

Study on Optimization of Power Line Planning Based on Economic Coefficient Grid Model

Moxuan Wu, Fengyong Zhao, Shihao Hu, Quanhui Guo

State Grid Jiangxi Electric Power Company Jiujiang Power Supply Branch, Jiujiang Jiangxi
Email: datouli110@qq.com

Received: Mar. 10th, 2017; accepted: Mar. 27th, 2017; published: Mar. 31st, 2017

Abstract

To solve power line planning problem of electric power industry, this paper builds a grid model based on geographic information, which is assigned with certain weight value according to land use situation, and forms an economic coefficient evaluation system model to apply to electric power planning. Taking the optimal value of length of power line and sum of economic coefficients into account, improved ant colony optimization is used in this paper to implement the optimization of power line planning. MATLAB simulation and experiment results prove the algorithm proposed in this paper has its advantages in economic efficiency.

Keywords

Economic Coefficient, Grid Model, Power Line Planning, Optimal Path, Improved Ant Colony Optimization

基于经济系数网格模型的电力线路规划优化研究

伍谟煊, 赵风勇, 胡世昊, 郭泉辉

国网江西省电力公司九江供电分公司, 江西 九江
Email: datouli110@qq.com

收稿日期: 2017年3月10日; 录用日期: 2017年3月27日; 发布日期: 2017年3月31日

摘要

针对电力行业中电力线路规划问题,本文基于地理信息数据对规划区域进行了网格化建模,并结合土地实际利用情况将网格模型赋以一定权值系数,形成了应用于电力规划的经济系数评估体系模型。考虑到规划线路总长度和经济系数总和的最优值,本文利用改进的蚁群算法实现了电力线路规划优化。MATLAB 仿真和实验结果证明了本文提出的算法在经济效益方面的线路规划优势。

关键词

经济系数, 网格模型, 电力线路规划, 最优路径, 改进的蚁群算法

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

电力线路规划是电力系统规划的重要组成部分,其任务是根据规划区域负荷、起始和终止点、电压等级、线路长度、地理信息以及线路通过区域的征地和拆迁补偿费用等确定最优规划路线,以满足线路在建设中的经济性要求。

现有的研究中,在求解传统的最短路径问题时,常用的方法有单向沿墙壁搜索算法、深度优先搜索算法和广度优先搜索算法等[1][2],但此类传统算法在解决复杂环境路径规划问题时常有鲁棒性差、效率低、非最优等不足[3]。根据蚂蚁在寻找食物过程中发现最优路径的行为,意大利学者 Marco Dorigo 于 1992 年在他的博士论文中提出了蚁群算法[4]。蚁群算法是一种模拟进化算法,研究表明该算法具有许多优良的性质,是一种自组织、正反馈的算法,具有较强的鲁棒性和较好的求解能力[5],在限量弧路由问题、参数优化、城市道路交通流模拟、模糊系统设计、混合变量优化等方面都有成功的应用[6][7][8][9][10]。

数字地价模型(Digital Land Price Model)是指使用一组有序数值形式表示地价高低的表面模型,与数字地价模型直接相关的一个概念是网格地价。网格地价是近几年提出的一种地价形态,可认为是把整个估价区用规则网格划分,将网格作为基本地价单元表征地价水平的一种地价表现形式[11][12][13]。

考虑到输电线路通过路径的房屋拆迁以及土地征用等架设费用组成因子,本文根据上述网格思想,提出一种应用于电力规划中的经济系数评估模型,该模型在地价的基础上增加了土地占用分类费用、经济特征费用、土地潜力补偿费用和规划建设费用,并根据这种评估模型,完成了对规划区域的经济系数网格建模。

同时,将改进的蚁群算法应用于经济系数网格模型,实现了电力线路总架设费用的优化。本文最后以九江浔阳区与庐山区交界处为算例,与现有 110 kV 线路进行了优化对比,仿真和实验结果证明了算法能得到较好的规划指导效果,为电力线路规划提供了一种新思路和新方法。

2. 基本蚁群算法原理介绍

2.1. 蚁群觅食规律

研究发现,蚂蚁个体之间会通过一种称之为信息素的物质传递信息,从而进行相互协作[14][15][16]。如图 1 所示,初始情况下,蚂蚁选择不同路径的概率相等,但是由于蚂蚁的爬行速度相同,因此在相同

