

# 航空发动机分布式控制半物理仿真平台设计

徐若淞 谢寿生 彭靖波 李腾辉 赵泽平

(空军工程大学 西安 710038)

(联系电话 17795834061 E-mail 709829237@qq.com)

**摘要:**建立了某航空发动机分布式控制半物理仿真平台。发动机数学模型运行在计算机上模拟真实发动机,通过 CAN 总线技术,将其与控制计算机和智能传感器以及智能执行机构实物相连,实现闭环控制,同时利用 LABVIEW 设计了实时数据显示界面。对该半物理仿真试验系统进行试验,结果表明:该半物理仿真实验系统能有效地对该型发动机模型进行实时控制,为开展全物理的发动机分布式控制系统研究和先进控制理论在发动机分布式控制中的应用奠定了实验基础。

**关键词:**航空发动机;分布式控制;半物理仿真;CAN 总线

## 引言

近年来,航空发动机分布式控制系统因其独特的优势受到极大重视,相对于全权限数字电子控制来说,它有着减少控制系统重量、减少研制周期和设计成本、增强系统可靠性等优点,对于提高控制系统性能、实现航空发动机的多变量和高性能控制,具有十分重要的意义<sup>[1-3]</sup>。

国外航空发动机分布式控制系统的研究起步较早,比较深入,已经进入工程验证阶段,并且计划在未来 10~20 年间首先应用到大型民用客机,随后应用到较为先进的军用飞机<sup>[4-6]</sup>。而国内对于航空发动机分布式控制研究起步于 2000 年,研究内容涵盖了分布式控制系统结构设计、模型建立、控制算法设计、数据总线、网络信息调度、稳定性分析以及故障诊断等方面的研究,虽然已经取得较大的进步,但整体上与国外差距较大,还未进入工程验证阶段<sup>[7-8]</sup>。

本文介绍一种航空发动机分布式控制系统半物理仿真试验平台。基于半物理仿真试验,一方面有效地解决了全物理实验成本高和风险大的缺点,另一方面克服了纯数字仿真精度和直观性差等缺点,利用 CAN 总线技术和虚拟仪器技术,以及发动机仿真模型实现了航空发动机分布式控制系统半物理仿真实验平台,为全物理的航空发动机分布式控制系统的研制提供了非常有利的工具。

## 1 总体设计

### 1.1 工作原理

航空发动机分布式控制系统半物理仿真实验台由发动机模拟计算机、发动机控制计算机、CAN 总线、电源模块、智能装置五大部分组成。其中发动机模拟计算机运行发动机数学模型,智能传感器通过接收模型计算机中解算出的各个传感器模拟量,进行数据转换,并通过串口上传至 CAN 总线,与发动机控制计算机进行实时通讯。发动机控制计算机中接收 CAN 总线上的数字量,运行控制算法,输出控制信号至 CAN 总线,控制面板中实时显示发动机运行数据和曲线,并能够在控制面板中进行控制器参数调整、故障模拟、通讯检测等操作。智能执行机构从 CAN 总线中接收控制信号,以模拟量信号输出至发动机模拟计算机中进行发动机转速控制。整个系统用于模拟发动机整个起动与控制过程,从而对控制规律以及控制算法进行深层次的实验和研究。

如图 1 中所示,整个分布式控制系统中智能装置包括 7 个智能传感器和 3 个智能执行机构,智能传感器包括:智能大气温度传感器、智能燃气温度传感器、智能大气压力传感器、智能滑油压力传感器、智能压气机后总压传感器、智能自由涡轮转速传感器和智能压气机涡轮转速传感器。智能执行机

