

文章编号:1000-8055(2011)04-0935-07

压气机静子叶片转角主备控制器 转换装置改进

李 杰, 樊 丁, 彭 凯, 尹飞佳

(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 为了确保某型航空发动机高压压气机可调静子叶片转角控制系统主备控制器转换的可靠性, 对系统原有的控制器转换装置进行了改进, 加入了新的转换机构。仿真计算结果表明, 若数字电子控制器故障后, 未按照预定要求输出 0 脉冲占空比, 而输出了固定的非 0 脉冲占空比信号或随机的不可预测的脉冲占空比信号, 原系统的正常工作将受到较严重的影响; 而采用改进的转换装置后, 系统的正常工作不受影响且能够实现主备控制器安全、平稳、快速地转换。对转换装置所做的改进改善了该控制系统的转换性能并提高了发动机工作可靠性。

关 键 词: 高压压气机可调静子叶片转角; 航空发动机; 控制系统; 转换特性; 转换装置

中图分类号: V233.7

文献标志码: A

Improvement of switch devices of compressor stator blade angle main-backup controller

LI Jie, FAN Ding, PENG Kai, YIN Fei-jia

(School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to ensure the main-backup controller switch reliability of an aero-engine high-pressure compressor variable stator blade angle control system, the original switch devices were improved by adding a new switch component. Simulation results show that, if the fault of digital electronic controller (DEC) occurs, and then if DEC output does not meet the design requirements, i. e., the output pulse duty cycle of DEC is not 0 but fixed or random, unpredictable signal, the normal work of the original system will be seriously affected, while the normal work of the system with improved switch devices will not be affected, and the switching of main-backup controller is safe, rapid and smooth. Control system's switch performance and aero-engine's functional reliability are improved by the switch devices improvement.

Key words: high-pressure compressor variable stator blade angle; aero-engine; control system; switch performance; switch devices

高推质比、低油耗、长使用寿命、大灵活性、高可靠性和良好的可维护性是对当今先进航空发动机的要求。航空发动机性能的充分发挥主要依靠控制系统来实现和保证。因此, 控制系统的性能和

可靠性对发动机的正常工作十分重要。随着飞机、发动机技术的发展, 对航空发动机控制也提出了更高的要求, 传统的机械液压控制技术已不能满足发动机技术日益发展的需求^[1-3]。当前发动机控

收稿日期: 2010-04-09; 修订日期: 2010-08-27

作者简介: 李杰(1984—), 男, 陕西宝鸡人, 博士生, 主要从事航空推进系统控制研究。

制器已发展为数字电子控制器以满足现代航空发动机控制的需求。

作为某型航空发动机控制系统的一个重要组成部分,其高压压气机可调静子叶片转角控制系统采用了具有全功能机械液压备份控制器的数字电子控制系统.在系统正常工作过程中,数字电子控制器作为主要的控制方式,一旦其出现故障,则需要立即转换至机械液压备份控制器.转换过程要求安全、平稳、快速,以减小对发动机工作状态的影响.因此,对该高压压气机可调静子叶片转角控制系统的转换特性进行研究对于提高飞行的安全性和可靠性具有重要的意义。

目前,有关航空发动机控制系统转换装置(实现主备控制器转换功能)的研究资料很少,国内在相关领域上的研究工作有待深入^[4].

本文在对原型高压压气机可调静子叶片转角控制系统转换特性研究的基础上,提出了该系统转换装置的改进方法,通过仿真研究可知,改进后的转换装置能够改善原系统控制器的转换性能,当数字电子控制器发生严重故障时,仍然能够实现主备控制器安全、平稳、快速地转换并继续正常工作。

1 系统工作原理分析

航空发动机高压压气机可调静子叶片转角控制系统的功用是,根据发动机进口温度 T_1 及高压转子转速 n_2 ,调节高压压气机可调静子叶片转角 α_2 ,以确保压气机的稳定工作.高压压气机可调静子叶片转角控制系统的结构如图1所示.发动机工作时,控制系统依据发动机换算转速计算得到 α_2 的控制希望值 α_{20} .数字电子控制器依据 $\Delta\alpha_2 = \alpha_{20} - \alpha_2$ 经控制计算发出控制信号,驱动 α_2 控制电磁阀,调节 α_2 控制活门衬套位置,从而改变 α_2 作

