DOI: 10.13245/j.hust.15S1005

五自由度搬运机器人系统设计与运动学分析

丁 磊 李 恩 谭 民 王逸洲

(中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室, 北京 100190)

摘要 设计了一种用于冲压生产线上下料操作的新型五自由度搬运机器人. 首先,结合冲压生产线的应用需求设计了机器人的机械结构,并进一步构建了其控制系统;然后,对机器人运动学进行分析,建立机器人连杆坐标系,利用 D-H 法描述机器人正向运动学模型,并求解机器人逆运动学;最后,对机器人工作空间和运动精度进行描述,将工作空间分别投影到 xy,xz,yz 三个平面得到其具体参数,利用雅可比矩阵求解各关节最大容许误差,对机器人的参数设计和轨迹规划具有指导意义.

关键词 五自由度搬运机器人; 运动学; 工作空间; 运动精度; 分析

中图分类号 TP241.2 **文献标志码** A **文章编号** 1671-4512(2015)S1-0019-04

System design and kinematics analysis of a 5-DOF handling robot

Ding Lei Li En Tan Min Wang Yizhou

(State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract A new 5 degree of freedom (DOF) handling robot for punching production line was designed. Firstly, the robot mechanical structure was designed considering requirements of the punching production line. Then the control system was built. Secondly, the forward kinematics model was analyzed. The link coordinate system was established by the D-H method. The inverse kinematics was solved. Finally, workspace and movement precision was described. The workspace was projected to xy, xz, yz three planes to get its specific parameters. Kinematics, workspace and movement precision analysis are instructive to robot parameter design and trajectory planning.

Key words 5 degree of freedom (DOF) handling robot; kinematics; workspace; movement precision; analysis

在冲压生产线中,主要有传统的人工方式与自动化方式两种生产组织形式[1],人工方式采用手工送料,危险性高、劳动强度大、生产效率低,已经无法满足行业的需求,而自动化方式采用上下料机器人代替人工操作,在产品质量、安全生产、生产效率等方面都有较大优势,成为冲压行业发展的主要趋势. 目前冲压生产线在机械制造业、核工业、航空航天、能源、运输、石油化学、建筑和电子等行业都得到广泛应用[2].

在冲压生产中大中型冲压件生产节拍为12~25 次/min,冲压机器人作业时间仅有 1 s 左右,冲压机器人最高移动速度可达 80 m/min,定位精度为±0.5 mm[3]. 基于冲压生产的特点,冲压机器人应具备较大的工作空间、较高的运行速度[4]和末端运动精度.

目前国内冲压生产大部分采用人工操作方式,冲压机器人使用率较低,冲压机器人设计也存在着机器人工作空间较小、末端定位精度较低等问题. 针对这些问题,设计了一种新型五自由度搬运机器人,并对机器人运动学进行分析,完成机器

收稿日期 2015-06-30.

作者简介 丁 磊(1991-),男,硕士研究生, E-mail: dinglei2014@ia.ac.cn.

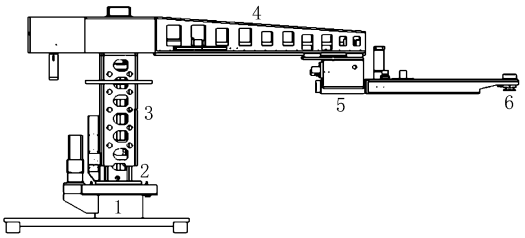
基金项目 国家高技术研究发展计划资助项目(2013AA041002); 国家自然科学基金资助项目(61403372).

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

人工作空间和运动精度的分析,保证了机器人搬运精度,增加了机器人适用范围.

1 机器人机构设计

设计的机器人为五自由度机器人,五个自由度分别为大臂旋转运动、大臂垂直移动,小臂平行移动、小臂扭转运动和末端执行器旋转运动.冲压机器人机械结构如图1所示.



1—底座;2—大臂旋转运动机构;3—大臂垂直移动机构;4—小臂平行移动机构;5—小臂扭转运动机构;6—末端执行器旋转运动机构

图1 冲压机器人机械手结构

大臂旋转机构采用伺服电机和行星减速机传动实现,整个机体都能随大臂摆动而进行回转运动;大臂垂直移动机构采用伺服电机,结合滚珠丝杆,将电机旋转运动转化成直线运动,实现垂直移动;小臂平行移动机构采用伺服电机和滚珠丝杆传动实现;小臂扭转机构采用步进电机及编码器实现,编码器反馈可以避免步进电机开环控制带来的控制误差,采用齿轮传动,实现小臂翻转;执行器旋转机构采用步进电机和齿轮传动,实现执行器旋转;执行器为真空吸盘.

