

基于空间等距线的焊接机器人轨迹优化

刘 杰^{1,2}, 胡绳荪^{1,2}, 申俊琦^{1,2}, 庑宇赜^{1,2}, 陈昌亮³

(1. 天津大学 材料科学与工程学院,天津 300072; 2. 天津大学 天津市现代连接技术重点实验室,天津 300072; 3. 天津职业技术师范大学 天津市高速切削与精密加工重点实验室,天津 300222)

摘 要: 针对球管相贯焊缝焊接机器人多道多层焊接中示教时间过长的问题,开展了等距线法机器人焊接轨迹规划的研究,提出了一种基于 B 样条空间等距线的轨迹优化方法. 在机器人轨迹规划中,将前一道机器人焊接时局部修改过的轨迹投影到理论轨迹的拟合平面,将拟合平面上计算得到的投影曲线法向量作为求解下一道等距线轨迹的实际轨迹法向量;在指定端点切矢条件下,利用最小二乘法生成 B 样条曲线以逼近等距线,利用等距线生成机器人运动轨迹,从而有效地减少示教时间. 结果表明,利用该方法得到的机器人焊接轨迹能够满足球管相贯焊缝焊接要求.

关键词: 球管相贯焊缝; 轨迹优化; B 样条; 等距线; 最小二乘法

中图分类号: TG 409 **文献标识码:** A **doi:**10.12073/j.hjxb.20151115001

0 序 言

核电压力容器封头与圆管连接的焊缝坡口采用 J 形坡口,需要进行多道多层焊接^[1]. 应用天津大学自主研发的球管相贯焊缝专用焊接机器人实现了 J 形坡口焊缝的自动化焊接^[2-3]. 根据核电压力容器封头结构,通过球管相贯线的数学模型可以自动生成机器人焊接理论轨迹曲线^[4]. 在多道多层焊时,操作人员需要在每道焊缝施焊前,在理论轨迹的基础上对机器人运动轨迹进行在线示教修正^[5]. 但由于加工、焊接误差等影响,理论轨迹曲线与实际轨迹偏差较大,示教修正过程耗时严重. 如何减少每道焊缝的在线修正时间成为提高机器人焊接效率的瓶颈问题.

之前在多道多层焊接机器人运动轨迹在线修正时,都是以球管相贯线数学模型得到的理论轨迹为基础,因此,每道焊缝在线修正存在大量的重复修正过程,导致示教时间长. 为此,文中提出了新的空间等距线机器人轨迹在线示教方法. 该方法的基本思想是基于实际工程结构安装后,两道相邻焊缝焊接的机器人运动轨迹特征相似,利用前一道焊缝修正轨迹的等距线逼近后一道机器人焊接运动轨迹. 通过保留前一道机器人运动轨迹的修正特征,得到与实际轨迹更为相近的理论轨迹,可以有效降低后一

道焊缝机器人运动轨迹的示教时间.

由于等距线计算没有封闭解,目前普遍利用各种样条曲线逼近等距线^[6-10]. 所在课题组之前设计的 B 样条逼近算法是利用等曲线弧长准则对原 B 样条曲线取样,用向心算法计算取样点的等距点,计算该等距点的 3 次 B 样条曲线,在给定全局误差限下去除多余控制顶点得到最终的等距线^[10]. 该方法在拟合精度和控制顶点数量达到很好的效果,但该方法并未考虑对插值点切矢的控制,无法保证机器人运动轨迹在起点与终点的光滑性,难以满足焊接工艺的需要.

文中提出了一种带约束的最小二乘法进行 B 样条拟合的算法进行机器人焊接轨迹优化.

