

酒箱码垛机器人的机构设计与运动仿真分析

张明, 何庆中, 郭帅

(四川理工学院, 自贡 643000)

摘要: 针对白酒生产线码垛作业, 设计了专门的码垛机器人, 利用平行四边形机构对码垛机器人进行了结构设计。再根据码垛机器人的结构特点, 运用 D-H 法对运动模型进行了位姿和速度的正反解。在此基础上, 利用 ADAMS 软件对机器人的运动过程进行了仿真, 得到了关节扭矩、角速度和角加速度曲线, 为后续工作的控制系统设计提供依据。

关键词: 码垛机器人; 运动仿真; 雅可比矩阵; ADAMS

中图分类号: TB486+.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2013)01-0083-05

Mechanical Design and Motion Simulation Analysis of Liquor Automated Production Line Palletizing Robot

ZHANG Ming, HE Qing-zhong, GUO Shuai

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

Abstract: According to the palletizing job of liquor production line, a special palletizing robot was designed by using parallelogram mechanism. The positive and negative solution of motion model pose and speed was solved using the D-H method according to the structural characteristics of palletizing robot. The robot motion process was simulated using ADAMS software. The torque, angular velocity, and angular acceleration curves of joints were obtained. The purpose was to provide basis for the control system design.

Key words: palletizing robot; motion simulation; Jacobian matrix; ADAMS

码垛技术是物流自动化技术领域的一门重要技术, 随着工业自动化的发展, 码垛机器人已经在各个行业, 如机械制造、医疗卫生、石油化工、食品饮料、仓储物流、交通运输等都发挥着不可替代的作用^[1]。目前已有许多研究针对工业机器人的机构以及运动学等方面, 也得到了一定的可行性成果。由于很多码垛机器人在速度、承载能力以及系统的可靠性方面都存在问题, 不能为机器人的成功研制提供可靠保障, 因此文中在已研究的成果上针对上述问题进行了进一步的设计与研究, 并通过仿真来验证其正确性。

1 码垛机器人的结构设计

为提高码垛机器人机械系统的控制性能, 要求机

械传动部件的转动惯量小、摩擦小、阻尼比合理、刚度大, 并满足体积小、质量轻、高速、低噪音和高可靠性等要求。由此可见, 合理的设计驱动方式和机械传动是保证整个机器人伺服控制性能的基本要求^[2-3]。

1.1 码垛机器人腰部设计

机器人腰部结构的旋转主要靠克服负载的转动惯量, 由电机和固定在底座上的齿轮传动来带动底盘转动^[2], 其结构见图 1。

1.2 码垛机器人臂部设计

码垛机器人的臂部均为旋转关节, 前后臂都采用四杆机构, 其特点是机器人在空间运动时, 始终能保证被夹的酒箱与水平面保持平行, 可减少酒箱的空间位置姿态控制自由度, 从而降低了码垛机器人的控制难度^[4]。通过伺服电机经减速器实现传动, 此结构还

收稿日期: 2012-11-04

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

作者简介: 张明(1986-), 男, 郑州人, 四川理工学院硕士生, 主攻机械设计及理论。

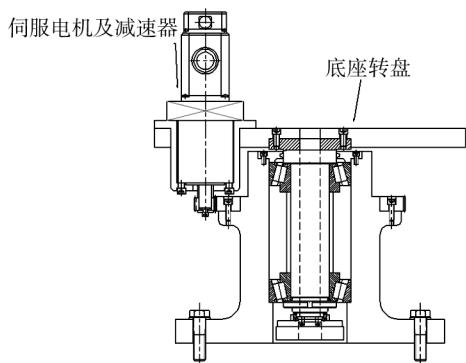


图1 码垛机器人腰部结构
Fig. 1 Palletizing robot waist structure

可以在意外发生时,如断电情况,起到自锁作用,防止酒箱掉落。臂部结构见图2。

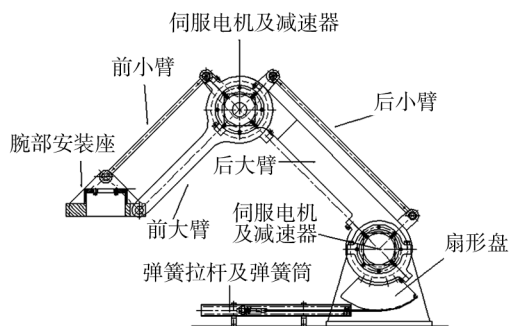


图2 码垛机器人臂部结构
Fig. 2 Palletizing robot arm structure

1.3 码垛机器人的工作原理

根据白酒包装箱码垛的要求,码垛机器人主要采用平行四边形连杆机构,此结构具有稳定性好、承载能力大、结构紧凑等特点。机器人有4个自由度,4个自由度分别由4个伺服电机控制完成三维空间的作业任务。

