

APU空中起动性能及其控制规律 试验研究

Experimental Study of APU in Flight Start Performance and Control Logic

李博 章弘 唐宏刚 周宇穗 / 上海飞机设计研究院

摘 要: APU空中起动性能匹配设计是APU系统设计与集成的重要内容。本文提出了一种针对带有冲压进气门的APU系统的空中起动性能匹配试验方法,并结合其在实际工程中的应用,对APU空中起动控制规律的选择进行了验证与分析。

关键词: 辅助动力装置; 空中起动; 控制规律

Keywords: APU; in flight start; control logic

0 引言

辅助动力装置(APU)是大型飞机上安装的独立小型动力装置系统,其主要功能是在地面与空中起动主发动机,向客舱供气,并为各种机载设备提供辅助电源。

如何将既定的APU发动机在飞机上安装匹配且满足APU预定的功能与性能是APU系统设计的主要目标。APU的特殊布局构型及安装位置,使其未安装性能与安装性能有较大差异。较好的系统匹配设计能够较大的发挥APU发动机的性能,提高可靠性与经济性^[1-2]。

1 APU空中起动性能匹配分析

1.1 APU空中起动概述

空中起动是APU的一个重要的过渡工作过程。APU空中起动性能的基本要求是,在压气机不喘振和涡轮前温度不超温的情况下,在给定的时间内按照给定的起动和燃油控制程序点燃燃烧室,并将APU发动机加速到可加载的转速^[1]。

目前,大型飞机特别是大型民用飞

机的APU系统通常采用冲压风门式的进气系统,用以提高APU在飞行过程中的进气总压恢复系数,改善进气性能,提升APU发动机的功率。但同时,这种冲压风门式的进气系统也向APU的空中起动能力提出了更高的要求。

随着飞机飞行高度和速度的变化,APU燃烧室的工作条件也随之变化,APU起动的难易出现差异,同时APU冲压进气门的冲压效果也随飞行环境的变化而变化^[3]。因此,对APU系统间的匹配设计以及APU起动控制规律进行优化,使APU能够在宽广的飞行包线内起动成功,就需要对APU发动机、APU进气系统以及APU起动控制规律进行综合分析研究。

1.2 APU空中起动的影响因素分析

影响APU空中起动的主要因素有APU发动机部件特性(压气机、燃烧室),APU燃油调节规律,起动机特性,进气系统与APU发动机的匹配特性,APU起动控制规律,环境条件(温度、高度、飞行速度)等^[3]。

对于某个特定的APU发动机,其起动机类型及特性、燃烧室特性及燃油调节规律已经确定^[4-7]。因此,优化进气系统与APU发动机之间的匹配、APU起动控制规律,使APU在各种环境条件下满足起动要求,就成为APU空中起动匹配设计的主要目标。

1.3 APU空中起动性能匹配分析

对于带有冲压进气门的APU系统,在飞行过程中,APU进气门的开启角度、开启速率、开启规律等直接影响APU的空中起动性能。

对于特定的APU发动机,其起动过程大致分为三个阶段^[1,8]。

第一阶段:转速从零增加到涡轮开始产生功率的转速 n_1 ,APU完全由起动机带动加速(或空中借助风车效应加速)。此阶段的最后达到 n_1 转速时,APU可向燃烧室供油、点火,燃烧室开始工作。

第二阶段:由涡轮开始产生功率的转速 n_1 到起动机脱开的转速 n_2 ,在这个阶段,起动机与涡轮的扭矩之和驱动

APU加速。

第三阶段:由起动机脱开的转速 n_2 到APU可加载的转速 n_3 ,这个阶段,APU的加速功率由涡轮提供。

1) APU压气机对起动的要求

图1所示为起动过程在APU压气机特性图上的示意。0-1为第一阶段,1-2为第二阶段,2-3为第三阶段。从中可以看出,压气机对于起动过程的要求主要产生在第二阶段的后期和第三阶段,在这段时间内,APU转速迅速提高,APU工作点离喘振边界较近^[1]。此过程的控制重点为APU进气系统应提供充足的进气量以满足APU的加速需求。