动筒左右腔油压,驱动可调静子叶片旋转,并通过活门衬套位置传感器和 α_2 角度位移传感器形成闭环控制回路.机械液压控制器则经凸轮、杠杆机构的控制计算,驱动 α_2 控制活门活塞移动,从而改变 α_2 作动筒左右腔油压,驱动可调静子叶片旋转,并通过反馈装置形成机械反馈信号构成闭环控制回路.数字电子控制和机械液压控制相互协调工作,以确保系统有良好的动态和稳态性能。

当数字电子控制器出现故障时,需转换到机械液压备份控制器工作.主备控制器的转换通过 α_2 重调电磁阀和 α_2 重调活门来实现.按照设计要求,主备控制器转换时,数控通道断电,数字电子控制器输出 0 脉冲占空比信号.而后, α_2 控制活门衬套移动到极限位置,数字电子控制器退出工作,系统转换到机械液压备份控制方式。

2 控制器转换装置改进方法

试验及仿真验证^[5-12]表明,如果系统的主备控制器转换过程按照预定规律变化时,主备控制器转换特性良好.但若数字电子控制器出现故障后,未按照预定要求输出 0 脉冲占空比,而输出固定的非 0 脉冲占空比信号或随机的不可预测的脉冲占空比信号时,原型转换装置在这种情况下无法实现主备控制器可靠地转换.系统转换到机械液压备份控制方式后,仍然受数字电子控制器的控制作用,此时,高压压气机正常工作将会受到严重的影响。

2.1 转换装置改进方法

本文提出的改进转换装置的思路是,在 α_2 控制电磁阀和 α_2 控制活门之间加入主备控制油路转换活门,以改善系统主备控制器转换性能,提高系统工作可靠性.改进后系统的结构如图2所示.将新加入的转换活门命名为 α_2 控制转换活门.加

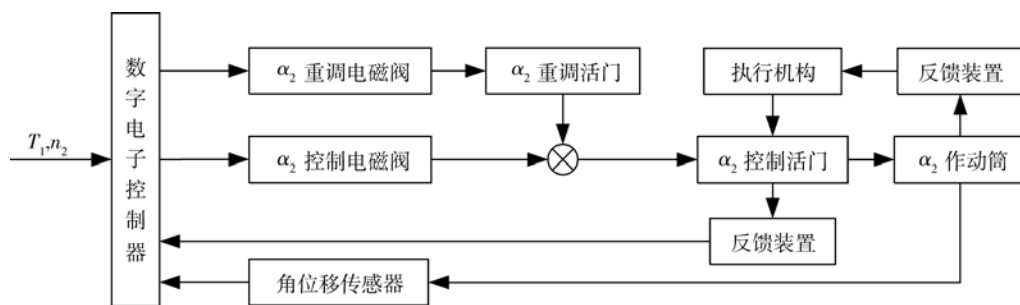


图1 高压压气机可调静子叶片转角控制系统结构

Fig. 1 Structure of high-pressure compressor variable stator blade angle control system

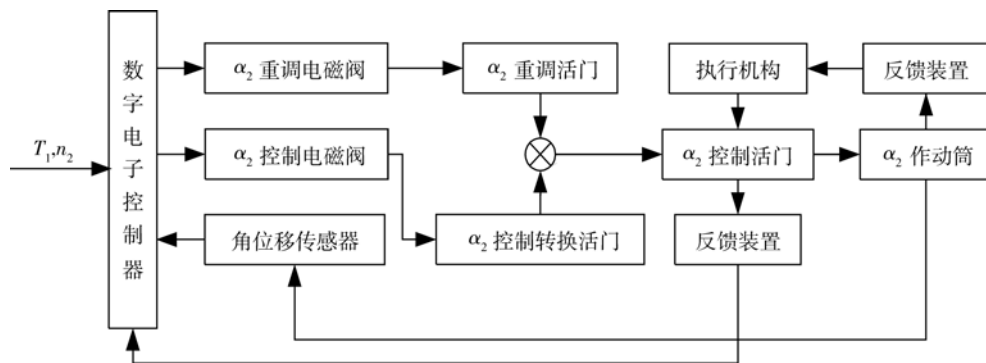


图2 改进转换装置后的系统的结构

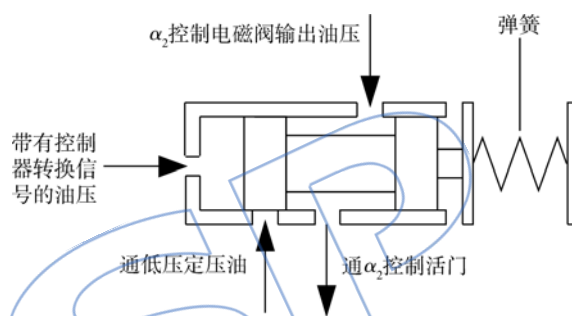
Fig. 2 Structure of the system with improved switch devices

