[文章编号] 1003－4684(2025)04-0005-06

基于自适应权重 WOA 的机械臂接触力跟踪算法

王思宇[1,2]，何飞宇[3]，何 涛[1,2]

(1 湖北工业大学机械工程学院，湖北 武汉 430068；2 现代制造质量工程湖北省重点实验室，湖北 武汉 430068；
3 湖北省产品质量监督检验研究所，湖北 鄂州 436032)

[摘 要] 为了提高机械臂末端的接触力跟踪控制精度，对自适应阻抗控制算法进行研究，构建了自适应阻抗控制器。通过引入自适应权重鲸鱼优化算法对自适应阻抗控制参数进行优化，提出一种基于自适应权重 WOA 的机械臂接触力控制方法。该方法能够实现对惯性系数、阻尼系数以及刚度系数的优化，在环境参数变化或接触力波动时，动态调整接触力跟踪策略，将接触力控制在设定的期望值附近。仿真与实验结果表明，该方法显著提升了机械臂末端与环境接触时接触力的跟踪控制精度，相较于传统阻抗控制，具有超调量小、收敛速度快的优势，能够有效降低实际接触力的跟踪误差，使实际接触力控制的误差在±1 N 以内，展现出较好的稳定性与有效性。

[关键词] 机械臂；鲸鱼优化算法；自适应阻抗控制；力跟踪；自适应权重

[中图分类号] TP242 [文献标识码] A

机械臂的应用场景日益广泛，尤其在磨削、焊接、轴孔装配等领域表现突出。由于机械臂末端需与外界环境实时接触，在操作过程中，不仅要约束其运动位置，更要精准控制末端接触力大小。接触力过大，易导致工件损坏；接触力过小，则可能造成工具失效。

Nuno Mendes 等[1]提出一种基于模糊变参数的 PID 力/位混合控制算法。该算法通过动态调整 PID 参数，显著增强了系统控制的鲁棒性。张俊鑫等[2]提出一种基于力/位混合导向的机械臂阻抗控制策略。首先，将阻抗控制算法与自抗扰控制(ADRC)相结合，对控制回路进行优化；在此基础上，采用开关式变论域模糊控制器对 ADRC 进行改进。该策略有效提升了机械臂在力/ 位混合控制模式下对未知环境的适应能力，使其能够更精准地应对复杂工况。唐康峻等[3]提出一种基于神经网络的打磨机械臂力位混合控制方法。该方法利用神经网络对打磨机械臂系统参数误差与振动干扰进行实时识别与抑制，有效增强了系统对外界振动干扰的抵抗能力，显著提升了打磨作业的稳定性与控制精度。金玉阳等[4]提出一种基于位置的模糊自适应控制方法，通过在自适应阻抗控制中嵌入模糊控制器，动态调节阻抗控制参数，有效提升了位置跟踪的准确性。然而，该方法应用于力/位控制时，高度依赖精确的环境模型，若环境模型存在偏差，运行过程中易引发不稳定响应，致使控制精度难以保障。

为解决这一问题，研究人员尝试利用模糊控制算法或神经网络算法对环境参数信息进行预测，以增强系统对环境变化的适应性。尽管此类数据驱动方法无需构建精确的控制模型，但要实现高精度的环境参数预测，须依赖大量数据集进行训练。这无疑会大幅增加时间成本，成为限制其快速应用的瓶颈。

在自适应阻抗控制中，阻抗控制参数大多依靠人为经验设定，致使控制效果欠佳。为解决这一问题，引入鲸鱼优化算法对阻抗控制参数进行优化。鲸鱼优化算法(WOA)[5]具有搜索机制独特、原理简单、调整参数少等优点，也存在收敛速度慢、易陷入局部最优等问题。针对这些问题，本文提出一种基于自适应权重 WOA 的机械臂末端接触力跟踪算法：首先建立自适应阻抗控制器；然后在 WOA 算法中引入自适应惯性权值，以增强全局搜索能力，避免陷入局部最优；最后利用自适应权重 WOA 算法实现对自适应阻抗控制参数的调整，并通过仿真与实验研究，验证该方法的有效性。

