

# 航空发动机控制系统半物理模拟试验的应用

潘丽君<sup>1</sup>, 孙志岩<sup>1</sup>, 杨惠民<sup>1</sup>, 王培栋<sup>2</sup>

(1. 中国航发控制系统研究所 2. 空军驻无锡地区军事代表室 无锡 214063)

**摘要** :半物理模拟试验在发动机控制系统研发中发挥着重要作用,然而鲜有文献对国内外半物理模拟试验的应用情况、技术特征进行总结提炼。结合科研实践和相关文献,分析了航空发动机控制系统开展半物理模拟试验的必要性、控制系统的复杂性和国外标准规范要求开展半物理模拟试验的必要性,介绍了半物理模拟试验的基本组成和原理,回顾了国外半物理模拟试验的开展情况,并对国内半物理模拟试验在科研、批产过程中的应用进行说明。结合工程实践和国外研究成果,总结了半物理模拟试验环境的关键技术,指出了半物理模拟试验技术深化的方向。

**关键词** :半物理模拟试验; 控制系统; 集成试验; 航空发动机

中图分类号: V232.9

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2017.03.012

## Survey of closed-loop bench testing of aero engine control system

Pan Li-jun<sup>1</sup>, Sun Zhi-yan<sup>1</sup>, Yang Hui-min<sup>1</sup>, Wang Pei-dong<sup>2</sup>

(1. AECC Aero Engine Control System Institute, WuXi 214063; 2. Consumer Representative Office of Air Force in Wuxi, Wuxi 214063)

**Abstract**: Closed-loop bench testing plays an important role in the engine control system development, but few papers discussed and summarized the practice and technology of closed-loop bench test. This paper analyzes the necessity of closed-loop bench test of engine control system, the complexity of control system and foreign standard specification all require closed-loop bench test. Reviews the development of closed-loop bench test abroad, and introduces the basic composition and principle of closed-loop bench test, describes the application of domestic closed-loop bench test in scientific research and batch production process. Combined with engineering practice and research on foreign situation, summarizes the key technology of closed-loop bench test environment, and points out the direction of closed-loop bench test technology.

**Key words**: closed-loop bench test; control system; integration test; aeroengine

## 0 引言

航空发动机控制系统半物理模拟试验是在控制系统装机前,在试验室环境下构建系统安装和工作条件,集成控制系统部件,与发动机数学模型构成闭环运行的仿真试验,试验中控制系统部件如电子控制器、液压执行机构、传感器等是真实的(物理的),发动机是虚拟的(数学模型),故称为半物理模拟试验。国外相关文献一般称作闭环试验台试验(closed-loop bench test)或湿设备试验(wet rig test)。

由于在真实发动机上开展控制系统的功能和性能验证风险、成本很高,国际发动机行业标杆企业如

PW、RR 等公司,均建有功能完善的半物理模拟试验器,并将半物理模拟试验视为控制系统综合与验证中的关键环节之一。半物理模拟试验对于充分验证系统功能性能,降低系统研制风险和成本有着重要作用。

由于国内开展控制系统自主研制和半物理模拟试验起步较晚,对半物理模拟试验的技术积累较少,在科研实践中半物理模拟试验结果常与发动机试验结果存在差异,一些在发动机上出现的控制系统问题难以在半物理模拟试验中复现,影响了半物理模拟试验的效果。而对于国外半物理模拟试验的应用情况和技术特征,目前鲜有文献进行归纳介绍。本文分析了开展半物理模拟试验的必要性,介绍国内外半物理模

收稿日期: 2016-11-19 基金项目: 航空动力基础研究项目资助

作者简介: 潘丽君(1962),女,工程师,从事航空标准化管理工作, E-mail: 18903822938@163.com。

引用格式: 潘丽君, 孙志岩, 杨惠民, 等. 航空发动机控制系统半物理模拟试验的应用[J]. 航空发动机, 2017, 43(3): 62-67. Pan Lijun, Sun Zhiyan, Yang Huimin, et al. Survey of closed-loop bench testing of aero engine control system[J]. Aeroengine, 2017, 43(3): 62-67.

