

# 基于 CAN 总线的焊接机器人安全控制器系统的设计

郑磊, 叶桦, 孙晓洁

(东南大学自动化学院, 南京 210096; 东南大学复杂工程系统测量与控制教育部重点实验室, 南京 210096)

**摘要:**为提高工业焊接机器人安全性,分析和研究了安全保护系统的任务需求,引入 CAN 工业现场总线技术,建立基于 CAN 总线的机器人控制结构,针对机器人控制系统各种工作状态制定相应的安全策略,划定系统安全等级,设计独立的安全控制器,配置安全控制器与机器人各模块之间的 CAN 总线通讯协议格式,监控机器人运行参数,通过逻辑判断和安全区域计算,对系统运行错误及预测可能存在的风险能够及时动作,确保机器人安全稳定运行。实验结果表明所设计的控制器是有效可行的。

**关键词:**工业焊接机器人;CAN 总线;通讯协议;安全保护

中图分类号:TP273+.5

文献标识码:A

文章编号:1001-7119(2011)05-0671-06

## Design of Safety Protection System for Industry Welding Robot based on CAN Bus

ZHENG Lei, YE Hua, SUN Xiaojie

(School of Automation, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China; Key Laboratory of Measurement and Control of Complex System of Engineering of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China)

**Abstract:**To improve the safety of industrial welding robots, the task demand of safeguard system is firstly analyzed and discussed. The technology of CAN field bus is then introduced which robot control system is based on. Given various kinds of working conditions, relevant safety strategies are made as well as safety grades. Secondly a separate safety controller is designed and communication protocol between the modules of robot and the controller is made to observe the operation parameters. Last but not least, the mechanism of logical judgment and computing of safety zone is applied to forecast possible risks and prevent errors of system in time, ensuring the safe and stable operation. Practice indicates, the controller is feasible and effective.

**Key words:** industry welding robot; CAN Bus; communication protocol; Safety protection

焊接机器人就是在焊接领域内代替焊工从事焊接工作的工业机器人,现已广泛应用于机械制造、汽车生产等行业,具有多自由度、运转速度快、运动范围大等特点,故其安全问题一直是机器人生产商、应用商关注的重要课题。国际电工委员会(IEC)和欧洲标准化组织(CEN/CEN-ELEC)也制定了相关的安全标准<sup>[1,9]</sup>,采用开放式

机器人控制器的机器人便于对系统进行扩展,允许各单元共享数据,这就为安全控制系统的设计提供了方便<sup>[2,3]</sup>。

在焊接机器人系统中,传统的信号传输和采集是通过众多的 I/O 接口实现的,连线复杂,维护困难。控制总线多采用 RS232, RS485 等总线作为通信桥梁,组成控制网络,通信速率低,实时性差

收稿日期:2011-07-10

基金项目:江苏省徐工集团院士工作站资助项目(BM2009562).江苏省重大科技成果转化项目(BA2007058)

作者简介:郑磊,男,硕士,研究方向:模式识别与智能控制系统, E-mail: zhenglei0217@163.com

[4], 本文引入 CAN(controller area network 控制器局域网)现场总线, 构建分布式控制系统。由于 CAN 总线的高性能、高可靠性、造价低、易维护和独特设计等优点[3], 非常适合这种设备转速高, 工作环境复杂, 危险系数高, 现场干扰强的场合, 使控制系统向分散化、网络化、智能化方向发展。

本文将分布式控制概念引入焊接机器人控制系统中, 将现场总线技术应用于安全控制器的数据采集和安全控制中, 以 ARM9 扩展 CAN 控制芯片 MCP2515 作为安全控制器核心, 首先分析机器人工作特点, 对机器人各关节运动速度、加速度、各关节最大运动角度等运动参数制定相关的专家意见和安全策略; 其次通过 CAN 总线监视各轴驱动器的工作状态及工作环境中的安全信号, 同时实时计算机器人各关节角度、末端实际位置和姿态, 参照安全策略做出相应措施, 实现关节限位和安全区域保护功能, 从而提高机器人工作的稳定性和安全性, 保护现场人员和设备, 实现机器人主动安全防护。

