

基于多源排斥力融合的人工势场路径规划 局部最小陷阱规避算法及实现

骆云飞¹ 史 记² 王婷婷¹ 陈 微¹ 高德峻¹
LUO Yunfei SHI Ji WANG Tingting CHEN Wei GAO Dejun

摘 要

随着路径规划在不同领域中需求不断增长,人工势场法(artificial potential field, APF)因计算简单、规划时间短、易于底层控制、动态环境响应快速并能及时调整路径等优点,在快速求解多障碍物情景和实时避障的问题上有较强发挥潜力。但在不同复杂场景下普遍具有障碍密集、边界复杂以及局部凹陷结构显著等问题,使得传统人工势场法在实际路径规划中容易出现振荡、不平滑以及陷入局部最小值的现象。为解决上述问题,文章提出一种改进的多源融合人工势场路径规划方法。主要包括多源排斥力建模与融合机制、局部最小值在线检测机制、虚拟目标引导的脱困策略。此外,设计了自适应步长调节策略以及基于滑动窗口的路径平滑模块,以提高路径的连续性与安全性。基于真实地形数据构建高精度障碍物模型,并与一般改进 APF 方法进行实验对比。实验结果表明,所提方法能可靠脱离陷阱,减少路径振荡,避障性能优良,在复杂地形环境中的规划成功率及路径平滑性都得到极大提高,同时也给出了切实可行、高效稳健的路径规划方案。

关键词

人工势场法; 路径规划; 避障

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.07.020

0 引言

随着电子技术、通信系统、导航控制等领域飞速发展,路径规划算法作为实现自主决策与智能控制的核心技术,已在各类场景中得到成熟且广泛的应用。但早期的路径规划主要是基于人工制定航线或静态地图。因此无法满足复杂动态环境下对实时性、自适应性的严格要求。从 21 世纪初开始,全球信息化、智能化水平大幅提升。卫星定位(GNSS)、5G 通信及人工智能技术都取得突破性进展,路径规划的应用领域也从军事任务(如边境巡逻、目标跟踪)^[1-3]扩展至农业巡检^[4]、环境监测^[5]、物流配送^[6]、航拍摄影^[7]、灾害救援^[8]等民用领域,并在工程建设、基础设施布局优化、交通运输线路规划等领域都产生了极其重要的工程价值。更重要的是,智能机器人、自主车辆及工程线路设计中所要解决的种种问题。本质上都可以抽象为在复杂约束环境中寻找一条安全、可行、代价最优的路径。

路径规划的根本目的在于在已知或部分已知的环境中为移动体或工程线路求取从起点到目标点的最优或次优路径,

即要避开静态、动态障碍,同时在安全约束下使能耗最小、路径最短,且路径平滑、可执行。但路径规划问题本身的复杂性源于若干因素:障碍物分布的非线性性、环境动态性、空间高维性、地形复杂性以及工程建设中所涉地貌、地质、施工诸种约束^[9]。因此,设计路径规划算法时必须统筹考虑计算效率、实时性及全局最优性,方能自然、合理地适应不同场景的决策需求。更重要的是,在电力线路选线、管廊建设、道路选线等工程应用中,规划路径必然要满足法规、地质条件、经济成本诸种综合约束,故而路径规划问题绝不只是控制与导航问题,实质上是一个典型的多目标、多约束的优化决策问题。

1 技术背景

1.1 路径规划技术发展

从方法论的角度可以把路径规划算法划分为全局规划与局部规划两类:全局路径规划算法(如 A*、Dijkstra 等)利用完整的环境信息求解静态或结构化场景下的理论最优路径^[10],但其计算复杂度较高,对动态环境的适应性较差。局部路径规划算法(如 RRT^[11]、DWA、人工势场法 APF 等)其以实时传感器信息为基础做在线路径调整,因而灵活性强、鲁棒性好,适合处理不确定性大、动态障碍较多的场景。为应对

1. 北京洛斯塔科技发展有限公司 北京 100044
2. 武汉大学遥感信息工程学院 湖北武汉 430079
[基金项目] 国家电网有限公司科技项目(SGTYHT/23-JS-001)

