

基于动态焊缝切线法的大曲率弯曲焊缝跟踪

柳 健, 洪 波, 洪宇翔, 李 毅

(湘潭大学 复杂轨迹加工工艺及装备教育部工程研究中心, 湘潭 411105)

摘 要: 针对轮式移动焊接机器人在造船、大型球罐焊接等工业生产中的大曲率弯曲焊缝跟踪问题,在采用小波实时降噪的基础上,结合焊缝切线法的思路和滑模变结构控制方法提出了动态焊缝切线法,并且通过 Matlab 仿真分析和试验验证,证明了该方法能够以固定步长实时修正焊接小车驱动轮的速度,保证焊炬沿大曲率弯曲焊缝轨迹跟踪效果较好的前提下切线速度大小基本不变,提高了焊缝质量,实现了弯曲焊缝的实时自动跟踪. 为轮式移动焊接机器人在复杂轨迹的焊缝自动跟踪应用方面提供了一种新的理论思路.

关键词: 移动焊接机器人; 焊缝跟踪; 小波准实时降噪; 焊缝切线法

中图分类号: TG 409 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2016)01-0055-04

0 序 言

焊缝跟踪是焊接自动化的一个很重要的研究领域. 在大型舰船舱体、甲板、船身、大型球罐的焊接中存在大量弯曲焊缝. 实现对这些弯曲焊缝的自动跟踪,并且尽量保持焊接速度恒定是保证焊接效率与焊缝质量的必要条件. 轮式移动焊接机器人具有机构简单、适应性强、灵活性高等特点. 因此,将轮式移动焊接机器人用于弯曲焊缝跟踪已成为焊接自动化领域的一个重要研究方向^[1,2].

电弧传感轮式机器人是利用电弧本身作为传感器的非完整约束机构. 它允许机器人的某些关节无驱动,可以大大降低机器人的制造成本、重量和能耗,提高了机器的灵活性. 但目前还缺乏系统完善的分析方法,难以建立精确的数学模型^[3].

通过对电弧传感的移动式焊接机器人的执行机构与信号处理进行分析,提出了动态焊缝切线法. 并通过 Matlab 仿真与焊缝跟踪试验证明了该方法的可行性与正确性.

1 移动机器人系统组成

移动焊接机器人焊缝跟踪系统如图1所示. 该系统主要由移动焊接机器人、旋转电弧传感器、焊机、送丝机、计算机、数据采集卡和运动控制卡等部分组成. 系统的工作过程为:旋转电弧传感器控制

电弧在焊缝坡口上旋转扫描,由霍尔传感器提取反映坡口扫描信息的信号,经数据采集卡将传感信号转化为数字信号,并将其送入到计算机中,对该数字信号进行实时小波在线降噪处理后,由其计算获取焊缝偏差,经过控制器得到十字滑块和车轮的控制量,并经过运动控制卡,控制伺服电动机驱动车轮和十字滑块运动,从而实现焊缝跟踪.

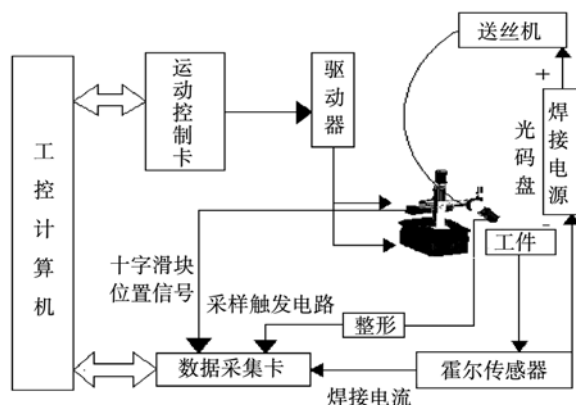


图1 移动焊接机器人跟踪系统组成

Fig. 1 Seam tracking system composition of mobile welding robot

所采用的轮式移动焊接机器人由焊接小车和十字滑块组成,具有4自由度,可实现直线、弯曲以及折线焊缝的跟踪. 移动小车采用两后轮独立驱动,前轮则采用万向轮结构,焊接小车的转弯半径由两后轮速度控制,为了保证跟踪的精度以及焊缝的质量,将具有纵、横向跟踪调节功能且结构惯性小的十

