

高速接触网腕臂智能化预配施工工法

中铁十一局集团有限公司

吴 飞 蒋 海 何利江 马林林 刘 曼

1. 前言

高速接触网腕臂智能化预配施工工法是应用工业机器人的智能化驱动和柔性控制的方法，实现自动化、智能化的接触网腕臂车间预配作业的施工方法。传统的接触网腕臂预配方法为如果预配，存在预配精度低、合格率不高、生产效率低等问题，从开通运营的线路来看，人工预配的腕臂在运行过程中还存在精度不高、牵固稳定性差等问题。随着高速铁路的快速发展，高速铁路对接触网腕臂提出了更高的要求，如：一次精准组装到位、腕臂数据可追溯等。

为解决接触网腕臂施工的上述问题，满足高速铁路发展的需要，中铁十一局集团电务工程有限公司联合铁四院，依托新建铁路武汉至十堰高铁线路自主研发了“基于工业机器人的腕臂智能化预配技术”，研制了智能化腕臂预配车间装备，在总结“智能化腕臂预配车间”应用于施工生产经验和方法的基础上形成了“高速接触网腕臂智能化预配施工工法”。

目前，本工法在汉十高铁项目验证应用效果良好，完成了汉十高铁项目的腕臂预配工作，比传统方法精度更高、效率更快、费用更省。其关键技术-“基于工业机器人的腕臂智能化预配技术”经湖北省科技信息研究院查新检索中心进行国内外查新结论为：“国内外未见与其查新要点完全相同的文献报道”，在中国铁建股份有限公司组织的工法关键技术专家评审中经组委会评审认定为“国内外领先技术”；其核心技术形成的4项实用新型专利均已授权：“用于腕臂预配系统的三轴伺服变位专机及腕臂预配系统”（ZL201820996992.1）、“用于腕臂预配系统的腕臂加工设备及腕臂预配系统”（ZL201821007310.6）、“用于三轴伺服变位专机的柔性定位台及三轴伺服变位专机”（ZL201820996970.5）、“腕臂预配系统及预配工装”（ZL201821006884.1）；3项发明专利均已受理：“腕臂预配系统及腕臂预配方法”、“用于腕臂预配系统的腕臂加工设备及腕臂预配系统”、“腕臂预配

系统及预配工装”。

2. 工法特点

本工法基于智能化腕臂预配车间，采用工业机器人、自动化数据流转和流水线自动控制的方法，具备以下特点：

2.1 基于 BIM 技术建立了设计施工一体化的大数据中心，开发了智能预配管理系统，实现了网络分布传输数据和精准控制的工厂预配作业。

2.2 三维精确测量计算的预配数据和预配任务计划可从数据中心自动推送或本地导入，实现数据驱动控制腕臂预配作业，减少人工外部干预。

2.3 腕臂预配数据可追溯性，利用自动喷码赋予腕臂身份信息，承载每套腕臂的身份信息数据使得每套腕臂预配数据可追溯。

2.4 腕臂零部件（如定位管卡子、套管双耳等）自动行走定位，通过变位机的移动，将卡件滑动到需求位置，提升零部件安装位置精度至 $\pm 1\text{mm}$ ，避免人为误差。

2.5 高度柔性化的生产模式，满足多种类型接触网腕臂生产预配，通过伺服机构和机器人的精密配合，可实现 2 米~4 米的平、斜腕臂柔性化生产。

2.6 采用机器人携带电子力矩扳手自动拧紧螺帽，保证数据达到质量要求，精度高达 $0.1\text{N}\cdot\text{m}$ ，满足高精度预配生产目标，实时反馈力矩到数据系统中，实现数据的可追溯性。

2.7 减少劳动力成本支出，提升预配效率，机器人代替人工搬运，减轻人工劳动强度，自动化流转过过程，缩短腕臂预配时间。

3. 适用范围

本工法适用于高速、普速铁路、城市轨道交通架空接触网的腕臂自动化预配施工。

4. 工艺原理

4.1 基于 BIM 技术的三维智能预配管理系统，实现全过程的数据分析、流转、

驱动和控制：

(1) 实现基于 BIM 技术和大数据自动分析的腕臂管件最优套料算法，提出适合预配的最优管件长度组合和加工顺序计划，可灵活调整加工顺序，结合最优，给电气控制系统传达非时序化的切割加工、堆栈指令，最大程度节约腕臂原材料；