入 α_2 控制转换活门的依据是,当数字电子控制器故障后,原型系统采取 α_2 控制电磁阀和 α_2 重调电磁阀断电的方式,使系统由数控方式转换到备份控制方式。此时,数字电子控制器输入到 α_2 控制电磁阀的信号为0脉冲占空比信号, α_2 控制电磁阀输出低压油,但若此时数字电子控制器输出的信号异常时,则可导致 α_2 控制电磁阀输出异常油压,影响系统正常工作。若在 α_2 控制电磁阀和 α_2 控制活门之间加入转换活门,即 α_2 控制转换活门,则可解决上述问题。

所设计的 α_2 控制转换活门结构如图3所示。其工作原理是,当系统处于数控方式下时,输入到 α_2 控制转换活门的油压为高压油, α_2 控制转换活门将 α_2 控制电磁阀与 α_2 控制活门之间的油路导通,同时切断低压定压油与 α_2 控制活门之间的油路。此时,由数字电子控制器通过 α_2 控制电磁阀控制 α_2 控制活门衬套位置,进而控制 α_2 角度。若数字电子控制器故障,系统接收到主备控制器转换信号时,输入到 α_2 控制转换活门的油压由高压油变为低压油,则 α_2 控制转换活门立即切断 α_2 控制电磁阀与 α_2 控制活门之间的油路,导通低压定压油与 α_2 控制活门之间的油路,迅速实现主备控制油路转换。此时, α_2 控制活门衬套在低压油的作用下移动到极限位置,数字电子控制器退出工作,由机械液压式备份控制器完成对 α_2 的控制。若此时,数字电子控制器控制的 α_2 控制电磁阀输出异常油压,则 α_2 控制转换活门可完全消除其对系统正常工作的影响。

2.2 α_2 控制转换活门设计方法

所设计 α_2 控制转换活门为三路凸台式滑阀,其工作油路为三路,进出油窗口为圆形。此活门为开关式活门,仅有两种稳定工作状态,即打开和关闭状态,分别对应系统处于数控状态和备份控制

图3 α_2 控制转换活门结构示意图Fig. 3 Schematic diagram of α_2 control switch valve

状态。设计此活门时,应重点关注其动态品质,即要求当其接到主备控制器转换命令时,能够快速实现控制油路转换,转换时间应尽可能短。影响活门动态品质的主要因素是弹簧和活门阀芯的设计参数等。

所设计的 α_2 控制转换活门的主要参数是,弹簧刚度系数为 3.57 N/mm ;进/出油窗口直径为 4 mm ;阀芯直径为 6 mm ;活门可移动范围为 $-5\sim 5\text{ mm}$ 。

3 仿真研究结果及分析

为了验证改进后转换装置的有效性,分别构建了原型高压压气机可调静子叶片转角控制系统和改进后的系统数学模型,并且依据试验台试验数据对所建立的数学模型进行了动静态验证。

首先,对原系统进行仿真研究。设定系统的工作状态为,发动机进口温度 $T_1=15^\circ\text{C}$,高压转子转速 n_2 由 0 r/min 阶跃变化到 13187 r/min (对应的 α_2 控制期望值由 0° 阶跃变化为 51°)。设系统分别正常运行到第 0.5 s 和 3.0 s 时(系统分别工作于过渡态和稳态),数字电子控制器发生故障,系统转换到机械液压备份控制方式。设定数字电子控制器故障后,未按照预定要求输出0脉冲占空

比,而分别输出了100%脉冲占空比信号(第一种故障模式)和随机的不可预测的脉冲占空比信号(第二种故障模式),此随机信号最大值为1,最小值为0,变化间隔为0.01 s.