字滑块超前于两后轮安置于焊车上,更有利于快速、准确的跟踪大转折、大曲率的焊缝^[4],控制也较简单、合理。

2 动态焊缝切线法基本原理

动态焊缝切线法的基本思路是旋转电弧传感器控制电弧在焊缝坡口上旋转扫描,由霍尔电流传感器提取反映坡口扫描信息的焊接电流信号,经数据采集卡将焊接电流信号转化为数字信号,对该数字信号进行实时小波在线递推降噪处理后,由其计算获取焊缝偏差信息,并修正以确定的焊缝偏差值 e_{k-2}, e_{k-1}, e_k ,采用最小二乘法获得的偏差预测值 e''_{k+1} ,实时获得最佳焊缝偏差值 e_{k+1} , k 为 k 时刻,当横向滑块移动的距离 d 超过设定的阈值 u (横向滑块中心为参考点)时,如果焊缝偏差的符号与上一周期的偏差符号相反且 $(|e_{k+1}| - |e_k|)/T$ 小于设定的阈值 b ,则横向滑块向其中心方向移动,小车直行, T 为控制周期;如果焊缝偏差的符号与上一周期的偏差符号相同或 $(|e_{k+1}| - |e_k|)/T$ 大于或等于设定阈值 b 时,按定步长方式调整焊接小车与滑块,确保焊炬始终以一定速率沿大曲率弯曲焊缝中心线的切向运动实现焊缝的自动跟踪。

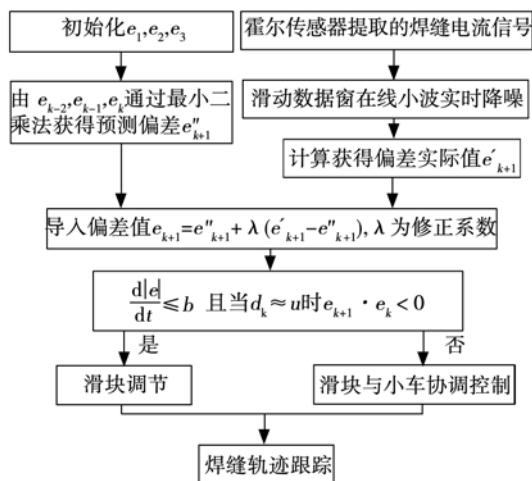


图2 动态焊缝切线法流程图

Fig. 2 Flow diagram of the method of dynamic tangent to weld seam

3 动态焊缝切线法

3.1 小波实时降噪

文中采用小波变换阈值降噪法进行实时降噪处理,选用 db4 小波基以及 6 层小波分解层数,小波分

解系数 a 通过软硬阈值折中法进行阈值处理, $0 < a < 1$, 当 a 分别为 0 和 1 时,即为硬阈值法和软阈值法,取 a 为 0.5 (并非最佳),采用固定的阈值形式的 sqtwolog 规则,产生的阈值大小是 $\lambda = \sigma \sqrt{2 \lg n}$ ^[5],其中 σ 是噪声信号的标准差, n 是信号的长度,滑动固定窗口宽度设为 256。

由图 3 可见,小波降噪后的电流波形和原始焊接电流波形吻合较好,反映出了原信号的低频变化趋势,满足信号降噪要求。

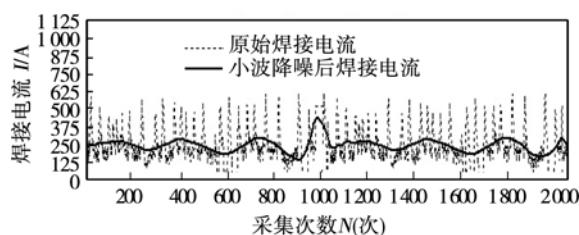


图3 小波降噪后焊接电流波形

Fig. 3 Welding current waveform after real-time wavelet de-noising

3.2 机器人轨迹跟踪控制

在相对较短时间内,焊接机器人的运动距离很短,将焊接小车的运动看做平移和旋转的组合,由 A 平移到 C,在 C 点旋转,在平移到 B,假设 AC 等于 BC. $v_{E(k-1)}$ 为在 $k-1$ 时刻焊接小车的移动速度, T 为控制周期, l_k 为表示横向十字滑块在 k 时刻的伸出长度。据文献[6]可得当前时刻车体的移动方向与焊缝走向的偏差,即

