

文章编号:1001-9081(2010)11-3087-04

# 基于嵌入式PC的工业机器人开放式控制系统交互控制的实现

田茂胜<sup>1,2</sup>, 唐小琦<sup>1</sup>, 孟国军<sup>1</sup>, 叶伯生<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学 国家数控系统工程技术研究中心, 武汉 430074;

2. 武汉华中数控股份有限公司, 武汉 430223)

(tms\_02@126.com)

**摘要:**为了满足多自由度关节型工业机器人多机交互控制的需求,以嵌入式工业PC为硬件平台,RT-Linux操作系统为软件平台,采用模块化的软件设计方法,设计了工业机器人开放式控制系统。该系统采用共享内存的方式实现内外部信号的交互,通过执行PLC程序中定义的不同的M指令来实现与外部系统的交互控制功能。在浇铸机器人交互控制中的实际应用表明:该控制系统开放性好,实时性强,运行稳定可靠。

**关键词:**工业机器人;开放式控制系统;嵌入式PC;交互控制

**中图分类号:** TP242.2 **文献标志码:** A

## Implementation of interactive control in open control system for industrial robot based on embedded PC

TIAN Mao-sheng<sup>1,2</sup>, TANG Xiao-qi<sup>1</sup>, MENG Guo-jun<sup>1</sup>, YE Bo-sheng<sup>1</sup>

(1. State Engineering Research Center of Numerical Control System, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei 430074, China;

2. Wuhan Huazhong Numerical Control Corporation Limited, Wuhan Hubei 430223, China)

**Abstract:** In order to implement interactive control of multi Degree Of Freedom (DOF) articulated industrial robot, an open control system for this kind of robot was designed. Hardware of the system was designed based on embedded industrial PC and Field Programmable Gate Array (FPGA). And the functional software of the system was modularized based on RT-Linux operating system. The interactive control signal was transmitted by shared memory of the system. And the system implemented interactive control through different M instructions defined in PLC program. The implementation of interactive control between a 3-axes articulated casting robot and 2 casting machines proves that the control system is a real open system, and it also has strong real-time control ability and reliability.

**Key words:** industrial robot; open control system; embedded PC; interactive control

## 0 引言

多自由度关节型工业机器人应用范围涉及到焊接、搬运、喷涂、浇铸等各方面,对于不同的应用,关节型工业机器人的自由度数量、对应的外部系统交互控制信号的需求等都各不相同。因此,其控制系统必须具有开放性、通用性,对于不同的应用,可以根据需要来选配相关的硬件设备,并提供外部系统交互信号的通路;同时能够根据需要增减、修改相应的软件功能模块,以满足不同工业机器人及其自动化系统交互控制的需求<sup>[1]</sup>。鉴于工业PC强大的处理能力及其良好的通用性,越来越多的机器人采用工业PC作为控制系统的核心控制器<sup>[1-2]</sup>。而对于不同系统之间的交互控制,系统之间的信号交换多采用开关量或现场总线通信的方式来实现<sup>[3-6]</sup>。现场总线通信方式传递的信息量大,适合复杂的多机协调控制,但其实现的难度大,成本高;而采用开关量交换信号简单易行,能满足大多数工业机器人交互控制的应用需求。因此,本文选用嵌入式x86工业PC作为工业机器人控制系统的核心控制器,系统通过开关量与外部系统进行信号交换,交互信号在机器人系统内部通过共享内存的方式进行传递,从而以相对简单的方式实现工业机器人系统的交互控制。

## 1 工业机器人开放式控制系统结构原理

### 1.1 系统硬件结构

本文所设计的开放式机器人控制系统的硬件系统基于嵌入式x86工业PC实现,主要包括RC控制器、人机接口(Human Machine Interface, HMI)、伺服驱动系统等三大部分。其硬件系统的体系结构如图1所示。

系统的RC控制器以“嵌入式x86工业PC+FPGA”的方式实现,嵌入式x86工业PC是整个系统的控制核心,所有的数据及信号处理均由它完成;嵌入式x86工业PC通过PC104总线与FPGA模块进行通信;FPGA模块实现与伺服系统、外部I/O信号、操作面板等的接口功能,为工业PC与外部的各种信息和数据的交换提供通路。

