

机械工程应用于航天工业的创新和发展

王洪宇 项天豪 王劭宸 李 想 康海超
首都航天机械有限公司 北京 100076

摘要: 航天工业作为现代科技发展的前沿领域,对国家的战略地位和综合实力有着深远影响。本文聚焦于机械工程在航天工业中的应用,深入探讨其创新与发展态势。阐述了航天工业对机械工程高精度、高可靠性及轻量化的要求,详细介绍了先进制造工艺、新型材料应用、精密传动与控制技术等关键技术创新成果。进一步展望了航天器结构设计、空间机器人技术、航天动力系统等方面的新发展方向,分析了当前面临的极端环境下材料性能、跨学科融合及高成本等挑战,旨在为机械工程在航天工业的持续发展提供理论与实践指导,助力航天事业迈向新高度。

关键词: 机械工程应用于; 航天工业; 创新; 发展

引言: 航天工业作为人类探索宇宙的前沿阵地,对技术的要求极为严苛。机械工程作为基础支撑学科,在航天领域的作用举足轻重。从航天器的基础零部件制造到复杂系统的构建,机械工程贯穿始终。随着航天任务的不断拓展和深化,对机械工程的精度、可靠性和轻量化等方面提出了新挑战和新机遇。本文将深入剖析机械工程如何在航天工业中应对这些需求,通过技术创新和发展方向的探索,推动航天工业持续进步,开启人类航天事业新篇章。

1 航天工业对机械工程的要求

1.1 高精度要求

航天器的各类任务,如高精度的轨道控制、精确的姿态调整以及仪器设备的精准指向等,都对机械部件的精度有着近乎苛刻的要求。例如,太空望远镜的镜片加工与安装,其精度需达到亚微米甚至纳米级别,否则将严重影响观测数据的准确性与可靠性。这就促使机械工程在加工工艺上不断突破,采用超精密加工技术,如高精度研磨、抛光等,以及先进的精密测量手段,像激光干涉测量、原子力显微镜测量等,来确保零部件在尺寸、形状和表面质量等方面达到航天任务所需的高精度标准,为航天器的精准运行提供坚实保障。

1.2 高可靠性要求

在发射过程中的强烈振动、冲击,在轨运行时的高低温度交替、高真空、强辐射以及微重力等复杂条件下,机械部件要能长时间稳定可靠地运行,任何故障都可能导致航天任务失败,危及航天员生命安全及造成巨大的经济损失。因此,从材料的筛选与优化,确保其具备良好的抗辐射、耐高温、耐低温性能,到结构的冗余设计,即便部分组件出现故障,整体系统仍能维持基本功能;再到严格的可靠性验证测试,模拟各种极端工况,

通过故障预测与健康管理技术提前监测潜在故障隐患,全方位保障机械工程系统在航天任务中的高可靠性。

1.3 轻量化要求

鉴于航天器发射成本高昂,每增加一千克的重量都意味着巨大的经济开销,所以机械工程在航天工业中面临着严峻的轻量化要求。在保证结构强度与性能的前提下,要尽可能地减轻零部件和系统的重量。一方面,积极研发和应用轻质高强度材料,如碳纤维复合材料、镁铝合金等,这些材料具有优异的比强度和比模量,能在减轻重量的同时满足力学性能需求。另一方面,借助先进的结构优化设计方法,如拓扑优化,通过数学算法确定材料在结构中的最优分布,去除不必要的材料;尺寸优化则精确调整结构部件的尺寸参数,在满足强度、刚度等约束条件下,实现结构重量的最小化,从而有效降低航天器的发射成本,提高其有效载荷比,为航天任务的效益提升奠定基础^[1]。

2 机械工程在航天领域的关键技术创新

2.1 先进制造工艺

2.1.1 增材制造技术

增材制造技术,也就是3D打印,为航天工业带来了全新的制造模式。它能够依据计算机设计模型,将材料逐层堆积成三维实体零件,这一过程无需传统制造中的大量模具和复杂加工工序。在航天零部件制造中,其优势尽显。例如,卫星的轻量化支架结构,通过3D打印可实现复杂的镂空设计,在保证结构强度的同时大幅减轻重量,提高卫星的有效载荷能力。而且,对于火箭发动机中的一些具有复杂内部流道结构的部件,如涡轮泵的叶轮等,3D打印能够一体成型,避免了传统加工方法中对各部分分别制造再焊接组装可能出现的连接问题,提高了部件的整体性能和可靠性。