拟试验发展和应用情况,结合国内工程实践梳理半物理试验的关键技术,并提出未来半物理模拟试验技术深化的方向。

## 1 半物理模拟试验的必要性

发动机控制系统始于20世纪40年代简单的液压机械燃油控制系统,先后经历了初始阶段、成长阶段、电子阶段和综合阶段,现已发展到全权限数字电子控制(FADEC)技术。随着飞行包线的扩展和发动机控制功能的发展,系统控制的复杂性也大大增加,发动机控制系统的控制变量也从早期的单个变量扩展到如今的10多个变量<sup>[1]</sup>。

20世纪70年代以前,由于缺乏仿真验证手段,发动机控制系统的设计验证常常要在发动机试车和试飞中完成,很多控制系统的功能、逻辑在试验后要调整,使得控制系统研制滞后于发动机研制。此外,一些功能如全飞行包线内的故障模式和检测、故障运行/故障安全性能的验证难免带来试车试飞风险。

针对传统研制流程存在的问题,PW公司采用仿真技术加速控制系统研制进程,并提出了仿真技术需要解决的问题:(1)保证发动机数学模型及控制系统仿真模型的高置信度;(2)在发动机研制过程中始终按最新状态及时更新模型;(3)保证所有的仿真是匹配的<sup>[2]</sup>。

在工程实践中,确保所有仿真模型的高置信度和及时更新存在很大难度,因此集成控制系统实物部件的半物理模拟试验成为不可或缺的验证方式。通过开展半物理模拟试验,可以实现控制系统和发动机的并行开发和验证,大大降低控制系统功能、性能调试的成本,完成在试车试飞中难以验证的故障处理、对象拉偏等高风险的科目验证。

由于半物理模拟试验的重要作用,“GJB-4053 航空发动机数字电子控制系统通用规范”等国内标准提出了开展半物理模拟试验的要求,而美军标准的相关说明更为具体。如美国“JSSG-2007B 航空发动机设计规范”<sup>[3]</sup>对控制系统试验提出:“FADEC(包含燃油系统)应当在1个包含发动机实时动态模型的试验台上集成试验以证明对发动机的控制能力,要验证控制系统在包线范围内(地面、高空)从起动到最大加力状态下的功能和性能;如果可能,还应当通过飞机模拟器验证发动机的控制模式和飞推综合控制模式。”

美国2004年发布的“MIL-STD-3024 推进系统完整性大纲”明确指出,“开展系统集成开发要采用半物理试验设备;并指出需要开展几类试验,如控制系统开发、燃油系统集成、故障注入、故障检测和故障处理等;半物理模拟试验的需求应该在初步设计评审(PDR)前就进行识别,并与各部件供应商达成一致,在研发过程中应该使用半物理试验的数据来不断更新部件模型<sup>[4]</sup>”。

## 2 半物理模拟试验基本组成与原理

半物理模拟试验的基本组成(如图1所示)包括发动机控制系统参试件、安装台架、物理效应设备、发动机模型计算机、传感器模拟装置、操纵模拟装置等。半物理模拟试验的基本原理是:安装台架和物理效应设备为控制系统的泵、计量装置等燃油、作动附件提供安装、传动、供油、负载等模拟发动机工作环境;发动机模型采集控制系统的控制量包括流量、变几何位移等参数,计算发动机当前状态值;电子控制器根据油门杆等操纵指令计算发动机控制的目标值,根据目标值和当前状态值的偏差计算燃油流量、变几何位置等控制量的给定,从而实现实体的发动机控制系统与虚拟的发动机数学模型构成闭环运行。

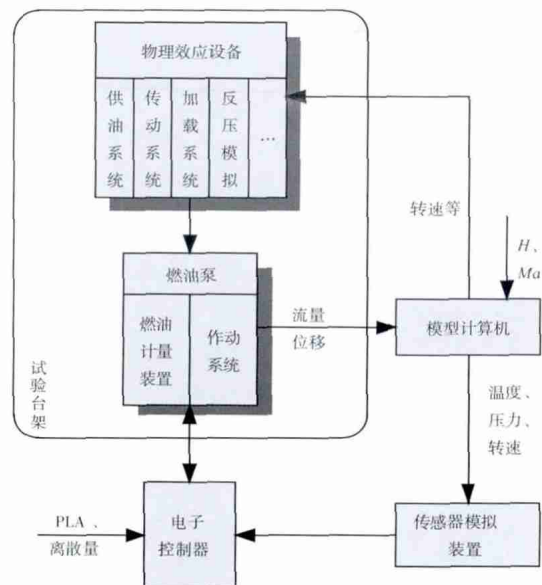


图1 半物理模拟试验基本组成和原理

控制系统参试件一般包括电子控制器、燃油泵、燃油计量装置、作动装置、传感器等。部分传感器如温度传感器由于集成真实传感器并施加真实物理效应较为困难,一般采用传感器模拟装置进行模拟;安装

