

柔性关节机械臂接触力阻抗控制系统设计

毕梦莹

(中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471000)

摘要: 由于机械臂关节具备柔性特性, 接触力情况复杂多变, 且系统存在非线性阻抗因素, 传统的单一力信号跟踪控制方式过于僵化, 难以适应复杂多变的接触力环境, 导致控制效果不佳; 为此, 设计柔性关节机械臂接触力阻抗控制系统; 设计机械臂伺服控制器时, 采用动态阻抗参数和接触力位置控制策略, 结合非线性阻抗模型和双环控制架构, 实现柔顺交互; 末端关节轨迹生成器通过直线型规划程序封装为 Simulink 模块满足柔顺性和动力学优化, 确保精准控制; 基于磁感应的力矩传感器实时测量末端力/力矩, 支持精细操作; 利用拉格朗日方程分解接触力并补偿柔性变形, 分析应力分布和阻抗影响, 动态调节参数; 引入粒子群优化算法优化力控性能, 平衡接触力与位置。通过跟踪力信号、抑制扰动内环和修正力强度外环的双环阻抗控制, 缓冲外力冲击, 保证轨迹精度, 最终实现高精度力/位置跟踪控制; 实验结果表明, 应用上述系统可以较好地平衡 X 轴、Y 轴方向上关节受力点的位置误差, 从而避免机械臂接触力载荷出现明显波动的数值变化情况, 控制效果较好。

关键词: 关节机械臂; 柔性接触力; 阻抗作用; 伺服控制器; 负荷强度; 粒子群优化

Design of Contact Force Impedance Control System for Flexible Joint Robot Arms

BI Mengying

(China Airborne Missile Academy, Luoyang 471000, China)

Abstract: The robotic arm joint has, the characteristics of flexibility, complex and variable contact forces, with nonlinear impedance factors presented in the system. The traditional tracking control method for a single force signal is too rigid, making it suitable for complex and variable contact force environments, thus resulting in a poor control effect. Therefore, a contact force impedance control system for flexible joint robotic arms is designed. With a robotic arm servo controller presented, this paper adopts a dynamic impedance parameter and contact force position control strategy and combines a nonlinear impedance model with a dual-loop control architecture, achieving a compliant interaction. The end joint trajectory generator is encapsulated as a Simulink module through a linear planning program, meeting the requirements of flexibility and dynamic optimization to ensure a precise control. A magnetic induction-based torque sensor is used to measure an end force/torque in real time, supporting fine operations. The Lagrange equation is employed to decompose the contact force and compensate for the flexible deformation, analyze stress distribution and impedance effects, and then dynamically adjust the parameters. A particle swarm optimization algorithm is introduced to optimize force control performance and balance a contact force and position. By the dual-loop impedance control of tracking the force signal, suppressing the disturbance in the inner loop, and correcting the force intensity in the outer loop, external force impacts are buffered to ensure trajectory accuracy, ultimately achieving high-precision force/position tracking control. Experimental results show that the designed system can effectively balance the position errors of joint force points in the X-axis and Y-axis directions, thereby avoiding a significant numerical fluctuation in the robotic arm's contact force load and achieving a favorable control effect.

Keywords: articulated robotic arm; flexible contact force; impedance effect; servo controller; load intensity; particle swarm optimization

收稿日期:2025-06-18; 修回日期:2025-07-23。

作者简介:毕梦莹(1991-),女,硕士,工程师。

引用格式:毕梦莹. 柔性关节机械臂接触力阻抗控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2026, 34(6): 89-96, 113.

0 引言

柔性关节机械臂是机械系统的重要组成结构,通过在关节处引入柔性设计思想,提升系统的行为适应性。关于关节柔性的研究起源于机械结构的轴向间隙与摩擦变形,可以通过集中参数模型描述其表现程度^[1]。在机械系统中,柔性关节与机械臂的连接需要借助连杆,该结构通常具有较强的拉伸或扭曲能力,对于其形变特性的研究则可以通过偏微分方程等多种不同的分布参数模型来进行。不同于常规的分布式关节机械臂,柔性关节机械臂的弹性更大,在执行任务的过程中发生损坏或不可逆变形的可能性相对较小。实际应用中,柔性关节多采用碳纤维、铝合金等轻质材料,在直流无刷电机的驱动下,关节体快速转动,显著提升了机械臂的负载—自重比。

对于机械型控制系统而言,如何协调机械臂与接触力作用之间的负荷关系成为一项亟待解决的难题。针对上述问题,张家维等人^[2]提出了考虑基座振动抑制的阻抗控制方法,建立紧耦合系统模型,并利用阻抗控制器协调机械臂在外力作用下的响应状态,再通过人工势场法求解自运动向量,调节机械臂受力状态。然而,阻抗控制器的协调能力相对有限,在关节耦合能力较弱的情况下,基于该方法并不能实现对机械臂响应行为的有效控制。周玥欣等人^[3]提出了考虑输入饱和作用的不确定控制方法,基于时间自适应模糊反步法构建机械臂系统的动态模型,根据固定时间命令滤波器输出对虚拟控制函数进行逼近运算,进而在消除补偿误差的同时,控制接触力载荷的分布情况。由于动态模型并未考虑静止状态下机械臂的受力特性,所以其对接触力的控制作用效果相对有限。陈少南等人^[4]提出了基于自适应阻抗的控制方法,利用六维力传感器测量机械臂表面的接触力信息,并根据环境位置与环境刚度的估值,修正机械臂的参考运动轨迹,实现对力控效果的自适应调节。但环境位置与环境刚度的估值并不能清晰地表述出接触力力矩的作用特点,所以在进行控制调节时,该算法的准确性并不能得到有效保障。王旭升等人^[5]提出了基于位置控制的阻抗控制算法,通过对非线性接触力的微分运算,对机械臂表面接触力进行超调控制,在此基础上参考径向基函数构建自适应滑模平面,以实现对不确定性力学扰动作用的有效控制。在自适应滑模平面中,径向基函数运算并不能完全消除线性微分误差,所以其阻抗控制作用的有效性只表现在特定微分区间内。

