

DOI: 10.3969/j.issn.2095-509X.2019.01.005

# 堆码机器人的静态受力变形和动态误差分析

王林军<sup>1,2</sup> 梁志国<sup>1,2</sup> 张东<sup>2</sup>

(1. 兰州理工大学机电工程学院, 甘肃 兰州 730050)

(2. 兰州理工大学西部能源与环境研究中心, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 以关节型堆码机器人 DJM-1200 作为研究对象, 阐述了堆码机器人的总体机构设计。利用激光干涉仪对其在 3 种典型位姿下的静态受力变形进行测量分析, 同时对机器人的 Z 轴垂直运动和 Y 轴水平运动两种状态进行动态误差分析。结果发现零位姿形变量适中, 满足机器人刚度要求, 故机器人可以用零位姿长期摆放, 同时误差分析的结果对于机器人轨迹的修订以及位移误差的补偿具有积极的借鉴意义。

**关键词:** 堆码机器人; 静态受力变形; 动态误差分析

中图分类号: TP242

文献标识码: B

文章编号: 2095-509X(2019)01-0019-04

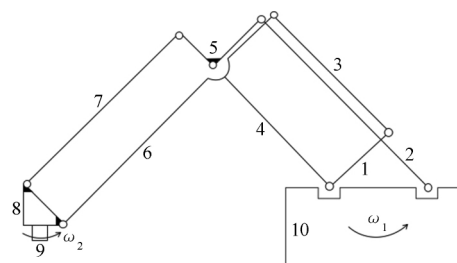
机器人是现代出现的一种光机电一体化产物。机器人技术创建在多学科发展的根基上, 具有应用领域广、技术新、学科综合与交叉性强等特点<sup>[1]</sup>。智能机器人涉及的知识面很广, 有行为仿真、通讯、影像辨别、传感器、机构、嵌入式系统等。传统的机器人技术涉及机械学、电子学、自动控制等学科; 现代机器人技术则包括了更加广泛的学科和技术领域, 如计算机技术、仿生学、生物工程、人工智能、微机械、信息工程、遥感技术等。

关节臂机器人是一种能模拟人手臂的部分动作, 按预设的程序轨迹及其他要求, 实现抓取物料、搬运工件或操作工具的自动化装置<sup>[2]</sup>。堆码机械手是一台由四轴控制、能够高速搬运物料的智能设备<sup>[3]</sup>, 它可以将物料从一个位置用吸盘或托盘搬起, 在运动过程中通过程序的设计对物料进行旋转、移动, 然后有规律地放在另一指定的位置, 省去了大量人力, 降低了人工成本<sup>[4-5]</sup>。在实际的包装生产工艺中, 对于堆码机器人的定位要求较高, 通常要求对货物进行整齐规则的堆放。由于机器长期的高强度使用, 以及搬运过程中不同质量的货物对机器的冲击, 会使得机器在不同位姿下的位移产生误差。因此对堆码机器人进行静态受力变形和动态误差分析, 对于机器人轨迹的修订以及位移误差的补偿具有积极的意义。

## 1 堆码机器人的 3 种典型位姿

### 1.1 总体机构分析

本文研究的堆码机器人在机构上跟一般的工业机器人有所不同, 该机器人采用的是平行四边形机构, 大臂和小臂之间通过配重块横臂和配重块上连杆组成一个平行四边形辅助机构; V 字杆及其下部连杆和连接中心组成又一个平行四边形辅助机构; 托盘连接机构通过 V 字杆和上部横连杆组成另外一个平行四边形辅助机构, 如图 1 所示。为保证物料的正确堆码, 该堆码机器人托盘连接机构通过 3 个平行四边形辅助机构的旋转始终保持与水平面垂直。



1—配重块横臂; 2—V 字杆下部连杆; 3—配重块横臂连杆;  
4—大臂; 5—V 字杆; 6—小臂; 7—V 字杆上部连杆;  
8—托盘连接机构; 9—托盘; 10—连接中心

图 1 堆码机器人的机构简图

该堆码机器人主要有 4 个自由度, 即 4 个旋转

收稿日期: 2017-08-27

基金项目: 甘肃省高等学校科研项目(2015A-040)

作者简介: 王林军(1963—), 男, 教授, 主要研究方向为机械 CAD、新能源利用技术等, wanglinjun@lut.cn.

通讯作者: 梁志国, 1397545637@qq.com.