$$\alpha = \arctan \frac{l_k - l_{k-1}}{v_{E(k-1)} T} \quad (1)$$

为了使移动焊接机器人沿焊缝中心线切向移动,见图 4,其偏转角度为 $\theta = 2\alpha$ 。

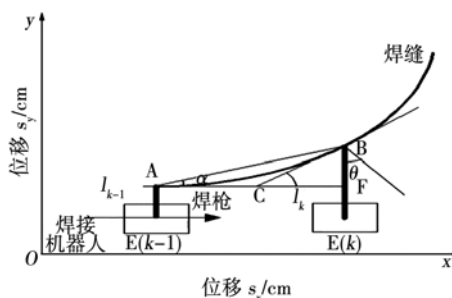


图4 车体与焊缝位置关系

Fig. 4 Position relationship between welding tractor and welding line

如图 5 建立世界坐标系 XOY ,在十字滑块固定

的位置建立焊接移动机器人的坐标系 $x_e O_e y_e$, 对焊接机器人的速度积分可得其质心下一时刻的位姿为

$$\left. \begin{aligned} x_{k+1} - x_k &= \int_0^T v_E \cos(\theta + \theta_0) dt \\ y_{k+1} - y_k &= \int_0^T v_E \sin(\theta + \theta_0) dt \\ \theta_{k+1} - \theta_k &= \int_0^T \omega_k dt \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: x_k, y_k 为时刻 k 质心的坐标; v_E 和 ω_k 分别为焊接小车当前的移动速度和角速度; θ 是时间 t 的函数, 满足 $\theta = \theta_k + \omega_k t$; θ_k 为 k 时刻焊接小车偏转角度; θ_0 为初始偏转角。

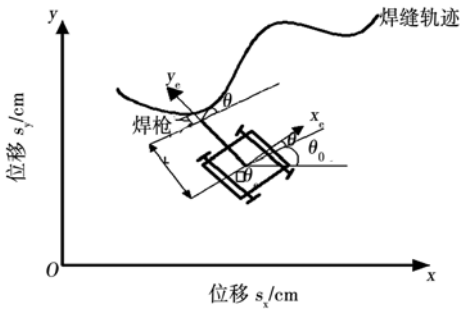


图5 机器人跟踪轨迹示意图

Fig. 5 Seam tracking path diagram of welding robot

当横向滑块移动的距离 d 小于设定的阈值 u (横向滑块中心为参考点) 时, 焊接小车的角速度 $\omega = 0$, 则

$$\left. \begin{aligned} x_{k+1} &= x_k + v_E T \cos \theta_k \\ y_{k+1} &= y_k + v_E T \sin \theta_k \\ \theta_{k+1} &= \theta_k \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

当横向滑块移动的距离 d 大于设定的阈值 u (横向滑块中心为参考点), $\omega \neq 0$ 时

$$\left. \begin{aligned} x_{k+1} &= x_k + \frac{v_E}{\omega_k} (\sin \theta_{k+1} - \sin \theta_k) \\ y_{k+1} &= y_k + \frac{v_E}{\omega_k} (\cos \theta_k - \cos \theta_{k+1}) \\ \theta_{k+1} &= \theta_k + \omega_k T \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

当横向滑块调节量为 ΔL , 焊接机器人质心 $[x_E, y_E, \theta + \theta_0]$ 与焊炬 $[x_T, y_T, \theta_T]$ 之间有如下位置关系, 即

$$\left. \begin{aligned} x_T &= x_E - (L + \Delta L) \sin(\theta + \theta_0) \\ y_T &= y_E + (L + \Delta L) \cos(\theta + \theta_0) \\ \theta_T &= \theta + \theta_0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: L 为焊枪横向初始长度。