1 等距线轨迹优化

给定一条 B 样条曲线 $C(u)$, 即

$$C(u) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(u)P_i, u \in [0,1] \tag{1}$$

式中: $N_{i,p}(u)$ 为第 i 个 p 次 B 样条基函数. 该曲线由 $n+1$ 个控制顶点 $P_0, P_1, \cdots, P_n$ 和节点向量 U 定义,节点向量 U 为

$$U = \{ \underbrace{0, 0, \cdots, 0}_{p+1}, u_{p+1}, \cdots, u_n, \underbrace{1, 1, \cdots, 1}_{p+1} \} \tag{2}$$

式中: u_n 为曲线上节点. 该 B 样条曲线的等距线可定义为

$$C(u)_{\text{offset}} = C(u) + d \cdot N(u) \tag{3}$$

式中: $N(u)$ 为参数为 u 时曲线的单位法向量; d 为

收稿日期: 2015-11-15
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50975195);天津市应用基础及前沿技术研究计划资助项目(10JCYBJC06500)

等距量; $C(u)_{\text{offset}}$ 为 $C(u)$ 的等距线.

1.1 空间曲线法向量

平面曲线的等距点可直接由式(3)求解,空间曲线等距点算法较为复杂. 核电封头中的球管相贯曲线为空间曲线,经局部修改的轨迹曲线上各点主法向量如图 1 所示. 由图 1 可以看出,局部修改点的引入导致修改点附近各点的主法向量发散,若继续沿该方向计算等距点会使等距线产生较大的波动,从而影响焊接效果.

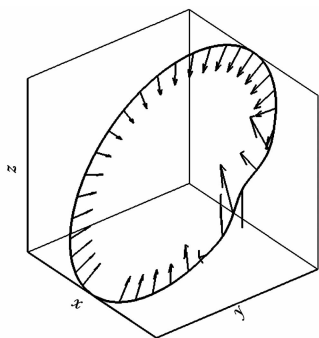


图 1 局部修改后各点主法向量

Fig. 1 Principal normal of points on modified curve

核电封头中的球管相贯曲线是空间曲线,但是核电封头球半径与圆管管径之比约为 27:1,圆管管径相对球径较小. 经计算,若将空间曲线拟合为平面曲线,最大偏差仅为 1.01 71 mm,为工程允许偏差范围内^[5]. 因此可以将球管相贯焊缝曲线近似为平面曲线.

机器人在线轨迹示教过程中,若将局部修改后的轨迹投影至理论轨迹拟合平面上,在平面内计算投影轨迹的法向量将有效解决空间曲线主法向量发散的问题. 并且,以投影轨迹法向量作为实际轨迹法向量来求解等距线可以达到如下效果.

(1) 等距线从局部修改轨迹上的插值点等距外廓,保持了前一道轨迹局部修改特征.

(2) 等距线外廓方向与理论轨迹拟合平面平行,故等距线不会在多次等距后产生很大波动.

正是因为这种方法具有上述特点,利用投影轨迹计算实际轨迹法向量可以在局部修改特征和理论轨迹特征之间达到很好的平衡. 图 2 为用该方法计算的法向量示意图,图中虚线为局部修改后轨迹,实线为投影曲线,灰色平面为拟合平面.

1.2 B 样条拟合

对于曲线拟合问题,普遍采用插值或逼近算法:插值方法计算速度快,但在插值点之间曲线误差较大;逼近算法计算量大,但曲线在整体范围逼近效果

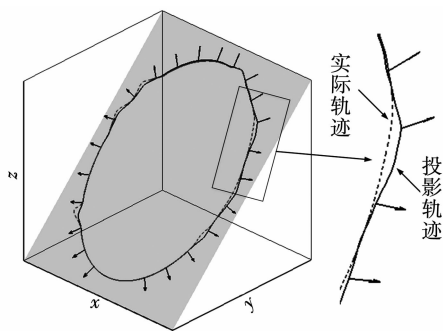


图 2 拟合平面法向量

Fig. 2 Normal vector on fit plane

较好,而且就 B 样条而言,用逼近方法拟合 B 样条曲线可以在一定误差范围内去除多余控制顶点,使曲线的形式更加简单^[6].

球管相贯焊缝焊接机器人运动轨迹为首尾相接的环形轨迹,焊接工艺不仅要求起点与终点位置重合,同时要求两点至少达到一阶连续,文中采用带约束的最小二乘法进行 B 样条拟合.

