骑座相贯线焊接机器人运动学分析及仿真

李晓辉 汪 苏

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院，北京 100191)

摘 要：针对复杂相贯线曲线机器人自动焊接的特殊要求，开发了骑座式相贯线焊接机器人，并通过对机器人结构进行合理简化建立了机器人的D-H连杆坐标系.根据D-H连杆坐标系，推导了机器人的运动学正解方程和逆解方程，并结合机器人关节变量的取值范围，确定了逆解的唯一性.然后通过Matlab仿真软件对机器人的运动学进行了仿真，结果表明所得的机器人正、逆运动学方程完全正确.仿真误差表明所得结果完全可以满足工程需要，为相贯线焊接机器人的轨迹控制和离线编程提供了依据和算法支持.

关 键 词：相贯线；焊接机器人；运动学仿真

中图分类号：TP 242；TG 409

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2008)08-0964-05

Kinematic analysis and simulation of saddle-back coping welding robot

Li Xiaohui Wang Su

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Aiming at the special request of complicated intersection line robot welding, a kind of saddle-back coping welding robot was presented, which has five axes. The robot mechanistic structure was reduced essentially and rationally. The five-axis robot D-H (Denavit-Hartenberg) links' coordinates were established with the reduced robot mechanistic structure. Then the forward solution and the inverse kinematics equations were built according to D-H links' coordinates. The singular solution of inverse kinematics equations was educed associated with the kinematic parameters change range. Programming in the Matlab software according to the forward solution and inverse kinematics equations, the five-axis robot kinematic analysis was simulated. The simulative calculations results indicate that forward solution and inverse kinematics equations are completely accurate. And the simulation accuracy shows that the solution of inverse kinematics equations satisfies the welding project well. It is very important to welding robot and can provide a theoretical basis and supports algorithm for trajectory regulation and off-line programming.

Key words: intersection line; welding robot; kinematic simulation

在大型压力容器和管道工程应用中，相贯线焊缝是十分常用的典型焊缝形式.这种空间曲线焊缝焊接劳动强度大、焊接质量不易保证，因此越来越多地采用机器人进行焊接[1-2].在焊接过程中焊枪的位姿是影响焊接质量的重要因素，因而也是机器人控制的一个重要部分[3-4].现在大多数相贯线机器人采用的是固定形式，少数采用骑座式的机器人；在焊接过程中也只是考虑了焊枪位置，不能实时调整焊枪的姿态；而控制多采用模拟算法或者几何法进行分析，精度差，适应能力不强[5-8].

1 机器人结构设计

对于大型的相贯线构件，由于其自身的重量较大，运动需要较大的动力，工装投入成本也较高，因此在常规焊接工艺条件下都是构件保持静

收稿日期：2007-07-18

作者简介：李晓辉(1978—)，男，河北保定人，博士生，lixiaohui@me.buaa.edu.cn.

止不动.相对而言焊接机器人本身重量不大,可以对机器人进行编程控制,有效的控制其运动方式来达到预期的相贯线轨迹和焊枪姿态[9-10].根据上述情况,采用骑座式焊接机器人结构,即在焊接过程中相贯的筒体保持静止,而机器人通过四爪卡盘固定在相贯筒体上.由于既要控制焊枪姿态又要控制运动轨迹,因此需要 5 个自由度,同时考虑到在线控制的精度和速度要求,采用了如图 1 所示的结构形式.

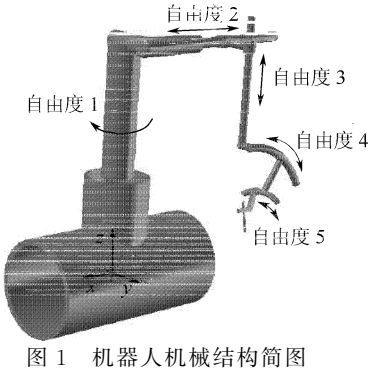


图 1　机器人机械结构简图

图 1 可见,机器人的 5 个自由度如下:自由度 1 是转动关节,可以带动整个机器人围绕相贯筒体轴线旋转;自由度 2 和 3 为 2 个移动关节,分别为水平方向和竖直方向;自由度 4 和 5 的目的是调节焊枪姿态,本文采用了 2 个圆弧导轨,而且圆弧导轨的 2 个中心轴线保持了垂直相交,焊枪末端正好处于两轴线交点处,目的是当单独调节关节 4 和 5 时,焊枪末端的位置不发生变化,可以降低对控制系统的要求.

