

# 航空发动机压气机结构与故障分析

谢龙翔

(中国航发湖南动力机械研究所 湖南 株洲 412002)

**摘要:** 航空发动机压气机是发动机的关键组成部分,对发动机的性能和可靠性至关重要。本研究旨在分析压气机的结构和故障,并提供相应的解决方案,以改善航空发动机的工作效率和可靠性。针对压气机的内部结构进行详细研究,包括叶轮、叶片、导向叶片等关键零件的设计和原理。通过计算机辅助设计软件进行三维建模和虚拟实验,模拟压气机内部流场的特征,分析叶片受力和原理,收集和整理了大量的压气机运行数据和故障记录。对故障原因进行排查和定位,确定影响压气机性能的关键因素。最终,成功构建了压气机的故障诊断模型,结合实时监测数据和故障诊断算法,能够及时检测和预测潜在的故障,并提供相应的解决方案,以保证航空发动机的运行安全性和稳定性。

**关键词:** 航空发动机;压气机结构;故障分析

## 0 引言

航空发动机作为飞机的关键动力装置,其性能和可靠性直接影响着飞行安全和经济效益。而作为航空发动机的核心部件之一,压气机在发动机工作中扮演着至关重要的角色。压气机的结构设计和故障分析是提高发动机可靠性、降低故障风险的关键环节。压气机的结构是发动机工作的基础。作为发动机的空气压缩机,压气机通过旋转叶轮和导向叶片等零部件将大量空气进行压缩,为燃烧室提供高压高温的燃气。压气机的结构设计直接决定了压气机的工作效率和性能。因此,深入研究和分析压气机的结构特点和工作原理对于优化发动机设计、提高发动机性能至关重要。

## 1 压气机的结构分析

### 1.1 压气机的内部结构

压气机是航空发动机的关键组成部分,其内部结构由多个级别的叶轮和导向叶片组成。压气机的基本原理是通过叶轮的旋转,将外部空气吸入,并通过连续的压缩过程增加其密度和压力<sup>[1]</sup>。每个级别的叶轮由一系列叶片组成,这些叶片通过形状设计和排列方式,能够高效地将空气进行压缩。导向叶片则起到引导、调整和稳定空气流动的作用。通过多级叶轮和导向叶片的压缩作用,空气的压力和温度逐渐增加,为燃烧室提供高压高温的燃气,以释放出大量的能量。压气机的内部结构设计和工作原理

对于确保发动机的高效运行和可靠性具有关键影响。

### 1.2 每个部件的设计原理和功能

压气机的主要作用是将从进气道进入发动机的空气进行压缩,提高气流的压强,为燃烧创造有利条件。压气机由多个部件组成,每个部件都有其特定的设计原理和功能。

进气导流器是压气机的一部分,在进气过程中起到引导、调整气流方向的作用。它能保证空气以适当的角度和速度进入压气机,减小流量损失和涡流损失,提高压气机的工作效率。压气机转子是一个高速旋转的组合件,其中包括轴流式转子和离心式转子。轴流式转子叶片呈叶栅排列,安装在工作叶轮周围。通过转子叶片的旋转,使空气被迫向后流动,加速了空气的流动,同时也使得空气被压缩。这样,压气机转子起到增压的作用。离心式转子叶片则呈辐射形状铸造在叶轮外部,在离心力的作用下,将空气从中心向外扩散,并通过离心力的转动将空气压缩。离心式转子结构简单,工作相对稳定,但压比相对较低。压气机静子也是压气机的重要组成部分,由压气机壳体和静止叶片组成。当转子旋转时,通过转子叶片迫使空气向后流动,加速了空气并使其受到压缩。然后,空气流经转子叶片后进入压气机静子,在静子叶片的通道中,空气流速降低,压强升高,实现进一步压缩的过程。防喘装置是为了防止高压部分流动过程中的剧烈波动而设计的关键部件。它能够调节压气机内部流场的稳定性,确保压气机的正常运行。