经仿真计算得到的高压压气机可调静子叶片转角控制系统各个参数的变化如图4所示.在图4中,图4(a)和(b)为第一种故障模式的仿真结

果,图4(c)~(f)为第二种故障模式的仿真结果.图4(a)和(c)为数字电子控制器输出的脉冲占空比信号变化曲线(图中 T_s 表示系统接收到主备控制器转换命令的时间);图4(b)和(f)为高压压气机可调静子叶片转角 α_2 的变化曲线;图4(d)和(e)分别为 $T_s=0.5$ s和 $T_s=3.0$ s时, α_2 控制活门的活塞和衬套的位置变化曲线.

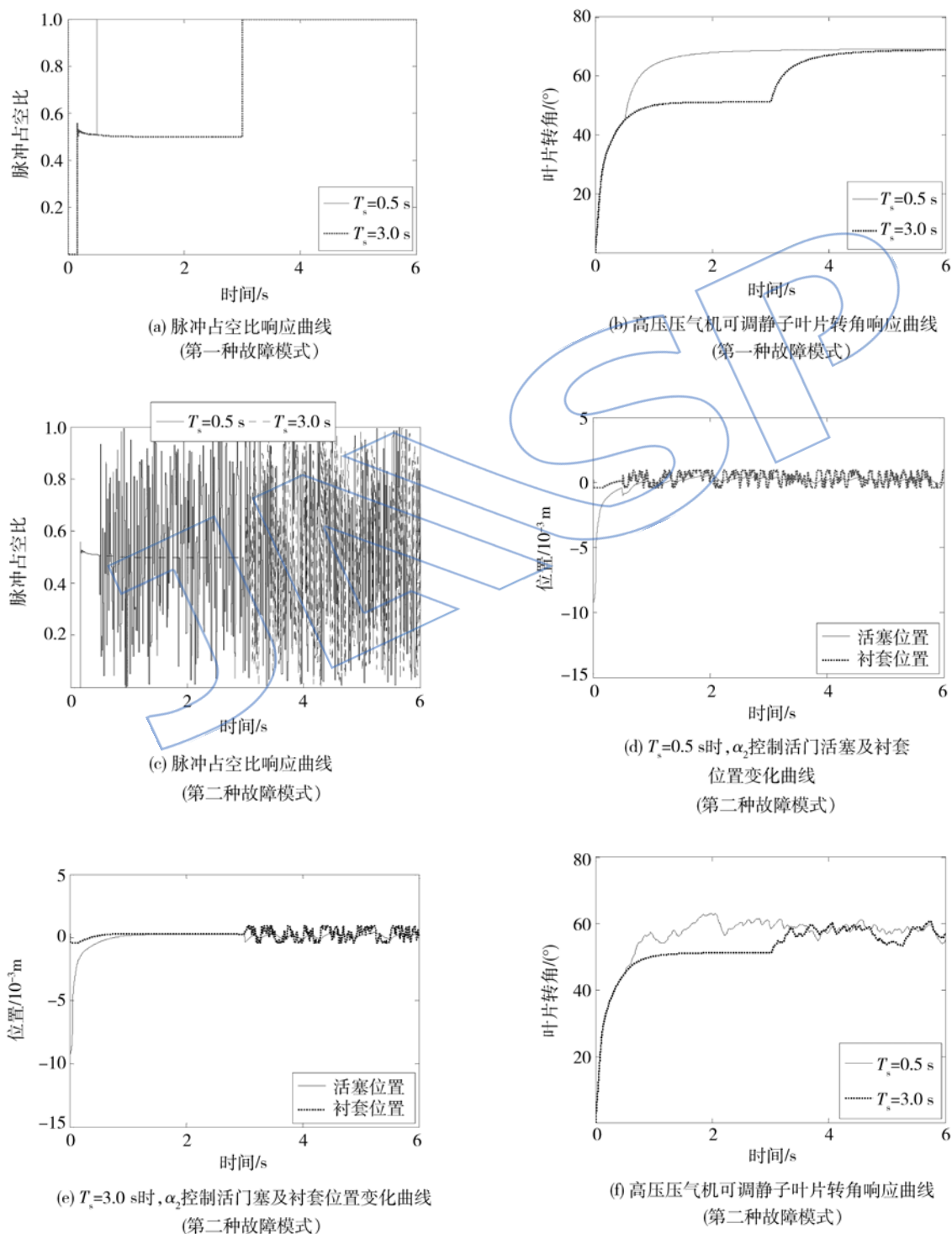


图4 原型系统仿真结果

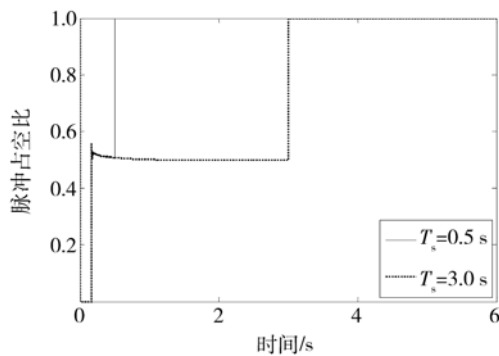
Fig. 4 Simulation results of the original system

由仿真结果可知,不论主备控制器的转换发生在过渡态还是稳态,若数字电子控制器故障后输出了100%脉冲占空比信号或随机的不可预测的脉冲占空比信号,系统就不能正常工作。