

高精度数控焊接变位机控制系统设计与实现

石 瑞 樊 丁 王 政

(甘肃工业大学 甘肃省有色金属新材料省部共建国家重点实验室, 兰州 730050)

摘要: 研制弧焊机器人用数控焊接变位机对弧焊机器人柔性加工单元(WEMC)的设计具有重要的意义。作者以基于数字信号处理器(DSP)的研华多轴运动控制卡PCL-832卡为设计核心, 采用基于模糊规则的智能双模协调控制器, 即采用比例积分微分控制器(PID)和模糊控制器的加权合成算法, 控制过程中模糊控制器和PID控制器同时输出控制量, 当控制误差较大时模糊控制器的输出权重较大, 而当控制误差较小时PID控制器的输出权重较大, 有效避免了变结构控制器切换过程中的震荡, 实现了焊接变位机的高精度位置控制。作者对实时控制软件的结构设计和实时性要求进行了详细的理论分析, 提出了基于DOS(Disk operation system)系统下的高精度数控焊接变位机多任务实时控制软件的设计与实现方法。进行了多种工件的焊接试验, 试验表明该控制系统工作可靠, 效果良好。

关键词: 数控焊接变位机; 智能双模控制器; 实时多任务控制系统; 弧焊机器人

中图分类号: TG431 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2003)04-21-04



石 瑞

0 序 言

近年来, 为了适应快速变化的市场需求, 生产商频繁地更换产品的品种和批量, 这就对生产设备的自动化程度和柔性化程度提出了很高的要求。弧焊机器人柔性加工单元正是一种具有柔性化特点的高度自动化焊接设备。它不仅能提高焊接生产率、产品的焊接质量和可靠性、加工柔性和制造精度, 而且还能改善工人的劳动环境, 降低劳动强度, 提高经济效益^[1]。

目前, 我国研制的焊接机器人尚未产业化, 焊接柔性加工单元技术尚处于探索阶段, 国内生产、应用主要靠全套引进。弧焊机器人在国外已经批量化, 价格相对较低, 而与机器人相配套的数控变位系统却因加工对象而异, 多属单件生产, 因此价格往往是机器人本身价格的3~7倍。作者的研究目的是在进口弧焊机器人的基础上, 再根据特定产品, 自行研制焊接变位机等机器人的外围设备及控制系统, 可以节约大量外汇, 实现低成本焊接自动化。高精度数控焊接变位机控制系统必须具有合理的体系结构、较强的数据运算和处理能力、良好的信息融合控制功能, 以及开放的软硬件接口。

1 系统的硬件组成

根据设计要求, 变位机载重500kg, 能在两旋转轴所确定的空间旋转并可在任意位置定位, 且要保持速度均匀, 这就要求对电机实行速度和位置控制。作者选用了交流伺服控制系统, 并采用工业控制计算机作为核心, 应用全闭环控制方案, 保证在恶劣条件下系统的控制精度与工作可靠性。图1为控制系统的硬件结构框图。

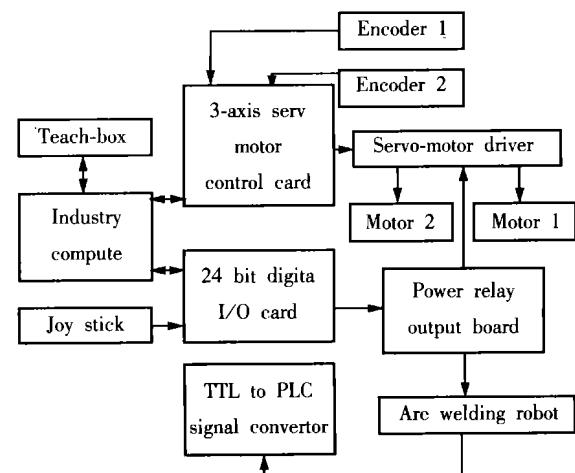


图1 系统硬件框图

Fig. 1 System construction of hardware

2 控制结构及算法

2.1 控制结构

按伺服系统的反馈控制方式来分, 可分为开环

控制、半闭环控制和全闭环控制三种方式。由于全闭环结构的位置检测元件安装于主轴上, 理论上可以消除机械传动误差如齿轮间隙等引起的控制误差, 可以获得很高的到位精度, 因此数控焊接变位机控制系统采用全闭环控制方案。