1.2.1 端点导矢计算

令 $C^{(k)}(u)$ 表示 $C(u)$ 的 k 阶导矢,则可以通过计算基函数的 k 阶导矢来得到 $C^{(k)}(u)$,经推导,可得到 B 样条曲线的一阶导矢为

$$C'(u) = \sum_{i=0}^{n-1} N_{i+1,p-1}(u) Q_i \quad (4)$$

其中 Q_i 定义为

$$Q_i = p \frac{P_{i+1} - P_i}{u_{i+p+1} - u_{i+1}} \quad (5)$$

假设 B 样条在起点和终点处的导矢分别为 D_0 和 D_m ,则由上述公式计算可得到

$$\begin{cases} D_0 = \frac{P}{u_{p+1}}(-P_0 + P_1) \\ D_m = \frac{P}{1 - u_{m-p-1}}(-P_{n-1} + P_n) \end{cases} \quad (6)$$

1.2.2 B 样条逼近

在进行全局逼近前需计算好插值点对应的参数值并生成节点矢量. 考虑到相邻插值点间距离往往不同,将采用弦长参数化方法以及平均值方法计算节点向量.

(1) 插值点对应参数,即

$$\begin{aligned} \bar{u}_0 &= 0, \bar{u}_n = 1, \\ \bar{u}_k &= \bar{u}_{k-1} + \frac{|Q_k - Q_{k-1}|}{d}, k = 1, 2, \dots, n-1 \end{aligned} \quad (7)$$

式中: Q 为插值点; $\bar{u}$ 为相应参数; d 为总弦长.

$$d = \sum_{k=1}^n |Q_k - Q_{k-1}| \quad (8)$$

(2) 节点向量为

$$\begin{aligned} u_0 = \cdots = u_p = 0, u_{m-p} = \cdots = u_m = 1, \\ u_{j+p} = \frac{1}{p} \sum_{i=j}^{j+p-1} u_i, j = 1, 2, \cdots, n-p \end{aligned} \quad (9)$$

将插值点参数化并计算出节点向量后,便可建立最小二乘问题来得到控制顶点^[9]. 给定端点切矢 D_0 和 D_m 及控制顶点 $Q_i (i = 0, 1, \cdots, m)$ 且 $m > n + 2$ (指定端点切矢将增加 2 个控制顶点), 则逼近过程即寻求一条 B 样条曲线, 即

$$C(u) = \sum_{i=0}^{n+2} N_{i,p}(u) P_i, u \in [0, 1] \quad (10)$$

同时满足下列条件, 即

$$(1) Q'_0 = D_0, Q'_m = D_m.$$

$$(2) Q_0 = C(0), Q_m = C(1).$$

(3) 其余插值点被逼近 B 样条曲线, 即

$$f = \sum_{k=1}^{m-1} |Q_k - C(\bar{u}_k)|^2 \quad (11)$$

关于 $n + 3$ 个变量 P_i 达到最小.

由于两端插值点与样条曲线重合, 故控制顶点 P_0, P_{n+2} 与两端插值点重合; 同时由于端点切矢指定, 由式(6)可知, P_0 与 P_1 以及 P_{n+1} 与 P_{n+2} 两两相关, 因此 P_1, P_{n+1} 位置因此固定.

f 是关于 $n - 1$ 个控制顶点 $P_2, \cdots, P_n$ 的函数, 根据最小二乘技术, 为使 f 最小, 令 f 关于 $n - 1$ 个未知控制顶点 P_l 的偏导都为 0, 即

$$\frac{\partial f}{\partial P_l} = \sum_{k=1}^{m-1} (-2N_{l,p}(\bar{u}_k) R_k + 2N_{i,p}(\bar{u}_k) P_i) \quad (12)$$

式中: $R_k = Q_k - N_{0,p}(\bar{u}_k) Q_0 - N_{n,p}(\bar{u}_k) Q_m, k = 1, \cdots, m - 1$.

