

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.12.017

四自由度 SCARA 机器人系统 机构设计及运动学分析*

王海峰,尹 彬,罗锐捷,王新刚
(东北大学秦皇岛分校 控制工程学院,河北 秦皇岛 066004)

摘要:针对所在机器人实验室通用实验平台的要求,在 SolidWorks 环境中建立了 4 自由度 SCARA 机器人三维模型,并制造出了 SCARA 机器人机械本体,对 SCARA 机器人传动方案、机械结构设计和运动学分析等方面进行了研究。在此基础上,基于 Monte Carlo 法完成了机器人工作空间计算,基于 D-H 参数法建立了 SCARA 机器人运动学模型,分析了机器人正逆向运动学方程;最后对 SCARA 机器人进行了 Matlab 运动仿真分析,得到了各关节变量变化情况与仿真轨迹比较结果。研究表明:该 4 自由度 SCARA 机器人传动方案与机械结构设计的可行性和机器人运动学模型的正确性得到了验证,机器人末端执行器能准确经过给定采样点,关节变量变化与工作空间计算结果相符,对机器人通用实验平台的建立有着重要意义。

关键词:SCARA 机器人;工作空间分析;运动学分析;Matlab 仿真

中图分类号:TP242.2

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2019)12-1320-05

Mechanism design and kinematics analysis of 4-dof SCARA robot system

WANG Hai-feng, YIN Bin, LUO Rui-jie, WANG Xin-gang

(School of Control Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: Aiming at the requirements of the general experimental platform of the robot laboratory, the three-dimensional model of SCARA robot with four degrees of freedom was established in SolidWorks environment, and the mechanical body of SCARA robot was manufactured. The transmission scheme, mechanical structure design and kinematics analysis of SCARA robot were studied. On this basis, the workspace calculation of robot was completed based on Monte Carlo method, and the kinematics model of SCARA robot was established based on d-h parameter method, and the forward and reverse kinematics equations of robot were analyzed. At last, Matlab motion simulation analysis was carried out on SCARA robot, and the results of variation of each joint variable and simulation trajectory comparison were obtained. The results show that the four degrees of freedom SCARA robot transmission scheme and the feasibility of the mechanical structure design and the correctness of the robot kinematics model are verified, robot end actuators can accurately through a given sampling points, the variation of joint variables is consistent with the result of working space calculation, the robot to the establishment of the general experimental platform has important significance.

Key words: SCARA robot; workspace analysis; kinematics analysis; Matlab Simulation

0 引 言

SCARA 平面关节型机器人是一种应用极广泛的工业机器人,具有动作灵活、可操控性强、定位精度高

等特点^[1]。SCARA 机器人具有 4 个关节,包括 3 个旋转关节和 1 个移动关节,其中,3 个旋转关节关节轴线相互平行,以实现平面内的位姿变化;移动关节控制机器人末端高度,以实现机器人垂直方向上的移动。

收稿日期:2019-05-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51475086)

作者简介:王海峰(1971-),男,黑龙江哈尔滨人,硕士,工程师,主要从事工业产品设计、控制理论方面的研究。E-mail:taranis@163.com

现有的 SCARA 机器人的机构与运动学研究主要针对机械臂轨迹优化问题,运动学分析主要建立在以 Robotics Toolbox 工具箱为基础的逆运动学求解,其在机器人运动学模型上存在一定局限性。

机器人运动学建模的 D-H 建模法,可以很方便地得到机器人的正运动学方程^[2],而要获得机器人的逆运动学方程,则难度较大,求解的方法可以分成两大类:数值解和封闭解。BAKER 等研究了冗余机械臂的数值逆解; TSAI 等研究了通用的 6 自由度和 5 自由度的机械臂的数值解; NAKAMURA 等研究了适用于机器人控制的带有奇点鲁棒控制的数值逆解。封闭解是基于解析形式的解法,其又可分为代数法和几何法,黄晨华研究了几何法求解机器人运动学逆解^[3]。