为解决上述问题,大幅提升机械臂作业的安全性,设计新型柔性关节机械臂接触力阻抗控制系统,参考粒子群优化算法定义力学负荷作用的阻抗控制模型。粒子群优化算法通过模拟特定对象的群体行为,确定个体间

所共享信息的最优解,且对象种群中的每个粒子都对应一个所求解问题的潜在解^[6]。从函数角度来看,潜在解具有速度、位置双重描述属性。根据目标求解问题推导函数表达式,进而确定每个粒子所对应的适应度区间,在适应度适中的情况下,进行连续收敛运算,就可以评估所得数值解的优劣程度。

1 控制系统硬件模块设计

柔性关节机械臂接触力阻抗控制系统的硬件模块部分涉及机械臂伺服控制器、末端关节轨迹生成器与力矩传感器,本章节针对其具体设计方法展开研究。

1.1 机械臂伺服控制器设计

机械臂伺服控制器承担着末端关节轨迹生成器与力矩传感器的调节功能,通过整合动态阻抗参数、接触力位置控制策略,实现传感器与外部环境之间的力学载荷柔顺交互。在 I/O 模块与 I/O 总线的支持下,伺服控制器通过解析力矩传感器的反馈信号,确定机械臂接触力的负载强度,再通过对关节驱动器输出扭矩的实时调整,改变柔性关节惯性、阻尼、刚度等参数的取值^[7]。由于柔性关节机械臂具有弹性形变特性,所以伺服控制器的设计应遵循非线性阻抗模型。内部伺服控制回路中,HSV-130U 驱动器对关节空间的阻抗参数进行解耦运算,可以通过控制器将编码信息传输至上机位,实现机械臂自由空间与接触力约束空间之间的数值切换^[8]。外部控制组件中,Modbus 驱动单元分析柔性关节的冗余特性,通过对机械臂表面接触力力矩的分配,满足关联传感器组件的阻抗特性需求,从而避免机械臂接触力力矩出现明显波动。对于机械臂伺服控制器基本结构如图 1 所示。

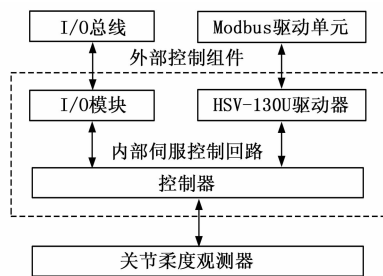


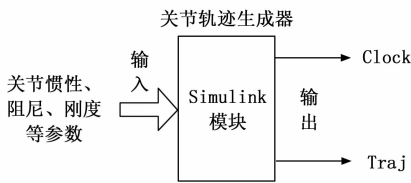
图 1 机械臂伺服控制器基本结构图

柔性关节的传动柔度可能会导致末端传感器位置发生滞后,而通过伺服控制器则可以对关节驱动力矩进行前馈补偿,进而控制柔性关节的弹性形变程度。由于伺服控制器的设计采用双环控制架构,驱动器与 I/O 模块同时调节机械臂表面的接触力作用强度,所以为实时估计关节形变,必须设置柔度观测器才能够实现对关节运动与驱动器输出行为的动态解耦。关节柔度观测器是在伺服控制器采用双环控制架构,驱动器与 I/O 模块同时

调节机械臂表面接触力作用强度的背景下设置的。由于柔性关节的传动柔度可能导致末端传感器位置滞后，而伺服控制器要对关节驱动力矩进行前馈补偿以控制弹性形变程度，此时就需要关节柔度观测器。它的作用是实时估计关节形变，进而实现对关节运动与驱动器输出行为的动态解耦，即把关节运动和驱动器输出这两个相互关联、相互影响的过程分离开来，以便更精准地对机械臂进行控制，避免因关节柔度带来的不良影响，保障机械臂按照预期的方式运行，实现传感器与外部环境之间良好的力学载荷柔顺交互等控制目标。

1.2 末端关节的轨迹生成器设计

在阻抗控制系统中，对于机械臂的行为规划等同于对末端柔性关节位置轨迹的控制。对于轨迹生成器而言，其所规划出的有关柔性关节的位置数据相当于机械臂接触力阻抗调节所需的期望信息。出于对关节轨迹精准性的保障，在设计生成器结构时应编写一个简单的直线型规划程序语句，并将其封装成 Simulink 模块可以理解的形式，再通过预先设置的 Clock 与 Traj 接口终端，传输至控制系统共享环境之中^[9]。末端关节轨迹生成器 Simulink 模块的设置应同时满足柔顺性需求、动力学耦合条件与多约束优化原则。柔顺性需求是指柔性关节在机械臂接触力作用下所表现出的应力突变情况；动力学耦合条件是指接触力形变与关节末端轨迹之间的非线性映射关系；多约束优化原则是指柔性关节轨迹需要同时满足速度、加速度、接触力阈值等多种不同的数值约束标准。完整的末端关节轨迹生成器建模结构如图 2 所示。