### 1 焊接机器人控制系统简介

焊接机器人控制系统包括运动控制器、各轴伺服放大器、示教盒[5]、安全环境检测器[8]、安全控制器等组成, 如图 1 所示。在实际应用中, 用户通过示教盒示教焊接轨迹、编辑示教程序或通过 CAN 总线接收离线示教程序, 工控 PC 机是整个运动控制系统的核心, 对示教程序进行解释分析, 并对示教任务进行管理, 同时完成合理轨迹规划和系统集成, 并将目标轨迹发至运动控制卡执行; PMAC 运动控制器完成系统闭环和控制算法, 目标轨迹进行细分, 输出指令到各轴伺服放大器; 伺服放大器根据运动控制器给定的控制量完成速度环运算, 对电机进行相应的伺服控制,

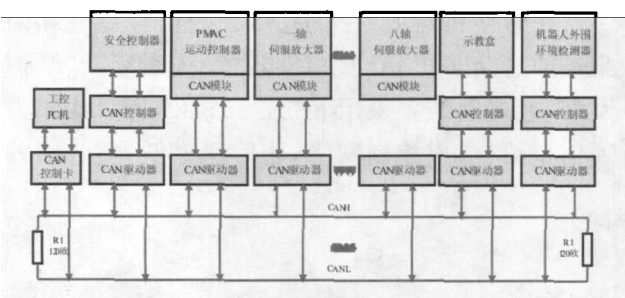


图 1 机器人控制系统概况图

Fig. 1 Communications in system based on CAN Bus

最终转化为各轴的机械手臂运动。

作为 CAN 通讯网络中的一个节点, 安全控制器负责机器人运行安全策略的制定和执行工作, 通过 CAN 总线从 PMAC 运动控制器、各轴伺服放大器、外围安全环境检测器等焊接机器人组件采集信息, 经过 CAN 协议解析, 计算分析机器人运动速度、转矩、位姿, 参照机器人安全空间和安全策略, 做出相应的执行策略。

### 2 安全控制器的功能和硬件设计

安全控制器独立于机器人运动控制系统工作, 其功能划分如图 2 所示, 其中状态检测模块通过读取 CAN 总线上的数据, 完成三类状态的监测: 焊接机器人环境变量(包括电源、备用电源、安全门、安全栅等)的监测、焊接机器人本体状态(伺服状态、各轴实际速度、转矩等)检测、焊接机器人姿态、位置的监测, 并通过运动学的正逆变换和坐标系变换, 判断机器人的运动状态, 并在执行模块进行安全等级的划分, 对不同等级的状况分别限制机器人执行的动作, 并通过安全设施发出紧急的命令完成安全保护。

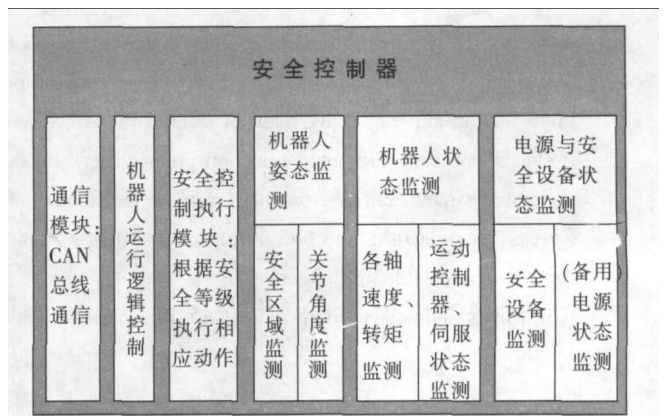


图 2 安全控制器功能框图

Fig. 2 Diagram of the safety protection system

安全控制器的硬件由三星公司的 ARM9 微控制器芯片 S3C2440A 为控制核心, S3C2440A 内置丰富的外设资源包括中断控制器、GPIO、SPI、RTC 等接口电路, 其内核为 16/32 位的 ARM920T 处理器, 主频可达 400 MHz, 满足安全控制器对控制器计算能力和扩展性的要求[6], 实时时钟完成控制周期的同步, 通过控制逻辑和判断完成安全控制输出, 并将工作日志记录在数据存储 EEPROM 模块中, 硬件设计原理如图 3 所示。

