

doi:10.13756/j.gtxyj.2025.240037.

光纤光缆技术与应用

蒋佳芮, 赵赞善, 段茂生, 等. 并行化的多目标优化海缆路由规划算法研究[J]. 光通信研究, 2025(2): 240037.

Jiang J R, Zhao Z S, Duan M S, et al. Research on Parallel Multi-objective Optimal Submarine Cable Route Planning Algorithm[J]. Study on Optical Communications, 2025(2): 240037.

并行化的多目标优化海缆路由规划算法研究

蒋佳芮¹, 赵赞善^{1,2,3}, 段茂生¹, 高冠军¹

(1. 北京邮电大学 信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876; 2. 中国科学院声学研究所南海研究站, 海口 570105; 3. 陵水海洋信息海南省野外科学观测研究站, 海南 陵水 572423)

摘要:【目的】文章为了解决传统蚁群优化(ACO)算法更新同一张地图导致无法并行规划的缺陷,提出了一种并行多目标优化海缆路由规划算法,实现了局部区域的精细规划。【方法】文章采用分治思想将目标海域的栅格地图分割成多个栅格子图,建立了并行化多目标优化海缆路由规划算法模型,并对模型关键参数进行优化,然后在最佳模型参数下,利用并行化蚁群优化(PACO)算法进行海底光缆路由规划,统计了 Pareto 前沿解下的海底光缆路由方案。【结果】仿真结果表明,并行多目标优化算法模型在分块数量为 6, 蚁群规模大小为 150 时,获得最佳的搜索能力和效率。PACO 算法规划的海底光缆路由与传统 ACO 算法相比在相同风险条件下节省了 33.9% 的成本,且路由成本均小于传统 ACO 算法,路由最大成本与传统 ACO 算法的最小成本相比还降低了 20.6%,同时相应的风险降低了 65.8%。【结论】在多目标海底光缆路由规划中,与传统 ACO 算法相比,PACO 算法不仅在规划结果上更优,而且运算时间效率提高至少 8 倍。

关键词:海缆路由规划;并行蚁群优化算法;多目标优化

中图分类号:TN929.11

文献标志码:A

Research on Parallel Multi-objective Optimal Submarine Cable Route Planning Algorithm

JIANG Jiarui¹, ZHAO Zanshan^{1,2,3}, DUAN Maosheng¹, GAO Guanjun¹

(1. State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

2. Hainan Acoustics Laboratory, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Haikou 570105, China;

3. Lingshui Marine Information Hainan Observation and Research Station, Lingshui 572423, China)

Abstract: 【Objective】In order to solve the problem that the traditional Ant Colony Optimization (ACO) algorithm updates the same map, resulting in the inability of parallel planning, a parallel multi-objective optimization submarine cable route planning algorithm is proposed in this paper, which realizes the precise planning of local areas. 【Methods】In this paper, the grid map of the target sea area is divided into multiple grid subgraphs by the idea of divide and conquer, and a parallel multi-objective optimization submarine cable route algorithm model is established, and the key parameters of the model are optimized. Then, the Parallel Ant Colony Optimization (PACO) algorithm is used to carry out the submarine cable route planning under the optimal model parameters, and the submarine cable route scheme solved by Pareto frontier is counted. 【Results】The simulation results show that the parallel multi-objective optimization model obtains the best search ability and efficiency when the number of blocks is 6 and the size of ant colony is 150. The PACO algorithm can save 33.9% of the cost of submarine cable route compared with the traditional ACO algorithm under the same risk conditions, and the cost of routes is smaller than the traditional ant colony algorithm. The maximum cost of routes is also reduced by 20.6% compared with the minimum cost of the traditional ACO algorithm, and the corresponding risk is reduced by 65.8%. 【Conclusion】In multi-objective submarine cable route planning, compared to the traditional ACO algorithm, the PACO algorithm not only achieves better planning results but also improves computational efficiency by at least 8 times.

