某自动化流水线搬运机械手的仿真与试验分析

李国昌,赵成,李蕊,迟源,李秀芳

(国网北京市电力公司,北京 100161)

摘要:目的 研究某自动化流水线三自由度机械手的运动学特性和试验分析方法。方法 创建机械手的 D-H 法运动方程;在 SW 中建立机械手模型,并导入 RecurDyn 中完成对机械手的运动学仿真;最后对 试验样机进行试验验证分析。结果 通过运动学仿真分析得到连杆 2 末端点在 x 轴、y 轴、z 轴上的位移 变化量分别为 67,75,150 mm,最大速度设计目标与仿真结果的误差百分比分别为-0.53%,-1.57%, 3.08%,最大加速度的误差百分比分别为 2.2%,-0.087%,-3%;建立了试验验证平台,通过模块化设计 软件,试验得出该机器手的运动学特性良好,电机电流曲线平滑稳定。结论 该自动化流水线三自由度 机械手具有运动连续且平稳、控制简单的特点,符合自动化流水线的工作特性。

关键词:流水线;机械手;运动学仿真;试验分析

中图分类号: TB486; TP241 文献标识码: B 文章编号: 1001-3563(2018)15-0166-07 **DOI**: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.15.025

Simulation and Experiment of an Automated Pipelining Manipulator

LI Guo-chang, ZHAO Cheng, LI Rui, CHI Yuan, LI Xiu-fang (Beijing Municipal Electric Power Company, Beijing 100161, China)

ABSTRACT: The work aims to study the kinematic characteristics and experimental analysis method of a three- degree-freedom manipulator in an automatic assembly line. The D-H motion equation of the manipulator was created. The manipulator model was built in SW and imported into RecurDyn to complete the kinematics simulation of manipulator. At last, the test prototype was validated and analyzed. Through kinematics simulation analysis, the displacement changes at the end points of link 2 on the X-axis, Y-axis and z-axis were respectively 67 mm, 75 mm and 150 mm. The error percentages of the maximum speed design target and the simulation result were respectively -0.53%, -1.57% and 3.08%, and the error percentages of the maximum acceleration were respectively 2.2%, -0.087% and -3%. The test verification platform was set up. Through modular design software, it was found that the kinematics characteristics of the manipulator were good and the motor current curve was smooth and stable. The three-degree-freedom manipulator of the automatic assembly line has the characteristics of continuous motion, stable motion and simple control, which is in line with the working characteristics of the automatic assembly line.

KEY WORDS: assembly line; manipulator; kinematics simulation; experimental analysis

随着经济的快速发展以及生产规模的不断扩大,生 产流水线的发展趋势已逐步向高度自动化的方向发展, 其有效地提高了生产速度,减少了工人单一作业,而 流水线机械手在流水线自动化应用上就成了不可避 免的研究对象^[1-2]。自动化流水线机械手的发展正朝 着高柔性、高处理能力及高可靠性的方向发展^[3-4]。 文中以自动化流水线机械手为研究对象,该类型机械 手主要适用于流水线上的搬运、分选等工作,尤其适 用于较长直线流水线的物料运输,易实现对机械手的 控制与跟踪。

文中通过对流水线三自由度机械手进行数学建模,得出驱动参数和末端执行空间位置的关系;建立机械手三维模型,并通过 Recurdyn 完成对机械手的运动学仿真;通过采用嵌入式控制与伺服控制的相关技术,针对样机机械手制定出相应的控制系统,通过HMI 实现人机交流,有效地实现对机器手的控制。

