

文章编号:1000-8055(2015)11-2713-08

doi:10.13224/j.cnki.jasp.2015.11.020

# 某型涡轴发动机数控系统的机械液压 备份控制方案研究

廖光煌<sup>1,3</sup>, 黄金泉<sup>1,2</sup>

- (1. 南京航空航天大学 能源与动力学院 江苏省航空动力系统重点实验室, 南京 210016;
2. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100191;
3. 中国航空工业集团公司 航空动力控制系统研究所, 江苏 无锡 214063)

**摘 要:** 综合国内外涡轴发动机控制系统的发展趋势及成熟度的基础上, 提出了一种带机械液压备份功能的控制系统方案, 该方案的机械液压备份功能模块能跟随数字控制功能模块, 并能够在数字控制失效后平稳切换到机械液压备份控制, 具有在包线范围内实现发动机的燃油和导叶机械液压备份控制功能, 保证涡轴发动机安全工作和直升机的安全返航。该方案通过工程设计、试制, 开展了半物理试验和台架试验验证, 验证结果表明: 该备份控制方案的动力涡轮转速控制精度优于 $\pm 0.5\%$ , 导叶控制精度优于 $4^\circ$ , 具有良好的工程应用性。

**关 键 词:** 涡轴发动机; 数控系统; 机械液压备份控制; 半物理试验验证; 台架验证

中图分类号: V231

文献标志码: A

## Research on backup hydromechanical control plan of the turbo-shaft engine's control system

LIAO Guang-huang<sup>1,3</sup>, HUANG Jin-quan<sup>1,2</sup>

- (1. Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System,  
College of Energy and Power Engineering,  
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. Collaborative Innovation Center for Advanced Aero-Engine,  
Beijing 100191, China;
3. Aviation Motor Control System Institute,  
Aviation Industry Corporation of China, Wuxi Jiangsu 214063, China)

**Abstract:** Based on the research of the development and the maturity of turbo-shaft engine's control systems abroad, a control system scheme including a hydromechanical system as the backup was proposed. The module of backup hydromechanical control system could work synchronously with the digital control module, and switch to the main control system smoothly in case of failure of the digital control mode. This kind of design could achieve the function of backup control for the fuel and the compressor guide vane, and also guarantee the security for the engine's work and the return of helicopters. The design has been checked with the semi-physical simulation experiment and engine rig test after design and manufacturing. According to the verification result, the system has a control precision of  $\pm 0.5\%$  for power turbin speed and precision of  $4^\circ$  for the guide vane, which insures the well application in engineering.

收稿日期: 2014-04-08

作者简介: 廖光煌(1972—), 男, 湖南浏阳人, 研究员, 博士生, 主要从事航空发动机控制系统研究。

通讯作者: 黄金泉(1963—), 男, 江苏泰兴人, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事航空发动机建模、控制和故障诊断技术研究。

**Key words:** turbo-shaft engine; control system; backup hydromechanical control; semi-physical simulation test; engine rig test

涡轴发动机控制系统的发展大致经历了液压机械式控制阶段、模拟电子式监督控制阶段、数字电子式监督控制阶段、单通道数字控制加机械液压备份阶段和双通道全权限数字电子控制(FADEC)阶段<sup>[1-4]</sup>。其各阶段的典型涡轴发动机控制系统有:透默Ⅲ涡轴发动机的机械液压控制系统,其机械液压控制系统只控制燃气发生器转速( $N_g$ ),和旋翼转速调节器一起实现旋翼转速和动力涡轮转速( $N_p$ )恒定的控制目标;T700 涡轴发动机的数字电子式监督控制系统,其机械液压部分完成起动、 $N_g$ 、 $N_p$ 及导叶控制功能,数字电子部分完成双发匹配、燃气涡轮出口温度( $T_{45}$ )限制和  $N_p$  精准调节功能<sup>[5]</sup>;PT6 涡轴发动机单通道数字控制加机械液压备份控制系统,其数字式控制部分实现除停车功能外的所有其他功能,机械液压在数字部分完全失效后实现简单的燃油备份控制功能,不具备导叶备份控制功能。本文在国内首次提出了双通道 FADEC+机械液压备份控制系统方案,其特点在于双通道 FADEC 实现了所有起动、停车、稳态、加减速、限制和保护功能,且双通道间互为备份,机械液压备份能够自动跟随 FADEC,并在双通道 FADEC 均故障失效后平稳切换至机械液压备份,实现燃油和导叶的备份控制,并根据压气机进口压力  $p_h$  (视同大气压力)和

