

# “荣耀之环”关键建造技术研究

张弛 李明华 王圳

上海建工二建集团, 上海 200080

[摘要]文中首先介绍了“荣耀之环”的工程概况。其次,从技术角度分析了本工程的重难点。然后,从深化设计及加工制作,现场施工部署,圆环钢结构安装,圆环钢结构卸载,楼面、幕墙及屋面施工这六个方面阐述了整个“荣耀之环”的施工过程。并且总结了“荣耀之环”的关键建造技术。重点阐述了超大钢构件吊装过程中的 PLC 同步液压控制技术和焊接机器人技术。最后给出了结论和展望。

[关键词]“荣耀之环”; 钢结构提升; PLC 液压顶升技术; 数字化

DOI: 10.33142/aem.v7i6.16988 中图分类号: TU745 文献标识码: A

## Research on Key Construction Technologies of the "Glory Ring"

ZHANG Chi, LI Minghua, WANG Zhen

Shanghai Construction No. 2 Construction Group Co., Ltd., Shanghai, 200080, China

**Abstract:** The article first introduces the engineering overview of the "Glory Ring". Secondly, the key and difficult points of this project were analyzed from a technical perspective. Then, the construction process of the entire "Glory Ring" was elaborated from six aspects: deepening design and processing production, on-site construction deployment, installation of circular steel structures, unloading of circular steel structures, and construction of floors, curtain walls, and roofs, and summarized the key construction techniques of the 'Ring of Glory'. Emphasis was placed on the PLC synchronous hydraulic control technology and welding robot technology during the hoisting process of ultra large steel components. Finally, conclusions and prospects were presented.

**Keywords:** "Glory Ring"; steel structure lifting; PLC hydraulic lifting technology; digitization

### 1 工程概况

上海临港自贸区金融总部湾区“荣耀之环”位于滴水湖正北方核心区(图 1.a)。沿滴水湖,形成一个集航运、贸易、金融、保险、医疗等为一体的金融创新服务区(图 1.b)。

“荣耀之环”平面呈圆环形,外径 153m,内径 115m,宽度 19m,支承于四栋塔楼顶部。圆环底标高 46.55m,顶标高 56.15m,层高 6.6m(图 1.c)。四座塔楼高 46m。圆环主体为全钢结构,截面呈 C 字型开口,由内环桁架和上、下两层悬挑钢梁组成。内圈设倒三角桁架,外圈设封边环梁,桁架高度 6.6m。悬挑梁悬臂下弦长度为 11.3m,上弦 9.9m。

内环桁架高 8.7m,杆件采用大尺寸箱梁截面。圆环内侧设斜拉杆。支座区域为箱型构件。其余区域为直径  $\phi=200\text{mm}$  的实心预应力钢棒。主应力结构材质为 Q460,其余材质为 Q355B。

圆环与下部四栋塔楼之间设 32 个支座,分为固定铰支座和抗拉型滑动支座两类。“荣耀之环”结构通过 26 个支座与 T2、T2'、T3、T3' 四座塔楼连接。其中 T2、T3' 塔楼上各布置 7 个滑动铰支座, T2'、T3 塔楼上各布置 6 个固定铰支座。支座最大受拉承载力 10000kN,最大水平承载力 12000kN,最大竖向承载力 8000kN(图 4.a.b)。部分支座处设有黏滞阻尼器。圆环楼面采用钢筋桁架组合楼板。

“荣耀之环”的幕墙展现了最先进的幕墙设计。外环

立面为结构幕墙。单块玻璃尺寸为  $2.5\text{m}\times 6.7\text{m}$ 。由 8 片 12m 超白夹胶中空镂空玻璃组成,最大限度确保幕墙无轮毂,达到极致通透效果。内环立面为拉索玻璃系统。圆环顶部和底部均为铜色金属铝板。底面铝板带穿孔,以实现夜幕下的灯光设计效果(图 1.d)。

### 2 工程难点

“荣耀之环”采用了极为大胆和简约的建筑风格设计。结构主体采用了表面平整光滑的钢结构圆环整体设计,使得结构在悬空段受纯弯剪扭作用。在实现了建筑上极致简洁的美感的同时,确实也带来了结构设计上,尤其是现场施工技术和质量安全把控上的超高难度。

“荣耀之环”为超大直径、超大跨度的空间钢结构,且截面呈开口形式(图 2.a)。施工过程为非稳定体系,结构安装和变形控制难度很大(图 2.b)。钢结构和幕墙之间的变形协调控制,以及在 50m 高空超大面积玻璃幕墙铝板装饰层的安装也是本工程的难点。