2) APU燃烧室对起动的要求

燃烧室特性对APU起动有着较大的影响,影响燃烧室工作的主要参数有余气系数 α 、进气速度 V_{in} 、进气压力 P_{in} 以及进气温度 T_{in} 。

燃烧室特性主要影响APU起动的第一阶段和第二阶段初期。余气系数 α 与进气速度 V_{in} 对APU起动的的影响较大。余气系数 α 的过大过小,都有可能引起熄火。过大的 α 引起的是贫油熄火,过小的 α 引起的是富油熄火,雾化的油滴能够着火燃烧的余气系数的范围就是燃烧室温度工作的范围。另外,燃烧室空气的进气速度 V_{in} 决定着燃烧室稳定工作区间的大小,这个稳定工作的范围随燃烧室空气进气速度 V_{in} 的增加而减小^[2]。进气压力与进气温度主要对APU起动时间的长短产生影响。燃烧室稳定工作范围如图2所示。

对于特定的APU发动机,已经确定其燃油调节规律,即APU燃烧室的稳定工作范围已经确定。因此,燃烧室对APU起动的主要要求是确定合适的燃烧室空气进气速度 V_{in} 以保证点火成功。

1.4 APU空中起动控制规律类型

基于上述的APU起动过程及APU

燃烧室与压气机对起动的要求,可初步拟定APU空中起动控制规律,再结合相应的试验数据对拟定的起动控制规律进行修正与优化,以达到系统的匹配优化。

结合APU起动过程的三个阶段,初步拟定两种APU空中起动控制规律。

1) 进气门线性开启形式(图3所示)

进气门接收到APU起动信号后由零度开始匀速开启至全开位 φ_3 。开启过程中,开启角度在 $\varphi_1 \sim \varphi_2$ 区间内,APU完成点火过程,APU转速由 n_1 加速到 n_2 。继而,APU起动机脱开,APU在涡轮功率的作用下加速到可加载转速 n_3 ,进气门开启至全开位,起动过程结束。

2) 进气门阶段式开启形式(图4所示)

进气门接收到APU起动信号后由零度开始匀速开启,经 t_1 时间后进气门开启角度为 φ_1 。然后进气门停止开启直至 t_2 时刻,在此时间段内APU完成点火过程,APU转速由 n_1 加速到 n_2 。继而,APU起动机脱开,APU在涡轮功率的作用下加速到 n_3 ,此时进气门继续开启至全开位,起动过程结束。