发动机进口温度  $T_1$  分别进行燃油和导叶控制的修正,能够实现发动机全包线的稳态和加减速控制,保证发动机安全工作和直升机的安全返航。针对该方案进行了工程设计和试制,并完成了半物理模拟试验和发动机台架试验<sup>[6]</sup>。

## 1 某型涡轴发动机及控制系统特点

某型涡轴发动机为中等功率自由涡轮式涡轴发动机,其主要控制变量为燃油流量( $\dot{m}_f$ )和导叶角度( $\alpha_{ha}$ ),按照高安全性、高可靠性数控系统的设计原则,采用双通道 FADEC+机械液压备份控制系统架构来满足要求,其基本工作原理如图1所示。其中双通道 FADEC 采用某型成熟涡轴发动机的系统架构,并采用双通道+独立超转保护的电子控制器架构,双通道互为备份,并进行轮转控制<sup>[7-8]</sup>。执行装置为双线圈的双电液伺服阀。控制软件结合电子控制器实现了起动、慢车及以上状态控制及各类限制和保护控制功能,根据系统的故障等级进行双通道和双电液伺服阀间的重构,并进行驱动输出<sup>[9]</sup>,这里不再赘述,本文重点就机械液压备份控制部分进行分析、研究和验证。

图1中机械液压备份部分由燃油备份控制、导叶备份控制、燃油跟随组件和导叶跟随组件构成,并根据  $p_h$  和  $T_1$  进行修正调节。当 FADEC 主

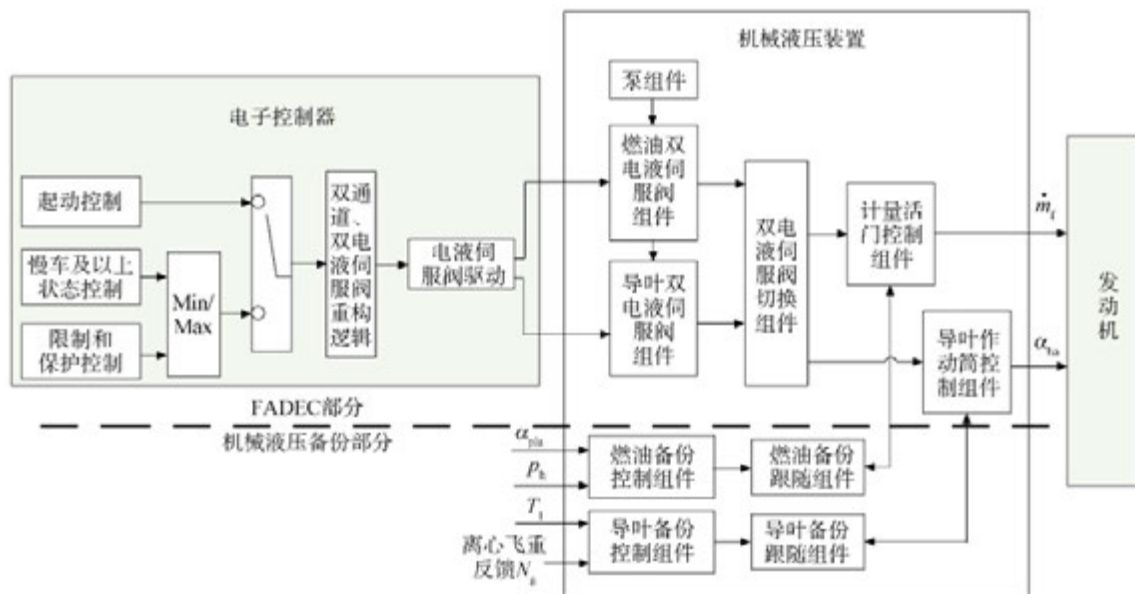


图1 数控系统基本原理图

Fig. 1 Schematic diagram of digital control system

控时,燃油跟随组件和导叶跟随组件分别实时跟踪计量活门位置及导叶作动筒位置,并反馈至燃油和导叶备份控制组件,以保证 FADEC 与备份切换时的平稳过渡<sup>[10-11]</sup>;当机械液压备份主控时,飞行员直接操纵油门杆(PLA),进行发动机状态

的调整,燃油备份控制组件根据 PLA 位置和  $p_h$  进行动态调节  $\dot{m}_f$  输出,导叶备份控制组件根据离心飞重反馈  $N_g$  和  $T_1$  进行  $\alpha_{ha}$  的调节,以保证发动机不熄火、不喘振地安全工作<sup>[12-14]</sup>. 详细工作原理图见图 2 所示.

