

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2017.10.040

# 基于级间放气的发动机防喘控制

陈志雄\*

中国航发湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002

**摘要:**航空发动机一般会采用级间放气和导叶调节等控制措施来保障压气机的稳定工作,防止压气机喘振造成发动机损坏。对某型航空发动机的级间放气控制技术进行分析和研究,利用 FADEC 控制放气阀动作,控制软件预设放气调节计划,根据发动机实时状态计算合适的放气阀位置需求,通过 PID 控制实现阀无级调节,使放气阀在发动机整个工作过程中自动保持需求的打开位置,提高压气机喘振裕度,同时提出了喘振检测及退喘控制方法,并进行试验验证,结果表明该技术合理可行。

**关键词:** 放气控制; 放气调节计划; 喘振检测; 退喘控制

中图分类号: V233.95 文献标识码: A 文章编号: 1007-5453 (2017) 10-0040-05

燃气涡轮发动机的压气机工作稳定性能丧失是航空动力装置一种危险的非正常状态。这种稳定性丧失带来旋转失速和喘振,可能造成发动机熄火停车、涡轮等热端部件和压气机出口叶片超温,甚至由机械振动而造成发动机损坏。因此,必须采用必要的控制措施来避免发动机工作中出现压气机工作稳定性丧失<sup>[1]</sup>。通过发动机控制系统调节压气机稳定裕度,是避免压气机工作稳定性能丧失的有效手段。压气机稳定性控制技术在国内外受到了研究人员的重视。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稳定性主动控制 (ASC) 技术。我国国内基于全权限数字式电子控制 (FADEC) 的防喘控制开展了大量的研究和实践<sup>[2-10]</sup>。

压气机稳定性控制技术主要有可调导叶和级间放气,可调导叶可在扩稳的情况下维持效率不降低,但其调节机构复杂,获取调节规律要做大量试验,级间放气结构简单,但由于其放掉的那部分气体一般都排到大气损失掉,导致压气机效率低<sup>[2]</sup>。本文基于某型发动机的防喘控制技术,对级间放气控制技术进行分析和研究。

心高压压气机 (NH) 组合压气机,导叶不可调,采用中间级放气控制技术来协调压气机工作时通过压气机前后的空气流量,使各级流量系数相对设计状态不会有过大的变化,这样可以避免轴流压气机叶片产生严重的气流分离,防止喘振<sup>[5]</sup>。

中间级放气是通过放气阀实现,放气阀置于压气机中间或中间偏后位置,如图 1 所示。不需要放气时,放气阀在高压空气的作用下处于关闭状态;需要放气时,作动筒感受到来自电子控制器的控制信号,控制高压空气阀关闭,放气阀在弹簧力的作用下被打开。

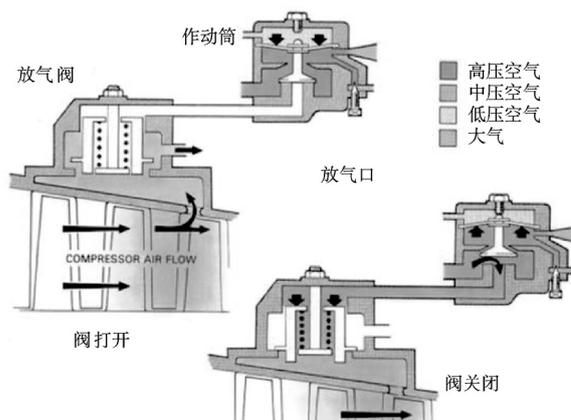


图 1 级间放气原理图

Fig.1 Principle of interstage bleeding

## 1 级间放气控制原理

某型发动机压气机为多级轴流低压压气机 (NL) 和离

收稿日期: 2017-05-09; 退修日期: 2017-05-16; 录用日期: 2017-06-12

\* 通信作者. Tel.: 17773302484 E-mail: 450445837@qq.com

引用格式: CHEN Zhixiong. Research on aeroengine anti-surge control based on interstage bleeding [J]. Aeronautical Science & Technology, 2017, 28 (10): 40-44. 陈志雄. 基于级间放气的发动机防喘控制 [J]. 航空科学技术, 2017, 28 (10): 40-44.

