

箱型钢结构轨道式焊接机器人 D-H 模型与连续轨迹规划

朱志明^{1,2}, 马国锐¹, 刘 晗¹, 刘 博¹

(1. 清华大学 机械工程系,北京 100084; 2. 清华大学 先进成形制造教育部重点实验室,北京 100084)

摘 要: 针对箱型钢的结构特征和焊接过程特点,设计了一款5自由度的轨道式焊接机器人,用于箱型钢结构安装现场的自动化焊接. 采用 D-H 法,建立了机器人运动学模型,并通过特定的代数方法进行了逆运动学求解,推导出了焊枪末端的空间位姿参数与焊接机器人各关节变量的解析关系模型. 在此基础上,采用连续路径运动的轨迹规划法,在给定焊枪末端轨迹时,对各关节的运动情况进行了 MATLAB 仿真研究. 结果表明,导出的逆运动学求解模型可用于箱型钢结构焊接机器人的连续运动轨迹和姿态规划和控制,为实施机器人的运动控制奠定了基础.

关键词: 箱型钢结构; 焊接机器人; 轨迹规划; 运动学模型; 末端位姿

中图分类号: TG 434.5 **文献标识码:** A **doi:**10.12073/j.hjxb.20140824001

0 序 言

箱型钢结构广泛应用于桥梁、高层建筑、大型场馆等工程建设领域. 在箱型钢的车间制造环节,焊接自动化程度较高,可以保证制造精度和焊接质量;但是在现场安装环节,由于现场环境的复杂性,焊接条件恶劣,目前仍以手工焊接为主,从而使焊接过程易受环境和人为因素的影响,焊接质量的稳定性难以保证,并且工人需要高空作业,对人身安全产生极大威胁.

针对箱型钢的结构特征、安装现场的空间位姿多样化和焊接过程的复杂性等,为保证安装现场的焊接质量及其稳定性,设计开发了用于箱型钢结构安装现场自动化焊接的专用轨道式焊接机器人系统^[1]. 焊接机器人的末端位姿、机器人的各关节运行平稳性等是能否高质量地完成预期焊接任务的关键^[2-4],对焊接机器人进行轨迹规划及仿真分析是建立机器人运动控制系统的前提.

1 本体结构与焊接过程轨迹规划

1.1 机器人本体结构

箱型钢结构轨道式焊接机器人的整体机械结构如图 1 所示,包括轨道及其安装机构、行走机构及焊接执行机构等^[1].

环形轨道包括 4 段圆弧轨道与 4 段直线轨道,通过改变直线轨道的长度可以适应不同尺寸的箱型

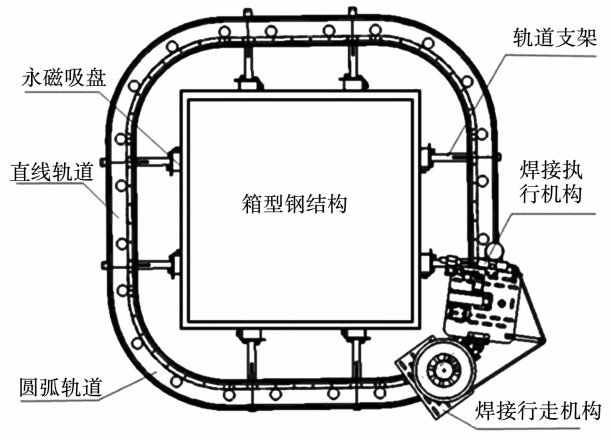


图 1 整体机械结构平面布局
Fig. 1 Plane layout of overall mechanical structure

钢结构的焊接. 轨道通过永磁吸盘和轨道支架固定在钢结构表面,拆装方便;机器人行走机构安装在环形轨道上,可以在轨道上行走移动;焊接执行机构固定在机器人行走机构的移动平台上,如图 2 所示, x 方向滑台用以调整焊枪至工件的距离(高度), z 方向滑台用以调整焊枪在焊缝宽度方向的位置,近端关节主要用来调整焊枪沿焊缝宽度方向的横向摆角,远端关节主要用来调整焊枪沿焊接方向的前后角度;加上机器人行走机构在轨道上的运动,本焊接机器人系统共有 5 个自由度.