台架为参试的泵、燃油附件等提供与发动机接近的安装接口和支撑条件,物理效应设备为发动机控制系统参试部件提供模拟发动机条件的工作环境,包括供油系统、传动系统、作动负载模拟系统、燃烧室压力模拟系统等;发动机模型计算机用于运行发动机实时数学模型,根据采集到的控制系统的控制量如流量、作动系统位移等计算发动机输出状态;传感器模拟装置对于受条件制约不能参与试验的传感器,如温度、压力、振动等传感器,根据发动机模型运算的输出值采用信号模拟的方式为电子控制器提供模拟输入;操纵模拟装置用于模拟飞机对发动机的操作接口和人机界面,如油门杆、开关、信号灯、通讯接口等。

### 3 国外半物理模拟试验的应用

国外发动机控制系统研发普遍采用了半物理模拟试验验证。

早在 20 世纪 60 年代,Vickers 公司就设计了用于燃油调节器验证的半物理模拟试验器,由于当时计算机技术还不够成熟,试验器使用模拟电路模拟发动机动态特性控制燃油泵转速,并模拟了燃油调节器的出口压力<sup>[5]</sup>。

进入 20 世纪 70 年代,随着计算机技术的发展,半物理模拟试验开始采用基于数字计算机的实时仿真技术,大大增强了半物理模拟试验的能力。如 PW 公司 FADEC 系统配装 F-15 飞机试飞前,开展了 677 h 的半物理模拟试验,验证了 2 套用于交付发动机的控制系统,在试验中分别采用常温燃油和高温燃油进行了海平面和高空点的动态试验,并且开展了大量故障检测和处理逻辑的验证,大大降低了系统研制成本,缩短了研制周期<sup>[6]</sup>。

PW 公司于 20 世纪 70 年代末建成的用于 F100 等发动机控制系统的半物理模拟试验环境,其原理如图 2 所示。

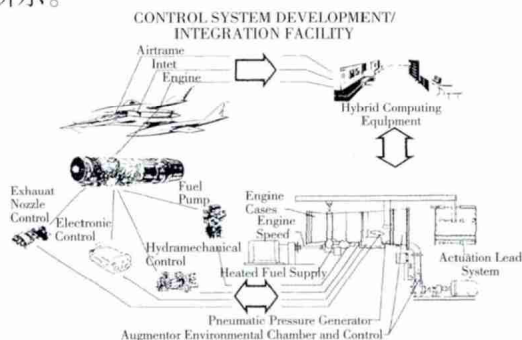


图 2 PW 公司半物理试验设备

根据相关文献披露,该半物理试验环境具有以下功能特点<sup>[2]</sup>:

(1)具备模拟包含飞发接口的完整推进系统在全工作范围的实时仿真能力;

(2)可工作在纯分析设计模式下或组合控制系统硬件进行闭环试验;

(3)可测试单个部件、完整控制系统,或者部分仿真替代的控制系统;

(4)试验环境具备各种能对系统功能性能产生影响的物理效应。例如采用真实的空气涡轮起动机,采用计算机控制作动器的负载,为了验证燃油在高温总管中的蒸发现象对加力系统工作的影响,使用真实的加力燃烧室喷嘴架,并模拟喷嘴架工作温度等;

(5)试验设备具备模拟控制对象动态特性能力,例如其对气压动态的模拟速度达到了 8 Hz,采用小惯量电机带动转速传感器;

(6)具备故障模拟和频响分析功能。

PW 公司在其用于黑鹰直升机的功率为 2207 kW 涡轴发动机控制系统验证中,进行带飞行模拟器的半物理模拟试验,通过引入人在回路的仿真器,可以验证机动飞行时控制系统性能对飞行操纵的影响<sup>[7]</sup>。

GE 公司在对 F404 发动机控制系统验证中,半物理模拟试验被用来进行 2000 h 的燃油/滑油系统部件寿命评估,试验构型中不仅包括燃油系统部件,还包含滑油系统部件,对燃油系统部件施加了空气温度和燃油温度的极限环境效应,并开展了 750 h 的模拟任务耐久性试验<sup>[8]</sup>。

英国 RR 公司在对其半分布式控制系统开发验证中,使用了 Woodward 公司半物理试验设备对燃油喷嘴背压进行了模拟,主要试验内容包括动态试验和故障注入试验等。研发人员对半物理试验结果和仿真结果进行了对比,并对试验中出现的问题进行试车风险分析<sup>[9]</sup>。

