

文章编号:1000-8055(2011)09-2122-06

辅助动力装置建模及数值仿真

常博博¹, 苏三买¹, 刘铁庚², 刘美凤²

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072;

2. 中国航空工业集团公司 中国航空动力机械研究所, 湖南 株洲 410003)

摘 要: 为辅助 APU(auxiliary power unit)的研发,以目前广泛应用的带负载压气机结构 APU 为研究对象,进行建模分析与研究.首先介绍了 APU 结构特点与调节规律,然后分析了负载压气机对 APU 共同工作的影响,最后采用部件法建立了该类型 APU 数学模型并设计仿真软件.以某型 APU 为对象,数值仿真与实际试车数据比较,结果表明所采用的建模方法是正确的,计算误差小于 5%,所建立的模型能够满足工程需求.

关 键 词: 辅助动力装置 (APU); 负载压气机; 数学模型; 数值仿真; 部件法

中图分类号: V235.1

文献标志码: A

Model and numerical simulation of auxiliary power unit

CHANG Bo-bo¹, SU San-mai¹, LIU Tie-geng², LIU Mei-feng²

(1. School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. China Aviation Powerplant Research Institute,

Aviation Industry Corporation of China, Zhuzhou Hunan 410003, China)

Abstract: In order to supporting auxiliary power unit (APU) design, the widely used APU with load compressor in structure was discussed and modeled. Firstly, the structural characteristics and regulation law are introduced and then how the load compressor works on APU was analyzed. Finally the mathematic model of APU was established based on components. Take a kind of APU as the object for numerical simulation and then compare with the actual test data. The results show that the dynamic simulation error is less than 5%. The mathematic model of APU is suitable for engineering usage.

Key words: auxiliary power unit (APU); load compressor; mathematic model; numerical simulation; components method

辅助动力装置(auxiliary power unit,简称 APU)是装在飞机上的一套不依赖于机外任何能源、自成独立体系的小型燃气涡轮动力装置^[1-4],其功用是为飞机主发动机起动和飞机环控系统提供压缩空气,同时带动发电机向飞机提供电源,是飞机的重要子系统^[5-6].

APU 在结构上主要有单转子和双转子两种

类型,引气包括从主压气机引气和负载压气机引气两种方式^[7].目前民用客机 B737, A320 等广泛应用单轴带负载压气机结构形式的 APU.

建模与仿真是辅助动力装置研发与控制系统设计的重要支持与技术基础,国外(如著名的 HoneyWell, Hamilton Sundstrand 公司)APU 研究技术成熟、产品系列化^[8],国内对带负载压气机的

收稿日期:2010-09-25; 修订日期:2011-01-18

基金项目:航空科学基金(20100653006)

作者简介:常博博(1986—),男,陕西渭南人,硕士生,主要从事航空发动机建模与仿真方向研究.

APU 建模研究甚少,当前大型飞机设计对 APU 需求迫切.由于以往侧重军用大型发动机的建模工作,对 APU 的设计与仿真技术积累不够,为此,本文以该类型 APU 为研究对象,进行 APU 结构特点分析,并根据共同工作原理进行发动机建模,设计仿真软件,将实际试车数据与仿真数据对比,验证建模方法的正确性与模型实用性,以便为 APU 研发提供技术支持.

1 结构特点

不同的发动机结构形式、不同的工作模式与应用情况,对模型的要求也不同,为更准确定位要建立发动机模型的要求,首先对该型 APU 的特点进行简要分析.

本文所研究的单轴带负载压气机 APU 结构原理如图 1,主要包括主发动机、负载压气机及其引气机构、附件传动机构三个部分,其中主发动机由单级离心压气机、回流环形燃烧室、两级轴流涡轮、不可调扩散喷管组成;负载压气机为单级离心压气机,与主发动机同轴,通过蜗壳向外引气;附件及其传动包括供油与润滑、在机匣上安装的大功率发电机等.