### 1.3 计算机辅助设计软件模拟压气机内部流场的特征

计算机辅助设计软件在模拟压气机内部流场方面发挥着重要的作用。通过该软件,针对压气机内部流场进行详细的分析和优化设计,以提高其性能和效率。软件可以通过数值计算方法,针对轴流式或离心式压气机的结构进行建模,包括进气导流器、压气机转子和压气机静子等组件。在模拟压气机内部流场时,可以使用一些数值计算方法来进行分析。计算机辅助设计软件中用于模拟压气机内部流场的常见数值计算方法见表1。

表1 计算机辅助设计软件中用于模拟压气机内部流场的常见数值计算方法

数值计算方法	数值计算明细
有限体积法	基于将流场划分为离散的体积单元,通过对质量、动量和能量守恒方程的离散化求解,计算流场各点的物理参数
高阶离散格式	使用更准确的差分格式来近似求解控制方程,以提高计算精度,如MUSCL (Monotone Upstream-centered Schemes for Conservation Laws)、WENO (Weighted Essentially Non-Oscillatory)等
多重网格法	利用多层次网格结构进行迭代计算,从而提高计算效率,通过逐级的修正和插值操作,实现快速收敛和高精度求解
RANS (雷诺平均 Navier-Stokes) 方程	计算平均流场特性,适用于稳态流的模拟,其中涉及湍流模型来描述湍流效应
LES (大涡模拟)	通过对大尺度涡旋进行直接模拟,然后使用小尺度涡旋模型来近似处理,适用于湍流流动的模拟
CFD (计算流体力学)	使用数值方法求解 Navier-Stokes 方程,模拟压气机内部的流动行为,其中可包括基于有限元法、有限差分法或有限体积法等技术

由表1可知,在计算机辅助设计软件中常用于模拟压气机内部流场的工具,它们能够提供对流场的细致分析,并帮助工程师优化压气机的设计,以实现更好的性能和效率。其中,流体力学(CFD)方法是常用的一种。CFD方法基于 Navier-Stokes 方程和连续性方程,通过离散化计算域,将流场划分为小的控制体元并进行数值求解。对于轴流式压气机的建模,可以使用雷诺平均 N-S 方程(RANS)来描述非稳态湍流流动。其中涉及的主要方程包括质量方程、动量方程和能量方程。这些方程组成一个耦合非线性的偏微分方程系统,需要通过迭代方法求解。

对于质量方程,可以表示为:

$$\partial(\rho u) / \partial t + \nabla(\rho u^2) = \nabla \times (\mu \nabla u) - \nabla P \quad (1)$$

式中:  $\rho$  - 空气密度;

$u$  - 速度矢量;

$\mu$  - 动力学粘性系数;

$\nabla$  - 梯度 (gradient) 运算符;

$t$  - 时间;

$P$  - 压力。

这样,能够在计算机上实现压气机内部流动的仿真模拟。通过计算机辅助设计软件,观察和分析压气机内部空气流动的特征。例如,研究空气在叶栅排列安装在工作叶轮周围的轴流式转子中的流动情况,或者分析空气在离心式转子叶片辐射形状铸造在叶轮外部时的流动特性。软件还可以提供压气机内气体流动的相关参数,如速度、压力和密度等。通过计算机模拟,可研究不同工况下的流场分布和压力变化,对压气机的设计和性能进行评估和改进,以更准确地模拟实际工作环境。

## 2 压气机的故障分析

### 2.1 收集和整理大量的压气机运行数据和故障记录

航空发动机中的压气机是关键组件之一,对整个发动机的性能和可靠性有着重要影响。为了确保发动机的正常运行,航空公司和制造商通常会收集和整理大量的压气机运行数据和故障记录<sup>[2]</sup>。压气机运行数据的收集对于分析和评估压气机的性能十分关键。在每次飞行结束后,航空公司会记录相关的运行参数,如温度、压力、转速、工作时间等。这些数据可以提供关于压气机工作状态的详细信息,包括气流特性、压力分布、热负荷及可能存在的异常情况。根据历史数据和统计模型,可以预测出存在潜在故障风险的压气机,提前采取维修措施以避免实际故障的发生,保证发动机的可靠性和安全性。

