

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.09.013

双臂机器人末端一体化关节控制与驱动单元设计^{*}

李开霞^{1,3}, 丁玲³, 赵江海^{1,2}, 胡晓娟³

(1. 中国科学院合肥物质科学研究院 先进制造技术研究所, 江苏 常州 213164;

2. 江苏省产业技术研究院 机器人与智能装备技术研究所, 江苏 常州 213164;

3. 常州先进制造技术研究所, 江苏 常州 213164)

摘要:针对双臂机器人末端关节智能一体化问题,对双臂机器人末端一体化关节的控制与驱动单元进行了系统设计,对设计原理及设计方法进行了归纳分析,综合应用 CAN 总线技术与传感器技术,并以数字信号处理器 DSP 与智能功率模块 IPM 为核心进行了硬件电路设计,结合先进控制理论技术,提出了一种基于迭代学习控制方法的改进型模糊自适应整定 PID 控制算法,提出了末端一体化关节柔顺控制的设计方法及下一步解决方案,研制开发出双臂机器人末端一体化关节的控制与驱动单元样机,进行了样机的闭环控制测试实验。实践结果表明:本设计能满足末端一体化关节的闭环控制,稳定可靠,结构紧凑,体积小,集成度高,有利于关节的轻量化及智能化设计,对于双臂机器人一体化智能关节研究具有重要的理论与实践价值。

关键词:双臂机器人;末端一体化关节;数字信号处理器;智能功率模块;模糊自适应 PID

中图分类号:TH39;TP242

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)09-1019-05

Control and drive unit design on end integral joint for dual-arm robot

LI Kai-xia^{1,3}, DING Ling³, ZHAO Jiang-hai^{1,2}, HU Xiao-juan³

(1. Institute of Advanced Manufacturing Technology, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Changzhou 213164, China; 2. Institute of Robotics and Intelligent Equipment Technology, Jiangsu Institutes of Industrial Technology, Changzhou 213164, China; 3. Changzhou Institute of Advanced Manufacturing Technology, Changzhou 213164, China)

Abstract: Aiming at the intelligence problems of the end integral joint for dual-arm robot, the control and drive unit on end integral joint for dual-arm robot was designed, and the design principles and methods were induced and analyzed. With comprehensive utilization of CAN bus technology and sensor technology, and based on the digital signal processor DSP and the intelligent power module IPM, the system hardware was designed. Combined with advanced control theory and based on iterative learning control, the improved fuzzy adaptive tuning PID control algorithm was presented. The compliant control methods and implementation plans for the end integral joint were proposed. The prototype was designed and developed, and the closed-loop control test experiments were carried out. The practices indicate that, the design meets requirements for the closed-loop control on the end integral joint, has advantages including good stability, high reliability, compact structure, small volume and high integration, and improves the lightweight and intelligence design. It has important theoretical and practical value for the intelligence of the integral joint research on dual-arm robot.

Key words: dual-arm robot; end integral joint; DSP; IPM; fuzzy adaptive PID

收稿日期:2017-01-12

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2015BAK06B02);中科院机器人与智能制造创新研究院重点资助项目(C20)

作者简介:李开霞(1982-),女,河北保定人,硕士研究生,工程师,主要从事服务机器人方面的研究。E-mail:likaixia_LKX@163.com

0 引 言

为适应社会与工业发展需求,满足智能制造需求,双臂协作型机器人应运而生,成为降低人事成本、提高生产效率与补足劳力缺口等的重要解决途径。双臂协作型机器人成为工业机器人市场的新亮点,具有非常好的应用价值及前景。关节是双臂机器人功能组件最为重要的部分,面向工业生产的拟人化操作要求,协作型双臂工业机器人的关节具有大扭矩、高精度、结构紧凑等特点。

目前,为了实现双臂机器人空间多自由度运动,传统成熟做法一般采用多轴联动技术及系统集成方法,即系统的伺服控制部分由多轴联动的伺服控制器和多套伺服系统组成,各伺服系统完成力矩环和速度环的控制,而将位置闭环交给伺服控制器做,由其多轴联动功能完成各轴之间的位置协调。而双臂机器人具备多个自由度,要求机器人轻量化设计,其实现技术复杂,难以应用先进控制算法,致使精度的提高受到限制,另外,无法与现场多个传感器进行融合应用,灵活性较差,受到的限制过多。此外,为保证可靠性及稳定性,包含伺服驱动器在内的伺服系统多采用进口产品,其昂贵的价格直接导致双臂机器人整体造价过高,无法普及应用,严重影响了产业化应用的潜力^[1]。因此,缺乏一种低成本、高精度的紧凑型一体化关节已经成为双臂机器人在实际应用中面临的一大难题,应用于工程实际的一体化智能关节的设计研究成为重要研究领域。