伺服驱动系统由多个独立的伺服单元组成,每个独立的伺服单元由一个带标准脉冲指令接口的伺服驱动器及一个伺服电机组成,每个伺服单元对应机器人一个关节轴,关节轴数量可以根据实际需要灵活配置,系统最多可配置8个关节轴。

系统共有48路输入、32路输出信号,为保证系统的可靠性,提高系统抗干扰能力,I/O信号的接口均采用光电隔离的方式。HMI包括操作面板、显示器和各种通信及数据交换接

收稿日期:2010-05-19;修回日期:2010-07-17。 基金项目:国家科技重大专项(2009ZX04009-011)。

作者简介:田茂胜(1980-),男(土家族),湖北恩施人,工程师,博士研究生,主要研究方向:数控、工业机器人控制;唐小琦(1957-),男,湖南邵东人,教授,博士生导师,主要研究方向:非电量测量、智能仪器、数控;孟国军(1986-),男,山东菏泽人,硕士研究生,主要研究方向:工业机器人控制;叶伯生(1966-),男,湖北黄冈人,副教授,博士,主要研究方向:数控、工业机器人控制。

口等,可实现友好的人机交互功能,并能方便地与外部系统进行通信及数据交换。

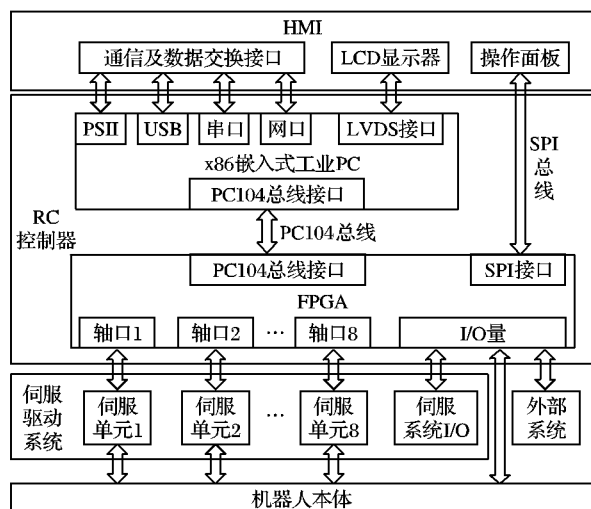


图1 控制系统硬件体系结构

## 1.2 系统软件结构

系统采用 RT-Linux 作为软件平台,系统软件的实时操作环境在 RT-Linux 操作系统上扩展而成。整个软件系统分为3层:系统层、控制层和应用层。软件系统结构如图2所示。

系统层主要包括 RT-Linux 操作系统、设备驱动程序和 RTMS 实时多任务调度程序等3部分。设备驱动程序主要是满足不同的控制对象(即不同自由度的工业机器人)在使用不同的硬件配置时对不同驱动程序的要求,以实现系统的通用性。RTMS 模块是自主开发的装载于 RT-Linux 实时内核上任务调度器,它实现对机器人控制系统的任务管理调度。控制系统将应用层和控制层的各个程序模块的任务按其不同的实时性要求划分调度优先级,以满足 RTMS 模块调度功能的需求。

