

北京航空航天大学学报
Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics
ISSN 1001-5965,CN 11-2625/V

《北京航空航天大学学报》网络首发论文

题目：平面钢筋绑扎机器人作业顺序与末端轨迹协同规划
作者：赵志刚，谢浩，颉俊杰，王靖，刘陈阳，刘孟涛
DOI：10.13700/j.bh.1001-5965.2026.0519
收稿日期：2026-07-20
网络首发日期：2026-11-02
引用格式：赵志刚，谢浩，颉俊杰，王靖，刘陈阳，刘孟涛．平面钢筋绑扎机器人作业顺序与末端轨迹协同规划[J/OL]．北京航空航天大学学报．https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2026.0519



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

平面钢筋绑扎机器人作业顺序与末端轨迹协同规划

赵志刚[1,✉]，谢浩[1]，颉俊杰[1.2]，王靖[1]，刘陈阳[1]，刘孟涛[1]

（1.兰州交通大学 机电工程学院，兰州 730070; 2.甘肃路桥建设集团，兰州 730030)

*通信作者 E-mail：zhaozhg@mail.lzjtu.cn 赵志刚，男，博士，教授，博士生导师。主要研究方向：特种机器人，多机器人系统建模与控制，E-mail：zhaozhg@mail.lzjtu.cn

摘要 针对平面钢筋绑扎机器人多点连续作业顺序优化与末端局部轨迹规划相互分离，导致规划结果难以准确反映末端真实执行轨迹的问题，提出一种面向钢筋绑扎任务的作业顺序与末端轨迹协同规划方法。首先，综合考虑绑扎点间转移距离、末端姿态调整和平面切换代价，建立多目标作业顺序优化模型，并采用混合离散灰狼优化-模拟退火算法（HDGWO-SA）进行求解。其次，针对单个绑扎点构建准备、接近、执行和退出四阶段末端作业轨迹模型，形成面向不同作业场景的参数化路径模板。在此基础上，将相邻绑扎点之间的转移过程由传统点中心距离修正为当前点退出位姿至下一点准备位姿之间的关键位姿级衔接代价，建立作业顺序与末端轨迹协同规划模型。仿真与实体实验结果表明，所提方法能够降低多点连续作业中的冗余转移，提高末端轨迹连续性，并在 JAKA Zu5 机械臂平台上实现多点连续执行，验证了该方法的有效性和工程可行性。

关键词 钢筋绑扎机器人；作业顺序优化；末端轨迹规划；HDGWO-SA；协同规划

中图分类号 TP242.2；TU649 文献标识码：A DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2026.0519

Collaborative planning of task sequence and end-effector trajectory for planar rebar tying robots

ZHAO Zhigang[1,✉], XIE Hao[1], XIE Junjie[1,2], WANG Jing[1], LIU Chenyang[1], LIU Mengtao[1]

(1.School of Mechanical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Gansu Road & Bridge Construction Group, Lanzhou 730030, China)

*E-mail: zhaozhg@mail.lzjtu.cn

Abstract To address the decoupling between task sequence optimization and local end-effector trajectory planning in multi-point continuous operations of planar rebar tying robots, which makes it difficult for the planned results to accurately represent the actual execution trajectory of the end effector, this study proposes a collaborative planning method for task sequence optimization and end-effector trajectory planning in rebar tying tasks. First, a multi-objective task sequence optimization model is established by comprehensively considering the transfer distance between tying points, end-effector posture adjustment, and plane-switching cost. The model is solved using a hybrid discrete grey wolf optimization–simulated annealing algorithm (HDGWO-SA). Second, for each individual tying point, a four-stage end-effector trajectory model consisting of preparation, approach, execution, and withdrawal phases is constructed, thereby forming parameterized trajectory templates for different operation scenarios. On this basis, the transfer process between adjacent tying points is reformulated from the conventional point-to-point center distance to a key-pose-level transition cost between the withdrawal

收稿日期：2026-07-20

基金项目：甘肃省教育厅产业支撑计划项目（2025CYZC-023）；甘肃省交通运输厅科技项目（2024-14）；兰州市 2024 年青年科技人才创新项目（2024-QN-112）

作者简介：谢浩，男，硕士研究生。主要研究方向：钢筋绑扎机器人规划与控制。

Fund：Industrial Support Program Project of Gansu Provincial Department of Education (2025CYZC-023); Science and Technology Project of Gansu Provincial Department of Transportation (2024-14); 2024 Youth Science and Technology Talent Innovation Project of Lanzhou City (2024-QN-112)

网络首发时间：2026-11-02 09:55:50 网络首发地址：https://link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20261031.1651.001

pose of the current point and the preparation pose of the next point. Accordingly, a collaborative planning model integrating task sequence optimization with end-effector trajectory planning is developed. Simulation and real-robot experimental results demonstrate that the proposed method can reduce redundant transfers in multi-point continuous operations, improve the continuity of end-effector trajectories, and enable multi-point continuous execution on the JAKA Zu5 robotic arm platform, thereby verifying its effectiveness and engineering feasibility.
Key words rebar tying robot; task sequence optimization; end-effector trajectory planning; HDGWO-SA; collaborative planning

钢筋绑扎是钢筋混凝土结构施工中的基础工序，直接影响钢筋骨架成型质量和后续施工效率。传统人工绑扎存在作业点数量大、重复性强、劳动强度高和施工质量一致性不足等问题，在桥面板、楼板及大型基础钢筋网施工中尤为突出[1-4]。

近年来，面向钢筋绑扎作业的机器人系统、视觉识别、位姿估计和轨迹规划方法得到较多关注，相关研究已从单一机械结构设计逐步扩展到感知、规划和执行一体化方向[5-8]。其中，钢筋交叉点识别、绑扎点定位、机器人自主移动和覆盖路径规划是实现自动化绑扎的关键环节[9-11]。然而，钢筋绑扎任务并非简单的目标点到达问题，机器人既要在多个绑扎点之间确定合理访问顺序，又要保证末端执行器在单个绑扎点附近满足接近方向、姿态连续性、安全间隙和绑扎动作可执行性等约束。

现有研究主要集中在两个方面。一类方法从视觉感知和目标定位出发，利用深度相机、工业相机、目标检测网络或几何特征提取方法实现钢筋交叉点识别和位姿估计，并结合识别结果生成机器人作业目标[5,10-11,16-20]。此类方法提升了绑扎点识别精度和机器人自主定位能力，但其规划对象多为交叉点中心或拍照位置，对末端执行器在实际绑扎过程中的准备位、接近位、执行位和退出位考虑不足。另一类方法将钢筋绑扎任务转化为多点遍历或覆盖路径规划问题，采用固定行列遍历、贪心搜索、旅行商问题（Traveling Salesman Problem，TSP）模型、遗传算法、蚁群算法、灰狼优化算法等方法优化作业顺序，以降低总行程或提高覆盖效率[7,9,12-15,18,21]。该类方法能够改善多点访问顺序，但通常以绑扎点中心距离或移动平台路径长度作为主要评价指标，难以反映机械臂末端在局部作业阶段产生的姿态调整、偏置接近、撤离避碰和平面切换等实际运动代价。

对于机械臂末端局部轨迹规划，已有研究多采用采样搜索、轨迹插值、位姿约束规划或基于任务模板的轨迹生成方法，以满足局部避碰、姿态平滑和执行稳定性要求[4,8,10-11,16,20,22]。这类方法适合解决单个目标点附近的接近和执行问题，但若与多点作业顺序优化相互独立，则容易出现全局顺序看似较优、末端实际执行轨迹并不经济的情况。例如，仅依据相邻绑扎点中心距离确定访问顺序时，可能忽略当前点退出位姿与下一点准备位姿之间的实际衔接距离；仅优化单点局部轨迹时，又无法从整体任务角度抑制跨区域跳转、频繁姿态切换和冗余空程。因此，多点钢筋绑扎任务需要将作业顺序优化与末端局部轨迹规划统一到同一评价框架中。

从问题形式上看，多点钢筋绑扎可视为机器人任务顺序与末端轨迹联合规划的一类具体应用，但其工艺约束使该问题区别于一般多目标访问或目标点间路径规划。首先，钢筋交叉点呈密集、规则分布，末端执行器在局部区域内易受邻近钢筋结构约束；其次，每个绑扎点并非单一位置目标，而是包含准备、接近、执行和退出等连续作业阶段，不同阶段对应不同的位姿和速度要求；再次，水平面、竖直面及受限区域具有不同的接近方向和姿态约束，连续作业中还伴随作业平面切换。由此，相邻绑扎点之间的实际转移代价不仅取决于目标点中心距离，还受到当前点退出位姿、下一点准备位姿及其局部作业模板的共同影响。因此，研究问题可视为具有钢筋绑扎工艺约束的任务顺序—末端轨迹协同规划问题，其关键在于将点间顺序评价与点内局部执行过程统一建模。

进一步来看，现有钢筋绑扎机器人规划研究已分别在任务规划、覆盖路径规划和作业路径优化等方面取得进展。例如，文献[7]面向轮腿式钢筋绑扎机器人开展基于建筑信息模型（Building Information Modeling，BIM）的任务规划，文献[18]将机器视觉与覆盖路径规划结合，文献[20]围绕钢筋交叉点检测、定位及路径优化开展研究，文献[21]则针对轨道式钢筋绑扎机器人进行作业路径优化。这些研究为绑扎点获取和多点任务规划提供了基础，但规划评价主要集中于绑扎目标点、覆盖路径或机器人整体移动路径层面。另一方面，已有机器人任务顺序与轨迹联合规划研究[22]表明，将任

务排序与运动过程统一考虑能够进一步改善整体执行性能，但针对钢筋绑扎过程中“准备—接近—执行—退出”这一具有明确工艺约束的末端作业过程，如何将单点关键位姿对实际转移代价的影响反馈至多点作业顺序评价仍缺乏针对性建模。因此，本文的重点并非单独提高某一局部轨迹或访问顺序的优化性能，而是建立由单点关键位姿到多点作业顺序的代价耦合关系，使顺序评价更接近机械臂末端真实执行过程。

针对上述问题，以基于 JAKA Zu5 机械臂的平面钢筋绑扎机器人为研究对象，提出作业顺序与末端轨迹协同规划方法。首先，综合考虑绑扎点间转移距离、末端姿态调整和平面切换代价，建立多目标作业顺序优化模型，并采用混合离散灰狼优化-模拟退火算法（Hybrid Discrete Grey Wolf Optimizer with Simulated Annealing，HDGWO-SA）进行求解，以提高复杂绑扎点集下的顺序寻优能力；其次，针对钢筋绑扎的工艺特征，将单点作业过程划分为准备、接近、执行和退出四个阶段，建立关键位姿及参数化局部轨迹模型；进一步区别于仅以绑扎点中心或覆盖距离评价作业顺序的方法，将相邻任务之间的转移代价修正为“当前点退出位姿—下一点准备位姿”的关键位姿级衔接代价，并将其反馈至作业顺序评价，实现点间转移与点内执行的统一建模。最后，通过算法对比、单点轨迹实验、多点协同规划及 JAKA Zu5 实机连续执行验证所提方法的有效性。

1　多目标绑扎作业顺序优化建模

钢筋绑扎机器人在多点连续作业中需要依次完成全部待绑扎点。对于给定任务点集，在满足绑扎点不重不漏、机械臂可达及局部作业约束的前提下，不同绑扎点之间可以形成多种可行访问排列，其差异主要体现在点间转移距离、末端姿态调整和平面切换等运动开销。因此，所述作业顺序优化并非改变单个绑扎点内部的绑扎工艺流程，而是在全部可行的绑扎点访问排列中搜索综合转移代价较小的执行顺序。本节首先描述绑扎点集合及可行访问序列，随后建立多目标顺序评价模型，最后采用 HDGWO-SA 算法完成最优访问序列搜索。

1.1 绑扎任务序列描述

多点连续作业中，不同绑扎点间的访问顺序直接影响末端执行器的总体转移距离、姿态调整频率及整体作业效率，设待绑点集合为 $\mathcal{P}=\{p_1,p_2,\cdots,p_i,\cdots p_n\}$，其中 p_i 表示第 i 个待绑扎目标点，n 为目标绑扎点总数。定义机械臂对所有绑扎点的一个可行访问序列为 $\sigma=[\sigma_1,\sigma_2,\cdots,\sigma_i,\cdots\sigma_n]$，其中 $\sigma_k\in\{1,2,\cdots,n\}$ 表示第 k 个被执行的目标点编号，k 为访问序列中的位置索引；对于任意 $a\neq b$，满足 $\sigma_a\neq\sigma_b$，即每个绑扎点在一个作业周期内仅被访问一次。需要说明的是，所研究的“作业顺序”是多个绑扎点之间的访问先后关系，而非单个绑扎点内部的工艺执行顺序。单点绑扎仍按照准备、接近、执行和退出的固定工艺阶段完成；对于多个待绑扎点，在满足全部点位均被执行及机器人运动约束的条件下，可存在多种可行访问序列。固定行列遍历可作为一种确定性的规则顺序，而本文进一步根据点间运动代价对访问排列进行优化。