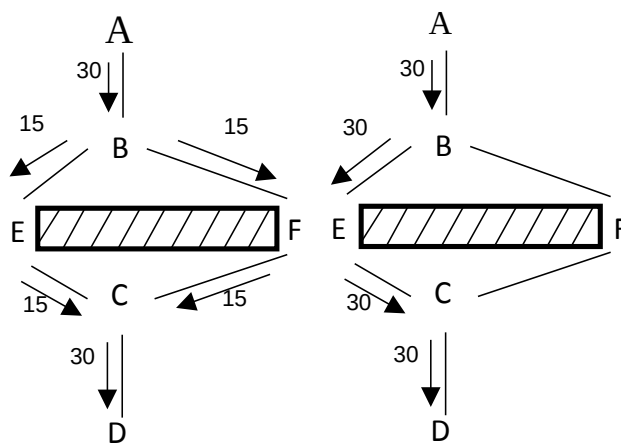


Figure 1. Simplified diagram of ant colony foraging

图 1. 蚁群觅食过程简化图

的时间内，路径较短的蚂蚁数量更多，留下的信息素也更多。后续蚂蚁由于受到信息素浓度的影响，选择路径较短的支路的概率就会更大，形成正反馈作用。最后，有较强信息素浓度的一条支路便会成为从蚁巢到食物的最优路径。

2.2. 蚁群算法的网格实现

如图 2 所示，将蚁群觅食的路径网格化为一个 8 方向网格模型。蚂蚁在网格中的可移动方向如图 3 所示。网格模型分别定义一个起始点和一个目标点，表示蚁巢和食物，在模型中黑色栅格代表路径障碍，白色栅格代表可通过路径。栅格中的蚂蚁可以向周围的 8 个方向探测并确定移动位置，每次只能移动一个栅格。

因此蚁群觅食寻优的问题可以数学描述为研究最优路径的问题：寻找一条从起始点到目标点的线路。该条路径应当考虑如下条件：

$$l = \min(\sum L_i) \quad (1)$$

其中 L_i 分别代表第 i 栅格的路线长度。蚁群不断重复寻找食物的过程，最终发现获得食物的最优路径。但是基本的蚁群算法只适用于最短路径问题，无法解决电力线路规划的多目标寻优，因此本文将基于经济系数网格模型对基本蚁群算法做出一定改进。

3. 规划区域经济系数网格建模

3.1. 经济系数评估体系模型

在对电力规划区域的规划经济性评估中，需要考虑到许多对线路规划的影响因素。以规划区域电力规划经济系数为系数层(O)，选取规划路径栅格的地理信息数据为造价层(I)，将不同区域的规划经济性评估细则作为指标层(X)，构建规划区域电力规划经济系数评估体系模型，见图 4 所示。

