

基于遗传算法的直驱 SCARA 机器人臂长优化设计*

刘吉柱, 王淑浩, 章晓旗, 沈琪, 潘明强, 王阳俊, 孙立宁

(苏州大学机电工程学院 苏州, 215131)

摘要 由于选择顺应性装配机器人手臂(selective compliance assembly robot arm, 简称 SCARA) 机器人关节驱动链过长, 无法满足电子芯片等制造行业高速、高精度的要求, 因此提出了一种直驱 SCARA 机器人, 其特点是结构简单、消除了中间传动环节, 代替了传统的伺服电机加减速器驱动的方式。同时, 针对直驱关节转矩脉动较大、影响机器人端部稳定性的问题, 提出了一种优化和设计思路, 对于机器人的整体结构和参数进行了优化。在确定了 SCARA 机器人最大运动范围之后, 分别建立了速度评价函数和刚度评价函数, 以速度、刚度性能函数为适应性函数, 采用多目标遗传算法对臂长进行优化。臂长优化前后的实验对比显示, 优化前关节联合速度最大为 3.9 m/s, 优化后关节联合速度最大为 4.6 m/s, 有较大的提升。通过仿真发现: 在末端载荷相同的情况下, 优化后的形变量更小; 优化前重复定位精度为 ± 0.0105 mm, 较之传统 SCARA 机器人的重复定位精度已有一定提升, 优化后重复定位精度进一步提高为 ± 0.009 mm。仿真与实验结果证明, 遗传算法优化有效解决了 SCARA 机器人端部稳定性问题, 能明显提升机器人关节运动速度。

关键词 直驱; 选择顺应性装配机器人手臂机器人; 遗传算法; 臂长优化

中图分类号 TH12

引言

SCARA 机器人因为自身的灵活性、简便的操作、紧凑的结构和较大的工作空间等特点, 受到自动化生产线的青睐, 使其朝着高速和高精度应用的方向发展^[1]。目前, SCARA 机器人通常由伺服电机加减速器驱动, 如果装配尺寸链过长, 则减速器的齿隙会影响动态响应和重复定位^[2]。Denso HSR 系列的 SCARA 机器人的重复定位精度最高可达 ± 0.015 mm, 但由于内部结构紧凑, 导致装配困难^[3]。史陶比尔 TP80 系列 SCARA 机器人被用于各种小负载和轻微负载的工作环境, 但每次重复动作定位精度约为 ± 0.05 mm^[4]。虽然不同公司的 SCARA 机器人在性能和设计上各有千秋, 但在传动结构上大同小异, 很难实现高速与高精度的目标。

为了满足机器人高速高精度的特性, 贾帅^[5]设计了一种直驱电机, 用于驱动 7 轴机器人, 提高了工业机器人的控制精度。Gosselin 等^[6]分析了机械手末端刚度矩阵的最小奇异值, 并将其作为刚度性能的指标函数来优化机器人的手臂长度。丁渊明等^[7]以机械手特定工作区域的能耗为性能指标, 利用遗传算法对串行机械手的结构参数进行优化。对于多

轴机械手, 也有许多的经典优化设计方法, 例如启发式算法、序列二次规划法和蒙特卡洛法等^[8-10]。

笔者基于直驱的理念, 提出了一种直驱式结构的 SCARA 机器人, 简化了操作手结构, 并提出了一种基于遗传算法的直驱结构 SCARA 机器人臂长优化方法。首先, 通过计算前臂和后臂的等效转动惯量, 推导出速度性能评价的目标函数; 其次, 通过计算机器人的雅可比矩阵和末端刚度矩阵, 得到刚度性能评价的目标函数; 最后, 利用遗传算法对前臂和后臂的长度进行优化, 通过合理分配前臂和后臂的长度, 使前臂和后臂的等效转动惯量达到最佳平衡点, 改善了 SCARA 机器人的动态响应性能。

1 直驱 SCARA 机器人关节传动分析

1.1 关节传动分析

SCARA 机器人具有 4 个自由度, 分别为前臂与电机连接处关节的旋转、后臂与电机连接处关节的旋转, 末端运动器的旋转和移动。定义前臂旋转中心为 A 轴, 后臂旋转中心为 B 轴, 末端运动器的旋转中心为 C 轴, 移动参考坐标为 D 轴, C 和 D 同轴。3

* 国家重点研发计划资助项目(2022YFB4701004)

收稿日期: 2021-06-01; 修回日期: 2021-08-23

个旋转中心轴线相互平行,满足特定平面定位和定向的要求,而末端运动器沿着D轴移动解决了自身的升降问题^[11]。传统的SCARA机器人前臂与电机间的关节连接多采用伺服电机和谐波减速器配合的传动链,存在传动环节多、结构复杂和装备困难等问题。

笔者提出了使用力矩式电机代替伺服电机加减速器方式,设计一种结构较为简单的直驱式SCARA机器人,更少的传动环节能够有效降低传动误差;力矩电机自身也具有良好的低速稳定性和较宽的调速范围。力矩式电机的回转支撑结构由于具有相对较高的刚度,因此能够承受更大的径向力和轴向力。图1为直驱SCARA机器人三维模型。