上述两种开启规律中的开启速率、APU点火时间、进气门在各阶段的开启角度值等参数需要通过试验进行确定与修正。

2 APU空中起动性能匹配试验方法及应用

2.1 APU空中起动试验方法

1) APU发动机起动过程主要参数的确定

一般,通过APU发动机台架试

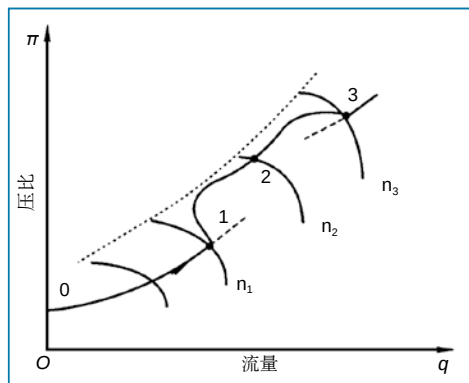


图1 起动过程在APU压气机特性图上的示意

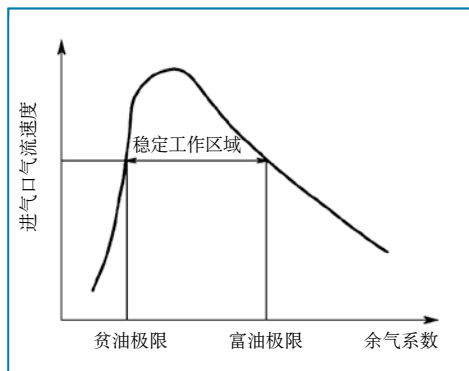


图2 燃烧室稳定工作范围

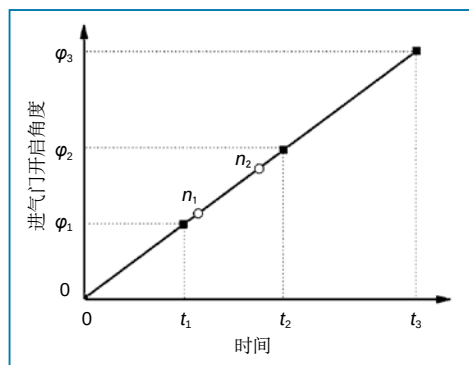


图3 进气门开启角度随时间变化关系方案1

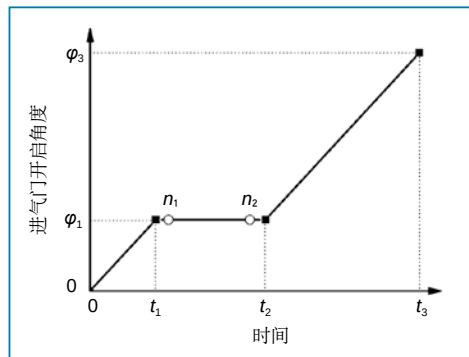


图4 进气门开启角度随时间变化关系方案2

验的方法来确定APU发动机起动过程的主要参数,包括燃烧室稳定工作范围、压气机流量要求、转速特征等,这些参数通常由APU制造商提供,或通过实验室试验得出^[9]。

2) 试验考核参数的确定与测量方案

APU起动匹配试验的目的是调节APU进气系统,以保证APU起动过程中燃烧室工作在稳定工作范围内。因此,需确定相关的试验考核参数并对APU系统进行相应的测试改装,以测定并衡量燃烧室的工作状态。考虑到燃烧室空气进气速度 V_{in} 是影响起动的的主要因素,且 V_{in} 为通过燃烧室进口总压与出口静压的函数,即:

$$V_{in} = f(P_{t1,comb} - P_{s2,comb}) \quad (1)$$

其中, $P_{t1,comb}$ 为燃烧室进口总压; $P_{s2,comb}$ 为燃烧室出口静压。

由于燃烧室进出口压力参数是APU进气截面总压与排气截面静压压差的函数,即:

$$\begin{aligned} V_{in} &= f(P_{t1,comb} - P_{s2,comb}) \\ &= g(P_{t1} - P_{s2}) = g(\Delta P) \end{aligned} \quad (2)$$

其中, P_{t1} 为APU进气截面总压, P_{s2} 为APU排气截面静压。由此得出 $\Delta P = g^{-1}(V_{in})$ 。

因此,APU空中起动试验的测量参数为 $\Delta P = P_{t1} - P_{s2}$ 。APU内部气流流路及进排气截面位置如图5所示,在进排气

界面上加装压力传感器可以测量所需的总压与静压。

3) APU空中起动性能匹配的飞行试验

在飞行包线内选取试验点,并在每个试验点上验证不同进气门开度下的气流特性。飞行试验过程中,APU关车,将进气门固定在试验预定的开启角度位置,对不同进气门开度时的气流特性进行测量,获得不同进气门开度下的 ΔP 值,以及APU发动机的风车转速特性。

4) 试验结果分析,修正并优化APU空中起动控制规律

通过上述获得的试验数据,结合APU燃烧室的稳定工作范围,确定冲压风门开启的关键参数,确定并优化APU起动控制规律。

2.2 APU空中起动试验结果分析

按上述试验方法,以某型恒物理转速APU进行空中起动匹配试验。

1) 确定APU发动机起动过程的主要参数

通过试验室验证,确定了该APU起动过程的主要参数。APU起动过程节点转速 $n_1=(4\sim 8)\%N$, $n_2=(45\sim 55)\%N$, $n_3=(95\sim 98)\%N$;燃烧室稳定工作的最大允许压差 $\Delta P = P_{max}$;点火时间(点火成功后达到稳定加速程度的时间) $t=\Delta T$ 。其中, N 为APU额定工作转速(恒

