

DOI: 10.7672/sgjs2026130019

# 地下连续墙钢筋笼龙门式焊接机器人研发与应用\*

陈晓明<sup>1,2</sup>, 王涛<sup>2,3</sup>, 滕延锋<sup>2,3</sup>, 金晶<sup>2,3</sup>, 李冀清<sup>2,3</sup>

(1. 上海建工集团股份有限公司, 上海 200080; 2. 上海面向典型建筑应用机器人工程技术研究中心, 上海 200072;  
3. 上海市机械施工集团有限公司, 上海 200072)

**[摘要]** 钢筋网片是钢筋工程中的主要部件之一。通过分析现有焊接设备在生产地下连续墙钢筋笼网片时存在的问题,综合考虑了焊接方式、焊点定位和网片形式对焊接工艺和质量的影响,提出了以气保焊作为焊接设备,以待焊位置的钢筋确定焊点实际位置,研制了新型龙门式焊接机器人,实现了不同类型网片的通用化焊接。现场应用表明,新型龙门式焊接机器人不仅定位精度高、焊接质量好,同时焊接过程实现机械化和自动化生产,社会效益和经济效益显著。

**[关键词]** 地下连续墙;钢筋笼;焊接;机器人

**[中图分类号]** TU753

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 2097-0897(2026)13-0019-05

## Development and Application of Gantry Welding Robot for Reinforcement Cage of Diaphragm Wall

CHEN Xiaoming<sup>1,2</sup>, WANG Tao<sup>2,3</sup>, TENG Yanfeng<sup>2,3</sup>, JIN Jing<sup>2,3</sup>, LI Jiqing<sup>2,3</sup>

(1. Shanghai Construction Group Co., Ltd., Shanghai 200080, China;

2. Shanghai Engineering Research Center of Oriented in Typical Building Application Robot, Shanghai 200072, China;

3. Shanghai Mechanized Construction Group Co., Ltd., Shanghai 200072, China)

**Abstract:** Reinforcement mesh is one of the key components in reinforcement engineering. By analyzing the problems with existing welding equipment during the production of reinforcement cages for diaphragm walls and comprehensively considering the impact of welding methods, weld spot positioning, and mesh configurations on welding processes and quality, this paper proposed the use of gas-shielded arc welding as the welding method and determined the actual weld spot positions based on the reinforcement bars at the welding location. A new gantry-type welding robot was developed, enabling the universal welding of different types of mesh. Field applications have demonstrated that the new gantry-type welding robot not only offers high positioning accuracy and excellent weld quality but also enables mechanized and automated production during the welding process, yielding significant social and economic benefits.

**Keywords:** diaphragm walls; reinforcement cages; welding; robots

### 1 研究背景

在地下连续墙设计中,为了保持地下连续墙的含钢量,纵筋往往做成并筋的形式,即纵筋有 2 根并排的钢筋组成,较粗的钢筋为纵向主筋,较细的钢筋为纵向副筋。同时由于网片位置不同,还存在下网片结构和上网片结构,如图 1 所示。下网片结构的横筋位于纵筋下部,上网片结构的横筋位于纵筋

上部。

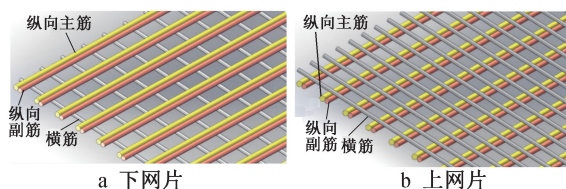


图 1 地下连续墙钢筋笼网片结构

Fig. 1 Reinforcement cage mesh structure of diaphragm wall

\* 上海市国有资产监督管理委员会基金项目:钢筋工程数字化柔性生产线关键技术及智能质检平台研发(2021005)

