

B737NG 发动机引气系统工作原理及故障分析

刘立军, 李豪

深圳航空有限责任公司广州分公司, 广东 广州 510805

摘要 : 鉴于发动机引气系统故障频发、复杂度高以及排除故障所需时间较长的特点, 它一直是对机务维护工作构成挑战的主要问题之一。本文旨在探讨波音 737NG 型飞机上该系统的构造及其工作原理, 并基于对该机型的理论学习、实际操作培训及现有工作经验, 深入分析了这一系统中常见的故障类型及其解决策略。希望通过本研究为航线上的故障排查提供有价值的参考意见, 进而有效提升处理此类故障的工作效率。

关键词 : 737NG; 发动机引气系统; 高压级活门; 压力调节关断活门; 引气调节器

B737NG Eng Bleed System Principle And Fault Analysis

Liu Lijun, Li Hao

Shenzhen Airlines Co., Ltd. Guangzhou Branch, Guangzhou, Guangdong 510805

Abstract : In the domain of maintenance, ENG bleed system always be a difficult problem for its high rate of failure, repeatability, complexity and long period of maintenance. According to the problem we mention above. We need to elaborate B737NG ENG bleed system framework and principle. Connecting theory and practice. Discussing some common failure and processing method. Providing some suggestion to line maintenance to improve the trouble shooting of ENG bleed system.

Keywords : 737NG; Eng bleed; high stage valve; prsov; bleed air regulator

引言

随着航空器数量的不断增加, 气源系统的故障频率也随之上升, 这往往会导致航班长时间延误。为深入了解此类系统并加速识别故障原因, 维修工程部门一直致力于研究这一课题。本文通过对波音 737NG 型飞机发动机引气系统的工作机制及其故障排除思路进行深入探讨与总结, 旨在为实际操作提供有价值的指导建议。

本文旨在对波音 737NG 飞机发动机引气系统各组件进行详尽分析, 以揭示其潜在问题的根本原因。同时, 文中简要介绍了几种较为科学合理的故障诊断方法及其相应的解决策略, 旨在帮助技术人员能够更加快速、准确且高效地完成维修任务。此外, 通过一种直观易懂的方式描述了具体的测试步骤, 这不仅有助于精确定位故障位置, 还能指导工作人员采取有效的措施排除故障, 极大地提高了维护工作的便捷性^[1-2]。

一、发动机引气系统的组成及工作过程

在探讨发动机引气系统之前, 我们先简要介绍一下飞机的引气系统。该系统的主要功能是为飞机上的多个子系统提供高压且温度较高的空气。这些子系统的运行依赖于来自不同来源的压缩气体, 主要包括发动机引气系统、辅助动力装置提供的气体以及地面供气设施。引气系统的服务对象广泛, 涵盖了从发动机启动到环境控制(如空调与增压)、防冰措施(例如发动机进气口及机翼表面加热)乃至液体储存容器的压力调节等多个方面。值得注意的是, 构成发动机引气系统的组件通常被安装于发动机本体内, 并位于发动机吊舱内部^[3]。

(一) 发动机引气系统的组成

飞机配备有两个独立的发动机引气系统, 分别对应于第一台

和第二台发动机。每个系统的引气来自发动机高压压气机的不同阶段, 具体来说, 是第 9 级与第 5 级。当发动机处于低速运转状态时, 由于来自第 5 级的引气压力不足以满足气源系统的需求, 此时将采用第 9 级作为供气来源。相反地, 在发动机高速运行条件下, 则优先利用第 5 级提供的压缩空气。整个引气过程主要由三大关键组件进行调控。

在发动机处于较低转速状态下, 高压级调节器与高压级活门共同作用以调控来自第 9 级引气气流的压力水平。与此同时, 在较低运行速度条件下, 安装于第五级的一个单向阀门能够有效阻止气体逆向流入第五级压缩机内部。