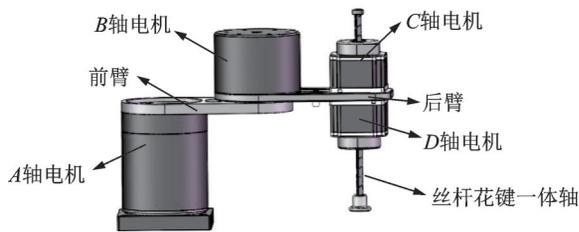


图1 直驱SCARA机器人三维模型

Fig.1 3D model of the direct-driven SCARA robot

为满足工业需求,笔者设计的SCARA机器人主要技术参数如表1所示。

表1 SCARA机器人主要技术参数

Tab.1 Main design parameters of the SCARA robot

参数	运动部件	
	前臂	后臂
运动范围/(°)	±180	±140
最大速度/(r·min ⁻¹)	100	100
臂展/mm	250	250
重复定位精度/mm	±0.01	±0.01

1.2 机器人关节动力学建模

图2为直驱SCARA机器人的简化示意图。其中:A、B分别为SCARA机器人的前臂、后臂与电机连接处的旋转中心轴; L_1 、 L_2 分别为前臂和后臂臂长; E 和 F 分别为前臂和后臂的质心; h_1 和 h_2 分别为 E 和 F 距离A轴和B轴的距离; m_1 和 m_3 分别为前臂和后臂的质量; m_2 为B轴上的电机质量; m_4 为末端运动器整体质量。

拉格朗日法以系统能量作为基础,可以设计和建立一个关于机器人的数学模型。笔者提出的机器人拉格朗日函数 L 为

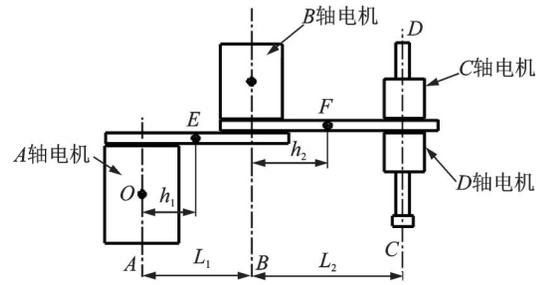


图2 直驱SCARA机器人的简化示意图

Fig.2 Simplified schematic diagram of the direct-driven SCARA robot

$$L = K - P \quad (1)$$

其中: K 为所建系统的动能; P 为所建系统的势能。

根据D-H参数选择SCARA机器人广义坐标 $q = (\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)$,所受的广义力公式为

$$F = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} \quad (2)$$

$$F_i = \frac{d}{dt} \frac{\partial K}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial K}{\partial q_i} + \frac{\partial P}{\partial q_i} \quad (3)$$

其中: q_i 为 K 和 P 的广义坐标; \dot{q}_i 为广义坐标的一阶导数,对应运动速度; F_i 为广义坐标对应的广义力。

由图2可知,SCARA机器人的结构将4个自由度简化为2个自由度,忽略末端运动器通过丝杆的旋转和升降,将末端运动器看作整体,作为后臂的一部分。对前臂与电机连接处和后臂与电机连接处所在关节,即A轴和B轴所在关节进行动力学计算,按照拉格朗日法^[12]得到

$$\tau = H(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) \quad (4)$$

其中: τ 为力矩矩阵,表示直驱电机对系统的输入力矩; $H(q)$ 为惯性矩阵,为该系统运动时所受的惯性力; $C(q, \dot{q})$ 为系统的离心力和科氏力矩阵,表示系统在运动时所受相对应的2个力; $G(q)$ 为重力矩阵,代表了系统自身所受重力。

由图2可知,SCARA机器人为平面关节型机器人,重力对A轴和B轴上关节的影响很小,所以省略 $G(q)$,将式(4)展开为

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\text{其中: } H_{11} = \frac{1}{3} m_1 l_1^2 + m_2 \left(\frac{1}{3} l_1^2 + l_2^2 + l_1 l_2 c_2 \right) + (m_3 + m_4)(l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 c_2) + \frac{1}{2} m_4 r^2;$$

$$H_{22} = \frac{1}{3} m_2 l_2^2 + (m_3 + m_4) l_2^2 + \frac{1}{2} m_4 r^2;$$

$$H_{21} = H_{12} = \left(\frac{1}{3} m_2 + m_3 + m_4 \right) l_2^2 + \left(\frac{1}{2} m_2 + m_3 + \right)$$

$$m_4)l_1l_2c_2 + \frac{1}{2}m_4r^2;$$

$$C_{11} = -\left(\frac{1}{2}m_2 + m_3 + m_4\right)l_1l_2S_2\dot{q}_2;$$

$$C_{12} = -\left(\frac{1}{2}m_2 + m_3 + m_4\right)l_1l_2(S_2\dot{q}_1 + C_2\dot{q}_2);$$

$$C_{21} = \left(\frac{1}{2}m_2 + m_3 + m_4\right)l_1l_2C_2\dot{q}_1; C_{22} = 0。$$