**[作者简介]** 陈晓明,总工程师,教授级高级工程师, E-mail: xiaoxm@sina.com

**[收稿日期]** 2026-03-20

钢筋网片是地下连续墙钢筋笼的主要组成部分,占比超过 80%,目前仍以传统的人工制作为主

要手段,不仅人工成本高、工作强度大,施工环境杂乱,影响施工安全,而且存在施工效率低、质量不稳定、钢筋笼整体结构不稳定等问题,开发自动化加工装备,实现地下连续墙钢筋笼的机械化、自动化、数字化和智能化生产已迫在眉睫。目前市场上已经有钢筋网片生产的自动焊接设备(排焊机),如图 2 所示。排焊机通过对钢筋进行强力矫正,然后对纵筋和横筋交叉点处施加强电流,使得纵筋和横筋交叉点处出现熔融实现焊接。

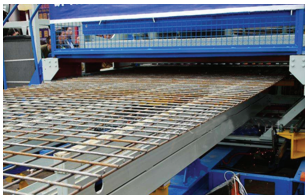


图 2 排焊机

Fig. 2 Row welding machine

上述排焊机仅适用于小型直径的单筋网片焊接,对于地下连续墙钢筋笼网片而言,钢筋直径普遍超过 32mm,仍采用上述大电流方式将导致电气系统负荷过大,耗电量剧增,普通工地无法采用上述供电方式;采用强电流熔融钢筋的形式进行焊接对大直径钢筋而言截面变小,在结构受力部位容易削弱结构强度。地下连续墙钢筋笼的钢筋网片中普遍存在并筋,现有的排焊机定位方式无法对并筋进行焊接。同时地下连续墙钢筋笼的钢筋普遍使用大直径螺纹钢筋,在加工制作、运输和搬运过程中容易出现弯曲,无法使用矫正方式进行定位。因此,需要针对地下连续墙钢筋笼网片模块的特点,研究适用于地下连续墙钢筋笼网片结构的自动化焊接设备。

2 研发思路

1)地下连续墙钢筋笼主要有“一字形”“L 形”“Z 形”等多种类型,其中“一字形”钢筋笼最为常见,“L 形”“Z 形”等结构可通过多个“一字形”钢筋笼相互连接而成,因此以制作“一字形”钢筋笼为研究目标。“一字形”钢筋笼网片结构长度普遍超过 50m,呈矩形,考虑设计规范、材料运输、施工效率等因素,一般在施工现场整体制作。网片结构不仅尺寸大,同时还比较柔,焊点位置相对规律性强且基本在同一高度内,不容易进行整体精确移动,因此网片焊接机器人使用轨道式龙门结构方案,网片结构位于龙门架下方,保持静止。焊接机器人位于龙门架上,沿钢筋笼纵向进行移动。

2)“一字形”地下连续墙钢筋笼的宽度受施工

分幅、成槽设备抓斗宽度影响,一般有 4.0,4.2,4.5,5.0,5.2,5.5,6.0,6.8m 等,各种宽度占比如图 3 所示。由图 3 可知,幅宽<6m 的钢筋笼占比达 97.5%,为主要类型。因此设定加工的钢筋笼宽度不超过 6m。考虑到钢筋笼两侧焊接时焊枪总成的宽度,最终确定网片焊接机器人的轨道宽度为 8m。

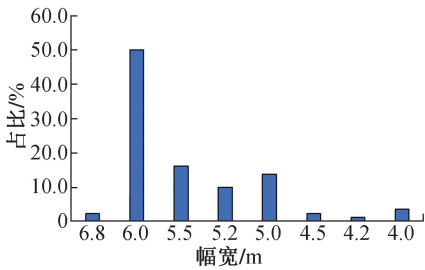


图 3 钢筋笼宽度统计

Fig. 3 Statistics of reinforcement cage width

3)地下连续墙钢筋笼的高度受到地下连续墙厚度的影响,现有工程应用中,地下连续墙的厚度主要有 0.8,1.0,1.2,1.5m,因此网片焊接机器人应具备升降功能,考虑到焊枪的高度调整,竖向升降系统的最大行程为 1.6m。

4)考虑钢筋定位和焊接效率的要求,每根横筋的焊接时间(包括横向行走和纵向行走)应不超过 35s,全部焊接时间不超过 2.5h。龙门式焊接机器人横向行走速度选择在 1.2~1.5m/min。网片结构的纵筋间距一般为 150mm,共有 40 个焊点,每个焊点的焊接时间为 5s,所需的焊接执行端为  $40 \times 5 \div 35 \approx 5.7$ ,共设置 6 个独立的焊接执行端。网片结构的横筋间距为 200mm,龙门式焊接机器人纵向行走速度选择在 1.5~1.8m/min。

