

DOI: 10. 7672/sgjs2026130024

地下连续墙钢筋笼直线型桁架焊接机器人研发与应用*

陈晓明^{1,2}, 王涛^{2,3}, 陈旭阳^{2,3}, 王琥^{2,3}, 金晶^{2,3}

(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] 钢筋桁架是钢筋工程中的通用组件之一, 为了克服人工焊接存在的不足, 提出了一种直线型焊接机器人及生产工艺。直线型焊接机器人包括定位平台、夹紧传送总成和自动焊接装置, 适用于多种规格的钢筋桁架加工。通过桁架单元制作, 将多个桁架单元拼接后形成整体桁架。直线型焊接机器人可显著降低劳动强度、减少制作成本, 并提高钢筋桁架的加工质量, 在实际应用中具有良好的适应性, 为钢筋工程的桁架制作提供了一种质量稳定、加工高效和经济的解决方案。

[关键词] 钢筋工程; 地下连续墙; 焊接; 机器人; 钢筋桁架

[中图分类号] TU476.3 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 2097-0897(2026)13-0024-06

Development and Application of Welding Robot for Reinforcement Cage Linear Truss of Diaphragm Wall

CHEN Xiaoming^{1,2}, WANG Tao^{2,3}, CHEN Xuyang^{2,3}, WANG Xiao^{2,3}, JIN Jing^{2,3}

(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: Reinforced steel trusses are one of the most common components in reinforced concrete construction. To address the limitations of manual welding, a linear welding robot and corresponding production process have been developed. The linear welding robot comprises a positioning platform, a clamping and conveying assembly, and an automatic welding unit, making it suitable for processing reinforced steel trusses of various specifications. By manufacturing individual truss units and assembling multiple units together, a complete truss structure is formed. The linear welding robot significantly reduces labor intensity and production costs while improving the processing quality of steel trusses, demonstrating excellent adaptability in practical applications and providing a solution for truss fabrication in steel reinforcement projects that is characterized by consistent quality, high processing efficiency, and cost-effectiveness.

Keywords: reinforcement engineering; diaphragm walls; welding; robots; reinforced steel trusses

1 研究背景

地下连续墙作为现代建筑工程中的重要围护结构,其施工质量和效率对整体工程的安全、稳定以及经济效益具有重要影响。钢筋笼作为地下连续墙的重要组成部分,其成型技术一直是研究的热点^[1-6]。在地下连续墙钢筋笼结构中,钢筋桁架是

重要组成部分,如图1所示。钢筋笼通过钢筋桁架形成一个强大的骨架,使整体结构具有足够的抗拉和抗弯能力,满足钢筋笼运输和起吊需求^[7-9]。

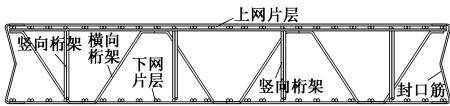


图1 地下连续墙钢筋笼结构

Fig. 1 Reinforcement cage structure of diaphragm wall

钢筋桁架分为X形桁架和W形桁架^[8],其中W形桁架由主筋、腹筋和钢筋直螺纹套筒组成,如

* 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装备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

图 2a 所示。X 形桁架是在 W 形桁架上层叠层焊接腹筋,如图 2b 所示。

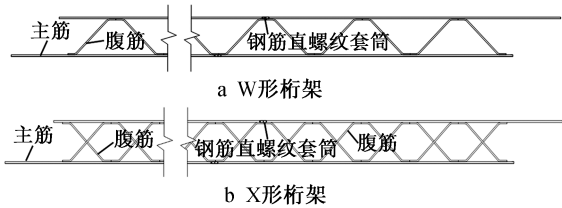


图 2 钢筋桁架结构
Fig. 2 Steel truss structure

在现场加工上述钢筋桁架时,首先在钢筋笼旁用槽钢搭建定位焊接平台,将两端带螺纹主筋通过钢筋直螺纹套筒连接至桁架设计长度。然后,由人工将 2 根主筋搬运至定位焊接平台,排列 W 形桁架腹筋焊接,若制作桁架为 X 形,在 W 形桁架上方排列叠层腹筋焊接。焊接完成单面的焊缝后,人工将桁架在平台上翻面,对背面的焊缝进行焊接。完成桁架加工后,通过人工将整体桁架搬运至钢筋笼下网片上方后焊接固定^[7-8]。