1.2 焊接过程运动轨迹规划

焊接过程的运动轨迹规划如图 3 所示. 当移动平台运行于直线轨道上时,焊枪末端在箱型钢结构简图的细线上移动;当移动平台运行于圆弧轨道上

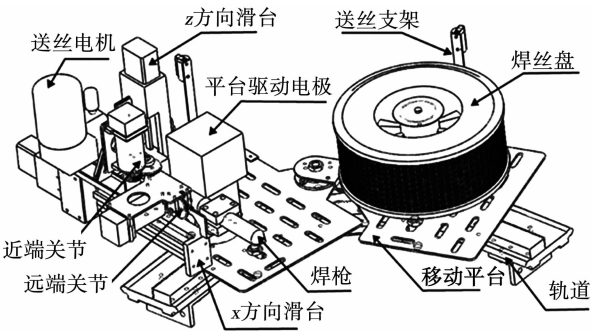


图2 焊接执行机构总体结构

Fig. 2 Overall structure of the welding actuator

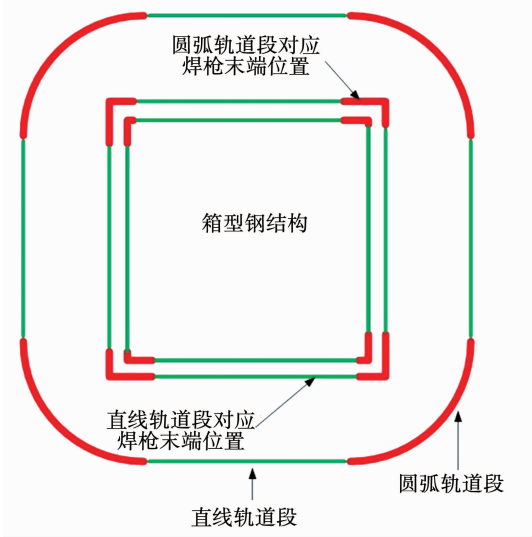


图3 焊接过程轨迹规划示意图

Fig. 3 Schematic diagram of trajectory planning for welding process

时,焊枪末端在箱型钢结构简图的粗线上移动. 由于移动平台的驱动电机与焊接执行机构的 z 轴之间存在一定的偏移量,因此当移动平台在圆弧轨道上移动时,焊枪末端的轨迹在箱型钢转角处并不是前后对称的,增加了运动轨迹规划与控制的复杂性.

对于常规箱型柱的焊接,每一焊道均需进行焊接轨迹规划,理想情况下,当移动平台运行于直线轨道时,焊接轨迹规划比较简单, x 和 z 方向滑台、近端和远端关节均不需要调整,只需控制移动平台在直线轨道上的位置和运动速度即可实现图 3 中直线轨道段的焊接过程;当移动平台运行于圆弧轨道时,焊接轨迹规划相对比较复杂,此时 z 方向滑台和近端关节仍不需要调整,但需要控制 x 方向滑台、远端关节和移动平台在圆弧轨道上的位置,从而实现图 3 中圆弧轨道段的焊接过程. 下面主要对圆弧轨道段的焊接轨迹进行详细规划.

2 焊接机器人运动学模型

建立机器人运动学模型是实现机器人运动轨迹规划的前提,也是建立机器人控制系统的基础. 目前应用最为广泛的机器人建模方法是 D-H 坐标变换法,该方法适用于任何结构的机器人. 文中采用 D-H 法对所设计的焊接机器人进行运动学建模.

2.1 D-H 模型坐标变换与参数

焊接机器人共有 5 个自由度,考虑焊枪末端的空间位置和姿态,共需建立 6 个坐标系 $x_0 - z_0$ 到 $x_5 - z_5$. 对于圆弧轨道段,D-H 模型的坐标变换如图 4 所示,其中, $x_0 - z_0$ 固结于圆弧轨道圆心,为基坐标系; $x_1 - z_1$ 固结于 z 方向滑台; $x_2 - z_2$ 固结于 x 方向滑台; $x_3 - z_3$ 固结于近端转动关节; $x_4 - z_4$ 固结于远端转动关节; $x_5 - z_5$ 固结于焊枪末端. 图 4 中的 y 轴由右手法则确定.

