

基于分层强化学习的数字化输电线路路径规划研究

宋涛¹, 李丹¹, 路宁²

(1. 国家电网有限公司特高压建设分公司, 北京 100052; 2. 北京道亨软件股份有限公司, 北京 100012)

摘要:在输电线路的设计中,使用三维数字化设计技术可以显著提升地形的划分精度,然而地形划分精度的提升会使得地形栅格矩阵维度呈指数级增加,导致路径规划过程中出现维度灾难问题。为解决该问题,研究了一种基于分层强化学习的数字化输电线路路径规划方法。建立输电线路的三维数字化云平台,使用不同比例尺对地形数据进行重采样,将原始的地形重构为粗粒度和细粒度的两层栅格图,使用基于 MAXQ 算法的分层强化学习进行路径规划,从而解决了细粒度栅格单元带来的维度灾难问题,同时又保持了精确性的优势。实际算例表明,在地形划分精度提高、传统方法无法收敛的情况下,提出的方法仍能保持收敛,并相较传统方法不合理的跨越区域更少,降低了路径规划成本。

关键词:数字化输电线路;路径规划;分层强化学习;MAXQ

DOI:10.19753/j.issn1001-1390.2022.04.014

中图分类号:TM726

文献标识码:B

文章编号:1001-1390(2022)04-0091-07

Research of digital transmission line path planning method based on hierarchical reinforcement learning

Song Tao¹, Li Dan¹, Lu Ning²

(1. State Grid UHV Engineering Construction Company, Beijing 100052, China.

2. Beijing Daoheng Software Co., Ltd., Beijing 100012, China)

Abstract: In the domain of transmission lines design, the use of 3D digital design technology can significantly improve the fine-grained terrain division. However, the fine-grained terrain division will make the dimension of terrain grid matrix increase exponentially, which leads to the dimension disaster in the process of path planning. In order to solve this problem, a digital transmission line path planning method based on hierarchical reinforcement learning is studied. Firstly, a three-dimensional digital cloud platform for transmission lines is established. Then, different scales are used to resample the terrain data, and the original terrain is reconstructed into two layers of coarse-grained and fine-grained grid map. Then, the hierarchical reinforcement learning based on MAXQ algorithm is used for path planning, so as to solve the dimension disaster problem caused by fine-grained grid cells, while maintaining the advantage of accuracy. The practical example shows that the proposed method can still keep convergence when the accuracy of terrain division is improved and the traditional method cannot converge. Compared with the traditional method, the unreasonable crossing area is less and the cost of path planning can be reduced.

Keywords: digital transmission line, path planning, hierarchical reinforcement learning, MAXQ

0 引言

输电线路具有输电距离远、覆盖范围大、走廊环境复杂等特征。其中,输电线路的最优路径规划问题是输电线路设计的关键问题,其路径规划的合理性直接

影响到输电线路的建设成本和可靠性问题。例如,文献[1]对 800 kV 特高压线路工程造价的影响因素进行分析,指出杆塔价格、线路长度、地质条件、地形地貌等是影响输电线路工程造价的主要因素。文献[2]指出在不同的地形下,人力运距对输电线路造价的影响各不相同。文献[3]分析了在不同地形地貌条件下,输电

基金项目:国家电网有限公司科技项目(研综[2020]7号)

线路的雷电防御性能,并指出在某些特定的地形地貌下输电线路更容易被雷电击中。文献[4]分析了山地地形对 ± 1100 kV 输电线路雷电屏蔽性能的影响,研究的结果对不同地形条件下的输电线路防雷设计具有一定的参考价值。

在输电线路路径规划问题中,需要考虑的因素较多,例如,设计人员不仅要考虑输电走廊的地形地貌、还要考虑到自然气候、环境保护以及政策法规等因素。以往的输电线路路径规划主要靠查阅纸质地图以及工程人员的实际勘测情况,再对基于地形地貌的栅格划分来实现路径规划工作。由于输电线路的地形地貌较为复杂,而纸质地图多存在不精确、信息滞后的特征,使得传统的输电线路路径规划方法具有工作强度大,准确率低等缺陷^[5]。