对于任意相邻两个执行点 p_i 与 p_j，可定义点间基础转移代价 C_{ij}^{seq}，用于表征机器人在作业顺序层面由第 i 个绑扎点转移至第 j 个绑扎点所需的基础运动开销。该代价同时考虑目标点之间的空间转移距离和末端作业姿态切换幅度，可表示为：

$$C_{ij}^{\mathrm{seq}}=d_{ij}+\lambda_q\Delta q_{ij} \tag{1}$$

式中，d_{ij} 为两绑扎点的空间欧氏距离，Δq_{ij} 表示机械臂末端姿态调整量，λ_q 为平衡距离代价与姿态调整代价在转移评价中相对重要性的权重系数。

1.2 多目标作业顺序优化模型

在上述序列描述基础上，进一步从总转移距离、末端姿态调整量和顺序规整性三个方面构建作业顺序优化目标函数：

$$J^{\mathrm{seq}}(\sigma)=\omega_1 J^{\mathrm{dis}}(\sigma)+\omega_2 J^{\mathrm{att}}(\sigma)+\omega_3 J^{\mathrm{reg}}(\sigma) \tag{2}$$

式中，$J^{\mathrm{dis}}(\sigma)$为总转移距离代价；$J^{\mathrm{att}}(\sigma)$为总姿态调整代价；$J^{\mathrm{reg}}(\sigma)$为顺序规整性代价；$\omega_1,\omega_2,\omega_3$为各目标项对应的权重系数，满足：

$$\omega_1+\omega_2+\omega_3=1,\omega_k\geq 0(k=1,2,3) \tag{3}$$

总转移距离代价定义为：

$$J^{\mathrm{dis}}(\sigma)=\sum_{k=1}^{n-1} d_{\sigma_k\sigma_{k+1}} \tag{4}$$

式中，$k=1,2,\ldots,n-1$为访问序列中的相邻任务索引，$d_{\sigma_k\sigma_{k+1}}$表示第k个与第$k+1$个访问绑扎点之间的空间距离。考虑到连续作业过程中不仅存在姿态变化幅度差异，还可能伴随不同作业平面之间的切换，将姿态代价定义为姿态调整量与作业平面切换惩罚项的组合形式，即：

$$J^{\mathrm{att}}(\sigma)=\sum_{k=1}^{n-1}(\Delta q_{\sigma_k\sigma_{k+1}}+\gamma I^{\mathrm{pl}}_{\sigma_k\sigma_{k+1}}) \tag{5}$$

式中，$\Delta q_{\sigma_k\sigma_{k+1}}$表示机械臂末端在相邻两个目标点之间切换时的姿态调整量；$I^{\mathrm{pl}}_{\sigma_k\sigma_{k+1}}$为作业平面指示函数，用于判定连续两个作业点是否处于同一姿态平面；γ是平面切换惩罚权重系数。姿态变化越剧烈，或跨平面切换越频繁，则对应代价越大。

为避免顺序优化结果出现频繁跨区跳转或局部执行顺序过于离散的情况，引入顺序规整性代价项：

$$J^{\mathrm{reg}}(\sigma)=\sum_{k=1}^{n-1} r_{\sigma_k\sigma_{k+1}} \tag{6}$$

式中，$r_{\sigma_k\sigma_{k+1}}$表示由区域跨度、方向突变或局部顺序不连续引起的附加代价。该项用于增强作业顺序的连续性与工程可执行性。

因此，多目标绑扎作业顺序优化的决策变量为绑扎点访问序列σ。设全部满足不重不漏约束的可行访问序列构成集合Ω，则优化过程是在Ω中不断生成和评价候选序列，并依据总转移距离、姿态调整及顺序规整性构成的综合代价$J^{\mathrm{seq}}_{\sigma}(\sigma)$判断序列优劣。最优作业顺序定义为$\arg\min_{\sigma\in\Omega} J^{\mathrm{seq}}(\sigma)$，即从全部可行访问排列中寻找综合运动代价最小的执行顺序。该问题本质上属于具有复合边权和工艺约束的 TSP 类离散组合优化问题，第 1.3 节采用 HDGWO-SA 算法完成候选序列搜索与更新。本文顺序优化过程可概括为“任务点集输入—可行序列编码—综合代价评价—HDGWO-SA 迭代更新—最优访问序列输出”。

1.3 HDGWO-SA 顺序优化方法

针对复杂空间钢筋网格绑扎点位的遍历顺序优化问题，传统的启发式算法（如按行遍历或贪心算法）由于缺乏全局视野，极易产生大量的冗余路径和频繁的姿态切换。标准灰狼优化算法（Grey Wolf Optimizer, GWO）虽具有极强的全局搜索能力，但其原始的连续空间向量更新公式无法直接应用于离散序列优化，且在迭代后期易陷入局部最优停滞[23]。为此，提出一种混合离散灰狼优化-模拟退火算法（Hybrid Discrete Grey Wolf Optimizer with Simulated Annealing, HDGWO-SA），用于求解多目标绑扎作业顺序优化问题。

HDGWO-SA 的核心改进包括两个方面，一是对 GWO 的位置更新过程进行离散化重构，采用排列编码表示绑扎点访问序列，并通过顺序交叉（Order Crossover，OX）算子实现普通个体向头狼个体的序列片段学习，以保证生成序列满足不重复、不遗漏约束；二是在当前最优个体基础上引入模拟退火（Simulated Annealing，SA）局部精化机制，通过 2-opt 扰动和 Metropolis 接受准则增强跳出局部最优的能力。前者用于解决连续 GWO 难以直接处理离散作业序列的问题，后者用于改善算法后期搜索停滞问题。由此，离散 GWO 的全局搜索与 SA 的局部精化相结合，形成用于绑扎顺序优

化的 HDGWO-SA 算法。

（1）基于 OX 算子的离散 GWO 更新机制

在标准 GWO 中，根据个体适应度将种群中的前三个最优个体分别记为 α、β 和 δ 狼，其中 α 狼为当前最优个体，β 狼和 δ 狼分别为次优和第三优个体。标准 GWO 通过计算普通个体与三类领导个体之间的距离向量更新位置。为保证离散访问序列的合法性，摒弃基于步长的连续向量更新方式，重构基于 OX 算子的离散演化逻辑。

为了平衡算法初期的全局搜索与后期局部开发，引入随当前迭代次数 t 变化的学习概率 $\mu(t)$，其中 $t=0,1,\ldots,t_{\max}$，$t_{\max}$ 为最大迭代次数：

$$\mu(t)=\mu_{\min}+(\mu_{\max}-\mu_{\min})\cdot\frac{t}{t_{\max}} \tag{7}$$

式中，t 为当前迭代次数，$t_{\max}$ 为最大迭代次数；$\mu(t)$ 为第 t 次迭代对应的学习概率；$\mu_{\min}$ 和 $\mu_{\max}$ 分别为学习概率的最小值和最大值，取 $\mu_{\min}=0.7$，$\mu_{\max}=0.95$。随着迭代深入，狼群将以更高的概率向头狼学习，加速收敛。

普通狼不再进行空间位移，而是通过 OX 算子向领导者学习路径片段。在每次迭代中，对第 i 个种群个体生成服从区间[0,1]均匀分布的随机数 u，并依据当前学习概率 $\mu(t)$ 确定其更新方式：

$$\sigma_i(t+1)=\begin{cases}\mathrm{OX}(\sigma_i(t),\sigma_\alpha), u<\mu(t)\\ \mathrm{Mutation}(\sigma_i(t)), \text{otherwise}\end{cases} \tag{8}$$

式中，$\sigma_i(t)$ 表示第 t 次迭代中第 i 个个体对应的绑扎点访问序列；$\sigma_\alpha(t)$ 表示第 t 次迭代中当前 α 狼对应的最优访问序列；u 为区间[0,1]内的均匀随机数。若 $u<\mu(t)$，则第 i 个个体通过 OX 算子向当前最优序列 $\sigma_\alpha(t)$ 学习；若 $u>\mu(t)$，则对 $\sigma_i(t)$ 执行两点交换变异，以保持种群多样性。

（2）基于模拟退火机制的头狼精化开发策略

由于离散组合优化问题解空间高度离散且存在大量局部极值，单纯依靠 GWO 的包围机制容易在迭代后期导致种群同化。为此，在每一代更新结束后，专门针对当前的最优个体（α 狼）嵌入模拟退火局部精化策略[24]。

首先，对当前最优访问序列 σ_α 随机选取两个断点，将两断点之间的子序列反转，得到经 2-opt 扰动后的候选访问序列 σ_{new}。定义 $\Delta J=J^{\text{seq}}(\sigma_{\text{new}})-J^{\text{seq}}(\sigma_\alpha)$，其中，$\Delta J$ 表示候选访问序列与当前最优访问序列之间的顺序代价增量。候选访问序列的接受概率记为 $P(\text{Accept})$，并按照 Metropolis 准则计算：

$$P(\text{Accept})=\begin{cases}1, \Delta J<0\\ \exp\left(-\dfrac{\Delta J}{T_t}\right), \Delta J\geq 0\end{cases} \tag{9}$$

式中，T_t 为第 t 次迭代对应的退火温度。若 $\Delta J<0$，候选序列的代价降低，直接接受；若 $\Delta J\geq 0$，则 $P(\text{Accept})$ 以一定概率接受该候选序列，以降低算法陷入局部最优的可能性。系统温度 T 按照几何退火模型更新：

$$T(t+1)=\eta\cdot T(t) \tag{10}$$

式中，T_0 为初始退火温度，η 为几何降温系数。设定较高的初温（$T_0=150$）与较慢的降温系数（$\eta=0.99$）。随着迭代进行，系统温度逐步降低，算法接受较差解的概率逐渐减小，使搜索过程由前期扩展搜索逐步转向后期稳定收敛。

HDGWO-SA 的求解逻辑遵循“全局粗寻优-局部精细调优”，具体流程为：

算法 1：HDGWO-SA 绑扎顺序规划算法

输入：待绑扎点集合 $\mathcal{P}$，多目标权重系数 $\omega_1,\omega_2,\omega_3$，平面切换惩罚系数 γ，种群规模 N_{pop}，最大迭代次数 $t_{\max}$，退火初温 T_0，降温系数 η。

输出：全局最优绑扎序列 σ_α 及其最小顺序代价 $J^{\text{seq}}(\sigma_\alpha)$

1.随机生成初始离散种群 $\left\{\sigma_1,\sigma_2,\cdots,\sigma_{N_{\text{pop}}}\right\}$，令 $T=T_0$；

2.计算各个体的顺序代价 $J^{\text{seq}}(\sigma_i)$，按代价升序排序，并确定当前头狼个体 σ_α；

3.令 $t=1$；

4. while($t \le t_{\max}$)do

5. 由 $\mu(t)=\mu_{\min}+(\mu_{\max}-\mu_{\min})\cdot(t/t_{\max})$ 计算当前学习概率；

6. for $i=1$ to N_{pop} do

7. 若 $u<\mu(t)$，则执行 $\text{OX}(\sigma_i,\sigma_\alpha)$ 生成新个体；

8. 否则，对 σ_i 执行两点交换变异；

9. 对新个体进行合法性检查，保证绑扎点不重不漏；

10. end for

11. 重新计算种群顺序代价，并更新当前头狼个体 σ_α；

12. 对 σ_α 执行 2-opt 扰动，生成候选序列 σ_{new}；

13. 计算 $\Delta J=J^{\text{seq}}(\sigma_{\text{new}})-J^{\text{seq}}(\sigma_\alpha)$；

14. 若 $\Delta J<0$ 或 $u<\exp(-\Delta J/T)$，则接受 σ_{new}，并更新 σ_α；

15. 更新温度 $T\leftarrow T\cdot\eta$，令 $t\leftarrow t+1$

16.end while

17.输出 σ_α 及 $J^{\text{seq}}(\sigma_\alpha)$

通过上述方法，算法能够在满足绑扎点不重不漏约束的前提下，综合优化点间距离、姿态调整和平面切换代价，为后续末端轨迹协同规划提供作业顺序基础。

2 单点绑扎末端关键位姿与局部作业轨迹建模

钢筋绑扎机器人在单个绑扎点处的末端运动受到绑扎工艺和机械臂实际执行条件的共同约束。除要求末端到达目标绑扎点外，还需满足接近方向、绑扎工具姿态与作业平面匹配、邻近钢筋结构安全间隙、机械臂可达性以及不同作业阶段速度限制等要求。因此，不将单个绑扎点简化为单一位置目标，而是围绕准备、接近、执行和退出四个阶段建立关键位姿及局部作业轨迹模型，并通过场景模版参数对不同作业平面和受限区域的实际运动约束进行描述。