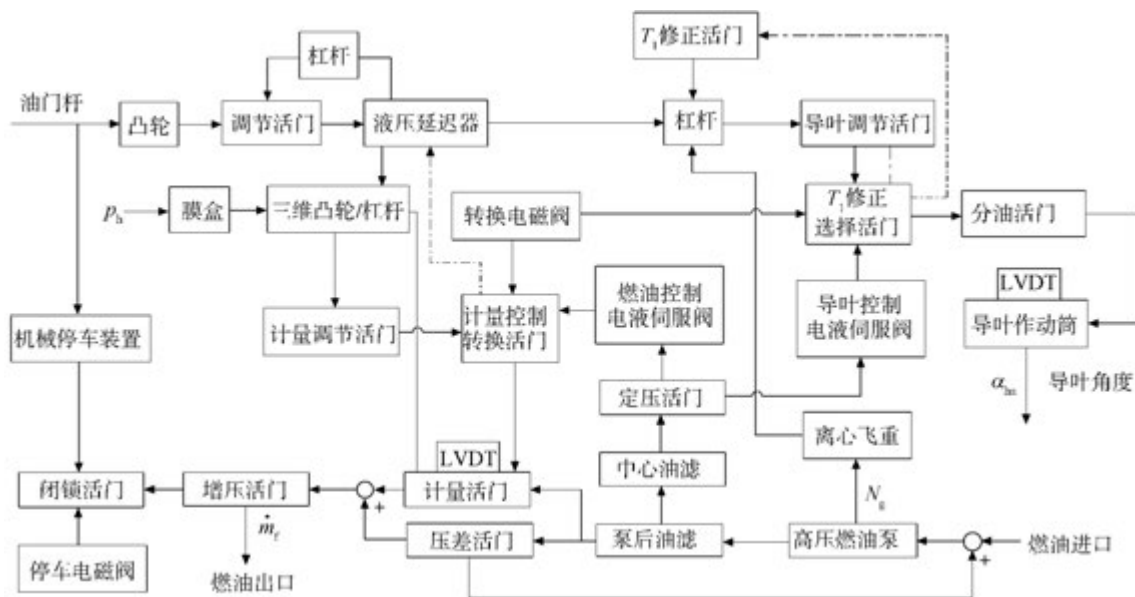


图 2 机械液压装置原理图

Fig. 2 Schematic diagram of hydromechanical device

## 2 机械液压备份控制方案原理及实现

根据功能需求,机械液压备份控制在主控状态时独立完成状态热备份,备份时实现燃油计量和导叶控制. 因此,以下按燃油控制回路、导叶控制回路和跟随切换三部分进行介绍.

备份状态控制时,如图 2 所示(图中 LVDT 表示线位移式差动变压器),通过油门杆给定发动机状态控制信号,并由凸轮将操纵用的角位移信号转换为液压控制用的活门线位移,再通过调节活门、液压延迟器、杠杆这一闭环的位移放大回路等比例地转化为液压延迟器的位移. 通过调节液压延迟器实际的响应速度,来统一对给定信号的状态变化速率进行限制.

### 2.1 燃油控制回路

备份燃油控制的设计思路为:  $\dot{m}_f = f(\alpha_{pla}, p_h)$ , 即由油门杆开环控制燃油给定,并根据  $p_h$  对实际供油进行修正. 具体实现时(见图 2),通过液压延迟器给定控制信号,经与其结构固联的三维凸轮—计量调节活门—计量活门形成位置闭环控制. 同时通过真空膜盒感应外部的大气压力  $p_h$ ,

并将修正量引入三维凸轮,从而调节计量活门位移,修正供油流量. 在此设计架构中,三维凸轮的作用至关重要,其 3 个维度的参数分别代表发动机状态给定(液压延迟器位移)、工作大气环境( $p_h$ )和实际供油量(计量活门位移). 根据发动机的工作特性,此三者之间存在唯一的一一对应关系. 三维凸轮将此三者通过结构分别具化为凸轮的线位移(液压延迟器位移)、型面支撑有效半径和角位移(计量活门位移). 图 3 为根据燃油控制原理建立的 MATLAB 模型<sup>[15-16]</sup>.