尤其是南、北两段悬空段每段提升重量达 1550t。不仅需要完成异型超重单体的匀速平稳提升,同时需要保证构件重心的稳定。整个提升过程需要提前完成数字化仿真计算和动画模拟(图 2.c.d)。在提升段到达指定高度后进行临时固定并开始高空焊接工作。最后,还需要让圆环的重量逐步和安全地卸载到整个塔楼上。并监测四栋塔楼的整体沉降。

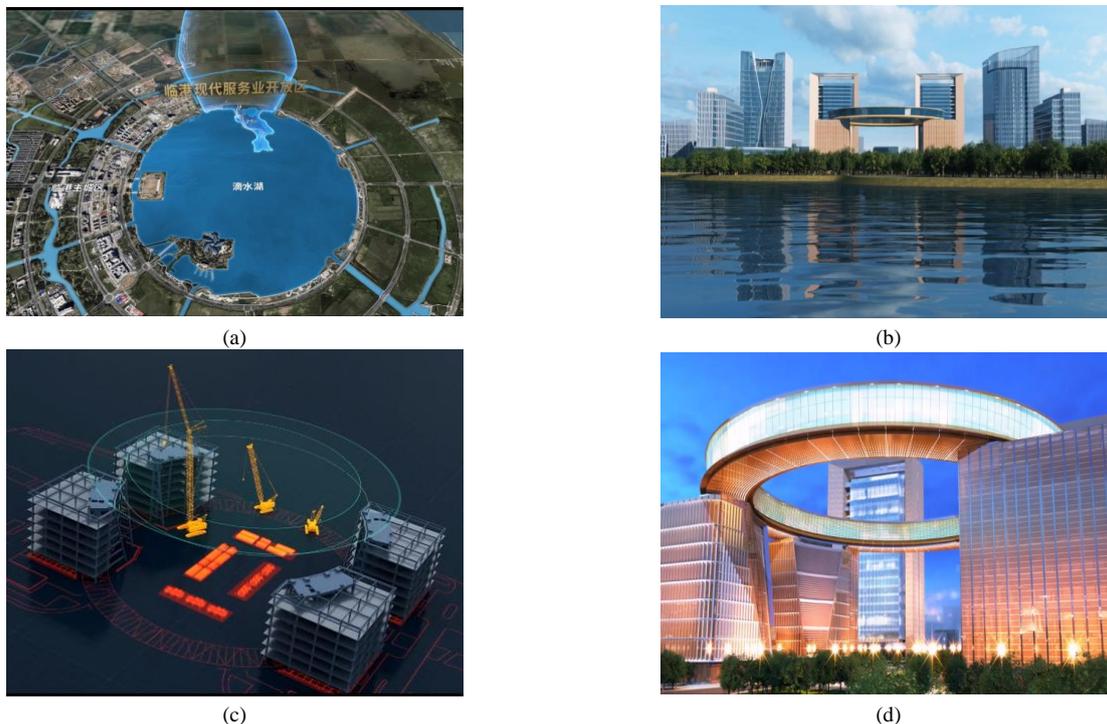


图1 “荣耀之环”工程概况示意图

(a)位于滴水湖正北方临港现代服务业开放区；(b)湖面上看“荣耀之环”的立面示意图；(c)“荣耀之环”下方塔楼支承结构与四座塔楼示意图；(d)“荣耀之环”夜幕下灯光效果图

