

# 小型移动焊接机器人结构设计

叶艳辉<sup>1</sup>, 张华<sup>1,2</sup>, 王帅<sup>1</sup>

(1. 南昌大学 江西省机器人与焊接自动化重点实验室,南昌 330031; 2. 江西昌大创新科技发展有限公司,南昌 330029)

**摘要:** 针对狭窄空间自动焊接问题,设计了一种小型移动焊接机器人机构。根据机器人结构的运动特点,运用模块化设计方法,把机器人机构分为轮式移动平台、焊炬调节机构和电弧传感器三部分。其中,轮式移动平台采用三轮式差速驱动结构形式,底部安装一可调磁吸力装置,且控制器集成于移动平台上;焊炬调节机构由十字滑块和焊炬连接装置组成,十字滑块由两电机分别驱动,实现焊缝水平和高低方向精确跟踪;电弧传感器采用圆锥摆形式,且与焊枪设计成一体,使用方便。同时,建立机器人运动学方程,并对直角焊缝不同的转弯中心进行分析,确定水平滑块的行程参数,为机器人的焊缝跟踪控制提供参考。结果表明,该机器人机构满足弯曲焊缝跟踪要求,焊接质量良好。

**关键词:** 移动焊接机器人; 窄窄空间; 结构设计

中图分类号: TG 434.5

文献标识码: A

文章编号: 0253-360X(2016)07-0101-04

## 0 序 言

随着人们对焊接的质量、焊接效率的要求及人工焊接成本的提高,使得焊接机器人的需求和使用也越来越广泛。在船舶制造中,为了加强船体的强度,通常要在船舱底部存在许多格子形框架结构。由于该结构作业空间狭小,焊接工人作业时身体不能自由伸展,工作条件十分恶劣等特点,使得研制针对该类结构焊接机器人具有较好的经济和社会效益。而现有的工业机械手由于其手臂长度一般为1.5~2.0 m,且底座不能大范围移动,不能焊接大尺寸的工件;对于龙门式焊接机器人<sup>[1]</sup>来说,虽然焊接尺寸较大,但也仅限于车间的空间范围内,作业空间受限。目前,国内外针对船舶制造开发了很多类型的移动式焊接机器人系统,用以解决其自动焊接问题。韩国Lee Ji-hyoung等人<sup>[2]</sup>研制的用于双壳体船舱U型结构焊缝焊接的五自由度移动焊接机器人,该机器人由移动导轨和五自由度机械手组成,传感器采用接触和电弧传感器实现焊缝识别,但该机器人体积大且需要专用的吊装设备来实现移动操作。上海交通大学张轲等<sup>[3]</sup>研制一种具有自寻迹功能的移动焊接机器人,采用视觉传感器实现初始焊缝识别,可应用于大型舰船甲板的自动化焊接。南昌大学<sup>[4]</sup>开发的弯曲焊缝自主移动焊接机器人,该机器

人移动平台采用四轮结构,能实现平面弯曲角焊缝自动焊接,但该机器人控制器与机器人本体机构分开布置,使得焊接工人更换焊接工位很不方便。由上述可知,目前用于船舶焊接机器人系统都是针对大型开阔区域的焊接作业,体积大,且控制器和机器人本体分离,导致使用和移动不方便。而狭窄船舱底部结构内部工作空间小,多数情况下要在车间外进行焊接,因此,这些焊接机器人都难以适应该结构的焊接自动化要求。

针对上述问题,文中设计了一种适合狭窄空间焊接的小型移动焊接机器人机构,用以解决船舱、集装箱等大型结构件自动化焊接问题。

## 1 焊接机器人机构设计

由于所设计的焊接机器人是在准平面、空间狭窄的环境下工作,为了保证机器人能根据电弧传感器的偏差信息,跟踪焊缝自动焊接,要求所设计的机器人应该结构紧凑、移动灵活且工作稳定。文中针对狭窄空间特点,开发了一种小型移动焊接机器人,根据机器人各结构的运动特点,运用模块化设计方法,把机器人机构分为轮式移动平台、焊炬调节机构和电弧传感器三部分。其中,轮式移动平台由于其惯性大,响应慢,主要对焊缝进行粗跟踪,焊炬调节机构负责焊缝精确跟踪,电弧传感器完成焊缝偏差实时识别。另外,机器人控制器和电机驱动器集成安装于机器人移动平台上,使其体积更小。同时,为