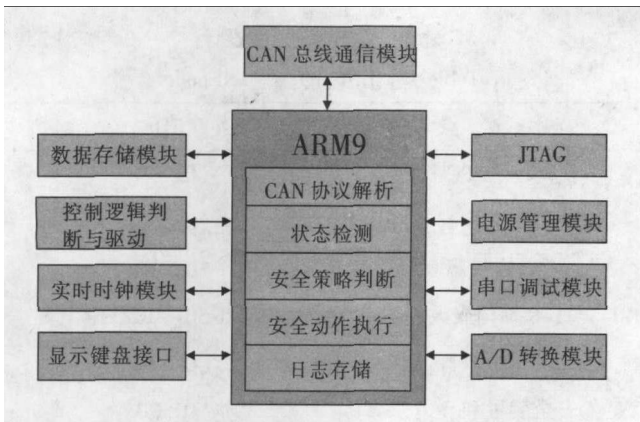


图 3 系统结构框图

Fig. 3 Structure diagram of system

硬件设计的重点是 CAN 节点的设计, 主要通过 CAN 控制器 MCP2515 和收发器 MCP2551 来完成。MCP2515 是 Microchip 公司推出的具有 SPI 接口的独立 CAN 控制器。它完全支持 CAN V2.0B 技术规范, 通信速率最高可达 1 Mbps, 内含 3 个发送缓冲器、2 个接收缓冲器、6 个 29 位验收滤波寄存器和 2 个 29 位验收屏蔽寄存器; 它的 SPI 接口时钟频率最高可达 10 MHz, 可满足一个 SPI 主机接口扩展多路 CAN 总线接口的需要<sup>[7]</sup>, 简化了系统结构。为了增强 CAN 总线节点的抗干扰能力, 实现总线上各节点间的完全电气隔离, MCP2515 和 CAN 收发器 MCP2551 之间使用高速光耦 TLP113 进行光电隔离。同时光耦部分电路所采用的两个电源 VCC 和 VDD 使用 DC-DC 转换器实现完全隔离。CAN 总线接口电路原理图如图 4:

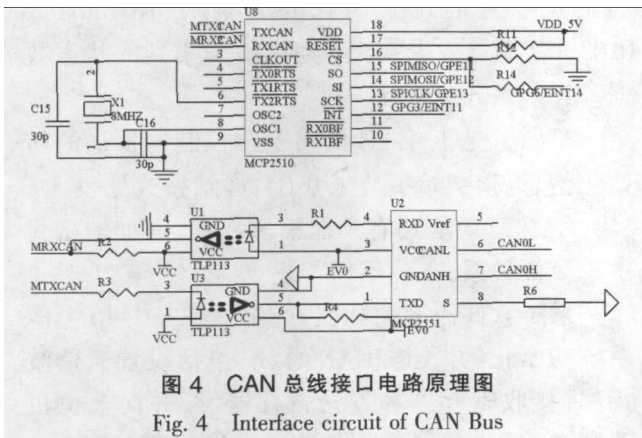


图 4 CAN 总线接口电路原理图  
Fig. 4 Interface circuit of CAN Bus

### 3 安全控制器软件设计

软件设计包含两个部分: 安全控制策略算法和 CAN 总线通讯, 安全控制策略算法部分主要

完成对检测对象的安全规则制定, CAN 总线通讯主要完成安全控制器与机器人控制系统其他部分的信息交互, 主要包括系统初始化信息设置、监测对象数据采集、警报信息交互等。

#### 3.1 安全控制策略

安全控制策略即安全控制器执行规则, 对应不同的机器人工作状态给予不同的安全等级定义, 执行相应的规则。这些规则的制定是在充分综合分析焊接机器人的工作环境、状态、需求等条件, 听取机器人机械工程师、电气工程师、控制算法工程师、操作员工等相关人员的专家意见, 结合所采集机器人工作信号综合总结而出<sup>[4]</sup>。在本系统中, 安全控制策略分为三类: 焊接工作前安全检查规则、焊接工作过程安全策略、焊接结束巡查规则。

##### 3.1.1 焊接工作前安全检查规则

监控机器人工作区域设置的安全设备的工作状态: 对备用电源、控制电源、安全门、安全栅栏<sup>[2]</sup>的状态制定相应的安全策略, 有一项报警则机器人不能开动运行。

##### 3.1.2 焊接工作过程安全策略

监控机器人各组件的工作状态: 确保各关节电机运行状态(速度、转矩)、各关节空间状态正常, 对突发不正常状态制定相应级别的安全策略, 同时修改焊接工作前安全检查规则, 以达到机器人工作中持续监控安全设备的目的。这个过程的安全策略分为三种: 安全运行、警告性策略、运行错误停机策略。

