

DOI: 10.3901/JME.2010.08.073

# 弧焊机器人焊枪姿态的简便示教\*

周律<sup>1</sup> 蔡锦达<sup>1</sup> 钱炜<sup>1</sup> 陈善本<sup>2</sup>

(1. 上海理工大学机械工程学院 上海 200093;

2. 上海交通大学材料科学与工程学院 上海 200240)

**摘要:** 弧焊机器人焊接空间搭接焊缝时, 对于焊枪姿态的示教往往占据了大量的示教时间。为此, 提出一种焊枪姿态的简便示教方法。该方法采用根据几何约束计算焊接时焊枪姿态的思路完成焊枪姿态的示教。先以任意焊枪姿态对焊缝进行位置示教, 然后根据焊缝的切向矢量和焊接工艺要求的焊枪角度计算出焊接时的焊枪姿态。对于三维曲线焊缝, 只有当局部焊接平面与基坐标系的  $Oyz$  平面不垂直时, 需要进行简单的焊枪姿态示教, 示教时只须调整机器人绕工具坐标系一个轴转动的角度即可完成。使用该方法可以显著地减少示教难度和示教时间, 提高姿态示教的精度。详细介绍焊枪姿态的描述方法、焊接方向角的计算方法和焊枪姿态的调整方法等关键技术。使用搭接曲线焊缝进行试验验证, 证明了该方法的可行性。

**关键词:** 弧焊机器人 焊枪姿态 简便示教方法 焊接方向角

**中图分类号:** TG409

## Simple and Convenient Teaching of Welding Torch Orientations for Arc Welding Robot

ZHOU Lü<sup>1</sup> CAI Jinda<sup>1</sup> QIAN Wei<sup>1</sup> CHEN Shanben<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai University for Science and Technology, Shanghai 200093;

2. School of Material Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

**Abstract:** Teaching the orientations of a welding torch tends to occupy a great deal of time when arc welding robot welds spatial welding seam with lap joint. Therefore, a simple and convenient method of teaching is proposed. To teach the orientations of welding torch, the idea that the geometric constraints of the torch are used to automatically calculate the orientations of a torch is adopted. The position teaching is performed with arbitrary welding torch orientations. The torch orientations during welding are calculated according to the tangential vector of seam and the angles of torch required by welding process. For 3D curve seam, the simple teaching of torch orientations is needed only at the time when the local welding plane is not perpendicular to the  $Oyz$  plane of the robot base frame. And this kind of teaching can just be done by adjusting the robot's angle of rotation around one axis. This method can dramatically cut down the time and the difficulty of teaching, and enhance the accuracy of the orientation teaching. The key techniques, such as the description of the orientations of a welding torch, the calculation of the welding orientation angles and the adjustment of the orientations of a welding torch, are presented. The test results on a curve seam with lap joint show the feasibility of this method.

**Key words:** Arc welding robot Orientations of welding torch Simple and convenient method of teaching

Welding orientation angle

## 0 前言

由于焊接质量稳定、生产效率高等优点, 弧焊

机器人获得了大量的应用<sup>[1]</sup>。弧焊机器人最主要的功能就是可以复现经过编程的焊枪运动轨迹, 包括焊枪的位置和姿态。其编程方法有在线示教和离线编程两种。这两种编程方法均有和传感器相结合、向自动编程发展的趋势<sup>[2]</sup>。其中, 应用激光视觉传感器的研究较为活跃<sup>[3-4]</sup>。文献[5]为了促进机器人离线编程技术的发展, 开发了虚拟的激光传感器,

\* 上海高校选拔培养优秀青年教师科研专项基金(slg-07021)和上海市教委重点学科建设(J50503)资助项目。20090520 收到初稿, 20091109 收到修改稿

以便在计算机上图形化地展示应用传感器导引机器人时的工作情况。

在实际应用中,由于示教编程具有灵活性和方便性,仍然是目前最主要的编程方法,示教盒也是机器人系统的标准配置。随着技术进步,新一代的示教盒普遍采用了嵌入式操作系统,具有图形化编程界面和触摸屏输入,从而使编程界面更加友好,可操作性更强。