系数层(O)与造价层(I)之间的关系为

$$O = \sum I_i \times a_i \quad i=1,2,3 \quad (2)$$

造价层(I)与指标层(X)之间的关系为

$$I_i = \sum X_i \times \beta_i \quad i=1,2,3,\dots \quad (3)$$

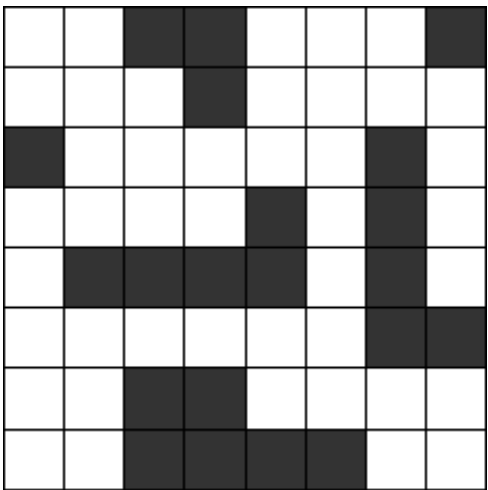


Figure 2. Grid diagram of ant colony foraging path.
图 2. 蚁群觅食路径网格图

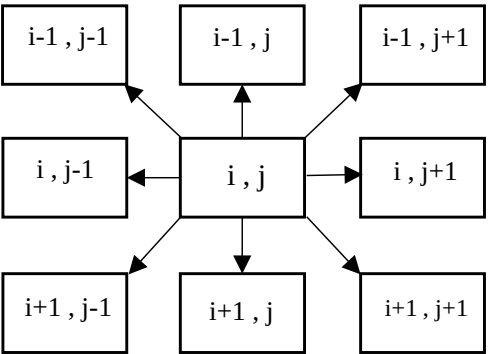


Figure 3. Schematic of ant colony foraging direction
图 3. 蚁群觅食行进方向示意图

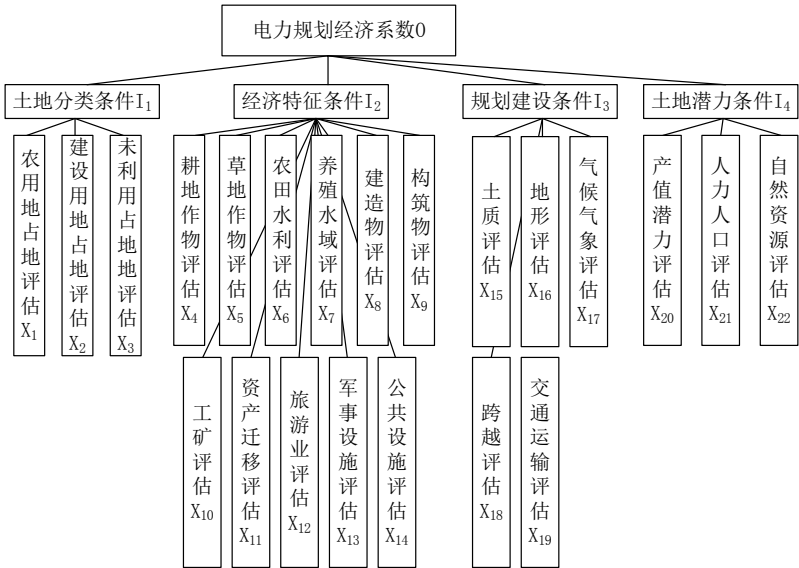


Figure 4. Structure of economic coefficient evaluation system model
图 4. 经济系数评估体系模型结构

权向量 α_i 和 β_i 分别为造价层和指标层的权值向量, 分别代表不同造价支出和指标评估结果对电力线路规划的重要层度, 权值越高表示支出对电力规划越重要。

指标层(X)的评估规则如下:

$$\begin{cases} X_i = S_o \times P_i \times \beta_i & i = 1, 2, 3 \\ X_j = X_j = S_n \times P_j \times \beta_j & j = 4, \dots, 14 \\ X_k = \sum (T_k \times n) \times \beta_k & k = 15, \dots, 18 \\ X_{19} = (d_{\min r} \times P_c + V_a) \times \beta_{19} \\ X_{20} = ((d_{\min b} + d_{\min i}) \times \zeta + \gamma_f) \times \beta_{20} \\ X_n = \rho_n \times \beta_n & n = 21, 22 \end{cases} \quad (4)$$

其中 $S_o = S_{\text{safety}} + S_{\text{tower}}$ 表示线路规划的占用土地和空间面积, S_{safety} 和 S_{tower} 分别代表线路的安全面积和塔基面积; P_i 和 P_j 分别为政策下不同土地分类和经济特征的补偿标准; T_k 为不同网格单元建设特征带来的额外建设支出, n 为建设特征量化值; $d_{\min r}$ 、 $d_{\min b}$ 和 $d_{\min i}$ 分别代表规划占用网格单元距离公路、商业点和工业点的最小距离; P_c 表示网格单元非公路运输成本; V_a 表示平均正常公路运输成本; ρ_n 为人口和自然资源密度潜力系数。

3.2. 规划区域经济系数网格模型

如图 5 所示, 本文以江西省九江市浔阳区和庐山区交界处区域为例, 该区域内从九江电厂到 110 kV 油厂变电站原有 110 kV 线路一条。基于网格化的思想, 可将该区域网格化为 i 行和 j 列的矩阵网格。浔阳区与庐山区相应的经济系数评估体系指标层(X')数据详见表 1。由于目标规划区域存在电厂等重要设施, 因此本文在如下假设条件下对目标区域进行系数网格模型建模。

- 1) 本文建模只针对 110 kV 电压等级;
- 2) 假设发电厂为不可规划区域;
- 3) 线路规划过程中不考虑负荷, 导线材料和杆塔类型问题。

因此, 利用系数层(O)对矩阵网格进行建模, 可得到目标规划区域的经济系数矩阵 A , 表示为:



Figure 5. Geographic map of area to be planned

图 5. 待规划区域地理图

Table 1. The index layer data in the economic coefficient evaluation model of Baishui Lake, Jinjiapo and Wuli Street
表 1. 九江市白水湖、金鸡坡与五里街经济系数评估模型指标层数据

