

# 航天制造中机械臂的发展与展望

项天豪 王劫崴 康海超 王 振 王洪宇  
首都航天机械有限公司 北京 100076

**摘要:** 航天制造中机械臂的发展经历了从简单操作到高精度、智能化应用的转变。当前,机械臂已具备高精度运动控制、智能感知与决策、高负载与大工作范围设计等先进技术。关键技术包括先进材料与结构、精准力觉与触觉感知、高效动力与驱动以及可靠通信与数据处理。机械臂广泛应用于零部件加工、航天器装配、检测与维护等领域。未来,随着技术不断进步,航天制造中机械臂的应用将更加广泛,性能将更加卓越。

**关键词:** 航天制造;机械臂;发展与展望

## 引言

航天制造作为高科技领域的重要组成部分,对机械臂技术的要求日益提高。从最初的简单操作到如今的智能化应用,机械臂在航天制造中发挥着不可替代的作用。本文旨在探讨航天制造中机械臂的发展历程、技术现状、关键技术、应用领域以及未来展望。通过深入分析,我们可以更好地理解机械臂在航天制造中的重要性,为未来的技术创新和应用提供有益的参考。

## 1 航天制造中机械臂的发展历程

在航天发展的早期,机械臂主要作为简单的辅助工具出现,用于搬运一些小型、轻便的零部件,其结构相对简陋,功能单一,多为手动或简单的电动控制方式。在早期的卫星组装车间,机械臂仅能执行基本的抓取和放置动作,帮助工人更便捷地将零部件移动到指定位置,操作精度和灵活性有限,但初步体现了机械臂在航天制造中减轻人力劳动强度、提高工作效率的潜力<sup>[1]</sup>。随着航天技术的不断进步,对机械臂的性能要求逐渐提高,机械臂开始具备一定的自动化程度和精度控制能力。在这一阶段,机械臂的结构设计得到改进,采用了更为先进的传动系统和控制系统,能够实现较为复杂的轨迹运动,并且开始应用于一些对精度要求稍高的加工和装配环节,如小型电子元件的焊接和简单机械结构的组装等。不过,此时的机械臂仍然存在作业范围有限、负载能力不足以及对复杂环境适应能力较弱等问题。进入21世纪后,随着计算机技术、传感器技术以及人工智能技术的飞速发展,航天制造中的机械臂迎来了快速发展期。机械臂的智能化程度大幅提升,具备了自主感知、决策和执行任务的能力。通过搭载先进的视觉传感器和力觉传感器,机械臂能够实时获取周围环境信息和操作对象的状态,实现精确的力控制和柔顺操作,从而可以完成诸如高精度零部件的精密装配、复杂曲面的打

磨加工等任务。机械臂的结构更加轻量化和模块化,其工作范围和负载能力也有了显著提高,能够适应航天制造中各种大型、重型部件的制造需求,为空间站的建设与维护提供了有力支持。

## 2 航天制造中机械臂的技术现状

### 2.1 高精度运动控制技术

目前,航天制造中的机械臂在运动控制方面已经达到了极高的精度水平。通过采用高精度的伺服电机、精密的减速器以及先进的运动控制算法,机械臂能够实现亚毫米甚至微米级的定位精度和重复定位精度。在航天发动机的叶片加工过程中,机械臂可以精确地按照预设的加工轨迹进行铣削、磨削等操作,确保叶片的型面精度和表面质量符合严格的设计要求,从而保证发动机的性能和可靠性。

### 2.2 智能感知与决策技术

机械臂配备了多种智能传感器,如视觉传感器、力觉传感器、触觉传感器等,使其能够实时感知周围环境和操作对象的状态信息。基于这些感知数据,机械臂可以利用先进的人工智能算法进行自主决策,实现智能操作。在航天器的装配过程中,机械臂通过视觉传感器识别零部件的形状、位置和姿态,然后根据预设的装配工艺和规则,自主规划最优的装配路径和操作顺序,完成复杂部件的高精度装配任务,有效提高了装配效率和质量,同时降低了人为操作失误的风险。

### 2.3 高负载与大工作范围设计技术

为了满足航天制造中大型部件的加工和装配需求,机械臂的设计不断向高负载和大工作范围方向发展。现代航天制造机械臂的负载能力可达数吨甚至数十吨,工作范围能够覆盖整个航天器的制造车间或空间站的大部分区域。在大型运载火箭的制造过程中,机械臂可以轻松搬运和安装各种重型结构件,如箭体的筒体、发动机

