面向紧耦合协作空间的机械臂动态避障路径规划方法

董元发[1,2,3] 常 硕[3] 袁 野[4] 肖宏博[3] 周 彬[1,2,3*] 彭 巍[1,2,3] 安友军[1,2,3]

1.三峡大学机器人与智能系统宜昌市重点实验室,宜昌,443002

2.三峡大学智能制造创新技术中心,宜昌,443002

3.三峡大学机械与动力学院,宜昌,443002

4.湖北清江水电开发有限责任公司,宜昌,443000

摘要:针对紧耦合协作空间中人体障碍包络空间异形、运动轨迹突变大且不确定性高等问题,构建了协作机械臂动态避障路径规划框架,建立了目标偏置、自适应步长、剪枝优化、黏附避让、回归全局路径、局部极值逃逸、目标抵近等全局路径规划与局部避障策略集,提出了融合自适应避障策略切换机制的人工势场-快速扩展随机树(ASAPF-RRT)混合算法并开展协作机械臂动态避障实验。实验结果表明:仿真环境中所提ASAPF-RRT相较于RRT、APF、APF-RRT等方法,在路径规划成功率上分别高出86%、38%、22%,在规划路径长度上分别平均减小42.02%、22.73%、34.53%,在算法运行时间上相较于RRT、APF-RRT分别平均缩短92.89%、90.08%。实机实验中,自适应避障策略切换机制能够高效触发正确的避障策略,避障成功率达到97.9%,可有效支撑紧耦合协作空间下机械臂的连续安全作业。

关键词:紧耦合协作空间;动态避障;人机协作;路径规划;快速扩展随机树;人工势场

中图分类号:TG156

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.11.019 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Dynamic Obstacle Avoidance Path Planning Method for Robotic Arms in Tightly Coupled Collaborative Workspaces

DONG Yuanfa[1,2,3] CHANG Shuo[3] YUAN Ye[4] XIAO Hongbo[3] ZHOU Bin[1,2,3*]
PENG Wei[1,2,3] AN Youjun[1,2,3]

1.Yichang Key Laboratory of Robotics and Intelligent Systems, China Three Gorges University, Yichang, Hubei, 443002

2.Intelligent Manufacturing Innovation Technology Center, China Three Gorges University, Yichang, Hubei, 443002

3.College of Mechanical & Power Engineering, China Three Gorges University, Yichang, Hubei, 443002

4.Hubei Qingjiang Hydropower Development Co., Ltd., Yichang, Hubei, 443000

Abstract: To address the issues of irregular human-obstacle envelope spaces, large motion trajectory mutations, and high uncertainty in tightly coupled collaborative workspaces, a dynamic obstacle avoidance path-planning framework was developed for collaborative robotic arms. A global path planning and local obstacle avoidance strategy set was established, comprising target bias, adaptive step size, pruning optimization, adhesion avoidance, global path regression, local-extremum escape, and target proximity. An adaptive-switching artificial potential field (APF) -rapidly exploring random tree (RRT) algorithm (ASAPF-RRT) was proposed by integrating an adaptive obstacle avoidance strategy-switching mechanism, and dynamic obstacle avoidance experiments were conducted for collaborative robotic arms. The experimental results show that ASAPF-RRT proposed in the simulation environment achieve relative success-rate improvements of 86%, 38%, and 22% over RRT, APF, and APF-RRT, respectively; it reduces path length by averages of 42.02%, 22.73%, and 34.53%, and computational time by averages of 92.89% and 90.08% compared with RRT and APF-RRT, respectively. In physical robot experiments, the adaptively obstacle avoidance strategy switching mechanism efficiently trigger the correct avoidance strategy with a success rate of 97.9%, supporting continuous safe operation of robotic arms in tightly

收稿日期:2025-09-24

基金项目:国家自然科学基金(52075292,52505562);湖北省自然科学基金(2023AFB1116,2025AFB165);湖北省智慧水电技术创新中心开放基金(1525020008)

coupled collaborative workspaces.

Key words: tightly coupled collaborative workspace; dynamic obstacle avoidance; human-machine collaboration; path planning; rapidly exploring random tree; artificial potential field

0　引言

随着机器人技术的发展，协作机器人在高端制造、航空航天、军事装备、医疗健康、社会服务等各个领域逐渐得到了应用[1-2]，人机协作的层级[3]逐步从共同存在、顺序协作向空间交错、响应协作演变，人机作业空间呈现出紧耦合特征。紧耦合协作空间意味着协作机械臂与人的工作空间高度重叠，运行过程中极易因人体动作轨迹的不确定性而产生碰撞风险。现有协作机械臂主要通过内置力位传感器和封装的运动控制算法来限制关节转动速度和力矩大小以降低冲击能量，同时当协作机械臂检测到物理碰撞时，触发协作机械臂的断电保护机制，从而降低碰撞风险和危害。但由于这种安全策略是以发生真实碰撞为触发条件，仍然会对操作人员的生理和心理造成较大的压力，同时，碰撞触发后的急停会增加机械臂本体及其执行机构的机械负荷，不利于设备长期稳定运行，且会影响生产的连续性和效率[4]。因此，如何实现协作机械臂工作过程中实时感知人体障碍并进行动态避障路径规划，是保障紧耦合协作空间下人机安全的基础关键技术[5-6]。

协作机械臂动态避障路径规划是指在不断变化的环境中，根据实时获取的环境信息主动调整策略，寻找一条从起始点到目标点连续且安全无碰撞的路径[7]。现有路径规划方法主要分为全局路径规划和局部路径规划[8]两类，常见的全局路径规划包括概率路线图法(probabilistic roadmap method, PRM)[9]、快速扩展随机树算法(rapidly exploring random tree, RRT)[10]等，常见的局部路径规划方法主要包括蚁群优化算法[11]、A*算法[12]和人工势场法(artificial potential field, APF)[13]等。从方法特性看，RRT算法具有较强的全局探索能力和概率完备性，能够较好地适应高维复杂环境下的路径搜索需求；APF算法具有计算简单、响应速度快和局部避障灵活等优点，更适用于动态障碍物干扰下的实时轨迹调整。然而，单独采用RRT算法难以满足动态环境下路径平滑性与实时性的要求，单独采用APF算法又易陷入局部极值并产生目标不可达问题。因此，融合RRT与APF两种方法，通过RRT算法提供全局可行路径引导，通过APF算法实现局部动态避障修正，是解决紧耦合协作空间中机械臂动态避障路径规划问题的一种合理思路。目前许多学者对RRT和APF两种算法进行了改进，如张振等[14]、WANG等[15]在RRT算法中加入目标偏置策略，通过规定采样区间和方向来限制采样点，增强采样的目标导向性，加快算法的搜索速度；李扬等[16]结合自适应步长策略，利用RRT在扩展过程中收集到的信息来适应树中节点的扩展，使得随机树可以更快地遍历障碍物较少的区域以优化其搜索时间；ZHANG等[17]通过在APF算法陷入局部极值时建立一个虚拟障碍物，并重新定义APF算法的引力公式来解决上述问题，但未验证动态障碍物场景下的可行性；TANG等[18]修改吸引力势场函数以解决碰撞问题、提出距离因子以缓解无法到达目标的问题、引入有效的虚拟目标点以解决局部最小值问题，并提出了动态避障的相对速度法；LIN等[19]提出了一种面向机器人操作任务的三维人工势场路径规划方法，提高了复杂操作环境下的空间避障能力与路径可行性；LEE等[20]提出将APF算法和RRT算法相结合的协作机械臂路径规划方法，验证了两种算法在协作机械臂路径规划方面结合的可行性；FAN等[21]通过将APF算法和RRT算法相融合，在APF算法规划陷入振荡或碰撞的情况下采用改进RRT进行规划，加快了搜索速度，且能够完成复杂环境中的避障路径规划；JI等[22]将改进APF方法与RRT*方法相结合，提出了面向超冗余机械臂系统的运动规划方法，实现了复杂空间中的路径搜索与跟踪控制。

综上所述，现有研究围绕RRT、APF及其融合方法对机械臂路径规划进行了大量探索，在提升路径规划效率和质量等方面取得了一定进展。然而，针对紧耦合协作空间中人体障碍包络空间复杂、运动轨迹突变大且不确定性高、人机作业空间高度重叠等特点，现有方法在自适应避障、局部重规划和连续安全作业保障方面仍存在不足。为此，本文建立了协作机械臂动态避障路径规划框架，改进RRT算法实现高效全局路径规划，提出融合自适应避障策略切换机制的局部路径重规划方法，并通过仿真与实机实验验证了所提方法的有效性。

1　协作机械臂动态避障路径规划框架

在紧耦合协作空间中，存在协作机械臂与人

类操作者共享空间的情形，且共享空间的动态性和不确定性随着人类作为潜在“动态障碍物”的介入而显著增加。此时，如果人类与协作机械臂预定的轨迹发生潜在的交叉或重合，则协作机械臂需要能够及时识别这种风险并对可能导致碰撞的路径进行实时的重规划，以确保安全距离和避免潜在碰撞。

