

辅助动力装置N-Dot加速控制研究 及试车验证

杨帆¹, 彭凯², 王伟¹, 白洁¹, 赵振宇¹, 毛宁¹

(1. 航空工业西安航空计算技术研究所, 西安 710065; 2. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘要: 在辅助动力装置(APU)全权限数字电子控制系统研制中, 为保证同一型号 APU 加速性能不受 APU 加工误差、部件性能衰退等的影响, 采用基于 N-Dot 的加速控制方法对 APU 的过渡态加速控制律进行设计。在控制算法实现过程中, 为避免纯微分在实际工作中带来的数值干扰和稳定性问题, 对设计的控制回路进行了等效变换, 得到了基于纯积分的加速度闭环控制的等价形式。通过台架试车, 对基于 N-Dot 的加速控制律进行验证。试车结果表明, 所设计的 N-Dot 加速控制律能有效防止 APU 在加速过程中超转、超温, 且加速性能一致性良好, 能有效发挥其加速性能。

关键词: 航空发动机; 辅助动力装置; N-Dot; 加速控制律; 全权限数字控制系统; 台架试车

中图分类号: V233.7; TP23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2620 (2020) 03-0013-04

Research and testing verification of N-Dot acceleration control for an auxiliary power unit

YANG Fan¹, PENG Kai², WANG Wei¹, BAI Jie¹, ZHAO Zhen-yu¹, MAO Ning¹

(1. AVIC Xi'an Aeronautics Computing Technique Research Institute, Xi'an 710065, China;

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

Abstract: During the development of a full authority digital control system (FADEC) for an auxiliary power unit (APU), in order to ensure that the acceleration performance of the APU for the same type are not influenced by engine manufacturing errors and component performance degradation, the N-Dot-based acceleration control method was used to design transient acceleration control law of APU. In the implementing process of the control algorithm, to avoid the problem of numerical interference and stability caused by the pure differential element in practice, the designed control loop was equivalently transformed, and then an equivalent form of closed-loop acceleration control based on pure integral was obtained. Finally, the designed acceleration control law based on N-Dot was verified through the bench test. The test results show that the designed N-Dot acceleration control law can effectively prevent the APU from over-rotation and over-temperature during the acceleration process, and the acceleration performance is consistent and effectively exerted.

Key words: aero-engine; auxiliary power unit; N-Dot; acceleration control law;
full authority digital control system; rig testing

1 引言

辅助动力装置(APU)^[1]是大飞机系统的关键部件之一^[2], 其主要技术特点为: 总体结构力求简单; 为输出压缩气源, 要求压气机喘振裕度大; 为保证发电品

质, 采用恒转速控制, 工作时共同工作点沿等转速线移动; 既要输出轴功率, 又要输出压缩空气, 部件匹配和控制难度大^[3]。上述特点给 APU 控制规律和控制器的设计带来极大的挑战。在 APU 总控制律设计和开发周期中, 过渡态控制器设计接近占四分之

收稿日期: 2019-04-15

基金项目: 国家科技重大专项(2017-V-0010-0060; 2017-V-0015-0067); 民机专项(MJ-2017-D-28)

作者简介: 杨帆(1974-), 男, 重庆人, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为航空发动机控制。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

压热容,为简化推导过程,可近似为 $c_{pa} \approx c_{pf} \approx c$ 。

将 P_r 、 P_c 代入式(2),且 $W_a + W_f \approx W_a$,可得:

$$W_f \cdot H_u \cdot \eta_b = J \cdot \frac{dn_g}{dt} \cdot n_g + W_a \cdot (T_4 - T_1) \quad (5)$$

式中: H_u 为燃油低热值常数, η_b 为燃烧效率。

式(5)表明,加速过程,燃油的化学能一部分用于发动机转子的加速,另一部分维持发动机的热力循环。

4 基于N-Dot的APU加速控制律设计

4.1 加速过程控制计划综合

为保证加速过程中APU不超温、不超转,设计了基于N-Dot的APU加速过程的控制计划,如图2所示。图中, $n_{g,ref}$ 为试车台监控计算机给定的APU指令转速, $T_{4,max}$ 为给定的APU排气温度限制值, $\dot{n}_{g,ref}$ 为给定的APU加速过程的转子加速度期望值, \dot{n}_g 为APU实际的转子加速度, $W_{f,max}$ 为给定的APU的最大供油流量计划, $W_{f,c}$ 为加速过程控制计划综合后输出的燃油流量指令。

