43.
ZENG Detang, ZHAO Weili, WANG Xi, et al. Study on the influence of oil return profile structure on the characteristics of metering device [J]. Aeroengine, 2012, 38(1): 41-43. (in Chinese)
- [6] 余玲, 叶志锋, 王彬. 航空发动机计量装置特性仿真与试验研究[J]. 航空发动机, 2015, 41(2): 85-88.
YU Ling, YE Zhifeng, WANG Bin. Characteristic simulation and experimental research of aeroengine metering device [J]. Aeroengine, 2015, 41 (2): 85-88. (in Chinese)
- [7] 杨永敏, 卢前顺. 商用航空发动机燃油计量装置动态建模分析研究 [J]. 制造业自动化, 2016, 38(6): 106-110.
YANG Yongmin, LU Qianshun. Research on dynamic modeling analysis of fuel metering device for commercial aeroengine [J]. Manufacturing Automation, 2016, 38 (6): 106-110. (in Chinese)
- [8] 刘培培, 马静, 彭凯, 等. 基于 AMESim 的涡桨发动机燃油计量装置仿真[J]. 机械制造, 2016, 49(8): 19-21.
LIU Peipei, MA Jing, PENG Kai, et al. Simulation of turboprop engine fuel metering device based on AMESim [J]. Mechanical Manufacturing, 2016, 49 (8): 19-21. (in Chinese)
- [9] 廖坤年, 张天宏. 微型涡喷发动机燃油计量技术研究[J]. 航空动力学报, 2008, 23(11): 2137-2141.
MI Kunnian, ZHANG Tianhong. Research on fuel metering technology of micro turbojet engine [J]. Journal of Aeronautical Power, 2008, 23 (11): 2137-2141. (in Chinese)
- [10] 李阔, 郭迎清. AMESim 仿真技术在航空动力控制系统中的应用 [J]. 计算机仿真, 2009, 26(1): 107-110.
LI Kuo, GUO Yingqing. Application of AMESim simulation technology in aero dynamic control system [J]. Computer Simulation, 2009, 26(1): 107-110. (in Chinese)
- [11] 余玲. 航空发动机燃油计量装置的温度特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
YU Ling. Research on temperature characteristics of fuel metering device for Aeroengine [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013. (in Chinese)
- [12] 曹启威, 王彬, 赵皓参. 步进电机驱动的燃油计量装置建模与分析 [J]. 航空发动机, 2016, 42(5): 21-25.
CAO Qiwei, WANG Bin, ZHAO Haoshen. Modeling and analysis of fuel metering device driven by stepping motor [J]. Aeroengine, 2016, 42 (5): 21-25. (in Chinese)
- [13] 刘铁庚. 新型中小发数控系统燃油计量装置设计方案 [J]. 测控技术, 2012, (S31): 352-354.
LIU Tiegeng. Design scheme of fuel oil metering device of new small and medium-sized generator numerical control system [J]. Measurement and Control Technology, 2012, (S31): 352-354. (in Chinese)
- [14] 王彬, 赵皓参, 叶志锋. 加力燃油计量装置的 AMESim 仿真研究 [J]. 航空发动机, 2014, 40(5): 62-66.
WANG Bin, ZHAO Haocen, YE Zhifeng. AMESim simulation research on afterburner fuel metering device [J]. Aeroengine, 2014, 40 (5): 62-66. (in Chinese)
- [15] 张云静, 郝利剑, 柴国英. 数字化柴油机结构建模流程设计[J]. 车用发动机, 2013(1), 1-4.
ZHANG Yunjing, HAO Lijian, CHAI Guoying. Process design of digital diesel engine structure modeling [J]. Vehicle Engine, 2013(1), 1-4. (in Chinese)

(编辑: 刘 静)