

机械传动技术在航空航天领域的应用与挑战

陈纪伟¹, 王广¹, 唐娟²

1. 国华(青岛)智能装备有限公司, 山东 青岛 266000

2. 江苏省减速机产品质量监督检验中心, 江苏 泰州 225400

DOI: 10.61369/ERA.12274

摘要： 随着航空航天技术的飞速发展，机械传动技术作为其中的关键支撑技术之一，其在航空航天领域的应用与面临的挑战备受关注。本文首先说明机械传动技术的原理和主要类型特点，接着深入探讨它在飞行器动力系统、飞行控制系统以及各类航空航天设备里的重要应用。分析这项技术面临的极端环境适应性、高可靠性与长寿命，还有轻量化设计等难题。针对性地提出应对现在挑战的办法，对未来发展趋势进行展望，目的是给航空航天领域机械传动技术的持续创新和优化提供理论支持。

关键词： 机械传动技术；航空航天；极端环境；轻量化设计

Optimized Design and Application of Mechanical Transmission System in Industrial Robot

Chen Jiwei¹, Wang Guang¹, Tang Juan²

1. Guohua (Qingdao) Intelligent Equipment Co., LTD. Qingdao, Shandong 266000

2. Jiangsu reducer Product Quality Supervision and Inspection Center, Taizhou, Jiangsu 225400

Abstract: With the rapid development of aerospace technology, mechanical transmission technology, as one of the key supporting technologies, its application and challenges in the field of aerospace have attracted much attention. This paper first explains the principle and main type characteristics of mechanical transmission technology, and then discusses its important application in aircraft power system, flight control system and all kinds of aerospace equipment. Analyze the extreme environmental adaptability, high reliability, long life, and lightweight design challenges. The aim to respond to the current challenges, and to make the prospect of the future development trend, is to provide theoretical support for the continuous innovation and optimization of mechanical transmission technology in the aerospace field.

Keywords: mechanical transmission technology; aerospace; extreme environment; lightweight design

航空航天领域是现代科技的前沿，对推动人类社会发展和探索未知世界很关键。机械传动技术是其中重要的支撑技术，它的性能好坏直接影响航空航天装备的整体效能。随着航空航天事业朝着更高速度、更远距离、更复杂任务发展，对机械传动技术提出了前所未有的严格要求。从飞行器的动力传输到飞行姿态的精确控制，机械传动技术到处都有。深入研究它在航空航天领域的应用情况、面临的挑战以及应对策略，对提升航空航天装备性能、推动该领域技术进步有很大现实意义。

一、机械传动技术概述

(一) 机械传动技术原理

机械传动技术是工业领域实现动力传输和运动转换的关键方法。它的核心原理主要依据力学里的牛顿定律和运动学原理。比如齿轮传动，主动轮和从动轮通过齿紧密咬合，把主动轮的旋转运动平稳地传给从动轮。因为齿轮齿数比不一样，既能准确调节转速，又能高效传递扭矩，适合像航空发动机这种对传动精度要求特别高的设备^[1]。带传动是利用带和带轮之间的摩擦力来传输动力，通过灵活改变带轮直径比，能实现转速的无级调节，常常用

于航空电子设备冷却系统，这种系统对传动平稳性和噪音控制要求很严格^[2]。链传动靠链条和链轮齿准确咬合，实现运动和动力的传递，它有准确的平均传动比，在航空航天设备的起落架收放机构这类对可靠性要求极高的地方起着关键作用。这些传动方式各有特点，都严格按照力的传递和运动转换规律，保证在复杂多变的工作环境中，高效传输动力，精确控制运动。

(二) 主要类型及特点

机械传动技术主要有齿轮传动、带传动、链传动、蜗轮蜗杆传动等类型。齿轮传动有传动比准确、传递功率范围大、效率高、结构紧凑等优点，广泛用在对传动精度要求高的地方，像航