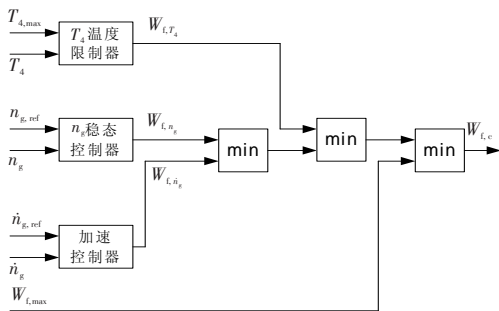


图2 APU加速过程控制计划

Fig.2 Control plan of APU acceleration process

在APU加速控制计划中:①加速控制器执行基于N-Dot的加速控制计划,期望的APU转子加速度由 $\dot{n}_{g,ref}$ 给定,与APU实际的转子加速度构成闭环控制回路,调节燃油流量,保证发动机的加速性能。② n_g 稳态控制器执行按 $n_{g,ref}$ 给定的APU稳态转速控制计划,保证加速过程中APU不超转,并在加速末期接替加速控制器,保持APU状态稳定在 $n_{g,ref}$ 给定的转速状态上。③ T_4 温度限制器执行按 $T_{4,max}$ 给定的APU超温限制的 T_4 温度控制计划,防止加速过程及稳态控制过程中APU超温。④将上述三条控制计划按选小的准则进行控制计划综合,之后再与稳态过程的最大供油流量控制计划选小,以实现APU在

加速控制过程中通过燃油流量的调节,充分发挥APU的加速性能、缩短加速时间,并保证APU不超温、不超转,在加速过程末期能平稳切换到 $n_{g,ref}$ 所指定的稳定工作状态。

4.2 基于N-Dot的加速控制算法

采用PID算法构建的基于N-Dot的加速控制器,其控制回路如图3所示。图中, s 为拉普拉斯算符。由 n_g 计算APU实际转子加速度的算法,无论是采用差分法还是跟踪微分器等方法,计算所得的 \dot{n}_g 均存在数值干扰和稳定性的问题^[7],不适于当作反馈参数,与指令值 $\dot{n}_{g,ref}$ 构成控制误差直接用于控制回路计算。对图3的控制框图做适当的等价变换,可将 \dot{n}_g 的控制回路等效转换为 n_g 的控制回路,如图4所示。

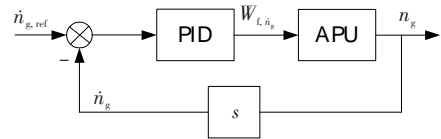


图3 \dot{n}_g 控制回路

Fig.3 Control loop of \dot{n}_g

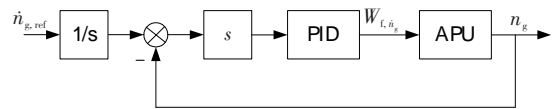


图4 等效的 n_g 控制回路

Fig.4 Equivalent control loop of n_g

对于图3,若记PID的传递函数为 G_c ,则:

$$W_{f,\dot{n}_g} = G_c \cdot (\dot{n}_{g,ref} - \dot{n}_g) = G_c \cdot s \cdot \left(\frac{\dot{n}_{g,ref}}{s} - n_g \right) \quad (6)$$

当PID采用积分控制,即 $G_c = K/s$,则式(5)为:

$$W_{f,\dot{n}_g} = K \left(\frac{\dot{n}_{g,ref}}{s} - n_g \right) = K(n_{g,ref} - n_g) \quad (7)$$

式(7)表明, \dot{n}_g 的积分控制等价于 n_g 的比例控制。同时,转速信号 n_g 包含了 \dot{n}_g 的精确值,实现了 \dot{n}_g 的无差测量,可当作控制反馈参数,直接用于控制回路计算。

5 台架试车验证

在完成FADEC总体和控制律设计后,开展了一系列部件及整机台架验证试验,主要包括:电动燃油泵转速-燃油流量特性的部件试验;起动电机功率-APU转速特性的冷转试验;APU点火试验;APU

稳态及功率输出试车试验^[6-9]。系统设计定型后,进行了多次全状态台架试车,APU启动、运行及功率输出工作稳定可靠。

针对N-Dot加速控制律的试车过程见图5~图7,图中给出了 n_g 、 T_4 、 $T_{4,max}$ 、 W_f 、 \dot{n}_g 的变化曲线。图5和图6分别为N-Dot控制器增益K小和大时的加速过程。可见,APU在大增益下加速时间缩短;两次加速试车过程,排气温度远小于其超温保护控制门限值, n_g 单调变化、无超调现象。图7示出了加速过程中排气温度超温保护控制效果的试车过程。由图可知, T_4 超温后,由 $T_{4,max}$ 限制器控制加速过程的供油量,基本保持 $T_4 = T_{4,max}$,加速过程的 \dot{n}_g 降低,加速时

