

# 涡扇发动机故障诊断硬件在回路实时仿真平台

郭迎清<sup>1</sup>, 冯健朋<sup>2</sup>, 张书刚<sup>1</sup>

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

(2. 中航工业西安航空计算技术研究所 第18研究室, 西安 710119)

**摘要:** 硬件在回路仿真是发动机故障诊断算法由理论转向实际工程应用的重要阶段,但目前航空发动机故障诊断算法的研究多数处于软件数字仿真阶段。构建民用涡扇发动机故障诊断算法硬件在回路实时仿真验证平台,开发考虑健康退化的民用涡扇发动机多维调度分段线性化模型,分析并模拟仿真民用涡扇发动机的四类典型常见故障。经过对相关诊断算法进行实验验证,表明该平台及使用的模型和方法都是行之有效的,具有一定的工程使用价值。

**关键词:** 民用涡扇发动机;故障诊断;硬件在回路实时仿真;分段线性模型;健康参数

**中图分类号:** V235.21

**文献标识码:** A

## Hardware-in-the-loop Real-time Simulation Platform of Civil Turbofan Engine Fault Diagnosis

Guo Yingqing<sup>1</sup>, Feng Jianpeng<sup>2</sup>, Zhang Shugang<sup>1</sup>

(1. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. No. 18 Research Division, AVIC Xi'an Aeronautics Computing Technique Research Institute, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** Hardware-in-the-loop real-time simulation is an important stage of the engine fault diagnosis algorithm shift from theory to practical engineering applications, but the study remains mostly in the software simulation stage. A hardware-in-the-loop simulation platform of civil turbofan engine health diagnosis is constructed. The multi-schedule piecewise linear model with health parameters and faults simulation method in hardware platform are developed. The health diagnosis algorithm is used to the simulation. The results show that the platform and the use of models and methods are effective and of some engineering application value.

**Key words:** civil turbofan engine; fault diagnosis; hardware-in-the-loop (HIL) real-time simulation; piecewise linear model; health parameters

## 0 引言

航空发动机是一个高复杂、可修复的多部件系统,在高温、高压、高转速、高负荷的苛刻条件下长时间反复工作<sup>[1]</sup>,其任何故障都威胁着飞机的安全,所以及时、准确地对发动机进行故障诊断对保证飞行安全、提高维修经济效益具有重要的意义。

近年来,关于航空发动机故障诊断的研究取得了很大的进展,出现了很多不同种类的故障诊断算法。而仿真验证是检验一种故障诊断算法必不可少的过程,特别是硬件在回路仿真是将故障诊断算法由理论推向实际的重要步骤,因此开发故障诊断算法硬件在回路实时仿真平台具有重要的工程意义。

在发动机控制系统研制过程中,国内外已经出现了很多关于通用发动机数控系统快速原型化仿真平台的研究<sup>[2-3]</sup>,有效解决了控制系统算法数字仿真到半物理仿真的快速无缝转换,上述研究对故障诊断仿真平台开发具有一定的借鉴作用。李睿

等<sup>[4]</sup>提出的军用发动机传感器故障诊断仿真平台只针对传感器故障,缺少一定通用性。郭迎清等<sup>[5-6]</sup>对发动机状态监控平台提出了完整的发动机状态监控系统的结构。这些研究对开发完整的故障诊断硬件实时仿真平台有很好的借鉴作用。

张书刚等<sup>[7]</sup>提出并设计了一种用于航空发动机在线气路故障检测和隔离、性能健康监测、参数估计的综合诊断结构及相关算法。为了验证该综合诊断结构和诊断算法的实时性和工程适用性,本文以某型民用大涵道比涡扇发动机为研究对象,构建民用涡扇发动机故障诊断硬件在回路实时仿真验证平台,并提出一种可应用于硬件在回路实时仿真的考虑健康退化的多维调度发动机分段线性化模型。针对发动机故障诊断算法验证的需求,在硬件仿真平台环境下模拟仿真发动机的四类常见故障。