2　机器人运动学分析

2.1　机器人连杆坐标系建立

机器人的关节 4 和 5 沿圆弧导轨进行移动,可以看作是绕各自导轨中心轴线的旋转运动,因此可以将关节 4 和 5 简化为绕导轨轴线旋转的旋转副.简化后整个机器人就只有旋转副和移动副构成,可以很方便的建立 D-H 连杆坐标系,如图 2 所示.其中参考坐标系 $Ox_0y_0z_0$ 建立在两相贯筒体的轴线交点处,整个机器人的 D-H 参数如表 1 所示.

表 1　机器人的 D-H 参数

i	θ_i	d_i/mm	a_i/mm	α_i	关节范围
1	θ_1	d_1	0	$-\pi/2$	$-\pi\sim\pi$
2	0	d_2	a_2	$-\pi/2$	$+350\sim+885$ mm
3	$-\pi/2$	d_3	a_3	$-\pi/2$	$+1\,110\sim+1\,600$ mm
4	θ_4	d_4	0	$-\pi/2$	$-3\pi/4\sim-\pi/4$
5	θ_5	0	0	$-\pi/2$	$-3\pi/4\sim-\pi/4$

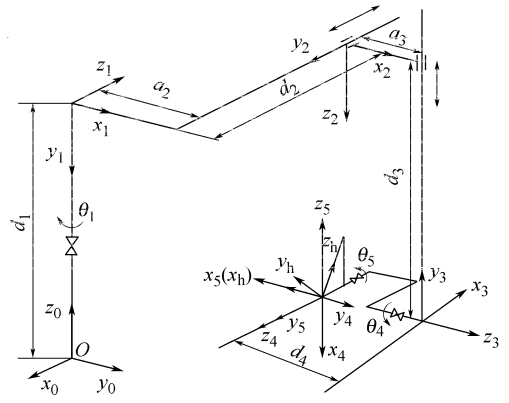


图 2　机器人连杆坐标系

6　0　0　0　η　0

2.2　机器人运动学正问题

根据 D-H 连杆坐标系,可以得到各坐标系之间的变换关系(Rot 和 Tran 分别表示旋转和平移变换):

$$^0\boldsymbol{T}_1=\mathrm{Rot}(z,\theta_1)\cdot\mathrm{Tran}(z,d_1)\cdot\mathrm{Rot}\left(x,-\frac{\pi}{2}\right)=\begin{pmatrix}\cos\theta_1 & 0 & -\sin\theta_1 & 0\\ \sin\theta_1 & 0 & \cos\theta_1 & 0\\ 0 & -1 & 0 & d_1\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{pmatrix}$$

同样方法可得

$$^1\boldsymbol{T}_2=\begin{pmatrix}1 & 0 & 0 & a_2\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & -1 & 0 & d_2\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{pmatrix}$$

$$^2\boldsymbol{T}_3=\begin{pmatrix}0 & 0 & 1 & 0\\ -1 & 0 & 0 & -a_3\\ 0 & -1 & 0 & d_3\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{pmatrix}$$

$$^3\boldsymbol{T}_4=\begin{pmatrix}\cos\theta_4 & 0 & -\sin\theta_4 & 0\\ \sin\theta_4 & 0 & \cos\theta_4 & 0\\ 0 & -1 & 0 & -d_4\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{pmatrix}$$

$$^4\boldsymbol{T}_5=\begin{pmatrix}\cos\theta_5 & 0 & \sin\theta_5 & 0\\ \sin\theta_5 & 0 & -\cos\theta_5 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{pmatrix}$$

由于焊枪坐标系 $Ox_hy_hz_h$ 和坐标系 $Ox_5y_5z_5$ 存在一个夹角 η,因此

$$^5\boldsymbol{T}_h=\begin{pmatrix}1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & \cos\eta & -\sin\eta & 0\\ 0 & \sin\eta & \cos\eta & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{pmatrix}$$

