

某型发动机高空小表速转速摆动问题分析

李 杨

(海军驻沈阳地区第二军事代表室,沈阳 110043)

摘要:为了解决某型发动机研制过程中出现的高空小表速转速摆动问题,对发动机转速控制原理开展深入分析,利用 AMESIM 工具软件建立发动机转速控制数学模型,并对转速控制通道进行仿真对比分析,确定了通道参数对转速控制影响量值,通过对比同系列发动机控制参数,提出在现有系统构架基础上,对低压转子转速控制通道进行分段控制改进措施,经半物理试验、高空台模拟试验和试飞验证表明,改进措施既能保证发动机地面加速性要求,又解决了高空小表速转速摆动问题。

关键词: 高空小表速;转速;摆动;仿真;控制模型;航空发动机

中图分类号: V233.7+52

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2020.01.012

Analysis of the Rotor Speed Swing of the High-altitude Small Airspeed of an Engine Research on the Swing of Small Airspeed of an Engine

LI Yang

(The Second Navy Consumer Representative Office in Shenyang, Shenyang 110043, China)

Abstract: In order to solve the rotor speed swing problem of high-altitude small airspeed of the development engine, an in-depth analysis of the principle of engine rotor speed control was carried out. The mathematical model of engine rotor speed control was established by using AMESIM tool software, and the rotor speed control channel was simulated and compared. The influence of channel parameters on rotor speed control was determined. By comparing the control parameters of the same series of engines, on the basis of the existing system framework, the improvement measures of piecewise control for the rotor speed control channel of low pressure rotor were put forward. Through semi-physical test, altitude simulation test and flight test, it is shown that the improvement measures can not only ensure the acceleration requirement of engine ground, but also solve the problem of rotor speed swing of high-altitude small airspeed.

Key words: high-altitude small airspeed; rotor speed; swing; simulation; control model; aeroengine

0 引言

某型发动机在进行高空小表速试飞时,在高度 11 km 以上,表速小于 500 km/h 时出现转速摆动的问题,此时发动机控制计划为按照低压转子转速通道限制值控制发动机最大工作状态, n_1 摆动量超出了允许的摆动范围,影响飞行安全^[1];按照高压转子转速 n_2 和排气温度 T_6 限制通道控制发动机时,发动机工作稳定,无参数摆动情况。国内同系列原型发动机在相同的工作状态点则无转速摆动问题。

本文通过对发动机低压转子转速控制通道进行

对比分析^[2-4],基于当前控制系统架构和发动机起动加速性的特殊要求,提出低压转子转速控制通道分段控制措施^[5]。

1 低压转子转速控制原理

当采用综合电子调节器进行低压转子转速 n_1 闭环控制时,控制回路由综合电子调节器、 S_1 占空比电磁阀、执行活门、选择活门、校正活塞、随动活塞、计量活门、供油管路、发动机、转速传感器以及电缆组成。此时,被控量为 n_1 转速,控制量为主燃油流量

收稿日期:2019-04-08 基金项目:航空动力基础研究项目资助

作者简介:李杨(1980),男,工程师,主要从事航空发动机质量监督工作;E-mail: 47942984@qq.com。

引用格式:李杨.某型发动机高空小表速转速摆动问题分析[J].航空发动机,2020,46(1):61-64. LI Yang. Analysis of the rotor speed swing of the high-altitude small airspeed of an engine research on the swing of small airspeed of an engine [J]. Aeroengine, 2020, 46(1): 61-64.

$W_t^{[6-7]}$ 。

其中综合电子调节器负责根据发动机进口总温 T_1 信号设定 n_1 转速的限制值, 根据 n_1 传感器的采集, 生成 n_1 限制值和反馈值的偏差信号, 从而生成对应的电压信号 ΔU , 并利用喘振压差信号 ΔP_{ck} 对电压信号进行微分补偿, 得到失调电压 ΔU_{ppt} , 根据失调电压计算 S_1 占空比, 输出到主燃油泵调节器的 S_1 占空比电磁阀, 从而控制发动机供油量, 实现按 n_1 转速控制发动机最大工作状态的功能^[8], 如图 1 所示。