近年来,三维数字化设计技术的发展弥补了上述方法的缺陷^[6]。输电线路的三维数字化设计是指使用卫星,无人机, GPS 等设备,并借助全数字化摄像手段,生成线路走廊的数字模型以及具有立体效果的三维景观图,使得输电线路勘测的精度和分辨率大大提升^[7~10]。例如,文献[11]使用无人机对山火条件下的架空输电线路闪络及监测技术进行研究,文献[12]使用无人机和激光雷达技术对输电线路走廊清理技术进行研究,文献[13]使用 GPS 设备,并基于 S 变换的行波法对高压输电线路进行故障定位。使用三维数字化设计可以让输电线路设计人员直观地了解当前的地形地貌,显著降低了设计人员的设计难度和工作量^[14]。

然而,输电线路的三维数字化设计技术的发展也给路径规划带来了新问题:由于三维数字化对地形划分的精度大大提升,造成了地形划分的栅格矩阵维度呈指数级增加^[15],此时,传统的基于栅格划分的路径规划方法已无法适用于栅格矩阵规模急剧增大的环境。例如,文献[16]使用蚁群算法对输电线路进行路径规划,文献[17]研究了基于遗传算法的特高压架空输电线最优路径规划方法,文献[18]研究了基于贝叶斯网络与蚁群算法的输电线路路径规划算法。上述的方法在栅格矩阵规模较低(栅格矩阵维度 < 100)的条件下,具有良好的收敛性和精确性,但若使用在栅格矩阵规模较大(栅格矩阵维度 100 ~ 10000)的条件下,上述方法会由于过高的栅格矩阵维度从而引发维度灾难的问题,导致算法收敛速度过慢甚至不收敛^[19~20]。因此,有必要对传统的路径规划方法进行改进,以适应地形栅格矩阵的维度大规模提升的

需求。

基于上述分析,研究了一种适用于三维数字化输电线路的分层强化学习路径规划方法,建立了输电线路的三维数字化云平台,在此基础上,使用不同比例尺对地形数据进行重采样,将原始的地形栅格单元重构为两层,其中第一层为大比例尺的粗粒度地形栅格图,第二层是在第一层图像的基础上,进一步使用小比例尺进行第一层图像的细粒度栅格图,如图 1 所示。两层栅格图像建立完毕后,使用基于 MAXQ 算法的分层强化学习进行路径规划,从而解决了细粒度栅格单元带来的维度灾难问题,同时又保持了精确性的优势。最后,使用实际算例验证了有效性和可行性。

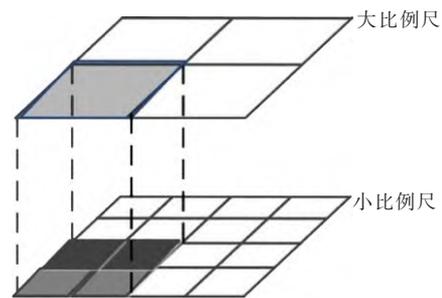


图 1 双层栅格矩阵结构图

Fig. 1 Structure diagram of double grid matrix

1 基于云计算的输电线路三维勘测系统

研究的分层强化学习路径规划方法是为解决输电线路的三维数字化地形划分导致的维度灾难问题,因此,本节先对输电线路的三维勘测系统进行简要介绍。输电线路的三维勘测系统是指采用计算机图形技术、地理信息勘测技术以及三维仿真技术生成高精度的输电线路走廊的数字化平台。建立的云计算的输电线路三维设计的数据云平台如图 2 所示,具体结构分为六层:(1)物理层,通过高清 SAR 影像、倾斜摄影技术、无人激光雷达等物理设备进行数据的采集;(2)数据传输层,使用 4G、5G 或 WIFI 等传输方式将采集数据传送至云平台;(3)云计算平台的底层,是将传统的数据通过操作系统存储进服务器中;(4)数据清洗层,将数据缓存中的数据清洗和分类,将其划分成时间数据和空间数据,传输至不同的数据库中;(5)功能服务层,是将数据进一步地发挖掘与分析,从而满足工程人员的需求;(6)用户层,提供数据的可视化,以及建立用户与数据交互的界面。