德国 MTU 公司在对 EJ200 发动机矢量控制系统验证中,采用了半物理模拟试验验证,并通过试验验证作动系统模型<sup>[10]</sup>。在对 TP400 涡桨发动机数控系统验证中,采用干设备(dry rig)和湿设备(wet rig)2 类设备进行验证,采用干设备实现硬件在回路的仿真验证,测试中只有控制器是真实的,而采用湿设备集成真实的燃油系统部件和部分传感器,将干设备和湿设备组合后可进行半物理模拟试验<sup>[11]</sup>。



## 4 国内半物理模拟试验的应用

### 4.1 系统研发阶段半物理模拟试验的应用

国内发动机全权限数控系统研究起步于20世纪80年代。从1987年开始列为预先研究项目,在项目初期就通过半物理模拟试验验证系统功能性能;1996年开始历时1年半,在半物理模拟试验台上共完成14种故障模式及组合模式的故障模拟试验、19个高空点的功能和性能模拟试验和模型拉偏试验,控制系统的稳定性、可靠性得到大幅度提高<sup>[12]</sup>。

2002年全权限数字电子控制技术试飞验证后,大量在研发发动机开始采用全权限数控系统,对半物理模拟试验器的需求也大大增加,近年结合项目研制需求,已建立了多个具备不同发动机数控系统特征的半物理模拟试验器,包括涡轴、涡桨、非加力涡扇、加力涡扇等。这些试验器在数控系统开发验证中发挥了重要作用。如某型加力涡扇发动机数控系统在设计定型前开展了800 h以上的半物理模拟试验,某型涡轴发动机数控系统在设计定型前开展了超过6000 h的半物理模拟试验。

国内发动机控制系统研发遵循分级设计、分级综合验证的V字流程。

在控制系统设计阶段,系统和部件模型还只是初步模型,缺乏实际工程数据的验证,进入集成验证阶段后,通过开展部件试验可以获取一部分部件数据,但由于部件试验环境与真实状态存在差异,其试验数据还不足以完整对系统模型进行校核。在半物理模拟试验中,由于系统架构完整,通过开展针对性的动态性能测试,可以提取较为准确的系统和部件的动态模型,一方面可用于更新回归桌面仿真模型,另一方面,半物理模拟试验中提取的控制回路模型可用于故障诊断。

在系统分级综合验证的流程中,一般顺序为部件试验、电子控制器在回路的HIL仿真试验、集成所有控制系统部件的半物理模拟试验、台架试验、飞行试验等。由于半物理模拟试验是控制系统在装发动机前最后1级试验,并且试验组成最为完整,因此半物理模拟试验也成为控制系统研制单位最为完整的验证基线,通过与部件试验、HIL仿真试验进行数据对比和校核,可以促进部件试验、HIL试验的基线对准。

### 4.2 批生产阶段半物理模拟试验的应用

半物理模拟试验不仅用于发动机控制系统研发

阶段的验证,在产品设计鉴定后的生产阶段也发挥了重要作用。由于国内发动机数控系统还未走完从设计、生产、使用、维护到退役的完整生命周期,对于控制系统及其部件的完整容差指标还在不断完善中,通过半物理模拟试验可积累系统部件匹配性能数据,帮助发现部件匹配异常和系统功能性能偏离,降低交付质量风险,并进一步完善系统部件的性能验收指标,为实现系统产品的生产定型提供支撑数据。

某型航空发动机数控系统自2011年小批量生产至今累计交付数百套,在此过程中,半物理模拟试验对发动机交付及外场正常使用发挥了以下重要作用:

(1)可有效抑制问题延伸到外场。虽然参与半物理试验的各部件均已通过部件验收,但组成子系统或全系统后的性能依然存在超差的可能,例如转速采集超标、油针位移采集超标、低温供油特性超标等,在某型数控系统生产中,每个月都有数套产品需经过调整才能满足系统集成要求。

一方面由于系统性能取决于相互匹配的部件指标,分配给部件指标往往预留一定容差,当单套系统中多个部件同时出现容差接近极限时,系统性能极可能超标;另一方面受制于当前的技术水平,部分系统性能只有在系统集成后才能检查,部件生产阶段无法有效控制。通过半物理试验提前发现匹配问题并解决,可有效降低因数控系统问题对发动机交付试车的影响,保障发动机交付。