当动态障碍物出现时，快速生成一条新的无碰撞路径是实现任务的关键。面对动态障碍物导致原有路径无效的问题，目前主要有两种策略：一是废弃原先规划好的所有路径，进行路径重规划；二是维持现有轨迹中的有效部分，在此基础上进行必要的路径更新。本研究采用后者，如图1所示，协作机械臂动态避障路径规划整体框架由环境感知模块、规划决策模块和运动控制模块三部分构成。首先，协作机械臂提取任务序列中当前执行任务的起始点坐标，同时通过外置相机阵列实时获取紧耦合协作空间中人与工作环境的相关图像信息，采用人体骨架特征提取和目标识别算法得到人机环境的状态数据，并基于当前人机环境状态完成协作机械臂的全局路径规划。在协作机械臂沿全局规划路径运动过程中，环境感知模块实时分析人机环境状态并执行碰撞检测；当协作机械臂与人体任意部位之间的距离小于安全距离阈值时，碰撞预警信息反馈至规划决策模块。规划决策模块根据当前人机环境状态自适应切换避障策略：当不存在碰撞风险且系统未陷入局部极小值或目标不可达状态时，协作机械臂继续沿全局规划路径运动；当出现碰撞预警或其他异常情况时，规划决策模块选择相应运动策略进行局部路径重规划，生成新的避障路径，并由运动控制模块完成轨迹规划与执行控制，实现黏附避让、回归全局路径、局部极小值逃逸和目标抵近等动作，从而实现机械臂在紧耦合协作空间中高效完成协作任务的同时，还能灵活、动态地避开人体运动障碍，保障人机协作安全。

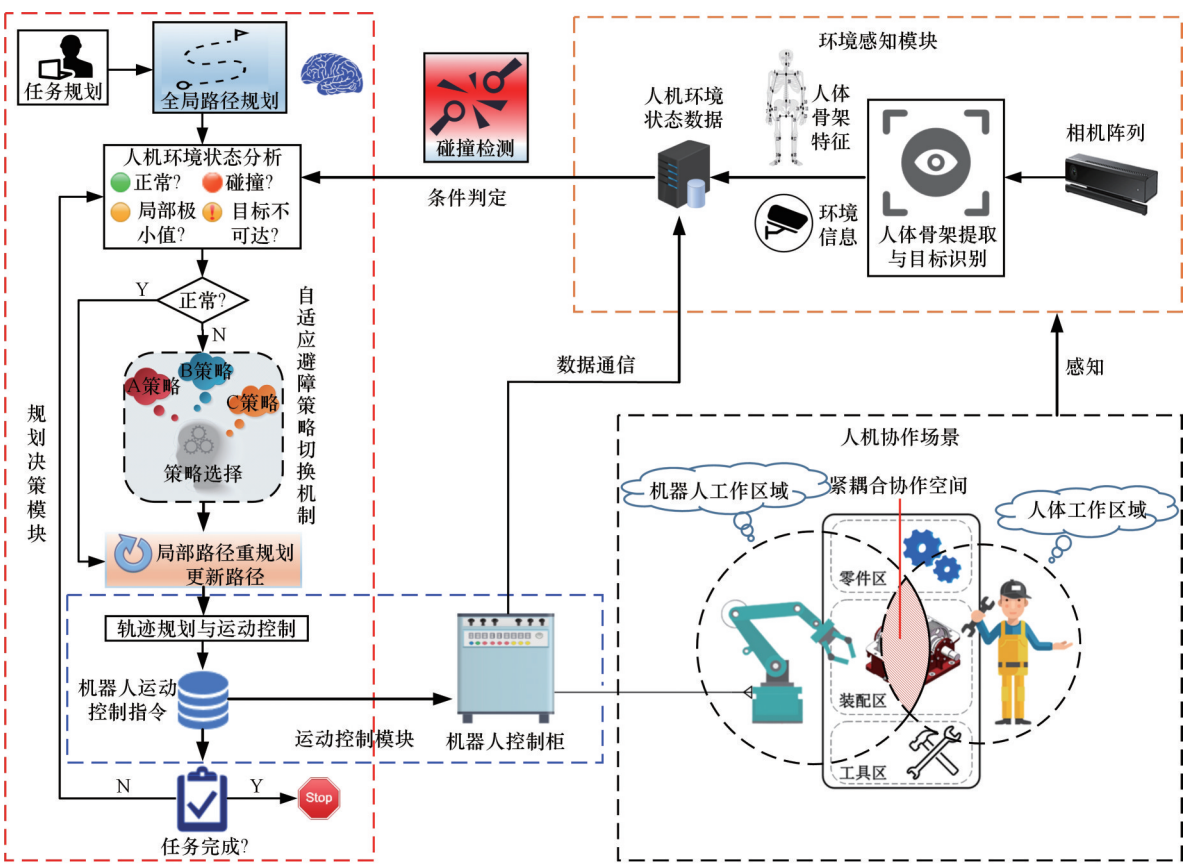


图1 协作机械臂动态避障路径规划整体框架图

Fig.1 Framework of dynamic obstacle-avoidance path planning for collaborative robot arms

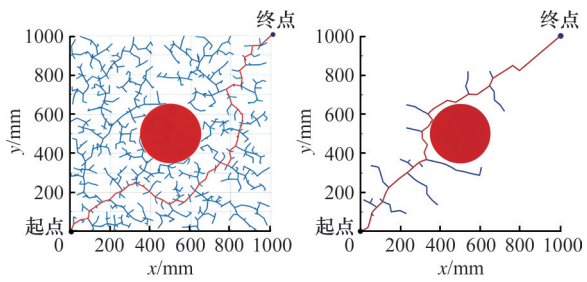
2 基于改进RRT算法的协作机械臂全局路径规划

RRT算法是一种基于随机采样的规划算法，不可避免地存在扩展方式过于盲目、扩展步长过于平均、规划的路径质量不高、算法实时性差等缺点。针对上述缺点，本文引入目标偏置策略以避免生成冗余节点或集中在未探索区域；在路径搜索过程中采用自适应步长的策略，根据搜索进展调整步长，以平衡搜索速度和路径质量；同时，引

入剪枝优化策略对路径进行优化以减少路径的锯齿状特性，提高路径可行性并缩短路径长度。算法具体改进措施描述如下。

2.1　目标偏置策略

RRT算法在整个状态空间χ中随机采样，采样点会出现在机械臂不可达区域χ_{obs}范围内或偏离目标点从而产生无效节点等问题，如图2a所示。针对该问题，引入基于概率的目标偏置策略，通过设定一个概率阈值$\varepsilon_{target}\in(0,1)$，并在0～1之间随机取值$\varepsilon$，当$\varepsilon\geqslant\varepsilon_{target}$时，在机械臂可安全运动区域$\chi_{free}$内随机取点；当$\varepsilon<\varepsilon_{target}$时，在目标点状态空间$G(\chi_{goal})$内随机取点，则树的拓展方向便会向着目标点位置$\chi_{goal}$方向扩展，如图2b所示。该策略使随机树具有一定的目标偏置性，减少了在整个空间内不必要的搜索，改善了随机树节点扩展的盲目性，加快了算法收敛速度。



(a)无目标偏置路径　　(b)加入目标偏置后路径

图2　引入目标偏置策略对比图

Fig.2　Comparison diagram of the goal-bias strategy

2.2　自适应步长策略

传统RRT算法通常是以固定步长沿采样点方向进行节点扩展从而生成新节点，新节点位置的计算公式如下：

$$\chi_{new}=\chi_{nearest}+S_0\cdot\frac{\chi_{rand}-\chi_{nearest}}{\left\|\chi_{rand}-\chi_{nearest}\right\|}\tag{1}$$

式中：χ_{new}为新节点；S_0为固定步长；χ_{rand}为当前采样点；$\chi_{nearest}$为已生成节点中距离χ_{rand}最近的节点。

在复杂环境中，使用固定步长进行探索会导致生成的路径存在不必要的延伸和绕行，如果步长过大则可能会在探索空间中留下大量未被探索的区域，无法在狭窄的区域进行规划，在障碍物分布密集的场景中搜索效率也较低。相反，如果步长过小则可能会在已知区域内重复探索，在障碍物分布稀疏的场景中需要大量的节点扩展，导致搜索冗余度高。针对上述问题，本文对传统RRT算法进行改进，提出自适应步长策略。该策略根据协作机械臂末端执行器附近存在的障碍物数量来自适应调节搜索步长，自适应步长S的计算公式如下：

$$S=2S_0\exp(-wn_{obs})\tag{2}$$

式中：n_{obs}为协作机械臂末端执行器附近存在的障碍物数量；w为障碍物数量对步长的影响系数。

当协作机械臂末端执行器附近没有障碍物时，自适应步长S为$2S_0$；当障碍物数量增加时，步长S逐渐减小。该策略可以在不同情况下更加灵活地调整搜索步长，减少了迭代次数，并提高了算法在复杂环境中的探索能力。