复杂环境,研究者们还提出了蚁群算法^[12]、粒子群算法^[13]、遗传算法和强化学习等智能优化方法来增强全局搜索能力。不过,也必须客观地看到,上述方法普遍存在计算开销大、收敛速度慢、参数调参困难诸种问题^[14],故在实时决策任务及工程应用中尚有改进空间。

人工势场法(APF)在各类算法中由于计算简洁、实现容易、规划速度极快,又极自然地适合与底层控制系统集成,因此成为实时路径规划及避障问题中长期被关注的研究热点。其基本思想为把目标点当作吸引源,把障碍物当作排斥源,用合成势场来引导路径生成。更重要的是,APF对动态障碍及局部环境变化有极好的适应性,故很适合工程施工规划、地形约束环境下的线路布设以及复杂环境中的自主导航任务。但传统APF也存在局部极小值、目标不可达、路径振荡诸种经典问题,限制了其在复杂地形、多障碍环境中的应用。因此,近年来学界对此进行了较为系统、有层次的改进:引入自适应势场模型、虚拟目标机制、全局引导策略以及与A*、RRT等算法融合的方法,切实提高了其鲁棒性及全局搜索能力^[9-14]。也正因如此,智能系统在动态环境下的自主决策能力得到了长足提升,而工程建设中地形约束路径规划也因此获得了有力的新理论、新工具。

1.2 APF 算法原理

人工势场法(artificial potential field, APF)是由Khatib^[15]于1986年首次提出,其基本思想是将路径规划问题抽象为在虚拟力场中的受力运动模型:目标点产生吸引力,障碍物产生排斥力,其路径规划即生成合力作用下的运动轨迹。借鉴了物理学中电荷、引力场的概念,将实际环境抽象为若干力场叠加而成的导航场。

在基本模型中,势场函数由吸引势场与排斥势场构成:

$$F_{\text{total}} = -\nabla(U_{\text{att}} + U_{\text{rep}}) \quad (1)$$

式中: F_{total} 表示规划的路径当前所受的合力方向; U_{att} 表示目标点产生的吸引势能,作用是引导路径靠近目标; U_{rep} 表示障碍物产生的排斥势能,作用是避免碰撞。

吸引势场常见定义为:

$$U_{\text{att}}(x) = \frac{1}{2} k_{\text{att}} \|x - x_{\text{goal}}\|^2 \quad (2)$$

$$F_{\text{att}} = -k_{\text{att}}(x - x_{\text{goal}}) \quad (3)$$

即:吸引力大小与规划路径的当前位置到目标点的欧氏距离成正比。

排斥势场则通常根据规划路径与障碍物之间的距离函数构造:

$$U_{\text{rep}}(x) = \begin{cases} \frac{1}{2} k_{\text{rep}} \left(\frac{1}{d(x)} - \frac{1}{d_0} \right)^2, & d(x) \leq d_0 \\ 0, & d(x) > d_0 \end{cases} \quad (4)$$

$$F_{\text{rep}} = \nabla U_{\text{rep}}(x) \quad (5)$$

式中: $d(x)$ 为规划路径当前与最近障碍物之间的距离, d_0 为排斥力的作用范围, k_{rep} 为排斥力增益因子。

上述模型具有明确的物理意义:由于远离障碍物时排斥力为零,而接近障碍物时排斥力急剧增大,因此可以很自然、合理地实现避障。

1.3 现有 APF 算法的局限性

局部极小值问题是APF算法在复杂地形环境进行路径规划时最常见、最棘手的问题之一:即当若干障碍物所施的排斥力与目标点的吸引力达到平衡时,运动体就会停留在非目标区域而不能前进,因此很容易陷入“局部极小值陷阱”。这类情况在障碍物密集、地形结构复杂、存在多方向约束的场合中十分典型,诸如峡谷、山谷通道、狭窄隧道及非规则障碍分布区域。若算法陷入局部极小值便不能自主脱困,路径规划自然停滞甚至彻底失败,故而对智能系统在复杂环境中的任务执行及导航稳定性有直接而重大的影响。

传统人工势场法在复杂地形下易陷入局部极小值的根本原因归纳如下:

(1) 障碍物密度高、分布不均,地形中障碍物形态复杂,排斥力方向易发生干扰甚至抵消,使路径偏离目标方向;

(2) 狭窄通道的“夹击效应”,在地形通道或岩体间隙中,来自两侧的排斥力形成平衡区,导致合力为零、路径受阻;

(3) 障碍边界过度敏感导致路径震荡,运动体靠近障碍物时,排斥力随微小位置变化而剧烈摆动,引起路径不稳定;

(4) 缺乏对地形结构方向性的识别,传统模型仅基于障碍物距离计算排斥力,忽视了地形在感知范围内的空间分布规律,导致算法无法识别最优通行方向。若直接应用传统人工势场法于复杂地形路径规划,将易产生路径震荡、陷阱停滞与规划失败等问题,自然难以满足复杂环境下对效率、安全性和平滑性各指标的严格要求。

本文就所讨论的问题提出了多源排斥力融合机制的局部最小陷阱规避方法:先融合各障碍源的排斥信息以构造全局方向感知模型,因此算法在障碍密集或地形约束区域能很好地判断整体方向趋势,由此直接、合理地寻找脱困路径,跳出局部极小值陷阱。同时,文中对排斥力分布及方向权重都做了自适应调节,使不同障碍力场之间过渡平滑,路径震荡得以有效抑制。随后在典型复杂地形环境下设计仿真场景,对改进算法与传统人工势场法做了严谨、有层次的对比分析,最终清楚地证明所提方法在路径长度、避障成功率、收敛稳定性、运行效率诸方面均有明显改进,因而适合作为复杂地形及工程路径规划的求解工具。

2 改进 APF 算法设计

2.1 虚拟目标跳出机制设计

局部极小值问题是人工势场法在城市复杂环境中广泛存在的核心难题之一。传统算法在多个障碍物的合力影响下，可能出现合力为零但尚未到达目标点的“势场陷阱”区域。此时规划的路径在物理意义上处于“受力平衡”，路径规划停止更新，最终导致任务失败。

为有效解决所论问题，本文引入虚拟目标跳出机制。其基本思想为：在判定路径陷入局部极小值区域后，临时生成一个“引导式中间目标”（虚拟目标），强制引导路径暂时脱离陷阱区域，再逐步恢复向主目标点的运动趋势，从而实现路径的连续性与任务的可达性。

本机制设计包括以下关键内容：

（1）陷阱区域识别策略

陷阱区域一般具有如下两个特征：

①运动方向波动异常：规划的路径在连续多次路径迭代中，运动方向变化剧烈但路径进展缓慢，甚至徘徊原地；

②合力模值趋近于零：当前合力（吸引力与排斥力之和）接近于零，说明系统处于非目标平衡态。

为此，定义陷阱判断指标：

$$\gamma = \frac{1}{k} \sum_{t=t_0}^{t_0+k} \|F_{\text{total}}(t)\| < \varepsilon \text{ 且 } \theta_{\text{var}} > \theta_{\text{th}} \quad (6)$$