收稿日期: 2014-09-04

基金项目: 国家863高技术研究发展计划资助项目(2013AA041003);  
江西省科技支撑计划项目(2013BBE50030)

为了减少恶劣焊接环境下粉尘对运动部件影响,采用全封闭式结构,提高其系统可靠性。

文中采用三维软件完成焊接机器人各零部件建模、虚拟样机装配及样机结构尺寸优化,其内部结构如图1所示。机器人结构外形尺寸为:260 mm × 350 mm × 465 mm,重量约为15 kg。该焊接机器人具有体积小,质量轻,使用方便等特点,满足狭窄空间下对焊接机器人的要求。

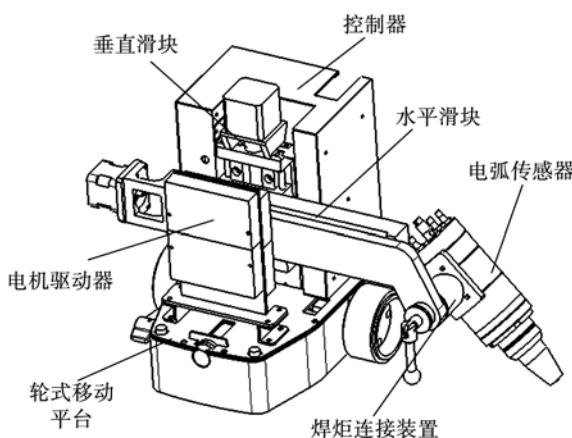


图1 焊接机器人结构图

Fig. 1 Structure of welding robot

### 1.1 轮式移动平台设计

由于该焊接机器人主要在准平面的工件上工作,而两轮差速驱动形式在结构与控制上简单,且可实现零转动半径的特点;因此,所设计的机器人轮式移动平台(图2)采用差速驱动的三轮结构形式,机器人后部布置两驱动轮,与前面一转向轮构成工作平面,保证机器人在工件上可靠移动。两驱动轮由两步进电机驱动系统独立驱动,通过不同的速度控制实现机器人的轨迹规划与跟踪。在机器人前部安装一超声测距传感器,防止机器人与前方工件发生

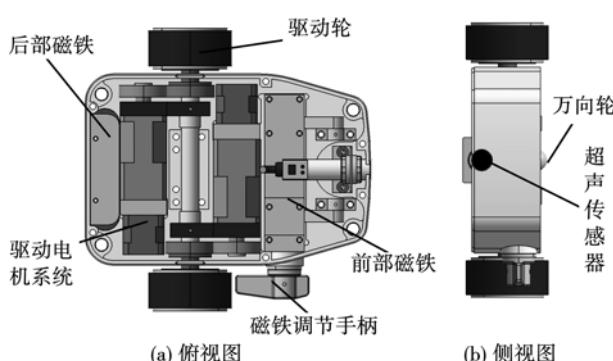


图2 轮式移动平台结构图

Fig. 2 Structure of wheeled mobile platform

碰撞;同时,在格子形结构焊接中,用于检测机器人与工件之间距离,确定机器人转弯时刻。为了提高移动平台稳定性和驱动能力,在机器人底盘前部和后部布置永磁铁,增加驱动轮与工件之间正压力;其中,前部磁铁装置的磁吸附力可以通过磁铁调节手柄来调整磁铁与工件之间间隙实现磁吸力的增减,从而方便操作人员移动机器人到不同焊接位置,降低劳动强度。