1 自适应阻抗控制模型

在外部环境作用下，N 自由度的机器人动力学表达式：

$$D(\alpha)\ddot{\alpha}+H(\alpha,\dot{\alpha})+\tau_f(\dot{\alpha})=\tau-\tau_e \tag{1}$$

[收稿日期] 2023－10－20
[基金项目] 国家自然科学基金(51275158)
[第一作者] 王思宇(1995－)，男，湖北随州人，湖北工业大学硕士研究生，研究方向为机器人技术。

式中：$D(\alpha)$ 为惯性矩阵；α 为关节角度；$\dot{\alpha}$ 为关节角速度；$\ddot{\alpha}$ 为关节角加速度；τ_f 为重力力矩，τ 为关节力矩；τ_e 为外界环境施加的力矩；$H(\alpha,\dot{\alpha})=C(\alpha,\dot{\alpha})\dot{\alpha}+G(\alpha)$[6]。

自适应阻抗控制模型能够根据接触力的变化进行动态调整，从而实现预期的力控制效果。此外，自适应阻抗控制算法无需建立精确的机械臂模型，不仅能够在短时间内快速、精确地跟踪位置信号，还能将接触力稳定控制在设定的期望值附近[4]。自适应阻抗控制关系式为

$$M\ddot{E}+B\dot{E}+KE=F_e-F_d \tag{2}$$

式中：M 表示为惯性系数；B 表示为阻尼系数；K 表示为刚度系数；F_e 和 F_d 分别表示为机器人末端产生的实际接触力和期望接触力；E 表示为期望位置 X_d 与实际位置 X 之差。为简化讨论，故只考虑一个方向上的受力情况。

控制过程可分为两个阶段：接触空间阶段和自由空间阶段。在接触空间阶段中，当机械臂末端与环境发生接触时，在理想状态下，期望接触力与实际接触力相等，假设 $K=0$，故式(2)可写为

$$M\ddot{E}+B\dot{E}=F_e-F_d \tag{3}$$

由于工作环境的不确定性，所以只能取环境位置的估计值 X_e' 以及不确定性 ΔX_e，于是定义 $\Delta X_e=X_e'-X_e$，$E'=E-\Delta X_e$，由式(3)得出

$$M\ddot{E}'+B\dot{E}'=F_e-F_d \tag{4}$$

为了减少机械臂末端与环境接触时的接触力误差，在式(4)中加入一个自适应补偿项 Ω，确保接触力误差的稳定性：

$$M\ddot{E}'+B(\dot{E}'+\Omega)=F_e-F_d \tag{5}$$

式中，Ω 可写成

$$\Omega(t)=\Omega(t-\lambda)+\eta\frac{F_d(t-\lambda)-F_e(t-\lambda))}{B}$$

其中，λ 为采样周期；η 为自适应更新率，且 $\eta>0$ 要求满足 $0<\eta<\dfrac{\lambda b}{\lambda b+m}$，$b$ 和 m 分别为 B 和 M 矩阵中相应的元素[7]。

为了得出自适应阻抗控制的规律，将式(1)的机械臂动力学方程改为

$$\hat{D}\ddot{\alpha}(t)+\overline{H}(t)=\tau(t) \tag{6}$$

式中：$\overline{H}(t)=H(t)+\tau_f(t)+\tau_e(t)+(D-\hat{D})\ddot{\alpha}(t)$；$\hat{D}$ 表示 D 的估计值。

在实际应用中，$\ddot{\alpha}(t)$ 和 $\tau(t)$ 的值很难得到，所以使用前一时刻的 $\tau(t-\lambda)$、$\ddot{\alpha}(t-\lambda)$ 代替 $\tau(t)$、$\ddot{\alpha}(t)$。令 $\hat{H}$ 为 $\overline{H}$ 的估计值，由式(6)可以得到

$$\hat{H}(t)=\overline{H}(t-\lambda)=\tau(t-\lambda)-\hat{D}\ddot{\alpha}(t-\lambda) \tag{7}$$

由式(6)和式(7)可知

$$\hat{D}u(t)+\hat{H}(t)=\tau(t) \tag{8}$$

式中，$u(t)=\alpha(t)=J^{-1}(\ddot{X}-\dot{J}\dot{\alpha})$，$\boldsymbol{J}$ 为雅克比矩阵。