2.1 单点绑扎路径描述

单点作业过程划分为准备、接近、执行和退出四个阶段，对应四个阶段分别定义关键位姿 $\boldsymbol{X}_i^{\text{pre}},\boldsymbol{X}_i^{\text{app}},\boldsymbol{X}_i^{\text{exe}},\boldsymbol{X}_i^{\text{ret}}$，其中下标 i 表示第 i 个绑扎点。为统一描述不同绑扎点处的末端作业过程，如图 1 所示，以第 i 个绑扎点为原点建立局部任务坐标系 $\mathcal{F}_i=\left\{O_i,\boldsymbol{e}_{\text{x},i},\boldsymbol{e}_{\text{y},i},\boldsymbol{e}_{\text{z},i}\right\}$，其中，$O_i$ 为绑扎点位置，$\boldsymbol{e}_{\text{z},i}$ 轴定义为绑扎末端的期望接近方向；$\boldsymbol{e}_{\text{x},i}$ 轴取钢筋局部主方向之一；$\boldsymbol{e}_{\text{y},i}$ 轴由右手定则确定。在该局部坐标系下，如图 2 所示，四阶段关键位姿可统一表示为：

$$\boldsymbol{X}_i^s=\begin{bmatrix}\boldsymbol{R}_i^s & \boldsymbol{p}_i^s\\ 0^{\text{T}} & 1\end{bmatrix},s\in\{\text{pre,app,exe,ret}\} \tag{11}$$

式中，$\boldsymbol{p}_i^s$ 和 $\boldsymbol{R}_i^s$ 分别表示第 i 个绑扎点在阶段 s 下的末端位置向量和姿态矩阵。

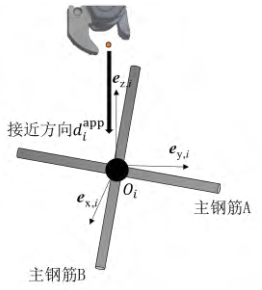


图 1 单点局部任务坐标系及接近方向定义示意图
Fig 1 Schematic Diagram of Single-Point Local Task Coordinate System and Approach Direction Definition

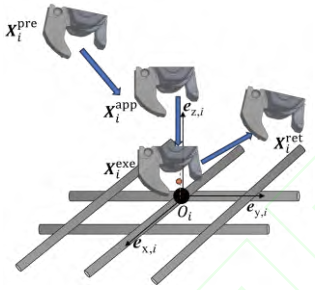


图 2 基于局部任务坐标系的四阶段关键位姿示意图
Fig 2 Schematic Diagram of Four-Stage Key Poses Based on Local Task Coordinate System

准备位姿 $\boldsymbol{X}_i^{\mathrm{pre}}$ 用于末端执行器在正式接触钢筋前的标准待入位姿，其位置由执行位姿沿接近方向反向偏置得到：

$$\boldsymbol{p}_i^{\mathrm{pre}} = \boldsymbol{p}_i^{\mathrm{exe}} + d^{\mathrm{pre}}\boldsymbol{e}_{\mathrm{z},i} + \delta_{\mathrm{x}}\boldsymbol{e}_{\mathrm{x},i} + \delta_{\mathrm{y}}\boldsymbol{e}_{\mathrm{y},i} \tag{12}$$

式中，d^{pre} 为准备距离，δ_{x}，δ_{y} 为侧向偏置量。

为实现由自由空间运动向局部精细作业的平稳过渡，在准备位与执行位之间增设接近位姿 $\boldsymbol{X}_i^{\mathrm{app}}$。该位姿位于执行位沿接近方向外侧距离 d^{app} 处，用作速度切换与局部精确对准的过渡节点，其位置可表示为：

$$\boldsymbol{p}_i^{\mathrm{app}} = \boldsymbol{p}_i^{\mathrm{exe}} + d^{\mathrm{app}}\boldsymbol{e}_{\mathrm{z},i}, \left(0 < d^{\mathrm{app}} < d^{\mathrm{pre}}\right) \tag{13}$$

执行位姿 $\boldsymbol{X}_i^{\mathrm{exe}}$ 为绑扎工具完成压紧或绑扎动作时的目标位姿，其位置 $\boldsymbol{p}_i^{\mathrm{exe}}$ 由绑扎点坐标及末端工具偏置确定，姿态 $\boldsymbol{R}_i^{\mathrm{exe}}$ 根据钢筋局部方向和末端期望接近方向确定。

退出位姿 $\boldsymbol{X}_i^{\mathrm{ret}}$ 用于绑扎完成后的安全撤离。考虑密集钢筋区域可能存在局部干涉，退出位姿允许引入侧向偏置：

$$\boldsymbol{p}_i^{\mathrm{ret}} = \boldsymbol{p}_i^{\mathrm{exe}} + d^{\mathrm{ret}}\boldsymbol{e}_{\mathrm{z},i} + \Delta x_i\boldsymbol{e}_{\mathrm{x},i} + \Delta y_i\boldsymbol{e}_{\mathrm{y},i} \tag{14}$$

式中，d^{ret} 为退出距离，Δx_i，Δy_i 为退出阶段的侧向偏置量。

基于上述四阶段关键位姿，第 i 个绑扎点的局部作业轨迹可表示为：

$$\Gamma_i^{\mathrm{local}} = \Gamma_i^{\mathrm{pre}} \cup \Gamma_i^{\mathrm{app}} \cup \Gamma_i^{\mathrm{exe}} \cup \Gamma_i^{\mathrm{ret}} \tag{15}$$

式中，Γ_i^{pre} 为上一状态到准备位的轨迹；Γ_i^{app} 为准备位到接近位/执行位的轨迹；Γ_i^{exe} 为执行保持或微动调整轨迹；Γ_i^{ret} 为执行位到退出位的轨迹。该模型描述了末端由自由空间进入局部作业区域、完成绑扎动作并安全退出的完整过程。

2.2 场景模板与阶段速度策略

根据绑扎点所在区域空间特征，将单点局部作业轨迹分为水平面正向接近、竖直面法向接近和受限区域偏置接近三类模板，图 3 所示为三类场景模板示意图。三类模板均基于第 2.1 节定义的局部

任务坐标系构建，$\boldsymbol{e}_{\mathrm{z},i}$表示末端期望接近方向，差异主要体现在接近方向和侧向偏置参数选取。

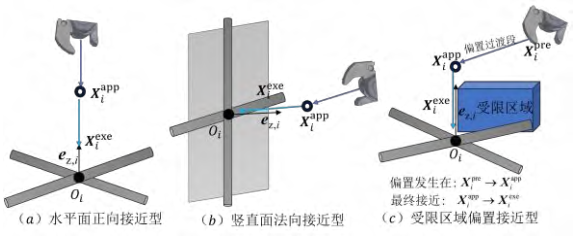


图 3 三类场景模板示意图
Fig 3 Schematic Diagram of Three Types of Scene Templates

为统一描述三类模版，准备位姿、接近位姿和退出位姿的位置参数化形式写为：

$$\begin{aligned}\boldsymbol{p}_i^{\mathrm{pre}} &= \boldsymbol{p}_i^{\mathrm{exe}} + d^{\mathrm{pre}}\boldsymbol{e}_{\mathrm{z},i} + \delta_{\mathrm{x}}\boldsymbol{e}_{\mathrm{x},i} + \delta_{\mathrm{y}}\boldsymbol{e}_{\mathrm{y},i}\\ \boldsymbol{p}_i^{\mathrm{app}} &= \boldsymbol{p}_i^{\mathrm{exe}} + d^{\mathrm{app}}\boldsymbol{e}_{\mathrm{z},i}\\ \boldsymbol{p}_i^{\mathrm{ret}} &= \boldsymbol{p}_i^{\mathrm{exe}} + d^{\mathrm{ret}}\boldsymbol{e}_{\mathrm{z},i} + \Delta x_i\boldsymbol{e}_{\mathrm{x},i} + \Delta y_i\boldsymbol{e}_{\mathrm{y},i}\end{aligned} \tag{16}$$

式中，d^{pre}、d^{app}和d^{ret}分别为准备、接近和退出距离，且$d^{\mathrm{pre}} > d^{\mathrm{app}} > 0$；$\delta_{\mathrm{x}},\delta_{\mathrm{y}}$为准备阶段侧向偏置量，$\Delta x_i,\Delta y_i$为退出阶段侧向偏置量。

对于水平面正向接近模版，$\boldsymbol{e}_{\mathrm{z},i}$取水平钢筋网外法向方向，通常令$\delta_{\mathrm{x}} = \delta_{\mathrm{y}} = \Delta x_i = \Delta y_i = 0$，末端沿法向接近并退出。对于竖直面法向接近模版，$\boldsymbol{e}_{\mathrm{z},i}$取竖直钢筋网所在平面的外法向方向，其参数形式与水平面模版一致，仅接近方向不同。对于受限区域偏置接近模版，根据局部钢筋分布或障碍约束设置$\delta_{\mathrm{x}},\delta_{\mathrm{y}},\Delta x_i,\Delta y_i$，使末端在准备或退出阶段引入侧向偏移，以提高局部避碰能力。

考虑不同作业阶段对效率和安全性的要求，设置分阶段速度约束策略。设v_i^{pre}、v_i^{app}和v_i^{exe}分别表示第i个绑扎点准备、接近和执行阶段的末端速度约束，v_{s}、v_{w}和v_{e}分别表示安全转移速度、接近工作速度和执行阶段速度。准备阶段采用安全转移速度v_{s}，即$v_i^{\mathrm{pre}} = v_{\mathrm{s}}$；接近阶段采用较低的工作速度$v_{\mathrm{w}}$，即$v_i^{\mathrm{app}} = v_{\mathrm{w}}$，且满足$v_{\mathrm{w}} < v_{\mathrm{s}}$；执行阶段以绑扎动作和位姿保持为主，速度约束为较小值，即$v_i^{\mathrm{exe}} = v_{\mathrm{e}}$；退出阶段先以低速$v_{\mathrm{w}}$撤离局部作业区域，待末端远离钢筋结构后再恢复至安全转移速度v_{s}。图 4 中各平台段表示不同作业阶段的速度约束水平，阶段切换处采用平滑加减速过渡，以保证末端速度连续性。

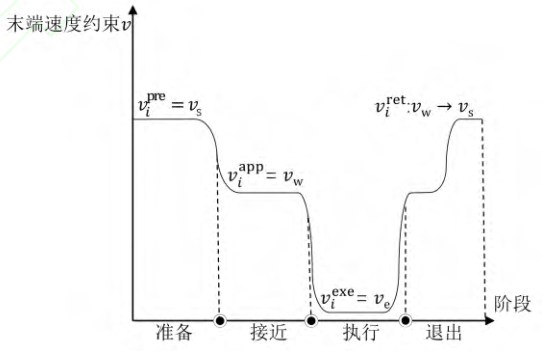


图 4 单点分阶段作业过程的末端速度约束示意图
Fig 4 Schematic Diagram of End Effector Velocity Constraints for Single-Point Phased Operation Process

因此，单点局部作业轨迹并非由场景模板直接给出，而是按照“模板匹配—关键位姿计算—分段轨迹插值—阶段速度赋值”的流程生成。对于第i个绑扎点，首先根据其平面类型和局部空间约束确定

对应模板，再由模板参数计算 $\boldsymbol{X}_i^{\mathrm{pre}}$、$\boldsymbol{X}_i^{\mathrm{app}}$、$\boldsymbol{X}_i^{\mathrm{exe}}$ 和 $\boldsymbol{X}_i^{\mathrm{ret}}$ 四个关键位姿，随后对相邻关键位姿进行分段插值，并结合阶段速度约束完成时间参数化，最终得到单点局部作业轨迹 $\Gamma_i^{\mathrm{local}}$。为保证所生成局部轨迹能够用于实际机械臂执行，模板参数还需满足以下基本约束：①准备位姿和退出位姿应位于局部钢筋结构之外，并保持不小于设定安全距离 d^{safe} 的间隙；②接近方向 $\boldsymbol{e}_{\mathrm{z},i}$ 应与绑扎工具实际工作方向一致，接近阶段末端沿该方向进入执行位姿；③四阶段关键位姿应位于 JAKA Zu5 机械臂可达工作空间内，并满足控制器运动规划可执行条件；④阶段速度满足 $v_{\mathrm{e}} < v_{\mathrm{w}} < v_{\mathrm{s}}$，其中接近与执行阶段采用较低速度以降低局部接触和碰撞风险；⑤对于水平面、竖直面及受限区域，根据实际钢筋网朝向和局部障碍情况分别确定接近方向与侧向偏置参数。若候选关键位姿不满足可达性或安全距离要求，则该局部轨迹视为不可行，不参与后续协同规划评价。

2.3　单点局部轨迹代价评价

为评价单点绑扎局部作业轨迹的质量，从路径长度、姿态变化、安全裕度和作业时间四个方面构建评价指标。对于第 i 个绑扎点，其局部作业轨迹为 $\Gamma_i^{\mathrm{local}}$，对应的局部轨迹代价由以下四项组成。