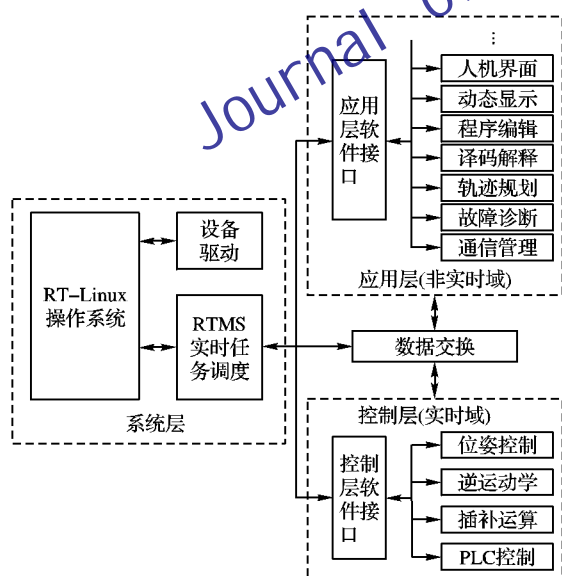


图2 控制系统软件体系结构

控制层为实时域,系统的全部实时控制功能均在控制层实现。控制层软件根据控制功能的不同进行模块化设计,主要包括插补运算、逆运动学、位姿控制、PLC控制等软件模块。

应用层为非实时域,也采用模块化编程的方法进行设计,应用层功能软件模块有人机界面、动态显示、程序编辑、译码解释、轨迹规划、故障诊断、通信管理等。系统提供了对用户开放的应用层控制软件接口,具备了方便的二次开发环境,能

灵活地组配不同类型的机器人控制系统和扩充系统功能,具有很好的开放性和可维护性。对于不同的工业机器人对象,其系统功能的区别和增减均在应用层实现。

## 2 系统交互控制机理

机器人控制系统内、外部信息的交换机制,是实现系统交互控制的关键所在。控制系统内部信息交换可以有多种方式实现,本系统中内部信息的交换通过共享内存的方式来实现。系统中内、外部开关信号的交换也是采用共享内存的方式来实现的,在共享内存中定义不同的寄存器来实现不同控制信号的传递,系统内、外部开关信号交互机制如图3所示。

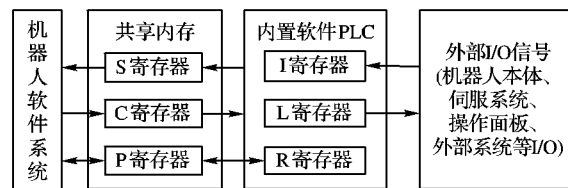


图3 系统内、外部开关信号交换机制

各寄存器功能定义如下:

I寄存器为系统外部输入给 PLC 的开关信号,PLC 程序通过读 I 寄存器获取外部输入信号;

L寄存器为 PLC 输出给外部系统的开关信号,PLC 程序通过写 L 寄存器输出控制信号;

R寄存器为 PLC 内部中间寄存器,可由 PLC 软件任意使用;

P寄存器为 PLC 外部参数,可由 PLC 程序与机器人用户任意自行定义,从而实现机器人用户与系统之间的信号交互;

S寄存器为 PLC 输出给机器人系统内部的信号;

C寄存器为机器人系统内部输出给 PLC 的信号。

其中:S、C寄存器由数控系统与 PLC 事先约定好的,PLC 硬件和软件都不能更改其寄存器各位的定义。

本系统控制软件中的 PLC 控制程序模块的主要任务是实现对系统内外部输入、输出的开关量信号的逻辑控制。在机器人控制系统与外部系统进行交互式控制时,所有的交互控制信号都由 PLC 控制程序进行处理,在 PLC 程序中根据控制的不同需求定义不同的 M 指令,每一条 M 指令控制一个或多个内、外部开关信号,用户进行机器人编程时,在需要实现交互控制的动作语句后面插入对应的 M 指令,系统通过执行 M 指令来读写相关寄存器的值,从而完成相关控制信号在系统内部的传递,实现本系统与外部系统的交互控制功能。

## 3 系统应用及其交互控制的实现

本文设计的控制系统已经成功应用于东风汽车公司某厂的三轴浇铸机器人系统的控制,实现了机器人系统与两台浇铸机系统的交互控制,系统应用实物如图4所示。

### 3.1 应用对象控制功能需求

如图4所示,本应用案例中机器人系统与2台浇铸机系统之间必须进行交互控制,工作时机器人运动过程如图5所示。

浇铸所用容器安装于机器人末端,机器人容器初始位置(零点)为废料箱正上方,当系统以熔炉1供料时,机器人浇灌1号浇铸机时运动过程为:

a→等待→b→浇灌→c→除废料→a

机器人浇灌2号浇铸机时运动过程为:

a→等待→d→浇灌→e→除废料→a

机器人末端容器从废料箱正上方水平运动到熔炉1上方

暂停,等待任意浇铸机发送“准备好”信号给机器人系统;浇铸机 X(1 或 2)准备好后,给机器人系统发送“浇铸机 X 准备好”信号,机器人系统检测到此信号后,从炉 1 内舀出液态金属,运动到浇铸机 X 处对其进行浇灌;浇灌完毕后,给浇铸机 X 发送“X 号机浇灌完成”信号,浇铸机 X 收到此信号后开始工作,同时,机器人容器移动到废料箱上方,机器人系统清除“X 号机浇灌完成”信号并暂停 5 s,由机器人控制系统通过外部 I/O 控制吹风机将容器内的废料清除,废料清除完毕后,机器人重复运动过程 a,容器回到熔炉 1 上方,等待下一次浇铸机“准备好”信号。机器人的“等待”、“浇灌”、“除废料”等工作状态,都需要与浇铸机及其他相关辅助设备(如吹风机)进行交互控制才可实现。

同时,考虑到两台浇铸机自身工作的周期可能不同,而且可能有浇铸机故障等问题存在,机器人的浇灌过程需要有各种不同的运动过程组合。实现不同的运动过程组合,也需要机器人系统与浇铸机系统的交互控制来实现。系统正常工作过程中,两个熔炉可以根据工作中备料多少随时轮换使用,熔炉的切换要求通过机器人控制系统的操作面板上的按钮选择实现,使用不同的熔炉时,机器人运动过程类似。



图 4 控制系统应用实例

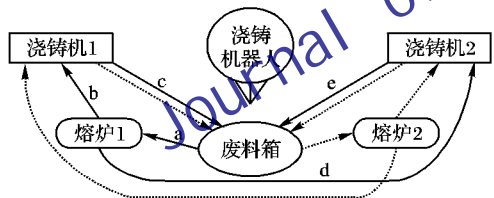


图 5 浇铸机器人运动过程示意图

3.2 交互控制功能的实现

机器人控制系统与浇铸机系统以及外部辅助设备的交互控制,都通过 PLC 控制程序来实现。其中,对于机器人控制系统与浇铸机及其他外部辅助设备之间实现手动、半自动、急停、报警等互锁功能的交互信号,直接由机器人在 PLC 控制程序中进行处理;对于系统正常运行过程中的交互控制信号,则在机器人 PLC 控制程序中按照交互控制信号的功能定义各种不同的 M 指令,并在机器人运动程序中调用 M 指令来实现。本系统中定义的 M 指令及其功能如表 1 所示。

表 1 M 指令代码与功能

M 指令代码	M 指令功能	寄存器信号
M1	判断浇灌对象	输入 I1.0 和 I1.1
M11	输出“1 号机浇灌完成”信号	输出 L1.0 = 1
M12	清除“1 号机浇灌完成”信号	输出 L1.0 = 0
M21	输出“2 号机浇灌完成”信号	输出 L1.1 = 1
M22	清除“2 号机浇灌完成”信号	输出 L1.1 = 0
M31	开废料吹风机	输出 L1.2 = 1
M32	关废料吹风机	输出 L1.2 = 0

M 指令的功能定义在 PLC 程序中的 exec\_M( ) 子程序中实现,定义代码如下:

```
void exec_M()  
{  
    ...  
    switch(mod_M_code(0))  
    { case 1: if (bit(I[1],0))  
        { if (bit(I[1],1))  
            { *ch_user_in(0) = 3;  
              mod_M_code(0) = -1; break;  
            }  
            else { *ch_user_in(0) = 1;  
                  mod_M_code(0) = -1; break;  
            }  
        }  
        else if (bit(I[1],1))  
        { if (bit(I[1],0))  
            { *ch_user_in(0) = 3;  
              mod_M_code(0) = -1; break;  
            }  
            else  
            { *ch_user_in(0) = 2;  
              mod_M_code(0) = -1; break;  
            }  
        }  
        else *ch_user_in(0) = 0; break;  
    case11: L[1] = 0x01; mod_M_code(0) = -1; break;  
    case12: L[1] = ~0x01; mod_M_code(0) = -1; break;  
    case21: L[1] = 0x02; mod_M_code(0) = -1; break;  
    case22: L[1] = ~0x02; mod_M_code(0) = -1; break;  
    case31: L[1] = 0x04; mod_M_code(0) = -1; break;  
    case32: L[1] = ~0x04; mod_M_code(0) = -1; break;  
}
```