Key words: submarine cable route planning; PACO algorithm; multi-objective optimization

0 引言

海底光缆路由规划是设计可靠海底光缆通信系

统的关键步骤。在实际工程中,海底光缆路由规划大多基于专家经验设计备选路由,通过走访各个相关部门获取所规划海域内的资料,然后进行实地勘

收稿日期:2024-03-29; 修回日期:2024-05-04; 纸质出版日期:2025-04-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(62371064);国家重点研发计划资助项目(2022YFB2903303);北京市自然科学基金资助项目(4232050)

作者简介:蒋佳芮(1999-),女,重庆人。硕士,主要研究方向为海底光缆通信系统。

通信作者:高冠军,副教授。E-mail:ggj@bupt.edu.cn

© Editorial Office of Study on Optical Communications. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

察以验证方案的可行性和合理性。基于行业专家的海底光缆路由规划方式耗时长、成本高且各种因素很可能互相冲突^[1-2]。Wang 等人^[3]提出了一种海底光缆路由规划方法,考虑了多种规划因素,最小化了光缆的总体生命周期成本,但这种方法仅考虑了单一目标在海缆路由规划中的影响;Zhao M 等人^[4]权衡建造成本和地震因素,使用 Dijkstra 算法进行点到点的海底光缆路由规划,却并未考虑其他风险因素对路由规划的影响;Zhao Z S 等人^[5]考虑了海底光缆路由选择过程中的各个风险因素,量化了各待选区域的风险等级评分,同时将风险等级评分和基础建造成本作为优化目标来规划海底光缆路由,然而该算法耗时较长,并不适合应用在数据量较大的场景。

本文提出了一种基于并行蚁群优化(Parallel Ant Colony Optimization, PACO)算法的并行化多目标优化海底光缆路由规划算法,以量化风险因素和建造成本为栅格数据,并将其拆分为多个子集并行规划路由,最终将局部最优路由由组合为全局最优路由。通过仿真实验对本文所提方法进行研究和优化,结果表明,该算法规划的结果比传统蚁群优化(Ant Colony Optimization, ACO)算法更优,并且还可以有效地降低耗时,提升性能。

1 工作原理

1.1 原理

基于 PACO 算法的多目标优化海底光缆路由规划算法主要包括数据建模、分块处理、并行规划和合成路由 4 个模块,如图 1 所示。

①数据建模:数据建模利用地理信息系统(Geographic Information System, GIS)地形数据和目标区域内各种风险因素分布,利用数值模型构建出目标海域内的风险因素和成本分布地图。本文使用了文献[5]中提出的建模方法对目标海域内的风

险和成本进行建模。假设目标海域的栅格地图为 D ,其数据存储为 (m, n) 二维数组。

②分块处理:分块处理将栅格数据切割为多个分块,同时需要确定各分块上子路由的起点和终点位置。假设当前分块个数为 k ,路由起点为 (x_s, y_s) ,路由终点为 (x_e, y_e) ,分块 i 上的子路由起点为 S_i ,终点为 E_i ,则有:

$$S_i = E_{i-1}, i \in [2, k], S_1 = (x_s, y_s), E_k = (x_e, y_e). \quad (1)$$

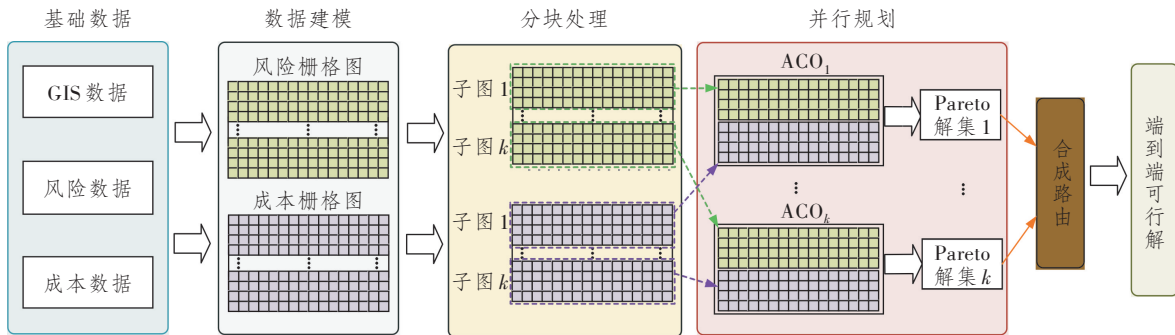
当前分块的终点与下一个分块的起点重合,从而使各分块的路径衔接起来。分块子路由的起点或终点统称为分块点,其位置包含行号和列号两个维度。本文中各分块点的行号直接根据分块个数和路由起终点之间的行间距均分得到,列号则按照下文流程中的规则进行选取。