5)每个焊接执行端包括焊枪横移装置和焊枪就位装置,且各执行端能够同步独立工作。在焊接下网片时,焊点就位装置与横筋保持平行;在焊接上网片时,焊点就位装置垂直于横筋,实现了上网片和下网片的通用焊接,适应能力强。

6)在焊接工艺方面,为了保持钢筋截面面积不受影响,采用增加材料的二氧化碳保护焊对钢筋网片进行焊接。二氧化碳保护焊采用增加材料的方式进行焊接,对原有钢筋截面基本无影响,焊接质量稳定可靠,同时二氧化碳保护焊的功耗低,绿色环保。

7)针对钢筋网片中并筋形式,对左侧焊点和右侧焊点分别进行焊接。即采用左置焊枪专门焊接左侧焊点,右置焊枪专门焊接右侧焊点,实现在并筋条件下,能够对并筋左右焊点均进行焊接。对于并筋中无法对不同直径钢筋进行同时压紧的问题,

采用临时逐个压紧的方式对待焊焊点进行压紧。

8)大直径螺纹钢筋存在自然弯曲,无法采用强力矫正的方式进行焊点定位。同时室外工作环境下的尘土、水雾等不利因素会对激光等探测方式产生重大不利影响,严重时可能造成定位失效,基于上述考虑,采用了以焊点处钢筋为定位基准的相对式机械定位技术进行定位。相对式机械定位技术以待焊处的交叉钢筋为定位基准,以探针触发信号和固定偏移值的方式确定横筋和纵筋的位置。当平面定位完成后,下压气缸驱动焊枪压紧待焊位置的钢筋,实现竖向定位。相对式机械定位技术稳定可靠,不受施工现场风雨、灰尘和振动等不利因素影响,同时对钢筋的直线度无要求,现场适应性强。

3 新型龙门式焊接机器人

3.1 新型焊接机器人总体构成

新研发的网片焊接机器人采用龙门式结构,两侧轨道间距 8m,整机宽度 10m,高 2.5m,长 2.5m,能焊接宽度不超过 6m 的地下连续墙钢筋笼钢筋网片。龙门架两侧通过可行走的支腿支撑于纵向轨道上方,在龙门架上布置了 6 台可沿着龙门架横梁进行横向移动的焊枪。当需要对焊点进行焊接时,多台焊枪在焊枪就位系统的定位下,分别对多个焊点进行同时焊接。

新型龙门式焊接机器人主要由纵向行走系统、竖向升降系统、横向行走系统、竖向压紧系统、焊点定位系统、焊枪总成以及信息管理系统组成,如图 4 所示。

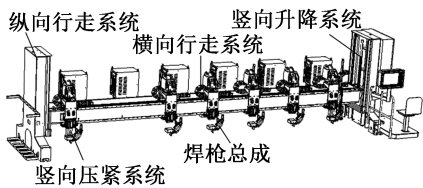


图 4 网片焊接机器人总体结构

Fig. 4 The overall structure of mesh welding robot

3.2 纵向行走系统

纵向行走系统安装在龙门架两侧支腿的下方,由导向槽口、负重轮和驱动轮组成,如图 5 所示。导向槽口安装在纵向行走系统的前端,以轨道为导向基准,对整个设备的纵向移动提供导向功能;负重轮负责支撑整个设备的质量,每侧设置 2 个;驱动轮设置在侧部,由伺服电机驱动的减速器驱动,保证纵向行走系统能够在伺服电机的控制下进行纵向精确行走定位。

纵向行走系统采用双侧伺服电机驱动,单侧驱动

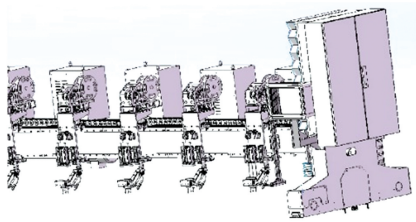


图 5 纵向行走系统

Fig. 5 Longitudinal walking system

力  $F=3\text{kN}$ , 减速比  $D = \frac{1}{3}$ , 其驱动扭矩  $T=4.13\text{N} \cdot \text{m}$ , 电机额定转速取值为  $V=3\,000\text{r}/\text{min}$ 。

