[研究・设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2019.03.002

四轴机器人控制系统设计

徐达勇^{1,2},陈海卫^{1,2}

(1. 江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 江南大学 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122)

摘 要:针对四轴机器人运动控制问题,设计开发了一套基于雷赛运动控制器和触摸屏的具有人机交互功能的四轴机器 人运动控制系统。首先采用改良 D-H 法建立了机器人的运动学模型,并对机器人进行运动学分析,求得了机器人的正 逆运动学的解。然后分析划分了机器人控制系统的功能,在运动控制器上开发了相应的参数设置模块、状态监测模块、 文件管理模块和运动控制模块,并在触摸屏上设计了人机交互界面。最后通过分析机器人在空间的直线运动,设计了机 器人直线插补算法,并在运动控制器上开发了相应的插补运动模块。经实验验证,控制系统能够有效地对四轴机器人进 行运动控制,且运动过程平稳可靠。控制系统解决了四轴机器人的运动控制问题。

关 键 词:四轴机器人;雷赛运动控制器;改良 D-H 法;直线插补算法;人机交互界面 中图分类号:TP242.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2895(2019)03-0007-06

Design of Control System for Four-Axis Robot

XU Dayong^{1,2}, CHEN Haiwei^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract: A four-axis robot motion control system with human-computer interaction function based on Leashine motion controller and touch screen was designed and developed for the motion control problem of four-axis robot. Firstly, the kinematics model of the robot was established by the modified D-H method, and the kinematics analysis of the robot was carried out to obtain the solution of the forward and inverse kinematics of the robot. Then the function of the robot control system was analyzed. The corresponding parameter setting module, status monitoring module, file management module and motion control module were developed on the motion controller, and the human-computer interaction interface was designed on the touch screen. Finally, by analyzing the linear motion of the robot in space, the linear interpolation algorithm of the robot was designed, and the corresponding interpolation motion module was developed on the motion control system can effectively control the motion of the four-axis robot, and the motion process is stable and reliable. The control system can effectively control the motion of the four-axis robot.

Keywords: four-axis robot; Leashine motion controller; modified D-H method; linear interpolation algorithm; humancomputer interaction interface

机器人控制系统是工业机器人的核心,对机器人的性能起着至关重要的作用^[1]。运动控制器的实时 I/O控制能够保证机器人的运动精度,满足机器人控 制的要求,同时运动控制器的开放型架构和丰富的软 件接口,易于开发和扩展^[2]。许阳^[3]提出了一种基于 CPAC 运动控制器的六轴机器人控制系统,实现了机 器人的控制系统的基本功能。王耀东^[4]研究了基于 Codesys 的机器人运动控制器,并搭建了以 ER50 六自

收稿日期:2018-12-03;修回日期:2019-03-02

第一作者简介:徐达勇(1993),男,浙江临海人,硕士研究生,主要研究方向为机电一体化、机器人控制系统研究。通信作者:陈 海卫(1982),男,河北保定人,副教授,硕士生导师,主要研究方向为机电一体化、振动与噪声、CAE分析等。E-mail:chenhaiwei @ jiangnan. edu. cn 由度工业机器人为控制对象的机器人控制系统。

以运动控制器为核心,配合外部设备构成机器人 控制系统,构建的机器人控制系统结构精简,性价比 高^[5-9]。课题组设计了一款基于雷赛运动控制器和触 摸屏的四轴机器人控制系统,能够实现参数设置、文件 管理和路径插补等功能,并可通过人机交互界面对机 器人进行操作和修改机器人的相关参数。

1 四轴机器人机械结构

课题组研究的四轴机器人为极坐标形式的,其关 节组合为 PRPR,其中上下轴和伸缩轴为直线副,旋转 轴和校正轴为旋转副。各轴分别由一部伺服电机驱 动,上下轴采用同步带和丝杠滑块实现直线运动,伸缩 轴采用同步带和直线模组实现直线运动,旋转轴通过 同步带和谐波减速器实现旋转运动,校正轴通过同步 带实现旋转运动。机器人三维结构如图1所示。