通过上述公式得出自适应阻抗控制的规律为

$$\hat{D}J^{-1}(\ddot{X}-\dot{J}\dot{\alpha})+\tau(t-\lambda)-\hat{D}\ddot{\alpha}(t-\lambda)=\tau(t) \tag{9}$$

根据式(9)得到自适应阻抗控制系统结构如图 1 所示。

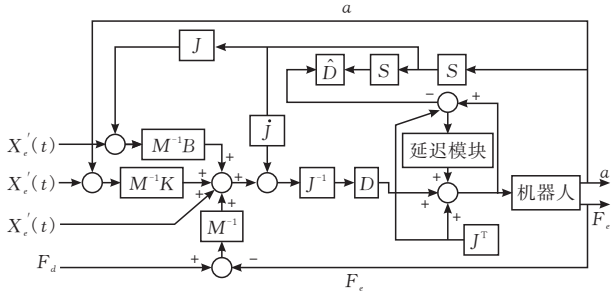

图 1 自适应阻抗控制系统结构

利用数学建模构建的机械臂动力学方程，能够在仿真环境中实现对机械臂的精确控制。然而在实际应用场景中，由于系统的复杂性、干扰因素的不确定性等原因，很难得到精确的动力学模型，所以选取简化的相连二连杆机械臂[8]对其进行研究。二连杆机械臂模型如图 2 所示。

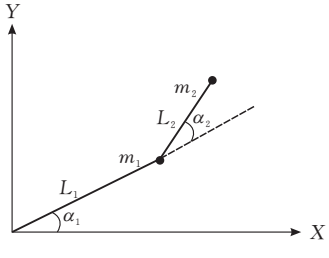

图 2 二连杆机械臂模型

为了便于在仿真中选取合适的 α 值，通过惯性矩阵得出两连杆机械臂的关节角度 α 变化范围，通过文献[8]可知两连杆机械臂的惯性矩阵

$$\boldsymbol{D}(\alpha)=\begin{bmatrix}D_{11}(\alpha) & D_{12}(\alpha)\\ D_{21}(\alpha) & D_{22}(\alpha)\end{bmatrix} \tag{10}$$

其中：$D_{11}(\alpha)=m_2L_2^2+2m_2L_1L_2\cos(\alpha_2)+(m_1+m_2)L_1^2$；$D_{12}(\alpha)=D_{22}(\alpha)=m_2(L_2^2+L_1L_2\cos(\alpha_2))$；$D_{22}(\alpha)=m_2L_2^2$。

自适应阻抗控制系统虽在接触力控制领域应用广泛，但机械臂末端接触力控制精度和稳定性不足，导致系统动态信息难以分析。在未知环境下，机械臂工作时需重新调整自适应阻抗控制中的 M、B、K 3 个参数以适应环境变化。针对这一问题，选用 WOA 算法对 M、B、K 3 个参数进行优化。

2　WOA 算法

WOA 算法采用随机或者最佳搜索代理模拟捕食行为，并使用螺旋运动轨迹模拟鲸鱼的气泡网攻击机制。该算法主要分为 3 个阶段：围捕机制、气泡网攻击机制和探索阶段（寻找猎物）[9]。假设：鲸鱼种群数量为 N，搜索空间为 d 维，第 i 只鲸鱼在 d 维空间的位置为 $X_i=(X_i^1,X_i^2,X_i^3,\cdots,X_i^d)$，$i=1,2,3,\cdots,N$，猎物的位置表示问题的全局最优解。

2.1　围捕机制

在 WOA 算法中，假设目标猎物为当前的最优位置，其他鲸鱼个体向当前最优个体的位置移动。更新鲸鱼位置的计算表达式如下：

$$D=|2r_2\cdot X_{\text{rand}}(t)-X(t)| \tag{11}$$

$$X(t+1)=X_{\text{rand}}(t)-A\cdot D \tag{12}$$

$$A=2ar_1-a \tag{13}$$

$$a=2-\frac{2t}{T_{\max}} \tag{14}$$

其中：t 为当前的迭代次数；$X(t)$为当前鲸鱼个体的位置；$X_{\text{rand}}(t)$为当前获得的最佳解；D 为当前获得的最佳解与当前鲸鱼个体位置之间的距离；r_1 和 r_2 为[0,1]中的任意值；a 为收敛因子，在迭代过程中从 2 到 0 呈线性递减；$T_{\max}$为最大迭代次数。

