

无人机用活塞式发动机高空性能提升技术研究

米守波 党 辉 张 吉
西安爱生技术集团有限公司 陕西 西安 710065

摘 要：无人机活塞式发动机高空性能受多重因素制约。本文剖析了高空环境、进气系统、燃烧过程、热管理及动力传输对发动机高空性能的核心影响，阐述了进气系统、燃烧系统、热管理系统、动力传输系统及发动机材料与结构优化等关键技术，探讨了各提升技术间的兼容性、多技术集成思路与方法，以及集成过程中的技术协调要点，为提升无人机活塞式发动机高空性能提供技术支撑。

关键词：无人机；活塞式发动机；高空性能；关键技术；技术集成

引言：随着无人机应用场景向高空领域不断拓展，对活塞式发动机高空性能提出了更高要求。当前，无人机活塞式发动机在高空运行时面临诸多挑战，如进气不足、燃烧不稳定、散热困难等，这些问题严重制约了发动机的动力输出、运行稳定性和耐久性。深入研究无人机活塞式发动机高空性能提升技术，突破现有性能瓶颈，对于增强无人机高空作业能力、拓展其应用范围具有重要意义。

1 无人机活塞式发动机高空性能核心影响因素

1.1 高空环境对发动机工作的基础影响

高空环境通过大气物理参数的变化，直接作用于无人机活塞式发动机的工作循环，形成基础性影响^[1]。海

拔升高伴随大气密度降低，空气压力与温度递减，这一变化直接改变发动机进气条件，导致缸内可吸入的空气量减少。空气密度下降会使得燃油与空气的混合比例偏离最优范围，进而干扰燃烧过程的稳定性。高空低温环境会影响燃油雾化效果，降低燃油蒸发速率，同时加剧发动机零部件的热应力变化，影响润滑系统效能，导致零部件磨损风险上升。大气压力降低还会改变发动机排气背压，影响废气排出效率，间接制约进气过程的顺畅性，最终导致发动机动力输出能力发生波动。不同海拔高度下，大气物理参数变化及对发动机的具体影响，如表1所示。

表1

海拔高度	大气密度变化	空气压力变化	空气温度变化	对发动机的主要影响
低海拔（< 2000m）	基本稳定	接近标准大气压	接近常温	进气条件良好，燃烧稳定，动力输出平稳
中海拔（2000-5000m）	明显下降	显著降低	逐步递减	进气量不足，空燃比失衡，燃烧效率下降，动力输出减弱
高海拔（> 5000m）	大幅下降	大幅降低	显著降低	燃油雾化效果差，点火可靠性下降，散热困难，零部件磨损加剧

1.2 发动机进气系统与高空性能的关联

进气系统作为发动机获取空气的核心部件，其工作状态与无人机活塞式发动机高空性能紧密相关。进气系统的结构设计与工作效率，直接决定高空环境下缸内进气量与进气质量。进气道流场分布合理性影响空气进入气缸的均匀性，流场紊乱会导致局部进气不足，造成缸内燃烧不均衡。进气增压装置的工作效能的高低，直接决定高空环境下进气压力的补偿效果，能够缓解高空空气稀薄带来的进气量不足问题。进气冷却与稳压结构的设计，可优化进气温度与压力稳定性，减少进气波动对燃烧过程的干扰，进气系统的密封性能不足会导致增压气体泄漏，降低进气效率，进一步削弱发动机高空动力

性能。

1.3 发动机燃烧过程与高空性能的关联

燃烧过程是发动机将燃油化学能转化为机械能的核心环节，其完善程度直接关联无人机活塞式发动机高空性能。高空空气稀薄导致缸内氧气含量不足，燃油与空气混合不均匀，会降低燃烧充分性，增加燃油消耗的同时减少有效功输出。燃烧室结构设计决定燃油雾化混合效果与火焰传播速度，不合理的燃烧室结构会导致火焰传播迟缓，甚至出现燃烧不完全现象。点火系统的点火能量与点火时机，影响燃烧过程的启动与持续稳定性，高空低温环境会降低点火系统工作可靠性，易出现点火延迟或点火失败，进而破坏燃烧循环的连续性，导致发

动机动力输出下降、运转稳定性变差。

1.4 发动机热管理与高空性能的关联

发动机热管理系统的工作效能,直接影响无人机活塞式发动机高空运行的稳定性与耐久性,进而关联高空性能表现。高空环境大气密度低,空气散热能力下降,导致发动机余热难以快速散发,易出现零部件过热现象。热管理系统中的冷却结构与热交换效率,决定发动机工作温度的控制精度,冷却不足会导致气缸温度过高,引发燃油早燃,冷却过度则会降低燃烧热效率,造成能量浪费^[2]。热交换部件的结构设计与材料选择,影响热传递速率,不合理的设计会导致热管理系统响应滞后,无法及时适应高空环境的温度变化,进而影响发动机各部件配合精度,削弱高空动力输出的稳定性。