##### 3.1.3 焊接结束巡查规则

对机器人的运行状态和监控过程进行分析综合备份, 同时对备用电源、控制电源、安全门、安全栅栏、运动控制器、伺服放大器、电机状态等再次巡查, 以备下次运作。软件流程图见图 5。

应对安全策略判定的决策输出也有三种形式: 警告性自检、报警停在原位等待处理、错误性立即下电停机。

#### 3.2 CAN 总线通讯

CAN 技术规范包括 CAN2.0A 和 CAN2.0B 两个部分, 独立 CAN 控制器 MCP2515 兼容 CAN2.0A 和 CAN2.0B 两种规范<sup>[3]</sup>。本系统采用了支持 CAN2.0B 的 PeliCAN 模式, 它具有两种不同的帧格式: 标准帧和扩展帧, 为了增加组网的简单性和方便性, 本文采用了标准帧格式, 包含起始场

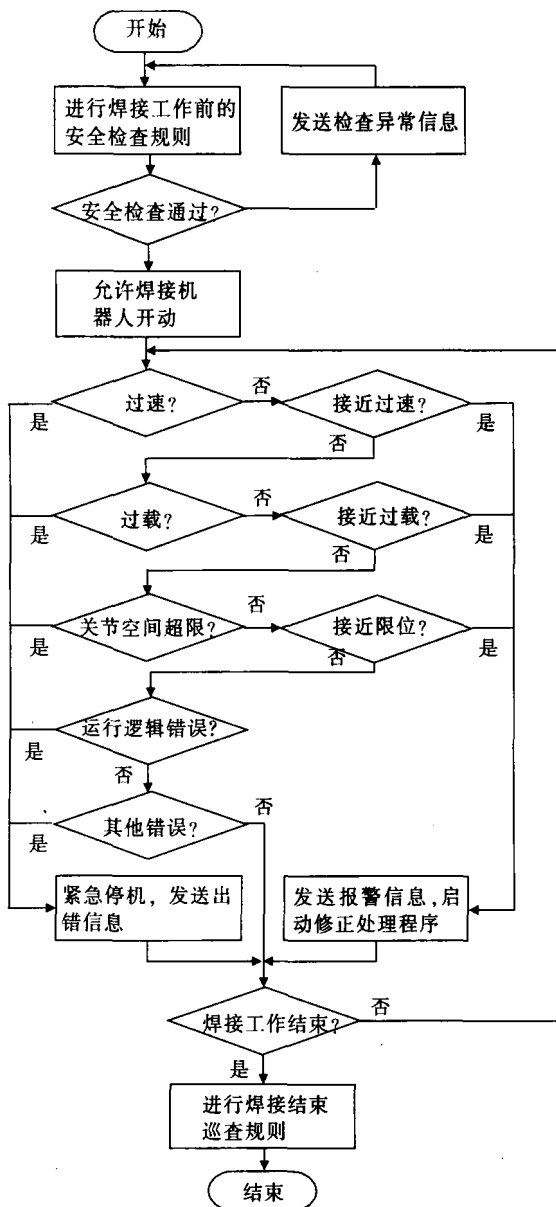


图 5 安全控制策略软件流程图

Fig. 5 Flow chart of security control strategy

SoF, 11 位标识符和 RTR 位组成的仲裁域, 控制域, 数据域, CRC 校验域, 应答域和帧结尾。

本文在通讯协议设计中, 主要是考虑仲裁域的 11 位标识符和数据域的数据位, 控制域的 DLC 设为 8, 表示数据域位数为 8 字节。通信协议的设计分为两部分, 节点 ID 的确定和数据位格式的设计:

(1) 节点 ID 的确定: 机器人控制系统 CAN 网络的各个节点为了区分接收方和发送方, 都要定义其通信 ID, 表 1 详细列出了各节点的 ID。

(2) 数据域格式的设计: 数据是指安全控制器作为 CAN 总线的节点要与其他节点交换的有效分组信息。这包括输入和输出两个方向的信息, 输入方向即读取的信息包括伺服放大器节点

