

机械臂动力学建模与控制策略研究

吴业胜

广西北港新材料有限公司 广西 北海 536017

摘要: 机械臂在工业自动化、航空航天等领域的广泛应用,对其动力学性能与控制精度提出更高要求。动力学建模是探究机械臂运动规律与力学特性的基础,拉格朗日方程法、牛顿-欧拉方程法等多种建模方法各有优势。控制策略的选择直接影响机械臂运行的稳定性与准确性,PID控制、自适应控制等策略在不同场景发挥关键作用。深入研究动力学建模与控制策略,有助于提升机械臂性能,推动相关领域技术发展。

关键词: 机械臂动力学;建模;控制策略

引言

随着智能制造与自动化技术的快速发展,机械臂作为核心执行机构,其动力学特性与控制性能成为制约应用效能的关键因素。传统建模方法在复杂工况下的精确性与计算效率面临挑战,而新型控制策略的适应性与鲁棒性需求日益凸显。本文围绕机械臂动力学建模与控制策略展开研究,系统对比不同建模方法的原理与适用场景,深入剖析各类控制策略的特点,旨在为机械臂优化设计与高效控制提供理论支撑与技术参考。

1 机械臂动力学概述

机械臂动力学聚焦于研究机械臂运动与作用力之间的关系,是理解和控制机械臂运动行为的核心理论基础。其主要任务是建立描述机械臂各关节运动与所受外力、内力以及惯性力之间相互作用的数学模型,为机械臂的轨迹规划、控制算法设计和性能优化提供重要依据。机械臂本质上是一个多刚体系统,由多个通过关节相互连接的连杆组成。在运动过程中,每个连杆不仅受到自身惯性力的影响,还承受着来自相邻连杆的作用力和反作用力,以及外部负载带来的力矩。这些力和力矩的相互作用使得机械臂的动力学特性极为复杂,呈现出非线性、强耦合的特点。以串联机械臂为例,一个关节的运动变化会通过连杆的动力学耦合效应,对其他关节的运动状态产生显著影响,这意味着在分析和控制机械臂运动时,必须将整个系统作为一个整体进行考虑。为了建立精确的动力学模型,常采用拉格朗日方程或牛顿-欧拉方程。拉格朗日方程从能量的角度出发,通过定义系统的动能和势能,构建拉格朗日函数,进而推导出机械臂的动力学方程。这种方法在处理复杂多体系统时具有一定优势,因为其可以避免对系统内部约束力的直接求解,简化建模过程。牛顿-欧拉方程则基于经典力学的牛顿定律和欧拉转动定律,从力和力矩的平衡关系入

手,逐步推导每个连杆的运动方程,该方法物理意义明确,特别适用于实时动力学计算,在机械臂的控制算法实现中得到广泛应用。精确的机械臂动力学模型对于提升机械臂的控制性能至关重要。它能够帮助工程师更准确地预测机械臂在不同工况下的运动响应,优化控制策略,提高机械臂的运动精度、速度和稳定性,从而满足工业自动化、机器人手术、空间探索等众多领域日益增长的高精度作业需求。

2 机械臂动力学建模方法

2.1 拉格朗日方程法

拉格朗日方程法以能量守恒原理为基础构建机械臂动力学模型。通过定义系统的动能和势能,引入拉格朗日函数 $L = T - V$,其中 T 为系统总动能,涵盖各关节运动产生的平动动能与转动动能,通过对各连杆质心速度和角速度的计算得出; V 为系统总势能,包含重力势能等,根据各连杆质心位置与重力加速度关系确定。基于变分原理,将动力学问题转化为求解拉格朗日函数关于广义坐标的二阶微分方程。对于多自由度机械臂,这种方法能有效避开牛顿-欧拉方程法中复杂的力和力矩分析,将系统动力学特性以简洁的数学形式呈现。其优势在于对复杂系统的适应性强,无需直接分析系统内部的约束力,在处理具有多个闭合运动链的机械臂系统时,通过选择合适的广义坐标,可大幅简化建模过程。该方法在计算过程中,动能和势能的表达式往往涉及大量的矩阵运算和复杂的三角函数,计算复杂度较高,在实时性要求高的应用场景中存在一定局限性。常用于机器人系统的理论分析与设计阶段,为后续的控制算法设计提供动力学模型基础^[1]。

