

# 基于 PLC 的马鞍型焊接机自动控制系统<sup>①</sup>

李文江<sup>1</sup>, 郑晓琳<sup>1</sup>, 孙 宏<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(辽宁工程技术大学 电气与控制学院, 葫芦岛 125105)

<sup>2</sup>(沈阳金科精密仪器设备有限公司, 沈阳 110000)

**摘要:** 马鞍型曲线焊接在工业生产中使用广泛, 目前常用的插补算法不能适用于其自动焊接. 基于三菱 PLC 控制器 Q02HCPU, 通过对插补算法设计原则的研究, 在马鞍型空间几何特性基础上, 提出了基于逐点比较和角度逼近的直接插补算法, 并通过 MATLAB 软件进行仿真实验. 实验表明, 该算法插补精度高, 软件编程易于实现, 提高了马鞍型焊接生产的自动化程度.

**关键词:** 焊接; PLC; 马鞍型; 自动控制; 插补算法

## Saddle Type Welding Machine Automatic Control System Based on PLC

LI Wen-Jiang<sup>1</sup>, ZHENG Xiao-Lin<sup>1</sup>, SUN Hong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

<sup>2</sup>(Shenyang Jinke Precision Equipment Co. Ltd, Shenyang 110000, China)

**Abstract:** Saddle shaped curve in the industrial production is widely used in the welding, and the traditional interpolation algorithms cannot be applied to the automatic welding. In this paper, based on the Mitsubishi PLC controller Q02HCPU and the interpolation algorithm principle of design research, the saddle-shaped geometry characteristic foundation, proposed based on point by point comparison and angle approximation of direct interpolation algorithm, and through MATLAB software simulation. The experimental results show that the algorithm has high precision in interpolation, and make software programming easily to realize, to improve the saddle shaped welding production automation.

**Key words:** welding; PLC; saddle type; automatic control; interpolation algorithm

随着开放式数控技术的发展, 以及 PLC 和 PC 工控机等在焊接领域中的使用, 我国目前的焊接自动化水平, 对于像马鞍型这样复杂的空间曲线焊缝, 一般还是采用手工的方式进行焊接. 国内也有某些单位利用机械凸轮仿形原理或利用 PLC 控制技术开发复杂空间曲线焊缝的自动焊接控制系统. 但利用机械凸轮仿形开发的控制系统自动化水平比较低、在实际运行时焊接效率低. 开发复杂空间曲线系统的稳定性比较差. 国外大多采用弧焊机器人来焊接大直径马鞍型焊缝, 但这些机器人价格非常昂贵, 同时对零部件的备料, 要求综合尺寸精度高、形位公差小, 往往由于几个尺寸不合格就使得焊枪偏离焊缝, 严重影响了焊缝的内

部和外部质量. 纵观当今世界自动化焊接设备的发展趋势, 可以概括为如下几个特点: (1)采用高效的焊接方法, (2)自适应全数字控制, (3)智能化和焊接工艺参数的优化, (4)管控一体化, (5)柔性化<sup>[1]</sup>. 因此, 本文采用插补运算方法开发了针对空间马鞍型曲线焊缝的焊接系统, 保证焊接线速度恒定, 取代用机械差动机构模拟实现空间曲线运动的方法, 使得焊枪运动轨迹更加准确, 机械结构变得简单. 本控制系统最大特点在于用运动控制方式. 可以在焊接过程中对焊接工艺参数(焊接电流、焊接电压、焊接速度)进行微调, 可以根据工艺要求实时调整回转半径和焊枪高度, 设备可根据调整后的轨迹运转. 控制系统提供了友好的人机交

① 收稿时间:2012-02-28;收到修改稿时间:2012-04-02

互界面, 用户可以根据工艺要求分段设定工艺参数, 包括焊接电流、焊接电压、焊接速度以及焊接层数。

### 1 马鞍型焊接机自动化系统原理

在焊接结构的实际生产中, 特别在输油、输气、锅炉、压力容器、化工容器、核电站设备焊接结构的制造中, 经常会碰到管与管“横接”的实例<sup>[2]</sup>。从几何的角度看, 一个直径较小圆管即子管与一个直径较大圆管即母管相互垂直相贯时, 其相贯线像马鞍的形状。在焊接实际生产中, 如果工件接口焊缝的形状像马鞍就习惯称其为“马鞍型”焊缝。马鞍型焊缝主要有正交、斜交、偏心交等几种形式<sup>[3]</sup>, 本文以典型的正交马鞍型焊缝为主分析马鞍型曲线自动焊接数控系统。

