

文章编号:1000-8055(2011)09-2095-06

辅助动力装置喘振控制方法

苏三买¹, 常博博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 412002)

摘 要: 以带负载压气机的辅助动力装置(APU)为研究对象,分析了其引气工作特点及负载压气机喘振机理,提出采用出口换算流量小于最小稳定工作流量的方法来控制负载压气机稳定工作,当 APU 出口换算流量小于最小稳定工作流量 2% 时,通过打开喘振控制阀(SCV)防止 APU 喘振. 设计了比例积分微分(PID)控制器控制 SCV 开度,试车数据与相同条件下的喘振仿真试验结果对比表明,所提出的方法既可避免负载压气机喘振,又可保证出口压力满足引气要求.

关 键 词: 辅助动力装置; 负载压气机; 喘振; 出口换算流量; 喘振控制阀 (SCV)

中图分类号: V235.95

文献标志码: A

Research on control method of surge in auxiliary power unit

SU San-mai¹, CHANG Bo-bo¹, 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 412002, China)

Abstract: The surge mechanism of auxiliary power unit (APU) with load compressor was analyzed. To ensure load compressor's working stability, the method of controlling exit corrected flow less than the minimum stable work flow was put forward. When load compressor exit flow is less than 2%, compared with minimum stable flow, the surge control valve (SCV) used to avoid surge was opened. Proportion-integral-differential (PID) controller was designed to control the opening angle of SCV so as to avoid surge of load compressor, and make exit pressure of air meet certain requirements. Compared with APU actual test data, numerical simulation results show that the method can be used to ensure the load compressor's working stability.

Key words: auxiliary power unit; load compressor; surge; exit corrected flow; surge control valve (SCV)

辅助动力装置(auxiliary power unit, 简称 APU)是一种安装在大型飞机上的独立小型燃气涡轮发动机,主要为飞机主发动机起动和环控系统提供压缩空气^[1-3]. 目前飞机上应用较广泛的是带离心式负载压气机结构的 APU,压缩空气由负

载压气机提供.

当 APU 引气时,无论是主发动机起动模式还是环控引气模式,为满足工作要求,引气压力均较高,负载压气机工作点接近喘振边界;同时由于引气量变化不可预测(如环控引气模式,座舱气量

收稿日期:2010-09-30; 修订日期:2011-02-09

基金项目:航空科学基金(20100653006); APTD 项目(APTD-0401-01)

作者简介:苏三买(1968—),男,陕西府谷人,副教授,博士,主要从事航空发动机建模与仿真.

变化),使得出口负载变化,引起负载压气机工作点波动,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^[4].

由于APU主要功能之一是引气,无论出口负载如何变化,始终要求保持引气的出口压力维持在一定范围,与主发动机喘振控制不同,不能采用诸如放气方法(压力迅速降低,低于引气压力要求)或切油降转退喘^[5],因此如何实现负载压气机喘振预测与控制是APU一项重要研究内容.

上述类型APU在国外研究与工程应用成熟,但关于负载压气机喘振控制的文献极少.国内以往对APU研究甚少,关于负载压气机喘振控制基本为空白^[6].本文根据该类型APU负载压气机特点及工作模式,分析并研究防喘控制方法,既保证在任何工作状态下不喘振,同时维持出口压力在要求工作范围.

1 APU引气及喘振分析

带负载压气机的APU结构简图^[7-8]如图1.

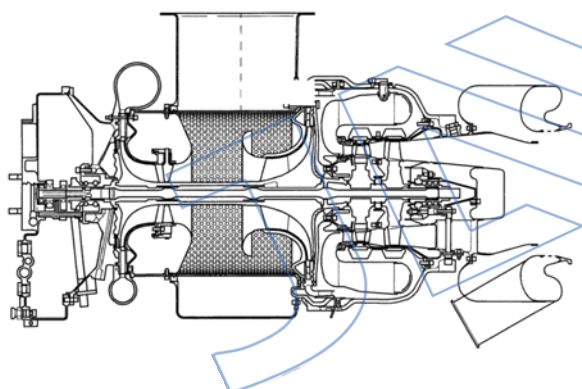


图1 带负载压气机 APU 结构简图

Fig.1 Structure of APU with load compressor

进气道一进两开(分别进主发动机和负载压气机),主发动机类似单轴涡轴发动机,前端输出轴驱动负载压气机与附件,其中负载压气机为带进口可调导叶离心式结构,出口接两根管道,一根接喘振控制阀 SCV(surge control valve)将气流引到主发动机喷管、另一根接负载控制阀 LCV(load control valve).根据飞机引气指令,如图2,LCV出口气流输送到飞机主发动机起动系统 MES(main engine system)或飞机环控系统 ECS(environment control system).