2.2　气泡网攻击机制

鲸鱼循螺线轨迹，借气泡阵列捕食，数学模型表示为：

$$X(t+1)=D'e^{fk}\cos(2\pi k)+X_{\text{best}}(t) \tag{15}$$

$$D'=|X_{\text{best}}(t)-X(t)| \tag{16}$$

式中：D'为鲸鱼个体到最佳位置鲸鱼个体间的距离；常数 f 为鲸鱼的螺旋运动；常数 k 为在[−1,1]范围内的任意值；X_{best}为当前鲸鱼群中最佳位置的鲸鱼个体。

鲸鱼沿着螺旋形路径游动，同时在猎物周围形成一个不断缩小的圈子。为了对这种情况进行建模，假设在螺旋模型优化或收缩包围机制（用于更新鲸鱼位置）过程中，鲸鱼数量发生变化的可能性为 50% [10]，则其数学模型表示为：

$$X(t+1)=\begin{cases}X_{\text{rand}}(t)-A\cdot D, & q<0.5\\ D'e^{fk}\cos(2\pi k)+X_{\text{best}}(t), & q\geqslant 0.5\end{cases} \tag{17}$$

式中，q 是[0,1]中的任意随机数。

2.3　探索阶段（寻找猎物）

鲸鱼在搜寻猎物时，会通过观察其他鲸鱼的位置变化，调整自身行动路径。因此，A 在超出范围(−1,1)之外时，它具有随机值，使鲸鱼不会陷入局部最优。为了加强探索，当 $|A|\geqslant 1$，鲸鱼个体会向着当前位置最优的鲸鱼靠近。探索阶段的数学模型可表示为

$$D=|R\cdot X_{\text{best}}(t)-X(t)| \tag{18}$$

$$X(t+1)=X_{\text{best}}(t)-A\cdot D \tag{19}$$

在 WOA 算法中，参数 $|A|$ 影响着算法的搜索能力。当参数 $|A|\geqslant 1$ 时，算法是以概率值为 0.5 来进行随机的全局探索；当 $|A|<1$ 时，算法是进行鲸鱼个体的局部搜索[11]。搜索系数 A 的自适应变化策略，使得 WOA 算法拥有良好的探索能力以及平衡全局探索和局部搜索能力。但是正是由于 A 的随机机制，使得 WOA 算法存在容易陷入局部最优。

3　自适应权重 WOA 算法

在 WOA 算法中，$|A|$ 的大小是由收敛因子 a 决定的，因此 a 的迭代过程对算法的优化结果影响巨大。为了减少收敛因子 a 对鲸鱼算法性能的影响，选用一种非线性调整策略，其公式如下：

$$a=\begin{cases}\dfrac{T_{\max}^2}{4}\times\left[\left(t-\dfrac{T_{\max}}{2}\right)^2+1\right], & t\leqslant\dfrac{T_{\max}}{2}\\ \dfrac{T_{\max}^2}{4}\times(t-T_{\max})^2, & t>\dfrac{T_{\max}}{2}\end{cases} \tag{20}$$

为了减少 WOA 算法在寻优时陷入局部最优的可能性，本文提出一种自适应权重策略，提高了 WOA 算法跳出局部最优的能力，其定义如下：

$$\omega(t)=2\cos\left(\frac{\pi t}{2T_{\max}}\right)-1 \tag{21}$$

因此，引入新的自适应权重因子 ω 后的式(17)更新为

$$X(t+1)=\begin{cases}X_{\text{rand}}(t)-\omega\cdot A\cdot D, & q<0.5\\ \omega\cdot D'\cdot e^{fk}\cdot\cos(2\pi k)+X_{\text{best}}(t), & q\geqslant 0.5\end{cases} \tag{22}$$