冲压机器人的五自由度相互配合,既增大了机器人工作空间又提高了末端定位精度.大臂旋转运动可以覆盖水平面上绝大部分区域,在大范围内抓取工件;大臂垂直移动和小臂平行移动分别从抓取高度和半径上增大了工作空间;小臂扭转运动可以调整末端执行器位置,保证合适的角度抓取工件,增加定位精度;末端执行器旋转运动可以调整工件角度,增加定位精度和冲压精度.

2 控制系统设计

机器人控制系统由控制器、电机及其驱动器、人机交互界面和电源等部件构成.控制结构采用控制层、设备层和人机交互层分层设计,每个层次的功能各不相同,相互通信,共同完成控制任务.

控制层由主控制器与两个四轴运动控制卡组成.主控制器作为上位控制器,与两个运动控制卡通过串口进行通信,控制运动控制卡动作.主控制器工作于示教模式、手动控制模式和自动控制模式.运动控制卡发出控制信号和脉冲串控制设备层的电机,并接收传感器反馈信号进行处理.

设备层位于控制系统底层,包括执行机构(伺服电机和步进电机)、检测单元(限位传感器和零位传感器)等,通过驱动器或直接接收控制器指令,完成相应动作,并将执行器当前的状态反馈给控制层.

人机交互界面采用触摸屏实现,可显示并监控机器人当前状态,输出错误报警信息.此外,人机交互还可以通过手脉实现,相比触摸屏,手脉对于示教操作和手动控制更方便、直接.

3 运动学分析

3.1 运动学模型

采用D-H法[5-6]建立运动学模型,首先建立参考坐标系,z轴选取关节轴线方向,y轴选取机器人处于初始状态的手臂方向,根据坐标系建立规则依次建立各连杆坐标系,如图2所示,d_i为连杆偏移量.

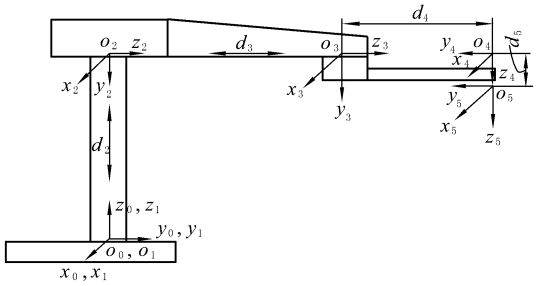


图2 冲压机器人坐标系

由图2建立的坐标系确定各连杆的D-H参数,其中各关节的关节角为θ_i,可得到各连杆的连杆变换矩阵为:

$$\boldsymbol{A}_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & 0 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$\boldsymbol{A}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$\boldsymbol{A}_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$\boldsymbol{A}_4 = \begin{bmatrix} \cos\theta_4 & 0 & -\sin\theta_4 & 0 \\ \sin\theta_4 & 0 & \cos\theta_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$\boldsymbol{A}_5 = \begin{bmatrix} \cos\theta_5 & -\sin\theta_5 & 0 & 0 \\ \sin\theta_5 & \cos\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

机器人的正向运动学可表示为

$$\boldsymbol{T} = \begin{bmatrix} s_1 s_5 + c_1 c_4 c_5 & s_1 c_5 - c_1 c_4 s_5 & -c_1 s_4 & B \\ s_1 c_4 c_5 - c_1 s_5 & -c_1 c_5 - s_1 c_4 s_5 & -s_1 s_4 & C \\ -s_4 c_5 & s_4 s_5 & -c_4 & d_2 - d_5 c_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

式中：$s_i = \sin\theta_i$，$c_i = \cos\theta_i$；$B = -(d_3 + d_4)s_1 - d_5 c_1 s_4$；$C = (d_3 + d_4)c_1 - d_5 s_1 s_4$.

3.2　逆运动学分析

机器人的逆向运动学是给定末端执行器位置和姿态得到各关节的参数. 控制机器人手臂时，逆运动学求解是实现机器人运动的基础. 给定末端位姿

$$\boldsymbol{T} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

式中：n_x，n_y，n_z，o_x，o_y，o_z，a_x，a_y 和 a_z 分别为末端坐标系的坐标轴在参考坐标系中的方向余弦；p_x，p_y 和 p_z 为末端坐标系的原点在参考坐标系中的位置矢量[4].

