

# Optimized design and application of mechanical transmission system in industrial Robot

Jiwei Chen<sup>1</sup> Juan Tang<sup>2</sup> Guang Wang<sup>1</sup>

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

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

## Abstract

This paper focuses on the optimization design of mechanical transmission system, and deeply discusses the optimization design and application of mechanical transmission system in industrial robots. First overview of industrial robot development and mechanical transmission system composition and function, then analyze its industrial robot movement accuracy, the impact of load capacity, the commonly used transmission system type characteristics, detailed based on performance requirements of parameter optimization, material and structure selection and advanced design technology application optimization design method, finally to intelligent, green environmental protection trend, analyze the technical challenges and countermeasures. The purpose is to provide theoretical reference for improving the performance of industrial robots and promoting the development of related fields.

## Keywords

industrial robot; mechanical transmission system; optimized design; performance influence

# 机械传动系统在工业机器人中的优化设计与应用

陈纪伟<sup>1</sup> 唐娟<sup>2</sup> 王广<sup>1</sup>

1. 国华(青岛)智能装备有限公司, 中国·山东·青岛 266000

2. 江苏省减速机产品质量监督检验中心, 中国·江苏·泰州 225400

## 摘要

本文关注机械传动系统的优化设计, 深入探讨机械传动系统在工业机器人中的优化设计与应用。先是概述工业机器人发展以及机械传动系统构成与功能, 接着分析它对工业机器人运动精度、负载能力等性能的影响, 阐述常用传动系统类型特点, 详细介绍基于性能需求的参数优化、材料与结构选择及先进设计技术应用等优化设计方法, 最后展望智能化、绿色环保趋势, 剖析面临的技术挑战与应对策略。目的是为提升工业机器人性能、推动相关领域发展提供理论参考。

## 关键词

工业机器人; 机械传动系统; 优化设计; 性能影响

## 1 引言

机器人在现代制造业里处于核心地位, 在汽车制造、电子加工、物流仓储等很多领域广泛应用, 大大提升了生产效率与产品质量。机械传动系统是工业机器人的关键部分, 就像人体的骨骼与肌肉, 负责传递动力与运动。它性能的好坏, 直接决定工业机器人能不能精准、高效地完成复杂任务。随着制造业朝着高端化、智能化发展, 对工业机器人性能要求越来越高, 机械传动系统的优化设计成了提升工业机器人整体性能的关键。深入研究机械传动系统在工业机器人中的优化设计与应用, 对推动工业自动化进程、增强制造业竞争力有重要现实意义。

【作者简介】陈纪伟(1983-), 男, 中国山东淄博人, 从事人形机器人与人工智能领域研究。

## 2 机器人与机械传动系统概述

### 2.1 机器人与机械传动系统的发展与应用现状

工业机器人从 20 世纪中叶诞生以来, 经过半个多世纪的发展, 技术不断更新, 功能越来越强大。早期工业机器人只能完成简单重复的任务, 现在已经发展成具有高度灵活性、精确性和智能性的自动化装备。在汽车制造领域, 工业机器人承担焊接、装配、喷漆等重要工序, 大大提高了生产效率与产品一致性; 在电子行业, 工业机器人凭借高精度操作, 实现微小零部件的精准装配与检测; 在物流仓储行业, 搬运机器人按照指令快速、准确地搬运货物, 优化了仓储物流流程。不过, 随着应用场景不断增多, 对工业机器人的精度、速度、负载能力等性能提出了更高要求, 这也促使机械传动系统不断优化升级。

### 2.2 机械传动系统的构成与功能

机械传动系统主要由齿轮、皮带、链条、轴、联轴器

等部件组成。它的核心功能是把动力源（比如电机）输出的动力与运动，准确地传递到工业机器人的各个关节与执行机构，实现机器人的复杂动作。通过不同传动部件的组合，可以实现运动形式转换，比如把电机的旋转运动变成直线运动；还能改变运动速度与扭矩，来适应不同工作任务的需要。例如在工业机器人手臂关节处，通过精密齿轮传动，保证手臂能精确、平稳地转动，实现对目标物体的抓取与放置，传动系统的稳定性与准确性直接关系到工业机器人操作的可靠性与产品质量。

### 3 机械传动系统对工业机器人性能的影响

#### 3.1 运动精度与稳定性

机械传动系统的精度与稳定性对工业机器人运动精度起着决定作用。齿轮的制造精度、皮带的张紧程度、链条的节距误差等，都会在传动过程中产生累积偏差，让机器人末端执行器的实际运动轨迹偏离预期。以高精度装配机器人为例，如果传动系统精度不够，在装配微小零部件时，很容易出现装配偏差，降低产品合格率<sup>[1]</sup>。同时，传动系统的振动与冲击会影响机器人运动稳定性，特别是在高速运动情况下，不稳定的传动会使机器人产生抖动，严重影响操作精度与设备寿命。所以，提高传动系统精度与稳定性是保证工业机器人高精度作业的关键。