2.2 智能双模控制算法^[2,3]

在数控焊接变位机的位置控制中, 由于系统传动链中有的运动副如齿轮等存在间隙或失动量, 使得变位机的位移与指令之间出现非线性关系。同时当变位机工作台倾斜运动时, 由于工件及工作台的重心高及偏心矩不断变化, 造成电机的输出转矩不断改变, 而且焊接工件的形状及重量多变, 使得变位机的控制存在严重的非线性; 再加上交流电机是一个高阶次、强耦合、参数时变的非线性控制对象, 尤其是调速方式更增加了其动态过程的复杂性。因此, 被控的交流伺服驱动系统具有很复杂的多重非线性关系, 难以建立起准确的数学模型。

传统的比例积分微分控制器(PID)智能化程度不高, 其参数整定后就不再改变, 自适应能力差, 对于高度非线性、时变的系统不能满足控制要求, 但 PID 控制器在小偏差范围内有较高的控制精度。模糊控制是一种模仿人类思维方式的智能控制算法, 它不需要被控对象的精确模型, 对非线性系统有很好的适应能力, 但是由于缺少积分环节, 稳态静差难以消除。结合二者优点, 作者采用了加权合成算法的智能双模模糊—PID 控制器。

控制过程中, 采用 Fuzzy—PID 型的变结构控制, 或者采用其它类型的多控制器变结构控制时, 对确定的系统, 适当选取切换点可以解决变结构控制问题, 但切换点的选取有时并不准确, 而且不同控制器之间的切换, 容易导致控制量的突变。常规的变结构控制是一个非 0 即 1 的精确选择, 但实际上, 不同控制器在不同误差域都是有一定效果的, 差别仅在于控制性能的好坏而已, 因此绝对地选择控制器将会丢失有用的控制信息。针对上述缺点, 采用基于模糊规则的多控制器协调控制, 控制器结构如图 2 所示。

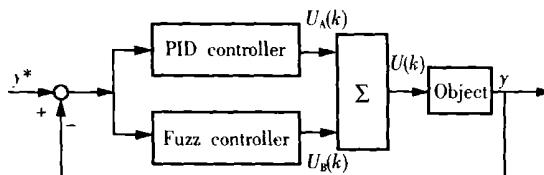


图 2 双模控制器结构

Fig. 2 Construction of two-mode coordinating controller

把 PID 控制器称为 A, 模糊控制器称为 B, 把误差大小依次分成七个等级 $E = \{6, 5, 4, 3, 2, 1, 0\}$ 。采用如下控制规则, 当误差很大时, 完全由 B 控制; 当误差很小时, 完全由 A 控制; 误差较大时, B 控制作用强, A 作用弱; 误差较小时, A 控制作用强, B 作用弱。把总的控制作用最后通过对两个控制器的加权合成来得到。

用正态型模糊变量来描述模糊概念, 因纯正态函数是凸型函数, 不满足单调递升或单调递减的需要, 采取由正态函数变化而来的 S 型函数。其表达式如下

$$\mu_B(x) = \begin{cases} \frac{1-e^{-\alpha x}}{1+e^{-\alpha x}}, & 0 \leq x \leq 6; \\ 1, & x \geq 6; \end{cases} \quad (1)$$

