

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.08.020

排爆机器人机械臂控制系统设计*

李 波¹, 张 瑾¹, 李国栋^{2*}

(1. 中国兵器装备集团 上海电控研究所, 上海 200092;
2. 杭州电子科技大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要:针对远程控制排爆机器人机械臂能否精确定位并完成排爆任务的问题,将运动学、动力学分析方法与分布式控制理论应用到机械臂控制系统设计中,对机械臂的运动特征与实用控制原理进行分析研究,对机械臂控制系统的硬件、软件分别进行了具体设计,确定了总体结构与主要部件参数,硬件上采用以 LPC2378 为核心的主控制器、LPC2368 为核心的协处理器架构的控制系统,软件上采用 CAN 2.0B 总线技术完成主控制器与协处理器间通讯,提出了一种基于模块化设计与多传感器信息融合的机械臂控制系统,并在多种条件下进行仿真测试。研究结果表明,该排爆机器人机械臂各项技术指标基本达到设计要求,能够较好地实现远程视频定位控制、拆除剪断引爆器和搬运爆炸物,具备一定的反恐排爆能力。

关键词:排爆机器人;机械臂;控制系统;模块化设计;信息融合

中图分类号:TH39;TH134

文献标志码:B

文章编号:1001-4551(2015)08-1110-05

Design of EOD robot manipulator control system

LI Bo¹, Zhang Jin¹, LI Guo-dong²

(1. Shanghai Electric Control Research Institute, China South Industries Group Corporation, Shanghai 200092, China; 2. College of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at the problems of explosive ordnance disposal (EOD) robot manipulator accurate positioning by remote control, the kinematics analysis, dynamic analysis and distributed control theory were applied on the manipulator control system design. The motion feature and control principle of manipulator was analyzed. The hardware and software were designed specifically. The overall structure of manipulator and main parts parameter were confirmed. The LPC2378 was used as core in main controller and LPC2368 was used as core in coprocessor. The CAN BUS 2.0B was adopted to communicate between main controller and coprocessor. A manipulator control system based on modular design and multiple sensor intelligence fusion was put forward and tested in various conditions. The experimental results indicate that the robot manipulator technical criteria can be achieved, and it can remotely position, demolish the blasting machine and transport explosive which indicates the EOD robot is able to counter terrorist to some extent.

Key words: explosive ordnance disposal (EOD) robot; manipulator; control system; modular design; intelligence fusion

0 引 言

排爆机器人是指能代替人到不能去或不适宜去的有爆炸危险的环境中,直接在事发现场进行侦察、搬运和处理爆炸物及其他危险品的机器人。当排爆机器人

移动到距离爆炸物较近距离时,后方操作人员控制机械臂接近爆炸物。当排爆机器人进入最佳工作位置时,用机械臂接近爆炸物,根据现场情况决定是利用水炮枪将爆炸物击毁,还是利用机械臂手爪将爆炸物搬离现场后再处理。由于爆炸物一般体积较小,需要机

收稿日期:2015-03-31

基金项目:中国兵器装备集团公司研发基金资助项目(EJ11-8013)

作者简介:李 波(1980-),男,浙江杭州人,工程师,主要从事电器控制方面的研究设计与开发方面的研究. E-mail:lgd500@hdu.edu.cn

通信联系人:李国栋,男,高级实验师. E-mail:lgd500@hdu.edu.cn

机械臂手爪精准接近操作,这对控制系统精度提出了较高要求^[1]。

传统的做法是利用回传的二维视频等信息来操控机械臂。当人们双目观察自然界物体时,看到的物体是具有形态、大小、位置的三维图像;这是因为物体的物光与位相同时通过双目而呈现的结果。当物像通过摄像镜头时,在通过物光的同时滤掉了位相(透镜的光学特性),由此得到的是二维图像。它只能判别图像的上下、左右位置,而无法得到前后距离的信息。所以,二维视频图像很难进行高精度的三维视觉定位。通过视频图像进行远程操控机械臂,前、后距离信息的未知极易产生错觉,使操作失误而导致排爆失败。“双目视觉定位”是近几年发展起来的三维定位方法,但相应控制器设计复杂,采集与计算的信息量很大,硬件要求高,一般嵌入式系统难以实现。如果采用信息融合技术,将机械臂上多种传感器信息融合处理(如安装在手爪上测量不同方向距离的传感器),就能提高信息实时性的同时又降低信息处理的硬件成本;通用的嵌入式系统通过科学合理的模块化设计就能完成机械臂的较高精度控制任务^[2]。