构包括：步进电机、电液伺服阀和高速比例阀。在实际系统工作中，只选择一种执行机构接入系统进行工作。

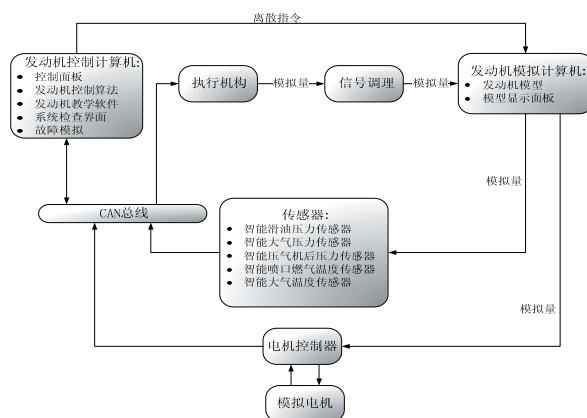


图1 系统工作原理图

发动机模拟计算机运行数学模型，在起动过程中，按下起动按钮，模拟油门杆推动过程中供油量的固定给入，直到发动机起动成功。起动过程初期，若滑油压力、转速、喷口燃气温度等在规定时间内达不到给定值则判定起动失败；若超过一定值，则判定为超温超转，起动失败。起动成功后，发动机转速稳定，通过接收来自执行机构供油量信号调节发动机压气机涡轮转速、自由涡轮转速、喷口燃气温度和压气机后总压等。

智能传感器将来自发动机模拟计算机运行的模拟量通过 CAN 总线传递给中央控制器，并在控制与监控面板上实时显示。其中智能转速传感器与转速控制器相联，转速控制器接收来自模拟计算机的转速信号，控制模拟电机运转，并且实时监控电机转速，并将模拟电机转速传递给智能转速传感器，以数字量形式通过 CAN 总线传递给发动机控制计算机。

智能执行机构接受中央控制器的数字信号，调节活门开度，将燃油量信号输出至发动机模型。

发动机控制计算机通过处理传感器数据，对开关量信号进行判定，并以离散指令形式输出至发动机模拟计算机，开关量信号包括状态选择、起动、停车、燃油电磁阀、起动机点火附件、电动起动机继电器、最小滑油压力信号器和电动机燃油压力信号器。

系统中设计了故障注入功能，通过对传感器和执行机构进行短路、断路和漂移信号的添加，实现航空发动机故障情况下的模拟。

## 1.2 硬件系统

(1)电源模块。本设计中主要需要 27V、24V 和 5V 三种不同输出范围的电源，27V 直流电源用于拉高离散指令输出电平；5V 电源，用于拉高 CAN-数字量电平以及为电机控制器供电；24V 电源，用于给智能装置、模拟电机以及信号调理设备供电。

24V 直流电源采用 MD-xxx，该电源 AC 输入为 176 ~ 264V，输出 DC 为 24V，电流 5.0A；5V 直流电源采用 JMD-xxx，该电源 AC 输入为 100 ~ 240V，输出 DC 为 5V，输出电流 2.0A。该型电源成本低、输入范围广，能够满足系统在实验室环境下的需求。在本设计中，出于对 maxon 电机能够稳定、高效运转、能够有效模拟转速的考虑，以及为使在平时的使用检测更加方便，添加了 HSPY-xxx 型直流稳压电源，该型电源能够实时显示电压、电流数值，且输出电压电流范围可调，输出电压范围 0 ~ 30V，输出电流范围 0 ~ 10A，输出功率 300W。负载调整率：电压 0.02%+ 20mV，电流 0.02%+ 20mA；设定值精度：电压 0.1%，电流 0.5%；显示值精度：电压 0.1%，电流 0.5%；设定值分辨率：电压：10mV，电流：10mA。输出精度高、范围广、可根据不同用途进行输出调节，为系统提供更好的驱动能力。

(2)智能装置本设计采用的智能装置的主要作用是对信号的处理以及实现与 CAN 总线的通讯。即

将接收到的传感器模拟量转化为数字量，通过 CAN 总线上传至发动机控制计算机以及通过 CAN 总线接收来至上位机的控制信号并转化为模拟量，经信号调理、A/D 模数转换传递给发动机模拟计算机。

智能装置采用 K85 系列 CAN 总线模块,硬件上采用 ARM7 作为 CPU 处理单元,CPU 上集成 CAN 控制器，提高了产品的集成度和可靠性；收发器采用带有隔离的高速 CAN 收发器芯片 CTM1050，隔离电压大于 1000V，芯片主要功能是将 CAN 控制器的逻辑电平转换为 CAN 总线的差分电平并且具有 DC2500V 的隔离功能及 ESD 保护功能。工作温度为-10℃ ~ 55℃，能够满足工业级技术要求。

