

# 基于GIS路径规划算法研究综述

朱致仁, 李士心\*, 周立明, 陈范凯, 刘 宸, 孟范润

天津职业技术师范大学电子工程学院, 天津

收稿日期: 2023年5月14日; 录用日期: 2023年6月12日; 发布日期: 2023年6月20日

## 摘 要

随着科技的进步, GIS技术被广泛应用于自然生态、城市道路、农业、商业、工业等众多领域。其中, 与GIS技术结合的路径规划算法可以更高效地完成寻优任务、提高运行效率。为了更清晰地区分不同的路径规划算法, 根据GIS路径规划算法的设计原理, 将其分为基于几何模型、基于启发式和基于混合等三类路径规划算法。详细阐述了三类算法的概念、原理及改进方式, 对比总结了不同类型路径规划算法的优缺点, 从算法局限性、环境建模和动态路径规划等方面展望了GIS路径规划算法的未来发展趋势。

## 关键词

GIS, 路径规划, 优化算法, 混合算法

# Summary of Research Based on GIS Pathway Planning Algorithm

Zhiren Zhu, Shixin Li\*, Liming Zhou, Fankai Chen, Chen Liu, Fanrun Meng

College of Electrical Engineering, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin

Received: May 14<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jun. 12<sup>th</sup>, 2023; published: Jun. 20<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

With the progress of science and technology, GIS technology is widely used in natural ecology, urban roads, agriculture, commerce, industry and many other fields. Among them, the path planning algorithm combined with GIS technology can complete the optimization task more efficiently and

\*通讯作者。

improve the operation efficiency. In order to more clearly distinguish different path planning algorithms, according to the design principle of GIS path planning algorithm, it is divided into three types of path planning algorithms: geometric model, heuristic and hybrid. The concept, principle and improvement mode of the three types of algorithms are elaborated in detail, the advantages and disadvantages of different types of path planning algorithms are summarized, and the future development trend of GIS path planning algorithm is prospected from the aspects of algorithm limitations, environment modeling and dynamic path planning.

## Keywords

GIS, Path Planning, The Optimization Algorithm, The Hybrid Algorithm

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

GIS 技术(Geographic Information Systems) [1] [2] [3] [4] [5], 即地理信息系统技术, 是近些年迅速发展起来的一门综合性的、多种学科交叉的空间信息分析技术。因其具有体积小、重量轻、密封性好、运行可靠性高、运输周期短及成本低等优点, 被广泛应用于农业、林业生产、土地资源、生态环境以及自然灾害等领域。通过与遥感技术、地图学以及摄影测量学等学科技术相结合, 在路径规划问题中得到了广泛的应用。GIS 可以有效地动态监测和分析多时期的环境资源状况及生产活动变化, 将收集起来的信息、数据、决策等综合为一个信息流, 提高工作效率。在现实环境中, 由于环境的多变及突发情况的不确定性, 如果以 GIS 技术为载体, 结合定位技术和路径规划算法, 找寻出一条不同约束条件下的最优化路径, 将会极大地缩短时间, 减少人力资源成本的浪费。因此, 结合 GIS 技术的路径规划算法[6] [7] [8] [9] [10]研究显得格外重要。

本文主要对 GIS 技术相结合的路径规划算法进行综述, 着重介绍了每种路径规划算法的寻优能力、效率、优缺点以及总结算法的改进方式、方案, 并对未来的改进方向进行展望。

## 2. GIS 路径规划分类

路径规划不能只考虑始发点与终点之间的最短路径, 同时还要考虑这两点间的道路情况, 如在城市道路中, 需要考虑红绿灯、道路长度、堵车、天气等一些突发状况。而 GIS 技术可以了解到实际情况, 通过对这些信息的综合, 就可以获得真实距离。获取道路真实情况是前提, 而更好、更快、更精确的规划出一条最优路径最重要的部分是算法的选取。GIS 路径规划算法最重要的是效率高、鲁棒性好, 因此, 选择合适的路径规划算法不仅可以保证全局最优化, 而且可以更好的与 GIS 技术结合, 提高各个领域工作效率和工作能力。目前, 国内外学者对 GIS 技术路径规划算法进行了大量研究, 并且在基本算法上做出改进创新。本文根据 GIS 路径规划实现方式, 将算法分为三类, 一类是几何模型的 GIS 路径规划算法, 如 Dijkstra 算法[11] [12] [13] [14] [15], A\*算法[16] [17] [18]等; 另一类是启发式 GIS 路径规划算法, 如蚁群算法(ACO) [19] [20] [21], 遗传算法(GA) [22] [23] [24] [25], 模拟退火算法(SA) [26] [27] [28] [29], 爬山算法(HC) [30]等; 最后一类是将各种单一算法结合起来的混合路径规划算法[31] [32] [33]。具体分类如图 1 所示。