在算法中引入自适应权重调整策略后，系统能够根据鲸鱼种群的实时分布状态动态调整权重参数。这种自适应权重机制主要由两个阶段构成：在全局搜索阶段，当算法迭代次数超过阈值时，权重参数会自动降低以扩大搜索范围；在局部开发阶段，当检测到种群陷入局部最优时，权重参数会相应提高以增强局部搜索能力。这两个阶段的权重变化曲线并非预先设定，而是根据种群多样性指标实时计算得出。通过这种设计，改进后的 WOA 算法在保持快速收敛特性的同时，能够有效避免局部最优陷阱，显著提升了算法在复杂优化问题中的求解性能。

4　自适应权重 WOA 算法优化自适应阻抗控制参数

在这里使用的自适应权重 WOA 算法主要是为了优化自适应阻抗控制算法中的 M，B，K 3 个阻

抗控制参数。该算法通过不断更新鲸鱼个体的位置，提升自适应阻抗控制算法的控制能力。适应度函数决定了鲸鱼个体的最优位置，采用函数如下：

$$J = \cos(\sqrt{e^2 + \varphi u^2}) \tag{23}$$

式中：e 为接触力跟踪误差，对应着自适应阻抗控制器中的 ΔF，ΔF 是实际接触力与期望接触力的误差；u 为位置跟踪误差，对应着自适应阻抗控制器中的 ΔX，ΔX 是 X 方向上的实际位置和期望位置的跟踪误差；φ 是常数，取值范围在(0,1)之间[12]。

图 3 为自适应权重 WOA 的寻优流程，自适应权重 WOA 与 Simulink 的连接桥梁是鲸鱼个体(自适应阻抗控制参数)和该鲸鱼个体对应的适应度值(控制系统的性能指标)。

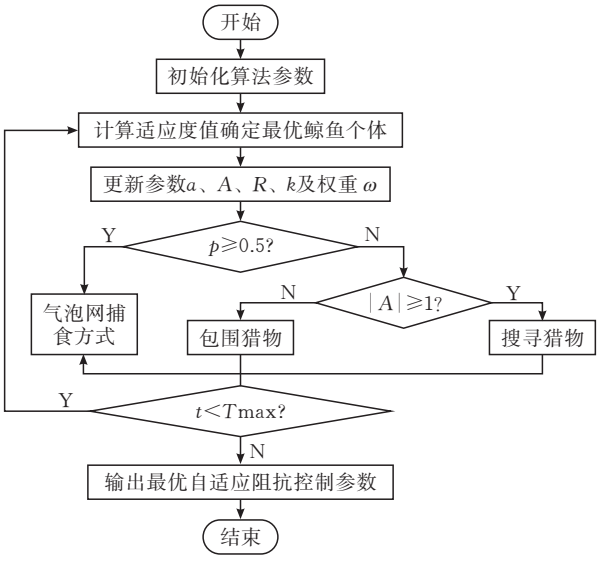

图 3 自适应权重 WOA 的流程

为了使改进 WOA 算法中的主函数与适应度函数相连接，需要使用 Assignin 函数赋值给Simulink 仿真模型中的 M，B，K 3 个阻抗控制参数，然后进行离线运算，最后得出优化后的阻抗控制参数。

5 基于自适应权重 WOA 的机械臂接触力跟踪仿真及实验

对设计的自适应阻抗控制器利用 Matlab/Simulink 软件进行仿真。在仿真模型中设置 $M=1$，$B=10\ 000$，$K=0$，X 方向上的环境刚度 $K_e=4000$，$\eta=0.02$，仿真时间 2 s。假设 X 方向的期望接触力为 20 N，期望位置 $X_d=0.87$ m，环境位置 $X_e=0.86$ m。仿真自适应权重 WOA 算法中的种群规模为 30，迭代次数为 30，参数维度设置为 3。M，B，K 三个参数范围的下限为 $L_b=[0,40,300]$，上限为 $U_b=[10,200,700]$。为方便对设计的模型进行分析，仿真只对 X 方向上的接触力进行阻抗控制参数寻优。

在 Simulink 中设置二连杆机械臂的关节质量 $m_1=m_2=1$ kg；机械臂关节长度为 $L_1=L_2=1$ m。将这些参数代入式(10)得出：

$$\boldsymbol{D}(\alpha)=\begin{bmatrix}3+2\cos(\alpha_2) & 1+\cos(\alpha_2)\\ 1+\cos(\alpha_2) & 1\end{bmatrix} \tag{24}$$