上述结构的制作和安装目前主要依靠人工进行,这种制作方式生产效率低下且工人的劳动强度大。而且其焊接质量取决于工人的经验和熟练程度,难以保障钢筋桁架焊接质量的一致性^[9-14]。同时,桁架钢筋自身刚度较小,焊接过程中缺少牢固的定位约束,焊缝在冷却过程中容易出现主筋严重形变,对钢筋笼整体宽度产生不利影响,进而为后续的吊装和槽段下放环节带来潜在的安全风险。因此,为改善这一现状,通过研究自动化钢筋桁架加工设备提高焊接自动化程度,减少人工参与,对提高钢筋桁架的焊接质量和生产效率具有实际意义^[15]。

2 研发思路

2.1 整体工艺

钢筋桁架的制作过程涵盖平台上加工和将其搬运至钢筋笼进行安装两个核心环节。现有的自动化加工工艺通常无法满足长距离的整体加工和搬运任务,因此基于互换性原理和单元组装工艺,对整体桁架采用单元加工后进行组装的策略,满足现场操作和应用。

采用单元桁架代替整体制造,不仅需要改变传统桁架主筋的对接方式,而且为了确保单元桁架之间对接的互换性,每片单元桁架的宽度、端头错位距离须相同,具体实现方式如下。

1)将纵筋对接方式改为在一侧进行镦粗后套丝,套丝长度为螺纹套筒的长度;在另一侧进行镦

粗后套丝,套丝长度为套筒长度的一半(见图 3)。这种方法满足了桁架单元化拼接的要求,并且对连接处的强度不产生不利影响。

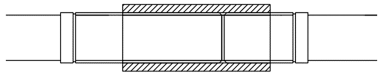


图 3 可拆装螺纹套筒对接
Fig. 3 Removable thread sleeve docking

2)钢筋桁架由钢筋焊接组成,焊缝形式属于直线型焊缝,宜采用直角坐标式焊接机器人。钢筋属于长而柔的构件,自身刚度小,在外力作用下容易发生不可恢复的变形,在焊接过程中更容易发生横向收缩和弯曲变形。在本设计中采用刚性固定纵向主筋的方式,如图 4 所示。由于焊缝在纵筋间隔较大,多段焊接产生的变形对端部错位距离不会产生明显纵向变形,因此仅需控制主筋截断长度相同,并在端头设立简易定位板即可保证加工的桁架单元规格统一。

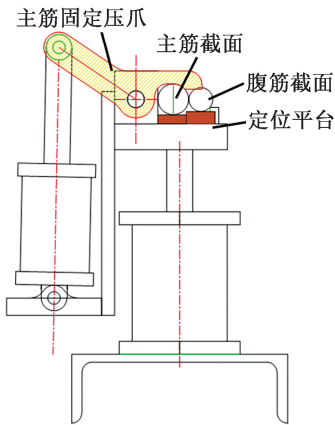


图 4 主筋定位和压紧方式
Fig. 4 Positioning and pressing method of main reinforcement

2.2 主要尺寸选择

经调研生产中常用桁架宽度分为 0.8、1.0、1.2m,此外还有 0.6m 宽的小型钢筋笼,但考虑小型钢筋笼常用施工场地较小且不对人工构成高强度劳动负担,因此设计主要考虑 0.8m 以上尺寸。现场桁架由人工通长连接钢筋后进行焊接加工,标准单节长度由纵向钢筋长度划分,地下连续墙设计深度若为 H ,那么桁架长度 L 与 H 值相等:

$$L = n \times 9 + L_1 + L_2 \text{ 或 } L = n \times 12 + L_1 + L_2 \quad (1)$$

式中: L_1 为主筋锚固长度,根据设计值变化; L_2 为端部错位长度,根据设计值变化; n 为纵向钢筋根数;9 和 12 为纵向钢筋标准长度(m)。

当钢筋笼长度为 60m 时,钢筋笼桁架分为 5 节

12m 钢筋通长连接,端头错位 0.8m,尾部增加锚固长度 L_1 。尾部锚固筋视为附加筋,不计入自动焊接分段,因此焊接桁架单元分段长度为 $12+L_2$ 或 $9+L_2$,取最大值端部错位 0.8m,12m 的纵筋为最大工件尺寸,桁架焊接机器人设计长度应满足单节最大长度 12.8m。为方便设备流转,桁架焊接机器人最大宽度应小于最大运输尺寸 3m。