表 1 各节点的 ID 设计

Table 1 ID design of each node

节点	ID
工控 PC 机	0x50F
安全控制器	0x50E
运动控制器 PMAC	0x50D
1-8 轴伺服放大器	0x501~0x508
示教盒	0x50C
安全装置和环境监测	0x50B

的速度、转矩、位置、状态信息, 运动控制器的速度、转矩指令、状态信息, 示教盒的停机命令状态信息, 工控 PC 机的控制命令信息。输出方向的信息包括向工控 PC 机报告机器人运行非正常状态的报警、错误信息。对于这些大量的信息, 在数据帧里对这些信息明确类型, 做好标识, 对于信息的后续处理非常重要。

首先, 是警报信息数据帧, 始字节是 0x01, 警报有三种类型: 接近超速、接近过载、接近限位, 在第二字节分别定义其项目号为 0x01、0x02、0x03, 字节 4~6 未用, 0x10 是结束字节, 具体参照表 2。

其次, 是错误信息的数据帧, 错误信息帧初始字节是 0x02, 错误信息有九种类型, 与警报帧格式相似, 详细信息和项目号见表 3 所示。

第三, 是安全控制器读取总线上的当前机器人信息状态数据帧, 帧开始为 0x03, 当前速度、当前转矩、当前位置的代码分别为 0x01、0x02、0x03, 字节 4、字节 5、6 为当前采集到的状态数据。详细格式见表 4。

第四, 是工控 PC 机向安全控制器发送的初始化信息, 帧初始字节是 0x04, 详细格式见表 5

CAN 总线上还有其他很多数据, 详细帧格式由于篇幅关系, 在此不再赘述。

系统软件流程图如图 6, 首先 S3C2440 上电系统初始化, 并配置 CAN 总线, 包括设置通信波特率、接收寄存器和发送寄存器等, 并向上位机请求初始化数据参数, 完成初始化后进入安全控制器保护阶段。根据上文描述的安全控制策略算法, 分析机器人运行状态, 判定机器人安全等级, 对报警、错误等信息做出不同处理, 并将运行日志保存在 EEPROM 中, 完成焊接机器人安全运行的保护。

表 2 警报信息的数据帧格式

Table 2 Frame format of warning messages

注释	字节 1 数据类型	字节 2 报警项目	字节 3 轴号	字节 4 备用	字节 5 备用	字节 6 备用	字节 7 校验字节	字节 8 结束字节
接近过速	0x01	0x01	0x01~0x08	-	-	-	DATA	0x10
接近过载	0x01	0x02	0x01~0x08	-	-	-	DATA	0x10
接近限位	0x01	0x03	0x01~0x08	-	-	-	DATA	0x10

表 3 错误信息的数据帧格式

Table 3 Frame format of error messages

注释	字节 1 数据类型	字节 2 错误型号	字节 3 轴号	字节 4 备用	字节 5 备用	字节 6 备用	字节 7 校验	字节 8 结束
过速	0x02	0x11	0x01~0x08	-	-	-	DATA	0x10
过载	0x02	0x12	0x01~0x08	-	-	-	DATA	0x10
限位	0x02	0x13	0x01~0x08	-	-	-	DATA	0x10
运动控制逻辑错误	0x02	0x14	0x01~0x08	-	-	-	DATA	0x10
运动控制状态错误	0x02	0x15	0x01~0x08	-	-	-	DATA	0x10
伺服放大器错误	0x02	0x16	0x01~0x08	-	-	-	DATA	0x10
安全防护装置错误	0x02	0x17	-	-	-	-	DATA	0x10
示教盒急停错误	0x02	0x18	-	-	-	-	DATA	0x10

表 4 检测当前信息的数据帧格式

Table 4 Frame format of status messages

注释	字节 1 数据类型	字节 2 项目类	字节 3 轴号	字节 4	字节 5 数据	字节 6	字节 7 校验字节	字节 8 结束字节
当前速度值	0x03	0x01	0x01~0x08		DATA		DATA	0x10
当前转矩值	0x03	0x02	0x01~0x08		DATA		DATA	0x10
当前位置值	0x03	0x03	0x01~0x08		DATA		DATA	0x10

