

基于 LabVIEW 的二自由度串联机械手轨迹跟踪控制*

曾嘉煜 梁锐林 杨坤宏 王雪松 张立群 王宇林
(广东海洋大学机械与动力工程学院 湛江 524088)

摘 要:以平面二自由度串联机械手为研究对象,基于 LabVIEW 平台以及应用 PID 算法来进行对机械手的轨迹跟踪控制。该系统以 NI CompactRIO 平台和 PC 机构筑了系统硬件平台,采用 LabVIEW 图形化编程语言进行控制软件的编程和建立人机交互界面,来实现机械手预定轨迹跟踪控制功能。通过对现实中二自由度机械手的实验,在 LabVIEW 的前面板窗口中获得了机械手末端的转角误差曲线。实验结果表明,所设计的平面二自由度机械手轨迹跟踪控制效果良好,能够满足工业现场控制要求。

关键词:串联机械手; PID 算法; LabVIEW; 轨迹控制

中图分类号: TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Trajectory tracking control of two degree of freedom manipulator based on LabVIEW

Zeng Jiayu Liang Ruilin Yang Kunhong Wang Xuesong Zhang Liquan Wang Yulin
(School of Mechanical and Powerengineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

Abstract: In this paper, the planar two degree of freedom manipulator is taken as the research object. Based on the LabVIEW platform and the PID algorithm, the trajectory tracking control of the manipulator is carried out. The system is based on NI CompactRIO platform and PC built the hardware platform of the system, using the graphical programming language LabVIEW control software programming and the establishment of man-machine interface, realizes the manipulator a predetermined trajectory tracking control function. Through the experiment of the two degrees of freedom manipulator in reality, the angle error curve of the end of the manipulator was obtained in the front panel window of LabVIEW. The experimental results show that the plane trajectory, two DOF Manipulator designed the tracking control effect is good, can meet the requirements of industrial field control.

Keywords: series manipulator; PID algorithm; LabVIEW; trajectory control

0 引 言

随着科学技术的日益进步,机器人学科具有越来越强大的生命力,机器人的应用范围非常广,涉及工业、医疗、服务等领域。工业机器人领域涉及到的知识非常广,其综合了计算机科学技术、机械工程技术、电子工程技术、信息传感器技术等多门学科形成的高新技术^[1]。机器人轨迹跟踪控制是指给定各关节驱动力矩,使机器人的位置、速度等状态变量跟踪已知的理想轨迹^[2],轨迹控制是影响机械人运动精度的关键部分,为了实现对机器人转动位置高精度的控制,一定要考虑各种因素对机器人控制的影响。

国内外有学者对此进行了研究,如于潇雁等人^[3]针对漂浮基柔性两杆空间机械臂,在仅有精确载体姿态、关节

角位移反馈的情况下,利用滑模观测器构建载体姿态角速度、关节角速度估计矢量,基于速度估计矢量设计了系统的鲁棒慢变控制方案;徐娟等人^[4]提出了一种基于模糊 PID 的自适应控制策略,针对影响系数法及自动寻优控制的平衡头控制方法存在的平衡效率低且平衡精度不足等问题,设计了一种基于极坐标式的质量块型平衡头,采用蜗杆蜗轮减速装置带动质量块实现准确定位。

但是机器臂运动稳定性以及多自由度的协调控制依旧存在着一些问题,不能实时、准确、迅速地为目标做出响应。为了更好地解决这类问题,减小机械手转动位置误差,本文以机械手为控制对象,搭建二自由度串联机械手实验平台,采用 NI CompactRIO 嵌入式测控系统及其硬件架构、PC 机作为上位机的方式,在目前业界比较流行的

收稿日期:2017-04

* 基金项目:广东省大学生创新创业训练计划(1056613045)项目资助

图形化编程语言 LabVIEW 开发环境下进行编程,利用 PID 算法对机械手转角精度进行控制,并用 LabVIEW 编程语言编写了控制程序^[5-6]。实验结果表明,实现了二自由度机械手的位置跟踪控制,提高了机械手转角精度,整体结构合理,提高编程效率和减少编程周期,使 LabVIEW 软件更加灵活和开放。