本研究以 4 自由度 SCARA 机器人为例,在 SolidWorks 环境下进行机器人本体设计与传动结构优化,并以运动学模型为基础进行轨迹验证^[4]。

1 SCARA 机器人系统结构设计

SCARA 机器人由基座、大臂、小臂和腕部组成。基座与大臂间连接称为肩关节,大臂与小臂间连接称为肘关节,小臂与腕部间连接称为腕关节^[5]。3 个关节中,肩关节为沿 z 轴的移动自由度,肘关节与腕关节均为绕 z 轴的转动自由度,其中,腕部包含两个绕 z 轴的转动自由度,分别控制腕部的转动与机器人末端执行器的转动^[6]。

滚珠丝杆传动适用于轻载、高精度场合。同步齿形带传动具有精度高、中心距大、承载能力强等优点^[7]。目前,机器人传动系统中普遍使用减速器,但相对于传统精密传动系统,其结构复杂、体积大、质量大、成本高^[8]。因此,本文 SCARA 机器人肩关节采用滚珠丝杆传动,其余关节采用同步齿形带传动。各关节具体传动结构如下:

- 肩关节(J1) 步进电机 1→滚珠丝杆→大臂;
 - 肘关节(J2) 步进电机 2→同步齿形带 1→小臂;
 - 腕关节(J3) 步进电机 3→同步齿形带 2→腕部;
 - 末端执行器旋转(J4) 步进电机 4→末端执行器;
- SCARA 机器人三维模型如图 1 所示。

肩关节步进电机 1 直接与滚珠丝杆相连,丝杆滑台与大臂固接,实现大臂在垂直方向的移动^[9];肘关节步进电机 2 与同步齿形带 1 相连,同步齿形带 1 输出端直接与小臂相连,驱动小臂旋转;腕关节步进电机 3 与同步齿形带 2 安装在小臂内部,同步齿形带 2 将动力传递到腕部,实现腕部旋转运动,考虑到步进电机重量将影响机械臂刚度,小臂与腕部均采用将步进电

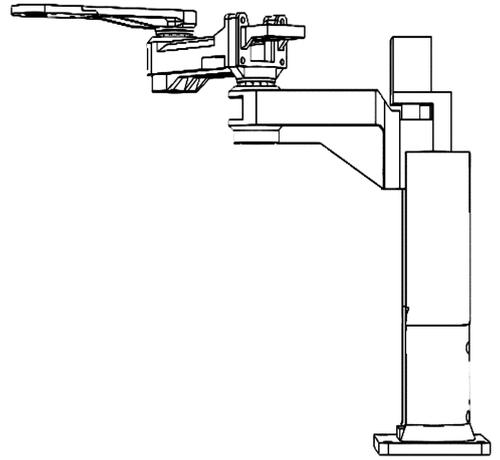


图 1 SCARA 机器人三维模型

机偏置基座一侧,通过同步齿形带驱动肘关节与腕关节转动,以保证末端执行器定位精度;步进电机 4 直接驱动末端执行器,实现末端执行器姿态调整^[10]。

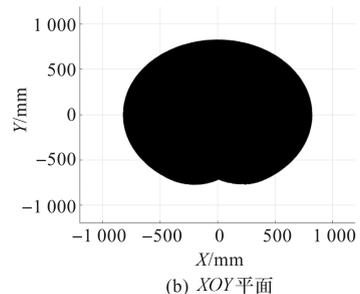
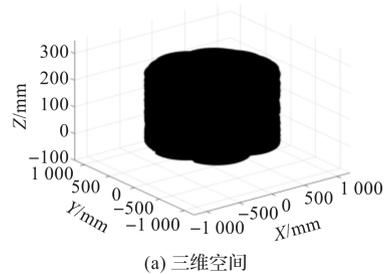
SCARA 机器人主要技术参数如表 1 所示。

表 1 SCARA 机器人主要技术参数

项目	技术参数			
运动部件	大臂升降 (J1)	小臂旋转 (J2)	腕部旋转 (J3)	末端执行器旋转 (J4)
最大运动范围 /(°)	250 ^①	±150	±130	±360
最大运动速度 /(°·s ⁻¹)	140 ^②	130	130	130
臂展/mm	400 + 400			