电机额定功率  $W$  与扭矩  $T$  和转速  $V$  的关系为:

$$W = \frac{TV}{9\,549} \approx 1.3\text{kW}, \text{ 选用伺服电机型号为}$$

ECMA-C10613ES。

3.3 竖向升降系统

竖向升降系统安装在龙门架两侧支腿的内侧,由导向槽、连接滑块、蜗轮蜗杆驱动器组成,如图 6 所示。导向槽安装在龙门架支腿内侧,为升降动作提供导向;连接滑块在导向槽内部可以自由滑动,在连接滑块的内部与带有传动螺纹的蜗杆耦合,在连接滑块的侧面与龙门架的端面刚接。在驱动蜗轮蜗杆的作用下,蜗杆驱动连接滑块进行升降,连接滑块带动整个龙门架实现升降。

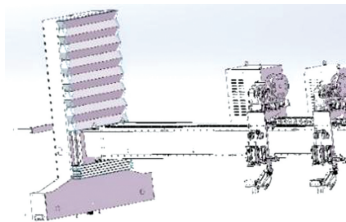


图 6 竖向升降系统

Fig. 6 Vertical lifting system

竖向升降系统采用双侧伺服电机驱动,单侧驱动力  $F=5\text{kN}$ , 减速比  $D = \frac{1}{7}$ , 电机额定转速取值为  $V=3\,000\text{r}/\text{min}$ 。经计算,电机额定功率  $W \approx 3\text{kW}$ , 选用伺服电机型号为 ECMA-C10630ES。

3.4 横向行走系统

横向行走系统安装在龙门架上方,由导向槽、滑动基座和驱动装置组成,如图 7 所示。横向行走系统为焊枪提供横向移动功能。横向行走系统的导向槽口安装在龙门架上,为焊枪的横向移动提供导向基准;滑动基座在上述导向槽口内滑动,在滑动基座上方安装了焊枪总成和竖向压紧系统;滑动基座由伺服电机进行驱动,可实现焊枪总成在横向

的精确行走和定位。

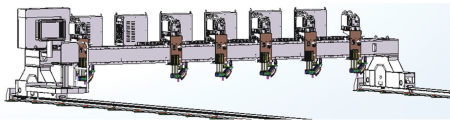


图 7 横向行走系统  
Fig. 7 Lateral walking system

3.5 竖向压紧系统和焊枪总成

竖向压紧系统和焊枪总成如图 8 所示。竖向压紧系统安装在滑动基座侧边,由下压气缸和压块组成,主要负责对待焊位置处的钢筋进行压紧,防止横筋和纵筋之间出现缝隙导致焊接失效。焊枪总成安装在竖向压紧系统压块的侧边,由连接梁和焊枪就位气缸组成,当焊点完成定位后,在焊枪就位气缸的作用下,焊枪移动至焊接位置进行焊接作业。

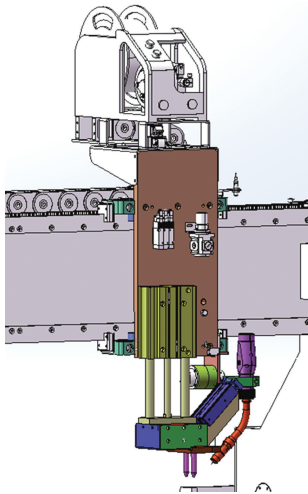


图 8 竖向压紧系统和焊枪总成

Fig. 8 Vertical pressing system and welding torch assembly

3.6 焊点定位系统

在大型钢筋网片制作中,由于钢筋的自然弯曲和布料精度影响,实际钢筋位置与设计位置有差异,造成实际的焊点位置与设计位置有厘米级误差,因此在地下连续墙钢筋笼的网片焊接中,使用以焊点处钢筋为定位基准的相对定位模式是解决上述问题的有效方法。相对定位系统如图 9 所示。