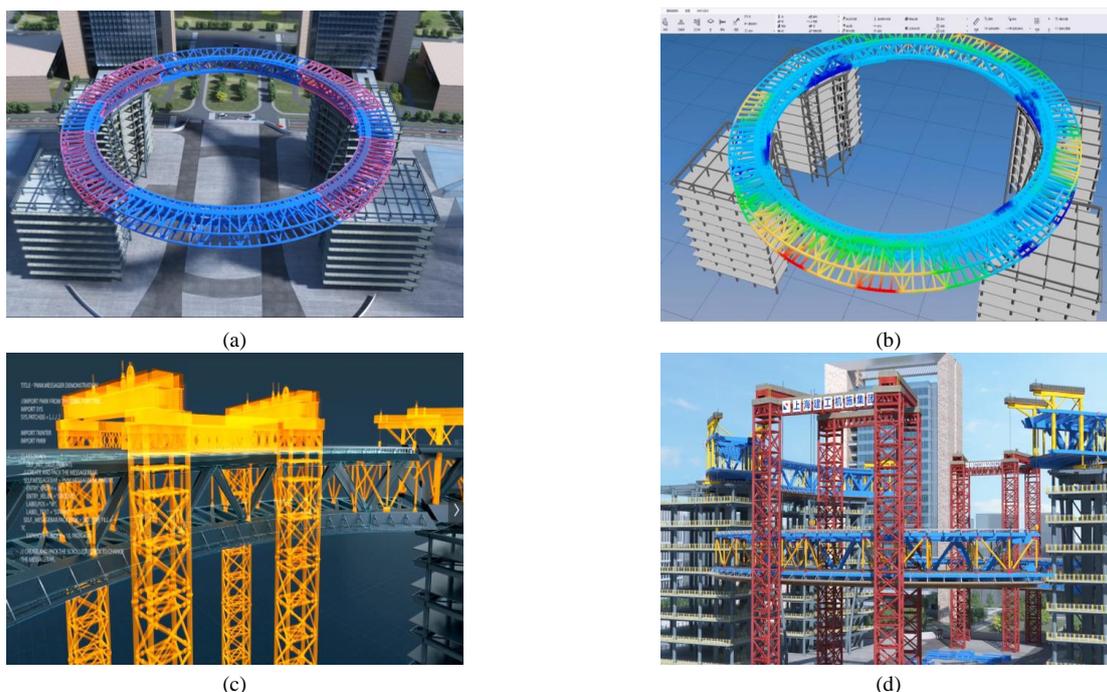


图2 “荣耀之环”工程难点解析图

(a)四座塔楼与圆环结构框架图；(b)圆环钢结构应变有限元分析图；(c)圆环提升段的提升过程数字仿真图；(d)圆环南侧提升段提升动画示意图

### 3 施工过程

#### 3.1 总体施工技术路线

荣耀之环结构总重约 9760t，钢结构部分约 6760t。结

合“荣耀之环”工程特点，将圆环分为三个区域(图 3.a.b.c)。第一区域为四座塔楼的上部结构，单长约 40m，单重约 1500t。第二区域为东、西侧的塔楼间结构，跨度约 27m，

单重约 330t。第三区域为南、北两侧的塔楼间结构，跨度约 106m，单重 1550t。第一、二区域采用原位散件安装，东、西地块同步施工。第三区域由上海建工机施集团自主研发的，并且已成熟应用的计算机控制液压千斤顶系统整体提升安装。南、北合拢段同时进行。

### 3.2 深化设计及加工制作

钢结构深化设计阶段，结合施工模拟计算，确定圆环结构预变形方案。本工程钢结构与幕墙、屋面的关系紧密。需要一体化深化设计、加工，和安装钢结构、幕墙，和屋面，并采用 BIM 技术辅助提升深化设计质量。

钢构件由拥有特级加工资质的钢构生产厂生产。加工基地具备先进的数字化加工中心、数控等离子火焰切割机、工业喷涂机器人，以及数字化流水生产线。并且加工基地拥有两万多平米的专业预拼装场地，可满足本工程复杂钢结构的加工和预拼装要求。为了提高效率，最大构件采用虚拟预拼装技术。以减少现场焊工作量，加快进度，钢构件大分段出厂时，最大构件长 22m，宽 4.7m，重约 9.3t。

### 3.3 现场施工部署

现场布置两个出入口，场内设置环形施工道路，供大型起重机和大型构件运输车辆通行。环形道路内侧设为构件堆场，提升段投影下方设置整体拼装和提升胎架。

### 3.4 塔楼钢结构施工

塔楼 T2、T3、T2'、T3' 中，每个单体屋面钢梁构件都达约 200 件，需要在 BIM 中预建模，并做安装流程及构

件碰撞预演(图 5.a.b)。钢板板材使用 4mm~75mm 不等。

### 3.5 圆环钢结构安装

复测支座埋件，完成支座安装，并临时固定(图 4.a.b)。随后安装第一区域钢结构。首先安装下桁层结构。横架下桁架分两段吊装，构件最大长度 22m，重约 93t。采用 600t 履带吊吊装。下桁层结构安装完成后，设置临时支撑，安装桁架腹杆及上桁。最后在外圈设置临时支撑，安装屋面层悬挑结构。圆环钢结构最大构件截面达 2.5m×1.7m。高空危险处采用焊接机器人进行现场焊接。

第二区域钢结构焊接顺序同第一区域，采用 600t 履带吊散件吊装。最重构件为弦架，长 16m，重 43t。两部分结构合拢后，铺设层面楼承板，施工楼板混凝土，留设后浇带。