1 系统组成和动力学分析

1.1 系统结构组成

如图 1 所示,二自由度串联机械手系统由 PC 机、NI CompactRIO 硬件平台、驱动器、伺服电机和机械手本体组成。计算机完成脉冲信号采集、PID 控制、人机界面、系统管理等任务;NI CompactRIO 硬件平台完成模拟电压输出及脉冲信号输入,使能伺服电机;计算机与 NI CompactRIO 硬件平台之间通过 CAN 总线完成数据传输。驱动器部分完成编码信号接收,功率放大,驱动伺服电机。两个电机分别控制机械手的两个转动关节,各轴转角通过增量式编码器反馈回驱动器,再传递给 NI CompactRIO 平台。

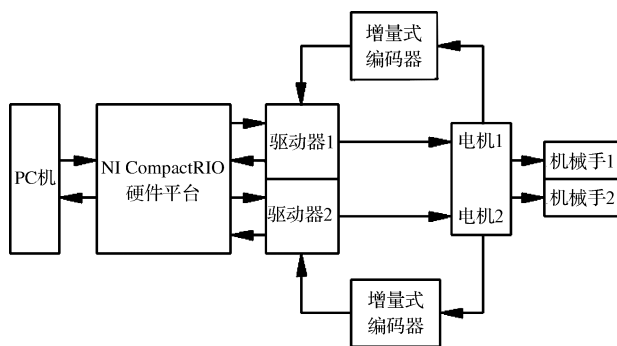


图 1 机械手系统组成

1.2 机械手平台搭建与动力学分析

1) 机械手结构

如图 2 所示,所研究的平面二自由度机械手由支架、平台、两个独立的机械手及其伺服驱动电机组成。为了降低手臂 1 的转速大小,提高手臂 1 的输出扭矩和降低负载/电机的转动惯量比,在伺服电机连接到手臂 1 关节之间加上一个减速器,为了使减速器的尺寸尽可能小,同时为了选用的减速器的减速比范围不能太窄,在这里选用行星齿轮减速器。为了便于结构的简化,手臂 2 采用电机直接驱动。

2) 机械手运动学分析

机械手是由一系列连杆通过转动或移动关节串联而成的^[7]。一般来说,开链机器人的一端会固定在机座之上,另外一端是可以自由转动的,自由转动一端可以安装末端执行器,末端执行器可以用来抓取物体,可以完成各种不同的任务。机械手末端的工作空间是由各个关节来决定的^[8]。

这里讨论机器人运动学的两个基本问题^[9]:机器人正向运动学和逆向运动学。利用齐次变换矩阵来描述连杆坐标系之间的相对平移和旋转的方法称为正向运动学。

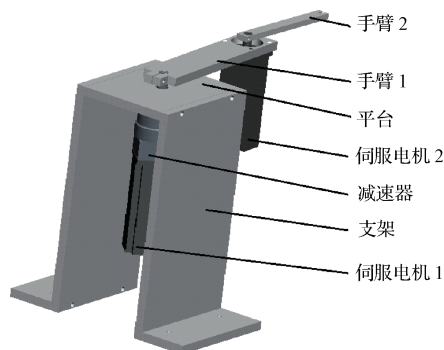


图 2 机械手整体结构

反之,给定末端连杆的位姿计算相应的关节变量的过程称之为逆向运动学。这里,采用正向运动学来对本文的平面二自由度机械手进行运动学分析。

如图 3 所示,其中, L_1 为手臂 1, L_2 为手臂 2, O_1 为关节 1, O_2 为关节 2, P 为末端执行器接口。 O_1 、 O_2 关节使用伺服电动机使其高速转动,机器人关节可以采用伺服电动机驱动。该驱动方式具有结构简单、易于控制等优点。在机器人驱动中,这也是应用最多的驱动方式。伺服电动机的编码器输出反馈信号,编码器信号再输入到 CompactRIO 硬件设备上。在 Windows 平台上经过 LabVIEW 虚拟仪器软件控制 FPGA 硬件机座进行信号的处理。使得伺服驱动器能够根据反馈的编码器信号不断地调整电压输出。进而使得末端执行器接口 P 能够以特定的要求进行运动。

