涡轴发动机燃油信号故障对策

赵 飞[1],蓝 天[2],开文杰[1]
(1.中国航发控制系统研究所,江苏无锡 214063;2. 陆军装备部驻上海地区航空军事代表室,上海 200235)

摘要:某型涡轴发动机燃油计量活门位置信号失效后,采取直接停车的处理对策。为了提高燃油系统的可靠性和安全性,设计了一种基于伺服回路校正的方法。在燃油计量活门位置信号失效后,通过在燃油伺服回路中串联1个校正器,使得校正后的通路增益为1,计算出合适的电流继续控制燃油执行机构,可避免发动机停车,实现发动机稳定控制。采用基于单点积分的扫频法,在半物理试验器上辨识出燃油执行机构的高精度数学模型,并根据数学模型设计了校正器的控制参数。在仿真模型、控制系统半物理试验器以及发动机地面试验台对增加校正器的燃油系统进行试验验证。试验结果表明:该伺服回路串联校正方法可以在燃油计量活门位置信号失效后,有效控制发动机在一定状态下稳定工作。

关键词:燃油计量活门;位置信号;故障对策;伺服回路校正器;执行机构;涡轴发动机
中图分类号:V233.7 **文献标识码:**A **doi:**10.13477/j.cnki.aeroengine.2021.05.012

Fault Accommodation of Fuel Signal for Turbine-Shaft Engine

ZHAO Fei[1], LAN Tian[2], KAI Wen-jie[1]
(1. AECC Aero Engine Control System Institute, Wuxi Jiangsu 214063, China; 2. Aviation Military Representative Office of PLA Army in Shanghai, Shanghai 200235, China)

Abstract: After the failure of the position signal of the fuel metering valve of a turbo-shaft engine, the accommodation of artificial shutdown was adopted. In order to improve the reliability and safety of the fuel system, a servo loop correction method was designed. After the position signal of fuel metering valve failed, the corrected path gain was 1 through a in series corrector in the fuel servo loop. By calculating the appropriate current to continue to control the fuel actuator, the engine shutdown could be avoided and the engine stability control could be realized. A high-precision mathematical model of fuel actuator was identified on a semi-physical tester by sweep frequency method based on single point integration, and the control parameters of corrector were designed by the model. The simulation model, the semi-physical tester of the control system and the ground test bench of the engine were tested and verified for fuel system with corrector added. The test results show that the servo loop correction method can effectively control the engine to work stably under certain condition after the position signal of fuel metering valve fails.

Key words: fuel metering valve; position signal; fault accommodation; servo loop corrector; actuator; turbo-shaft engine

0 引言

发动机数控系统的可靠性和安全性直接关系到发动机安全,数控系统故障诊断及处理对策是提高发动机可靠性及安全性的重要方法之一。故障诊断指系统对发动机异常情况的检测与分析,处理对策则是系统对于异常情况采取的相应弥补措施,从而提高系统容错能力,以保证系统安全运行,最终确保发动机安全[1-3]。通过实施数控系统的故障对策避免发动机空中停车,实现其稳定控制,能够提高发动机数控系统的可靠性和安全性。

国内外学者对故障诊断进行了深入研究[4-6]。李本威等[7]通过监测发动机部件的性能参数实现对发动机健康状态的监视,从而实现故障诊断;姜洁等[8-9]基于极端学习机算法建立离线/在线优势相结合的发动机逆模型,能够准确诊断出传感器/执行机构的故障,且有较强的实时性与适应能力;何保成等[10]建立

收稿日期:2019-12-17 **基金项目:**航空动力基础研究项目资助
作者简介:赵飞(1988),男,硕士,工程师,主要从事涡轴发动机控制系统研究工作;E-mail:453193546@qq.com。

引用格式:*赵飞,蓝天,开文杰.涡轴发动机燃油信号故障对策[J].航空发动机,2021,47(5):72-77. ZHAO Fei, LAN Tian, KAI Wenjie. Fault accommodation of fuel signal for turbine-shaft engine[J]. Aeroengine, 2021, 47(5): 72-77.*