勘测数据送入云计算平台后,可以使用计算机图像技术将其可视化成三维的地形地貌图,进而辅助工

程人员进行路径规划、杆塔设计等工作,如图 3 所示。

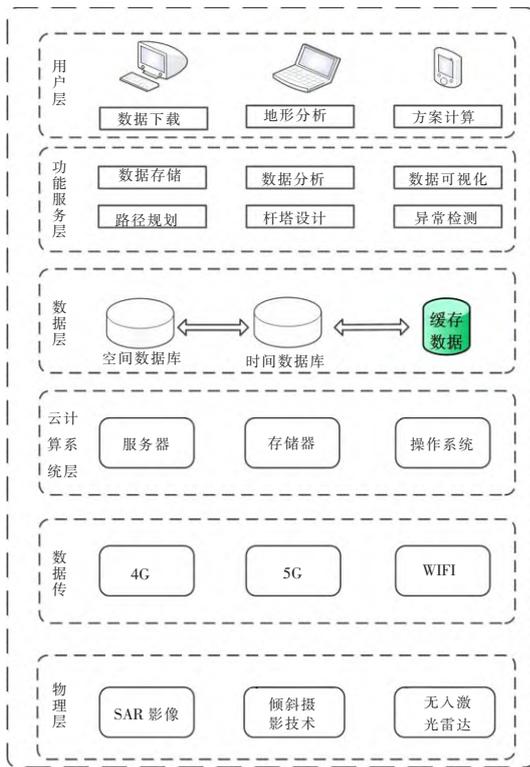


图 2 输电线路三维设计的云平台系统
Fig. 2 Cloud platform system for 3D design of transmission lines

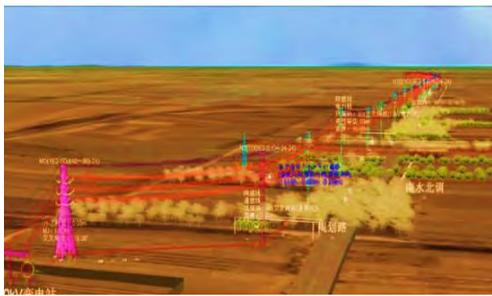


图 3 基于云平台的输电线路三维设计图
Fig. 3 3D design diagram of transmission line based on cloud platform

2 输电线路路径规划评价指标分析与规划步骤

2.1 输电线路路径规划评价指标分析

在建立输电线路三维数据云计算平台的基础上,可以根据《100 kV ~ 750 kV 架空输电线路设计规范》进行输电线路的路径规划工作。输电线路长度路径规划的基本原则是:在尽量缩短输电线路路线走廊长度的前提下,还必须考虑地形地貌的条件,例如高度、坡度、覆冰、地震烈度、公路铁路、土地利用等,从而兼顾

到架设成本最优性、架设方案的安全可靠性、对环境的友好性等因素。除此之外,架设输电线路的路径需避开某些特殊区域,例如不良地质带、灾害点、矿区、军事设施、重要设施、城镇及规划区、重冰区、原始森林、自然保护区、风景名胜等。图 4 为影响输电线路规划的成本因子结构图。可以发现,影响输电线路路径规划的评价指标分为地质条件和避障条件两大类,并且这两大类的路径规划原则各不相同:在地质条件评价指标中,需兼顾距离最短和成本最低的要求,而在避障条件指标中,需完全绕开上述区域。

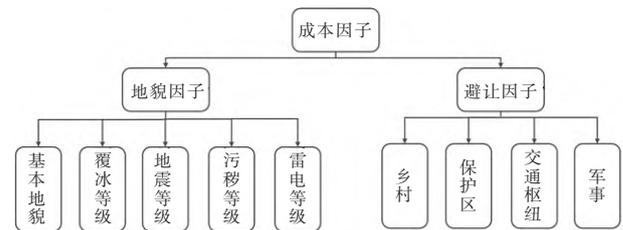


图 4 影响输电线路路径规划的成本因子结构图
Fig. 4 Structure chart of cost factors affecting transmission line path planning

2.2 输电线路路径规划步骤

输电线路路径规划一般是先将输电线路走廊地形栅格化,再对每块栅格进行成本因子计算,最终简化成栅格矩阵,记作:

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & \dots & m_{1i} \\ \dots & \dots & \dots \\ m_{1j} & \dots & m_{ij} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 M 为栅格矩阵;矩阵 M 中每个元素下标 i, j 表示每块地域;矩阵中的元素 m_{ij} 表示该地域的架设成本权重,其值可以根据图 4 所列举的成本因子,并结合南方电网公司《110 kV ~ 500 kV 输电线路典型造价》(2011 版本)标准计算出。由式(1)可画出输电线路走廊的栅格矩阵如图 5 所示,其中颜色越深表示成本权重越高。特别注意的是,对于某些必须避开的特殊区域,可设置其成本权重为一极大值(具体数值需根据不同的工程情况进行设定),如图 5 中黑色方块所示,从而使得设计的算法可以使输电线路避开上述区域。