### 2.2 导叶控制回路

备份导叶控制的设计思路是:  $\alpha_{ha} = f(\alpha_{pla}, T_1, N_g)$ , 即由油门杆给定控制信号,进行  $N_g$  转速的闭环控制,再根据  $N_g$  转速进行导叶的位置控制,并根据  $T_1$  对导叶角度进行修正. 具体实现时(见图 2),通过液压延迟器给定控制信号,作用于杠杆的一端,通过杠杆—导叶调节活门—分油活门—导叶作动筒实现对导叶角度的调节. 同时通过离心飞重感受发动机燃气涡轮的转速,并将其转化为离心力作用于杠杆的另一端,从而实现导叶控制. 另外,通过  $T_1$  修正活门将  $T_1$  信号转化为活门位移,基本实现导叶角度与燃气发生器



迟器记录下来.同时通过真空膜盒感应外部的大气压力  $p_h$ ,对此位移进行修正.导叶控制热备份除了通过液压延迟器记录状态给定外,另外通过  $T_1$  修正活门实时记录  $T_1$  信号.数字控制状态时,发动机燃气涡轮的转速实时表征着发动机的实际状态,离心飞重将其转化为离心力作用于杠杆一端,驱动导叶调节活门调节  $T_1$  修正活门位置,并通过  $T_1$  修正活门改变杠杆力臂,实现与另一端液压延迟器给定力矩的平衡,从而将发动机的实际状态记录于  $T_1$  修正活门.由于影响发动机实际工作状态的可调参数除  $T_1$  外均已专门部件进行独立修正,故将此活门命名为  $T_1$  修正活门.

## 2.4 原理仿真

根据文中第 2.1 节及第 2.2 节模型建立全系统模型,对机械液压备份方案进行功能、性能仿真.仿真结果图 5 所示.在 10 s 时,系统由主控状态切换至备份.在 125 s 时,加入干扰信号,幅度为 20 kg/h.

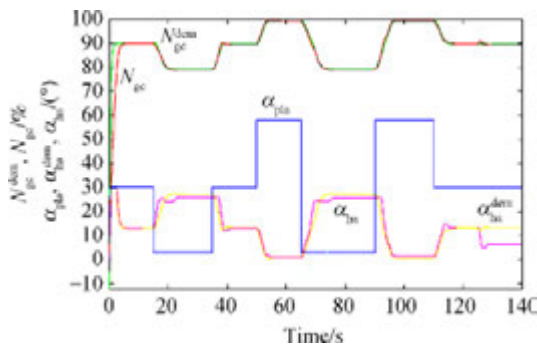


图 5 机械液压备份系统仿真曲线

Fig. 5 Simulation curve of backup hydromechanical control system

图 5 中各变量定义:  $N_{gc}^{dem}$  表示燃气发生器换算转速的控制目标值,  $N_{gc}$  表示燃气发生器换算转速的实际控制值,  $\alpha_{pla}$  表示油门杆位置,  $\alpha_{ha}^{dem}$  表示压气机导叶角度的控制目标值,  $\alpha_{ha}$  表示压气机导叶角度的控制目标值.

仿真结果显示,机械液压备份系统的  $N_{gc}$  响应情况良好,燃油控制稳定,导叶稳态控制精度和动态响应情况均满足发动机导叶工作指标,控制原理可行.

## 3 半物理试验验证及结果分析

以电子控制器、泵调节器、作动筒及相关传感器为真实试验件,发动机以数学模型代替,构建半物理试验环境,进行试验验证<sup>[17-18]</sup>.半物理试验原

理简化如图 6 所示(图中  $\dot{m}_f(V)$  表示燃油流量给定电压,  $I_{\dot{m}_f}(mA)$  表示燃油流量控制电流,  $I_{\alpha_{ha}}(mA)$  表示导叶控制电流).

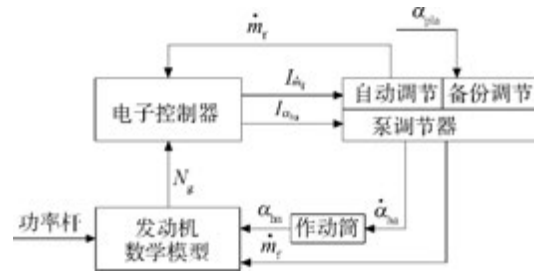
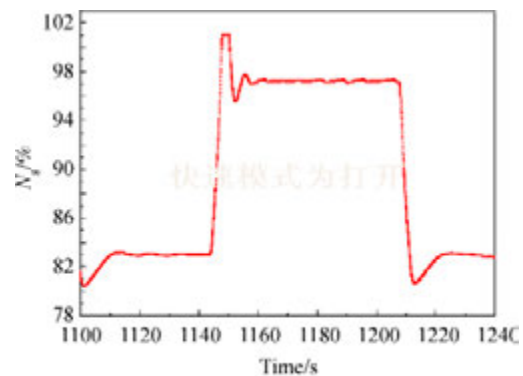


