

白酒包装线搬运机器人轨迹曲线研究

段朋, 何庆中, 王浦全, 郭帅, 厉明玉

(四川理工学院, 自贡 643000)

摘要: **目的** 研究白酒包装线码垛机器人的轨迹曲线方程。**方法** 采用 D-H 算法建立机器人空间轨迹的正解和逆解方程, 求解得到各关节相对于初始位置的转角变化量, 然后应用五次多项式逼近方式将转角驱动添加到对应的关节驱动上, 对机器人进行动力学仿真, 从而得到轨迹曲线。**结果** 提取轨迹曲线上的点, 运用 Matlab 曲线拟合工具箱进行数据拟合, 得到了精确的机器人空间轨迹方程。**结论** 采用仿真分析和数据拟合方法得到轨迹曲线方程, 避免了复杂的数学建模和公式计算, 从而在很大程度上减少了计算量和工作时间, 为进一步完成控制系统的设计提供了理论基础和技术支持。

关键词: 码垛机器人; 轨迹规划; 动力学仿真; 曲线拟合

中图分类号: TB486

文献标识码: A

文章编号: 1001-3563(2014)03-0022-06

Trajectory Curve of the Liquor Packing Line Moving Robot

DUAN Peng, HE Qing-zhong, WANG Pu-quan, GUO Shuai, LI Ming-yu

(Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China)

ABSTRACT: **Objective** To study the trajectory equation based on the transporting process of palletizing robot. **Methods** D-H method was adopted to establish the positive and inverse solutions equation of the robot's space trajectory, and to obtain the angle variation relative to the initial position at each joint. Dynamics simulation was conducted after adding angle drive to the corresponding joint drive by applying five-order polynomial approximation methods, achieving the path curve of the robot. **Results** The parameter equation of space curve was obtained by using the Matlab curve fitting toolbox and the points in the trajectory curve, and the rationality of curve equation was compared. **Conclusion** The method of simulation analysis and data fitting could avoid complex mathematic modeling and formula calculation, consequently, it to a great extent reduced the amount of calculation and working hours, moreover, it provided theoretical basis and technical support for completing the design of the control system.

KEY WORDS: palletizing robot; trajectory planning; dynamics simulation; curve fitting

随着工业自动化的快速发展,码垛机器人作为自动化的重要标志,特别是在包装、搬运、传送等工作简单繁琐,需要大量劳动力投入的工作岗位上,发挥着重要的作用。随着码垛机器人的广泛应用,在许多岗位上都出现了专业的搬运码垛机器人,但是一旦公司的生产线工艺稍加改动,就会导致机器人的调试麻烦,严重的话可能直接报废。针对这种问题,提出了

一种矢量调节轨迹曲线的方式,来设计码垛机器人的控制系统,从而能够快速有效地调节机器人的轨迹,使机器人在自己的工作空间内能够灵活适应不同的生产线或者工艺过程,极大提高搬运机器人的重复利用率,节约生产成本,提高生产效率,使得码垛机器人在工业生产中的适应性更强,更好地促进工业经济的发展。

收稿日期: 2013-11-15

基金项目: 自贡市科技局科技计划研究项目(2010Q03);四川理工学院科研基金项目(2012PY08);泸州老窖科研基金项目(091jzk08)

作者简介: 段朋(1989—),男,河南焦作人,四川理工学院硕士生,主攻码垛机器人。

通讯作者: 何庆中(1962—),男,四川自贡人,硕士,四川理工学院教授、硕士生导师,主要研究方向为机械设计及其自动化。

1 机器人结构

根据工厂现场的实际工作情况,该机器人的主要工作任务是在自动化的生产线上把一条传送带上的货物迅速地转移到另一条传送带上,2条传送带的运送方向相同,但不在同一高度,作业机器人位于2条传送带的中间位置。根据工况要求,每一个循环需要2 s。见图1。