2.1.2 精密锻造与铸造技术

精密锻造技术在航天工业中占据重要地位。以等温锻造为例,在制造航空发动机的涡轮盘时,通过保持锻造过程中的温度恒定,使金属材料在均匀的变形条件下流动,能够细化晶粒组织,显著提高材料的强度和韧性,并且减少加工余量,降低材料浪费。同时,粉末锻造技术将金属粉末预成型后再进行锻造,可制造出形状复杂、性能优良的零部件,满足航天产品对高性能的需求。精密铸造技术同样不可或缺。对于火箭发动机的燃烧室,采用熔模精密铸造工艺,能够制造出具有复杂内部结构和高精度尺寸要求的铸件。

2.2 新型材料应用

2.2.1 高性能复合材料

高性能复合材料在航天领域具有举足轻重的地位。碳纤维增强复合材料因其出色的比强度和比模量,被广泛应用于卫星结构件。例如,在通信卫星的主体框架中使用碳纤维复合材料,相比传统金属材料,重量可减轻30%以上,这不仅降低了发射成本,还提高了卫星的有效载荷搭载能力和轨道转移效率。而且,其良好的耐疲劳性能和尺寸稳定性,能够确保卫星在复杂的太空环境下长期稳定运行。在航天飞机的机翼前缘等部位,耐高温的陶瓷基复合材料发挥着关键作用,它能够承受再入大气层时的高温烧蚀,保障航天器的结构完整性和安全性。此外,高性能复合材料的可设计性强,通过调整纤维方向和铺层方式,可以根据具体的航天部件受力需求进行定制化设计,进一步优化其性能,为航天工程的轻量化和高性能发展提供了有力支撑。

2.2.2 智能材料与结构

智能材料与结构为航天技术带来了创新性变革。形状记忆合金作为智能材料的一种,在航天器的可展开结构设计中展现出独特优势。例如,在空间望远镜的大型天线展开机构中应用形状记忆合金,当温度变化时,合金能够产生形状恢复力,实现天线的自动展开和精确锁定,无需复杂的电机驱动和精确的控制程序,降低了系统的复杂性和故障风险,提高了展开的可靠性和准确性。压电材料则常用于制造智能结构中的传感器和驱动器。在航天器的结构健康监测系统中,压电传感器能够实时感知结构的振动、应力和应变情况,并将这些物理量转化为电信号传输给控制系统。当检测到结构出现异常振动或应力集中时,压电驱动器可以根据控制系统的指令产生相应的力或位移,对结构进行主动控制和振动抑制,保障航天器在飞行过程中的稳定性和安全性,提升了航天系统的智能化水平和自适应能力。

2.3 精密传动与控制技术

2.3.1 高精度齿轮传动技术

在航天领域,高精度齿轮传动技术起着关键作用。例如在航天器的姿态控制系统中,齿轮传动负责精确传递动力以驱动姿态调整机构,其精度直接影响姿态控制的准确性。航天级齿轮采用特殊的材料,如高强度合金钢,并经过精密的加工工艺,齿形精度可达微米级甚至更高。先进的磨削、珩磨技术确保齿面光滑,减少传动过程中的摩擦和能量损失,同时降低噪音和振动,提高传动效率和稳定性。为适应太空环境,齿轮的润滑技术也不断革新,采用耐高低温、抗辐射的特殊润滑剂,保证在极端条件下依然能保持良好的润滑性能,防止齿轮磨损和卡死。高精度的齿轮传动系统能够实现精确的运动传递和控制,为航天器精准的姿态调整和稳定运行提供了坚实保障,满足了航天任务对高精度控制的严格要求。

2.3.2 先进的控制技术

随着航天任务的日益复杂,先进的控制技术成为机械工程在航天领域发展的核心要素之一。基于模型预测控制算法,航天器能够根据自身的动力学模型和环境参数,提前预测未来的运动状态,并通过优化控制输入来实现精确的轨迹跟踪和姿态控制。例如在卫星编队飞行任务中,通过先进的控制技术协调各卫星之间的相对位置和姿态,确保它们在复杂的太空环境中保持稳定的编队构型,实现协同观测或通信等任务。自适应控制技术则使航天器能够实时感知外界环境的变化和自身系统的参数漂移,自动调整控制策略以维持稳定的性能。例如在深空探测任务中,当探测器遭遇未知的引力场变化或大气阻力时,自适应控制系统能够迅速做出反应,调整推进器的推力和方向,保证探测器按预定轨道飞行,大大提高了航天任务的自主性、适应性和成功率^[2]。

3 机械工程在航天工业中的新发展方向

3.1 航天器结构设计的创新

3.1.1 多功能一体化结构设计

多功能一体化结构设计旨在将多种功能集成于航天器的结构部件中,以提高系统的集成度和效率。例如,在卫星结构中,将承载、热控、电子设备安装等功能有机结合。通过特殊的材料和结构设计,使结构件既能承受力学载荷,又能利用其自身的热传导特性进行热量的传递与分配,实现高效热控,减少了独立热控部件的数量和重量。合理规划结构内部空间,为电子设备提供稳定的安装平台,并优化布线布局,降低电磁干扰。这种设计方法不仅减少了航天器的零部件数量,减轻了重量,降低了发射成本,还增强了系统的可靠性和稳定