空发动机的减速机构^[3]。带传动有缓冲吸振、传动平稳、噪声低、过载时带会打滑起到保护作用等特点，适合中心距较大、对传动精度要求相对不高的场景，比如一些辅助设备的动力传输。链传动能在高温、多尘、潮湿等恶劣环境下工作，传动比准确，传递功率较大，不过工作时会有冲击和噪声，常用于航空航天地面设备的动力传输。蜗轮蜗杆传动能实现大传动比、结构紧凑，能实现自锁，常用于需要较大减速比并且空间有限的装置中^[4]。

二、在航空航天领域的应用

（一）飞行器动力系统

在飞行器动力系统中，机械传动技术非常关键。拿航空发动机这个核心动力源来说，齿轮传动就像发动机的“动力纽带”。发动机内部构造复杂，压气机要把空气压缩后送到燃烧室，涡轮要利用燃烧产生的高温高压气体膨胀做功，带动压气机一直运转。这时候，高精度的齿轮传动系统通过设计好的齿轮啮合，把压气机轴和涡轮轴连在一起。齿轮的模数、齿数以及齿形等参数经过精确计算，保证在高速、高负载的极端工作状况下，两者之间能高效又稳定地传输动力，为发动机的稳定运转提供保障^[5]。在发动机的起动系统里，链传动很重要。起动机产生的初始动力，通过高强度的链条传到发动机曲轴，依靠链条和链轮之间可靠的啮合，克服发动机的初始阻力，顺利让发动机启动，开启飞行器的动力旅程。在直升机独特的动力传输系统里，一套复杂又精巧的齿轮传动系统负责动力分配。发动机输出的强大动力，经过多级齿轮减速和转向机构，合理又准确地分配到旋翼和尾桨。其中，旋翼得到动力后高速旋转，给直升机提供垂直起降和悬停需要的升力；尾桨依靠合适的动力输入，产生侧向力来平衡旋翼旋转带来的反扭矩，保证直升机飞行姿态的稳定控制和动力的高效输出，让直升机能够轻松完成垂直起降、悬停等高难度特殊飞行任务^[6]。

（二）飞行控制系统

飞行控制系统就像飞行器的“神经中枢”，机械传动技术是其中传递指令的关键“神经网络”，对飞行器飞行姿态的精确控制起决定作用。在传统飞机的操纵系统里，钢索和连杆等机械传动装置是飞行员和飞机舵面之间的“沟通桥梁”。当飞行员操作驾驶杆或脚蹬时，这些动作产生的力通过高强度的钢索传到飞机的升降舵、方向舵和副翼。比如，向前推驾驶杆，钢索拉动升降舵向下偏转，改变流经机翼的气流，让飞机产生低头的俯仰运动；转动驾驶盘，钢索带动副翼一上一下反向偏转，引起飞机的滚转运动；踩动脚蹬通过连杆驱动方向舵左右摆动，实现飞机的偏航运动。在一些先进的飞行器中，蜗轮蜗杆传动技术被巧妙用在飞行控制面的作动器驱动上。蜗轮蜗杆独特的大传动比特性，能把电机输入的较小扭矩变成强大的输出扭矩，精确驱动控制面运动。同时，它的自锁特性保证在飞行过程中，就算遇到外界干扰，控制面也能稳定保持在既定位置，为飞行器在复杂气象条件、高机动飞行等复杂飞行条件下提供精确的控制力矩，有力保障飞行稳定性和操纵性，让飞行器能灵活应对各种飞行情况。