1.3 模型简化验证

给定相同的运动轨迹^[13],对比简化前后A,B轴上连接关节的力矩大小。简化前有4个自由度同时运动,简化后有2个自由度,即C,D轴上的自由度。设置各运动关节的轨迹 $q_d = 1 - \cos(0.5\pi t)$,仿真时间为1s。图3为简化前后前臂与电机关节(A轴)的力矩对比。图4为简化前后后臂与电机关节(B轴)的力矩对比。

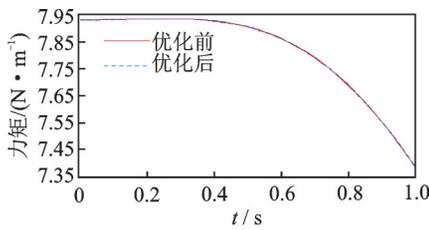


图3 简化前后前臂与电机关节(A轴)的力矩对比

Fig.3 Comparison of torque between forearm and motor joint (A-axis) before and after simplification

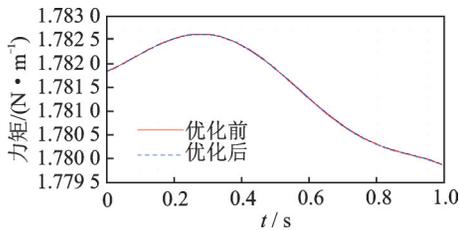


图4 简化前后后臂与电机关节(B轴)的力矩对比

Fig.4 Comparison diagram of torque between simplified front and rear arms and motor joint (B-axis)

由仿真结果可知,当后臂末端运动器上的2个自由度作为一个整体加载在后臂上时,和4个自由度的关节比较而言,前臂和后臂运动力矩基本不会受到影响。

2 构建目标函数

2.1 速度目标函数

当驱动电机的模型和最大工作范围确定后,SCARA机器人的工作速度主要取决于每个电机的负载,即电机轴的等效惯性矩。

2.1.1 转动惯量

将前臂和后臂分别看作为一个均质杆, r_1 和 r_2 分别为B轴上驱动电机和末端运动器上的电机半径; θ_1, θ_2 分别为前臂和后臂转角运动范围,同时 θ_2 也为前臂与后臂的夹角。各部分相对于A轴的转动惯量公式为

$$J_{1A} = \frac{1}{12}m_1L_1^2 + m_1h_1^2 \quad (6)$$

$$J_{2A} = m_2r_1^2 + m_2L_1^2 \quad (7)$$

$$J_{3A} = \frac{1}{12}m_3L_2^2 + m_3(h_2^2 + L_1^2 + 2h_2L_1\cos\theta_2) \quad (8)$$

$$J_{4A} = m_4r_2^2 + m_4(L_2^2 + L_1^2 + 2L_2L_1\cos\theta_2) \quad (9)$$

其中: J_{1A} 为前臂相对于A轴的转动惯量; J_{2A} 为B轴上的电机相对于A轴的转动惯量; J_{3A} 为后臂相对于A轴的转动惯量; J_{4A} 为末端运动器整体相对于A轴的转动惯量。

前臂和后臂均使用6061铝合金材料,计算得到质量与长度的关系为

$$\begin{cases} m_1 = 0.004L_1 \\ m_3 = 0.004L_2 \end{cases} \quad (10)$$

由式(6)~(10)得到SCARA机器人对A轴的总转动惯量,即A轴电机处的等效转动惯量 J_1 为

$$J_1 = \sum_{i=1}^4 J_{iA} \quad (11)$$

B轴电机处的等效转动惯量为

$$J_2 = \left(\frac{1}{12}m_3 + m_4\right)L_2^2 + m_3h_2^2 + m_4r_2^2 \quad (12)$$

2.1.2 最大速度模型

SCARA机器人A轴和B轴上2个关节理论合成的最高速度是当2个关节在一条直线时。设A,B处关节合成速度为 v ,A轴关节最高速度为 v_1 ,B轴关节最高速度为 v_2 ,则

$$v_1 = T_1L_1t/J_1 \quad (13)$$

$$v_2 = T_2L_2t/J_2 \quad (14)$$

$$v = v_1 + v_2 \quad (15)$$

其中: t 为加速度时间; T_1, T_2 分别为A轴和B轴上电机的输出力矩。

由式(13)~(15)得到

$$v = (L_1 + L_2)\frac{T_1}{J_1}t + L_2\frac{T_2}{J_2}t \quad (16)$$

2.2 刚度目标函数

SCARA机器人末端刚度性能直接影响其精度。对于给定的SCARA机器人最大工作范围,其刚度性能与前臂和后臂的长度有很大关系^[14]。

2.2.1 刚度矩阵

SCARA机器人有4个关节, k_i 表示第*i*个关节

的刚度。由于直驱电机应用于A、B两轴,所以可将与电机相连的传动轴的扭转刚度近似作为A、B轴2个关节的刚度,且该刚度矩阵为对角矩阵,记为

$$\mathbf{K}_q = \text{diag}(k_1, k_2, k_3, k_4) \quad (17)$$

根据机器人传动结构的特点和各主要传动件的扭转刚度经验公式,计算得到SCARA机器人关节刚度如表2所示。

通过D-H参数表,利用微分变换求得SCARA机器人的雅可比矩阵为 $\mathbf{J}^{[15]}$,得到末端刚度矩阵 \mathbf{K} 与关节刚度矩阵 \mathbf{K}_q 的关系为