搭接接头由于其焊前准备和装配工作简单,在实际生产中得到了广泛的应用。焊接搭接焊缝时,焊枪姿态的示教往往占据了大量的示教时间,特别是对于空间曲线焊缝。为此,本文提出了一种焊枪姿态的简便示教方法。该方法采用根据几何约束来计算焊接时焊枪姿态的思路,先以任意焊枪姿态对焊缝进行示教,通过对示教点插值获得焊缝的位置点,然后根据焊缝的切向矢量和输入的焊接工艺要求的焊枪角度计算出焊接时的焊枪姿态。对于三维焊缝,只有当局部焊接平面与基坐标系的 $Oyz$ 平面不垂直时,需要进行简单的焊枪姿态示教,且示教时只须调整绕工具坐标系一个坐标轴转动的角度即可完成。该方法经适当的调整后,也可适应于其他类型焊缝的焊枪位姿示教。

## 1 焊接时的焊枪姿态描述

为了描述焊枪的位姿,首先需要定义工具坐标系。如图1所示,焊枪上钨极(对于钨极惰性气体保护电弧焊方法)或焊丝(对于钨极惰性气体保护电弧焊方法)的尖端定义为工具中心点(TCP),这一点是机器人的控制点。把工具坐标系 $\{T\}$ 的原点置于TCP。描述焊枪姿态的3个单位矢量定义如下: $z$ 向矢量与焊枪轴线或焊丝中心线共线,且指向焊缝,称为接近矢量 $a$ ;  $y$ 向矢量处于用于指示焊接的前进方向,称为方向矢量 $o$ ; 最后一个矢量称为法线矢量 $n$ ,由矢量的叉乘定义: $n = o \times a$ 。



图1 工具坐标系 $\{T\}$ 的定义

此外,为了简化问题的描述,本文还进行了如下定义。

(1) 焊接方向矢量 $v$ : 局部焊缝的切向矢量,用于描述焊接的前进方向(图1)。

(2) 局部焊接平面 $\Pi$ : 在焊接点附近的局部工件表面所在的平面(图1)。

(3) 标准工具坐标系 $\{T_0\}$ :  $a$ 轴向下且与机器人基坐标系 $\{B\}$ 的 $Oxy$ 平面垂直, $o$ 轴与 $\{B\}$ 的 $y$ 轴平行且具有相同正方向的工具坐标系。

在焊接时,焊枪需要由其他姿态调整到焊接工艺要求的姿态。为了描述焊接时的焊枪姿态,本文定义了工具姿态的几何约束。如图2所示,工具姿态的几何约束包含如下的参数。

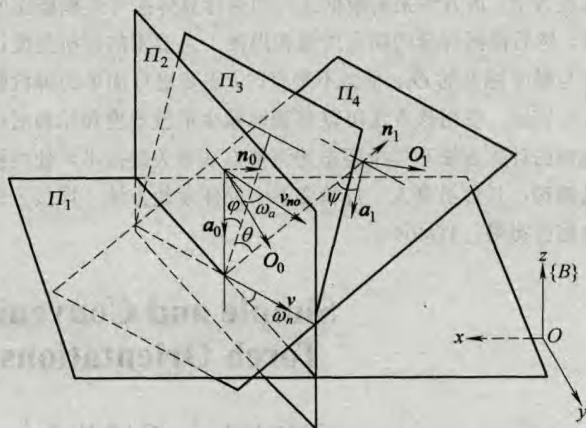


图2 工具姿态的几何约束

(1) 焊接方向角 $\omega_a$ 和 $\omega_n$ : 其中 $\omega_a$ 表示焊接方向矢量 $v$ 在标准工具坐标系 $\{T_0\}$ 的 $no$ 平面上的投影 $v_{no}$ 与 $o$ 轴正方向的夹角; $\omega_n$ 表示矢量 $v$ 与坐标系 $\{T_0\}$ 的 $no$ 平面之间的夹角。