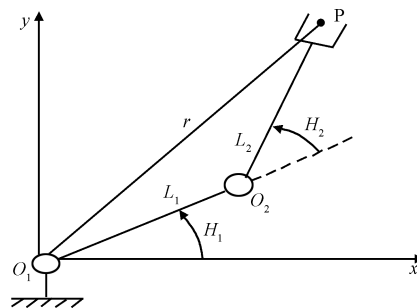


图 3 二自由度机器人手的位置模型

这里采用回转关节 O_1 和 O_2 ,而关节的位置一般可以用关节变量来表示。在这里可以用 θ_1 、 θ_2 、 L_1 和 L_2 来表示连杆的位置。把它们写成矩阵的形式为:

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\theta} = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

设 P 点的坐标为 (x, y) ,则 P 点的坐标可以用 $\mathbf{r}$ 和 $\boldsymbol{\theta}$ 表示为:

$$x = L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (3)$$

$$y = L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (4)$$

这个关系式用一个关系矩阵表示成:

$$\mathbf{r} = \mathbf{f}(\boldsymbol{\theta}) \quad (5)$$

2 PD 控制算法

PID 控制在实际应用中也有 PI 控制和 PD 控制^[10], 本文采用是 PD 控制算法, 即将位置 PID 控制算法中的积分项系数设置为 0, 就形成了 PD 控制。PD 控制能够提前使抑制误差的控制作用等于 0, 避免了被控量的严重超调, 改善了系统在调节过程中的动态性能, 则 PD 控制计算式为:

$$u(n) = K_p \left\{ e(n) + \frac{T_d}{T} [e(n) - e(n-1)] \right\} \quad (6)$$

本系统中 PD 控制算法的框图如图 4 所示。

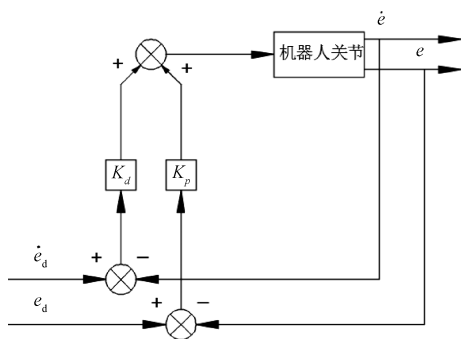


图 4 PD 控制算法框图

采用 PD 控制的机器人方程为:

$$\tau = K_d \dot{e} + K_p e = K_d \frac{[e(n) - e(n-1)]}{T} + K_p e(n) \quad (7)$$

式中: $e(n)$ 为当前采样时刻给定值与反馈值的偏差, T 为 PD 控制的采样周期, K_d 为微分时间常数, K_p 为比例系数, 通过调整 K_d 、 K_p 两参数可以实现机器人的定点控制。

3 控制系统

3.1 硬件系统

本系统采用 PC 机作为上位机, 完成编写程序和监控

的功能。控制器采用 NI 公司的 CompactRIO 硬件平台, 包括 cRIO-9075, 它集成了 400 MHz 工业实时处理器和 LX25 FPGA, 可以高速精确地处理数据, 能连接 LabVIEW 应用程序的用户界面。NI 9401 数字输入/输出模块, 用于使能驱动器, 接收脉冲信号。NI 9263 模拟电压输出模块, 用于输出指定的电压信号, 驱动伺服电机运动。CompactRIO 硬件平台执行上位机发送的编程指令并将其转化为对电机控制信号, 此信号经由台达伺服 ASDA-B2 电机驱动器放大驱动台达伺服电机 ECMAC20604RS, 同时, 电机驱动器根据伺服电机反馈回来的编码器信号进行差分放大处理, 再将脉冲信号反馈回 CompactRIO 硬件平台中进行脉冲计数作为轨迹跟踪特性分析的依据, 形成闭环系统。