(3)转速模拟装置。电机控制器采用 ACJ-xxx，该型电机控制器能够通过模拟电压控制，电压输入范围为-10 到 10V，能够实时控制电机转速并实时上传至 CAN 总线以供上位机读取。支持 CAN 总线和 RS-232 通讯，通过 CME2 自带软件对电机控制器进行参数配置以及通讯总线地址的选取。工作额定电压为 5V。

模拟电机为 ECX-xxx，该型电机通过电机控制器控制，最高转速为 80000rpm。工作额定电压为 24V。

(4)通讯模块。信号调理设备：发动机接收执行机构传输的模拟量以及智能传感器接收发动机模拟计算机输出的模拟量都需要进行信号调理，但由于 K85-CAN 具有多种量程可供选择，能够直接输入模拟量数据。系统中为三个执行机构通道配置信号调理设备，对模拟量电压/电流进行调理，满足发动机模拟计算机输入要求。

D/A 和 A/D 模块:发动机模拟计算机通过 D/A 模块将发动机模拟计算机计算出来的参数转化为 0 ~ 10V 的模拟量输出；A/D 模块将发动机控制信号模拟量转换为数字量传递给模拟计算机。本设计中采用 PCI-xxx(8 通道)模拟量输出卡和 PCI-xxx(4 通道)模拟量输入卡，该输入输出卡为非隔离的具有多通道的 PCI 模拟量卡，且每个通道都带有 16 位的双缓冲 ADC。PCI-xxx 输出电压设定 0 ~ 10V，分辨率  $10/2^{16}$ ，满足系统对精度的需要。

CAN 总线 PCI 接口通讯卡：用于 CAN 总线与 PC 之间的通讯。

1.3 软件系统

本设计主要采用了 LABVIEW 与 Simulink 两种软件进行整个系统的搭建。LABVIEW 作为一款唯一的图形化软件集成开发平台，具有系统研发周期短、易于上手等优点，但对于某些复杂的数学或逻辑运算，仅仅使用图形和连线进行过程描述就显得过于繁琐且易于出错，而 MATLAB 具有强大的数学和逻辑运算功能，Simulink 是 MATLAB 中非常重要的一部分，无需大量书写代码就能够快速建立复杂系统模型。本系统将两者混合编程，能够取长补短，发挥两者优势。利用 MATLAB/Simulink 进行底层程序设计，LabVIEW 设计系统控制平台，实现基于控制平台的系统工作过程的可视化和可操作化。

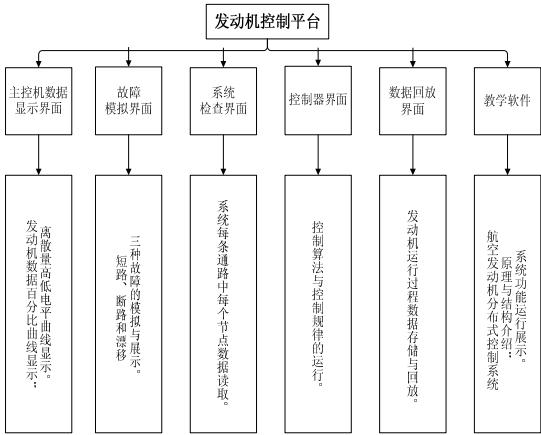


图 2 发动机控制平台软件与功能介绍

本系统设计的监控平台基于 LABVIEW 与 Simulink 搭建了发动机分布式控制平台, 实现了系统检查、发动机运行过程实时显示、故障模拟、转速控制、数据存储回放和软件教学 6 个方面的功能设计, 如图 2 所示。提供了人机交互平台, 易于操作和使用, 使整个过程更加可视化和可操作化。仿真平台显示界面如图 3 所示。