马鞍型自动焊接系统的执行系统主要包括回转机构、升降机构、径向机构、摆动机构。马鞍型曲线焊缝是空间曲线焊缝, 通过三个轴联动来实现拟合; 考虑到其垂直投影为圆形, 所以两个轴的联动可以用一个回转轴来代替。在实际马鞍型曲线焊缝的焊接中, 需要回转机构、升降机构和摆动机构实现四轴联动, 来完成焊接过程, 其结构如图 1 所示。

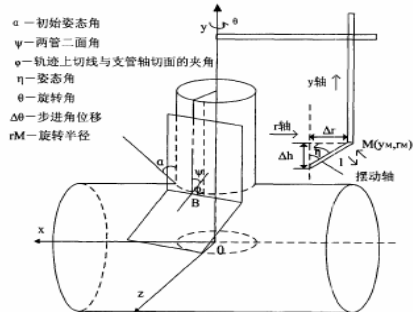


图 1 四轴联动结构示意图

### 2 马鞍型曲线的插补算法

#### 2.1 马鞍型曲线焊枪位姿数控系统的插补算法

数控技术的核心是曲线的插补算法问题, 是实现复杂几何元素数控加工和开发现代数控系统的前提。插补的任务是在一条已知起点和终点的曲线上进行“数据点的密化”。每个插补周期都要运行一次插补, 根据指令进程计算出一个微小的直线数据段。通常在若干个插补周期后, 完成从程序起点到终点的“数据点的密化”<sup>[4]</sup>。

马鞍型曲线是由复杂的空间曲线组成。考虑到马鞍型焊缝的焊接质量, 要保证焊枪姿态的可控性, 需

要四轴联动来实现实际焊接中的插补<sup>[5]</sup>。系统有四个自由度, 绕支管轴线的旋转轴为  $\theta$ ; 焊枪的升降轴为  $y$ ; 焊枪回转半径的调节轴为  $r$ ; 焊枪的姿态调节轴为  $\eta$ (姿态角, 即焊枪摆动轴与垂直方向的夹角)。对于四轴联动系统, 若采用传统的逐次二维插补, 需要进行四次二维平面插补<sup>[6]</sup>, 使得算法的复杂性大大增加, 因此采用直接插补算法。基于以上算法设计原则, 利用四轴联动及空间解析几何原理, 建立了马鞍型曲线焊接时的轨迹和焊枪姿态控制的数学模型, 提出了一种马鞍型曲线的四轴联动直接插补算法。该算法插补精度高、速度快, 解决了焊枪姿态的可控性问题。基于此算法开发了参数驱动马鞍型曲线焊接自动控制系统。

如图 1 中  $M$  为升降轴和摆动轴的连接点,  $l$  为摆动轴的长度,  $\Delta\theta$ 、 $\Delta h$  分别为摆动轴在回转轴方向和升降轴方向上的变化量。在圆管相贯接头中, 规定相贯线上任意一点的二面角为过该点圆管的切平面与另一相贯体的切平面的夹角  $\psi$ , 如图 3.1。相贯线上各点处的二面角都不相同, 称  $\psi$  为在相贯线  $B$  点处的二面角。在起始点  $A$  处的二面角为  $90^\circ$ , 起始姿态角为  $\alpha$ (姿态角为焊枪姿态的调节角度)。相贯线上各点处二面角不尽相同, 发现它与所求的姿态角存在一定的关系, 在  $A$  处的二面角为  $90^\circ$ , 在  $B$  点的二面角变化  $90^\circ-\psi$ 。当旋转轴旋转  $\Delta\theta$  时,  $\psi$ 、 $\psi'$  分别为在相贯线上  $B$  点与  $C$  点法平面内的二面角, 此时姿态角的变化量应从  $B$  点的  $90^\circ-\psi$  变成  $C$  点的  $90^\circ-\psi'$ 。因此当二面角从  $90^\circ$  变为  $\psi$  时, 姿态角只有相应变化  $90^\circ-\psi$ , 才能满足二面角对姿态角的影响, 由此可得姿态角的公式  $\eta=90^\circ-\psi+\alpha$ , 因此若求姿态角  $\eta$ , 需先求二面角  $\psi$ 。