关节:腰部竖直方向的回转、大臂绕主轴I的俯仰、小臂绕主轴II的俯仰和托盘绕竖直方向的回转。托盘的最终位姿是通过腰部和手腕的回转来确定的,大臂和小臂的俯仰则确定物料的目标堆码位置。

由于该型堆码机器人的定位精度要求不是太高,且应用于大批大量的生产线,因而在控制系统中采用半闭环控制系统,在堆码机器人的手腕处安装转伺服电机和光敏传感器,用来确定物料的具体位置。当位置发生偏差时,通过半闭环控制系统反馈给控制主机。

托盘和连接中心能够实现旋转运动,从而到达三维空间范围内的目标点。运动时,大臂为原动件,带动整个机构运动。

### 1.2 相关参数

堆码机器人相关参数如下:1)机构为平行四边形机构,有4个自由度;2)最大回转半径为2735mm;3)最大负荷质量为60kg;4)重复定位精度为±0.8mm;5)腰部运动范围为-150°~150°,最大速度为90(°)/s;6)大臂绕主轴I的运动范围为15°~135°,最大速度为120(°)/s;7)小臂绕主轴II的运动范围为30°~170°,最大速度为120(°)/s;8)托盘连接机构绕主轴III的运动范围为-185°~165°,最大速度为120(°)/s。

### 1.3 3种位姿

根据前面给出的堆码机器人的相关参数,对堆码机器人简易模型的工作空间进行求解,得到如下3个位姿。

位姿1(如图2所示):机械手臂待机时的自然位姿(系统默认),简称零位姿。在此规定,当大臂绕主轴I的运动角度达到60°,同时小臂绕主轴II的运动角度达到75°,此时便是堆码机器人的零位姿,即位姿1。图中的α、β为空间三维坐标系中机械手臂与X轴、Y轴的夹角。

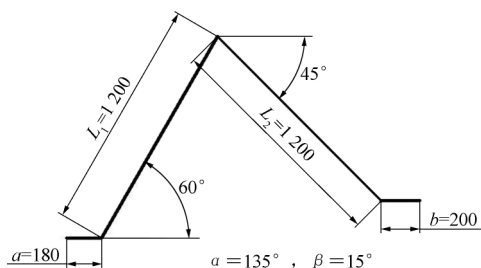


图2 位姿1处机构简图

位姿2(如图3所示):机械手臂与工作平台距离最短的位姿,简称极近位姿。当大臂绕主轴I的运动角度达到最大,同时小臂绕主轴II的运动角度达到最小,此时便是堆码机器人的极近位姿,即位姿2。

图中的γ为空间三维坐标系中机械手臂与Z轴的夹角。

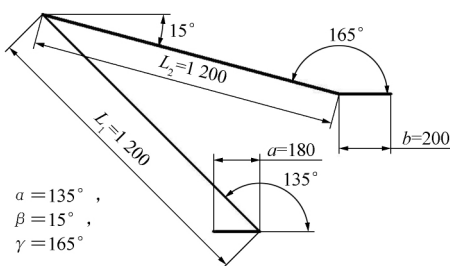


图3 位姿2处机构简图

位姿3(如图4所示):机械手臂与工作平台的距离最远的位姿,简称极远位姿。

当大臂绕主轴I的运动范围达到最小,同时小臂绕主轴II的运动范围到最大,此时便是堆码机器人的极远位姿,即位姿3。

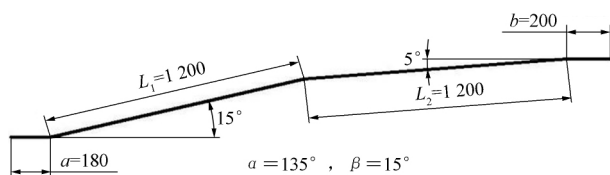


图4 位姿3处机构简图

## 2 3种典型位姿下的静态受力变形分析

通过机器人控制键盘将机器人分别调整到3种不同位姿,具体坐标参数见表1。表中,A为机器人腰部运动角度。

表1 3种位姿参数

	坐标			A/(°)
	X/mm	Y/mm	Z/mm	
位姿1	1334	883	827	-80
位姿2	869	454	1000	-86
位姿3	1979	1459	773	-77

出于安全和加载位置考虑,从空载开始,选取加载重物钢板每块质量为1.5kg,如图5所示,加载在吸盘两侧。



图5 加载实物图

## 2.1 静力学试验

分别对堆码机器人的位姿 1、2、3 处加载 3 ~

15kg 载荷, 进行静态试验, 统计测量位移量并绘制出统计表(表 2、表 3、表 4)。

表 2 位姿 1 处不同载荷下的位移试验数据

载荷/kg	第一组试验位移量/ $\mu\text{m}$		第二组试验位移量/ $\mu\text{m}$		第三组试验位移量/ $\mu\text{m}$		位移平均值/ $\mu\text{m}$	
	逐渐加载	逐渐减载	逐渐加载	逐渐减载	逐渐加载	逐渐减载	逐渐加载	逐渐减载
0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0.038 3	0.039 9	0.037 3	0.041 5	0.039 1	0.042 7	0.038 2	0.041 4
6	0.063 9	0.072 7	0.063 1	0.073 6	0.065 2	0.073 9	0.064 1	0.073 4
9	0.096 6	0.112 2	0.095 8	0.113 5	0.097 3	0.113 0	0.096 6	0.112 9
12	0.132 1	0.147 0	0.132 5	0.148 3	0.133 1	0.147 6	0.132 6	0.147 3
15	0.170 7	0.170 7	0.173 2	0.173 2	0.172 5	0.172 5	0.172 1	0.172 1