$$\mathbf{K} = (\mathbf{J}^{-1})^T \mathbf{K}_q \mathbf{J}^{-1} \quad (18)$$

其中: $s_{12} = \sin(\theta_1 + \theta_2)$; $c_{12} = \cos(\theta_1 + \theta_2)$;

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} -a_2 s_{12} - a_1 s_1 & -a_2 s_{12} & 0 & 0 \\ a_2 c_{12} + a_1 c_1 & a_2 c_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

表2 SCARA机器人关节刚度

Tab.2 Stiffness of the SCARA robot joints

关节	扭转刚度/(N·m·rad ⁻¹)
第1关节	$k_1 = 3.786 \times 10^{10}$
第2关节	$k_2 = 4.118 \times 10^{10}$
第3关节	$k_3 = 2.535 \times 10^{10}$
第4关节	$k_4 = 1.254 \times 10^{10}$

2.2.2 端部刚度定量评价方法

由于静刚度计算模型无法直接描述刚度与不同变量间的数值变量关系,因此考虑使用一种量化刚度模型计算的方法。机器人对于外力和机械变形的抵抗能力是机器人末端的机械刚性。根据胡克定律,机器人受力 F 与变形 D 满足

$$F = QD \quad (19)$$

其中: Q 为弹性系数。

为研究力和线性变形、力矩和扭矩之间的相互关系,根据量纲的不同将静刚度矩阵 Z 分块^[12],即

$$\begin{bmatrix} \mathbf{f} \\ \mathbf{n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{fd} & \mathbf{Z}_{f\sigma} \\ \mathbf{Z}_{nd} & \mathbf{Z}_{n\sigma} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{d} \\ \boldsymbol{\sigma} \end{bmatrix} \quad (20)$$

其中: \mathbf{f} 为末端运动器所受的力矢量; \mathbf{n} 为对应的力矩矢量; \mathbf{d} 为末端受线性力的变形; $\boldsymbol{\sigma}$ 为末端部分扭转后的变形; \mathbf{Z}_{fd} 为力-线性位移刚度矩阵; \mathbf{Z}_{nd} 为力矩-线性位移刚度矩阵; $\mathbf{Z}_{f\sigma}$ 为力-角度位移刚度矩阵; $\mathbf{Z}_{n\sigma}$ 为力矩-角度位移刚度矩阵。

鉴于SCARA机器人末端运动器主要承受线性力,选择 \mathbf{Z}_{fd} 的最小奇异值 λ 来衡量机器人末端的刚度性能, λ 越大,末端刚度性能就越好。由于雅可比

矩阵是关于旋转角度和其臂长之间的函数,所以 λ 和机器人的位姿密切相关。通过对 λ 进行优化,仅能得到机器人在某一位姿下的最大刚度的臂长。笔者借鉴Gosselin等^[6]提出的新型全局参数性能指标,引入参数 $\bar{\lambda}$, $\bar{\lambda}$ 代表机器人工作时的综合参数,以此作为刚度性能目标评价函数。

$$\bar{\lambda} = \frac{\int_W \lambda dW}{\int_W dW} = \frac{\int_{\varphi} \lambda d\theta_1 d\theta_2}{\int_{\varphi} d\theta_1 d\theta_2} \quad (21)$$

其中: W 为机器人的可达工作空间; φ 为机器人的可达工作角度。

3 遗传算法

遗传算法通过筛选最优个体来繁衍种群以获得问题的最优解^[16]。

3.1 适应度函数

本次优化模型包括速度性能和刚度性能2个指标。对于多目标函数的优化问题,使用权重系数变化法对其进行归一化处理。由式(16),(21)可得, $F(L_1, L_2) = \alpha v + \beta \bar{\lambda}$; α 和 β 定义为加权系数,且 $\alpha + \beta = 1$, α 和 β 的值一般根据经验法则和2个目标函数的重要性程度确定,这里 $\alpha = 0.4$, $\beta = 0.6$ 。优化模型为

$$\begin{aligned} \max &= F(L_1, L_2) \\ \text{s.t.} & \begin{cases} 88 \ll L_1 \ll 162 \\ L_1 + L_2 = 250 \end{cases} \end{aligned} \quad (22)$$