在机器人的控制部分, 通常一般的机器人是基于 PID 控制的独立伺服控制, 但在机器人高速运动的情况下, 机器人的动力学特性表现的非常明显, 不能忽略不计, 再采用传统的控制方法, 性能不满足要求。所以高速运动的机器人控制, 必须采用先进的基于动力学特性的控制方法, 故电机驱动器对伺服电机采用力矩控制模式 (也就是 FPGA 输出的是电压信号, 而不是控制位置的脉冲信号)。

设置驱动器的控制模式为 T 模式 (力矩控制模式), 即驱动器外部输入电压指令为 T-REF, GND 之间的仿真电压差, 输入的电压范围是 $-10 \sim +10$ V, 不同的电压差对应不同的扭矩。

CompactRIO 硬件平台和伺服驱动器、伺服电机的接线如图 5 所示。

3.2 软件系统

以机械手 1 为例, 来说明基于 LabVIEW 编程如何用 PID 算法精确控制机械手 1 转过的角度。

设 $\tau = K_p e + K_d \dot{e}$, 因为采用扭矩模式控制电机, 所以 τ 为反馈回来扭矩大小。

设 $q_{1d} = \sin \pi t$, 设置驱动器每发送 5 000 个脉冲, 电机轴转动 1 圈, 则:

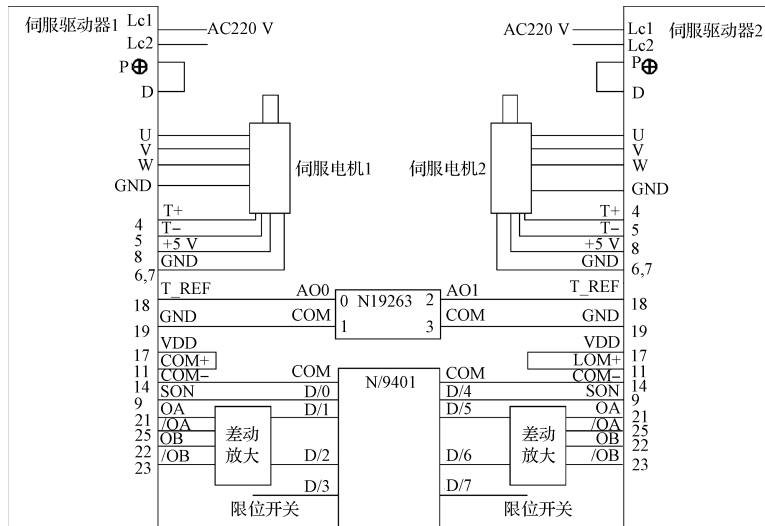


图 5 硬件系统接线

$$q_1 = \frac{2\pi \cdot n_1}{5\ 000} \quad (8)$$

则转角偏差:

$$e = q_{1d} - q_1 \quad (9)$$

求导得

$$\dot{e} = \frac{\Delta e}{\Delta t} = \frac{e(t) - e(t-T)}{T} \quad (10)$$

所以:

$$\tau = K_p e + K_d \dot{e} = K_p \cdot (q_{1d} - q_1) + K_d \cdot \frac{\Delta e}{\Delta t} \quad (11)$$

式中: e 为转角偏差, $\dot{e}$ 为转角偏差对时间 t 的导数, q_{1d} 为手臂 1 转角随时间 t 变化的函数, q_1 为手臂 1 在时间 t 内转过的角度, n_1 为在时间 t 内手臂 1 接收到的脉冲个数, 其中 T 为 q_{1d} 的周期, $T=2\text{ ms}$, τ 为实际电机输出的扭矩。