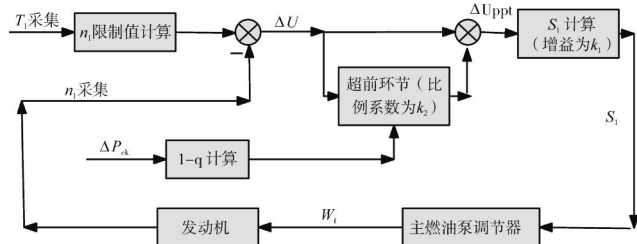


图 1 n_1 控制回路原理

2 原因分析

在某型发动机研制初期地面起飞加速性攻关时发现, 综合电子调节器在发动机转速 85% 时开始限制供油, 从而降低了发动机加速性能。为适应发动机地面起飞加速性要求, 综合电子调节器低压转子转速 n_1 通道的超前环节比例系数 k_2 变小 (见表 1), 从而减少加速过程中 S_1 对加速油量的限制, 提高发动机加速性。改进后, 经地面试验和专项试车验证, 在发动机加速过程中 92% 转速时开始限制供油, 从而提高发动机加速性, 满足某型发动机地面加速性要求。

表 1 n_1 超前环节比例系数 K_2 对比

n_1 控制通道参数 $\Delta P_{ck}/\text{MPa}$	K_2	
	某型	原型
0	16	23
0.22	7	13

但在高空小表速工作条件下, 由于发动机工作负载减小, 系统闭环控制的稳定裕度减小, 导致在发动机高空小表速条件下工作时, 易出现 n_1 转速摆动问题^[9-10]。

3 建立数学模型

发动机转速闭环控制系统有 3 个环节: 控制器 (综合电子调节器)、执行机构 (主燃油泵调节器)、被控对象 (发动机), 如图 2 所示。

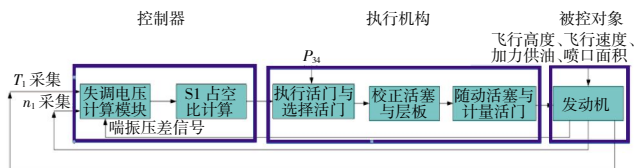


图 2 n_1 控制回路仿真原理

根据 n_1 控制回路各环节的功能, 将其划分为 6 个模块, 基于 AMESIM 仿真软件分别进行建模和仿真验证^[11-15], 并集成整个 n_1 控制回路模型, 如图 3 所示。

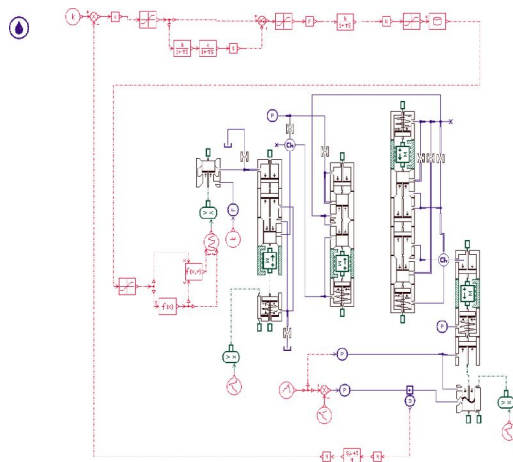


图 3 n_1 控制回路仿真模型

4 基于 AMESIM 的仿真分析

低压转子转速 n_1 程序电路中超前环节传递函数表达式为

$$G(S) = \frac{KS}{(1+0.1S)(1+TS)} \quad (1)$$

式中: K 为增益系数; T 为时间常数; S 为复数的自变量。

发动机的综合电子调节器中 K 、 T 的计算公式为

$$K = \frac{0.65}{2.48q+1} \quad (2)$$

$$T = \frac{0.04}{2.48q+1} \quad (3)$$

式中: q 为占空比信号, 由喘振压差信号 ΔP_{ck} 插值得到。

原型发动机的综合电子调节器中 K 、 T 为

$$K = \frac{1.04}{1.14q+1} \quad (4)$$

$$T = \frac{0.028}{1.14q+1} \quad (5)$$

全包线范围内的喘振压差信号的变化规律如图 4 所示。

在高度为 11 km、表速为 300 km/h 的飞行状态点,喘振压差信号 ΔP_{ck} 根据图 4 插值,再分别将某型和原型综合电子调节器中 K 、 T 系数代入仿真模型,运算转速结果如图 5、6 所示。从仿真分析过程及结果来看,修改 n_1 超前环节,使超前环节比例系数为原型的状态,可以解决某发动机高空小表速转速摆动问题^[16]。