本研究提出如下机械臂设计任务:最大臂展1.6 m、肩部旋转300°、肩部摆动170°、大臂摆动270°、小臂摆动180°、手爪旋转360°、手爪张开0~25 cm、最大抓举15 kg、水平展开抓举6 kg。根据以上指标,拟采用机器人动力学、运动学方法分析机械臂主要运动与控制特征,利用模块化方法设计相关硬件系统,编程控制机械臂执行仿真排爆任务并测试其性能。

1 排爆机器人机械臂控制系统设计原理

1.1 排爆机器人机械臂控制系统特征分析

本研究的机械臂是一个相对独立的机构,它由肩关节、大臂关节、肘关节、腕关节、爪关节等组成,排爆机器人机械臂装配图如图1所示。

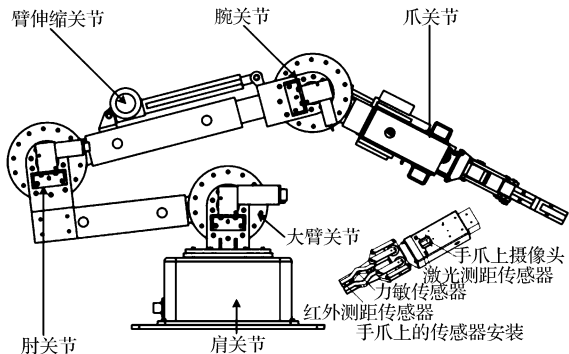


图1 排爆机器人机械臂装配图

机械臂的每个关节内安装一个能够对相邻连杆施加转矩的伺服直流电机和一个用以测量关节转角的编码传感器,可以实时获得各关节的位置矢量 Θ 与速度矢量 $\dot{\Theta}$ 。由动力学方程,可计算出施加在机械臂各关节上的力矩矢量 T ,如下式所示:

$$T = M(\Theta_d) \ddot{\Theta}_d + V(\Theta_d) \dot{\Theta}_d + G(\Theta_d) \quad (1)$$

式中: $M(\Theta_d)$ —机械臂质量矩阵, $V(\Theta_d)$ —离心力及哥氏力矢量, $G(\Theta_d)$ —重力矢量。

由式(1)可以依照指定的模型计算出所需转矩以实现期望轨迹。如果动力学模型是完备、精确的,且没有噪声或其他干扰存在,则沿着期望轨迹连续应用式(1)即可实现期望轨迹运行。然而在现实环境中,由于动力学模型的不完备以及存在不可避免的干扰,使得这种开环控制方式不实用^[3]。

实际设计应用中,需要通过比较期望位置 and 实际位置之差、期望速度与实际速度之差来计算伺服误差,如下式所示:

$$E = \Theta_d - \Theta \quad (2)$$

$$\dot{E} = \dot{\Theta}_d - \dot{\Theta} \quad (3)$$

控制系统由式(2,3)就能根据伺服误差函数计算驱动器所需的转矩。该控制系统设计利用传感器的反馈信息来减少伺服误差,实现闭环控制,其原理如图2所示。该闭环控制系统的核心问题是怎样保证相关传感器的测量精度与稳定性,这样才能保证系统相对稳定。