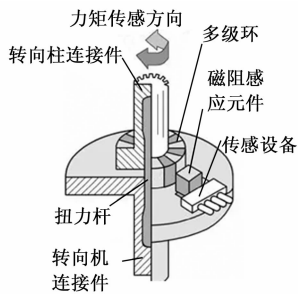


关节惯性、阻尼及刚度等参数作为 Simulink 模块的输入参数，其取值会随着机械臂在接触力作用下动态响应状态的变化而发生变化。Simulink 模块在运算输入参数时，需借助不同的接口终端向外传输反馈信息。其中，Clock 接口传输与接触力负荷和机械臂形变等级相关的运算信息，Traj 接口传输与关节轨迹跟踪相关的运算信息。

末端关节轨迹生成器是柔性关节机械臂接触力阻抗控制系统硬件模块的重要组成部分，其设计的 Simulink 模块形式、满足的柔顺性需求等与硬件模块的整体功能实现紧密相关，且与机械臂伺服控制器、力矩传感器等硬件模块共同协作以完成系统的控制任务。

1.3 力矩传感器设计

柔性关节机械臂接触力阻抗控制系统对于力矩传感器的设置基于磁感应作用原则，扭力杆在机械臂接触力作用下产生形变，这种力学负载作用驱动转向机连接件与转向柱连接件，从而使传感设备感受到磁性电阻的变化行为，并产生相应的电信号输出。阻尼控制系统运行过程中，传感设备集成机械臂伺服控制器与末端关节轨迹生成器，调节力矩传感方向，一方面感应磁感应作用的方向与强度变化，另一方面测量柔性关节机械臂在三维空间内的力和扭矩^[10]。由于传感器模块接受系统电机回路的直接调度，所以其传感精度水平直接影响力控效果。参照磁感应原则构建力矩传感器的等效模型如图 3 所示。



阻抗控制系统的设计，要求力矩传感器必须实时测量柔性关节机械臂末端执行器所承受的推力和力矩，支持机械设备完成对目标任务结构的精细抓取与装载，以防止因力矩超限而导致机械臂操作失误的问题。如果末端关节轨迹生成器发生异常表现，力矩传感器识别所得的推力和力矩结果也会随之出现异常数值状态。阻尼控制系统根据这种异常表现可以识别出接触力对机械臂的非常规负荷作用，以避免对柔性关节的稳定性造成影响。

2 柔性关节机械臂接触力的阻抗特性研究

由于柔性关节机械臂具有弹性形变特性，在运行过程中，柔性关节的传动柔度可能导致末端传感器位置滞后，且关节惯性、阻尼、刚度等参数会随机械臂动态响应状态改变而变化，这使得仅依靠现有的硬件模块设计难以精确处理复杂的接触力情况。同时，机械臂在接触力作用下，关节轨迹的精准性受到动力学耦合条件以及多约束优化原则的限制，力矩传感器的传感精度也直接影响着力控效果，一旦末端关节轨迹生成器出现异常，力矩传感器识别结果也会异常，进而影响机械臂操作的稳定性。因此，结合控制系统的硬件设计方案，在柔性变形条件下分解机械臂接触表面的作用受力，再根据力学作用的实时负荷强度，分析接触力的阻抗作用表现。利用拉格朗日方程对机械臂接触力进行分解，将外力作

用标量等效为在 X 轴、 Y 轴、 Z 轴方向上的取值，以此补偿关节柔性变形对接触力作用的影响；同时分析应力分布情况，确定最大应力效果和应力集中区域，避免不同力矩作用相互抵消；此外，还需分析接触力负荷下阻抗作用对机械臂运动能力的影响，通过动态调节阻抗参数设置值来适应不同环境，从而提升整个接触力阻抗控制系统的性能与稳定性。

2.1 柔性变形条件下的接触作用受力分解

对于机械臂接触力的受力作用分解遵循拉格朗日方程。拉格朗日方程的核心思想是利用外力作用标量替代牛顿力学中的矢量进行数学运算，适用于非保守力系统、约束系统等多种不同的复杂自由度耦合场景^[11]。对于拉格朗日方程的定义如公式 (1) 所示：

$$\delta = \mathbf{W}(q)q'' + \mathbf{E}(q, q')q' + \mathbf{R}(q) \quad (1)$$

其中： $\mathbf{W}(q)$ 为惯性矩阵，它是关于机械臂关节角度 q 的函数，描述了机械臂各关节在不同位置时所具有的惯性特性，反映了机械臂在运动过程中抵抗加速度变化的能力； $\mathbf{E}(q, q')$ 表示科氏力矩矩阵，它是关于关节角度 q 和关节角速度 q' 的函数，是由于机械臂各关节之间的相对运动而产生的附加力矩，类似于在旋转参考系中观察到的科里奥利力； $\mathbf{R}(q)$ 为重力矩矩阵，它是关于关节角度 q 的函数。重力矩是由于机械臂自身重力作用在各关节上产生的力矩。当机械臂处于不同姿态时，各关节所承受的重力矩不同，重力矩矩阵反映了这种变化关系； δ 为牛顿力学中的控制力矩，即为了使机械臂按照期望的轨迹运动，需要在各关节上施加的力矩； q 、 q' 、 q'' 分别为外力作用标量在不同方向上的取值。基于拉格朗日方程分解机械臂接触力作用，可将外力作用标量等效为接触力在 X 轴、 Y 轴、 Z 轴方向上的取值，即 $(q, q', q'') = (x, y, z)$ 。利用 (x, y, z) 可将拉格朗日方程变形式表示为：