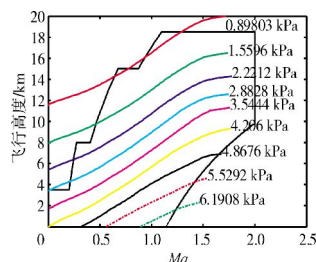


图 4 中间状态喘振压差信号全包线变化规律

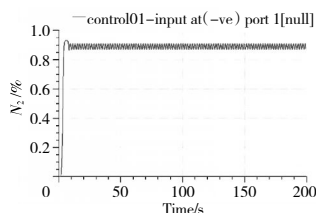


图 5 某型发动机 n_1 转速控制输出仿真结果

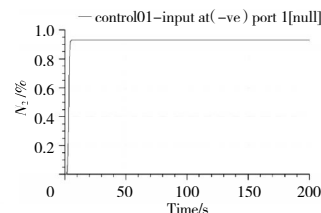


图 6 原型发动机 n_1 转速控制输出仿真结果

5 半物理试验

在半物理试验器上,对发动机进行 n_1 控制回路的大闭环仿真试验^[17]。引出综合电子调节器的 k_2 的调整点,连接外部电阻箱,调整 k_2 利用真实的发动机数学模型和完全真实的控制系统,进行高空左边界验证。

半物理模拟试验成功复现发动机在高度为 11 km,表速为 300 km/h 飞行状态点处参数摆动现象,而引入原型状态的超前环节比例系数后,摆动消除。试验结果如图 7、8 所示。

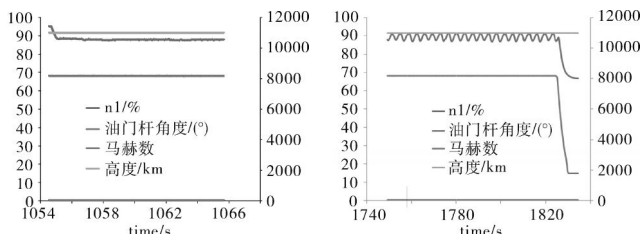


图 7 原型发动机半物理试验 n_1 摆动情况(摆幅为 $\pm 0.2\%$)

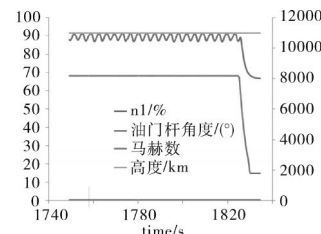


图 8 某型发动机半物理试验 n_1 摆动情况(摆幅为 $\pm 2.2\%$)

6 改进措施及验证

在保证发动机高空小表速飞行状态稳定的同时兼顾发动机地面加速性,使用当前系统防喘联锁的高度信号,对 n_1 超前环节进行分段控制,低空及地面保留当前超前环节比例系数,不影响发动机地面起动加

速性;高空使用原型发动机超前环节比例系数,可提高发动机高空工作稳定性。

针对上述改进措施开展并通过如下验证:

(1)地面加速性验证。进行大油门特性、小油门特性、全程加速和半程加速等相关加速功能检查,加速性能满足发动机地面使用要求;

(2)高空台模拟验证。在转速摆动工作点验证改进措施有效性和控制率转换的稳定性,试验项目包括在高度为 11 km、表速为 300 km/h 飞行状态点加力通断和稳定工作试验、 n_1 控制通道的放大系数转换专项试验,发动机均能稳定可靠地工作,无转速摆动现象;

(3)试飞验证。落实改进措施的发动机在高度为 11 km、表速为 300 km/h 飞行状态点,在训练状态和作战状态模式下,处于中间状态和加力状态时均工作正常,未出现参数摆动现象。

7 结束语

通过对比分析,以及数值仿真、半物理试验、高空台模拟、试飞验证,采取“按高度分段控制 n_1 超前环节比例系数”的改进措施,既保证了发动机高空小表速飞行状态稳定性,同时兼顾了发动机地面加速性和发动机研制进度。首次采用的分段控制策略可在同类发动机或同类问题中进行借鉴和应用。