(2) 实现设计数据、工点测量数据、零部件数据和进度任务的自动输入，驱动机器人生产线；

(3) 实时推送参数化的腕臂预配 BIM 图到各个工位；

(4) 实时记录工位作业的尺寸、扭矩、零部件规格数量等各种技术参数和腕臂总装检测工数据；

(5) 成品数据上传到管理系统，创新实现了智能预配工艺的数据闭环，为现场施工安装、工程验收等提供全寿命周期的数据流转接口。

4.2 高度柔性化设计

根据接触网数据唯一性的特点，研发出满足多种规格的接触网腕臂预配系统，利用伺服电机使控制行走速度，准确控制被控物到达的位置。

4.3 工业机器人自动抓取、转运

横、斜腕臂采用机器人搬运。机器人动作由编写的 PLC 系统程序控制，在每个工序完成后，机器人将当前工位的腕臂抓取，自动传输到，到下一个工位，直至腕臂完成预配，机器人下线。可根据系统传递的腕臂尺寸，自动抓取，满足不同腕臂生产需求。

4.4 工业机器人力矩精准紧固

由于腕臂零部件螺母型号不一，机器人的拧紧枪批头采用自动更换方式。为保证腕臂螺栓力矩精度满足要求，在拧紧枪采用电子式力矩扳手，通过电子信息信号，实现不同螺栓型号、不同力矩大小自动化紧固，力矩数据同时保存记录至数据中心，供追溯查阅。

4.5 腕臂信息追溯、定位技术

采用高精度自动喷码机，为每一根腕臂打上二维码及条形码标识，赋予腕臂唯一身份。本技术采用非接触式连续自动喷码，能够有效保障字迹清晰持久，喷印图案准确，在复杂的现场环境也不会脱落。支持手机扫描身份识别，保证每一

根腕臂都能够从数据计算、安装位置信息、出厂时间、作业人员等进行追溯查询。

4.6 腕臂零部件自动定位技术

本技术主要采用翻转伺服电机、伺服滑台、自主研发设计的零部件工装夹具及工作台组成，实现接触网腕臂承力索座、卡子、套管座等卡件的自动走行定位安装。利用翻转伺服电动机将工作台转向，伺服机翻转使得机构可以交替生产平腕臂和斜腕臂，同时完成另一边的上件，自动读取数据系统中各零部件安装位置，通过电气控制系统控制变位机的移动，将卡件精准滑动到预配安装位置。

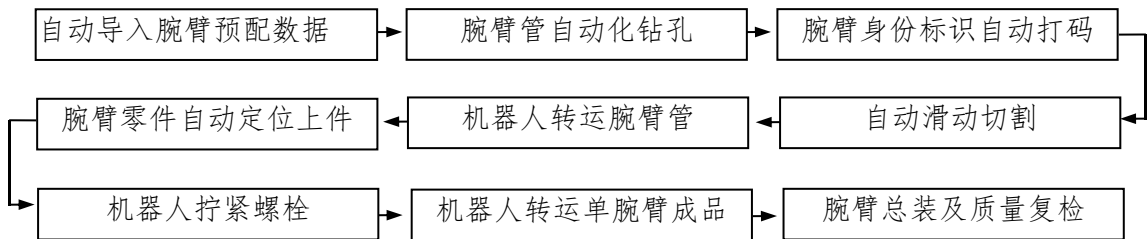
4.7 电气控制系统研究

电气控制系统采用先进的 SIMENS 系统，通过现场工业级以太网络将所有设备进行连接通讯，如：机器人、执行阀岛、伺服电机、触摸屏监控系统、生产显示系统等。

在腕臂智能化预配过程中，主要采用由工控机导入 excel 的方式，传输到电气控制系统中，获取原始接触网腕臂相关数据。采用 labview 上位机导入 Excel 表格到 SQL server 数据库，然后通过 labview 上位机组态，通过 RS232 串口与 PLC 通信，传输数据生产。

5. 工艺流程及操作要点

5.1 施工工艺流程



5.2 操作要点

5.2.1 自动导入腕臂预配数据

按照腕臂预配车间数据格式要求，由智能预配管理系统自动推送预配工单和数据给车间机器人自动化控制系统，完成腕臂预配数据的录入，实现本地或远端导入腕臂预配车间数据库内。