③并行规划:并行规划由不同的蚁群在不同的子图上进行多目标优化海底光缆路由搜索。每个并行规划的过程包括初始化各分块的信息(包括风险评分矩阵、建造成本矩阵、蚁群数量和信息素矩阵等)和多目标海底光缆路由规划。由于各分块中的所有数据是独立的,因此可以使用多线程技术对多个分块同时进行处理和规划,每个分块将产生该区域内的 Pareto^[6]可行路由解。每个分块的 Pareto 可行路由解的个数可能不止一个,本文用 R_i 表示第 i 个分块规划出的可行路由数量。

④合成路由:合成路由将多个分块规划出的可行路由组合为端到端的全局路由。如上所述,总的分块数量为 k ,第 i 个分块规划出的可行路由数量为 R_i ,因此端到端路由共有 N_r 种组合,即共有 N_r 条端到端可行路由, N_r 可表示为

$$N_r = \prod_{i=1}^k R_i. \quad (2)$$

通过分析 N_r 条路由的成本和风险的支配关系,从而得出端到端海底光缆的可行解。



注: $ACO_1 \sim ACO_k$ 为分块后由 k 个蚁群算法并行寻优。

图 1 并行化的多目标优化海底光缆路由规划算法原理图

Figure 1 Schematic of parallel multi-objective optimization submarine cable route planning algorithm

1.2 流程

基于 PACO 算法的多目标优化海缆路由规划算法首先需要根据分块个数、路由起点和路由终点来确定各个分块的子路由由起终点位置。分块处理时,切割方式为在垂直方向上对栅格图进行等间距划分,间距大小为 d , d 可表示为

$$d = \left\lfloor \frac{|x_s - x_e|}{k} \right\rfloor. \quad (3)$$

忽略最后一个分块的差异,如图 2 所示。所有切割行及路由起终点所在的行数据被组合为新的数据集 Ω , Ω 为 $k+1$ 行 n 列的矩阵,且有

$$\Omega = \begin{pmatrix} D_{x_s,1} & \cdots & D_{x_s,n} \\ D_{(x_s+d),1} & \cdots & D_{(x_s+d),n} \\ D_{(x_s+d \cdot 2),1} & \cdots & D_{(x_s+d \cdot 2),n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{x_e,1} & \cdots & D_{x_e,n} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

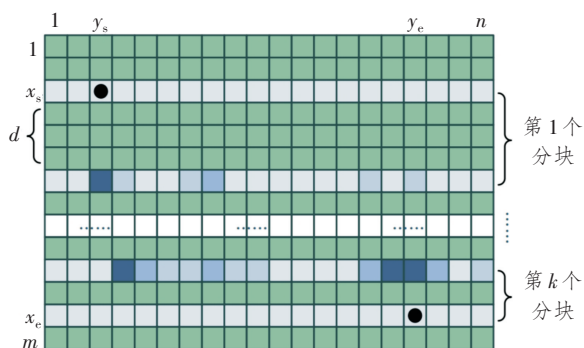


图 2 分块处理原理图

Figure 2 Schematic of block processing

将路由起点和终点重新映射到数据集 Ω 上进行路由规划,并统计各像元作为路由点出现的频率。图 2 中色块颜色越深,频率越高,而高频率的像元位置优先作为子路由的起点或终点。除了最后一个分块,每个分块的大小均为 $d+2$ 行 n 列。例如,当 $x_s=6$ 、 $x_e=49$ 且 $k=5$ 时,由式(3)可得 $d=8$,共产生 6 个分块点,其行号序列为 $\{6, 14, 22, 30, 38, 49\}$ 。根据分块点序列的行号对原图的行进行抽样,抽样后的图像宽度不变,高度为 6,在抽样后的图像中使用多目标路由规划蚁群算法进行选路。当生成的 Pareto 路由数量小于阈值时,将再次进行路由规划。

根据生成的 Pareto 路由解集,以行为单位统计每个像元点作为路由节点的频率,频率越高的点被选为分块点的可能性越高。为了避免最终合成的路由出现迂回的情况,需要按照单调性来选择各分块点的列号。除此之外,分块的起点和终点尽可能分布在路由起点和终点构成的对角线上。频率相等的点组成一个点序列,该点序列是一个升序序列,当序

列中所有高频率的点都不满足要求时,则在序列中的低频率点中查找。每个抽样行将选出唯一点作为分块点,若未选出,则再次在抽样图中进行路由规划。选取分块点的详细流程如图 3 所示。