关节一体化设计涉及机械、电气、控制等多个学科知识,需要划分几个模块进行设计。

本研究针对双臂机器人末端一体化关节结构设计,综合应用 CAN 总线技术、传感器技术、高速数字信号处理技术、智能功率技术和先进控制理论技术等,以 DSP 和 IPM 为硬件核心,以基于迭代学习控制方法的改进型模糊自适应整定 PID 控制算法为软件核心,进行双臂机器人末端一体化关节的控制与驱动单元系统设计。

1 总体结构设计

本研究采用机电一体化和模块化方法,研制一种结构、驱动、传动、制动、检测和控制高度集成化的复合型智能末端关节,运用多学科方法进行优化。

双臂机器人末端智能关节模块化结构设计如图 1

所示。

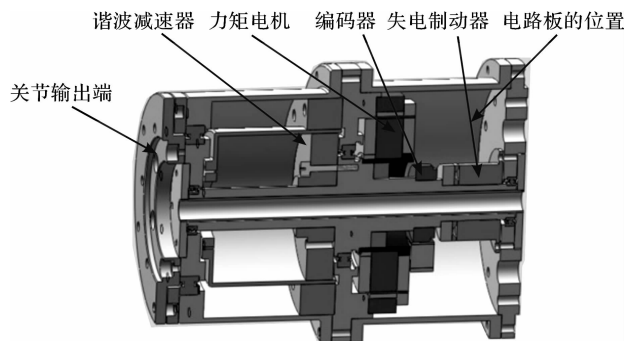


图1 末端一体化关节结构示意图

双臂机器人具有多自由度,末端一体化关节作为双臂机器人的底层关节之一,是隶属于总体设计结构图中 CAN 总线下面多个自由度关节之一的部分,控制与驱动单元需要完成的主要任务包括总线传输,与总控保持实时通信,关节的状态检测、运动控制、伺服驱动和执行等环节^[2]。该单元系统设计形成一个集检测、控制、驱动、执行及总线传输于一体的运动关节驱动控制器,功能完备,简单适用,操作方便。同时,总体设计需要考虑满足小体积、高精度、功耗高效、安全可靠及低成本等多种因素条件。

2 硬件设计

2.1 硬件总体设计

控制与驱动单元的硬件原理如图 2 所示^[3-5]。末端一体化关节控制与驱动单元硬件电路主要由 TI 公司的 TMS320C2000™ Piccolo™ 系列 DSP TMS320F28069、意法半导体智能功率模块 IPM STGIPS20C60T-H、电流检测电路、位置-速度检测电路、霍尔、光电编码器处理电路、CAN 总线驱动电路、电源处理电路、抱闸电路、限位电路等构成。

2.2 DSP 设计

DSP TMS320F28069 具备标准 CAN 控制接口、霍尔捕获 ECAP 模块、光电编码器接口 EQEP 模块、高速高精度三相 EPWM 发生模块、AD 模块及必备 IO 资源,丰富的片上资源便于实现控制器间通信、光电编码器连接、三相 PWM 驱动及保护,同时高速 DSP 具备强大计算能力,具备可实现高精度复杂算法的能力,保证了算法的有效执行及升级扩展,为关节的控制与驱动提供了强大硬件支持。

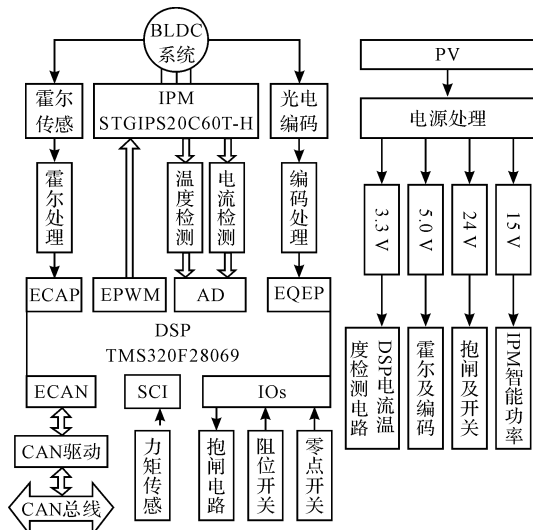


图2 控制与驱动单元的硬件原理

2.3 IPM 设计

意法半导体智能功率模块 IPM 包含三相电机驱动电路,最高电流达 20 A, PWM 最高开关频率为 20 KHz,具有 GTR(大功率晶体管)高电流密度、低饱和电压和耐高压的优点,以及 MOSFET(场效应晶体管)高输入阻抗、高开关频率和低驱动功率的优点,且 IPM 内部集成了逻辑、控制、检测和保护电路,集成温度检测接口,使用方便,最大限度减少了电路板体积,增强了紧凑性,有效简化了设计过程,提高了可靠性、安全性及整体集成度。