如图5所示, 当前焊枪前端与目标点的位姿误差为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x'_e \\ y'_e \\ \theta'_e \end{bmatrix} &= v_{lc} \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} + \frac{L + y_e}{H} \\ -\frac{x_e}{H} \\ -\frac{1}{H} \end{bmatrix} + v_{rc} \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} - \frac{L + y_e}{H} \\ \frac{x_e}{H} \\ \frac{1}{H} \end{bmatrix} \\ &\quad + \begin{bmatrix} v_r \cos \theta_e \\ v_r \sin \theta_e - v_h \\ \theta'_r \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: v_{lc} 为左后轮的速度; v_{rc} 为右后轮的速度; v_h 为横向滑块的移动速度; H 为焊接小车两驱动轮的间距; θ_e 为当前偏转角; v_r 为焊枪参考速度。

令控制参数 k_1, k_2, k_3, k_4 为非负常数, 采用滑模变结构控制方法实现控制, 取切换函数: $s = \theta_e$, 指数趋近率 s' , 令 $s' = -k_1 \text{sgns} - k_2 s$, 设

$$\left. \begin{aligned} v_{lc} + v_{rc} &= 2v_r \cos \theta_e + 2L\theta'_r + 2Ls'/b + k_3 x_e s^2 \\ v_{lc} - v_{rc} &= H\theta'_r - k_1 \text{sgns} - k_2 s \\ v_h &= k_4 y_e + v_r \sin \theta_e \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: θ_r 为参考偏转角度。

由运动学模型, 构造 Lyapunov 函数, 即

$$V = x_e^2/2 + y_e^2/2 + k_3 \theta_e^2/2 \quad (8)$$

对函数求导有

$$V' = x_e x'_e + y_e y'_e + k_3 \theta_e \theta'_e \quad (9)$$

联立式(6) - 式(10) 得

$$V' = -k_3 k_1 |s| - (k_3 k_2 + \frac{1}{2} k_3 x_e^2) s^2 - k_4 y_e^2 \leq 0$$

因此, 在控制律式(8) 的作用下, 控制系统全局渐近稳定。

旋转电弧传感器仅可以检测到 y_e , 因此需做如下处理: (1) 假设焊枪或其延长线与焊缝相交, 即 x_e 始终为0; (2) 预先设定焊枪参考速度 v_r , 参考偏转角速度 θ'_r 。

将 k 时刻目标点的位置设为 $y_r^{(k)}, x_r^{(k)}$, 则可对 $\theta_r^{(k)}$ 进行如下估计, 即

$$\begin{aligned} \theta_r^{(k)} &= 2 \arctan \frac{y_r^{(k)} - y_r^{(k-1)}}{x_r^{(k)} - x_r^{(k-1)}}, \text{ 其中 } (x_r^{(k)} > x_r^{(k-1)}) \\ \theta_e^{(k)} &= \theta_r^{(k)} - \theta_T^{(k)} \\ \theta_r^{(k)} &= (\theta_r^{(k)} - \theta_r^{(k-1)})/T \end{aligned} \quad (10)$$

代入式(8) 即可求得当前时刻的控制量。其中 $v_E = \frac{v_{lc} + v_{rc}}{2}$, $\omega = \frac{v_{lc} - v_{rc}}{H}$ 。

4 仿真结果分析

为了验证该模型的有效性, 基于 Matlab 对模型

进行仿真研究. 试验中控制参数 k_1, k_2, k_3, k_4 分别取 0.78, 0.85, 1.6, 0.49; 焊枪前端初始位置为 $(0, 0, \pi/6)$; 参考速度 $v_r = 40$ cm/min, 焊枪横向初始长度 $L = 30$ cm, 两驱动轮间距 $H = 20$ cm. 轨迹跟踪仿真结果和跟踪误差如图 6a, 图 6b 所示.

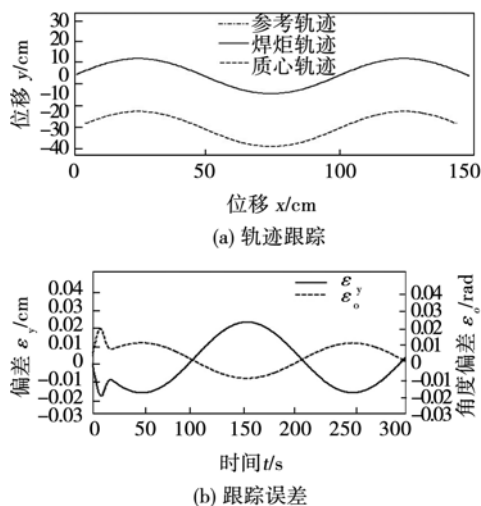


图 6 正弦曲线跟踪结果

Fig. 6 Simulation results on sine wave seam tracking

如图 6 所示, ε_y 成正弦规律变化这主要是因为当前时刻的 θ_r 由焊枪前一时刻参考位置和当前时刻参考位置估计计算所得, 存在一定滞后性, 在曲率最大处, 对应跟踪误差最大, 从图 6 中亦可看出 ε_y 最大值约为 0.02 cm, 满足弯曲焊缝跟踪的要求.