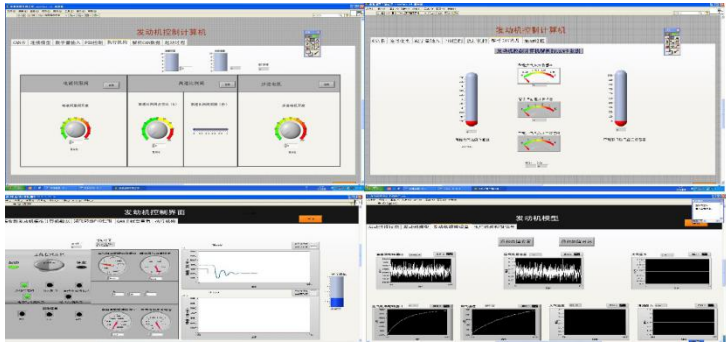


图 3 仿真平台显示界面

## 2 关键技术

### 2.1 建立某型发动机数学模型

整个半物理试验台就是通过模型计算机模拟真实发动机。模型计算机中的发动机模型与真实发动机的拟合程度决定了半物理仿真实验平台的仿真度。本系统主要采用递推极大似然法对小型涡轴发动机进行模型辨识。极大似然法是一类概率性的贝叶斯估计方法, 它根据观测数据和未知参数一般都具有随机统计特性这一特点, 通过引入观测量的条件概率密度或条件概率分布, 构造一个以观测数据和未知参数为自变量的似然函数——极大化似然函数, 以观测值出现的概率最大作为估计准则, 获得系统模型的参数估计值[9-10]。而所谓递推极大似然法就是利用每观测到一次数据就递推计算一次的极大似然估计解算方法[11-12]。模型辨识结构如图 4 所示。

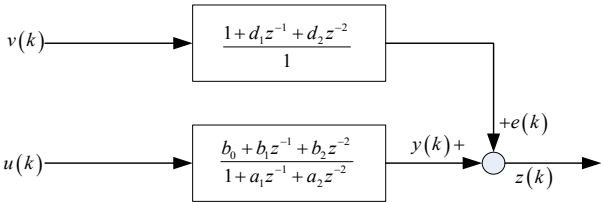


图 4 发动机模型辨识结构

在相同系统输入的情况下发动机及其所辨识模型的响应曲线(红色曲线代表发动机试车曲线, 蓝色代表辨识模型的响应曲线), 如图 5 所示, 限于篇幅, 只展示部分辨识结果。辨识结果的拟合度均在 97%以上, 有效的验证了该模型的有效性。

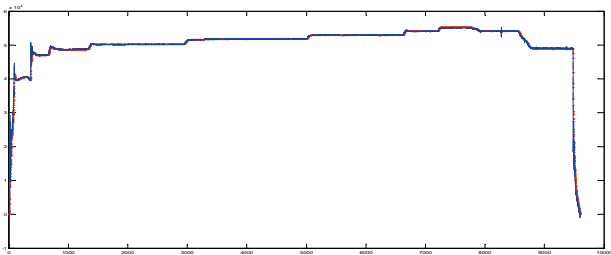


图 5 压气机涡轮转速辨识模型响应曲线

2.2 CAN 总线技术

航空发动机分布式控制系统中，中央控制器(EEC)需要实时准确地获取发动机的状态信息以及能够及时有效发送控制信号。这就对分布式网络中数据传递的及时性和准确性提出了较高的要求。本系统选取了 CAN 总线作为通讯总线。

CAN 总线，又称为控制器局域网络，是一种多主总线[13-16]，通讯速率可达 1MB/S，最远通讯距离可达 10KM(5Kbps)。CAN 总线连接示意图如图 6 所示。

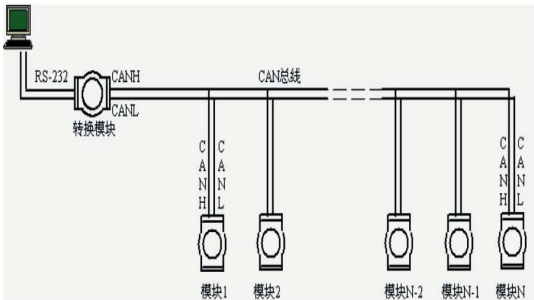


图 6 CAN 总线连接示意图



图 7 CAN 总线标准帧示意图

本系统中采用 K85 系列测控模块实现传感器数据与 CAN 总线通讯以及 CAN 总线命令与执行机构之间的传递。符合 CAN2.0B 标准帧协议，11 位标识符中高四位定义为功能码(Function Code)，不同的功能码表示不同的功能，低 7 位为节点地址(Node-ID)。