2.3 定位装置设计

桁架主筋间分布腹筋,腹筋与主筋间沿直线均匀分布双面焊缝,焊缝应满足 JGJ 18—2012《钢筋焊接及验收规程》要求,双面短焊缝长度 $L \geq 5D$ (D 为钢筋直径),腹筋常用设计为 $\phi 28$ 和 $\phi 32$,焊缝最大长度 L 为 160mm,由于腹筋首尾相连,除两侧焊接工位焊缝长度为 160mm,其余焊接工位均需满足 320mm 的焊接长度。

由于采用人工上料和自动化设备焊接的工艺模式,在桁架焊接过程中定位误差不可避免,误差主要产生原因为定位误差 $\delta_{\text{定位}}$ 和工件加工误差 $T_{\text{加工}}$,即:

$$\Delta = \delta_{\text{定位}} + T_{\text{加工}} \quad (2)$$

在实际设计中,加工误差 $T_{\text{加工}}$ 表现为端头切割产生的贴合面偏移,由切割设备对钢筋下压造成 $1^\circ \sim 5^\circ$ 的切角,用最大腹筋直径 $\phi 32$ 算得 $T_{\text{加工}}$ 设计值为 3mm。定位误差 $\delta_{\text{定位}}$ 为位置要求的最大变动范围,其主要原因为工装的定位装配基准和腹筋放置基准,定位误差计算如下:

$$\delta_{\text{定位}} = \delta_{\text{位置}} + \delta_{\text{不重}} \quad (3)$$

式中: $\delta_{\text{位置}}$ 为基准位置误差值,为定位工装预留的安装误差; $\delta_{\text{不重}}$ 为基准不重合误差值,是工件中心在未焊接状态下摆放在工装中心的经验基准误差。

由于不同规格桁架腹筋相对长度尺寸会发生改变,工装采用临时装配,应预留充足装配误差, $\delta_{\text{位置}}$ 设计值为 20mm, $\delta_{\text{不重}}$ 设计值采用工件中心的放置误差,经验值为 2mm,由此推算工装上腹筋的放置空间 $L+\Delta$ 应不小于 345mm。

2.4 压紧装置设计

压紧装置采用气缸压紧的方式,下压力 $F_{\text{压}}$ 参考成年人体重初定 686N,双气缸压紧焊接段两侧。为了尽可能缩小占地空间,气缸输出力矩与负载阻力矩比值为 1,则单个气缸推力理论值 $F_{\text{气缸}}$ 为下压力 $F_{\text{压}}$ 的一半,为 343N。

由于气缸在工作中存在摩擦等能量损耗,气缸实际推力 $f_{\text{气缸}}$ 应考虑工作折减系数 η :

$$F_{\text{气缸}} = \eta f_{\text{气缸}} \quad (4)$$

气缸实际推力按下式计算:

$$f_{\text{气缸}} = S_{\text{气缸}} P_{\text{空气}} \quad (5)$$

式中: $S_{\text{气缸}}$ 为气缸内部截面积; $P_{\text{空气}}$ 为空气压力。

气缸内部截面积 $S_{\text{气缸}}$ 为:

$$S_{\text{气缸}} = \frac{\pi D^2}{4} \quad (6)$$

式中: D 为气缸缸径。

取工作折减系数 η 为 0.85,空气压力 $P_{\text{空气}}$ 为 0.6MPa,求得缸径 $D = 29.27\text{mm}$,向上选取标准件缸径为 32mm。

综上,依据桁架单元的尺寸范围和单元桁架加工的工艺性考量,对桁架焊接机器人提出的基础功能性要求为:设备焊接尺寸宽度 0.8~1.2m 范围可调;钢筋端头错位距离 0.8m 范围内可调;具备单幅桁架的传送功能,以满足多个单元连续作业;工装为临时装配,焊接段在工装活动范围至少为 345mm;焊接设备应具备相对坐标定位功能。

3 新型直线型焊接机器人

根据上节分析,本文提供一种能够对钢筋桁架进行固定、焊接和传送于一体的直线型焊接机器人,如图 5 所示。焊接机器人包括操作主机、底座平台、焊枪总成、夹紧传送总成、传送电机、焊机、动轨平台和主筋限位板。通过操作主机可进行焊接机器人的各项参数设置、监控焊接进度、控制夹紧传送总成与焊接机器人之间的联动。