$$\mu_A(x) = 1 - \mu_B(x).$$

将所确定的隶属函数在误差论域点离散化, 取 $\alpha=0.4$, 则不同误差域控制器的作用强度如表 1 所示。

表 1 两控制器的加权值

Table 1 Weight value of each controller

E	6	5	4	3	2	1	0
A	0	0.16	0.33	0.46	0.62	0.80	1
B	1	0.84	0.67	0.54	0.38	0.20	0

这样, 系统控制作用就由 PID 控制器 $U_A(k)$ 和模糊控制器 $U_B(k)$ 共同决定。即

$$U(k) = \mu_A(x) U_A(k) + \mu_B(x) U_B(k). \quad (2)$$

3 控制系统软件结构

3.1 实时控制软件结构

数控焊接变位机控制软件主要由初始化模块、通讯模块、错误处理模块、I/O 控制模块、显示模块、示教模块、编辑和文件处理模块、指令解释模块、双模控制计算模块、插补计算和伺服电机控制模块等组成。这些不同的模块代表不同的工作任务, 它们按工作性质可以分为两类, 实时任务模块和非实时任务模块^[4]。对于实时任务, 根据处理任务的轻重缓急及重要程度, 将其划分成不同的优先级。

在传统的单任务机制下, 控制程序采用循环方式, 各功能模块按固定顺序构成一个整体, 作为一个任务得到执行。而在实际应用中, 各个模块要求的执行频率往往不一致, 系统这种复杂的分时控制要求在单任务机制下难以满足。

考虑到弧焊机器人用数控焊接变位机的实时任务可以分解为若干相对独立的模块, 且可以将这些

模块理解为子任务，并引进多任务机制进行管理。在这种结构下，各功能模块由系统调度程序启动执行完毕后返回系统调度程序，彼此处于等同地位，其执行顺序也比较灵活，且可在程序运行过程中动态地改变执行结构。各子任务的执行频率要求表现为它们的优先级，优先级越高的子任务单位时间内执行次数越多，从而其执行频率越高。各子任务在自己的时间片内运行，通过合理设计时间片大小和各任务的优先级，可以满足系统内各种复杂的定时要求。

3.2 各实时任务模块执行频率的选取

系统运行时实时任务处理线程由高精度实时定时器周期性触发，在该处理周期内闭环系统实际上运行在开环状态，此时对反馈信号不能做出反映。因此，系统实时性优劣取决于各实时任务执行频率的大小。该执行频率越高，系统实时性越好。各实时任务执行频率的选取不是任意的，它与各个控制任务所必需的执行时间有关，此外，各任务执行频率的选取还必须满足一定的同步条件^[5]。各实时任务的执行频率应该根据其优先级和最坏情形下的运行时间来选取，紧急控制任务应具有最高的优先级，各个实时模块的频率分配如图3所示。

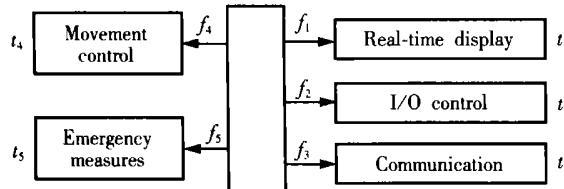


图3 实时模块的频率分配

Fig. 3 Real-time modules run frequency assigning

根据各线程实时性的高低，其频率有

$$f_1 < f_2 < f_3 < f_4 < f_5. \quad (3)$$

执行每个任务所用的时间片 t_1, t_2, t_3, t_4, t_5 对应于每种线程在最坏情形下的实际执行时间（可据实际程序和执行情况大致估算）。它们显然要满足下列条件

$$t_i < 1/f_i, \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5). \quad (4)$$