1 机器人机构与运动学建模

1.1 机械手的三维模型

文中的研究对象为三自由度机械手,该机械手适 用于长范围的工作场合,具有运动平稳、效率高、占 地面积小,工作空间大等优点。

机械手主要包括:由电机驱动向关节水平方向移 动;通过连杆机构确保执行端的空间姿态不发生改 变,其中各转动关节由驱动电机分别驱动,彼此零部 件之间的相互运动构成了机械手的运动。其中机械手 三维简易模型见图 1。该机械手机构活动关节分别为: 安装在基座上的电机 A 驱动滑块移动的 1 个移动关 节,安装在滑块上的电机 B 驱动连杆 a 的 1 个转动关 节,以及安装在滑块上的电机 C 驱动连杆 b 带动连杆 架的的1个转动关节,3个关节串并联构成开链杆件 机构。在基座上建立绝对坐标系,其示意见图 2,其 中针对机械手的移动关节及2个转动关节进行简化, 移动关节在 z 轴方向往复移动, 2 个转动关节绕 z 轴 在一定角度范围内转动。图 1 中的电机 A、电机 B、 电机 C 与图 2 中的 A, B, C 相对应,其中由于图 1 中 的电机 C 在滑块上,通过驱动图 1 中连杆 b 调节连杆 架的位置及角度,将其简化到图2所示的连杆1与连 杆2之间。末端执行的位置及角度的调节通过图1中 的活动杆及活动架控制,由独立的电机驱动,相对于 连杆 a、连杆 b 及连杆架而言是独立的运动。由于末 端执行的位置及角度的具体调节建立在连杆架上,文 中对连杆架末端点进行了分析,故在机械手简化过程 中,不再考虑末端执行的位置及角度的调节过程,图2 中没有末端执行、活动杆、活动架的简化形式。





图 2 绝对坐标系下机械手示意 Fig.2 Schematic diagram of manipulator in absolute coordinate system

1.2 机器手数学建模分析

在分析机械手的运动之前,需对机械手简化,运 动学分析过程中仅需要考虑其结构尺寸,对力与力矩 作用机械手本身产生的变化不需考虑,通过采用 D-H 矩阵法,建立机械手不同构件的坐标系,建立过程如 下所述^[5]。

1)建立连杆的 D-H 坐标系。在固定导轨上建立 绝对坐标系{O},在机械手滑块与固定导轨接触位置 建立坐标系{O₀},并在机械手各铰接处分别创建坐标 系{O₁},{O₂},并在执行末端创建坐标系{O₃}。则机 械手 D-H 坐标系见图 3。



图 3 机械手 D-H 坐标系 Fig.3 D-H coordinate system of manipulator

2)确定参数与关节变量。杆件几何参数。连杆

长度为 l_{i-1} ,其中简化后的连杆有效长度与实际连杆 有效长度一致,即两侧连接销的公垂线尺寸;连杆扭 转角为 a_{i-1} ,在沿公垂线方向看去连杆两侧连接销的 夹角。关节运动参数。关节回转量 θ_i :顺着连接销的 方向看去,相邻 2 个连杆在连接销上的夹角,取 θ_i 沿 z_i 逆时针旋转的角位移为正。关节平移量 d_i :相邻 2 个连杆在连接销的公垂线尺寸^[6]。

在以上参数中,对文中的机械手来说,有9个为 定量,定量分别为: $l_{i-1}(i=1,2,3), a_{i-1}=0(i=1,2,3),$ $d_i=0(i=2,3), \theta_i=0(i=1);$ 有3个为变量,分别为 滑块移动量 $d_i(i=1),$ 关节处旋转量 $\theta_i(i=2,3),$ 即 关节的变量。

通过以上分析得出 D-H 参数, 见表 1。

表 1 D-H 参数 Tab.1 D-H parameter

编号 i	a_i	α_i	d_i	$ heta_i$	变量
1	0	0	d_1	0	d_1
2	l_1	0	0	$ heta_1$	$ heta_1$
3	l_2	0	0	θ_2	θ_2

通过 D-H 法创建连杆坐标系的变换矩阵为:

$${}^{0}\boldsymbol{A}_{3} = \begin{bmatrix} \cos\theta_{1} \times \cos\theta_{2} - \sin\theta_{1} \times \sin\theta_{2} & -\cos\theta_{1} \times \sin\theta_{2} - \sin\theta_{1} \times \cos\theta_{2} \\ \sin\theta_{1} \times \cos\theta_{2} + \cos\theta_{1} \times \cos\theta_{2} & \cos\theta_{1} \times \cos\theta_{2} - \sin\theta_{1} \times \sin\theta_{2} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

