

飞行器动力系统的优化设计与性能提升研究

郭 烜

沈阳航空航天大学 国际工程师学院 辽宁沈阳 110136

摘要：本文针对飞行器动力系统现状及存在问题，提出结构优化设计、控制策略优化和材料应用优化三种方法。结构优化通过轻量化设计、气动优化和热管理优化提升性能；控制策略优化引入智能控制算法、多变量协调控制和故障诊断与容错控制；材料应用优化聚焦高温材料和润滑材料。仿真实验表明，优化后发动机推力提升10%，燃油消耗率降低8%，推重比提高15%，响应时间缩短20%，稳定性指数提高25%，抗干扰能力增强24%。这些优化措施有效提升了飞行器动力系统的性能。

关键词：飞行器动力系统；优化设计；性能提升；结构优化

引言

随着航空航天技术的飞速发展，飞行器在速度、航程、载重等方面的性能要求不断提高，这对飞行器动力系统提出了更为严峻的挑战。动力系统的效率、可靠性、推重比等性能指标直接决定了飞行器的作战效能和经济效益。然而，当前飞行器动力系统设计上仍存在一些问題，如能量转换效率不高、结构复杂导致维护成本增加、控制精度不足等，严重制约了飞行器性能的进一步提升。因此，开展飞行器动力系统的优化设计与性能提升研究具有重要的现实意义。

一、飞行器动力系统现状及问题分析

1. 动力系统组成与工作原理

飞行器动力系统构成了现代航空航天器的核心动力来源，它由发动机、燃油供应系统及控制系统这三个主要部分紧密组合而成，共同保障飞行器能够获得持续稳定的推进力。发动机作为整个系统的核心部件，其基本工作原理是将化学能高效转化为机械能和热能，具体过程是当燃料与氧气在燃烧室内充分混合燃烧后产生极高温度和压力的气体，这股高温高压气流会以极高速度喷射而出并形成强大的反作用力，同时也会带动发动机内部的涡轮高速旋转，涡轮与风扇或螺旋桨相连接进而产生足够的推力使飞行器前进^[1]。

燃油供应系统在整个工作流程中扮演着至关重要的角色，它负责精确控制并安全输送燃油从油箱到发动机燃烧室，根据飞行状态的不同自动调节燃油流量和压力，确保发动机在各种飞行环境和工况下都能获得最适合的燃料量，完成最佳的燃烧效果和能量转换。与此同时，

控制系统则如同飞行器的神经中枢，通过遍布各处的传感器实时采集发动机运行参数如转速、温度、压力等关键数据，经过复杂的算法分析与处理后向执行机构发出精准指令，动态调节发动机的各项参数和工作状态，使其始终保持在最优运行区间内，从而保证飞行器的性能、效率 and 安全性。这三大系统的协同工作和精密配合构成了现代飞行器动力系统的基本工作原理和组成架构，为飞行器提供可靠持久的动力支持。

2. 现存问题

当前飞行器动力系统虽然经过多年发展和改进，但仍面临着几个关键技术瓶颈和亟待解决的问题，其中最突出的是能量转换效率低下的问题，现阶段航空发动机的能量转换效率普遍徘徊在30%–40%左右，意味着每单位燃料中约有60%–70%的能量未能有效转化为推进力，而是以热能形式散失到环境中，这种大量能量浪费不仅直接增加了燃料消耗和运行成本，同时也给发动机的热管理系统带来了沉重负担，额外的冷却需求又进一步降低了系统的整体效率^[2]。

结构设计的不合理性也严重制约着动力系统性能的提升，许多现役飞行器动力系统结构过于繁复，内部零部件数量庞大且布局紧凑，这种设计虽然在一定程度上满足了功能需求，但却带来了系统可靠性下降和维护难度增加的问题，零部件越多意味着潜在故障点越多，同时复杂结构也导致检修和更换部件的工作变得异常困难，大大增加了维护时间和成本，此外，不合理的结构设计还常常引起气流分布不均匀、涡流增加等气动问题，这些都会直接导致推力下降和燃油效率降低。

控制策略的落后是制约动力系统性能的第三个重要

因素，传统控制系统多采用预设的固定参数和简单的反馈机制，这种方式在飞行器面临复杂多变的飞行环境时显得十分僵化，无法根据实时飞行状态和环境变化进行智能调整，导致发动机经常工作在非最优状态，出现推力不稳定、燃油消耗波动、甚至在极端情况下可能引发熄火等安全隐患，这种控制策略上的局限性已成为制约现代飞行器动力系统性能进一步提升的重要瓶颈。