如图 7 所示为 CAN 传输协议标准帧示意图。FF=0 为标准格式，FF=1 为扩展格式(协议中固定为 0)，RTR=0 为数据帧。RTR=1 为远程帧(协议中固定为 0)，DLC 为本帧有效数据字节个数，可填入 0 ~ 8，0 ~ 8 表示本帧无后跟数据字节。约定长度数字超过 8 后，0x09 表示有后续帧，0x0A 表示本帧为连续帧的最后一帧。

功能码定义如表 1 所示

表 1 功能码定义

功能码	功能
0000	保留
0001	广播指令(主节点)
0010	主节点发送从节点配置信息
0011	主节点请求从节点配置信息
0101	主节点请求单通道输入数据(指定)
0110	主节点请求全通道输入数据(全部)
0111	主节点发送单通道输出数据(指定)
1000	主节点发送全通道输出数据(全部)
1001	主节点请求全通道输出数据(全部)
1010	主节点发送计数清零
1011	保留
1100	保留
1101	保留
1110	状态返回指令
1111	保留

2.3 LabVIEW 和 MATLAB 之间的无缝集成

本设计主要采用了 LABVIEW 与 Simulink 两种软件进行整个系统的搭建。因此，在设计控制面板过程中，需要源源不断的调用 MATLAB 中的程序，实现两个软件之间的集成连接是系统正常工作的关键。Simulation Interface Toolkit(仿直接口工具包)是一款能够为 LabVIEW 用户界面提供 Simulink 中模型调用接口的工具。在前面板中，用户可以对模型参数进行操作以及实时观测模型运行数据。Simulink 模型和 LabVIEW 用户界面可以在同一台计算机，也可以在不同的计算机运行，LabVIEW 通过 TCP/IP 与 Simulink 交换数据。利用 SIT 工具箱，既可以将位于一台主机上的多个 VI 程序调用同一个 Simulink 模型，也可以将一个 VI 程序与同一台计算机上的多个 Simulink 模型建立联系。

利用 RTW(Real-Time Workshop)将 Simulink 模型文件或 mdl 文件转换为动态数据连接库文件，这样 SIMULINK 模型就可以在 Real-Time target 上运行，且能够被 LabVIEW 调用。RTW 工作原理就是将 Simulink 文件或 mdl 文件转化为 C 语言，再利用 Microsoft Visual C++对 C 语言进行编译，生成 DLL 文件供 LabVIEW 调用。同时 SIT 工具箱对 DLL 文件生成模型 VI 文件。生成的模型 DLL 文件包含原始 Simulink 文件的全部方面，因此在调用时无需 Simulink 的运行。

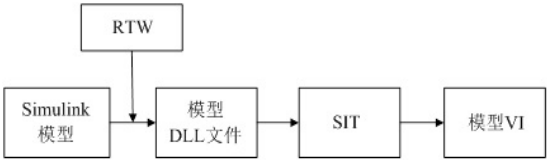


图 8 Simulink 模型转化过程

SIT Connection Manager Dialog Box(SIT 连接管理对话工具箱)能够将 LabVIEW 界面中控制器和指示器与 Simulink 中参数等一一联系起来，随后 SIT 工具箱自动生成代码块(The block diagram code)，将 VI 程序与 Simulink 模型建立关联。工作原理如图 9 所示。

在实时模块(Real-Time Module)中，用户控制界面程序 VI 通过 SIT Server 与模型 VI 文件通讯，对模型 VI 文件中参数修改以及实时数据读取。实时模块的优点就是扩展 TCP 的功能，使其能够和网络化的实时设备进行通讯，SIT 工具箱为用户控制界面程序 VI 和模型 VI 配置了 TCP/IP 通讯协议，并且 TCP/IP 与 Real-Time FIFOs(First Input First Output)共同工作，使得整个调用过程更加清晰和准确，并且不会对全局调用过程产生影响。整个过程通过 SIT 工具箱自动完成，方便简单，易于操作，实现了 LabVIEW 和 MATLAB 之间的无缝集成。