在驱动器中扭矩与模拟电压关系如图 6 所示。即可将实际电机输出的扭矩转换成实际输入到电机的模拟电压。

在 LabVIEW 中, 首先要对电机驱动器反馈回来的脉

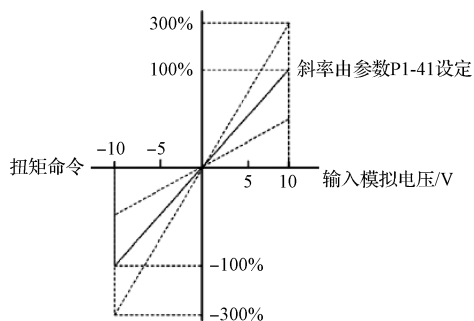


图 6 扭矩与模拟电压关系

冲信号进行计数, 计数程序如图 7 所示。

其次将脉冲个数进行上述算法处理, 设置驱动器 P1-41 参数为 100, 驱动器外部电压若输入 10 V, 即表示输出的扭矩控制指令为 100% 的额定扭矩。算法处理程序如图 8 所示。

在 LabVIEW 前面板上将实际扭矩和理想扭矩进行对比, 程序如图 9 所示。

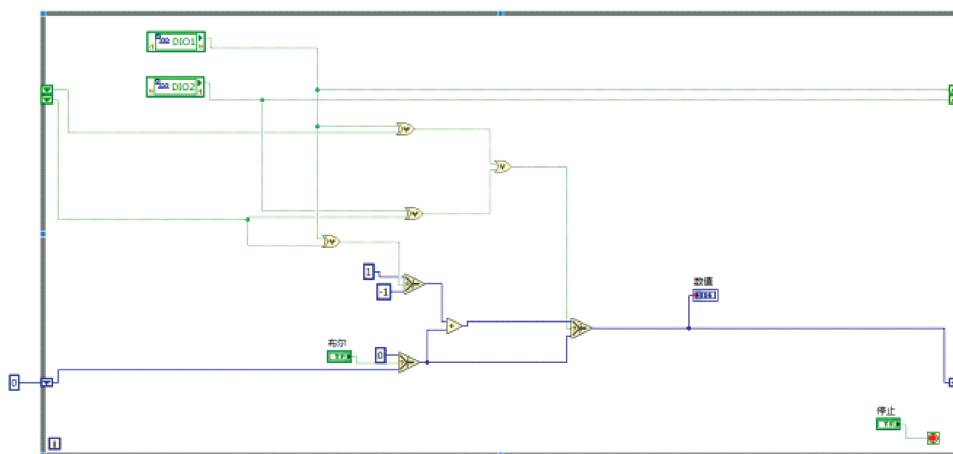