码垛的工作原理是机器人由初始位置转到工作点,手臂下降,抓取由传送带送入的酒箱,在托板上进行码垛。由于在实际情况下,码盘处的垛形会出现不同的情况,只靠末端执行器抓取或放下酒箱是满足不了实际需求的,因此就需要通过手腕部的电机驱动来调整末端执行器的位姿,使酒箱达到正确的位置,酒箱在空间中也是通过手腕部的调整来实现正确的位姿。机器人的前后臂则是通过各个电机与减速器产生旋转角度,带动末端执行器转到目标点。最后臂部放下酒箱完成码垛。

码垛机器人具体工作步骤:末端执行器抓取酒箱

→臂部抬起→底座旋转到目标点→臂部放下→末端执行器松开酒箱。在进行上述工作步骤的时候,为了提高工作效率,各个动作可以实现联动。比如在臂部抬起和放下的过程中,底座就可以同时进行旋转操作,但要注意臂部抬起的动作一定要先于底座的旋转,这样可以避免因手臂靠下而使酒箱发成碰撞。在整个工作过程中,酒箱完成的是一个曲线的轨迹。见图3。

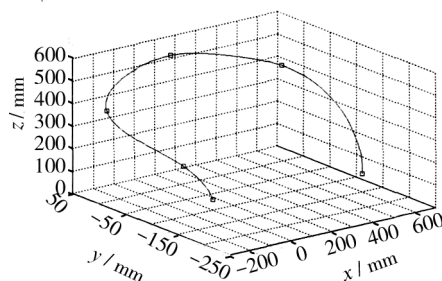


图3 码垛机器人的运动轨迹
Fig. 3 Palletizing robot motion trajectory

2 码垛机器人的运动学分析^[5-6]

2.1 位姿分析

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,根据机器人的臂部结构得出此结构的运动简图见图4。

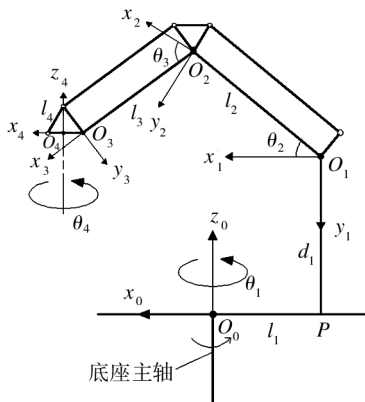


图4 码垛机器人臂部结构简图
Fig. 4 Diagram of the palletizing robot arm structure

图4中关节4(O_4)为从动关节,它与关节2,3(O_2, O_3)的关系为:

$$\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 = 0, \quad \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4 = 0 \quad (1)$$

根据图4中各个关节的参数,得到机器人的D-H参数表,见表1, $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ 分别为各个杆件的转角,

表 1 码垛机器人的 D-H 参数表

Tab. 1 Palletizing robot D-H parameter table

连杆 i	变量 θ_i /(°)	α_{i-1} /(°)	a_{i-1} /mm	d_i /mm	关节转角范围 /(°)
1	θ_1	-90	$l_1 = 150$	$d_1 = 195$	± 90
2	θ_2	0	$l_2 = 500$	0	$75 \sim -15$
3	θ_3	0	$l_3 = 360$	0	$45 \sim -45$
4	θ_4	90	$l_4 = 84.9$	0	± 90

即关节变量,其中,从坐标 O_1 到坐标 O_2 , x 轴没有旋转,即 $\theta_1 = 0^\circ$,同理 $\theta_4 = 0^\circ$, l_1, l_2, l_3, l_4 分别为连杆的常量,关节的转角范围是机器人在作业时的最大运动范围。

由于码垛机器人的 4 个关节均为旋转关节,所以应用广义连杆变换齐次矩阵的一般表达式:

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1}d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $s\theta_i = \sin \theta_i$, $c\theta_i = \cos \theta_i$, $i = 1, 2, 3, 4$ 。

把表 1 中的连杆参数带入式(2)中,得到各个连杆的变换矩阵为 ${}^0T_1, {}^1T_2, {}^2T_3, {}^3T_4$,将各个连杆的变换矩阵相乘并把式(1)带入化简,可得到机器人臂部的总变换矩阵,即为手臂末端连杆坐标系相对于底座坐标系的变换矩阵:

$${}^0T_4 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_1 + l_4 + l_3 c\theta_2 + l_2 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 1 & -l_3 s\theta_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)即为码垛机器人手臂的位姿正解方程,在该方程中可以看出机器人末端手腕处的转轴只有 3 个位移坐标,即:

$$\begin{cases} p_x = l_1 + l_4 + l_3 c\theta_2 + l_2 \\ p_y = d_1 \\ p_z = -l_3 s\theta_2 \end{cases} \quad (4)$$

其中: p_x, p_y, p_z 为手腕转轴坐标系原点在底座坐标系 $\{0\}$ 中的坐标。

以上所计算的为码垛机器人的位姿正解,位姿的反解则是根据机器人手臂末端的坐标系来确定各个关节变量,根据已知的式(4)来求解 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$,限于篇幅这里不再给出。

2.2 速度分析

机械手速度分析就是在位姿分析的基础上,研究末端连杆空间速度与关节空间速度的线性映射关系^[7]。可以通过求解雅可比矩阵和雅可比逆矩阵来分别算出速度的正解与反解。

此码垛机器人的的关节数为 3,手臂末端的自由度也为 3,因此它的雅可比矩阵为 3 阶方阵。对式(4)进行求导得:

$$\begin{cases} {}^0v_{4x} = -\dot{\theta}_2 l_3 s\theta_2 \\ {}^0v_{4y} = 0 \\ {}^0v_{4z} = -\dot{\theta}_2 l_3 c\theta_2 \end{cases} \quad (5)$$

其中, ${}^0v_{4x}, {}^0v_{4y}, {}^0v_{4z}$ 分别是末端执行器相对于底座坐标系的速度分量,再将式(5)变换成矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} {}^0v_{4x} \\ {}^0v_{4y} \\ {}^0v_{4z} \end{bmatrix} = [{}^0J_{3 \times 3}] \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: ${}^0J_{3 \times 3}$ 即为末端执行器相对于底座坐标系的雅可比矩阵。

在式(5)中,把 ${}^0v_{4x}, {}^0v_{4y}, {}^0v_{4z}$ 看成已知量,关节的速度当成未知量,分别解出各个式子就得出速度的反解。在速度的反解中,各个分式的分母均不能为零。分母为零的情况是操作臂处于工作空间的奇异位形,当一个操作臂处于奇异位形时,它就会失去一个或多个自由度(在笛卡尔空间中观察)^[8]。当关节丧失自由度时,关节速度所引起的末端执行器的速度向量只具有某一特定方向,就不能得到任意的速度向量,这样的机械手将无法进行速度控制^[9]。由此可见,在对码垛机器人做轨迹规划时,应避开速度反解不存在的点。

3 码垛机器人的运动仿真分析^[10]

ADAMS 软件可以进行运动和动力学的仿真分析。在不影响运动分析的情况下,先用 Inventor 三维软件构造出码垛机器人的简化模型,再通过#.x_t 文件导入到 ADAMS 中,见图 5。

对各个导入的零部件分配材料,机器人的底座采用铸铁,手臂采用铝合金材料。定义完材料后,对各个连接进行必要的约束,除固定约束外,各关节处均采用旋转铰链约束。最后对各个旋转关节添加驱动力,底座转盘与底座的旋转驱动力定为 MOTION_1,