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 vav-le),用于在不同工作条件下控制 APU 进气量.

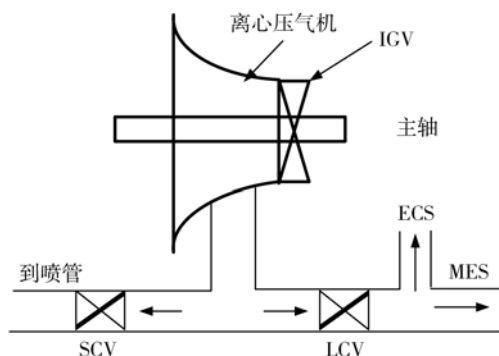


图2 APU负载压气机引气示意图

Fig.2 Schematic of APU load compressor air bleeding

APU工作时,主发动机保持恒定转速,负载压气机与主发动机同轴,因此转速始终恒定,负载压气机的工作主要通过进口导叶 IGV、喘振控制阀 SCV 和引气节流阀、LCV 来控制,其中 SCV 为位置无级可调阀,LCV 为开关阀.

引气调节规律:进气导叶采用开环调节,根据进口大气条件调节到给定角度.

APU 起动时,SCV 全开,LCV 关闭,压气机出口空气全部排放到喷管,工作点较低;当起动进入稳定转速时,允许引气.当 APU 工作在引气模式时,LCV 全开,SCV 关闭,随引气负载(主发动机起动或环控引气量)变化,负载压气机出口压力和流量也将发生变化.当负载压气机引气压力升高时,其工作点将上升并逐渐逼近喘振边界.为了保证压气机稳定工作,同时保证其出口压力和流量维持在主发动机和环控要求范围内,需时刻监控工作点的变化,并通过控制 SCV 的位置,以保证负载压气机在工作中不喘振,同时能稳定工作.

2 喘振判定方法

压气机稳定性控制技术在国内外受到了研究人员的重视^[9-12].目前,在美国综合高性能涡轮发动机技术(IHPTET)计划下,美国空军正与工业界联手研究并确定稳定性主动控制(ASC)用于发动机的可行性,IHPTET 计划控制系统的发展目标之一是减少 50% 的裕度^[9].

压气机喘振控制是将稳定性检查加入到发动机控制逻辑中去,实时地计算非稳定性影响,对压气机稳定性进行在线评估,并形成反馈控制系统,将安全的喘振裕度减至最小,从而提高发动机性能.

在实际应用中,压气机喘振控制的核心包括

两个方面:一是检测哪些参数,并依据什么计算准则来预测即将发生喘振;二是根据检测到的参数如何设计控制规律,建立控制模型并设计控制器,推动执行装置,消除或避免进入喘振^[10-11]。

综上,进行喘振控制,关键是如何检测喘振即将发生,即喘振的预测或判定。

2.1 判定原理

本文所研究的APU,其测量参数包括负载压气机的进口总温 T_2^* 、进口总压 p_2^* 、出口总压 p_1^* 、出口总压与静压的压差 Δp 。

对于离心式负载压气机,由图3特性曲线可以看出,工作转速越高,压力随着流量的变化越剧烈,但物理流量变化不大,而压比变化剧烈。目前民用离心式压缩机上通常采用固定极限物理流量法来判别喘振^[11],以此流量为喘振判断条件势必降低检测信号的敏感程度,进而影响控制精度。由于受进口导叶调节影响(特性线改变)和进气大气条件变化,该方法在APU上不适用。在理论上,通常选用压气机出口压力脉动值与其均值之比作为喘振判别特征参数,该方法适用于工作点处于临界喘振状态,对于APU,为保证出口引气压力基本恒定,不允许进入临界喘振状态,因此该方法也不适用。