既然所有的任务均由一个中心处理器(CPU)执行，那么还必须满足下列附加条件

$$t_1 + t_2(f_2/f_1) + t_3(f_3/f_1) + t_4(f_4/f_1) < 1/f_1. \quad (5)$$

即在 $1/f_1$ 的时间内，动态显示任务执行1次，通讯和I/O任务执行 f_2/f_1 和 f_3/f_1 次，数字微分分析(DDA)插补和伺服控制任务执行 f_4/f_1 次，紧急处理任务执行 f_5/f_1 次，式(5)也可写成

$$t_5f_5 + t_4f_4 + t_3f_3 + t_2f_2 + t_1f_1 < 1. \quad (6)$$

由于各任务模块程序的具体执行时间不好估算，由试验确定是否满足式(6)。

4 试验结果

4.1 双模控制器仿真控制结果

为了检验双模控制器的控制效果，对其进行了仿真试验，作为对照，把经典PID控制、模糊控制和双模协调控制都集中在一起，便于比较。图4是系统阶跃响应曲线的仿真结果。

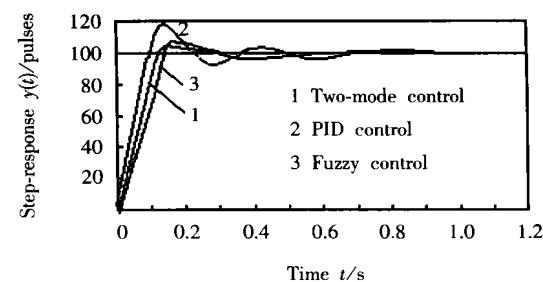


图4 阶跃响应数字仿真曲线

Fig. 4 Step-response curve

从图4中可以看出，PID控制有几次超调，随着输入频率的增大，超调量也增大，且过渡时间较长，导致指令在稍有变化后，响应不能及时跟踪指令的变化，控制精度低。模糊控制响应快，但稳态精度低。只有双模协调控制既超调很小，又达到很高的稳态精度，控制效果好。

从计算机仿真的结论来看，文中提出的方法能有效地协调系统的动静态特性之间的矛盾，满足了系统对位置控制的要求。

4.2 位置控制的试验结果

图5为位置误差测试曲线。误差通过检测光电编码器位置反馈与给定量的差值得到。光电编码器选用25 000个脉冲/转，经4倍频后达100 000个脉冲/转。从三条误差曲线可看出，其共同趋势是在指令突变时，误差曲线也变化剧烈，容易产生振荡。不同的是，模糊控制误差曲线突变大，但能很快进入稳定；PID控制突变不如模糊控制明显，但需要多次反复才可稳定下来；而双模协调控制误差曲线则规则得多，突变不明显，最后实际静差在±5个脉冲范围内变化。由此可知其理论位置控制。

相对误差为 $5/100\ 000 = 0.005\%$ (变位机运行在 360° 以内)。

绝对误差为 $5 \times 3.14 \times 1\ 000 / 100\ 000 = 0.157\text{ mm}$ (工作台边缘，工作台直径为1 000 mm)。

