

空间相贯曲线轨迹控制与仿真^①

陈雪^{1,2}, 宋锐², 樊铭渠¹, 田新诚²

¹(山东科技大学 信息与电气工程学院, 青岛 266590)

²(山东大学 控制科学与工程学院, 济南 250061)

摘要: 针对空间相贯曲线轨迹控制的复杂性和特殊性, 研究一种新型空间相贯曲线插补算法. 通过建立相贯曲线的数学模型, 提出了由直线轴和旋转轴组成的非笛卡尔坐标中的相贯曲线轨迹直接插补和速度控制算法, 并对算法进行仿真. 仿真结果表明, 所提出的相贯曲线轨迹插补算法具有较高的轨迹控制精度和速度稳定性, 具有良好的应用前景.

关键词: 空间相贯曲线; 插补算法; 运动控制器; 速度稳定; 计算机控制系统

Trajectory Control of Spatial Intersected Curves

CHEN Xue^{1,2}, SONG Rui², FAN Ming-Qu¹, TIAN Xin-Cheng²

¹(College of Information & Electrical Engineering, Shandong University of Science & Technology, Qingdao 266590, China)

²(School of Control Science & Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: The trajectory control of spatial intersected curve has great complexity and particularity. To solve this problem, a new trajectory interpolation algorithm of spatial intersected curve is proposed in this paper. Through building the mathematical model of the curve, a direct interpolation and speed control algorithm is developed in a non-cartesian coordinate system with linear axis and rotation axis. The simulation results show that the algorithm has high trajectory precision and speed stability with well application prospects.

Key words: spatial intersected curve; interpolation algorithm; motion controller; speed stability; computer control system

在焊接、切割等机械加工领域, 复杂曲线的自动加工控制问题是人们研究的热点和难点, 其中空间相贯曲线是一类最常见的复杂曲线. 相贯曲线的切割、焊接加工等在造船、石油、化工、输油/输气/供水、钢结构、各类容器制造等行业大量存在. 复杂曲线的焊接和切割在我国主要有三种加工形式: 一是广泛采用手工加工方式, 难以保证焊接、切割的质量和效率; 二是采用通用的工业机器人, 通用工业机器人设备投资大, 加工前的准备工作复杂, 加工成本高, 难以在我国大量推广^[1-3]; 三是采用专用的基于仿形技术的自动/半自动焊接、切割专用装备. 但是由于靠模技术的局限性, 当加工不同规格、不同形式的曲线时, 必须更换仿形凸轮, 每次更换凸轮就必须进行复杂的调整, 操作困难. 特别是, 基于凸轮仿形的机械加工难以实现

焊枪的恒线速度控制, 只能在加工过程中由操作者随时手动调整, 给操作者带来很大的困难^[4-6]. 因此研究相贯曲线的自动控制技术是非常必要的, 其中, 相贯曲线的高精度轨迹控制是其核心技术之一.

轨迹插补理论是数控技术的核心问题, 是数控技术领域的研究热点. 为解决复杂曲线的加工问题, 国内外很多学者进行了大量研究, 主要有两种技术路线: 一是根据加工精度要求将复杂曲线离散为大量的微小直线段和圆弧段, 进而生成数控加工程序, 由具有直线和圆弧等基本插补功能的数控装备进行复杂曲线的加工^[7,8], 这是目前普遍采用的复杂曲线加工控制方式. 二是研究复杂曲线的直接插补理论, 用复杂曲线的直接插补算法“武装”数控机床, 使之能够直接加工复杂曲线, 而无需经过复杂的 CAM 过程来生成数控

① 基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)(2012AA041307); 山东大学自主创新基金(2011JC013)

收稿时间: 2012-09-21; 收到修改稿时间: 2012-11-13

加工程序。目前国内外复杂曲线的插补理论成果主要是 B 样条曲线和 NURBS 曲线的插补算法。其他一些专用的复杂曲线直接插补算法,如基于切点跟踪的插补算法研究,取得了可喜的研究成果,直接推动了我国曲轴、凸轮轴等非圆曲线加工数控装备技术的发展^[9-11]。在空间相贯曲线的直接插补理论的研究方面,国内外学者做了许多有益的工作,取得了一些可喜的研究成果,文献[12,13]研究了特殊相贯曲线的数学模型及其计算问题;文献[14]研究了一种相贯线接缝的实时插补控制算法;文献[15]提出一种耦合速度曲线的连续运动轨迹规划方法和轨迹插补算法,并分析了在一阶近似和二阶近似条件下的轨迹精度;文献[16-19]对相贯曲线直接插补算法进行了研究和仿真,但算法比较复杂,对速度稳定性没有作深入研究。