速), P_{max} 、 ΔT 为已知定值。

2) APU空中起动匹配的飞行试验

在飞机的飞行包线内选取试验点,选取4种飞行高度、5种飞行速度状态进行试验,共20个飞行试验点,几乎覆盖整个飞行包线。同时,在每个试验点上又对多种APU进气门角度状态进行试验与测量,APU冲压进气门的开度分布在30%~65%之间。

试验过程中,APU处于关车状态,通过数据采集设备测量APU风车转速情况与进排气压差 ΔP 值。飞行试验结果如图6~图8所示。

通过对比分析以上试验结果可以得出:

a) 进气门开度不变时,在相同飞行高度下, ΔP 随飞行马赫数的增大而增大。

b) 进气门开度不变时,在相同飞行马赫数下, ΔP 随飞行高度的增大而减小。

c) 低空高马赫数时, ΔP 较大,APU空中起动较难。

d) 在相同飞行高度与马赫数条件下, ΔP 随进气门开度的增大而增大。

e) 在不同的进气门开启角度及飞行状态下,APU的风车转速不同,相对于63%、50%、37%的进气门开度,APU风车转速范围分别是5%~12%、4%~9%

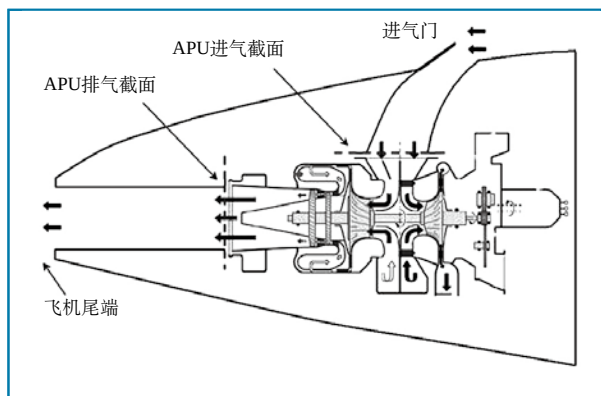


图5 APU内部气流流路及进排气截面位置

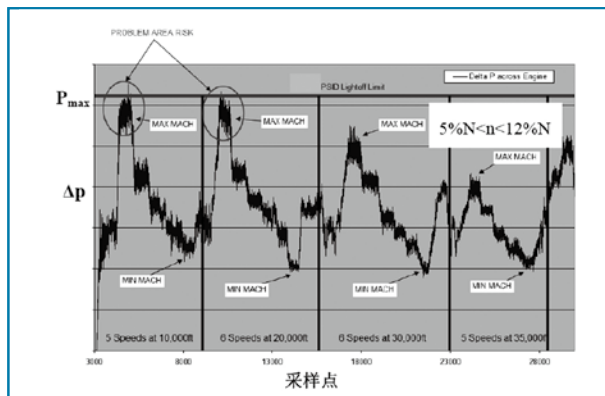


图6 进气门开度为63%时的试验结果

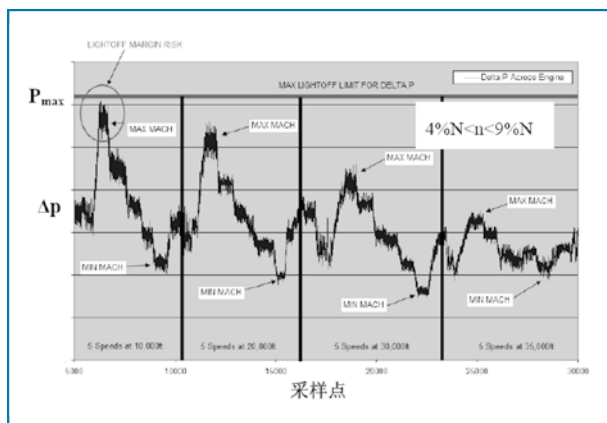


图7 进气门开度为50%时的试验结果

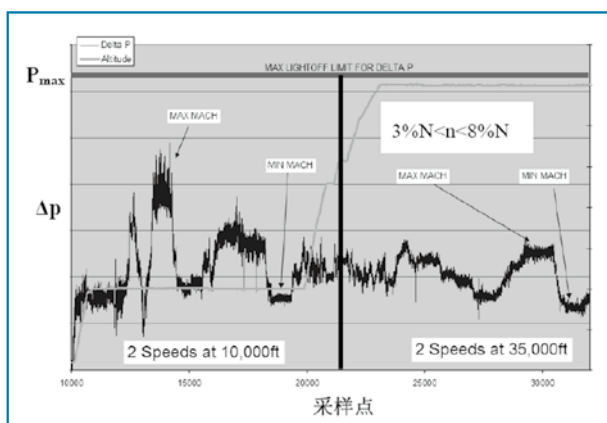


图8 进气门开度为37%时的试验结果

和3%~8%。

2.3 APU空中起动控制规律的选择与分析

1) APU燃烧室稳定工作时进气门开启角度的范围

37%进气门开度时,所有试验点的压差值 ΔP 都小于燃烧室的限制值,即在整個飞行包线内都能满足APU燃烧室稳定工作的要求。50%进气门开度时,低空高马赫数试验点的压差值 ΔP 接近燃烧室的限制值,裕度较小。63%进气门开度时,中低空高马赫数部分试验点的压差值 ΔP 大于燃烧室的限制值,无法满足APU燃烧室稳定工作的要求。因此,为满足APU在整个飞行包线内空中起动的成功,应控制冲压进气门的开启角度,使APU在点火成功后进气门的角度(方案1的 ϕ_2 与方案2的 ϕ_1)不超过37%左右。