2.2 牛顿-欧拉方程法

牛顿-欧拉方程法基于牛顿第二定律和欧拉旋转定律,从力和力矩的角度建立机械臂动力学模型。对机械

臂的每个连杆,依据牛顿第二定律 $F=ma$ 分析其平动动力学特性,其中 F 为作用在连杆质心的合力, m 为连杆质量, a 为质心加速度;根据欧拉旋转定律 $M=I\alpha+\omega\times(I\omega)$ 分析转动动力学特性, M 为作用在连杆上的合力矩, I 为连杆的惯性张量, α 为角加速度, ω 为角速度。通过建立各连杆的坐标系,利用齐次变换矩阵描述连杆间的位姿关系,采用递推的方式,从基座到末端执行器正向递推计算速度和加速度,再从末端执行器到基座反向递推计算力和力矩,从而得出各关节所需的驱动力矩。该方法物理意义明确,直观地反映了力、力矩与运动之间的关系,在分析机械臂的受力状态和运动特性方面具有独特优势。由于需要对每个连杆进行详细的力和力矩分析,当机械臂自由度增加时,计算量呈指数级增长,模型建立过程繁琐,且对复杂结构的处理难度较大。常用于机械臂动力学的基础理论研究以及对计算效率要求不高、需要深入分析机械臂受力情况的场景。

2.3 凯恩方程法

凯恩方程法以广义速率作为描述系统运动的变量,通过引入广义惯性力和广义主动力,建立机械臂动力学方程。它基于达朗贝尔原理,将动力学问题转化为在广义速率下的虚功率平衡方程。对于机械臂系统,先确定合适的广义速率,这些广义速率可以是关节角速度或其他与系统运动相关的量,通过对系统运动学的分析,建立速度约束方程,进而推导出广义惯性力和广义主动力的表达式。与拉格朗日方程法相比,凯恩方程法在处理具有非完整约束和复杂运动约束的机械臂系统时更具优势,能够更灵活地选择描述系统运动的变量,简化约束条件的处理过程。其核心在于通过巧妙地选择广义速率,将系统的动力学方程以更简洁的形式表达,减少不必要的计算量。该方法对广义速率的选择要求较高,需要深入理解系统的运动特性和约束条件,在实际应用中,若广义速率选择不当,可能导致方程求解困难。常用于具有复杂约束条件的机械臂动力学建模,如移动机械臂系统等^[2]。

2.4 递归算法

递归算法在机械臂动力学建模中通过递推的方式高效计算各关节的驱动力矩。其基本思想是利用机械臂的结构特性,将动力学计算过程分解为正向递推和反向递推两个阶段。在正向递推阶段,从机械臂的基座开始,根据前一个连杆的运动状态和关节运动参数,依次计算后续各连杆的位置、速度和加速度;在反向递推阶段,从末端执行器开始,根据末端负载和各连杆的惯性参数,反向计算各关节所需的驱动力矩。该算法充分利用

了机械臂连杆间的运动学和动力学关系,避免了大量重复的计算,大幅降低了计算复杂度,提高了计算效率。在多自由度机械臂系统中,递归算法的优势尤为明显,能够满足实时控制对动力学模型计算速度的要求。该算法可以方便地与机械臂的运动学模型相结合,实现对机械臂运动和动力学特性的综合分析。递归算法的推导过程较为复杂,需要对机械臂的运动学和动力学知识有深入的理解,且在处理具有特殊结构或复杂约束的机械臂时,需要对算法进行相应的改进和优化。常用于机械臂实时控制中的动力学计算,为实现机械臂的快速、精确运动控制提供支撑。

3 机械臂控制策略

3.1 PID控制

(1) PID控制作为经典的闭环反馈控制策略,通过比例(P)、积分(I)和微分(D)三个控制环节的协同作用实现对机械臂的精确控制。比例环节依据当前误差信号的大小快速响应,及时调整控制量;积分环节能够消除稳态误差,确保机械臂最终达到目标位置;微分环节则基于误差变化率进行预测,提前抑制系统超调,提升动态性能。三者相互配合,形成对机械臂位置、速度和加速度的综合调控。(2)在工业场景中,PID控制凭借其结构简单、易于实现和参数调整直观的优势,成为机械臂基础控制的首选。无论是搬运、装配等常规作业,还是重复性高的生产任务,PID控制都能以较低的成本实现稳定的控制效果。其对硬件要求不高,通过经验试凑或Ziegler-Nichols等整定方法,可快速获得适合特定工况的参数,满足多数工业应用场景的精度与稳定性需求。(3)尽管PID控制应用广泛,但面对复杂多变的工况时仍存在局限性。其依赖精确的数学模型,当机械臂负载变化、存在非线性摩擦或外部干扰时,控制性能会显著下降。由于缺乏自适应性,传统PID控制器难以应对机械臂在高速运动、强耦合关节等复杂条件下的控制需求,需要结合其他先进控制策略或改进算法以提升鲁棒性和适应性。

