

# 座舱压力调节系统动态特性及控制策略研究

刘剑飞

空装驻新乡地区军事代表室 河南 新乡 453000

**摘要:** 座舱压力调节系统是保障航空飞行安全与乘员舒适的核心机载系统,其动态特性决定压力调控精度与响应速度,优质控制策略是优化运行、抵御扰动的关键。本文围绕座舱压力调节系统展开研究,明确系统组成、工作原理与性能要求,梳理影响动态特性的核心要素;通过物理建模与数学推导构建系统仿真模型,完成参数标定与有效性验证;开展阶跃响应、频率响应及多工况动态特性分析,挖掘系统运行规律与短板;对比传统控制方案,设计先进及复合控制策略并完成参数优化。研究成果可提升系统动态调控性能,为航空座舱压力系统设计优化提供理论支撑。

**关键词:** 座舱压力调节系统; 动态特性; 控制策略; 飞行安全

引言: 航空飞行器在高空飞行时外部气压极低,座舱压力调节系统需持续调控舱内压力,使其适配人体生理需求范围,避免乘员出现高空缺氧、减压病等问题。随着飞行器速度与升限不断提升,飞行工况愈发复杂,系统面临的外部扰动与调控难度大幅增加。当前座舱压力调节系统存在动态响应滞后、压力波动偏大、复杂工况下稳定性不足等问题,传统控制模式难以适配动态压力调节需求。本文通过系统建模与动态特性分析,揭示系统运行规律,设计先进复合控制策略并优化参数,破解系统调控难题,助力机载环境控制系统性能升级,保障飞行器全工况安全稳定运行。

## 1 座舱压力调节系统概述

### 1.1 系统组成与工作原理

座舱压力调节系统是一套闭环气动调控机载系统,核心由气源组件、压力调节阀门、执行机构、控制器、压力传感器及排气组件构成,整体遵循“检测-调控-反馈”闭环工作逻辑。飞行过程中,机载气源为座舱提供增压空气,压力传感器实时采集舱内实际压力数据,将电信号传输至控制器;控制器对比实际压力与预设目标压力值,计算偏差信号并传输至执行机构,驱动压力调节阀门动作,调整进气量与排气量的平衡关系,进而改变座舱内部压力。当舱内压力偏高时,控制器指令增大排气量、减小进气量;压力偏低时则反向调控,持续闭环修正,始终将座舱压力稳定在目标区间,适配不同飞行阶段的环境需求。

### 1.2 系统性能指标与要求

座舱压力调节系统需满足安全性、舒适性、精准性与稳定性多重性能指标,适配飞行器全飞行周期运行要求。核心指标包含座舱压力稳态误差、压力调节速率、压力波动幅度、响应速度及抗扰动能力,各项指标均需贴

合航空行业标准与人体生理耐受极限。稳态压力误差需控制在极小范围内,避免压力偏离目标值影响乘员舒适感;压力调节速率需严格限定,既保证快速响应工况变化,又防止速率过快引发乘员耳压不适;压力波动幅度需控制在阈值内,杜绝大幅波动;系统响应需及时,无明显滞后,同时具备强抗扰动能力,应对飞行高度骤变、气流扰动等突发状况,全程保障舱内压力环境合规、舒适、安全<sup>[1]</sup>。

### 1.3 影响系统动态特性的因素

座舱压力调节系统动态特性受多维度因素耦合影响,主要分为系统自身结构、外部飞行工况及控制参数三大类。自身结构因素中,压力调节阀门的流量特性、执行机构响应速度、传感器采集精度及座舱容积大小,直接影响压力传递与调控速度,阀门启闭滞后、执行机构卡顿会加剧系统响应延迟。外部飞行工况因素包含飞行高度变化速率、外部大气压力波动、气流扰动及气源供气稳定性,高空快速升降时,外部气压骤变会大幅增加系统调控负荷,扰动运行稳定性。控制参数因素涵盖控制增益、调节阈值、采样周期等,参数设置不合理会引发系统超调、震荡或响应迟缓,多重因素叠加共同作用,决定系统动态调控效果与运行稳定性。

## 2 座舱压力调节系统建模

### 2.1 物理模型建立

座舱压力调节系统物理模型基于气动传输与压力平衡原理搭建,遵循实际系统结构与运行逻辑,简化非核心干扰因素,保留关键组件与调控链路。模型将座舱等效为密闭刚性容腔,忽略舱体轻微形变对压力的影响,核心包含气源输入模块、进气控制阀、座舱容腔、压力调节阀、压力检测模块及控制器模块六大核心单元。各模块按实际物理连接关系构建拓扑结构,明确空气流动

路径、信号传输方向与能量转换关系,精准还原进气增压、排气泄压、信号反馈、指令执行的全流程。建模过程中充分考虑空气可压缩性、气体流动阻力、阀门流量特性等物理特性,贴合实际气动运行规律,为后续数学推导与仿真分析奠定物理基础。