在高速旋转状态下, 高压级活门会关闭, 而第五级的单向阀门则开启, 以确保气体能够被导向压力调节与切断阀 (PRSOV)。引气控制器 (BAR) 和 PRSOV 共同调控流向总管路的发动机引气

量。为了防止过压情况发生，在引气控制器上安装了超压开关，一旦触发，它不仅能够阻止进一步的压力增加，还会激活空调供气控制面板上的断开指示灯。当温度上升至 $450^{\circ}\text{F}/232^{\circ}\text{C}$ 时，相应的温控装置（即 $450^{\circ}\text{F}/232^{\circ}\text{C}$ 恒温器）将促使 PRSOV 朝向前方移动（即进入关闭状态），以此来实现对温度的有效管理。空调辅助组件（ACAU）充当了空调供气控制系统与压力调节及切断阀之间的桥梁作用。如果系统检测到超出正常范围的高温状况（例如达到 $490^{\circ}\text{F}/245^{\circ}\text{C}$ ），那么设置于 ACAU 内部的过热保护继电器会被激活，进而导致 BAR 中的电磁阀闭合，使得 PRSOV 依靠弹簧力自动关闭，并同时点亮断开指示灯，从而有效地避免了因过热而导致的管道或用户设备损坏风险^[4]。

发动机引气预冷器系统负责调控进入气压系统前的引气温度。此过程中，预冷器控制活门调节通过预冷器的风扇空气量，其操作受预冷器控制活门传感器及机翼热防冰电磁活门的影响。预冷器系统的核心功能在于，在引气流入气源总管之前，通过调整预冷器控制活门来管理通向预冷器的冷却空气流量，进而实现对引气温度的有效控制。整个过程为自动化运行。

（二）发动机引气系统的工作过程

在发动机启动至怠速状态后，高压压机第九级引气口的压力促使高压调节器开启高压阀门。该阀门内置了一个平衡作动器，确保压力不会超过 33 psi。此时，高压空气开始填充各级管道，并有一部分到达 BAR 电磁阀位置待命。一旦驾驶舱 P5 面板上的引气开关被激活，信号将通过 ACAU 传递至 BAR 电磁阀，进而开启电磁阀以及后续的 PRSOV（压力调节和关断阀）。此时，系统内的气源压力由高压阀门调控。随着油门进一步推进，当第五级引气压力超过了高压阀门的最大调节值（即 33 psi）时，第五级单向阀因受力而开启，导致高压阀门关闭。在此情况下，PRSOV 负责调节气源压力，并将其上限控制在 45 psi 以内。此外，预冷器控制系统通过调整通往预冷器的冷却风扇气体流量来降低发动机引气温度，从而有效管理引气温度并将处理后的空气输送至气压总管^[5]。

二、发动机引气系统主要部件的工作原理

（一）引气调节部分

1. PRSOV 打开：当引气电门置于 ON 位置时，BAR 将从发动机压机抽取的气体调节至大约 24PSI 的标准压力水平，随后将其作为控制气流供应给 PRSOV。该控制气流进入 A 腔后，促使控制作动器克服弹簧阻力，从而开启至全开状态。

2. PRSOV 保持：PRSOV 调节机制：通过响应上下游压力的变化，阀门能够依据调节作动器 B 腔内压力的变动自动调整开度，以此确保下游的压力维持在一个 36 至 52PSI 之间的稳定范围内。

3. PRSOV 关闭：当引气电门被置于 OFF 位置，或是 ACAU 检测到气体温度或压力超出安全范围时，BAR 将促使 PRSOV 的 A 腔内压力释放。由于此时 A 腔的压力低于 B 腔，导致 PRSOV 向关闭方向移动。

（二）高压级调节部分

1. HSV 开启机制：高级活门默认处于关闭状态，由弹簧保持，并通过气压控制其开关。该活门配备了一个机械结构，其中包含一个专门用于平衡作用的打开作动器。当系统运行时，高级调节器依据设定的压力标准向打开作动器提供 16.5PSI 的压力信号，此力足以克服活门内部弹簧预设的力量及 B 腔内的反向压力，促使高级活门开启。这样一来，可以确保活门下游的压力稳定在 34PSI。