## 1 仿真平台软硬件总体设计

民用涡扇发动机故障诊断实时仿真平台由两台性能优异的工控机、一台 PC 兼容机,以及配套的数据采集卡和网络通讯设备组成。

根据民用涡扇发动机故障诊断验证系统的实际需求,构建的民用涡扇发动机故障硬件在回路实时诊断仿真平台的软硬件结构框架如图 1 所示。仿真平台实物如图 2 所示。

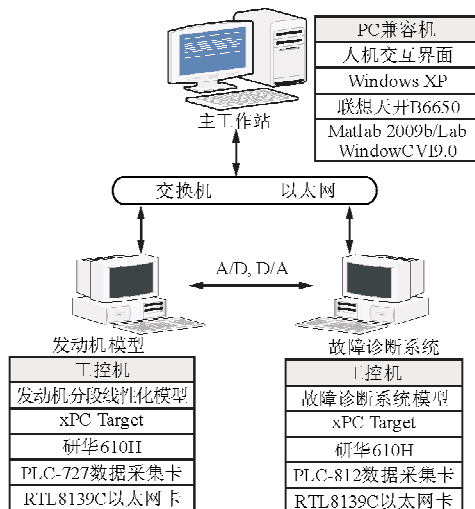


图 1 仿真平台的软硬件框架

Fig. 1 Software and hardware structure of simulation platform

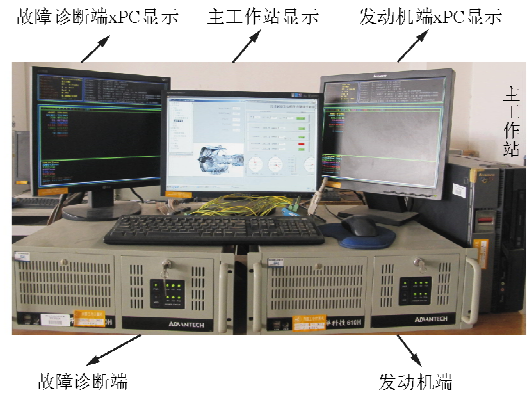


图 2 仿真平台实物图

Fig. 2 Actual device of simulation platform

仿真发动机装置由一台性能优异的工控机、采集卡等 I/O 设备构成,其中运行 xPC 实时目标系统,加载民用涡扇发动机分段线性化模型程序,完成发动机部分的性能仿真和故障状态的模拟。

故障诊断系统也是由一台性能优异的工控机和采集卡等 I/O 设备构成,运行 xPC 实时目标系统,加载故障诊断算法程序,完成发动机故障状态的实时诊断。

主工作站是一台普通 PC 兼容机,操作系统为 Windows XP。在该平台上运行 MATLAB 软件,其主要功能是在仿真前进行发动机的建模与分析,故障诊断系统开发,软件在回路仿真,目标机代码生成、编译、链接、下载。在仿真过程中,通过虚拟仪器软件 LabWindows/CVI 对仿真发动机和诊断系统进行实时监控、故障加入、诊断结果显示、数据记录等,以及在仿真结束后对数据进行后期处理工作。同时,该工作站完成对 xPC 目标系统的实时内核配置、主机与目标机的调试环境建立。在整个仿真平台中,应用操作任务在工作站平台上完成。