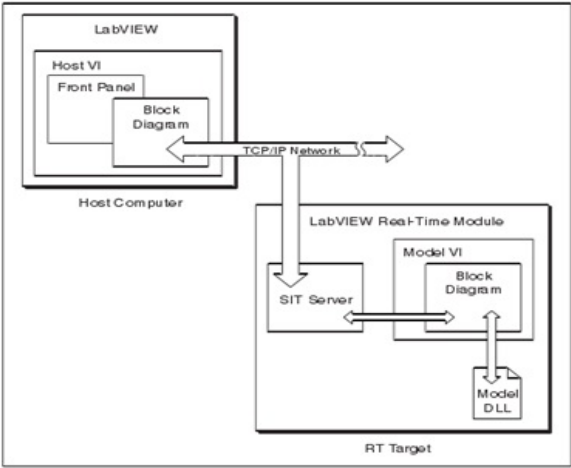


图 9 SIT 工作原理



### 3 系统仿真试验与分析

航空发动机分布式控制半物理仿真试验系统就是将发动机数学模型、智能传感器、控制计算机、智能执行机构连接在一起,由控制计算机中的控制器完成对模拟发动机供油量的闭环调节,从而实现所需要的控制计划。

在  $H=10\text{Km}$  的状态下,选择发动机的启动模式,控制计划为  $W_f \rightarrow f(n_1, n_2, T_4^*, P_3)$ , 其中  $W_f$  为发动机供油量。 $n_1$  为低压转子转速,  $n_2$  为高压转子转速,  $T_4^*$  为喷口燃气温度,  $P_3$  为压气机后压力。仿真给定控制规律为  $W_f \rightarrow n_2 = \text{const}$ ,  $n_2$  转速为 30000 转/分,利用 PID 控制方法对  $n_2$  转速进行控制,经过参数整定,其比例系数为 5,积分系数为 1,微分系数为 5,仿真结果如图 9,其中上方的响应曲线为  $n_1$  转速与时间曲线,下方为  $n_2$  转速与时间的曲线。

从图 10 中可以看出,在给定  $n_2$  转速之后,控制器能够迅速调节供油量使  $n_2$  达到给定值,调节时间经计算为 60ms,且静态误差的平均值为 56.3 转/分,仅为给定值的 0.19%,由于供油量稳定,  $n_1$  转速也保持稳定。结果表明该航空发动机分布式控制半物理仿真试验平台能够满足给定的要求对发动机进行控制。

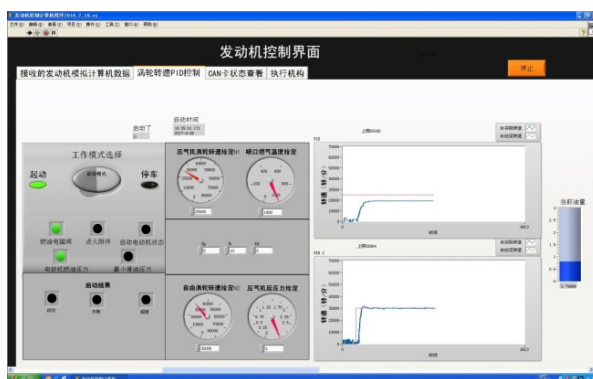


图 10 仿真结果图

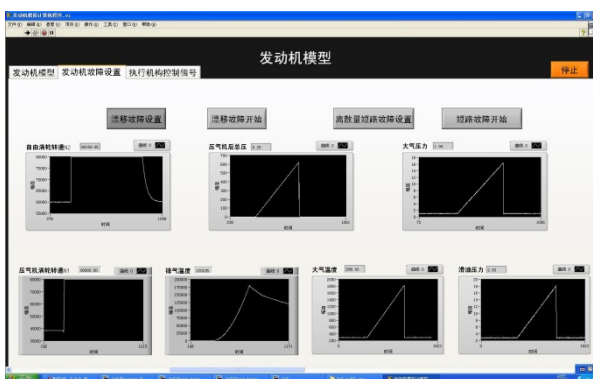


图 11 漂移故障模拟图

图 11 表示了对发动机传感器漂移故障的模拟仿真,设漂移的斜率为 1,该仿真图较为真实的反映了漂移故障。

### 4 结语

基于 CAN 总线技术,成功设计完成了航空发动机分布式控制系统的半物理仿真平台,该平台具有以下特点:用户界面具有良好的人机交互性,可扩展编程,能满足不同的测控需求,同时通过更换