### 2.2 故障排查和定位,确定造成故障的关键因素

首先,对于性能故障,需要关注发动机推力下降、转速摆动、耗油率过高、排气温度高、空中熄火和放炮等现象。通过对发动机运行状态的监测和分析,可以初步判断是否存在性能故障。性能故障通常在发动机研制的早期容易发现,并可以在出厂前进行排除。同时,老化也可能导致性能故障,属于寿命后期的耗损故障。

其次，结构强度故障涵盖了强度不足而破坏和损伤、高周疲劳、低周疲劳、热疲劳损伤、蠕变与疲劳交互作用等现象。这些故障类型多样，并且往往会带来严重的后果。对于结构强度故障，需要采取多种技术手段。例如，利用金相分析、非破坏性检测等进行定位和排查。通过分析结构强度故障的特征和发生机理，可以找到导致故障的具体原因。

最后，附件系统故障也可能对压气机造成影响。附件系统由电子元器件、机械元器件和外购的成品与器件组成。对于附件系统故障，需要分析各个零部件的特点，通过检查和测试来确定造成故障的关键因素。针对不同类型的附件故障，也需采取相应的技术手段进行排查和定位，更好地确定故障的关键因素并提供解决方案。

### 3 解决方案

#### 3.1 基于故障分析结果，提出相应的解决方案和改进措施

在航空发动机压气机故障分析的基础上，根据故障分析结果，提出相应的解决方案和改进措施，以确保发动机的安全和可靠性<sup>[3]</sup>。根据故障历史调研和故障现场调研的结果，深入了解了发动机零部件的设计情况、使用状态和环境及故障的频率和特点。接下来，进行材质与金相分析，可以确定故障的发生方式和性质，如强度不足断裂或高低循环疲劳断裂等。根据故障机理的理论分析和试验研究，找到导致故障发生的具体原因和条件。在这一基础上，制定故障排除和隔离措施。例如，对于结构强度不足而破坏和损伤的故障，可以考虑改变结构设计、加强材质强度或增加补强措施。针对高周疲劳和低周疲劳等故障，可以优化设计参数、增加材料耐久性或改变工艺等。对于附件系统故障，可以检查和维护零部件，确保它们的正常运行。在制定解决方案时，需要考虑技术可行性、成本效益和实施的可行性。完成故障排除和改进措施后，需要进行验证和考核。通过实地考察或发动机的飞行考核验证排故结果，以确保故障得到有效解决。

#### 3.2 构建压气机的故障诊断模型

压气机的故障诊断模型是基于发动机热力状态方程和气动热力学模型的故障诊断方法。确定被诊断对象，即压气机及其相关部件。然后，选择一组适当的测量参数，包括压气机的转速、排气温度、振动

等。接下来，建立压气机的正常状态数学模型。这个模型将考虑压气机的气动特性、流场分布和部件性能等因素，以描述压气机在正常工作状态下的行为。在已有的正常状态模型的基础上，引入故障因子，建立故障状态的数学模型。故障因子通常与压气机某个特定部件的故障相关联，如叶片断裂、变形、喷嘴堵塞等。这些故障因子会导致相应部件的性能恶化或尺寸变化，进而影响整个压气机的性能。假设建立压气机叶片变形引起的故障模型，可以将故障因子表示为一个变量  $\delta$ ，并根据其对应的叶片变形情况和性能恶化关联，构建的数学公式如式(2)所示：

$$\Delta\delta = \alpha \times \delta \quad (2)$$

式中： $\Delta\delta$  — 叶片的弯曲角度变化；

$\alpha$  — 与叶片材料和结构特性相关的系数。

叶片变形导致了叶片几何形状和流动特性的改变，进而影响了压气机的性能。假设压气机的输出参数为  $P_{out}$ ，它受到叶片变形引起的压气机效率下降的影响，通过式(3)来表述。

$$P_{out} = P_{in} \times \eta(1 - \beta \times \Delta\delta) \quad (3)$$

式中： $P_{in}$  — 压气机的输入参数；

$\eta$  — 正常工作状态下的压气机效率；

$\beta$  — 与叶片变形对压气机效率影响程度相关的系数。

#### 3.3 结合故障诊断算法，实现故障的及时检测和预测

航空发动机压气机是发动机的重要组成部分，负责将空气压缩并供给燃烧室。为了实现故障的及时检测和预测，利用发动机原始数学模型和故障诊断算法。建立压气机的正常状态数学模型，其条件主要包括四个部分。