①单位为 mm;②单位为 mm/s

根据表 1 设计的 SCARA 机器人技术参数,通过 Monte Carlo 法^[11]计算得到 SCARA 机器人工作空间,如图 2 所示。



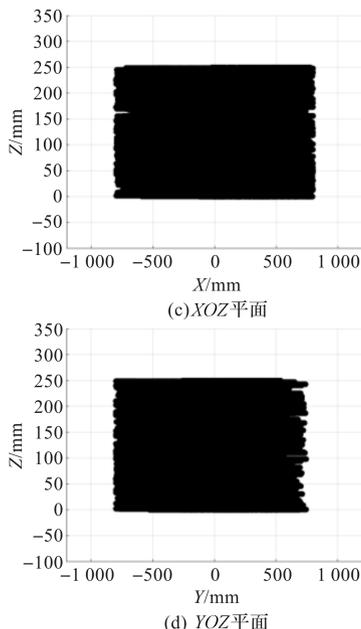


图 2 SCARA 机器人工作空间

2 SCARA 机器人系统的运动学分析

2.1 SCARA 机器人坐标系建立

为了分析 SCARA 机器人末端连杆的位姿与个关节变量之间的关系,笔者依据 D-H 理论^[12] 构建 SCARA 机器人连杆坐标系,如图 3 所示。

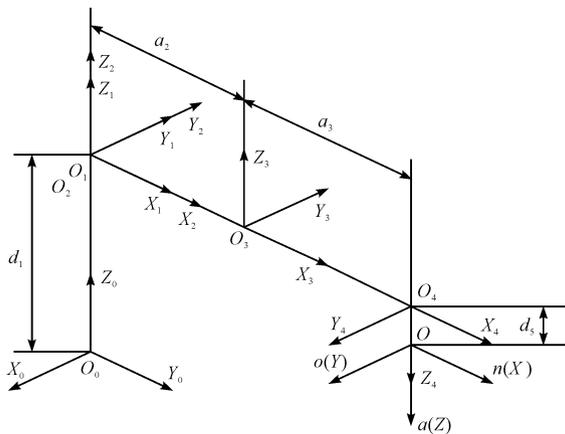


图 3 SCARA 机器人连杆坐标系

本研究以第二关节轴线与基座平面交点为基坐标系原点,构建基坐标系 $X_0Y_0Z_0$,坐标系 $X_1Y_1Z_1$ 原点位于第二关节处,坐标系 $X_2Y_2Z_2$ 与坐标系 $X_1Y_1Z_1$ 重合,坐标系 $X_3Y_3Z_3$ 原点位于第三关节处,坐标系 $X_4Y_4Z_4$ 原点位于第四关节处。其中, $\alpha_2 = 400 \text{ mm}$, $\alpha_3 = 400 \text{ mm}$, $d_5 = 150 \text{ mm}$ 。

机器人 D-H 参数与关节变量如表 2 所示。

表 2 机器人 D-H 参数与关节变量

杆件 i	连杆长度	关节扭角	连杆长度	关节转角
	a_{i-1}/mm	$\alpha_{i-1}/(^{\circ})$	d_i/mm	$\theta_i/(^{\circ})$
1	0	0	d_1	90
2	0	0	0	θ_2
3	α_2	0	0	θ_3
4	α_3	180	0	θ_4

2.2 SCARA 机器人正运动学

机器人正运动学分析是已知 D-H 参数与关节变量,推导出机器人末端位姿^[13]。本文以基坐标系为参考坐标系,依据两相邻关节间的坐标转换矩阵(齐次变换矩阵),采用递推计算方式,求出参考坐标系到机器人末端坐标系的齐次变换矩阵。

为了简化表达,令 $c_2 = \cos\theta_2, c_3 = \cos\theta_3, c_4 = \cos\theta_4, c_{12} = \cos(\theta_1 + \theta_2), c_{13} = \cos(\theta_1 + \theta_3), c_{34} = \cos(\theta_3 + \theta_4), s_2 = \sin\theta_2, s_3 = \sin\theta_3, s_4 = \sin\theta_4, s_{12} = \sin(\theta_1 + \theta_2), s_{34} = \sin(\theta_3 + \theta_4)$ 。

由机器人连杆坐标系与 D-H 参数表得,各坐标系齐次变换矩阵分别为:

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & 0 \\ s_2 & c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & \alpha_2 \\ s_3 & c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$${}^3_4T = \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 & \alpha_3 \\ -s_4 & -c_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

根据式(1 ~ 4),可得如下转换关系矩阵:

$${}^0_4T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T = \begin{bmatrix} s_4c_{23} - c_4s_{23} & c_4c_{23} - s_4s_{23} & 0 & -\alpha_2s_2 - \alpha_3s_{23} \\ c_4c_{23} + s_4s_{23} & c_4s_{23} - s_4c_{23} & 0 & \alpha_2c_2 + \alpha_3c_{23} \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

由式(5)可知, ${}^0_4\mathbf{T}$ 表示机器人末端连杆坐标系相对基坐标系的齐次变换矩阵,通过 ${}^0_4\mathbf{T}$ 可求得任意末端连杆的位姿。式(5)即为 SCARA 机器人末端连杆的正运动学方程。

若基坐标系 $X_0Y_0Z_0$ 相对工作站 {S} 的变换为 ${}^S_0\mathbf{T}$,末端执行器 {T} 相对末端连杆 {4} 的变换为 ${}^4_7\mathbf{T}$,则末端执行器相对工作站的位姿为:

$${}^S_7\mathbf{T} = {}^S_0\mathbf{T}{}^0_4\mathbf{T}{}^4_7\mathbf{T} \quad (6)$$

$${}^4_7\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2.3 SCARA 机器人逆运动学求解

假定基坐标系 $X_0Y_0Z_0$ 与工作站 {S} 重合。以代数法求解 SCARA 机器人逆运动学^[14],令末端执行器位姿矩阵: \mathbf{T}_{end} :

$$\mathbf{T}_{\text{end}} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & \alpha_x & p_x \\ n_y & o_y & \alpha_y & p_y \\ n_z & o_z & \alpha_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

位姿矩阵 \mathbf{T}_{end} 中参数如表 3 所示。

表 3 位姿矩阵参数

矢量项目	符号	矩阵
法向矢量	n	$\mathbf{n} = (n_x, n_y, n_z)$
方位矢量	o	$\mathbf{o} = (o_x, o_y, o_z)$
接近矢量	a	$\mathbf{a} = (\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z)$
末端执行器位置矢量	p	$\mathbf{p} = (p_x, p_y, p_z)$

对 ${}^S_7\mathbf{T}$ 、 \mathbf{T}_{end} 分别左乘 ${}^0_1\mathbf{T}^{-1}$,然后比较等式两端对应元素,可得对应关节变量反解:

$$\theta_3 = \text{Atan2}\left(\pm \sqrt{1 - \left(\frac{p_x^2 + p_y^2 - a_2^2 - a_3^2}{2\alpha_2\alpha_3}\right)^2}, \frac{p_x^2 + p_y^2 - \alpha_2^2 - \alpha_3^2}{2\alpha_2\alpha_3}\right) \quad (7)$$

$$d_1 = p_z + d_5 \quad (8)$$

对 ${}^S_7\mathbf{T}$ 、 \mathbf{T}_{end} 分别左乘 ${}^0_1\mathbf{T}^{-1}$ 和 ${}^1_2\mathbf{T}^{-1}$,然后比较等式两端对应元素,可得对应关节变量反解:

$$\theta_2 = \text{Atan2}(p_y, p_x) - \text{Atan2}(\alpha_2 + \alpha_3 c_3, \pm \sqrt{p_x^2 + p_y^2 - (\alpha_2 + \alpha_3 c_3)^2}) \quad (9)$$

$$\theta_4 = \theta_2 + \theta_3 - \text{Atan2}(o_y, \pm o_x) \quad (10)$$

综上所述,式(7~10)即为 SCARA 机器人逆运动学反解。

至此,机器人逆运动学方程所有的解均已给出。由关节变量表达式可知,机器人逆运动学存在多解情

况,需要根据机器人的运动可实现性确定^[15]。

3 SCARA 机器人仿真结果及分析

本文首先根据 SCARA 机器人运动学方程与参数,在 Matlab 中建立机器人运动学模型,然后利用 Matlab 空间曲线作为机器人末端执行器,将空间曲线上各样本点的位姿矩阵视为末端执行器位姿矩阵,反解出相应关节变量值,最后将关节变量值代入末端执行器的正向运动学方程,得到末端执行器仿真轨迹。本研究通过对比仿真轨迹与实际轨迹重合情况,验证逆运动学反解。