本研究中优化目标函数为非负函数值,且以求出该目标函数的最大值为目标,故使用目标函数作为个体的适应度函数。适应度函数为

$$f(L_1, L_2) = F(L_1, L_2) \quad (23)$$

3.2 边界约束条件

3.2.1 工作空间

通过计算前3个关节的运动可以确定SCARA机器人的工作空间,前臂和后臂在工作平面的运动决定了机器人的工作空间范围,末端垂直关节的运动使机器人在与工作平面平行的平面上能够达到相同的工作运动范围^[17]。文中SCARA机器人的前臂和后臂转角运动范围为 $\theta_1 \in [-180, 180]$, $\theta_2 \in [-140, 140]$ 。SCARA机器人工作空间的表达式为

$$\begin{cases} x = L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + L_1 \cos\theta_1 \\ y = L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + L_1 \sin\theta_1 \\ z = d_1 - d_3 \end{cases} \quad (24)$$

其中: L_1 为前臂长度; L_2 为后臂长度; d_1 为前臂距离底座的高度; d_3 为末端运动器升降距离。

3.2.2 约束条件

本研究中直驱 SCARA 机器人的臂展长度为 250 mm,为了使其能够满足工作要求,机器人环形工作区域的宽度 d 必须大于 140 mm。根据后臂的运动工作旋转幅度范围可知前臂和后臂的最小夹角为 40° ,根据几何关系^[18]计算得到

$$250 - \sqrt{L_1^2 + L_2^2 - 2L_1L_2\cos40^\circ} > 140 \quad (25)$$

求得 $L_1 \in [88, 162]$, 即在工作区域环宽为 140 mm 时,前臂的最小臂长为 88 mm,最大臂长为 162 mm。

图 5 为当前臂长为 88 mm 和 162 mm 时的机器人工作区域,圆环部分是工作可以到达的区域。

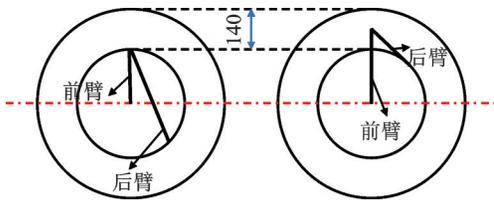


图 5 机器人工作区域(单位: mm)

Fig.5 Working area of the robot(unit: mm)

3.2.3 终止条件

在遗传算法计算过程中,当父代与子代之间的一个适应度阈值小于设定的适应度阈值时,适应度值就会趋于稳定,即可确立其为一个全局最佳的模型解^[19]。设笔者提出遗传算法的终止条件为:①父代与子代之间适应度小于设定阈值;②遗传代数达到最大遗传代数。使用 Matlab 编写适应度函数 $f(L_1, L_2)$,调用遗传算法工具包,随机生成种群规模为 50 的初始种群,设置遗传代数为 100,交叉概率为 0.9,变异概率为 0.05。输入边界约束条件矩阵,设置相关种群参数,求得每个个体的适应度函数值。图 6 为遗传算法优化过程,求得的最优个体优化结果如图 7 所示,取整得到 $L_1 = 114 \text{ mm}$, $L_2 = 136 \text{ mm}$ 作

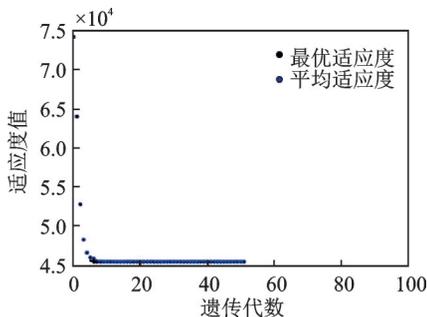


图 6 遗传算法优化过程

Fig.6 The process of genetic algorithm optimization

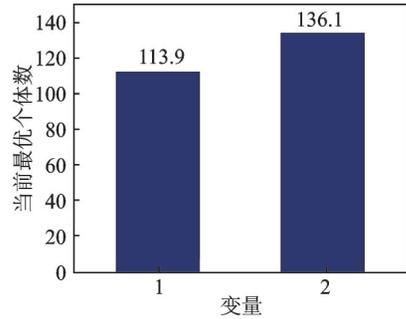


图 7 最优个体优化结果

Fig.7 The results of optimal individual optimization

为遗传算法优化后的臂长。

4 仿真与实验

根据遗传算法优化结果,选取一组优化前后的机械臂对比,如图 8 所示。

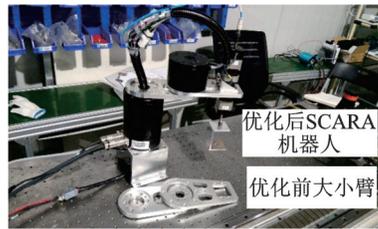


图 8 优化前后机械臂对比

Fig.8 Comparison of the robotic arms before and after the optimization

4.1 速度性能实验分析

本研究中 SCARA 机器人的工作速度是机械前、后臂速度的合成。本实验设计为 2 个阶段。第 1 阶段是前、后臂臂长优化前的速度检测实验,实验中调试前臂关节处的电机最大电流为 3 A,后臂电机电流为 4 A;第 2 阶段是前、后臂优化后的运动速度检测实验,在相同的 120° 工作范围内,调试前臂处电机最大实际工作电流为 3A,后臂为 4A。2 组实验所得优化前后的前、后臂速度曲线如图 9~12 所示。优化前后合成速度如表 3 所示。