为克服上述两种方法在APU上应用的不足,本文提出并采用压气机出口换算流量的方法来预测喘振。

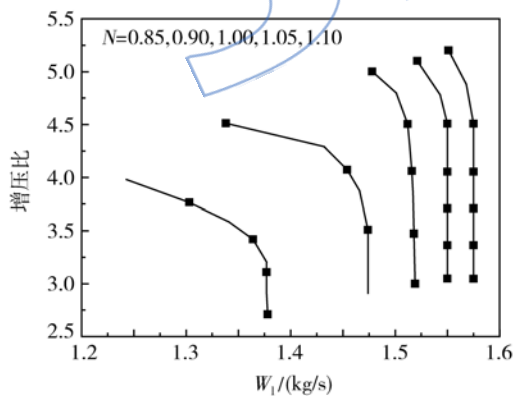


图3 按进口参数表示的压气机特性

Fig. 3 Compressor map according to inlet airflow parameter

2.2 负载压气机出口换算流量计算

系统测量的负载压气机出口总压 p_1^* 与静压 p_s 的压差 Δp 反映了压气机的出口流量大小。根据测量的进口总温 T_2^* 与上述参数,可计算出口

总温 T_1^* ,根据气体动力学与发动机原理,当压气机工作在某一转速时,出口总压与静压满足式(1)

$$\frac{p_s}{p_1^*} = \left[1 - \frac{\kappa-1}{\kappa+1} \lambda^2 \right]^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (1)$$

其中 p_s 为负载压气机出口静压; κ 为气体等熵指数; λ 为出口气流速度因数。

根据实测的出口总压 p_1^* 与压差 Δp 带入式(1)则有

$$\frac{p_1^* - \Delta p}{p_1^*} = \left[1 - \frac{\kappa-1}{\kappa+1} \lambda^2 \right]^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (2)$$

由此可计算出速度因数 λ ,则流量函数 $q(\lambda)$ 为

$$q(\lambda) = \left[\frac{\kappa+1}{2} \right]^{\frac{1}{\kappa-1}} \cdot \lambda \cdot \left[1 - \frac{\kappa-1}{\kappa+1} \lambda^2 \right]^{\frac{1}{\kappa-1}} \quad (3)$$

根据压气机工作原理,出口总温 T_1^* 为

$$T_1^* = T_2^* \frac{1 + [(\pi_c)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1]}{\eta_c} \quad (4)$$

其中 η_c 负载压气机工作效率, π_c 为增压比。

负载压气机出口流量

$$W_1 = K \cdot p_1^* / \sqrt{T_1^*} \cdot A q(\lambda) \quad (5)$$

其中 T_1^* 为负载压气机出口总温; A 为压气机出口流道面积; K 为常数。

综上,按测量参数计算的负载压气机出口换算空气质量为

$$W_{1,cor} = W_1 \left[\sqrt{\frac{T_1^*}{T_2^*}} / \sqrt{\frac{p_1^*}{p_2^*}} \right] \quad (6)$$

2.3 极限换算流量计算

由于该APU的负载压气机实际工作过程比较复杂,压气机在不同转速,不同进气条件和不同进口导叶角度下能够稳定工作的极限换算流量不一样,为进行喘振判断,需计算不同条件下的极限换算流量。本文根据压气机特性曲线,选取进气温度、进口导叶角度、引气压力需求(环控引气或主发动机起动引气)为输入参数,计算出压气机稳定工作的极限换算流量 $W_{limin,cor}$ 。

2.4 喘振判定方法分析

将按进口参数表示的压气机特性(图3),根据式(6)计算出负载压气机出口换算流量,转换为按出口换算流量表示的特性,转换结果如图4。由图可以看出,转换后的特性曲线中,流量变换由原来的1.2~1.6 kg/s范围扩展到0.387~1.6 kg/s,当工作点变化时,明显降低了流量变化的梯度,而且流量与压比关系近似为分段直线。