## 2 仿真平台实现

### 2.1 工作站及仿真平台工作流程

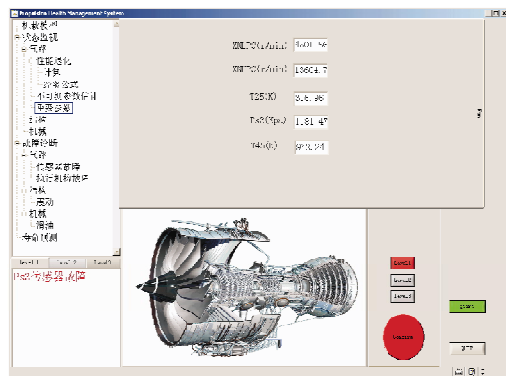
工作站安装 MATLAB 和 LabWindows/CVI 软件,利用 MATLAB/Simulink/RTW 进行故障诊断算法的开发、软件仿真以及自动代码生成。RTW 是 MATLAB 的重要组成部分,直接从仿真模型产生优化的、可移植的和个性化的代码,并根据目标系统配置自动生成多种环境下的可执行程序<sup>[8]</sup>。LabWindows/CVI 进行故障诊断算法硬件实时仿真平台操作界面的开发<sup>[9]</sup>,可通过软件功能

来实现数据采集、分析、控制和显示。由于丰富的库函数、方便开发 GUI 界面等优点,使其开发效率更高、代码出错率低,因而适合作为发动机故障诊断算法硬件实时仿真平台操作界面的开发环境。

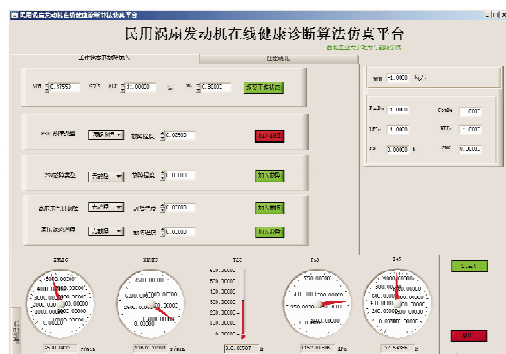
民用飞机涡扇发动机故障诊断算法硬件在回路实时仿真验证的步骤如下:

(1) 利用 MATLAB/Simulink 下的发动机模块和相关模块开发故障诊断算法,进行软件在回路仿真与验证。仿真达到要求后,将发动机模块和诊断模块分离,添加已封装为 S 函数的数据采集卡驱动;利用 MATLAB 下的 RTW 功能分别将发动机模块和诊断模块自动生成标准 C 代码,并编译成可以在 xPC 目标下实时运行的可执行程序。

(2) 通过建立的 TCP/IP 协议通讯方式下载到已经搭建好的 xPC 目标机,同时利用 xPC 目标浏览器或者 LabWindows/CVI 开发的仿真平台界面进行仿真过程监控、调整参数、故障加入等操作。LabWindows/CVI 环境下开发的仿真平台操作显示界面如图 3 所示。



(a) 发动机端



(b) 故障诊断端

图 3 仿真平台操作显示界面

Fig. 3 Interface of the simulation platform

### 2.2 仿真发动机部分

航空发动机是一个复杂的非线性系统,其特性可用如下的函数表示:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, h, u, e) \\ y &= g_y(x, h, u, e) + v \end{aligned} \tag{1}$$

式中:  $x, h, u, e$  分别为状态变量、健康参数、控制指令、飞行环境参数;  $y$  为测量输出。

张书刚等<sup>[10]</sup> 基于 GasTurb 软件开发了 MATLAB/Simulink 下的民用大涵道比涡扇发动机非线性模型,本平台使用基于此非线性模型的分段线性化模型。该线性化模型与部件级的非线性模型相比,保留了发动机基本的性能特征和健康退化特征,提高了实时性,也方便后期控制算法的开发。

航空发动机气路故障模拟可以通过调整气路部件健康参数实现。对于普通基于转速调度的分段线性化模型,难以模拟发动机健康状况出现退化或者故障的情况。尤其是当性能退化较大时,线性模型与非线性模型输出会出现明显的偏差。本文通过增加对发动机高压压气机和高压涡轮健康参数的调度,实现对发动机高压压气机和高压涡轮故障及退化的仿真模拟。假设  $H$  为 11 km、 $Ma$  为 0.8、发动机功率为 90%,在第 20 s 时刻,发动机高压压气机效率降低 4%,增加了健康参数调度的分段线性化模型、非线性模型、普通分段线性化模型输出风扇转速的对比,如图 4 所示。

