

# 工业机器人应用中机械结构设计方法分析

任姝炎<sup>1</sup> 马守珍<sup>2</sup>

1. 哈尔滨工业大学机电工程学院 黑龙江省哈尔滨市 150000;  
2. 内蒙古农业大学计算机与信息工程学院 内蒙古呼和浩特 010018

DOI: 10.12238/ems.v7i5.13225

**[摘要]** 随着工业自动化需求的不断提升,当前工业机器人需要适应更复杂的任务场景,进而对机械结构的刚性、轻量化等提出更高要求。本文系统梳理工业机器人机械结构的设计方法,借助分析机械组成、设计要求及参数优化方法,明确工业机器人各项性能指标,解决实际工程中的结构设计难题。另外,新材料、新工艺的不断发展,机器人结构设计也应随之不断革新,旨在为工业机器人机械结构设计提供全面的技术参考,推动工业机器人向更高精度、更高效率方向发展。

**[关键词]** 工业机器人; 机械结构; 设计方法

## 引言:

当前工业机器人设计正从传统经验驱动转向多学科协同,融合拓扑优化、轻量化材料等关键技术。近年来,工业机器人引入了仿生学原理,突破传统构型限制,结合增材制造技术实现功能-形态一体化。现代设计方法更强调环境自适应能力,利用可变刚度机构、主动柔顺关节等创新设计应对非结构化场景。与此同时,人工智能算法的渗透正改变传统迭代流程,基于深度学习的参数优化将大幅缩短设计周期。基于此融合趋势,设计人员需考虑如何在保证可靠性的前提下平衡性能表现与制造成本,推动工业机器人设计向更高端的方向发展。

## 一、工业机器人机械结构组成

工业机器人机械结构主要由机座、臂部、腕部及末端执行器组成,机座为支撑基础,承载整体重量,通常固定于地面,其刚性直接影响机器人运动精度。臂部由多个连杆和关节构成,分为大、小臂,利用关节旋转或平移进行自由运动,结构设计需兼顾强度与灵活性。腕部连接臂部及末端执行器,提供俯仰、偏航和回转运动以调整姿态。末端执行器是直接完成作业的部件,根据任务需求可更换为夹爪、焊枪等工具,结合专用接口实现快速拆装。驱动系统可为机械结构提供动力,常见有电机、液压或气动装置,经减速器传递动力并提高扭矩<sup>[1]</sup>。传动机构将驱动能量转化为机械运动,传感器系统则实时监测位置、速度等参数,形成闭环控制。

## 二、工业机器人机械结构设计要求

### 1. 高刚性轻量化结构设计

高刚性可保证机械臂在作业时保持稳定,减少振动,从而提高定位精度。轻量化则借助优化材料选择降低运动部件的质量,减小惯性影响,促使机器人具备更高的响应速度。材料使用高强度铝合金、碳纤维复合材料等兼顾轻量、高刚性的材料,同时利用有限元分析去除冗余结构,增强关键受力部位支撑强度。结构设计需平衡刚性与重量,避免过度减重降低刚度,影响末端执行器的稳定性。轻量化设计还能降低驱动系统负荷,减少能耗,延长关键部件的使用寿命。

### 2. 模块化可扩展布局设计

机械结构经模块化设计分解为标准化功能单元,各模块采用统一的机械电气接口实现即插即用,允许根据任务需求灵活调整臂展长度、关节数量或末端工具。同时,设计机械结构时需预留兼容接口,支持后续升级需求<sup>[2]</sup>。模块化结构还简化了维护流程,出现故障时,可单独更换部件,大幅降低停机时间。产线调整时,只需重组现有模块就能适应新工艺,有效缩短产线改造周期。标准化模块还能降低备件库存压力,提高供应链管理效率。

## 三、工业机器人机械结构设计方法

### 1. 明确工业机器人机械结构设计目标

设计工业机器人机械结构时,设计人员需要综合考虑负载能力、工作范围等核心性能指标,同时兼顾可靠性、维护性等实际需求<sup>[3]</sup>。负载参数决定结构强度,工作范围影响臂展尺寸,运动精度要求传动系统具有足够的刚度,还需评估工作环境因素对材料的影响。最大加速度、重复定位精度等动态性能指标需与控制系统相匹配,设计目标还应包含可扩展性要求,为后续功能升级预留空间。明确的设计目标既能指导具体结构设计,又能作为验证最终产品性能的客观标准,保障机械结构满足实际应用需求。

### 2. 工业机器人机械结构参数设计

#### (1) 运动学参数设计

工业机器人运动学参数有自由度、关节类型、连杆参数以及工作空间分析等,其中:

#### ① 自由度与关节配置

机器人自由度由关节数量决定,6自由度可任意调整机器人空间位姿,而4自由度适用于平面作业。关节类型有旋转关节及移动关节,其配置需满足任务需求。自由度分配需基于运动链分析,要求末端执行器具备足够的灵活性。

#### ② 连杆参数与坐标系建立

采用D-H参数法建立机器人运动学模型,每个连杆需定义四个参数:连杆长度 $a_i$ 、连杆扭角 $\alpha_i$ 、关节距离 $d_i$ 、关节角度 $\theta_i$ 。其中,旋转关节的 $\theta_i$ 为变量,移动关节的 $d_i$ 为变量。由齐次变换矩阵 $T_i^{i-1}$ 描述相邻连杆间的位姿关系:

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

机器人末端位姿矩阵 $T_n^0$ 有链式乘法计算可得:

$$T_n^0 = T_1^0 T_2^1 \dots T_n^{n-1}$$

#### ③ 工作空间分析

工作空间由关节运动范围和连杆几何参数共同决定,依据正运动学计算末端可达位置集合,结合逆运动学验证位姿可解性。工作空间可分为可达工作空间与灵活工作空间,后者要求末端具备多姿态到达能力。

#### ④ 性能优化指标

运动学参数设计需优化灵巧性、奇异点规避及运动效率。雅可比矩阵 $J$ 用于分析末端速度 $\dot{X}$ 与关节速度 $\dot{q}$ 的关系:

$$\dot{X} = J\dot{q}$$

结合最小化雅可比矩阵的条件数,可提升机器人的运动精度。

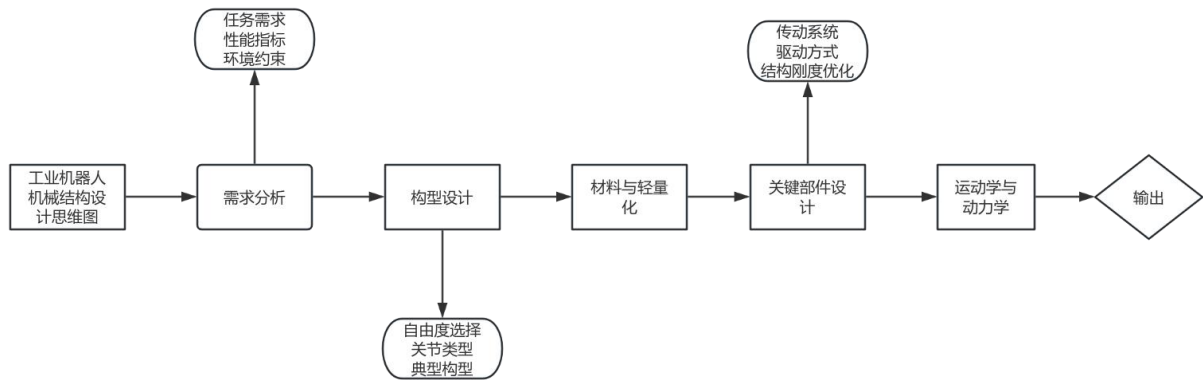


图 1 工业机器人机械结构设计思维图

输出后需要评估其寿命并失效模式，同时加入力反馈限制以及急停装置，结构采用模块化拆装，接口出润滑处理。

(2) 动力学参数设计

工业机器人的动力学参数设计主要针对机器人运动与受力之间的关系，其核心任务是建立关节驱动力矩与机器人运动状态的数学模型，为后续的运动控制提供依据。

首先，工业机器人动力学建模主要采用拉格朗日法以及牛顿-欧拉法。拉格朗日法基于能量守恒，借助计算工业机器人的动能和势能，利用拉格朗日方程推导出关节力矩与运动参数之间的关系<sup>[4]</sup>。牛顿-欧拉法则基于力和力矩平衡原理，采用递推计算方法：正向递推从基座到末端依次计算各连杆的速度、加速度，反向递推从末端到基座计算各关节所需的作用力、力矩。

其次，各连杆质量大小及质心位置，直接决定机器人整体的惯性特性；惯性张量精确描述连杆绕不同旋转轴的转动惯量，决定旋转运动的动态响应功能；摩擦效应包含粘性摩擦和库仑摩擦，主要影响关节运动的平稳性；重力补偿，机器人不同的工作姿态会受到不同的重力矩作用，必须实时补偿<sup>[5]</sup>。