2.3　剪枝优化策略

针对传统RRT算法生成的路径冗余点较多、路径曲折、路径成本较高等问题，本文采用剪枝优化思想对冗余路径进行裁剪，提高了路径平滑性。设改进RRT算法生成的路径关键点序列为$\{\chi_{start},\chi_1,\chi_2,\cdots,\chi_{goal}\}$，以$\chi_{start}$为起点，依次判断当前关键点和后续路径关键点连线是否与障碍物发生碰撞，如果不发生碰撞，则将两个节点之间的路径关键点删除；如果发生碰撞，则连接当前关键点和该节点的前一节点，同时将该节点的前一节点作为新起点，继续遍历该节点后续节点，重复执行上述操作直至到达目标点χ_{goal}。剪枝优化过程如图3所示。

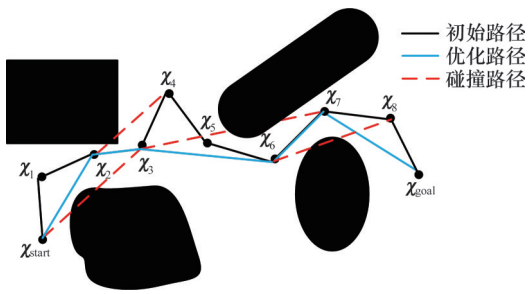


图3　路径优化方法示意图

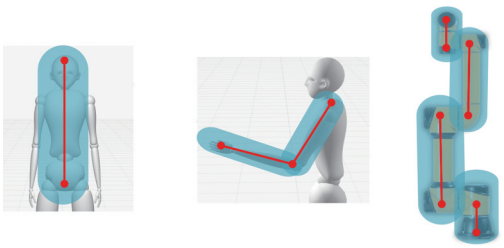
Fig.3　Path optimization method diagram

3　基于最短距离的人机碰撞检测方法

碰撞检测是常用的预警方法之一，通常涉及对物理模型的简化和包络，通过计算包围盒之间的最短距离进行预警。常见的包围盒模型有：轴向包围盒(AABB)、定向包围盒(OBB)和八叉树(octree)等。

本文首先通过相机获取人体骨架信息，身体各部位的包络尺寸可采用人体测量学方法进行实际测量，从而建立骨架特征模型。装配工作台和工器具等一般处于静止状态，可提前获取。然后对人体上半身及协作机械臂模型进行膨胀处理，并采用胶囊体包围盒进行包络如图4所示，设定安全距离阈值，当检测到最短距离小于设定的阈值时，系统触发碰撞预警。

经过处理后，将该问题简化为求解两个胶囊体包围盒之间的最短距离。其中每个胶囊体可以

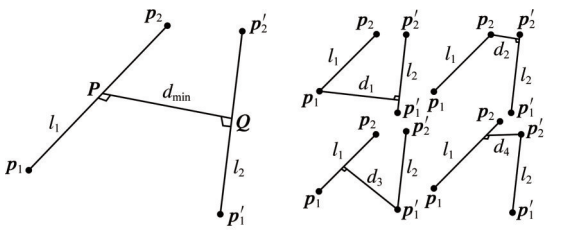


(a)人体上半身包围盒模型　(b)人体手臂包围盒模型　(c)协作机械臂包围盒模型

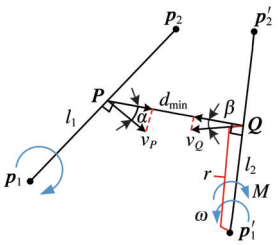
图4　包围盒模型

Fig.4　Bounding-box model

由2个点(分别为胶囊圆柱上、下底面圆心坐标)和半径ρ定义。设胶囊体1的轴线段由端点$\boldsymbol{p}_1$、$\boldsymbol{p}_2$确定,胶囊体2的轴线段由端点$\boldsymbol{p}_1'$、$\boldsymbol{p}_2'$确定,胶囊体1、2的半径分别为ρ_1和ρ_2,则人体与机械臂包围盒之间的最短距离问题可转化为两条空间线段$\boldsymbol{p}_1\boldsymbol{p}_2$与$\boldsymbol{p}_1'\boldsymbol{p}_2'$之间的最短距离求解问题,其原理示意如图5所示。



(a)最短距离示意图　(b)d_1、d_2、d_3、d_4计算示意图



(c)动态安全距离计算示意图

图5　最短距离计算原理示意图

Fig.5　Shortest-distance calculation schematic

在图5a中,$\boldsymbol{p}_1$、$\boldsymbol{p}_2$(胶囊体1)和$\boldsymbol{p}_1'$、$\boldsymbol{p}_2'$(胶囊体2)分别表示胶囊体中间圆柱部分上、下底面两点,连线段分别用l_1和l_2表示,点$\boldsymbol{P}$和点$\boldsymbol{Q}$分别表示两线段上距离最近的点,则有

$$\boldsymbol{P}(\lambda_1)=\boldsymbol{p}_1+\lambda_1\boldsymbol{s}_1 \tag{3}$$

$$\boldsymbol{Q}(\lambda_2)=\boldsymbol{p}_1'+\lambda_2\boldsymbol{s}_2 \tag{4}$$

其中,$\boldsymbol{s}_1=\boldsymbol{p}_2-\boldsymbol{p}_1$,$\boldsymbol{s}_2=\boldsymbol{p}_2'-\boldsymbol{p}_1'$,$0\leqslant\lambda_1,\lambda_2\leqslant1$。则两线段间的最短距离求解问题可以转化为带约束的最优化问题,其表达式如下:

$$\left.\begin{aligned}&\min f(\lambda_1,\lambda_2)=\left\|(\boldsymbol{p}_1+\lambda_1\boldsymbol{s}_1)-(\boldsymbol{p}_1'+\lambda_2\boldsymbol{s}_2)\right\|^2\\&\text{s.t. }0\leqslant\lambda_1,\lambda_2\leqslant1\end{aligned}\right\} \tag{5}$$

由极小值条件:$\dfrac{\partial f}{\partial\lambda_1}=0$,$\dfrac{\partial f}{\partial\lambda_2}=0$,可得

$$\left.\begin{aligned}\lambda_1&=\frac{(\boldsymbol{s}_1\cdot\boldsymbol{s}_2)[(\boldsymbol{p}_1-\boldsymbol{p}_1')\cdot\boldsymbol{s}_2]-\|\boldsymbol{s}_2\|^2[(\boldsymbol{p}_1-\boldsymbol{p}_1')\cdot\boldsymbol{s}_1]}{\|\boldsymbol{s}_1\|^2\cdot\|\boldsymbol{s}_2\|^2-(\boldsymbol{s}_1\cdot\boldsymbol{s}_2)^2}\\\lambda_2&=\frac{(\boldsymbol{s}_1\cdot\boldsymbol{s}_2)[(\boldsymbol{p}_1-\boldsymbol{p}_1')\cdot\boldsymbol{s}_1]-\|\boldsymbol{s}_1\|^2[(\boldsymbol{p}_1-\boldsymbol{p}_1')\cdot\boldsymbol{s}_2]}{\|\boldsymbol{s}_1\|^2\cdot\|\boldsymbol{s}_2\|^2-(\boldsymbol{s}_1\cdot\boldsymbol{s}_2)^2}\end{aligned}\right\} \tag{6}$$

若$\lambda_1,\lambda_2\notin[0,1]$,则分别求出$\boldsymbol{p}_1$到$l_2$的最短距离$d_1$,$\boldsymbol{p}_2$到$l_2$的最短距离$d_2$,$\boldsymbol{p}_1'$到$l_1$的最短距离$d_3$,$\boldsymbol{p}_2'$到$l_1$的最短距离$d_4$,如图5b所示,可得两线段间最短距离$d_{\min}=\min\{d_1,d_2,d_3,d_4\}$。为保障安全,根据机器人协作安全距离标准ISO 15066中定义的第三种协作模式——速度和距离检测(speed and separation monitoring,SSM),设定一个安全距离阈值d_{safe}。由于协作机械臂处于复杂且动态的环境中,故引入动态安全距离可确保突发情况下有足够的时间和空间采取应急措施,即

$$\left.\begin{aligned}M&=I\delta+\tau_f\\t_2&=\omega/\delta\end{aligned}\right\} \tag{7}$$

$$v_Qt_1\cos\beta-v_Pt_1\cos\alpha+\frac{1}{2}v_Qt_2+d_{\text{safe}}=d_{\text{dyn}} \tag{8}$$