传感器仿真模型,在航空发动机数控系统的故障分析中提供故障定位措施,同时可用于分析传感器的一般故障机理;朱子杰[11]基于卡尔曼滤波器、鲁棒滤波器以及神经网络开展全飞行包线内的发动机部件故障预测与诊断,实现传感器故障的在线检测、隔离及重构;张高钱[12]采用改进的支持向量机建立传感器故障诊断系统,实现故障诊断与预测,且具有通用性,可用于不同类型的发动机;蒋平国等[13]基于执行机构回路模型,实现快速且准确的执行机构位置传感器故障诊断,并在某型发动机全权限数字电子控制系统中进行了工程应用。在故障处理对策上,也有学者开展了相关研究。针对存在故障的涡扇发动机建立T-S模糊系统,设计反馈容错控制器,能在系统发生故障时抑制故障输入的影响[11],但缺乏工程应用实践;设计被动/主动容错控制系统,改进故障后系统切换时的过渡方式,减少了切换时系统的波动量[12];在故障发生后改变控制算法,采用不完全微分补偿的方式对执行机构位置传感器故障进行容错控制,并通过了半物理模拟试验验证[13],但可能会引起系统振荡。

本文针对某型涡轴发动机在燃油计量活门位置信号失效后采取的主动控制发动机停车的保守策略,提出一种对燃油计量活门控制回路优化的方法,在仿真模型、半物理试验器、发动机整机上进行试验验证,并对验证结果进行了对比分析。

1　执行机构控制回路组成及原理

目前,在航空发动机控制系统中,执行机构大部分采用小闭环控制回路(相对于发动机转速等大闭环控制回路而言),以提高系统稳定性和动态品质[13]。某型涡轴发动机燃油流量小闭环控制回路结构如图1所示。

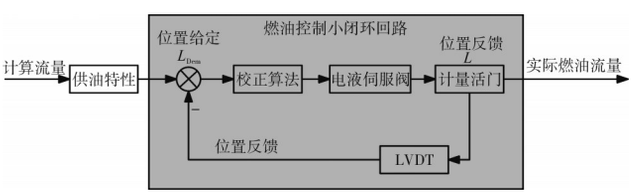

图 1　燃油计量活门控制结构

数字电子控制器根据给定条件按一定的控制律和控制算法计算出燃油流量后，先根据燃油供油装置的供油特性得到燃油计量活门的位置给定值,与燃油计量活门位置反馈信号比较后通过校正算法产生输出信号,由电液伺服阀来控制燃油计量活门的位置,最终使燃油计量活门达到给定位置,从而保证经燃油计量活门计量后进入发动机燃烧室的燃油流量等于控制需要的燃油流量。

系统通过设计合格的参数来保证燃油小闭环控制回路的动态响应足够快,在正常情况下,燃油计量活门位置反馈值可迅速跟随燃油计量活门位置给定值。若用于测量燃油计量活门位置的线位移传感器(Linear Variable Differential Transformer,LVDT)失效,使得实际的燃油计量活门位置不可知,无法形成闭环回路,不能有效地控制燃油供给,会严重影响系统的控制稳定性和发动机安全。因此,在燃油计量活门位置信号故障后,设计合理的处理对策来保证发动机运行安全就十分重要[14-16]。

2　现有故障对策分析

目前,某型涡轴发动机燃油计量活门位置信号失效的故障模式与处理对策见表1。表中序号1为位置信号单通道故障,单通道故障不影响发动机正常工作;序号2为双线圈双通道故障,其处理对策为控制发动机停车。

表1　燃油计量活门失效故障模式与处理对策

序号	故障模式	处理对策
1	单线圈	采用另一线圈值
2	双线圈	控制发动机停车

从表中可见,在燃油计量活门位置信号双线圈失效时,数控系统直接控制发动机停车。这种处理对策虽然可保证发动机安全停车,但引起的后果对直升机是十分严重甚至是致命的。

实际上,当燃油计量活门位置信号双线圈失效后,燃油执行机构并未发生故障,从发动机控制角度出发,只需要设计出一种合适的控制方法以及选取1套恰当的控制参数,计算出合适的控制电流来控制燃油执行机构,即可控制发动机处于某一稳定的状态,确保发动机安全。

3　燃油伺服回路校正改进

3.1　伺服回路校正设计

在燃油计量活门位置信号故障导致小闭环回路不可用后,从图1中可见,电液伺服阀前端缺少1个能抵消执行机构特性的控制算法。根据伺服回路校正

的原理可在“L_{Dem}→L”的前向通路中串联校正，通过串联1个能抵消执行结构特性的校正器，使得校正后的“L_{Dem}→L”前向通路增益为“1”，从而实现发动机稳定控制。由经典控制理论[17]可知，燃油执行机构可等效为1阶积分环节K/s，改进具体结构如图2所示。