(2) 局部焊接平面方向角 $\varphi$ : 平面 $\Pi_3$ 和平面 $\Pi_2$ 之间的夹角,其中平面 $\Pi_3$ 包含焊接方向矢量 $v$ 且与局部焊接平面 $\Pi$ 垂直,平面 $\Pi_2$ 包含焊接方向矢量 $v$ 且与基坐标系 $\{B\}$ 的 $Oxy$ 平面垂直。

(3) 焊枪工作角 $\theta$ : 平面 $\Pi_4$ 和平面 $\Pi_3$ 之间的夹角,其中平面 $\Pi_4$ 是由焊接时的焊枪轴线和焊接方向矢量 $v$ 所确定的平面。

(4) 焊接行进角 $\psi$ : 在平面 $\Pi_4$ 内,焊枪轴线与焊接方向矢量 $v$ 的垂线之间的夹角。

在这样定义了工具姿态的几何约束后,焊接时第 $i$ 个位置点的焊枪姿态可以用一系列的坐标系旋转变来描述。标准工具坐标系 $\{T_0\}$ 先绕其 $a$ 轴旋转 $\omega_{ai}$ ,旋转后的坐标系再绕其 $n$ 轴旋转 $\omega_{ni}$ 转换为 $\{T'_{0i}\}$ 。此时,坐标系 $\{T'_{0i}\}$ 的 $a$ 轴和 $o$ 轴位于图2中的 $\Pi_2$ 平面内,且其 $o$ 轴与焊接方向矢量 $v_i$ 平行。 $\{T'_{0i}\}$ 称为中间示教工具坐标系。

如果局部焊接平面 $\Pi_i$ 与基坐标系的 $Oyz$ 平面不垂直,则在复现中间示教工具坐标系 $\{T'_{0i}\}$ 的基础上

进行焊枪姿态的简单示教。参照工件在焊缝附近的端面, 只调整坐标系 $\{T'_{0i}\}$ 绕 $o$ 轴的转动角度, 使焊枪与局部焊接平面 $\Pi_i$ 垂直。在这一过程中, 机器人控制器记录机器人在各示教点处绕 $o$ 轴转动的角度, 并进行插值生成各焊缝位置点处绕 $o$ 轴的旋转角度 $\varphi_i$ 。使坐标系 $\{T'_{0i}\}$ 绕其 $o$ 轴旋转 $\varphi_i$ , 旋转后坐标系的 $a$ 轴和 $o$ 轴在图2中的 $\Pi_3$ 平面内, 接着再绕其 $o$ 轴的旋转角度 $\theta$ , 最后, 旋转后坐标系再绕其 $n$ 轴的旋转角度 $\psi$ , 即可获得第 $i$ 个焊缝位置点处焊接时的工具坐标系 $\{T_{1i}\}$ 。

这些坐标系的旋转均绕动坐标系的某一个轴进行, 属于欧拉角描述<sup>[6]</sup>。根据机器人运动学知识, 中间示教工具坐标系 $\{T'_{0i}\}$ 在基坐标系 $\{B\}$ 中的姿态可以用旋转矩阵 ${}^B_{T'_{0i}}R$ 描述

$${}^B_{T'_{0i}}R = {}^B_{T_0}R \times R_a(\omega_{ai})R_n(\omega_{ni}) = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \omega_{ai} & -\sin \omega_{ai} & 0 \\ \sin \omega_{ai} & \cos \omega_{ai} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega_{ni} & -\sin \omega_{ni} \\ 0 & \sin \omega_{ni} & \cos \omega_{ni} \end{pmatrix} \quad (1)$$

焊接时的焊枪姿态用式(2)计算

$${}^B_{T_{1i}}R = {}^B_{T'_{0i}}R \times R_o(\varphi_{ai})R_o(\theta)R_n(\psi) = {}^B_{T'_{0i}}R \times \begin{pmatrix} \cos(\varphi_i + \theta) & 0 & \sin(\varphi_i + \theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\varphi_i + \theta) & 0 & \cos(\varphi_i + \theta) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi & -\sin \psi \\ 0 & \sin \psi & \cos \psi \end{pmatrix} \quad (2)$$