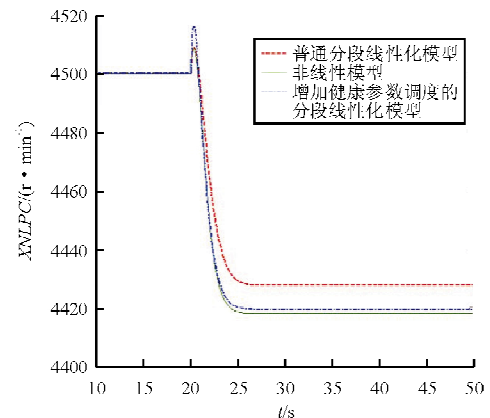


图 4 分段线性化模型与非线性模型输出的对比

Fig. 4 Comparison of piecewise linear model and nonlinear model output

从图 4 可以看出:增加健康参数调度的分段线性化模型输出与非线性模型基本一致,可以完整模

拟发动机气路故障或者退化的情况;而普通分段线性化模型与非线性模型的输出偏差过大,不能真实地反应出发动机气路退化。按照发生故障时部件效率与流量系数之间的关系<sup>[11]</sup>,在分段线性化模型建立时可以将部件效率和流量系数当作一个调度量处理。

为了满足发动机性能仿真、故障模拟、故障诊断等要求,分段线性化模型设定具体的输入量和输出量,如表 1 所示。民用涡扇发动机的故障通常包括气路部件故障、传感器故障、执行机构故障、FA-DEC 故障、燃油系统故障、滑油系统故障。选取民用涡扇发动机常见的四类故障:传感器 Ps3 故障、执行机构 VSV 故障、部件 HPC 故障、部件 HPT 故障进行研究<sup>[12]</sup>。故障具体实现如表 2 所示。

表 1 仿真发动机模型的输入量及输出量

Table 1 Input and output of the engine model

类型	物理量	符号
输入量	燃油油量	WFM
	风扇效率系数	eFAN
	风扇流量系数	fFAN
	增压级效率系数	eBST
	增压级流量系数	fBST
	高压压气机效率系数	eHPC
	高压压气机流量系数	fHPC
	高压涡轮效率系数	eHPT
	高压涡轮流量系数	fHPT
	低压涡轮效率系数	eLPT
	低压涡轮流量系数	fLPT
	可调静子叶片角度	VSV
	增压级放气活门开度	VBV
	输出量	风扇转速
高压压气机转速		XNIIPC
高压压气机进口总温		T25
高压压气机进口总压		P25
高压压气机出口总温		T3
高压压气机出口静压		Ps3
低压涡轮进口总温		T45

表 2 故障模拟

Table 2 Fault simulation

单位:%

故障类型	VSV 故障		HPC 故障		HPT 故障		Ps3 故障	
	偏差	效率系数	流量系数	效率系数	流量系数	效率系数	流量系数	偏差
小故障	2.50	-1.50	-1.50	-1.50	1.50	1.50	2.33	
中故障	5.80	-3.00	-3.00	-3.00	3.00	3.00	6.67	
大故障	10.00	-6.00	-6.00	-6.00	6.00	6.00	10.00	

### 2.3 故障诊断部分

当软件仿真达到要求后,通过系统分离步骤,构建完成的故障诊断端 Simulink 模型如图 5 所示,包括故障诊断模块、PCI-812PG 采集卡 D/A 驱动模块、信号映射模块等。PCI-812PG 模块即封装为 S 函数的数据采集卡驱动程序,故障诊断部分利用这一模块完成发动机模型数据的实时采集,然后经过一定比例将电压值放大为代表实际物理意义的传感器采集的信号,传递给故障诊断部分完成故障诊断。诊断结果可以通过 xPC 提供的 xPC Scope 实时显示在 xPC 目标机的屏幕上,同时平台监控界面也会显示故障信息,也可以通过 xPC 目标浏览器导出数据文件,进行离线分析。

