

# 引气系统压力超调现象的机理分析与抑制策略研究

董铨

空装驻新乡地区军事代表室

DOI:10.32629/etd.v6i12.19255

**[摘要]** 飞机引气系统对飞行安全与设备运行至关重要,但压力超调现象时有发生。本文先阐述引气系统构成、压力调节机制及不同飞行阶段压力需求特点,分析压力超调现象、特征及其对飞机系统和飞行安全的不利影响。接着从系统动态特性、阀门特性、飞行工况变化等方面剖析压力超调机理。最后提出基于控制算法优化、硬件改进与系统优化的抑制策略,为保障引气系统稳定运行提供参考。

**[关键词]** 引气系统; 压力超调; 抑制策略

**中图分类号:** V245 **文献标识码:** A

## Mechanism Analysis and Suppression Strategy Research on Pressure Overshoot Phenomenon in Bleed Air System

Tan Dong

Military Representative Office of Air Force Equipment Department in Xinxiang Region

**[Abstract]** The aircraft bleed air system is crucial for flight safety and equipment operation, but pressure overshoot phenomenon occurs frequently. This paper first expounds the composition of the bleed air system, the pressure regulation mechanism, and the pressure demand characteristics at different flight stages, and analyzes the pressure overshoot phenomenon, its characteristics, and its adverse effects on aircraft systems and flight safety. Then it analyzes the mechanism of pressure overshoot from aspects such as system dynamic characteristics, valve characteristics, and flight condition changes. Finally, it proposes suppression strategies based on control algorithm optimization, hardware improvement, and system optimization, providing references for ensuring the stable operation of the bleed air system.

**[Key words]** bleed air system; pressure overshoot; suppression strategy

### 引言

在航空领域,飞机引气系统作为关键子系统,为众多设备提供气源,其稳定运行关乎飞行安全与乘客舒适度。然而,引气系统在压力调节过程中常出现压力超调现象,这会对飞机系统和飞行安全产生多方面负面影响。深入探究压力超调现象的机理,并研究有效的抑制策略,对于提高引气系统的可靠性和稳定性,保障飞机安全飞行具有重要的现实意义和紧迫性。

### 1 引气系统工作原理及压力调节机制

#### 1.1 引气系统的构成与功能

飞机引气系统是航空发动机及飞机整体运行中至关重要的子系统,它主要由引气源、引气管道、压力调节装置、温度调节装置以及相关的控制阀门等部分构成。引气源通常来自发动机的高压压气机,部分飞机在特定情况下也可从辅助动力装置(APU)引气。引气管道负责将引出的气体输送到飞机各个需要气源的部位,如空调系统、机翼防冰系统、发动机启动系统等。压力调节装置是确保引气压力稳定在合适范围的关键部件,它能

根据不同系统的需求以及飞行状态的变化,对引气压力进行精确调整。温度调节装置则用于控制引气温度,防止过高或过低的温度对飞机系统造成损害。引气系统的主要功能是为飞机上的多种设备提供合适压力和温度的气源,保障这些设备正常运行,从而维持飞机的正常飞行和乘客的舒适环境<sup>[1]</sup>。例如,空调系统依靠引气来调节客舱的温度和湿度,为乘客创造适宜的乘坐环境;机翼防冰系统利用引气加热机翼表面,防止结冰影响飞机的空气动力学性能;发动机启动时,引气提供的高压气体能够驱动发动机的启动装置,使发动机顺利启动。

#### 1.2 压力调节的工作流程与原理

压力调节装置在引气系统中起着核心作用,其工作流程通常从压力传感器开始。压力传感器实时监测引气管道内的压力,并将压力信号转换为电信号传输给压力调节器。压力调节器根据预设的压力值与实际监测到的压力值进行比较分析。当实际压力高于预设值时,压力调节器会发出指令,控制压力调节阀门(如引气调节活门)动作,调节阀门的开度,让部分引气回流至压

气机低压级或其他合适环节,从而降低管道内的压力;当实际压力低于预设值时,压力调节器则指令阀门减小开度或保持关闭状态,减少引气回流,使管道内压力上升。这种通过不断比较和调整阀门开度的方式,实现对引气压力的动态调节。其原理基于负反馈控制理论,以设定压力为目标,通过实时监测和调整,使系统输出(引气压力)尽可能接近目标值,确保引气压力稳定在合适的范围内,满足飞机各系统对气源压力的要求。