放气阀配备位移传感器 LVDT, 可以感受阀的打开位置, 控制系统利用阀位置反馈实现对阀的无级调节。具备级间放气控制功能的发动机控制系统采用 FADEC 技术, 由电子控制器、放气阀 (执行机构)、传感器和电缆等组成, 如图 2 所示。电子控制器采用双通道备份系统提高可靠性, 控制软件中预设放气调节计划。工作时, 电子控制器采集来自发动机传感器的进气温度、燃烧室进口压力、转子转速等信号, 判断发动机的状态, 通过放气调节计划计算当前放气阀的需求面积, 利用放气阀的打面积与活位置之间的关系得到位置需求, 与来自放气阀的实时位置反馈形成闭环控制, 通过 PID 控制算法计算出控制命令发送给放气阀, 使其开度位置保持与需求位置一致, 为压气机提供放气面积进行放气。放气控制原理图如图 3 所示。

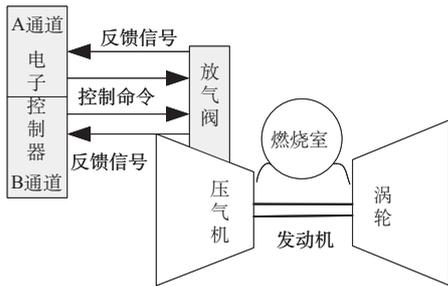


图 2 放气控制系统组成

Fig.2 Principle of interstage bleeding control system

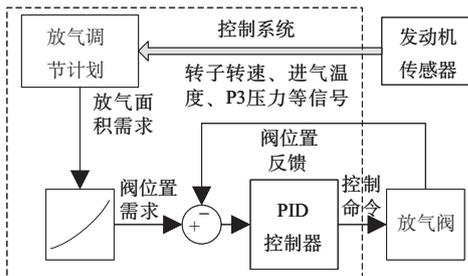


图 3 放气控制原理图

Fig.3 Bleeding control schematic diagram

## 2 放气调节计划分析

### 2.1 压气机控制规律

设计放气调节计划之前, 需给定压气机控制规律, 通过对压气机结构和性能的分析以及压气机试验, 提出与发动机状态匹配的放气面积需求, 使发动机在各种工作状态下具有较高的喘振裕度。优秀的压气机控制规律需考虑发动机启动、稳态、过渡态、环境条件变化等各种工作状态下的喘振裕度控制, 在尽量不影响发动机性能的前提下保证压气机具备足够的喘振裕度, 使压气机稳定工作。

下面对某型发动机的压气机控制规律进行定性分析, 提出影响放气面积需求的三个因素:

(1) 发动机在稳态工作时, 根据轴流压气机的压比—流量特性提出放气面积需求, 如图 4 所示, 特性线边缘为喘振线, 与压气机工作线形成喘振裕度, 增加级间放气改变压气机特性, 使喘振线上移, 工作线远离喘振线, 扩大喘振裕度。因此根据压气机转子换算转速 NLC 来设定放气面积需求。级间放气结构简单, 但由于其放掉的那部分气体一般都排到大气损失掉, 导致压气机效率降低, 因此需要综合考虑压气机性能和喘振裕度的需求, 一般在低转速状态下优先满足喘振裕度需求, 而高转速状态下应尽量满足性能需求。

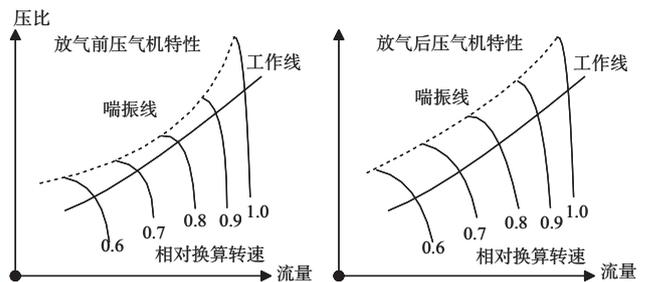


图 4 放气对压气机特性的影响

Fig.4 The influence of bleeding release on compressor characteristics

(2) 发动机在过渡态工作状态时, 压气机加速使工作线上移, 如图 5 所示, 导致喘振裕度减小, 因此需要按转子加速度  $NL_{Dot}$  的值增加相应的放气面积需求, 保障过渡态时压气机具备足够的喘振裕度。

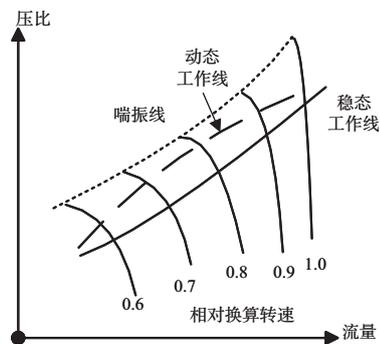


图 5 过渡态对压气机特性

Fig.5 Transition state to compressor characteristics

(3) 双转子组合压气机工作时, 如果高压转子转速 NH 和低压转子转速 NL 气动匹配不合适, NH 过低导致低压压气机后存在气堵时, 使喘振裕度减小, 因此需要按  $NL/NH$  的比值来增加放气面积需求。