通过上述的矩阵变化,可以得到:

$$ {}^{0}\boldsymbol{T}_{\mathrm{h}}={}^{0}\boldsymbol{T}_{1}\cdot{}^{1}\boldsymbol{T}_{2}\cdot{}^{2}\boldsymbol{T}_{3}\cdot{}^{3}\boldsymbol{T}_{4}\cdot{}^{4}\boldsymbol{T}_{5}\cdot{}^{5}\boldsymbol{T}_{\mathrm{h}}=\begin{pmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{1} $$

其中

$$ n_x=-\cos\theta_1\sin\theta_5-\sin\theta_1\cos\theta_4\cos\theta_5 \tag{2} $$

$$ n_y=\cos\theta_1\cos\theta_4\cos\theta_5-\sin\theta_1\sin\theta_5 \tag{3} $$

$$ n_z=\cos\theta_5\sin\theta_4 \tag{4} $$

$$ o_x=\sin\eta(\cos\theta_1\cos\theta_5-\sin\theta_1\cos\theta_4\cdot\sin\theta_5)+\cos\eta\sin\theta_1\sin\theta_4 \tag{5} $$

$$ o_y=\sin\eta(\sin\theta_1\cos\theta_5+\cos\theta_1\cos\theta_4\cdot\sin\theta_5)-\cos\eta\cos\theta_1\sin\theta_4 \tag{6} $$

$$ o_z=\cos\eta\cos\theta_4+\sin\eta\sin\theta_4\sin\theta_5 \tag{7} $$

$$ a_x=\cos\eta(\cos\theta_1\cos\theta_5-\sin\theta_1\cdot\cos\theta_4\sin\theta_5)-\sin\eta\sin\theta_1\sin\theta_4 \tag{8} $$

$$ a_y=\cos\eta(\sin\theta_1\cos\theta_5+\cos\theta_1\cdot\cos\theta_4\sin\theta_5)+\sin\eta\cos\theta_1\sin\theta_4 \tag{9} $$

$$ a_z=\cos\eta\sin\theta_4\sin\theta_5-\sin\eta\cos\theta_4 \tag{10} $$

$$ p_x=a_2\cos\theta_1-a_3\sin\theta_1-d_2\sin\theta_1-d_4\cos\theta_1 \tag{11} $$

$$ p_y=a_2\sin\theta_1+a_3\cos\theta_1+d_2\cos\theta_1-d_4\sin\theta_1 \tag{12} $$

$$ p_z=d_1-d_3 \tag{13} $$

公式(1)~(13)即为运动学的正解方程.可以通过给定各个关节变量来求得机器人焊枪末端的位姿.

2.3 机器人运动学逆问题

通过给定机器人末端位姿来求解各个关节变量的过程为机器人运动学的逆问题.下面来分析运动学的逆解方程.

由式(13)可求得

$$ d_3=d_1-p_z \tag{14} $$

由式(11)和(12)进行整理得:

$$ p_x=(a_2-d_4)\cos\theta_1-(a_3+d_2)\sin\theta_1 \tag{15} $$

$$ p_y=(a_2-d_4)\sin\theta_1+(a_3+d_2)\cos\theta_1 \tag{16} $$

然后将两式进行平方相加得到:

$$ p_x^2+p_y^2=(a_2-d_4)^2+(a_3+d_2)^2 \tag{17} $$

由于 d_2 的取值范围为正值,因此

$$ d_2=\sqrt{p_x^2+p_y^2-(a_2-d_4)^2}-a_3 \tag{18} $$

式(15)和式(16)两边分别相除并化简得:

$$ \frac{\sin\theta_1}{\cos\theta_1}=\frac{(a_2-d_4)p_y-(a_3+d_2)p_x}{(a_3+d_2)p_y+(a_2-d_4)p_x} \tag{19} $$

因此可得

$$ \theta_1=\arctan\frac{(a_2-d_4)p_y-(a_3+d_2)p_x}{(a_3+d_2)p_y+(a_2-d_4)p_x}+k\pi \tag{20} $$

其中 $k=0,\pm1$.