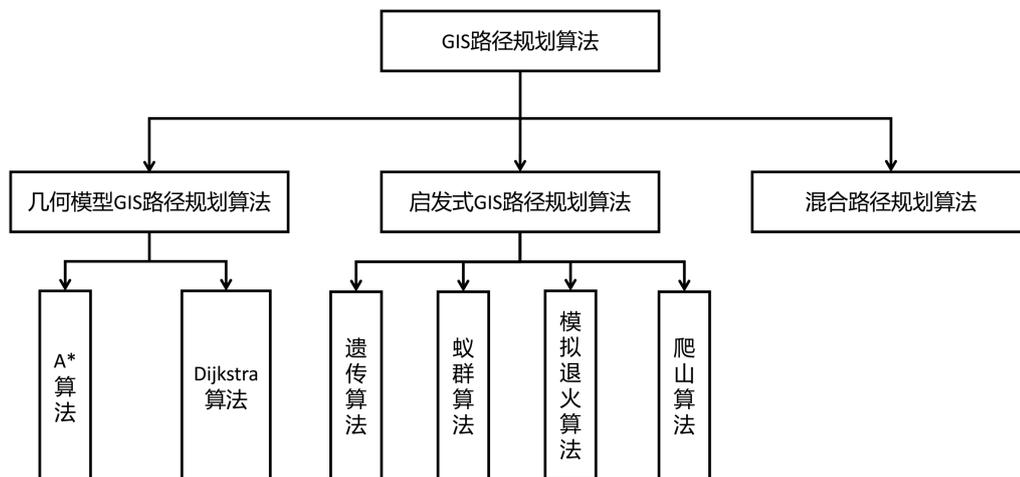


Figure 1. The GIS path-planning algorithm  
图 1. GIS 路径规划算法

### 3. GIS 路径规划算法

#### 3.1. 几何模型 GIS 路径规划算法

##### 3.1.1. Dijkstra 算法

Dijkstra 算法(狄克斯特拉算法)是一种基于贪婪策略,采用广度优先搜索思想,以拓扑连通图的起始点为中心逐步向四周扩展来找寻最优路径的经典全局路径规划算法,被广泛应用于二维环境中向图最短路径问题。该算法适用性高,适合大多数场景,但在复杂情况下,存在着时间复杂度高,遍历节点多,效率低下等缺点。

针对传统 Dijkstra 算法在复杂情况下路径规划时间复杂度高的问题,文献[11]中将蚁群算法的思想加入经典 Dijkstra 算法中,加入类似信息素的判别因子,减少最优路径的冗余杂点。文献[12]中提出了一种多标号并行的方法对遍历过程做出改进,同时,对于模型处理的速度,采用并行求解的方式来提升,大幅缩短运行时间,提高了路径规划效率。针对多目标寻优问题,文献[13]中在传统的 Dijkstra 算法中加入预搜索实现算法的回溯功能,通过使用归一化熵权法建立评价函数,简化路径优化模型,此外,在预搜索遍历过程中加入跳出机制,解决了传统 Dijkstra 算法在多约束条件下搜索失败率高,运算时间久的问题。文献[14]中提出了一种双向搜索最优路径的方法,即从目的地和终点同时进行搜索,调整搜索区域面积,减少搜索节点的数量,该算法时间权重更少,综合性能更好。文献[15]中提出了一种改进的动态路径规划算法,通过分析环境因素对道路权重的影响程度来改进算法,不同的影响因子设置不同的弧段权值,提高了传统算法的路径规划时间。

##### 3.1.2. A\*算法

A\* (A-Str)算法是一种很常用图形路径寻优算法,在二维栅格地图上寻优效果最好,同时也是求解静态路网中最短路径最有效的直接搜索方法,结合了贪心算法(深度优先)与经典的 Dijkstra 算法(广度优先),在 Dijkstra 算法中加入启发函数和代价评估函数进行约束,优先计算代价更低的方向,估价函数如下:

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (1)$$

其中  $f(n)$  表示代价,即从起点  $f(n)$  开始经过某一个位置  $H$  再到达终点的代价;  $g(n)$  为当前代价,即从起点到  $H$  的实际代价;  $h(n)$  为预估代价,即位置  $H$  到达终点的代价(此代价由曼哈顿距离判断)。

该算法的基本原理是使用两个集合来表示待遍历的节点, 已经遍历过的节点, 从起点开始对当前位置的 8 个相邻节点进行位置评估, 设置父节点, 加入待遍历的节点列表中, 计算最小代价, 选取代价值最小优先级最高的节点作为下一个待遍历的节点进行搜索, 重复以上操作, 直到找到目标点, 从终点开始, 每个节点沿着父节点移动直至起点, 形成实际路径。该算法具有结构简单、应用广泛、计算时间短等优点。但在大型环境中, 该算法时间、空间复杂度高, 搜索效率低。

针对传统 A\*算法搜索效率差、拐点多、最优路径中存在冗余杂点的问题, 文献[16]中选用对角线距离作为启发函数对 A\*算法进行修改, 并且, 提出了转弯惩罚项来减少转弯次数, 同时, 提出路径再优化策略, 删除路径中的冗余杂点, 减少拐弯次数, 有效的提高了路径规划的效率。文献[17]中将全局路径划分为距离相等的若干段局部路径, 计算物体与邻近节点的相对距离和相对角度, 通过将相邻两节点的欧氏距离进行累加对启发函数进行修改, 减少路径规划中所需的计算量, 提高了算法的稳定性。文献[18]中将父节点加入评价函数当前节点中, 减少往返搜索次数; 在二维环境中限制 4 个搜索方向, 并且通过修改启发函数中  $h(n)$  的计算方式缩短路径及遍历空间, 在三维环境中基于 B 样曲线对轨迹节点进行平滑处理, 减少不必要的冗余杂点和拐点, 提高路径搜索效率。

### 3.2. 启发式 GIS 路径规划算法

#### 3.2.1. 蚁群算法

蚁群算法(Ant Clony Optimization, ACO)是一种源于蚂蚁集体寻径觅食行为而提出来的基于种群的启发式全局优化算法, 该算法于 20 世纪 90 年代由意大利学者 M. Dorigo, V. Maniezzo 等人提出。它的基本原理是蚂蚁在觅食寻径的过程中, 会留下信息素进行信息传递, 并且通过感知这种信息素来决定自己的运动方向。因此, 蚁群集体行为便会产生一种信息正反馈现象, 即信息素浓度越高的路径, 选择该路径的可能性越大, 走过的蚂蚁就越多。该算法可以多个个体同时并行计算, 有很强的鲁棒性, 被广泛应用于求解旅行商(TSP)问题、分配问题等, 但也存在着收敛速度慢、易于陷入局部最优等问题。

针对传统蚁群算法局限性, 文献[19]采用 CRITIC 法熵权 TOPSIS 法改进蚁群算法, 通过修改期望函数与信息素浓度更新规则, 在计算最优路径时引入时间成本和环境成本, 避免 ACO 过早陷入局部最优解问题。针对传统蚁群算法收敛速度慢, 动态避障存在缺陷等问题, 文献[20]中提出了一种基于拉普拉斯分布的改进算法, 通过修改启发函数, 增强信息素的引导作用; 其次, 引入拉普拉斯分布调节信息素挥发; 最后, 对蚁群得到的路径进行双向冗余节点删除平滑处理, 使得二次路径优化更加平滑。针对巨大环境中的路径寻优问题, 文献[21]中提出了一种拓展蚁群优化的 SoSACO-v2 算法, 该算法赋予蚁群嗅觉, 将食物作为特权节点, 当靠近足够多的特权节点时, 直接引导它们到特权节点, 是一种提供更快响应的算法。

#### 3.2.2. 遗传算法

遗传算法(Genetic Algorithm, GA)最早由美国的 J. H. Holland 教授提出, 是借用自然选择, 通过生物遗传、变异、交叉等模拟生物自然进化论的一种自适应并行全局优化搜索算法。其基本原理是效仿自然界生物“物竞天择, 适者生存”的法则, 提高各个个体的适应性。该算法具有高效、实用、鲁棒性强等优点, 被广泛应用于神经网络、机器学习、模式识别等领域求解 NP 问题、多峰函数和多目标优化问题, 但也存在着过早趋同, 计算密集等缺陷。