### 2.2 放气调节计划设计

放气调节计划是压气机控制规律的实现算法, 控制软

件利用放气调节计划计算阀面积需求。

某型发动机的压气机控制规律存在三种因素影响放气面积需求,分别为 NLC、NL<sub>Dot</sub> 和 NL/NH,其中 NLC 影响因素为基本因素,作用于整个工作状态,NL<sub>Dot</sub> 和 NL/NH 为叠加的影响因素,超过一定值时起作用。因此,放气面积需求  $A$  为上述三个面积需求之和。

$$A = A_1 + A_2 + A_3 \quad (1)$$

(1) 稳态放气阀面积需求  $A_1$  由压气机转子换算转速 NLC 来设定,增大稳态下的喘振余度,  $A_1$  为 NLC 的函数。

$$A_1 = f(\text{NLC}) \quad (2)$$

通过压气机或整机试验和计算分析获得压气机特性和喘振裕度,给出  $A_1$  与 NLC 的函数关系,控制软件中利用插值模型计算  $A_1$  的值。在低转速时阀面积全开,随着转速上升而开始减小放气面积,到一定转速时阀全关。

(2) 过渡态放气阀面积需求  $A_2$  是轴流压气机转子转速加速度 NL<sub>Dot</sub> 的函数,加速越快,需增加的阀面积需求越大。

$$A_2 = k \cdot (\text{NL}_{\text{Dot}} - \sigma) \quad (3)$$

式中:  $A_2$  与 NL<sub>Dot</sub> 成比例关系,系数  $k$  和  $\sigma$  通过整机或压气机试验分析整定获得。

(3) 阀面积需求  $A_3$  是 NL/NH 的比值函数, NL/NH 越大说明 NH 相对 NL 越低,存在气堵的可能性越大,因此需增加的阀面积需求越大。

$$A_3 = \lambda \cdot \text{NL}/\text{NH} + \varepsilon \quad (4)$$

式中:  $\gamma$  和  $\varepsilon$  均为系数,由发动机或压气机试验分析整定获得。

放气阀的开度位置和打开面积之间存在对应关系,如图 6 所示。因此,最终通放气面积需求  $A$  获得放气阀位置需求。

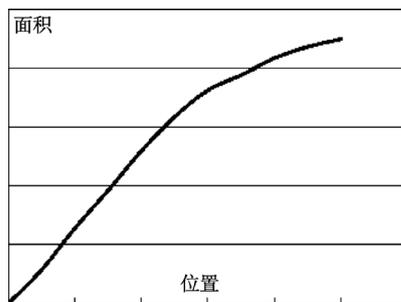


图 6 放气阀位置与面积图

Fig.6 The position and area diagram of the bleed valve

### 3 PID 控制器设计

为了实现放气面积连续调节控制,采用放气阀位置闭环控制,利用 LVDT 反馈的阀位置,与放气调节计划计算的

位置需求形成偏差信号  $E_k$ ,经 PID 控制算法获得作动筒的控制电流 ITM,使作动筒动作,最终使放气阀位置保持在需求位置。

为了保证阀控制快速、稳定,需设计合理的 PID 控制算法,某型发动机的放气 PID 控制算法如图 7 所示,利用死区控制避免频繁动作带来振荡,利用积分饱和和限制避免误积分导致电流异常增大。

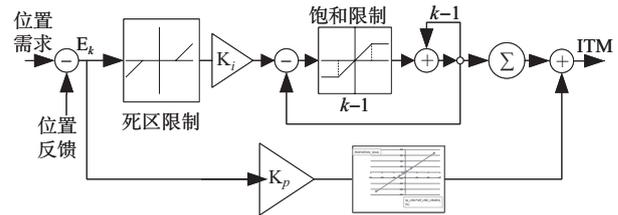


图 7 PID 控制器设计图

Fig.7 PID controller design drawing

### 4 喘振检测和退喘控制

由上述分析,为了保证压气机工作稳定,采取了中间级放气控制,调节放气面积,在尽量不影响发动机性能的基础上尽可能提高喘振裕度。但在大气条件急剧变化、发动机性能衰退严重等条件下,发动机仍可能发生喘振,因此,需要控制系统具备喘振检测和退喘控制能力。