参考文献:

- [1] Merovitch L. Elements of vibration analysis [M]. New York: McGraw-Hill, 1975:30-40.
- [2] 廉筱纯, 吴虎. 航空发动机原理 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2013:183-240.
LIAN Xiaochun, WU Hu. Aviation engine principle[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2013:183-240. (in Chinese)
- [3] 樊思齐, 李华聪, 樊丁. 航空发动机控制 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2008:10-20.
FAN Siqi, LI Huacong, FAN Ding. Aeroengine control [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2008:10-20. (in Chinese)
- [4] 胡寿松. 自动控制原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1984:12-20.
HU Shousong. Principle of automatic control [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1984:12-20. (in Chinese)
- [5] 李杰, 樊丁, 彭凯, 等. 压气机静子叶片转角主备控制器转换装置改进[J]. 航空动力学报, 2011, 26(4): 935-941.
LI Jie, FAN Ding, PENG Kai, et al. Improvement of switch devices of compressor stator blade angle main backup controller [J]. Journal of

- Aerospace Power, 2011, 26(4): 935–941. (in Chinese)
- [6] 孙建国, 黄金泉, 叶志锋. 现代航空动力装置控制 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2009: 6–12.
- SUN Jianguo, HUANG Jinquan, YE Zhifeng. Modern aviation power plant control [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2009: 6–12. (in Chinese)
- [7] 周宗才. 飞机推进系统控制 [M]. 西安: 空军工程学院, 1997: 39–49.
- ZHOU Zongcai. Aircraft propulsion system control [M]. Xi'an: Air Force Engineering College, 1997: 39–49. (in Chinese)
- [8] 姚华. 航空发动机全权限数字电子控制系统 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2014: 71–92.
- YAO Hua. Full authority digital electronic control system for aero-engine [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2014: 71–92. (in Chinese)
- [9] 宋兆泓. 航空发动机故障分析 [M]. 北京: 北京航空学院出版社, 1993: 342–362.
- SONG Zhaohong. Aeroengine fault analysis [M]. Beijing: Beijing Aviation College Press, 1993: 342–362. (in Chinese)
- [10] 贾淑芝, 李军. 某型航空发动机转速信号故障分析 [J]. 航空发动机, 2008, 34(2): 46–47.
- JIA Shuzhi, LI Jun. Failure analysis of speed signals for an aeroengine [J]. Aeroengine, 2008, 34(2): 46–47. (in Chinese)
- [11] 曾俊英. 航空动力装置控制 (元件部分) [M]. 北京: 航空工业出版社, 1995: 118–122.
- ZENG Junying. Aviation power device control (component portion) [M]. Beijing: Aviation Industry Publishing Company, 1995: 118–122. (in Chinese)
- [12] 盛敬超. 工程流体力学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1988: 172–193.
- SHENG Jingchao. Engineering fluid mechanics [M]. Beijing: China Machine Press, 1988: 172–193. (in Chinese)
- [13] 林建亚, 何存兴. 液压元件 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1988: 68–82.
- LIN Jianya, HE Cunxing. Hydraulic components [M]. Beijing: China Machine Press, 1988: 68–82. (in Chinese)
- [14] 李华聪, 李吉. 机械 / 液压系统建模仿真软件 AMESim [J]. 计算机仿真, 2006, 23(12): 294–297.
- LI Huacong, LI Ji. Modeling and simulation software AMESim for mechanical/hydraulic system [J]. Computer Simulation, 2006, 23(12): 294–297. (in Chinese)
- [15] 薛定宇. 控制系统计算机辅助设计 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 342–352.
- XUE Dingyu. Computer aided control system design [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 342–352. (in Chinese)
- [16] 王斌, 王曦, 石玉麟, 等. 一种航空发动机的分段实时线形动态模型 [J]. 航空动力学报, 2014, 29(3): 696–701.
- WANG Bin, WANG Xi, SHI Yulin, et al. A real-time piecewise linear dynamic model of aeroengine [J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(3): 696–701. (in Chinese)
- [17] 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.

(编辑: 刘 静)