

机械工程在航天领域的新技术研究

王劼宸 李 童 王永建 王洪宇 闫文龙

首都航天机械有限公司 北京 100076

摘 要: 本文聚焦机械工程在航天领域的新技术研究, 涵盖先进材料、智能结构、微纳制造、增材制造、极端环境机械设计与可靠性技术及人机协作与机器人技术等方面。高性能复合材料、智能材料和高温合金等先进材料, 使航天器结构更轻、更强、更智能。智能结构与自适应系统提升航天器稳定性。微纳制造与增材制造技术实现高精度、低成本、快速制造。极端环境下的机械设计与可靠性技术保障航天器运行。人机协作与机器人技术提高任务执行效率和安全性。这些新技术为航天领域的发展注入新动力。

关键词: 机械工程; 航天领域; 新技术

引言

航天技术的迅猛进步加剧了对机械工程新技术的渴求。航天领域因其极端环境和高标准, 成为新技术研发与应用的关键阵地。本文深入探索机械工程在航天领域的新技术, 剖析其基本原理、显著特点及潜在应用前景, 旨在为航天科技创新与持续发展提供有益参考与启示, 推动该领域迈向更高水平。

1 先进材料应用技术

1.1 高性能复合材料

高性能复合材料如碳纤维增强复合材料、硼纤维增强复合材料等, 因其具有高比强度、高比模量、耐疲劳、耐腐蚀等优异性能, 在航天领域得到了广泛应用。例如, 在航天器结构部件中, CFRP可有效减轻结构重量, 提高航天器的有效载荷能力和燃油效率。在卫星的太阳能电池板支架、机身框架等部位使用CFRP, 能够在保证足够强度的同时, 大幅降低重量, 从而降低发射成本并提高轨道机动性。

1.2 智能材料

智能材料如形状记忆合金、压电材料、电致变色材料等, 具备对外界环境刺激(如温度、应力、电场、磁场等)产生响应并自动改变自身性能的能力。在航天领域, SMA可用于制造自适应结构部件, 如可展开天线的支撑结构。在卫星发射过程中, 天线处于折叠状态以节省空间, 进入轨道后, 通过温度变化或电流激励使SMA发生形状记忆效应, 从而驱动天线展开并精确调整形状, 确保天线的性能和精度, 提高通信效率。压电材料则可用于振动控制和能量收集, 例如在航天器的发动机部件上安装压电传感器和能量收集装置, 将振动能转化为电能, 为航天器的小型电子设备供电, 同时抑制有害振动, 提高航天器的稳定性和可靠性。

1.3 高温合金与陶瓷基复合材料

对于航天器在高速再入大气层或长时间运行于高温环境下的需求, 高温合金和陶瓷基复合材料发挥着关键作用^[1]。陶瓷基复合材料具有耐高温、低密度、高强度等优点, 可用于制造超高温热防护结构, 如航天飞机的前缘、发动机热端部件等。高温合金则在航空发动机涡轮叶片、燃烧室等高温部件中广泛应用, 通过不断改进合金成分和制备工艺, 提高其耐高温性能、抗氧化性能和力学性能, 以满足航天发动机在极端高温条件下高效、可靠运行的要求。

2 智能结构与自适应系统

2.1 结构健康监测技术

结构健康监测技术利用传感器网络对航天器结构的应力、应变、温度、振动等参数进行实时监测, 通过数据采集与分析系统对结构的健康状况进行评估和诊断, 及时发现潜在的损伤或故障隐患。例如, 在国际空间站的桁架结构上安装了大量的传感器, 实时监测结构在微流星体撞击、太空辐射、温度变化等复杂环境因素作用下的响应, 一旦检测到异常信号, 地面控制中心能够迅速采取措施, 如调整飞行姿态、安排宇航员进行修复或实施应急预案, 确保空间站的结构完整性和安全性, 避免灾难性事故的发生。

2.2 自适应结构控制技术

自适应结构控制技术通过集成传感器、执行器和控制器, 使航天器结构能够根据外界环境变化或任务需求自动调整自身的形状、刚度、阻尼等特性, 以优化结构性能。例如, 在可变形机翼技术中, 通过在机翼内部嵌入形状记忆合金丝或压电陶瓷驱动器, 根据飞行速度、高度、马赫数等飞行参数的变化, 自动改变机翼的弯度、扭转角等几何形状, 从而提高飞机在不同飞行条

件下的升阻比和机动性,降低飞行阻力和燃油消耗。在航天器的天线系统中,自适应结构控制技术可用于实时调整天线的指向精度和波束形状,克服因航天器姿态变化、轨道摄动以及通信对象位置变动等因素导致的信号衰减问题,确保稳定、高效的通信连接。