支架等,并且能够在较大的空间范围内进行灵活操作,确保各个部件的准确对接和装配,大大提高了火箭的制造效率和质量。

### 3 航天制造中机械臂发展的关键技术

#### 3.1 先进的材料与结构技术

(1) 轻量化材料应用。为了提高机械臂的负载能力和运动性能,采用高强度、低密度的先进材料至关重要。碳纤维复合材料具有比强度高、重量轻、耐腐蚀等优点,被广泛应用于机械臂的臂杆、关节等部件的制造。通过使用碳纤维复合材料,机械臂在保证结构强度的前提下,显著减轻了自身重量,从而提高了能源利用效率和操作灵活性,使其能够在相同的动力系统下实现更大的负载能力和更快的运动速度。(2) 模块化与可重构结构设计。航天制造任务多样且复杂,要求机械臂具有较强的适应性和可扩展性。模块化与可重构的结构设计理念使得机械臂能够根据不同的任务需求快速更换或调整其功能模块和结构形式。通过设计标准化的关节模块、连杆模块和末端执行器模块,可以方便地组装出不同自由度、不同工作范围和不同功能的机械臂系统,满足航天器零部件的加工、装配、检测等各种任务要求,同时也便于机械臂的维护和升级,降低了研发和使用成本。

#### 3.2 精准的力觉与触觉感知技术

(1) 力觉传感器技术。在航天制造的精密装配和加工过程中,机械臂需要精确感知操作过程中的力和力矩信息,以实现柔顺控制和避免对零部件造成损伤,高灵敏度、高精度的力觉传感器是实现这一目标的关键技术之一<sup>[2]</sup>。六维力觉传感器能够实时测量三个方向的力和三个方向的力矩,其测量精度可达毫牛级甚至微牛级。通过将力觉传感器安装在机械臂的关节或末端执行器上,机械臂可以根据力反馈信息实时调整操作动作,如在精密装配中实现零部件的无冲击对接和精确的力控制拧紧,确保装配质量和可靠性。(2) 触觉传感器技术。触觉传感器能够使机械臂获得与操作对象接触表面的纹理、硬度、形状等信息,进一步提高其操作的灵巧性和适应性。基于压阻式、电容式或压电式原理的触觉传感器阵列,可以覆盖在机械臂的末端执行器表面,当与物体接触时,传感器能够将接触压力分布转化为电信号,从而为机械臂提供丰富的触觉信息。在航天制造中,触觉传感器可用于复杂形状零部件的抓取和操作,帮助机械臂更好地适应不同形状和表面特性的物体,提高操作的成功率和精度。

#### 3.3 高效的动力与驱动技术

(1) 高性能伺服驱动系统。机械臂的精确运动控制

离不开高性能的伺服驱动系统。先进的伺服电机结合高精度的编码器和先进的控制算法,能够实现快速、准确的位置、速度和力矩控制。采用永磁同步伺服电机,具有响应速度快、效率高、扭矩密度大等优点,配合高精度的绝对值编码器,可以实现机械臂关节的高精度定位和运动控制。伺服驱动系统还具备良好的动态性能和过载能力,能够满足机械臂在高速运动和大负载情况下的工作要求,确保机械臂的操作稳定性和可靠性。(2) 新型驱动方式探索。除了传统的电动驱动方式,科研人员也在积极探索其他新型驱动技术在航天制造机械臂中的应用,如液压驱动、气动驱动、形状记忆合金驱动以及仿生肌肉驱动等。这些新型驱动方式各具特点,例如液压驱动具有输出力大、功率密度高的优势,适用于大型重载机械臂;气动驱动则具有结构简单、成本低、无污染等特点,在一些对精度要求不高但需要快速动作的场合具有应用潜力。

#### 3.4 可靠的通信与数据处理技术

(1) 高速稳定的通信技术。在航天制造过程中,机械臂通常需要与其他设备(如控制系统、加工设备、检测仪器等)进行大量的数据交互和协同工作。因此,建立高速、稳定、可靠的通信链路至关重要。工业以太网、无线通信技术(如Wi-Fi6、5G等)被广泛应用于机械臂的通信系统中,能够实现实时、大容量的数据传输,满足机械臂对控制指令、传感器数据、状态信息等的快速传输需求。为了确保通信的可靠性和抗干扰能力,还采用了多种通信协议和数据加密技术,防止数据丢失或被篡改,保障机械臂在复杂电磁环境下的稳定运行。(2) 高效的数据处理技术。机械臂在运行过程中会产生海量的传感器数据和操作数据,如何对这些数据进行快速、准确的处理和分析,提取有价值的信息,是实现机械臂智能控制和优化决策的关键。先进的数据处理技术,如大数据分析、云计算、边缘计算等,被应用于机械臂的控制系统中。

### 4 航天制造中机械臂发展的应用领域

#### 4.1 零部件加工与制造

机械臂在航天零部件的精密加工中发挥着重要作用。在航空发动机叶片的制造过程中,机械臂可以精确控制刀具的路径和切削参数,对叶片的型面进行高精度的铣削和磨削加工,确保叶片的形状精度和表面粗糙度达到极高的标准,从而提高发动机的性能和可靠性。机械臂的高精度运动控制能力能够实现复杂曲面的精确加工,减少人为因素对加工质量的影响,提高加工效率和产品一致性。对于一些具有特殊材料或结构要求的航天