(2)可快速定位并解决外场故障。遵循新装备交付初期故障多发的客观规律,交付前3年某型数控系统在主机及部队共发生故障182起,外场故障发生后,如缺少半物理模拟试验环境,必须在发动机或飞机上进行故障定位,而限于测试、验证条件,故障定位效率将极大降低。同时,针对外场发生的故障,通过完善半物理模拟试验方法,可防止同类故障再次发生。例如通过在生产试验中补充了低电压工作能力检查试验,提前在生产环节发现并排除了控制器和燃油泵调节器电磁阀匹配问题。

(3)可有力保障产品外场服务工作。在数控系统使用维护中,因发动机或飞机原因返修属于常规工作,通过半物理模拟试验可完成数控系统级检修,简化了部件和发动机工作,检修后数控系统可提供与产品出厂交付及发动机交付试车对比的数据,有效支撑外场服务人员及部队机务人员决策,提高装备使用效率。

## 5 半物理模拟试验环境的关键技术

完整而又先进的试验环境是半物理模拟试验有效开展的前提条件。根据国内工程实践和对国外半物理模拟试验开展情况的研究,简要介绍半物理模拟试验环境的关键技术。

### 5.1 高置信度发动机模型

为了保证闭环试验性能的准确性,应当用实际试车数据校核修正发动机数学模型,同时还应对发动机模型软件运行进行实时性测试。对于起动、熄火、高空、放气等状态,发动机模型也应保证一定的精度,以保证验证结果的合理性。

### 5.2 安装台架及效应模拟技术

#### 5.2.1 安装型架及机械传动机构

试验中控制系统部件安装定位和互联管路应参考真实发动机,公开披露的 F119、TP400 等发动机半物理模拟试验均采用 3 维安装的布局,各部件连接的管路也与真实发动机近似。对于导叶、喷口等作动筒的安装,应考虑作动筒的机械传动机构形式及传动系数与发动机一致,安装机构应具备足够的强度和支撑刚度<sup>[13-14]</sup>。

#### 5.2.2 传动系统

传动系统用于为燃油泵、交流发电机等控制系统部件提供传动动力。如有多个试验件需要传动,需要考虑传动齿轮箱的结构与安装型架的兼容性。对传动系统稳态和动态性能均有较高要求,动态特性应明显优于发动机的转子动态。

#### 5.2.3 燃油供油系统

燃油供油系统应当具备模拟飞行包线内的燃油温度的供油能力,供油温度的控制应当保证一定的精度。燃油供油系统的供油压力和回油压力可根据发动机工作指标进行调节。

#### 5.2.4 背压模拟技术

背压模拟主要包括主燃烧室和加力燃烧室的背压模拟。其目的是解决半物理模拟试验时燃烧室压力环境差异的问题。在工程实践中,常用压气机后压力及涡轮后压力近似作为主燃烧室和加力燃烧室的背压指令值,通过背压模拟装置调节主燃油及加力燃油的计量管路出口压力值。

#### 5.2.5 作动加载技术

作动系统负载需要考虑全飞行包线内的气动载荷特别是极限条件下的载荷,对于喷口作动系统、矢

量作动系统等复杂的执行机构,还应考虑模拟作动机构的惯性负载和摩擦负载。采用力闭环的作动加载系统要能够在作动系统的各种工作条件下抑制多余力。

### 5.2.6 气压模拟技术

带液压机械备份功能的发动机控制系统通常具备气压敏感元件,部分电子控制器内部集成了压力传感器,因此半物理试验环境需要具备气压模拟装置。气压模拟要有足够的动态性能,并考虑发动机控制部件的安全保护<sup>[15]</sup>。

### 5.2.7 加力燃烧室环境模拟技术

基于高空加力点火过程的复杂性,PW 公司在半物理模拟试验中进行了加力燃烧室的环境模拟,在试验环境中,直接采用发动机的喷嘴架,置于 1 个油箱中,油箱的环境压力和喷嘴架的金属温度通过计算机控制以复现飞行中的发动机状态,可以模拟高空状态燃油填充时的蒸发效应,从而对控制进行优化。

### 5.3 飞机-发动机接口模拟技术

发动机控制系统与飞机通过总线、离散量等信号进行交联。为了评估系统设计对飞机的影响,需要对飞发接口进行模拟。一些先进飞机设计了飞发一体化控制,这种情况下还应包含飞机动力学模型和模拟座舱,如有条件还应通过人在回路的方式评估发动机的控制品质。