2.4 反馈检测

电流检测电路采用下桥臂电流检测法,采样电阻选择 CRA2512-FZ-R010ELF, (0.01 ohm, 1%, 3W) 对相电流进行采样,采用 3.3 V/2 作为基准电压,采样电压与之进行比较运放后至 DSP 进行 AD 采集,选择 NUP4201MR6 芯片对 IO 口进行安全保护。

霍尔、光电编码器信号经信号滤波整形调理电路后输入至 DSP 接口的 ECAP 和 EQEP 进行处理,从而获取位置及速度信息。EQEP 作为正交编码单元电路,专为编码器信号采集设计的电路,简化了控制系统硬件电路设计的同时,对于执行电机的速度检测,位置检测及控制提供了极大方便。

为便于一体化关节的进一步改进与研究,在控制与驱动单元硬件设计中增加了力矩传感器的预留接口。

2.5 电源处理

电源处理模块是系统正常运行的基础,将外部输入直流总电源经过防浪涌、防过流及防反接等处理后,降压稳压获得所需各路电压,包括 24 V、15 V、

5 V 及 3.3 V。

3 软件设计

3.1 软件总体设计

末端一体化关节控制与驱动单元实现主要功能包括:(1)检测末端关节状态,主要包括执行电机的转角位置、速度、电机电流及各开关信号状态;(2)CAN 总线与双臂机器人总控保持实时通信,实时上传状态信息,同时接收机器人主控的运动控制指令;(3)解析指令,结合状态信息,按照性能要求,实现运动控制算法,根据运算结果控制执行电机完成关节的运动控制。为实现上述功能,本研究将末端一体化关节控制与驱动单元的软件划分为以下几部分:主程序、CAN 通信模块、命令接收模块、数据采集(状态检测)模块、闭环运算模块和驱动控制模块等。软件采用 C 语言编程,在 TI 公司的嵌入式处理器集成开发环境 CCS6.0 上编写实现,便于移植到其他相似控制系统中。

3.2 控制策略设计

控制与驱动单元的闭环运算模块采用三闭环控制结构,即电流环,速度环和位置环。其中,电机转速的检测是实现系统速度闭环控制的前提和关键,该设计采用 M/T 法测速,防脉冲均值滤波法进行滤波处理,特别是在低速测量时,如何区别出零速、抖动干扰和低速是关键问题,设计合理的逻辑判断,做出全面、准确的决策^[6-7]。控制中用到的反馈电流为平均值,而检测电流采样到的是瞬时值,采用全桥 PWM 调制方式得到的反馈电流存在明显的电流脉动,换向是引起电机转矩脉动的主要原因之一,且难以消除,因此对采样电流进行数字滤波得到平均值后用于电流环控制。

实现对被控对象的控制,先进控制理论的应用能够极大提高伺服系统控制性能,目前有很多优秀的控制方法,如自适应控制法、神经网络法和模糊控制法、鲁棒控制法、滑模控制法以及最优控制法等,并在信息技术、集成电路制造技术等高速发展的推动下有了很大的发展并得到广泛的应用,但是数字 PID 控制仍然是一种稳定的、可靠的、实现简单的控制方法,因此,目前最多采用的仍然是 PID 控制算法,均以普通数字 PID 控制算法为基础^[8-9]。

综合实际应用需求,参数固定 PID 无法实现良好动态响应和得到理想控制效果^[10-11]。该设计采用复合型控制策略,各模块设计过程中充分融合微分先行、步进式、抗积分饱和、带死区等 PID 控制思想,同时设