如果所有焊缝位置点位于某一平面内, 且该平面平行于基坐标系的 $Oxy$ 平面, 则式(1)中的 $R_n(\omega_{ni})$ 为单位矩阵。如果在一条焊缝的所有位置点处, 局部焊接平面均垂直于基坐标系的 $Oyz$ 平面, 则式(2)中的 $R_o(\varphi_{ai})$ 为单位矩阵。

在确定焊枪姿态的参数中, 焊接方向角 $\omega_a$ 和 $\omega_n$ 这两个角度由焊接方向矢量确定, 具体计算方法见第2节。焊枪工作角 $\theta$ 和焊接行进角 $\psi$ 则根据焊接工艺的要求通过示教盒设定。由于这两个参数的取值范围均为 $-\pi/2$ 到 $\pi/2$ , 确定它们的正负号, 对操作人员来说会感到困难。可以采用在示教盒界面上选择焊枪轴线所在卦限的方法来简便地确定这两个参数的符号。图3中给出在局部焊接平面上的4个卦限的示意图。

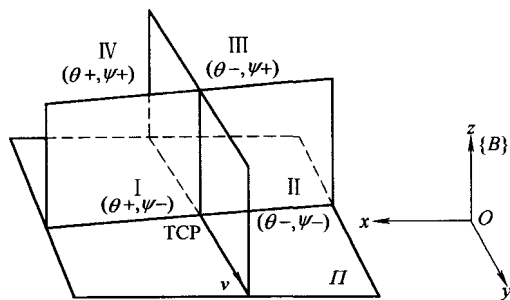


图3  $\theta$ 和 $\psi$ 符号的确定示意图

## 2 焊接方向角的计算

本文使用二次多项式方程拟合局部的焊缝曲线。二次多项式拟合与三次或高次拟合相比, 计算量较小且拟合结果比较稳定; 而与直线拟合相比, 当焊缝的曲率较大时, 则二次多项式的拟合结果较为精确。拟合方法为最小二乘法, 为加快运算速度, 方程中的系数采用解析解进行计算。

设参数方程为

$$\begin{cases} x = c_{x0} + c_{x1}t + c_{x2}t^2 \\ y = c_{y0} + c_{y1}t + c_{y2}t^2 \\ z = c_{z0} + c_{z1}t + c_{z2}t^2 \end{cases} \quad (3)$$

令 $t=0, 1, \dots, 5$ , 使用焊缝位置点中相邻的6个点进行拟合, 并且每次拟合均向后平移1个数据点, 直到6个坐标点中的最后一个点到达所有焊缝位置点中的最后一个点。在每次拟合后计算用于该次拟合的6个坐标点中的第1个坐标点处的焊接方向角; 而对于最后一次拟合, 计算用于该次拟合的6个坐标点中的所有坐标点对应的焊接方向角。

在用最小二乘拟合法计算出式(3)中的系数后, 对式(3)求导可以得到在基坐标系 $\{B\}$ 内的局部焊缝的切向矢量。将该矢量转换到标准工具坐标系 $\{T_0\}$ 内, 根据几何关系可以得到计算焊接方向角 $\omega_a$ 和 $\omega_n$ 的公式为

$$\begin{cases} \omega_a = -\arctan \frac{c_{x1} + 2c_{x2}t_i}{c_{y1} + 2c_{y2}t_i} \\ \omega_n = -\arctan \frac{c_{z1} + 2c_{z2}t_i}{\sqrt{(c_{x1} + 2c_{x2}t_i)^2 + (c_{y1} + 2c_{y2}t_i)^2}} \end{cases} \quad (4)$$

为了在 $360^\circ$ 的范围内正确地计算出焊接方向角, 在这里采用参数形式的方程对焊缝坐标点的 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 坐标分别进行拟合, 并且利用双变量反正切函数 $\arctan(y/x)$ 计算焊接方向角。



### 3 焊枪姿态的调整方法

在已知当前工具姿态的旋转矩阵 ${}^B_{T_c}R$ 和目标工具姿态的旋转矩阵 ${}^B_{T_d}R$ 后,根据文献[7]中的微分运动矢量方程可以计算出从当前姿态到达目标姿态所需的姿态调整量。微分运动矢量方程的公式为

$$(\alpha_x \ \alpha_y \ \alpha_z)^T = \frac{1}{2}(\mathbf{n}_c \times \mathbf{n}_d + \mathbf{o}_c \times \mathbf{o}_d + \mathbf{a}_c \times \mathbf{a}_d) \quad (5)$$