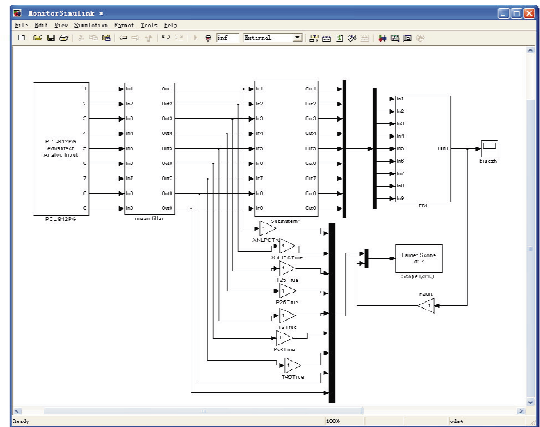


图 5 故障诊断端 Simulink 模型

Fig. 5 Simulink model of fault diagnostic module

由于平台采用了统一的模块化设计,在进行不同故障诊断算法验证时,只需替换 FDI 部分,可以使该平台成为通用的、适应于各类故障诊断算法的发动机故障诊断装置硬件在回路仿真验证平台。

### 3 故障诊断算法仿真验证

本文采用基于卡尔曼滤波器与神经网络的融合算法确定发动机的故障类型<sup>[13-14]</sup>,故障诊断算法中故障类型标志的设定,如表 3 所示。

表 3 故障类型标志

Table 3 Fault type flag

故障类型	标志	故障类型	标志
无故障	0	HPC 故障	3
Ps3 故障	1	IIPT 故障	4
VSV 故障	2	异常	5

基于卡尔曼滤波器与神经网络融合的故障诊断原理如图 6 所示。卡尔曼滤波器用于故障检测及滤波残差 WSSR 的产生,以 WSSR 为故障指示信号,通过比较是否超出门限值检测故障。当检测出故障后,启动 BP 神经网络相关模块,进行故障定位。由于滤波器滤波残差和故障信息相关,不同的滤波残差和故障之间存在着严格的气动热力学关系,通过 BP 神经网络映射滤波残差和故障之间的非线性关系,可以得到需要的故障定位结果<sup>[13-14]</sup>。

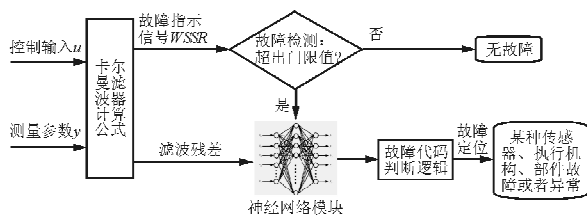
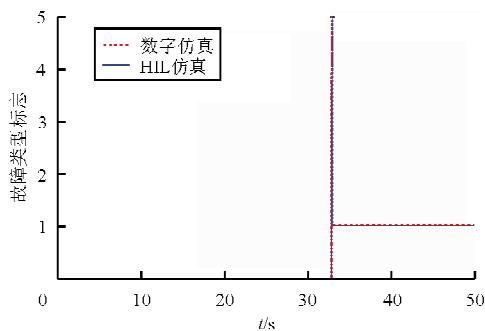