（1）路径长度指标。路径长度用于表征末端执行器完成单点作业所需的空间运动距离。设单点作业轨迹由四个阶段组成，则总路径长度可表示为：

$$L_i = \sum L_i^s \left(s \in \{\mathrm{pre,app,exe,ret}\} \right) \tag{17}$$

式中，$\boldsymbol{L}_i$ 表示第 i 个绑扎点局部作业轨迹的总路径长度，$\boldsymbol{L}_i^s$ 为第 s 阶段的末端路径长度。距离越大，说明末端空行程和局部运动开销越大。

（2）姿态变化指标。姿态变化用于表征末端执行器在单点作业过程中的姿态调整幅度。根据四阶段关键位姿，姿态变化量定义为相邻关键位姿之间姿态差的累加：

$$\Theta_i = \Delta\theta_i^{\mathrm{pre}\to\mathrm{app}} + \Delta\theta_i^{\mathrm{app}\to\mathrm{exe}} + \Delta\theta_i^{\mathrm{exe}\to\mathrm{ret}} \tag{18}$$

式中，Θ_i 表示第 i 个绑扎点局部作业过程中末端的累计姿态变化量，$\Delta\theta^{a\to b}$ 表示相邻作业阶段 a 与 b 之间的姿态变化角，其中 $a,b \in \{\mathrm{pre,app,exe,ret}\}$。任意相邻关键位姿 a 与 b 之间的姿态差可表示为：

$$\Delta\theta_i^{a\to b} = \arccos\left(\frac{\mathrm{tr}\left(\left(\boldsymbol{R}_i^a \right)^{\mathrm{T}} \boldsymbol{R}_i^b \right) - 1}{2} \right) \tag{19}$$

式中，$\boldsymbol{R}_i^a, \boldsymbol{R}_i^b$ 分别为对应阶段的末端姿态矩阵。姿态变化量越大，说明单点作业过程中末端姿态调整越剧烈。

（3）安全裕度指标。安全裕度用于评价末端轨迹与钢筋或障碍物之间的最小距离。将第 i 个绑扎点的局部轨迹离散为若干空间点，设 $\boldsymbol{\xi}_{i,m}$ 为局部轨迹上的第 m 个离散空间点，其中 m 为轨迹离散点索引；设 Λ 为钢筋及局部障碍物构成的空间障碍物集合，$\boldsymbol{o} \in \Lambda$ 表示该集合中的空间点，则 $\boldsymbol{\xi}_{i,m}$ 到障碍物集合的最小距离为：

$$d_{i,m} = \min_{\boldsymbol{o}\in\Lambda} \left\| \boldsymbol{\xi}_{i,m} - \boldsymbol{o} \right\| \tag{20}$$

则单点轨迹的最小安全距离为：

$$d_i^{\min} = \min_m d_{i,m} \tag{21}$$

为使安全距离越小对应代价越大，定义安全裕度代价为：

$$S_i^{\mathrm{safe}} = \frac{d^{\mathrm{safe}}}{d_i^{\min} + \zeta} \tag{22}$$

式中，d^{safe} 为安全参考距离，ζ 为防止分母为零的极小正数。

（4）作业时间指标。作业时间用于评价单点作业轨迹的执行效率。结合 2.2 节给出的阶段速度约

束，单点作业时间可表示为：

$$\tau_i = \sum_{s\in\text{pre,app,ret}} \frac{L_i^s}{v_i^s} + t_i^{\text{exe}} \tag{23}$$

式中，τ_i表示第i个绑扎点单点局部作业的估计执行时间；v_i^s为第s阶段的速度约束；t_i^{exe}为执行阶段的位姿保持或绑扎动作时间。由于执行阶段通常以保持或微动为主，故将其单独以执行时间项表示。

为避免不同量纲指标直接叠加，对路径长度、姿态变化和作业时间进行无量纲化处理：

$$\bar{L}_i = \frac{L_i}{L_{\text{ref}}},\quad \bar{\Theta}_i = \frac{\Theta_i}{\Theta_{\text{ref}}},\quad \bar{\tau}_i = \frac{\tau_i}{\tau_{\text{ref}}} \tag{24}$$

式中，$\bar{L}_i$、$\bar{\Theta}_i$和$\bar{\tau}_i$分别表示第i个绑扎点局部轨迹的路径长度、姿态变化量和作业时间经无量纲化后的指标；L_{ref}、Θ_{ref}、τ_{ref}分别为对应指标的参考值。由此，第i个绑扎点的局部轨迹综合代价定义为：

$$C_i^{\text{local}} = \kappa_L \bar{L}_i + \kappa_\Theta \bar{\Theta}_i + \kappa_S S_i^{\text{safe}} + \kappa_\tau \bar{\tau}_i \tag{25}$$

式中，$\kappa_L,\kappa_\Theta,\kappa_S,\kappa_\tau$为各评价项的权重系数。该局部轨迹代价可用于评价单点作业轨迹质量，其中准备位姿和退出位姿还将作为后续点间关键位姿级衔接代价计算的输入。

3 作业顺序与末端轨迹协同规划

3.1 关键位姿级协同规划原理与框架

与一般将任务排序和局部轨迹分别求解的方法不同，钢筋绑扎连续作业建模为“点间转移—点内执行”交替组成的完整末端运动过程。其中，点间转移决定多点任务的整体效率，点内执行决定单点绑扎的可达性与安全性，二者通过准备位姿、退出位姿和局部轨迹代价建立耦合关系。第 1 节的作业顺序优化以绑扎点中心作为任务节点，其评价重点是不同目标点之间的访问先后关系；第 2 节则进一步描述了机械臂在单个绑扎点附近的准备、接近、执行和退出过程。若两者独立处理，则点中心级顺序评价不能反映末端完成当前绑扎点后由退出位姿运动至下一绑扎点准备位姿所产生的实际转移开销。为此，以单点局部轨迹中的准备位姿和退出位姿为接口，将点内局部作业过程引入多点访问顺序评价，构建关键位姿级作业顺序与末端轨迹协同规划方法。

待绑扎点集对应的场景信息集合为$\Sigma=\{E_1,E_2,...,E_n\}$，$E_i$包括绑扎点所属作业平面、局部接近方向及空间约束等信息。对于每个绑扎点p_i首先根据第 2 节的单点轨迹模型建立局部任务坐标系，并由场景模板计算准备位姿$\boldsymbol{X}_i^{pre}$、接近位姿$\boldsymbol{X}_i^{app}$、执行位姿$\boldsymbol{X}_i^{exe}$和退出位姿$\boldsymbol{X}_i^{ret}$，进而生成局部作业轨迹Γ_i^{local}及局部代价C_i^{local}。

在此基础上，将任意两个候选相邻绑扎点p_i和p_j之间的点间转移定义为$\boldsymbol{X}_i^{\text{ret}} \to \boldsymbol{X}_j^{\text{pre}}$，并根据两关键位姿之间的空间距离、姿态变化、作业平面切换及安全风险计算关键位姿级衔接代价C_{ij}^{link}。由所有C_{ij}^{link}构成点间衔接代价矩阵，该矩阵替代第 1 节中仅基于绑扎点中心建立的基础边权，参与候选访问序列的适应度评价。

因此，所述“协同”并非分别得到作业顺序和局部轨迹后再进行简单拼接，而是利用单点局部轨迹产生的关键位姿信息重新定义多点任务的顺序评价边权。HDGWO-SA 在候选访问序列搜索过程中以协同总代价$J^{\text{coop}}(\sigma)$评价序列优劣，其中$J^{\text{coop}}(\sigma)$表示访问序列σ对应的点间衔接代价与点内局部作业代价构成的综合评价指标，其具体表达式将在 3.3 节给出。得到最优访问序列后，再按照该顺序依次拼接各绑扎点的局部轨迹及相邻点间衔接轨迹，最终形成完整末端执行轨迹。其总体框架如图 5 所示。

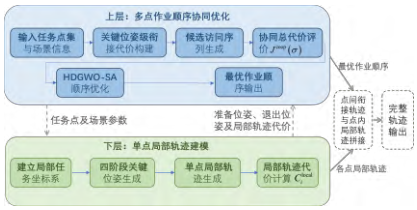


图 5 作业顺序与末端轨迹协同规划框架
Fig 5 Framework for joint planning of operation sequence and end-effector trajectory

3.2 关键位姿级点间衔接代价建模

根据 3.1 节所述协同原理，单点局部轨迹对全局访问顺序的影响通过准备位姿和退出位姿传递至点间边权。因此，多点连续绑扎任务中相邻两个任务节点之间的转移不再采用绑扎点中心距离表征，而定义为当前绑扎点退出位姿至下一绑扎点准备位姿之间的实际衔接过程。为此，在第 1 节点间转移代价模型的基础上，引入由单点分阶段轨迹生成的关键位姿信息，将相邻两个绑扎点之间的转移过程定义为 $\Gamma_{ij}^{\mathrm{link}}:\boldsymbol{X}_i^{\mathrm{ret}}\to\boldsymbol{X}_j^{\mathrm{pre}}$。其中，$\boldsymbol{X}_i^{\mathrm{ret}}$ 表示第 i 个绑扎点完成绑扎后的退出位姿，$\boldsymbol{X}_j^{\mathrm{pre}}$ 表示第 j 个绑扎点开始局部接近前的准备位姿。二者可分别表示为：

$$\boldsymbol{X}_i^{\mathrm{ret}}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{R}_i^{\mathrm{ret}} & \boldsymbol{p}_i^{\mathrm{ret}}\\ 0^{\mathrm{T}} & 1\end{bmatrix} \tag{26}$$

$$\boldsymbol{X}_j^{\mathrm{pre}}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{R}_j^{\mathrm{pre}} & \boldsymbol{p}_j^{\mathrm{pre}}\\ 0^{\mathrm{T}} & 1\end{bmatrix} \tag{27}$$

式中，$\boldsymbol{p}_i^{\mathrm{ret}}$、$\boldsymbol{p}_j^{\mathrm{pre}}$ 分别为退出位和准备位的位置向量；$\boldsymbol{R}_i^{\mathrm{ret}}$、$\boldsymbol{R}_j^{\mathrm{pre}}$ 分别为对应姿态矩阵。

（1）衔接路径长度项定义为 $L_{ij}^{\mathrm{link}}=\|\boldsymbol{p}_i^{\mathrm{ret}}-\boldsymbol{p}_j^{\mathrm{pre}}\|$，该项用于衡量末端执行器从当前绑扎点退出位移动至下一绑扎点准备位所需的空间转移距离。

（2）为了描述相邻两个绑扎点之间末端姿态切换幅度，定义姿态调整项：

$$\Delta\theta_{ij}^{\mathrm{link}}=\arccos\left(\frac{\mathrm{tr}\left(\left(\boldsymbol{R}_i^{\mathrm{ret}}\right)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}_j^{\mathrm{pre}}\right)-1}{2}\right) \tag{28}$$

式中，$\Delta\theta_{ij}^{\mathrm{link}}$ 表示末端由第 i 个绑扎点退出位姿转移至第 j 个绑扎点准备位姿时的姿态变化角。

（3）作业平面切换惩罚项定义为：

$$I_{ij}^{\mathrm{pl}}=\begin{cases}0,\rho_i=\rho_j\\ 1,\rho_i\neq\rho_j\end{cases} \tag{29}$$

式中，ρ_i 与 ρ_j 分别表示第 i 和 j 个绑扎点所属的作业平面类型。若两个绑扎点处于同一作业平面，则不引入平面切换惩罚；若二者处于不同作业平面，则引入惩罚项，以抑制连续作业过程中的频繁跨平面切换。

（4）安全风险惩罚项 S_{ij}^{risk} 用于描述末端在点间衔接轨迹 $\Gamma_{ij}^{\mathrm{link}}$ 上与周围钢筋结构或局部障碍物之间的安全距离情况。设衔接轨迹上第 m 个离散点到障碍物集合 Λ 的最小距离为：

$$d_{ij,m}=\min_{\boldsymbol{o}\in\Lambda}\|\boldsymbol{\xi}_{ij,m}-\boldsymbol{o}\| \tag{30}$$

式中，$d_{ij,m}$ 表示点间衔接轨迹 $\Gamma_{ij}^{\mathrm{link}}$ 上第 m 个离散空间点 $\boldsymbol{\xi}_{ij,m}$ 到障碍物集合 Λ 的最小距离。则点间衔接轨迹的最小安全距离为：

$$d_{ij}^{\min}=\min_{m} d_{ij,m} \tag{31}$$

其中，$d_{ij}^{\min}$ 表示整条点间衔接轨迹 $\Gamma_{ij}^{\mathrm{link}}$ 与周围钢筋或障碍物之间的最小安全距离。对应安全风险惩罚可定义为：

$$S_{ij}^{\mathrm{risk}}=\frac{d^{\mathrm{safe}}}{d_{ij}^{\min}+\zeta} \tag{32}$$