费用项目	地形	白水湖街办	五里街办	金鸡坡街办	权系数
土地占用分类补偿费用 (元/亩)	农用地	48,338	41,699	40,022	1.0
	建设用地	80,482	76,130	72,162	1.2
	未利用地	20,983	19,880	19,671	0.9
	养殖	3156	2784	3017	0.7
	草地	2119	1978	1951	0.75
	农田水利	2717	2519	2700	0.67
	构筑物	4135	3918	4011	0.67
	工矿	17,189	20,178	18,197	1.8
土地特征补偿费用 元/平方米	填湖	120,066 元/亩	120,066 元/亩	120,066 元/亩	0.8
	建造物	1600	1600	1600	0.78
	耕地	2118	1914	2000	0.7
	林地	1817	1608	1704	1.35
	公共设施	7179	6864	6799	0.2
	军事设施	10,147	9871	11,048	1.7
	旅游	37,148	41,578	35,347	0.5
	土质	5154	4876	4925	0.9
规划建设费用 元/平方米	地形	2178	1904	2017	0.7
	交通(元/米)	1780	1517	1873	0.66
	跨越	32,000 元/处	32,000 元/处	32,000 元/处	0.7
	气象	6473	5917	6198	0.45
	产值	17,814	16,745	19,374	1.5
土地潜力经济补偿费用	人力人口	77,154	80,074	79,162	1.45
	自然资源	147,830	117,986	151,725	1.2

$$A_{20 \times 46} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1609 & 332 & 10.48 & 10.48 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 278 & 2.08 & 2.1 & 2.1 & 0.1 \\ 1.27 & 1.27 & 0.1 & 1.22 & \cdots & 3.1 & 2.05 & 2.08 & 2.1 & 2.1 \\ 0 & 0 & 0 & 3.602 & \cdots & 0.58 & 3.1 & 2.05 & 2.08 & 2.1 \\ 0 & 0 & 0 & 3.602 & \cdots & 0.61 & 0.58 & 3.1 & 0.25 & 0.28 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 2.43 & 2.43 & 0.72 & 52.43 & \cdots & 0.6 & 0.6 & 3 & 0.6 & 0.63 \\ 2.43 & 2.43 & 2.43 & 0.72 & \cdots & 0.6 & 0.6 & 3 & 0.6 & 0.63 \\ 2.43 & 2.43 & 2.43 & 0.72 & \cdots & 0.6 & 0.6 & 0.6 & 0.6 & 0.63 \\ 2.43 & 2.43 & 2.43 & 0.72 & \cdots & 0.6 & 0.6 & 0.6 & 0.6 & 0.63 \\ 2.43 & 2.43 & 2.43 & 0.72 & \cdots & 0.6 & 0.6 & 0.6 & 0.6 & 0.6 \end{bmatrix} \quad (5)$$

4. 改进型蚁群算法在电力线路规划中的应用

4.1. 蚂蚁觅食行进方向的改进

考虑到导线、架空地线和塔身风压的水平力，以及角度荷载和导线的不平衡张力，电力线路在转向

处需要架设转角塔，且转角塔的额定转角应大于等于线路转角。因此，将改进型蚁群算法应用于电力线路规划时，应结合蚂蚁的前进方向改进蚂蚁的觅食行进方向。如图 6 所示，假设蚂蚁前进方向是从点 $(i, j-1)$ 到点 (i, j) ，已知转角塔的额定转角范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$ ，为保证线路转角符合转角塔规格要求，点 (i, j) 下一步实际可选的栅格只有 5 个。

4.2. 路径优化规则

规划建设经济性的关键在于寻找规划线路总长度和经济系数总和的最优值。因此可以采用蚁群算法进行求解，但是传统的蚁群算法无法达到兼顾线路最优和规划建设经济系数最优，并且为了避免算法陷入局部最优，本文针对规划区域经济系数网格模型的特点，考虑从选择路径的概率公式着手改进算法。对位于点 (i, j) 处的蚂蚁 m ，按公式(6)选择下个可行点 (u, v) 。式中蚂蚁 m 下一步的可到达点集表示为：

$$P_{ijuv}^m(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{ijuv}^\alpha(t) \eta_{ijuv}^\beta(t) \psi_{ijuv}^\gamma(t)}{\sum_{(x,y) \in allowed_m} \tau_{ijxy}^\alpha(t) \eta_{ijxy}^\beta(t) \psi_{ijxy}^\gamma(t)}, & (u,v) \in allowed_m \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (6)$$