第三区域，圆环采用整体提升工艺安装。整个提升过程包括提升前阶段、悬停阶段、提升阶段、嵌补段安装阶段，以及卸载阶段。提升前完成对原始数据的测量；提升悬停后对整体进行观测。该阶段计算最大水平偏位 40mm，预警值设置为 36mm。提升阶段对提升点的竖向相对偏位进行控制，应将最大竖向相对偏位控制到最小，预警值设置为 10mm。到嵌补段安装阶段，需对嵌补段两端对接口的水平及竖向相对偏差进行控制。应将最大相对偏位控制到最小，水平方向及垂直方向预警值均设置为 40mm。卸载阶段应对卸载前后各观测点竖向位移进行监测，相对卸载前变形，预警值设置为计算值的 90%

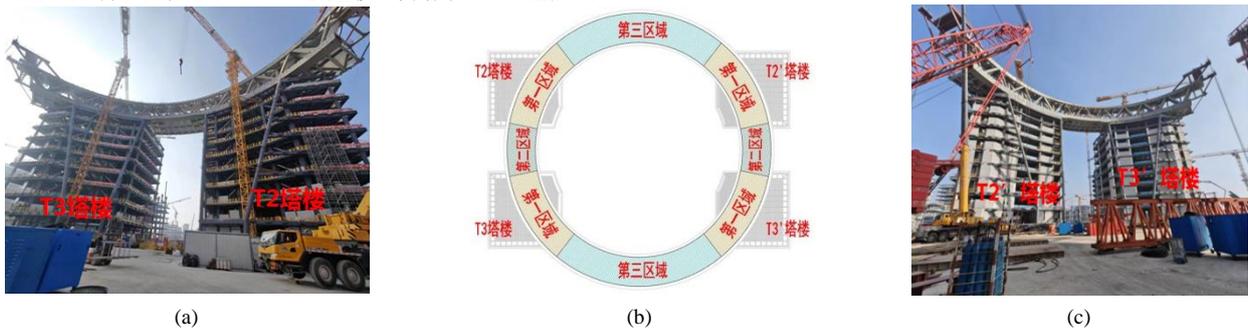


图 3 圆环钢结构与塔楼之间的支座形式示意图

(a)环西边 T2、T3 塔楼；(b)“荣耀之环”施工区域划分；(c)环东边 T2'、T3' 塔楼



图 4 圆环钢结构与塔楼之间的支座形式示意图

(a)抗拉型滑动支座；(b)固定铰支座

每个提升段跨度 96m，平面呈弧形。提升段结构形式为大跨度圆环钢桁架；提升区域为南北侧第三区域主体结构；提升段加固形式为外环开口处圆管支撑加固；提升段总长度达 60.8m；提升总高度为 46m；提升方式为计算机同步控制的液压式千斤顶集群式提升。为确保提升过程稳定，跨中和跨端各设 4 个提升点，总计 8 个提升点。跨中布置两个门市提升支架。基础采用钢管桩免共振振动工艺施工。跨端提升支架设置在已安装的圆环上。内环跨中两个提升点上各布置两台 350t 千斤顶。其余 6 个提升点上布置 200t 千斤顶。总提升能力达 2600t。

在投影下方地面设置拼装胎架，采用 300t 和 150t 履带吊辅助拼装。提升段与高空对接不设补缺段，设斜向切口，便于合拢进档。为确保对接精度，采用如下方法控制。第一，对接段构件预留加工余量。对地面拼装及高空已安装的圆环进行三维扫描，形成数字化模型。利用 BIM 技术虚拟拼装，结合提升变形计算值，确定对接段构件实际尺寸。工厂加工后将运至现场，完成提升段全部拼装。第二，采用自主研发的高精度整体提升及计算机同步控制技术，精度可达 2mm，确保准确对接。截面开口处设置临时加固杆件，形成封闭的桁架体系。钢结构拼装完成后，铺设楼面楼承板及钢筋，同时安装幕墙轮毂及底部装饰铝板。经施工计算，提升过程中结构变形最大达 44mm，影响幕墙玻璃安全，玻璃板块考虑后装。拼装完

成后，开始试提升，提升 20mm 后悬停静置。检查一切正常后，迅速提升。提升速度控制在 4m/h，提升过程结合荷载实时监测与测量机器人自动追踪测量。实现荷载与位移双控，确保同步提升过程稳定。提升到位后，完成斜口对接焊接。