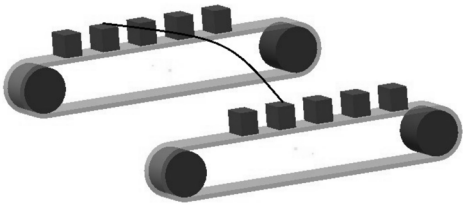


图1 码垛机器人工作任务

Fig.1 Task of the palletizing robot

该码垛机器人主要任务是在2条生产线之间完成搬运工作,因此该机器人的结构比较简单,见图2和3^[1-3]。

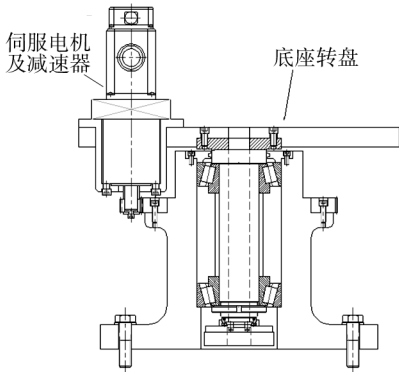


图2 码垛机器人腰部结构

Fig.2 Waist structure of the palletizing robot

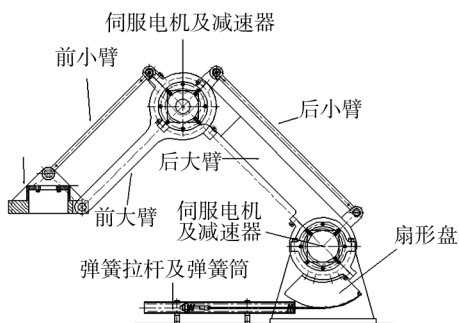


图3 码垛机器人臂部结构

Fig.3 Arm structure of the palletizing robot

2 机器人的正解和逆解

2.1 正解计算

该码垛机器人在工作过程中主要的运动都是旋转运动,再加上里面的一些约束条件,因此可以根据D-H法求出机器人的正解为:

$${}^0T_5 = A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$${}^0T_5 = A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \cos \theta_1 (l_1 + l_2 \cos \theta_2 + l_3 \cos \theta_{23} + l_4) \\ 0 & 1 & 0 & \sin \theta_1 (l_1 + l_2 \cos \theta_2 + l_3 \cos \theta_{23} + l_4) \\ 0 & 0 & 1 & -l_2 \sin \theta_2 - l_3 \sin \theta_{23} - l_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

码垛机器人手腕处的位移相对于底座坐标系的坐标为:

$$\begin{cases} p_x = \cos \theta_1 (l_1 + l_2 \cos \theta_2 + l_3 \cos \theta_{23} + l_4) \\ p_y = \sin \theta_1 (l_1 + l_2 \cos \theta_2 + l_3 \cos \theta_{23} + l_4) \\ p_z = -l_2 \sin \theta_2 - l_3 \sin \theta_{23} - l_5 \end{cases} \quad (3)$$

2.2 逆解计算^[4-5]

机器人的运动方程是非线性的,求解该码垛机器人的逆解,就是根据正解的结果,通过矩阵的运算,求出各个关节变量 $\theta_i (i=1,2,3)$ 的值。

2.2.1 求解 θ_1

对于式(1),用逆矩阵 ${}^0T_1^{-1}$ 分别乘以等式的两边,得:

$${}^1T_5 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 & 0 & -l_1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & -\sin \theta_5 & 0 & l_4 + l_3 \cos \theta_{23} + l_2 \cos \theta_2 \\ 0 & 0 & -1 & l_5 + l_3 \sin \theta_{23} + l_2 \sin \theta_2 \\ \sin \theta_5 & \cos \theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

令上式两边对应的元素相等,得到:

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{p_y}{p_x}\right) \quad (5)$$

2.2.2 求解 θ_2

根据求解 θ_1 的方法,先计算出 ${}^1T_2^{-1}$,再根据 ${}^0T_1^{-1} \cdot {}^1T_2^{-1} \cdot {}^0T_5 = {}^2T_5$ 即可求得 θ_2 。令对应的 ${}^0T_1^{-1} \cdot {}^1T_2^{-1} \cdot {}^0T_5 = {}^2T_5$ 两边的元素相等,得:

$$\theta_2 = \arcsin\left(\frac{l_2 p_y}{p_x^2 + p_y^2}\right) \quad (6)$$

2.2.3 求解 θ_3

同理算出:

$$\theta_2 + \theta_3 = \arcsin\left(\frac{-p_z - l_2 \sin \theta_2 - l_5}{l_3}\right) \quad (7)$$