由 $|\boldsymbol{D}(\alpha)-\lambda E|=0$ 求解出二连杆机械臂的惯性矩阵 $\boldsymbol{D}(\alpha)$ 的特征值为：

$$\lambda = 2+\cos(\alpha_2)\pm\sqrt{2}(1+\cos(\alpha_2)) \tag{25}$$

得出最小特征值为 $\gamma=3-2\sqrt{2}\approx 0.172$，估计矩阵 $\hat{\boldsymbol{D}}=\begin{bmatrix}\beta & 0\\ 0 & \beta\end{bmatrix}$，且 $0<\beta<2\gamma$ [13]，因此得出 β 的取值范围为(0,0.344)。在仿真模型中将 β 的值设置为 0.1，基于自适应权重的 WOA 和 WOA 的迭代曲线如图 4 所示。

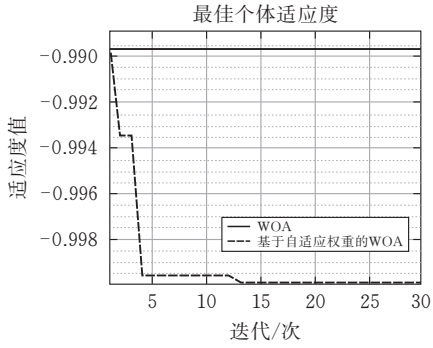

图 4 适应度值的迭代曲线

由图 4 可以看出，不加自适应权重的 WOA 陷入了局部最优，而基于自适应权重的 WOA 迭代次数达到 13 时，适应度值趋于稳定，没有陷入局部最优，此时选取的 M，B，K 3 个参数的值为最优值。由 Matlab 计算的结果得出，自适应权重的 WOA 算法寻得的 3 个最优参数分别为 $M=2.3038$，$B=99.5624$，$K=425.6404$。

将这 3 个参数分别代入基于自适应权重的 WOA 自适应阻抗控制模型和常规自适应阻抗控制模型中，得出 X 方向上的机械臂末端曲线(图 5 和图 6)。

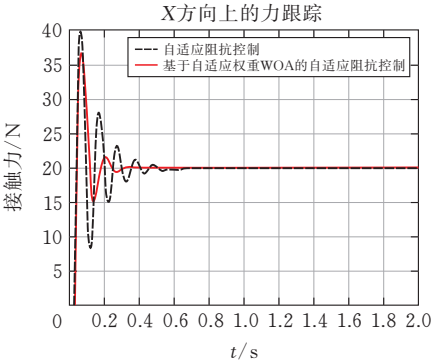

图 5 X 方向上的接触力跟踪

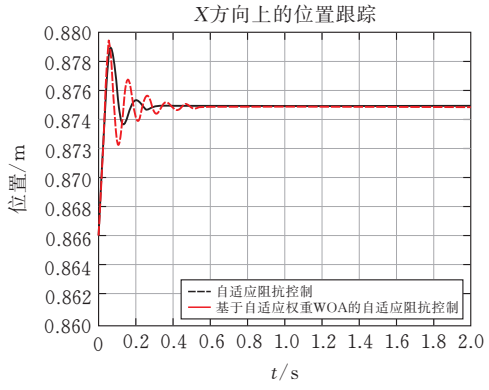

图 6　X 方向上的位置跟踪

通过图 5 和图 6 得出，基于自适应权重的 WOA 的自适应阻抗控制比自适应阻抗控制的力波动更小，趋于稳定的时间更短，降低了力跟踪误差和位置跟踪误差，提高了力跟踪和位置跟踪的控制精度。对本系统使用粒子群算法寻优得到阻抗控制参数[14]分别为 $M=1.5261$，$B=196.3492$，$K=483.6618$，再使用比较整定法[15]寻优得到阻抗控制参数分别为 $M=1$，$B=50$，$K=625$。将上述 3 种优化算法寻优得出的阻抗控制参数引入到自适应阻抗控制器中进行仿真实验，观察上述 3 种优化算法稳定达到 20 N 期望接触力的曲线对比，得到 X 方向上的力跟踪曲线对比（图 7）和位置跟踪曲线对比（图 8）。