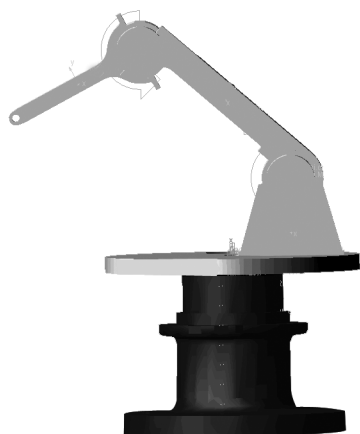


图5 码垛机器人的简化模型

Fig. 5 The palletizing robot simplified model

后大臂与减速器1的旋转驱动力定为 MOTION_2,前大臂与减速器2的旋转驱动力定为 MOTION_3,再根据机器人工作空间的范围和整个码垛过程在各个驱动力上添加 Step 函数的速度曲线。经过计算得出3个旋转铰链处的扭矩、角速度和角加速度的曲线,见图6。

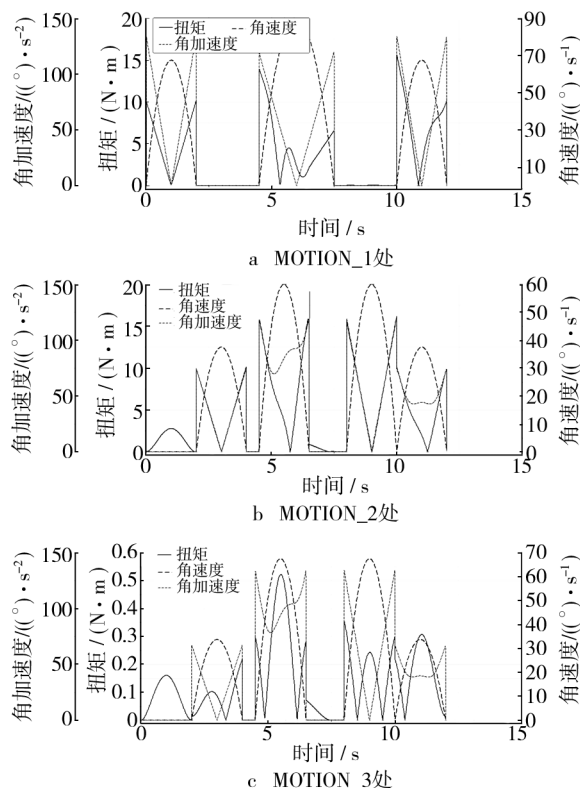


图6 3个旋转铰链处的扭矩、角速度和角加速度的曲线

Fig. 6 Torque, angular velocity, and acceleration curves at three rotation gemels

根据运动学方程的解,带入相对应的数据,在机器人运行1s时,得到各个关节变量是 $\theta_1 = 33.3^\circ$, $\theta_2 = 49.6^\circ$, $\theta_3 = 90^\circ$, $\theta_4 = 99.6^\circ$,将其带入式(4)中,得到 $x = 868.223$, $y = 195$, $z = -274.154$,此与仿真的结果一致。

从仿真的结果来看,底座在工作中完成起一停一起的动作,所以速度变化时,加速度突变,扭矩突变。在臂部关节运动时,因为会有联动,所以在速度变化时,速度联动点加速度的曲线会比较圆滑,这样会减小对扭矩的冲击。应尽量控制突变的发生,尤其是扭矩的突变。针对扭矩在选择电机时,扭矩曲线的最大值要小于电机的最大转矩,而连续有效的负载转矩应小于电机的额定转矩。在进行控制系统设计时,应避免电机的突然启动与制动,这样会加大关节扭矩的突变,影响关节的寿命^[11]。

经过试验得出的数据与计算一致。根据以上各个关节处的扭矩、角速度和角加速度的曲线图,可为选择伺服电机和减速器提供必要的依据,也为控制系统的设计创造了理论基础。

4 结语

提出了白酒生产线的码垛机器人的设计方案,通过D-H法的计算得到各个关节处的位姿方程、速度的正反解。运用ADAMS软件对运动过程进行仿真,得出仿真图,根据仿真结果为伺服电机和减速器的选择以及控制系统的设计提供理论依据。

参考文献:

- [1] 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. Palletizing Robot Application Status, Problems and Countermeasures [J] Packaging Engineering, 2011, 32(3):96-102.
- [2] 朱世强,王宣银. 机器人技术及其应用[M]. 杭州:浙江大学出版社,2000.
ZHU Shi-qiang, WANG Xuan-yin. Robot Technology and Its Application [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2000.
- [3] 马香峰. 机器人机构学[M]. 北京:机械工业出版社,1991.
MA Xiang-feng. Robot Mechanism to Learn [M]. Beijing: China Machine Press, 1991.