当数字电子控制器故障后输出100%脉冲占空比信号时, α_2 上升并稳定到 68.9° , α_2 的稳态值已超出了允许的范围。当数字电子控制器故障后输出了随机的不可预测的脉冲占空比信号时, α_2 控制活门

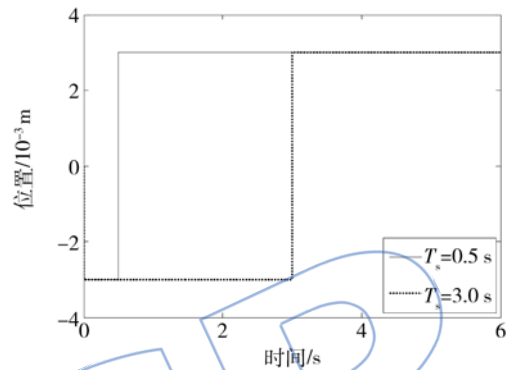
的活塞和衬套一直振荡,无法稳定到平衡位置。此时, α_2 在 $51.1^\circ \sim 60.2^\circ$ 之间振荡,也已经超出了允许的范围,可引起压气机工作不稳定,对发动机正常工作造成较严重的影响。

其次,在保持设定状态不变的情况下对改进转换装置后的系统进行仿真研究。仿真得到的系统的各个参数的变化如图5所示。

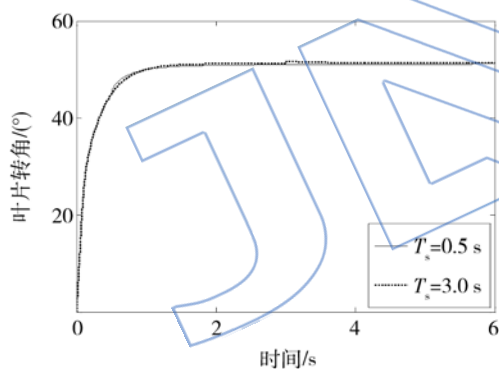
图5(a)~(c)为对第一种故障模式的仿真结



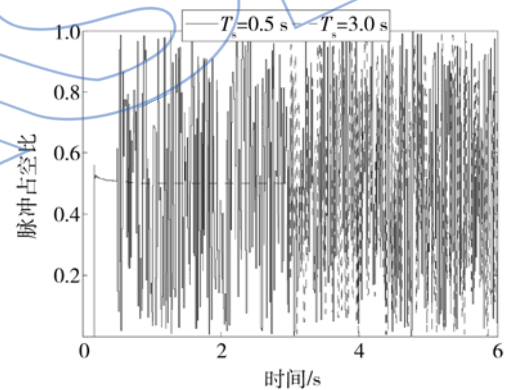
(a) 脉冲占空比响应曲线
(第一种故障模式)



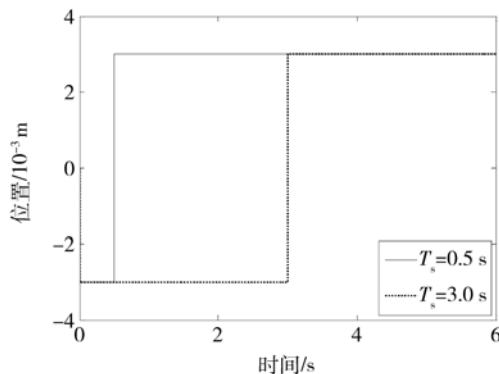
(b) α_2 控制转换活门位置响应曲线
(第一种故障模式)