二、优化设计方法

1. 结构优化设计

飞行器动力系统的结构优化设计主要围绕轻量化设计、气动优化和热管理优化三个关键方向展开，其中轻量化设计作为提高推重比的重要手段，核心在于采用先进材料和制造工艺来减轻系统整体重量，碳纤维复合材料凭借其高强度低密度的特性已逐渐取代传统金属材料应用于发动机外壳和支架结构，同时钛合金在发动机热端部件的应用也大幅降低了系统重量，除材料升级外，优化零部件结构也是实现轻量化的重要途径，通过拓扑优化和仿生设计可在维持必要强度和刚度的前提下去除多余材料，实现结构的轻质高效^[1]。

气动优化则聚焦于提升发动机内部气流通效率和降低能量损失，主要涉及进气道、燃烧室和喷管等关键部件的流道设计，采用计算流体动力学技术可精确模拟不同飞行状态下的内部气流分布情况，优化后的进气道能更好适应各种速度和高度条件下的进气需求，改进型燃烧室可提高燃料雾化效率和燃烧完全性，而新型喷管则能最大限度降低排气损失，这些气动优化措施的综合应用显著提升了发动机的推进效率。

热管理优化作为结构设计的第三个关键方向，着重解决发动机高温环境下的散热问题，通过设计高效冷却系统来降低关键部件的工作温度，延长发动机使用寿命，现代发动机冷却技术已经从单一冷却方式发展为气冷与液冷相结合的综合冷却系统，涡轮叶片采用内部复杂冷却通道并结合薄膜冷却技术，燃烧室壁则利用先进隔热材料和主动冷却策略来控制温度，这种多层次热管理策略有效平衡了冷却效果与系统复杂度。

2. 控制策略优化

飞行器动力系统控制策略优化包括智能控制算法、多变量协调控制和故障诊断与容错控制三个主要方面，智能控制算法作为控制策略优化的核心突破口，正在彻底改变动力系统的运行管理模式，通过引入模糊控制技术可以有效处理系统中的不确定性因素，建立更接近人类专家思维的控制模型，神经网络控制则利用其强大的

学习能力模拟复杂的非线性系统动态特性，而自适应控制技术能够根据飞行环境和工况变化自动调整控制参数，这些先进控制算法的应用大大提高了系统的鲁棒性和环境适应能力，使发动机在各种工况下都能保持最佳运行状态^[4]。

多变量协调控制技术针对动力系统多输入多输出的复杂特性，通过建立完整的系统数学模型来实现对多个关键变量的统一协调管理，燃油流量、涡轮转速、压气机压力比等参数之间存在着复杂的耦合关系，传统单变量控制难以实现全局最优，而多变量协调控制则能综合考虑各变量间的相互影响，建立最优控制策略，实现系统性能的整体提升，特别是在发动机过渡态控制中表现出显著优势，有效减少了推力波动和燃油消耗。

故障诊断与容错控制作为保障系统可靠性的关键技术，通过实时监测关键参数并结合模型辨识技术能快速精确定位潜在故障，现代故障诊断系统已从简单的阈值监测发展为基于数据驱动和模型驱动相结合的综合诊断方法，能够在故障初期就发出预警，同时容错控制策略可在发生故障时通过重构控制律或调整控制目标来维持系统基本功能，最大限度降低故障影响，这种主动防护机制极大提高了整个动力系统的安全性和可靠性。

3. 材料应用优化

飞行器动力系统的材料应用优化主要集中在高温材料和润滑材料两个关键领域，高温材料作为发动机热端部件的核心支撑技术，直接决定了发动机的最高工作温度和热效率，现代航空发动机的燃烧室和涡轮部件长期工作在1400℃以上的极端高温环境中，传统金属材料在这种条件下强度和抗氧化性急剧下降，陶瓷基复合材料凭借其优异的高温性能和较低密度逐渐成为研究热点，特别是碳化硅纤维增强碳化硅陶瓷复合材料(SiC/SiC)在保持高温强度的同时还具有良好的热震性能，而新型金属间化合物如镍铝和钛铝合金则兼具金属的韧性和陶瓷的耐高温性，这些先进材料的应用使发动机能够在更高温度下工作，显著提升了热效率。

润滑材料虽然在发动机系统中用量不大但却是确保系统稳定运行的关键因素，飞行器动力系统轴承和传动部件在高温高压高速条件下工作，对润滑材料提出了极高要求，合成润滑油已经取代传统矿物油成为主流选择，聚醚类和聚酯类合成润滑油凭借其优异的高温稳定性和低挥发性能够在宽温域内保持良好的润滑效果，同时固体润滑剂如二硫化钼和石墨在特殊环境下也发挥着重要作用，尤其是在极端温度或真空环境中，而纳米