性,提升了航天器整体性能,适应了航天任务对小型化、轻量化和高性能的发展需求。

3.1.2 可重构与自适应结构

可重构与自适应结构是应对复杂多变航天任务的关键创新方向。可重构结构允许航天器在不同任务阶段或面对意外情况时,改变自身的形态和构型。比如,可展开式太阳能电池板在发射时呈折叠紧凑状态,入轨后展开至更大面积,以满足不同光照条件下的能源需求;模块化的航天器结构能够根据任务需求进行模块的组合与拆卸,快速实现功能扩展或变更。自适应结构则利用智能材料和传感反馈技术,使航天器能实时感知外界环境变化,并自动调整结构参数。

3.2 空间机器人技术的发展

3.2.1 灵巧操作与协作机器人

在航天任务中,灵巧操作与协作机器人的发展至关重要。例如空间站的建设与维护,需要机器人具备高度灵巧的操作能力,其机械臂关节设计更为精密,拥有更多的自由度,能够像人类手臂一样精准地完成复杂的装配任务,如对接管道、安装设备等,操作精度可达毫米甚至微米级。人机协作成为关键特性,通过先进的传感器和智能算法,机器人能感知航天员的位置和动作意图,实现安全、高效的协同作业。

3.2.2 自主导航与决策机器人

自主导航与决策机器人是空间技术发展的前沿方向。在月球、火星等外星探测任务中,复杂多变的环境对机器人的自主能力提出了高要求。它们利用视觉、激光雷达等多种传感器收集环境信息,通过先进的SLAM(同步定位与地图构建)算法实时构建周围地图,并进行精确的定位与导航。在遇到障碍或突发状况时,基于人工智能的决策系统迅速分析并制定最佳路径规划和应对策略,无需地面控制中心的实时指令就能做出自主判断和行动。

3.3 航天动力系统的机械工程创新

3.3.1 新型推进技术

新型推进技术为航天事业的发展开辟了新路径。离子推进技术以其高比冲的优势备受瞩目,通过电离推进剂并加速离子产生推力,虽推力较小,但能长时间持续作用,适合深空探测等任务,如用于行星际探测器,可

使其在燃料有限的情况下实现更远距离的航行。核推进技术则具有强大的推力和高能量密度,能大幅缩短星际旅行时间,不过其技术难度和安全性要求极高,目前仍处于研究和试验阶段。此外,太阳帆推进利用太阳光压提供动力,无需传统推进剂,理论上可实现无限续航,在未来的星际探索中具有巨大潜力。这些新型推进技术的发展将突破传统化学推进的局限,推动人类迈向更广阔的宇宙空间,开启航天新纪元。

3.3.2 发动机轻量化与高效热管理

发动机轻量化与高效热管理对于航天动力系统至关重要。在轻量化方面,采用新型轻质高强度材料,如钛铝合金、陶瓷基复合材料等,优化发动机结构设计,通过拓扑优化等手段去除冗余部分,在保证强度和性能的前提下减轻重量,提高推重比,降低发射成本。高效热管理则通过改进冷却方式和热防护技术实现,例如采用先进的气膜冷却、再生冷却等技术,确保发动机在高温环境下可靠运行,同时提高热效率,减少能量损失。此外,利用智能热管理系统,根据发动机工况实时调节冷却剂流量和温度,进一步提升发动机的性能和可靠性,为航天任务提供更强劲、稳定且高效的动力支持,助力航天器在复杂的太空环境中顺利执行任务^[1]。

结束语

总之,机械工程在航天工业中的创新发展成果斐然,从关键技术的突破到新方向的探索,为航天事业搭建了稳固的技术基石。然而,我们也深知未来挑战重重,如极端环境下的材料难题、跨学科融合困境及高成本压力等。但正是这些挑战,将驱动机械工程持续奋进。我们坚信,随着科技的飞速进步,机械工程与新兴技术将碰撞出更耀眼的火花,不断攻克难关,推动航天工业迈向新的高峰,让人类在浩瀚宇宙的征程中越走越远,书写更加辉煌的篇章。

参考文献

- [1]林裴文,朱雪斌,马子乾.机械制造技术新发展及其在我国的研究和应用[J].时代汽车,2021(21):142-143.
- [2]吴智恒,陈启愉,罗良传.机械工业可靠性技术应用研究[M].华南理工大学出版社:,2020:254-255
- [3]吴立新.试论工程机械中液压技术发展的新趋势[J].山东工业技术,2020(16):260-261