针对传统遗传算法在多约束条件下寻优能力差, 算法收敛速度慢, 易于陷入局部最优解问题, 文献[22]中通过构建栅格地图, 设置约束条件, 在目标函数中增加删除算子提高算法迭代效率, 并引入小生境法避免算法过早的陷入局部最优解。为解决遗传算法在路径规划中由于交叉和突变产生不可行路径的问题, 文献[23]对路径表示采用二进制编码的方式, 再与粒子群算法(PSO)结合, 重建变异算子, 在适应度

评估中加入惩罚因子,避免陷入局部最优解,最后,对无效路径,加入修复机制,保持种群多样性。文献[24]提出了一种新的突变方法,该方法根据总路径的适应度接受节点,同时检查靠近突变节点的所有自由节点,提高了传统遗传算法的收敛速度。文献[25]利用 Voronoi 图对路径规划的区域进行划分,并将传统遗传算法与贪婪算法结合,建立了一种新的遗传交叉算子—贪婪交叉算子,改善了遗传算法的收敛性。

### 3.2.3. 模拟退火算法

模拟退火算法(Simulated Annealing, SA)是一种基于 Monte Carlo 迭代求解策略的随机寻优算法,从理论上说,是一种全局最优算法,最早于 1953 年由 Metropolis 等人提出。该算法的基本原理是模拟物理固体退火过程,在高温时,加速粒子运动,物体内部的分子相对自由成无序状态,当温度慢慢下降后,热能原子的可动性就会消失,重新分布成一个有序状态,确保能量达到最低状态。该算法鲁棒性好、不易陷入局部最优解,被广泛应用于模式识别、路径规划等工程领域。

针对传统模拟退火算法局限性问题,文献[26]中提出了一种融合遗传算法思想的模拟退火算法,在栅格环境下,以贪心算法为基础,定义最优解和次优解系数作为优良路径进行两两配对,产生新路径,输出退火过程的最优解。针对传统模拟退火算法解决复杂非线性规划路径问题,文献[27]中提出了一种加入粒子群的模拟退火算法,设置迭代次数最大值,通过比较个体粒子的适应度与全局适应度,更新粒子速度和粒子位置得到最优解,完成对模拟退火算法的改进,提高了路径规划的质量。针对算法不能有效实施全局搜索的问题,文献[28]在原有算法的基础上提出了回火操作使全局搜索与局部搜索实现平衡,改变最优解在迭代过程的接受规则;针对多约束问题,提出了领域变换策略,同时构建满足问题约束的初始解,生成算法整体框架,提高了多约束条件下的路径规划效率。文献[29]提出了一种基于动态概率的模拟退火算法,首先通过蒙特卡洛模拟算法随机生成多个初始解,并选择当前解作为最优解;其次,使用交换法、移位法、倒序法产生新解,并根据对应的目标函数计算动态概率;最后,迭代终止,输出当前解作为最优解,提高了算法的收敛精度和全局寻优能力。

### 3.2.4. 爬山算法

爬山算法(Hill Climbing, HC) [30]采用启发式方法对深度优先搜索进行改进,是一种简单的贪心搜索算法。该算法的基本原理是从山峰开始向高处攀爬寻找最高点,即从当前节点开始和临近节点进行比较,如果当前节点最高,则用当前节点作为局部最优解,反之,选择最高邻节点作为局部最优解,直至找到最高点。爬山算法虽然避免遍历、效率高,但同时存在着随机性,不一定能搜索到全局最优解,常与其他算法结合使用。

## 3.3. 混合路径规划算法

单一算法各有优劣,因此,除了在传统算法的基础上进行改进之外,国内外学者尝试将不同的算法进行结合,使得新算法在路径规划中效率更高。

文献[31]将爬山算法的局部搜索能力与蚁群算法结合,设计了一种新算法弥补蚁群算法的早熟现象。首先对蚂蚁走过的路径进行归一化处理,改进信息素增量函数;其次,挑选经历第一次蚁群算法的随机数量蚂蚁进行爬山操作得到爬山最优解,再将爬山最优解代入蚁群算法中再次挑选,直至迭代完成得到最优解。文献[32]将爬山算法、蚁群算法和遗传算法结合起来,首先,利用遗传算法的随机搜索性和全局收敛性,将爬山策略用于遗传选择,与轮盘赌法相结合,增强寻优效果,在初始种群中不断迭代,选择出初始最优解集;其次,将遗传算法得到的最优解作为信息素,利用蚁群算法的并行性、正反馈机制对初始最优解集反复进行局部搜索获得最优解。针对遗传算法局部搜索能力弱的问题,文献[33]将爬山算法与遗传算法相结合,对每一代最优个体采用多次爬山策略代替原个体,增强算法的局部搜索能力,提高了算法的计算效率和稳定性。