求得:

$$\theta_3 = \arcsin\left(\frac{-p_z - l_2 \sin \theta_2 - l_5}{l_3}\right) - \arcsin\left(\frac{l_2 p_y}{p_x^2 + p_y^2}\right) \quad (8)$$

由于该码垛机器人采用平行四边形结构, θ_4, θ_5 两个关节的变化不影响到末端执行器的轨迹变化, θ_4 是从动关节, θ_5 是末端执行器的水平旋转,因此省略了对 θ_4, θ_5 的求解。对 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 求导,即为关节的角速度:

$$\begin{cases} \dot{\theta}_1 = \frac{{}^0v_{5y} \cos \theta_1 - {}^0v_{5x} \sin \theta_1}{l_1 + l_2 \cos \theta_2 + l_3 \cos \theta_{23} + l_4} \\ \dot{\theta}_2 = \frac{{}^0v_{5x} \cos \theta_1 \cos \theta_{23} + {}^0v_{5y} \sin \theta_1 \cos \theta_{23} - {}^0v_{5z} \sin \theta_{23}}{l_2 \sin \theta_3} \\ \dot{\theta}_3 = \frac{{}^0v_{5z} (l_2 \sin \theta_2 + l_3 \sin \theta_{23})}{l_2 l_3 \sin \theta_3} - \frac{l_2 \cos \theta_2 + l_3 \cos \theta_{23}}{l_2 l_3 \sin \theta_3} \cdot ({}^0v_{5x} \cos \theta_1 + {}^0v_{5y} \sin \theta_1) \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中,若分母为0,则关节就丧失了自由度。这个时候由关节速度引起的末端执行器的速度向量就只有一个特定方向,也就不能对速度进行控制,因此要避开速度反解中不存在的点。

2.3 关节转角计算

码垛机器人工作过程主要是关节的旋转^[6]工作,如需求得关节转角,则必须准确得到码垛机器人末端执行器的起始点位置。假设起点为坐标原点,则由终点坐标求解出的关节转角即为码垛机器人的

工作转角。应用 Matlab 数学计算软件,在可视化语言 Simulink 环境中,完成逆解公式的编程。带入相关已知条件,即可求得机器人抓起货物到放下货物这一过程中各个关节的角度变化。已知条件:连杆1长度 l_1 、连杆2长度 l_2 、连杆3长度 l_3 、连杆5长度 l_4 、连杆5长度 l_5 分别为 150, 500, 360, 84.9, 0 mm; 目标位置相对初始位置的坐标 (p_x, p_y, p_z) 为 $(-825, 200, -300)$ 。

经求解,得到了码垛机器人完成搬运任务各个关系的相对转动角度, θ_1 为机座转轴转动角度, θ_2 为后臂关节转动角度, θ_3 为前臂关节转动角度。关节1, 2, 3 的转角 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 的计算结果分别为 $172.56^\circ, 12.6^\circ, 11.86^\circ$ 。

3 动力学仿真^[7]

码垛机器人的运动分析需要根据 Denavit - Hartenberg 方法建立关节的坐标系统,根据机器人的臂部结构得出了此结构的运动简图,见图4。

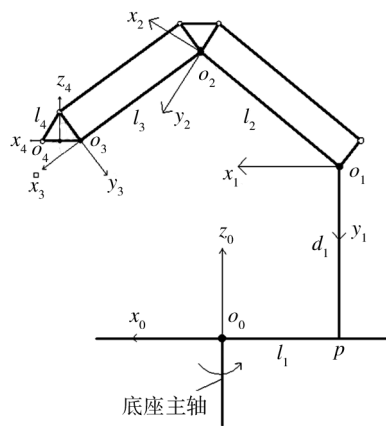


图4 机构运动简图

Fig. 4 Mechanism motion diagram

考虑到码垛机器人关节在转动过程中的冲击问题,为了减小和消除冲击现象,对码垛机器人进行动力学仿真时,采用五次多项式的位移驱动作为驱动力,驱动机器人进行动力学仿真。在多体动力学分析软件 Adams 中,可以直接调用其内部 Step5 函数作为关节的位移驱动方程,利用五次多项式来逼近海赛阶跃函数,有连续的一、二阶导数,可以保证关节转动的平稳性。