进一步推导得到

$$\sum_{i=2}^n \left(\sum_{k=1}^{m-1} N_{l,p}(\bar{u}_k) N_{i,p}(\bar{u}_k) \right) P_i = \sum_{k=1}^{m-1} N_{l,p}(\bar{u}_k) R_k \quad (13)$$

该式是一个以控制顶点 $P_2, \cdots, P_n$ 为未知量的线性方程, 令 $l = 1, 2, \cdots, n - 1$, 则得到含 $n - 1$ 个未知量和 $n - 1$ 个方程的线性方程组

$$(N^T N) P = R \quad (14)$$

式中: N 是一个 $(m - 1) \times (n - 1)$ 的矩阵; R 是一个由 $n - 1$ 个点组成的列向量, 即

$$N = \begin{bmatrix} N_{2,p}(\bar{u}_1) & \cdots & N_{n,p}(\bar{u}_1) \\ \vdots & & \vdots \\ N_{2,p}(\bar{u}_{m-1}) & \cdots & N_{n,p}(\bar{u}_{m-1}) \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$R = \begin{bmatrix} N_{2,p}(\bar{u}_1) R_1 + \cdots + N_{n,p}(\bar{u}_{m-1}) R_{m-1} \\ \vdots \\ N_{2,p}(\bar{u}_1) R_1 + \cdots + N_{n,p}(\bar{u}_{m-1}) R_{m-1} \end{bmatrix} \quad (16)$$

通过求解该线性方程组即可得到控制顶点 $P_2, \cdots, P_n$, 结合之前求得的 P_0, P_1, P_{n+1} 和 P_{n+2} 即可得到拟合的 B 样条曲线.

在原轨迹上等弦长选取 100 个采样点, 利用投影轨迹算法向量, 用 25 个控制顶点逼近等距点, 最终等距线如图 3 所示.

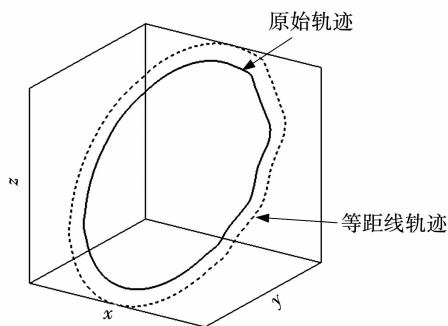


图 3 B 样条等距线

Fig. 3 Offset B-spline

2 轨迹优化效果及分析

图 4 为理论轨迹与实际轨迹以及等距线轨迹与实际轨迹对比, 图中虚线分别代表等距线轨迹和理论轨迹, 实线代表实际轨迹. 由于等距线轨迹保留了前一道轨迹的修改特征, 所以其更贴合实际轨迹, 逼近效果更好.

在对等距线轨迹及理论轨迹示教过程中, 均匀采集 36 个示教点, 在示教点读取各轴电机编码值并计算示教点空间坐标. 比较在示教点处等距线与实际轨迹以及理论轨迹与实际轨迹的偏差, 结果见表 1. 由于两道相邻轨迹特征相似, 故等距线轨迹更加接近于实际轨迹, 平均偏差、全局偏差及偏差标准差均有大幅度下降, 这可以缩短示教时间.

利用工件倾角为 20° 的模拟件进行焊接试验, 采用前述方法对轨迹进行优化并人工示教, 平均示教修正点个数由先前的 23 个减少为 16 个, 示教时间也由 40 min 缩短为 30 min 左右, 示教时间缩短了 25%. 相邻两道焊缝图像如图 5 所示. 由图 5 可以看出, 焊道排列整齐, 外形美观, 质量良好.

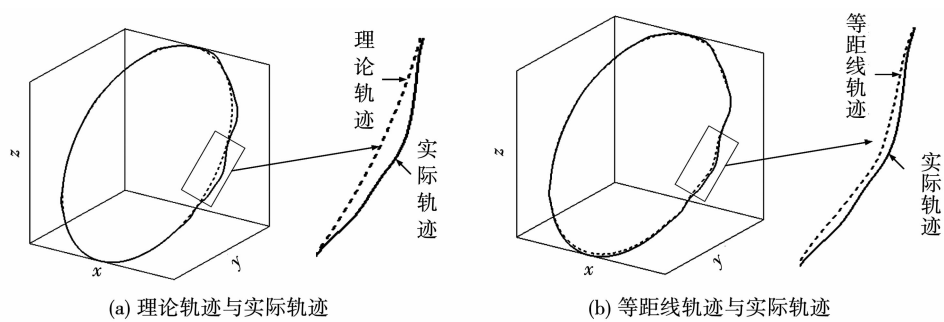


图 4 等距线轨迹与理论轨迹对比

Fig. 4 Comparison between offset B-spline trajectory and theoretical trajectory

表 1 等距线轨迹及理论轨迹偏差

Table 1 Errors of offset trajectory and theoretical trajectory

类别	最大偏差 $\Delta_{\max}/\text{mm}$	平均偏差 $\Delta_{\text{avg}}/\text{mm}$	标准差 σ/mm	偏差和 Σ/mm
理论轨迹	4.48	1.35	2.27	48.6
等距线轨迹	2.73	0.61	1.05	21.96