相对定位方式采用实际焊点处的横筋作为焊点的纵向坐标( $y$ 向),以实际焊点处的纵筋作为焊点的横向坐标( $x$ 向),以压紧后纵筋横筋接触点作为实际焊点的 $z$ 向坐标,精确确定焊点的三维坐标。在实施中,当纵向探针触碰到待焊位置的横筋时,以纵向探针触发信号时的值加上固定纵向偏移值作为焊点的 $y$ 向坐标;横向探针触碰到待焊位置的纵筋时,以横向探针的位置加上固定横向偏移值作

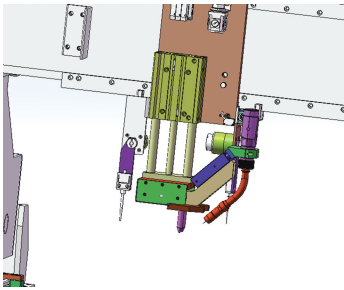


图 9 相对式焊点定位  
Fig. 9 Relative solder joint positioning

为焊点的 $x$ 向坐标,下压气缸将钢筋压紧后,此时的高度位置作为焊点的 $z$ 向坐标,当 3 个坐标确定后,焊枪就位气缸带动焊枪移动至焊点处进行焊接。

3.7 信息管理系统

新型龙门式机器人的数据是通过分布在机器人各部位的伺服电机转速传感器、行程触碰开关等元器件来采集并将信号发送至本机 PLC,设备端的人机交互触摸屏以及焊点检测图像则通过以太网与 PLC 控制器通信。网片焊接机器人的控制器采用了 PLC 控制器,配以 INVT 全数字伺服系统,通过 ModbusTCP 扩展 I/O 设备,经串口服务器和交换机传输至现场总控室的上位机。管理人员通过上位机内的组态界面能够直观地监控各台网片焊接机器人的生产运行状态。

4 基于新型龙门式焊接机器人技术的大型钢筋网片焊接工艺

在图 1a 中,横筋在纵筋下方,焊点位于纵筋的两侧,焊枪总成的方向与横筋平行。焊接时,首先通过横筋、纵筋和压紧装置分别确定出待焊焊点的 $y$ 向、 $x$ 向和 $z$ 向坐标,然后焊枪总成对纵筋的左焊点或者右焊点进行焊接。由于焊枪总成的方向在焊接过程中不能更改,因此为了对纵筋(并筋)两侧的焊点均进行焊接,需要 2 台焊接机器人分别对纵筋的左焊点和右焊点进行焊接,即在进行下网片焊接时,需要 2 台焊接机器人才能完成焊接。在图 1b 中,横筋在纵筋上方,焊点位于纵筋的前侧或后侧,焊枪总成的方向与横筋垂直。焊接时,首先通过横筋、纵筋和压紧装置分别确定出待焊焊点的 $y$ 向、 $x$ 向和 $z$ 向坐标,然后焊枪总成对纵筋的前侧焊点进行焊接。

5 新型龙门式焊接机器人试验应用

5.1 应用效果

新型龙门式焊接机器人在工地现场进行了试验应用,钢筋笼长 50m、宽 6m、高 1.2m,钢筋最大直径 40mm。组装完成后的焊接机器人如图 10 所示,

完成后的焊点如图 11 所示。

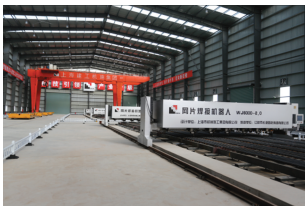


图 10 组装完成的龙门式焊接机器人

Fig. 10 Assembled gantry welding robot



a 下网片焊点

b 上网片焊点

图 11 网片焊点

Fig. 11 welding spot

在应用过程中,网片结构的焊点合格率超过 90%,焊接时间与同类型人工制作的时间保持相近,焊工人数减少 80%。使用新型龙门式焊接机器人进行大型钢筋网片焊接,不仅定位准确、焊点饱满、焊接质量高,而且焊接过程中无须人工参与,全部实现自动化生产。

5.2 技术优势

1)采用龙门式多把自动焊枪形式进行焊接,避免了熔融焊接设备功率大、能耗高的问题,同时二氧化碳保护焊的焊接质量高,焊点牢固。

2)使用相对定位模式代替了绝对定位模式。地下连续墙钢筋笼的钢筋不仅直径较大而且较长,各焊点位置与设计位置偏差较大,使用相对定位模式能够适应上述偏差,实现准确定位。