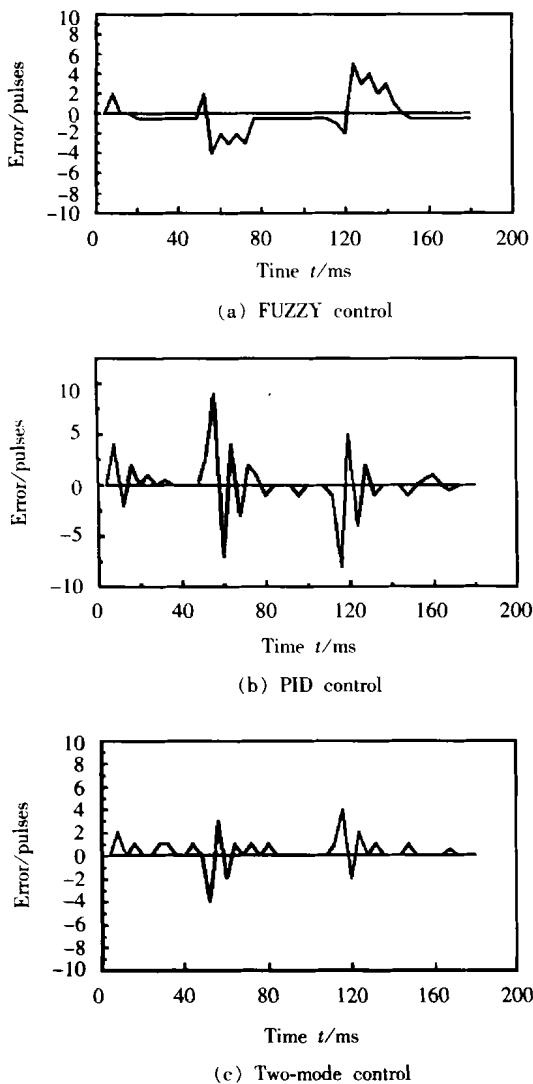


图 5 位置误差测试曲线

Fig. 5 Error curve of position control

同时为了验证整个控制系统的控制精度和可靠性, 对典型焊件进行了多次焊接试验, 结果证明该系统满足与机器人配合工作的位置控制和速度控制精

[上接第 20 页]

- [2] Zhao D B, Chen S B, Wu L. Surface height and geometry parameters for describing shape of weld pool during pulsed GTWA[J]. Proceedings of Spie-the International Society for Optical Engineering, 1999, 38(3): 91~98.
- [3] 黄石生. 焊接过程的神经网络建模及控制的研究[J]. 机械工程学报, 1994, 30(3): 24~29.
- [4] 王建军, 林 涛, 陈善本. 铝合金交流钨极氩弧焊熔池图像传感方法[J]. 上海交通大学学报, 2002, 36(1): 5~8.
- [5] 王建军, 林 涛, 陈善本. 铝合金 TIG 焊熔池正面图像模式识别[J]. 焊接学报, 2002, 23(5): 73~76.

度要求。

5 结 论

(1) 作者所设计的双模智能控制器, 既利用了模糊控制在误差较大时调节快的优点, 又利用了传统 PID 控制在误差小时的调节精度高的优势, 提高了高精度数控焊接变位机控制系统的响应速度和定位精度。

(2) 控制系统引入多任务机制, 可以有效地改善程序结构, 提高系统的实时性, 满足复杂系统的控制要求。

(3) 所设计的高精度数控焊接变位机控制系统, 软硬件结构合理, 运行可靠, 精度高, 在应用中获得了良好的效果。

参考文献:

- [1] 林尚扬, 陈善本, 李成桐. 焊接机器人及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000. 212~221.
- [2] 樊 丁, 姚洪杰, 王 政, 等. 数控焊接变位机双模控制器的试验分析[J]. 甘肃工业大学学报, 1999, 25(3): 6~11.
- [3] Fan Ding Zhou Wankun, Tan Weiming. Tow-mode intelligent co-ordinating control of position for the welding positioner[J]. China Welding, 1998, 7(1): 47~52.
- [4] 张云生. 实时控制系统软件设计原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [5] 石 霖, 樊 丁, 黄 勇, 等. 基于 DOS 系统的实时多任务控制软件设计方法研究[J]. 甘肃工业大学学报 2001, 27(4): 1~4.

作者简介: 石 霖 男 1973 年 3 月出生, 讲师, 博士研究生。研究方向为人工智能、机电一体化和弧焊过程控制。参加或主持省部级及国家自然科学基金项目 4 项, 发表论文 20 余篇。

Email: shiy@gstu.edu.cn

- [6] Choo R T C. Modeling of high-current arcs with emphasis on free surface phenomena in the weld pool[J]. Welding Journal, 1990, 69(9): 346~361.
- [7] Xiao Y H, Ouden G. A study of GTA weld pool oscillation [J]. Welding Journal, 1990, 69(8): 289~293.
- [8] 韩曾晋. 自适应控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 1987. 100~109.

作者简介: 王建军, 男, 1971 年出生, 博士研究生。主要从事焊接过程智能控制的研究, 发表论文 10 篇。

Email: wangjj@mail.sjtu.edu.cn