对图 5 所示栅格矩阵基于最优成本进行路径搜索,搜索动作分为 8 个方向,如图 6 所示。传统的搜索方法一般包含手动搜索法、遗传算法或粒子群优化算法等。

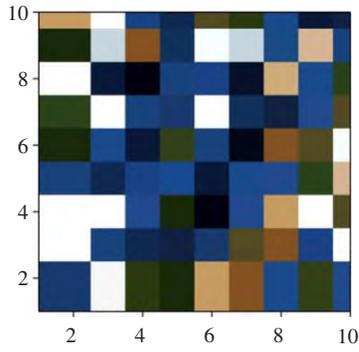


图 5 输电线路栅格矩阵颜色图

Fig. 5 Color map of transmission line grid matrix

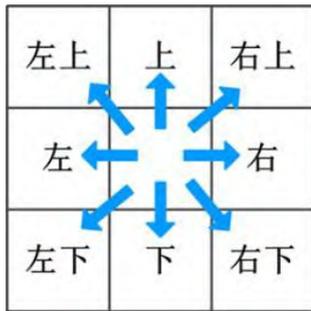


图 6 输电线路规划的动作设计

Fig. 6 Action design for transmission line planning

3 基于分层强化学学习的输电线路路径规划方法

在输电线路的路径规划任务中需要同时考虑地址条件和避障条件,当规划的栅格矩阵维度成规模增长时,会使得路径规划算法参数的状态空间成指数级扩张,若使用传统算法,例如遗传算法或粒子群优化算法时,会由于搜索维度过高而导致维度灾难问题。近年来,学者们对如何解决维度灾难问题进行了广泛地研究,其中,分层强化学学习是解决上述问题的有效方法,其以指数形式降低大规模栅格矩阵下的计算量,适合于解决三维云平台中的输电线路路径规划问题^[21]。

采用分层强化学学习中的 MAXQ 算法进行大规模输电线路的路径规划^[22],其主要思路是先基于马尔可夫过程建立学习总任务 M,再将总任务 M 分解成多个半马尔可夫过程子任务,记为 $\{m_0, m_1, \dots, m_n\}$,同时,将总策略 π 分解为多个子策略,记为 $\{\pi_0, \pi_1, \dots, \pi_n\}$,其中,子策略 π_i 对应子任务 m_i 。根据分层强化学学习的定义,若能保证每个子策略 π_i 都是子任务 m_i 的最优策略,那么总策略 π 也为最优策略,从而得到路径最优解。

3.1 MAXQ 算法

在 MAXQ 算法中,每个子任务可以由三元组 $\langle \pi_i,$

$T_i, R_i \rangle$ 组成:策略 π_i 用于从子任务 m_i 中选择当前时刻 t 时的动作 a_t , T_i 是子任务结束的终止步骤;奖励值 R_i 为子任务学习过程中当前时刻的代价函数。当子任务学习结束后,总体的期望代价函数 $V^\pi(i, s')$ 为:

$$V^\pi(i, s') = V^\pi(\pi_i(s), s) + \sum_{s', \tau} P_i^\pi(s', a_\tau | s, \pi_i(s)) \gamma^\tau V^\pi(i, s') \quad (2)$$

式中 $V^\pi(i, s')$ 为从观测 s' 开始到子任务 m_i 学习结束时的期望代价函数值; $V^\pi(\pi_i(s), s)$ 为在当前策略 π_i 下的期望代价函数值; $P_i^\pi(s', a_\tau | s, \pi_i(s))$ 为在当前策略 π_i 下,状态—动作由 $(s, \pi_i(s))$ 转变成 τ 时刻的状态—动作 (s', a_τ) 的转移概率。 $0 < \gamma < 1$ 为折扣因子。

MAXQ 算法的动作值函数为:

$$Q^\pi(i, s, a) = V^\pi(a, s) + \sum_{s', \tau} P_i^\pi(s', a_\tau | s, a) \gamma^\tau Q^\pi(i, s', \pi(s')) \quad (3)$$

令:

$$C^\pi(i, s, a) = \sum_{s', \tau} P_i^\pi(s', a_\tau | s, a) \gamma^\tau Q^\pi(i, s', \pi(s')) \quad (4)$$