1.5 发动机动力传输与高空性能的关联

动力传输系统作为发动机动力输出的关键载体,其传输效率与工作稳定性,直接关联无人机活塞式发动机高空性能的发挥。动力传输部件的配合精度与传动效率,决定发动机输出机械能的有效传递比例,部件磨损或配合间隙不合理会导致动力损耗增加,降低实际输出动力。高空低温环境会影响动力传输系统润滑效果,导致部件摩擦阻力增大,进一步加剧动力损耗,同时降低部件运转灵活性。动力传输系统的负载匹配特性,需与高空环境下发动机的动力输出特性相适配,匹配不当会导致发动机长期处于非最优工况运行,不仅降低动力输出效率,还会缩短发动机使用寿命,间接影响无人机高空作业的持续性。

2 无人机活塞式发动机高空性能提升关键技术

2.1 进气系统优化技术

进气增压技术聚焦高空空气稀薄引发的进气量不足问题,以进气量精准补偿为核心导向,优化增压装置的气动结构与闭环控制逻辑,通过动态调整增压比适配发动机不同高空工况的运行需求,缓解增压过程中排气背压升高对换气过程的不利影响,助力发动机功率稳定在设计区间。进气道结构优化依托流体力学理论与数值计算方法,合理调整气道曲率、截面尺寸及内部导流结构,优化气道内流场分布,降低气流沿程阻力与局部涡流损耗,提升进气均匀性与充量系数,为后续燃烧过程提供稳定且充足的气流保障。进气过滤与稳压技术针对高空大气中含有的颗粒物、水汽等杂质,优化过滤介质选型与过滤结构设计,有效拦截各类杂质以减少发动机内部部件的磨损,通过稳压模块的动态调节功能,降低进气流量与压力的波动幅度,保障进气参数稳定,适配高空复杂多变的环境工况。

2.2 燃烧系统优化技术

燃烧室结构改进以提升燃烧效率与燃烧稳定性为核心,优化燃烧室几何形态、喉口尺寸及内部扰流结构,改善燃油与空气的混合均匀性,缩短燃烧持续时间,减少不完全燃烧造成的能量损耗,适配高空低压低温环境下的燃烧特性^[3]。燃油供给方式优化采用高精度电控喷射技术,结合高空工况下燃油雾化的特殊要求,优化喷射孔结构、喷射压力与喷射时机,改善燃油雾化粒径与分布均匀性,适配重油等高粘度燃油的燃烧需求,进一步提升燃油经济性与燃烧稳定性。点火系统性能优化重点解决高空低压环境下的点火可靠性问题,强化点火能量输出与点火时机的精准调控,开发双裕度点火控制与点火能量自适应调节技术,避免点火失效引发的燃烧中断,保障发动机持续稳定做功,满足无人机高空飞行的动力供给需求。

2.3 热管理系统优化技术

冷却系统结构改进针对高空空气稀薄导致的散热效率下降问题,优化换热器的结构参数与布置方式,设计液冷与风冷复合冷却系统,合理选择冷却介质并优化循环路径,提升冷却系统对高空环境的适配能力,避免发动机部件因散热不足出现过热损坏。散热效率提升技术通过优化散热翅片的高度、间距与截面形状,定义冷侧混合系数与传热系数等关键参数,改善散热面的传热特性,削弱高空稀薄空气对散热效果的制约,有效提升整体散热效率。温度控制技术优化依托高精度温度传感与闭环调节机制,优化节温器的控制逻辑与响应速度,精准维持发动机气缸、缸盖等关键部件的工作温度区间,避免高温过热或低温启动困难等问题,保障高空工况下发动机热平衡稳定,延长发动机工作寿命。

2.4 动力传输系统优化技术

传动结构改进立足无人机轻量化与紧凑化设计需求,简化传统多部件传动布局,采用曲轴与驱动齿轮一体成型工艺,优化齿轮模数、齿形与轴承配置,减少装配环节与部件间的配合间隙,降低部件磨损概率,缩小传动系统整体体积与重量,适配无人机有限的安装空间。动力损耗抑制技术通过提升传动部件的加工精度与配合精度,设计减震齿轮组件与多组减震弹簧协同结构,有效吸收发动机高速运转产生的震动载荷,减少传动过程中的摩擦损耗与能量流失,提升动力传输效率,确保发动机输出动力高效传递至无人机螺旋桨等执行部件,保障无人机高空飞行的动力性能。