图 6 机械液压备份控制方案验证试验原理图

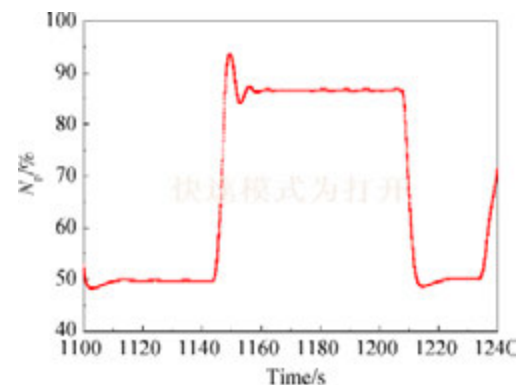
Fig. 6 Schematic diagram of experimental verification for backup hydromechanical control plan

验证当由主控转机械液压备份控制后,改变燃油给定,观察发动机  $N_{gc}$  动态跟随效果、控制精度及其对应的导叶动态跟随特性,控制精度.试验曲线如图 7、图 8 所示.

图 7 中,  $\dot{m}_f$  表示燃油流量.由图 7、图 8 试验曲线可知:机械液压备份控制方案工作时,在发动机  $N_{gc} = 80\% \sim 100\%$  范围内,  $N_{gc}$  动态响应情况良好,  $N_p$  动态控制精度为  $-0.724\% \sim 0.592\%$ ;  $N_g$  稳态控制精度为  $-0.06\% \sim 0.197\%$ ,  $N_p$  稳态