2. HSV 关闭：随着发动机转速的提升，当九级压缩机的压力超过 110PSI 时，高级活门将被关闭，此时发动机切换至使用五级引气模式。

（三）引气预冷部分

1. 预冷器的作用

预冷器控制活门调节从风扇到预冷器的冷却空气流量，以此来管理引气温度。这一过程是由系统自动完成的。预冷器控制活门的开度受到 390°F 温度传感器以及大翼热防冰（WTAI）电磁活门信号的影响。通过这种方式，预冷器控制活门能够有效地调整进入预冷器中的冷却空气量。

2. 预冷器的工作原理

预冷器控制活门负责将来自压气机的引气引导至 A 腔、喷嘴及 B 腔，同时也连接着作动筒基准压力调节器、伺服基准压力调节器、预冷器控制活门传感器以及大翼防冰电磁阀。此阀门默认处于开启状态，依靠弹簧力保持。随着 A 腔内压力的增加，阀门会相应地打开；反之，若 A 腔的压力降低，则会导致阀门关闭。当 B 腔的压力下降时，通过连杆机制促使喷嘴开启，进而导致 A 腔内的压力减小，从而使得预冷器控制活门得以打开^[6-7]。

三、发动机引气系统的常见故障分析

（一）常见的引气系统故障

1. 当遇到地面引气无法接通或在飞行过程中引气突然中断，并且没有相应的警告信号显示，同时观察到引气压力降为“零”时，潜在的原因可能是压力调节和关断活门（PRSOV）未能开启，或者引气活门（BAR）的电磁控制部分出现故障。上述情况的发生可能归因于 BAR 电磁活门的失效、PRSOV 发生卡滞现象，或是空调组件控制器（ACAU）出现问题。此外，也有可能是由于控制面板或相关电路存在缺陷，导致控制信号未能正确传输所致。

2. 在低速运行状态下，遇到引气压力偏低的情况时，首要步骤是确认是否存在指示异常。为此，需要对压力表及压力传感器进行检查。若开启隔离活门后发现两侧的读数存在差异，则可以断定问题出在压力表或压力传感器上。排除了上述可能性之后，接下来应转向系统组件层面的问题排查。在此之前，建议优先检验高压活门或是高压调节装置，以确定这些部件是否出现了卡滞现象。此外，如果 PRSOV 发生卡阻且开口度极小，也会导致引气压力下降。

3. 在高功率运行条件下，观察到引气压力偏低的现象。首先

应检查是否存在指示系统的问题，随后再考虑部件本身是否出现故障。鉴于高功率状态下引气压力是由 PRSOV 进行调控的，这意味着如果 PRSOV 开启程度不足，则可能导致引气压力下降。控制 PRSOV 运作的是 BAR 及 45° F 温度开关，因此，BAR 或 45° F 温度开关发生故障可能是首要原因；此外，PRSOV 自身存在缺陷也会导致引气压力降低^[8-9]。

（二）引气系统故障的分析方法

引气系统的故障通常出现在三个特定区域：预冷器控制区、高压级控制区以及 PRSOV（压力调节和关断活门）控制区。当面对此类问题时，可以遵循以下思路来进行故障排查。

首先，应当对压力表及压力传感器进行检查，以判断是否存在指示问题。如果开启隔离活门后发现两侧的读数存在差异，则可以断定故障出在压力表或压力传感器上。特别是当引气总管的压力传感器发生故障时，即便实际引气压力处于正常范围内，也可能出现错误的指示。在这种情况下，正确的处理方式是更换引气总管的压力传感器。