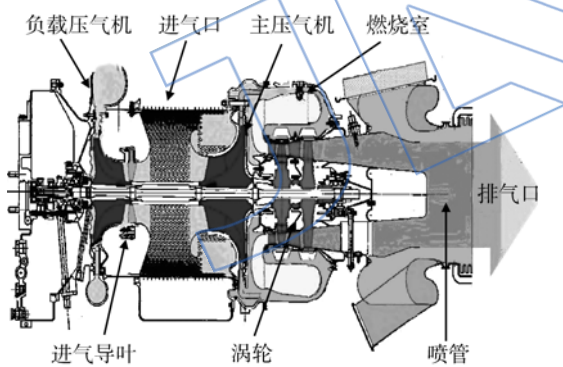


图 1 APU 结构原理图

Fig. 1 Structure and principle of APU

负载压气机是该类 APU 的明显特征,其出口引气示意如图 2 所示.

负载压气机蜗壳引气管出口分叉为两根管道,一路经喘振控制阀 SCV(surge control vavle)引到喷管,SCV 为无级可调面积阀,用于控制放气量防止负载压气机喘振;另一路经负载控制阀 LCV(load control vavle)引到飞机,LCV 为开关阀,引气进入飞机气体管路系统后由飞机不同的控制阀控制又分两路,一路进入主发动机起动系统 MES(main engine system),另一路进入飞机

环控系统 ECS(environment control system),根据飞机工作引气,用于起动主发动机或给环控系统供气.

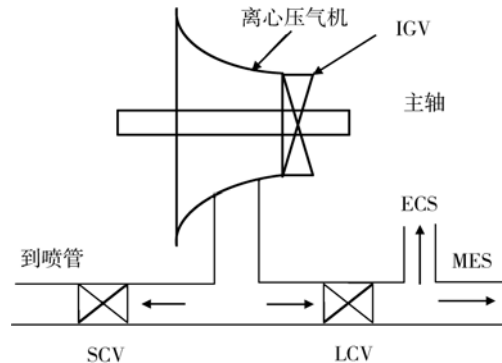


图 2 APU 负载压气机引气示意图

Fig. 2 APU schematic of load compressor
air bleeding

为适应不同的引气量需求,负载压气机进口处设有可调进口导流叶片 IGV(inlet guide vavle),用于在不同工作条件下控制 APU 进气量.

2 工作模式与调节规律分析

APU 工作模式与状态主要包括:起动、电提取功率、主发动机起动、环控引气、停车^[8-9].

1) APU 起动.在转速到达 95%之前,属于起动段,采用时序开环控制,既不引气也不提取电功率;负载压气机出口管道喘振阀 SCV 全开,引气阀 LCV 关闭,负载压气机出口气流通过 SCV 排到 APU 尾喷管.进口导叶 IGV 处于角度最小状态,以提高 APU 起动速度.

2) 转速上升至 95%之后,进入转速闭环控制,根据工作模式不同保证 APU 恒物理转速工作.允许飞机引气和电功率提取,其中根据飞机引气指令,控制到相应的引气模式.在 MES 引气模式,转速控制在 100%;在 ECS 引气模式,转速控制在 99%.

3) 负载压气机喘振控制.在 MES 和 ECS 两种引气模式下,为满足引气压力要求,引气压力均较高,负载压气机工作点接近喘振边界;同时由于引气量随负载变化不可控(如环控引气模式,座舱气量变化),出口负载变化,引起负载压气机的工作点波动,当出口需气量减小时,有可能使工作点逼近喘振边界,进而引发喘振.当引气压力与流量波动可能引起负载压气机喘振时,根据工况,系统闭环调节喘振阀 SCV 的开度,将部分引气量排放到喷管,维持引气压力基本恒定.

4) APU 停车. 当接到飞机停车指令后, 供油被切断, SCV 全开, LCV 关闭, 转速下降, 时序控制停车.

5) 负载压气机导叶角度控制. 上述过程中, 为与 APU 主发动机工作匹配, 负载压气机进口导流叶片角度按设定的控制规律开环调节.

3 建模方法

3.1 模型特点

从建模的角度, 该类型 APU 侧重关注以下三个方面: 第一, 核心机建模. 根据结构与工作特点可参考单轴涡轴发动机的建模机理建立核心机的共同工作方程^[10-11]. 第二, 喷管出口参数计算. 该 APU 采用扩散喷管, 喷管出口气流处于亚临界状态并完全膨胀到大气压力, 其次从 SCV 排出的空气与喷管气流混合^[12]. 第三, 负载压气机与主发动机共同工作. 负载压气机与主压气机同轴, 作为大发动机和环控的气源, 其工作状态影响核心机的共同工作. 工作模式的不同, 负载压气机的工作点也不一样. 负载压气机的模型是该型 APU 建模的难点, 主要是其工作点的确定, 起动时无负载, 工作点低; 主发动机起动或环控方式工作时, 引气压力高, 工作点高.