经过齐次变换矩阵的表达式可求得:

 $\begin{cases} p_x = \cos \theta_1 \times l_2 \times \cos \theta_2 - \sin \theta_1 \times l_2 \times \sin \theta_2 + l_1 \times \cos \theta_1 \\ p_y = \sin \theta_1 \times l_2 \times \cos \theta_2 + \sin \theta_2 \times l_2 \times \cos \theta_2 + l_1 \times \sin \theta_1 \\ p_z = d_1 \end{cases}$

$$\begin{cases} p_x = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ p_y = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ p_z = d_1 \end{cases}$$
(7)

其中位置矢量*p_x*,*p_y*,*p_z分别为机械手末端点在基 坐标系中的空间位置处 <i>x*,*y*,*z* 轴的坐标值。

运动学逆解是当给出机器手末端点在基坐标系中 的空间位置时,求出对应关节变量值的过程。根据三 角函数推导公式,对式(7)进行运动学逆解求解为:

$$\begin{cases} \theta_{1} = \arctan(\frac{-\sqrt{1-M^{2}}}{M}) + \phi + k\pi \\ \theta_{2} = \pi - \arccos\frac{l_{1}^{2} + l_{2}^{2} - P_{x}^{2} - P_{y}^{2}}{2l_{1}l_{2}} \end{cases}$$
(8)

式中:
$$\phi = \arctan \frac{P_y}{P_x}$$
; $M = \frac{l_1^2 - l_2^2 + P_x^2 + P_y^2}{2l_1 \times \sqrt{p_x^2 + p_y^2}}$; *k*为

$^{-1}A_i = \operatorname{Trans}(a_i, 0, 0) \mathrm{R}$	t(x,0)Trans	$(0,0,d_i)$ Rot	$(z, \theta_i) =$
---	-------------	-----------------	-------------------

$\cos\theta_i$	$-\cos \alpha_i \times \sin \theta_i$	$\sin \alpha_i \times \sin \theta_i$	$a_i \times \cos \theta_i$	
$\sin \theta_i$	$\cos \alpha_i \times \cos \theta_i$	$-\sin\alpha_i \times \cos\theta_i$	$-a_i \times \sin \theta_i$	(1)
0	$\sin lpha_i$	$\cos \alpha_i$	d_i	
0	0	0	1	

式中: $i^{-1}A$ 为创建的齐次变换矩阵; Trans (a_i , 0, 0)为沿 x_i 轴移动距离 a_i ; Rot (x, 0)为绕 x 轴旋转的角度为 0; Trans (0, 0, d_i)为在 z 轴上的关节平移量为 d_i ; Rot (z, θ_i)为绕 z 轴旋转的角度为 θ_i 。

根据图 3 和表 1,由式(1)计算得到机械手的 末端位置的变换矩阵 $i^{-1}A$,在已知 d_1, θ_1, θ_2 的情况下, 便能够求解出末端执行对应的不同空间位置:

$${}^{0}A_{3} = \prod_{i=1}^{3} {}^{i-1}A_{i}, i = (1, 2, 3)$$
(2)

当 $q = [q_1...q_n]^T$ 确定时,可求得^{*i*-1} $A_i(q_i)(i = 1...n)$, 得到正运动学的解为:

$${}^{0}A_{n}(q) = {}^{0}A_{1}(q_{1}){}^{1}A_{2}(q_{2})\cdots {}^{n-1}A_{n}(q_{n})$$
(3)
求解的方程组为:

$${}^{0}A_{3} = {}^{0}A_{1} \times {}^{1}A_{2} \times {}^{2}A_{3} = \begin{bmatrix} {}^{0}R_{3} & {}^{0}p_{3} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(4)

得到:

(6)

$$\begin{array}{ccc} 0 & \cos\theta_1 \times l_2 \times \cos\theta_2 - \sin\theta_1 \times l_2 \times \sin\theta_2 + l_1 \times \cos\theta_1 \\ 0 & \sin\theta_1 \times l_2 \times \cos\theta_2 + \sin\theta_2 \times l_2 \times \cos\theta_1 + l_1 \times \sin\theta_1 \\ 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{array}$$
(5)