$$allowed_m = (0, 1, \dots, n) - tabu_m \quad (7)$$

其中 $tabu_m$ 为禁忌表，记录了在 t 时刻蚂蚁 m 已经走过的栅格，不允许蚂蚁在本次循环中再经过这些栅格。 τ_{ijxy} 表示点 (i, j) 与点 (u, v) 之间的信息素浓度，其初始值为一常数，后随程序运行而逐渐改变； η_{ijxy} 为启发式因子，表示蚂蚁从点 (i, j) 转移到点 (u, v) 的期望程度，通常取点 (i, j) 与点 (u, v) 之间距离的倒数； ψ_{ijuv} 表示仅考虑周围各栅格权值的情况下，从点 (i, j) 转移到点 (u, v) 的期望程度，其计算公式如下：

$$\psi_{ijuv}(t) = 1 - \frac{\theta_{uv}}{\sum_{(x,y) \in allowed_m} \theta_{xy}} \quad (8)$$

式中 θ_{uv} 表示栅格 (u, v) 的权值。 α 、 β 、 γ 分别表示信息素、启发式因子和网格经济系数的重要程度，且 α 、 β 和 γ 均大于 0。

4.3. 可行解的构建

算法生成的每只蚂蚁按公式(6)确定的概率在网格模型当中漫游，对任意一只蚂蚁，定义如下的生命周期：

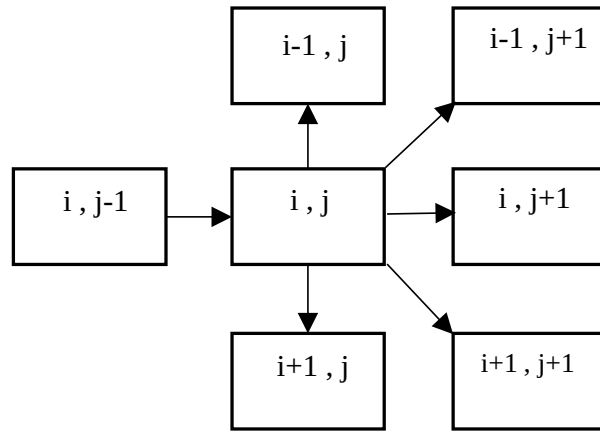


Figure 6. Schematic of improved ant colony foraging direction
图 6. 改进的蚁群觅食行进方向

- 1) 蚂蚁走到死路, 已经无法向任意一个方向移动, 则将该蚂蚁从系统中删除;
- 2) 蚂蚁走到目标点, 此时该蚂蚁走过的路径为一条可行路径。

因此, 从蚁群的产生到生命周期结束, 将会有一部分蚂蚁找到问题的可行解, 且可行解的数量小于或等于蚂蚁总数。

4.4. 信息素更新规则

在迭代过程中, 如果某只蚂蚁走到目标点, 生成了一条可行路径, 则算出这只蚂蚁所走路径的总架设费用, 更新相关变量。每次迭代结束后, 比较本次迭代所有可行路径的总架设费用, 得到最优路径和最差路径。信息素的更新采用全局更新策略, 即当全部蚂蚁结束一次路径寻优后, 在满足要求的路径上按公式(9)更新信息素浓度, 并将信息素的正反馈保持到以后的迭代中去。在以后的迭代中, 只有当算法新生成的路径满足信息素更新条件, 才会再次更新信息素。

传统蚁群算法中, 最差路径的蚂蚁释放的信息素会影响算法的求解能力, 为了提高算法的收敛速度, 同时避免算法陷入局部最优, 考虑在增加最优路径信息素浓度的基础上削弱最差路径的信息素浓度, 使最优路径和最差路径上的信息素浓度差异进一步增大, 促使算法快速收敛。

$$\tau(t+1) = (1-\rho) * \tau(t) + \Delta\tau_{best}(t) - \Delta\tau_{worst}(t), \rho \in (0,1) \quad (9)$$

其中

$$\Delta\tau_{best}(t) = \begin{cases} Q_1 \times (V_{best} - V_1) / V_{best} \\ 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$\Delta\tau_{worst}(t) = \begin{cases} Q_2 / V_2 \\ 0 \end{cases} \quad (11)$$

