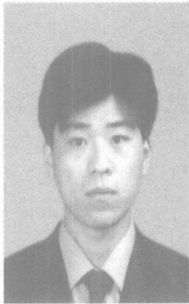


开放式弧焊机器人系统控制软件的开发

张连新, 高洪明, 张广军, 吴 林  
(哈尔滨工业大学, 现代焊接生产技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001)



张连新

**摘 要:** 基于 Visual C++ 开发环境和 PComm32PRO 动态链接库, 采用多文档模板技术和动态菜单技术开发了开放式弧焊机器人系统的控制软件。首先, 分析了作为机器人遥控焊接系统组成部分的焊接机器人的控制软件的功能需求与构成; 然后, 分别开发了作为单独的焊接机器人所需的控制软件模块, 包括运动控制模块、在线指令模块、状态监控模块和运动程序模块四个模块。最后, 通过对开发的机器人控制软件系统的实际应用, 表明开发的各个软件模块的正确性和稳定性, 对机器人控制的有效性, 同时也发现该软件系统对用户的使用非常方便、简单。

**关键词:** PComm32PRO; 软件系统; 机器人控制; 弧焊机器人

**中图分类号:** TG409      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0253-360X(2007)01-025-04

0 序 言

随着人类探索范围的不增大, 焊接技术被广泛的应用到了空间站的建造、深海结构以及核能设备的维修领域中。因此, 机器人遥控焊接技术应运而生, 并且表现出了巨大的应用潜力<sup>[1-3]</sup>。但是目前国内机器人遥控焊接技术还不能实际应用, 因此开发能够实际应用的机器人遥控焊接系统具有非常重要的实际意义和理论价值。实际上, 在机器人遥控焊接系统中, 焊接机器人仍然是最重要、核心的部分。焊接机器人的精度直接决定着能否进行实际的应用, 这在遥控焊接作业中显得更加重要; 焊接机器人的开放性决定着能否连接更多的传感器为该地端的操作者提供更多的现场信息, 也决定着操作手段的多样性。因此, 开发具有较高精度, 良好开放性的焊接机器人是构建机器人遥控焊接系统的基础。控制软件作为焊接机器人系统的重要组成部分, 它决定了系统的功能及使用的方便性等, 故开发软件系统是很重要的。下面详细地介绍以工业控制计算机和 PMAC 运动控制卡为核心的焊接机器人控制系统的软件开发。

人遥控焊接系统, 在系统中, 所有的子系统, 如力觉传感系统等都通过局域网连接起来。要构件这样的一个系统, 首先要有一个能够满足这样需要的开放式焊接机器人, 如能够很好集成各种遥控焊接需要的传感器等。但是考虑到机器人如果能够作为普通的焊接机器人进行其它的应用, 也可以作为机器人遥控焊接系统的组成部分, 将是更好的选择。为此, 以能够满足构建机器人遥控焊接系统的需要为基础, 开发一台开放式机器人系统。基于这样的考虑, 确定了机器人系统的硬件结构, 如图 1 所示。

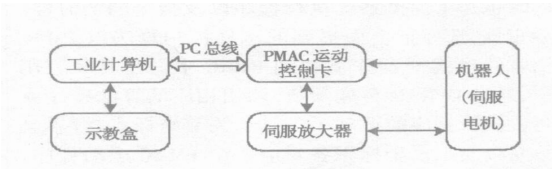


图 1 开放式焊接机器人控制系统硬件结构  
Fig. 1 Hardware structure of open architecture welding robot control system

2 软件设计

根据图 2 所示的系统硬件结构, 以及机器人的实际需要, 基于 Visual C++6.0 开发环境和 DeltaTau 提供的 PComm32PRO 动态链接库进行软件的开发。PComm32PRO 提供了与 PMAC 进行通讯的编程接口。在软件的开发过程中采用了多文档模板和动态