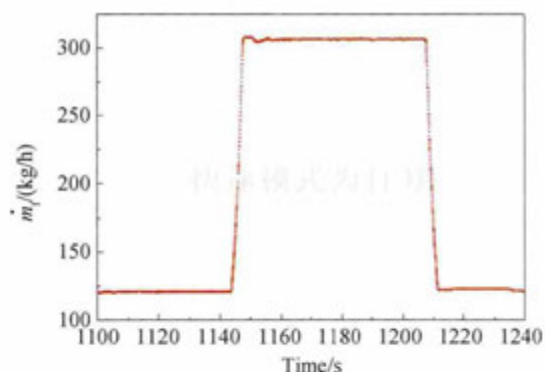


(a) 燃气发生器转速变化

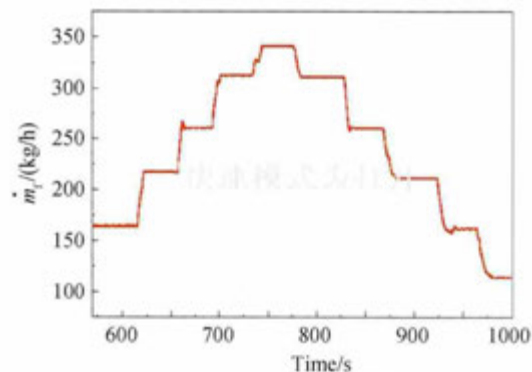


(b) 动力涡轮转速变化

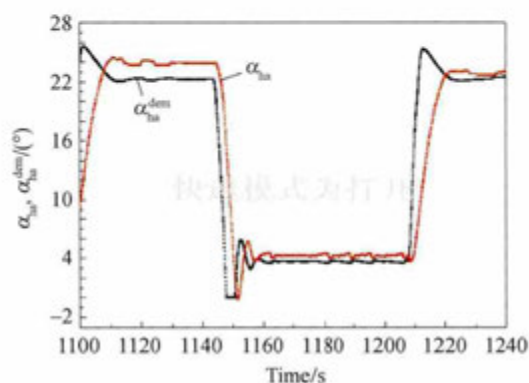




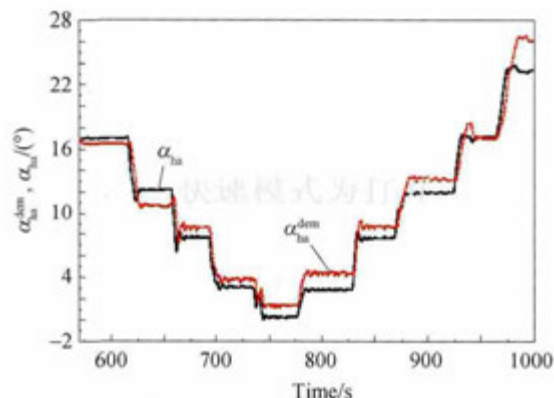
(c) 燃油流量变化



(c) 燃油油量变化



(d) 导叶跟随情况



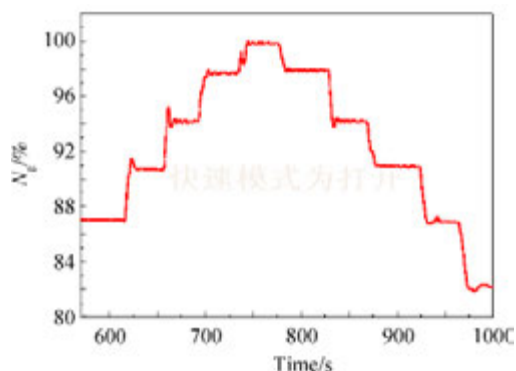
(d) 导叶跟随情况

图7 机械液压备份控制方案半物理验证试验曲线1

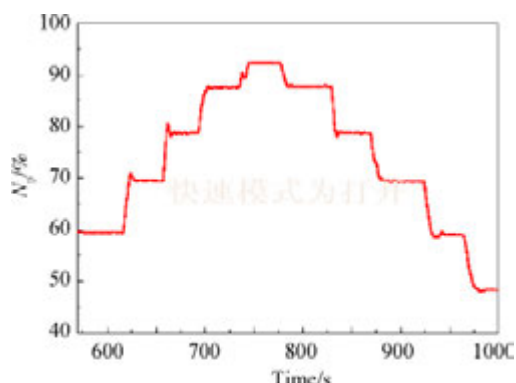
Fig. 7 Curve 1 of semi-physical simulation for backup hydromechanical control plan

图8 机械液压备份控制方案半物理验证试验曲线2

Fig. 8 Curve 2 of semi-physical simulation for backup hydromechanical control plan



(a) 燃气发生器转速变化

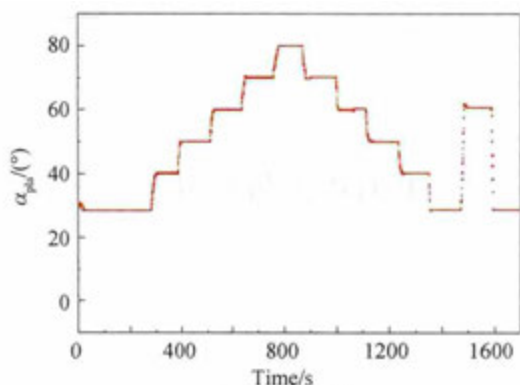


(b) 动力涡轮转速变化

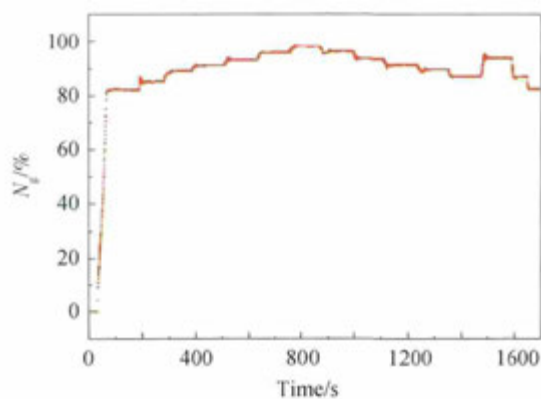
控制精度为 $-0.142\% \sim 0.186\%$ ;燃油计量稳定,定义导叶角度控制偏差为 $\Delta\alpha_{ha} = \alpha_{ha}^{dem} - \alpha_{ha}$ ,则 $\Delta\alpha_{ha} \in [-0.19^\circ, 3.07^\circ]$ ,位于给定的公差带范围内.试验测得各项指标符合设计预期,方案可行.

#### 4 台架试验验证及结果分析

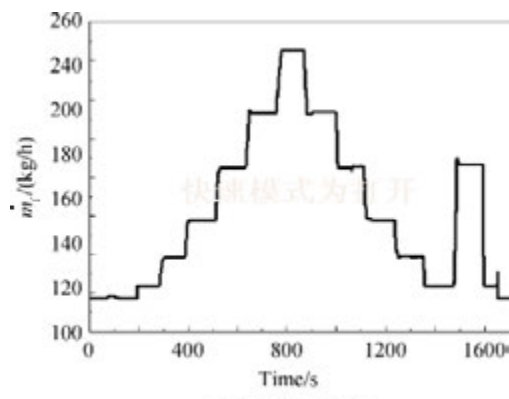
图6中的发动机数学模型以真实的目标发动机替代,即为机械液压备份控制方案台架验证试验原理.机械液压备份控制方案在台架的试验结果如图9所示.