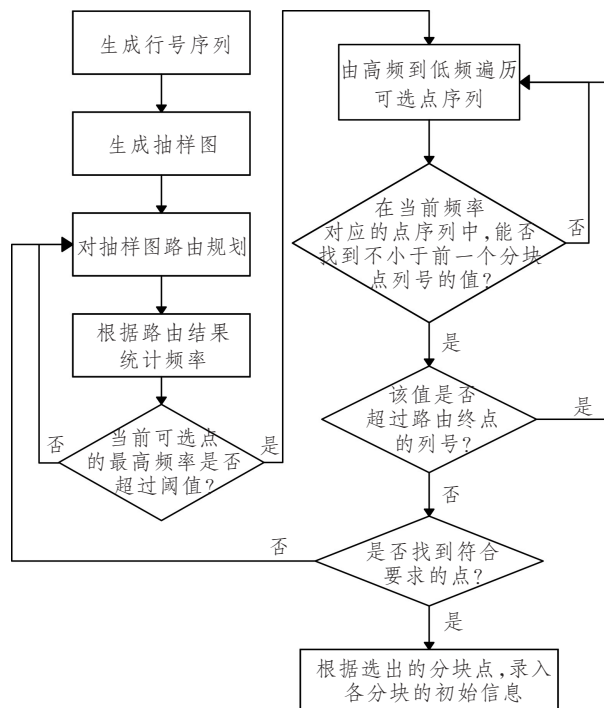


图 3 地图分块流程图

Figure 3 Operation flow of block processing

并行规划算法在确定分块点的位置后,按照分块点的信息将全局地图划分为多个子图,接着在使用多线程技术的同时,利用 ACO 算法在各子图层进行多目标优化海底光缆路由规划。每个分块拥有独立的蚁群和信息素矩阵,输出的是局部的 Pareto 最优路由解,最后将所有分块的路由解组合生成最终的路由集合。

2 结果与分析

本文设定初始参数信息素因子 $\alpha=1$,启发函数因子 $\beta=1$,信息素挥发因子 $\rho=0.4$,基础建造成本权重因子 $w_1=0.5$,风险等级评分权重因子 $w_2=0.5$,伪随机因子 $q_0=0.9$,最大迭代次数 $N_c=100$ 。

2.1 模型参数优化

为了最大化模型性能,考虑到分块个数和蚁群数量这两个因素对模型性能的影响较大,本文同时对分块个数 k 和分块上的蚁群数量 N_a 进行联合优化:

$$N_a \in (a_1, a_2, \dots, a_j), \quad (5)$$

$$a_j = a_{j-1} + 50, a_1 = 100, j \in [2, 7], \quad (6)$$

$$k \in [1, 9]. \quad (7)$$

由式(5)~(7)可知,一共产生了 63 组路由解,

按照文献[5]提出的 Pareto 解综合得分的计算方法,实验中所有路由解的 Pareto 得分情况如图 4 所示。由图可知,当 $k=6$ 时,路由的 Pareto 得分明显优于其他参数取值。

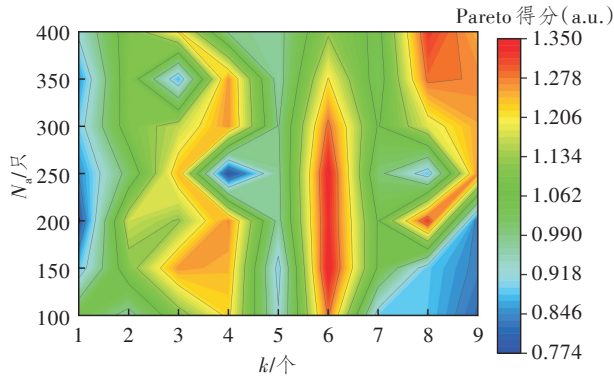


图 4 不同组合参数下的算法性能

Figure 4 Performance under different combination parameters

图 5 所示为在分块个数 $k=6$ 的条件下,算法耗时和路由 Pareto 得分随蚁群数量 N_a 的变化。由图可知,Pareto 得分随着 N_a 的增加呈现先增后减的趋势,Pareto 得分峰值在 $N_a=150$ 和 250 时取得,而算法耗时随着 N_a 的增加而上升。因此,综合考虑,将 $k=6, N_a=150$ 作为最佳参数用于路由规划。