Step5 函数定义为:

Step5(x, x_0, h_0, x_1, h_1)=

$$\begin{cases} h_0 & (x \leq x_0) \\ h_0 + (h_1 - h_0) \left[\frac{(x - x_0)}{(x_1 - x_0)} \right]^3 \cdot \{ 10 - 15 \left[\frac{(x - x_0)}{(x_1 - x_0)} \right] + 6 \left[\frac{(x - x_0)}{(x_1 - x_0)} \right]^2 \} & (x_0 < x < x_1) \\ h_1 & (x \geq x_1) \end{cases}$$

式中: x 为自变量,可以是时间或时间的任一函数; x_0 为自变量的 Step5 函数开始值,可以是常数或函数表达式或设计变量; x_1 为自变量的 Step5 函数结束值,可以是常数、函数表达式或设计变量; h_0 为 Step5 函数的初始值,可以是常数、设计变量或其他函数表达式; h_1 为 Step5 函数的最终值,可以是常数、设计变量或其他函数表达式。

根据码垛机器人工作原理,在 Adams 中对各个零部件添加合适的约束,在 3 个关节添加驱动约束。然后将求解出的关节转角以角度位移驱动函数的形式添加到对应的驱动约束上,接着调整好视角,设置好仿真时间,就可以进行动力学仿真分析,得到的末端执行器的轨迹曲线^[8]见图 5。

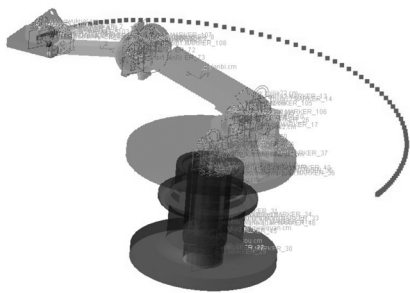


图 5 码垛机器人轨迹曲线
Fig. 5 Trajectory curve of the palletizing robot

在 Adams 后处理中,可以清楚地看到码垛机器人在空间的运动情况,然后在曲线图中提取出各关节的角速度和角加速度曲线。可以看到,各个关节处的角速度都是光滑的曲线,而且角加速度曲线也不存在畸变点。在机械设计中,由 $F=ma^2$ 可知,加速度的变化会引起作用力的相应改变。为了避免机构在运动过程中因速度的改变,从而对构件产生较大的冲击力,所以在设计驱动方式时一定要保证机构运动加速度曲线的平滑性,这样既保证了机器人的工作平稳性,又有效延长了机器人的使用寿命。从图 6 可以明显看出,加速度曲线是一条平滑的曲线,所以机器人在工作过程中各构件之间的冲击作用力非常小,说明驱

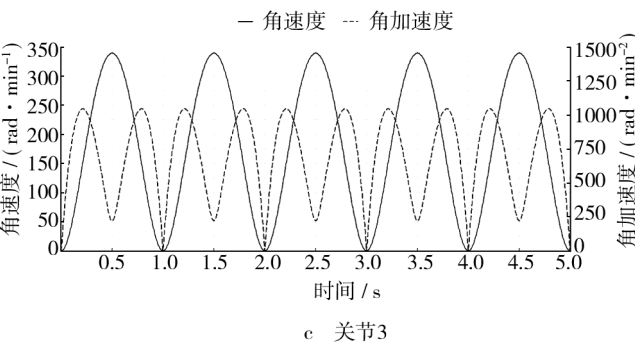
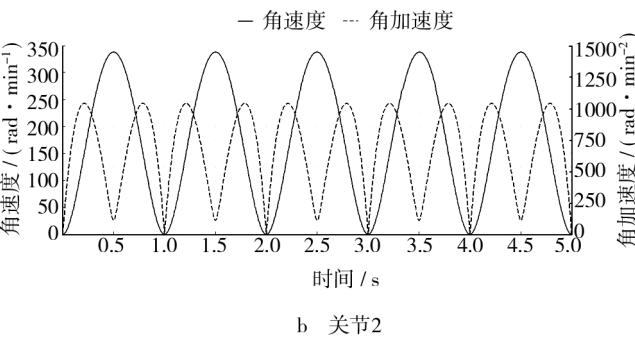
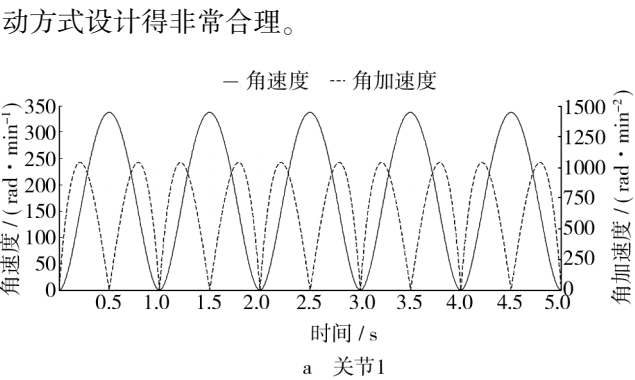