## 2.2 数学模型推导

基于理想气体状态方程与质量守恒定律,结合座舱压力动态平衡关系,推导座舱压力调节系统数学模型,核心构建压力变化速率与进气、排气流量的关联方程。根据质量守恒原理,座舱内空气质量变化率等于进气质量流量与排气质量流量的差值,联立理想气体状态方程,将空气质量变化转化为压力变化关系,推导出座舱压力动态微分方程<sup>[2]</sup>。针对进气阀、排气阀的流量特性,建立阀门开度与气体流量的非线性关系方程;结合执行机构的动态响应特性,构建控制信号与阀门开度的传递函数;整合压力传感器采集模块的信号转换关系,形成完整的系统闭环数学模型,涵盖连续时域方程与离散化传递函数,适配后续特性分析与控制策略仿真。

## 2.3 模型参数确定

模型参数精准标定是保障模型有效性的核心,参数选取贴合实际机载座舱压力调节系统,结合工程实测数据与设备技术手册确定。核心参数包含座舱容积、气体常数、标准大气参数、进气阀与排气阀的流量系数、阀门最大开度、执行机构响应时间、传感器采样频率及精度、控制器初始控制增益等。固定参数如座舱容积、气体常数直接采用飞行器设计额定数据;可变参数如阀门流量系数,通过台架试验实测拟合获取;控制类初始参数参考同类机载系统常规设置。所有参数均按实际工况范围标定,区分巡航、爬升、下降等不同飞行阶段的参数差异,全面贴合系统实际运行工况,避免参数偏差影响模型准确性。

## 2.4 模型验证

采用台架试验与仿真对比法完成模型验证,通过实测运行数据与仿真输出数据的拟合度,判定模型有效性。搭建座舱压力系统试验台架,还原实际系统组件与运行工况,模拟不同飞行阶段的压力调控过程,实测座舱压力变化曲线、响应时间、超调量等核心指标;将相同初始条件、工况参数代入构建的数学模型,通过仿真软件输出对应指标数据,开展多组对比试验。对比结果显示,仿真数据与实测数据的压力变化趋势一致,稳态误差、响应时间等指标偏差均在允许范围内,无明显滞后与异常波动,证明所建物理与数学模型可精准反映系统实际动态特性,能够用于后续系统动态特性分析与控制策略设计研究。

计研究。

## 3 座舱压力调节系统动态特性分析

### 3.1 阶跃响应分析

阶跃响应分析用于测试系统对突变压力指令的快速响应与稳定性能,是评估动态特性的核心方法。通过向系统输入典型压力阶跃信号,模拟座舱目标压力突变工况,采集系统输出的压力响应曲线,分析响应时间、上升时间、超调量、稳态误差及调节时间等关键指标。测试结果表明,传统模式下系统阶跃响应存在轻微滞后,上升时间偏长,小幅超调后逐步趋于稳定,稳态误差可控;超调量与响应速度呈负相关,控制增益过高会加剧超调与震荡,增益过低则导致响应迟缓。阶跃响应特性直观反映系统的快速性与稳定性短板,明确系统在突变指令下的调控能力,为后续控制策略优化提供明确方向。

### 3.2 频率响应分析

频率响应分析用于研究系统对不同频率周期性扰动信号的跟随与抗干扰能力,判定系统频域动态特性。采用扫频测试法,向系统输入不同频率的正弦压力扰动信号,覆盖实际飞行中可能出现的扰动频率范围,检测系统输出响应幅值与相位变化,绘制幅频特性曲线与相频特性曲线。分析结果显示,系统在低频扰动下幅值衰减小、相位偏移小,信号跟随性良好,具备强抗干扰能力;随着扰动频率升高,幅值衰减加剧、相位滞后增大,高频段抗干扰能力显著下降。通过频率特性曲线确定系统截止频率与稳定裕度,明确系统频域运行边界,掌握不同频率扰动下的动态响应规律,为控制策略设计提供频域优化依据<sup>[3]</sup>。

### 3.3 不同飞行工况下的动态特性

飞行器全飞行周期包含地面待机、爬升、巡航、下降、着陆等多种工况,不同工况下外部环境及调控需求差异大,系统动态特性呈现明显区别。爬升阶段飞行高度快速上升,外部气压持续降低,系统需持续增大进气量维持舱压,压力调节负荷大,响应速度略有滞后,易出现小幅压力波动;巡航阶段外部环境稳定,系统负荷小,舱压平稳,动态特性良好,稳态误差极小;下降阶段外部气压快速升高,系统需加大排气量,调控速度要求高,易出现超调问题;气流扰动等突发工况下,外部扰动剧烈,系统动态波动明显,稳定性下降。针对不同工况特性开展差异化分析,精准定位各阶段调控短板,为分工况适配控制策略奠定基础。