对照正向运动学末端位姿矩阵可得：

$$\begin{aligned} p_x &= -(d_3 + d_4)\sin\theta_1 - d_5\cos\theta_1\sin\theta_4; \\ p_y &= (d_3 + d_4)\cos\theta_1 - d_5\sin\theta_1\sin\theta_4; \\ p_z &= d_2 - d_5\cos\theta_4; \\ a_z &= -\cos\theta_4; \\ o_z &= \sin\theta_4\sin\theta_5. \end{aligned} \tag{1}$$

由上述方程组可求得：

$$\theta_4 = \mathrm{atan2}(\pm\sqrt{1 - a_z^2}, a_z);$$

$$\theta_5 = \mathrm{atan2}(\pm o_z, \sqrt{1 - a_z^2 - o_z^2});$$

$$d_2 = p_z - d_5 a_z;$$

$$d_3 = \pm\sqrt{p_x^2 + p_y^2 + d_5^2 a_z^2 - d_5^2} - d_4;$$

$$\theta_1 = \mathrm{atan2}(-p_x, p_y) - \mathrm{atan2}(d_5\sqrt{1 - a_z^2}, d_3 + d_4).$$

考虑机器人机构的限制，对方程组进行修正得逆运动学五个关节变量唯一解：

$$\theta_1 = \mathrm{atan2}(-p_x, p_y) - \mathrm{atan2}(d_5\sqrt{1 - a_z^2}, d_3 + d_4);$$

$$\theta_4 = \mathrm{atan2}(\sqrt{1 - a_z^2}, a_z);$$

$$\theta_5 = \mathrm{atan2}(-o_z, n_z);$$

$$d_2 = p_z - d_5 a_z;$$

$$d_3 = \sqrt{p_x^2 + p_y^2 + d_5^2 a_z^2 - d_5^2} - d_4.$$

4　工作空间分析

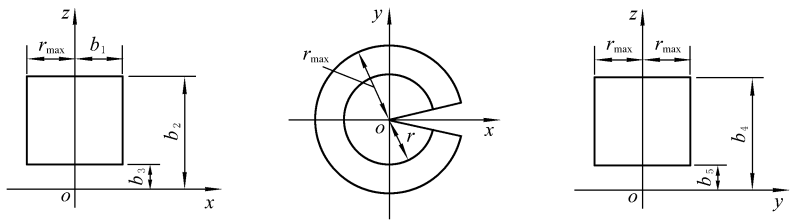
机器人的工作空间可以描述为末端执行器可以到达点的集合，机器人工作空间分析在机器人机构设计、轨迹规划和任务决策等方面有重要作用[7]. 由于机械结构的限制，关节变量只能在一定范围内取值，因此机器人的工作空间是受限制的.

冲压机器人属于柱坐标系机器人，其工作空间为圆柱环空间，为了便于描述，分别将其投影到 xy，yz 和 xz 平面，分析其具体参数.

首先将工作空间投影到 xy 平面，由式(1)中前两项可得

$$p_x^2 + p_y^2 = (d_3 + d_4)^2 + (d_5\sin\theta_4)^2.$$

由上式可得：工作空间在 xy 平面投影为圆环域，由于大臂旋转角度的限制，投影区域为缺圆环域. 其次将工作空间投影到 yz 平面得矩形域. 最后将工作空间投影到 xz 平面，与 yz 平面投影类似，具体参数如图 3 所示，其中 xy 平面投影缺



(a) xz 平面投影　　(b) xy 平面投影　　(c) yz 平面投影

图 3　xy，yz，xz 平面投影参数图

圆环域圆心角 $\theta = \theta_{1\max} - \theta_{1\min}$，缺圆环域外径 $r_{\max} = [(d_{3\max} + d_4)^2 + d_5^2]^{1/2}$. 图中：$b_1 = r_{\max}[1 - \cos(2\pi - \theta)/2]$；$b_2 = b_4 = d_{2\max} + d_5\cos(\pi - \theta_{4\min})$；$b_3 = b_5 = d_{2\min} - d_5$；$r = d_{3\min} - d_4$，式中 $\theta_{1\max}$ 和 $\theta_{1\min}$ 为 θ 取值的上下限；$d_{3\max}$ 和 $d_{3\min}$ 为 d 取值的上下限；$d_{2\max}$ 和 $d_{2\min}$ 为 d_2 取值上下限.

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

经过上述冲压机器人工作空间分析,所设计机器人能够实现从机床到机床的圆柱环空间内的搬运操作,满足了冲床上下料的实际需求.

5 运动精度分析

五自由度冲压机器人精度分析采用微分变换法,微分变换法可以把各方面的误差转变为连杆坐标系所产生的微小旋转误差和微小平移误差[8].为实现工件的精确定位,冲压机器人须满足0.2 mm定位精度的要求,为了分析机构装配和控制误差所造成的定位误差,须分析各关节误差与定位精度的关系.由机器人运动学结果及微分变换法,机器人雅可比矩阵可表示为

$$\boldsymbol{J}=\begin{bmatrix} D & -s_4c_5 & -s_5 & -d_5c_5 & 0 \\ E & s_4s_5 & -c_5 & d_5s_5 & 0 \\ F & -c_4 & 0 & 0 & 0 \\ -s_4c_5 & 0 & 0 & -s_5 & 0 \\ s_4s_5 & 0 & 0 & -c_5 & 0 \\ -c_4 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

式中:$D=d_5s_4s_5-(d_3+d_4)c_4c_5$;$E=d_5s_4c_5+(d_3+d_4)c_4s_5$;$F=(d_3+d_4)s_4$.