式中, $\alpha_x$ 、 $\alpha_y$ 、 $\alpha_z$ 分别表示绕参考坐标系 $\{B\}$ 中的 $x$ 轴、 $y$ 轴、 $z$ 轴转动的角度, $\mathbf{n}_c$ 、 $\mathbf{o}_c$ 、 $\mathbf{a}_c$ 和 $\mathbf{n}_d$ 、 $\mathbf{o}_d$ 、 $\mathbf{a}_d$ 分别为旋转矩阵 ${}^B_{T_c}R$ 和 ${}^B_{T_d}R$ 中的3个列矢量。

机器人控制器中具有当前工具姿态的旋转矩阵数据。目标工具姿态为在下一焊缝位置点处焊接工艺要求的焊枪姿态。在计算出每个焊缝位置点处的焊接方向角后,根据式(1)、(2)可以计算出下一焊缝位置点处的焊枪姿态的旋转矩阵。在计算出姿态调整量后进行插值以确定姿态增量,再分配到机器人的各轴即可不断调整工具姿态。

值得注意的是,当机器人需要改变较大的姿态才能从当前工具姿态到达目标工具姿态时,使用式(5)计算姿态调整量会产生较大的误差。其本质原因是因为该公式是建立在微分关系基础上的,只有当姿态改变较小时该公式是精确的。为了提高工具姿态调整的精度,比较可行的方法为:在姿态调整过程中,每隔一段时间读取一次机器人的当前工具姿态,并利用该姿态和目标姿态计算新姿态调整量,直到当前姿态和目标姿态之间的差别小于一定的阈值。

### 4 机器人简便示教试验结果

本文提出的这种焊枪姿态的简便示教方法应该在机器人的控制器和示教盒上实现,然而目前商品化的机器人没有提供这种程度的开放接口。因此,本文采用PC机和机器人通信的方法对该示教方法进行了一定的验证。试验机器人为沈阳自动化所生产RH6机器人。

PC机和机器人之间采用CAN总线通信,软件接口为PC机为向机器人发送运动增量数据和读取机器人的位姿数据,其中位姿数据为机器人T6变换矩阵中的 $(o_x \ o_y \ o_z \ a_x \ a_y \ a_z \ p_x \ p_y \ p_z)$ ;运动增量数据为位置增量 $(\Delta p_x \ \Delta p_y \ \Delta p_z)^T$ ,姿态增量 $(\Delta \alpha_x \ \Delta \alpha_y \ \Delta \alpha_z)^T$ 。这里 $\Delta \alpha_x$ 、 $\Delta \alpha_y$ 、 $\Delta \alpha_z$ 分别表示

工具坐标系 $\{T\}$ 绕基坐标系 $\{B\}$ 中的 $x$ 轴、 $y$ 轴、 $z$ 轴转动的角度增量。

为了便于观察试验结果,在试验中采用的搭接焊缝为平面曲线焊缝,图4为应用视觉伺服方法获取的焊缝坐标<sup>[8]</sup>。当设定焊枪工作角 $\theta = -60^\circ$ ,焊接行进角 $\psi = 10^\circ$ 时,计算出的姿态调整量如图5所示。从图5中可以看出,当焊枪从初始的垂直姿态调整到焊接姿态时,绕 $y$ 轴和 $z$ 轴的调整角度均较大,其后,焊枪姿态的调整主要是绕基坐标系 $z$ 轴的转动,这种调整是依据焊接方向矢量的变化而进行的。