表 3 位姿 2 处不同载荷下的位移试验数据

载荷/kg	第一组试验位移量/ $\mu\text{m}$		第二组试验位移量/ $\mu\text{m}$		第三组试验位移量/ $\mu\text{m}$		位移平均值/ $\mu\text{m}$	
	逐渐加载	逐渐减载	逐渐加载	逐渐减载	逐渐加载	逐渐减载	逐渐加载	逐渐减载
0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0.072 1	0.100 9	0.071 6	0.102 3	0.083 2	0.100 0	0.075 6	0.101 1
6	0.149 2	0.173 0	0.148 5	0.175 6	0.150 3	0.148 0	0.149 3	0.165 5
9	0.226 9	0.245 3	0.225 9	0.246 6	0.227 1	0.245 0	0.226 6	0.245 6
12	0.306 7	0.318 8	0.306 1	0.319 0	0.307 5	0.320 5	0.306 8	0.319 4
15	0.385 6	0.385 6	0.385 3	0.385 3	0.386 2	0.386 2	0.385 7	0.385 7

表 4 位姿 3 处不同载荷下的位移试验数据

载荷/kg	第一组试验位移量/ $\mu\text{m}$		第二组试验位移量/ $\mu\text{m}$		第三组试验位移量/ $\mu\text{m}$		位移平均值/ $\mu\text{m}$	
	逐渐加载	逐渐减载	逐渐加载	逐渐减载	逐渐加载	逐渐减载	逐渐加载	逐渐减载
0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0.023 6	0.001 5	0.025 6	0.002 3	0.024 0	0.001 9	0.024 4	0.001 9
6	0.050 6	0.026 1	0.052 3	0.021 3	0.051 1	0.025 1	0.051 3	0.024 2
9	0.071 4	0.050 5	0.073 2	0.052 1	0.072 3	0.049 6	0.072 3	0.050 7
12	0.095 9	0.076 3	0.096 3	0.075 2	0.096 3	0.079 2	0.096 2	0.076 9
15	0.108 2	0.108 2	0.110 5	0.110 5	0.109 5	0.109 5	0.109 4	0.109 4

## 2.2 数据分析

由上述实验数据可知, 堆码机器人在 3 种典型位姿下加载 3 ~ 15kg 载荷时, 其位移试验数据近似呈直线上升趋势。实验中存在不可避免的误差, 具体分析为: 1) 逐级加载时, 质心偏移量过大, 使机器人在一定程度上有变形; 2) 机器人活动关节中的间隙过大, 对测量结果影响很大; 3) 载荷不断增加, 最终形成误差累积效果, 对试验测量结果产生误差放大效果; 4) 周围环境的影响, 如周围震动、试验台不稳定等, 都对测量结果有较大影响。

综上所述, 机器人的 3 种位姿在不同载荷的作用下, 位移偏移量都在误差允许范围内。极近位姿偏移量最大, 载荷质心距离地面约束最远, 形变量最大, 机器人不能长时间以极近位姿摆放。极远位姿变形量最小, 载荷质心距离地面约束最近, 形变量最小, 但容易触碰限位开关, 使整个系统卡死。

零位姿形变量适中, 载荷距离地面约束距离适中, 满足机器人刚度要求, 故机器人可以用零位姿长期摆放。

## 3 堆码机器人的动态误差分析

本文主要对堆码机器人在工作位姿沿 Z 轴垂直运动和 Y 轴水平运动时的误差进行分析。具体试验方案是让机器人以不同的速度值、不同的负载值, 用不同的加速度形式进行试验分析。

### 3.1 堆码机器人动态误差试验

在给定速度分别为 50mm/s、150mm/s、250mm/s 且为空载的情况下, 测量出堆码机器人在 3 种不同加速度方式下 Z 轴和 Y 轴的最大位移、最大速度以及最大加速度值。其试验数据见表 5 和表 6。