式中： k 为判断窗口长度， ε 为合力幅值阈值， θ_{var} 为方向角变化幅度， θ_{th} 为方向剧变阈值。

若满足上述条件，即认为规划路径陷入局部极小值区域，启动跳出机制。

虚拟目标点应满足两个基本条件：远离当前障碍密集区、朝向目标点方向推进。

（2）跳出方向搜索策略

本文基于障碍物建模方式设计了低障碍密度方向搜索，其搜索方式为：

①基于当前位置在 2π 范围内均匀采样 K 个方向：

$$\phi_k = \frac{2\pi k}{K}, d_k = (\cos\phi_k, \sin\phi_k) \quad (7)$$

对每个方向构建扇区，统计障碍密度得分：

$$S_k = \sum_{i \in \text{sector}(k)} \frac{R - r_i}{R} \quad (8)$$

选择障碍最稀疏方向：

$$d_{\text{id}} = \text{argmin} S_k \quad (9)$$

②跳出方向融合

为避免虚拟目标偏离真实目标过远，将 d_{id} 与指向目标方向 d_g 融合：

$$d_{\text{esc}} = \omega d_{\text{id}} + (1 - \omega) d_g \quad (10)$$

该机制使跳出过程更具全局性和可控性。

式中： ω 为调节系数，通常设置 $\omega > 0.5$ ，以优先跳出障碍区，再逐步靠近主目标。

随后由此生成虚拟子目标：

$$x_v = x_{\text{curr}} + l_{\text{vt}} + d_{\text{esc}} \quad (11)$$

为避免路径震荡，本文进一步设定虚拟目标寿命 L ，在持续引导 L 步之后或合力方向恢复稳定后，自动取消虚拟目标，重新回归真实目标点引导。

（3）跳出路径更新策略

一旦生成虚拟目标，当前吸引力方向将临时指向 x_v ，合力改写为：

$$F'_{\text{total}} = F_{\text{att}}^v + F_{\text{rep}}^{\text{fusion}} \quad (12)$$

式中： F_{att}^v 表示指向虚拟目标的吸引力。路径将在新合力作用下摆脱陷阱区域。当检测到当前位置距离虚拟目标小于某设定值 d_0 ，或重新满足稳定推进条件，则判定跳出完成，恢复原始目标点规划。

2.2 路径震荡处理机制

本算法为解决传统 APF 算法对于障碍边界过度敏感导致路径震荡的问题，在生成路径时引用如下机制以优化路径实际可行性：

（1）位置更新时采用自适应步长，用公式表示为：

障碍密度比：

$$\eta = \min(1, \frac{n_{\text{near}}}{N_{\text{ref}}}) \quad (13)$$

距离因子：

$$\lambda_d = \min(1, \frac{d_{\text{min}}}{d_{\text{ref}}}) \quad (14)$$

步长：

$$s = s_0 \cdot \max(\gamma, \min(\lambda_d, 1 - 0.7\eta)) \quad (15)$$

（2）后处理路径平滑路径最终采用移动平均平滑，窗口 $2h+1$ ：

$$\hat{x}_i = \frac{1}{2h+1} \sum_{j=i-h}^{i+h} x_j \quad (16)$$

通过 cKDTree 检查碰撞，必要时回推修正。

3 应用设计及验证

为验证所提出的改进人工势场路径规划算法在复杂地形环境中的有效性与适应性，本文设计并实施了一系列路径规划实验。

3.1 实验环境

实验全过程都在 Python 程序环境中完成，所用工具包括 numpy、matplotlib、geopandas、shapely 和 scipy 等科学计算及地理信息处理常用库，路径生成及可视化由自定义模块直

接实现,而障碍物数据处理、地理信息解析都借助 `geopandas` 对矢量数据做高效、可靠的操作,因此实验环境的构造十分自然且易于控制。实验设计了若干复杂地形环境下的路径规划实验,系统、严谨地验证了本文提出的“多源排斥力融合+局部最小值检测+虚拟目标跳出机制”。实验从复杂地形、障碍密集区域两个方面考察所提算法的避障能力、跳出陷阱能力、路径平滑性及整体规划效率,由此客观、定量地评价该方法在复杂地形中的适应性、稳健性、相对于传统人工势场法的性能改进,以及其在实际路径规划任务中的应用价值。

为了验证算法在真实地形中的规划能力,实验采用真实来源的地形等高线 `shp` 数据。实验步骤严格按照代码约定执行。

3.2 实验数据与场景构建

为了验证算法在真实地形中的规划能力,实验采用真实来源的地形等高线 `shp` 数据。实验数据处理过程如下:

(1) WGS84 → UTM 投影转换

读取 `shp` 中的坐标系统,并进行统一投影以保证距离计算具有真实地理意义。

(2) 对每条等高线按固定间隔 d (例如 2 m) 进行均匀插值。

对一段曲线端点 P_0 与 P_1 :

$$P(t) = P_0 + t(P_1 - P_0) \quad (17)$$

$$t \in \left\{0, \frac{1}{N}, \dots, 1\right\} \quad (18)$$

采样点数:

$$N = \left\lceil \frac{L}{d} \right\rceil + 1 \quad (19)$$

式中: L 为线段长度,以获得能够完整保留等高线细节结构的点集。

(3) 基于法向量的双侧缓冲区生成(安全距离约束)