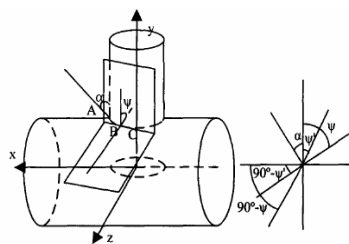


图 2 二面角与姿态角的关系图

如图 2 所示, 两个切面的二面角, 由几何原理可得, 它等于它们的法向量的夹角。主管为  $S_1$ , 半径为  $R$ , 其圆柱面方程为

$$F_1(x, y, z) = z^2 + y^2 - R^2 = 0 \tag{1}$$

在  $B$  点的法向量为

$$n_1 = \left\{ \frac{\partial F_1}{\partial x}, \frac{\partial F_1}{\partial y}, \frac{\partial F_1}{\partial z} \right\} = \{0, y, z\} \quad (2)$$

支管为 S2, 半径为 r, 其圆柱面方程为

$$F_2(x, y, z) = z^2 + x^2 - r^2 = 0 \quad (3)$$

在 B 点的法向量为

$$n_2 = \left\{ \frac{\partial F_2}{\partial x}, \frac{\partial F_2}{\partial y}, \frac{\partial F_2}{\partial z} \right\} = \{x, 0, z\} \quad (4)$$

由几何定义

$$\cos \psi = \frac{n_1 \cdot n_2}{|n_1| |n_2|} = \frac{z^2}{r \cdot R} \quad (5)$$

如图 3 所示的投影关系, 可以得出马鞍型曲线的方程为:

$$\begin{cases} x = r \cos \theta \\ z = r \sin \theta \\ y = \sqrt{R^2 - (r \sin \theta)^2} \end{cases} \quad (6)$$

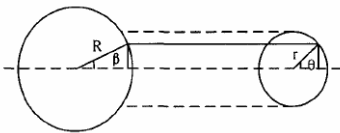


图 3 相贯线投影图

可以得到  $z=r \cdot \sin \theta=R \cdot \sin \beta$ , 其中  $\beta$  为当旋转轴旋转  $\theta$  时轨迹上的点在  $yOz$  平面内相应的角度变化. 则

$$\psi = \arccos \left( \frac{r \sin^2 \theta}{R} \right) \quad (7)$$

则姿态角

$$\eta = 90^\circ - \arccos \left( \frac{r \sin^2 \theta}{R} \right) + \alpha \quad (8)$$

设升降杆末端 M 点 y 轴方向的坐标为  $y_M$ , 回转轴的旋转半径  $r_M$ , 则

$$y_M = y + \Delta h \approx y + l \cos \eta \quad (9)$$

$$r_M = r + \Delta r \approx r + l \sin \eta \quad (10)$$

将式(6)和式(8)代入上式得

$$y_M = \sqrt{R^2 - (R \sin \theta)^2} + l \cos \left[ 90^\circ - \arccos \left( \frac{r \sin^2 \theta}{R} \right) + \alpha \right] \quad (11)$$

$$r_M = r + l \sin \left[ 90^\circ - \arccos \left( \frac{r \sin^2 \theta}{R} \right) + \alpha \right] \quad (12)$$

设旋转角  $\theta$  的变化  $\Delta \theta$  后为  $\theta'$ , 则  $\theta' = \theta + \Delta \theta$ . 则升降轴沿 y 轴的变化量为  $\Delta y_M$ , 回转半径变化为  $\Delta r_M$ , 姿态角  $\eta$  在支管轴切面内变化为  $\Delta \eta$ .

$$\Delta y_M = \sqrt{R^2 - [r \sin(\theta + \Delta \theta)]^2} + l \cos \left[ 90^\circ - \arccos \left[ \frac{r \sin^2(\theta + \Delta \theta)}{R} \right] + \alpha \right] - \left[ \sqrt{R^2 - (r \sin \theta)^2} + l \cos \left[ 90^\circ - \arccos \left( \frac{r \sin^2 \theta}{R} \right) + \alpha \right] \right] \quad (13)$$

$$\Delta r_M = l \sin \left[ 90^\circ - \arccos \left[ \frac{r \sin^2(\theta + \Delta \theta)}{R} \right] + \alpha \right] - l \sin \left[ 90^\circ - \arccos \left( \frac{r \sin^2 \theta}{R} \right) + \alpha \right] \quad (14)$$

$$\Delta \eta = \arccos \left[ \frac{r \sin^2(\theta + \Delta \theta)}{R} \right] - \arccos \left( \frac{r \sin^2 \theta}{R} \right) \quad (15)$$

按式(13)式(14)式(15)即可求出新的插补点的坐标  $M'(\theta', \Delta y'_M, \Delta r'_M, \eta')$ . 选择合适的  $\Delta \theta$  的顺次插补, 仅输入两相贯体半径  $r, R$ , 焊枪姿态摆动杆长  $l$  和起始姿态角  $\alpha$ , 便可插补出马鞍型曲线.