图 6 关节 1,2,3 速度和加速度曲线
Fig. 6 Velocity and acceleration curve of joint 1,2 and 3

4 轨迹^[10]曲线函数的确定

根据码垛机器人动力学仿真分析所得到的轨迹曲线,通过对曲线在 Adams 中进行数据曲线后处理,从构成完成样条曲线上的 100 个点中,按等间距原则,提取其中的 24 个点作为曲线拟合的关键点,然后采用 Matlab 强大拟合工具箱进行码垛机器人空间轨迹曲线^[11]的拟合。提取点的具体坐标见表 1。

通过对表 1 中的数据分析,为了能够得到一条光滑的样条曲线,在 Matlab 中选择用 n 次多项式^[12-13]作为基函数,分别在空间曲线上点的 x, y, z 等 3 个分量进行 n 次多项式拟合,设多项式的通用表达式为:

表 1 轨迹曲线点坐标

Tab.1 Point coordinates of trajectory curve

点	<i>t</i> /s	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>
1	0	0	0	0
2	0.04	38.52	-4.15	-16.46
3	0.08	86.82	-9.24	-33.70
4	0.12	153.44	-16.08	-51.72
5	0.16	237.18	-24.49	-65.52
6	0.2	335.92	-34.27	-69.78
7	0.24	446.33	-45.25	-59.32
8	0.28	563.74	-57.22	-29.77
9	0.32	682.29	-70	21.91
10	0.36	795.37	-83.39	96.88
11	0.4	896.22	-97.21	194.13
12	0.44	978.71	-111.26	310.48
13	0.48	1038.1	-125.36	440.86
14	0.52	1071.58	-139.32	578.88
15	0.56	1078.62	-152.96	717.64
16	0.6	1061.02	-166.10	850.49
17	0.64	1022.55	-178.57	971.85
18	0.68	968.44	-190.19	1077.66
19	0.72	904.77	-200.80	1165.66
20	0.76	837.76	-210.24	1235.39
21	0.8	773.29	-218.34	1287.84
22	0.84	716.57	-224.95	1325.06
23	0.88	671.91	-229.89	1349.34
24	0.92	642.79	-233.03	1363.12

$$y = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \cdots + a_0 = \sum_{i=0}^n a_i x^i \quad (10)$$

在 Matlab 数据拟合工具箱中,对数据进行 *n* 次多项式拟合采用的是 polyfit 函数,自变量为时间 *t*,而 *x*, *y*, *z* 为拟合的函数。运行曲线拟合程序^[14—15],分别得到 3 个方向对应的多项式系数。多项式的具体系数值见表 2。

将上面得到的多项式系数值分别带入各分量相对应的通用方程中,可以得到空间曲线 *x*, *y*, *z* 等 3 个方向上关于时间 *t* 的方程,那么码垛机器人的完整空间轨迹方程就由 *x*, *y*, *z* 等 3 个方向上的曲线合成,具体方程为:

$$\begin{aligned} x &= -0.0015t^{24} + 0.0203t^{23} - 0.1285t^{22} + 0.5066t^{21} + \cdots - 0.0002t^6 \\ y &= 0.0010t^{24} - 0.0203t^{23} + 0.1029t^{22} - 0.4278t^{21} + \cdots + 0.0002t^6 \end{aligned}$$