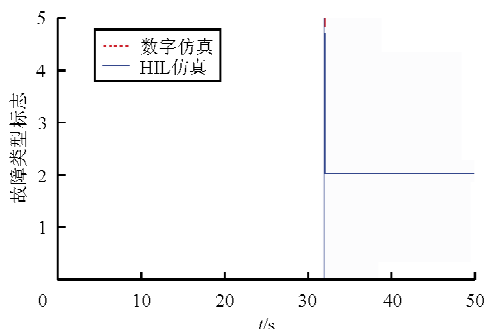
图 6 基于卡尔曼滤波器和神经网络的融合诊断算法

Fig. 6 Fusion diagnostic algorithm based on Kalman filter and neural networks

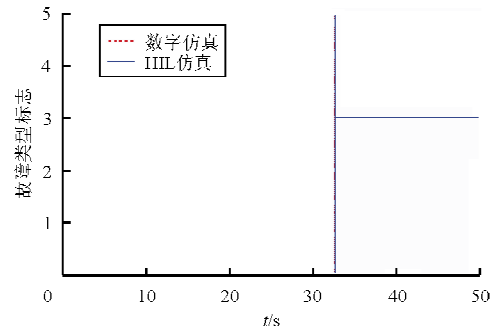
以上述算法为例,在本文研制的实时仿真平台进行验证。仿真开始后,通过仿真平台操作界面加入设定的故障。四种典型故障在硬件在回路与软件环境下仿真的结果对比,如图 7 所示。两种环境下都在仿真 30 s 时刻加入故障。



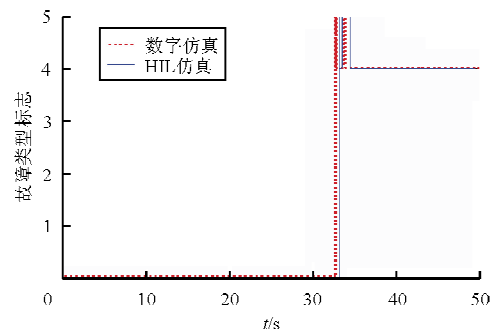
(a) Ps3 传感器故障



(b) VSV 故障



(c) IIPC 故障



(d) HPT 故障

图 7 软件环境和硬件在回路环境下诊断结果对比  
Fig. 7 Diagnostic results comparison in Simulink and HIL environments

以图 7(d) 高压涡轮故障为例,软件仿真故障隔离时间为 2.87 s,硬件在回路实时仿真故障隔离时间为 3.25 s。诊断过程中,故障诊断系统先是检测到异常,故障标志显示为 5,经过进一步的分析隔离,最终确定故障类型为高压压气机故障,故障标志变为 4。故障标志从 5 到 4 反复出现,是因为不同类型或大小的故障诊断难度有差别,并且系统程序实时输出诊断结果。其他三类故障对比结果与此类似。

由仿真结果可见该仿真平台可以完成发动机故障诊断算法的硬件在回路实时仿真验证。并且在发动机采样周期 20 ms 内,程序平均执行时间为 0.277 ms,最大执行时间为 0.283 ms。表明诊断算法满足在线实时性要求。

### 4 结 论

(1) 本文建立了民用涡扇发动机故障诊断硬件在回路实时仿真验证平台,对该平台涉及的软硬件总体技术和各组成部分关键技术进行了深入研究。

(2) 开发了加入健康参数多维调度的分段线性化模型,能够准确反映发动机部件退化;采用先进的快速原型化技术实现了发动机故障诊断算法从数字仿真到硬件在回路实时仿真的无缝衔接;通过基于卡尔曼滤波器和神经网络的融合诊断算法,对四类典型故障诊断的实验,验证了诊断算法及硬件在回路平台的有效性。