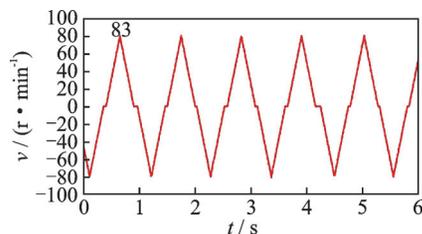


图 9 优化前前臂速度曲线

Fig.9 Forearm velocity before the optimization

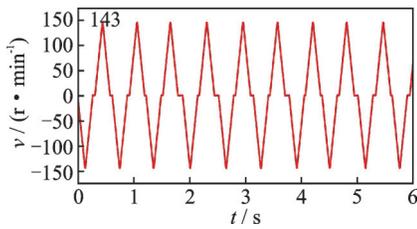


图 10 优化前后臂速度曲线

Fig.10 Upper arm velocity before the optimization

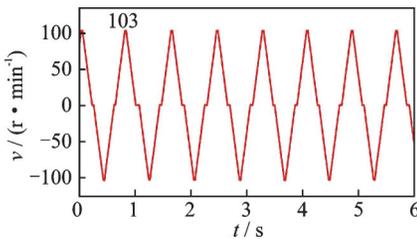


图 11 优化后前臂速度曲线

Fig.11 Forearm velocity after the optimization

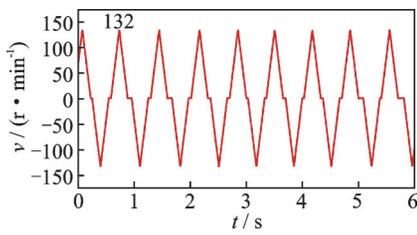


图 12 优化后后臂速度曲线

Fig.12 Upper arm velocity after the optimization

表 3 优化前后合成速度

Tab.3 The resultant speed before and after the optimization

状态	前臂速度/ (r · min ⁻¹)	后臂速度/ (r · min ⁻¹)	合成速度/ (m · s ⁻¹)
优化前	83	143	3.9
优化后	103	132	4.6

从表 3 可知,在相同条件下优化后,后臂的最大速度有所降低,前臂的最大速度增大,最终结果满足设计要求。通过计算前后臂的合成速度可知,优化后的合成速度更大,其动态性能有所提高,合成速度较优化前有了很大提升。

4.2 刚度特性模拟

前后臂电机规格参数如表 4 所示。末端负载力的大小需满足以下 2 个条件

$$\begin{cases} F_0 \leq T_1 / (L_1 + L_2) \\ F_0 \leq T_2 / L_2 \end{cases} \quad (26)$$

取安全系数为 1.2,得到最大负载约为 1.1 kg,在相同的条件下,利用 ANSYS 进行结构优化前后刚度性能的仿真分析。在末端施加 5 N 的垂直力,优化前后末

表 4 前后臂电机规格参数

Tab.4 The specification parameters of the upper arm and forearm motors

参数	前臂	后臂
外径/mm	110	110
高度/mm	150	113
电机总质量/kg	7.0	3.2
额定扭矩/(N·m)	6.2	1.9
峰值扭矩/(N·m)	18.6	5.8

端变形的仿真结果如图 13,14 所示。可以看出,优化前末端变形为 0.069 mm,优化后末端变形为 0.058 mm。前臂和后臂优化后的直驱 SCARA 机器人在相同负载下的末端变形比较小,静刚度更大,在一定程度上验证了遗传算法优化的准确性和有效性。

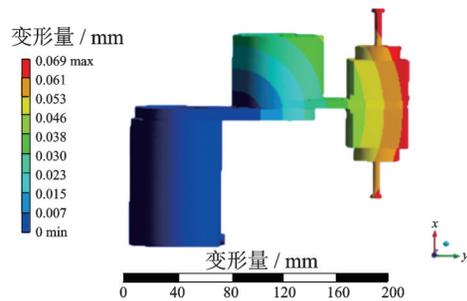


图 13 优化前末端形变

Fig.13 Terminal deformation before the optimization

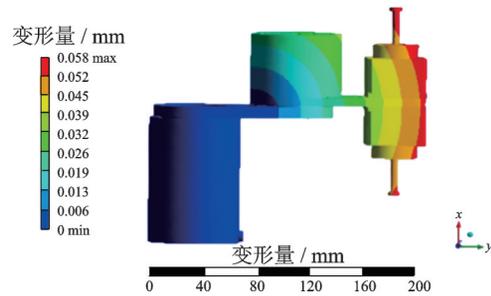


图 14 优化后末端形变

Fig.14 Terminal deformation after the optimization

4.3 重复定位精度测试

笔者优化设计的 SCARA 机器人应用于集成电路装配,其对重复定位精度要求很高,所以需要进一步验证其端部重复定位精度。图 15 为机器人本体与激光跟踪仪。

SCARA 机器人的运动空间为一个圆,前臂与电机连接处(A轴)的关节和后臂与电机连接处(B轴)的关节完成圆环平面定位,和垂直运动方向不相互耦合。笔者对这 2 个关节所在平面进行重复定位精度测试实验。完成机器人零位标定后,根据我国工业机器人性能测试国家标准 GB/T12642-2013 进行实验^[20],