其中,M为关节的制动力矩,I为关节的转动惯量,δ为关节的制动角加速度,τ_f为关节运动中的阻力矩(包括摩擦力矩和其他阻尼力矩),t_1为系统反应时间(包括系统检测和应急决策所需时间),t_2为制动时间。如图5c所示,v_P、v_Q分别为点$\boldsymbol{P}$和点$\boldsymbol{Q}$的速度大小,假设点$\boldsymbol{P}$为人体手臂上的点,则v_P可通过相机间接获取人体运动时手部关节的角速度计算得出,$\boldsymbol{Q}$为机械臂上的点,则v_Q可由$v_Q=\omega r$得到,ω为协作机械臂该关节的角速度,r为点$\boldsymbol{p}_1'$到点$\boldsymbol{Q}$的直线距离,α、β分别为v_P、v_Q投影到$d_{\min}$上的夹角,d_{dyn}为动态安全距离,其约束条件满足$d_{\text{dyn}}\geqslant d_{\text{safe}}$。

当$d_{\min}$小于d_{dyn}与两个胶囊体半径之和时,触发碰撞预警,反之则安全。则有

$$\left.\begin{aligned}d_{\min}&>D_{\text{safe}}\quad\text{安全}\\d_{\min}&\leqslant D_{\text{safe}}\quad\text{触发碰撞预警}\end{aligned}\right\} \tag{9}$$

其中,$D_{\text{safe}}=\rho_1+\rho_2+d_{\text{dyn}}$。

4　融合自适应避障策略切换机制的局部路径重规划

传统的避障策略(如紧急停止或减速)虽然能够一定程度上避免碰撞,但存在生产效率下降、动作不连贯、安全性降低和系统稳定性差等缺陷,无法满足协作机械臂在复杂且变化的紧耦合协作空间下安全和高效运行的需求,因此,本文提出一种基于协作机械臂与动态障碍物距离变化及碰撞预警状态的自适应避障策略切换机制。当协作机械臂与动态障碍物距离较大时,协作机械臂会按照改进RRT算法规划的全局路径运动,以保证高效

率地完成任务。当协作机械臂与动态障碍物的距离逐渐减小并触发碰撞预警时，协作机械臂会自主地切换至局部路径规划模式并采用黏附避让策略，利用实时感知的人体和环境信息来规避障碍物。一旦成功避开障碍物，将重新切换为全局路径跟踪模式并采用回归全局路径策略，以确保协作机械臂在避障后能够回到原定的运动轨迹，继续执行任务。同时，在借助势场法进行动态避障规划的过程中，不可避免地会出现局部极值和目标不可达问题，本文针对这两种特殊情况分别设计了局部极值逃逸策略和目标抵近策略，以保证避障运动与任务执行的连续性。

4.1　黏附避让与回归全局路径策略

图6为自适应避障策略切换的局部路径重规划示意图，其中P_{start}、P_{goal}分别为机械臂Robot运动的起点和目标点，v_{obs}为障碍物的运动速度。在协作机械臂运动过程中(图6a)，当前轨迹路径点与障碍物包围盒之间的最短距离大于安全距离阈值(即$d_{min}>D_{safe}$)时，协作机械臂按照改进RRT算法规划的全局路径运行。当协作机械臂运行到预警点时(图6b)，通过视觉传感器检测到协作机械臂与当前最近的动态障碍物之间的距离小于安全距离阈值(即$d_{min}<D_{safe}$)，此时系统将触发碰撞预警并采用黏附避让策略进行路径重规划。在重规划时引入势场法思想寻找避让路径，目标点产生引力F_{att}，动态障碍物对该点产生斥力F_{rep}，将两者组成的合力F_R方向作为改进RRT算法中路径节点扩展的方向，根据设定的步长获取扩展点1。判断获取的扩展点1是否仍然处于障碍物的影响范围之内(图6c)，如果处于范围内则继续采用黏附避让策略，计算该点合力方向并将其作为扩展方向，以设定步长继续获取扩展点2，依次重复扩展，直至获取的扩展点n不处于障碍物的影响范围之内时停止扩展。协作机械臂当前位置与动态障碍物之间的最短距离大于安全距离阈值(即$d_{min}>D_{safe}$)且判断障碍物运动趋势不会继续阻碍机械臂运动(图6d)，此时采用回归全局路径策略退出局部避障规划。由于动态障碍物的变化，初始的安全节点集由3个节点变为4个节点，此时选择安全节点集中距离机械臂最近的节点作为最近点进行路径跟踪，并在最近点的引导下回归到原定的运动轨迹。若此时又出现动态障碍物且触发碰撞预警，则系统将重新采用黏附避让策略进行避障，直到回归原定路径并完成工作任务。

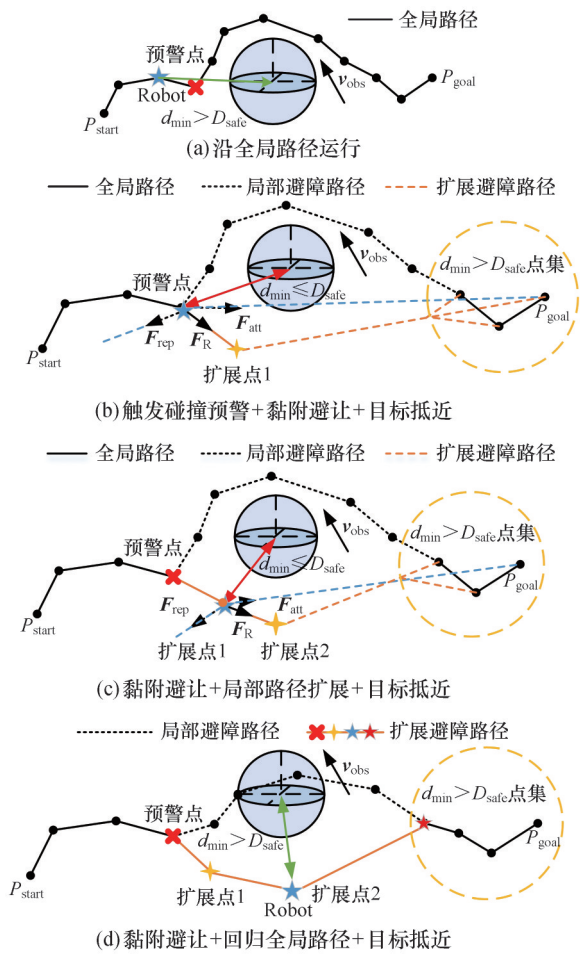
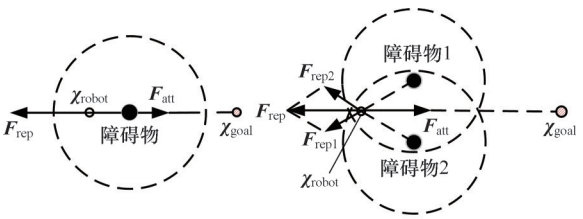


图6　自适应避障策略切换的局部路径重规划示意图

Fig.6　Local path replanning schematic with adaptive obstacle-avoidance strategy switching

4.2　局部极值逃逸策略

局部极值问题是指受障碍物斥力和目标引力的影响，势场合力为零，使得协作机械臂陷入局部极值，无法继续向目标点前进，如图7所示，其中χ_{goal}、χ_{robot}分别为目标点位置和机器人位置。



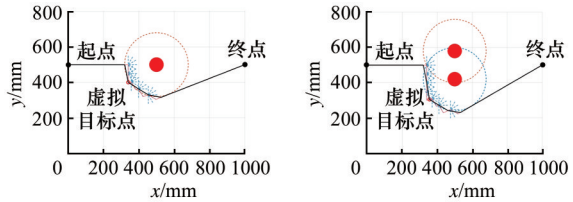
(a)局部极小值场景1　　(b)局部极小值场景2

图7　陷入局部极小值示意图

Fig.7　Local minimum trap schematic

本文采用的局部极小值判定准则如下：①在搜索路径时，若该点所受到的合外力为0，则视其陷入局部极值，如图7a、图7b所示；②若以该点为圆心、2倍搜索步长为半径的圆形区域内的节点总数大于给定阈值φ时，则视该点陷入局部极小值。若满足上述任意一条准则，则判断协作机械臂已陷入局部极值。当协作机械臂陷入局部极小值时，采用局部极值逃逸策略。如图8所示，通过结合安全节点集信息，计算机械臂当前位置和安全

节点集中各个节点之间的距离，取距离最短安全节点为临时虚拟目标点，忽略目标点产生的引力从而跳出局部极小值。



(a)局部极值逃逸场景1　　(b)局部极值逃逸场景2

图8　局部极值逃逸策略示意图

Fig.8　Local minimum escape strategy schematic

4.3　目标抵近策略

在协作机械臂实际工作环境中，目标点或其附近往往会存在一些障碍物，协作机械臂在目标点的引导下靠近障碍物，但越靠近障碍物会导致斥力不断增大甚至超过目标点产生的引力，此时协作机械臂所受合力方向便会偏离目标点，出现目标不可达现象，如图9所示。