公式(10)、(11)中 V_1 为本次迭代最少架设费用, V_{best} 为当前最少架设费用, V_2 为本次迭代最多架设费用; Q_1 、 Q_2 为信息素改变系数; ρ 为信息素蒸发系数。

公式(9)至公式(11)能够根据可行路径的情况动态地调整路径上的信息素。当一条更优路径出现后, V_{best} 和 V_1 会有一个差值, 差值越大, 更优路径增加的信息素也越多, 蚁群就能更快收敛于更优路径上。随着迭代次数增加, 算法逐渐收敛, V_{best} 和 V_1 的差值会逐渐减小, 此时, 公式(10)能够相应减小信息素增量直至 0。这种方法能够使更优路径上的信息素浓度更加突出, 使更优路径的变化快速反映在信息素的分布上。

但上述信息素更新策略会带来以前走过的路径再被选择的可能性过大的问题, 从而影响算法的全局搜索能力; 当算法应用于大规模网格模型时, 由于信息素挥发系数 ρ 的存在, 从未被搜索到的路径上信息素会逐渐减小至接近 0, 也会降低算法全局搜索能力。为避免过早收敛, 本算法采用 Max-Min Ant System 原理, 将每条路径信息素浓度的范围限制在 $[\tau_{min}, \tau_{max}]$ 之间, 超出该范围的值被强制设定为 τ_{min} 或 τ_{max} , 避免了某些路径的信息素增长过快造成算法出现停滞现象。

图 7 为改进型蚁群算法在电力线路规划中的算法示意图, 其中 K 为迭代次数, m 为蚂蚁只数。

5. 仿真与算法实现

5.1. MATLAB 仿真计算

为验证本算法的有效性, 使用 MATLAB 对本算法进行了仿真计算。如图 8 所示, 将目标规划区域的经济系数矩阵模型在 MATLAB 中进行建模。

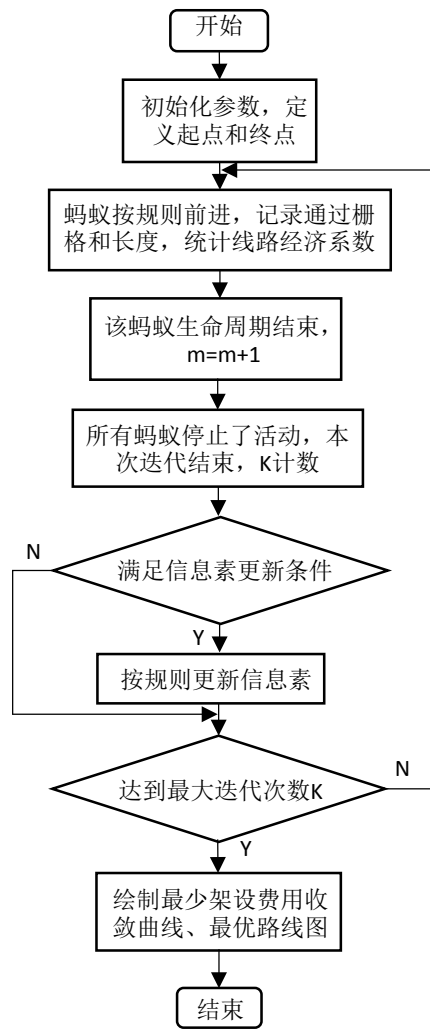


Figure 7. Schematic of improved ant colony optimization
图 7. 改进型蚁群算法示意图

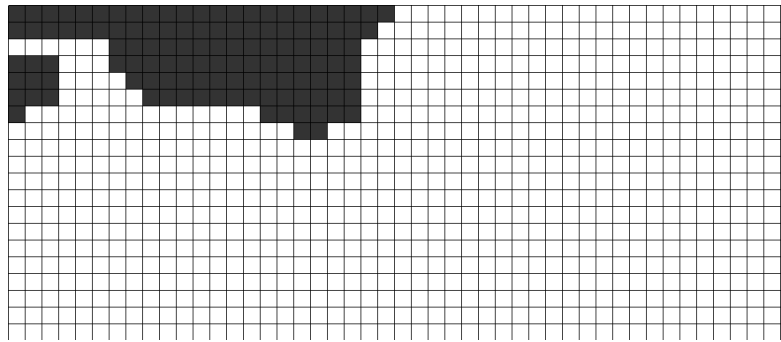


Figure 8. Grid model of area to be planned
图 8. 待规划区域网格模型

图中黑色网格代表不可规划区域，白色网格代表可规划路径区域。设置蚂蚁数量 $m = 20 + 46$ 只，各参数设定为 $\alpha = 2$, $\beta = 18$, $\gamma = 10$, $\rho = 0.3$, $Q_1 = 1$, $Q_2 = 1$, $\tau_{\min} = 0.1$, $\tau_{\max} = (20 + 46)/2$, 初始化 $\tau = (20 + 46)/4$, 最大迭代次数 $K = 100$ 。仿真结果与算法收敛曲线如图 9 和图 10 所示。