### 1.2 焊炬调节机构设计

由于轮式移动平台惯性大,为了提高焊缝跟踪响应速度和精度,在移动平台上增加焊炬调节机构。该机构具有惯性小,响应快,可以在降低轮式移动平台的运动精度情况下,实现快速、准确的焊缝跟踪,提高焊接质量。该机构由十字滑块和焊炬连接装置组成,具有三自由度,实现水平和高度方向跟踪,以及焊枪姿态调整。其中,十字滑块由水平滑块和垂直滑块组成,分别由两步进电机独立驱动控制。同时,焊炬连接装置上设有一手动转动关节(图3),可通过旋转调节手柄来手动控制焊炬绕连接轴转动,以实现不同焊缝形式(如对接,角焊缝等)焊接时焊炬姿态调整。

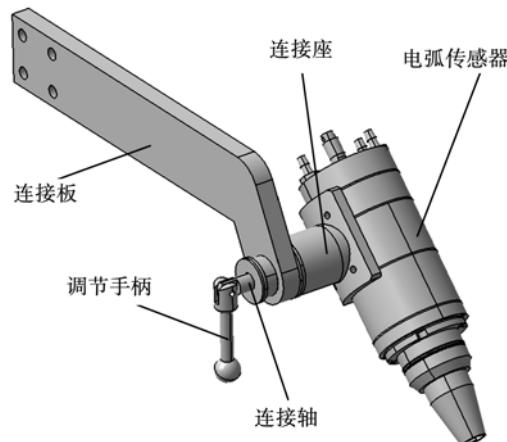


图3 焊炬连接装置结构图

Fig. 3 Structure of welding gun connection device

### 1.3 电弧传感器结构

电弧传感器是利用焊接电弧本身信息实现焊缝识别,具有实时性好,抗干扰能力强等特点,可实现焊缝左右与高低方向识别<sup>[5]</sup>。文中所设计的电弧传感器采用圆锥摆形式(图4),电动机固定在其外壳体上,电动机转子固定在空心轴上,空心轴通过偏心轮及调心球轴承与导电杆相连,导电杆上端通过调心球轴承与传感器外壳相连。电动机驱动空心轴转动时,导电杆做圆锥运动,焊丝、冷却水管、气管、送

丝软管及焊接电缆从传感器后部的送丝管送入,从而将它们集成于传感器内部,使其结构更紧凑。由于传感器与焊枪为一体,体积小,使用和安装方便,特别适合于狭窄空间焊缝跟踪。

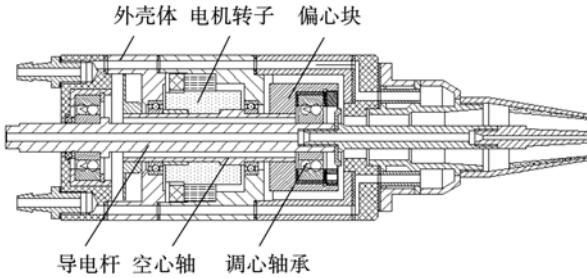


图4 电弧传感器结构

Fig. 4 Structure of arc sensor

## 2 机器人运动学分析

### 2.1 机器人运动学模型建立

在焊缝跟踪过程中,为了保证焊接质量,除要求焊炬末端实时跟踪焊缝外,其速率应保持不变。为此,必须建立机器人运动学模型,从而完成焊缝的轨迹规划和运动控制。假设机器人在平面工件上工作,忽略焊炬在高度方向变化,只考虑机器人跟踪平面焊缝情况,此时,焊炬末端速度是轮式移动平台与水平滑块速度的矢量合成。如图5所示,首先,建立全局坐标系 $\{xOy\}$ 和机器人局部参考坐标系 $\{x'Cy'\}$ ;其中,局部坐标系原点C位于两驱动轮轴线中心, $y'$ 轴与两轮轴线重合, $x'$ 轴与全局坐标系x轴夹角为 $\theta$ 。两轮直径为 $2r$ ,轮距为 $2c$ ,焊枪末端W与原点C距离为 $l$ ,与水平滑块位置有关。