可将式(3)简化成:

$$Q^\pi(i, s, a) = V^\pi(a, s) + C^\pi(i, s, a) \quad (5)$$

并且每个子任务在总任务中的价值函数投影为:

$$V^\pi(0, s) = V^\pi(a_1, s) + C^\pi(a_{t-1}, s, a_n) + \dots + C^\pi(a_1, s, a_2) + C^\pi(0, s, a_1) \quad (6)$$

其中:

$$V^\pi(a_t, s) = P(s' | s, a_t) R(s' | s, a_t) \quad (7)$$

通过逐层能使 $V_i^\pi(0, s)$ 值最大的 π_i , 并根据子任务的策略选择最优动作 a , 从而实现了对每个子任务进行最优策略 π_i^* 求解, 记为:

$$\pi_i^* = \arg \max_a \{ V_i^{\pi_i^*}(0, s) \} \quad (8)$$

以此递归求解, 最终可得到总任务的最优策略 $\pi^* = \{ \pi_1^*, \pi_2^*, \dots, \pi_i^* \}$ 。

3.2 基于 MAXQ 算法的最优路径规划

基于 MAXQ 算法的最优路径规划方法如图 7 所示, 首先建立输电线路走廊的总栅格图, 作为路径规划的总任务, 再将总栅格图划分成各个小区域, 作为子任务。对每个子任务进行最优策略求解, 从而确定最优动作。

具体步骤为:

步骤 1: 初始化算法参数, 并令 $t=0$;

步骤 2: 输入总区域栅格图作为当前的观测 s , 并在总栅格图中确认路径规划的起点和终点;

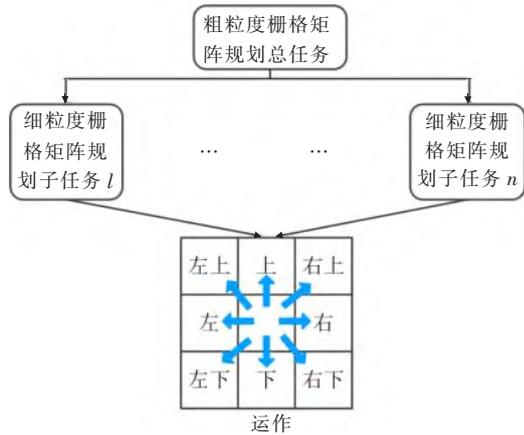


图 7 基于 MAXQ 算法的输电线路最优路径规划
Fig. 7 Transmission line optimal path planning based on MAXQ algorithm

步骤 3: 使用 10 km 比例尺将总栅格图划分成各个子区域栅格图, 并根据第 2 节计算每块子区域栅格图的粗略造价函数, 如图 8(a) 所示, 为设计方便起见, 在实际工程中, 再将图 8(a) 投影至二维平面用做算法的输入数据, 如图 8(b) 所示。

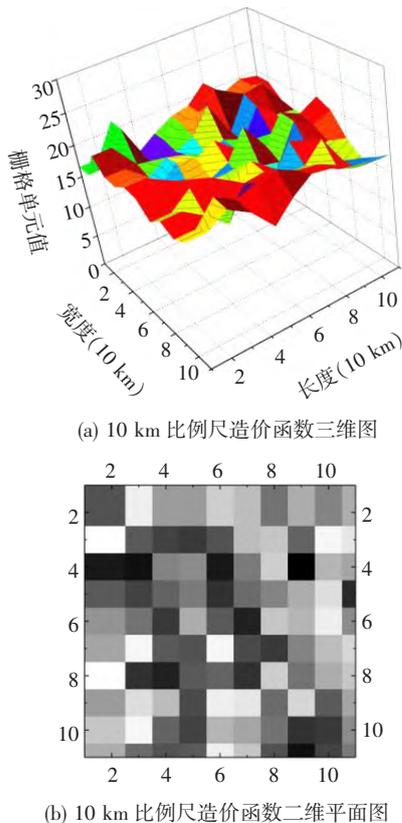


图 8 10 km 比例尺下的造价函数二维和三维平面图
Fig. 8 Transmission line optimal path planning based on MAXQ algorithm under 10 km scale