图 1 四轴机器人三维结构 Figure 1 Three dimensional structure of four-axis robot

2 四轴机器人的运动学分析

2.1 四轴机器人的运动学模型

对于机器人运动学建模,一般采用 D-H 法,但是 由于原有的 D-H 法在选取 D-H 模型参数时,参数 d_i 和 θ_i 是关于第 i-1 个连杆的,而且在设置坐标时,参 数的下标与连杆的标号不一致,在分析时会造成混淆。 Kevin M. Lynch 等^[10]提出了一种改良的 D-H 建模方 法,模型的参数定义:

1) 扭转角 α_{i-1} 为 z_{i-1} 轴绕 x_{i-1} 轴旋转到 z_i 轴需要 转过的角度;

2) 杆长 α_{i-1} 为 z_{i-1} 轴与 z_i 轴间的公垂线的长度;

 3) 偏距 d_i 为 x_{i-1}轴与 z_i 轴的交点移动到第 i 个 连杆的坐标原点的距离;

 4) 关节角 θ_i 为 x_{i-1}轴绕着 z_i 轴旋转到 x_i 轴需要 转过的角度。

按照改良的 D-H 方法的定义,建立图 2 所示的连 杆坐标系,可得机器人的 D-H 模型参数如表 1 所示。



图2 连杆坐标系示意图

Figure 2 Diagram of connecting rod coordinate system

表1 连杆参数

Table 1 Parameters of link

<i>i</i> 轴	扭转角 α _{i-1} /(°)	杆长 a_{i-1} /mm	偏距 d _i /mm	关节角 <i>θ_i/</i> (°)
1轴(上下轴)	0	0	$d_1 + l_1$	0
2 轴(旋转轴)	0	0	0	θ_2
3轴(伸缩轴)	- 90	0	$d_3 + l_3$	0
4轴(校正轴)	90	0	0	$ heta_4$

2.2 四轴机器人的正运动学

机器人的正运动学问题,是根据机器人的各关节 角度,求取与机器人的末端执行器相关的坐标系在全 局坐标系中的位置和方位。机器人坐标变换可以通过 齐次变换矩阵来实现。

$${}^{i-1}T = \begin{bmatrix} \cos \theta_{i} & -\sin \theta_{i} & 0 & a_{i-1} \\ \sin \theta_{i} \cos \alpha_{i-1} & \cos \theta_{i} \cos \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} & -d_{i} \sin \alpha_{i-1} \\ \sin \theta_{i} \sin \alpha_{i-1} & \cos \theta_{i} \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & d_{i} \cos \alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{\circ}$$
(1)

机器人末端执行器的位姿矩阵形式为:

$${}^{0}_{4}\boldsymbol{T} = \begin{bmatrix} n_{x} & o_{x} & a_{x} & p_{x} \\ n_{y} & o_{y} & a_{y} & p_{y} \\ n_{z} & o_{z} & a_{z} & p_{z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \circ$$
(2)

根据(1)式求解出各相邻连杆的位姿变换矩阵, 再通过相邻坐标系之间的变换,将末端执行器的坐标 转换到基坐标系中,从而实现末端执行器在基坐标系 中的描述,即

$$\begin{bmatrix} {}^{0}\mathbf{T} = {}^{0}_{1}\mathbf{T}_{2}^{1}\mathbf{T}_{3}^{2}\mathbf{T}_{4}^{3}\mathbf{T} = \\ \cos (\theta_{2} + \theta_{4}) & -\sin (\theta_{2} + \theta_{4}) & 0 & -(d_{3} + l_{3})\sin \theta_{2} \\ \sin (\theta_{2} + \theta_{4}) & \cos (\theta_{2} + \theta_{4}) & 0 & -(d_{3} + l_{3})\cos \theta_{2} \\ 0 & 0 & 1 & d_{1} + l_{1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
 (3)

由式(2)和式(3)得四轴机器人正运动学的解

$$p_{x} = -(d_{3} + l_{3}) \sin \theta_{2};$$

$$p_{y} = -(d_{3} + l_{3}) \cos \theta_{2};$$

$$p_{z} = d_{1} + l_{10}$$
(4)