5.2.2 腕臂管钻孔

作业人员将选择的腕臂剥离掉塑料薄膜，放置于打孔机构，放到钻机限位的末端，并按动作键两次夹紧，再按一次启动钻机打孔。打孔完成后气缸自动松开。

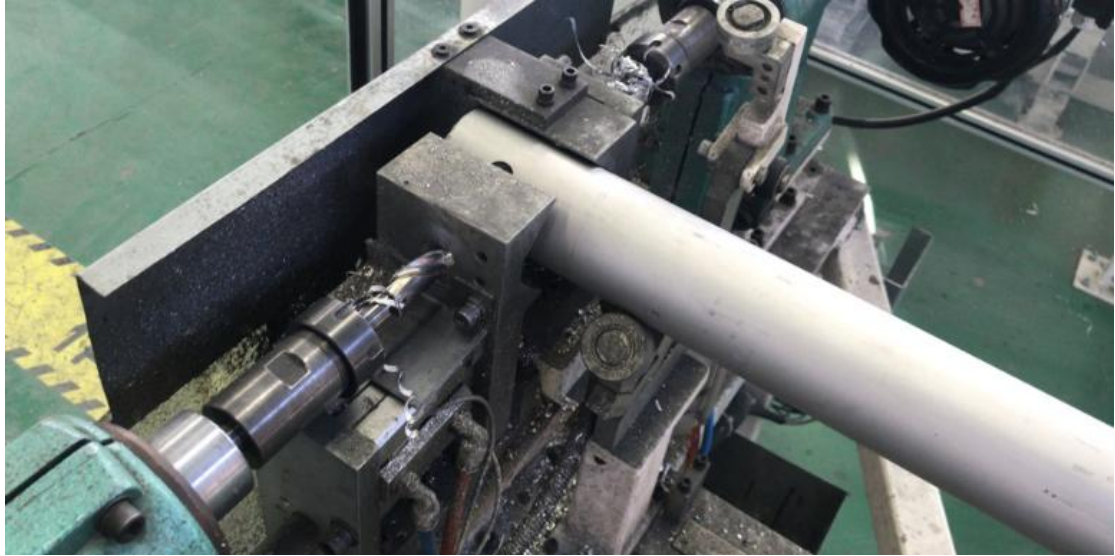


图 5.2.2 腕臂管钻孔

5.2.3 腕臂身份标识喷码

作业人员将腕臂打孔的位置穿入到 OP10 上件位的定位销中；另一边放置到上一步调整的平台（两者长度需要保持一致）。作业人员离开安全光栅工作范围后，按动异常复位，然后按动作键夹持腕臂管，再次按动作键开始喷码，喷码机伺服启动依次对条形码，卡件安装位置进行喷码。



图 5.2.3 腕臂管喷码标识

5.2.4 自动滑动切割

当腕臂切割完毕后，随即被机器人抓起时，切割伺服启动推送腕臂管到切割位置，锯床气缸夹紧腕臂管，启动锯床切割腕臂管，切割完毕后锯片下降，伺服向前推动废料下落到废料箱中，退回到下料位置。



图 5.2.4 腕臂切割

5.2.5 机器人搬运腕臂管

腕臂管切割完成后，机器人夹持腕臂，同步打开切割气缸，机器人执行动作夹持腕臂管搬运动作，OP20 工位伺服行走走到腕臂管放件位置，机器人执行放件动作，完成转运。



图 5.2.5 机器人搬运腕臂管

5.2.6 腕臂卡件自动上件

当异常复位按钮的灯闪烁时，作业人员需要退出安全光栅，按下异常复位。作业人员上件前需按动作按钮，使得夹具工位进入上件状态，将套管单耳和套管座按图指示放置。承力索座需要将上下块分离到最大，下块放置在下层模具上与模具平齐，上块被气缸撑住，同时保证锁片都在正确位置。走出安全光栅范围，按异常复位，按动作按钮两次。当动作按钮常亮时，上件完成，翻转伺服会转到机器人侧。若机器人侧在进行螺栓紧固动作，则不会立即翻转。