由于 $\theta_1=[-\pi,\pi]$,因此将 $-\frac{\pi}{2},\frac{\pi}{2}$ 作为分界点进行考虑可以分为以下几种情况:

1) 当 $(a_2-d_4)p_y-(a_3+d_2)p_x<0$ 且 $(a_3+d_2)p_y+(a_2-d_4)p_x<0$ 时,$\theta_1\in\left[-\pi,-\frac{\pi}{2}\right]$.因此

$$ \theta_1=\arctan\frac{(a_2-d_4)p_y-(a_3+d_2)p_x}{(a_3+d_2)p_y+(a_2-d_4)p_x}-\pi \tag{21} $$

2) 当 $(a_2-d_4)p_y-(a_3+d_2)p_x>0$ 且 $(a_3+d_2)p_y+(a_2-d_4)p_x<0$ 时,$\theta_1\in\left[\frac{\pi}{2},\pi\right]$.因此

$$ \theta_1=\arctan\frac{(a_2-d_4)p_y-(a_3+d_2)p_x}{(a_3+d_2)p_y+(a_2-d_4)p_x}+\pi \tag{22} $$

3) 当 $(a_3+d_2)p_y+(a_2-d_4)p_x>0$ 时,$\theta_1\in[-\pi/2,\pi/2]$.因此

$$ \theta_1=\arctan\frac{(a_2-d_4)p_y-(a_3+d_2)p_x}{(a_3+d_2)p_y+(a_2-d_4)p_x} \tag{23} $$

可以很方便的求得

$$ {}^{0}\boldsymbol{T}_{1}^{-1}=\begin{pmatrix} \cos\theta_1 & \sin\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & d_1 \\ -\sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} $$

$$ {}^{5}\boldsymbol{T}_{\mathrm{h}}^{-1}=\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\eta & \sin\eta & 0 \\ 0 & -\sin\eta & \cos\eta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} $$

用 ${}^{0}\boldsymbol{T}_{1}^{-1}$ 左乘、${}^{5}\boldsymbol{T}_{\mathrm{h}}^{-1}$ 右乘公式(1)的右端和中间部分,则右端为

$$ {}^{0}\boldsymbol{T}_{1}^{-1}\cdot{}^{0}\boldsymbol{T}_{\mathrm{h}}\cdot{}^{5}\boldsymbol{T}_{\mathrm{h}}^{-1}=[\boldsymbol{K}\quad\boldsymbol{L}\quad\boldsymbol{M}\quad\boldsymbol{N}] \tag{24} $$

其中

$$ \boldsymbol{K}=\begin{pmatrix} \cos\theta_1\cdot n_x+\sin\theta_1\cdot n_y \\ -n_z \\ \cos\theta_1\cdot n_y-\sin\theta_1\cdot n_x \\ 0 \end{pmatrix} \qquad \boldsymbol{N}=\begin{pmatrix} \cos\theta_1\cdot p_x+\sin\theta_1\cdot p_y \\ d_1-p_z \\ \cos\theta_1\cdot p_y-\sin\theta_1\cdot p_x \\ 1 \end{pmatrix} $$

$$\boldsymbol{L}=\begin{pmatrix}\cos\eta(\cos\theta_1\cdot o_x+\sin\theta_1\cdot o_y)-\sin\eta(\cos\theta_1\cdot a_x+\sin\theta_1\cdot a_y)\\ \sin\eta\cdot a_z-\cos\eta\cdot o_z\\ \sin\eta(\sin\theta_1\cdot a_x-\cos\theta_1\cdot o_y)-\cos\eta(\sin\theta_1\cdot o_x-\cos\theta_1\cdot o_y)\\ 0\end{pmatrix}$$

$$\boldsymbol{M}=\begin{pmatrix}\cos\eta(\cos\theta_1\cdot a_x+\sin\theta_1\cdot a_y)+\sin\eta(\cos\theta_1\cdot o_x+\sin\theta_1\cdot o_y)\\ \cos\eta\cdot a_z-\sin\eta\cdot o_z\\ -\cos\eta(\sin\theta_1\cdot a_x-\cos\theta_1\cdot a_y)-\sin\eta(\sin\theta_1\cdot o_x-\cos\theta_1\cdot o_y)\\ 0\end{pmatrix}$$