仿真前,需要建立待仿真轨迹的空间曲线方程,并对轨迹进行离散,以获得各样本点,进而求得机器人逆运动学反解^[16]。笔者选取空间阿基米德螺线为待仿真轨迹,以直线 $x = -300, y = 400$ 为空间阿基米德螺线中心线,5 mm/rad 为阿基米德螺旋线系数,以 π 为螺距生成空间螺旋线,以 0.05 rad 为步长取样,将空间阿基米德螺线离散为 377 个样本点。

机器人各关节变量变化曲线图如图 4 所示。

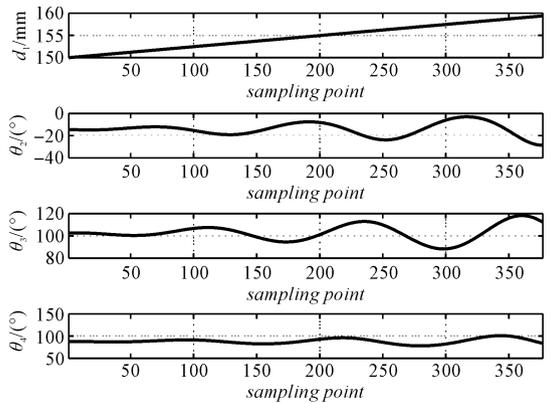


图 4 机器人各关节变量变化曲线图

在 Matlab 中,本研究依据 SCARA 机器人运动学方程,求出离散样本点对应各关节角度或位移。假定机器人末端执行器姿态方向不变,均与 X 轴正方向平行。

将机器人个关节变量代入机器人正向运动学方程,得到末端执行器仿真轨迹,再对比待仿真轨迹,得到机器人仿真轨迹模拟比较图如图 5 所示。

图 5 表明:仿真轨迹和实际轨迹重合,验证了机器人逆运动学反解的正确性。

以 δ 为轨迹仿真位置的误差, $\delta_{\alpha_x}, \delta_{\alpha_y}$ 为 $O(Y)$ 轴方向余弦的误差,可得到机器人轨迹仿真误差曲线图,如图 6 所示。

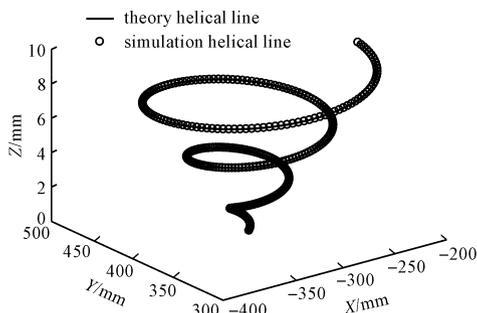


图 5 机器人仿真轨迹模拟比较图

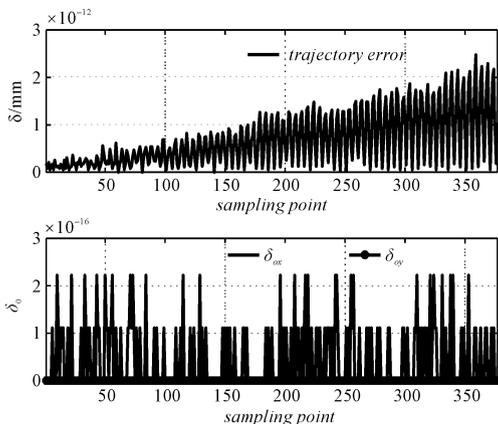


图 6 机器人轨迹仿真误差曲线图

对两种空间运动轨迹的关节角度变化曲线、轨迹模拟曲线以及轨迹仿真误差曲线进行分析可得：(1) 关节角变化趋势符合运动轨迹要求，轨迹仿真误差很小，可忽略不计^[17]；(2) 机器人运动学分析所得逆运动学反解能精确控制机器人末端执行器的位置与姿态，也为机器人平台自动控制提供了理论基础^[18]。