图 5.2.6 自动上件

5.2.7 机器人螺栓拧紧

a 伺服转到机器人侧后，第一个伺服将行走一定距离，让 OP10 的管件得以放置，放置完毕后伺服行走机构会穿过管件。

b 机器人开始螺栓拧紧动作，该步骤会拧两个力矩，过程中会移动伺服，和旋转管件来进行其他位置的螺栓拧紧。

c 螺栓有 18 和 24 两种规格，机器人会自动切换套筒。（图为正在更换套筒）



图 5.2.7 螺栓按力矩拧紧

5.2.8 机器人转运腕臂半成品

螺栓紧固工序完成后，机器人抓取腕臂管送往 OP30 位置，OP20 所有气缸打开，翻转气缸翻转到 0 度位置，机器人夹持腕臂管件，锁定夹持气缸，执行转移动作，将腕臂转移到下件平台。

5.2.9 人工复检预配质量

1、长度校验

每批次第一根腕臂需要校验长度是否正常，作业人员根据校验表格上的长度进行校验，长度为管件边缘到卡件的中心的距离。

2、力矩校验

1) 由于力矩为质量卡控要点，每一个腕臂零部件的力矩都需要校验。套管单耳为重点二次校验对象，由于其他位置的卡子有各自锁紧机构，而套管单耳需要自锁。套管单耳的拧紧力矩是 $70\text{N}\cdot\text{m}$ ，一般一段时间可能会放松一点力矩，所以需要力矩增加到 $73\text{N}\cdot\text{m}$ 左右，校验完成需要进行划线标记。

2) 套管座力矩要求是 $75\text{N}\cdot\text{m}$ ，为防止管件顶损坏，机器紧固之后，作业人员需要再拧一次进行检查。紧固后将下面的锁紧螺栓拧紧即可，锁紧螺栓力矩为依据。

3) 承力索座有四个螺栓，力矩为 $56\text{N}\cdot\text{m}$ ，作业人员拧紧后需要将锁片锁住，则需要将螺栓的平面与锁片保持一致，拧紧后需要将锁片打上。



图 5.2.9 人工质检平台

6. 材料与设备

本工法采用的材料及设备见表 1。

表 1 机具设备表

序号	名称	型号	单位	数量	用途	备注
1	智能化腕臂预配车间	ZNWB1.0	套	1	自动化腕臂预配	
2	空气压力泵		套	1	为车间提供压力空气	
3	力矩扳手	$75\text{N}\cdot\text{m}$	把	2	复核力矩是否达标	
4	卷尺	5m	把	2	复核预配精度	

5	扎带		根	若干	用于捆扎预配完成的腕臂	
6	质检平台		套	1	用于腕臂质量检查	

7. 质量控制

7.1 质量控制标准

本工法严格执行国家铁路局发布的《铁路电力牵引供电设计规范》TB10009-2016、《高速铁路电力牵引工程施工质量验收标准》TB 10758-2018、《铁路电力牵引工程施工质量验收标准》TB 10421-2018 等相关标准规定，设备、工器具在进场时，进行质量验收，按照相关标准对其进行性能校验。

7.2 质量保证措施及注意事项

7.2.1 腕臂预配前，测量预配数据预配数据确保精确，定期校对测量仪器精度，对测量人员进行岗前培训，从源头避免预配数据错误；

7.2.2 智能化腕臂预配车间所有作业人员进行岗前培训，熟悉各工位操作要点及质量注意事项，减少人为误差。

7.2.3 按照保养维护手册，定期保养维护腕臂车间内各易损件，避免因设备零部件损坏而引起腕臂预配质量下降。

8. 安全措施

8.1 安全规程

8.1.1 认真贯彻学习铁道部《技术管理规程》；

8.1.2 认真贯彻学习《铁路电力牵引供电施工安全技术规程》（TB10401—2003）。

8.2 安全措施

8.2.1 认真贯彻“安全第一，预防为主”的方针，根据国家有关规定、条例，结合施工单位实际情况和工程的具体特点，组成专职安全员和班组兼职安全员以及工地安全用电负责人参加的安全生产管理网络，执行安全生产责任制，明确各级人员的职责，抓好工程的安全生产。