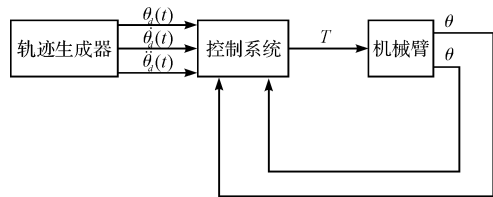


图2 机械臂单关节闭环控制系统框图

如图2所示,所有信号线表示 $N \times 1$ 维矢量,由此可见,机械臂的控制问题是一个多输入、输出的控制问题。由运动学和动力学理论可知,对于 N 个关节的机械臂,可以近似等效为 N 个独立的单输入、输出控制系统的叠加。根据伺服控制定律,建立伺服误差的二阶微分方程,如下式所示:

$$\ddot{e} + k_v \dot{e} + k_p e = 0 \quad (4)$$

式中: e —伺服误差, $e = x_d - x$,为期望轨迹与实际轨迹之差。轨迹跟踪控制器原理图如图3所示。

图3中, $f' = x_d + k_v \dot{e} + k_p e$ 。由图3可知,系统即使存在误差,该误差在闭环系统中也会受到抑制,随之系统准确跟踪期望轨迹^[4-6]。

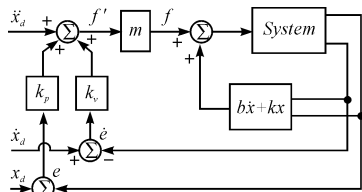


图3 机构臂轨迹跟踪器控制原理图

上述是机械臂控制系统的原理。对排爆机器人而言,机械臂的手爪坐标中心能与爆炸物坐标中心对齐才是设计的主要目标。如图 1 所示,手爪上安装了测量抓举力的压敏传感器、测量手爪张开距离的红外测距传感器、测量手爪坐标中心与目标物体前后距离的激光测距传感器以及安装在手爪上下的 2 个摄像头。当这些传感器信息经过协处理器融合到视频图像中,系统依照图像上的坐标值就能正确定位当前手爪坐标中心与目标物中心坐标位置,操控手爪使其正确定位。

1.2 排爆机器人机械臂控制系统硬件设计原理

依据分布式控制理论,控制系统通常由一个或多个主控制器和许多节点控制器组成。二者均具有信息处理能力,不同之处在于,主控制器主要针对系统总体

进行判断、决策,节点控制器主要用于某方面的信息采集与控制,因此主控制器硬件性能要求可以有所降低。目前,节点控制器(包含结构较复杂的各类传感器与执行器)以各种模块形式在市场上大量涌现,因此机械臂控制系统实现模块化设计非常易于实现。

机械臂由电气部件、控制驱动部件、总线通信接口、嵌入式操作系统、软件中间件等部分组成。其中电气部件由具有一定功能的通用部件组成,包括伺服电机、编码器等部件;控制驱动部件用于控制或驱动相应电气部件;总线通信接口用于各控制驱动部件之间进行信息交换与传输;嵌入式操作系统负责各控制驱动部件硬件资源的分配与管理;软件中间件屏蔽了底层硬件和应用软件信息,可实现不同功能构件间的软件连接支持。上述按模块化思想开发的功能构件具有标准的硬件和软件接口,便于系统集成,可以降低设计、集成与制造的难度。

排爆机器人采用上位远程控制机+底层主处理器+底层协处理器的上、下位机结构,排爆机器人机械臂控制系统原理图如图 4 所示。

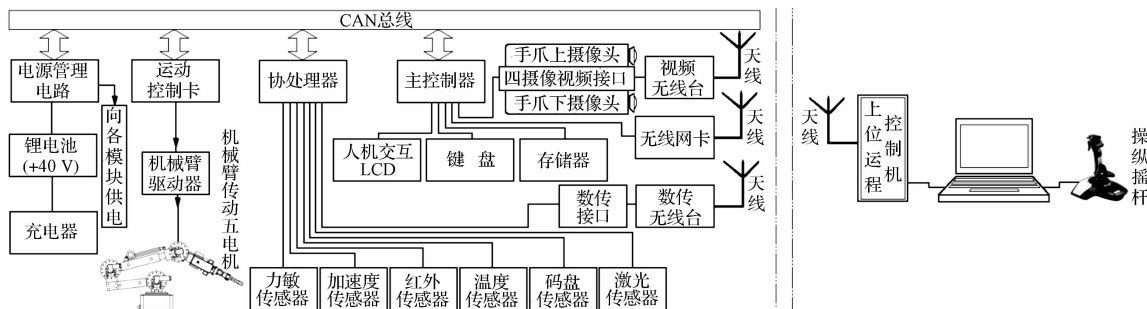


图4 排爆机器人机械臂控制系统原理图

(1)上位远程控制机。用于获取排爆机器人机械臂的运动过程中获取的各类传感器信息、摄像系统的图像信息,同时把运动指令发送给底层主处理器。

(2)底层主处理器。用于接收上位机的运动控制指令并作解析,并转换成相关直流电机驱动控制器指令,使机械臂执行上位机的运动控制。同时与底层协处理器通讯,获取并处理机械臂上各类传感器的信息。