- [4] 李成伟, 负超. 码垛机器人机构设计与运动学研究[J]. 机械设计与制造, 2009, 6(6): 181-183.
YI Cheng-wei, YUN Chao. Palletizing Robot Mechanical Design and Kinematics[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2009, 6(6): 181-183.
- [5] 姚猛, 韩宝玲, 罗庆生, 等. 工业码垛机器人机构设计与运动学分析[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2011, 5(5): 31-37.
YAO Meng, HAN Bao-ling, LUO Qing-sheng. Industrial Palletizing Robot Mechanical Design and Kinematic Analysis[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2011, 5(5): 31-37.
- [6] 刘飞飞, 缪周. 重型桶装物品搬运码垛机器人的设计与研究[J]. 机床与液压, 2004(6): 130-132.
LIU Fei-fei, MIAO Zhou. The Heavy Barrels Items Handling Palletizing Robot Design and Research[J]. Machine Tools and Hydraulic, 2004(6): 130-132.
- [7] 龚振邦. 机器人机械设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 1995.
GONG Zhen-bang. Robot Mechanical Design[M]. Beijing: Electronics Industry Press, 1995.
- [8] CRAIG J J. 机器人学导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
CRAIG J J. Robot Introduction[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.
- [9] 芮执元, 刘涛. 码垛机器人运动学分析与仿真[J]. 机械制造, 2010, 48(4): 7-10.
RUI Zhi-yuan, LIU Tao. Palletizing Robot Kinematics Analysis and Simulation[J]. Machinery Manufacturing, 2010, 48(4): 7-10.
- [10] 何庆中, 赵献丹, 刘明, 等. 基于 MATLAB 的微电驱串联机械手工作空间域解算与仿真[J]. 四川理工学院学报, 2006, 10(5): 5-9.
HE Qing-zhong, ZHAO Xian-dan, LIU Ming, et al. Based on the MATLAB Micro Electric Drive Series on the Working Space of Manipulator Field Computation and Simulation[J]. Journal of Sichuan Institute of Technology, 2006, 10(5): 5-9.
- [11] 雷崇华, 何庆中, 李江. 电驱微差 6R 关节型开链机械手工作空间运动学逆解[J]. 四川理工学院学报, 2008, 6(3): 103-106.
LEI Chong-hua, HE Qing-zhong, LI Jiang. Electric Drive Differential 6R Joint Type Open the Working Space of Manipulator Kinematics Inverse Solution[J]. Journal of Sichuan Institute of Technology, 2008, 6(3): 103-106.

(上接第 78 页)

- XIONG Guang-leng, LI Bo-hu, CHAI Xu-dong. Virtual Prototyping Technology[J]. Journal of System Simulation, 2011(1): 114-116.
- [2] 贺兵. 基于虚拟样机技术的包装机械系统仿真研究[J]. 包装工程, 2008, 29(2): 47-49.
HE Bing. Simulation Study of Packaging Machine Based on Virtual Prototyping[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(2): 47-49.
- [3] 成刚虎, 柴三中, 张选生. 模切机施压机构的运动特性分析与优化设计[J]. 西安理工大学学报, 2006, 22(3): 249-252.
CHENG Gang-hu, CHAI San-zhong, ZHANG Xuan-sheng. Motion Analysis and Optimum Design of the Dual-elbow-bar Mechanism of the Die-cutting Machine[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2006, 22(3): 249-252.
- [4] 谢继光, 邹慧君. 自动平压平模切机双肘杆机构动态分析[J]. 机械设计与研究, 2005, 21(3): 75-77.
XIE Ji-guang, ZOU Hui-jun. Dynamic Analysis of the Double-elbow-bar Mechanism of Automatic Vertical Platen Die-cutter[J]. Machine Design and Research, 2005, 21(3): 75-77.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 朱峰, 葛正浩, 苏鹏刚, 等. 基于 ADAMS 的平行分度凸轮机构的动力学仿真[J]. 包装工程, 2009, 30(6): 1-4.
ZHU Hao, GE Zheng-hao, SU Peng-gang, et al. Dynamic Simulation of Parallel Indexing Cam Mechanism Based on Adams[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(6): 1-4.