其中:M1 代码用于浇铸机系统控制机器人的动作,PLC 程序先检测输入信号 I1.0 (“浇铸机 1 准备好”信号)和 I1.1 (“浇铸机 2 准备好”信号)的值,然后通过 PLC 程序中的函数 \*ch\_user\_in(0)来设置用户交互控制代码 UserCode 的值,用户的机器人运动程序中通过判别 UserCode 的值来决定机器人的浇灌流程。其余 M 代码值,均对应各个相应的输出信号,用于机器人系统控制两台浇铸机及吹风机的动作。当 PLC 程序处理完对应的 M 代码所定义的输入输出信号后,通过函数 mod\_M\_code(0) = -1 通知系统该 M 指令处理完毕,机器人接着执行下一条指令。

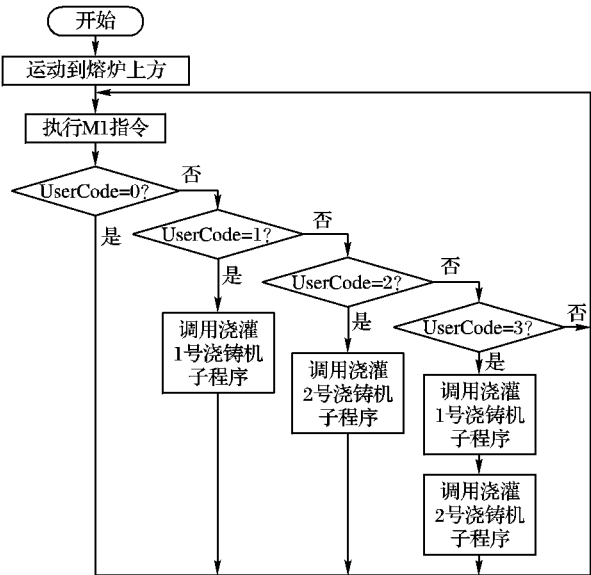


图 6 浇铸机器人运动主程序流程



在用户的机器人运动程序中,通过在机器人运动过程中的指定位置执行对应的M指令,即可完成机器人与浇铸机的交互控制。机器人运动程序也采用模块化的方式编写,机器人对两台浇铸机的浇灌过程分别用两个子程序来实现,主程序中判断浇灌对象,调用相应的子程序,完成浇灌过程。机器人运动主程序流程如图6所示,浇灌1号浇铸机的子程序如图7所示,浇灌2号浇铸机的流程与图7类似,在此不单独说明。

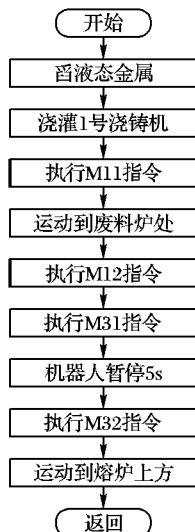


图7 机器人浇灌时运动子程序流程

#### 4 性能指标及应用测试

根据现场应用测试,该浇铸机器人系统达到的技术指标和性能参数如下。

可控轴数:3轴(最多可扩展至8轴)。

重复定位精度:  $\pm 0.8$  mm。

最大负载能力:5 kg。

机器人末端最大线速度:1.5 m/s。

配套浇铸机数量:2台。

单台浇铸最大周期:25 s。

现场应用浇铸原料为液态铝,根据生产工艺要求,必须保证在单台浇铸最大周期时间内完成浇铸,否则无法浇铸出合格的产品。对于不同的铸型模具,每次浇铸时液态铝用量不一样,为保证浇铸过程平稳安全,机器人运行的速度及浇铸周期也不同,在应用现场使用不同的模具对浇铸机器人控制系