3 微纳制造技术

3.1 微机电系统(MEMS)在航天中的应用

微机电系统(MEMS)技术将机械结构、传感器、执行器、信号处理电路等集成在微小的芯片尺度范围内,具有体积小、重量轻、功耗低、成本低、功能集成度高等优势,在航天领域展现出广阔的应用前景。例如,MEMS惯性传感器(如加速度计、陀螺仪)已广泛应用于卫星的姿态控制和轨道确定系统中,取代了传统的大型惯性测量装置,显著减轻了卫星的重量和体积,同时提高了测量精度和可靠性^[2]。MEMS压力传感器可用于航天器的大气环境监测、推进系统压力测量等方面,为航天器的运行状态监测提供关键数据。此外,MEMS微镜、微透镜等光学元件在卫星光学通信系统、对地观测成像系统中也发挥着重要作用,通过精确控制微镜的角度和位置,实现光束的快速指向调整和聚焦,提高光学系统的性能和灵活性。

3.2 纳机电系统(NEMS)的发展潜力

纳机电系统(NEMS)作为MEMS的进一步发展,将器件的尺寸缩小到纳米尺度,展现出更为优异的性能和独特的物理现象,有望在未来航天领域带来革命性的突破。例如,基于纳米材料的量子传感器具有极高的灵敏度和分辨率,可用于探测微弱的引力波、磁场变化等信号,为深空探测、天体物理研究提供全新的探测手段。NEMS中的纳米机械谐振器可作为超精密频率标准,用于航天器的高精度时钟系统,提高导航定位的精度和时间同步的准确性。此外,NEMS技术还可应用于开发新型的纳米能源存储和转换装置,如纳米电池、纳米发电机等,为航天器提供更高效、更持久的能源供应解决方案,满足未来长期、复杂航天任务的能源需求。

4 增材制造技术

4.1 增材制造技术在航天零部件制造中的应用

增材制造技术通过逐层堆积材料的方式直接制造复杂形状的零部件,无需传统加工工艺中的模具制造和大量切削加工工序,具有设计自由度高、制造周期短、材料利用率高、成本低等优点,在航天领域得到了越来越广泛的应用。例如,在火箭发动机制造中,增材制造技术可用于制造复杂的燃烧室、喷管等部件,通过优化设计结构,实现轻量化和高性能的目标。同时,对于一些

传统加工工艺难以制造的异形零部件,如卫星的桁架结构节点、复杂形状的天线反射面等,增材制造技术能够轻松实现其制造,提高零部件的性能和可靠性,并缩短研发周期和降低制造成本。

4.2 增材制造材料的发展与优化

随着增材制造技术在航天领域的应用不断拓展,对增材制造材料的性能要求也越来越高。目前,多种适用于航天领域的增材制造材料正在不断发展和优化,包括高性能金属材料、复合材料以及功能材料^[3]。研究人员通过改进材料的成分设计、粉末制备工艺、打印工艺参数等方法,提高增材制造材料的力学性能、物理性能和化学性能,使其满足航天零部件在强度、刚度、耐高温、耐疲劳、耐腐蚀等方面的严格要求。例如,通过对钛合金粉末进行优化处理和采用特定的激光选区熔化工艺参数,制造出的钛合金零部件具有更高的致密度、更好的力学性能和更低的残余应力,能够满足航空航天关键部件的高性能要求。

5 极端环境下的机械设计与可靠性技术

5.1 空间辐射环境下的材料与结构设计

在太空环境中,航天器面临着高能粒子辐射的威胁,这可能导致材料的性能退化、结构的损伤以及电子设备的故障。因此,在机械工程设计中,需要采用抗辐射材料和特殊的结构设计方法来应对这一挑战。例如,选择具有高原子序数和高密度的材料作为航天器的屏蔽层,如铅、钨等,通过合理设计屏蔽层的厚度和结构,有效阻挡高能粒子的穿透,保护内部的关键部件和系统。同时,对于长期暴露在辐射环境下的结构部件,采用耐辐射性能良好的材料,并优化结构形式,减少应力集中和辐射敏感区域,提高结构的可靠性和耐久性。此外,还通过对材料和结构进行辐射效应测试与评估,建立辐射损伤模型,为航天器的设计和寿命预测提供依据。

5.2 高低温循环环境下的机械性能研究与设计

航天器在轨道运行过程中会经历极端的高低温循环环境,例如在日照区温度可高达数百摄氏度,而在阴影区温度则会骤降至零下几十甚至上百摄氏度。这种剧烈的温度变化会引起材料的热胀冷缩,导致结构产生热应力和变形,从而影响航天器的性能和可靠性。为解决这一问题,在机械设计中采用了多种热防护措施和热设计技术。例如,在航天器表面覆盖隔热材料,减少热量的吸收和传递,同时设计合理的热控系统,通过主动加热或冷却方式调节部件的温度,使其保持在适宜的工作范围内。在结构设计方面,考虑材料的热膨胀系数匹配性,采用柔性连接、热补偿结构等设计手段,缓解热应