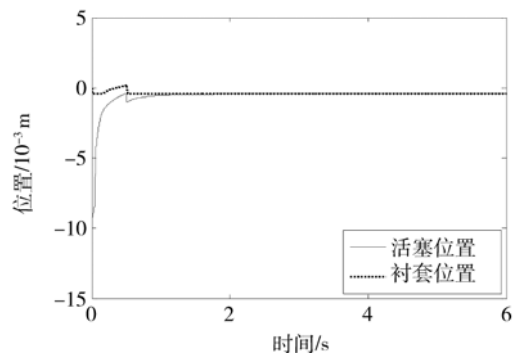
(c) 高压压气机可调静子叶片转角响应曲线
(第一种故障模式)



(d) 脉冲占空比响应曲线
(第二种故障模式)



(e) α_2 控制转换活门位置响应曲线
(第二种故障模式)



(f) $T_s = 0.5$ s时, α_2 控制活门活塞及衬套
位置变化曲线
(第二种故障模式)

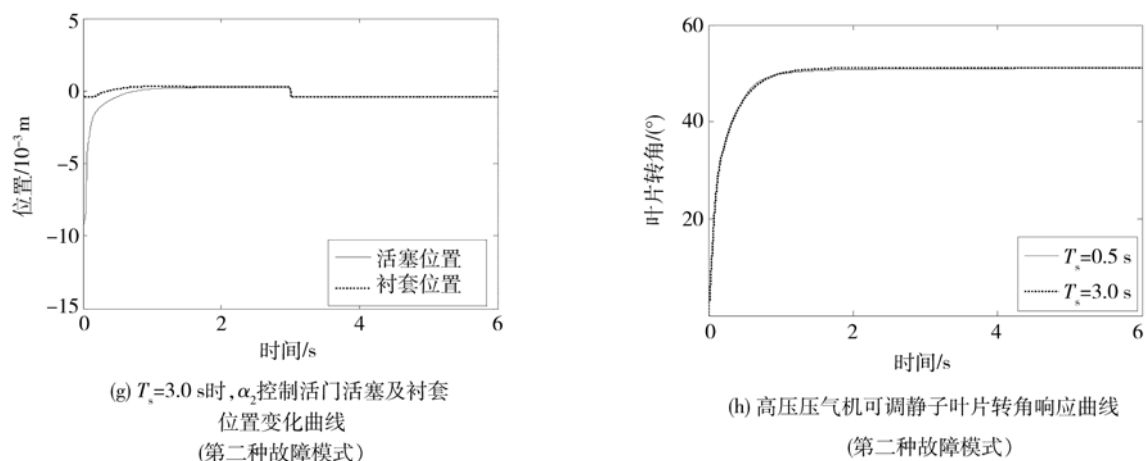


图 5 改进转换装置的系统的仿真结果

Fig. 5 Simulation results of the system with improved switch devices

结果,图 5(d)~(h)为对第二种故障模式的仿真结果.图 5(a)和(d)为数字电子控制器输出的脉冲占空比信号变化曲线;图 5(b)和(e)为所设计的 α_2 控制转换活门位置变化曲线;图 5(c)和(h)为 α_2 的变化曲线;图 5(f)和(g)分别 $T_s=0.5$ s 和 $T_s=3.0$ s 时, α_2 控制活门的活塞及衬套的位置变化曲线.

由仿真结果可知,不论主备控制器的转换发生在系统的过渡态还是稳态,若数字电子控制器故障后,输出了 100% 脉冲占空比信号或随机的不可预测的脉冲占空比信号,系统的正常工作均不会受到大的影响.由图 5 中的曲线(b)和(e)可知,所设计的 α_2 控制转换活门能够按照设计要求进行主备控制器控制油道的快速转换.由图 5 中曲线(f)和曲线(g)可知,不论 $T_s=0.5$ s 还是 $T_s=3.0$ s, α_2 控制活门活塞和衬套均能平稳而快速地过渡到平衡位置.由图 5 中曲线(c)和(h)可知,不论主备控制器的转换发生在过渡态还是稳态,高压压气机可调静子叶片转角 α_2 的响应均未受到大的影响.当 $T_s=0.5$ s 时, α_2 可以快速、平稳地过渡到控制期望值,稳态误差小于 0.1° ,当 $T_s=3.0$ s 时, α_2 的稳态值未发生明显变化,稳态误差小于 0.1° .由此可见,将转换装置改进后,可以很好地实现主备控制器安全、快速、平稳地转换,且主备控制器转换后,备份控制器的工作不受数字电子控制器故障的影响.