整数值,在对 θ_1 , θ_2 取值时应考虑机械手在实际运动中的范围限制,其中 d_1 可由控制器直接获取。

在机器手空间位置确定的情况下,可根据运动学 逆解的求法,算出机器手各关节的变量值。从运动学 逆解方程可知,在基坐标系 Oxyz 中各个运动是完全 解耦的,易建立起机械手驱动关节与末端执行之间的 运动学关系^[7]。

1.3 机械手的速度矩阵与 Jacobi 矩阵

通过 D-H 矩阵法求得的连杆坐标系的变换矩阵, 确定机械手关节位置 q, 解析机械手关节的运动速度 q 与其末端执行速度的关系, 求得齐次变换矩阵为:

$${}^{0}\boldsymbol{A}_{n} = \begin{bmatrix} {}^{0}\boldsymbol{R}_{n} & \boldsymbol{p}_{n} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{1} \end{bmatrix}$$
(9)

通过变换矩阵推导三维矢量代表的正速度递推 公式,系数为 n,则 D-H 矩阵法建立的传动轴坐标系 $i^{-1}A_i$,连杆 $i(i=\{1...n\})$ 的角速度为 w_i ,则传动轴坐 标系 $i^{-1}A_i$ 原点的移动速度为 v_i ,则有:

$${}^{0}\dot{A}_{n} = \begin{bmatrix} {}^{0}\dot{R}_{n} & \dot{p}_{n} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S(w_{i}){}^{0}R_{i} & v_{i} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$
(10)

$$\pm \mp:$$

⁰
$$A_{i} = {}^{0}A_{i-1} {}^{i-1}A_{i} + {}^{0}A_{i-1}Q_{i} {}^{i-1}A_{i}\dot{q}_{i}$$
 (11)
根据式 (10—11) 求得:
 $S(w_{i})^{0}R_{i} = S(w_{i-1})^{0}R_{i} + S(\bar{\sigma}_{i}z_{i-1})^{0}R_{i}\dot{q}_{i},$

$$(S(w_{\rm c})^0 R_{\rm c} = 0) \tag{12}$$

$$v_i = v_{i-1} + w_{i-1} \times \dot{p}_i + (\bar{\sigma}_i z_{i-1} \times \dot{p}_i + \sigma_i z_{i-1}) \dot{q}_i, (v_0 = 0)$$
 (13)
由此可知角速度 w_i 与移动速度 v_i 的表达式,见

式(14—15),将参数代入其中可求解出相应连杆的 角速度与速度值。

$$w_i = w_{i-1} + \bar{\sigma}_i z_{i-1} \dot{q}_i \quad (w_0 = 0) \tag{14}$$

$$v_i = v_{i-1} + w_i \times \dot{p}_i + \sigma_i z_{i-1} \dot{\vec{q}}_i \ (v_0 = 0) \tag{15}$$

根据以上的求解过程,可求得机械手的雅克比 矩阵。

由:

$${}^{0}\dot{A}_{n} = \sum_{i=1}^{n} {}^{0}A_{i-1}Q_{i}^{i-1}A_{n}\dot{q}_{i}$$
(16)

可知:

$$v_{n} = \sum_{i=1}^{n} \left[\sigma_{i} z_{i-1} \times (p_{n} - p_{i-1}) + \sigma_{i} z_{i-1} \right] \dot{q}_{i} =$$

$$\sum_{i=1}^{n} b_{i} \dot{q}_{i} = \left[b_{1} \cdots b_{n} \right] \dot{q}$$
(17)

$$w_{n} = \sum_{i=1}^{n} \overline{\sigma}_{i} z_{i-1} \dot{q}_{i} = \sum_{i=1}^{n} c_{i} \dot{q}_{i} = [c_{1} \cdots c_{n}] \dot{q}$$
(18)