本文研究由直线轴和旋转轴组成的非笛卡尔坐标中的相贯曲线轨迹插补和速度控制算法,运用直接插补算法开发针对空间相贯曲线的焊接控制系统,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,焊接线速度恒定,机械结构简单,并进行仿真验证。

1 相贯曲线的数学模型

两立体相交称为两立体相贯,它们表面形成的交线称作相贯线。它是一种复杂的空间曲线,常见的情况是两圆柱体相交。两圆柱体相交分为三种情况:正交、斜交和偏心交。为了研究相贯曲线插补算法,首先必须求得相贯曲线的数学模型。下面以两圆柱体正交相贯曲线为例进行研究。

图 1 中两圆柱体正交,主管和支管半径分别为 R 和 r 。以主管和支管的轴线交点为坐标原点,建立坐标系,如图 1 所示。

支管的参数方程为:

$$X = r \sin \theta \quad Y = r \cos \theta \quad (1)$$

主管的截面方程满足:

$$X^2 + Z^2 = R^2 \quad (2)$$

主管和支管的交线即相贯曲线上任一点必须同时满足主管和支管方程,故相贯曲线上点的坐标应满足以下条件:

$$\begin{aligned} X &= r \sin \theta \\ Y &= r \cos \theta \\ Z &= (R^2 - X^2)^{1/2} = [R^2 - (r \sin \theta)^2]^{1/2} \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)即为垂直正交圆柱体相贯线轨迹方程。

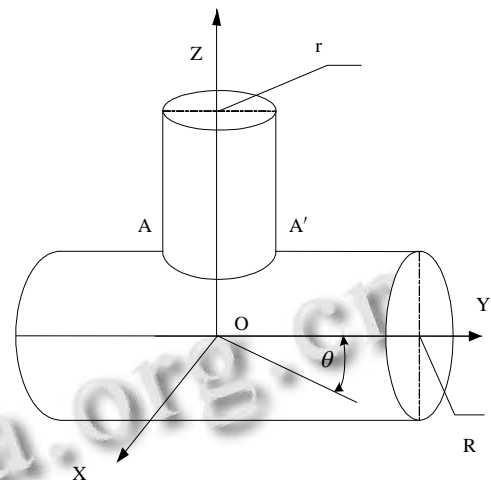


图 1 相贯曲线模型

2 空间相贯曲线插补算法及速度控制

2.1 空间相贯曲线插补实现方法

空间相贯曲线轨迹控制的目的是在可以接受的算法复杂度的前提下,保证轨迹插补的几何精度,同时还要有良好的插补速度稳定性和可控性。为减少插补计算时间,保证插补的实时性,本文插补方法采用二级插补方法:1)在实时插补计算前进行必要的预处理,即根据得到的相贯线方程,求出相贯线上点的位置坐标,即插补点的位置坐标,将曲线分割成微小的直线段,将计算得到的数据传送给插补处理模块。2)由运动控制器执行实时插补过程。

在由直线轴和旋转轴组成的非笛卡尔坐标中,由直线轴 Z 和旋转轴的联动对相贯曲线轨迹进行插补。旋转轴每次旋转一定的度数,对应得到 Z 轴的值,将曲线细分成 N 个直线段,得到 N 个坐标值。由此求得运动轨迹上相邻两个离散点之间的运动位移量 ΔZ 。其中,

$$Z_1 = \sqrt{R^2 - (r \sin \theta)^2}, \quad Z_2 = \sqrt{R^2 - (r \sin(\theta+1))^2}$$

可得 $\Delta Z = Z_2 - Z_1$ 。

2.2 空间相贯曲线插补速度控制

为保证相贯曲线的加工质量,需要对曲线的插补速度进行控制。设加工的合速度为 V' , Z 轴是直线轴, θ 轴是旋转轴。 Z 轴直线速度是 V_z , θ 轴直线速度是 V_θ , θ 轴旋转速度 V'_θ 和直线速度 V_θ 之间的转化具体分析如式(4)-(10)。示意图如图 2 所示。