计采用一种改进型模糊自适应 PID 控制算法,闭环控制结构图如图 3 所示。

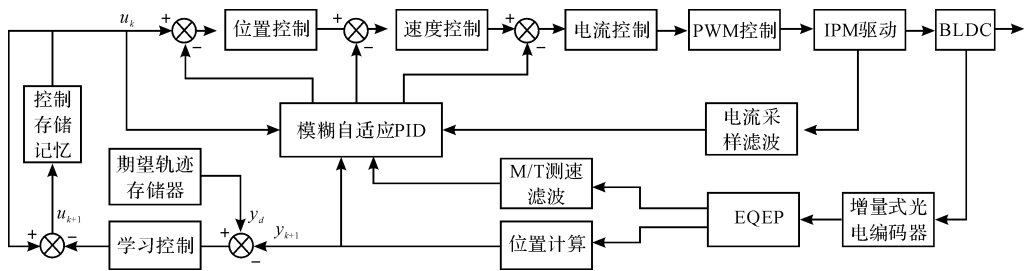


图 3 闭环控制结构图

不同条件下,根据控制系统实际响应情况,模糊推理,整定得出相应 PID 参数值进行控制,从而获得良好控制效果,实现高精度位置控制及平稳速度控制。

迭代学习控制方法与模糊控制一样,均不依赖于控制系统的精确数学模型,通过迭代修正达到控制目标的改善,适合于具有重复运动性质的被控对象,能以非常简单的方式处理不确定度相当高的非线性强耦合动态系统,非常适合在双臂机器人控制领域应用。将迭代学习控制方法与模糊自适应 PID 算法相结合,组成复合型 PID 控制器,这种改进设计采用了模糊控制灵活而适应性强的优点,利用了 PID 控制精度高和易于实现的特点,同时又兼具了迭代学习控制方法的高精度跟踪给定期望轨迹的能力,同时增强了可靠性和鲁棒性。

3.3 柔顺控制设计

控制架构图如图 4 所示。

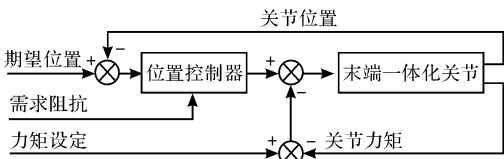


图 4 位置/力/阻抗控制架构图

下一代与人共融双臂协作机器人不但要实现位置控制,还要有力矩控制和阻抗控制(即柔顺控制)功能,以实现接触式操作及安全人机交互等需要接触力控制的操作。双臂机器人控制系统通过如图 4 所示的控制框架,采集位置和力的传感信息,通过相应的控制算法,实现位置和力控制。

位置和作用力之间的关系被称为机械阻抗,阻抗控制的目标是要通过调解机器人的机械阻抗以保持末端执行器的位置和末端执行器-环境之间的接触力的理想的动态关系。在力、位置控制的基础上,将检测到的力和位置信号加入系统的动力学模型,其输出作为前馈加入力-位置控制器,实现阻抗控制。

为实现柔顺控制,本研究在双臂机器人末端一体

化关节谐波减速器的后端安装力矩传感器,实时测量电机轴的输出力矩,伺服驱动控制器通过电流和力矩直接感知反馈,可实现更为快速和精准的力矩和阻抗控制。采用多维力传感器的感知反馈实现智能关节的柔顺控制策略是下一阶段工作的重点。力传感器坐标设置与工作坐标成一定相对关系,一体化关节的位置控制采用上节设计的控制策略,通过坐标变换把位置偏差从机器人基准坐标变换到工作坐标中,再通过速度环和运动学逆解将位置指令变成关节速度指令,送往关节速度控制回路输出。力反馈通道利用力传感器获取经滤波器去除噪声后的信号,后经坐标变换,送到控制回路中变成关节运动指令输出,进而修正关节运动。

4 实验及结果分析

根据双臂机器人末端一体化关节结构设计具体要求,研制开发出控制与驱动单元样机,实物如图 5 所示。

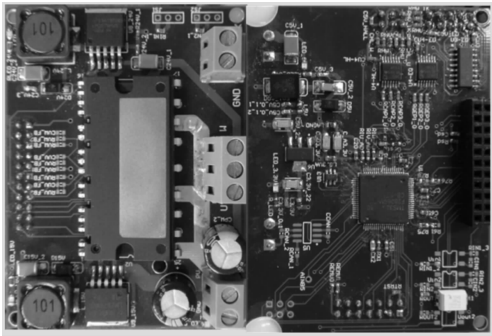


图 5 实物图片

电路板长宽高尺寸为 80 mm × 60 mm × 30 mm,控制与驱动分为上下两层对插设计,结构紧凑,体积相对较小。电路板设计可以根据具体机械结构设计配合做出相应外形尺寸调整,具有一定灵活性与通用性。直流工作电压范围为 24 V ~ 48 V,最高输出持续电流 10 A,峰值电流 20 A,工作温度 - 15 ℃ ~ + 85 ℃。经