### 3.4. 总结

本节将结合 GIS 技术的路径规划算法简单的分为三大类——基于几何模型、基于启发式、基于混合的路径规划算法。其中，基于几何模型的路径规划算法适用于二维环境中，该类算法结构简单、适用性高，但需要遍历更多的节点，因此效率不高。基于启发式的路径规划算法搜索效率高、鲁棒性好，但存在易于陷入局部最优解、收敛速度慢等问题。基于混合的路径规划算法搜索效率高，但存在时间复杂度高、计算量大等问题。

### 4. 存在问题及后续展望

随着路径规划算法的深入研究与改进，与 GIS 技术结合的路径规划算法更加智能化、自主化，但同时也存在一些问题，由于不同行业和领域中的应用需求不同，所存在的问题也不同，因此，需要对不同的问题进行分析改进。

1) 算法局限性问题。经典单一算法无法处理一切路径规划，在简单环境中操作简易、使用方便、效率高，但复杂环境该会表现出自身局限性；对于混合算法虽然可以处理大部分路径规划问题，但是开发新的混合算法复杂程度高且不一定有效。针对算法局限性方面，应在传统算法上引入突变思想，提高算法局限性，增强算法适应性。

2) 环境建模问题。建立更加符合真实情况的环境模型与算法相融合是一个跨学科。现有的环境模型多是将目标作为一个质点在任务空间中模拟，这种环境模型过于理想化，便于求解，忽视了现实情况的复杂性，从而导致真实情况下的路径规划效果差。针对环境建模问题，应提高建模环境的复杂性，增加约束条件，同时考虑目标自身的特点。

3) 实时动态监测问题。现有的路径优化算法多是在障碍物及目的地已知不变的情况下，但实际情况存在许多不确定性，使得目标在面对突发情况时的路径规划无法应对。针对实时动态监测方面，应结合启发式算法提高环境的动态性，增强算法的动态规划能力。

### 5. 结语

结合 GIS 技术的路径规划算法发展至今已经日趋成熟，本文主要阐述了基于几何模型、基于启发式和基于混合的路径规划算法，从算法的时间复杂度、多目标寻优及搜索效率等角度分析了基于 GIS 技术的路径规划算法，并从算法的局限性、环境建模、动态监测等方面进行分析展望。当前，静态路径规划算法已相对成熟，但实时动态路径规划算法仍存在着很多问题，因此，接下来的研究方向应着重考虑多学科交叉融合形成更加高效的路径规划算法。

### 参考文献

- [1] Denisova, E.V. (2023) Use of GIS Technologies to Create a Local Geoinformation System for Irrigated Land Accounting. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, **58**, 1633-1641. <https://doi.org/10.1134/S000143382212012X>
- [2] Vinh, L.H., Canh, T.T., Binh, N.T., Ha, P.T., The, N.M., Vuong, N.D., Tu, L.H. and Huyen, N.T. (2023) Assessing Land Use/Land Cover Change and Its Driving Forces Using GIS Technique: Case Study in Kon Tum Province. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **1170**, Article ID: 012019. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1170/1/012019>
- [3] Mehedi Hasan Saddam, Md., Hossain, K.T., Bhowmick, R.C., Salauddin, Md. and Aziz, T. (2023) Assessing the Shoreline Dynamics of Moheshkhal Island in Bangladesh by Integrating GIS Techniques and Sea-Level Data. *Regional Studies in Marine Science*, **62**, Article ID: 102941. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2023.102941>
- [4] 张丽楠, 张粉粉, 吴艳, 曹先彬. 基于移动 GIS 技术的森林资源调查与督查系统[J]. 现代农业科技, 2023(7): 120-123.
- [5] 陈熙. GIS 技术在农业水文水资源管理中运用分析[J]. 农村实用技术, 2023(2): 125-126.