#### 3.2 负载能力与工作速度

工业机器人的负载能力与工作速度在很大程度上依赖机械传动系统的设计。合适的传动比、高强度的传动部件以及合理的结构设计，能够有效提高机器人的负载能力。在搬运重物的工业场景中，如果传动系统设计不好，机器人可能承受不了重物重量，导致传动部件损坏或运动失控。而在工作速度方面，传动系统的惯性、摩擦力等因素限制着机器人的加减速性能。高效的传动系统可以降低能量损耗，提高动力传输效率，让机器人能够快速响应指令，在保证运动平稳的前提下，实现更高的工作速度，从而提高整体生产效率。

#### 3.3 能耗与可靠性

机械传动系统在运行过程中有能量损耗，比如齿轮啮合时的摩擦损耗、皮带传动中的弹性滑动损耗等，这些损耗不仅降低能源利用率，还会增加运行成本。设计高效节能的传动系统，可以明显降低工业机器人的能耗。同时，传动系统的可靠性关系到工业机器人能不能持续稳定运行。长期运行过程中，传动部件容易因为磨损、疲劳等原因出现故障，比如齿轮齿面剥落、链条断裂等，一旦发生故障，就会导致生产线停产，造成巨大经济损失。因此，提高传动系统可靠性，选用优质材料、优化结构设计以及加强日常维护，对保证工业机器人稳定运行非常重要。

## 4 工业机器人常用机械传动系统类型及特点

### 4.1 齿轮传动

齿轮传动在工业机器人中应用很广泛。它有传动效率

高的明显优势，一般能达到 95% - 99%，可以高效传递动力，减少能量损耗。通过精确设计齿轮的模数、齿数、齿形等参数，能够实现准确的传动比，保证机器人运动精度。另外，齿轮传动承载能力强，能适应重载工况，在工业机器人的大负载关节驱动中起关键作用。但是齿轮传动对制造精度和安装精度要求非常高，微小的加工误差或安装不当，都可能导致齿轮啮合不好，产生噪声与振动，影响机器人运行稳定性，而且齿轮传动的制造成本相对较高。

### 4.2 带传动

带传动依靠皮带与带轮之间的摩擦力传递动力，结构简单，成本低，安装与维护比较方便。在一些对精度要求相对不高、负载较小的工业机器人应用场景中，比如轻载物料搬运机器人的辅助传动机构，带传动被广泛应用。它还有良好的缓冲吸振性能，可以有效降低传动过程中的冲击与振动，保护电机及其他传动部件。不过，带传动存在弹性滑动现象，使得传动比不准确，传动效率相对较低，一般在 90% - 95% 之间。而且，皮带容易受温度、湿度等环境因素影响，使用寿命有限，需要定期更换。

### 4.3 链传动

链传动通过链条与链轮的啮合实现动力传递，传动效率比较高，能达到 95% - 98%。和带传动相比，链传动能传递更大的功率，而且不会出现弹性滑动，传动比准确，适合要求传动比恒定的工业机器人应用，比如装配生产线中的同步传送装置。链传动的适应性强，可以在高温、多尘、潮湿等恶劣环境下工作。但是链条在长期运行过程中，链节与链节之间的连接处容易磨损，导致链条伸长，影响传动精度，需要定期张紧与维护。同时，链传动工作时会产生一定噪声，在对噪声要求严格的工作环境中应用会受到限制。

### 4.4 其他传动方式

除了上面这些常见传动方式，工业机器人中还应用了蜗轮蜗杆传动、螺旋传动、同步带传动等。蜗轮蜗杆传动有较大的传动比，可以实现大扭矩输出，并且具有自锁功能，经常用于需要精确控制位置而且防止反转的场合，比如工业机器人的旋转关节。不过它的传动效率较低，发热量大。螺旋传动能把回转运动变成直线运动，精度高，可以实现微小位移控制，常用于工业机器人的精密定位机构。同步带传动结合了带传动和链传动的优点，传动比准确，传动效率高，而且具有良好的柔韧性，可以用于对精度和速度要求较高的工业机器人传动系统，比如高速分拣机器人。

## 5 机械传动系统的优化设计方法

### 5.1 基于性能需求的参数优化

根据工业机器人的具体工作任务与性能要求，确定传动系统的优化目标，比如提高运动精度、增大负载能力、提升工作速度等。选择影响系统性能的关键参数，像齿轮的模数、齿数、压力角，带传动的带轮直径、皮带型号，链传动

的链节距、链轮齿数等作为设计变量。建立约束条件,包括强度约束、刚度约束、运动学约束等,保证优化后的参数满足实际需要。运用优化算法,比如遗传算法、粒子群算法等,对参数进行寻优计算,得到满足性能要求并且比较理想的传动系统参数组合,从而提升工业机器人整体性能<sup>[2]</sup>。