步骤 4: 将总栅格图中的每块子区域进行 500 m 比例尺的精细划分, 从而实现更精确的造价函数计算, 如图 9(a) 所示, 为设计方便起见, 在实际工程中, 再将图 9(a) 投影至二维平面用做算法的输入数据, 如图 9(b) 所示。

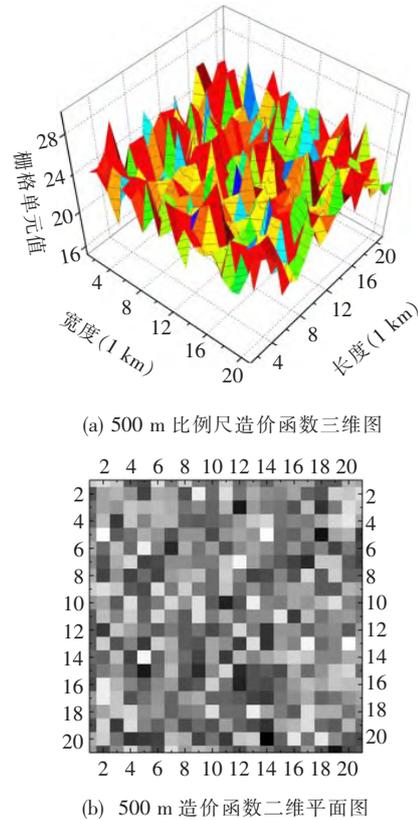


图 9 500 m 比例尺下的造价函数二维和三维平面图
Fig. 9 Transmission line optimal path planning based on MAXQ algorithm under 500 m scale

步骤 5: 将图 8 的栅格矩阵作为总任务, 在图 8 下计算价值函数 V^{π} 并执行子任务;

步骤 6: 对图 9 中的子任务 i 进行动作值函数 Q 以及函数 C 的计算, 从而计算出价值函数 V^{π^i} , 根据式(8)对最优子策略进行求解, 得到 π_i^* ;

步骤 7: 完成子任务后返回总任务, 直到满足终止条件为止。

4 实验结果

在实际工程中进行文中算法有效性地验证。工程为承德百万千瓦风电基地二期输电线路项目, 承德地区风能资源丰富, 适宜建设大中型风电场。根据冀北电网规划, 拟建由龙源(棋新风电场 220 kV 升压站)至 T 接点(御道口变电站-木兰变电站线路断点)一回 220

kV 线路。棋新风电场安装单机容量为 2 MW 的风电机组 150 台,风电机组采用一机一变单元接线方式,通过 17 回集电线路接入到新建 220 kV 升压站内 3 台主变的 35 kV 母线,升压至 220 kV 后利用原木御线木兰侧 220 kV 线路送出,棋新升压站至木御线破口点的线路长度约 140 km,拟采用 2 × JL/G1A-400 型号导线,木御线破口点至木兰 220 kV 升压站的线路长度约 290 km,木御线导线型号为 2 × JL/G1A-400。本工程的建设可以减少化石能源消耗,对于开发利用可再生资源,贯彻国家能源发展战略,推动承德地区经济和社会发展,实现我国能源的可持续发展具有重要意义。

工程中使用数字化三维勘测系统,并在此基础上分别采用文中方法和传统的粒子群优化算法进行棋新风电场至木御线破口点之间的输电线路路径规划,图 10 为输电线路路径规划的比较结果。其中一条线路为使用传统的粒子群优化算法的输电线路规划路径,另一条线路为使用文中方法的输电线路规划路径。可以看出,两种方法的路径长度相差不大,然而相较于粒子群方法,文中方法跨越的不合理区域更少,这是因为粒子群优化算法使用的比例尺为 10 km,地形栅格矩阵为 10 × 30,而文中方法所使用的比例尺为 1 km,栅格矩阵为 100 × 3 000,对地形具有更为精细地划分和鉴别。必须说明的是,如果传统的例子群算法也使用 1 km 的比例尺,会因为无法收敛而一直陷于计算中,从而无法输出最优的结果。



图 10 采用文中方法和粒子群方法的比较结果
Fig. 10 Comparison results between the proposed method and particle swarm optimization method

表 1 分别为采用粒子群优化算法、使用的 MAXQ 算法以及人工规划方法的具体指标比较,可以看出,采用的分层强化学习方法可以在更高精度的地形划分条件下收敛,不会出现发散的问题。同时,更高精度的地形划分使得文中方法的不合理跨越区域更少,从而降