本实验将每条等高线向法向两侧扩展固定距离以有效防止路径从障碍穿过,势场出现距离为零,排斥力不足导致的贴边穿越等情况,最终得到高密度障碍点集作为地形的“软边界”用于势场计算。

(4) 空间索引构建

构建 `KDTree` 用于邻域障碍搜索,实现:近邻查询、距离检查、平滑后路径校正,保证了算法的实时性和可扩展性。

(5) 实验区域选取

本次实验为体现避障效果,主要选取障碍稠密区(峡谷、山脊密集)区域进行验证,并着重考虑闭合或半闭合凹形区域(典型陷阱),在测试排斥力稳定性和方向判断能力以及路径抗震荡能力的同时验证虚拟目标机制是否能有效跳出陷阱。

3.3 对比算法设置

为全面分析本文对于 APF 的改进效果,实验与一般改进 APF 算法进行横向对比,从而评估陷阱规避机制带来的路径生成稳定性提升,以及算法的实际性能比较。

3.4 实验结果与优势分析

经选取不同地区进行实验,本文算法可以稳定生成理想虚拟点使路径稳定到达可达目标点,展示其中代表性局部最小陷阱的虚拟目标方向生成效果及其对应路径如图 1~2 所示,其中标准实线、虚线箭头分别表示引力及障碍物产生的斥力,粗体虚线箭头表示障碍物密度方向,粗体实线箭头表示合成后的虚拟目标引导方向。

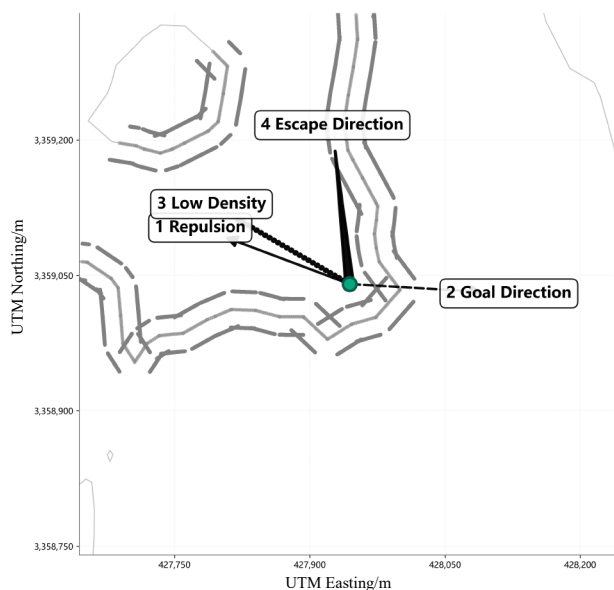


图 1 局部最小陷阱处理

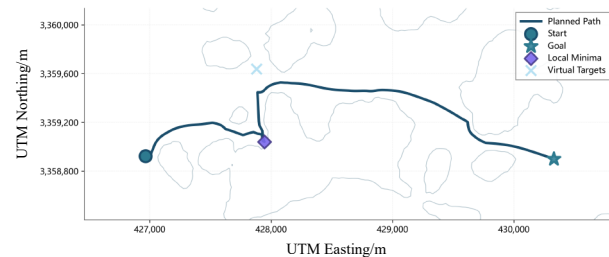


图 2 路径生成效果

基于一般 APF 算法陷入局部最小无法脱困,仅将本文算法与一般改进 APF 算法陷入局部最小值前相同路径生成数据进行对比,数据如表 1 所示。

优势分析:

(1) 虚拟目标机制为移动体提供临时引导方向,有效实现脱困并避免陷入局部极小值陷阱;

(2) 通过对障碍物密集区域进行精细处理显著降低路径震荡与折返现象,提升运动轨迹的连续性与稳定性;