菜单技术, 为用户的操作以及多个功能模块的功能分离提供了方便。根据机器人控制实际需要, 设计了四个功能模块: 运动控制模块、在线指令模块、状态监控模块、运动程序模块。下面将详细地介绍上述四个模块的开发思想与过程。

2.1 运动控制模块的开发

机器人的运动控制模块是机器人控制软件最核心的部分。因为机器人简单来说就是一个运动执行机构, 它最基本的功能就是按照预期精确的执行运动。对于焊接机器人来说, 按照轨迹插补形式来说要求能够完成 PTP、直线和圆弧三种形式的轨迹; 当编写机器人运动程序的时候都需要设定相应的运动形式, 以便机器人在执行程序时能够按照设定的形式执行两个示教点之间的运动。按照控制坐标系来说要实现单关节的运动控制、世界坐标系和工具坐标系下的控制。当操作者用示教盒、空间鼠标等外部操作设备操作机器人运动时, 需要设定运动坐标系, 以便机器人能够按照正确的方式来完成运动。

要实现这些要求的控制形式, 首先就是要建立机器人的运动学模型和轨迹插补算法。采用传统的 DH 方法建立机器人的正运动学模型, 采用几何投影法建立机器人的逆运动学模型; 直线轨迹插补采用驱动矩阵的方法, 圆弧轨迹插补采用扩展的驱动矩阵方式; 这些算法对于六自由度平行四连杆结构的机器人来说都是非常成熟的, 也是最常用的, 故不作详细介绍。

由于在系统中 PMAC 是执行运动控制的核心, 同时也为了提供系统执行程序以及指令的实时性、稳定性, 选择把上面提到的运动控制算法以 PMAC 语言的形式开发并下载到 PMAC 中。在实际应用中, 通过 DPRAM 传递参数, 调用相应的算法程序就可以执行相应的运动了。对于关节坐标系、世界坐标系以及工具坐标系各对应一个 PMAC 运动程序, 参数包括运动速度、运动方向等参数, 通过 DPRAM 传递给相应的  $M$  变量, 在程序中直接使用  $M$  变量, 执行对应的程序就可以实现相应的运动。无论是示教盒、空间鼠标, 还是操纵杆, 只要向设定的变量传递相应的参数, 调用相应的程序, 整个过程是一样。所以不需要对应于每一个设备开发单独的运动程序。在系统中对应于关节坐标系、世界坐标系以及工具坐标系的运动程序分别是 prog60, prog61, prog62。

同理, 对应于 PTP, 直线和圆弧三种轨迹插补方式也分别有一个 PMAC 运动程序 prog130, prog131, prog132。与上面的三个坐标系的切换是一样的, 只

是传递的参数不一样。

上面提到的 PMAC 运动程序是基于 PMAC 语言开发的。PMAC 语言指令比较简单, 用来开发上述的算法难度还是比较大的, 例如在 PMAC 语言中的变量不能由用户定义, 所以进行矩阵的计算非常复杂。尽管如此, 还是通过大量的代码实现了上述的六个算法。具体的实现不再介绍。

2.2 在线指令模块的开发

在线指令模块是机器人最重要的人机接口。操作者可以通过这一模块随时向 PAMC 发送控制指令, 实现对机器人的控制; 同时也可以通过这一模块查询 PMAC 以及机器人各个关节驱动电机的状态; 还有一个重要的作用, 就是对 PAMC 的相关参数进行配置, 包括  $I, P, Q, M$  变量以及坐标系等。

这一模块的基本原理就是基于 PMAC 提供的在线指令, 这些指令很多是标准的计算机键盘组合键, 或者是一串字符, 类似于计算机的 DOS 命令。如: “J2+”, 第二个电机以 I222 设定的速度正方向运动; “CONTROL+P” 则报告所有电机的位置; “?” 报告电机的状态等, 还有很多的指令。这些指令中有的用来对 PMAC 或电机进行状态的修改或控制, 也包括多四种类型变量以及坐标系的配置与修改; 还有一部分用于获取 PMAC 或者电机等的状态。所以开发了一个在线指令模块, 界面如图 2 所示, 类似于 DOS 系统的界面, 通过键盘输入指令。