式中，ζ 为防止分母为零的极小正数。该项使得点间衔接轨迹越靠近钢筋或障碍物，其安全风险代价越大。协同规划仅对满足单点可达性和局部安全约束的绑扎点轨迹进行顺序评价。若某一候选点间衔接轨迹违反最小安全距离或机器人运动可达性要求，则将其对应边权设为不可行或赋予较大惩罚，从而避免优化结果选择无法实际执行的点间转移。

相邻绑扎点之间的关键位姿级衔接代价定义为：

$$C_{ij}^{\mathrm{link}}=\omega_{\mathrm{l}}L_{ij}^{\mathrm{link}}+\omega_{\mathrm{r}}\Delta\theta_{ij}^{\mathrm{link}}+\omega_{\mathrm{p}}I_{ij}^{\mathrm{pl}}+\omega_{\mathrm{s}}S_{ij}^{\mathrm{risk}} \tag{33}$$

式中，ω_{l}、ω_{r}、ω_{p}、ω_{s} 分别为衔接路径长度、姿态调整量、作业平面切换惩罚和安全风险惩罚对应的权重系数。

由此，相邻绑扎点之间的转移评价不再仅由目标点中心距离决定，而是由当前点退出位姿与下一点准备位姿之间的空间距离、姿态变化、平面切换和安全裕度共同决定。该建模方式使第 2 节中建立的单点分阶段轨迹模型能够直接参与第 3 节的全局顺序评价，为后续协同总代价函数构建提供基础。

3.3 协同总代价函数构建与求解机制

对于给定作业顺序 σ，完整末端轨迹由点内局部作业轨迹和点间衔接轨迹共同组成：

$$\Gamma(\sigma)=\Gamma_{\sigma_1}^{\mathrm{local}}\cup\Gamma_{\sigma_1\sigma_2}^{\mathrm{link}}\cup\Gamma_{\sigma_2}^{\mathrm{local}}\cup\cdots\cup\Gamma_{\sigma_{n-1}\sigma_n}^{\mathrm{link}}\cup\Gamma_{\sigma_n}^{\mathrm{local}} \tag{34}$$

式中，$\Gamma(\sigma)$ 表示机器人按照访问序列 σ 执行全部绑扎任务时形成的完整末端轨迹；$\Gamma_{\sigma_k}^{\mathrm{local}}$ 表示第 σ_k 个绑扎点的单点局部作业轨迹，$\Gamma_{\sigma_k\sigma_{k+1}}^{\mathrm{link}}$ 表示第 σ_k 个绑扎点退出位至第 σ_{k+1} 个绑扎点准备位之间的点间衔接轨迹。

基于上述完整轨迹表达，将协同总代价函数定义为

$$J^{\mathrm{coop}}(\sigma)=\sum_{k=1}^{n-1}C_{\sigma_k\sigma_{k+1}}^{\mathrm{link}}+\lambda_{\mathrm{local}}\sum_{k=1}^{n}C_{\sigma_k}^{\mathrm{local}} \tag{35}$$

式中，$C_{\sigma_k\sigma_{k+1}}^{\mathrm{link}}$ 为关键位姿级点间衔接代价，由 3.2 节计算得到；$C_{\sigma_k}^{\mathrm{local}}$ 为单点局部轨迹代价，由 2.3 节计算得到；λ_{local} 为局部轨迹代价权重系数，用于调节点间衔接开销与点内局部作业开销在整体评价中的相对影响。

需要指出的是，当各绑扎点局部路径模板预先确定且所有绑扎点均必须执行时，$\sum_{k=1}^{n}C_{\sigma_k}^{\mathrm{local}}$ 对于不同作业顺序可能保持不变。此时，该项主要用于评价完整任务的点内作业开销，而真正影响顺序优化结果的是关键位姿级衔接代价 $\sum_{k=1}^{n-1}C_{\sigma_k\sigma_{k+1}}^{\mathrm{link}}$。若后续允许受限区域绑扎点根据前后相邻点关系自适应选择退出方向或偏置模板，则 $C_{\sigma_k}^{\mathrm{local}}$ 可进一步扩展为顺序相关项。

对于给定任务点集，协同规划的求解过程按照“单点轨迹预处理—衔接代价矩阵构建—候选序列评价与更新—完整轨迹生成”四个步骤进行。首先，对全部绑扎点分别生成准备、接近、执行和退出四阶段关键位姿及局部作业轨迹，并计算对应的局部轨迹代价 C_i^{local}。其次，遍历任意可形成前后访问关系的绑扎点对 (i,j)，根据当前点退出位姿 $\boldsymbol{X}_i^{\mathrm{ret}}$ 与下一点准备位姿 $\boldsymbol{X}_j^{\mathrm{pre}}$ 计算 C_{ij}^{link}，形成点间衔接代价

矩阵 $\boldsymbol{C}^{\mathrm{link}}=\left[C_{ij}^{\mathrm{link}}\right]_{n\times n}$。

在序列寻优阶段，采用第 1 节所述 HDGWO-SA 算法对绑扎点访问序列进行搜索。首先初始化离散种群，每个个体对应一个可行访问序列 σ；对于任一候选序列，按照其相邻节点关系从 $\boldsymbol{C}^{\mathrm{link}}$ 中提取 $C_{\sigma_k\sigma_{k+1}}^{\mathrm{link}}$，并结合各绑扎点局部轨迹代价，根据式(35)计算协同总代价 $J^{\mathrm{coop}}\left(\sigma\right)$，作为该候选序列的适应度。随后按照第 1.3 节的 OX 离散学习、交换变异及模拟退火局部精化策略更新种群，并重复进行候选序列评价与更新，直至达到最大迭代次数或满足收敛条件。最终输出协同总代价最小的最优作业顺序 σ^*，并按照该顺序依次拼接各绑扎点局部轨迹与相邻绑扎点之间的衔接轨迹，生成完整末端执行轨迹 $\Gamma\left(\sigma^*\right)$。由于各绑扎点关键位姿和局部轨迹已在寻优前完成预处理，因此种群迭代过程中无需重复进行单点轨迹规划。具体求解流程如图 6 所示。

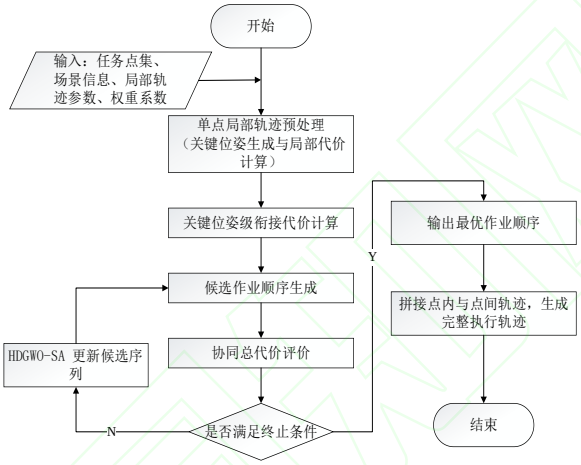


图 6 作业顺序与末端轨迹协同规划求解流程

Fig 6 Solution flow of joint planning for operation sequence and end-effector trajectory

通过上述方法，作业顺序优化不再停留于绑扎点中心之间的抽象路径搜索，而是进一步考虑了末端执行器在连续绑扎过程中的实际起止位姿、姿态切换和平面转换约束。由此获得的作业顺序能够更准确地反映机器人末端完整执行轨迹的运动代价，为第 4.3 节多点任务下的协同规划验证提供理论基础。

4　仿真与实验

4.1　多目标作业顺序优化仿真验证

为验证第 1 节所建多目标作业顺序优化模型及 HDGWO-SA 算法的有效性，在 130mm 间距的水平—竖直面钢筋网格工况下进行仿真对比，重点考察不同方法在顺序代价、求解稳定性和计算耗时方面的差异。对比方法包括固定行列遍历、贪心算法[25]、标准离散灰狼算法（Discrete Grey Wolf Optimizer，DGWO）[26]、遗传算法（Genetic Algorithm，GA）[27]和 HDGWO-SA 算法。各算法采用相同的绑扎点集和多目标代价函数，规划结果如图 7 所示，为了排除算法初始化的随机性影响，DGWO、GA 和 HDGWO-SA 均独立运行 30 次。其中，Row-by-Row 和 Greedy 在给定任务点集、起点及代价参数后均采用确定性规则生成访问序列，不涉及随机初始化，因此其规划结果在重复计算中保持一致；DGWO、GA 和 HDGWO-SA 包含随机初始化及随机搜索过程，为降低随机性影响，分别独立运行 30 次，并统计最优值、平均值和标准差。表 1 详细记录了各算法的统计学表现。

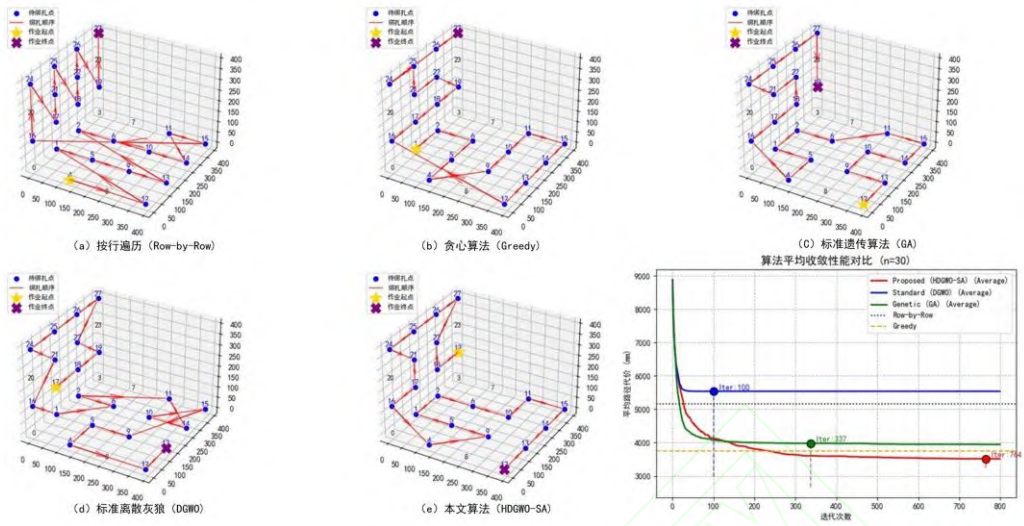


图 7 不同作业顺序优化方法的规划结果与收敛性能

Fig 7 Planning results and convergence performance of different operation sequence optimization methods

表1 不同作业顺序优化方法的统计结果

Table 1 Statistical results of different task-sequence optimization methods

算法	最优 J^{seq}	平均 J^{seq}	标准差	平均耗时(s)
HDGWO-SA	3445.39	3511.09	45.20	0.82
DGWO	4112.16	5538.75	755.96	0.78
GA	3521.54	3945.57	383.05	0.85
Row-by-Row	5154.76	5154.76	0.00	<0.01
Greedy	3748.79	3748.79	0.00	<0.01

由表 1 可知，Row-by-Row 和 Greedy 均属于确定性顺序生成方法。在任务点集、起点及代价参数固定的条件下，Row-by-Row 按照预设行列次序直接生成访问序列，Greedy 则根据当前节点与未访问节点之间的局部转移代价逐步确定下一访问点，二者均不涉及随机初始化和随机搜索过程。因此，重复计算所得顺序代价保持不变，其最优值与平均值一致，标准差均为 0。与此同时，两种方法无需进行种群初始化和多代迭代寻优，单次计算时间均低于 0.01 s。对于 DGWO、GA 和 HDGWO-SA，连续 50 代内最优适应度变化量小于设定阈值 $\varepsilon_{\mathrm{conv}}$ 时，认为算法达到稳定收敛状态，其中 $\varepsilon_{\mathrm{conv}}$ 表示用于判断算法是否达到稳定收敛的适应度变化阈值。

相比之下，DGWO、GA 和 HDGWO-SA 均包含随机初始化和种群迭代过程，因此 30 次独立运行结果存在不同程度的波动。DGWO 的最优顺序代价为 4112.16，优于 Row-by-Row 的 5154.76，但其平均值达到 5538.75，标准差为 755.96，说明 DGWO 虽然在部分运行中能够获得较优访问序列，但受随机初始化和离散搜索能力限制，部分搜索过程易停留在质量较差的局部解，导致总体波动较大。GA 的最优值和平均值分别为 3521.54 和 3945.57，标准差为 383.05，其求解稳定性较 DGWO 有所改善。