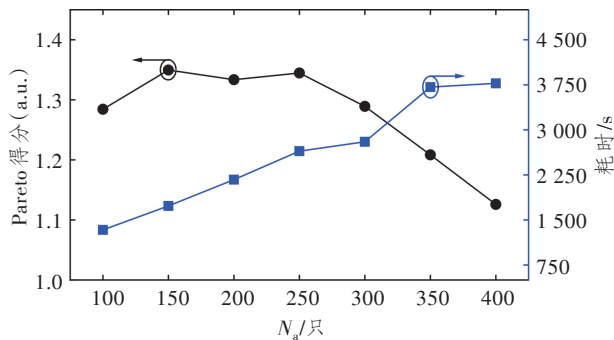


图 5 当 $k=6$ 时,并行规划算法的 Pareto 综合得分和计算耗时随蚁群数量 N_a 的变化曲线图

Figure 5 Curve of the score of Pareto solutions and consuming time versus ant colony size N_a using parallel programming algorithm when $k=6$

2.2 路由规划

在最佳参数条件下进行路由规划,组合各分块子路由生成所有全局路由,然后根据规则筛选出最终的 Pareto 路由结果集。图 6 将本文所提算法实验结果与文献[5]中的实验结果进行了对比,由图可知,在同等风险评分条件下,PACO 的基础建造成本与 ACO 相比降低了 8 530 千元,节省了 33.9% 的成本。在 ACO 规划出的所有路由中,最小成本为 21 570.9 千元,而 PACO 规划出的路由最大成

本仅为 17 128.1 千元,节省了 20.6%,同时相应的风险降低了 65.8%。可见,并行化多目标优化海底光缆路由规划算法的规划结果比传统 ACO 算法更优。

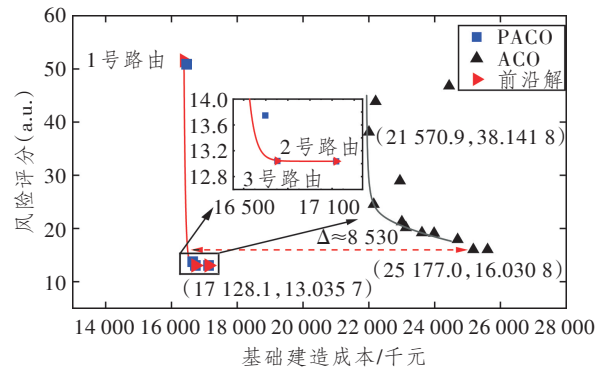
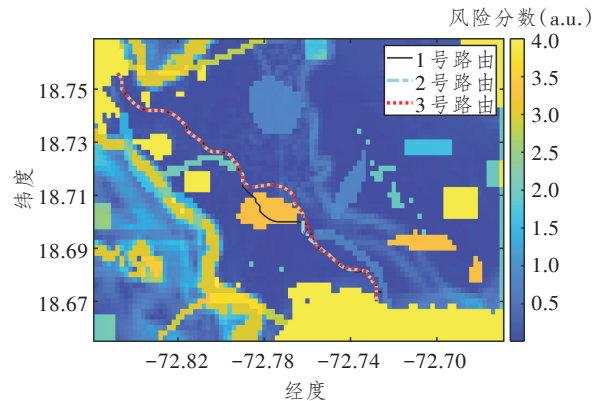


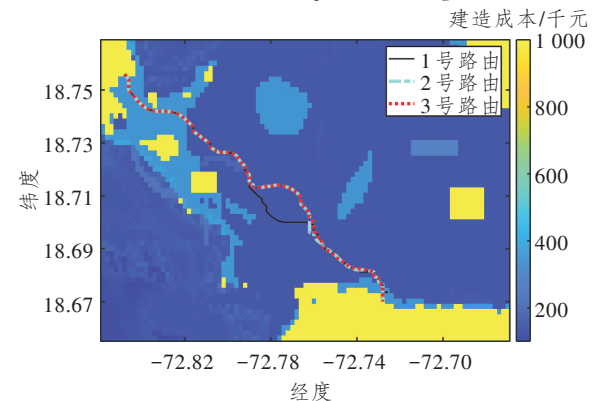
图 6 并行化的多目标优化海缆路由规划算法与传统 ACO 算法的 Pareto 解对比图