$$\delta' = \mathbf{W}(x)z + \mathbf{E}(x, y)y + \mathbf{R}(x) \quad (2)$$

其中： δ' 表示牛顿力学控制力矩在机械臂受力分解坐标系中的等效分量； $\mathbf{W}(x)$ 、 $\mathbf{E}(x, y)$ 、 $\mathbf{R}(x)$ 分别为机械臂接触力的惯性矩阵、科氏力矩矩阵与重力矩矩阵。这些等效矩阵是在考虑了外力在不同方向上的分解后得到的，它们与原始的惯性矩阵、科氏力矩矩阵和重力矩矩阵之间存在一定的转换关系，这种转换关系是基于坐标变换和力的分解原理推导得出的。设 w_x 表示机械臂关节在 X 轴方向上的柔性变形参数， w_y 表示 Y 轴方向上的柔性变形参数， w_z 表示 Z 轴方向上的柔性变形参数。这些柔性变形参数反映了机械臂关节在受到外力作用时，在相应方向上产生的弹性变形量。其大小与关节的材料特性、结构尺寸以及所受外力的大小和方向有关。为了推导柔性变形条件下的机械臂接触作用受力分解表达式，做出如下假设：鉴于机械臂的柔性变形量相较于

其整体尺寸极为微小，属于小变形范畴，故可采用线性弹性理论来分析机械臂的变形与受力关系，以此简化计算流程；同时，假定机械臂的材料均匀且各向同性，即材料在各个方向上的物理性质（弹性模量、泊松比等）保持一致，从而确保机械臂在不同方向上的变形和受力特性具有一致性，利于构建统一的数学模型；此外，在本研究的初步分析阶段，为突出柔性变形对接触力的影响，忽略机械臂关节之间的间隙和摩擦等在实际中会对机械臂运动和受力产生一定影响的次要因素。在上述假设条件下，联立公式 (2) 推导柔性变形条件下的机械臂接触作用受力分解表达式如下：

$$\mathbf{Q} = (w_x + w_y + w_z)^2 \cdot \frac{\sin(\chi_x + \chi_y + \chi_z)}{\delta'^{-1}(x, y, z)} \quad (3)$$

其中： χ_x 、 χ_y 、 χ_z 分别为柔性变形影响下机械臂接触力作用方向与 X 轴、 Y 轴、 Z 轴基线方向的物理夹角。这些夹角是由于机械臂关节的柔性变形导致的接触力作用方向的改变。基于拉格朗日方程分解机械臂接触作用受力，可以更好确定力矩传感器扭力杆的扭矩情况。因为力矩传感器扭力杆的扭矩与机械臂各关节所受的力和力矩有关，通过分解接触力并考虑柔性变形的影响，可以更准确地计算出各关节的受力情况，进而确定扭力杆的扭矩。以补偿关节柔性变形对接触力作用的影响，保障阻抗控制的有效性^[12]。

2.2 机械臂接触力的负荷强度计算

仅分解受力难以明确机械臂实际承受的应力状况，无法确定最大应力位置及应力集中区域，易出现不同力矩作用相互干扰抵消的情况。因此，柔性变形条件下完成接触作用受力分解后，进一步计算机械臂接触力的负荷强度。除了要考虑关节柔性变形特性，还应分析负载参数、动态参数对计算结果的影响。

负载参数直接影响机械臂接触力的惯性表现，由于质心偏移会产生额外的力矩效果，所以在求解负载参数时，应确定柔性变形条件下机械臂所承担的接触力是否存在附加扭矩作用^[13]。动态参数的求解意在描述柔性关节机械臂在接触力作用下的变形表现，需根据负荷点分布情况设置具体的运算标准，以确保动态参数对接触力力矩的作用效果最显著^[14]。设 u 表示机械臂质心偏移， t 表示接触力惯性表现， e 表示附加扭矩作用（如果机械臂所承担接触力不存在附加的扭矩作用，在 $e = 1$ 的取值条件成立）， r 表示柔性关节机械臂的变形表现， o 表示接触力负荷点分布，联立上述物理量，可将负载参数 γ 、动态参数 α 的计算式表示为：

$$\begin{cases} \gamma = \frac{u}{2\sqrt{te}} \\ \alpha = \sqrt{\frac{r}{o}} \end{cases} \quad (4)$$

联立公式 (3)、(4), 可将机械臂接触力的负荷强度计算式表示为:

$$U = \exp\left(-\frac{\beta Q - O_i}{2\alpha\gamma}\right), i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

其中: β 为扭矩补偿, i 为弹性形变, O_i 为 i 形变下的逆动力学力矩。根据力矩传感器所测得的机械臂接触力和力矩数值, 可以准确分析柔性变形条件下外部接触力所提供的负荷作用, 由于其强度水平并不能保持为定值状态, 所以在计算过程中应确定最大应力效果和应力集中区域, 以避免不同力矩作用相互抵消。

2.3 接触力负荷下的阻抗作用分析

在接触力负荷下, 阻抗作用影响柔性关节机械臂的运动能力, 主要表现在力学冲击效果具有足够长的缓冲时间。在力学冲击缓冲时间不超限的情况下, 阻抗控制作用等同于具有调节能力的机械化模型。因此, 进一步分析接触力负荷下的阻抗作用, 为实现柔性关节机械臂接触力阻抗控制奠定良好的数据基础。