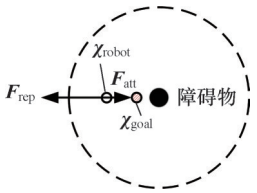


图9　目标不可达示意图

Fig.9　Unreachable goal schematic

本文通过引入安全距离对传统斥力场函数进行改进，改进后的斥力场函数可表示为

$$U_{\mathrm{rep}}(\chi)=\begin{cases}\dfrac{1}{2}\left[K_{\mathrm{rep}}\left(\dfrac{1}{\rho(\chi,\chi_{\mathrm{obs}})}-\dfrac{1}{d_{\mathrm{ir}}}\right)^2+K_{\mathrm{s}}\left(\dfrac{1}{\rho(\chi,\chi_{\mathrm{obs}})}-\dfrac{1}{D_{\mathrm{safe}}}\right)^2\right]\cdot \ln(\rho(\chi,\chi_{\mathrm{goal}})+1) & d_{\min}<D_{\mathrm{safe}}\\ \dfrac{1}{2}K_{\mathrm{rep}}\left(\dfrac{1}{\rho(\chi,\chi_{\mathrm{obs}})}-\dfrac{1}{d_{\mathrm{ir}}}\right)^2\ln(\rho(\chi,\chi_{\mathrm{goal}})+1) & D_{\mathrm{safe}}\leqslant d_{\min}\leqslant d_{\mathrm{ir}}\\ 0 & d_{\min}>d_{\mathrm{ir}}\end{cases} \tag{10}$$

此时，斥力为改进斥力场的负梯度，可表示为

$$F_{\mathrm{rep}}(\chi)=-grad(U_{\mathrm{rep}}(\chi))=\begin{cases}F'_{\mathrm{rep1}}+F'_{\mathrm{rep2}}+F'_{\mathrm{rep3}}+F'_{\mathrm{rep4}} & d_{\min}<D_{\mathrm{safe}}\\ F'_{\mathrm{rep1}}+F'_{\mathrm{rep2}} & D_{\mathrm{safe}}\leqslant d_{\min}\leqslant d_{\mathrm{ir}}\\ 0 & d_{\min}>d_{\mathrm{ir}}\end{cases} \tag{11}$$

$$F'_{\mathrm{rep1}}(\chi)=K_{\mathrm{rep}}\left(\frac{1}{\rho(\chi,\chi_{\mathrm{obs}})}-\frac{1}{d_{\mathrm{ir}}}\right)\frac{1}{\rho^2(\chi,\chi_{\mathrm{obs}})}\cdot \ln(\rho(\chi,\chi_{\mathrm{goal}})+1)\cdot\nabla\rho(\chi,\chi_{\mathrm{obs}}) \tag{12}$$

$$F'_{\mathrm{rep2}}(\chi)=-\frac{1}{2}K_{\mathrm{rep}}\left(\frac{1}{\rho(\chi,\chi_{\mathrm{obs}})}-\frac{1}{d_{\mathrm{ir}}}\right)^2\cdot\frac{1}{\rho(\chi,\chi_{\mathrm{goal}})+1}\cdot\nabla\rho(\chi,\chi_{\mathrm{goal}}) \tag{13}$$

$$F'_{\mathrm{rep3}}(\chi)=\left[K_{\mathrm{rep}}\left(\frac{1}{\rho(\chi,\chi_{\mathrm{obs}})}-\frac{1}{d_{\mathrm{ir}}}\right)+K_{\mathrm{s}}\left(\frac{1}{\rho(\chi,\chi_{\mathrm{obs}})}-\frac{1}{D_{\mathrm{safe}}}\right)\right]\frac{1}{\rho^2(\chi,\chi_{\mathrm{obs}})}\ln(\rho(\chi,\chi_{\mathrm{goal}})+1)\cdot\nabla\rho(\chi,\chi_{\mathrm{obs}}) \tag{14}$$

$$F'_{\mathrm{rep4}}(\chi)=-\frac{1}{2}\left[K_{\mathrm{rep}}\left(\frac{1}{\rho(\chi,\chi_{\mathrm{obs}})}-\frac{1}{d_{\mathrm{ir}}}\right)^2+K_{\mathrm{s}}\left(\frac{1}{\rho(\chi,\chi_{\mathrm{obs}})}-\frac{1}{D_{\mathrm{safe}}}\right)^2\right]\frac{1}{\rho(\chi,\chi_{\mathrm{goal}})+1}\cdot\nabla\rho(\chi,\chi_{\mathrm{goal}}) \tag{15}$$

其中，K_{rep}为斥力影响系数，K_{s}为安全距离影响系数，d_{ir}为障碍物影响距离，$\rho(\chi,\chi_{\mathrm{obs}})$为协作机械臂末端执行器到障碍物$\chi_{\mathrm{obs}}$的距离，$\rho(\chi,\chi_{\mathrm{goal}})$为协作机械臂末端执行器到目标点之间的距离。本文引入安全距离对斥力场函数进行分段，确保在安全距离内产生的斥力比之前更大，从而提高协作机械臂的避障能力，并保证协作机械臂路径规划过程中的安全性。同时，在斥力场函数中增加控制量$\ln(\rho(\chi,\chi_{\mathrm{goal}})+1)$，随着协作机械臂末端执行器与目标点之间的距离越来越小，目标点附近的斥力场便会逐渐减弱。F'_{rep1}、F'_{rep3}分别为斥力沿指向障碍物方向上的斥力系数影响分量和安全距离影响系数分量，F'_{rep2}、F'_{rep4}分别为斥力沿指向目标点方向上的斥力系数影响分量和安全距离影响系数分量。

由式(11)～式(15)可知，改进后的斥力函数中不仅包含斥力方向上的分量还包含引力方向上的分量。如图10所示，当协作机械臂向目标点靠近时，斥力分量逐渐减小，引力分量不断增大，协作机械臂末端执行器便可在斥力的引力分量和目标点引力的共同作用下到达目标点，从而解决目标不可达问题。