### 1.3 不同飞行阶段引气压力需求与调节特点

在飞机的不同飞行阶段,各系统对引气压力的需求存在差异,引气系统的压力调节也具有相应特点。在地面滑行和起飞阶段,发动机处于高功率状态,引气量较大。此时,空调系统需要提供足够的气流来保证客舱的通风和温度调节,同时发动机启动系统可能处于备用状态,对引气压力稳定性要求较高。压力调节装置会密切监测压力变化,及时调整阀门开度,确保引气压力既能满足空调系统需求,又能为发动机启动提供可靠气源。巡航阶段,飞机处于相对稳定的飞行状态,各系统对引气压力的需求也较为稳定。但此时发动机的工作状态可能因飞行高度和速度的变化而有所调整,引气源的压力和流量也会相应改变。压力调节系统需要根据这些变化,精确控制阀门,维持引气压力在合适的水平,保证空调、防冰等系统正常运行。着陆阶段,飞机需要降低高度和速度,发动机功率逐渐减小,引气量也相应减少。同时,机翼防冰系统可能根据气象条件调整工作状态,对引气压力提出不同要求。压力调节装置要快速响应这些变化,合理调节阀门,确保引气压力满足着陆阶段各系统的需求,保障飞机安全着陆。

## 2 压力超调现象及影响

### 2.1 压力超调的现象与特征

压力超调是指引气系统在调节压力过程中,实际压力超过设定压力值的现象。在压力调节过程中,由于系统存在惯性、响应延迟等因素,当压力调节器发出调整指令后,阀门动作不能立即使压力达到设定值,而是会出现一定程度的波动。当这种波动使得实际压力在上升过程中超过设定压力,并且超过一定幅度和持续时间时,就形成了压力超调<sup>[2]</sup>。压力超调的特征表现为压力曲线在达到设定值后,不是平稳地保持在该值,而是继续上升形成一个峰值,然后再逐渐下降回到设定值附近。压力超调的幅度和持续时间因系统特性和调节情况而异,幅度可能从几个百分点到较大比例不等,持续时间也可能从瞬间到数秒甚至更长时间。

### 2.2 对飞机系统及飞行安全的影响

压力超调对飞机系统和飞行安全会产生多方面的不利影响。对于飞机系统而言,过高的引气压力可能会对引气管道、阀门及相关设备造成过大的应力,长期作用下可能导致设备疲劳损坏,缩短设备使用寿命。例如,压力超调可能使管道连接处承受超出设计范围的拉力或压力,引发泄漏问题,影响引气系统的正常供气。对于空调系统,压力超调可能导致客舱压力波动过大,影响乘客的舒适度,甚至可能对乘客的耳膜造成不适或损伤。在机翼防冰系统方面,压力超调可能使防冰区域温度过高,不仅浪

费能源,还可能对机翼结构造成热损伤。从飞行安全角度来看,压力超调可能干扰发动机的正常工作。发动机的一些控制系统对引气压力有严格要求,压力超调可能导致发动机控制参数异常,影响发动机的推力和稳定性,在极端情况下甚至可能引发发动机故障。压力超调引起的系统不稳定还可能影响飞机的整体操控性能,增加飞行员的操作难度,对飞行安全构成潜在威胁。

## 3 压力超调机理分析

### 3.1 系统动态特性与响应延迟

引气系统是一个复杂的动态系统,具有自身的惯性特性。当压力调节器发出调整指令后,由于引气在管道中的流动需要一定时间,以及阀门动作的机械延迟等因素,系统不能立即对指令做出响应,而是存在一定的响应延迟。这种响应延迟使得压力调节过程不能实时跟随设定值的变化,导致实际压力在调节过程中出现超调现象。例如,当需要降低引气压力时,压力调节器发出关闭阀门指令,但由于阀门动作的延迟以及引气在管道中的惯性流动,引气压力不会立即下降,而是会继续上升一段时间,从而形成压力超调。系统动态特性中的时间常数、阻尼比等参数对压力超调的幅度和持续时间有重要影响。时间常数越大,系统响应越慢,压力超调可能越明显;阻尼比过小,系统容易出现振荡,也会加剧压力超调现象。

### 3.2 阀门特性与调节精度

压力调节阀门是引气系统压力调节的关键执行部件,其特性直接影响压力调节的精度和稳定性。阀门的流量特性、泄漏特性以及动作灵敏度等都会对压力超调产生影响。如果阀门的流量特性不理想,在阀门开度变化时,引气流量不能与开度成线性关系,就会导致压力调节不准确,容易引发压力超调。阀门的泄漏特性也很重要,如果阀门存在内泄漏或外泄漏,会使引气压力在调节过程中难以精确控制,增加压力超调的可能性<sup>[3]</sup>。阀门的动作灵敏度决定了其对压力调节器指令的响应速度,动作迟缓的阀门会导致系统响应延迟,进而引起压力超调。阀门制造工艺的精度、材料的选择以及长期使用后的磨损等因素,都会影响阀门的特性,从而对压力调节产生不利影响。

### 3.3 飞行工况变化的影响

飞机在不同飞行工况下,发动机的工作状态、飞行高度和速度等因素都会发生变化,这些变化会对引气系统的压力调节产生显著影响,进而引发压力超调。例如,当飞机进行加速或爬升时,发动机功率增加,引气源的压力和流量也会相应增大。此时,压力调节系统需要及时调整阀门开度以维持引气压力稳定,但由于系统响应延迟和动态特性的影响,可能无法迅速准确地做出调整,导致压力超调。飞行高度变化也会对引气压力产生影响,高空气压较低,引气在管道中的流动特性会发生变化,压力调节装置需要根据高度变化调整调节策略,否则容易出现压力超调。另外,飞机的飞行姿态改变,如俯仰、横滚等,也可能影响引气在管道内的分布和流动,对压力调节带来挑战,增加压力超调的风险。