图 7 脉冲信号计数程序

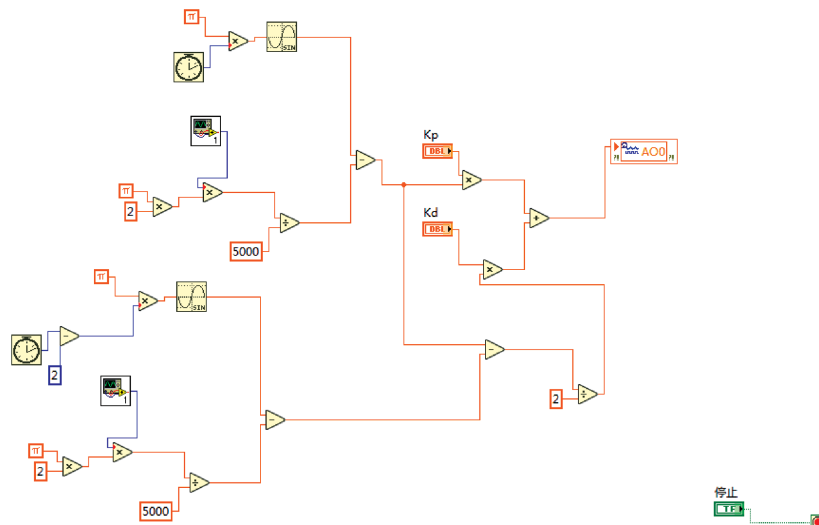


图 8 算法处理程序

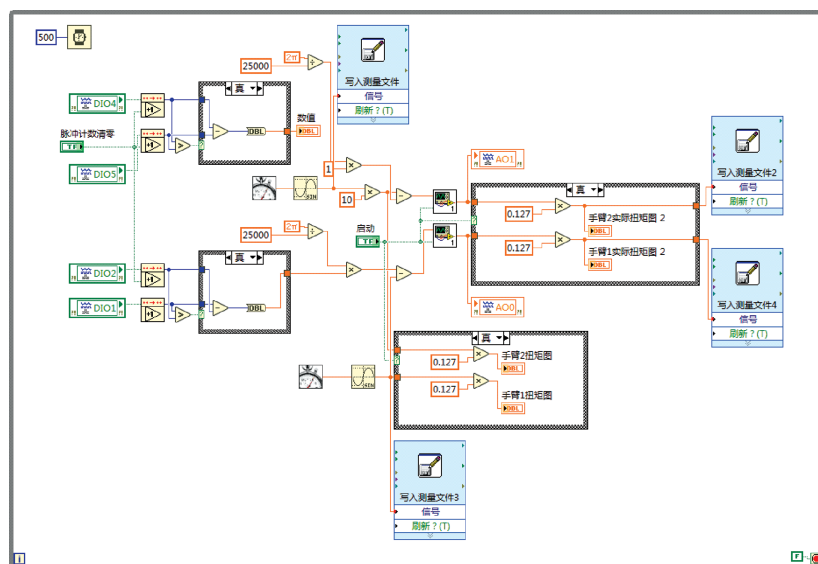
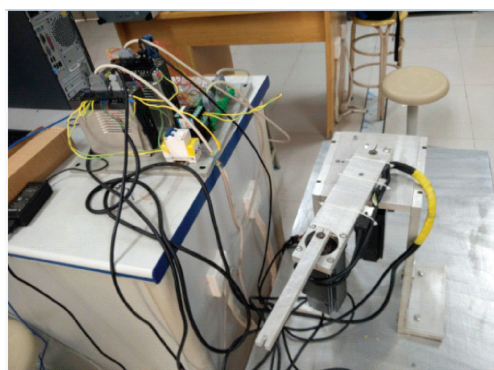


图9 扭矩对比程序

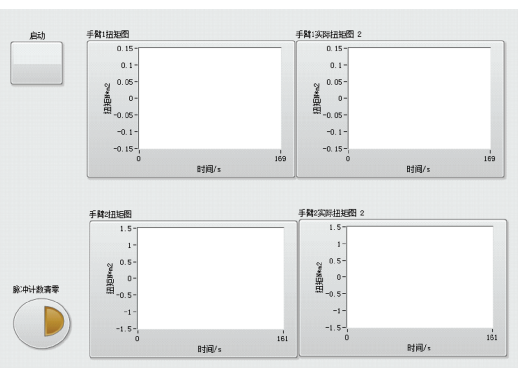
4 实验验证与测试结果

制作二自由度机械手控制平台,NI 9401 模块实时采集从电机驱动器反馈回的脉冲信号,并通过编程计数成单位时间内发送到电机的脉冲个数。在FPGA机座中将脉冲个数经过上述算法转换成相应实际的扭矩,扭矩和电压

