

# 基于旋转电弧轮式焊接机器人运动学建模及仿真\*

洪 波<sup>1</sup>, 何秀全<sup>1</sup>, 李湘文<sup>1</sup>, 刘 新<sup>2</sup>, 洪宇翔<sup>1</sup>

(1. 湘潭大学 机械工程学院, 湖南 湘潭 411105; 2. 湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412008)

**摘要:** 旋转电弧轮式焊接机器人的焊炬执行机构由十字滑块和小车左右差速驱动轮两个运动单元构成。针对其机构设计的稳定性以及可控性等问题, 根据运动特点推导出焊炬的运动学模型, 由旋转电弧焊缝跟踪原理应用 Matlab/Simulink 进行焊缝跟踪仿真, 实现了机构设计以及控制方法对焊缝跟踪的影响。仿真结果证明了该模型的有效性和正确性, 为旋转电弧移焊接机器人的机构设计、稳定性分析以及控制器设计提供了理论依据。

**关键词:** 旋转电弧; 运动学; 焊接机器人; 建模仿真

中图分类号: TP242.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2010)04-0038-03

## Kinematics model and simulation based on the rotating arc of welding wheeled robot

HONG Bo<sup>1</sup>, HE Xiu-quan, LI Xiang-wen<sup>1</sup>, LIU Xin<sup>2</sup>, HONG Yu-xiang<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China;

2. School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412008, China)

**Abstract:** The rotating arc of welding wheeled robot's actuating mechanism of welding torch is formed by two motor units, cross-slider and differential speed of driving wheel. Aiming at the problems of stability of mechanism design and controllability of the rotating arc of welding wheeled robot, at first, based on the movement characteristics, the welding torch's kinematics model was derived, and then by the principle of rotating arc seam tracking, the seam tracking was simulated by Matlab/Simulink. The influence of seam tracking was realized by mechanism design and control methods. Simulation results prove that the kinematics model is effective and correct, and they can also provide theoretical basis for mechanism design, stability analysis and controller design of the arc sensor of welding wheeled robot.

**Key words:** rotating arc; kinematics; welding wheeled robot; modeling and simulation

## 0 引 言

焊接机器人在现代工业制造过程中的应用日趋广泛, 使用效率和经济性在很大程度上决定于自动化的程度。目前国内外大量应用的弧焊机器人系统基本都属于示教再现阶段或离线编程阶段的焊接<sup>[1-4]</sup>。而基于旋转电弧的轮式焊接机器人由于其移动性以及较高的智能, 已成为解决大型焊接结构件自动化焊接的有效方法<sup>[5]</sup>。

目前对旋转电弧轮式焊接机器人还缺乏系统完善的运动学分析, 难以建立精确的数学模型, 更难于仿真模拟。而机器人运动学是机器人动力学、机器人控制和规划的基础, 在机器人研究中占有重要的地位。而且对于机器人的仿真软件(如三维图形动态仿真软件: Workspace5、Robot、Works、Robot Studio 等等), 都是基于 Windows 平台所支持的 OpenGL 而开发的三维图形功能, 对开发人员的专业要求较高<sup>[6-8]</sup>。

本研究通过对旋转电弧的轮式焊接机器人执行机构进行分析, 推导出该模型焊炬的运动学关系, 利用

收稿日期: 2009-11-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50975243); 湖南省科技厅资助项目(2008ck3079)

作者简介: 洪 波(1960-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事焊接方法与设备、机器人与自动化和仿真建模、数值计算等方面的科研和教学工作。

E-mail: xwli@yahoo.cn

Matlab/Simulink 进行仿真模拟。

## 1 运动学模型

旋转电弧轮式焊接机器人是多自由度、多连杆的空间机构,其运动学和动力学问题十分复杂,计算难度和计算量都很大。要在计算机上进行仿真就必须对机器人进行适当的简化,若将机器人的执行机构作为仿真对象将大为简化。简化后的几何模型如图1所示。

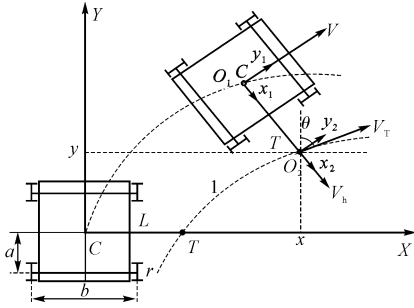


图1 旋转电弧焊接机器人几何模型

$a$ —焊接小车质心到驱动轮间的距离; $b$ —两个驱动轮之间的距离; $r$ —驱动轮的半径; $L$ —焊接小车质心与焊炬之间的距离; $\theta$ —焊接小车的转角; $[x_1 \ y_1]^T$ —机器人质心坐标; $V$ —焊接小车当前移动速度; $[x_2 \ y_2]^T$ —焊炬位置的坐标; $V_r$ —焊炬当前移动速度; $V_h$ —纵向滑快的速度。