间明显变长。

6 结论

(1) 从单转子发动机转子动力学和热力循环方程入手,分析了发动机加速过程的基本热力参数关系。针对加速过程中APU超转、超温的控制约束,设计了基于N-Dot的过渡态加速控制律,台架试车验证了所设计的N-Dot加速控制律有效、可行。

(2) 深入分析了N-Dot的PID控制算法实现,通过等效变换,APU转速加速度的积分控制等价于APU转速的比例控制,等效实现了APU转速加速度的无差测量。

参考文献:

[1] GBJ 3971-2000,航空燃气涡轮辅助动力装置通用规范[S].

[2] 刘大响,金捷,彭友梅,等.大型飞机发动机的发展现状和关键技术分析[C]//中国航空学会2007年学术年会论文集.2007.

[3] 李东杰.辅助动力装置的应用现状和发展趋势[J].航空科学技术,2012,(6):7—10.

[4] Jaw L C, Mattingly J D. Aircraft engine controls: design, system analysis, and health monitoring[M]. Virginia: AIAA, 2009.

[5] 王曦,党伟,李志鹏,等.1种N-dot过渡态PI控制律的设计方法[J].航空发动机,2015,41(6):1—5.

[6] 彭凯,杨帆,樊丁,等.某型APU全权限数字电子控制系统研究及试车验证[J].西北工业大学学报,2018,36(6):1102—1107.

[7] 杨帆,彭凯,周宇晨,等.辅助动力装置全权限数控系统研究及试车验证[J].测控技术,2018,37(12):8—11.

[8] 杨帆,樊丁,彭凯,等.基于试车数据的航空发动机启动过程建模[J].空军工程大学学报(自然科学版),2013,(6):1—4.

[9] 杨帆,樊丁,彭凯,等.跟踪微分器在航空发动机控制系统中的应用研究[J].测控技术,2013,32(10):148—151.

[10] 樊思齐.航空发动机控制[M].西安:西北工业大学出版社,2008.

[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.

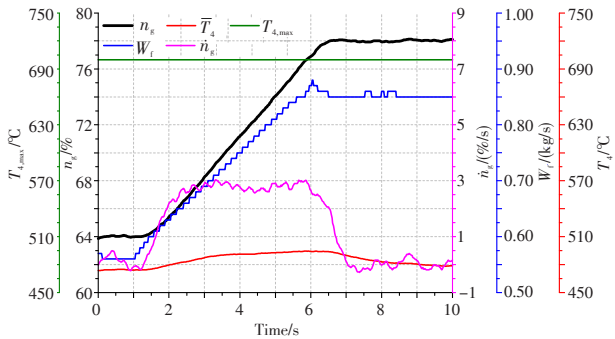


图5 小增益加速试车过程

Fig.5 Acceleration testing process under small control gain

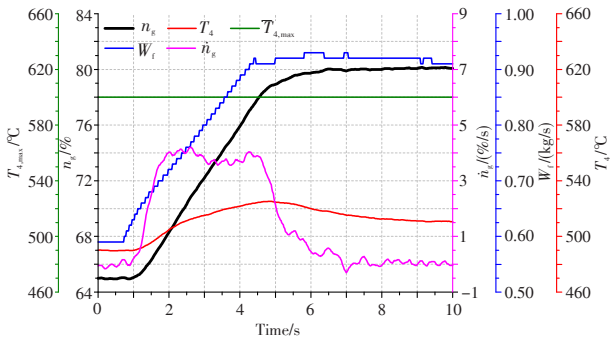


图6 大增益加速试车过程

Fig.6 Acceleration testing process under big control gain

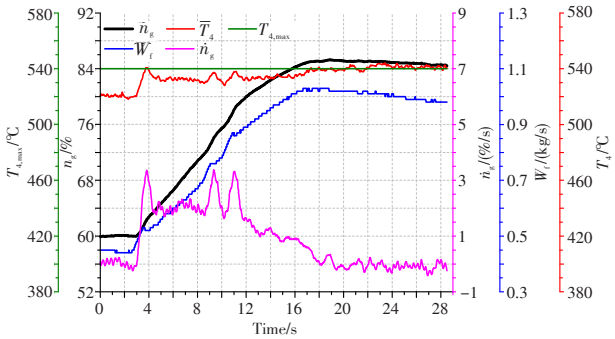


图7 加速试车过程的 T_4 限制效果

Fig.7 T_4 limited in acceleration testing process