### 5.4 传感器信号仿真技术

随着控制系统由液压机械式向数字控制转变以及信号仿真技术的成熟,在半物理仿真试验中对发动机参数模拟开始从真实物理效应的模拟转为通过电子技术模拟传感器信号,以降低试验成本,同时避免由于物理效应装置的复杂和不稳定性给仿真结果带来的偏差。传感器信号仿真装置应具备足够的稳态和动态精度,电气负载特性应能支持控制器 BIT 检测功能。

### 5.5 数据采集与处理技术

试验中的关键参数如燃油流量等应确保测量的精度,数据采集应根据测试需求设置合适的采样速率,以研究被试对象的稳态和动态特性。数据处理应对环节的动态、静态特征值、系统响应、系统稳定性、故障及故障瞬态等,按特定的性能准则和指标进行在线或离线处理,为系统性能的评定提供定量的试验分析结果。

### 5.6 故障模拟技术

故障的检测、隔离和处理是发动机控制系统的关

键功能,也是半物理模拟试验的重要内容。半物理模拟试验需要尽可能完整地模拟实际工作中可能出现的软故障、硬故障模式,充分验证系统安全性。

## 6 结束语

航空发动机控制的高复杂性和风险使得发动机数控系统的研制离不开大量仿真试验的支持,而半物理模拟试验已成为当今发动机数控系统研制必不可少的重要手段,其试验水平在一定程度上反映了控制系统的研制水平。半物理模拟试验是综合机械、液压、电子、仿真、测试等专业的多学科复杂试验,国内经过近30年的发展,初步建立了较为完整的半物理模拟试验设施,但与国际先进水平相比还有一定差距,未来需要在效应模拟的完整性、状态覆盖度、仿真模型的置信度等方面深化技术研究,提升半物理模拟试验的置信度和完整性,为发动机控制系统研制提供有力支持。

### 参考文献:

- [1] 臧军. 现代航空发动机控制技术 [M]. 北京:航空工业出版社,2014:3-5.
- [2] ZangJun. Modern aeroengine control technology [M]. Beijing: Aviation Industry Press,2014:3-5.
- [3] Borgmeyer C H.A Streamlined control system development process.[C]//New York:American Institute of Aeronautics and Astronautics,1979:79-1344.
- [3] JSSG-2007B-2007,Joint service specification guide engines, aircraft, turbine[S]. department of Defense,2007.
- [4] MIL-STD-3024, Propulsion system integrity program[S]. Department of Defense,2008.
- [5] Bowen R A. Dynamic fuel system simulator for automatic trouble Shooting.[C]//New York:Society of Automotive Engineers,1964:866d.
- [6] Barrett W J,Rembold J P.Flight test of a full authority digital electronic engine control system in an F-15 aircraft[C]//New York:American Institute of Aeronautics and Astronautics,1981:81-1501.
- [7] Smith B J,Raymond D,Zagranski.Closed loop bench testing of the next generation control system for helicopter engines.[C]//Montreal:American Helicopter Society 58th Annual Forum,2002:1041-1050.
- [8] Horling J E,Harrer R E.Closed-loop engine fuel system simulation[C]//New York:Society of Automotive Engineers,821374.
- [9] Walker J H.Testing advanced controls on a demonstrator engine[R]. AIAA-98-4031.
- [10] Rausch Christian,Lietzau Klaus. Integrated Thrust Vectored Engine Control [C]//Braunschweig:RTO AVT Symposium,2000:MP-051.
- [11] Gaertner D W. Development-share of MTU aero engines in TP400-D6, propulsion system for A400M.[C]//International Society of Airbreathing Engines,2005:1166.
- [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,2014:9-11.
- YaoHua. Full authority digital electronic control system for aeroengine [M]. Beijing: Aviation Industry Press,2014:9-11.
- [13] Rajagopalan R, Wood B C, Schryver M. Evolution of propulsion controls and health monitoring at pratt and Whitney[C]//Ohio:International Air and Space Symposium and Exposition,2003:2003-2645.
- [14] Nick Britton. Successful first test of the TP400-D6 engine control and monitoring system. [OL]<http://www.europrop-int.com/pages/news/news.htm>,2013.
- [15] Chan S W K,Davidson J R. The Development of a hardware-in-the-loop engine simulation facility [C]//New York:American Institute of Aeronautics and Astronautics,1985:85-1293.

(编辑 李华文)