(3)底层协处理器。主要负责机械臂上安装的各类传感器所获取信息的预处理工作^[7]。

2 排爆机器人机械臂控制系统硬件设计

依据图 4 设计方案,机械臂控制系统包含三大模块:电源模块、主控制器模块、协处理器模块。

2.1 电源模块设计

电源模块在整个控制系统中的作用非常重要,它

直接决定整个系统的可靠性。在整个控制系统中,CPU 板、接插件板、协处理板、电机驱动器、数传及视频无线台等的供电都来自锂电池 +40 V 直流电压输入,经稳压递减得到 24 V、12 V、5 V、3.3 V 等所需电压。笔者在第一级稳压电路输入插座后增加了 1 个稳压管进行过压保护,1 个瞬态抑制二极管用以防止外部电源串扰。24 V 电压一路供机械臂驱动器、底盘驱动器、云台驱动器等需要 24 V 的电路,另一路经 DC-DC 稳压模块转换为 12 V 电压。12 V 电压一路供传感器接口电路、视频接口电路、视频无线台、数传无线台等电路,另一路经 DC-DC 稳压模块转换输出 5 V 电压供需要的芯片。主控制器与协处理器绝大部分的芯片需要 3.3 V 电压,该电压由相关 DC-DC 稳压模块转换获得。

由于电源系统是采用递减稳压,前级工作时产生的干扰信号很有可能通过电源对下级产生干扰。为保证各级电源可靠工作,必须强化各级的前后滤波,使干

扰降到最小。特别是 3.3 V 电压,它是提供 CPU、AD、DA 等重要芯片工作电压的电源,稍有波动会对控制精度造成很大影响,因此本研究采用多个 0.01 μF 、0.1 μF 、10 μF 等电容并接在输入与输出端,用以旁路不同频段的干扰信号。各级电压通过高可靠接插件向主控制器、协处理器等提供所需电压^[8]。

2.2 主控制器模块设计

主控制器控制芯片采用 PHILIPS 公司生产的 LPC2378 芯片,它是一款基于 ARM 架构的微处理器,内含 10/100 Ethernet MAC、USB2.0 全速接口、4 个 UART、2 路 CAN 通道、1 个 SPI 接口、2 个同步串行端口(SSP)、3 个 I²C 接口等。片内高达 512 KB 的 Flash 程序存储器,具有在系统编程(ISP)和在应用程序编程(IAP)功能;先进的向量中断控制器,支持 32 个向量中断;多达 70 个(LPC2368)或 104 个(LPC2378)的通用 I/O 管脚;10 位 A/D、D/A 转换器等功能。芯片的这些硬件配置完全能满足主控制器的设计要求。

主控制器由 LPC2378 微处理器最小系统及其周围的电源、以太网、SD 卡、视频、CAN 总线、UART 等电路组成,是整个系统的核心,也是系统中最复杂的电路板。主控制器通过外部总线与协处理器等进行通讯,需要用到 LPC2378 微处理器信号线:16 根数据线、16 根地址线、读、写、片选、中断等。由于信号从主控制器板到协处理器板需要通过接插件连通,为提高信号质量和驱动能力,本研究在系统中使用了两片 74LVC16245 芯片对各信号进行缓冲、整形。所有跟主控制器相关的芯片设计成一组模块,集成在一块 6 层 PCB 板上,通过接插件与协处理器 PCB 板连接^[9]。