中间部分为

$${}^0\boldsymbol{T}_1^{-1}\cdot{}^0\boldsymbol{T}_1\cdot{}^1\boldsymbol{T}_2\cdot{}^2\boldsymbol{T}_3\cdot{}^3\boldsymbol{T}_4\cdot{}^4\boldsymbol{T}_5\cdot{}^5\boldsymbol{T}_{\mathrm{h}}\cdot{}^5\boldsymbol{T}^{-1}={}^1\boldsymbol{T}_5=\begin{pmatrix}-\sin\theta_5 & 0 & \cos\theta_5 & a_2-d_4\\ -\cos\theta_5\sin\theta_4 & -\cos\theta_4 & -\sin\theta\sin\theta_5 & d_3\\ \cos\theta_4\cos\theta_5 & -\sin\theta_4 & \cos\theta_4\sin\theta_5 & a_3+d_2\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{pmatrix}\tag{25}$$

由式(24)和式(25)的对应元素相等可得

$$\theta_5=k\pi+\arctan\{(-\cos\theta_1\cdot n_y-\sin\theta_1\cdot n_y)/[\cos\eta(\cos\theta_1\cdot a_x+\sin\theta_1\cdot a_y)+\sin\eta(\cos\theta_1\cdot o_x+\sin\theta_1\cdot o_y)]\}\tag{26}$$

其中 $k=0,\pm1$.

$$\theta_4=k\pi+\arctan\{[\cos\eta(\sin\theta_1\cdot o_x-\cos\theta_1\cdot o_y)-\sin\eta(\sin\theta_1\cdot a_x-\cos\theta_1\cdot a_y)]/(\cos\eta\cdot o_z-\sin\eta\cdot a_z)\}\tag{27}$$

其中 $k=0,\pm1$.

由于 $\theta_5\in\left[-\frac{3\pi}{4},-\frac{\pi}{4}\right]$,因此将 $-\frac{\pi}{2}$ 作为分界点进行考虑可以分为以下 2 种情况:

1) 当 $-\cos\theta_1\cdot n_x-\sin\theta_1\cdot n_y<0$ 且 $\cos\eta\cdot(\cos\theta_1\cdot a_x+\sin\theta_1\cdot a_y)+\sin\eta(\cos\theta_1\cdot o_x+\sin\theta_1\cdot o_y)<0$ 时,$\theta\in\left[-\frac{3\pi}{4},-\frac{\pi}{2}\right]$. 因此

$$\theta_5=-\pi+\arctan\{(-\cos\theta_1\cdot n_x-\sin\theta_1\cdot n_y)/[\cos\eta(\cos\theta_1\cdot a_x+\sin\theta_1\cdot a_y)+\sin\eta(\cos\theta_1\cdot o_x+\sin\theta_1\cdot o_y)]\}\tag{28}$$

2) 当 $\cos\eta(\cos\theta_1\cdot a_x+\sin\theta_1\cdot a_y)+\sin\eta\cdot(\cos\theta_1\cdot o_x+\sin\theta_1\cdot o_y)>0$ 时,$\theta_5\in\left[-\frac{\pi}{2},-\frac{\pi}{4}\right]$. 因此

$$\theta_5=\arctan\{(-\cos\theta_1\cdot n_x-\sin\theta_1\cdot n_y)/[\cos\eta(\cos\theta_1\cdot a_x+\sin\theta_1\cdot a_y)+\sin\eta(\cos\theta_1\cdot o_x+\sin\theta_1\cdot o_y]\}\tag{29}$$

由于 $\theta_4\in\left[-\frac{3\pi}{4},-\frac{\pi}{4}\right]$,因此将 $-\frac{\pi}{2}$ 作为分界点进行考虑可以分为以下 2 种情况:

1) 当 $\cos\eta(\sin\theta_1\cdot o_x-\cos\theta_1\cdot o_y)-\sin\eta(\sin\theta_1\cdot a_x-\cos\theta_1\cdot a_y)<0$ 且 $\cos\eta\cdot o_z-\sin\eta\cdot a_z<0$ 时,$\theta_4\in\left[-\frac{3\pi}{4},-\frac{\pi}{2}\right]$. 因此

$$\theta_4=\arctan\{[\cos\eta(\sin\theta_1\cdot o_x-\cos\theta_1\cdot o_y)-\sin\eta(\sin\theta_1\cdot a_x-\cos\theta_1\cdot a_y)]/(\cos\eta\cdot o_z-\sin\eta\cdot a_z)\}-\pi\tag{30}$$

2) 当 $\cos\eta(\sin\theta_1\cdot o_x-\cos\theta_1\cdot o_y)-\sin\eta(\sin\theta_1\cdot a_x-\cos\theta_1\cdot a_y)<0$ 且 $\cos\eta\cdot o_z-\sin\eta\cdot a_z>0$ 时,$\theta_4\in\left[-\frac{\pi}{2},-\frac{\pi}{4}\right]$. 因此

$$\theta_4=\arctan\{[\cos\eta(\sin\theta_1\cdot o_x-\cos\theta_1\cdot o_y)-\sin\eta(\sin\theta_1\cdot a_x-\cos\theta_1\cdot a_y)]/(\cos\eta\cdot o_z-\sin\eta\cdot a_z)\}\tag{31}$$

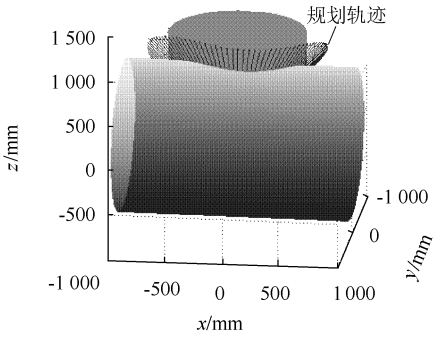
其中方程(14),(18),(21)~(23),(28)~(31)即为运动学的逆解方程,通过这些方程可以求出应用当前位姿的各个关节的运动量.

3　运动学仿真

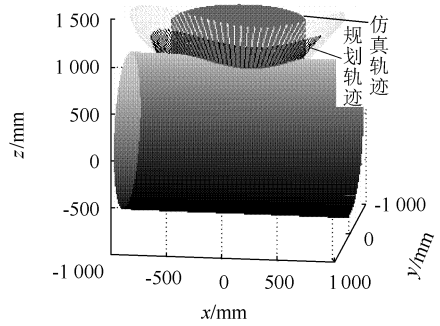
机器人的运动学仿真是为了动态模拟焊接过程中机器人焊枪的运动关系,为机器人的实际焊接做准备工作. 运动学仿真的过程为:先给出一组规划好的焊枪轨迹,然后通过运动学逆解方程求出 5 个关节变量的值,最后将得到的关节变量值代入正解方程中得到焊枪轨迹. 通过与给定的轨迹进行比较可以分析运动规划的正确性和合理性. 本文运用 Matlab 强大的仿真功能进行机器人的运动学仿真.

实际设计中机器人具体参数为 $d_1=1\,477$ mm,$a_2=50$ mm,$a_3=116$ mm,$d_4=75$ mm,$\eta=\frac{\pi}{6}$,焊接的筒体半径分别为 $r=600$ mm,$R=800$ mm. 本文给定的轨迹是焊枪始终与相贯线焊缝坐标系的 z 轴始终重合[6],如图 3a. 通过图 3b 中运动仿真得到的焊枪位姿与规划位姿对比可分析出机器人运动轨迹的规划是正确的.

