

# 主管旋转式相贯曲线自动焊接模型与仿真

石磊, 田新诚

(山东大学 控制科学与工程学院, 济南 250061)

**摘要:** 相贯管道的主管旋转式焊接方式能够实现相贯焊缝的全过程平角焊, 降低工艺复杂度并提高焊接质量。为了实现相贯管道的自动化焊接, 建立了主管旋转式相贯曲线自动焊接模型。以一般性相贯管道几何模型为基础, 用齐次变换矩阵分析了焊缝特征和焊枪姿态, 得出了主管旋转角的变化规律及焊枪与世界坐标系的空间位置关系。利用 MATLAB 和 OpenGL 对相贯管道的几何模型和焊接过程的运动模型进行了仿真。结果表明, 该自动焊接模型是可行的, 可以用于主管旋转式相贯曲线自动焊接的实时插补或离线编程。

**关键词:** 主管旋转; 相贯曲线; 自动焊接

中图分类号: TG 409 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2015)06-0005-04

## 0 序言

管管相贯曲线是一种较为复杂的空间曲线, 其自动焊接具有重要意义。近年来国内在此领域的研究取得了较大进展。文献[1,2]均基于专用焊接机床, 其模型较为简单, 焊枪姿态不可控。文献[3-5]均基于跨骑式焊接机器人, 其中文献[4,5]实现了焊枪全姿态控制, 且文献[5]可适用于偏置斜交模型。文献[6]针对骑座式焊接机器人, 建立并比较了两种不同的管管相贯焊接模型。然而由于上述焊接机构的模型特点, 它们在焊接过程中会交替出现上坡焊和下坡焊, 当主支管半径接近或者管管非正交时, 这种现象尤为明显。由于焊缝倾角的大幅度变化而带来的熔池重力作用的变化也会严重影响焊接质量。

在一些主管允许旋转的情况下, 主管旋转式相贯曲线自动焊接方式解决了此问题。它通过旋转水平放置的主管, 使当前焊接位置始终处于相贯焊缝的最高点, 进而将全部的焊缝位置转化为平角焊位置, 稳定的熔池重力作用为焊缝的良好成形创造了条件。

文中建立了主管旋转式相贯曲线自动焊接的通用模型, 得到了主管旋转角和焊枪位姿的求解方法。这对相贯曲线自动焊接的实时插补与离线编程具有重要意义。

## 1 管管相贯几何模型

管管相贯几何模型(图1)的主要内容是主管坐标系下的相贯曲线坐标、焊缝特征和焊枪姿态。它是主管旋转运动模型的基础。

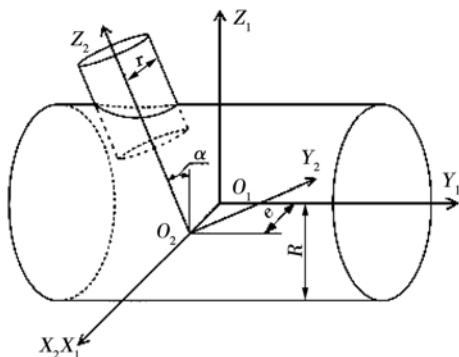


图1 管管相贯模型

Fig. 1 Model of intersecting pipes

主管坐标系为  $X_1Y_1Z_1$ , 主管中心轴线为  $Y_1$  轴; 支管坐标系为  $X_2Y_2Z_2$ , 支管中心轴线为  $Z_2$  轴。将  $X_1Y_1Z_1$  坐标系沿  $X_1$  轴平移距离  $e$ , 得到  $X'Y'Z'$  坐标系; 将  $X'Y'Z'$  坐标系绕  $X'$  轴旋转  $\alpha$  角度, 得到  $X_2Y_2Z_2$  坐标系。 $e$  为偏心距,  $\alpha$  为倾斜角。

### 1.1 相贯曲线坐标求解

$X_1Y_1Z_1$  到  $X_2Y_2Z_2$  的齐次变换矩阵为

$$T_2^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & e \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

相贯曲线上一点  $P(x, y, z)$  在主管坐标系中表示为  $\mathbf{P}_1(x_1, y_1, z_1)$ , 在支管坐标系中表示为  $\mathbf{P}_2(x_2, y_2, z_2)$ , 且满足以下约束, 即

$$\left. \begin{array}{l} x_1^2 + z_1^2 = R^2 \\ x_2^2 + y_2^2 = r^2 \\ \mathbf{P}_1 = \mathbf{T}_2^l \mathbf{P}_2 \end{array} \right\} \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{P}_1 = [x_1 \ y_1 \ z_1 \ 1]^T$ ;  $\mathbf{P}_2 = [x_2 \ y_2 \ z_2 \ 1]^T$ .