依据经改进后的转换装置的工作原理可知,系统收到主备控制器转换命令后, α_2 控制转换活门将 α_2 控制电磁阀与 α_2 控制活门之间的控制油道切断的同时,将低压定压油与 α_2 控制活门间的油路导通,此时不论数字电子控制器的输出何种

信号,均不会对 α_2 控制活门衬套位置的正常变化造成任何影响.在低压定压油的作用下, α_2 控制活门衬套按照设计要求快速移动到极限位置,以实现主备控制器的顺利转换.从理论分析可知,所做的改进是有效的,且理论分析结论与仿真研究结果一致.

4 结 论

由仿真结果可知,若数字电子控制器出现故障后,其未按照预定要求输出 0 脉冲占空比信号,而输出固定的非 0 脉冲占空比信号或无法预料的随机的脉冲占空比信号时,改进设计的转换装置仍然能够很好地实现主备控制器的转换功能,并且转换过程快速、安全、平稳,系统的各项技术指标可以满足航空发动机对该控制系统的要求.

所设计的新转换装置结构和工作原理并不复杂,因此该转换装置在工程上容易实现,且不会使系统增加过多质量.由于对高压压气机可调静子叶片转角控制系统所做的转换装置改进能够较好的改善该控制系统主备控制器转换性能,且不对其正常工作产生任何影响,从而能够提高航空发动机工作可靠性.因此,该项改进工作对理论研究和工程实践都有一定的指导意义.

参考文献:

- [1] 秦海波,张天宏,孙建国.面向 FADEC 系统 BIT 验证的综合故障注入器研究[J].航空动力学报,2005,21(3): 581-587.
QIN Haibo, ZHANG Tianhong, SUN Jianguo. Study on comprehensive fault injector for BIT verification of the FADEC system [J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 21 (3): 581-587. (in Chinese)

- [2] 李勇,樊丁,石斌. 航空发动机 FADEC 系统双机时钟级同步技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2006, 14(4): 508-509.
- LI Yong, FAN Ding, SHI Bin. Investigation about synchronization of real time clock between the two computers in aeroengine FADEC system[J]. Computer Measurement & Control, 2006, 14(4): 508-509. (in Chinese)
- [3] Witezak M, Obuehowiez A, Korbicz J. Genetic programming based approaches to identification and fault diagnosis of nonlinear dynamic systems[J]. Control, 2002, 75(13): 1012-1031.
- [4] 张绍基. 航空发动机控制系统研究与展望[J]. 航空动力学报, 2004, 19(3): 375-382.
- ZHANG Shaoji. A review of aeroengine control system[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(3): 375-382. (in Chinese)
- [5] Reed J A, Afjeh A A. Interactive, secure web-enabled aircraft engine simulation using XML data binding integration[R]. AIAA Paper 2002-4058, 2002.
- [6] Reed J A, Follen G J, Afjeh A A. Improving the aircraft design process using web-based modeling and simulation[J]. ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation, 2000, 10(1): 58-83.
- [7] Sexton W R A. New method to control turbofan engine starting by varying compressor surge valve bleed[D]. Virginia, US: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001.
- [8] Beldimna O, Bushnell L. Stability linearization and control of switched systems[R]. California, US: American Control Conference, 1999.
- [9] Roth B. A work potential perspective of engine component performance[R]. AIAA Paper 2001-3300, 2001.
- [10] Pettersson S, Lennartson B. Stability and robustness of hybrid systems[R]. Kobe, Japan: 35th IEEE Conference, Decision and Control, 1996.
- [11] Svakin A V, Matveev A S. Cyclic linear differential automatic: a simple class of hybrid dynamical systems[J]. Automata, 2000, 36(5): 727-734.
- [12] Libeozrn D, Morse A S. Basic problems in stability and design of switched systems[J]. IEEE Control System Magazine, 1999, 19(5): 59-70.