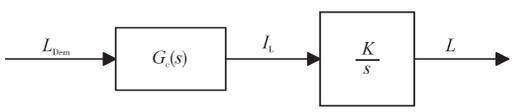

图2 伺服回路校正原理

从图中可见，校正器$G_c(s)$应满足

$$G_c(s)\cdot\frac{K}{s}=1 \tag{1}$$

则校正器的设计为

$$G_c(s)=s\cdot\frac{1}{K} \tag{2}$$

式中：K为增益系数。

由上述可知，除需引入1个微分环节以抵消积分环节中的执行机构积分特性外，还需设计1个比例环节$K_p''=1/K$以抵消执行机构的增益，使得“L_{Dem}→L”回路增益整定为“1”。同时，控制执行机构的平衡电流存在漂移，会给系统带来一定的静差，为此，需要引入弱积分环节$1/T_i''\cdot s$。此时燃油计量活门位置信号失效后的控制系统结构如图3所示，其中虚线内为伺服回路校正结构。

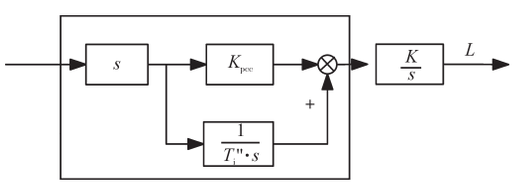

图3 伺服回路校正控制结构

3.2 伺服回路校正参数设计

在设计伺服回路校正参数时，需预先获得燃油执行机构的数学模型，本文采用扫频试验方法获取燃油执行机构的频域特性。目前应用普遍的扫频方法是快速傅里叶分析，但该技术在实际工程应用中存在精度问题(噪声影响严重)，基于频域响应的物理意义和傅里叶分析的基本定义出发，开发了基于单点积分的扫频技术。并从燃油执行机构性能验收(阶跃响应、斜坡响应等)方面进行了技术验证。结果表明，扫频获取的频域特性数学模型逼近实际特性的程度较好，具有较高的精度，能够满足先进控制算法设计对精度的要求。

采用上述扫频法，根据半物理试验对燃油执行机构的辨识结果，可得出燃油计量活门执行机构的数学模型$G(s)$为

$$G(s)=\frac{A}{s(Bs+1)} \tag{3}$$

式中：B为等效惯性值。

由此可知校正的比例系数为

$$K_p''=\frac{1}{A} \tag{4}$$

而为了消除静差引入的弱积分环节$1/\left(T_i''\cdot s\right)$，其积分效应应对稳定裕度基本无影响，通常情况下选择1个较大的时间常数Ti''即可满足要求。在试验中根据经验值选取$T_i''=2$，$K_p''=1.9$。最终伺服回路控制参数见表2。本文中，N_g指的是涡轴发动机燃气发生器转速，N_p指的是涡轴发动机动力涡轮转速。

表2 伺服回路校正控制参数

N_g/%	65	70	75	80	85	90	95	100	102
K_p''	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9
T_i''	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0

4 验证情况

4.1 数字仿真验证

使用某型涡轴发动机的数学模型进行仿真验证，分别在地面慢车状态和空中慢车状态下进行仿真试验，通过设置开关断开燃油计量活门采集信号的方式注入故障，仿真结果如图4、5所示。燃油计量活门故障仿真情况见表3。

表3 燃油计量活门故障仿真 %

系统状态	N_p波动	N_g波动
地面慢车	75～76	80～80.5
空中慢车	100～100.2	87～87.1

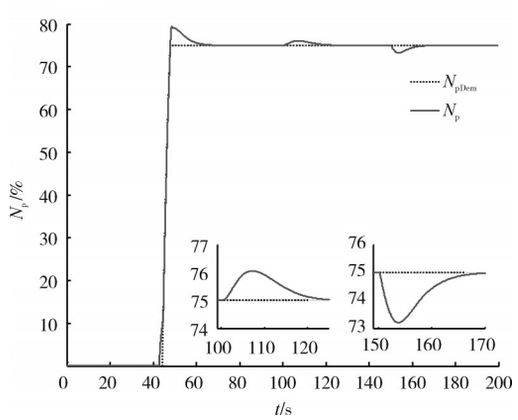

图4 地面慢车状态故障仿真(N_p响应)