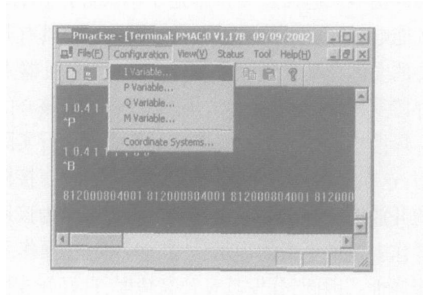


图 2 在线指令模块界面

Fig. 2 Interface of on-line commands module

为了使用的方便与直观, 把四种类型变量以及坐标系的配置与修改的操作也做成菜单的形式。通过弹出对话框的方式进行修改非常方便, 图 3 所示为  $I$  变量、 $P$  变量以及坐标系配置对话框, 其中  $Q$  变量配置对话框与  $P$  变量相似,  $M$  变量的配置对话框与  $I$  变量相似。通过这个模块还可以直接执行 PMAC 中的 PMAC 程序以及 PLC 程序。这是人机交互的最重要的部分, 其它很多功能都可以通过在线指令来实现。

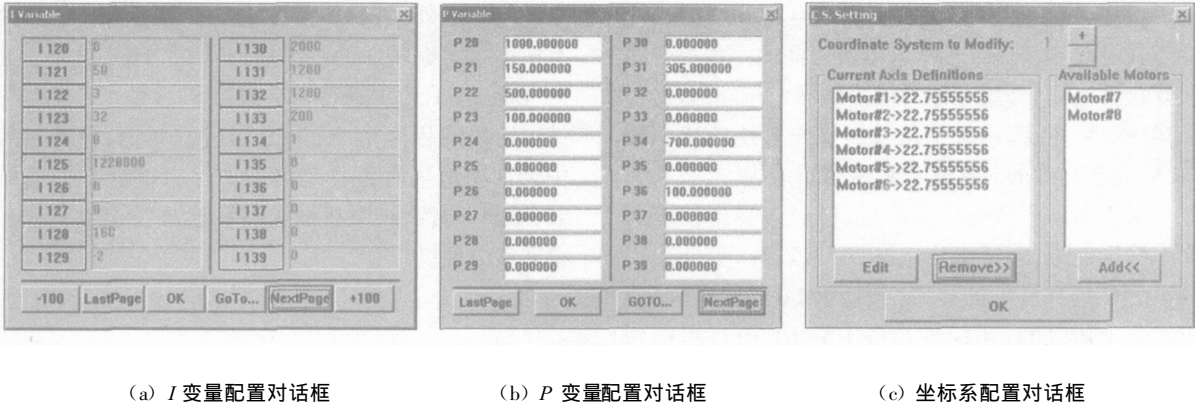


图 3 变量与坐标系配置对话框

Fig. 3 Variables and coordinates configuring dialogs

2.3 状态监控模块的开发

状态监控模块用来实时地显示机器人各个关节的实际位置与运行速度,如图 4 所示。这个模块的开发是根据 PMAC 的双端口 RAM 提供的实时固定数据缓冲功能来实现的。这个功能就是 PMAC 用固定的数据结构不断地更新 DPR 中的一个特定的区域。这个数据中包括有用的电机信息和能够被主应用程序访问的数据,如电机的位置、速度等。根据这样的一个功能,可以采用 PComm32 提供的接口函数 PmacDPRPosition() 和 PmacDPRGetVel() 来获取各个电机的位置与速度,以一定的周期更新与显示就可以把这些信息呈现给操作者了。但是通过这两个函数直接得到的数据并不是希望看到的各个关节的角度以及以角度/秒为单位的数值。对于位置,获取的数据相当于电机转动在光电编码器上产生的脉冲数。所以,对应的机器人关节转过的角度  $\theta_i$  可以表示为