### 3.6 圆环钢结构卸载

圆环合拢后，先进行整体提升系统卸载。然后卸载圆环临时加固杆件。根据计算加固杆件，最大内力达 200t。采用自主研发的四幅轴力卸载装置，实现稳步卸载。卸载完成后，拆除临时加固杆件和提升系统。拔除提升支架钢管桩。

进行卸载前，必须确保所有的嵌补段均已安装完成，所有嵌补段与已安装结构间的焊接工作均已完成；在跨端提升点先行卸载。卸载顺序为在单侧跨端四个提升点同步进行卸载；卸载方式为四名人员在四处同步切割钢绞线；做到跨度结构无变形，做好测量复核工作。跨中提升点随后卸载。卸载顺序为在单侧跨中四个提升点同步进行卸载；卸载方式为采用千斤顶反向行程进行卸载；跨中结构变形约 180mm，千斤顶反向行程缓慢卸载，并做好实时监测记录。

### 3.7 楼面、幕墙及屋面施工

圆环主体结构安装完成后，对称浇筑楼面混凝土。内外环立面玻璃幕墙屋面安装，沿口铅板跟进安装，最后施工顶部金色屋面。圆环钢结构截面形式、尺寸，玻璃幕墙形式、尺寸，和幕墙安装夹具详见图 6。