由式 (17—18) 可知:

$$\begin{bmatrix} v_n \\ w_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 & \dots & b_n \\ c_1 & \dots & c_n \end{bmatrix} \dot{q} = J\dot{q}$$
(19)

式中: 6×*n* 矩阵 **J**=*J*(*q*)称为机械手的 Jacobi 矩阵。若记 **J**=[*J*₁...*J_n*],则可知:

$$\boldsymbol{J}_{i} = \overline{\sigma}_{i} \begin{bmatrix} \boldsymbol{z}_{i-1} \times (\boldsymbol{p}_{n} - \boldsymbol{p}_{i-1}) \\ \boldsymbol{z}_{i-1} \end{bmatrix} + \sigma_{i} \begin{bmatrix} \boldsymbol{z}_{i-1} \\ \boldsymbol{0} \end{bmatrix}$$
(20)

通过 Jacobi 矩阵可求解出机械手的逆速度值及 末端执行相对于基坐标系的速度向量 v 的变换矩阵, 同时也为解析机械手的静态关节力矩以及在不同坐 标系下速度、加速度、静力的转换奠定了基础。

2 机器手的运动仿真分析

在 SW 中构建机械手的简化模型,并在 RecurDyn 中完成机械手的运动学分析。RecurDyn 采用相对坐标系运动方程理论,是十分专业的多体系统动力学软件^[8]。

2.1 工作空间的仿真

在不影响仿真准确性的情况下,将机械手的模型 在 Solidworks 中简化,将连杆、移动台及基台等效为 均质的矩形块^[9—10]。由于对机械手模型进行了简化, 为保证模型计算的准确性,在 RecurDyn 中将机械手 的质量和惯量等参数添加到简化后的模型参数中;其 中模型的主要仿真尺寸为:连杆 1 长 *l*₁=200 mm,转 动角度 a_1 为 15°~75°,连杆 2 长 l_1 =150 mm,转动 角度 a_1 为 15°~80°, z 轴有效行程为 0~150 mm。又 由于连杆及移动平台都是由电机驱动的,这里将有直 接接触的两零件进行连接,添加相应的固定副及运动 副,其中运动副包括旋转副及直线副,见图 4。



图 4 机械手简化模型及运动副 Fig.4 Simplified model of manipulator and kinematic pair

对动作装置及基座施加旋转运动副和直线运动 副,在以下构件中施加对应约束:基座与大地之间施 加固定副;基座与滑块间施加移动副;滑块与连杆1, 连杆1与连杆2分别施加旋转副。

该机械手仿真要完成的过程主要包括以下内容: 连杆 2 相对于连杆 1 静止,同时连杆 1 向下旋转到指 定位置,保持静止一段时间,留给连杆 2 末端执行工 作的时间(图中未指定执行器),然后连杆 1 升起到 起始位置后,滑块开始移动,等滑块移动到相应位置 点后,再重复连杆 1,2 之前的动作,即完成 1 循环周 期。旋转副与移动副的驱动表达式见图 5,机械手运 动过程路线见图 6。



图 5 运动副的驱动表达式 Fig.5 Driving expression of kinematic pair

由图 7a 连杆 2 末端点的位移变化曲线可知, z 轴从 91 mm 变化到-59 mm,与设定的 0~150 mm 的范 围一致,验证了仿真的正确性,在此基础上分析 x 轴, y 轴的变化量分别约为 67,75 mm。由图 7b 连杆 2 末端 点的速度变化曲线可知,连杆 2 末端点在 x 轴, y 轴,





z 轴方向的最大速度分别约为 74.6, 68.9, 13.4 mm/s。 由图 7c 连杆 2 末端点的加速度变化曲线可知,连杆 2 末端点在 x 轴, y 轴, z 轴方向的最大加速度分别约 为 102.2, 114.9, 19.4 mm/s²。通过图 7 与表 2 数据可 知,仿真分析结果与设计目标基本相符,但连杆 2 末 端点在进行下降运动与回升运动时出现一定的变化 幅度,该变化出现在 0~5 s 与 18~23 s 之间的时间 段,该时间段内,转动关节速度处于加速或减速状态, 产生的变化在可接受范围内。从整体而言,该机械手 运动平稳,未出现突变现象,且机械手模型在仿真过 程中未出现运动错位的情况。这对机械手参数及系统 参数的设计具有借鉴意义。