假设焊接小车的轮子与地面没有滑动,并且焊接小车的移动方向与两驱动轮轴线垂直,则有:

$$\begin{cases} x'_1 = v \cos \theta \\ y'_1 = v \sin \theta \end{cases} \quad (1)$$

式(1)消去小车速度  $V$  后,得到焊接小车的速度关系:

$$x'_1 \sin \theta = y'_1 \cos \theta \quad (2)$$

当纵向滑快调节量为  $\Delta L$  时,小车质心与焊炬之间有如下位置关系:

$$\begin{cases} x_2 = x_1 + (L + \Delta L) \sin \theta \\ y_2 = y_1 - (L + \Delta L) \cos \theta \end{cases} \quad (3)$$

对式(3)求导可得如下速度关系:

$$\begin{cases} x'_2 = x'_1 + L\theta' \cos \theta + v_h \sin \theta \\ y'_2 = y'_1 + L\theta' \sin \theta - v_h \cos \theta \\ v_h = \Delta L' \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $\Delta l = L$ , 所以有  $L + \Delta l \approx L$ 。

联立式(1)~式(4),可以得到焊炬的速度  $V_T$  关系为:

$$\begin{cases} x'_2 \sin \theta - y'_2 \cos \theta - v_h = 0 \\ V_T = \sqrt{x'^2_2 + y'^2_2} \end{cases} \quad (5)$$

设  $\theta_l$  为左驱动轮的转角,  $\theta_r$  为右驱动轮的转角,则焊接小车的转弯半径与速度关系如图2所示,可将小车的速度  $V$  和焊接小车的角速度  $\theta'$  表示成左右驱动轮的转角模式。由图2可知:

$$R = \frac{(\theta'_l + \theta'_r)b}{(\theta'_l - \theta'_r)2} \quad (6)$$

$$v = (\theta'_l + \theta'_r)r/2 \quad (7)$$

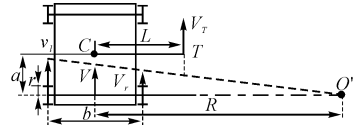


图2 焊接小车的转弯半径与速度关系

在不考虑焊接小车走直线的情况下,即左右驱动轮的角速度不相等( $\theta'_l \neq \theta'_r$ )。此时小车的速度  $V$  和焊接小车的角速度  $\theta'$  可以表示为:

$$\theta' = \frac{(\theta'_l - \theta'_r)r}{b} \quad (8)$$

联立式(4)~式(8),可以得出焊炬在运动过程中的矩阵表达式:

$$\begin{bmatrix} x'_2 \\ y'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{2} + \frac{L}{b}\right)r \cos \theta & \left(\frac{1}{2} - \frac{L}{b}\right)r \cos \theta \\ \left(\frac{1}{2} + \frac{L}{b}\right)r \sin \theta & \left(\frac{1}{2} - \frac{L}{b}\right)r \sin \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta'_l \\ \theta'_r \end{bmatrix} + v_h \begin{bmatrix} \sin \theta \\ -\cos \theta \end{bmatrix} \quad (9)$$

式(9)可以写成广义的雅可比矩阵形式:

$$X' = J\phi' + \Delta \quad (10)$$

式中,  $X' = [x'_2 \ y'_2]^T$ ;  $\phi' = [\theta'_l \ \theta'_r]^T$ ;  $J =$

$$\begin{bmatrix} \left(\frac{1}{2} + \frac{L}{b}\right)r \cos \theta & \left(\frac{1}{2} - \frac{L}{b}\right)r \cos \theta \\ \left(\frac{1}{2} + \frac{L}{b}\right)r \sin \theta & \left(\frac{1}{2} - \frac{L}{b}\right)r \sin \theta \end{bmatrix}; \Delta = v_h \begin{bmatrix} \sin \theta \\ -\cos \theta \end{bmatrix}。$$

上式的广义雅可比矩阵反映了旋转电弧轮式焊接机器人焊炬的速度与驱动轮的转速以及纵向滑快速度之间的关系。由上述的运动学模型可知,通过控制左、右轮的速度就可以控制小车的速度  $V$ 、角速度  $\theta'$  以及焊炬的速度。

## 2 焊缝跟踪 Simulink 仿真

### 2.1 旋转电弧焊缝跟踪原理

在 Simulink 仿真模型中,要用旋转电弧轮式焊接机器人的运动学方程对焊缝跟踪进行仿真就要加入旋转电弧的焊缝跟踪原理。其基本原理为:当任意时刻焊炬与焊缝间的偏差为  $e = \sqrt{x_e^2 + y_e^2}$  时,则焊接小车应

调量的  $\theta_e$  为<sup>[9]</sup>:

$$\theta_e = \arctan\left(\frac{2eT}{(\theta'_l + \theta'_r)r}\right) \quad (11)$$

其中,  $e$  为一矢量, 当  $|e| < u$  ( $u$  为设定的偏差限值), 小车上的执行机构(十字滑架)带动焊炬向减少偏差的方向运动, 但小车上、右轮速度保持不变; 当  $|e| > u$ , 则焊接小车不仅要使执行机构(十字滑架)带动焊炬向减少偏差的方向运动, 而且小车上、右轮速度发生改变, 使焊炬也向偏差减少的方向运动。