基于机器人雅可比矩阵,末端位姿广义位置矢量的微分运动量与关节变量微分运动量的关系可表示为

$$[d_x,\ d_y,\ d_z,\ \delta_x,\ \delta_y,\ \delta_z]^{\mathrm{T}}=\boldsymbol{J}[\Delta\theta_1,\ \Delta d_2,\ \Delta d_3,\ \Delta\theta_4,\ \Delta\theta_5]^{\mathrm{T}},$$

式中$\Delta\theta_1$,Δd_2和Δd_3为关节变量微分运动量.

由上式可得关节变量微分运动量的最小二乘解为

$$[\Delta\theta_1,\ \Delta d_2,\ \Delta d_3,\ \Delta\theta_4,\ \Delta\theta_5]^{\mathrm{T}}=(\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{J})^{-1}\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}[d_x,\ d_y,\ d_z,\ \delta_x,\ \delta_y,\ \delta_z]^{\mathrm{T}}.$$

对上式取范数可得各关节误差与末端精度的关系

$$(\Delta^2\theta_1+\Delta^2d_2+\Delta^2d_3+\Delta^2\theta_4+\Delta^2\theta_5)\leqslant\|(\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{J})^{-1}\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}\|_2^2(d_x^2+d_y^2+d_z^2+\delta_x^2+\delta_y^2+\delta_y^2).$$

由于末端最大定位误差为0.2 mm,因此在不考虑姿态误差的条件下,上式右侧可表示为$0.2^2\ \|(\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{J})^{-1}\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}\|_2^2$.

为了确定各关节的最大容许误差,可通过上式对所有位姿的遍历得到矩阵范数的最小值为1.0259,即右侧为$1.0259^2\times0.2^2$.

采用加权分配法进一步求取各轴的最大容许误差,权值分别取为1,1,1,2,2,则可得$\Delta\theta_1\leqslant0.0619$,$\Delta d_2\leqslant0.0619$,$\Delta d_3\leqslant0.0619$,$\Delta\theta_4\leqslant0.1238$,$\Delta\theta_5\leqslant0.1238$.从而建立了末端定位精度与各关节误差的关系,为实现末端定位精度,各关节的精度都要在最大容许误差范围之内,为加工、装配和控制的精度提供了参数指导.

6 结语

对五自由度冲压机器人进行了设计和分析,解决了冲压机器人的如下问题:考虑冲压生产线实际情况,对冲压机器人机构进行设计,为冲压机器人应用做好基础理论铺垫;通过对机器人的结构设计,最大程度上增加了机器人的工作空间,能在更大范围内进行搬运操作,将工作空间投影到xy,xz,yz三个平面得到了其具体参数,显式的表达了其工作空间范围;通过运动学分析,建立机器人运动学模型,并建立机器人雅可比矩阵,对运动精度进行分析,保证了机器人搬运精度,增加了机器人的适用范围.

五自由度冲压机器人并非全位姿可达的机械结构,因此在实际应用过程中,须结合机构自身的限制情况,进行合理的轨迹规划,才能确保机器人满足实际的搬运运动路径需求.

参 考 文 献

[1] 陈立新,郭文彦. 工业机器人在冲压自动化生产线中的应用[J]. 机械工程与自动化,2010(3):133-135.

[2] Wang Ke, Zhou Jiping. Kinematical analysis and simulation of high-speed plate carrying manipulator based on matlab[J]. Engineering, 2012(4):850-856.

[3] 冯江涛,赵娜,何昌传. 基于Adams的冲压机器人运动学仿真分析[J]. 模具制造,2015(2):70-73.

[4] 屈云涛. 冲压机器人本体设计及机器人自主设计开发研究[D]. 秦皇岛:燕山大学机械工程学院,2012.

[5] 谭民,徐德,侯增广,等. 先进机器人控制[M]. 北京:高等教育出版社,2007.

[6] 牛元会,程光明,杨志刚. D-H坐标系下机械手正向运动学分析[J]. 机械工程师,2006(7):27-29.

[7] 黄磊光,李耀通,谭民. 一般平面机器人的工作空间分析[J]. 机器人,1997,19(4):2-4+37.

[8] 兰春良. 焊接机器人的本体设计及其精度分析[D]. 秦皇岛:燕山大学机械工程学院,2013.

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net