低了路径规划的成本。

表 1 采用粒子群优化算法、MAXQ 算法以及人工规划方法的具体指标比较结果

Tab. 1 Specific indicators comparison results between particle swarm optimization method, MAXQ method and manual method

评价指标	粒子群优化算法	MAXQ	人工方法
比例尺/km	10	1	10
不合理跨越区域	较少	很少	较少
路径长度/m	138 367	138 454	138 652
预估造价/万元	18 027	17 993	18 040
1 km 比例尺收敛性	不收敛	收敛	不收敛

5 结束语

为解决地形划分精度提高而带来的维度灾难问题,研究了一种基于分层强化学习的数字化输电线路路径规划方法,建立输电线路的三维数字化云平台,使用不同比例尺对地形数据进行重采样为两侧栅格矩阵,第一层为粗粒度的栅格矩阵,第二层的细粒度栅格矩阵为第一层粗粒度栅格矩阵的进一步划分。再使用基于 MAXQ 的分层强化学习分别对两层栅格矩阵进行路径规划,将粗粒度的栅格矩阵路径规划设为分层强化学习算法的总任务,将细粒度的栅格矩阵路径规划设为分层强化学习算法的子任务,从而解决了细粒度栅格单元带来的维度灾难问题,同时又保持了精确性的优势。实际算例表明,在地形划分精度提高的情况下,传统的路径规划算法会由于维度灾难导致不收敛,而研究的分层强化学习算法可以克服上述维度灾难问题仍能保持收敛,并使得不合理的跨越区域更少,从而降低了路径规划成本。

参考文献

[1] 李小红,蔡霞. ±800 千伏特高压线路工程造价影响因素分析[J]. 中国电力企业管理, 2020, (24): 68-69.
Li Xiaohong, Cai Xia. Analysis on Influencing Factors of ± 800 kV high voltage line project cost[J]. China Power Enterprise Management, 2020, (24): 68-69.

[2] 张鲲. 利用高清影像地图精确计算输电线路工程人力运距[J]. 电力勘测设计, 2020, (4): 57-62.
Zhang Kun. Accurate Calculation of Manpower Distance of Transmission Line Engineering Using Satellite Map[J]. Electric Power Survey & Design, 2020, (4): 57-62.

[3] 陈嘉宁,吴振杰,王源涛,等. 基于雷击灾害的输电网可靠性综合评估模型[J]. 高压电器, 2020, 56(2): 170-175, 182.