3.2 自适应控制

(1)自适应控制针对机械臂运行过程中参数变化和外部不确定性,通过实时在线估计系统参数并动态调整控制策略,实现控制性能的优化。其核心在于构建参数辨识机制,持续监测机械臂的动态响应,依据输入输出数据实时更新模型参数,使控制器能够适应机械臂负载变化、摩擦系数波动等工况变化,始终保持良好的控制效果。(2)在机械臂执行多样化任务时,自适应控制展现出独特优势。例如在抓取不同重量和形状的物体时,

自适应控制器能够迅速调整控制参数,确保机械臂稳定抓取和精确操作。相比传统控制方法,自适应控制无需预先精确建模,可在运行过程中不断学习和适应,有效提升机械臂在复杂环境下的控制精度和可靠性,为柔性制造和智能装配等场景提供了有力支撑。(3)自适应控制在实际应用中面临挑战。参数辨识算法的计算复杂度较高,对处理器性能要求严苛,可能导致实时性不足。在强干扰或快速时变系统中,参数估计的准确性易受影响,若辨识过程不稳定,可能引发系统振荡甚至失稳。自适应控制算法的设计需要深厚的理论基础和大量的调试工作,增加了系统开发和维护成本^[3]。

3.3 鲁棒控制

(1)鲁棒控制聚焦于增强机械臂控制系统对不确定性因素的抵抗能力,通过设计控制器使系统在模型误差、外部干扰和参数摄动等情况下,依然能够保持稳定运行并满足性能指标。其核心思想是在控制器设计阶段考虑所有可能的不确定性范围,构建具有足够稳定性裕度的控制结构,确保机械臂在复杂工况下的可靠性。

(2)在存在强外部干扰或机械臂参数存在较大不确定性的场景中,鲁棒控制优势显著。例如在振动环境下执行精密操作,或机械臂长期运行导致部件磨损、参数变化时,鲁棒控制器能够有效抑制干扰影响,维持机械臂的运动精度和稳定性。与其他控制策略相比,鲁棒控制无需精确的系统模型,通过保守设计换取对不确定性的包容,为恶劣工况下的机械臂控制提供了可靠保障。(3)鲁棒控制的保守性设计也带来一定弊端。为确保对所有可能的不确定性具有鲁棒性,控制器设计往往会牺牲部分系统性能,导致控制响应速度变慢、动态性能受限。鲁棒控制器的设计过程较为复杂,需要综合运用现代控制理论和优化算法,准确量化不确定性范围并求解最优控制参数,这对工程实践中的设计和调试提出了较高要求。

3.4 智能控制

(1)智能控制融合人工智能、机器学习等技术,赋予机械臂自主学习和决策能力,突破传统控制方法对精确模型的依赖。神经网络、模糊逻辑和强化学习等智能算法能够模拟人类的思维和决策过程,通过对大量数据

的学习和分析,挖掘机械臂运行的内在规律,实现复杂非线性系统的有效控制。例如,神经网络可通过训练学习机械臂的动态特性,模糊逻辑则能基于专家经验处理不确定性问题。(2)在高度复杂和非结构化环境中,智能控制展现出强大的适应性和灵活性。机械臂在未知环境下执行探索任务,或与人类协作完成复杂操作时,智能控制系统能够实时感知环境变化,自主调整控制策略。强化学习算法可使机械臂通过不断试错,在奖励机制引导下学习最优控制策略,实现复杂任务的高效执行,为机械臂在智能制造、服务机器人等前沿领域的应用开辟了新路径。(3)智能控制在实际应用中仍面临诸多挑战。神经网络等算法的训练需要大量数据和强大的计算资源,且存在训练时间长、模型泛化能力不足等问题。智能控制系统的可解释性较差,难以直观理解其决策过程,增加了故障诊断和系统优化的难度。智能算法对硬件性能要求较高,在实时性和可靠性方面还需进一步提升,以满足工业应用的严苛标准^[4]。

结语

综上所述,机械臂动力学建模与控制策略研究对提升机械臂性能具有重要意义。通过对比分析拉格朗日方程法、牛顿-欧拉方程法等建模方法,以及PID控制、自适应控制等策略,明确了各方法与策略的优势及应用场景。研究成果为机械臂动力学分析与控制算法设计提供了理论依据。未来,随着技术进步,动力学建模与控制策略将朝着更精准、智能、高效的方向发展,以满足多领域复杂应用需求。

参考文献

- [1]仝思佳.柔性机械臂动力学建模与运动控制综述[J].南方农机,2024,55(23):85-88.
- [2]武殿博.欠驱动柔性机械臂的动力学建模与控制[J].现代电子技术,2020,43(6):93-96.
- [3]方虹斌,郑立,张琦炜,等.柔性机械臂动力学建模研究进展[J].动力学与控制学报,2023,21(12):5-21.
- [4]张甜.柔性机械臂动力学建模及控制分析[J].南方农机,2020,51(1):75.