接下来进行故障区域的初步识别。需要向飞行机组询问，在故障出现时飞机是否正处于爬升、平飞或是下降阶段，并迅速收集包括引气压力、引擎转速和飞行高度在内的关键数据。这样做有助于确定引气系统问题是在发动机何种工作条件下发生的，并据此推测出潜在的问题部位。如果仅在低功率状态下观察到异常，则可能是高压级引气组件存在问题；若问题仅出现在高功率运行时，则预冷器控制阀或其相关传感器可能存在故障；而当所有功率水平下均有故障表现时，最有可能的原因指向了压力调节关断活门（PRSOV）及其控制系统。

最终，在确定潜在故障部件的过程中，需要考虑到引气系统可能出现多种故障原因。然而，最为常见的问题通常集中在活门、控制器以及传感器上。当进行故障分析时，应当参考“引气压力/转速系统图”，以此来识别故障发生的特定区域，并在已界定的范围内执行相应的检测与测试，从而定位并排除故障部件。对于活门相关的故障，重点应放在预冷器控制活门、PRSOV

（压力调节和关断阀）及高压级活门上；针对控制器故障，则需特别注意检查高压级调节器（HPC）、BAR、450° F 恒温器以及 490° F 超温电门等组件；而关于传感器的问题，往往涉及到管道压力传感器或其指示装置的功能异常。此外，发动机引气控制系统中的软管泄露也是一个相对常见但容易被忽略的问题点，同样需要给予足够的重视来进行排查。

鉴于引气系统构成复杂，为提高故障诊断效率，在遵循既定排故策略的基础上，还应当按照从简至繁的原则进行排查。首先，应检查线路或传感器是否存在问题，这是因为这些组件不仅易于拆卸安装，而且相对容易出现故障。接着，需确认控制管路是否存在泄漏情况，因为如果控制管路发生泄漏，则可能导致控制活门工作异常；若未及时发现此问题，可能会误判为活门本身故障而更换之，从而延长了维修周期，并造成不必要的航空材料浪费^[10]。

四、结论

飞机的引气系统对于确保乘客在高空中享受到安全且舒适的环境至关重要。然而，由于其内在构造复杂性，一旦出现故障，则修复工作往往变得极具挑战性。传统上，维修人员倾向于通过同时替换多个组件的方式来解决此类问题。本文旨在详尽地探讨发动机引气系统的架构及其运作机制，并针对常见故障现象提出诊断思路、归纳总结，从而指导技术人员采用更为系统化的方法来定位并解决问题，以期提升工作效率同时减少开支。值得注意的是，引气系统中的缺陷通常是由于各个部件性能逐渐下降累积所致，表现为一种渐进式的退化过程。如果能够提前识别出这种衰退趋势，便可以在故障完全显现之前采取相应措施予以纠正。因此，建议相关维护机构主动收集有关引气系统的运行数据，及时发现异常情况，预先规划应对策略，并持续监控状态变化，以此有效增强整个系统的稳定性和可靠性。

参考文献

- [1] 宋静波：波音737飞机动力装置，中山大学出版社，2008。
- [2] 刘长福：航空发动机构造，国防工业出版社，2007。
- [3] 许春生：燃气涡轮发动机，兵器工业出版社，2006。
- [4] 朱军：波音737NG系列飞机发动机引气系统介绍及其常见故障分析[J]。江苏航空，2011(2):26-29。
- [5] 罗春田：BOEING737飞机维修经验交流论文汇编，中国民航出版社，1997。
- [6] 胡增林：航空维修与工程，航空工业信息中心，2013。
- [7] Boeing Company: 737-600/700/800/900 System Schematic Manual, 2017。
- [8] Boeing Company: 737-600/700/800/900 Fault Isolation Manual, 2018。
- [9] Boeing Company: 737-600/700/800/900 Aircraft Maintenance Manual, Part II, 2018。
- [10] Boeing Company: 737-600/700/800/900 TRAINING MANUAL, 2015。