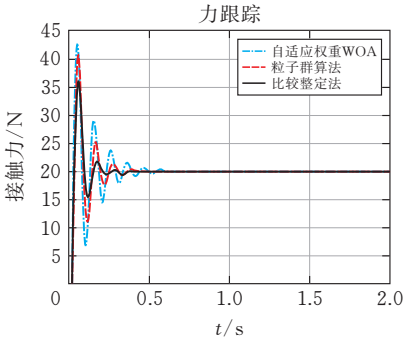

图 7　接触力跟踪曲线对比

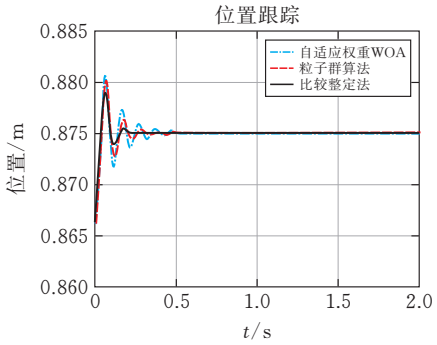

图 8　位置跟踪曲线对比

由图 7 和图 8 得出，粒子群算法得出的曲线在 0.607 s 时趋于稳定状态，遗传算法得出的曲线在 0.716 s 趋于稳定状态，而自适应权重 WOA 算法在 0.371 s 后达到稳定状态。实验结果表明，接触力在达到稳定状态时，自适应权重 WOA 算法比粒子群算法快 0.236 s，比遗传算法快 0.345 s，并且振荡次数更少。

为进一步验证本文自适应阻抗控制方法的有效性，进行了力跟踪控制实验（图 9）。以汽车玻璃为实验对象，机械臂末端以期望接触力大小为 20 N 的恒力在汽车玻璃上进行运动，所采用的控制方式分别为传统阻抗控制和基于自适应权重 WOA 的机械臂自适应阻抗控制。在传统阻抗控制时，实际接触力响应曲线如图 10 所示。从图中可知实际接触力波动范围在 21～24 N 区间内，与期望接触力 20 N 偏离较大。在实验中加入基于自适应权重 WOA 的机械臂自适应阻抗控制时，实际接触力响应曲线如图 11 所示。实际接触力的波动范围在 19～21 N 区间内，降低了实际接触力的跟踪误差；与传统阻抗控制的接触力相比较，提高了接触力跟踪控制精度。



图 9　力跟踪控制实验

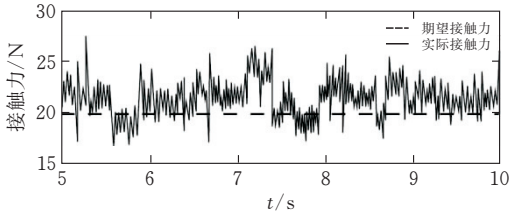

图 10　优化前接触力跟踪实验结果

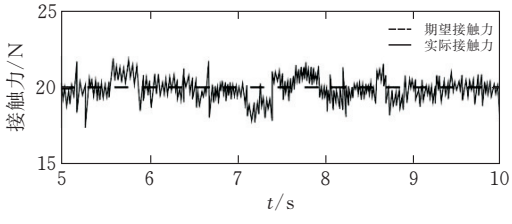

图 11　优化后接触力跟踪实验结果

6　结论

本文提出一种基于自适应权重鲸鱼优化算法的机械臂接触力跟踪控制方法，旨在解决未知环境刚度下阻抗控制参数的选择难题。该方法通过自适应权重 WOA 算法对阻抗控制参数进行动态调整，有效提升了接触力控制精度。仿真与实验结果表明，相较于传统阻抗控制方法，本文所提控制方法的力超调量显著降低，实际接触力波动范围大幅缩小，实

际接触力能够更精准地接近期望接触力，且跟踪过程平稳，最大波动控制在 ±1 N 以内，显著减小了恒力跟踪误差。研究成果对机械臂在打磨、抛光、装配等实际应用场景中的接触力精确控制具有重要参考价值。

[参 考 文 献]

[1] MENDES N, NETO P. Indirect adaptive fuzzy control for industrial robots: A solution for contact applications[J]. Expert Systems With Applications, 2015, 42(22): 8929-8935.