### 2.2 仿真结果

若实际焊接工件参数为  $r=300\text{mm}, R=500\text{mm}, \alpha=\pi/4, l=100\text{mm}, \Delta T=0.005$ , 算法通过 MATLAB 仿真验证, 结果如图 4, 图 5, 图 6, 图 7 所示.

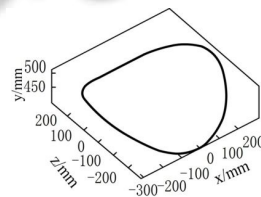


图 4 插补算法的轨迹

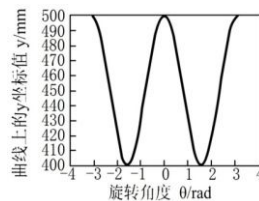


图 5 旋转角度与 Y 坐标值的关系

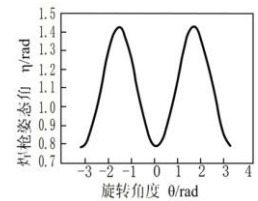


图 6 旋转角度与姿态角的关系

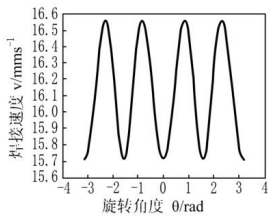


图7 旋转角度与焊枪速度的关系

仿真结果为马鞍型曲线,证明通过此算法获得  $y_M, r_M, \eta, \theta$ , 最终能插补出马鞍型曲线。

### 3 系统硬件设计

根据对控制系统的分析,选择三菱公司的Q系列PLC,它能满足中等性能应用的要求,应用领域广泛。本系统中选用的是Q02HCPU、一个16点的输入模块和一个16点的输出模块、一个定位模块QD75P4。

在硬件设计中要将整个控制箱放在机械回转臂上,进行控制系统设计时,选用体积较小的主板、板卡等。因此系统在选用输入输出板卡时,选用体积较小、符合PC104总线标准的PCM-3730。系统硬件总框图如图8所示。

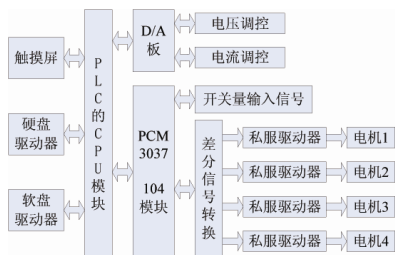


图8 焊接系统硬件总框图

为了增强抗干扰性,输入信号需经过光电耦合器与板卡相连;而输入输出板卡只有8路带光隔的输入,满足不了需求,因此需要进行扩展。扩展电路如下图9所示。将由PCM-3730输出的单端输出信号经过SN75174转换为差分输出信号以控制伺服电机,输出信号扩展电路如图10所示。

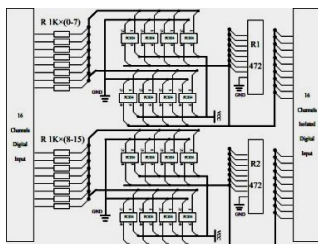


图9 开关量输入信号扩展电路图

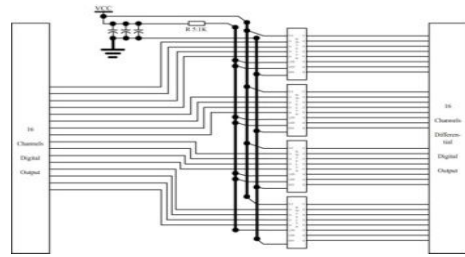


图10 开关量输出信号扩展电路图

### 4 系统软件设计

#### 4.1 控制系统程序流程设计

根据系统中选择的硬件为Mitsubishi公司的Q系列产品,因此对应地选用GX Developer编程软件。用软件GX Developer-QP来设定参数。通过绘制出的程序流程图对PLC进行软件的设计。编写PLC程序、位控单元定位程序。通过PLC与位控单元之间的通信,实现了PLC与位控单元之间的数据读写以及PLC对位控单元定位子程序的调用<sup>[7]</sup>。通过对硬件和软件的选