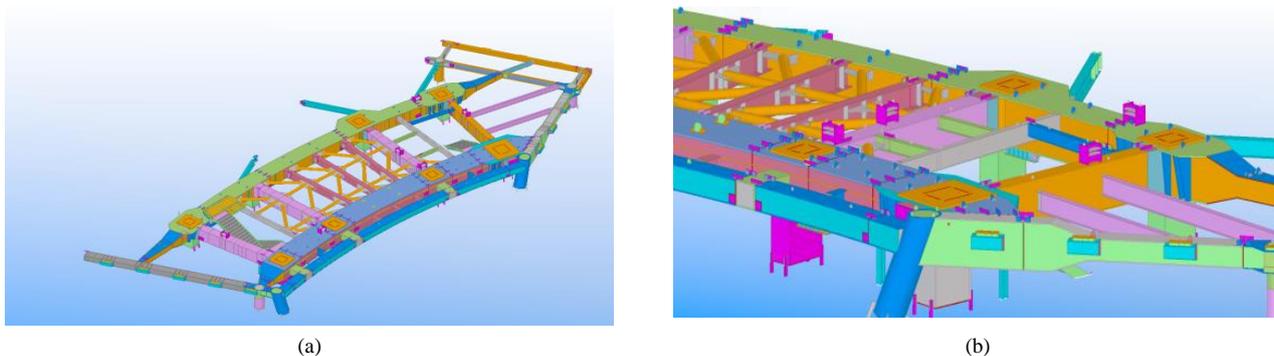


图 5 塔楼上圆环钢结构 BIM 构件详图

(a)整体；(b)与下部塔楼圆柱支撑连接细部

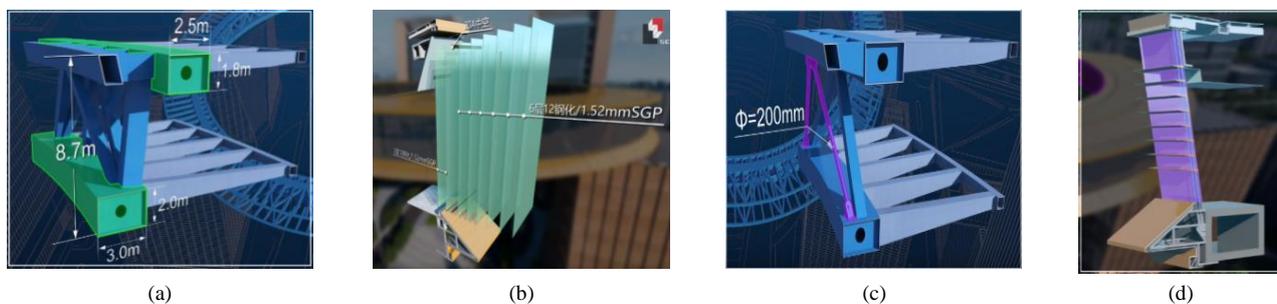


图 6 “荣耀之环”圆环钢结构截面、幕墙，及幕墙夹具细部构造详图。

(a)圆环开口“C”字型截面形状与详细尺寸图；(b)幕墙强化玻璃分层详解图；(c)圆环开口“C”字截面背面斜拉杆示意图；(d)玻璃幕墙夹具示意图

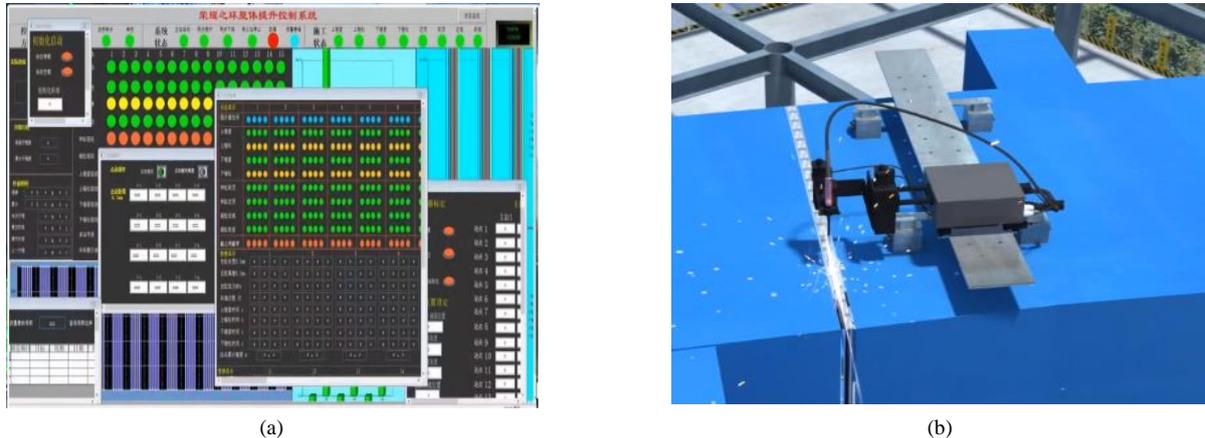


图7 “荣耀之环”关键建造技术

(a)PLC 同步液压顶升控制系统 PC 端界面控制软件; (b)钢结构焊接机器人

#### 4 建造技术难点

“荣耀之环”工程全过程施工中的技术难点包括：四栋高层塔楼的同步施工和沉降变形控制、塔楼外侧圆环结构下部的斜向圆柱支承体系的分层拼接与传力校正、四栋塔楼顶部的支座及隔震装置的安装、圆环钢构件的分段吊装、卸载时的钢结构圆环的受力平缓过渡、钢结构圆环成形后的全过程的应力应变重分布的计算和监测,以及焊接区域微小裂缝在应力应变重分布过程中的扩展风险评估和措施等。这里重点阐述两项最为前沿的技术重难点:

##### 4.1 液压顶升 PLC 同步控制系统

“荣耀之环”南、北两侧圆环构架重达 1550t,且平面呈圆弧形,既不中心对称,也不左右对称。在 8 组钢绞线提升点提升过程中,需要实时对提升高度和构件的重心进行监测和校位。通过安装位移和应力应变传感器对提升全过程进行系统化控制,确保系统工作的稳定<sup>[1,2]</sup>。连接液压提升装置的是一台提升控制器,控制连接 PC 端,PC 端上有自主研发的 PLC 同步液压提升控制软件(图 6.a)<sup>[3]</sup>。操作者可以通过软件对提升过程进行操控。

##### 4.2 高空焊接机器人

由于钢构件数量庞大,焊接任务繁重且危险。因此,

集团研发了钢结构焊接机器人辅助焊接(图 7.a)。

#### 5 结论与展望

“荣耀之环”工程体现了国际一流新城的建造水平,代表了中国甚至是世界的一流建筑标杆,助力上海成为国内外极具金融创新功能的总部核心区。

世界大势最终是文明的碰撞。中国上海滴水湖畔的荣耀之环,就像是上帝因为战争和众生的苦难而掉落的那滴眼泪所幻化成的光环。“荣耀之环”终将因为更加包容和开放的中国而载入人类文明的史册。

##### [参考文献]

- [1]杨叔子,杨克冲,吴波,等.机械控制基础[M].武汉:华中科技大学出版社,2020.
- [2]杨利,谢永超.传感器与机器视觉[M].北京:中国工信出版集团,2021.
- [3]李岚,梅雨凤.电力拖动与控制[M].北京:机械工业出版社,2015.

作者简介:张弛(1985—),男,加拿大拉瓦尔大学博士,清华大学助理研究员,博士后,上海建工二建集团高级工程师,项目总工程师,研究方向:土木工程。