表 2 多项式系数

Tab.2 Polynomial coefficients

	<i>a</i> ₂₄	<i>a</i> ₂₃	<i>a</i> ₂₂	<i>a</i> ₂₁	<i>a</i> ₂₀
<i>x</i>	-0.0015	0.0203	-0.1285	0.5066	-1.3960
<i>y</i>	0.0010	-0.0151	0.1029	-0.4278	1.2290
<i>z</i>	0.0006	-0.0081	0.0523	-0.2090	0.5824
	<i>a</i> ₁₉	<i>a</i> ₁₈	<i>a</i> ₁₇	<i>a</i> ₁₆	<i>a</i> ₁₅
<i>x</i>	2.8647	-4.5497	5.7362	-5.8416	4.8624
<i>y</i>	-2.6071	4.2538	-5.4843	5.6907	-4.8128
<i>z</i>	-1.2065	1.9321	-2.4536	2.5147	-2.1052
	<i>a</i> ₁₄	<i>a</i> ₁₃	<i>a</i> ₁₂	<i>a</i> ₁₁	<i>a</i> ₁₀
<i>x</i>	-3.3344	1.8930	-0.8916	0.3484	-0.1127
<i>y</i>	3.3458	-1.9220	0.9147	-0.3607	0.1176
<i>z</i>	1.4512	-0.8277	0.3915	-0.1536	0.0498
	<i>a</i> ₉	<i>a</i> ₈	<i>a</i> ₇	<i>a</i> ₆	<i>a</i> ₅
<i>x</i>	0.0300	-0.0065	0.0012	-0.0002	0
<i>y</i>	-0.0315	0.0069	-0.0012	0.0002	0
<i>z</i>	-0.0133	0.0029	-0.0005	0.0001	0

$$\begin{aligned} z &= 0.0006t^{24} - 0.0081t^{23} + 0.0523t^{22} - 0.2090t^{21} + \cdots + 0.0001t^6 \end{aligned}$$

5 结语

通过 Matlab 程序语言对机器人各关节转角变化进行求解,得到了转角变化量。然后用五次多项式进行海赛逼近,并将多项式以角度位移驱动的形式加到对应的关节处,在 Adams 中进行动力学仿真,得到了各关节的角速度和角加速度。最后在空间样条曲线上取点,在 Matlab 中对空间曲线进行 *n* 次多项式拟合,得到了空间曲线的函数表达式,提出了一种用矢量调节轨迹曲线的方式来设计码垛机器人的控制系统的方法,从而能够快速有效地调节机器人的运动轨迹,为码垛机器人控制系统的设计提供较为精确的参考和依据。

参考文献:

[1] ZHANG Hao, SUN Qiang, LI Long-jing. Planning and Simulation of Wafer-handling Robot Trajectories Based on ADAMS[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2013, 2(2): 70—73.
[2] ZHANG Chi. Path Tracking of a Mobile Robot Using Inertial Measurement Unit [J]. Control Theory & Applications, 2013, 3(3): 398—403.
[3] NOVEL ANDREA B D, BASTIN G, CAMPION G. Control of