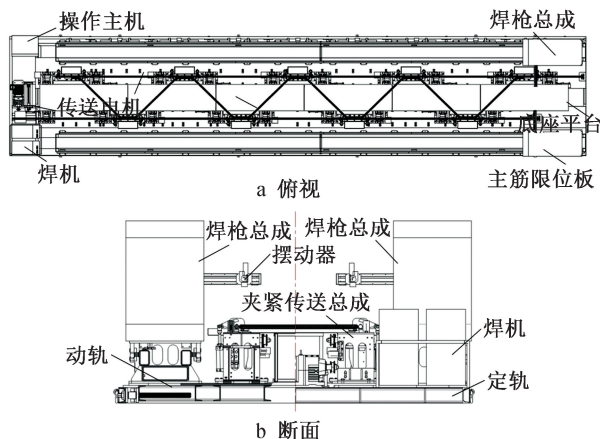


图 5 新型桁架焊接机器人

Fig. 5 New truss welding robot

3.1 加工平台

加工平台分两侧安装夹紧传送总成和焊接机器人,一侧为定轨,定轨安装板与平台框架刚性连接;另一侧为动轨,动轨安装板与平台框架可通过滑动摩擦横向移动。通过将动轨上固定的夹紧传送总成和焊枪总成整体横向移动,可控制加工桁架宽度。丝杠侧向移动的动轨平台具有自锁特性,调节后的平台具有稳定性。

3.2 纵向移动系统

纵向移动系统由多个夹紧传送总成配合完成桁架主筋的夹紧和传送,总成之间采用链轮串联连接,并通过压板与平台安装板固定,由平台前端的传送电机带动同步工作。纵向移动桁架的最大单重 $m=80\text{kg}$,预定移动速度 v 为 1m/s ,考虑工件放置偏差、链条张紧阻力、轻微导轨摩擦,可将传动力放大 1.2 倍作为设计许用传动力,计算如下:

$$F_{\text{设计}} = \mu mgS = 141.12\text{N} \quad (7)$$

式中: μ 为铁-铁摩擦系数,取 0.15; g 为重力加速度,取 9.8m/s^2 ; S 为设计安全系数,取 1.2。

有效传动功率:

$$P_{\text{有效}} = \frac{1}{1\,000} F_{\text{设计}} v \approx 0.141\text{kW} \quad (8)$$

由于多级链条传动,考虑实际传送损耗,总传动效率 $\eta=0.8$,电机功率应向上选取,选择 0.5kW 三向异步电动机。在桁架加工平台一端设置主筋限位板抵抗传送冲击及控制主筋端头间距。

3.3 夹紧定位系统

桁架在单元加工平台的传动和定位由多个夹紧传送总成单元组成,如图 6 所示。夹紧传送总成结构包括气动升降定位平台、气动夹爪、链轮滚筒组、主筋挡轮和外链条张紧轮。气动升降定位平台采用气缸和直线导轨控制平台升降,平台在升起状态下通过夹爪气缸^[4]夹紧主筋固定竖向桁架主筋,平台上固定垫块调节主筋与桁架的高低差;降低后的平台可将竖向桁架放置于滚轮组进行传送,传送过程中的竖向桁架可通过侧边挡轮控制直线度。每个夹紧传送总成上装载 1 套预张紧的滚筒链轮组^[5],滚筒采用伪双排链轮进行内部传动连接和外部传动连接,相邻 2 个总成通过改变链条长度的方式控制间距,通过弹簧带动外链条张紧轮连杆张紧。

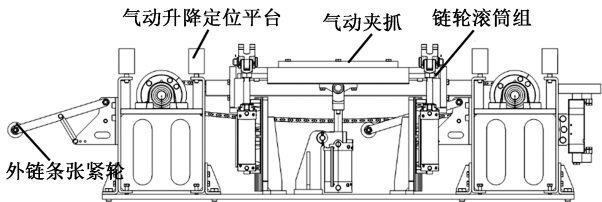


图 6 夹紧传动总成

Fig. 6 Clamping transmission assembly

3.4 焊枪总成

焊枪总成通过 2 个直线模组控制焊枪在横向和垂向的坐标位置,采用齿轮齿条机构在纵向轴移动。焊枪总成在纵向移动过程中,通过车身传感器识别夹紧传送总成上的焊接工位进行焊接动作。