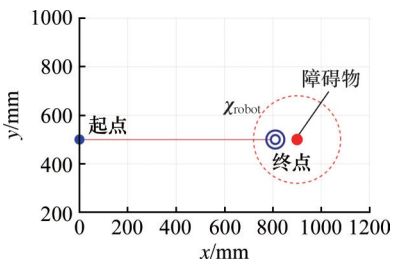


图10　改进斥力场函数解决目标不可达问题示意图

Fig.10　Improved repulsive field function for solving unreachable-goal problem

4.4　融合自适应避障策略切换机制的ASAPF-RRT算法

综合以上避障策略，本文提出了一种融合自适应避障策略切换机制的ASAPF-RRT算法，如图11所示。

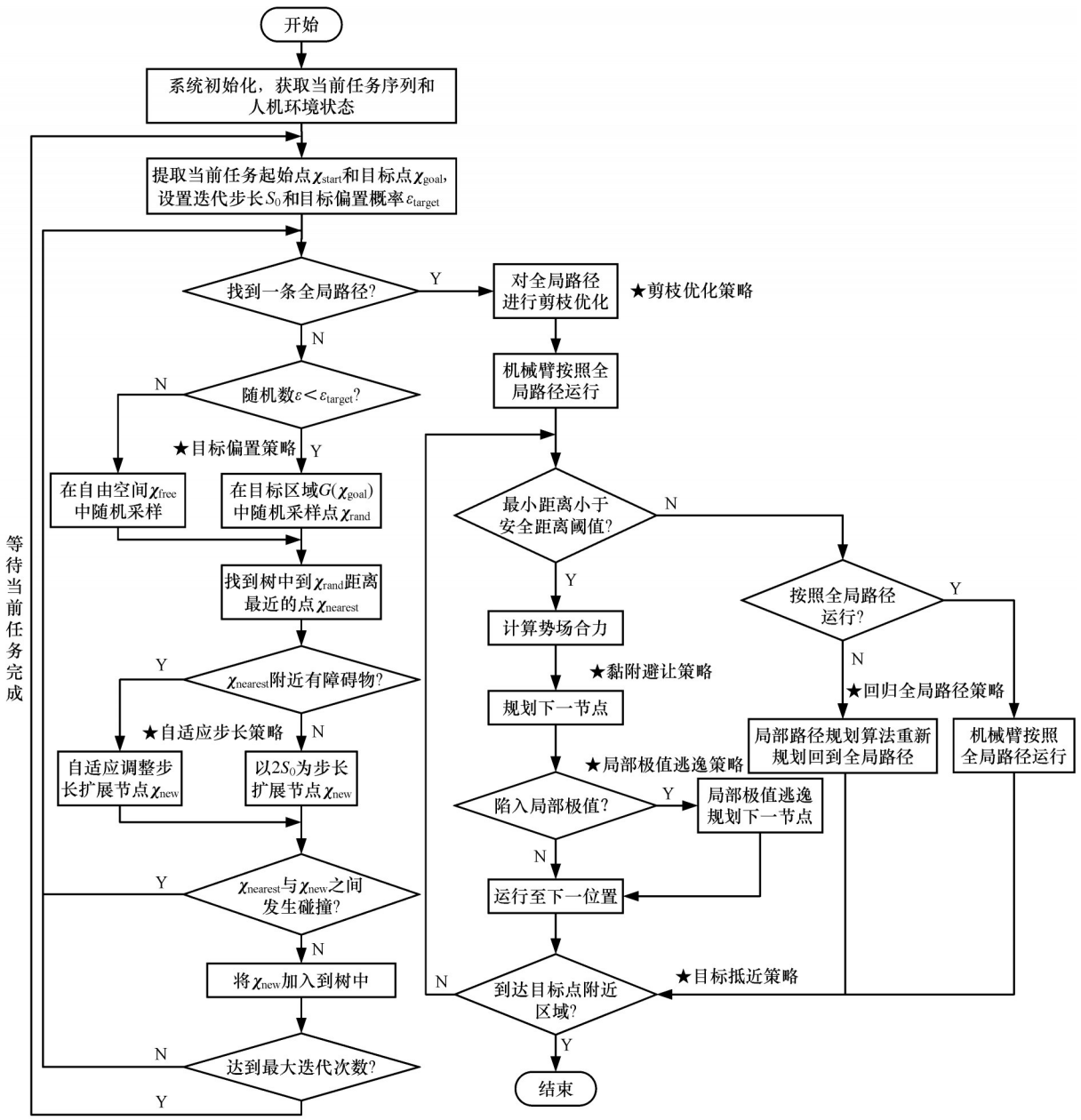


图 11　ASAPF-RRT 算法流程图

Fig.11　ASAPF-RRT algorithm flowchart

5　协作机械臂动态避障实验

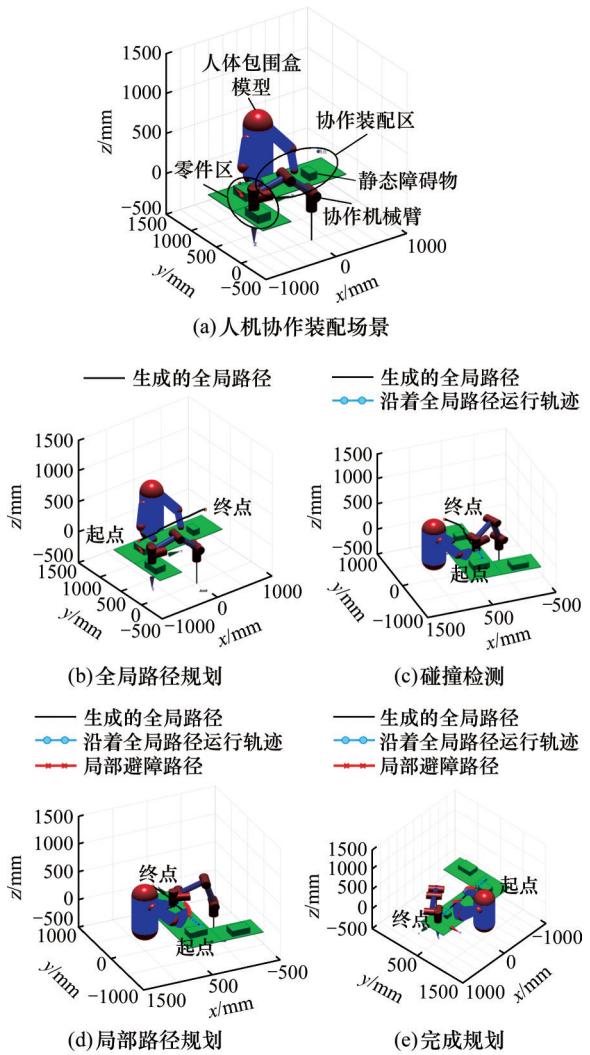
为验证ASAPF-RRT算法的有效性，搭建了一个人机协作装配实验场景，并在此基础上开展仿真与实验验证。仿真实验运行于AMD Ryzen 7 5800X @3.80 GHz八核处理器、32 GB内存的PC，操作系统选用Windows10，仿真软件采用MATLAB 2022b。真实人机协作场景中采用六自由度协作机械臂AUBO-i5机器人作为实验对象。

5.1　人机协作仿真环境下算法验证

为验证ASAPF-RRT算法在仿真紧耦合协作空间中的可行性，构建了人机协作装配虚拟场景开展实验。在该场景中，协作机械臂从零件区域获取工件，并将工件安全地放置于装配区域，以供作业人员进一步装配，这个过程通常被称为pick-place。在pick-place的过程中，协作机械臂极易与正在装配的作业人员的手臂发生干涉，从而产生安全问题，如图12a所示。

在人机协作装配仿真场景采用ASAPF-RRT算法进行动态避障路径规划，具体过程如下：在全局路径规划阶段，系统采用改进RRT算法规划生成一条从起始点(−662.725，507.496，190.215) mm到目标终点(617.932，601.215，210.369)mm无碰撞的全局路径，如图12b黑色曲线所示。协作机械臂沿着全局路径运行，如图

12c蓝色空心圆曲线所示。当检测到人体手臂与协作机械臂之间的距离小于所设定的安全距离时，触发局部避障并根据情况综合采用黏附避让、局部极值逃逸、目标抵近等策略规划生成新路径，如图12d所示。当协作机械臂成功避开人体手臂后采用回归全局路径策略规划生成新路径。当局部路径和全局路径重合后，协作机械臂按照全局路径运行并到达目标位置完成pick-place工件任务，如图12e所示。



(a)人机协作装配场景　(b)全局路径规划　(c)碰撞检测　(d)局部路径规划　(e)完成规划

图12　融合改进算法人机协作装配场景动态避障过程图

Fig.12　Diagram of dynamic obstacle-avoidance process in human-robot collaborative assembly with the integrated improved algorithm

为进一步检验自适应避障策略切换机制在不同场景中的鲁棒性，同样以pick-place任务场景为例，在人体手臂运动轨迹中加入随机性，以模拟不同工人因捡拾与装配零件速度差异所呈现的碰撞场景。定义人体手臂末端从初始位置到目标零件的初始离散轨迹点集合为

$$P=\{P_1,P_2,P_3,\cdots,P_n\} \tag{16}$$

在初始运动点集中加入随机扰动量以模拟不同体型工人手臂轨迹的突变，可表示为

$$P'=\{P_1',P_2',P_3',\cdots,P_n'\} \tag{17}$$

$$P_i'=P_i+rand(r_i,\theta_i) \tag{18}$$

其中，$r_i\in[0,d_{\min}]$，$\theta_i\in[0,2\pi]$，$rand(r_i,\theta_i)$表示第i个路径点在垂直于行进路径、偏转角度为θ_i的方向上产生距离r_i的随机扰动。

总位移及各段位移的计算公式如下：

$$\left.\begin{aligned}S_{\text{total}}&=\sum_{i=1}^{n-1}S_i\\S_i&=\|P_{i+1}'-P_i'\|\end{aligned}\right\} \tag{19}$$

第i段行程运动平均所需的时间t_i可表示为

$$t_i=\frac{S_i}{v_i}\qquad i=1,2,\cdots,n-1 \tag{20}$$

其中，v_i为第i段行程中人体的运动速度。在每段行程中通过引入随机数来模拟人体动作速度的随机性，即

$$v_{\text{rand},i}=v_i\times rand_i\qquad rand_i\in[0.5,1.5] \tag{21}$$

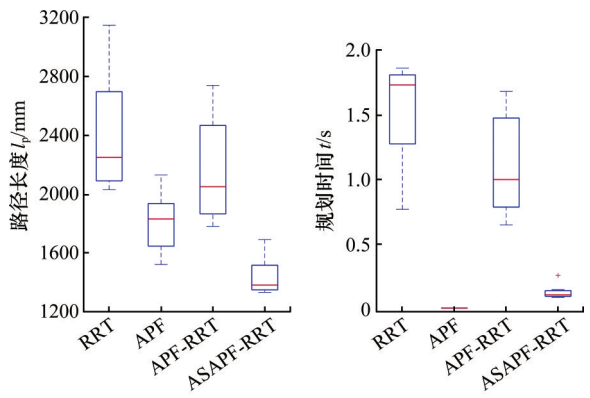
其中，$v_{\text{rand},i}$表示第i段行程人体的随机运动速度，$rand_i$表示第i段行程的随机因子。在上述构建的仿真场景中，分别采用RRT、APF、APF-RRT、ASAPF-RRT算法进行避障运动规划，50组实验数据如表2所示。

表2　不同算法在仿真场景中的实验数据

Tab.2　Experimental data of different algorithms in simulation scenarios

算法名称	平均路径长度/mm	平均耗时/s	规划成功率/%
RRT	2416.93	1.5250	14
APF	1813.55	0.0035	62
APF-RRT	2140.30	1.0923	78
ASAPF-RRT	1401.26	0.1084	100

图13为路径长度和规划时间的箱线对比图，图14为路径规划成功率的对比图。可以看出，相较于RRT、APF、APF-RRT，仿真实验场景中



(a)路径长度对比　(b)规划时间对比

图13　4种方法规划时间及路径长度箱线图

Fig.13　Boxplots of planning time and path length for four methods

ASAPF-RRT在规划路径长度上分别平均减小42.02%、22.73%、34.53%，在路径规划成功率上分别提高86%、38%、22%；在规划时间上，因结合了RRT算法的路径遍历机制，ASAPF-RRT的规划耗时相较于RRT、APF-RRT平均缩短92.89%、90.08%，较APF没有明显改进，但108.4 ms的响应时间在实际场景中依然具有较好的实时性。