对于柔性关节机械臂而言, 机械化模型受制于目标结构质量—弹性体—阻尼表现之间的数值关系^[15]。简单来说, 就是将机械臂在接触力作用下的响应表现设定为一个机械系统。在该系统中, 目标结构保持质量, 但弹性体形变量却会随着接触力负荷的增大而逐渐增大, 由于阻抗控制与弹性体形变特性相反, 所以基于二者之间的力学抵消效果, 可以准确分析阻抗控制系统对机械臂接触力的作用能力^[16]。规定 p_0 表示柔性关节机械臂质量, u 表示力学冲击的缓冲超限值, ϵ 表示弹性体变形值, A_ϵ 表示 ϵ 变形量下的阻尼效果, A_0 表示阻尼效果在弹性体非变形情况下的取值, 联立公式 (5), 推导机械化模型定义式:

$$P = p_0^u U(A_\epsilon - A_0) \quad (6)$$

在公式 (6) 的基础上, 可将接触力负荷下的阻抗作用分析式表示为:

$$S = \frac{-a\varphi}{\varphi P + \bar{s}^2 + \bar{c}^2 d} \quad (7)$$

其中: a 为弹性体阻抗特性, φ 为弹性体阻尼表现, φ 为力学抵消作用, $\bar{s}$ 为机械臂单位区域内的接触力负荷均值, $\bar{c}$ 为柔性阻力系数, d 为接触力阻抗参数。根据柔性关节机械臂与环境的交互行为, 可以灵活调节阻抗参数设置值。环境刚度较低时, 设置较小的阻尼参数, 而在环境刚度较高时, 设置较大的阻尼参数, 以确保机械臂能够适应不同的接触力负荷环境。

3 基于粒子群优化的机械臂接触力阻抗控制方案实现

根据式 (7) 分析柔性关节机械臂接触力的阻抗特性可知, 柔性关节机械臂运行期间, 接触力处于复杂多变的环境中, 为了抑制扰动并实现精确力控, 基于机械

臂接触力的阻抗特性, 定义粒子群优化算法, 并在此基础上, 跟踪接触力的阻抗作用效果, 以构建内、外阻抗控制模型, 实现对力学作用的阻抗性控制。

3.1 粒子群优化演算

针对柔性关节机械臂接触力阻抗控制系统设置粒子群优化算法, 在演算数值解时, 对粒子与解空间设置了明确要求。运算过程中, 每个粒子对应所设置问题目标搜索空间内的一个候选解对象, 且该候选解同时具有速度属性和位置属性^[17]。其中, 速度属性决定了数值解的搜索方向和速度, 位置属性决定了数值解所属的候选区域。基于粒子与解空间求解粒子群优化的演算标准, 就是通过适应度函数求解目标粒子的适应值区间, 并以此评估当前粒子的优劣表现。搜索粒子的过程中, 单纯根据个体极值和全局极值更新候选解的速度和位置过于片面, 容易使运算结果陷入局部最优^[18]。所以, 在演算过程中还需要多次更换个体极值与全局极值进行迭代更新, 从而使候选解逐渐靠近全局最优值。定义 n 个不同的粒子对象, 其取值满足公式 (8):

$$c_1, c_2, \dots, c_n \in [1, +\infty) \quad (8)$$

规定 v 表示粒子候选解的速度属性, b 表示粒子候选解的位置属性, 且 $v \neq 0$ 、 $b \neq 0$ 的不等式取值条件同时成立, 联立公式 (8), 可将粒子群优化的标准演算式表示为:

$$B = M(c) \cdot \left(\frac{vb \cdot |\kappa_{\max} - v_{\max}|}{c_1^2 + c_2^2 + \dots + c_n^2} \right)^{-\epsilon} \quad (9)$$

其中: $M(c)$ 表示基于随机粒子 c 的适应度函数, $v_{\max}$ 表示个体极值, $\kappa_{\max}$ 表示全局极值, ϵ 表示迭代运算次数。粒子群优化演算意在对目标粒子进行规模化运算, 因此所选定粒子的候选解越多, 运算结果的准确性就越高, 而这种高数据量下的优质运算符合柔性关节机械臂接触力的阻抗控制要求。

3.2 面向粒子群优化的接触力阻抗作用效果跟踪

基于粒子群优化算法跟踪柔性关节机械臂接触力阻抗作用效果, 旨在通过优化演算提升接触任务中的力控性能。为实现接触位置与机械臂力学负载效果之间的动态平衡, 阻抗控制同时调整柔性关节末端的惯性参数、阻尼、刚度等物理量^[19]。由于粒子群演算法则对接触力阻抗作用进行了迭代优化, 且计算过程中, 连续的搜索可以实现对阻抗参数的最优设置, 所以基于该方法跟踪接触力阻抗作用效果的鲁棒性较强。

在粒子群优化算法的具体实施中, 粒子的初始化策略至关重要。本文采用随机初始化与基于先验知识初始化相结合的方式。对于机械臂刚度、惯性参数、接触力阻尼等关键参数相关的粒子, 在满足其物理取值范围的前提下, 对一部分粒子进行随机初始化, 以增加搜索的随机性和多样性, 避免陷入局部最优解; 另一部分则根