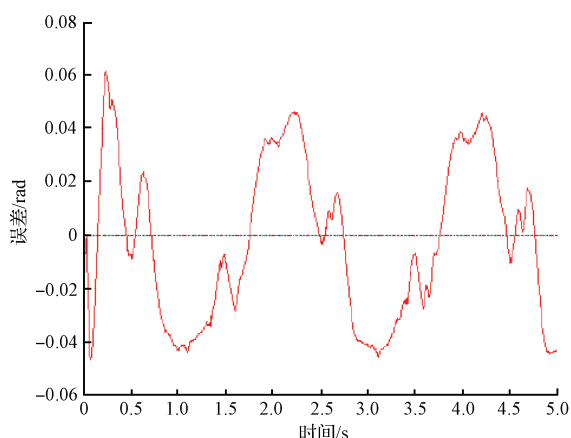
成线性关系,可将实际扭矩转化为实际输出电压。在LabVIEW前面板上将实际扭矩和理想扭矩进行对比,将机械手1转角误差和实际电机输出电压显示在波形图上,如图10所示,从图中可以看出轨迹跟踪误差在合理的范围内,能够满足机械手快准稳的工作要求。



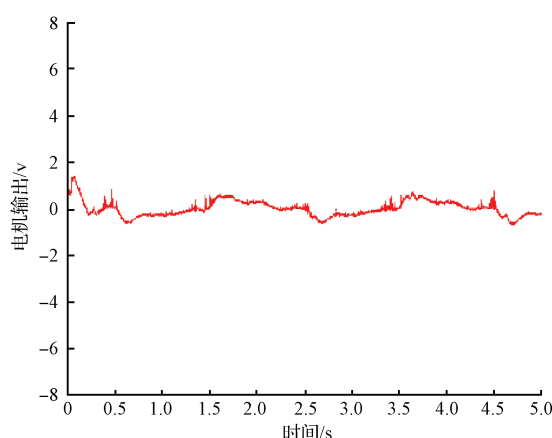
(a) 二自由度机械手控制平台



(b) 前面板扭矩对比图



(c) 机械手关节1转角误差



(d) 机械手关节1实际电机输出电压

图10 平台搭建与实验测试

5 结 论

本文提出了基于 LabVIEW 的编程环境下的二自由度机械手轨迹控制方法,结合 PID 控制算法,实现位置闭环控制系统,大大提高了机械手的转动位置精度,利用 LabVIEW 处理数据强大的能力,Compact RIO 硬件模块实时采集信号反馈到 FPGA 机座中进行算法处理,同时 LabVIEW 的图形化编程语言使得编程效率得到了提高,缩短了产品开发周期,具有很大的发展前景。

参 考 文 献

- [1] 孙英飞,罗爱华.我国工业机器人发展研究[J].科学技术与工程,2012,12(12):2912-2918,3031.
- [2] 田慧慧,苏玉鑫.机器人系统输出反馈重复学习轨迹跟踪控制[J].控制与决策,2012,27(11):1756-1760.
- [3] 于潇雁,陈力.漂浮基柔性两杆空间机械臂基于状态观测器的鲁棒控制及振动控制[J].机械工程学报,2016,52(15):28-35.
- [4] 徐娟,陈时桢,何烱剑,等.基于模糊 PID 的平衡头自适应控制策略研究[J].电子测量与仪器学报,2016,30(6):895-902.
- [5] 倪瑞萍,黄昶,周晨辰.FPGA 技术在 CompactRIO 中的应用[J].微计算机信息,2010,26(17):127-128,141.
- [6] 徐惠,肖功海,亓洪兴.基于 CompactRIO 的直流无刷电机控制系统[J].电子设计工程,2011,19(11):128-131.
- [7] 吴硕,吴桐.五自由度机械臂运动学系统建模与仿真[J].自动化与仪器仪表,2017(2):26-28,32.
- [8] 田海波,马宏伟,魏娟.串联机器人机械臂工作空间与结构参数研究[J].农业机械学报,2013,44(4):196-201.
- [9] 郭小宝,赵振,陈落根.码垛机器人运动学几何解法的研究[J].装备机械,2015(4):44-47.
- [10] 黄俊年,王立.浅析 PID 控制原理及应用[J].硅谷,2010(12):109-176.

作 者 简 介

曾嘉煜,男,1996 年出生,本科,主要研究方向为机电一体化。
E-mail:915037292@qq.com