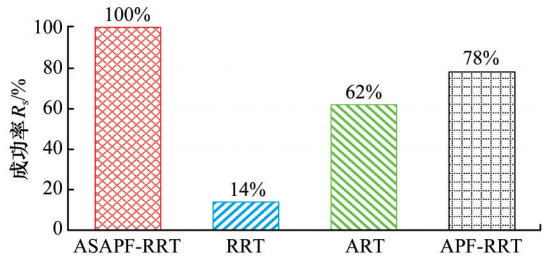


图14　4种方法路径规划成功率

Fig.14　Success rate of four path planning methods

面对动态障碍物时，由于RRT算法是一次性运行且几乎枚举了所有空间可行域，因此导致算法运行效率低且无法应对动态障碍场景，路径规划成功率低。APF算法避障策略简单，具有较短的局部路径规划时间，但是局限性也较为明显。当机械臂处于吸引力和斥力平衡时，APF算法易陷入局部极值导致振荡或目标不可达，紧耦合协作空间下路径规划成功率不高。APF-RRT算法将RRT算法和APF算法相结合，在RRT算法生成的全局路径中，每两个路径点之间均采用APF算法进行局部动态避障，虽然弥补了RRT算法无法应对动态障碍的缺点，且提高了路径规划的成功率，但是以RRT算法生成的全局路径为基础，仍然具有规划路径冗长和规划时间长的不足。本文所提ASAPF-RTT算法采用自适应避障策略切换机制，具备规划路径短、响应快、避障成功率高等优点，具有在紧耦合协作空间中快速生成高质量路径的能力。

5.2　实例验证

图15展示了协作机械臂运动过程中的动态避障行为。图15a所示为实验室模拟人机协作装配场景，其中AUBO-i5协作机械臂与操作员共同完成某减速器的装配工作，需承担部分零部件和工具的pick-place任务，期间需要频繁地经过操作员装配作业区域，极易与人体手臂发生碰撞。笔者采用Kinect V2相机实时获取人体骨架数据，并与机械臂骨架数据进行坐标对齐与碰撞检查，基于MATLAB 2022b和AUBO-i5自带SDK开发了紧耦合协作空间机械臂动态避障运动控制原型系统。该系统采用所提ASAPF-RRT算法实时规划机械臂运行路径和轨迹，图15b展示了人员干扰障碍场景，反映了作业人员参与装配过程中对机械臂运动形成干扰的典型工况。

如图15c所示，在整个任务过程中协作机械臂从起始位置抓取轴承1并运送到目标位置完成放置；由图15 d可见，作业人员需要伸手依次抓取齿轮、套筒、轴承2、轴承3和透盖进行装配，装配的正常顺序为齿轮(A)→套筒(B)→轴承2(C)→轴承3(D)→透盖(E)。任务过程如图15e所示。由于不同操作工人存在体形、装配习惯和速度差异等，故会影响协作机械臂的工作效率和避障性能，本实验邀请了5名工人参与测试，每名工人进行10组装配任务。

表3所示为不同的局部动态避障策略(如黏附避让与回归全局策略、局部极值逃逸策略、目标抵近策略)在不同场景中的触发次数。在大部分任务中，协作机械臂能够根据不同的情景灵活调用不同的策略来应对环境变化，展现出较强的自主避障能力。但也存在例外情况(如路径规划陷入局部极值、延迟响应问题、骨架识别被遮挡等)，这些问题导致实际避障次数与理论避障次数存在偏差，但偏差幅度较小，总体结果基本一致，协作机械臂能够高效触发正确的避障策略，避障成功率达到96.9%。

根据工人与协作机械臂间的运动方向、空间位置以及操作目的等因素，进一步地将人机协作过程中的典型动态交互场景分为以下五类：静态拦阻(工人整体或部分遮挡协作机械臂的运动路径)、相向遭遇(工人与协作机械臂相向运动相遇)、同向追逐(工人与协作机械臂同向运动追逐相遇)、交叉相遇(工人与协作机械臂以一定夹角运动相遇)、目标区域重叠(工人与协作机械臂在重叠的目标区域同时作业)，如图16所示。

如图17所示，对不同避障策略在全局静态场景与五种典型动态交互场景下的调用次数进行统计分析。在全局静态场景中，目标偏置策略、自适应步长策略、剪枝优化策略等始终被用于全局路径规划中。在所有动态交互场景中，黏附避让与回归全局策略的触发频率普遍较高。静态拦阻场景中，因工人的操作对协作机械臂的路径形成较大范围的干涉或遮挡时，协作机械臂容易陷入局部极值，采取局部极值逃逸策略使协作机械臂能及时跳出局部极值，因此局部极值逃逸策略在该场景下的触发次数明显高于其他场景。相向遭遇场景中，由于相向时更容易直接通过简单的黏附避让来解决冲突，因此黏附避让与回归全局策略



图15 人机协作装配场景协作机械臂动态避障过程

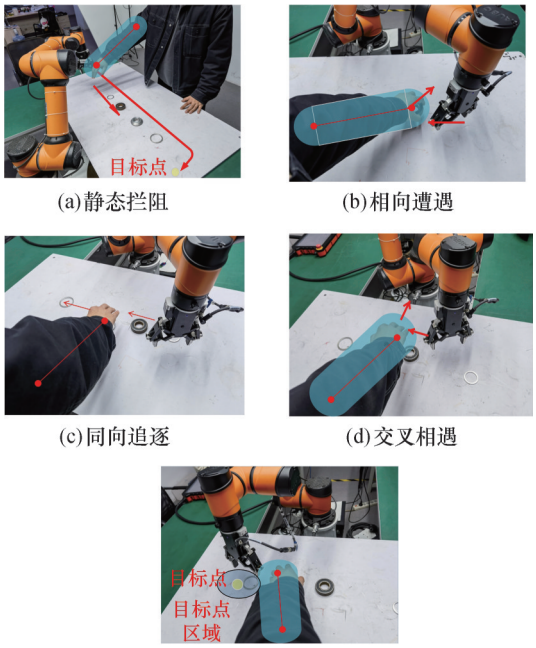
Fig.15 Dynamic obstacle avoidance process of collaborative robot arm in human-machine cooperative assembly scenario

的使用频次最高，触发极值逃逸的情况相对少。此外，同向追逐场景和交叉相遇场景中，工人与协作机械臂运动方向一致或呈一定夹角交叉相遇，发生冲突的风险相对较低，主要依赖黏附避让与回归全局策略来临时调整。目标区域重叠场景中，工人与协作机械臂共同作业，导致协作机械臂无法到达目标点，因此目标抵近策略在该场景下的触发次数最高。从这些数据中可以看出，所提ASAPF-RRT算法将目标偏置策略、自适应步长策略、剪枝优化策略作为全局路径优化的基础策

表 3　工人装配情况与协作机械臂避障性能分析

Tab.3　Analysis of worker assembly conditions and collaborative robot arm obstacle avoidance performance

作业人员	实验次数	黏附避让与回归全局路径策略触发次数	局部极值逃逸策略触发次数	目标抵近策略触发次数	理论避障次数	成功避障次数	说明
工人 1	10	45	7	5	45	44	1 次因骨架信息短时丢失，未触发避障；1 次因障碍物在机械臂后方同向运动，导致二次避障
工人 2	10	37	2	3	38	37	目标附近障碍干扰，直接触发目标抵近策略，终点未触发避障
工人 3	10	37	6	3	38	36	1 次因避障规划延迟响应导致失败；1 次因遮挡导致骨架提取失败，未触发避障
工人 4	10	36	0	4	35	34	1 次因规划延迟导致避障失败；1 次因骨架识别异常导致产生无效避障
工人 5	10	42	5	5	43	42	1 次因遮挡导致骨架提取失败，未触发避障
合计	50	197	20	20	199	193	



(a)静态拦阻　(b)相向遭遇　(c)同向追逐　(d)交叉相遇　(e)目标区域重叠

图 16　典型动态交互场景分类

Fig.16　Classification of typical dynamic interaction scenario

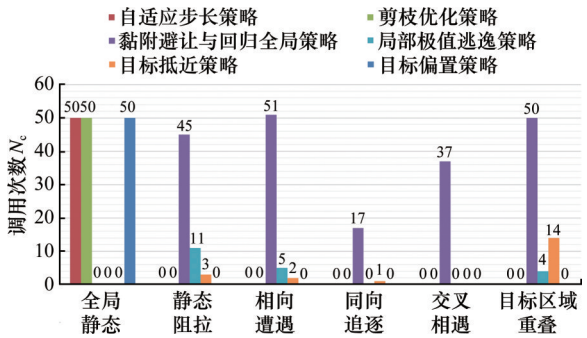


图 17　不同的避障策略在六种场景下的调用次数

Fig.17　Number of calls to different obstacle-avoidance strategies in six scenarios