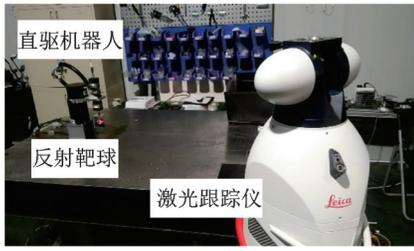


图 15 机器人本体与激光跟踪仪

Fig.15 Robot and laser tracker

使用激光跟踪仪进行末端位置的测量和数据采集,选择运动平面范围内尽可能大的内接长方形的 4 个顶点作为观察点,确定了测试点坐标,如表 5 所示。

表 5 测试点坐标

Tab.5 Coordinates of the tested points

位置	机器人坐标	跟踪仪坐标系
P_1	(197.2, -116.8)	(1 021.662, 4 518.324)
P_2	(191.8, -104.4)	(-1 004.699, 4 425.918)
P_3	(197.5, 102.9)	(-1 197.552, 4 362.576)
P_4	(93.1, 125.2)	(-1 247.443, 4 453.526)

具体的实验过程表述如下:在末端负载为 0.5 kg 条件下,机器人按 P_1, P_2, P_3, P_4, P_1 的顺序方向循环运动,移动速度为 2 m/s,且在每一个到达点上停留 1 s。利用激光跟踪仪对各点的坐标进行跟踪记录,连续测试 30 次,每一个测试点得到的数据都会组成一个二维平面的点集合^[20]。由点集合构造一个包围所有点的外部圆,重复定位精度定义如图 16 所示。圆心 (\bar{X}, \bar{Y}) 位于正中心,圆心半径 R 表征了机器人的末端重复定位精度。参考工业机器人性能测试的国家标准,计算公式分别为

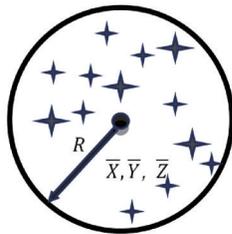


图 16 重复定位精度定义

Fig.16 Definition of the repeated positioning accuracy

$$R = \bar{D} + 3S_D \quad (27)$$

$$\bar{D} = \sum_{j=1}^N D_j / N \quad (28)$$

$$D_j = \sqrt{(X_j - \bar{X})^2 + (Y_j - \bar{Y})^2} \quad (29)$$

$$S_D = \sqrt{\sum_{j=1}^N (D_j - \bar{D})^2 / (N - 1)} \quad (30)$$

$$\bar{X} = \sum_{j=1}^N X_j / N \quad (31)$$

$$\bar{Y} = \sum_{j=1}^N Y_j / N \quad (32)$$

其中: (X_j, Y_j) 为第 j 次检测的坐标值; (\bar{X}, \bar{Y}) 为二维平面点集合中心处的坐标值; N 为测量次数,本次实验测量次数为 30。

对直驱 SCARA 机器人进行测试,优化前后重复定位精度及对比如表 6,7 和图 17 所示。

表 6 优化前重复定位精度

Tab.6 Repeated positioning accuracy before the optimization mm

位置	R	\bar{D}	S_D
P_1	0.016	0.008 5	0.002 6
P_2	0.012	0.006 0	0.002 0
P_3	0.019	0.006 9	0.003 9
P_4	0.021	0.008 9	0.003 9

表 7 优化后重复定位精度

Tab.7 Repeated positioning accuracy after the optimization mm

位置	R	\bar{D}	S_D
P_1	0.014	0.007 8	0.002 1
P_2	0.012	0.006 0	0.002 0
P_3	0.015	0.005 3	0.003 2
P_4	0.018	0.006 1	0.004 1

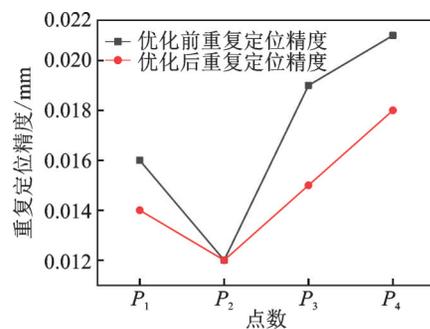


图 17 优化前后重复定位精度对比

Fig.17 Comparison of repeated positioning accuracy before and after the optimization

实验表明,重复定位精度最大值处均在 P_4 点,优化前为 $\pm 0.010 5$ mm,优化后为 ± 0.009 mm。可见,该 SCARA 机器人精度在优化后有一定提升。