零部件,如高温合金部件的电火花加工、复合材料构件的激光切割等特种加工工艺,机械臂能够准确地操控特种加工设备,按照预定的工艺参数进行加工操作。由于特种加工过程往往对加工位置、能量控制等要求极为严格,机械臂的精确控制和稳定性能确保了这些特种加工工艺的顺利实施,满足了航天零部件对特殊形状、尺寸和性能的要求。

#### 4.2 航天器部件装配

在航天器的制造过程中,如卫星、空间站等大型结构件的装配是一项复杂而艰巨的任务。机械臂可以凭借其强大的负载能力和高精度的定位控制,将各个大型部件准确地对接和组装在一起。在空间站的建设过程中,机械臂能够搬运和安装重达数吨的舱段,并确保它们之间的连接精度达到毫米级甚至更高,保证空间站的整体结构强度和密封性,为宇航员的生活和工作提供安全可靠的空间环境。对于航天器中的精密部件,如光学仪器、电子设备等的装配,机械臂的精细操作能力和智能感知技术发挥了关键作用。通过搭载高精度的视觉传感器和力觉传感器,机械臂可以在微纳米级的精度下完成精密部件的装配任务,如芯片的贴装、光学镜片的研磨与装配等。机械臂还能够根据装配过程中的反馈信息,对部件的位置和姿态进行实时调整,确保装配的准确性和可靠性,提高航天器的性能和使用寿命。

#### 4.3 航天器检测与维护

在航天制造过程中,对零部件和组件进行无损检测是确保产品质量和安全性的重要环节。机械臂可以携带各种无损检测设备,如超声波探伤仪、X射线检测仪、涡流检测仪等,对航天器的结构件、焊接部位、电子设备等进行全面、细致的检测<sup>[3]</sup>。机械臂能够将超声波探头准确地放置在待检测部位,并按照预定的扫描路径和参数进行检测操作,获取高质量的检测数据,及时发现零部件内部的缺陷和隐患,为产品质量控制提供有力支持。当航天器在运行过程中出现故障时,机械臂可以作为重要的维修工具进行故障诊断和修复工作。在太空环境中,宇航员的操作受到诸多限制,机械臂能够代替宇航员完成一些危险和复杂的维修任务。机械臂可以更换故障的电子元件、修复受损的结构部件等,通过其精确的操作和智能的故障诊断能力,快速定位故障点并实施有

效的修复措施,确保航天器的正常运行,延长其使用寿命,降低航天任务的风险和成本。

#### 5 航天制造中机械臂的未来展望

在未来,航天制造中机械臂的发展将呈现出多维度的突破与创新。(1)精度和速度方面,有望达到前所未有的高度。通过运用更先进的材料、优化结构设计以及改进控制算法,机械臂将在亚微米甚至纳米级精度下实现高速运动,极大地提升航天零部件的制造质量与效率,满足诸如量子通信设备等高端精密制造的严苛要求。(2)智能化水平会大幅跃升,具备更强的自主决策能力。借助深度学习等人工智能技术,机械臂能依据复杂多变的任务和环境状况迅速制定最佳操作策略,实现自适应控制。例如在航天器装配时,可自动调整装配方案以应对零部件的尺寸偏差,减少人工干预,显著提高工作效率和应对复杂任务的能力。(3)在太空应用领域,机械臂将深度参与太空站的建设、维护与升级工作。从大型舱段的搬运安装到设备的故障修复,机械臂都将发挥关键作用,助力人类在太空探索中不断拓展生存与科研空间,为长期太空驻留和深空探测任务提供坚实保障,推动人类航天事业迈向新的里程碑,不断拓宽对宇宙的认知边界,开创更加辉煌的航天新纪元。

#### 结语

综上,航天制造中机械臂的发展取得了显著成就,关键技术不断突破,应用领域日益拓展。未来,随着航天技术的不断进步和需求的日益增长,机械臂将在航天制造中发挥更加重要的作用。我们期待看到更多创新技术的涌现,推动机械臂在航天制造中的进一步发展。我们也应关注机械臂在航天任务中的安全性和可靠性,确保其能够稳定、高效地完成任务,为航天事业的蓬勃发展贡献力量。

#### 参考文献

- [1]吕舒婷,李淳,周贺,等.航天制造中机械臂的发展与展望[J].南方农机,2022,53(23):156-158.
- [2]申振丰,臧艺凯,周浪,等.移动机械臂在柔性制造系统中的应用[J].机器人技术与应用,2023(2):16-21.
- [3]吴琪,王志刚,杨宇,等.机械臂结构的发展与应用综述[J].航空科学技术,2024,35(5):60-73.