3 试验分析

3.1 试验硬件平台

根据图 1 机械手三维简易模型构建简易试验平 台,以便验证理论分析与软件分析的结果是否正确。 该简易试验平台主要包括机械手相关零部件、伺服电 机、减速器、控制器等部分。由于试验的目的是检验 理论分析是否正确,故机械手结构、材料、外观均按 机械手的整体机构设计时的要求进行选择。其中尺寸 按设计时的尺寸设定,减速机减速比设定为 120,直 线移动由直线电机驱动完成,其功率为 500 W。此次 试验滑轨长为 500 mm,设定的直线移动距离与仿真 距离 150 mm 一致。连杆 1,2 分别由伺服电机进行驱 动,电机功率为 400 W。

3.2 试验软件平台

在机械手硬件试验平台构建完成后,开始构建机 械手软件试验平台,编写运动调节代码。根据该机械 手的控制特点对软件进行模块化设计。控制系统建立 在嵌入式运动控制系统基础上,实现整个系统应用程 序的运行,管理硬件资源。应用程序将系统分为多个 任务块,并分别为各个任务编写相应的程序。插补算法 采用脉冲增量法,数据设置和信息反馈通过 RS485 传递给显示屏,实现人机交互^[11—14]。软件的具体模块 设计见图 8^[15]。人机交互界面见图 9。

Tab.2 Comparison of simulation results and design targets of mik 2 end points						
	x 轴		y 轴			
类别	速度/	加速度/	速度/	加速度/	速度/	加速度/
	$(\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1})$	$(\text{ mm} \cdot \text{s}^{-2})$	$(\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1})$	$(\text{ mm} \cdot \text{s}^{-2})$	$(\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1})$	$(\text{ mm}\cdot\text{s}^{-2})$
设计目标	75	100	70	115	13	20
仿真结果	74.6	102.2	68.9	114.9	13.4	19.4
误差百分比	-0.53%	2.2%	-1.57%	-0.087%	3.08%	-3%

表 2 连杆 2 末端点仿真结果与设计目标对比 b.2 Comparison of simulation results and design targets of link 2 end points



图 9 人机交互界面 Fig.9 Man-machine interaction interface

3.3 试验与分析

通过构建良好的软硬件试验平台,对机械手进行 试验验证。将仿真时的参数作为试验参数输入,即移 动速度为 10 mm/s,旋转角速度均为 5 r/min,同时将 其初始位置作为复位位置点。通过多次试验,将得到 的平均数据进行绘制,得到机械手末端点的轨迹路线 见图 10。



图 10 机械手末端位置轨迹路线 Fig.10 Trajectory map at the end position of the manipulator

试验过程中,在对机械手连杆2上的末端点未施 加负载且未对执行末端精度造成影响的前提下,通过 对机械手施加运行速度,在设定移动速度为10 mm/s, 测得其平均移动时间为15 s,整个过程机械手运行速 度平稳无突变。整个试验过程中,由图10可知机械 手沿 z 轴移动距离约为150 mm,并读取机械手末端 点的空间位置坐标,与仿真分析中相对应的机械手末 端点空间位置坐标对比,两者基本一致,很好地说明 了试验结果与仿真结果的统一性。

4 结语

通过 D-H 法建立自动化流水线搬运机械手的数 学模型,明确了输入的参数变量与末端执行位置的关 系,为机械手的动力学仿真确立基础。然后在 RecurDvn 中完成机械手的运动学仿真,可直观观察 机械手的运动状态,且便于读取连杆2的相关数值, 主要包括位移、速度、加速度等。通过读取的数值可 知机械手是运动平稳、无突变现象,为机械手参数及 系统参数的设计提供了一定的参考。最后通过搭建简 易试验平台验证机械手运动特性。试验说明该机械手 具有控制简单、运动平滑稳定的特点。由于其工作空 间在部分圆柱体范围内,因此对于直线流水线上的运 输工作具有实践意义, 机械手的执行端可针对不同情 况进行改造,应用范围较广泛。文中只涉及机械手的 数学建模、运动学仿真及简易试验验证,后期可以从 控制算法的优化和动力学模型的控制方法进行研究, 以加强机械手在较高速度状态下的稳健特性。