HDGWO-SA 获得的最优顺序代价为 3445.39，平均值为 3511.09，标准差仅为 45.20。与 GA 相比，其平均顺序代价降低约 11.01%，与 DGWO 相比降低约 36.61%；同时，其标准差分别仅为 GA 和 DGWO 的约 11.80%和 5.98%。此外，HDGWO-SA 的平均结果也低于确定性 Greedy 方法的 3748.79，表明所引入的 OX 离散学习机制和模拟退火局部精化策略不仅能够提高最优解质量，也能够减弱随机初始化对求解结果的影响，从而获得更加稳定的多点作业顺序。

从计算时间来看，DGWO、HDGWO-SA 和 GA 的平均耗时分别为 0.78 s、0.82 s 和 0.85 s，处于同一数量级。虽然 HDGWO-SA 在离散灰狼搜索基础上进一步加入 2-opt 扰动和 Metropolis 接受机制，但其平均耗时仅较 DGWO 增加 0.04 s，且低于 GA，说明所增加的局部精化过程未造成明显的额

外计算开销。在当前绑扎点规模下，该计算时间能够满足作业前顺序规划的需求。

从图 7 中的平均收敛曲线可以看出，DGWO、GA 和 HDGWO-SA 在迭代初期均能够较快降低顺序代价，但后期表现存在明显差异。DGWO 较早进入波动或停滞状态，GA 约在 337 代后趋于稳定，而 HDGWO-SA 在后期仍能够通过模拟退火扰动继续搜索更优序列，并最终收敛至三种随机优化算法中的最低代价水平。结合表 1 中的最优值、平均值和标准差可以看出，HDGWO-SA 在当前多点钢筋绑扎任务中兼顾了顺序优化质量、重复求解稳定性和计算效率，为后续关键位姿级协同规划提供了较为稳定的作业顺序基础。

4.2　单点局部作业轨迹仿真与实机验证

为验证第 2 节所建单点绑扎末端关键位姿与局部作业轨迹模型的可行性，选取水平钢筋网中的一个典型交叉点作为目标绑扎点，开展单点局部轨迹仿真与实机验证。首先基于目标绑扎点生成四阶段关键位姿，并在机器人操作系统 2（Robot Operating System 2，ROS 2）环境下完成末端分阶段轨迹仿真；随后在 JAKA Zu5 机械臂平台上进行实机执行，通过采集工具中心点（Tool Center Point，TCP）实测轨迹与规划轨迹进行对比，验证单点局部作业轨迹的可执行性和轨迹一致性。

4.2.1 单点仿真场景与关键位姿生成

选取水平钢筋网中的一个典型交叉点作为目标绑扎点。该点位于 JAKA Zu5 机械臂可达工作空间内，可代表常规水平面绑扎作业场景。仿真中，以视觉识别得到的绑扎点坐标作为目标位置输入，并在机器人基坐标系下建立对应的局部任务坐标系。

根据第 2 节提出的单点四阶段关键位姿模型，分别生成 $\boldsymbol{X}_i^{\mathrm{pre}}$、$\boldsymbol{X}_i^{\mathrm{app}}$、$\boldsymbol{X}_i^{\mathrm{exe}}$、$\boldsymbol{X}_i^{\mathrm{ret}}$。仿真过程按照准备—接近—执行—退出的阶段顺序生成末端局部作业轨迹，并结合分阶段速度约束完成轨迹参数化。需要说明的是，本节单点实验仅用于验证典型水平面绑扎点处四阶段轨迹模型的可执行性，并不表示所有绑扎点均采用完全相同的末端轨迹。对于不同绑扎点，系统根据其视觉定位坐标、所属作业平面、局部任务坐标系和场景模板参数，分别计算对应的四阶段关键位姿。因此，不同绑扎点的局部轨迹在空间位置、接近方向、偏置距离和退出方向上可以不同。

4.2.2 末端分阶段轨迹仿真

在 ROS 2 环境下建立 JAKA Zu5 机械臂及绑扎末端的运动学模型，并根据第 4.2.1 节生成的四阶段关键位姿进行笛卡尔空间轨迹规划，仿真结果如图 8 所示。图中蓝色、黄色、红色和绿色标记点分别表示准备位姿、接近位姿、执行位姿和退出位姿，可以看出，四个关键位姿均围绕目标绑扎点布置，末端执行器在接近阶段逐步靠近钢筋交叉区域，在执行阶段到达绑扎作业位置，并在退出阶段远离局部作业区域。由图中实时采样拖尾轨迹（紫实线）可知，执行轨迹在三维物理空间中吻合理想的线性路径指令（直线度拟合误差极小）。该结果说明第 2 节建立的四阶段关键位姿模型能够为单点绑扎作业提供可执行的局部轨迹输入，为后续实机验证提供规划轨迹参考。

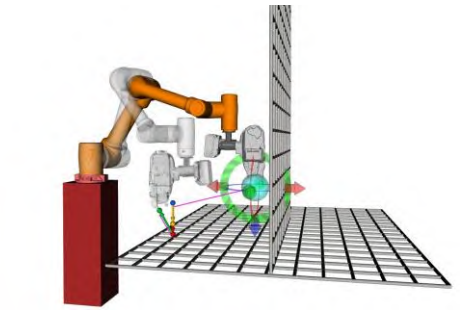


图 8 基于 ROS 2 的单个绑扎点末端分阶段规划示意图
Fig 8 Schematic Diagram of Phased End-Effector Planning for a Single Binding Point Based on ROS 2

4.2.3 实验平台与 TCP 轨迹采集

为进一步验证单点分阶段轨迹在实机系统中的可执行性，搭建了钢筋绑扎机器人实验平台，如图

9 所示。实验平台主要由 JAKA Zu5 六自由度协作机械臂、绑扎末端执行器、水平—竖直组合钢筋网格、RealSense D435i 深度相机以及上位机控制程序组成。其中，JAKA Zu5 机械臂用于完成末端位姿运动控制，绑扎末端执行器安装于机械臂法兰端，RealSense D435i 相机用于获取钢筋网格图像进行视觉识别交叉点并定位交叉点坐标。

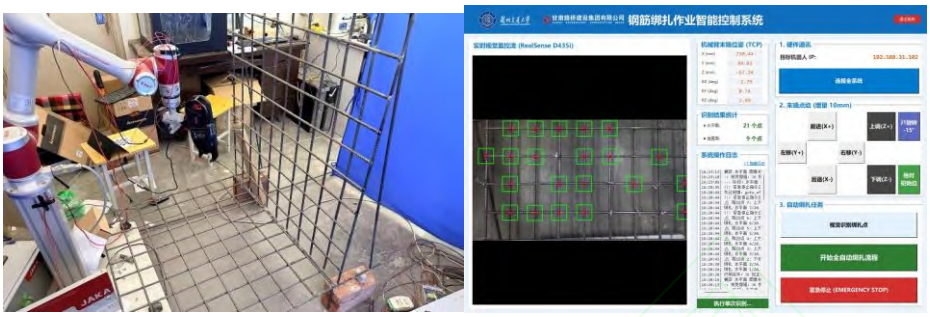


图 9 实验平台与单点绑扎场景实物图
Fig 9 Physical Photograph of Experimental Platform and Single-Point Binding Scene

实验控制程序采用 Python 编写，通过 JAKA 机器人控制接口向机械臂依次下发位姿指令。为获取实机执行过程中的末端运动数据，通过 JAKA 控制接口实时读取机器人 TCP 位姿，并记录末端在各时刻的位置与姿态数据。采集得到的实测 TCP 轨迹用于与规划轨迹进行对比，从而评价单点分阶段轨迹在实机平台上的轨迹一致性和可执行性。

4.2.4 实测轨迹对比与局部代价分析

按照第 4.2.3 节所述实验流程，控制 JAKA Zu5 机械臂完成单点分阶段运动，如图 10 所示，并将规划轨迹与实测 TCP 轨迹进行对比，结果如图 11 和图 12 所示。图 11 为规划轨迹与实测 TCP 轨迹的三维对比结果，图 12 为 TCP 坐标随时间变化曲线。可以看出，实测 TCP 轨迹能够按照规划关键位姿完成阶段运动，整体运动趋势与规划轨迹保持一致，说明所设计的单点局部作业轨迹具备实机可执行性。

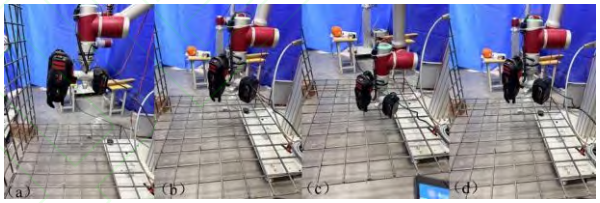


图 10 JAKA Zu5 末端分阶段实机执行过程图
Fig 10 Diagram of Phased Physical Execution Process for the End Effector of JAKA Zu5

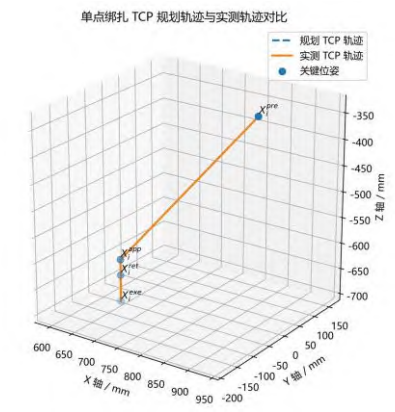


图 11　规划轨迹与实测 TCP 轨迹对比图
Fig 11 Comparison Diagram of Planned Trajectory and Measured TCP Trajectory

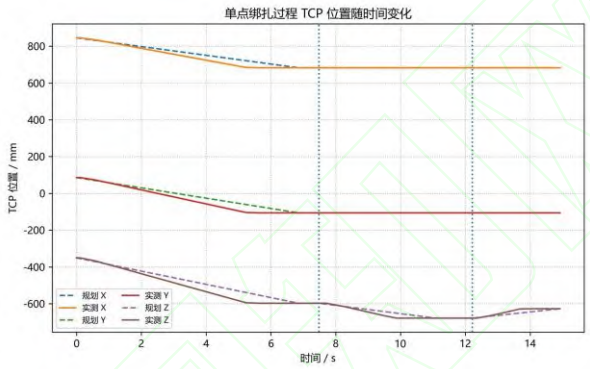


图 12 TCP 坐标时间曲线
Fig 12 Time Curves of TCP Coordinates

受机器人控制接口采样周期和机械臂插补运动影响，实测 TCP 采样点不一定与规划轨迹中的关键位姿点逐时刻对应。因此，主要从轨迹空间分布、阶段运动趋势和关键位姿到达情况评价单点执行效果，而不对高频采样点进行逐点跟踪误差分析。

为进一步量化单点作业轨迹特性，选取阶段运动距离、单点路径总长度、核心路径执行时间、姿态调整量及阶段速度作为评价指标，结果见表 2。由表 2 可知，单点轨迹总长度为 484.59 mm，核心路径执行时间为 13.16 s，姿态调整量为 40.12°。其中，准备阶段对应末端由初始状态运动至绑扎点上方接近区域，接近阶段对应末端低速逼近执行位姿，退出阶段对应绑扎完成后的安全撤离。该结果表明，单点局部作业轨迹不仅能够生成具有明确阶段特征的末端执行过程，而且可在 JAKA Zu5 平台上稳定执行。

表2 单个绑扎点末端分阶段轨迹评价结果
Table 2 Evaluation Results of Phased End-Effector Path for a Single Binding Point

评价指标	数值	说明
预备阶段/mm	352.59	准备位姿运动至绑扎点上方接近位姿
接近阶段/mm	81.00	由绑扎点上方接近至压紧执行位姿
退出阶段/mm	51.00	执行完成后沿安全方向回退至撤离位姿
单点路径总长度/mm	484.59	末端空间运动距离之和
核心路径执行时间/s	13.16	从 X^{pre} 至 X^{ret} 的实机执行时间
姿态调整量/°	40.12	根据钢筋方向拟合结果调整关节 6
接近阶段速度/ mm/s	95	
执行及退出段速度/ mm/s	70	

综上，单点仿真与实机验证结果表明，第 2 节建立的单点四阶段关键位姿模型和局部作业轨迹生成方法具有可执行性。由此得到的准备位姿、退出位姿和局部轨迹代价可作为后续多点任务中关键位姿级衔接代价计算和协同规划验证的基础输入。

4.3 多点任务下作业顺序与末端轨迹协同规划验证

4.3.1 多点任务设置与对比方法

为验证作业顺序与末端轨迹协同规划方法在多点连续绑扎任务中的有效性，基于视觉识别结果构建多点离线规划实验。视觉系统经手眼标定后输出机器人基坐标系下的绑扎点坐标，实验共识别得到 35 个待绑扎点，其中水平面绑扎点 23 个，竖直面绑扎点 12 个。

对于竖直面绑扎点，考虑到视觉识别和深度测量会引入局部离散误差，首先将其投影至竖直钢筋网所在平面，并依据钢筋间距进行网格行列约束修正，再用于后续作业顺序优化和关键位姿生成。