当进行喘振控制时,将当前工作状态的出口换算空气质量与计算的出口极限换算流量进行比

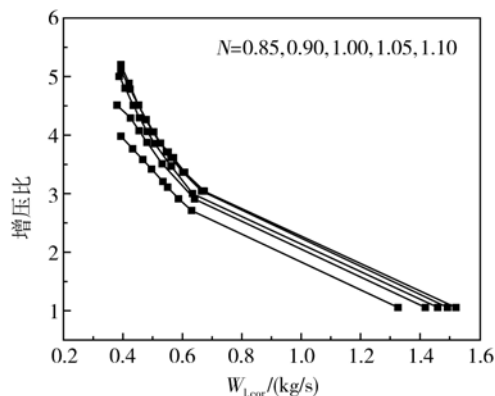


图4 按出口换算流量表示的压气机特性

Fig. 4 Compressor map according to exit airflow corrected parameter

较,如果出口换算空气流量小于喘振的极限换算流量,则控制喘振阀 SCV 的角度,保证负载压气机出口压力维持在一定范围。

3 控制器设计与仿真

3.1 控制器设计

根据上述方法,可以通过控制负载压气机出口喘振控制阀 SCV 的开度保证引气压力稳定在一定范围,即压气机工作点维持在喘振边界附近,同时不发生喘振。

针对 APU 引气特点,本文设计比例积分微

分(PID)控制器控制 SCV 阀开度的大小,使压气机在某一工作转速下,出口换算流量不超过极限换算流量。

控制器输入为

$$u(k) = K_p \cdot \left[e(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{i=0}^{k-1} e(i) + T_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \right] \quad (7)$$

实际控制,采用增量修正,按下式计算:

$$\Delta u(k) = K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + K_d [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (8)$$

其中 $e(k)$ 表示计算的出口换算空气流量 $W_{l,cor}$ 与极限流量 $W_{lmin,cor}$ 的差。 $u(k)$ 为 SCV 的开度。

为了避免在接近喘振时 SCV 频繁动作,通过控制出口换算空气流量时应该设置控制区间。即当计算的出口换算空气流量与极限空气流量比较,当 $W_{l,cor} \leq 1.02W_{lmin,cor}$ 时,SCV 按照上述控制器进行控制;当 $W_{l,cor} > 1.02W_{lmin,cor}$ 时,SCV 维持不动,既不进行喘振控制。

3.2 喘振控制仿真

根据上述喘振控制方法,采用 VC++ 编写 APU 模型与喘振控制实时仿真计算程序,软件界面如图 5。

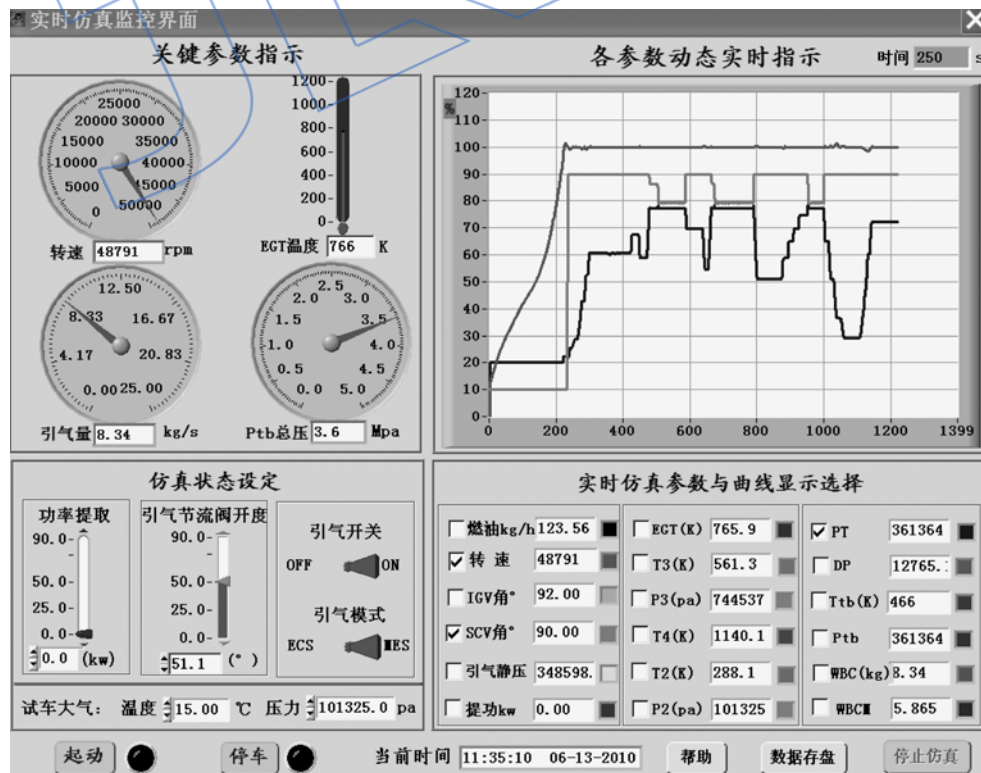


图5 喘振控制仿真界面

Fig. 5 Surge control simulation mainframe

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、提取功率等按钮,其中引气节流阀开度由界面手工调节,用于模拟引气负载变化;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,此仿真软件可进行APU各工况下的性能与逼喘仿真。