机器人的动力学方程可表示为：

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + F(\dot{q})$$

其中： $\tau$  为关节驱动力矩； $M(q)$  为质量矩阵，反映机器人的惯性特性； $C(q, \dot{q})$  为科里奥利力和向心力项； $G(q)$  为重力项； $F(\dot{q})$  为摩擦力项。

机械结构设计中，需优化动力学参数以提高机器人的运动性能，主要目标包括：①减小惯量：降低运动过程中的能量消耗；②平衡负载：优化质量分布以减少关节力矩波动；③抑制振动：通过结构刚度设计提高动态稳定性。

表 1 工业机器人机械系统设计参数参考

参数类别	核心参数	典型数值范围	关键影响因素
驱动系统	减速比	50: 1~200: 1	负载惯量/转速要求
	电机额定功率	200W~15kW	负载扭矩/运动加速度
	峰值扭矩	2~300Nm	过载需求/紧急制动
运动精度	重复定位精度	$\pm 0.01 \sim \pm 0.05\text{mm}$	传动间隙/控制分辨率
	绝对定位精度	$\pm 0.1 \sim \pm 0.5\text{mm}$	校准补偿/机械公差
	反向间隙	0.005~0.03mm	齿轮精度/预紧力
轻量化设计	旋转关节质量占比	10%~20%	惯性矩/动态响应
	材料去除率	20%~40%	拓扑优化算法/安全系数
环境适应性	防护等级	IP54~IP67	密封结构/材料耐腐蚀性
	工作温度范围	-20°C~60°C	热设计/元器件选型
安全防护	碰撞检测阈值	110%~150%额定扭矩	传感器精度/响应时间
	急停减速时间	300~800ms	制动器性能/惯性负载
	润滑周期	1000~3000 工作小时	密封性能/润滑剂特性
维护性	关节更换时间	15~45 分钟	连接方式/标准化程度

(3) 其他参数

除上述参数，工业机器人机械系统设计还需要综合考虑驱动系统、运动精度等多维参数体系，相互关联又彼此制约，共同决定了机器人的整体性能。具体数据参考表 1。

具体参数值需要根据实际应用场景针对性调整。例如焊接机器人通常选择 80: 1~120: 1 的减速比配合 3~7kW 电机，而装配机器人则倾向采用 50: 1~100: 1 减速比搭配 200W~1kW 电机<sup>[6]</sup>。精度参数方面，机床上下料机器人通常要求重复定位精度达到  $\pm 0.02\text{mm}$  以内，而搬运机器人可放宽至  $\pm 0.1\text{mm}$ 。防护等级在食品医药行业普遍要求 IP65 以上，普通工业环境 IP54 即可满足需求。

结束语：

综上所述，工业机器人机械结构设计是一项多学科交叉的系统工程，需要综合考虑运动学性能、动力学特性等特定需求。随着智能制造的快速发展，机器人的应用领域不断拓展，对机械结构提出更高要求。设计人员借助优化材料选择、模块化设计等方式，可以大幅提升机器人的动态响应能力。同时，借助先进的仿真分析工具，能够更精准地平衡各项性能指标，保证机械结构在复杂工况下的可靠性。未来，工业机器人机械结构设计将进一步向轻量化、高刚度、高集成化方向发展，为工业自动化提供更灵活的解决方案。

[参考文献]

[1] 鲍敏, 鲍婕, 敖冰峰. 基于关节模块自由组装式 7 自由度工业机器人[J]. 科学技术创新, 2022, (08): 1-4.  
 [2] 周莉萍, 李召. 机械结构设计技术与流程——《工业机器人机械系统》[J]. 铸造, 2022, 71 (01): 122.  
 [3] 牛保琴. 理论与方法并重的机械结构设计技术与流程——评《工业机器人机械系统》[J]. 铸造, 2021, 70 (12): 1492.  
 [4] 李再明. 工业机器人助推大数据时代食品产业智能化——《工业机器人机械结构与维护》评述[J]. 食品与机械, 2021, 37 (04): 237-238.  
 [5] 张慧. 基于 OBE 理念的工业机器人机械维护课程改革研究[J]. 内燃机与配件, 2020, (23): 232-233.  
 [6] 郑红. 工业机器人用谐波减速器机械结构设计[J]. 价值工程, 2020, 39 (27): 94-95.  
 作者简介：  
 任姝炎 (2003.11—) 女，汉族，河南省柘城县人，本科在读，哈尔滨工业大学，专业：机器人工程；  
 马守珍 (2002.12—)，女，蒙古族，内蒙古呼和浩特市人，本科在读，内蒙古农业大学，专业：计算机科学与技术。