2.3 四轴机器人的逆运动学

机器人的逆运动学问题,是根据机器人末端在全局坐标系中的位置和方位,求取各关节对应角度。假设机器人的初始末端位姿为 (p_x^0, p_y^0, p_z^0) ,目标末端位姿为 (p_x, p_y, p_z) ,上下轴位移 l_1 ,旋转轴转角 θ_2 ,伸缩轴位移为 l_3 ,机器人的空间几何关系如图 3 所示,其中 L_1, L_3 为上下轴和伸缩轴的固定部分的长度。



图 3 机器人空间几何关系 Figure 3 Space geometry of robots

对机器人的采用几何法分析,可以得出机器人空间坐标(p_x, p_y, p_z)与各轴位移之间的关系:

$$\theta_2 = \arctan \frac{p_x}{p_y};$$
(5)

$$\sqrt{p_x^2 + p_y^2} = L_3 + l_3;$$
 (6)

$$p_z = l_1 + L_{1\circ} \tag{7}$$

对于 θ_2 ,由于反正切函数的范围是($-\pi/2,\pi/2$),但机器人的工作范围要大于这一范围,所以需要 扩大 θ_2 的值域,当 $p_x < 0$ 时,有

$$\theta_2 = \pi + \arctan \frac{p_x}{p_y}$$
(8)

求解式(6)和式(7)可得上下轴和伸缩轴对应的 位移:

$$l_3 = \sqrt{p_x^2 + p_y^2} - L_3; \qquad (9)$$

$$l_1 = p_z - L_{1\circ} \tag{10}$$

综上所述,机器人的逆运动学解为:

$$l_{1} = p_{z} - L_{1};$$

$$\theta_{2} = \begin{cases} \pi + \arctan \frac{p_{x}}{p_{y}}, \stackrel{\text{d}}{=} p_{x} < 0 \text{ B}^{\dagger}, \\ \arctan \frac{p_{x}}{p_{y}}, \stackrel{\text{d}}{=} p_{x} > 0 \text{ B}^{\dagger}; \\ l_{3} = \sqrt{p_{x}^{2} + p_{y}^{2}} - L_{3} \circ \end{cases}$$

$$(11)$$

3 控制系统的软件结构

雷赛运动控制器 SMC604 是支持 IEC61131-3 编 程语言标准的高性能独立运动控制器,具有丰富的外 部设备接口以及功能库。本文的机器人的软件结构设 计遵循模块化设计,系统软件结构框架如图4 所示,主 要包含模块有文件管理模块、参数设置模块、状态显示 模块、人机交互模块以及运动控制模块。





Figure 4 Software architecture block diagram

控制器上电后,控制程序将读取机器人的配置文件, 初始化控制系统相关的控制变量,并检测相关变量的合 法性,在正确完成上述进程后,程序进入主循环进程,等 待操作人员或者外部设备的输入,并根据当前的系统状 态调用相应的程序和指令。各个模块的功能如下:

1) 人机交互模块

人机交互模块直观地展示了机器人的功能,帮助 操作人员方便地参看和设定机器人参数,编辑加工文 件和控制机器人运行,人机交互模块的结构如图 5 所示。

2) 参数设置模块

与机器人结构和控制相关的参数均可进行配置。 可以进行配置的参数包括机器人机械结构、速度、工作 原点和传感器参数等;在机械参数设置模块中,可以设 置机器人的实际机械结构参数,用于运动控制;机器人 的工作原点可以在工作原点模块中修改,以调整机器 人的工作原点,便于编程。运动参数模块可以设置机 器人的回零、空走、运行时的速度和不同速度档位的速 度。相关参数设置界面如图6所示。



图5 人机交互模块

Figure 5 Human-computer interaction module diagram



图6 参数设置界面

Figure 6 Parametric setting interface

3) 文件管理模块

操作人员可以通过文件管理模块对机器人配置和 加工文件进行管理和修改,操作人员可以预先将机器 人的控制指令存入加工文件内,实现机器人的自动 运行。

4) 状态管理模块

机器人的状态主要包括当前机器人的运行状态、 外部传感器和 IO 设备的状态、加工文件的运行状态 等,状态管理模块将以上信息通过 RS232 转 Modbus 通信协议传送到触摸屏上并显示。