（三）航空航天设备

在很多航空航天设备中，机械传动技术到处都有，为设备的正常运行和功能实现提供有力支持。以卫星的太阳能电池板展开机构为例，这个和卫星能源获取有关的重要装置采用了齿轮传动和链传动结合的巧妙设计。当卫星成功进入太空轨道后，地面控制中心发出展开指令，电机驱动齿轮传动系统，把动力慢慢传到链条。链条的运动带动一系列连杆机构，就像“机械手臂”一样，准确又可靠地把太阳能电池板从折叠状态慢慢展开到工作位置，让电池板能充分接收太阳辐射，给卫星提供持续稳定的能源。在空间探测器的采样机械臂中，精密的齿轮传动系统是机械臂的“运动心脏”。通过精确设计和控制齿轮传动比，能把电机的旋转运动精确变成机械臂各个关节的直线或旋转运动，实现机械臂在三维空间内的高精度定位和姿态调整。有了这么精确的运动控制能力，采样机械臂能在遥远的太空环境中，准确抓取、采集各类太空物质，完成艰难的采样任务。在飞机的起落架收放系统中，液压系统提供强大动力，机械传动负责把动力准确传递和转换。当飞机起飞前，机械传动装置和液压作动筒一起，把起落架平稳收起，减少飞行阻力；降落时，又能可靠地把起落架放下并锁定，保证飞机安全着陆，保障飞机在起飞和降落阶段的安全。

三、面临的挑战

（一）极端环境适应性

航空航天领域的工作环境特别恶劣。在高空，飞行器要面对低温和低气压。低温时，机械传动部件用的金属材料，内部原子活动能力变弱，晶格结构变脆弱，容易让材料变脆，大大降低材料原来的强度和韧性^[7]。低气压让润滑剂的沸点降低，挥发速度加快，不能在传动部件表面形成稳定有效的润滑膜，使部件间摩擦系数增大，磨损加重，严重影响传动系统的运行稳定性和寿命。在太空环境中，卫星和探测器情况更糟。强烈的宇宙辐射，像高能粒子辐射，会穿透材料表面，破坏原子结构，改变材料微观组织形态，降低材料性能。巨大的温度变化，从极寒的阴影区到炽热的向阳面，温差能有几百摄氏度，这让机械部件经常经历热胀冷缩，引起尺寸变化和应力累积，大大影响传动精度。另外，微流星体虽然体积小，但速度极高，一旦撞击，可能在部件表面形成凹坑甚至贯穿性损伤，直接威胁设备正常运行。

（二）高可靠性与长寿命要求

航空航天任务很复杂、特殊，一旦执行，因为太空环境恶劣又难到达，对机械传动系统进行维修和部件更换几乎不可能，这就对系统的高可靠性和长寿命有非常高的要求。拿飞行器来说，飞行过程中，任何一个小的传动部件，比如航空发动机里的关键齿轮，一旦出故障，后果很严重。齿轮的磨损、断裂等问题，可能让发动机内部动力传输中断，导致发动机停车，这对高空飞行的飞行器来说是致命安全隐患。再看卫星，它们常常要在太空中运行几年甚至几十年，承担通信、遥感、科学探测等重要任务。它搭载的机械传动部件，比如太阳能电池板展开机构的传动装置，必须在很长的运行周期内稳定可靠，保证电池板能正常展开

和调整角度，持续给卫星提供能源。这就要求在设计阶段，充分考虑各种工作状况和潜在风险；在材料选择上，选性能好、耐疲劳的优质材料；制造工艺方面，严格把控每一道工序，用高精度加工和先进的质量检测方法，全面保证系统有很高的可靠性和很长的使用寿命。

（三）轻量化设计难题

为了提高飞行器性能，降低能耗，航空航天领域对装备轻量化设计需求迫切。但是，在实现机械传动系统轻量化的同时，要保证它有足够的强度、刚度和可靠性不容易。轻量化通常意味着减少材料使用量或者用轻质材料，但这可能降低部件的承载能力和抗疲劳性能^[9]。比如，设计飞行器的传动齿轮时，如果太追求轻量化，减小齿轮尺寸或者用强度低的轻质材料，可能让齿轮在高负载下断裂或者磨损加重，影响传动系统正常运行。