焊枪总成采用的焊枪为气保焊通用焊枪,在直线模组上的摆动器处夹紧固定,焊机放置于平台一侧,送丝机置于焊枪总成内置机架上,可通过操作主机界面设置焊接启停位置和焊枪总成的三向电机移动。焊枪总成的焊接参数相对于人工工作效率进行设计,经过试验及现场观察,对于 280mm 桁架焊缝的人工焊接效率约为 2min/道 。对焊缝焊接装置计算条件极值为焊缝宽度 50mm ,深度 14mm ,效率要求为焊接状态下 2min 完成焊缝 280mm ,采用具备一定泛用性的 CO_2 气体保护焊,焊接方式为匀速摆动直线焊接。

焊枪总成结构如图 7 所示,通过 2 个直线模组^[1-2]交直相连,控制焊枪垂面坐标。平台上每个焊接机器人的车载电箱内置伺服驱动器控制端头焊枪的三坐标位移,可通过主机对车载电箱内驱动器编程控制。在横向直线模组端部搭载焊枪装夹摆动器,通过摆动器角度、端点停止时间与纵向移动电机配合实现多种焊接路径。与焊枪相连的送丝机搭载在焊接机器人上,电源线和 CO_2 气管通过线槽接入焊机和集中供气罐,送丝器控制线接入主机,通过操作主机内部 PLC 模块可对焊接机器人焊接状态进行编程控制。

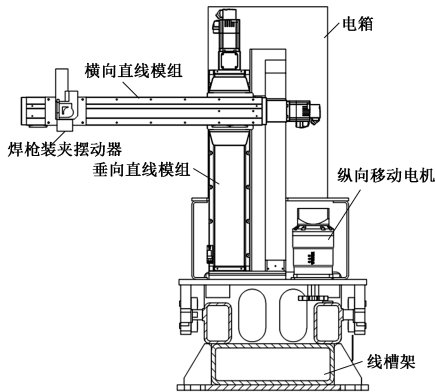


图 7 焊枪总成结构

Fig. 7 Welding torch assembly structure

3.5 焊缝定位系统

桁架焊缝的特点为间断型的直线,即桁架中两侧焊缝均处于同一直线上,且不连续,各个焊缝之间的距离有较大离散度,即焊缝之间的距离各不相同,不能直接使用定值定位系统进行焊缝定位。

考虑到上述特点,在设计焊缝定位系统时,摒弃了现有的图像处理等复杂繁琐的定位方法,采用了以焊缝处钢筋为定位基准,通过伺服电机走固定值来控制焊缝长度。在应用时,首先通过纵向移动系统驱动焊接机器人沿桁架纵向移动,当到达焊缝起点时,使用机械式触碰开关发出准备焊接信号,

焊接机器人在接收到信号后,控制焊枪总成的定点放下和定点抬起,实现焊缝的高质量焊接。

4 基于新型直线式焊接机器人的钢筋桁架加工生产线

如图 8 所示,桁架加工生产线全长 40m、宽 2.5m,是由 3 个上述直线型焊接机器人依次纵向排列而成的生产线,可满足 X 形和 W 形桁架的上料、定位、焊接和成品堆放,通过小型起重设备辅助操作人员进行上下料。采用桁架加工生产线生产桁架,可通过每个加工平台焊接固定的腹筋焊缝面提高单元桁架的生产效率。

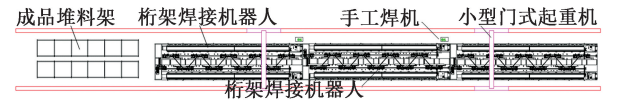


图 8 钢筋桁架加工生产线
Fig. 8 Steel truss processing production line

通过桁架加工生产线生产的单元桁架须经过主筋和腹筋上料、主筋和腹筋的点焊、不同姿态腹筋焊缝自动焊接和单元桁架堆料。如前文所述,可将桁架生产线纵向依次分为第 1 加工平台、第 2 加工平台、第 3 加工平台和成品堆料架。由于桁架生产线须同时满足 X 形和 W 形单元桁架的加工需求, X 形桁架可在 W 形桁架上增加腹筋进行焊接,生产线流程如图 9 所示。