复合润滑材料通过在基础油中添加纳米颗粒进一步提升了润滑性能，这些高性能润滑材料的应用有效减少了摩擦损失和机械磨损，延长了发动机部件寿命^[5]。

三、仿真实验与结果分析

1. 实验模型建立

本研究以某型先进涡扇发动机为对象构建了完整的动力系统数学模型，包含热力学模型、动力学模型和控制模型三个关键部分，热力学模型主要通过燃烧室能量平衡方程 $Q_t = \dot{m}_f \cdot H_f = \dot{m}_a \cdot c_p \cdot (T_3 - T_2)$ 描述能量转换过程，其中 Q_t 为热量释放， \dot{m}_f 为燃油流量， H_f 为燃料热值，该方程揭示了燃料化学能向热能转化的机制，同时还包括压气机和涡轮的等熵效率方程等参数关系。

动力学模型则采用转子动力学方程 $J \cdot d\omega/dt = \tau_t - \tau_c - \tau_{load}$ 表征系统瞬态特性， J 为转动惯量， ω 为角速度， τ_t 与 τ_c 分别为涡轮提供转矩和压气机消耗转矩，此方程对分析发动机加减速性能至关重要，控制模型采用状态空间表达式 $\dot{x} = Ax + Bu$ 和 $y = Cx + Du$ 构建闭环控制框架，使非线性系统能在小偏差范围内实现线性化控制。

模型建立过程融合理论分析与实验数据验证，关键参数通过台架试验数据进行标定，难以直接测量的内部参数采用参数辨识技术结合最小二乘法估计 $\hat{\theta} = (\Phi^T \Phi)^{-1} \cdot \Phi^T Y$ ，其中 $\hat{\theta}$ 为待辨识参数向量，此方法显著提高了模型精确性和可靠性，同时也合理简化了部分非关键因素以平衡计算效率与精度。

完成数学模型构建后，研究团队在 MATLAB/Simulink 平台建立了仿真环境，各子系统被模块化实现并通过信号线连接形成系统框架，设计了覆盖稳态性能、动态响应和极限工况的仿真方案，包括不同高度速度条件下的起动机性能、加减速特性及外部扰动响应，通过对比优化前后的系统行为，直观评估各项优化措施的有效性，为后续实际改进提供了可靠的理论依据和技术支撑。

2. 实验结果对比

仿真实验完成后对优化前后的发动机性能进行了全面对比分析，如表1所示，从静态性能指标来看，经过结构优化和材料升级后发动机的推力从原来的78.5kN提升到86.3kN增加了10%，而燃油消耗率则从原本的0.76kg/kN·h降低到0.70kg/kN·h减少了8%，推重比这一关键性能指标更是从6.8提高到7.82实现了15%的显著增长，这些静态性能全面提升直接反映了结构优化设计和材料应用优化的成效，尤其是轻量化设计和高温材料的应用对推重比改善贡献最为显著。

表1 发动机优化前后性能对比

性能指标	优化前	优化后	提升比例
推力 (kN)	78.5	86.3	10%
燃油消耗率 (kg/kN·h)	0.76	0.7	-8%
推重比	6.8	7.82	15%
响应时间 (s)	5.5	4.4	-20%
稳定性指数	0.68	0.85	25%
抗干扰度 (%)	72	89	24%

从动态控制性能来看，智能控制算法的引入使系统响应时间从5.5秒缩短到4.4秒性能提升20%，稳定性指数从0.68提高到0.85提升了25%，而系统在外部扰动下的抗干扰能力则从72%提高到89%改善了24%，这些动态性能的显著提升主要得益于多变量协调控制和自适应控制策略的应用，使发动机能够更快速准确地响应控制指令并保持稳定工作状态，特别是在复杂多变的飞行环境中表现出色。

结论

本文通过对飞行器动力系统现状及问题的深入分析，提出了结构优化设计、控制策略优化和材料应用优化三种方法，并通过仿真实验验证了这些方法的有效性。结构优化设计实现了轻量化和气动效率提升；控制策略优化提高了系统的智能化水平和动态性能；材料应用优化增强了发动机的高温性能和可靠性。这些优化措施的综合应用显著提升了飞行器动力系统的整体性能，为现代航空航天动力系统的发展提供了有益的参考。

参考文献

- [1] 郭峰, 朱剑锋, 尤延铨, 等. 涡轮基组合动力与火箭的耦合特性分析及匹配优化设计[J]. 航空学报, 2021(2): 14-15.
- [2] 韩忠华, 龙腾, 宋学官, 等. 飞行器多学科优化设计研究现状与展望[J]. 气动研究与试验, 2024, 2(4): 26-57.
- [3] 彭波. 并联式TBCC排气系统优化设计及性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2021(2): 21-22.
- [4] 刘超宇, 屈峰, 李杰奇, 等. 涡波一体乘波飞行器宽速域气动优化设计研究[J]. 力学学报, 2023, 55(1): 70-83.
- [5] 杨廷婷, 姜金朋, 刘洋, 等. 吸气式飞行器增压系统结构优化设计研究[J]. 液压气动与密封, 2022, 42(1): 84-89.