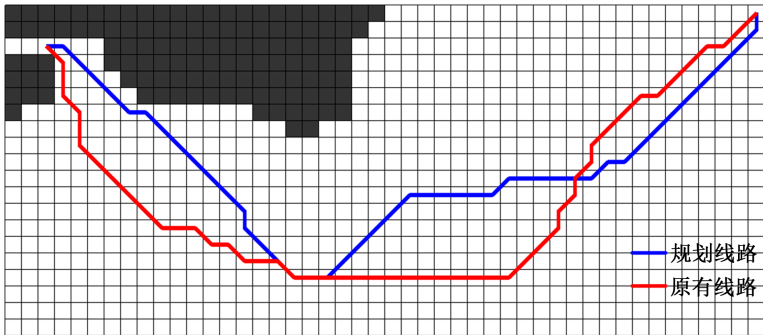


Figure 9. MATLAB simulation result
图 9. MATLAB 仿真结果

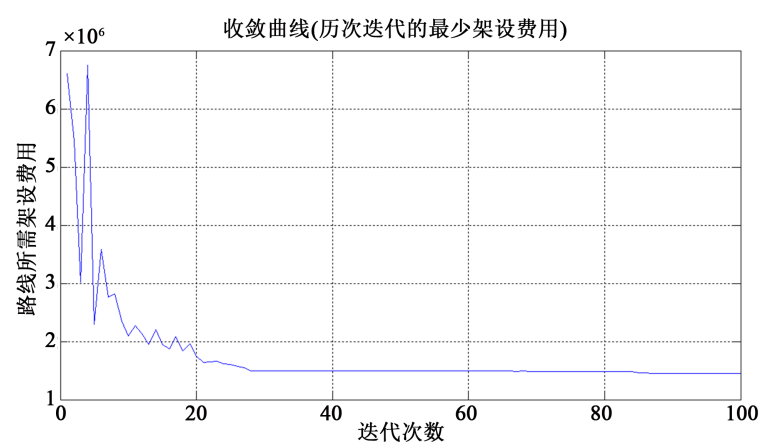


Figure 10. Convergence rate of improved ant colony optimization
图 10. 改进型蚁群算法收敛图

5.2. 实验验证

本文采用基于 GIS 的电力规划操作平台对算法规划线路和原有线路进行了对比实验。该区域原有线路为九江电厂到油厂变电站的 110 kV 浔油 I 线,为满足算法的建模要求,对原有线路进行了栅格化近似。考虑到建模所能获取的数据不足造成的误差,取原有线路造价的 90%为算法规划线路架设费用的最大允许值,即架设费用低于 158 万元的线路才被视为合格。

如图 11 所示,本算法规划线路能够综合考虑线路长度、地形地貌、城镇分布等因素,成功避开了鱼塘、农田、湖泊、居民区和大型工矿企业及重要设施,尽量靠近待规划区域中现有公路,改善交通条件,方便施工和运行,成功选取了满足建设经济性要求的路线,与仿真计算结果一致。

如图 12 为 100 次实验的线路总架设费用统计结果,从图中可以看出,对九江地区待规划区域的多次实验显示,本算法是一种能够应用于电力线路规划的有效算法,算法的合格率约为 93%。

6. 结论

本文提出了一种应用于电力线路规划的改进蚁群算法,并在基于经济系数的网格模型中实现了电力线路规划优化。利用九江地区土地实际使用情况数据对待规划区域进行经济系数网格化建模,同时改进了算法中选择下一可行点的概率公式,实现了总架设费用最少化的路线寻优。仿真实验证明了本算法的有效性和可行性。