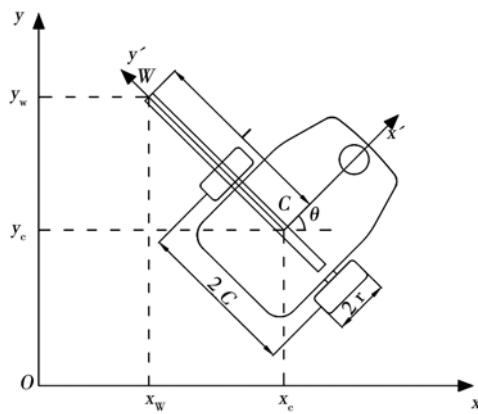


图5 焊接机器人运动学分析

Fig. 5 Kinematics analysis of welding robot

设C点和焊炬末端W点在全局坐标系中坐标

为 $[x_c \ y_c \ \theta_c]$ 和 $[x_w \ y_w \ \theta_w]$ ,根据差速驱动机器人运动规律和几何关系,可得轮式移动平台运动学模型:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \\ \dot{\theta}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r\cos\theta_c}{4c} & \frac{r\cos\theta_c}{4c} \\ \frac{r\sin\theta_c}{4c} & \frac{r\sin\theta_c}{4c} \\ -\frac{r}{4c} & \frac{r}{4c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_1 \\ \dot{\varphi}_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

由C点和焊炬末端W点相对位置的几何关系得

$$\left. \begin{array}{l} x_w = x_c - l\sin\theta_c \\ y_w = y_c + l\cos\theta_c \\ \theta_w = \theta_c + 90^\circ = \theta + 90^\circ \end{array} \right\} \quad (2)$$

联合式(1)和(2)求解,可得机器人运动学模型:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_w \\ \dot{y}_w \\ \dot{\theta}_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r\cos\theta(1+l)}{4c} & \frac{r\cos\theta(1-l)}{4c} \\ \frac{r\sin\theta(1-l)}{4c} & \frac{r\sin\theta(1+l)}{4c} \\ -\frac{r}{4c} & \frac{r}{4c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_1 \\ \dot{\varphi}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -l\sin\theta \\ l\cos\theta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

从式(3)可知,焊炬末端速度(线速度与角速度)与轮式移动平台驱动轮转速、水平滑块位置和速度有关。这是由于轮式移动平台与水平滑块自由度存在重合,从而使轨迹规划更复杂,但控制更灵活。

### 2.2 水平滑块行程分析

在船舱底部格子形结构中,存在大量的直角焊缝,该类焊缝一般由两段直线焊缝组成,当焊枪跟踪到直角拐点时,滑块最大,机器人稳定性最差。因此,为提高机器人跟踪过程中稳定性,应使机器人在跟踪到拐点位置时,水平滑块伸出长度尽可能短。如图6所示为跟踪直角焊缝时,机器人分别以不同

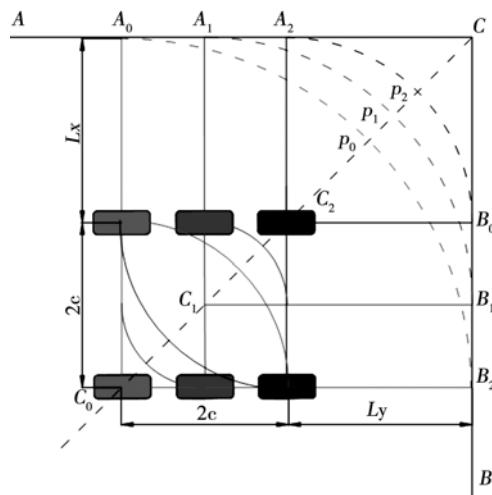


图6 不同转弯中心对滑块行程影响

Fig. 6 Slide distance effects on turning centre

转弯中心,对水平滑块行程进行比较分析.