以APU工作在主发动机起动引气模式(MES模式)为例,进行负载压气机喘振控制仿真。仿真起始负载压气机出口引气节流阀、LCV全开,喘振控制阀SCV起始状态全关闭,通过调节出口引气节流阀开度来调节引气压力(负载)的大小逼喘。APU工作过程仿真结果如图6。由图

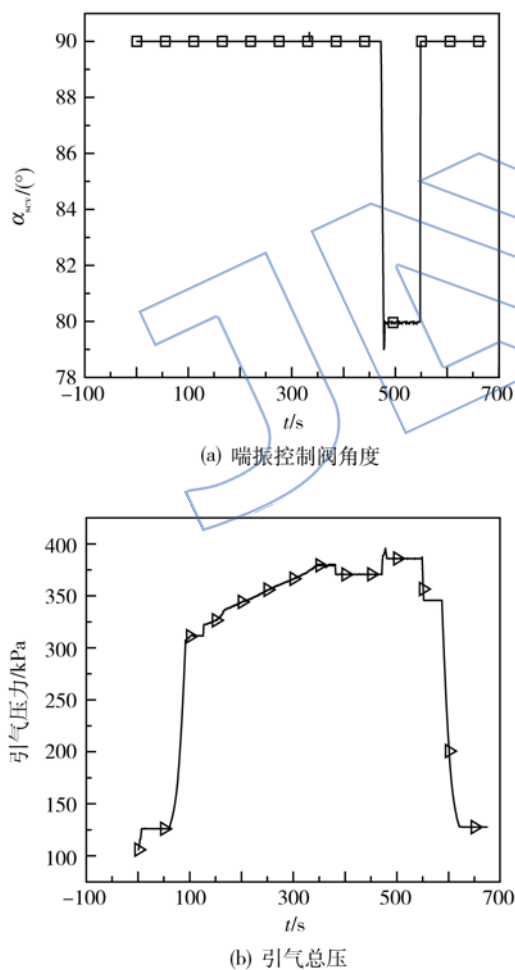


图6 喘振控制阀 α_{scv} 角度和引气总压变化仿真曲线

Fig. 6 Simulation result of surge control valve angle and bleeding pressure

可以看出,喘振控制阀SCV起始关闭,角度为 90° ,引气节流阀全开,出口负载变化时,压气机引气压力 p_{tb} 上升,到一定数值后,喘振控制器参与控制,SCV打到一定开度,维持出口换算空气流量与压力基本恒定。

图7为相同条件下(MES模式,逼喘前状态相同)实际试车曲线。由图6和图7对比可以看出,当引气压力上升时到0.384MPa时,喘振控制阀SCV(角度减小)打开,角度都稳定在 80° 附近。数据对比说明仿真与试验结果基本一致。