3.2 建模方法

根据共同工作原理, 采用部件法建立 APU 模型, 其中核心机部分与单轴涡轴发动机类似, 尾喷管处于亚临界完全膨胀, 排气静压按出口大气压计算, 负载压气机满足流量平衡和功率平衡, 核心机功率平衡考虑负载压气机功率. 此外动态过程的建模考虑各个部件气容(主压气机、负载压气机、燃烧室、涡轮)、提取电功率、转子转动惯量等.

建模选取负载压气机压比之比(π_y)、主压气机压比之比(π_c)、转速(n)和涡轮流量(W_{g4})四个参数作为独立变量, 构建 APU 共同工作的非线性方程, 并采用牛顿-拉夫逊法求解, 得到 APU 各截面气动性能参数.

四个共同工作方程如下:

1) 主压气机出口空气流量 W_{a2} 与燃油流量 W_f 之和与涡轮出口燃气流量 W_{g4} 平衡

$$W_{a2} + W_f = W_{g4} \quad (1)$$

2) 负载压气机功率 N_l 和主压气机功率 N_c 及电机所提取的功率 H_p 与涡轮产生的功率 N_t 平衡

$$N_t \eta_t = N_l + N_c + I \cdot \left(\frac{\pi}{30} \right)^2 \cdot n \frac{dn}{dt} + H_p \quad (2)$$

其中 η_t 为涡轮效率; I 为转动惯量.

3) 通过尾喷管的气流量 W_{g7} 等于涡轮出口的燃气流量 W_{g4} 与流过 SCV 的气流量 W_{ascv} 和平衡

$$W_{g7} = W_{ascv} + W_{g4} \quad (3)$$

4) 负载压气机出口根据压气机特性插值的空气流量 W_{a1} 与根据出口引气气流要求所计算的空气流量 W_{ar} 平衡, 其中 W_{ar} 应等于 SCV 的流量 W_{ascv} 与 LCV 流量 W_{alcv} 之和.

$$W_{a1} = W_{ar} \quad (4)$$

4 仿真软件设计

4.1 软件设计

根据上述建模方法, 采用 VC++ 编写 APU 性能仿真实时计算程序, 软件界面见图 3.

仿真界面主要由控制区、数据显示区两部分组成. 控制区包括起动、停车开关、引气开关、工作模式设定、引气节流阀开度、提取功率; 数据显示区包括: 关键参数数值显示、参数曲线动态显示, 两者用于动态显示 APU 各截面的气动参数及性能参数. 模型计算周期 20ms, 每 0.2s 刷新一次界面, 结合 APU 工作模式与调节规律, 可进行 APU 各工况下的性能仿真.

4.2 计算方法

动态计算时, 气容按一维定常管流处理^[12]. 为解决计算实时性, 参考试车数据, 给定接近工作状态的初猜点, 此外由于 APU 工作特点, 共同工作点波动不大. 模型经实测, 单点运行时间不超过 10ms.

4.3 仿真流程

仿真软件可按照 APU 工作模式与调节规律运行. 进入仿真界面按下起动按钮后, APU 开始起动, 时序供油, 转速上升, 当转速上升至 95% 时, 允许引气与电功率提取, 相应控件变亮. 当引气开关处于 ON 时, 引气模式控件变亮, 可进行 MES 与 ECS 模式间的切换仿真, 期间通过调节引气节流阀开度来调节引气负载大小, 也可通过功率提取控件设定提取电功率数值. APU 工作过程中, 通过调节供油量维持转速恒定. 按下停车按钮, 停止仿真, 数据自动存盘. 仿真过程中, 可通过各参数前复选框选择需实时监控的参数.