在  $X_2Y_2Z_2$  中, 假定一绕  $Z_2$  轴的旋转角为  $\theta$ , 则  $x_2$  和  $y_2$  可分别表示为  $r\cos\theta$  和  $r\sin\theta$ . 求解式(2) 可以得到相贯曲线在  $X_1Y_1Z_1$  和  $X_2Y_2Z_2$  中的坐标, 即

$$\left. \begin{array}{l} x_1 = r\cos\theta + e \\ y_1 = -\tan\alpha \sqrt{R^2 - (r\cos\theta + e)^2} + r\sec\alpha\sin\theta \\ z_1 = \sqrt{R^2 - (r\cos\theta + e)^2} \\ x_2 = r\cos\theta \\ y_2 = r\sin\theta \\ z_2 = \sec\alpha \sqrt{R^2 - (r\cos\theta + e)^2} - r\tan\alpha\sin\theta \end{array} \right\} \quad (3)$$

$$\quad (4)$$

## 1.2 焊缝特征与焊枪姿态

焊缝特征包括许多方面, 其中焊点位置、焊缝轴线和焊缝中心线方向是最重要的几个特征(图2). 焊枪姿态是相对于焊缝而言的, 当焊枪末端与焊点重合且焊枪轴线与焊缝中心线重合时, 焊枪姿态与焊缝特征可以用同一个齐次变换矩阵描述.

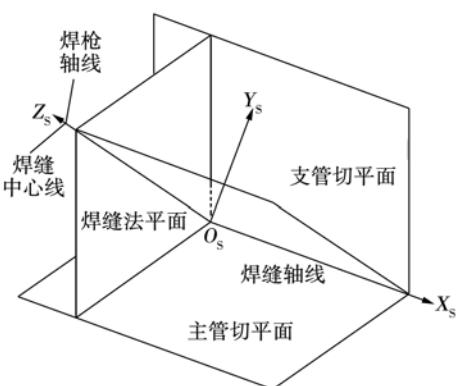


图2 焊缝特征模型

Fig. 2 Model of welding seam

$O_s$  点为焊缝上的一点, 其在  $X_1Y_1Z_1$  中的坐标为式(3). 焊缝轴线是相贯曲线在  $O_s$  点的切线, 也是过  $O_s$  点的主管切平面与支管切平面的交线. 焊缝法平面是过  $O_s$  点的焊缝轴线的法平面. 焊缝中心线是过  $O_s$  点, 垂直于焊缝轴线且平分两切平面的直线.

建立焊缝坐标系  $X_sY_sZ_s$ , 规定  $X_s$  轴与焊缝轴线重合,  $Z_s$  轴与焊缝中心线重合, 根据右手法则确定  $Y_s$  轴. 先确定  $X_sY_sZ_s$  的三个单位主矢量在  $X_1Y_1Z_1$  中的表示, 然后可以直接得到从  $X_1Y_1Z_1$  到  $X_sY_sZ_s$  的齐次变换矩阵.

通过式(2)的第一个方程和式(3), 可以求得主管在  $O_s$  点的单位法向量, 即

$$\mathbf{n}_R = \begin{bmatrix} r\cos\theta + e & 0 & \sqrt{R^2 - (r\cos\theta + e)^2} \\ R & R & R \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

通过式(2)的第2个方程、式(4)以及式(1)的旋转子块, 可以求得支管在  $O_s$  点的单位法向量, 即

$$\mathbf{n}_r = [\cos\theta \ \cos\alpha\sin\theta \ \sin\alpha\sin\theta]^T \quad (6)$$

设  $X_s$  轴的单位矢量在  $X_1Y_1Z_1$  中为  $\mathbf{n} = [n_x \ n_y \ n_z]^T$ . 相应的  $Y_s$  轴和  $Z_s$  轴的单位矢量分别为  $\mathbf{o} = [o_x \ o_y \ o_z]^T$ ,  $\mathbf{a} = [a_x \ a_y \ a_z]^T$ . 容易得到

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{n}_R \times \mathbf{n}_r}{\|\mathbf{n}_R \times \mathbf{n}_r\|} \quad (7)$$

$$\mathbf{a} = \frac{\mathbf{n}_R + \mathbf{n}_r}{\|\mathbf{n}_R + \mathbf{n}_r\|} \quad (8)$$

$$\mathbf{o} = \mathbf{a} \times \mathbf{n} \quad (9)$$

由式(7)、式(8)、式(9)和式(3)可以直接得到从  $X_1Y_1Z_1$  到  $X_sY_sZ_s$  的齐次变换矩阵为

$$\mathbf{T}_s^l = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & x_1 \\ n_y & o_y & a_y & y_1 \\ n_z & o_z & a_z & z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

在主管旋转式相贯曲线焊接中, 由于焊接倾角始终是  $0^\circ$ , 焊枪不需要作推焊或拉焊姿态, 焊枪垂直于焊缝轴线且平分两切平面便可以满足工艺要求. 因此焊枪(焊丝)的末端与  $O_s$  点重合, 焊枪轴线与  $Z_s$  轴重合, 焊缝特征与焊枪姿态均可以使用式(10)描述.