Figure 6 The comparison of Pareto solution between parallel multi-objective optimal submarine cable route planning algorithm and traditional ACO algorithm

本文将 Pareto 路由绘制在成本和风险数值评估分布地图上,如图 7 所示。



(a) 风险等级评分热力图
(a) The heat map of risk rating



(b) 基础建造成本热力图
(b) The heat map of foundation construction cost

图 7 Pareto 最优前沿的海底光缆路由方案
Figure 7 The submarine cable route scheme with Pareto front

由图可知,除了1号路由以外,其他路由方案均避开了高风险和高成本区域。表1所示为PACO算法输出的Pareto路由解集中每个解的Pareto综合得分,其中,1号路由的评分最低,这是由于尽管1号路由的成本最低,但其存在较长的高风险区域;3号路由评分最高,为极优解,在控制成本和提高可靠性的双重目标上均表现优异。

表1 Pareto最优解综合得分

Table 1 The score of Pareto front solution

序号	基础建造成本/ 千元	风险等级评分 (a. u.)	Pareto得分 (a. u.)
1	16 380.9	51.576 9	0.775 65
2	17 128.1	13.037 2	1.538 71
3	16 729.1	13.041 1	1.550 03

2.3 耗时对比

为了降低随机性对算法计算时间效率的影响,本文在对比PACO和ACO算法计算时间效率时,分别将两种算法在相同计算机上运行10次,取其平均值作为最终的计算时长,仿真结果如表2所示。由表可知,PACO和ACO算法的平均计算时长分别为1 677.5和14 145.0 s,PACO算法的计算耗时约为ACO算法的1/8。可见,本文所提并行框架结构计算效率更高,在长距离的海底光缆规划中具有明显的优势。

表2 算法耗时

Table 2 The consumption time

运行次数	不同算法计算耗时/s	
	ACO	PACO
1	13 373.9	1 806.67
2	12 907.1	1 771.97
3	15 770.1	1 727.69
4	12 652.0	1 565.04
5	12 698.9	1 665.40
6	20 282.9	1 590.69
7	16 442.4	1 592.09
8	12 752.0	1 795.92
9	12 356.0	1 641.73
10	12 211.9	1 617.53
平均值	14 145.0	1 677.50

3 结束语

本文提出了一种PACO算法,并将PACO算法用于多目标优化海缆路由规划研究。PACO算法采用分治的思想,建立并行化多目标优化海缆路由规划算法模型,并对算法的关键参数进行优化。仿真结果表明,PACO算法在分块数量为6和蚁群规模大小为150时获得了最佳搜索能力和效率。在优化PACO算法关键参数的基础上,利用该算法进行多目标优化海底光缆路由规划研究,结果表明,本文所提PACO算法规划出来的海底光缆路由在相同风险条件下节省了33.9%的成本,其规划出来的路由成本均小于传统ACO算法,PACO算法规划出来的最大成本与传统ACO算法的最小成本相比还降低了20.6%,同时相应的风险降低了65.8%。另外,相比于传统ACO算法,PACO算法在多目标优化海缆路由规划中的时间效率提升了8倍以上。

参考文献:

- [1] Carter L, Burnett D, Drew S, et al. Submarine Cables and the Oceans: Connecting the World [M]. Beijing, China: UNEP/Earthprint, 2009.
- [2] 高雯静,高冠军.海底光缆系统经济性建模及快速规划算法[J].光通信研究,2024(3):230072.
Gao W J, Gao G J. Economic Modeling and Fast Planning Algorithm of Undersea Optical Cable System [J]. Study on Optical Communications, 2024(3): 230072.
- [3] Wang Q, Guo J, Wang Z, et al. Cost-effective Path Planning for Submarine Cable Network Extension [J]. IEEE Access, 2019, 7: 61883-61895.
- [4] Zhao M, Chow T W S, Tang P, et al. Route Selection for Cabling Considering Cost Minimization and Earthquake Survivability via a Semi-supervised Probabilistic Model [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(2): 502-511.
- [5] Zhao Z S, Wang J, Gao G, et al. Multi-objective Optimization for Submarine Cable Route Planning based on the Ant Colony Optimization Algorithm [J]. Photonics, 2023, 10(8): 896.
- [6] Pareto V, Page A. Manuale di Economia Politica (Manual of Political Economy) [M]. Milan, Italy: Societa Editrice Librai, 1906.