

某型 APU 控制系统的设计与台架试车

钱小娟

(南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016)

摘 要: 以某型飞机辅助动力装置(APU)为控制对象, 介绍了该控制系统的工作原理, 详细设计了控制规律, 并对控制系统设计了台架试车试验步骤。通过多次台架试车, 验证了该系统的可行性和控制品质, 证明该系统能够安全、可靠运行, 并满足现代飞机对发动机起动、空中应急、电、液或其他辅助能源的不同需要。

关键词: 辅助动力装置; 控制系统; 控制规律; 台架试车; 飞机

中图分类号: V235.1 文献标识码: A 文章编号: 1673-5048(2008)03-0042-03

Design and Bed Test of Control System for Auxiliary Power Unit

QIAN Xiao-juan

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The working principle of the control system is introduced for a certain type of Auxiliary Power Unit, the control law of the APU is detailed designed, and the bed test steps of the system are discussed. After many times of bed test the functions and performances of the control system are evaluated. The results show that this system can satisfy the needs of start emergency and other power source of engine safely and reliably.

Key words: auxiliary power unit; control system; control law; bed test; aircraft

0 引 言

飞机辅助动力装置(APU)为加装在飞机上的独立于主发动机的动力装置, 它可提供气、电、液能源及轴功率, 满足现代飞机对发动机起动、空中应急、电、液或其他辅助能源的不同需要。APU 是小而简单的装置, 它配有相对少的运动部件, 具有高的推重比, 适用于军用和民用控制辅助动力装置和地面辅助动力装置。这种紧凑的设计可以在小包线内输出较大的动力, 而重量轻的特点增加了它的可运输性。

随着发动机技术的不断进步和性能的不断提高, 其控制系统也由简单到复杂。从早先的机械液压控制系统发展到现在的全权限数字电子式控制系统。经过三十多年的发展和广泛使用, 已充分证

明了数字式电子控制系统的优越性和发展前景, 形成了航空动力装置的控制以数字式电子控制系统取代液压机械式控制系统的必然趋势^[1-2]。

本文以数字电子计算机为控制中心, 分析了某型 APU 控制系统的工作原理, 根据该系统特点设计了控制规律, 完成了系统的台架试车试验。

1 APU 控制系统的工作原理

APU 是一种能输出增压气源和轴功率的小型燃气涡轮发动机, 其控制系统结构原理如图 1 所示, 整个控制系统由数字电子控制器、监控计算机、燃油供应装置、涡轮动力装置、起动发电机、液压负载装置和传感器等组成, 各部件之间相互联系, 共同工作。数字电子控制器是 APU 控制系统的核心部件, 它接收来自监控计算机的给定控制信号, 同时采集来自各传感器的信号, 进行分析处理, 输出控制信号到各执行机构, 并负责故障检测与处理; 监控计算机通过 RS232 串口实现与数字电子控制器的通讯, 给控制器发送 APU 给定转速信号和起动/停

收稿日期: 2008-04-18

作者简介: 钱小娟(1983-), 女, 江苏人, 硕士研究生, 从事无人直升机控制、航空发动机控制研究。

止信号,同时接收控制器测得的 APU 转速、电动泵转速、排气温度等信号并实时显示,以便仿真人员进行试验过程监视;燃油供应装置以电动机带动油泵转动实现供油,为 APU 提供足够压力及流量的燃油,满足 APU 燃油压力的要求,其中三个电磁阀门分别控制燃油供应油路,打开时保证燃油流通,关闭时截断油路;涡轮动力装置(TPU)由高压燃气驱动,通过涡轮轴输出轴功率,在动力轴上连接发电机输出功率,涡轮经减速齿轮箱输出轴驱动液压泵工作,同时压气机的增压空气一部分送入燃烧室参与燃烧,其余大部分通过引气阀提供给空气管理系统,用于座舱的环境控制和起动主发动机;起动发电机负责在 APU 起动时提供初始的转动力矩,同时产生电功率来给飞机供电;液压负载装置主要由液压负载台、液压泵组成,可以通过手动调节负载来检验 APU 转轴的带载功率;APU 控制系统的被控信号是由 APU 上安装的各传感器测量得到,采集的信号包括模拟量排气温度 T_4 、燃烧室气压 P_3 等,频率量 APU 转速 n 。