## 2 主管旋转运动模型

主管旋转式相贯曲线自动焊接方式最为显著的特征是管组不断绕主管中心轴线往复转动(图3). 主管坐标系不是基本参考坐标系, 需将管管相贯几何模型升级为主管旋转运动模型(图4). 此模型的主要内容是主管旋转角和旋转过程中的焊枪位置与方向.

建立世界坐标系  $X_wY_wZ_w$  ( $Z_w$  方向与重力方向相反), 将其绕  $Y_w$  轴旋转  $\beta$  角得到  $X_1Y_1Z_1$  坐标系. 从  $X_wY_wZ_w$  到  $X_1Y_1Z_1$  的齐次变换矩阵为

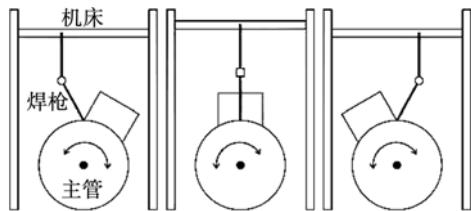


图3 主管旋转式相贯曲线焊接过程示意图

Fig. 3 Illustration of main pipe rotating intersecting curve welding

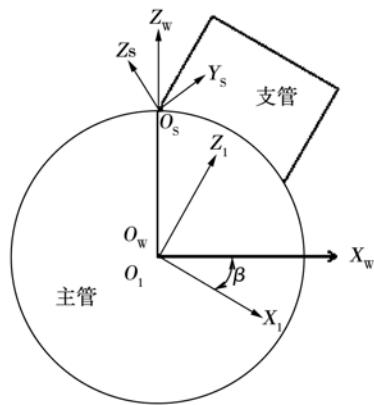


图4 主管旋转运动模型

Fig. 4 Model of rotating intersecting pipes

$$T_1^W = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

## 2.1 主管旋转角

结合式(10)与式(11),可以得到世界坐标系  $X_wY_wZ_w$  到焊缝坐标系  $X_sY_sZ_s$  的齐次变换矩阵为

$$T_s^W = T_1^W T_s^1 = \begin{bmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & x_1 \cos\beta + z_1 \sin\beta \\ \cdot & \cdot & \cdot & y_1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & -x_1 \sin\beta + z_1 \cos\beta \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$T_s^W$  的位置矢量  $\mathbf{p}$  即为焊缝上  $O_s$  点在世界坐标系中的坐标. 主管旋转式相贯曲线焊接要求, 管组绕主管中心轴旋转  $\beta$  角后, 当前焊接位置处于相贯焊缝的最高点. 解方程

$$\left. \begin{array}{l} x_1 \cos\beta + z_1 \sin\beta = 0 \\ -x_1 \sin\beta + z_1 \cos\beta = R \end{array} \right\} \quad (13)$$

得到主管旋转角, 即

$$\beta = \tan^{-1} \frac{-(r \cos\theta + e)}{\sqrt{R^2 - (r \cos\theta + e)^2}} \quad (14)$$

## 2.2 焊枪位置与方向

将式(14)代入式(12)得

$$T_s^W = \begin{bmatrix} \cdot & \cdot & a_x \cos\beta + a_z \sin\beta & 0 \\ \cdot & \cdot & a_y & y_1 \\ \cdot & \cdot & -a_x \sin\beta + a_z \cos\beta & R \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

根据1.2节中对焊缝坐标系的说明, 焊枪(焊丝)末端与  $O_s$  点重合, 焊枪轴线与  $Z_s$  轴重合. 因此焊枪在世界坐标系中的位置与方向如下.

焊枪(焊丝)末端位置为  $T_s^W$  的位置矢量, 即

$$\mathbf{p} = [0 \ y_1 \ R]^T \quad (16)$$

焊枪轴线方向(远离焊缝)为  $T_s^W$  的接近矢量为

$$\mathbf{a}_w = \begin{bmatrix} a_x \cos\beta + a_z \sin\beta \\ a_y \\ -a_x \sin\beta + a_z \cos\beta \end{bmatrix} \quad (17)$$

## 3 仿 真

主管旋转式相贯曲线自动焊接模型由几何模型和运动模型构成. 几何模型可以通过 MATLAB 仿真验证, 运动模型可以通过 OpenGL 仿真验证.

### 3.1 几何模型的 MATLAB 仿真

假设一组相贯管道, 主管半径为 85 mm, 支管半径为 57.5 mm, 偏心距为 10 mm, 倾斜角为 15°. 根据式(3)与式(8), 用 MATLAB 画出主管坐标系中的相贯曲线与焊枪姿态(图 5).