反复测试实验,样机整体性能指标达到使用要求,能够实现双臂机器人末端一体化关节闭环控制。

预期 300 r/min 的速度与位置脉冲响应曲线如图 6 所示。

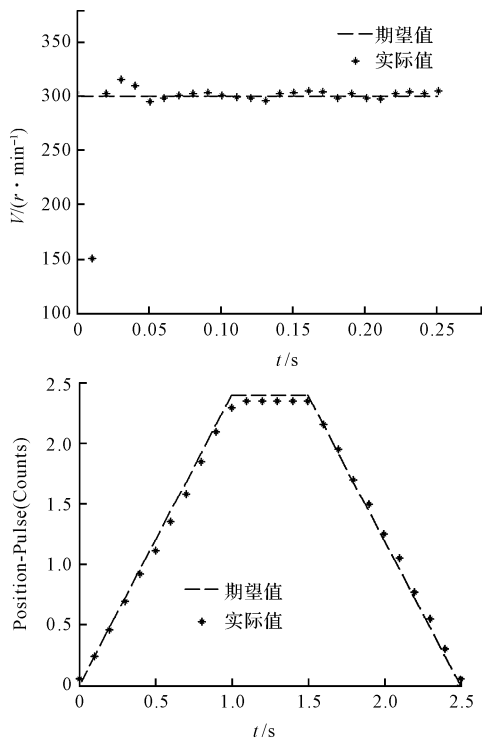


图6 速度与位置脉冲响应曲线

响应速度较快、超调量较小,位置脉冲响应曲线体现了样机的快速跟踪定位能力。同时,响应曲线显示,闭环控制的控制效果仍有改进可能,系统软件包含闭环控制算法设计尚有进一步改进完善的空间,特别是在不同工作负载下的工作性能,可以反复测试并改进,以达到更加成熟的目的。

5 结束语

针对双臂机器人末端一体化关节,本研究采用高速 DSP 和 IPM 智能功率模块进行控制与驱动单元的设计,分析了设计方法及原理,分别对硬件与软件进行了设计与实现,其中融入迭代学习控制方法后的模糊自适应整定 PID 改进控制算法得到了合理的实际应用。

实践结果表明:该设计具有良好的稳定性,较高的可靠性和安全性、设计紧凑、能够提高末端一体化关节的整体集成度,有利于关节的轻量化及智能化设计,具有重要的理论与实践价值。在下一阶段,本研究将通过集成力传感器信息反馈而引入柔顺控制策略,对末端关节的控制算法做进一步改进研究,以促进双臂机器人在装配、铸件打毛刺和拧螺钉等更多精细任务中的出色表现。

参考文献 (References):

- [1] 杨素香,冯旭,王孝利,等.机械臂关节驱动组件一体化结构设计[J].微特电机,2016,44(9):43-45,50.
- [2] 霍琦,朱明超,李昂,等.基于 DSP 的 Stewart 平台直流无刷电机伺服控制系统[J].电子设计工程,2016,24(14):146-148.
- [3] 王宏佳,杨明,贵献国,等.仿人机器人一体化关节微小伺服控制器的研制[J].高技术通讯,2012,22(3):294-298.
- [4] 段丽娜,赵金.基于 DSP 的无刷直流电机控制系统的研究[J].微电机,2014,47(3):60-63.
- [5] 张从鹏,邢庆辉.基于 ARM Cortex-M4 的永磁无刷直流调速系统设计[J].微特电机,2016,44(1):90-92.
- [6] 唐省阳,蔡为民,詹少华.基于 DSP 的改进型电机测速系统的分析与实现[J].煤矿机械,2012,33(2):207-208.
- [7] ALAEINOVIN P, JATSKEVICH J. Hall- sensor signals filtering for improved operation of brushless DC motors[J]. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2011, 27(2):613-618.
- [8] 方炜,张辉,刘晓东.无刷直流电机双闭环控制系统的设计[J].电源学报,2014,12(2):35-42.
- [9] PATEL V K S, PANDEY A K. Modeling and simulation of brushless DC motor using PWM control technique[J]. International Journal of Engineering Research and Applications, 2013, 3(3):612-620.
- [10] 黄祖良,邓琛,张琴舜.体感交互式拟人手臂机器人[J].轻工机械,2016,34(1):5-8.
- [11] 孙增圻,邓志东,张再兴.智能控制理论与技术[M].北京:清华大学出版社,2011.

[编辑:张豪]

本文引用格式:

李开霞,丁玲,赵江海,等.双臂机器人末端一体化关节控制与驱动单元设计[J].机电工程,2017,34(9):1019-1023.

LI Kai-xia, DING Ling, ZHAO Jiang-hai, et al. Control and drive unit design on end integral joint for dual-arm robot[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017, 34(9):1019-1023.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>