Jun., 2020

辅助动力装置N-Dot加速控制研究 及试车验证

杨帆,彭凯,王伟,白洁,赵振宇,毛宁

(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)¹¹是大飞机系统的关键部件之一¹²,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。

三¹¹。过渡态控制既要达到严苛的加减速设计指标,同时还必须保证 APU 不超出其转子转速限制、涡轮叶片最高工作温度限制、压气机最大压力及喘振限制、控制系统自身的诸如供油加速率限制等工作极限。

国内发动机过渡态控制规律多采用开环油气比,而国外已大量采用基于转子加速度 N-Dot(即前)的闭环控制律[5]。后者最突出的优点在于按发动机转子加速度的需求自动调节燃油流量,使其在不同环境条件下的加速特性具有一致性,充分反映发动机过渡态所要求的本质特性。

本文以某型APU为被控对象,设计了APU全权限数字电子控系统(FADEC)的总体结构。针对APU加速过程中超温、超转的约束,采用N-Dot控制方法,深入分析基于N-Dot的加速控制的PID算法实现,设计了APU过渡态的加速控制律,完成了APU加速控制过程的台架试车验证。

2 全权限数字电子控制系统总体结构

该APU从结构上属单轴燃气涡轮发动机,由1级离心式压气机、环形回流燃烧室和1级向心涡轮构成。从压气机出口引气,并对外输出轴功率。APU的FADEC主要包括:数字电子控制器,燃油系统,起动电机,滑油系统,负载关断阀,引气调节阀,点火装置,指令给定装置,各类传感器,数据通信端口和电源等。所设计的FADEC总体原理框图如图1所示[6-7]。

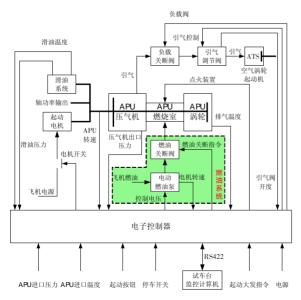


图1 全权限数字电子控制系统原理框图

Fig.1 Schematic diagram of FADEC

2.1 电子控制器

电子控制器作为APU控制系统的核心部件,接收来自试车台监控计算机及指令给定装置给出的各类控制指令;采集并处理来自传感器的信号,完成对控制律的综合计算;输出控制信号至各个执行机构,实现APU的全部控制功能。此外,还完成APU及FADEC的故障诊断与处理。

2.2 燃油系统

APU燃油系统由与APU转轴无关的电动燃油泵和燃油关断阀构成。其中,燃油关断阀控制通往APU燃烧室的油路的通断;电动燃油泵由齿轮泵和驱动齿轮泵的伺服电机构成,通过电子控制器输出的控制电压闭环调节电机转速来调节通往燃烧室的燃油流量W。

2.3 试车台监控计算机

试车台监控计算机通过RS422总线完成与数字电子控制器的双向串行通信,实现APU与试车台的人机交互功能。试车台监控计算机向电子控制器发送APU的冷转、假起动及起动模式的指令信号,控制APU的起动模式;给定APU工作状态的期望转速指令。试车台监控计算机接收APU转速、排气温度等状态信号、电子控制器故障诊断信息及电子控制器输出的控制信号,用于试车台测试系统的数据显示、告警、数据存储等。

3 加速过程的发动机热力循环

发动机的加速时间取决于发动机转子轴上的剩余扭矩 ΔM 。对于单轴燃气涡轮发动机,由发动机转子动力学方程 61 可知:

$$J \cdot \frac{\mathrm{d}n_{\mathrm{g}}}{\mathrm{d}t} = \Delta M = M_{\mathrm{T}} - M_{\mathrm{c}} \tag{1}$$

式中:J为发动机转子转动惯量, n_s 为发动机转子转速, M_r 为涡轮扭矩, M_c 为压气机扭矩。

式(1)的力矩平衡方程可等价于功率平衡方程:

$$J \cdot \frac{\mathrm{d}n_{\mathrm{g}}}{\mathrm{d}t} \cdot n_{\mathrm{g}} = M_{\mathrm{T}} \cdot n_{\mathrm{g}} - M_{\mathrm{C}} \cdot n_{\mathrm{g}} = P_{\mathrm{T}} - P_{\mathrm{C}} \tag{2}$$