$$\theta_i = \frac{P_c \times 360}{8\,192 \times R}$$

式中:  $P_c$  为通过函数读取到的数值;  $R$  为该关节的减速比。

脉冲数的  $I \times 09 \times 32$  倍。所以要得到电机的实际速度,要做两件事情: (1) 求出电机的伺服周期并把单位转化为秒; (2) 把读取的速度数据转换为角度/伺服周期。对于每一个电机来说,伺服周期可以表示为

$$t = (I \times 60 + 1) \times I10 / 8\,388\,608 (x = 1, 2, \dots, 6)$$

读取得到的数据变换的角度值  $\theta_i$  以及最终的关节速度  $v_j$  可分别表示为

$$v_j = \frac{\theta_i}{t} = \frac{v_c \times 360 \times 8\,388\,608}{I \times 09 \times 8\,192 \times R \times I10 \times (I \times 60 + 1)}$$

式中:  $v_c$  为读取到的速度数据;  $R$  为关节减速比;  $\theta_i$  为用角度表示的读取得到的数据;  $v_j$  为用单位 ( $^\circ$ )/s 表示的机器人关节速度。

经过上面的两部分的计算就可以把机器人各个关节的位置和速度直观地显示在用户面前。

2.4 运动程序模块的开发

弧焊机器人一般是通过执行机器人运动程序和操作设备(如示教编程器)发送的运动指令两种方式产生运动的。而执行操作设备发送的运动指令一般用于机器人的示教过程; 执行运动程序主要用于完成实际的焊接任务,这也是比较主要的运动形式。因此,只有具备了合适的运动程序的编辑器以及运动程序编辑语言才能够编写机器人运动程序。运动程序模块就是用来解决这个问题的,因此具有非常重要的意义。

对于运动程序编辑语言,机器人系统主要采用 PMAC 编程语言和自主开发的混合式弧焊机器人语言(HAWRL)两种方式。这是因为开发的机器人控制系统以 PMAC 和工业计算机为核心,并且 PMAC 提供了编程语言,用这种语言来编写基本的机器人的运动控制程序,才能够使机器人执行相应的运动。另外,也有时候需要应用这种语言来编写一些简单

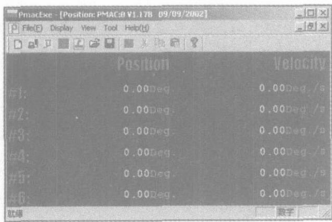


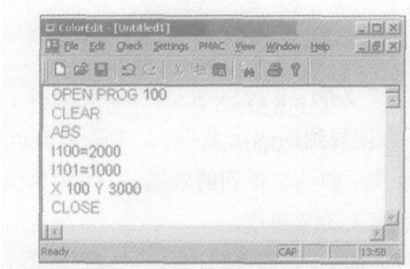
图 4 状态监控模块界面

Fig. 4 Interface of status-supervising module

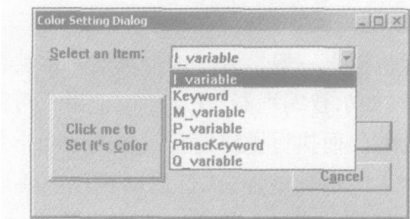
各个关节速度的计算就复杂一些了。通过函数读取到的数值表示 PMAC 每个伺服周期中电机转过

的焊接任务程序。对于 HAWRL 是自主开发的一种介于任务级和动作级机器人语言之间的一种混合式弧焊机器人语言, 用它作为焊接机器人与外部设备, 如离线编程系统、示教盒以及遥操作系统的统一接口, 它具有高效的焊接任务程序编辑能力<sup>[4]</sup>。