- [6] 康顺旺, 刘刚. 基于 GIS 空间分析方法的危化品泄漏事故应急疏散路径规划[J]. 测绘, 2020, 43(3): 122-125.
- [7] 王旭科. 基于三维地理信息数据和 SuperMap GIS 的消防救援路径规划应用研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2020.
- [8] 李凯. 基于 GIS 的钻井事故应急物资配送路径规划研究与实现[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安石油大学, 2021.
- [9] 袁丰桥. 基于 GIS 的校园路径规划系统设计与开发[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江工业大学, 2020.
- [10] 王茜, 王克晓, 虞豹, 李波. 基于 GIS 的“数字底图”构建路径探讨[J]. 南方农业, 2022, 16(21): 115-118.
- [11] 陈智康, 刘佳, 王丹丹, 张运喜. 改进 Dijkstra 机器人路径规划算法研究[J]. 天津职业技术师范大学学报, 2020, 30(3): 30-35.
- [12] 先梦瑜. 一种基于 Dijkstra 的物流配送路径优化算法设计[J]. 电子设计工程, 2023, 31(2): 20-24.
- [13] 郑弈, 谢亚琴. 基于 Dijkstra 算法改进的飞行器航迹快速规划算法[J]. 电子测量技术, 2022, 45(12): 73-79.
- [14] Noto, M. and Sato, H. (2000) A Method for the Shortest Path Search by Extended Dijkstra Algorithm. 2000 *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Cybernetics Evolving to Systems, Humans, Organizations, and Their Complex Interactions*, Vol. 3, 2316-2320.
- [15] 杨璐. 基于移动 GIS 的城市交通动态路径规划及系统实现[D]: [硕士学位论文]. 大连: 辽宁师范大学, 2017.
- [16] 宋宇, 张浩, 程超. 基于改进 A\*算法的物流机器人算法研究[J]. 长春工业大学学报, 2023, 44(2): 189-192.
- [17] 赵卫东, 章争生, 陈文博. 基于 A\*算法的局部路径规划算法[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2023, 40(1): 70-75.
- [18] 付三丽, 赵岩, 周禁程, 吴升祥, 侯继祖. 改进 A\*算法机器人路径规划技术研究[J]. 物联网技术, 2023, 13(4): 108-110.
- [19] 李明月, 李俐频, 左薇, 张军, 赵天瑞, 郭威, 黎彦良, 田禹. 基于 GIS 与改进蚁群算法的垃圾收运路径规划[J]. 环境工程学报, 2022, 16(7): 2388-2396.
- [20] 翟志波, 戴玉森, 周鹏鹏, 刘伟. 基于改进蚁群算法的移动机器人路径规划[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2023(4): 5-9.
- [21] Calle, J., Rivero, J., Cuadra, D., et al. (2017) Extending ACO for Fast Path Search in Huge Graphs and Social Networks. *Expert Systems with Applications*, **86**, 292-306. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.05.066>
- [22] 常见, 任雁. 基于改进遗传算法的机器人路径规划[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2023(2): 23-27.
- [23] 陈高远, 宋云雪. 改进遗传算法在移动机器人路径规划中的应用研究[J]. 计算机应用与软件, 2023, 40(2): 302-307.
- [24] Tuncer, A. and Yildirim, M. (2012) Dynamic Path Planning of Mobile Robots with Improved Genetic Algorithm. *Computers & Electrical Engineering*, **38**, 1564-1572. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2012.06.016>
- [25] 姚娟. 基于 GIS 的城市物流配送路径规划研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中师范大学, 2006.
- [26] 陶重霖, 雷祝兵, 李春光, 孙云飞, 周海冰. 基于改进模拟退火算法的搬运机器人路径规划[J]. 计算机测量与控制, 2018, 26(7): 182-185.
- [27] 刘婧. 基于改进模拟退火算法的船舶物流配送中心选址研究[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(16): 199-201.
- [28] 尚正阳, 顾寄南, 王建平. 求解带能力约束车辆路径优化问题的改进模拟退火算法[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(8): 2260-2269.
- [29] 冯思尧, 张程潇, 柳毅. 无线传感器网络环境下小车充电路径规划问题的改进模拟退火算法研究[J]. 智能物联技术, 2022, 5(2): 8-13+27.
- [30] 许傲雪. 基于爬山遗传算法的 T 公司农产品配送路径优化研究[D]: [硕士学位论文]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2022.
- [31] 程晗. 基于爬山蚁群算法的 J 物流公司配送路径优化研究[D]: [硕士学位论文]. 无锡: 江南大学, 2022.
- [32] 马丽. 基于 GIS 的物流配送路径规划算法的研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春理工大学, 2010.
- [33] 邵泳兵. 混合遗传算法在物流配送路径优化上的应用[J]. 物流工程与管理, 2022, 44(12): 32-34.