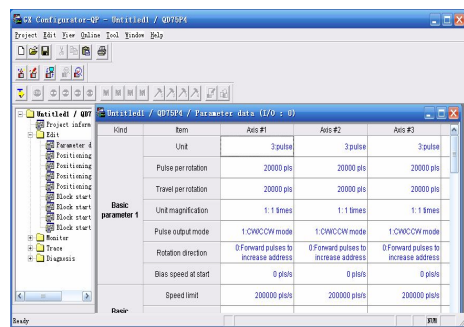


图11 GX Developer-QP 设定参数

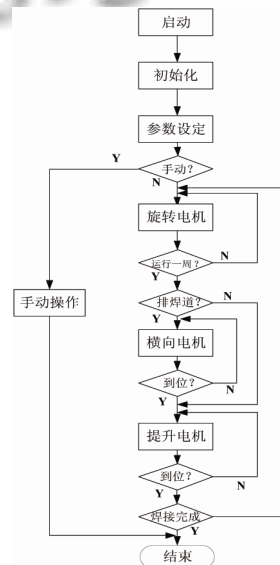


图12 程序流程图



型和设计后,实现了信号识别、检测、处理、PLC 和触摸屏在设备的运动控制,提供了友好的人机交互界面。利用自动控制使焊接技术实现高可靠性、高精度、高可操作性<sup>[8]</sup>。并可以在焊接过程中对焊接工艺参数进行微调,可以根据工艺要求实时调整回转半径和焊枪高度,设备可根据调整后的轨迹运转。程序的框图如图 11 所示。整个系统的主流程图如图 12 所示。

#### 4.2 触摸屏的设计

根据电焊机操作要求,需要设计欢迎、调整、自动、参数、X 轴设置零点、Z 轴设置零点、故障诊断等功能画面。本文采用 Windows 平台下的三菱 GT Designer2 软件开发,设计出以上各画面。焊机上电后,经过初始化后,触摸屏要首先显示欢迎画面,再通过触摸键点动进入调整画面,当需要进入其它画面时,可以利用调整画面上切换画面触摸键进行画面的切换。触摸屏的主页面包括了产品的名称,当前日期,和进入其它画面的按钮主页面如图 13 所示。系统的参数设置页面主要是对焊机在焊接时候所需参数的设置。参数的种类有:主轴的回转速度,即焊枪以什么样的速度进行焊接;焊枪的横向位移速度;焊丝的送丝速度;焊枪的提升和下降速度等。手动机参数设置页面如图 14 所示。



图 13 马鞍型焊机主页面



图 14 参数设置页面

为了方便系统调试,本系统还设计了每个伺服的单独调试功能:调试界面如图 15 所示。



图 15 伺服单独调试界面

#### 5 总结

马鞍型曲线自动焊接系统就是在子管与母管相对固定的情况下,在插补算法的基础上,借助于机械、控制、电气的方法,使焊接设备带动焊枪沿马鞍型焊缝实现自动焊接的数控系统。该数控系统主要由机械设备系统、焊机设备系统、控制系统三部分组成,采用先进的数字控制和柔性焊接技术,实现复杂空间曲线焊缝的自动化焊接。通过参数的设定和调整,完成对马鞍型自动焊接系统的调试。通过对硬件和软件的选型和设计后,实现了信号识别、检测、处理、PLC 和触摸屏在设备的运动控制,提供了友好的人机交互界面。利用自动控制使焊接技术实现高可靠性、高精度、高可操作性。并可以在焊接过程中对焊接工艺参数进行微调,可以根据工艺要求实时调整回转半径和焊枪高度,设备可根据调整后的轨迹运转。

#### 参考文献

- 1 吕燕,马鞍型曲线焊枪位姿数控系统的研究与开发.山东大学,2009.
- 2 苏欣,黄坤,等.长输管道自动焊现状.焊管,2005.
- 3 元化振.马鞍型曲线自动焊接数控系统的研究与开发.山东大学,2007.
- 4 Research and Application of All-Position Automatic Welding Machine. Engineering Sciences 2004,04.
- 5 Li JY, Xue HT, Li H, Song YL. Basic theory and applications of welding ARC spectral information. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007.
- 6 吴萍,黄健,向平.数控切割高精度方钢管相贯端头的研究.机电工程技术,2005.
- 7 霍孟友,等.自动焊接相贯线接缝的实时插补控制算法与仿真.焊接学报,2006,27(11):37-41.
- 8 史国生.电气控制与可编程控制器技术.北京:化学工业出版社,2005.