统进行了测试,测试结果如表2所示。

表2 浇铸机器人应用测试数据

浇铸液态铝用量/kg	末端容器最大线速度/(m/s)	单台浇铸周期/s
3.8	0.8	17
3.0	0.9	15
2.3	1.1	13
1.2	1.2	12

应用现场测试结果表明,该控制系统完全满足浇铸机器人系统对于小型铸铝部件的浇铸成型需求。系统从2009年底投入实际应用,至今运行状态稳定。

#### 5 结语

采用“嵌入式工业PC+FPGA”的方案作为控制系统通用性、开放式硬件平台,以RT-Linux操作系统为软件平台,采用模块化编程的方法,实现了机器人控制系统软件功能。系统通过开关量与外部系统进行信号交换,并以共享内存的方式将交互信号在系统内部传送,交互控制机制简单可行,能满足各种不通应用场合的交互控制需求。系统已经成功应用于东风汽车公司某厂的三轴浇铸机器人控制系统中,实现了灵活的交互控制功能,经过生产实践证明,该控制系统具有较高的可靠性、实时性和开放性,各项性能指标均符合实际应用需求,具有很好的应用前景。

#### 参考文献

- [1] 王天然,曲道奎. 工业机器人控制系统的开放体系结构[J]. 机器人, 2002, 24(3): 256-261.
- [2] BROGARDH T. Present and future robot control development — An industrial perspective [J]. Annual Reviews in Control, 2007, 31(1): 69-79.
- [3] 秦季冬. 基于博弈论的多机器人运动协调[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- [4] 安刚, 马宏鹏, 王孝喜, 等. 多机器人系统研发平台的功能、结构与实现[J]. 自动化与仪表, 2001, 16(1): 62-65.
- [5] SHENG WEI-HUA, YANG QING-YAN, TAN JIN-DONG, et al. Distributed multi-robot coordination in area exploration [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2006, 54(12): 945-955.
- [6] 陈建平, 杨宜民. 多移动机器人系统运动协调研究综述[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(23): 44-48.
- [7] 熊有伦. 机器人技术基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2008: 32-50.
- [8] CRAIG J J. Introduction to robotics mechanics and control [M]. 负超, 译. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [9] 吉林大学学报: 工学版, 2009, 39(2): 447-451.
- [10] 钱猛, 毛捍东, 姚莉, 等. 基于逻辑渗透图的网络安全分析模型[J]. 计算机工程, 2009, 35(9): 147-149.
- [11] 冯萍慧, 连一峰, 戴英侠, 等. 面向网络系统的脆弱性利用成本估算模型[J]. 计算机学报, 2006, 29(8): 1375-1381.
- [12] 张永铮, 方滨兴, 迟悦, 等. 用于评估网络信息系统的风险传播模型[J]. 软件学报, 2007, 18(1): 137-145.
- [13] 李伟明, 雷杰, 董静, 等. 一种优化的实时网络安全风险量化方法[J]. 计算机学报, 2009, 32(4): 794-803.
- [14] 张永铮, 云晓春, 胡铭曾. 基于特权提升的多维量化属性弱点分类法的研究[J]. 通信学报, 2004, 25(7): 107-114.
- [15] 姜伟, 方滨兴, 田志宏, 等. 基于攻防博弈模型的网络安全测评和最优主动防御[J]. 计算机学报, 2009, 32(4): 817-825.
- [16] 尚大鹏, 张冰, 周渊, 等. 一种深度优先的攻击图生成方法[J].

(上接第3050页)

#### 5 结语

为了全面评估网络节点的威胁性,本文建立了威胁度指标的评估体系并给出了相应的量化方法,通过利用面向对象的时间 Petri 网对网络脆弱性关联关系建模,使防御者更为准确直观地把握网络攻击行为和步骤,最后提出了无目标导向的威胁度评估方法。本文重点完成了对网络攻击行为的建模和威胁度分析,模拟了攻击方对网络的侵害策略和造成的威胁,下一步工作需要进一步研究针对威胁度大的节点防御方如何提出完整的应对策略。

#### 参考文献:

- [1] 尚大鹏, 张冰, 周渊, 等. 一种深度优先的攻击图生成方法[J].