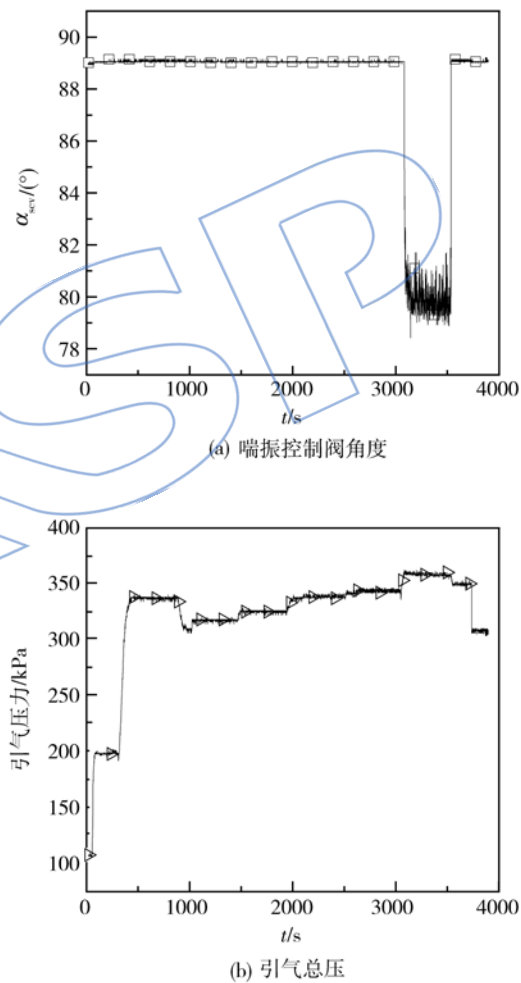


图7 喘振控制阀 α_{scv} 角度与引气总压变化试车曲线

Fig. 7 Test result of surge control valve angle and bleeding pressure

为了验证控制器设计质量,对MES与ECS两种模式进行工作过程切换逼喘仿真,软件仿真界面截图如图5所示。

通过多组不同进口条件试车数据与仿真结果对比得出规律:当出口换算空气流量大于极限换

算流量的1.02倍停止控制,SCV全关,当出口换算空气流量小于极限流量的1.02倍时SCV开始动作,控制器起作用。

5 结 论

针对APU负载压气机出口引气及其工作特性,应用调节喘振控制阀开度的方法控制负载压气机喘振,本文提出并采用以出口换算流量与当前工作状态下极限换算流量对比的方法判断负载压气机的喘振,并设计喘振控制器。实际试车数据与仿真结果对比表明,所采用的控制方法能够保证负载压气机不喘振和引气压力满足引气要求。所设计方法的工程实用性在该型APU电子控制器硬件在回路仿真试验中得到验证,仿真结果与试车结果吻合。

参考文献:

- [1] Rodger C, Johnson D C. APU fuel efficiency and affordability for commercial aircraft[R]. AIAA-1987-1907, 1987.
- [2] Rodgers C. Performance of single shaft load compressor auxiliary power units[R]. AIAA-1983-1159, 1983.
- [3] Rodgers C. Auxiliary power units for current and future aircraft[R]. SAE Technical Paper, 912059, 1991.
- [4] De Jager B. Rotating stall and surge control: a survey [C]// Proceedings of the 34th IEEE Conference on Decision and Control. New Orleans LA, USA: IEEE, 1995, 2: 1857-1862.
- [5] 屈霖云, 马明明, 王小峰, 等. 某型发动机喘振特征分析及消喘系统验证试验[J]. 航空动力学报, 2010, 25(6): 1291-1296.
- QU Jiyun, MA Mingming, WANG Xiaofeng, et al. Investigation of surge characteristics and surge eliminating system verification based on a certain engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(6): 1291-1296. (in Chinese)
- [6] 冯大庸. 航空发动机设计手册(第十四册)[M]. 北京: 航空工业出版社, 2000.
- [7] 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.
- [8] 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 and Quality, 1998(4): 19-22. (in Chinese)
- [9] 秦海波, 孙健国. 某型发动机喘振/消喘控制系统分析研究[J]. 航空动力学报, 2006, 21(1): 202-206.
- QIN Haibo, SUN Jianguo. Investigation on aircraft engine anti-surge/surge eliminating control system[J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(1): 202-206. (in Chinese)
- [10] 叶巍, 陆德雨, 黄顺洲, 等. 航空发动机喘振系统设计与研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 1998, 11(4): 45-49.
- YE Wei, LU Deyu, HUANG Shunzhou, et al. The design and research of air engine surge system[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 1998, 11(4): 45-49. (in Chinese)
- [11] 储朝霞. 离心式压缩机防喘振控制方案及数学模型[J]. 石油化工自动化, 2007, 12(3): 21-23.
- CHU Zhaoxia. The anti-surge control schemes and mathematic models for centrifugal compressors in methanol plant[J]. Automation in Petrochemical Industry, 2007, 12(3): 21-23. (in Chinese)
- [12] 李小彪, 于海生, 孙健国, 等. 一种涡扇发动机喘振信号判定方法[J]. 推进技术, 2009, 30(6): 728-729.
- LI Xiaobiao, YU Haisheng, SUN Jianguo, et al. A surge signal judge method for turbofan engine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2009, 30(6): 728-729. (in Chinese)