式中: P_{τ} 为涡轮功率, P_{c} 为压气机功率。

根据发动机的热力循环方程,有:

$$P_{\rm T} = (W_{\rm a} + W_{\rm f}) \cdot c_{\rm pf} \cdot (T_{\rm 3} - T_{\rm 4}) \tag{3}$$

$$P_{\rm C} = W_{\rm a} \cdot c_{\rm na} \cdot (T_2 - T_1) \tag{4}$$

式中: W_a 为发动机进气流量(无冷却引气); T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 分别为发动机进口温度、压气机出口温度、涡轮前燃气温度和排气温度; c_{pa} 、 c_{pf} 分别为空气、燃油的比定

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

将 P_{T} 、 P_{C} 代入式(2),且 $W_{\text{a}} + W_{\text{f}} \approx W_{\text{a}}$,可得:

$$W_{\rm f} \cdot H_{\rm u} \cdot \boldsymbol{\eta}_{\rm b} = J \cdot \frac{\mathrm{d}n_{\rm g}}{\mathrm{d}t} \cdot n_{\rm g} + W_{\rm a} \cdot (T_{\rm 4} - T_{\rm 1}) \tag{5}$$

式中: H_{\parallel} 为燃油低热值常数, η_{\parallel} 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, $W_{f,e}$ 为加速过程控制计划综合后输出的燃油流量指令。

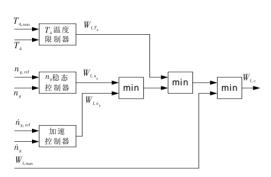


图2 APU加速过程控制计划

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 $n_{s,ret}$ 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_{s} 稳态控制器执行按 $n_{s,ret}$ 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 $n_{s,ret}$ 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_s 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 \hat{n}_s 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 \hat{n}_s 吨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 \hat{n}_s 的控制回路等效转换为 n_s 的控制回路,如图 4 所示。

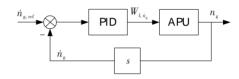


图3 前 控制回路

Fig.3 Control loop of \dot{n}_{s}

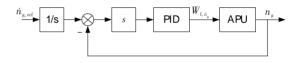


图4 等效的n。控制回路

Fig.4 Equivalent control loop of $n_{\rm g}$

对于图3,若记PID的传递函数为 G_c ,则:

$$W_{f, \dot{n}_{g}} = G_{c} \cdot (\dot{n}_{g, \text{ref}} - \dot{n}_{g}) = G_{c} \cdot s \cdot (\frac{\dot{n}_{g, \text{ref}}}{s} - n_{g})$$
 (6)

当PID采用积分控制,即 $G_c = K/s$,则式(5)为:

$$W_{f, \dot{n}_{g}} = K(\frac{\dot{n}_{g, \text{ref}}}{s} - n_{g}) = K(n_{g, \text{ref}} - n_{g})$$
 (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起动、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 $n_{\rm g}$ 、 T_4 、 $T_{4,\max}$ 、 $W_{\rm f}$ 、 $n_{\rm g}$ 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, $n_{\rm g}$ 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 $n_{\rm g}$ 降低,加速时

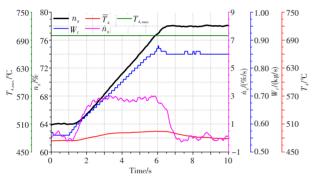


图 5 小增益加速试车过程

Fig.5 Acceleration testing process under small control gain

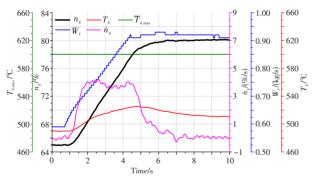


图6 大增益加速试车过程

Fig.6 Acceleration testing process under big control gain

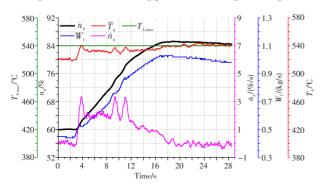


图7 加速试车过程的T。限制效果

Fig. 7 T_4 limited in acceleration testing process

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 机起动过程建模[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):
- [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.