对于运动程序编辑器来说, 就应该具备基本的文本编辑能力, 能够编辑上述两种语言。另外还要和 PMAC 具有良好的接口, 包括 PMAC 语言程序的下载与上传, 同时还应该具备 HAWRL 语言程序到 PMAC 语言程序的编译转换功能并下载的功能。对于这样的要求, 并没有现成的编辑器能够满足要求。为此, 开发了具备上述功能的运动程序编辑器, 界面如图 5a 所示。这个编辑器具备基本的文本编辑功能, 包括复制、粘贴、查找、替换、删除、选择等功能。同时, 为了提高机器人运动程序编辑的正确性, 又开发了语法显示、自动纠正以及字体设置的功能。有了这一功能, 可以最大程度地帮助编程人员提供编程的效率和正确性。这里面的关键词包括 PMAC 语言的四种变量、编程关键词、HAWRL 里面的关键词等, 如图 5b 所示。



(a) 运动程序编辑器



(b) 语法高亮显示设置对话框

图 5 运动程序编辑器

Fig. 5 Motion programs editor

除此之外, 另一个重要的功能就是与 PMAC 的有机连接。编辑好的程序可以通过“File”菜单下面的“Download”选项进行下载设置和下载。如果程序编辑区里的程序是 HAWRL 语言编写的, 下载过程中会自动地进行编译与转换<sup>[5]</sup>。有了这样的编辑器, 编辑、修改、查看机器人各种形式的运动程序变得非常方便。

3 结 论

- (1) 基于多文档模板和动态菜单技术开发了既能够应用于遥控焊接的也能够单独应用的, 开放式弧焊机器人控制软件系统。
- (2) 机器人的实际引用表明该软件系统能够有效、可靠地实现机器人的控制, 同时对用户的使用也非常方便, 包括系统的配置以及控制操作。同时也证明了各个软件模块的正确性, 尤其是焊枪标定模块和程序编辑模块的效率非常高, 使用非常方便。

参考文献:

[ 1 ] Hou M, Yeo S H, Wu L, *et al.* Teleoperation characteristics and human response factor in relation to a robotic welding system[ C] //Proceedings of IEEE IROS Osaka, Japan, 1996

[ 2 ] Agapakis J E. Fundamental and advances in the development of remote welding fabrication system[ J] . Welding Journal, 1986, 65(9): 21— 34.

[ 3 ] 吕伟新, 张 炯, 樊滨温, 等. 面向空间应用的主从与自主式要操作系统研究[ J] . 高技术通讯, 1997(1): 27— 30.

[ 4 ] 张连新, 高洪明, 吴 林, 等. 混合式弧焊机器人编程语言[ J] . 焊接学报, 2006, 27(7): 103— 107.

[ 5 ] 张连接, 高洪明, 吴 林, 等. 混合式弧焊机器人语言编译解释系统[ J] . 焊接学报, 2006, 27(10): 101— 104.

作者简介: 张连新 男, 1978 年出生, 博士研究生。研究方向为工业机器人控制、机器人焊接技术、焊接自动化与智能化等, 发表论论文 9 篇。

Email: lianxinzhang @hit. edu. cn

HX-1000 microhardness tester, and the constitution of the front face and cross section of the coating are analyzed by energy spectrum analysis. The results show that it is a close and homogeneous coating, and the bonding between the coating and the matrix is mechanical and metallurgical. The microhardness is 946.1 018 HV<sub>25</sub>, and the crystallization temperature is 433 °C.

**Key words:** bar material; plasma spraying; amorphous alloy; forming characters

#### **Transient liquid phase diffusion bonding of Cu-Ni alloy/mild steel composite pipe**

LIU Shi-cheng, CHEN Ru-shu, LIU De-yi (College of Materials Science and Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, Liaoning, China). p21—24

**Abstract:** Composition, microstructure and performance of the TLP diffusion bonding zone of B10 Cu-Ni alloy/low carbon steel using H62 brass interlayer were examined by means of SEM and OM, EDX analysis, microhardness test, shear test and alternating bend test. Sound bonding was obtained between the two dissimilar materials at 950-1 000 °C for 0.5-2 h. At the brass/cupro-nickel interface, and composition changed gradually, and grains grew continuously, and no remarkable hardness change was detected. On the other hand, significant variation of composition was observed at the steel/brass interface. Pearlite-rich band was found parallel to the bonding line in the region of steel adjacent to the interface. As the time and/or temperature increased, iron-rich microstructure with higher hardness, resulting in a decrease of plasticity of the interface, was observed.