表 5 Z 轴不同加速度方式各指标比较

设定速度/ (mm·s <sup>-1</sup> )	正弦加速度			正弦平方加速度			梯形加速度		
	最大位移/ μm	最大速度/ (μm·s <sup>-1</sup> )	最大加速度/ (μm·s <sup>-2</sup> )	最大位移/ μm	最大速度/ (μm·s <sup>-1</sup> )	最大加速度/ (μm·s <sup>-2</sup> )	最大位移/ μm	最大速度/ (μm·s <sup>-1</sup> )	最大加速度/ (μm·s <sup>-2</sup> )
50	402 288.1	50 736.6	21 035.0	402 241.3	50 924.6	28 314.0	402 175.8	51 127.7	20 521.7
150	402 248.3	151 989.5	143 388.9	402 263.8	151 749.9	167 151.0	402 194.7	152 347.6	152 615.6
250	402 307.6	253 137.6	405 883.7	402 321.9	253 311.4	445 379.7	402 253.1	253 011.6	445 914.9

表 6 Y 轴不同加速度方式各指标比较

设定速度/ (mm·s <sup>-1</sup> )	正弦加速度			正弦平方加速度			梯形加速度		
	最大位移/ μm	最大速度/ (μm·s <sup>-1</sup> )	最大加速度/ (μm·s <sup>-2</sup> )	最大位移/ μm	最大速度/ (μm·s <sup>-1</sup> )	最大加速度/ (μm·s <sup>-2</sup> )	最大位移/ μm	最大速度/ (μm·s <sup>-1</sup> )	最大加速度/ (μm·s <sup>-2</sup> )
50	402 183.6	51 173.3	19 371.9	402 197.2	51 264.3	20 720.1	402 201.7	51 132.2	20 075.4
150	402 219.9	152 258.4	148 183.0	402 242.1	151 997.9	162 139.7	402 200.3	152 235.1	144 932.6
250	402 238.2	252 902.1	397 174.8	402 274.0	252 665.5	435 004.0	402 213.4	253 010.7	382 614.2

### 3.2 数据分析

根据 Z 轴和 Y 轴动态误差试验数据, 可得出如下结论: 1) 给予机器人不同的最大运行速度时, 位移偏差不大, 由此可知速度不是影响位移波动的主要因素; 2) 最大位移和最大速度在不同的加速度方式下, 试验数据相差不大; 3) 对于 Y 轴, 设定相同的最大速度, 正弦平方加速度方式加速度值最大, 梯形加速度方式加速度值最小; 对于 Z 轴, 则是正弦加速度方式加速度值最小。由此可知不同的加速度方式会影响到机器人运动的形式。

### 4 结论

- 1) 对堆码机器人 3 个典型位姿的分析表明, 机器人长期摆放时用零位姿最合适, 为堆码机器人后期的实验与研究提供了参考;
- 2) 利用激光干涉仪对机器人进行动态误差分

析, 测量精度高, 可以有效测得机器人在垂直运动和水平运动两种状态下位移、速度和加速度之间的误差, 对于机器人轨迹的修订以及位移误差的补偿具有积极的意义。

#### 参考文献:

- [1] 沈绪明, 董鹏. 我国机器人发展现状、需求及产业化探讨[J]. 物流技术, 2012(22): 68-71.
- [2] 邓铎. 关节臂式机器人示教轨迹采集系统设计与实现[D]. 广州: 广东工业大学, 2016.
- [3] 秦忠. KX-R145 型堆码机器人的关键技术研究[C]//2002 年十一省、区、市机械工程学术年会暨云南省机械工程学会第六届学术年会论文集. 昆明: 云南省机械工程学会, 2002.
- [4] 孙军艳, 曹西京, 汤建明, 等. 堆垛机的有限元模态分析[J]. 轻工机械, 2005, 23(2): 46-48.
- [5] 谭晓东, 于艳. 堆垛机器人结构力学分析与优化[J]. 大连交通大学学报, 2010, 31(6): 48-50.

### The error analysis on static stress deformation and dynamic of the stacker robot

Wang Linjun<sup>1,2</sup>, Liang Zhiguo<sup>1,2</sup>, Zhang Dong<sup>2</sup>

(1. College of Mechanic - Electronic Engineering,

Lanzhou University of Technology, Gansu Lanzhou, 730050, China)

(2. Western Energy and Environment Research Center,

Lanzhou University of Technology, Gansu Lanzhou, 730050, China)

**Abstract:** In this paper, DJM-1200, a joint-type stacking robot is used as the object of study. The overall design of the stacking robot is described. The static force deformation of the stacking robot is measured by laser interferometer, and the robot Z-axis vertical motion and Y-axis horizontal motion in two states for dynamic error analysis. The results show that the error results have positive significance for the revision of the robot trajectory and the compensation of the displacement error. This illustrates that the robot can be used for the long time.

**Key words:** stacker robot; static force deformation; dynamic error analysis