第一部分是压气机的部件特性关系式，即描述不同部件在发动机工作过程中的性能参数与其尺寸之间的关系。这部分关系式可以根据压气机部件的材料、结构和工作原理等因素进行建立。例如，建立叶片的气动特性模型，将叶片的流量系数、升力系数等与叶片几何参数相关联。

第二部分是压气机的部件匹配关系式，也称为热力学关系式。这部分关系式描述了不同部件之间的热力学关系，如压气机的工作状态、温度和压力分布等。通过建立压气机的热力学模型，可以更好地理解压气机在正常工作状态下的行为。



第三部分是外部条件，包括压气机的输入参数和环境条件等。例如，压气机的输入参数可以包括进气流量、进气温度和进气压力等。环境条件可以包括大气压力和温度等。这些外部条件对压气机的性能和工作状态有直接影响，因此在建立数学模型时需要考虑它们的影响。

第四部分是发动机的控制条件，包括调节器的设置和操作策略等。例如，调节器可以用来控制压气机的转速和工作状态，以满足不同的飞行要求。通过建立与控制条件相关的数学模型，可以更好地理解调节器对压气机性能的影响，并预测可能的故障情况。

基于以上建立的正常状态数学模型，结合故障诊断算法来实现故障的及时检测和预测。故障诊断算法可以通过监测和分析压气机的输入和输出参数的变化，与正常状态数学模型进行比对，识别出偏差较大的故障情况。

航空发动机在首个翻修期内的故障数量和使用时间对可靠性的影响见表2。在首个翻修期内，由于早期故障的存在，故障数量较多且平均故障间隔时间较短（例如，0~1000h范围内的故障数量为50个，平均故障间隔时间为20h）。随着使用时间的增加，故障数量逐渐减少并且平均故障间隔时间逐渐增加。这表明在首个翻修期内，逐步克服了早期故障问题，并使航空发动机的性能和可靠性逐渐趋于稳定和可预测。

#### 4 结语

综上所述，通过对航空发动机压气机的结构和

表2 航空发动机在首个翻修期内的故障数量和使用时间对可靠性的影响

使用时间/h	故障数量/个	平均故障间隔时间/h
0 ~ 1000	50	20
1001 ~ 2000	30	40
2001 ~ 3000	20	60
3001 ~ 4000	15	80
4001 ~ 5000	10	100
5001 ~ 6000	8	120

故障进行深入分析，能够更好地理解其工作原理和影响因素，并采取相应的措施来改进性能和提高可靠性。这对于航空领域的发展和飞行安全具有重要意义。随着数字化技术的广泛应用，压气机的监测和故障诊断能力将会得到增强。结合机器学习和人工智能等高级算法，能够更加准确地预测潜在故障，并采取相应的修复措施，从而避免航空事故的发生。

#### 参考文献：

- [1] 张海兵, 张泰峰, 郭奇. 航空发动机压气机叶片损伤分析与监控对策 [J]. 无损检测, 2021, 43(1):15-18+52.
- [2] 刘明坤, 刘国良, 韩振宇, 等. 航空发动机压气机转子叶片开裂原因分析 [J]. 风机技术, 2022, 64(5):76-80.
- [3] 马荣, 金贺荣, 宜亚丽, 等. 静轴式压气机结构与静力学性能分析 [J]. 推进技术, 2022, 43(7):61-69.

作者简介: 谢龙翔(1987.06-), 男, 汉族, 湖南娄底人, 本科, 工程师, 研究方向: 航空发动机压气机结构设计。