参考文献:

- 杨欢. 基于 ADAMS 机械手的运动学仿真研究[J]. 煤矿机械, 2013, 34(4): 58—59.
 YANG Huan. Research on Kinematical Simulation of ADAMS Manipulator[J]. Coal Mine Machinery, 2013, 34(4): 58—59.
- [2] 聂永芳,曹永华,朱坤.基于 ADAMS 的抓取机器虚 拟样机的运动仿真[J].煤矿机械.2015,36(5): 97—99.
 NIE Yong-fang, CAO Yong-hua, ZHU kun. Based on ADAMS Motion Simulation of Grasping Machine Virtual Prototype[J]. Coal Mine Machinery, 2015, 36(5): 97—99.
- [3] 肖南峰. 工业机器人[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.

XIAO Nan-feng. Industrial Robot[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2011.

- [4] 宋伟刚. 机器人学: 运动学、动力学与控制[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
 SONG Wei-gang. Robotics: Kinematics, Dynamics and Control[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [5] 宋海峰. 基于 D-H 法的挖掘机工作装置运动学分析
 [J]. 建筑机械, 2012(17): 87—90.
 SONG Hai-feng. Analysis of Kinematics of Excavators Based on D-H Method[J]. Construction Machinery, 2012(17): 87—90.
- [6] 刘敦宁. 机器人自动码坯集成系统的研究[D]. 淄博:

山东理工大学, 2014.

LIU Dun-ning. Research on The Automatic Code Blank Integration System of Robots[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2014.

[7] 刘晓玉. 基于 MATLAB 的某型机器人运动学可视化 仿真平台实现[J]. 自动化技术与应用, 2011, 30(7): 66—71.

> LIU Xiao-yu. Based on MATLAB, A Robot Kinematics Visualization Simulation Platform Implementation[J]. Automation Technology and Application, 2011, 30(7): 66—71.

- [8] 刘义,徐凯,李济顺,等. RecueDyn 多体动力学仿真 基础应用与提高[M].北京:电子工业出版社, 2013. LIU Yi, XU Kai, LI Ji-shun, et al. Basic Application and Improvement of RecueDyn Multi-body Dynamics Simulation[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2013.
- [9] 朱素霞. IRB660 型码垛机器人的运动学与动力学分析[D]. 北京:北京邮电大学, 2013.
 ZHU Su-xia. Kinematics and Dynamics Analysis of the Stacking Robot of The IRB660[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2013.
- [10] 田涛. 一种高速拾取并联机器人的设计与实现[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
 TIAN Tao. Design and Implementation of A High-

speed Pickup Parallel Robot[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.

- [11] ERIGN M. SATICI AC, PATOGLU V. Design Optimization, Impedance Control and Characterization of a Modified Delta Robot[C]// 2011 IEEE International Conference on Mechatronics, 2011: 737–742.
- [12] 陈黎明. 码垛机器人控制系统设计[D]. 上海:上海 交通大学, 2010.
 CHEN Li-ming. Design of Control System for Stacking Robot[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010.
- [13] EPPINGER S D, SEERING W P. Introduction to Dynamic Models for Robot Force Control[J]. Control Systems Magazine IEEE, 1987, 7(2): 48-52.
- [14] ARAKELIAN V, BRIOT S. Complete Sharking Force and Sharking Moment Balancing of the Position Orientation Decoupled PAMIN SA Manipulato[C]// IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2009: 1521—1526.
- [15] 常丽文.开放式三关节机械手平台的研究[D].西安: 西安交通大学, 2004.
 CHANG Li-wen. Research on The Platform of Open 3 Joint Manipulator[D]. Xi'an: Xi'an Jiao Tong University, 2004.