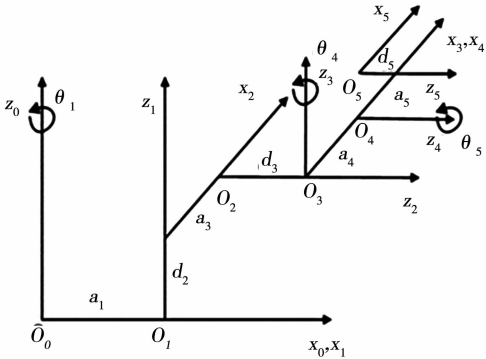


图4 D-H 模型坐标变换

Fig. 4 Coordinatetransformation of D-H model

在 D-H 坐标系中,刚性杆件的表示取决于该杆件的 4 个几何参数 $\theta_i, d_i, a_i, \alpha_i$,这 4 个参数可完全描述任何转动或移动关节.

采用 D-H 表示及坐标变换的前提是确认 D-H 参数表. 表 1 为本 5 自由度焊接机器人圆弧轨道段的 D-H 参数. 对于转动关节, θ_i 是关节变量;对于移动关节, d_i 是关节变量.

表 1 圆弧轨道段 D-H 参数表

Table 1 D-H parameters of arc track section

i	θ	d	a	α
1	θ_1	0	a_1	0°
2	90°	d_2	a_2	90°
3	0°	d_3	0	-90°
4	θ_4	0	a_4	90°
5	θ_5	d_5	a_5	0°

表 1 中, $\theta_1, \theta_4, \theta_5, d_2, d_3$ 为关节变量, 由机器人的关节运动决定; a_1, a_2, a_4, a_5, d_5 为确定值, 由系统的机械结构(圆弧轨道与焊接执行机构)决定, 设计中, $a_1 = 350 \text{ mm}, a_2 = 30 \text{ mm}, a_4 = 50 \text{ mm}, d_5 = -30 \text{ mm}, a_5 = 40 \text{ mm}$.

2.2 机器人运动学模型

建立机器人运动学模型, 就是求解系统的总变换矩阵, 已知总变换矩阵就可以由各个关节参数获得机器人的末端位姿. 对于文中焊接机器人, 各关节的坐标变换矩阵 $T_0^1, T_1^2, T_2^3, T_3^4, T_4^5$ 为

$$\begin{aligned} T_0^1 &= \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & a_1 c_1 \\ s_1 & c_1 & 0 & a_1 s_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & T_1^2 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & a_2 \\ 0 & 1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ T_2^3 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & T_3^4 &= \begin{bmatrix} c_4 & s_4 & 0 & a_4 c_4 \\ s_4 & -c_4 & 0 & a_4 s_4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ T_4^5 &= \begin{bmatrix} c_5 & -s_5 & 0 & a_5 c_5 \\ s_5 & c_5 & 0 & a_5 s_5 \\ 0 & 0 & 1 & d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

为了表达简洁, 令 $s_i = \sin \theta_i, c_i = \cos \theta_i$. 将各坐标变换矩阵 $T_0^1, T_1^2, T_2^3, T_3^4, T_4^5$ 相乘, 可获得系统的总变换矩阵 T , 即

$$T = \begin{bmatrix} -s_{14}c_5 & s_{14}s_5 & c_{14} & u \\ c_{14}s_5 & -c_{14}s_5 & s_{14} & v \\ s_5 & c_5 & 0 & d_2 + a_5 s_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $u = d_5 c_{14} - a_4 s_{14} + a_1 c_1 + d_3 c_1 - a_2 s_1 - a_5 s_{14} c_5$; $v = a_4 s_{14} + a_2 c_1 + a_1 s_1 + d_3 s_1 + a_5 c_{14} c_5$; $c_{14} = \cos(\theta_1 + \theta_4)$; $s_{14} = \sin(\theta_1 + \theta_4)$. 式(2)即机器人的运动学模型.

3 机器人逆运动学分析

所谓逆运动学求解, 就是已知机器人的末端空间特征, 根据机器人运动学模型求取各关节变量的过程. 焊接机器人的末端为焊枪, 焊枪末端的运动轨迹及其空间位姿需要根据钢结构和坡口尺寸、焊接位置、焊接工艺特征及焊缝成形质量等确定.