#### 4.1 喘振检测

识别喘振的最可靠方法是录取压气机转子及静子叶片上的初始分离数据,需要传感器安装在叶片上,这种方式一般只能在试验室实现。对控制系统来说,通常采用更经济的方法,利用发动机工作过程参数的组合检查来识别喘振<sup>[2]</sup>。一般情况下,利用发动机的转速  $n$ 、压气机进口压力  $p_2$ 、温度  $T_2$ 、燃烧室进口压力  $p_3$  等信号及其导数值来综合考虑喘振检测<sup>[2,6]</sup>,在这些信号超出某一时间内的给定值情况下,便发出喘振信号。

某型发动机采用了高压转子转速 NH、燃烧室进口压力  $p_3$  及其导数值来组合判定喘振。当  $p_3$  和 NH 出现反向突变,并超过一定阈值就判断喘振。

喘振判断算法为同时满足式 (5) 和式 (6):

$$\text{NH}_{\text{dot}} > \alpha \quad (5)$$

$$p_{3\text{dot}} < \beta \quad (6)$$

式中:  $\text{NH}_{\text{dot}}$  为 NH 的导数值,  $p_{3\text{dot}}$  为  $p_3$  的导数值,  $p$  为标准大气压,  $\alpha$  和  $\beta$  为门限值。

#### 4.2 退喘控制

当检测到发动机出现喘振时,必须进行退喘控制,以防

止喘振对发动机带来严重危害。退喘措施为加大级间放气面积和减小供油流量。在上述放气调节计划的基础上增加退喘放气面积  $A_{\text{surge}}$ ,  $A_{\text{surge}}$  可设置为定值, 发生喘振时的放气面积需求  $A_s$  为:

$$A_s = A + A_{\text{surge}} \quad (7)$$

当发动机在工作过程发生喘振时, 为防止本次工作再次发生喘振, 可对稳态放气阀面积需求调节计划进行临时调整, 将 NLC 对应的阀面积需求适当增大, 以获取更大的喘振裕度, 发动机停车后恢复原调节计划。

喘振时, 由于进入燃烧室的空气迅速减少, 燃烧室进口压力  $p_3$  受到损失, 可通过油气比限制控制来减小供油流量:

$$W_f / p_3 \leq \rho \quad (8)$$

式中:  $W_f$  为发动机燃油流量需求,  $\rho$  为油气比系数。

## 5 试验验证

通过试验验证发动机控制系统的放气防喘控制功能, 图 8 为稳态下放气阀位置图, 阀位置平稳, 与需求位置相符; 图 9 为过渡态放气阀位置变化图, 阀位置反应速度快, 跟随性好。

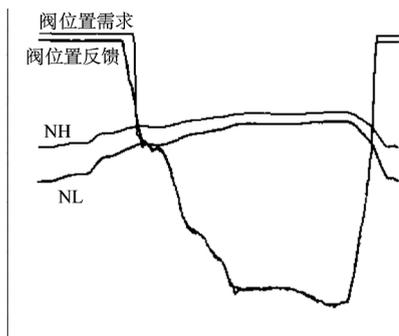


图 8 稳态试验数据  
Fig.8 Steady-state test data

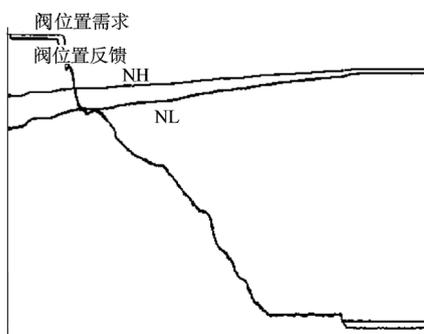


图 9 过渡态试验数据  
Fig.9 Transient test data

## 6 结论

基于某型航空发动机的防喘控制实现方法, 对级间放气控制技术进行了分析和研究, 包括级间放气控制原理、放气调节计划、放气控制闭环算法、喘振检测及退喘控制算法等内容。通过分析和试验得出以下结论:

(1) 利用发动机控制系统 (FADEC) 调节放气阀可有效实现压气机稳定性控制;

(2) 在满足发动机性能要求的基础上, 放气调节计划根据轴流压气机转子转速、转速加速度和高压转速比等状态, 无级调节放气阀开度位置, 增大喘振裕度;

(3) 提出利用燃烧室进口压力和转子转速的变化率的关系来识别喘振, 利用增加放气阀面积和减小供油来消除喘振;

(4) 通过试验表明, 控制系统能快速准确控制放气阀按调节计划保持开度位置稳定, 有效增大喘振裕度。

本文主要从控制系统的角度分析级间放气控制, 针对级间放气对压气机喘振裕度的定量影响和压气机控制规律的具体设计, 需要发动机总体和压气机专业的大量理论分析和试验, 本文不做详细论述。