(3) 本研究为航空发动机故障诊断算法的有效性检验和诊断装置工程应用实现提供了有效的途径与实验验证支持。

### 参考文献

- [1] Jaw L C, Mattingly J D. Aircraft engine controls; design, system analysis, and health monitoring[M]. USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- [2] 陆军,郭迎清,王海泉. 基于快速原型化的数控系统实时仿真平台研制[J]. 计算机测量与控制, 2009, 17(6): 1098-1101.  
Lu Jun, Guo Yingqing, Wang Haiquan. Digital electronic engine control real-time simulation platform based on rapid prototyping[J]. Computer Measurement & Control, 2009, 17(6): 1098-1101. (in Chinese)
- [3] Quinn R, Sims J. Improved turbine engine performance, responsiveness, and prognostics using model-based control in a hardware in the loop simulation[R]. AIAA-2007-5712, 2007.
- [4] 李睿,郭迎清,吴文斐. 航空发动机传感器故障诊断设计与验证综合仿真平台[J]. 计算机测量与控制, 2010, 18(3): 527-529.  
Li Rui, Guo Yingqing, Wu Wenfei. Design and verification of simulation platform for aircraft engine sensor fault diagnosis[J]. Computer Measurement & Control, 2010, 18(3): 527-529. (in Chinese)
- [5] 郭迎清,李睿,薛薇. 航空发动机状态监控系统研究[J]. 航空发动机, 2010, 36(5): 39-43.  
Guo Yingqing, Li Rui, Xue Wei. Study on aeroengine condition monitoring system[J]. Aeroengine, 2010, 36(5): 39-43. (in Chinese)
- [6] 薛薇,郭迎清,李睿. 航空发动机状态监视、故障诊断及验证[J]. 推进技术, 2011, 32(2): 271-275.  
Xue Wei, Guo Yingqing, Li Rui. Algorithm and experimental validation for condition monitoring, fault detection for gas turbine engine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2011, 32(2): 271-275. (in Chinese)
- [7] 张书刚,郭迎清,冯健朋. 航空发动机在线综合诊断结构设计及仿真验证[J]. 航空学报, 2014, 35(2): 381-390.  
Zhang Shugang, Guo Yingqing, Feng Jianpeng. Design and simulation validation of an integrated on-board aircraft engine diagnostic architecture[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(2): 381-390. (in Chinese)
- [8] 杨涤. 系统实时仿真开发环境与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2002.  
Yang Di. Real-time simulation development environment and application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002. (in Chinese)
- [9] 张凤均. LabWindows/CVI 开发入门和进阶[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2001.  
Zhang Fengjun. LabWindows/CVI entry-level and Advance [M]. Beijing: Beihang University Press, 2001. (in Chinese)
- [10] 张书刚,郭迎清,陆军. 基于 GasTurb/MATLAB 的航空发动机部件级模型研究[J]. 航空动力学报, 2012, 27(12): 2850-2856.  
Zhang Shugang, Guo Yingqing, Lu Jun. Research on aircraft engine component-level models based on GasTurb/MATLAB[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(12): 2850-2856. (in Chinese)
- [11] Simon Donald L. Propulsion diagnostic method evaluation strategy (ProDiMES) user's guide [R]. NASA TM-215840, 2010.
- [12] Kumar Aditya, Viassolo Daniel. Model-based fault tolerant control[R]. NASA CR-215273, 2008.
- [13] 姚华,单贵平,孙健国. 基于卡尔曼滤波器及神经网络的发动机故障诊断[J]. 航空动力学报, 2008, 23(6): 1111-1117.  
Yao Hua, Shan Guiping, Sun Jianguo. Fault diagnosis for gas turbine engines based on Kalman filter and neural networks[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(6): 1111-1117. (in Chinese)
- [14] 尹俊,郭迎清. 神经网络和卡尔曼滤波融合的航空发动机传感器故障诊断[J]. 计算机测量与控制, 2011, 19(8): 1936-1938.  
Yin Jun, Guo Yingqing. Neural network and Kalman filter based fusion fault diagnosis for aeroengine sensor[J]. Computer Measurement & Control, 2011, 19(8): 1936-1938. (in Chinese)

### 作者简介:

郭迎清(1964—),男,博士,教授,博导。主要研究方向:航空发动机控制与健康管埋。

冯健朋(1987—),男,硕士。主要研究方向:航空发动机故障诊断。

张书刚(1985—),男,博士研究生。主要研究方向:航空发动机控制与故障诊断技术。

(编辑:赵毓梅)