[4] 赵江涛,戴敏,陈伟,等. 山地地形对 ±1100 kV 输电线路雷电屏

- 蔽性能影响模型试验[J]. 高压技术, 2020, 46(9): 3318-3324.
Zhao Jiangtao, Dai Min, Chen Wei, et al. Model Test of the Effect of Mountain Terrain on Lightning Shielding Performance of ± 1100 kV Transmission Lines[J]. High Voltage, 2020, 46(9): 3318-3324.
- [5] 李隆基, 郝晓光, 李志坚, 等. 微地形环境下输电线路微气象分析与预测技术[J]. 中国电力, 2020, 53(3): 76-83.
Li Longji, Xi Xiaoguang, Li Zhijian, et al. Analysis and Prediction of Micro-meteorological Parameters for Power Transmission Lines in Micro-terrain Environment[J]. Electric Power, 2020, 53(3): 76-83.
- [6] 董飞飞, 李永双, 俞登科. 输电线路工程三维数字化应用研究与展望[J]. 智慧电力, 2019, 47(9): 86-90, 119.
Dong Feifei, Li Yongshuang, Yu Dengke. Research and Prospect of 3D Digital Application in Transmission Line Engineering[J]. Smart Power, 2019, 47(9): 86-90, 119.
- [7] 秦钟, 杨建国, 王海默, 等. 基于 Retinex 理论的低照度下输电线路图像增强方法及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 150-157.
Qin Zhong, Yang Jianguo, Wang Haimo, et al. Low illumination transmission line image enhancement method and application based on the Retinex theory [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 150-157.
- [8] 陈荣保, 韦盛, 盛雨婷, 等. 改进 EDLines 算法暨在高空输电线路识别与巡检中的应用[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(9): 157-160.
- [9] 康俊锋. 云计算环境下高分辨率遥感影像存储与高效管理技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
Kang Junfeng. Technologies of Storage and Emeient Management on Cloud ComPuting for High Resolution Remote Sensing Image[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [10] 杨剑锋, 秦钟, 庞小龙, 等. 基于深度学习网络的输电线路异物入侵监测和识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 37-44.
Yang Jianfeng, Qin Zhong, Pang Xiaolong, et al. Foreign body intrusion monitoring and recognition method based on Dense-YOLOv3 deep learning network[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 37-44.
- [11] 李广凯, 王庆红, 高松川. 山火条件下架空输电线路闪络及监测技术的研究现状分析[J]. 电测与仪表, 2014, 51(20): 122-128.
Li Guangkai, Wang Qinghong, Gao Songchuan. Reseach Status Analysis on Flashover and the Monitoring Technology of Overhead Transmission Lines under forest fires[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(20): 122-128.
- [12] 付红安, 王学平, 田帅, 等. 基于无人机激光雷达技术的输电线路走廊清理方法[J]. 电测与仪表, 2019, 56(23): 146-152.
Fu Hong'an, Wang Xueping, Tian Shuai, et al. Corridor cleaning method for power transmission line based on UAV Li DAR technique [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(23): 146-152.
- [13] 付华, 吴赛, 徐耀松, 等. 基于 VMD 与广义 S 变换的 HVDC 线路故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(4): 125-133.
Fu Hua, Wu Sai, Xu Yaosong, et al. HVDC line fault location based on VMD and generalized S-transform[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4): 125-133.
- [14] 冯潇, 李冰然, 白晨旭. 基于倾斜摄影技术的输电线路三维重建[J]. 电气应用, 2020, 39(3): 51-54.
Feng Xiao, Li Bingran, Bai Chenxu. Three-dimensional reconstruction of transmission line based on oblique photogrammetry[J]. Electrotechnical Application, 2020, 39(3): 51-54.
- [15] 马威威. 基于无人机遥感的电力走廊精细化制图研究[D]. 厦门: 厦门理工学院, 2020.
Ma Weiwei. Research on Fine Mapping of Power Corridor Based on UAV Remote Sensing[D]. Xiamen: Xiamen University of Technology, 2020.
- [16] 谢景海, 苏东禹, 卢诗华, 等. 基于改进蚁群算法的输电线路路径规划关键技术[J]. 电测与仪表, 2020, 57(4): 122-128.
Xie Jinghai, Su Dongyu, Lu Shihua, et al. Key technology of transmission line path planning based on improved ant[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(4): 122-128.
- [17] 覃源存. 遗传算法与 GIS 在超特高压架空输电线路的优化和应用研究[D]. 昆明: 云南大学, 2018.
Tan Yuancun. Research on optimization and application of GA and GIS in EHV/UHV overhead transmission line's path planning[D]. Kunming: Yunnan University, 2018.
- [18] 程有富. 基于贝叶斯网络与蚁群算法的输电线路巡检计划制定与路径规划研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
Cheng Youfu. Plan-Designing and Path-Planning Research Based on Bayesian Net and Ant Colony Algorithm for Power Transmission Lines Patrol Inspection System[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [19] Hutzenhaler M, Jentzen A, Wurstemberger V W. Overcoming the curse of dimensionality in the approximative pricing of financial derivatives with default risks[J]. Electronic Journal of Probability, 2020, 25.
- [20] Olivier Guéant, Manziuk I. Deep Reinforcement Learning for Market Making in Corporate Bonds: Beating the Curse of Dimensionality [J]. Applied Mathematical Finance, 2020, 26(74): 1-66.
- [21] Chiang, Feng-Kuei, Wallis, et al. Neuronal Encoding in Prefrontal Cortex. during Hierarchical Reinforcement Learning [J]. Journal of Cognitive Neuroscience, 2018, 30(8): 1197-1208.
- [22] Byza, Aejvk, Aqc. Hybrid Hierarchical Reinforcement Learning for online guidance and navigation with partial observability [J]. Neurocomputing, 2019, 331(2): 443-457.

作者简介:



宋涛(1982—),男,高级工程师,硕士,主要研究方向为特高压输电。Email:songtao19820611@163.com

李丹(1989—),女,高级工程师,硕士,主要研究方向为特高压输电。
路宁(1982—),男,硕士,主要研究方向为软件工程、电力数字化、智慧基建、大数据分析、物联网。

收稿日期:2021-07-26;修回日期:2021-12-11

(田春雨 编发)