(3) 利用临近障碍物区域,一定程度上提升路径精细

表 1 算法性能对比

算法	路径平均长度 /m	路径平均曲率 /(rad·m ⁻¹)	路径最大曲率 /(rad·m ⁻¹)	平均障碍物距离 /m	平均最小障碍物距离 /m	平均迭代次数 /次	路径运算效率 /(m·s ⁻¹)
改进 APF	2 625.91	0.005 34	2.027 6	305.59	30.32	1617.5	1 723.03
本文算法	2 614.52	0.004 70	0.760 7	248.63	20.05	3344.1	661.58
变化率	-0.42%	-11.98%	-62.48%	-18.63%	-33.87%	+106.74%	-61.60%

平滑程度，少量优化路径长度；

（4）算法机制不依赖特定场景结构，能够适应多种工程环境下的复杂障碍构型，具有较强的通用性。

4 结论

由于传统人工势场法在复杂环境下易陷入局部极小值、路径震荡、通用性差等问题，因此，本文提出了引入虚拟目标及方向调控机制的改进路径规划算法。

由实验结果可以十分清楚地得出结论，改进后的人工势场算法在牺牲一定效率的基础上，在密集结构环境中有极好的自适应避障能力及鲁棒性，因而路径规划任务完成率及工程适应性都大幅提高，适合于复杂地形及城市环境中的路径规划。

参考文献：

[1] 孙立鑫. 基于自组织行为的无人机编队 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2017.

[2] 李华东. 空中加油过程中无人机精确跟踪控制研究 [D]. 南京：南京航空航天大学，2018.

[3] 陈炳耀，信誉，路方婷，等. 长江江豚监测现状及展望 [J]. 中国环境监测，2023,39(2):1-10.

[4] 王飞，杨清平. 面向多无人机物流配送的双层任务规划方法 [J]. 北京航空航天大学学报，2026,52(1):94-103.

[5] 刘树东，刘业辉，孙叶美，等. 基于倒置残差注意力的无人机航拍图像小目标检测 [J]. 北京航空航天大学学报，2023, 49(3): 514-524.

[6] 孙彦景，李林，王博文，等. 灾后无人机自组网高动态多信道 TDMA 调度算法 [J]. 西安电子科技大学学报，2024, 51(2): 56-67.

[7]Wang Xufeng, Li Jianmin, Kong Xingwei, et al. Towards docking safety analysis for unmanned aerial vehicle probe-drogue autonomous aerial refueling based on docking success-probability and docking reachability[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2019, 233(11): 3893-3905.

[8] 武锦龙，吴虹麒，李浩，等. 基于改进 DeepLabV3+ 的荞麦

苗期无人机遥感 [J]. 农业机械学报，2024,55(5):186-195.

[9]LIU Xuanbing, ZHOU Shaolei, XIAO Zhicai, et al. Review on UAV obstacle avoidance methods[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43(5): 40-47.

[10]Szczerba R J , Galkowski P , Glicktein I S,et al.Robust algorithm for real-time route planning[J].IEEE Transactionson Aerospace and Electronic Systems, 2000, 36(3): 869-878.

[11]Urmson C, Simmons R.Approaches for heuristically biasing RRTgrowth[C]// 2003 IEEE/RSJ International Conference on IntelligentRobots and Systems (IROS). Piscataway:IEEE,2003: 1178-1183.

[12]Ran Xu , Zhang Qi , Ge Fen.A path planning method of logistics robotbased on improved ant colony algorithm[C]// 2020 International Conference on Big Data, Artificial Intelligence and Internet of Things Engineering (ICBAIE). Piscataway:IEEE,2020:450-453.

[13]Kuo Pinghuan, Li T-H S, Chen Guanyu, et al. A migrant-inspiredpath planning algorithm for obstacle run using particle swarmoptimization, potential field navigation, and fuzzy logic controller[J].The Knowledge Engineering Review, 2017, 32:e5.

[14] 汪玥，周航，徐泽楷，等. 基于改进人工势场法的路径规划研究 [J]. 航空计算技术，2024, 54(5): 74-78.

[15]Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobilerobots[J]. The International Journal of Robotics Research. 1986, 5(1): 90-98.

【作者简介】

骆云飞（1985—），男，河北石家庄人，硕士，高级工程师，研究方向：输电线路路径优化。

（收稿日期：2025-12-10 修回日期：2026-07-14）