根据第 2 节建立的单点分阶段轨迹模型，分别为每个绑扎点生成准备位姿、接近位姿、执行位姿和退出位姿。考虑到实际绑扎过程中末端执行器需与钢筋结构保持安全距离，实验中准备位姿和退出位姿均设置较大的安全偏置距离。

为保证对比公平性，将多点任务设置为固定起点和固定终点的开放式遍历问题。机器人从统一起始位姿出发，完成全部绑扎点作业后返回统一终止位姿；水平面与竖直面绑扎点允许混合排序。完整任务轨迹可表示为

$$\boldsymbol{X}_{\mathrm{start}} \rightarrow \boldsymbol{X}_{\sigma_1}^{\mathrm{pre}} \rightarrow \Gamma_{\sigma_1}^{\mathrm{local}} \rightarrow \Gamma_{\sigma_1\sigma_2}^{\mathrm{link}} \rightarrow \cdots \rightarrow \Gamma_{\sigma_n}^{\mathrm{local}} \rightarrow \boldsymbol{X}_{\mathrm{end}}$$

式中，$\boldsymbol{X}_{start}$ 和 $\boldsymbol{X}_{\mathrm{end}}$ 分别表示多点连续绑扎任务统一设置的末端起始位姿和终止位姿；其余轨迹符号含义与式(34)一致。

设置三组对比方法，固定行列遍历方法按照预设行列次序生成确定性作业序列，作为规则基线；点中心级 HDGWO-SA 顺序优化方法以绑扎点中心之间的距离、姿态调整和平面切换代价作为适应度函数；关键位姿级协同规划方法采用第 3 节建立的协同总代价函数 $J^{\mathrm{coop}}(\sigma)$，将相邻绑扎点之间的转移过程修正为当前点退出位姿至下一点准备位姿之间的实际衔接评价。

三种方法采用相同的视觉点集、单点路径模板、安全偏置距离、速度参数以及固定起终点边界条件，区别仅在于作业顺序生成方式和点间衔接代价评价方式。

4.3.2 完整末端轨迹生成与对比

根据 4.3.1 中的实验设置，分别三种方法生成多点作业顺序。对于任一规划序列 σ，按照第 3.3 节定义的完整轨迹拼接方式，将各绑扎点的点内局部作业轨迹与相邻绑扎点之间的点间衔接轨迹依次连接，生成完整末端 TCP 轨迹。

图 13 给出了三种方法生成的完整末端 TCP 轨迹。可以看出，固定行列遍历方法主要依据预设行列顺序完成绑扎任务，轨迹中存在一定的长距离跨区衔接现象。点中心级 HDGWO-SA 方法能够根据绑扎点中心位置优化访问顺序，使整体转移路径相比固定行列遍历更加紧凑。相比之下，协同规划方法在顺序优化过程中进一步考虑了退出位姿与下一准备位姿之间的实际衔接代价，因此生成的末端轨迹在点间过渡阶段更加平顺，减少了部分由关键位姿偏置引起的额外空程转移。

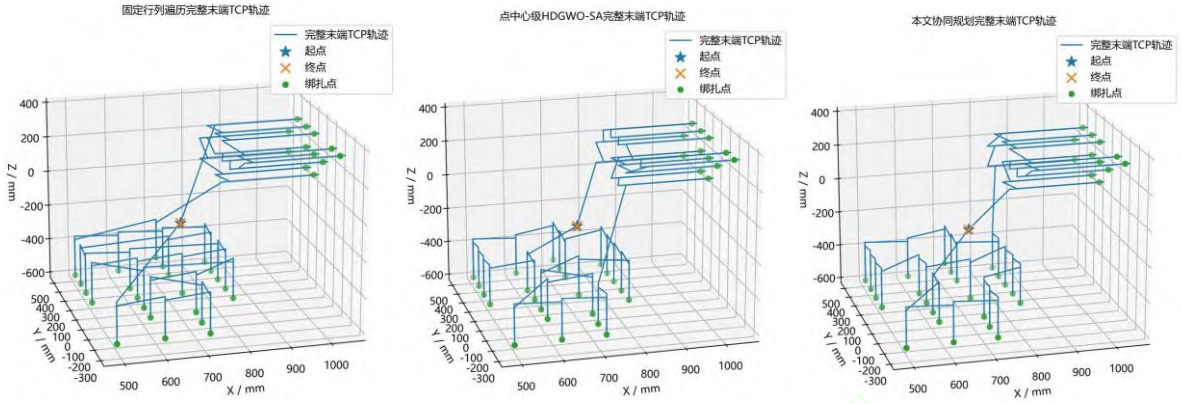


图 13 各方法生成的完整末端 TCP 轨迹
Fig 13 Complete End-Effector TCP Trajectories Generated by Various Methods

为进一步观察规划顺序的空间分布，图 14 给出了协同规划方法对应的多点访问顺序。结果表明，协同规划能够根据点间实际衔接代价自主调整作业顺序，而不是简单按视觉识别编号或固定行列顺序执行，引入关键位姿级衔接代价后，作业顺序评价能够更接近机器人末端的真实运动过程。

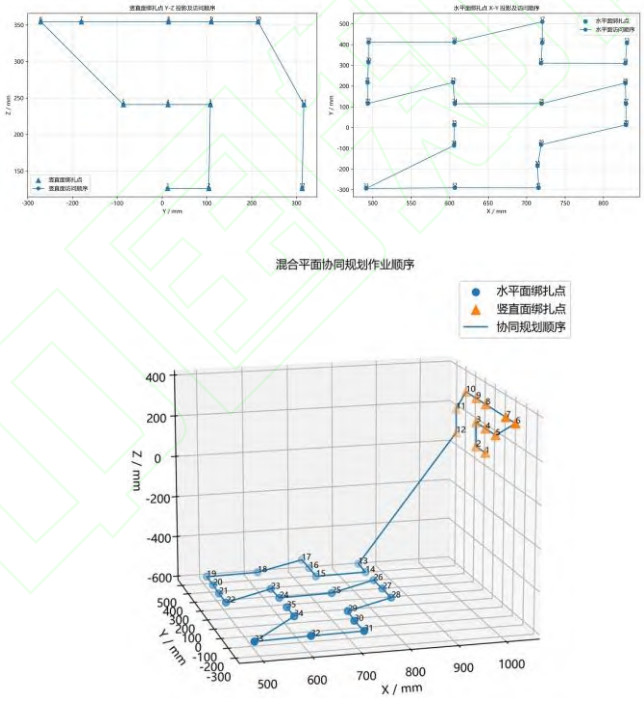


图 14 协同规划方法对应的多点访问顺序
Fig 14 Multi-point Access Sequence Corresponding to Collaborative Planning Method

总体来看，三种方法其点间衔接轨迹存在差异。固定行列遍历方法更接近传统经验轨迹，点中心级 HDGWO-SA 方法改善了绑扎点中心层面的访问顺序，而协同规划方法进一步将末端准备位姿和退出位姿纳入评价过程，为后续定量比较总衔接长度、完整路径长度和协同总代价提供了基础。

4.3.3 协同规划结果定量分析

为定量评价不同规划方法的执行效果，对三种方法生成的完整末端轨迹进行统计，结果如表 3 所示。

表3 三种方法生成的完整末端轨迹统计结果

Table 3 Statistical Results of Complete End-Effector Trajectories Generated by Three Methods

方法	总衔接长度/mm	完整路径长度/mm	协同总代价	预估执行时间/s
固定行列遍历	6176.19	22416.19	24225.40	264.76
点中心级 HDGWO-SA	5338.32	21578.32	23387.51	256.38
本文协同规划	4971.09	21211.09	23021.88	252.71

协同规划方法的总衔接长度进一步降低至 4971.09 mm，完整路径长度降低至 21211.09 mm，协同总代价降低至 23021.88。相比固定行列遍历方法，总衔接长度降低 19.51%，完整路径长度降低 5.38%，协同总代价降低 4.97%，估计执行时间降低 4.55%。相比点中心级 HDGWO-SA 方法，总衔接长度降低 6.88%，完整路径长度降低 1.70%，协同总代价降低 1.56%，估计执行时间降低 1.43%。

结果表明，点中心级 HDGWO-SA 已经能够获得较优的作业顺序，因此协同规划方法相对于该方法的提升幅度并不大。但由于协同规划在适应度评价中进一步引入了退出位姿至下一准备位姿之间的关键位姿级衔接代价，其总衔接长度、完整路径长度和协同总代价仍均低于点中心级优化结果。这说明仅依据绑扎点中心位置建立顺序代价，仍不能完全反映机器人末端真实执行轨迹，而关键位姿级衔接代价能够对点中心级顺序优化结果进行进一步修正。

综合来看，关键位姿级协同规划方法能够在固定起终点边界和真实视觉识别点集条件下完成多点连续绑扎任务规划。与固定行列遍历相比，该方法能够明显降低空程衔接开销；与点中心级 HDGWO-SA 相比，该方法在强基线基础上仍能进一步降低末端实际轨迹代价，验证了作业顺序优化与末端轨迹协同建模的有效性。尤其值得注意的是，点中心级 HDGWO-SA 与文中协同规划采用相同的绑扎点集和顺序优化算法，两者主要区别在于点间代价的建模层级。本文方法在该强基线基础上仍使总衔接长度降低 6.88%，说明性能改善并非仅来源于 HDGWO-SA 的顺序寻优能力，而主要得益于将末端退出位姿与下一任务准备位姿纳入顺序评价。该结果从实验层面验证了关键位姿级协同建模相对于传统点中心级顺序评价的有效性。

4.4 多点连续作业实机验证

为进一步验证协同规划轨迹的实机可执行性，选取协同规划得到的最优作业顺序，在 JAKA Zu5 机械臂平台上进行多点连续执行，并通过机器人控制接口记录末端反馈 TCP 轨迹，JAKA Zu5 末端姿态采用滚转-俯仰-偏航（Roll-Pitch-Yaw，RPY）角表示。将规划轨迹与实测轨迹进行对比，结果如下图所示。

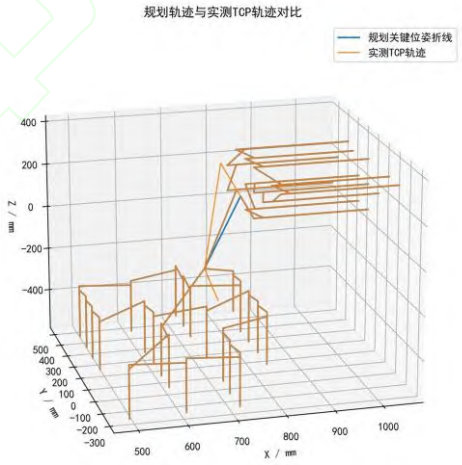
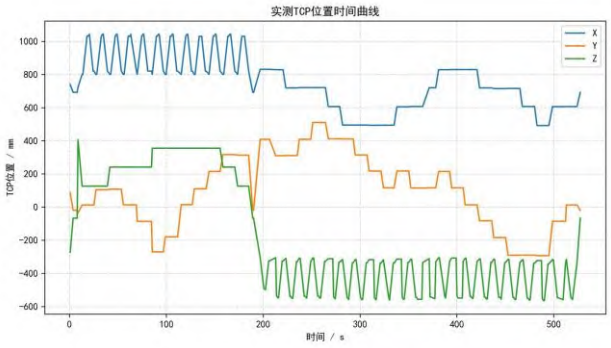
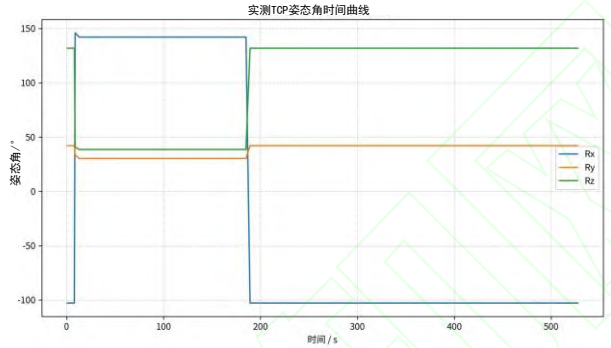


图 15 规划轨迹与控制器反馈 TCP 轨迹对比

Fig 15 Comparison of Planned Trajectory and Controller-feedback TCP Trajectory



（a） TCP 位置



（b） TCP RPY 姿态角

图 16 多点连续作业过程中控制器反馈 TCP 位姿随时间变化曲线
Fig 16 Curve of controller-feedback TCP pose versus time during multi-point continuous operation

由于机器人控制程序采用阻塞式关键位姿运动指令，TCP 反馈数据的获取周期同时受到机器人软件开发工具包（Software Development Kit，SDK）通信及运动指令执行过程影响，因此本实验不将控制器反馈 TCP 数据用于评价机械臂的绝对定位精度或高频轨迹跟踪误差，而主要从规划轨迹与反馈轨迹的空间分布、关键位姿序列连续执行状态以及运动指令返回结果等方面评价所生成轨迹的实机可执行性。