据以往类似接触任务的经验数据,对粒子进行初始化,使初始粒子群具有一定的方向性,能够更快地朝着可能的最优解区域搜索,提高优化效率。

适应度函数的设计依据是衡量接触力阻抗作用效果跟踪的优劣程度。本文综合考虑接触力的跟踪误差、阻抗参数调整的平滑性以及机械臂运动的稳定性等因素。接触力跟踪误差是核心指标,通过计算实际接触力与期望接触力之间的差值来反映跟踪的准确程度;阻抗参数调整的平滑性则确保机械臂在调整过程中不会出现剧烈的参数变化,避免引起机械臂的抖动或不稳定;机械臂运动的稳定性从机械臂末端的位置、速度等运动状态的变化情况来评估。将这 3 个方面的指标进行加权组合,构建出适应度函数,使得适应度函数值越小,代表接触力阻抗作用效果跟踪越好。

根据优化结果调整阻抗参数时,本文采用逐步调整的策略。在每次迭代优化得到一组较优的阻抗参数后,不直接将所有参数替换为新的值,而是按照一定的比例逐步更新。对于机械臂刚度、惯性参数和接触力阻尼等参数,先计算新参数与旧参数的差值,然后按照一个较小的比例系数对差值进行缩放,再将缩放后的差值与旧参数相加,得到更新后的参数值。这种逐步调整的方式可以避免参数的突变对机械臂运动和接触力跟踪造成过大影响,保证系统的稳定性。同时,在调整过程中,持续监测接触力的跟踪情况和机械臂的运动状态,如果发现调整后出现不稳定或跟踪误差增大的情况,及时回退部分调整步骤,重新进行优化和调整,以确保接触力阻抗作用效果跟踪的准确性和稳定性。

对于接触力阻抗作用效果的跟踪,计算过程中,粒子群优化算法需要根据惯性权重、学习因子等参数的取值,对演算标准进行调优,一方面避免运算结果出现局部振荡或收敛速度下降的问题,另一方面使计算结果的适应度水平大幅提升^[20]。设 f 为机械臂刚度, μ 为惯性参数, λ 为接触力阻尼, ϑ 为迭代运算过程中的最优设置项,为粒子群优化算法的惯性权重, η 为接触力阻抗作用的学习因子。在上述物理量的支持下,联立公式(9),可将基于粒子群优化的机械臂接触力阻抗作用效果跟踪条件设置为:

$$D = \lambda B^{-1} + \vartheta \left[\mu d + \frac{\eta}{2} \right] f \quad (10)$$

对于柔性关节机械臂而言,接触力强度受到复杂外力作用的直接影响,特别是在阻尼控制效果需要保持恒定的情况下,只有利用粒子群优化演算原则,设置明确的运算标准,才能确保阻抗作用跟踪效果的准确性。

3.3 内、外阻抗控制模型构建

3.3.1 内阻抗控制模型

内阻抗控制模型负责精准跟踪柔性关节机械臂外环

生成的接触力参考信号,可以参考粒子群优化算法下的力学作用跟踪效果,设置反馈机制,以实现对接触力扰动的有效抑制。机械臂受到接触力作用时,内阻抗控制模型通过对柔性关节角度的调整,使力矩输出值无限趋近期望值,从而避免阻抗控制作用出现失效表现^[21]。基于公式(10),推导机械臂内阻抗控制模型表达式如下:

$$F_1 = \theta \left(\frac{D}{S \|G_1 - G_0\|} \right)^{-\omega} \quad (11)$$

其中: G_0 为机械臂接触力力矩输出的期望值, G_1 表示单纯考虑内阻抗控制作用下的接触力力矩输入, θ 为柔性关节角度调整值, ω 表示阻抗作用效果跟踪反馈。

3.3.2 外阻抗控制模型

外阻抗控制模型根据柔性关节机械臂期望的受力状态及目标阻抗模型参数,确定阻抗控制作用实现所需的接触力强度修正量。相较于内阻抗控制模型,外阻抗控制模型以柔性关节末端受力为输入,在期望力矩输出保持不变的情况下,通过对阻抗作用位移偏量的控制,形成新的力学参考标准,以用来约束机械臂所承受的接触力作用^[22]。基于公式(10),推导机械臂外阻抗控制模型表达式如下:

$$F_2 = \frac{1}{g} (G_2 - G_0) + \frac{1}{2} \alpha \theta |\sigma|^2 \quad (12)$$

其中: G_2 表示单纯考虑外阻抗控制作用下的接触力力矩输入, g 为强度修正参数, σ 表示阻抗作用下的位移偏量。

结合内、外阻抗控制模型,可以快速响应接触力在既定作用位置处的修正量,确保机械臂伺服控制器、末端关节轨迹生成器能够实现力跟踪的稳定性。

3.4 内外双环融合的接触力阻抗控制

融合内外双环实施对接触力的阻抗控制,既缓冲了外力冲击对机械臂表面的变形影响,也保证了柔性关节的轨迹精度,避免机械工件发生损伤。受力过程中,内阻抗模型控制力矩输入、外阻抗模型控制关节输出,以实现对力信号的精确跟踪^[23]。如果机械臂元件要求接触力的定义符合力—位置动态关系,则需要将接触力误差转化为位置修正条件后,再进行数值运算。融合内、外阻抗控制模型后,机械臂表面在接触力作用下表现出柔性曲率变化状态,所以机械结构的行为能力并不会受到影响^[24]。设 h 为柔性关节的轨迹精度设定值, j 为机械臂表面形变曲率设定值, τ 为动态修正系数, k 为力—位置设定条件, v 为控制参数,联立公式(11)、(12),推导机械臂接触力阻抗控制的运算式为:

$$H = h j^{-\tau} + \frac{1}{F_1 F_2} (1 - k^v) \quad (13)$$

柔性关节机械臂接触力阻抗控制系统融合粒子群优化算法、内外双环机制等原则,实时跟踪关节轨迹,进而控制接触力作用效果,在保证机械臂元件阻尼特性的

同时，提升系统的任务适应性与运行柔顺性。

4 实验结果分析与研究

针对上文所设计控制系统（第一组）、文献 [2] 提出的考虑基座振动抑制的阻抗控制方法（第二组）、文献 [3] 提出的考虑输入饱和作用的不确定控制方法（第三组）设计实验，根据不同方法对机械臂与环境交互行为的调节能力，分析目标实验方法对机械作业安全性的控制能力。为确保实验对比的准确性和可靠性，在本次对比实验中，每种方法的实验条件保持完全一致。硬件方面，以 KUKA LBR iiwa 型号的柔性关节机械臂作为实验对象，配备末端六维力传感器与关节力矩传感器研究机械臂接触力作用强度的变化情况；设置 ROS/Python 实时内核控制力传感器；闭合伺服电机驱动关节，以完成位置/力矩模式之间的切换。基于粒子群优化的机械臂接触力阻抗控制方案在控制系统硬件上的实现，依托机械臂伺服控制器、末端关节轨迹生成器及力矩传感器等硬件模块。利用伺服控制器整合动态阻抗参数与接触力位置控制策略，通过解析力矩传感器反馈信号调整关节驱动器输出扭矩；末端关节轨迹生成器以直线型规划程序封装为 Simulink 模块，提供轨迹信息；力矩传感器基于磁感应作用实时测量末端力/力矩。在此基础上，运用粒子群优化算法对接触力阻抗作用效果进行跟踪，根据优化结果逐步调整阻抗参数，构建内、外阻抗控制模型并融合双环实施阻抗控制，从而实现对机械臂接触力的有效控制。对于实验所需力传感器参数如表 1 所示。

表 1 力传感器参数

参数	取值
额定激励电压	5~10 V
额定温度范围	-20~80 ℃
灵敏性温度参数	0.1 %F·S/10 ℃
力学灵敏度	1.0~2.0 mV/V
量程	0~20 kG
蠕变	0.1 %F·S/30min
安全过载	150 %F·S
非线性	±0.5 %F·S
重复性	1 %F·S
滞后性	1 %F·S

选择力传感器参数时，额定激励电压设为 5~10 V，能让传感器在合适电压下稳定运行并可可靠输出信号，保障实验中持续提供准确基础数据；选定 -20~80 ℃的额定温度范围与 0.1 %F·S/10 ℃的灵敏性温度参数，可有效应对不同实验环境温度，最大程度减少温度波动对测量精度的干扰，补偿温度变化带来的误差；确定 1.0~2.0 mV/V 的力学灵敏度参数，能够精准感知机械臂接触力的细微变化，为深入分析机械臂与环境的交

互情况提供精细数据；设定 0~20 kG 的量程参数，可完整覆盖实验中接触力的实际范围，避免测量值超出量程导致数据失真；明确 0.1 %F·S/30 min 的蠕变参数，能保障传感器在长时间测量过程中的稳定性，防止因时间因素产生测量误差；规定 150 %F·S 的安全过载参数，可防止意外过载情况损坏传感器，保证实验顺利进行和传感器的长久使用；限定 ±0.5 %F·S 的非线性、1 %F·S 的重复性与滞后性参数，能确保测量结果的准确性和一致性，这些参数综合确保实验数据可靠，为准确分析不同控制方法对机械作业安全性的控制能力奠定基础。

软件方面，设置 ROS/EtherCAT 接口，实现传感器数据的采集与控制指令的下发，再通过对数据零点的校准，建立三维机械臂模型与空间坐标系之间的映射关系。出于对实验结果准确性的保障，可以通过对传感器的标定，研究所得实验值与目标设定值之间的数值关系。如图 4 所示，利用三维建模软件模拟柔性关节机械臂的行为模式，进而确定最优载荷作用点所在位置，以避免实验过程中因接触力负荷水平过高而造成机械臂过度偏转的问题。

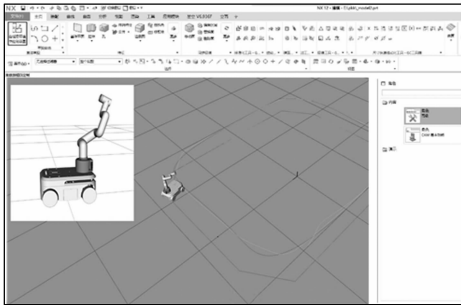


图 4 柔性关节机械臂的三维建模结构

将目标机械结构放置在置物架上，通过测力计确定机械臂表面接触力负荷的实际作用强度，利用超导线连接测力计与显示终端，以便于根据力学曲线分析关节受力点位置误差与接触力载荷的数值水平。

关节受力点位置误差同时表现在 X 轴、Y 轴两个方向上，在不考虑其他干扰条件的情况下，如果误差值分布较为平均且没有明显异于理论值，则表示所应用实验方法对误差分量的控制较为有效。图 5 为 X-Y 轴方向上关节受力点位置误差的具体实验情况。

从数值分布情况来看，第一组实验结果与理论误差情况更为接近，其最多误差表现存在于 X 轴与 Y 轴的中间区域，且实验过程中没有增大或减小的数值表现；第二组、第三组实验结果与理论误差情况的差异性较大，且在个别区域内，这两组实验曲线的异常数值表现较为突出。因此，在 X-Y 轴方向上，第一组方法对关节受力点位置误差的控制更为有效。