假设焊接机器人的焊枪末端位姿矩阵 B 在基坐标系 $x_0 - z_0$ 中的表达式为

$$B = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

根据式(2)和式(3)则有

$$T = B \quad (4)$$

由式(4)的两端(3,1),(1,3),(3,4)元素对应相等, 可得

$$n_z = \sin(\theta_5) \quad (5)$$

$$a_x = \arccos(\theta_1 + \theta_4) \quad (6)$$

$$d_2 = p_z - a_5 \sin(\theta_5) \quad (7)$$

对式(4)两端分别左乘 T_0^{-1} , 可得

$$\begin{bmatrix} -c_5 s_4 & s_4 s_5 & c_4 & d_3 + d_5 c_4 - a_4 s_4 - a_5 c_5 s_4 \\ c_4 c_5 & -c_4 s_5 & s_4 & a_2 + a_4 c_4 + d_5 s_4 + a_5 c_4 c_5 \\ s_5 & c_5 & 0 & d_2 + a_5 s_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x c_1 + n_y s_1 & o_x c_1 + o_y s_1 & a_x c_1 + a_y s_1 & p_x c_1 - a_1 + p_y s_1 \\ n_y c_1 - n_x s_1 & o_y c_1 - o_x s_1 & a_y c_1 - a_x s_1 & p_y c_1 - p_x s_1 \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

由式(8)两端(1,4)元素对应相等, 有

$$d_3 = a_4 \sin \theta_4 + a_5 \cos \theta_5 \sin \theta_4 - d_5 \cos \theta_4 + p_x \cos \theta_1 - a_1 + p_y \sin \theta_1 \quad (9)$$

由式(8)两端(1,3),(2,3),(2,4)元素对应相等, 可得

$$\theta_1 = \arcsin \left(\frac{-a_2 m \pm \sqrt{m^2 n^2 + n^4 - a_2^2 n^2}}{m^2 + n^2} \right) \quad (10)$$

式中: $m = d_5 a_x - a_4 a_y - a_5 a_y \cos \theta_5 - p_x$; $n = p_y - d_5 a_y - a_4 a_x - a_5 a_x \cos \theta_5$.

由式(5)、式(6)、式(7)、式(9)、式(10)可确定机器人逆运动学解析关系模型. 得

$$\begin{cases} \theta_1 = \arcsin \left(\frac{-a_2 m \pm \sqrt{m^2 n^2 + n^4 - a_2^2 n^2}}{m^2 + n^2} \right) \\ d_2 = p_z - a_5 \sin(\theta_5) \\ d_3 = a_4 \sin \theta_4 + a_5 \cos \theta_5 \sin \theta_4 - d_5 \cos \theta_4 \\ \quad + p_x \cos \theta_1 - a_1 + p_y \sin \theta_1 \\ \theta_4 = \arccos(a_x) - \theta_1 \\ \theta_5 = \arcsin(n_z) \end{cases} \quad (11)$$

根据式(11), 只要给定了机器人的焊枪末端位姿矩阵, 就可以求出各关节变量.

4 焊枪末端运动轨迹仿真

焊接机器人在进行箱型钢结构焊接时, 焊枪末端的运动轨迹、速度和位姿是连续的, 因此需要采用连续路径运动的轨迹规划法确定各关节变量的运动规律. 将实际焊接工艺所要求的焊枪末端轨迹平分

为多个点,然后针对每个点给出焊枪末端的姿态矩阵 $\mathbf{B}$,通过前述的逆运动学求解结果及关节速度模型计算获得各关节变量值及其变化速度.

针对箱型钢结构单道焊接过程轨迹规划进行仿真分析,焊接过程中 z 方向滑台保持不动,近端关节的转角为 30° ,焊枪末端以恒定 10 mm/s 的焊接速度运行(在焊枪转过直角弯时,考虑到实际焊接情况,直角处按 $R=10\text{ mm}$ 圆弧处理). 整个焊枪末端走过的轨迹如图 5 所示,分为三部分:第一段焊枪末端轨迹为沿 x 轴方向的 40 mm 长度的直线段,在此阶段焊枪平行于 yOz 平面行;第二段焊枪末端轨迹为一段半径为 10 mm 的 90° 圆弧,在此阶段焊枪轴线与 O_1 点构成的平面垂直于 xOy 平面;第三段焊枪末端轨迹为沿 y 轴方向的 140 mm 长度的直线段,在此阶段焊枪平行于 xOz 平面.