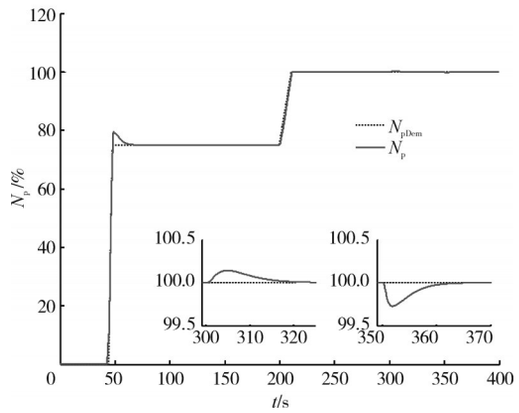

图5　空中慢车状态故障仿真(N_p响应)

从图中可见,在地面慢车和空中慢车状态下分别注入燃油计量活门位置信号故障,系统仿真结果N_p转速波动较小,满足设计要求。

4.2　半物理验证

在半物理试验器上,分别在地面慢车、空中慢车、N_g转速96%、缓慢移动总距杆、加速及减速状态下,开展燃油计量活门位置信号双通道双线圈失效故障模拟试验,试验时借助信号断连装置,对真实的燃油计量活门传感器采集信号进行断线的方式注入故障。具体情况见表4,并如图6~9所示。

表4　半物理试验器注入故障后转速波动　　%

系统状态	N_p波动	N_g波动
地面慢车	73.62~75.84	80.49~81.30
空中慢车	99.22~100.50	86.64~87.12
N_g=96%	99.49~100.26	96.13~96.44
缓慢推拉杆	98.52~101.41	88.56~100.64
加速	98.30~105.58	
减速	95.22~107.07	

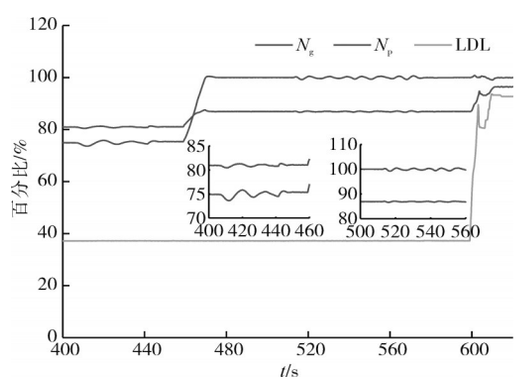

图6　改进后油针位置失效稳态过程

试验结果表明,在地面慢车、空中慢车、N_g转速96%以及缓慢推拉杆状态下注入故障,系统会存在一定程度的波动。从表4中可见,在3个稳定状态下的转速波动量较小,满足设计要求;在加减速状态下注入故障时,加速过程系统N_p转速超调5.58%,减速过程系统N_p转速超调7.07%,加减速状态波动略超出5%的设计要求。在燃油计量活门位置信号失效的情况下,该伺服回路校正控制结构的设计可以在一定程度上保证发动机稳定工作。

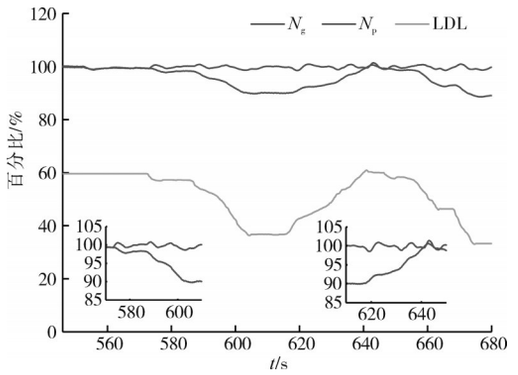

图7　改进后油针位置失效推杆、拉杆过程

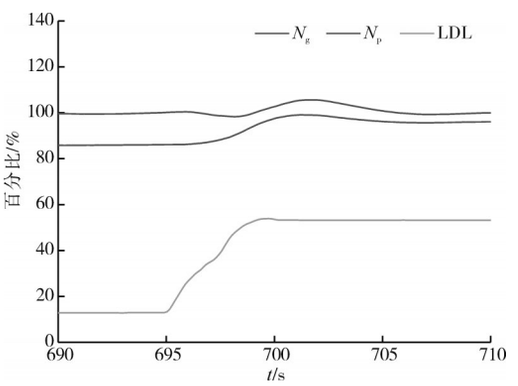

图8　改进后油针位置失效加速过程

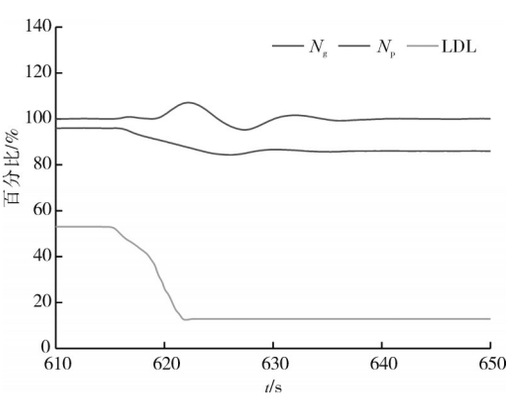

图9　改进后油针位置失效减速过程

在半物理试验中发现,当注入故障时控制规律发生切换时,会导致发动机转速大幅波动。经过分析,在故障发生前输入到电液伺服阀的控制电流由“比例+积分”环节计算,在故障发生后采取原积分项电