5 试验结果

为了验证动态焊缝切线法模型的焊缝跟踪效果, 利用旋转电弧传感器提取偏差信息, 采用动态焊缝切线法焊接正弦焊缝. 焊接试验有关参数: 焊机采用唐山松下 KR350, 保护气体为 CO_2 , 焊接速度为 40 cm/min, 电弧电压 25 V, 焊接电流 240 A, 旋转半径为 3 mm, 旋转频率 6 Hz. 图 7 为动态焊缝切线法

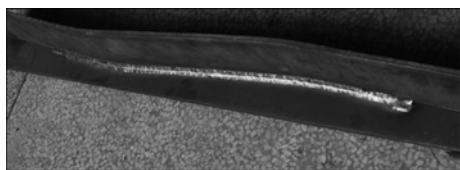


图 7 焊缝轨迹跟踪

Fig. 7 Experimental result on welding seam tracking

的焊缝跟踪效果图.

由图 7 可得焊缝跟踪过程较稳定, 焊缝成形均匀, 对中性好, 避免了因延时导致跟踪不及时, 引起的焊缝在弯曲处对中性差的情况.

6 结 论

(1) 小波变换阈值降噪法可以满足焊接信号降噪的光滑性、相似性以及实时性的要求.

(2) Matlab 仿真与焊缝自动跟踪试验结果验证了动态焊缝切线法模型的有效性.

(3) 动态焊缝切线法可以在保证大曲率弯曲焊缝自动跟踪过程中的焊缝质量的前提下, 实现焊缝自动跟踪, 为轮式移动焊接机器人应用于复杂轨迹焊缝自动跟踪提供了参考依据.

参考文献:

- [1] 李 原, 徐 德, 李 涛, 等. 一种基于激光结构光的焊缝跟踪视觉传感器[J]. 传感技术学报, 2005, 18(3): 488-492.
Li Yuan, Xu De, Li Tao, *et al.* On visual sensors for welding seam tracking based on laser structured light[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2005, 18(3): 488-492.
- [2] 王麟琨, 徐 德, 韩加强, 等. 基于工业焊接小车的视觉伺服控制算法研究[J]. 高科技通讯, 2005, 15(11): 23-29.
Wang Linkun, Xu De, Han Jiaqiang, *et al.* Research of visual servoing control algorithms for industrial welding vehicles[J]. Chinese High Technology Letters, 2005, 15(11): 23-29.
- [3] Niku Saeed B. Introduction to robotics analysis and systems applications[J]. Computer and Industrial Engineering, 1999, 37: 453-456.
- [4] 廖宝剑. 弯曲及折线焊缝的自动跟踪[J]. 中国机械工程, 1994, 5(2): 32-34.
Liao Baojian. Auto Tracking of curved and fold seam[J]. China Mechanical Engineering, 1994, 5(2): 32-34.
- [5] Donoho D L, Johnstone I M. Ideal spatial adaption by wavelet shrinkage[J]. Biometrika, 1994, 81: 425-455.
- [6] 高延峰, 张 华, 肖建华. 移动机器人弯曲角焊缝跟踪预测模糊控制器设计[J]. 机械工程学报, 2010, 46(23): 23-29.
Gao Yanfeng, Zhang Hua, Xiao Jianhua. Design of predictive fuzzy controller for curved fillet welding seam tracking based on a mobile robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(23): 23-29.

作者简介: 柳 健, 男, 1989 年出生, 硕士研究生. 主要研究方向为焊接设备及其自动化. Email: ljxtu1989@163.com

通讯作者: 洪 波, 男, 博士, 教授. Email: hongbo@xtu.edu.cn