2) APU起动点火的初始进气门角度

根据APU起动特性数据判断,APU点火的最佳初始转速 n_1 为(4~8)%N,与37%进气门开度时的风车转速值相当,因此,APU起动点火的初始进气门角度应设置为37%左右。

综上可知,此型APU空中起动过程中必须考虑进气门中途停止的开启

运动方案。若采用方案1进气门线性持续开启方式,根据APU起动时间计算,APU到达 n_2 时的进气门开度已达到65%左右,此时 ΔP 已经超出燃烧室稳定工作范围,无法满足整个飞行包线内的起动要求,因此方案1不适用。

3) APU空中起动控制规律

经以上试验与分析,对于此类空中起动稳定工作区间较窄的APU,可采用进气门阶段式开启形式的起动控制规律,即方案2的控制规律,以保证APU在起动过程中燃烧室稳定可靠的点火,方案中的主要参数可设置为 $\phi_1=37\%$, $\Delta T=t_1-t_2$ 。

4 结论

本文提出了一种针对APU系统中起动性能匹配的试验方法,并结合其在实际工程中的应用,对APU空中起动控制规律的选型进行了验证,为大型飞机APU的系统集成设计提供参考和借鉴。

AST

参考文献

- [1] 廉筱纯. 航空发动机原理[M]. 西安:西北工业大学出版社,2005:315-325.
- [2] 尚义. 航空燃气涡轮发动机

[M]. 北京:航空工业出版社,2008:92-94.

[3] 朴英. 航空燃气涡轮发动机起动性能分析[J]. 航空动力学报,2003,18(6):777-782.

[4] 张绍基. 航空发动机燃油与控制系统的研究与展望[J]. 航空发动机,2003,29(3):1-10.

[5] 王兆铭. 某型航空发动机空中起动供油规律的研究[J]. 航空动力学报,2010,25(5):1163-1168.

[6] 马燕荣. 某型燃气涡轮起动机空中起动试验[J]. 航空发动机,2009,35(4):44-47.

[7] 马燕荣. 某型燃气涡轮起动机空中起动调整试验[J]. 燃气涡轮试验与研究,2009,22(1):13-16.

[8] 钱小娟. 某型APU控制系统的设计与台架试车[J]. 航空兵器,2008(3):42-44.

[9] 许松. 航空发动机起动试车台的研制[J]. 机械研究与应用,2009(6):71-75.

作者简介

李博,助理工程师,主要从事辅助动力装置系统设计与研究工作。