表 5 初始值设定的数据帧格式

Table 5 Frame format of initial value messages

注释	字节 1 数据类型	字节 2 项目类	字节 3 轴号	字节 4	字节 5 数据	字节 6	字节 7 校验字节	字节 8 结束字节
速度限定值	0x04	0x01	0x01~0x08		DATA		DATA	0x10
转矩限定值	0x04	0x02	0x01~0x08		DATA		DATA	0x10
关节角限值	0x04	0x03	0x01~0x08		DATA		DATA	0x10
初始位置值	0x04	0x04	0x01~0x08		DATA		DATA	0x10
时间设定值	0x04	0x05	-		DATA		DATA	0x10

#### 4 系统测试

本文设计的安全控制器应用于昆山 1 号工业焊接机器人, 系统原有数字量 I/O 线 62 根, 模拟量 I/O 线 25 根, 编码器引线 48 根, 示教盒 I/O 线 10 根, 总数为 145 根, 控制柜接线数量多, 维护困难, 并且不同 I/O 线容易引起干扰, 改进原来

传统的设计方案, 引进具有 CAN 现场总线的伺服控制器和运动控制器, 除去控制柜面板的显示和按键所用 I/O 数 11 根, 其他均为两根 CAN 双绞线, 系统走线简单。安全控制器能够很好的根据当前焊接机器人的作业状态判断安全等级, 并执行相应动作, 既提高了生产效率, 又保证了运行安全。CAN 总线的引入使系统的灵活性、实时

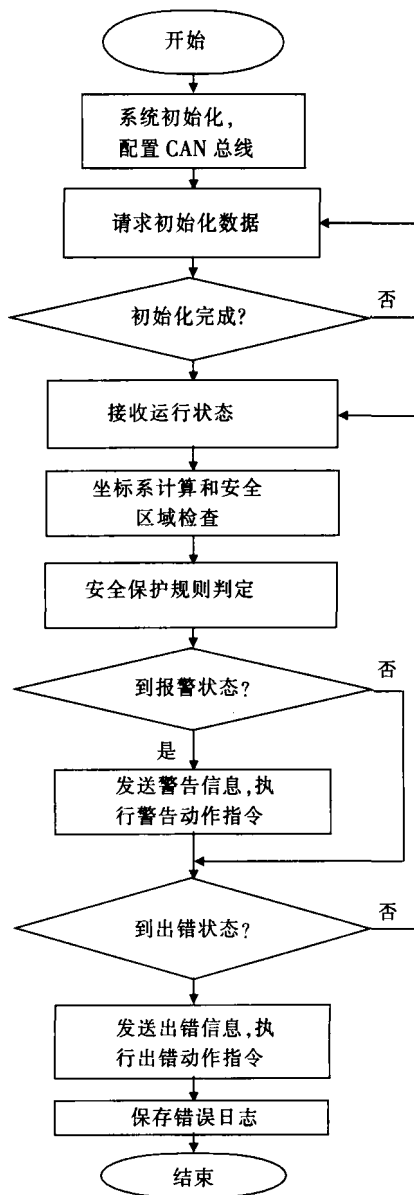


图 6 系统软件设计流程图

Fig. 6 Flow chart of program design

性、稳定性、抗干扰性得到了很大的提高和改善,使得系统更加灵活,系统传输更加可靠,抗干扰能力强,也便于功能的扩展和完善。

#### 参考文献:

- [1] 王黎明, 夏立, 等. CAN 现场总线系统的设计与应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [2] 韦文求, 谢存禧, 张铁, 等. 工业机器人控制系统的开放性与实时性研究 [J]. 现代制造工程, 2007(3).
- [3] 刘升鹏, 叶桦, 王丹. 工业焊接机器人安全控制器的设计与实现 [J]. 工业控制计算机 2009, 22(10): 13-14.
- [4] 李桂芝, 陈细军, 杨国胜, 谭民, 涂序彦. 基于 CAN 总线的自主移动机器人通信系统研究 [J]. 计算机工程与应用. 2004.19: 21-22.
- [5] 蔡自兴. 机器人学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [6] 杨水清, 张剑, 等. ARM 嵌入式 Linux 系统开发技术详解 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [7] 饶运涛, 邹继军, 等. 现场总线 CAN 原理与应用技术 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2007.
- [8] 陈善本, 林涛. 智能化焊接机器人技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [9] Gaskill S P. Safety issues in modern applications of robots [C] // Safety and Reliability of Complex Robotic Systems, IEE Colloquium on, 1994.6.