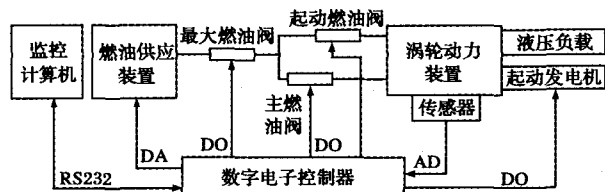


图1 APU 控制系统结构原理图

2 APU 控制系统的控制律设计

APU 的工作过程是复杂的气动热力过程,为了保证在环境条件和工作状态改变的情况下,APU 能够平稳起动、稳定工作及较好地提取功率,本文设计了相应的控制律。

2.1 起动过程控制

起动过程控制是根据 APU 涡轮转速与时间的关系接通最大燃油阀、起动燃油阀、主燃油阀和点火器等附件实现的。起动前先进行控制系统机内自检,然后分七个阶段完成起动过程。

第一阶段,当控制器发出起动指令后,起动发电机励磁和励磁上电,带动 APU 转轴转动,起动机工作,打开最大燃油阀,给电动泵恒量供油,以提供一定的泵压。

第二阶段,APU 转速达到 5% 时点火器工作,起动燃油阀打开,电动泵恒量供油,涡轮开始发出功率。这时剩余起动功率为

$$\Delta W_1 = W_s - W_k - W_c \quad (1)$$

式中: W_s —— 起动发电机功率;

W_k —— 压气机功率;

W_c —— 传动附件及摩擦的功率。

第三阶段,点火成功后涡轮开始发出功率,到 14% 额定转速时主燃油阀打开,电动泵仍然恒量供油,这一阶段的剩余功率为

$$\Delta W_2 = W_s + W_T - W_k - W_c \quad (2)$$

式中: W_T —— 涡轮功率。

这时,剩余功率随着涡轮功率的增加不断增加。

第四阶段,从 14% 额定转速到起动发电机励磁和励磁断电,此时供油规律为

$$m_f = f(n) \quad (3)$$

式中: m_f —— 燃油质量。

这一阶段的剩余功率同式(2),此时涡轮功率 W_T 仍小于或稍大于压气机和附件所需的功率,起动发电机仍协助涡轮工作以提高剩余功率。由上述可以看出,起动发电机功率越大,则剩余功率越大,起动过程就越快。

第五阶段,从起动发电机励磁供电断开到 APU 转速达到 70% 额定转速,此时恒量供油。

第六阶段,APU 转速从 70% 额定转速达到 75% 时,关闭点火器和起动燃油阀,APU 转子由涡轮单独带动,此时仍然恒量供油。

第七阶段,当 APU 转速达到 75% 额定转速且无故障信号时进入闭环控制。在闭环初期通过程序设定使转速给定以每秒 5% 的速度增加,保证闭环过程不超调、不振荡。

2.2 稳态控制

当 APU 达到 95% 额定转速时,起动发电机励磁上电并接通电负载回路,进入发电状态,同时对 APU 进行引气控制和加载控制,此时可以提取电功率、气功率和机械功率。在稳态控制中,整个控制系统为 APU 转速大闭环、电动泵转速小闭环的双闭环控制,控制原理如图 2 所示。APU 转速大闭环根据当前 APU 转速与给定转速的偏差进行控制,APU 转速一旦偏离设定转速,偏差信号经控制律计算后输出控制量给电动泵;电动泵接收控制信号,经放大后驱动电动机转动,电动机上装有直流测速机,将电动机转速所对应的电压信号调理后送至给定控制信号处,形成偏差来调整燃油控制量,从而形成小闭环控制,实现对燃油的精确控制。

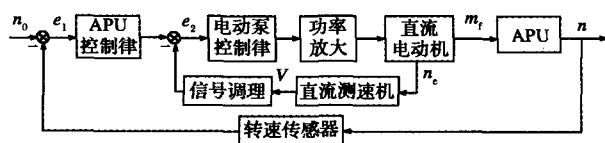


图2 闭环控制原理图

3 APU 台架试车试验

在完成了 APU 控制系统的设计、燃油供应规律调节以及假起动试验之后就进入台架试车试验阶段^[3-4]。试车试验分时序起动、闭环调节至额定转速、功率提取三个环节进行,这三个环节必须依次进行,且对控制系统的要求也不完全一样:

(1) 起动环节:起动过程都是开环控制,这一环节的要求是能够按照规定的时序对电磁阀和燃油泵进行控制。

(2) 闭环调节环节:该环节要求使 APU 能够平稳地由开环控制切换至闭环控制且调节至额定转速。

(3) 功率提取环节:该环节要求能够安全提取功率。功率提取时 APU 可能会出现超温、超转、喘振等现象,要确保安全。

4 试验结果分析

在台架试车试验中,经过参数调整和供油规律的调节,APU 控制系统能够达到较精确的控制,试验结果如图 3~5 所示,分别为 95% 额定转速下 APU 转速百分比、电动泵转速以及排气温度的曲线图。

由曲线可以看出,时序起动阶段 APU 转速上升平稳,未出现大幅波动,在进入闭环控制后平稳过渡到设定转速,无超调无振荡。当达到设定转速 5 s 后就可以提取功率,本文中功率提取主要是引气,由图中可以看出,当引气阀打开时,由于燃烧室气量突然减少,APU 涡轮转速会减小,转速反馈回 APU 电子控制器,与设定转速形成偏差,通过控制律的计算加大电动泵的控制信号,此时电动泵转速迅速提高,补充燃油供给,使 APU 在短时间内恢复设定转速,此时因为 APU 涡轮转速与压气机转速一致,当 APU 达到稳态时,燃烧室进气量恒定,燃油流量增加则油气比增加,故排气温度

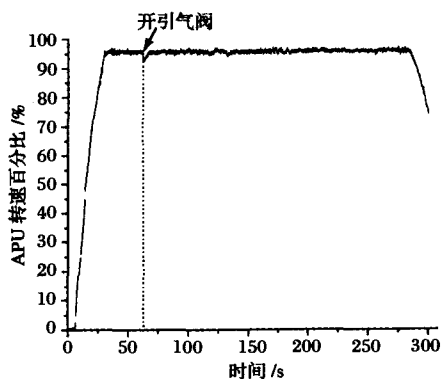


图 3 APU 转速百分比曲线

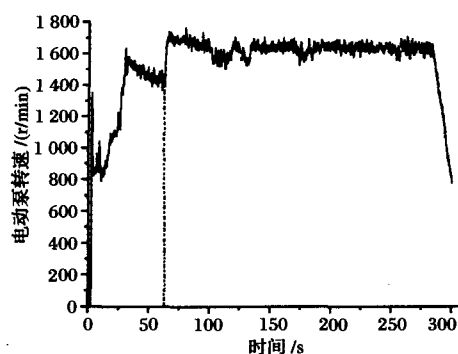


图 4 电动泵转速曲线

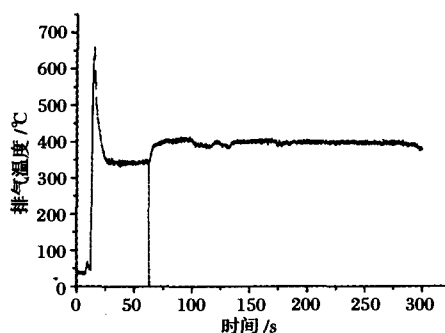


图 5 排气温度曲线

会相应随之提高。在调节引气阀时,APU 转速、电动泵转速和排气温度都作相应的波动,当将引气阀开度调小时 APU 转速一旦有上升趋势,电动泵立刻降低转速减小燃油流量,使 APU 转速保持在设定转速,反之亦然。

5 结 束 语

本文分析了某型 APU 控制系统的工作原理,为了保证 APU 自身的起动、稳定工作和功率提取,设计了相应的控制规律。多次台架试车试验表明,APU 转速能迅速调节至设定转速,无振荡,控制系统的反馈转速与设定转速的误差在 $\pm 1\%$,当引气功率从最小突升至最大时,转速变化小于 2.5% 额定转速,调节时间为 5 s,满足某型 APU 控制系统的控制精度和调节特性指标。

参考文献:

- [1] 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).
- [2] 王曦. 涡喷发动机电子控制器研究[J]. 航空发动机, 2004, 30(3).
- [3] 张天宏,黄向华,曹谦. 微型涡轮发动机控制系统仿真及台架试验[J]. 推进技术, 2006, 27(5).
- [4] Xie Zhiwu, Yu Jun, Liu Jinyang. Applying to Gas Turbine Engine Simulation[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Technology of Object-Oriented Languages and Systems[C], 1999: 458~464.