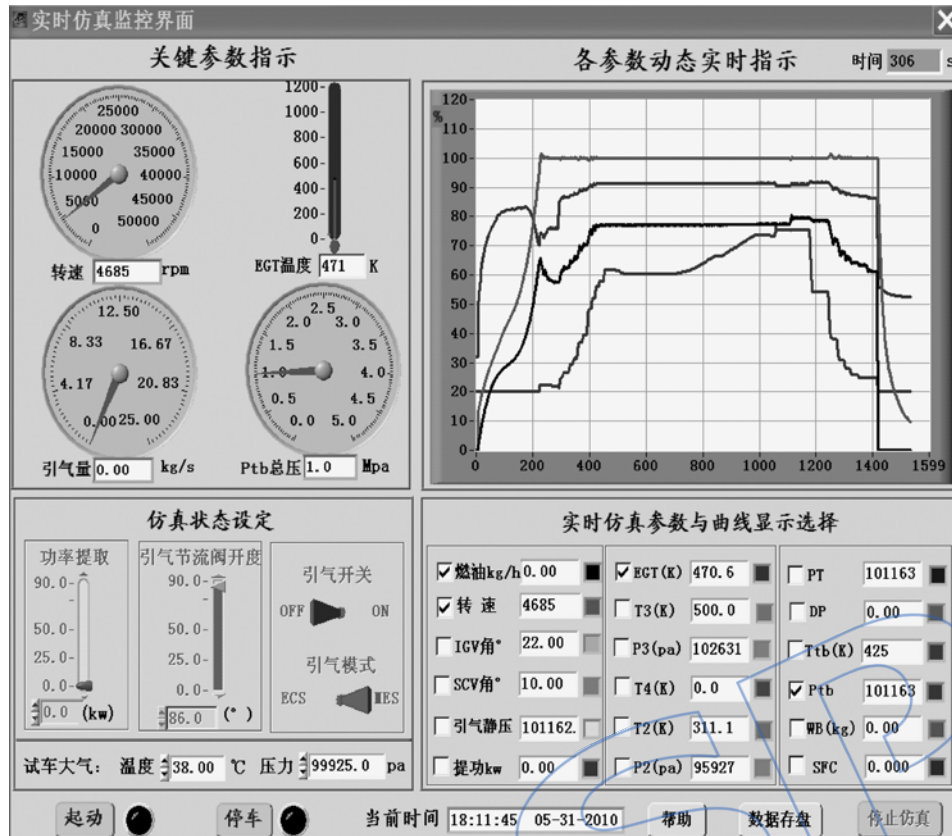


图3 APU性能数值仿真界面

Fig.3 APU performance numerical simulation mainframe

5 仿真与结果验证

以某型APU为研究对象进行全工况范围实时仿真,并与试车数据进行对比。图4~图7为MES模式下仿真结果与试车数据对比曲线。图8~图11为ECS模式下仿真结果与试车数据对比曲线。

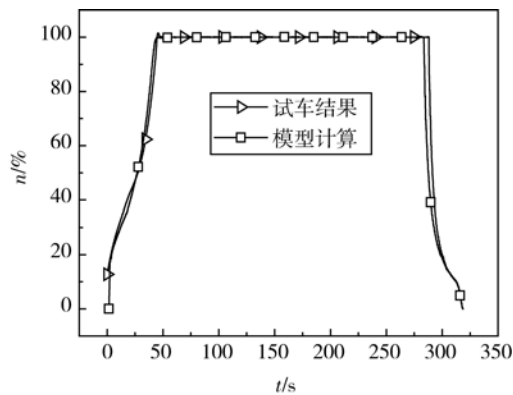


图4 转速变化曲线比较(MES模式)

Fig.4 Comparison of speed between numerical simulation and test results
(MES mode)

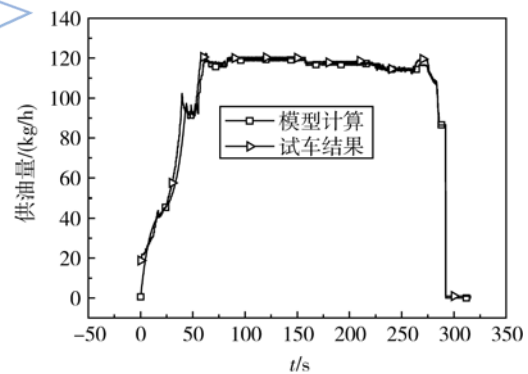


图5 供油量变化曲线比较(MES模式)