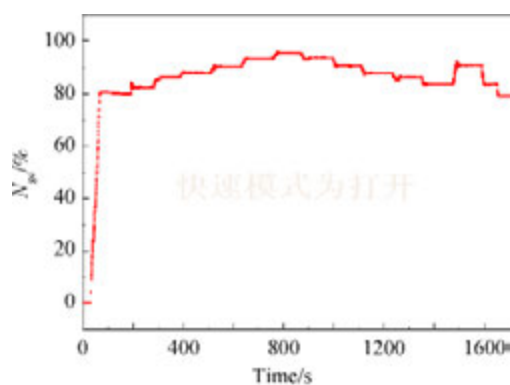
(a) 油门杆变化



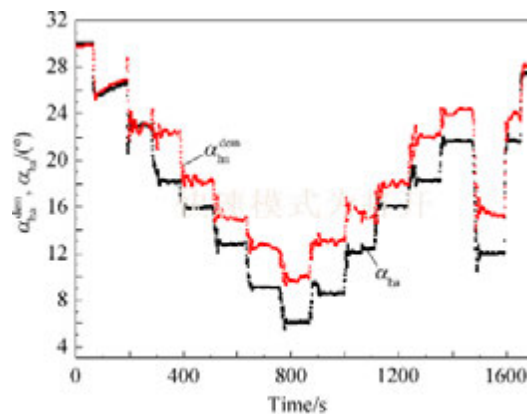
(b) 燃气发生器转速变化



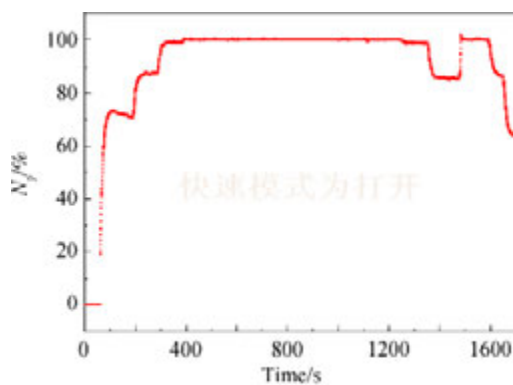
(f) 燃油流量变化



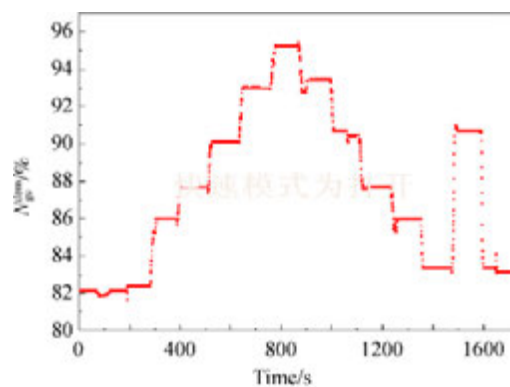
(c) 燃气发生器换算转速变化



(g) 导叶跟随情况



(d) 动力涡轮转速变化



(e) 燃气发生器换算转速指令值变化

图 9 机械液压备份控制方案台架验证试验曲线

Fig. 9 Curve of rig test for backup hydromechanical control plan

从图 9 中录得各发动机状态下导叶控制的稳态控制数据, 绘制导叶稳态控制曲线如图 10 所示. 其中最左边为发动机设计的导叶控制理论值, 最右边的为喘振边界线.

由图 9、图 10 可知, 机械液压备份控制方案

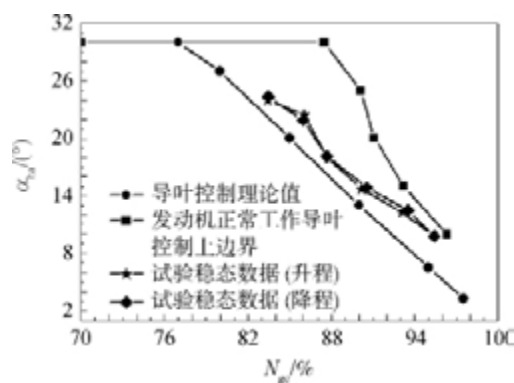


图 10 机械液压备份控制方案台架验证试验导叶控制稳态曲线

Fig. 10 Static curve of compressor guide vane control forrig test of backup hydromechanical control plan

台架验证试验中:在发动机状态  $N_{gc} = 80\% \sim 95\%$  范围内,  $N_{gc}$  动态控制精度为  $-0.819\% \sim 0.618\%$ , 响应情况良好;  $N_g$  稳态控制精度为  $-0.127\% \sim 0.184\%$ ,  $N_p$  稳态控制精度为  $-0.296\% \sim 0.327\%$ ; 燃油计量稳定, 导叶角度控制偏差  $\Delta\alpha_{ha} \in [1.9^\circ, 4.0^\circ]$ , 始终处于给定的公差带范围内, 且离边界值有较大的余度. 此试验结果与半物理验证试验结果基本一致. 因此, 机械液压备份控制方案是可行的.