控制器和发动机的数学模型可以进行各种类型发动机的半物理控制仿真实验。通过实例仿真,该系统能够实现对发动机供油量的闭环控制,为发动机分布式控制规律和控制方法研究以及数学模型验证分布式控制系统的开发提供了良好的实验手段,为实现发动机的全物理分布式控制打下了基础。

## 参考文献

- [1] H.A. Thompson , H. Benitez-Perez , D. Lee and et al. A CAN-bus-based sagely-critical distributed aero-engine control systems architecture demonstrator[J]. Microprocessors and Microsystems. 1999, 23.
- [2] 刘大响,程荣辉. 世界航空动力技术的现状及发展动向[J]. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(5): 490- 496.
- [3] LIU D X, CHENG R H. The Present Situation and Development Trend of World Aviation Power Technology[J].Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(5): 490- 496.
- [4] 闫月亮,董照飞.航空发动机控制发展趋势及新技术浅析[J].国际航空杂志, 2006, 7:78-80.
- [5] YAN Y L, DONG Z F. Aviation Engine Control Development Trend and New Technology Analysis[J].The International Airline Magazine, 2006,7:78-80
- [6] Mackey J.,Krasowski,M., Prokop N. High-Temperature Pressure Sensor Using Optical Stress Birefringence for Distributed Engine Control[C]. 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. AIAA 2009-4974, 2009.
- [7] Shaffer P L. Distributed Control System for Turbine Engines[J].Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, January, 1999, 121:102-107.
- [8] Mehrdad P, Marion M. Distributed Control of Turbofan Engines[R].AIAA-2009-5532,2009.
- [9] 郭迎清,章泓. 航空发动机分布式控制系统综述[J].航空发动机, 2003, 29(3):52-55.  
GUO Y Q, ZHANG H. The Review of [10] Aeroengine Distributed Control Systems[J]. The Aeroengine, 2003, 29(3):52-55.
- [11] 黄金泉,徐科.航空发动机分布式控制系统结构分析[J].航空动力学报, 2003,18(5):698-704.HUANG Q Q, XU K. The Structure Analysis of Aeroengine Distributed Control Systems[J].Journal of Aerospace Power, 2003,18(5):698-704.
- [12] K.S. Namenda, K. Parthasarathy. Identification and control of dynamical system using neural networks .IEEE Transaction on Neural Networks, 1990, 1(1):4-27.
- [13] 李严俊,张科.系统辨识理论及应用[M].北京:北京航空航天大学, 2002.LI Y J, ZHANG K. The System Identification Theory and Application[M].Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002.
- [14] 刘兴堂.现代辨识工程.北京:国防工业出版社, 2003.LIU X T .The Modern Identification Engineering. Beijing: National Defense Industry Press, 2003.
- [15] 陈亮,郭迎清.分布式控制系统中 CAN 总线通讯性能改进方法[J].科学技术与工程, 2011,11(30):7573-7576.CHENG L, GUO Y Q. The CAN Bus Improvement Method in Distributed Control System[J].The Science Technology and Engineering, 2011,11(30):7573-7576.
- [16] Fletcher TR. Convenient airborne MIL-STD 1553 multiplex data bus data acquisition system[J].Canadian Aeronautics and Space Journal, 1993,39(4):185-190.
- [17] 牛跃听.CAN 总线嵌入式开发:从入门到实践[M].北京:北京航空航天大学出版社, 2012.NIU Y T. The Bus Embedded Development, From Entry to Practice[M]. Beijing: The Press Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [18] Mehrdad P, Marion M. Distributed Control of Turbofan Engines[R].AIAA-2009-5532,2009.
- [19] Thompson H A, et al. Gas Turbine distributed aeroengine control systems architecture demonstrator ,Microprocessors and Microsystems,1999,23:345-355