[2] 张俊鑫，陈威，黄斯凯，等. 基于力位混合导向的工业机械臂顺槽运动控制策略研究[J]. 中国机械工程，2022(01)：1-9.

[3] 唐康峻，王志刚，郭宇飞，等. 基于神经网络的打磨机械臂的力/位混合控制[J]. 组合机床与自动化加工技术，2021,566(04)：121-125.

[4] 金玉阳，田忠武，李凯，等. 基于阻抗控制的飞机清洗臂主动柔顺控制研究[J]. 机械设计，2022，39(02)：84-89.

[5] MIRJALILI S, LEWIS A. The Whale Optimization Algorithm [J]. Advances in Engineering Software, 2016, 95 : 51-67.

[6] 顾涛，万佑红. 关节一体化机器人动力学与阻抗控制算法研究[J]. 机械设计与制造，2017，321(11)：259-262.

[7] 李铁军，张改萍，杨冬，等. 关于幕墙安装机械臂的力控制算法性能分析[J]. 机械设计与制造，2018，333(11)：154-157.

[8] 尹恒健，倪受东. 擦玻璃机械臂的自适应阻抗控制研究[J]. 机械设计与制造，2022 (07)：270-274.

[9] 孔芝，杨青峰，赵杰，等. 基于自适应调整权重和搜索策略的鲸鱼优化算法[J]. 东北大学学报(自然科学版)，2020，41(01)：35-43.

[10] 张君. 基于 WOA-FOPID 算法的钻锚机械臂机械臂运动控制研究[J]. 煤炭科学技术，2022，50(06)：292-302.

[11] 武泽权，牟永敏. 一种改进的鲸鱼优化算法[J]. 计算机应用研究，2020，37(12)：3618-3621.

[12] 周晓东，任天助，张激扬，等. 基于粒子群算法的阻抗控制在机械臂柔顺控制中的应用[J]. 空间控制技术与应用，2016，42(03)：15-20.

[13] 曹家勇，李娜，姚淳哲，等. 面向打磨机械臂的模糊自适应阻抗控制算法[J]. 现代制造工程，2020，476(05)：77-84.

[14] 张明瑞. 基于阻抗控制的机械臂跟踪控制研究[D]. 南京：南京信息工程大学，2022.

[15] 刘哲，邹涛，孙威，等. 结合实时优化遗传算法的磨削机械臂阻抗控制[J]. 控制理论与应用，2018，35(12)：1788-1795.

Contact Force Tracking Algorithm of Manipulator Based on Adaptive Weight WOA

WANG Siyu[1,2], HE Feiyu[3], HE Tao[1,2]

(1 *School of Mechanical Engineering, Hubei Univ. of Tech., Wuhan* 430068, *China*;
2 *Key Laboratory of Modern Manufacturing Quality Engineering, Hubei Province, Wuhan* 430068, *China*;
3 *Hubei Institute of Product Quality Supervision and Inspection, Ezhou* 436032, *China*)

Abstract: In order to improve the control accuracy of the contact force tracking at the end of the manipulator, the adaptive impedance control Algorithm was studied and an adaptive impedance controller was established. The adaptive impedance control parameters were optimized by using the adaptive weight WOA (Whale Optimization Algorithm) algorithm. A contact force control method of the manipulator based on the adaptive weight Whale Optimization Algorithm (WOA) was proposed. This method aimed to optimize the inertia coefficient M, damping coefficient B, and stiffness coefficient K. When the environment or contact force changed, the tracking contact force was adjusted to maintain the contact force at the set expected value. Simulation and experimental results show that the proposed method improves the tracking control accuracy of the contact force when the end of the manipulator is in contact with the environment. Compared with the traditional impedance control, the proposed control method has smaller overshoot, faster convergence rate, and significantly reduces the tracking error of the actual contact force. The maximum error of the actual contact force control is within ±1 N, which has good stability and effectiveness.

Keywords: robotic arm ; Whale Optimization Algorithm ; adaptive impedance control ; force tracking; adaptive weight

[责任编校：张 众]