### 2.2 焊缝跟踪仿真模型的建立

由运动学方程和焊缝的跟踪原理即可建立旋转电弧的焊缝跟踪仿真模型, 其总体仿真模型如图 3 所示。

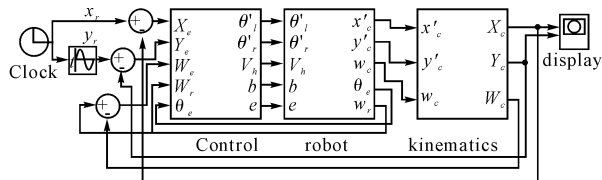


图 3 焊缝跟踪仿真模型

### 3 仿真结果分析

本研究在 Matlab/Simulink 仿真模型中进行了正弦折角复杂焊缝轨迹的实时跟踪仿真。仿真条件为期望焊接速度为  $V_T = 10 \text{ mm/s}$ ,  $\theta' = 0.02 \text{ rad/s}$ , 滑块速度为  $V_h = 0.2 \text{ mm/s}$ , 时间步长  $0.1 \text{ s}$ , 系统结构参数参考实际研制的系统。仿真结果如图 4 所示。

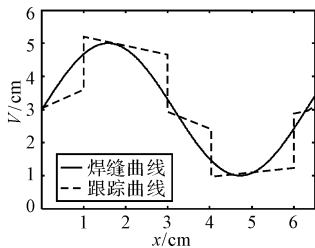


图 4 正弦曲线跟踪结果

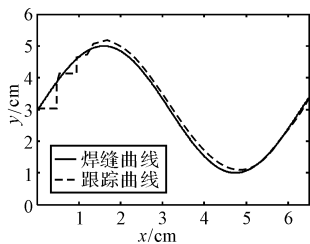


图 5 修改相关参数后的跟踪结果

从图 4 中可以看出, 按上面给定的参数进行跟踪的效果不好, 系统的振荡较大, 鲁棒性较差, 并且跟踪曲线超出了焊缝偏差范围。如适当修改轮式焊接器

人的结构尺寸(如减小  $a$ 、 $b$  和  $L$ ), 或者增大滑块调节速度和减慢焊接速度, 都能达到减小振荡、提高焊缝跟踪精度的效果。对修改后的焊接机器人相关参数进行仿真的结果如图 5 所示。

从图 5 中可以看出, 通过修改小车的结构尺寸, 系统的振荡消除了。仿真结果与实际需要达到的跟踪效果很接近, 调节量少、焊接稳定、灵敏度较高、鲁棒性好。从以上的仿真分析结果可以看出, 对大折角或者复杂的空间焊缝轨迹进行焊缝跟踪的时候, 可以在设计焊接小车的时候考虑减小  $a$ 、 $b$  和  $L$  等参数, 或者在进行控制时对调节机构的执行速度进行修改。

### 4 结束语

本研究针对现有的旋转电弧轮式弧焊机器人逐步推导出焊炬的运动学方程, 由此建立焊接小车的焊缝跟踪仿真模型, 并利用 Matlab/Simulink 对焊缝跟踪进行仿真。仿真结果符合实际要求, 并验证了模型的正确性, 最后通过仿真结果证明了该模型的有效性, 为旋转电弧移焊机器人的机构设计、稳定性分析以及控制器设计提供了理论依据。

### 参考文献 (References):

- [1] 蒋新松. 未来机器人技术方向的探讨[J]. 机器人, 1996, 18(5): 287-291.
- [2] 司现军, 王志良. 移动机器人多传感器信息融合技术综述[J]. 机电工程, 2004, 21(2): 1-5.
- [3] 程永伦, 朱世强, 罗利佳, 等. 基于 Matlab 的 QJ-6R 焊接机器人运动学分析及仿真[J]. 机电工程, 2007, 24(11): 107-110.
- [4] 田劲松, 吴林, 戴明. 弧焊机器人系统的编程分析及其数学建模[C]. 第九次全国焊接会议, 天津: 中国机械工程学会, 1999.
- [5] 宋金虎. 我国焊接机器人的应用与研究现状[J]. 电焊机, 2009, 39(4): 20-20.
- [6] NIKU S B. Introduction to Robotics: Analysis, Systems, Applications[M]. 1st. Upper Saddle River Prentice Hall, 2002.
- [7] 李湘文, 洪波, 尹力, 等. 基于滑模控制器的电弧传感焊接机器人轨迹跟踪控制研究[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(s1): 73-75.
- [8] PASHKEVICH A P, DOLGUI A B, SEMKIN K I. Kinematic aspects of a robot-positioner system in an arc welding application[J]. Control Engineering Practice, 2003, 11(6): 633-647.
- [9] 潘际奎. 现代弧焊控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.

[编辑: 柴福莉]