5 结 论

1) 优化前关节联合速度最大为 3.9 m/s,重复

定位精度为 ± 0.0105 mm,较传统 SCARA 机器人的重复定位精度有一定提升。优化后最大关节联合速度、重复定位精度分别为 4.6 m/s 和 ± 0.009 mm,可见该优化方法的有效性,对提升 SCARA 机器人性能有一定帮助。

2) 采用直驱式 SCARA 机器人的负载与传统 SCARA 机器人相比降低了很多,可知直驱式 SCARA 机器人更适用于微型精密场合。

3) 影响 SCARA 机器人准确性和速度的因素很多,笔者仅从本体结构的角度考虑其优化设计,未来还需要考虑其他性能指标的影响,如动态特性、轨迹跟踪特性等。

参 考 文 献

- [1] 田闯. 工业机器人的现状及发展趋势研究[J]. 中国管理信息化, 2019, 22(20): 156-157.
TIAN Chuang. Research on the status quo and development trend of industrial robots[J]. China Management Informatization, 2019, 22(20): 156-157. (in Chinese)
- [2] 赵春, 王延杰, 张霖, 等. 高速轻型 SCARA 机器人的机械结构及控制系统研究进展[J]. 机电工程技术, 2019, 48(6): 5-11.
ZHAO Chun, WANG Yanjie, ZHANG Lin, et al. Research progress on the mechanical structure and control system of high speed and light SCARA robot[J]. Mechanical and Electrical Engineering Technology, 2019, 48(6): 5-11. (in Chinese)
- [3] 陈紫渝. 基于环境吸引域的移动机械臂移动装配规划及控制研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021.
- [4] 鲁飞. 基于改进蚁群算法的机械臂路径规划研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
- [5] 贾帅. 工业机器人直接电驱动技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2015.
- [6] GOSSELIN C, ANGELES J. The optimum kinematic design of a planar three-degree-of-freedom parallel manipulator[J]. Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, 1988, 110(1): 35-41.
- [7] 丁渊明, 王宣银. 串联机械臂结构优化方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(12): 2360-2364.
DING Yuanming, WANG Xuanyin. Optimization method of serial manipulator structure[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2010, 44(12): 2360-2364. (in Chinese)
- [8] CECCARELLI M, MATA V, VALERO F. Optimal synthesis of three-revolute manipulators[J]. Meccanica, 1994, 29(1): 95-103.
- [9] PANDA S, MISHRA D, BISWAL B B. Revolute manipulator workspace optimization: a comparative study[J]. Applied Soft Computing Journal, 2013, 13(2): 899-910.
- [10] RASTEGAR J, FARDANESH B. Geometric synthesis of manipulators using the Monte Carlo method[J]. Journal of Mechanical Design, 1990, 112(3): 450-452.
- [11] TROCHIMCZUK R, ŁUKASZEWICZ A, MIKOŁAJCZYK T, et al. Finite element method stiffness analysis of a novel telemanipulator for minimally invasive surgery[J]. Transactions of the Society for Modeling and Simulation, 2019, 95(11): 1015-1025.
- [12] 裴永超. 高速轻载直驱式四自由度平面关节机器人的研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2018.
- [13] 闫昊. SCARA 机器人动力学分析及鲁棒性控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [14] 陈世钟, 刘延遂, 吴品弘, 等. 基于刚度性能的机器人臂长优化[J]. 机械与电子, 2015, 33(6): 69-74.
CHEN Shizhong, LIU Yansui, WU Pinhong, et al. Arm link length optimization of robots based on stiffness performance[J]. Machinery & Electronics, 2015, 33(6): 69-74. (in Chinese)
- [15] CECCARELLI M, LANNI C. A multi-objective optimum design of general 3R manipulators for prescribed workspace limits[J]. Mechanism and Machine Theory, 2004, 39(2): 119-132.
- [16] 周明. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999: 54-58.
- [17] HE Y B, MAI X Q, CUI C Q. Dynamic modeling, simulation, and experimental verification of a wafer handling scara robot with decoupling servo control[J]. IEEE Access, 2019, 7: 47143-47153.
- [18] 沈琪. 磁齿轮复合电机直驱式 SCARA 机器人研制[D]. 苏州: 苏州大学, 2019.
- [19] 覃俊华, 张洪伟, 赵世政. 基于遗传算法的模糊聚类研究及其应用[J]. 计算机应用, 2007, 27(1): 58-61.
QIN Junhua, ZHANG Hongwei, ZHAO Shizheng. Fuzzy clustering analysis based on genetic algorithm and its application[J]. Computer Applications, 2007, 27(1): 58-61. (in Chinese)
- [20] 陈健. 面向动态性能的工业机器人控制技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.



第一作者简介:刘吉柱,男,1978年8月生,博士、副教授。主要研究方向为机器人轻量化、智能机器人系统、伺服电机及驱动控制。曾发表《一种永磁球形同步电机系统滑模控制方法研究》(《南京理工大学学报》2022年第46卷第2期)等论文。
E-mail: liu_jizhu@163.com