- Non-holonomic Wheeled Mobile Robots by State Feedback Linearization [J]. International Journal of Robotics Research, 1995, 14(6): 543—559.
- [4] 张明,何庆中,郭帅. 酒箱码垛机器人的机构设计与运动仿真分析[J]. 包装工程, 2013, 34(1): 83—87.
- ZHANG Ming, HE Qing-zhong, GUO Shuai. Mechanical Design and Motion Simulation Analysis of Liquor Automated Production Line Palletizing Robot [J]. Packaging Engineering, 2013, 34(1): 83—87.
- [5] 李晓刚,刘晋浩. 码垛机器人的研究与应用现状、问题及对策[J]. 包装工程, 2011, 32(3): 96—102.
- LI Xiao-gang, LIU Jin-hao. Pallet Robot Research and Application Present Situation, Problems and Countermeasures [J]. Packaging Engineering, 2011, 32(3): 96—102.
- [6] 耿武帅,齐元胜,王晓华,等. 平压平模切机驱动机构创新设计及理论分析[J]. 包装工程, 2011, 32(11): 61—64.
- GENG Wu-shuai, QI Yuan-sheng, WANG Xiao-hua, et al. Creative Design and Theoretical Analysis of Drive Mechanism of Plane Die-cutting Machine [J]. Packaging Engineering, 2011, 32(11): 61—64.
- [7] 李发展,卢章平. 基于 Adams 模切机肘杆机构特性分析[J]. 包装工程, 2011, 32(1): 24—26.
- LI Fa-zhan, LU Zhang-ping. Characteristic Analysis of the Elbow-bar Mechanism of Die-cutting Machine Based on Adams [J]. Packaging Engineering, 2011, 32(1): 24—26.
- [8] 洪波,包能胜. 包装机械的概念设计图例软件的设计及应用[J]. 包装工程, 2010, 31(4): 78—81.
- HONG Bo, BAO Neng-sheng. Design and Application of Conceptual Design Legend Software for Packaging Machinery [J]. Packaging Engineering, 2010, 31(4): 78—81.
- [9] FU Hong-shuan, ZHAO Heng-hua, YANG Hui. Inverse Solutions Dynamics of the Parallel Machine [J]. Machinery Design & Manufacture, 2013(5): 94—95.
- [10] 李增刚. Adams 入门详解与实例 [M]. 北京:国防工业出版社, 2006.
- LI Zeng-gang. Detailed Introduction and Examples of Adams [M]. Beijing: Nation Defense Industry Press, 2006.
- [11] LIU Chao-ying, DU Qi-xin, et al. Design and United Simulation of 3 DOF NC Machining Experimental Platform Based on Virtual Prototyping Technology [J]. Machinery Design & Manufacture, 2013(5): 130—132.
- [12] GUO Bo-lin, HU Zheng-yi. The Trajectory Planning & Simulation of the Handling Manipulator Based on ADAMS [J]. Journal of Hubei University of Technology, 2007, 22(4): 37—39.
- [13] RUI Zhi-yuan, LIU Tao. Kinematics Analysis and Simulation of the Palletizing Robot [J]. Machinery Manufacture, 2010, 48(4): 7—10.
- [14] SUN Zhong-gui. A Fitting Method for Space Curve [J]. Journal of East China Geological Institute, 2003, 26(2): 153—154.
- [15] HU Xiao-ping, PENG Tao, ZUO Fu-yong. A Trajectory Planning Method Based on Newton Interpolation and Polynomial For Manipulator [J]. The Chinese Mechanical Engineering, 2012, 23(24): 2947—2949.

(上接第15页)

- HE Shan-shan, ZHANG Zi-yin, LIU Tong, et al. Preparation and Mechanical Properties of Lignin-epoxy Resin Composite Reinforced by Wood Flour [J]. Chemistry and Adhesion, 2013, 35(3): 26—28.
- [20] XIE Y J, CALLUM A S H, XIAO Z F, et al. Silane Coupling Agents Used for Natural Fiber/Polymer Composites [J]. Composites, 2010, 41: 806—819.
- [21] 刘荣榕. PVC/木粉复合材料的制备及其性能的研究 [D]. 上海:上海交通大学, 2008.
- LIU Rong-rong. A Study on the Preparation and Properties of PVC/Wood Flour Composites [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2008.
- [22] 刘玉慧,白鸿博,温安华,等. 改性木纤维 PVC/复合材料界面及性能的研究 [J]. 当代化工, 2007, 36(4): 438—442.
- LIU Yu-hui, BAI Hong-bo, WEN An-hua, et al. Interfacial Interactions on Properties of Modified Wood-fiber/PVC Composite [J]. Contemporary Chemical Industry, 2007, 36(4): 438—442.
- [23] 刘约权. 现代仪器分析 [M]. 北京:高等教育出版社, 2001: 143—163.
- LIU Yue-quan. Modern Instrumental Analysis [M]. Beijing: Higher Education Press, 2001: 143—163.
- [24] 刘贤森,费本华,江泽慧. 偶联剂对玻璃纤维增强造纸污泥纤维板的影响 [J]. 建筑材料学报, 2011, 14(3): 423—426.
- LIU Xian-miao, FEI Ben-hua, JIANG Ze-hui. Effect of Coupling Agent on Paper Sludge Fiberboard Reinforced by Fiberglass [J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(3): 423—426.