力的影响,确保结构在高低温循环环境下的稳定性和可靠性^[4]。此外,还对材料在高低温循环条件下的力学性能变化规律进行深入研究,为结构设计提供准确的材料参数和性能数据。

5.3 微重力环境下的机械系统设计与测试

微重力环境是航天领域特有的工作条件,它对机械系统的设计、运行和性能产生了显著影响。在微重力环境下,传统的基于重力作用的机械原理和设计方法不再适用,例如流体的流动特性、机械部件的摩擦磨损行为、结构的动力学响应等都发生了变化。因此,在航天机械系统设计中,需要充分考虑微重力因素,采用特殊的设计技术和实验验证方法。例如,在航天器的流体输送系统中,利用表面张力、毛细作用等原理设计无泵驱动的流体传输装置,避免因重力缺失导致的流体无法正常流动问题。在机械运动部件设计中,优化润滑方式和材料选择,减少微重力下的摩擦系数变化和磨损加剧现象,提高运动部件的寿命和可靠性。为了验证微重力环境下机械系统的性能,通常采用地面模拟实验设施进行微重力实验测试,获取相关数据并对设计进行优化改进,确保机械系统在实际太空任务中的正常运行。

6 人机协作与机器人技术

6.1 宇航员与机械臂的协同作业

在航天任务中,宇航员与机械臂的协同作业是常见的人机协作模式。例如,在国际空间站的建设和维护过程中,宇航员通过操控机械臂完成舱段的组装、设备的搬运与安装、太空行走时的辅助支持等任务。为实现高效、安全的人机协作,机械臂的设计需要充分考虑人机交互的便利性和舒适性,具备精确的位置控制和力反馈功能,使宇航员能够直观、准确地感知机械臂的运动状态和操作力。同时,开发了先进的人机交互接口,如手持控制器、虚拟现实/增强现实操控系统等,通过直观的手势识别、视觉跟踪等技术,降低宇航员的操作难度和疲劳度,提高协同作业的效率 and 精度。此外,还对人机协作过程中的安全性进行了深入研究,采用碰撞检测与避让算法、故障诊断与冗余设计等技术,确保宇航员在与机械臂协同工作时的人身安全,防止因机械故障或误操作引发的事故。

6.2 空间机器人的自主操作与智能决策

随着航天任务的日益复杂和多样化,空间机器人的

自主操作和智能决策能力变得愈发重要。空间机器人能够在无人干预的情况下,根据任务目标和环境信息自主完成诸如行星表面探测、空间站巡检、太空垃圾清理等任务。例如,火星探测器“毅力号”搭载的机械臂和采样系统能够在复杂的火星表面环境下,自主识别岩石样本、采集并封装样本,然后将其存储在探测器内部,整个过程无需地球控制中心的实时操控,极大地提高了任务的执行效率和灵活性^[5]。为实现空间机器人的自主操作和智能决策,研究人员运用了多种先进技术,包括计算机视觉、机器学习、人工智能算法、自主导航与定位技术等。通过视觉传感器获取周围环境的图像信息,利用机器学习算法对图像进行识别和分析,实现目标物体的检测与定位;基于人工智能算法进行任务规划和决策制定,根据环境变化和任务需求自主调整机器人的行为策略;借助自主导航与定位技术,使机器人在未知的空间环境中准确确定自身位置和姿态,并规划最优的运动路径,从而高效完成预定任务。

结束语

综上,机械工程在航天领域的新技术研究取得了显著进展,为航天技术的发展和 innovation 提供了有力支撑。然而,随着航天任务的日益复杂和多样化,对新技术的研究和应用也提出了更高的要求。未来,我们需要继续加强机械工程与航天技术的交叉融合,推动新技术在航天领域的广泛应用和深入发展,为人类的太空探索事业作出更大的贡献。同时,也需要关注新技术可能带来的潜在风险和 challenge,加强安全性和可靠性研究,确保航天任务的顺利执行和成功完成。

参考文献

- [1]蒋高明,高哲.经编技术在航空航天领域的应用与展望[J].纺织导报,2018(z1):88-91.
- [2]张辉,方良超,陈奇海,等.聚醚醚酮在航空航天领域的应用[J].新技术新工艺,2018(10):5-8.
- [3]杨雯茜,周静,孙宝亮,等.人工智能技术在航天装备领域应用[J].科学与财富,2024(1):64-66.
- [4]李森,夏鲁瑞,陈雪旗,等.太空安全新技术发展与应用[J].中国航天,2024(3):15-20.
- [5]周苑生.先进复合材料在航空航天领域的应用[J].中国新技术新产品,2018(3):129-130.