2.3 协处理器模块设计

协处理器控制芯片采用 LPC2368,包括 A/D、I/O、D/A、PWM 等输入输出功能,可用于控制各类机器人常用传感器与执行器,如测距传感器、力敏传感器、伺服电机、编码器等。LPC2368 内含 10 位 A/D、D/A 转换器,在使用采集功能时,需要向微处理器提供外部参考基准电压,该系统中将外部 5 V 电源经滤波处理后,作为参考电压的基准。

CPLD(EPM570T100C5)是协处理器的另一重要器件,主要用于实现机械臂各关节位姿状态的转换与计算功能,它与主控制器 LPC2378 微处理器之间通过并行接口进行通信,将 LPC2378 的地址总线、数据总线和控制总线连接到 CPLD 的相应管脚上,通过 CPLD 内部逻辑,利用宏单元在 CPLD 内部构造出相应的寄存器。主控制器就可以通过读写这些寄存器来完成对

CPLD 的控制(共 256 个 16 位的访问地址),实现机械臂各关节位姿的调整^[10]。

3 排爆机器人机械臂控制系统软件设计

LPC2378 微处理器是整个系统的核心,通过使用操作系统控制微处理器的底层硬件,可以较好地解决机械臂运行过程中的实时性问题,综观目前主流的嵌入式操作系统, $\mu\text{COS-II}$ 操作系统比较适合用于这一场合。构建一个适用于 LPC23XX 系列 CPU 的 $\mu\text{COS-II}$ 系统需完成以下几步:①编写或获取启动代码;②挂接 SWI 软件中断;③中断及时钟节拍中断;④编写应用程序。对于本系统而言,工作的重点在于挂接 SWI 软件中断、中断及时钟节拍中断、编写应用程序。

3.1 挂接 SWI 软件中断

将软中断异常处理程序挂接到内核是通过修改启动代码中的异常向量表实现,代码如下所示:

```
Reset
    LDR    PC, ResetAddr
    LDR    PC, UndefinedAddr
    LDR    PC, SWI_Addr
    LDR    PC, PrefetchAddr
    LDR    PC, DataAbortAddr
    DCD    0xb9205f80
    LDR    PC, [PC, #-0xff0]
    LDR    PC, FIQ_Addr
ResetAddr    DCD    ResetInit
UndefinedAddr    DCD    Undefined
SWI_Addr    DCD    SoftwareInterrupt
PrefetchAddr    DCD    PrefetchAbort
DataAbortAddr    DCD    DataAbort
nouse    DCD    0
IRQ_Addr    DCD    IRQ_Handler
FIQ_Addr    DCD    FIQ_Handler
```

3.2 中断及时钟节拍中断

这一步需要做以下两个方面的工作:

(1) 增加汇编接口的支持

方法是在文件中 IRQ.S 适当位置添加如下所示的代码,其中 xxx 替换为自己需要的字符串。这样,汇编接口就完成了。

```
xxx_Handler    HANDLER    xxx_Exception
```

(2) 初始化向量中断控制器

```
VICVectAddrX = (uint32) xxx_Handler ;
```

```
VICVectCntlX = (0x20 | Y);
```

```
VICIntEnable = 1 << Y;
```

3.3 编写应用程序

移植 $\mu\text{COS-II}$ 是为了在自己的系统使用 $\mu\text{COS-II}$ 。要在自己的系统中使用 $\mu\text{COS-II}$ 编写自己的应用程序就必须遵守 $\mu\text{COS-II}$ 的编程规范,主要包括主函数和用户任务。

依据以上分析,本研究将机械臂控制系统的应用程序编写为模块形式,其任务流程图如图 5 所示。

3.4 主控制器与协处理器通讯

由图 4 可知,主控制器与协处理器通过 CAN 总线连接,考虑到使用的便利性与将来的可扩展性,本研究采用 CAN2.0B 的协议,自定义的协议如表 1 所示,经过实测,该协议可以较好地满足机械臂各关节信息传输的需求。