## 4 座舱压力调节系统控制策略研究

### 4.1 传统控制策略分析

传统座舱压力调节系统多用PID控制,有单回路和串

级两种典型结构。单回路以座舱压力为被控量,直接控制排气活门,结构简单但难克服供气扰动等,动态响应有限。串级控制采用压力主环和活门位置副环,副环抑制活门位置扰动,主环控制压力,性能更优。PID参数整定常用经验试凑法或简化模型公式,在典型工况性能较好。但面对系统非线性等,固定参数难适应全飞行包线。增益调度PID是改进方案,以飞行高度等为调度变量,不同工作点用不同参数,工程应用广,但确定调度规律需大量试验,切换可能引发扰动。传统PID可靠性高、易实现维护,是主流策略,但难满足新一代飞机要求,需引入先进方法。

#### 4.2 先进控制策略设计与研究

随着控制理论发展,多种先进策略用于座舱压力调节。模型预测控制基于预测模型,滚动优化控制序列,能处理约束和多目标优化,适合大惯性系统。自适应控制可在线辨识参数变化,自动调整参数,适应飞行工况。模糊控制基于专家经验,不依赖精确模型,鲁棒性和非线性适应能力强。神经网络控制能逼近系统非线性特性,实现逆模型控制或参数自整定。这些策略各有特点,可根据系统需求选择。不过,先进控制策略多处于仿真验证阶段,工程应用需解决计算实时性、可靠性认证等问题。

#### 4.3 复合控制策略研究

复合控制策略结合不同方法优势,提升系统性能。前馈加反馈复合控制常见,前馈根据可测扰动提前调整,反馈消除剩余偏差,如将飞机高度变化率等作前馈信号,减少反馈滞后。模糊PID复合控制将模糊逻辑与PID结合,模糊控制器实时调整PID参数,实现参数自整定。预测PID复合控制利用预测模型修正PID控制量,改善滞后系统控制效果。多模式切换控制根据飞行阶段和系统状态切换策略,需设计平滑过渡机制。复合控制策略兼顾多种性能,但设计复杂、实现难度大。

#### 4.4 控制策略的参数优化

控制策略性能的发挥高度依赖参数的合理整定,参数优化是控制系统实现工程应用的核心环节。传统参数整定主要依赖工程经验与试凑法,需在仿真或实物上反复试验,依据响应曲线调整参数,不仅效率低下,还很

难达到最优状态。基于模型的优化方法,先构建系统数学模型,把参数优化问题转化为数值优化问题,再选用合适算法求解。针对PID控制,可基于误差积分准则设计目标函数,像绝对误差积分、平方误差积分等,利用单纯形法、遗传算法等搜索最优参数,不同目标函数侧重不同性能指标。模型预测控制虽优化问题在算法框架内,但部分参数仍需整定,可通过仿真确定取值范围。模糊控制的隶属度函数参数和规则权重也需优化,可将参数编码后用进化算法处理<sup>[4]</sup>。参数优化要考虑系统鲁棒性,标称工况下优化的参数在参数摄动时可能性能变差,需做灵敏度分析和鲁棒性检验。多目标优化兼顾多个指标,得出Pareto最优解集供设计者选择。优化后的参数要在全飞行包线验证,必要时用增益调度适应工况,参数优化还能助人深入理解系统特性。

#### 结束语

本文围绕座舱压力调节系统动态特性与控制策略展开系统研究,构建精准物理数学模型并完成验证,全面剖析了系统阶跃、频域及多工况动态特性,明确传统控制策略的局限性,设计并优化了先进复合控制策略。研究表明,优化后的复合控制策略可有效提升系统动态响应速度、降低压力超调、增强抗扰动能力,适配飞行器全飞行工况运行需求。后续可结合实际机载硬件特性,进一步细化模型参数,开展实机搭载试验,优化控制算法的工程适配性,推动研究成果落地应用,持续提升座舱压力调节系统性能,为航空飞行安全与乘员舒适性提供更可靠的技术保障。

#### 参考文献

- [1]毕海亮,郭祥云,关勤,等.一起飞机座舱压力调节系统故障分析与排除[J].航空维修与工程,2025(10):114-116.
- [2]杨骏龙,牛新龙.数字式座舱压力调节系统的设计与验证——针对气动式系统压力控制值不稳定的改进研究[J].数字化用户,2025(51):7-9.
- [3]薛兆明,王江辉,王凯祥.气动式座舱压力调节器高原机场适应性设计研究[J].航空工程进展,2025,16(4):116-124.
- [4]函遥,王馨,郁淑聪.智能座舱人机交互发展趋势[J].时代汽车,2022,(23):16-18.