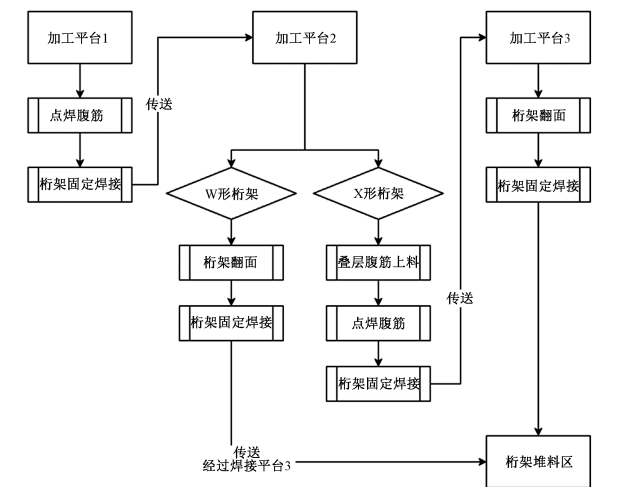


图 9 桁架加工流程
Fig. 9 Truss processing flow

在生产 X 形单元桁架时,可将 3 个加工平台的加工工序分配如下:①第 1 加工平台用于 W 形桁架的主筋和腹筋上料,点焊固定腹筋,腹筋正面焊缝焊接,向第 2 加工平台传送桁架;②第 2 加工平台用于 X 形桁架叠层腹筋的上料,点焊叠层腹筋,叠层腹筋焊缝焊接,向第 3 加工平台传送桁架;③第 3 加

工平台用于桁架翻面, W 形桁架反面焊缝焊接,桁架转运至成品堆料架。生产 W 形单元桁架时,使用第 1 加工平台和第 2 加工平台即可完成焊接,加工工序分配如下:第 1 加工平台用于 W 形桁架的主筋和腹筋上料,点焊固定腹筋,腹筋正面焊缝焊接,向第 2 加工平台传送桁架;第 2 加工平台用于桁架翻面, W 形桁架反面焊缝焊接,桁架转运至成品堆料架。

5 直线型桁架焊接机器人的应用

T3 地下连续墙钢筋笼智能建造中心是用于地下连续墙钢筋笼集中生产制作的自动化加工厂,主厂房长约 130m,宽 40m,净高 18m,内设 2 组钢筋笼加工平台,用于 60m 地下连续墙钢筋笼的集中加工制作。

桁架加工生产线位于厂内钢筋笼加工平台左侧,同时为 2 组钢筋笼加工平台提供桁架单元。由于自动化加工的主筋与弯曲腹筋须保证钢筋尺寸精度,针对现场供料过程规划了适用于上下游钢筋供应链的加工方案,如图 10 所示。

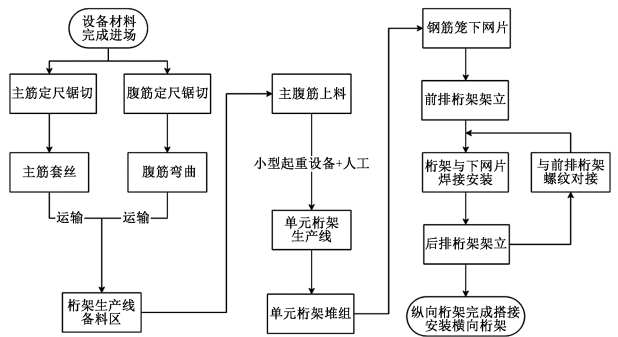


图 10 钢筋桁架工艺流程
Fig. 10 Steel truss process flow

单元桁架可适用于 0.8~1.2m 高度的地下连续墙,如图 11 所示。焊接机器人采用 CO₂ 气体保护焊自动焊接桁架单元,机器人的焊接速度为 2.5mm/s,每个 12m 长主筋的桁架单元件生产时间为 30min。最终的桁架产品高度误差小于 5mm,焊缝均匀饱满,由一个个单元片在堆料架成组堆叠,可适用于各种深度的地下连续墙制造。

每片 X 形预制桁架单元重约 240kg,钢筋笼下网片加工完成后,采用 6 人 1 组可搬运至钢筋笼网片上焊接固定。单片搬运相比于整体桁架搬运所需的劳动强度有所减轻,单元桁架间采用管钳或自动化工具可对接率为 100%,主筋对接完成后在对接处补充腹筋加强。最终完成的钢筋笼如图 12 所示。

每个桁架单元的生产时间为 20min,桁架合格



图 11 桁架焊接平台加工、堆放单元桁架
Fig. 11 Truss welding platform processing and stacking unit trusses