4 结束语

在 SolidWorks 环境中，本文建立了 SCARA 机器人本体三维模型，完成了机器人传动方案的设计，应用 Monte Carlo 法计算得到了机器人工作空间；基于 D-H 参数法建立了 SCARA 机器人运动学模型，分析了机器人正逆向运动学方程；最后在 Matlab 环境下，应用机器人运动学模型对机器人末端执行器轨迹进行了仿真，得到了各关节变量变化情况与仿真轨迹比较图像，验证了 SCARA 机器人运动学模型的正确性。

参考文献 (References) :

[1] 张付祥,赵 阳. UR5 机器人运动学及奇异性分析[J]. 河北科技大学学报,2019,40(1) :51-59.

[2] SUN J D, CAO G Z, LI W B, et al. Analytical inverse kinematic solution using the D-H method for a 6-DOF robot [C]. 2017 14th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence, URAI: IEEE,2017.

[3] 李 瑾. 基于 MATLAB 的 Puma250 机器人运动仿真与分析[J]. 现代制造技术与装备,2018(11) :66-68.

[4] 王 鹏,张良安,单家正. SCARA 机器人结构改进与仿真分析[J]. 现代制造工程,2015(12) :23-27,60.

[5] 牟玲龙,柴永生,殷守民. 一种多关节机器人几何标定方法研究[J]. 机电工程技术,2019,48(1) :16-20,142.

[6] 苏学满,杨 明,孙丽丽,等. 基于 matlab 的六自由度机器人运动特性分析[J]. 机械设计与制造,2013(1) :78-80.

[7] 濮良贵,陈国定,吴立言. 机械设计[M]. 9 版. 北京:高等教育出版社,2013.

[8] 王 梦. 多自由度串联机器人运动学分析与仿真[D]. 北京:北京理工大学机械与车辆工程学院,2016.

[9] 熊有伦. 机器人技术基础[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1996.

[10] 马 健,许德章,肖永强. SCARA 机器人结构设计与基于 ADAMS 的运动学仿真分析[J]. 蚌埠学院学报,2016,5(1) :14-20

[11] 郭建根,双 丰,阚宏林. 基于 ROS 的六关节机器人运动规划研究[J]. 安徽工程大学学报,2019,34(1) :36-45.

[12] SINGH A, SINGLA A, SONI S. Extension of D-H parameter method to hybrid manipulators used in robot-assisted surgery[J]. **Proc Inst Mech Eng H**,2015,229(10) :703-712.

[13] 张克敏. 基于虚拟现实的机器人仿真研究[D]. 重庆:重庆大学机械工程学院,2012:28-40.

[14] SPANIER V. Optimized SCARA kinematic, description and examples[C]. ISR 2010 (41st International Symposium on Robotics) and ROBOTIK 2010 (6th German Conference on Robotics), Munich: VDE, 2010.

[15] RONG PAN-XIANG, YANG JING, HU LIN-GUO, et al. Inverse kinematic in SCARA manipulator based on RBF networks[J]. **Electric Machines & Control**, 2007, 11(3) :303-305.

[16] LI Yu-hang, MEI Jiang-ping, LIU Song-tao, et al. Dynamic dimensional synthesis of a 4-DOF high-speed parallel manipulator [J]. **Journal of Mechanical Engineering**, 2014,50(19) :32.

[17] 臧家炜,梅江平,刘松涛,等. 高速并联机械手静动态特性分析及优化设计[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,2015,43(10) :108-115.

[18] 孙延平. 基于机器视觉的六轴机械手自动分拣系统[D]. 长春:长春工业大学电气与电子工程学院,2017.

[编辑:程 浩]

本文引用格式:

王海峰,尹 彬,罗锐捷,等. 四自由度 SCARA 机器人系统机构设计及运动学分析[J]. 机电工程,2019,36(12) :1320 - 1324.

WANG Hai-feng, YIN Bin, LUO Rui-jie, et al. Mechanism design and kinematics analysis of 4-dof SCARA robot system[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019,36(12) :1320 - 1324.
《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>