流不变，再加上伺服回路校正环节的计算电流，可保证故障发生时转速波动在可接受的范围内。

4.3 整机试验

采用改进后的方法在某型涡轴发动机整机台架地面慢车状态点进行了燃油计量活门位置双通道双线圈失效故障模拟试验，试验时借助信号断连装置，对真实的燃油计量活门传感器采集信号进行断线的方式注入故障。具体情况见表5，并如图10所示。试验结果表明，在地面慢车状态点注入故障时，系统会存在一定程度的转速波动，但波动量满足设计要求。

表5 整机地面慢车故障注入后转速波动 %

整机状态	N_p波动	N_g波动
地面慢车	73.78～75.13	75.44～76.80

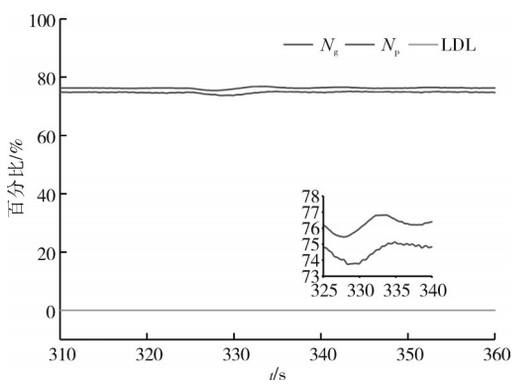

图10 改进后油针位置失效整机试验过程

4.4 仿真结果与整机试验结果分析

将数字仿真结果与整机试验结果进行对比分析，见表6，并如图11所示。

表6 数字仿真、整机试验注入故障时转速波动 %

类型	故障注入状态	N_p波动	N_g波动
数字仿真	地面慢车	75～76	80～80.5
整机试验	地面慢车	73.78～75.13	75.44～76.80

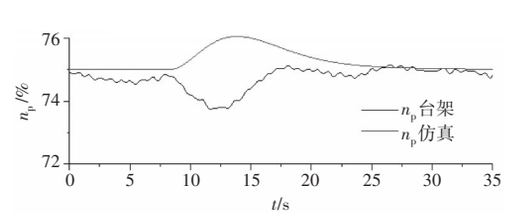

图11 数字仿真、整机试验注入故障试验对比

对比结果表明，在地面慢车状态下注入燃油计量活门位置信号故障时，系统的N_p转速存在一定幅度的波动，但相差不大，证明了改进后故障对策有效，可继续控制发动机并稳定在当前状态。从图11中可见，在注入故障后，N_p的波形变化呈相反的趋势，这是由于控制对象的负载不同造成的：在数字仿真时，负载模型是基于直升机旋翼负载特性数据建立的，但在整机试验时负载是由水力测功机（利用水对旋转的叶轮形成摩擦力矩吸收）模拟的。

5 结束语

燃油计量活门位置信号对于发动机控制甚至安全影响至关重要。本文对某型涡轴发动机燃油计量活门位置信号失效的故障模式进行了分析，提出了串联伺服回路校正的设计思路，针对该架构设计了控制参数，并进行了系统半物理试验及整机验证。验证结果表明：新设计的串联伺服回路校正方法在燃油计量活门位置信号失效后，可以继续控制发动机并稳定在一定状态。但整机台架验证不充分，仍需进行多状态的试验验证以进一步优化控制参数。

参考文献：

[1] 周东华，叶银忠.现代故障诊断与容错控制[M].北京：清华大学出版社，2000：12-15.
ZHOU Donghua，YE Yinzhong. Modern fault diagnosis and fault-tolerant control[M]. Beijing：Qinghua University Press，2000：12-15.（in Chinese）

[2] 胡昌华，许化龙.控制系统故障诊断与容错控制的分析和设计[M].北京：中国石化出版社，2002：19-23.
HU Changhua，XU Hualong. Analysis and design of fault diagnosis and fault-tolerant control of control system[M]. Beijing：China Petrifaction Press，2002：19-23.（in Chinese）