### 3.4 其他潜在因素分析

除了上述主要因素外, 还有一些其他潜在因素可能导致压力超调。例如, 引气系统中的传感器故障或精度下降, 会使压力调节器接收到错误的压力信号, 从而发出不恰当的调节指令, 引发压力超调。控制算法的缺陷也是一个潜在因素, 如果压力调节算法不能准确考虑系统的动态特性和各种影响因素, 可能导致调节过程不稳定, 出现压力超调。环境温度的变化也会对引气系统的性能产生一定影响, 高温或低温环境可能改变引气的物理性质, 影响压力调节阀门的动作和引气在管道中的流动, 进而导致压力超调。

#### 4 抑制策略研究

##### 4.1 基于控制算法优化的抑制方法

针对压力超调问题, 可以通过优化压力调节控制算法来提高系统的调节性能。传统的PID控制算法在引气系统压力调节中应用广泛, 但其在处理复杂动态系统和非线性问题时存在一定局限性。可以采用先进的智能控制算法, 如模糊控制、神经网络控制等, 与PID控制相结合, 形成复合控制策略。模糊控制能够根据系统的模糊信息进行推理和决策, 对处理不确定性和非线性问题具有优势; 神经网络控制具有自学习和自适应能力, 能够根据系统的历史数据和实时反馈不断调整控制参数, 提高控制精度。通过将智能控制算法引入引气系统压力调节, 可以更好地适应系统的动态特性和各种工况变化, 减少压力超调现象的发生。例如, 利用模糊控制算法根据压力偏差和偏差变化率实时调整PID控制器的参数, 使系统在不同工况下都能快速、稳定地调节引气压力, 有效抑制压力超调。

##### 4.2 硬件改进与系统优化

硬件方面的改进也是抑制压力超调的重要手段。首先, 对压力调节阀门进行优化设计, 提高阀门的流量特性、密封特性和动作灵敏度。采用先进的阀门制造工艺和材料, 减少阀门的泄漏和磨损, 确保阀门能够精确、快速地响应压力调节器的指令。其次, 优化引气管道的设计, 减少管道的弯曲和阻力, 降低引气在管道中的流动延迟和压力损失, 提高系统的响应速度。另外, 选用高精度、高可靠性的压力传感器, 确保压力调节器能够准确获取引气压力信息, 为精确调节提供可靠依据。对引气系统的整体布局进行优化, 合理安排各部件的位置, 减少信号传输延迟和干扰, 提高系统的稳定性和调节性能。

##### 4.3 综合策略的制定与实施

抑制引气系统压力超调需要综合考虑控制算法优化和硬件改进等多方面因素, 制定综合策略并有效实施。在飞机设计和研发阶段, 应将压力超调抑制作为重要指标纳入系统设计, 从整体上规划控制算法和硬件选型。在飞机运营过程中, 建立完善的系统监测和维护体系, 实时监测引气系统的压力变化和部件的工作状态。通过对监测数据的分析, 及时发现潜在的压力超调问题和部件故障隐患, 采取相应的措施进行预防和处理<sup>[4]</sup>。例如, 定期对压力调节阀门进行校准和维护, 确保其性能良好; 根据飞行数据和实际运行情况, 对控制算法进行在线调整和优化, 不断提高系统的压力调节能力。同时加强对飞行员的培训, 使其了解压力超调的现象、影响和应对措施, 在飞行过程中能够及时发现异常情况并采取正确的操作, 保障飞行安全。通过综合策略的制定与实施, 全面提高引气系统压力调节的稳定性和可靠性, 有效抑制压力超调现象, 确保飞机各系统的正常运行和飞行安全。

#### 5 结束语

本文围绕飞机引气系统压力超调现象展开研究, 全面分析了其产生机理, 涵盖系统动态特性、阀门特性等多方面因素。针对压力超调问题, 提出了基于控制算法优化、硬件改进与系统优化的综合抑制策略。通过这些策略的实施, 有望有效减少压力超调现象, 提升引气系统压力调节的稳定性和可靠性, 为飞机的安全飞行和各系统的正常运行提供坚实保障, 推动航空技术的进一步发展。

#### [参考文献]

- [1]张旭. 飞机发动机引气系统故障及维护分析[J]. 内燃机与配件, 2020, (23): 155-156.
- [2]杜玉军. 737NG飞机发动机引气系统故障排除简析[J]. 现代制造技术与装备, 2019, (01): 156-157.
- [3]吴豪, 郑永贵, 刘猛, 等. 飞机环控系统发动机动态引气地面试验设备总体设计方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51(2): 573-583.
- [4]韩量宇, 赵欢, 常城. 基于引气封油的轴承腔石墨密封系统滑油泄漏流动特性试验[J]. 航空学报, 2025, 46(10): 360-371.