2.5 发动机材料与结构优化技术

轻量化材料应用围绕无人机载重提升与机动性优化

需求,选用碳纤维复合材料、高强度钛合金、航空级铝合金等新型高端材料,替代传统铸铁与普通钢材,在充分保障发动机结构强度、刚度与运行可靠性的前提下,显著削减发动机整体重量,提升发动机功重比,增强无人机高空飞行的续航能力与机动性^[4]。关键部件结构强化针对高空复杂工况下的部件受力特性与环境应力,优化曲轴、气缸、活塞等关键部件的结构设计,采用组合式压装曲轴与高强度缸体结构,提升部件的耐高温、耐磨损与抗疲劳性能,延长部件使用寿命,保障发动机在高空严苛环境下长期稳定运行,为无人机高空作业提供可靠动力支撑。

3 技术融合与集成方案

3.1 各提升技术间的兼容性分析

各高空性能提升技术的兼容性的分析,是实现多技术有效集成的前提,需基于发动机工作循环特性与各技术作用机理展开。进气系统优化技术与燃烧系统优化技术存在紧密关联,进气增压、气道优化带来的进气量与进气质量提升,需与燃油供给、点火系统优化相适配,避免进气条件改善后燃油供给与点火响应未能同步适配,导致燃烧失衡。热管理系统优化技术需与进气、燃烧系统优化协同,进气冷却技术会影响发动机工作温度,需通过冷却系统与温度控制技术调整,平衡进气温度与缸内燃烧温度。动力传输系统优化与材料结构优化需相互适配,轻量化材料应用降低发动机重量后,需同步优化传动结构适配载荷变化,避免传动部件与轻量化部件配合出现应力不匹配问题。各技术间的兼容性分析需聚焦作用机理的协同性,排除技术间相互干扰,为后续集成奠定基础。

3.2 多技术集成思路与方法

多技术集成思路以提升发动机高空综合性能为核心,立足各技术核心作用,构建协同互补的集成体系。集成方法需遵循系统性原则,结合发动机高空工况需求,将进气、燃烧、热管理、动力传输及材料结构优化技术进行有机整合,避免单一技术优化带来的性能瓶颈。基于系统工程理论,采用模块化集成方法,将各优化技术划分为对应功能模块,明确各模块接口标准与协同逻辑,确保模块间衔接顺畅。通过优化集成控制策略,实现各技术模块的动态适配,根据高空海拔、飞行姿态等工况变化,自动调整各技术的工作参数,使发动机始终处于最优工作状态。集成过程中需兼顾轻量化与

可靠性要求,在整合各技术的同时,控制发动机整体重量与结构复杂度,适配无人机飞行需求。

3.3 集成过程中的技术协调要点

技术协调是保障多技术集成效果的关键,需聚焦各技术间的相互作用,明确协调重点与路径。进气系统与燃烧系统的协调需聚焦空燃比精准控制,进气量变化后及时调整燃油供给量与点火时机,确保燃烧充分性与稳定性。热管理系统需与各技术模块协同,针对进气冷却、燃烧生热、传动摩擦生热等不同热量来源,优化冷却与散热策略,维持发动机各部件温度均衡^[5]。动力传输系统与材料结构优化的协调需关注载荷匹配,轻量化结构带来的载荷变化需通过传动结构调整予以适配,减少动力传输损耗。此外,需协调各技术模块的控制逻辑,避免控制信号冲突,确保各技术模块同步响应工况变化,同时兼顾各技术的工作可靠性,避免单一模块故障影响整个集成系统的运行,保障发动机高空性能稳定发挥。

结束语

无人机活塞式发动机高空性能提升技术研究涉及多个关键领域。通过对进气、燃烧、热管理、动力传输等系统以及发动机材料与结构的优化,并实现多技术的有效集成与协调,可显著提升发动机在高空环境下的性能表现。这些研究成果有助于解决无人机在高空飞行中面临的发动机性能问题,为无人机在更广泛的高空作业场景中稳定、高效运行提供坚实保障。

参考文献

- [1]赵凯绅,杨广宾,胡崇波,等.高原型无人机活塞发动机涡轮增压器匹配研究[J].河南理工大学学报(自然科学版),2024,43(1):105-112.
- [2]温占永,田亚明,孙鹏晖,等.航空活塞发动机有效功率及空中功率恢复研究[J].科学技术与工程,2025,25(16):6760-6765.
- [3]王余枫,高建兵,赵玉伟,等.旋转对置活塞发动机运动学特性研究[J].北京理工大学学报,2024,44(4):369-376.
- [4]聂志,刘江,李吉,等.某航空活塞发动机冷却液散热器进气道研究[J].成都航空职业技术学院学报,2023,39(1):50-53.
- [5]温占永,孙鹏晖,田亚明.航空活塞发动机稳压箱温度影响因素及高空特性研究[J].车辆与动力技术,2024(3):17-22.