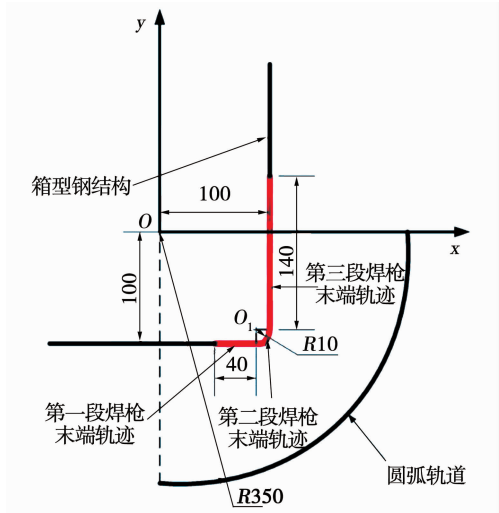


图 5 直角弯轨迹规划示意图 (mm)
Fig. 5 Schematic of right-angled trajectory planning

将各路径点的关节参数和速度的计算结果综合,即可得到轨迹规划仿真结果如图 6 所示,其中 θ_1

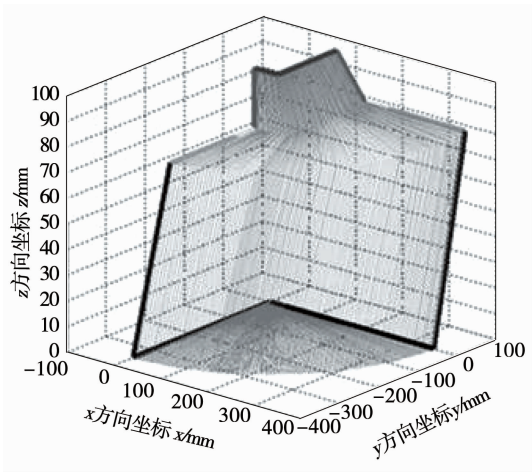


图 6 轨迹规划仿真结果
Fig. 6 Simulation results of trajectory planning

从 -90° 变化到 0 . 图中粗线为机器人末端轨迹.

5 结 论

(1) 用于箱型钢结构安装现场自动化焊接的轨道式焊接机器人具有 5 自由度,包括 3 个移动自由度,2 个转动自由度. 当机器人运行至圆弧轨道段时,对应的移动自由度转化为转动自由度.

(2) 在采用 D-H 坐标变换,建立 5 自由度箱型钢结构轨道式焊接机器人运动学模型的基础上,通过特定的代数方法,导出了焊枪末端的空间位姿参数与焊接机器人各关节运动参数的解析关系模型.

(3) 对给定焊枪末端轨迹、运动速度和位姿时的机器人运动进行了仿真研究,仿真结果表明,导出的逆运动学求解关系模型完全可用于箱型钢结构焊接机器人的运动轨迹和姿态规划和控制.

参考文献:

[1] 朱志明,马国锐,刘 晗,等. 箱型钢结构焊接机器人系统机构设计与研究[J]. 焊接, 2014(3): 2-7.
Zhu Zhiming, Ma Guorui, Liu Han, et al. Design and study of steel structure welding robot system[J]. Welding & Joining, 2014 (3): 2-7.

[2] 王 玉,王旗华,赵建光,等. 焊接机器人虚拟样机轨迹模拟和运动仿真分析[J]. 焊接学报, 2012, 33(4): 109-112.
Wang Yu, Wang Qihua, Zhao Jianguang, et al. Research on welding robot trajectory and motion simulation based on virtual prototype technology[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(4): 109-112.

[3] 杜宏旺,王宗义,刘少刚,等. 接管焊接机器人运动学及轨迹修正[J]. 焊接学报, 2009, 30(7): 45-48.
Du Hongwang, Wang Zongyi, Liu Shaogang, et al. Kinematics and track amendments of intersecting pipe welding robot[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(7): 45-48.

[4] 崔 鲲,戴 明,吴 林,等. 冗余自由度焊弧机器人路径自主规划的优化控制[J]. 焊接学报, 1998, 19(3): 64-70.
Cui Kun, Dai Ming, Wu Lin, et al. Autonomous path planning for arc welding robot with redundant degree of freedom[J]. Transactions of the China Welding Institution, 1998, 19(3): 64-70.

作者简介: 朱志明,男,1964 年出生,博士,教授,博士研究生导师. 主要从事焊接过程控制及自动化、现代功率电子技术与电能变换方面的研究开发工作. 发表论文 100 余篇. Email: zzmdme@mail. tsinghua. edu. cn