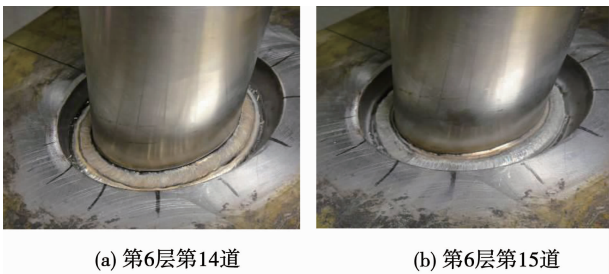


图 5 相邻两道焊缝

Fig. 5 Two adjacent weld passes

3 结 论

(1) 利用投影方法计算轨迹法向量,可以有效解决空间曲线主法向量发散问题. 利用最小二乘法逼近固定端点位置及切矢的 B 样条曲线生成轨迹的空间等距线,可以保证等距线轨迹的光滑性.

(2) 利用等距线生成机器人运动轨迹可以使其与实际轨迹偏差和由 48.6 mm 降至 21.96 mm,偏差标准差由 2.27 mm 降至 1.05 mm,等距线轨迹更加接近实际轨迹.

(3) 对比原有的示教方法,采用新的示教方法,示教时间缩短了 25%,提高机器人轨迹示教效率.

参考文献:

[1] 冯英超,石爱强,王 挺,等. 核电站安装施工中自动化焊

接技术应用分析[J]. 电焊机, 2009, 39(8): 27–29.

Feng Yingchao, Shi Aiqiang, Wang Ting, *et al.* Application and analysis of automatic welding technology in nuclear power plant construction[J]. Electric Welding Machine, 2009, 39(8): 27–29.

[2] Chen C L, Hu S S, He D L, *et al.* Kinematic analysis and trajectory planning of J-groove welding robot[J]. Transactions of Tianjin University, 2012, 18(5): 350–356.

[3] 胡绳荪,王明建,申俊琦,等. J 形坡口焊接机器人运动控制系统设计[J]. 天津大学学报, 2014, 47(4): 89–92.

Hu Shengsun, Wang Mingjian, Shen Junqi, *et al.* Design of J-groove welding robot motion control system[J]. Journal of Tianjin University, 2014, 47(4): 89–92.

[4] 赵 洁,胡绳荪,丁 炜,等. 基于 MATLAB 的球管相贯空间曲线焊缝的数学模型[J]. 焊接学报, 2011, 32(8): 89–92.

Zhao Jie, Hu Shengsun, Ding Wei, *et al.* Mathematical modeling of the intersection seam of sphere and tube based on MATLAB[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(8): 89–92.

[5] Chen C L, Hu S S, He D L, *et al.* An approach to the path planning of tube-sphere intersection welds with the robot dedicated to J-groove joints[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2012, 29(4): 41–48.

[6] Piegl L A, Tiller W. Computing offsets of NURBS curves and surfaces[J]. Computer-Aided Design, 1999, 31(2): 147–156.

[7] Xu X D, Li J J, Zhang H. A new NURBS offset curves and surfaces algorithm based on different geometry shape[C]//IEEE 10th International Conference on Computer-Aided Industrial Design & Conceptual Design. Wenzhou, China: IEEE, 2009: 2384–2390.

[8] Khan M A, Chen Z C. Approximation of planar offset curves with globally bounded error for B-spline NC tool paths[J]. International Journal of Production Research, 2012, 50(23): 6811–6825.

[9] Piegl L A, Tiller W. The NURBS Book. 2nd[M]. New York: Springer, 1997.