## 5.2 材料与结构的优化选择

在材料选择方面,要充分考虑传动系统的工作条件与性能要求。对于承受高负载、高冲击的传动部件,选用高强度、高韧性的合金材料,比如高强度合金钢用于制造齿轮,可以提高其承载能力与抗疲劳性能。对于一些对重量有严格要求的工业机器人,像航空航天领域应用的机器人,采用轻质高强的铝合金、碳纤维复合材料等,在保证性能的同时减轻系统重量,降低能耗。在结构设计上,通过优化传动部件的形状、尺寸以及布局,提高结构的合理性与紧凑性。例如,采用空心轴结构可以减轻轴的重量,同时不降低其强度与刚度;合理布置传动部件,可以减小系统的转动惯量,提高机器人的响应速度。

## 5.3 先进设计技术与工具的应用

计算机辅助设计(CAD)技术能够实现机械传动系统的三维建模与虚拟装配,设计师可以直观地对传动系统结构进行设计与优化,提前发现设计缺陷,缩短设计周期。计算机辅助工程(CAE)技术,比如有限元分析,可以对传动部件进行力学性能分析,模拟其在不同工况下的应力、应变分布,优化结构设计,提高部件可靠性。多物理场耦合分析技术考虑传动过程中的热、力、流等多物理场相互作用,更准确地预测传动系统性能。拓扑优化技术则根据给定的工况与约束条件,寻找材料在空间的最优分布,实现结构轻量化与性能优化。这些先进设计技术与工具的综合应用,为机械传动系统的优化设计提供了有力支持。

# 6 发展趋势与挑战

## 6.1 智能化与自动化趋势

现在人工智能和传感器技术发展得很快,工业机器人的机械传动系统正往智能化、自动化方向发展。智能传感器能实时查看传动系统的运行情况,像温度、振动、扭矩这些参数都能监测到。通过对这些数据进行分析处理,就能诊断故障,还能提前发现潜在的故障问题,避免突然出故障让生产停下来<sup>[3]</sup>。自适应控制技术会按照工作任务和环境的变化,自动调整传动系统的参数,比如传动比、速度等,让机器人一直处在最好的工作状态。还有,自动化装配技术发展了,传动系统的装配过程变得更高效、更精准,人工参与变少了,产品质量的一致性也提高了。

## 6.2 绿色环保与可持续发展要求

现在全球都在提倡绿色环保,工业机器人的机械传动系统得满足可持续发展的要求。一方面,要优化传动系统的设计,提高能源利用率,降低能耗,减少对不好的影响。可以用高效节能的传动部件和传动方式,比如新的齿轮材料和设计能减少摩擦损耗,能量回收技术能把机器人运动时产生的动能变成电能存起来以后用。另一方面,要用环保能回收的材料来制造传动部件,这样能减少废弃物排放,降低对资源的依赖,推动工业机器人行业朝着绿色可持续的方向发展。

## 6.3 面临的技术挑战与应对策略

工业机器人朝着更高精度、更高负载能力、更高速度发展,这给机械传动系统带来了很大的挑战。在高精度方面,怎么进一步提高传动系统的制造精度和装配精度,减少传动误差的积累,这还是个急需解决的问题。解决办法有采用更先进的加工工艺和检测技术,像超精密加工、激光测量技术等。对于高负载能力的需求,要研发高性能材料,创新结构设计,这样才能满足重载情况下对强度和可靠性的要求。在高速度方面,解决传动系统高速运转时的振动和噪声问题特别重要,可以通过优化动力学设计、采用阻尼减振技术等来解决。另外,还得加强跨学科研究,把机械、电子、控制等多个领域的技术融合起来,推动机械传动系统的技术创新。

# 7 结语

机械传动系统作为工业机器人的核心组成部分,对工业机器人的性能起着决定性作用。通过对工业机器人与机械传动系统的概述,明确了其发展现状与功能构成。深入分析机械传动系统对工业机器人运动精度、负载能力、能耗等性能的影响,详细阐述常用传动系统类型及特点,提出基于性能需求的参数优化、材料与结构选择以及先进设计技术应用等优化设计方法。同时,展望了智能化、绿色环保的发展趋势,剖析了面临的技术挑战与应对策略。在未来,随着科技的不断进步,持续深入研究机械传动系统的优化设计与应用,将为工业机器人性能的进一步提升提供有力支撑,推动工业自动化水平迈向新高度,助力制造业实现高质量发展。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 聂勇军.计算机辅助设计技术在机械设计中的应用[J].工程建设与设计,2020,(04):277-278.
- [3] 张琪.机械传动系统的优化设计与分析[J].中国设备工程,2024,(20):118-120.