图 4a 是运动仿真过程中焊枪端点在参照坐标系中的位置与规划位置的对比. 从图中分析,焊枪端点可以很准确的达到规划位置,x,y 和 z 三



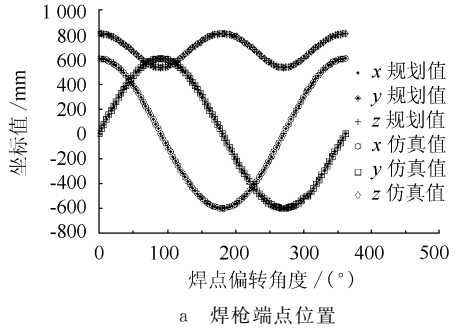
a 焊枪规划轨迹



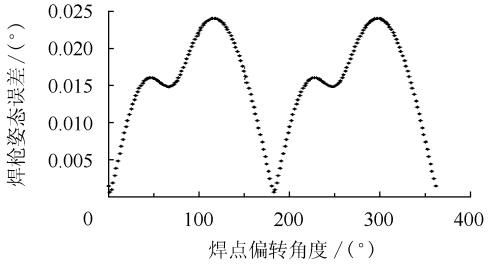
b 规划轨迹与仿真轨迹对比

图 3 焊枪轨迹运动学仿真

个方向上的误差都非常小.图 4b 是焊枪的姿态误差,由图中可以看到焊枪姿态的误差在 120°和 300°附近出现 2 次峰值,这是由这些位置的正弦值和余弦值非常接近引起的,但最大值也只有 0.025°左右,因此完全可以满足工程上的要求.



a 焊枪端点位置



b 焊枪姿态误差角

图 4 仿真误差分析

4 结束语

从相贯线的机器人焊接技术要求出发,建立了两虚拟轴的骑座式相贯线焊接机器人系统,推导出适合于机器人轨迹控制和离线编程的机器人运动学正解方程和逆解方程.通过 Matlab 仿真分析了运动学方程的误差,说明了推导出的运动学方程精度较高,适合于应用到实际工程的控制中.

参考文献(References)

[1] 姚杰.机器人在焊接相贯线时的无碰撞轨迹规划[J].机械工程与自动化,2006,27:73-74
Yao Jie. Collision-free trajectory planning in 3-D space for welding robot[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2006,27:73-74(in Chinese)

[2] 霍孟友,岳少剑,王新港.复杂相贯线接缝自动焊接的运动控制算法[J].焊接学报,2006,27(12):9-12
Huo Mengyou, Yue Shaojian, Wang Xingang. Movement control algorithm of automatic welding for complex intersection seam[J]. Transactions of the China Welding Institution,2006,27(12):9-12(in Chinese)

[3] 陈强,路井荣,孙振国,等.弧焊机器人焊炬姿态规划系统的研究[J].中国机械工程,2002,13(11):956-958
Chen Qiang, Lu Jingrong, Sun Zhenguo, et al. Study on torch pose planning system for arc welding robot[J]. China Mechanical Engineering, 2002,13(11):956-958(in Chinese)

[4] 陈志翔,卢振洋,殷树言,等.焊缝位姿及焊枪位姿的模型[J].机械工程学报,2003,39(7):59-62
Chen Zhixiang, Lu Zhenyang, Yin Shuyan, et al. Models of weld pose and welding gun pose[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003,39(7):59-62(in Chinese)

[5] Maekawa Hitoshi, Yamamoto Katsushi, Nakata Shuji. Torch trajectory generation along weld line in off-line programming system of arc welding robot[J]. Yosetsu Gakkai Ronbunshu/Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 1989, 7: 102-109

[6] Ventzas D E. Computer control software for pipe line construction industry[J]. Modelling, Measurement & Control B, 1994, 53:1-11

[7] Li W, Jaschek H, Wloka D. Modification of the roberts' algorithm for the graphical animation of robots[J]. Robotersysteme, 1990, 6:76-80

[8] Zhang Hua. Study of pedrailed intelligent arc welding robot system[J]. Robot Technique and Application, 2002(1):13-16

[9] Jiang Lipei. Flexible magnetic wheel type intelligent welding robot for spherical tank[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002(2):173-176

[10] 吴林,孔宇.焊接位置与焊丝方位定义的讨论及几何建模研究[J].机械工程学报,1997,33(5):49-53
Wu Lin, Kong Yu. Definition and geometric model of welding position and torch orientation[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1997, 33(5): 49-53(in Chinese)

(责任编辑:文丽芳)