图 15 给出了完整多点任务下规划轨迹与控制器反馈 TCP 轨迹的三维对比结果。反馈轨迹整体沿规划运动区域分布，机器人能够依次完成竖直面与水平面绑扎点访问，并完成不同作业平面之间的连续切换。图 16 给出了多点连续作业过程中控制器反馈 TCP 位置及 RPY 姿态角随时间的变化情况。JAKA Zu5 末端位姿采用$\left[x,y,z,R_{\mathrm{x}},R_{\mathrm{y}},R_{\mathrm{z}}\right]$表示，其中 x、y、z 分别表示 TCP 在机器人基坐标系三个坐标轴方向上的位置坐标，单位为 mm；R_{x}，R_{y}，R_{z} 为 RPY 姿态参数，SDK 内部采用 rad 表示，绘图时统一转换为°。由图可见，同一作业平面内连续绑扎过程中末端姿态总体保持稳定，而在水平面与竖直面任务切换阶段，RPY 姿态参数发生明显变化，与多平面作业中设置的末端姿态约束相一致。需要指出的是，由于欧拉角表示具有周期性和非唯一性，图中局部数值跃迁用于表征姿态表示的变化，不宜直接解释为机械臂发生同等幅值的瞬时物理旋转。

本次完整任务共包含 144 个运动指令点，其中包括平面切换安全位姿以及各绑扎点的准备、接近、执行和退出关键位姿。根据执行日志，各运动指令返回状态均正常，未出现运动指令执行错误。该结果表明，由协同规划生成的多点作业顺序及关键位姿序列能够在 JAKA Zu5 机械臂平台上完成连续执行，验证了所提方法的实机可执行性。

综上，多点连续作业实验表明，协同规划生成的作业顺序及末端关键位姿序列能够在 JAKA Zu5 平台上连续执行，完整任务过程中未出现运动指令执行错误。需要指出的是，实机实验中的 TCP 数

据来源于机器人控制器反馈，且其采样周期受到 SDK 通信和阻塞运动指令的限制，因此主要利用该数据验证规划轨迹的执行过程与连续作业状态，而不将其作为机械臂绝对定位精度或高频轨迹跟踪精度的评价依据。机械臂末端绝对定位误差的进一步测量需要引入独立外部测量系统或更高频的实际位姿反馈接口。

5 结论

针对钢筋绑扎机器人多点连续作业中作业顺序优化与末端局部轨迹规划分离的问题，提出了一种作业顺序与末端轨迹协同规划方法，主要结论如下：

（1）建立了面向钢筋绑扎任务的多目标作业顺序优化模型，将点间距离、姿态调整和平面切换等因素引入作业顺序评价，并采用 HDGWO-SA 算法进行求解，提高了多点绑扎任务的全局顺序优化能力。

（2）构建了单点绑扎末端分阶段轨迹模型，将局部作业过程划分为准备、接近、执行和退出四个阶段，并建立了适用于不同作业场景的参数化路径模板，为末端局部作业轨迹生成提供了统一描述方法。

（3）提出了关键位姿级协同规划方法，将传统点中心级转移代价修正为“退出位姿—准备位姿”之间的实际衔接代价，使作业顺序优化能够更准确地反映机器人末端真实执行轨迹。

（4）通过仿真与 JAKA Zu5 机械臂实机实验验证了所提方法的有效性，结果表明能够降低多点连续作业中的冗余转移，提高末端轨迹连续性，并具备良好的实机可执行性。

后续研究将进一步结合在线视觉反馈和力觉信息，对绑扎点定位误差、钢筋局部变形和末端接触状态进行实时修正，以提升钢筋绑扎机器人在复杂施工环境中的适应性和作业稳定性。

参考文献（References）

[1] 董林杰，张任飞，李杰，等．钢筋绑扎机器人研究进展及关键技术分析[J]．建筑科学与工程学报，2025，42（5）：15-31．DOI：10．19815/j．jace．2024．04039．
Dong Linjie, Zhang Renfei, Li Jie, et al. Research Progress and Key Technology Analysis of Rebar Tying Robots[J]. Journal of Building Science and Engineering, 2025, 42(5): 15-31. DOI: 10.19815/j.jace.2024.04039(in Chinese).

[2] 蔡金殿．智能建造中机器人技术在钢筋绑扎作业中的应用分析[J]．居业，2025，（10）：22-24．
Cai Jindian. Application Analysis of Robot Technology in Rebar Tying Operation in Intelligent Construction[J]. Habitat Industry, 2025, (10): 22-24(in Chinese).

[3] Jiahao J ,Weimin Z ,Fangxing L , et al.Robotic binding of rebar based on active perception and planning[J].Automation in Construction,2021,132DOI:10.1016/J.AUTCON.2021.103939.

[4] Duan H ,Sun X ,Yang H , et al.Design and experimentation of a dexterous end-effector for rebar tying robots based on anthropomorphic trajectories[J].Mechatronics,2026,116103484-03484.DOI:10.1016/J.MECHATRONICS.2026.103484.

[5] 周燕，柯美翔，文世峰，等．基于目标检测的智能钢筋绑扎机器人研究[J]．华中科技大学学报（自然科学版），2025，53（8）：30-37．DOI：10．13245/j．hust．250676．
Zhou Yan, Ke Meixiang, Wen Shifeng, et al. Research on Intelligent Rebar Tying Robots Based on Object Detection[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2025, 53(8): 30-37. DOI: 10.13245/j.hust.250676(in Chinese).

[6] 邓磊．基于机器视觉的钢筋绑扎节点识别及绑扎路径规划研究[D]．西安：西安建筑科技大学，2023．
Deng Lei. Research on Rebar Tying Node Recognition and Tying Path Planning Based on Machine Vision[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2023. (in Chinese).

[7] Siyi C ,Hao D ,Shuai G , et al.BIM-based task planning method for wheeled-legged rebar binding robot[J].Architectural Engineering and Design Management,2024,20(3):656-672.DOI:10.1080/17452007.2024.2328134.

[8] 吴嘉骏．钢筋绑扎机器人抗倾覆控制及末端轨迹优化研究[D]．上海：上海大学，2025．
Wu Jiajun. Research on Anti-overturning Control and End-effector Trajectory Optimization of Rebar Tying Robots[D]. Shanghai: Shanghai University, 2025(in Chinese).

[9] 赵志刚，王靖，颉俊杰，等．钢筋绑扎机器人平面顺序全覆盖路径规划[J/OL]．工程科学学报，1-16[2026-07-07]．https：//doi．org/10．13374/j．issn2095-9389．2025．10．14．002．
Zhao Zhigang, Wang Jing, Xie Junjie, et al. Full Coverage Path Planning of Planar Sequence for Rebar Tying Robots[J/OL]. Chinese Journal of Engineering Science, 1-16[2026-07-07]. https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2025.10.14.002(in Chinese).

[10] 唐子然．基于视觉识别的建筑用钢筋绑扎作业机器人运动规划研究[D]．长沙：中南大学，2024．
Tang Ziran. Research on Motion Planning of Construction Rebar Tying Robots Based on Visual Recognition[D]. Changsha: Central South University, 2024(in Chinese).

[11] Liu M ,Guo J ,Deng L , et al.Enhanced vision-based 6-DoF pose estimation for robotic rebar tying[J].Automation in Construction,2025,171105999-105999.DOI:10.1016/J.AUTCON.2025.105999.

[12] 李铁军，赵博言，刘今越，等．双机器人的任务分配和协同作业算法研究[J]．控制工程，2025，32（4）：577-585．DOI：10．14107/j．cnki．kzgc．20221064．

Li Tiejun, Zhao Boyan, Liu Jinyue, et al. Research on Task Allocation and Cooperative Operation Algorithm of Dual Robots[J]. Control Engineering of China, 2025, 32(4): 577-585. DOI: 10.14107/j.cnki.kzgc.20221064(in Chinese).

[13] 黄启华，冯子俊，杜玉晓，等．基于 K-means 与 2-Opt 改进的贪心路径优化算法研究[J]．自动化与信息工程，2025，46（2）：9-17．
Huang Qihua, Feng Zijun, Du Yuxiao, et al. Research on Improved Greedy Path Optimization Algorithm Based on K-means and 2-Opt[J]. Automation & Information Engineering, 2025, 46(2): 9-17(in Chinese).

[14] 王玥琪，宋佳智，赵海燕，等．灰狼优化算法的研究与应用综述[J/OL]．软件导刊，1-11[2026-07-07]．https：//link．cnki．net/urlid/42．1671．TP．20260206．1346．004．
Wang Yueqi, Song Jiazhi, Zhao Haiyan, et al. Review on Research and Application of Grey Wolf Optimization Algorithm[J/OL]. Software Guide, 1-11[2026-07-07]. https://link.cnki.net/urlid/42.1671.TP.20260206.1346.004(in Chinese).

[15] Cai Y ,Liu H ,Li M , et al.A Method of Dual-AGV-Ganged Path Planning Based on the Genetic Algorithm[J].Applied Sciences,2024,14(17):7482-7482.DOI:10.3390/APP14177482.

[16] ChengB ,DengL .Vision detection and path planning of mobile robots for rebar binding[J].Journal of Field Robotics,2024,41(6):1864-1886.DOI:10.1002/ROB.22356.

[17] 赵志刚，王元浩，颉俊杰，等．融合"悟构"注意力机制的轻量化钢筋绑扎点检测方法[J/OL]．北京航空航天大学学报，1-15[2026-07-07]．https：//doi．org/10．13700/j．bh．1001-5965．2025．0473．
Zhao Zhigang, Wang Yuanhao, Xie Junjie, et al. Lightweight Detection Method for Rebar Tying Points Integrated with Wugou Attention Mechanism[J/OL]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1-15[2026-07-07]. https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2025.0473(in Chinese).

[18] Tan X ,Xiong L ,Zhang W , et al.Rebar-tying Robot based on machine vision and coverage path planning[J].Robotics and Autonomous Systems,2024,182104826-104826.DOI:10.1016/J.ROBOT.2024.104826.

[19] Feng R ,Jia Y ,Wang T , et al.Research on the System Design and Target Recognition Method of the Rebar-Tying Robot[J].Buildings,2024,14(3):DOI:10.3390/BUILDINGS14030838.

[20] Li C ,Zhang W ,Li F , et al.Vision-Based Detection, Localization, and Optimized Path Planning for Rebar Intersections in Automated Construction[J].Applied Sciences,2025,15(13):7186-7186.DOI:10.3390/APP15137186.

[21] Shitong H ,Mingyang W ,Baijian W , et al.Operation Path Planning for Rail-Type Rebar Binding Robots Based on Improved Ant Colony Algorithm[J].Journal of Computing in Civil Engineering,2025,39(5):DOI:10.1061/JCCEE5.CPENG-6160.

[22] Dong X ,Wan G ,Zeng P , et al.Optimizing Robotic Task Sequencing and Trajectory Planning on the Basis of Deep Reinforcement Learning[J].Biomimetics,2023,9(1):DOI:10.3390/BIOMIMETICS9010010.

[23] 李靖，杨帆．复杂障碍物环境下多任务目标遍历路径规划[J]．现代电子技术，2021，44（7）：162-168．DOI：10．16652/j．issn．1004-373x．2021．07．032．
Li Jing, Yang Fan. Multi-task Target Traversal Path Planning in Environment with Complex Obstacles[J]. Modern Electronic Technology, 2021, 44(7): 162-168. DOI:10.16652/j.issn.1004-373x.2021.07.032(in Chinese).

[24] 李红，张志宾．基于快速模拟退火的组合聚类算法[J]．北京航空航天大学学报，2019，45（8）：1646-1652．DOI：10．13700/j．bh．1001-5965．2018．0647．
Li Hong, Zhang Zhibin. Combined Clustering Algorithm Based on Fast Simulated Annealing[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(8): 1646-1652. DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2018.0647(in Chinese).

[25] 张灿，马志艳，程源，等．融合贪心算法和改进 RRT 的机械臂避障路径规划[J]．机械设计与研究，2024，40（3）：92-96．DOI：10．13952/j．cnki．jofmdr．2024．0099．
Zhang Can, Ma Zhiyan, Cheng Yuan, et al. Obstacle Avoidance Path Planning for Manipulators Integrating Greedy Algorithm and Improved RRT[J]. Machine Design & Research, 2024, 40(3): 92-96. DOI: 10.13952/j.cnki.jofmdr.2024.0099(in Chinese).

[26] 刘聪．改进的灰狼优化算法及其应用研究[D]．哈尔滨：哈尔滨师范大学，2023．
Liu Cong. Research on Improved Grey Wolf Optimization Algorithm and Its Application[D]. Harbin: Harbin Normal University, 2023(in Chinese).

[27] Yang C ,He Z ,Zhao X , et al.A Robot Path Planning Method Based on a Key Point Encoding Genetic Algorithm[J].Algorithms,2026,19(4):285-285.DOI:10.3390/A19040285.