8.2.2 作业前必须点名做安全讲话，根据各小组的施工任务，做好安全预想及防范措施。

8.2.3 所有施工人员应有全局观念，服从统一指挥，加强班组负责人和各作业人员的联系。

8.2.4 施工人员必须穿好工作服，戴安全帽、穿防护服。

8.2.5 在腕臂车间运行前时，要对腕臂车间的性能，安全状况进行检查，保证腕臂车间的性能良好，严禁将有安全隐患或缺陷的工机具使用到车间。

8.3 腕臂车间运行时，禁止非作业人员进入现场，作业人员不可在擅自打开车间围栏，防止人员受伤、设备损伤。

8.4 作业人员在补料过程中，需要按照作业流程进行操作，避免与围栏内部设备接触，防止人员受伤。

8.5 设备需在干燥环境下使用，避免雨水及生活用水。

8.6 设备电力接线及高压空气阀接线需要设备维护人员操作，禁止其他人员擅自作业，避免触电及伤害。

9. 环保措施

9.1 成立对应的环境卫生管理机构，在工程施工过程中严格遵守国家和地方政府下发的有关环境保护的法律、法规和规章，加强对作业过程中材料、设备、废料的控制和治理，遵守防火及废弃物处理的规章制度，随时接受相关单位的监督检查。

9.2 对作业过程中可能影响到的各种公共设施制定可靠的防止损坏和移位的实施措施，加强实施中的监测、应对和验证。同时，将相关方案和要求向全体作业人员详细交底。

9.3 所有作业用机械、动力设备应经地方环保部门的检测，噪音、废气排放等指标达标后才能使用。

9.4 每日预配作业完成后必须做到工完料清，不得丢弃在预配车间现场。

10. 效益分析

内容	腕臂传统预配方式			腕臂智能化预配车间		
	第一年	第二年	第三年	第一年	第二年	第三年
生产年限						
开发费用	110,000	110,000	110,000	5,450,000	0	0

人工费用	1,680,000	1,848,000	2,032,800	170,000	187,000	205,700
维保费用	0	0	0	100,000	100,000	100,000
累计费用	1,790,000	1,958,000	2,142,800	5,720,000	287,000	305,700
年产能	17,880	35,760	53,640	69,120	138,240	207,360
生产单价 (元/套)	100.11	109.51	119.84	165.51	86.91	60.89
单位：元						

由上表分析可得，三年内传统的人工预配所需的人工费、平台建设费用成本约 589.08 万元，智能自动化生产线所需的人工费、研发费用成本约 631.27 万元，但是智能自动生产线的产能是人工预配的 5 倍，单套腕臂所需的成本是人工预配的一半。从人工投入、产能、单价方面分析，智能自动化生产线都产生了较大的经济效益。从工程质量方面，采用高精度伺服系统，利用工业机器人完成管材的转运及螺栓拧紧，实现预配腕臂扭力值偏差小于 $0.1N\cdot m$ ，装配误差小于 2mm，满足接触网对施工精度的要求，大大减少现场调试工作，确保接触网安装调试一步到位，有效保障工程质量。

11. 应用实例

汉十项目新建武汉至十堰铁路孝感至十堰段位于湖北中部至西北部，线路自汉孝城际铁路孝感东站引出西行，经孝感市、云梦县、安陆市、随州市、随县、枣阳市、襄阳市、谷城县、丹江口市至十堰市，线路全长 399.126 公里，中铁十一局集团有限公司汉十铁路 HSSDSG-1 标项目经理部施工地点为随州南至襄阳段，里程:DK163+606-DK269+606，全长 106 条公里，接触网专业包含随州南至随县区间、随县站、随县至枣阳区间、枣阳站、枣阳至襄阳区间 5 个单位工程，其中 H 型钢柱 4333 根，硬横梁 11 组，腕臂 5211 套，正馈线 212.17 条公里，保护线 212.17 条公里，承力索 270.26 条公里，接触线 270.26 条公里，隔离开关 84 台，避雷器 152 台。

针对高铁接触网腕臂及定位装置精度要求高、铝合金材质价格昂贵且易磨损的特点，同时，为进一步满足腕臂预配精度和细部设计规范要求，减小接触悬挂调整工程量，降低材料损耗，汉十项目我公司标段范围内所有腕臂均采用公司

自主研发的腕臂自动化预配机器人进行切割及预配，并采用特制的腕臂包装架包装后运至现场安装，截止目前已经完成 5198 套接触网腕臂的预配及组装，与传统的人工预配相比，有效提升了预配质量和精准度。

经验证，汉十项目采用高精度伺服系统结合工业机器人完成管材的转运及螺栓拧紧，实现预配腕臂扭力值偏差小于 $0.1\text{N}\cdot\text{m}$ ，装配误差小于 2mm ，满足高速铁路接触网对施工精度的要求，达到细部设计规范要求，大大减少现场调试工作，确保接触网安装调试一步到位，有效保障工程质量。