3)新型焊接机器人通过改变焊枪姿态,不仅可以焊接下网片的焊点,还可以焊接上网片的焊点,通用性好,生产效率高。

5.3 应用前景

本文提出的新型龙门式焊接机器人,适用于大型地下连续墙钢筋笼钢筋网片的焊接,不仅能够进行大直径钢筋组成的上网片和下网片的焊接作业,还能实现自动寻点、自动焊接的目标,焊接过程实现了全自动化,无须人工参与。该工艺既能够保证生产质量,还能大幅减少现场的专业焊工,现场无污染,符合绿色建造的可持续发展理念,社会、经济和环保效益显著,对实现大型地下连续墙钢筋笼的

机械化和自动化生产目标具有强大的推进作用,具有非常广阔的应用前景。

6 结语

本文通过分析现有焊接设备在大型钢筋网片生产中存在的问题,综合考虑了焊接方式、焊点定位和网片形式对焊接质量的影响,提出了以自动焊枪作为焊接设备,以待焊位置的横筋、纵筋和压紧位置确定焊点实际位置的相对定位工艺作为定位方法,以改变焊枪姿态实现上网片和下网片的通用化焊接,研制了新型龙门式焊接机器人并进行了现场试验。试验证明,新型焊接机器人不仅定位精度高、焊接质量好,同时焊接过程实现机械化和自动化生产,社会效益和经济效益好,为大型地下连续墙钢筋笼的自动化生产进行了有益探索。

参考文献:

[ 1 ] 陈善本. 智能化机器人焊接技术研究进展[ J ]. 机器人技术与应用, 2007 ( 3 ): 8-11.  
CHEN S B. Research progress of intelligent robot welding technology[ J ]. Robot technique and application, 2007 ( 3 ): 8-11.

[ 2 ] 黄和明,夏涛,肖诗凯,等. 多款建筑智能机器人全过程协同作业技术[ J ]. 施工技术(中英文),2025,54(13):6-11.  
HUANG H M, XIA T, XIAO S K, et al. The whole process collaborative operation technology of multiple building intelligent robots[ J ]. Construction technology, 2025, 54( 13 ): 6-11.

[ 3 ] 霍厚志,张号,杜启恒,等. 我国焊接机器人应用现状与技术发展趋势[ J ]. 焊管, 2017, 40 ( 2 ): 36-42, 45.  
HUO H Z, ZHANG H, DU Q H, et al. Application status and technology development trend of welding robot in China [ J ]. Welded pipe and tube, 2017, 40 ( 2 ): 36-42, 45.

[ 4 ] 贾宝荣,许勇,马良. 超高层建筑高强钢焊接全过程数字管控技术[ J ]. 施工技术(中英文),2026,55(1):13-16,28.  
JIA B R, XU Y, MA L. Digital control technology for entire welding process of high-strength steel in super high-rise buildings [ J ]. Construction technology, 2026, 55( 1 ): 13-16, 28.

[ 5 ] 刘丹,郑博方,王帅,等. 机器人焊接关键技术及应用[ J ]. 金属加工(热加工),2020(2):41-44.  
LIU D, ZHENG B F, WANG S, et al. Key technology and application of robot welding[ J ]. MW metal forming, 2020 ( 2 ): 41-44.

[ 6 ] 王彩凤,丁志远,雷宁宁,等. 焊接机器人在工程机械行业的应用现状及发展趋势[ J ]. 金属加工(热加工),2020(6):3-6.  
WANG C F, DING Z Y, LEI N N, et al. Application status and development trend of welding robot in construction machinery industry[ J ]. MW metal forming, 2020( 6 ): 3-6.

[ 7 ] 肖润泉,许燕玲,陈善本,等. 焊接机器人关键技术及应用发展现状[ J ]. 金属加工(热加工),2020(10):24-31.  
XIAO R Q, XU Y L, CHEN S B, et al. The key technology and application development of welding robot[ J ]. MW metal forming, 2020( 10 ): 24-31.