[3] 俞金寿.工业过程先进控制[M].北京：国防工业出版社，2000：8-11.
YU Jinshou. Industrial advanced process control[M]. Beijing：National Defense Industry Press，2000：8-11.（in Chinese）

[4] 姜斌.控制系统的故障诊断和故障调节[M].北京：国防工业出版社，2009：85-90.
JIANG Bin. Fault diagnosis and fault accommodation of control system[M]. Beijing：National Defense Industry Press，2009：85-90.（in Chinese）

[5] 张宝诚.航空发动机测试和试验技术[M].北京：北京航空航天大学出版社，2005：110-113.
ZHANG Baocheng. Aero engine testing and test technology[M]. Beijing：Beihang University Press，2005：110-113.（in Chinese）

[6] 黄向华.发动机数控系统智能解析余度技术[D].南京：南京航空航天大学，1988.
HUANG Xianghua. Intelligent analytical redundancy technology of aero-engine control system[D]. Nanjing：Nanjing University of Aeronautics and Astronautics，1988.（in Chinese）

[7] 李本威，胡国才，高国胜.涡轴发动机监视参数选择与诊断方法研究[J].航空动力学报，2002，17(2)：160-164.
LI Benwei，HU Guocai，GAO Guosheng. Study of selecting parameters

and fault diagnosis for turboshaft[J]. Journal of Aerospace Power, 2002,17(2):160-164. (in Chinese)

[8] 姜洁,李秋红,张高钱,等.航空发动机燃油系统执行机构及其传感器故障诊断[J].航空动力学报,2015,30(6):1529-1536.
JIANG Jie, LI Qiuhong, ZHANG Gaoqian, et al. Fault diagnosis for actuator and its sensor of aero-engine fuel system[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(6):1529-1536. (in Chinese)

[9] 姜洁,李秋红,张高钱,等.基于NN-ELM的航空发动机燃油系统执行机构故障诊断[J].航空动力学报,2016,31(2):484-492.
JIANG Jie, LI Qiuhong, ZHANG Gaoqian, et al. Fault diagnosis for actuators of aero-engine fuel system based on NN-ELM[J]. Journal of Aerospace Power,2016,31(2):484-492. (in Chinese)

[10] 何保成,于达仁,史新兴.应用传感器仿真模型分析发动机控制系统故障[J].推进技术,2001,22(5):364-367.
HE Baocheng, YU Daren, SHI Xinxing. Application of simulation model of sensors to analysis fault of control system of turbojet engine [J]. Journal of Propulsion Technology, 2001, 22(5): 364-367. (in Chinese)

[11] 朱子杰.航空发动机智能故障诊断与容错控制的研究[D].南京:南京航空航天大学,2010.
ZHU Zijie. Research on intelligent fault detection and fault-tolerant control of aero-engine[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2010.(in Chinese)

[12] 张高钱.航空发动机传感器故障诊断与容错控制[D].南京:南京航空航天大学,2014.
ZHANG Gaoqian. Research on aero-engine sensor fault diagnosis and fault tolerant control[D].Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2014.(in Chinese)

[13] 蒋平国,姚华,孙建国.航空发动机数控系统执行机构回路故障诊断和容错控制方法[J].航空动力学报,2005,20(2):282-286.
JIANG Pingguo, YAO hua, SUN Jianguo. Method of fault diagnosis and fault-tolerant control for actuator loop in aeroengine digital control system[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(2): 282-286. (in Chinese)

[14] 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]. Aerospace Science and Technology,2012,6:1-6. (in Chinese)

[15] 黄开明,尹泽勇,杨征山.涡轴发动机转速信号故障对策研究及试车验证[J].航空动力学报,2007,22(2):280-284.
HUANG Kaiming, YIN Zeyong, YANG Zhengshan. Study of rotor speed sensors fault accommodation and test run of turbo-shaft engine [J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(2): 280-284. (in Chinese)

[16] 姚华.涡轴发动机数控系统控制规律及容错控制[J].航空动力学报,2011,26(2):475-480.
YAO Hua. Control law and fault-tolerant control for turbo-shaft engine digital control system[J] Journal of Aerospace Power, 2011, 26(2):475-480. (in Chinese)

[17] 樊思齐.航空发动机控制[M].西安:西北工业大学出版社,2008:180-181.
FAN Siqi. Aeroengine control Volume 1[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press,2008:180-181.(in Chinese)

(编辑:刘　亮)