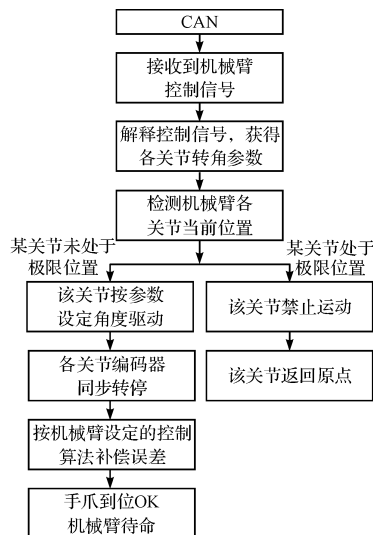


图 5 机械臂控制系统任务流程图

表 1 主控制器与协处理器 CAN 通讯协议表

手臂关节	ID	第 0 字节	第 1 字节	第 2 字节	第 3 字节	第 4 字节	第 5 字节
关节 7(肩旋转)	0 × 7	角度值	M	+ / -	速度值	0 × 04	CR8 检验值
关节 1(肩旋转)	0 × 1	角度值	M	+ / -	速度值	0 × 04	CR8 检验值
关节 2(肩旋转)	0 × 2	角度值	M	+ / -	速度值	0 × 04	CR8 检验值
关节 3(肩旋转)	0 × 3	角度值	M	+ / -	速度值	0 × 04	CR8 检验值
关节 4(肩旋转)	0 × 4	角度值	M	+ / -	速度值	0 × 04	CR8 检验值
关节 5(肩旋转)	0 × 5	角度值	M	+ / -	速度值	0 × 04	CR8 检验值
关节 6(肩旋转)	0 × 6	角度值	M	+ / -	速度值	0 × 04	CR8 检验值

4 排爆机器人机械臂控制系统仿真测试

排爆机器人完成整个系统设计装配调试工作后,首先对机械臂控制系统进行以下仿真测试工作:

(1) 机器人运行,机械臂收拢状态测试。输入肩关节、大臂关节转角 0° ,肘关节转角 15° ,腕关节转角 -30° ;启动运行程序,机械臂收拢,如图 1 所示。测得机械臂安装中心与手爪中心的间距为 779.58 mm,视频显示数据 768.32 mm,相对误差 1.4%;机械臂质心与安装中心重合,符合机器人运行时要求。

(2) 最佳排爆距离测试。输入肩关节转角 0° ,大臂关节转角 120° 肘关节转角 -15° ,腕关节转角 -40° ;启动运行程序,测得机械臂安装中心与手爪中心的间距为 1 492.65 mm,视频显示数据 1 482.92 mm,相对误差 0.65%。

(3) 最大机械臂长度测试。输入肩关节转角 0° ,大臂关节转角 150° 肘关节转角 -30° ,腕关节转角 -35° ;启动运行程序,测得机械臂安装中心与手爪中心的间距为 1 626.85 mm,视频显示数据 1 618.23 mm,

相对误差 0.53%。

(4) 机械臂的手爪抓举力测试。将长 × 宽 × 高为 200 mm × 200 mm × 200 mm 正方体,重 16 kg 的重物块放在离机械臂 0.8 m 处,通过远程操控抓举成功,其大于设计重量。

(5) 机械臂的手爪前端剪断导线功能测试。将几根 2.5 mm^2 单股与多股铜芯电线放在离机械臂 0.8 m 处,通过远程操控手爪前端,成功剪断所放电线,能用于切断引爆器电源。

(6) 机械臂手爪起螺钉功能测试。将螺钉固定的钢结构小架子放在离机械臂 0.8 m 处,通过远程控制手爪夹持专用螺丝刀;调整各关节,使螺丝刀刀刃垂直螺丝凹槽面对中稍压紧,逆向转动腕关节,拧出螺钉。仿真难度较大,用时较长,有待进一步设计与改进。

机械臂控制系统在(1~3)项仿真测试中,视频数显与实测数据存在 0.53% ~ 1.4% 的相对误差,这是由于传感器模块非线性误差引起的。通过协处理器线性化处理,误差降至 0.45% 左右,完全达到设计要求。

(下转第 1150 页)

本文引用格式:

李 波,张 瑾,李国栋. 排爆机器人机械臂控制系统设计[J]. 机电工程,2015,32(8):1110-1114,1150.

LI Bo, Zhang Jin, LI Guo-dong. Design of EOD robot manipulator control system[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015,32(8):1110-1114,1150.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>