Fig.5 Comparison of fuel between numerical simulation and test results
(MES mode)

典型工作点仿真数据与试车数据对比结果如表1和表2。

从两种主要工作模式以及典型工作点仿真计算结果与试车数据对比可以看出,所设计的APU模型计算结果与试车数据基本吻合,主要工作范围仿真计算误差控制在5%以内。

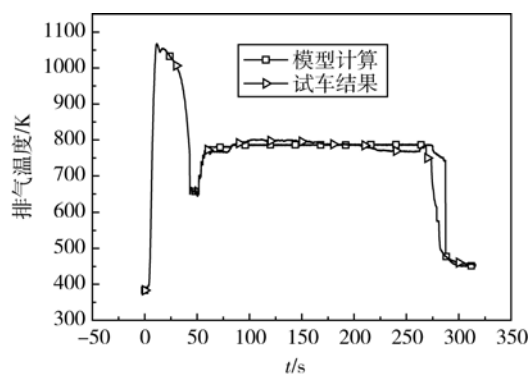


图6 排气温度变化曲线比较(MES模式)

Fig. 6 Comparison of exhaust gas temperature between numerical simulation and test results (MES mode)

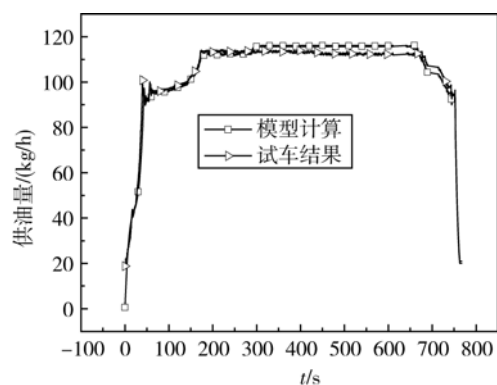


图9 供油量变化曲线比较(ECS模式)

Fig. 9 Comparison of fuel between numerical simulation and test results (ECS mode)

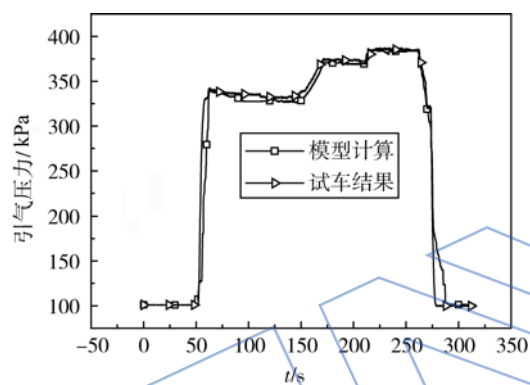


图7 引气压力变化曲线比较(MES模式)

Fig. 7 Comparison of pressure of bleed air between numerical simulation and test results (MES mode)

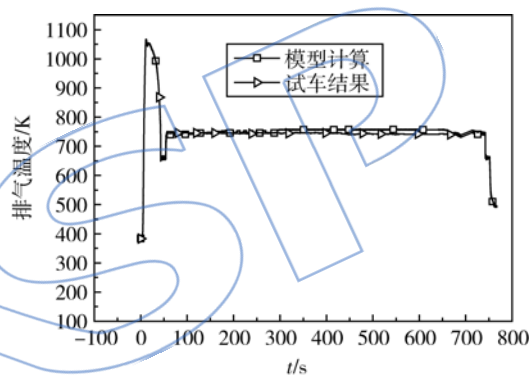


图10 排气温度变化曲线比较(ECS模式)

Fig. 10 Comparison of exhaust gas temperature between numerical simulation and test results (ECS mode)

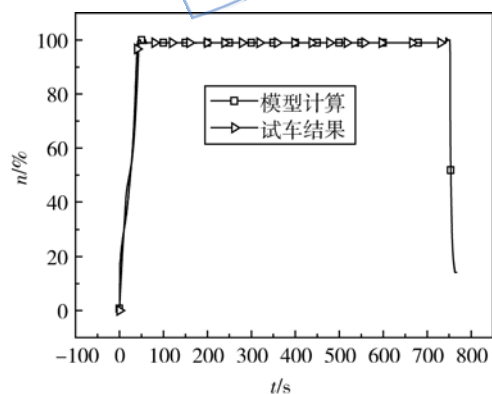


图8 转速变化曲线比较(ECS模式)