略，将黏附避让与回归全局策略作为动态避障核心策略，使协作机械臂在实际装配过程中能够有效地在复杂环境中进行动态调整，避开障碍物的同时快速回归至全局路径，从而提高整体装配效率和安全性；同时将局部极值逃逸策略和目标抵近策略作为动态避障辅助策略，用于解决局部路径规划中的局部极值和目标不可达问题，增强了算法在多样化装配场景中的适配能力。通过基础策略、核心策略和辅助策略的有机结合，ASAPF-RRT 算法可在实际装配过程中实现安全、灵活、高效的人机协同装配。

6　结语

不同于传统机械臂运动规划方法，紧耦合协作空间中人机运动空间交错重叠度高，协作机械臂运动规划面临人体障碍包络空间异形、运动轨迹突变大且不确定性高等挑战，单一避障策略往往难以适应。针对现有避障路径规划方法运行效率低，难以适应高动态、紧耦合协作空间，建立了协作机械臂动态避障路径规划框架，融合目标偏置、自适应步长、剪枝优化等策略改进了传统 RRT 算法，实现了协作机械臂高效全局路径规划；建立了黏附避让、回归全局路径、局部极值逃逸、目标抵近等避障策略，提出了融合自适应避障策略切换机制的 ASAPF-RRT 算法并开展了协作机械臂动态避障实验。实验结果表明：所提 ASAPF-RRT 算法可在紧耦合协作空间根据碰撞场景的不同动态调整避障策略，且在避障规划路径长度和算法效率方面具有显著优势，即便受到局部极值、骨架识别遮挡及环境干扰等因素的影响，避障成功率依然可达 97.9%，能够有效支撑紧耦合协作空间下机械臂的连续安全作业。未来将考虑融入人体运动轨迹预测并优化预测的时效和精度，以进一步提高协作机械臂在紧耦合协作空间下避障响应的前瞻性和柔顺性。

参考文献：

[1]　梁海平，卢政锋，卢耀安，等. 面向稳定物理人机交互的变导纳控制策略[J/OL]. 中国机械工程，1-8[2026-09-15].

https://link.cnki.net/urlid/42.1294.TH.20260709.1645.002.
LIANG Haiping, LU Zhengfeng, LU Yaoan, et al. Towards Stable Physical Human-robot Interaction by a Variable Admittance Control Strategy[J]. China Mechanical Engineering,1-8[2026-09-15]. https://link.cnki.net/urlid/42.1294.TH.20260709.1645.002

[2] 杨赓，周慧颖，王柏村. 数字孪生驱动的智能人机协作：理论、技术与应用[J]. 机械工程学报，2022，58(18)：279-291.
YANG Geng, ZHOU Huiying, WANG Baicun. Digital Twin-driven Smart Human-machine Collaboration: Theory, Enabling Technologies and Applications[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(18): 279-291.

[3] BDIWI M, PFEIFER M, STERZING A. A New Strategy for Ensuring Human Safety during Various Levels of Interaction with Industrial Robots[J]. CIRP Annals, 2017, 66(1): 453-456.

[4] VÉRONNEAU C, DENIS J, LHOMMEAU P, et al. Modular Magnetorheological Actuator with High Torque Density and Transparency for the Collaborative Robot Industry[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2023, 8(2): 896-903.

[5] 贾计东，张明路. 人机安全交互技术研究进展及发展趋势[J]. 机械工程学报，2020，56(3)：16-30.
JIA Jidong, ZHANG Minglu. Research Progress and Development Trend of the Safety of Human-Robot Interaction Technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(3): 16-30.

[6] MERCKAERT K, CONVENS B, NICOTRA M M, et al. Real-time Constraint-based Planning and Control of Robotic Manipulators for Safe Human-Robot Collaboration [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2024, 87: 102711.

[7] 郑湃，李成熙，殷悦，等. 增强现实辅助的互认知人机安全交互系统[J]. 机械工程学报，2023，59(6)：173-184.
ZHENG Pai, LI Chengxi, YIN Yue, et al. Augmented Reality-assisted Mutual Cognitive System for Human-Robot Interaction Safety Concerns[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(6): 173-184.

[8] LIU Lixing, WANG Xu, YANG Xin, et al. Path Planning Techniques for Mobile Robots: Review and Prospect [J]. Expert Systems with Applications, 2023, 227: 120254.

[9] YANG Run, LI Jingru, JIA Zhikun, et al. EPL-PRM: Equipotential Line Sampling Strategy for Probabilistic Roadmap Planners in Narrow Passages[J]. Biomimetic Intelligence and Robotics, 2023, 3(3): 100112.

[10] 陈波芝，陆亮，雷新宇，等. 基于改进快速扩展随机树算法的双机械臂协同避障规划方法[J]. 中国机械工程，2018，29(10)：1220-1226.
CHEN Bozhi, LU Liang, LEI Xinyu, et al. Simultaneous Obstacle-avoidance Motion Planning Approach for Dual Arm Robots Based on Improved RRT Algorithm[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(10): 1220-1226.

[11] 钱森，钱鹏飞，王春航，等. 多机协作吊装机器人动力学分析与路径规划[J]. 机械工程学报，2022，58(7)：20-31.
QIAN Sen, QIAN Pengfei, WANG Chunhang, et al. Dynamics and Path Planning of Multi-crane Cooperative Lifting Robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(7): 20-31.

[12] LI Hui, CHU Zhaoyi, FANG Yuan, et al. Source-seeking Multi-robot Team Simulator as Container of Nature-inspired Metaheuristic Algorithms and Astar Algorithm[J]. Expert Systems with Applications, 2023, 233: 120932.

[13] ALPARSLAN O, CETIN O. Real-time Indoor Path Planning Using Object Detection for Autonomous Flying Robots [J]. Intelligent Automation & Soft Computing, 2023, 36(3): 3355-3370.

[14] 张振，李新宇，董昊臻，等. 基于约束采样RRT的机械臂运动规划[J]. 计算机集成制造系统，2022，28(6)：1616-1626.
ZHANG Zhen, LI Xinyu, DONG Haozhen, et al. Constrained Sampling Method Based RRT Algorithm for Manipulator Motion Planning[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022, 28(6): 1616-1626.

[15] WANG Yan, JIANG Wensong, LUO Zai, et al. Path Planning of a 6-DOF Measuring Robot with a Direction Guidance RRT Method[J]. Expert Systems with Applications, 2024, 238: 122057.

[16] 李扬，张蕾，李鹏飞，等. 基于改进RRT结合B样条的机械臂运动规划方法[J]. 计算机集成制造系统，2023，29(1)：254-263.
LI Yang, ZHANG Lei, LI Pengfei, et al. Motion Planning Method of Manipulator Based on Improved RRT Combined with B-spline[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2023, 29(1): 254-263.

[17] ZHANG Wei, XU Guojun, SONG Yan, et al. An Obstacle Avoidance Strategy for Complex Obstacles Based on Artificial Potential Field Method[J]. Journal of Field Robotics, 2023, 40(5): 1231-1244.

[18] TANG Xinxing, PEI Hongxin, ZHANG Deyong. Path Planning for a Wheel-foot Hybrid Parallel-leg Walking Robot[J]. Sensors, 2024, 24(7): 2178.

[19] LIN H I, SHODIQ M A F, HSIEH M F. Robot Path Planning Based on Three-dimensional Artificial Potential Field [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2025, 144: 110127.

[20] LEE C C, SONG K T. Path Re-planning Design of a Cobot in a Dynamic Environment Based on Current Obstacle Configuration[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2023, 8(3): 1183-1190.

[21] FAN Qigao, CUI Guangming, ZHAO Zhengqing, et al. Obstacle Avoidance for Microrobots in Simulated Vascular Environment Based on Combined Path Planning[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2022, 7(4): 9794-9801.

[22] JI H, WANG C, WANG C, et al. Motion Planning of Hyper-redundant Manipulator Systems: Combining Path Following and Improved APF-RRT* Path Finding [J]. Complex & Intelligent Systems, 2025, 111:441.

（编辑　胡佳慧）

作者简介：董元发，男，1988年生，教授、博士研究生导师。研究方向为智能装备系统创新设计与高效运维。E-mail：dongyf@ctgu.edu.cn。**周　彬***（通信作者），男，1988年生，博士、讲师。研究方向为人车共驾、车辆智能控制。E-mail：zhoubin@ctgu.edu.cn。

本文引用格式：

董元发，常硕，袁野，等. 面向紧耦合协作空间的机械臂动态避障路径规划方法[J]. 中国机械工程，2026，37(11)：2864-2876.

DONG Yuanfa, CHANG Shuo, YUAN Ye, et al. Dynamic Obstacle Avoidance Path Planning Method for Robotic Arms in Tightly Coupled Collaborative Workspaces[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(11): 2864-2876.