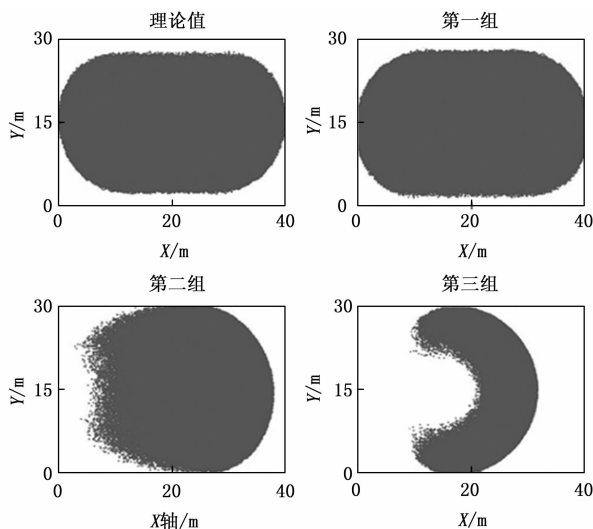


图 5 X-Y 轴方向上关节受力点的位置误差

通过对阻尼表现的分析，可以确定所研究方法对柔性关节机械臂接触力的阻抗控制能力，如果机械臂接触力载荷的波幅小且波动次数相对较少，则表示当前方法对接触力的阻抗控制能力较强。对于考虑基座振动抑制的阻抗控制方法，可设置阻尼比参数为 0.6 以有效抑制振动，刚度参数依据机械臂实际负载及基座特性设定为 500 N/m；考虑输入饱和作用的不确定控制方法，输入饱和和阈值根据机械臂驱动能力设定，力矩输入饱和阈值设为额定力矩的 1.2 倍，同时设置控制增益参数，比例增益为 8、积分增益为 0.5，以保障系统稳定且避免输入饱和带来的不良影响。不同实验方法对机械臂接触力载荷的阻抗控制效果如图 6 所示。3 种控制方法的误差均方根值、超调量如表 2 所示。

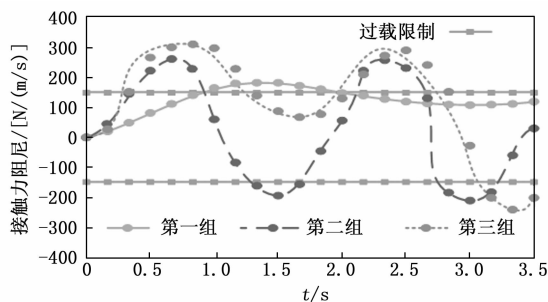


图 6 机械臂接触力载荷的阻抗控制效果

表 2 不同控制方法的阻抗控制效果

控制方法	误差均方根值	超调量/%	波动次数
第一组	80	10	1
第二组	150	30	4
第三组	140	28	3

分析图 6 和表 2 可知，KUKA LBR iiwa 型号柔性关节机械臂的过载限制保持在 ± 150 N/(m/s) 之间。

实验过程中，第一组、第二组、第三组接触力阻尼的初始值均为 0；随着实验时间的延长，第一组接触力阻尼在一次波动后，逐渐趋于数值稳定态势，其误差均方根值为 80，超调量为 10%，波动次数仅 1 次，虽波动时最大值超额定过载限制，但超出数值水平低；第二组接触力阻尼表现出了两次正向超限和两次负向超限，误差均方根值达 150，超调量 30%，波动次数 4 次，超限数值水平明显高于第一组；第三组接触力阻尼表现出了两次正向超限和一次负向超限，误差均方根值 140，超调量 28%，波动次数 3 次，超限数值水平与第二组相近且高于第一组。综上可知，在机械臂接触力载荷的阻抗控制方面，第一组方法的控制效果更突出。

为更全面地评估上文所设计控制系统的性能，引用系统的响应时间、稳定性、准确率、召回率以及 F_1 等评估指标，3 种方法的实验结果如表 3 所示。

表 3 不同控制方法的性能

控制方法	响应时间/ms	稳定性评分	准确率/%	召回率/%	F_1
第一组	120	8.5	92	90	91
第二组	150	7.0	85	80	82
第三组	140	7.5	82	78	80

由表 3 可知，在响应时间上，第一组仅 120 ms，明显短于第二组和第三组，表明其能更迅速响应控制指令，实时性佳；在稳定性评分方面，第一组 8.5 分最高，说明其控制下机械臂运行更平稳，与前文对关节受力点位置误差和接触力载荷阻尼控制效果分析一致；在准确率上，第一组 92% 领先，表明其对接触力等参数检测更精准；召回率第一组 90% 也优于其他两组，漏检情况少； F_1 分数作为综合指标，第一组 91 分同样最高，综合体现了该组控制系统在机械作业安全性控制上性能最优，而第二组和第三组在各方面指标上均有提升空间。

5 结束语

设计柔性关节机械臂接触力阻抗控制系统旨在解决关节受力点位置误差的问题，在抑制接触力载荷波动的同时，提升机械作业的安全性。设计过程中，机械臂伺服控制器将力—位置动态耦合关系与外部环境结合起来，根据轨迹生成器对末端关节形态的定义，调节力矩传感器，使其能够准确测量机械臂表面接触力作用的负荷强度。软件方面，则参考接触作用的受力分解情况，分析阻抗作用，再结合粒子群优化算法，设计具体的阻抗控制方案。相较于其他控制作用机制，所设计方法在关节受力点误差分配与接触力载荷波动控制方面表现出了突出作用价值，符合提高机械臂作业安全性的实际应用需求。

(下转第 113 页)