图 12 采用桁架单元制造的钢筋笼
Fig. 12 Reinforcement cage made of truss element

率 100%，专业焊工人数由原来的 10 人减少为 1 人，焊工人数减少 90%。同时桁架单元作为标准件，可以在施工现场的集中生产区或者其他区域专业化生产，实现了商品化经营。

现场生产应用证明，使用新型直线型焊接机器人进行钢筋桁架生产，不仅可以减少人力资源投入和原材料的损耗，还可以减少人工作业的缺陷和不稳定性，钢筋桁架焊缝饱满，成品尺寸精准，产品质量稳定，为地下连续墙钢筋笼自动化制作提供了有益的探索。

6 应用前景分析

- 1) 新型直线型焊接机器人不仅能够自动焊接，还可以自动压紧定位和自动传送，自动化程度高。
- 2) 使用相对寻点模式代替了绝对寻点模式。钢筋桁架不仅直径较大而且较长，各个焊缝的起始位置差异较大，使用相对寻点模式能够适应上述偏差，实现准确定位。
- 3) 使用桁架单元拼接形成整体钢筋桁架，不仅减少工人数量，降低工人劳动强度，还为商业化配送提供了技术基础。
- 4) 新型直线型焊接机器人通过改变焊枪姿态，不仅可以焊接 W 形钢筋桁架，还可以焊接 X 形钢筋桁架，通用性好，生产效率高。

新型直线型焊接机器人在地下连续墙钢筋笼的制造领域提供了一项创新工艺，为地下连续墙钢筋笼桁架制作带来了多重效益。首先，采用预制构件显著提升了施工效率，减少了现场加工和组装的时间，有效加快了施工进度；其次，预制构件的工厂

生产过程有助于提高施工质量和精度，从而提高整体施工质量，同时人工消耗最低，降低了工人的劳动强度；最后，预制桁架单元尺寸小、运输方便，可通过后方专业工厂加工制作后以商品桁架模式进行大范围配送，提升钢筋笼加工效率，降低桁架制作成本，具有良好的社会效益和经济效益。

7 结语

研究和应用表明，新型直线型焊接机器人在进行钢筋桁架生产时，不仅焊接质量稳定，同时尺寸准确，为后续加工提供良好基础。使用桁架单元拼接的方式进行桁架生产，显著提高了施工效率，减少了现场加工和组装时间，从而加快了施工进度。与传统方法相比，在确保焊接质量稳定的前提下，大大降低了人工数量和工人的劳动强度。同时，采用装配式构件和自动化焊接设备带来了环保与安全的优势，商品桁架的运作模式减少了施工现场的噪声和环境污染，提高了施工现场的安全性，还为地下连续墙钢筋笼的自动化生产提供了良好的技术基础。

参考文献：

[1] 夏明铤. 支护与主体结构一体化地连墙施工技术研究[J]. 铁道建筑技术, 2021(7): 101-105.
XIA M X. Research on construction technology of integration of support and main structure for underground diaphragm wall[J]. Railway construction technology, 2021(7): 101-105.

[2] 卢平凡. 地铁项目地连墙施工技术控制[J]. 四川水泥, 2020(6): 138-139.
LU P F. Technical control of diaphragm wall construction in subway project[J]. Sichuan cement, 2020(6): 138-139.

[3] 余正新. 淤泥质土地层中地连墙施工技术研究[J]. 交通世界, 2022(23): 4-6.
YU Z X. Study on construction technology of diaphragm wall in muddy soil layer[J]. Transpoworld, 2022(23): 4-6.

[4] 潘华炜, 周珺, 丁浩, 等. 地下连续墙施工过程中的变形控制研究[J]. 江苏水利, 2017(5): 29-32.
PAN H W, ZHOU J, DING H, et al. Study on deformation control of diaphragm wall during construction [J]. Jiangsu water resources, 2017(5): 29-32.

[5] WANG B, KARAVASILIS T L, CHEN P. Steel truss reinforced concrete composite walls: numerical investigation and design consideration [J]. Soil dynamics and earthquake engineering, 2024, 184: 108865.

[6] 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.

[7] WANG X R, SONG W, XUE T, et al. Dynamics analyses of rigid-flexible coupling of spot-welding robot[J]. Journal of advanced manufacturing systems, 2020, 19(4): 855-867.