## 5 结 论

研究结果表明, 针对具有燃油和导叶双变量控制的涡轴发动机, 本文提出的带机械液压备份功能的控制系统方案是切实可行的, 机械液压备份功能增加了系统的安全性, 具有保证涡轴发动机安全工作和直升机的安全返航的功能, 具有很好的工程应用前景.

## 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, 10.  
ZHANG Shaoji. Recent research and development of the fuel and control systems in an aeroengine[J]. Aeroengine, 2003, 29(3): 1-5, 10. (in Chinese)
- [2] 孙健国. 面向 21 世纪航空动力控制展望[J]. 航空动力学报, 2001, 16(2): 97-102.  
SUN Jianguo. Prospects of the aeroengine control development in the early 21<sup>st</sup> century[J]. Journal of Aerospace Power, 2001, 16(2): 97-102. (in Chinese)
- [3] Link C J. Aircraft engine conditions design, system analysis, and health monitoring[M]. Reston, VA: The American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc, 2009.
- [4] 侯志兴. 世界航空发动机手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 1987.
- [5] Smith B J, Zagranski R D. Closed loop bench testing of the next generation control system for helicopter engines[R]. Montreal, Canada: The 58th AHS International Annual Forum, 2002.
- [6] Walsh K R, Burcham F W. Flight evaluation of a hydromechanical backup control for the digital electronic engine control system in an F100 engine[R]. NASA DFRF83, 1986.
- [7] 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)
- [8] 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)
- [9] 蒋平国, 姚华, 孙健国. 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)
- [10] 姜彩虹. 航空发动机双冗余度控制规律设计方法[J]. 航空动力学报, 2011, 26(10): 2364-2370.  
JIANG Caihong. Method of dual-redundant control law design for aero-engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(10): 2364-2370. (in Chinese)
- [11] 姚华, 王国祥. 航空发动机全权限数控系统研究和试飞验证[J]. 航空动力学报, 2004, 19(2): 247-253.  
YAO Hua, WANG Guoxiang. A study and flight evaluation of full authority digital engine control system[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(2): 247-253. (in Chinese)
- [12] 赵顺利, 庄志清, 周向阳, 等. 某型机械液压式航空发动机导叶调节器方案设计[J]. 航空发动机, 2009, 35(4): 12-16.  
ZHAO Shunli, ZHUANG Zhiqing, ZHOU Xiangyang, et al. Concept design of mechanical hydraulic regulator for guide vanes of aeroengine[J]. Aeroengine, 2009, 35(4): 12-16. (in Chinese)
- [13] 李杰, 樊丁, 彭凯. 航空发动机压气机导流叶片调节器切换特性[J]. 推进技术, 2009, 30(5): 599-603.  
LI Jie, FAN Ding, PENG Kai. Switching performance of control system for aeroengine compressor air-intake guide vanes[J]. Journal of Propulsion Technology, 2009, 30(5): 599-603. (in Chinese)
- [14] McArdle J G, Barth R L. Dynamic and transient performance of turbofan/turboshaft convertible engine with variable inlet guide vanes[R]. NASA TM-4696, 1996.
- [15] 张志涌. 掌握和精通 MATLAB 6.5 版[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.
- [16] 刘金琨. 先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [17] 张海波, 叶飞, 李永进, 等. 直升机/发动机系统综合控制半物理仿真[J]. 航空动力学报, 2013, 28(7): 1650-1658.  
ZHANG Haibo, YE Fei, LI Yongjin, et al. Semi-physical simulation on integrated helicopter/engine control system[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(7): 1650-1658. (in Chinese)
- [18] 王兆铭, 朱传龙, 孙丰华, 等. 基于某型航空发动机的综合控制系统试验平台设计[J]. 航空发动机, 2012, 38(2): 1-5, 10.  
WANG Zhaoming, ZHU Chuanlong, SUN Fenghua, et al. Project of tester for an aeroengine control system[J]. Aeroengine, 2012, 38(2): 1-5, 10. (in Chinese)

(编辑: 叶 青)