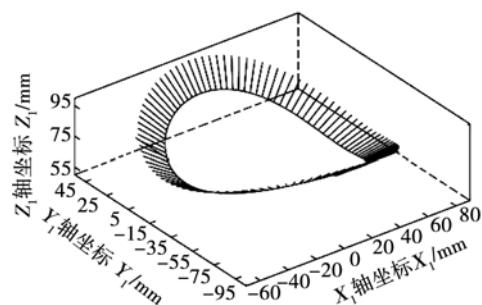


图5 几何模型仿真

Fig. 5 Simulation of geometric model

相贯曲线的仿真结果为马鞍形, 焊枪垂直于相贯曲线且平分主管与支管的二面角, 这说明了所建几何模型的正确性.

### 3.2 运动模型的 OpenGL 仿真

OpenGL 是一个 3D 图形和模型库<sup>[7]</sup>. 一个基于 VC++ 的 OpenGL 仿真平台被创建, 用于动态模拟焊接过程. 设定主管半径为 170 mm, 支管半径为 90 mm, 偏心距为 30 mm, 倾斜角为 -20°, 使用仿真平台模拟焊接过程, 并显示出焊枪末端相对于管道的

运动轨迹(图 6).

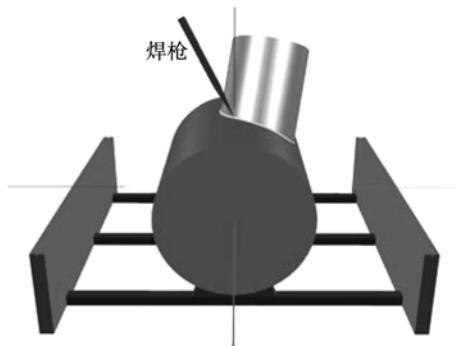


图 6 焊接过程仿真

Fig. 6 Simulation of welding process

经过仿真看出,焊接轨迹与相贯焊缝吻合,焊枪姿态与理论值相同. 因此 OpenGL 仿真验证了所建模型的正确性.

## 4 结 论

(1) 建立了主管旋转式相贯曲线自动焊接的几何模型和运动模型, 得到了主管旋转角和焊枪位置方向的求解方法. 通过 MATLAB 和 OpenGL 仿真验证了模型的正确性.

(2) 该模型对主管旋转式相贯曲线自动焊接机构具有通用性, 对相贯曲线自动焊接的实时插补与离线编程具有重要意义.

## 参考文献:

- [1] 亓化振, 田新诚, 张雪伊, 等. 基于角度逼近的马鞍形曲线自动焊接插补算法[J]. 焊接学报, 2007, 28(3): 93-96.

Qi Huazhen, Tian Xincheng, Zhang Xueyi, et al. Interpolation algorithm for saddle-shaped curve auto-welding based on angle approaching [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(3): 93-96.

- [2] 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[J]. 焊接学报, 2006, 27(11): 37-40.  
Huo Mengyou, Wang Xingang, Yin Ping. Real-time interpolation algorithm and simulation of seam of intersection line for automatic welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006, 27(11): 37-40.
- [3] 吕燕, 田新诚, 徐青, 等. 马鞍形曲线自动焊接四轴联动插补算法[J]. 焊接学报, 2009, 30(5): 81-84.  
Lü Yan, Tian Xincheng, Xu Qing, et al. Four-axis interpolation algorithm for automatic welding of saddle type curve weld[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(5): 81-84.
- [4] 李晓辉, 汪苏. 骑座相贯线焊接机器人运动学分析及仿真[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(8): 964-968.  
Li Xiaohui, Wang Su. Kinematic analysis and simulation of saddle-back coping welding robot[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(8): 964-968.
- [5] 任福深, 陈树君, 管新勇, 等. 管道插接相贯线专用焊接机器人[J]. 焊接学报, 2009, 30(6): 59-62.  
Ren Fushen, Chen Shujun, Guan Xinyong, et al. Special-purpose welding robot for intersection welding seam[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(6): 59-62.
- [6] Liu Yu, Zhao Jing, Lu Zhenyang, et al. Pose planning for the end-effector of robot in the welding of intersecting pipes[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011, 24(2): 264-270.
- [7] Wright R S, Haemel N, Sellers G M, et al. OpenGL superbible: comprehensive tutorial and reference [M]. 5th edition. Boston: Addison-Wesley, 2010.

**作者简介:** 石磊, 男, 1989 年出生, 博士研究生. 主要研究方向为运动控制、焊接自动化、机电一体化. 发表论文 2 篇. Email: mymf@163.com

**通讯作者:** 田新诚, 男, 博士研究生导师, 教授. Email: txch@sdu.edu.cn