假设  $C_0, C_1, C_2$  点分别表示机器人转弯中心为右轮、两轮轴线中心和左轮,转弯始点和终点分别为  $A_0, A_1, A_2$  和  $B_0, B_1, B_2$ . 设焊炬末端距左轮距离为  $L_x = 230$  mm,且  $L_y = L_x$ ,两轮轮距  $2c = 210$  mm. 由图 6 所示几何关系可知,不同转弯中心所需水平滑块最小行程分别为

$$P_2C = \sqrt{L_x^2 + L_y^2} - L_x = 95.2 \text{ mm} \quad (4)$$

$$P_1C = \sqrt{(L_x + c)^2 + (L_y + c)^2} - (L_x + c) = 138.7 \text{ mm} \quad (5)$$

$$P_0C = \sqrt{(L_x + 2c)^2 + (L_y + 2c)^2} = 182.2 \text{ mm} \quad (6)$$

从上式(4)、(5)和(6)计算结果可知,跟踪直角焊缝时,在结构参数相同的情况下,水平滑块所需行程从小到大依次为以  $C_2, C_1, C_0$  点为转弯中心. 因此,为使水平滑块行程较小,在进行直角焊缝跟踪轨迹规划时,应选择以  $C_2$  点为转弯中心. 但不足之处是与以  $C_1$  点为转弯中心时相比,此时左右轮转速差较大,因此,在进行电机驱动系统选择时应加于考虑.

### 3 焊缝跟踪试验验证

为了验证机器人机构设计的可行性,对具有高度方向变化的弯曲角焊缝进行跟踪试验. 试验参数如下:焊接钢板厚度为 5 mm,焊接电流 200 A,电弧电压 25 V,保护气为混合气,实心焊丝直径为 1.2 mm,焊接速度为 40 cm/min,旋转电弧传感器旋转直径 3 mm,频率为 36 Hz. 焊缝跟踪结果如图 7 所示,由图 7 可以看出,焊接跟踪成形效果较好,焊接质量符合要求.



图 7 高度方向变化弯曲角焊缝跟踪结果

Fig. 7 Tracking result of curved seam with height direction changing

### 4 结 论

(1) 采用模块化设计方法,设计一种小型移动焊接机器人系统,该机器人体积小、重量轻、移动灵活和使用方便,满足狭窄空间焊接要求.

(2) 对机器人运动规律进行分析,建立机器人运动学模型,为焊缝跟踪过程中的机器人运动控制提供参考.

(3) 针对直角焊缝跟踪,对比分析了不同的转弯中心对水平滑块行程的影响,为机器人机构参数设计和机器人轨迹规划提供依据.

(4) 通过对具有高度方向弯曲角焊缝跟踪试验,结果表明,焊接跟踪平顺,焊接成形质量较好,该机器人结构符合设计要求.

### 参考文献:

- [1] Marcelo H, Ang Jr, Lin Wei, et al. A walk-through programmed robot for welding in shipyards[J]. Industrial Robot: An International Journal, 1999, 26(5): 377–388.
- [2] Lee Donghun, Ku Namkug, Kim Tae-Wan, et al. Development and application of an intelligent welding robot system for shipbuilding[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2011, 27(2): 377–388.
- [3] 张轲, 吕学勤, 吴毅雄, 等. 自寻迹舰船甲板焊接移动机器人[J]. 焊接学报, 2005, 26(4): 55–59.  
Zhang Ke, Lu Xueqing, Wu Yixiong, et al. Mobile robot for welding ship decks with function of auto-searching weld line[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(4): 55–59.
- [4] 毛志伟, 张华, 郑国云. 旋转电弧传感弯曲焊缝移动焊接机器人结构设计[J]. 焊接学报, 2005, 26(11): 51–54.  
Mao Zhiwei, Zhang Hua, Zheng Gouyun. Structure design of mobile welding robot based on rotating arc sensor for bending weld [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(11): 51–54.
- [5] 潘际銮. 现代弧焊控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.

**作者简介:**叶艳辉,男,1979年出生,博士研究生,讲师.主要从事机器人和焊接自动化等方面科研工作.发表论文 10 余篇. Email: yyh-18@163.com

**通讯作者:**张华,男,教授. Email: zhanghua\_lab@163.com