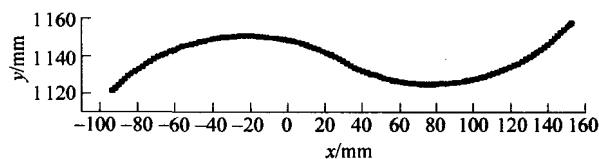
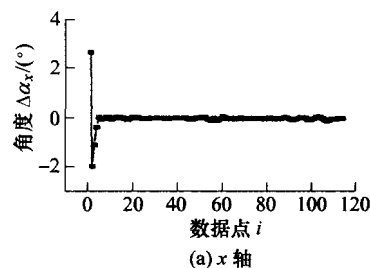
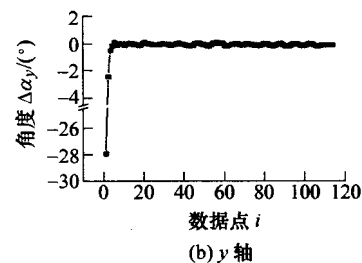


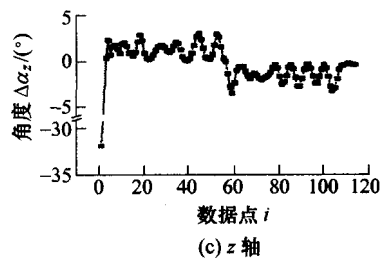
图4 焊缝曲线坐标



(a) x 轴



(b) y 轴



(c) z 轴

图5 平面曲线搭接焊缝对应的姿态调整量曲线

本试验直接证明了对于局部焊接平面始终平行于基坐标系 $Oxy$ 平面的二维焊缝,采用本文提出的方法能够完成焊枪姿态的自动化示教。由本文第1节的分析可知,对于局部焊接平面始终垂直于基

坐标系  $O_{yz}$  平面的三维焊缝, 如拱形的空间焊缝, 本方法同样能够方便地完成焊枪姿态的自动化示教; 而对于局部焊接平面与基坐标系的  $O_{yz}$  平面不垂直的任意三维焊缝, 只需要进行简单的焊枪姿态示教, 即示教时只需要调整机器人绕工具坐标系一个坐标轴转动的角度即可完成。因此, 本方法可以节省大量的示教时间和减小示教的难度。

## 5 结论

(1) 提出一种焊枪姿态的简便示教方法, 该方法先以任意焊枪姿态示教出焊缝的位置点, 然后根据焊缝的切向矢量和输入的焊接工艺要求的焊枪角度计算出焊接时的焊枪姿态。

(2) 该方法可以显著地缩短搭接焊缝的示教难度和示教时间, 提高姿态示教的精确性和生产率。

## 参 考 文 献

- [1] 徐方. 工业机器人产业现状与发展[J]. 机器人技术与应用, 2007, 9: 2-4.  
XU Fang. Actualities and development of industrial robots[J]. Robot Technique and Application, 2007, 9: 2-4.
- [2] 刘圣祥, 高洪明, 张广军. 弧焊机器人离线编程与仿真技术的研究现状及发展趋势[J]. 焊接, 2007, 7: 21-27.  
LIU Shengxiang, GAO Hongming, ZHANG Guangjun. Current status and development trend of off-line programming and simulation technology for arc welding[J]. Welding & Joining, 2007, 7: 21-27.
- [3] KIM P, RHEE S, LEE C H. Automatic teaching of welding robot for free-formed seam using laser vision sensor[J]. Optics and Lasers in Engineering, 1999, 31: 173-182.
- [4] LUO Hong, CHEN Xiaoqi. Laser visual sensing for seam tracking in robotic arc welding of titanium alloys[J]. Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2005, 26: 1 012-1 017.
- [5] PER C, MAGNUS O, GUNNAR B. Virtual triangulation sensor development, behavior simulation and CAR integration applied to robotic arc-welding[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2002, 35: 365-379.
- [6] 约翰 J C. 机器人学导论(英文版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.  
JOHN J C. Introduction to robotics (English version)[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.
- [7] CORKE P I. A robotics toolbox for MATLAB[J]. IEEE Robotics and Automation Magazine, 1996, 3: 24-32.
- [8] ZHOU Lü, LIN Tao, CHEN Shanben. Autonomous acquisition of seam coordinates for arc welding robot based on visual servoing[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications, 2006, 47(3): 239-255.

作者简介: 周律, 男, 1976 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为视觉在线检测技术及焊接自动化设备。

E-mail: zhoulv.sh@gmail.com