四、应对策略与展望

（一）现有挑战应对措施

针对极端环境适应性问题，科研人员努力研发新型材料。比如，研发出有很好低温韧性的合金钢，在高空低温环境下，它的晶体结构能有效阻止裂纹扩展，保持良好的强度和韧性，避免材料因低温变脆，为航空发动机等关键部件的机械传动提供保障^[9]。耐辐射的复合材料也在研发中，这种材料由特殊纤维和基体复合而成，能有效挡住太空辐射，防止材料微观结构改变，保证卫星和探测器的机械传动部件在强辐射环境下性能稳定。同时，润滑技术也在不断改进。真空润滑通过特殊的润滑脂配方和密封设计，在低气压环境下减少润滑剂挥发，保证传动部件正常润滑。自润滑材料在材料内部添加固体润滑剂，不用额外润滑补给，就能保证传动部件在极端工作状况下顺畅运转，大大提高机械传动

在极端环境中的适应性。

（二）未来发展趋势展望

未来，机械传动技术在航空航天领域会加快向智能化、集成化和高效化发展。在智能化方面，传感器会像“神经末梢”一样分布在传动部件各处，实时准确采集振动、温度、应力等多方面数据。用深度学习等人工智能算法对这些大量数据进行深入分析，能快速准确诊断出早期故障隐患，比如通过分析齿轮振动频谱，提前几个月预测齿轮的磨损趋势，从而实现预测性维护，大大提高系统的可靠性和安全性。在集成化方面，机械传动系统和电子、控制等系统深度融合，以飞行器飞控系统为例，机械传动装置和电子传感器、控制器紧密配合，实现对飞行姿态的毫秒级精确控制，减少传统系统里复杂的连接部件，提高系统紧凑性和协同工作效率^[10]。在高效化方面，科研人员努力研发新型传动机构，比如基于磁悬浮原理的无接触齿轮传动，从根本上减少机械摩擦损耗；通过优化传动比，让动力输出和负载需求完美匹配，明显提高能源利用效率，全面提升航空航天装备的性能，满足未来探索更遥远深空的需求。

五、结语

机械传动技术作为航空航天领域的重要支撑技术，在飞行器动力系统、飞行控制系统及各类设备中发挥着不可替代的作用。尽管面临着极端环境适应性、高可靠性与长寿命以及轻量化设计等诸多挑战，但通过采取有效的应对措施，如研发新型材料、改进设计与制造工艺、优化结构等，能够不断提升机械传动技术在航空航天领域的应用水平。展望未来，随着科技的不断进步，机械传动技术将朝着智能化、集成化和高效化方向持续发展，为航空航天事业的蓬勃发展注入强大动力。

参考文献

[1] 钟筱勋, 李子涛. 机器视觉识别技术在机械传动领域的应用分析 [J]. 造纸装备及材料, 2023, 52(04): 106–108.
[2] 张鹏远. 机械制造自动化中关于机器视觉技术的实践应用 [J]. 流体测量与控制, 2022, 3(02): 1–4.
[3] 官鑫. 自动化辅助设计技术在机械传动系统优化中的应用 [J]. 集成电路应用, 2024, 41(07): 214–215.
[4] 周懿俊. 机械传动系统保障性设计分析 [J]. 中国包装工业, 2013, (20): 50.
[5] 马洪强, 王圣友, 王苏宁, 等. 运动模型式飞行器气动力参数测试系统研究 [J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(05): 88–93+101.
[6] 吴琦, 陈新, 王少华, 等. 机械传动系统的组合方式研究 [J]. 机械科学与技术, 1998, (05): 75–78.
[7] 陈泳, 冯培恩, 何斌, 等. 机械传动系统概念设计自动化的策略研究 [J]. 自然科学进展, 2002, (11): 109–112.
[8] 周亮亮, 汪列隆, 易鹏. 机械传动系统扭转振动模式的有限元分析 [J]. 机电工程技术, 2016, 45(06): 29–31.
[9] 文向红, 孙爱芳, 李宏德. 机械传动系统方案布置设计探讨 [J]. 河南机电高等专科学校学报, 2002, (03): 21–22.
[9] 孙慧莹, 安鲁陵, 任益, 等. 机械传动系统电加载技术研究 [J]. 现代制造技术与装备, 2024, 60(02): 218–220.
[10] 李霞. 机械传动系统扭转振动的有限元分析探讨 [J]. 科技创新与应用, 2015, (04): 76.