Fig. 8 Comparison of speed between numerical simulation and test results (ECS mode)

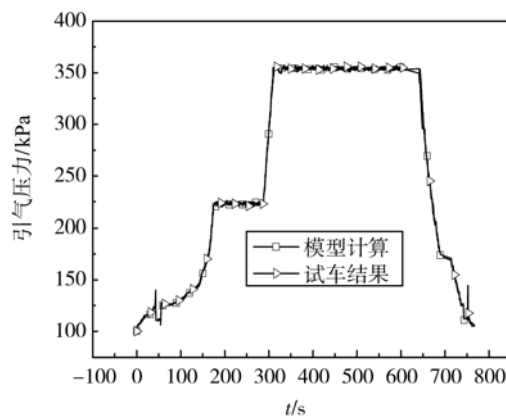


图11 引气压力变化曲线比较(ECS模式)

Fig. 11 Comparison of pressure of bleed air between numerical simulation and test results (ECS mode)

表1 典型工作点仿真数据与试车数据对比(ECS模式)

Table 1 Comparison of typical operation point between numerical simulation and test results(ECS mode)

比较参数	试车数据	仿真结果	误差
$n/(r/min)$	48314.1	48300.5	0.02%
供油量/(kg/h)	115.708	113.93	1.43%
引气压力/kPa	353	352	0.12%
排气温度/K	757.45	745.60	1.6%

表2 典型工作点仿真数据与试车数据对比(MES模式)

Table 2 Comparison of typical operation point between numerical simulation and test results(MES mode)

比较参数	试车数据	仿真结果	误差
$n/(r/min)$	48818	48790.5	0.05%
供油量/(kg/h)	117.68	115.13	1.99%
引气压力/kPa	386	387.8	0.35%
排气温度/K	789.45	768.60	2.66%

6 结论

辅助动力装置(APU)是飞机重要的子系统,为辅助APU研发,本文以带负载压气机的APU为研究对象,首先介绍APU的结构特点、引气管路控制、系统工作模式,然后基于部件法,结合APU的工作特点建立了动态数学模型,典型工作点计算以及全工况仿真与实际试车数据对比表

明,所采用的建模方法是正确的,建模精度符合工程需要,可应用于该类型APU性能数值仿真。

参考文献:

- [1] Rodger C, Johnson D C. APU fuel efficiency and affordability for commercial aircraft[R]. AIAA 1987-1907, 1987.
- [2] Cristian A. A novel start system for an aircraft auxiliary power unit[C]//Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit. Las Vegas, NV, USA; IECEC 2000, 1:7-11.
- [3] Dimitry G, Kevin D, Dinkar M. Model-based diagnostics for an aircraft auxiliary power unit[C]//IEEE Conference on Control Applications. Glasgow; IEEE, 2002:215-219.
- [4] Rodgers C. Performance of single shaft load compressor auxiliary power units[R]. AIAA-1983-1159, 1983.
- [5] Rodgers C. Auxiliary power units for current and future aircraft[R]. SAE Technical Paper, 912059, 1991.
- [6] Rodgers C. Secondary power system for advanced fighter[R]. AIAA 1985-1280, 1985.
- [7] 金中平. 辅助动力装置及其标准发展综述[J]. 航空标准化与质量, 1998(4):19-22.
JIN Zhongping. The auxiliary power units and its development[J]. Aeronautic Standardization & Quality, 1998(4): 19-22. (in Chinese)
- [8] 《航空发动机设计手册》总编委会. 航空发动机设计手册(第十四册)[M]. 北京:航空工业出版社, 2000.
- [9] 宋静波. 波音737飞机动力装置:CFM56-3 & APU[M]. 广州:中山大学出版社, 2008.
- [10] 廉小纯. 航空燃气轮机原理(上、下册)[M]. 北京:国防工业出版社, 2001.
- [11] 骆广琦, 桑增产, 王如根, 等. 航空燃气涡轮发动机数值仿真[M]. 北京:国防工业出版社, 2007.
- [12] 樊思齐. 航空发动机控制(下册)[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2008.