**Key words:** Cu-Ni alloy/steel composite pipe; transient liquid phase diffusion bonding; brass interlayer; interface; bonding strength

#### **Development of control software for open architecture arc welding robot**

ZHANG Lian-xin, GAN Hong-ming, ZHANG Guang-jun, WU Lin (State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China). p25—28

**Abstract:** Based on Visual C++ development environment and PComm32PRO DLL, the control software for open architecture arc welding robot is developed using multi-document templates and dynamic menus. Firstly, the functions and components of control software are analyzed. And then the control software modules required by single arc welding robot are developed separately, including motion control module, on-line commands module, status supervising module and motion programs module. The practice application of the software proved that all developed software module are correct, steady, and efficiency for robot control, also showed that the software is convenient and easy to use.

**Key words:** PComm32PRO; software system; robot control; arc welding robot

#### **Weld appearances and mechanical properties of friction stir welded joint of Al alloy and mild steel**

XING Li, KE Li-ming, HAUNG Chun-ping (Nanchang Institute of Aeronautical Technology, Nanchang 330034, China). p29—32

**Abstract:** Dissimilar materials, aluminum alloy and mild steel, were joined by friction stir welding, and the weld appearance and mechanical properties of joint were analyzed. The results shown that a deformation-free joint with good weld surface appearance can be obtained with suitable welding conditions for butt-joint and lap-joint of the dissimilar materials. For the butt joint, the mild steel and aluminum alloy were mixed well within the weld cross section, and the two kind of materials was intercalated on the middle plane parallel to the weld surface. The microhardness is higher than the mild steel at local place within weld nugget, which perhaps is the formation of intermetallic compound at these points. The joint is fractured from the edge of the nugget at the steel side for the butt-joint. For the lap-joint, the cross section appearance at the weld is somewhat like pincers or hook, that is, the steel is riveting into the aluminum alloy with a curved shape. The two kind of materials could reach plastic joining and the joint have a rather good shear properties.

**Key words:** friction stir welding; aluminum alloy; mild steel; weld appearance; joint properties

#### **Effects of Sn-Cu-Ni-Ce solder on mechanical properties of micro-joints soldered with diode-laser soldering system**

HAN Zong-jie, XUE Song-bai, WANG Jian-xin, WANG Shao-bo (College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China). p33—36

**Abstract:** The properties of micro-joints of two kinds of components/devices QFP48 and rectangular chip component 0805 were studied with Sn-Cu-Ni-Ce lead-free solder by means of diode-laser soldering system and infrared reflow soldering method. Reflow soldering method, and the distribution regulations of the mechanical properties of quad flat packaging and rectangular chip component soldered with different compositional solders were tested and analyzed by STR-1000 micro-joints tester. The results indicate that optimal laser output current while soldering with Sn-Cu-Ni-Ce solder is obviously larger than that of soldering with Sn-Ag-Cu solder or Sn-Pb solder respectively. The mechanical properties of micro-joints soldered with laser soldering system is notably larger than that of micro-joints soldered with IR reflow soldering method. Adding rare earth element Ce to Sn-Cu-Ni lead-free solder is able to improve the mechanical properties of the micro-joints which the mechanical properties of micro-joints is the best when the content of Ce is about 0.03wt. %.

**Key words:** Sn-Cu-Ni-Ce solder; lead-free solder; laser soldering; mechanical properties

#### **Measuring and three dimensional finite element numerical simulation of residual stress of high frequency electric resistance welded pipe**

LIU Wei, ZHANG Yu-Feng, HUO Li-Xing,