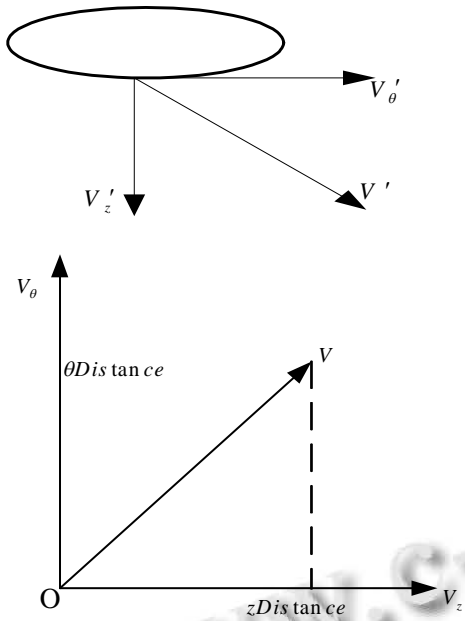


图 2 速度转化示意图

两直线轴合速度:

$$V = \sqrt{V_z^2 + V_\theta^2} \quad (4)$$

Z 轴直线速度为:

$$V_z = \frac{zDis tan ce}{\sqrt{zDis tan ce^2 + \theta Dis tan ce^2}} * V \quad (5)$$

轴直线速度为:

$$V_\theta = \frac{\theta Dis tan ce}{\sqrt{zDis tan ce^2 + \theta Dis tan ce^2}} * V \quad (6)$$

Z 轴为直线轴, 旋转速度不变,

$$V'_z = V_z \quad (7)$$

对旋转轴而言, θ 轴旋转速度为:

$$V'_\theta = V_\theta * r \quad (8)$$

二轴的合速度为:

$$V' = \sqrt{V_z'^2 + V_\theta'^2} \quad (9)$$

从而得到插补速度是:

$$V = \frac{V'}{\sqrt{\frac{zDis tan ce^2 + \theta Dis tan ce^2 * r^2}{zDis tan ce^2 + \theta Dis tan ce^2}}} \quad (10)$$

2.3 空间相贯曲线插补误差分析

插补精度是插补轨迹与理论轨迹的符合程度, 它可用插补误差来评价。

在二级插补方法中, 主要由两个方面产生误差。一

是在粗插补过程中, 采样点的选择, 由两个采样点间的直线段来代替弧长, 理论轨迹和实际轨迹产生的弓高误差。另一方面是在精插补过程中, 由运动控制器实时插补过程产生的误差。直线插补时, 轨迹插补误差小于一个脉冲当量。下面分析弓高误差。如图 3 所示。

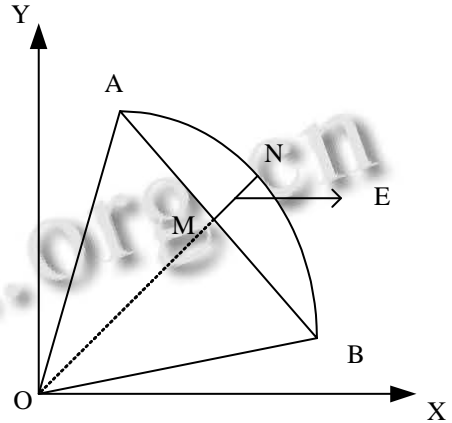


图 3 弓高误差示意图

弓高误差 MN 的长度为 E, 步长 AB 的长度为 L, 曲率半径 OB 的长度为 K. 为简化计算过程, 认为两个相邻插补点之间的距离足够小, 曲率半径不变, 即 AB 在同一个半径的圆上. 由 $MN=ON-OM$ 得:

$$E = K - \sqrt{K^2 - \frac{L^2}{4}} \quad (11)$$

由上式可知, 误差的大小与曲率半径和插补步长有关. 在曲率一定的情况下, 步长越小, 误差越小; 当步长一定时, 曲率半径越小, 弓高误差越大。

$$E_{max} = K_{min} - \sqrt{K_{min}^2 - \frac{L^2}{4}} \quad (12)$$

所以在给定误差的前提下, 其最大步长表示为:

$$L = \sqrt{8rE - 4E^2} \quad (13)$$

3 相贯曲线轨迹加工计算机控制系统

轨迹插补计算是轨迹控制系统中非常重要的模块. 插补计算得到 Z、 θ 运动轴的进给量, 通过运动控制器来控制各轴电机的运动, 从而完成空间相贯线轨迹的控制。

基于相贯曲线轨迹控制要求, 本系统的插补流程如图 4 所示, 并设计了如图 5 所示的人机界面. 通过人机界面可以进行参数设置, 实时显示各轴坐标、运动速度及运动轨迹。