5) 运动控制模块设计

机器人的运动控制模块通过调用雷赛控制器提供 的运动控制库和独立开发的模块,实现机器人的手动 示教、轨迹插补、机器人的运动学正反解、轨迹的计算 和线段插补等功能。图7所示为手动操作界面,结合 程序中相对应的功能,实现对机器人各轴的控制。



图7 手动操作界面

Figure 7 Manual operating interface

4 机器人粗插补功能的实现

在机器人实际作业中,操作机器人运动按照指定 路径运动到指定位置,需要控制机器人各关节的运动。 课题组在雷赛 SMC604 控制器上实现了机器人在直线 运动的粗插补算法。

4.1 直线粗插补

已知机器人在空间笛卡尔坐标系的起始点坐标M (x_{m},y_{m},z_{m}) 与终止点坐标 $N(x_{n},y_{n},y_{n})$,如图 8 所示。



图8 空间直线

Figure 8 Spatial straight line

在直角坐标空间的轨迹插补步骤:

- 1) 设末端运动的步长为 a, 计数变量 i 为 0;
- 2) 求解空间直线起点 M 和终点 N 间的距离 L;

3) 计算插补总步长 C。当 L/a 的余数为零时,

C = L/a;当 L/a的余数不为零时,C = L/a + 1。 4) 计算粗插补增量($\Delta x_{\perp} \Delta y_{\perp} \Delta z$)为·

$$\Delta x = (x_n - x_m)/C;$$

$$\Delta y = (y_n - y_m)/C;$$

$$\Delta z = (z_n - z_m)/C_{\circ}$$
(12)

5) 计算第 i 个点的坐标 (x_i, y_i, z_i) 为:

$$\begin{array}{c} x_{i} = x_{i-1} + i * \Delta x; \\ y_{i} = y_{i-1} + i * \Delta y; \\ z_{i} = z_{i-1} + i * \Delta z_{i-1} \end{array}$$

$$(13)$$

6)根据公式(11)计算出第*i*个点对应的电机转角;

7) 计数变量 i 加1,跳转至步骤 5),重复这一过

程,直至插补终点。

4.2 插补程序设计

雷赛 SMC604 运动控制器具有小线段前瞻连续插 补功能,可以预先读取路径信息,进行预处理和规划, 实现电机的连续稳定运动。利用控制器提供的这一功 能,机器人在笛卡尔空间运动时,加载加工文件后,读 取指令中存储的目标坐标,计算与当前位置之间的距 离,除以预先设置好的插补步长,计算出需要插补的段 数。然后迭代出中间点的位置,直至目标位置,得出一 系列点的坐标,通过逆运动学求解出各轴的角度变化, 再根据各轴的传动系数计算出电机的脉冲数,将计算 出的电机脉冲数压入缓冲区,启动插补模块,通过脉冲 控制各轴电机运行到指定位置,完成机器人的运动。 插补程序的工作流程如图9所示。



图9 插补程序流程

Figure 9 Flow of interpolation

5 实验结果

在控制器上编写运动程序,控制机器人在空间中 依次经过A,B,C,D共4点,各点坐标如表2所示。

表2 各点坐标参数

rapie 2 rarameters of each point	Table 2
----------------------------------	---------

点	坐标/(mm,mm,mm)	
A	(835,0,0)	
В	(985,0,0)	
С	(910,75,20)	
D	(835,367,40)	

机器人在各点间的运动方式为:从A 点到B 点为 直线运动;从B 点到C 点为圆弧运动;从C 点到D 点 位直线运动;从 D 点到 A 点为直线运动。

在机器人运动过程中的坐标变化如图 10 所示,记 录相应的点位数据,以二进制文件形式导出。将数据 导入 MATLAB 中对路径数据进行绘制,得到机器人在 空间运动的轨迹曲线如图 11 所示,机器人的运动轨迹 符合预期。



图 10 机器人末端坐标





Figure 11 Robot trajectory

6 结论

 1) 课题组设计了基于雷赛运动控制器和触摸屏 的四轴机器人控制系统,控制系统操作简单,功能划分 明确,系统的搭建成本低,实现了机器人控制的基本 功能。

2)课题组研究了空间直线的插补算法,并通过使用雷赛运动控制器上的小线段前瞻功能,实现了机器人的直线插补运动模块,实现机器人在笛卡尔空间的直线运动。

(下转第18页)