AST

## 参考文献

- [1] 贺尔铭. 民用航空发动机控制原理及典型系统 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 20-27.  
HE Erming. The principle of civil aviation engine control and typical system [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002: 20-27. (in Chinese)
- [2] 樊思齐, 李华聪, 樊丁. 航空发动机控制 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2008.  
FAN Siqi, LI Huacong, FAN Ding. Aviation engine control [M]. Xi'an: Northwest Polytechnical University Press, 2008. (in Chinese)
- [3] 张绍基. 航空发动机防喘控制系统设计和热扰动参数研究 [J]. 航空发动机, 2005, 31 (3): 8-12.  
ZHANG Shaoji. Design of anti-surge control system and research on heat disturbance parameters for aeroengine [J]. Aeroengine, 2005, 31 (3): 8-12. (in Chinese)
- [4] 秦海波, 孙健国. 某型发动机防喘 / 退喘控制系统分析研究 [J]. 航空动力学报, 2006 (01): 201-206.  
QIN Haibo, SUN Jianguo. Investigation on aircraft engine anti-

- surge/surge eliminating control system[J]. Journal of Aerospace Power, 2006 (01): 201-206. (in Chinese)
- [5] 高永, 李本威, 郁大照. 航空发动机防喘模糊控制器的设计[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2010 (5): 814-816.  
GAO Yong, LI Benwei, YU Dazhao. Design of fuzzy anti-surge controller for aero-engine[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2010 (5): 814-816. (in Chinese)
- [6] 李小彪, 余海生, 孙健国, 等. 一种涡扇发动机防喘振信号判断方法[J]. 推进技术, 2009 (6): 727-731.  
LI Xiaobiao, YU Haisheng, SUN Jianguo, et al. A surge signal judge method for turbofan engine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2009 (6): 727-731. (in Chinese)
- [7] 张绍基, 刘世官. 航空发动机消喘控制系统设计与试验[J]. 航空动力学报, 2012 (01): 204-210.  
ZHANG Shaoji, LIU Shiguan. Research on the elimination control system design and test for aero-engines[J]. Journal of Aerospace Power, 2012 (01): 204-210. (in Chinese)
- [8] 张绍基. 航空发动机进口温度畸变参数和防喘控制系统设计[J]. 推进技术, 2006, 27 (1): 15-19.  
ZHANG Shaoji. Research on heat distortion parameters and the design for engine surge control systems[J]. Journal of Propulsion Technology, 2006, 27 (1): 15-19. (in Chinese)
- [9] 朱宝康. 轴流压气机防喘保护[J]. 天津冶金, 1999 (S1): 75-77.  
ZHU Baokang. The protection on preventing from surging of axial flow air compressor[J]. Tianjin Metallurgy, 1999 (S1): 75-77. (in Chinese)
- [10] 黄伟, 黄向华. 基于主动防喘的航空发动机加速控制仿真[J]. 测控技术, 2013 (04): 61-65.  
HUANG Wei, HUANG Xianghua. Adaptive acceleration control for aero-engine based on active anti-surge control[J]. Measurement and Control Technology, 2013 (04): 61-65. (in Chinese)
- (责任编辑 朱赫)

#### 作者简介

陈志雄 (1985— ) 男, 硕士, 工程师。主要研究方向: 中小型航空发动机控制系统研制和试验。

Tel: 17773302484

E-mail: 450445837@qq.com

## Research on Aeroengine Anti-surge Control Based on Interstage Bleeding

CHEN Zhixiong\*

*AECC Hunan Aviaion Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, China*

**Abstract:** Aircraft engine generally uses interstage bleed and incorporation of variable stator vanes to ensure the compressor stability work and prevent the compressor surge causing damage to the engine. The interstage bleeding control method is used to improve the stability margin of axial compressor to prevent and eliminate the surge. This paper analyzed and studied the bleeding control technology of a certain type of aircraft engine, using FADEC system to control the bleed valve movement, through the bleed valve opening schedule in the software calculating the desired bleed valve position according to the real-time state of the engine. Through PID control, the valve can be adjusted without class, so that the valve can automatically keep the demand open in the whole process of engine work, improving the compressor surge margin. At the same time, the method of surge detection and control was presented. The results show that the technique is reasonable and feasible.

**Key Words:** bleed valve control; bleed valve opening schedule; surge detection; surge accommodation

Received: 2017-05-09; Revised: 2017-05-16; Accepted: 2017-06-12

\*Corresponding author. Tel.: 17773302484 E-mail: 450445837@qq.com