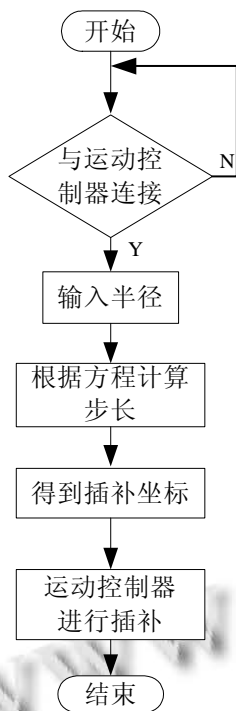


图 4 插补流程图

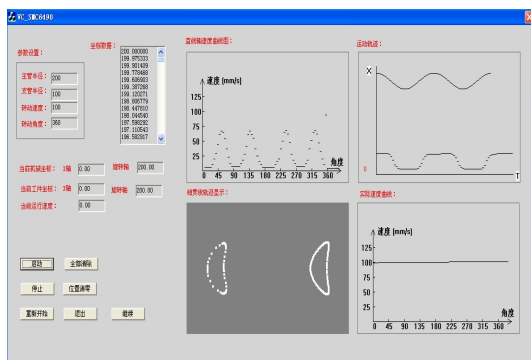
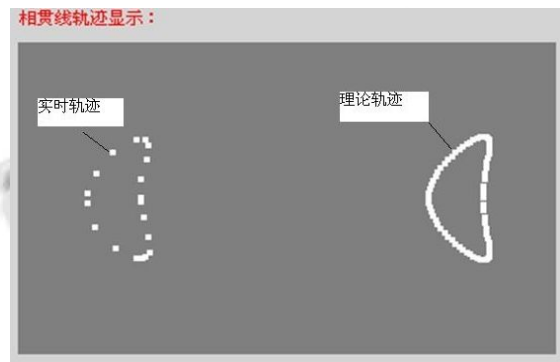


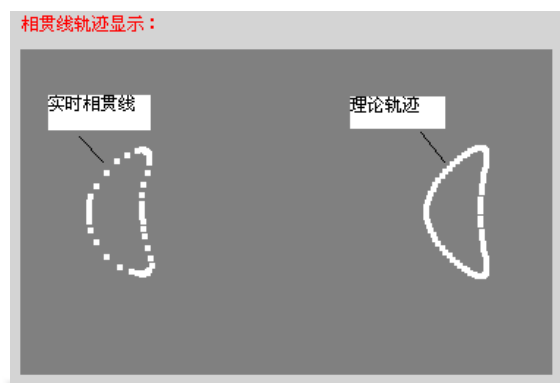
图 5 相贯曲线轨迹控制系统界面

$$E_2 = K - \sqrt{K^2 - \frac{L^2}{4}} = 100 - \sqrt{100^2 - \frac{200(\sin 0.9^\circ)^2}{4}} \approx 6.17 \times 10^{-5}$$

很显然 $E_1 > E_2$. 所以通过图 6(a)和图(b)两图的实时轨迹对比, 并根据以上计算结果可以得到: 插补点越多, 插补步长越小, 所得插补轨迹误差越小. 在实际应用当中, 可以根据实际加工要求的误差大小通过反算来选择合适的插补点数.



(a) 相贯曲线轨迹显示(3.6 度)



(b) 相贯曲线轨迹显示(1.8 度)

图 6 实时绘制各轴的实际运动轨迹

4 实验结果分析

在相贯曲线轨迹控制过程中, 通过实时采集各坐标轴的实际位置, 实时绘制各轴的实际运动轨迹得到图 6(a)和图(b). 对比图 6(a)中的理论轨迹和实时轨迹可得到, 所采用的插补算法轨迹控制正确. 图 6(a)中的步长为 3.6 度, 即插补一周的插补点数是 100. 图 6(b)中的步长为 1.8 度, 即插补一周的插补点数是 200. 假设 $r=100$, 结合 2.3 的误差分析, 根据式(11)可以得到:

当步长为 3.6 度时, 误差大小为

$$E_1 = K - \sqrt{K^2 - \frac{L^2}{4}} = 100 - \sqrt{100^2 - \frac{200(\sin 1.8^\circ)^2}{4}} \approx 2.47 \times 10^{-4}$$

当步长为 1.8 度时, 误差大小为

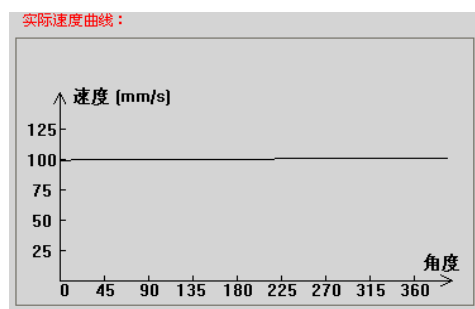


图 7 直线轴速度曲线图和实际度曲线图

图 7 所示为相贯曲线轨迹控制过程中的实际运行速度, 验证了插补算法的速度控制稳定性.

综上所述实验结果表明, 该计算机控制系统能可靠的

实现相贯曲线轨迹和速度的控制. 控制系统提供了友好的人机交互, 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. 采用软件和硬件相结合的二级插补算法, 所需原始数据少、算法简单、插补精度高, 便于控制进给速度, 能够节约插补运算所需的时间.

3 结语

本文通过构建空间相贯曲线方程, 采用两级插补算法, 实现了相贯曲线的精确轨迹控制和加工速度控制. 实验仿真结果验证了算法的轨迹控制准确性和速度控制稳定性, 具有广泛的应用前景.

参考文献

- Gao YF, Zhang H, Mao ZW. Coordinate control of broken-line welding seam tracking for wheeled robot. *Trans. of the China Welding Institution*, 2008,29(5):33-37.
- 吕燕. 马鞍型曲线焊枪位姿数控系统的研究与开发. 济南: 山东大学, 2009.
- 宋金虎. 我国焊接机器人的应用与研究现状. *电焊机*, 2009, 39(4):18-20.
- 万忠华, 卫国强, 于福鑫. 低成本仿形自动焊接机的研制. *机电工程技术*, 2010,(1):46-48.
- Kong M, Lin T, Chen SB. Present situation and recent development of intelligent robot welding technology. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2008(8):40-43.
- 李爱国, 王文标, 吴德烽. 柔性再制造测量机器人建模. *大连海事大学学报*, 2010,36(3):72-75.
- 金建新. 机床 CNC 系统中任意空间曲线的可控步长插补方法. *机械工程学报*, 2000,36(4):95-97.
- 郭义杰, 项占琴. 多面形非圆曲面数控磨削加工实时插补方法研究. *中国机械工程*, 2004,15(8):728-730.
- Park J, Nam S, Yang MY. Development of a real-time trajectory generator for NURBS interpolation based on the two-stage interpolation method. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2005,26(4):359-365.
- Zhang XH, Yu D, Hong HT, ed. Research on Smooth Compression Interpolation Algorithm in CNC Machining. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011,47(5): 156-169.
- 张忠厚, 李文娟, 刘强. 锅炉封头相贯线接缝自动焊机的研制. *焊接学报*, 1999,20(12):114-118.
- 邓东芳. 用形数结合的方法求作正交椭球与椭圆锥相贯线的投影. *武汉科技大学学报*, 2000,23(2):150-152.
- 李树揖. 异径圆管相贯线数学模型的建立与应用. *起重运输机械*, 2005,2(7):51-52.
- 霍孟友, 王新刚, 尹萍. 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):37-40.
- 王攀峰. 相贯线切割机器人作业单元关键技术研究. 天津, 天津大学, 2008.
- Yan L, Xincheng T, Qing X & P Bo. Four-axis interpolation algorithm for saddle type curve automated welding. *Trans China Welding Instn*, 2009,30:81-84.
- Li HT, Tian XC. A Novel CNC Interpolation Algorithm for Saddle Curve. *Advanced Materials Research*, 2011, 219-220: 239-242.
- Yi XL, Tian XC. A Novel Trajectory Control Algorithm for Intersection Seam Automated Welding. *Advanced Materials Research*, 2011,219-220:284-287.
- Tian XC, Deng XH. Curve Fitting Approach of Saddle-Shaped Curve for Automated Welding/Cutting. *Advanced Materials Research*, 2011,211-212:935-938.
- Porikli F. Integral Histogram: A Fast Way to Extract Histograms in Cartesian Spaces. 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2005,1(2):829-836.
- 周柯. 基于 HOG 特征的图像人体检测技术的研究与实现. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- 李同治, 丁小青, 王先进. 利用级联 SVM 的人体检测方法. *中国图像图形学报*, 2008,13(3):566-570.
- 程广涛, 陈雪, 郭照庄. 基于 HOG 特征行人视觉检测方法. *传感器与微系统*, 2011,30(7):68-71.
- 卢岩, 戴明, 姜磊, 李仕. 自适应人体运动目标精检测. *计算机系统应用*, 2011,20(5):162-166.
- Wang JYA, Adelson EH. Representing moving images with layers. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1994,3(5):625-638.
- 徐春广, 郑军, 肖定国, 理华, 黄卉. 数字图像中照度不均匀校正技术研究. *北京理工大学学报*, 2003,23(3):285-290.

(上接 137 页)