Figure 11. GIS-based experiment
图 11. 基于 GIS 的实验验证

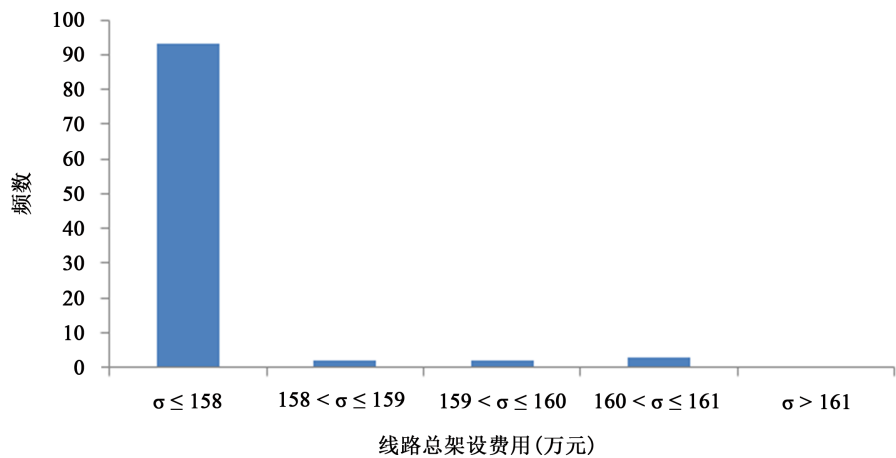


Figure 12. Experiment results of effectiveness of power line planning
图 12. 线路规划有效性实验结果

由于在网格化建模时所能获取的数据密度和权威性不足，本文的模型还有待改进，计算所得到的路线长度和费用与实际情况相比存在误差。在接下来的研究中，需要获取权威数据对目标区域进行精确建模，并研究算法在变电站和线路规划一体化优化中的应用。

参考文献 (References)

- [1] 魏小景, 嵇启春, 徐立先. 智能迷宫机器人系统设计与搜寻算法研究[J]. 现代电子技术, 2012, 35(24): 11-13.
- [2] 李晓光, 姚自强, 杨旭. 基于人工势场法的迷宫路径搜索算法设计[J]. 北京交通大学学报, 2014, 38(5): 27-32.
- [3] 赵娟平. 移动机器人路径规划的蚁群优化算法研究[D]: [博士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2011.
- [4] Pérez Cáceres, L., López-Ibáñez, M. and Stützle, T. (2015) Ant Colony Optimization on a Limited Budget of Evaluations. *Swarm Intelligence*, **9**, 103-124. <https://doi.org/10.1007/s11721-015-0106-x>
- [5] 柳长安, 鄢小虎, 刘春阳, 吴华. 基于改进蚁群算法的移动机器人动态路径规划方法[J]. 电子学报, 2011, 39(5): 1220-1224.
- [6] Xing, L.N., Rohlfshagen, P., Chen, Y.W., et al. (2011) A Hybrid Ant Colony Optimization Algorithm for the Extended Capacitated Arc Routing Problem. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, **41**, 1110-1123. <https://doi.org/10.1109/TSMCB.2011.2107899>
- [7] Liu, W., Cao, C., Zhang, Y., et al. (2011) Parameters Optimization of Synchronous Induction Coilgun Based on Ant Colony Algorithm. *IEEE Transactions on Plasma Science*, **39**, 100-104. <https://doi.org/10.1109/TPS.2010.2076315>

- [8] 罗元, 任爱珠. 基于蚁群算法的虚拟现实城市道路交通流模拟[J]. 计算机工程与设计, 2013, 34(2): 584-593.
- [9] Juang, C., Hung, C. and Hsu, C. (2014) Rule-Based Cooperative Continuous Ant Colony Optimization to Improve the Accuracy of Fuzzy System Design. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, **22**, 723-735. <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2013.2272480>
- [10] Liao, T., Socha, K., de Oca, M.A.M., et al. (2014) Ant Colony Optimization for Mixed-Variable Optimization Problems. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, **18**, 503-518. <https://doi.org/10.1109/TEVC.2013.2281531>
- [11] 张金亨. 城市网格基准地价评估方法[D]: [博士学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2011.
- [12] 谷淑娟, 高学东, 刘燕驰, 武森. 基于多尺度网格模型的物流配送中心选址候选集构建方法[J]. 控制与决策, 2011, 26(8): 1141-1146.
- [13] 张雅杰. 基于城市公共网格的土地信息应用研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2011.
- [14] Gao, H. and Zeng, W. (2015) Color Image Enhancement Based on Ant Colony Optimization Algorithm. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, **13**, 155-163. <https://doi.org/10.12928/telkomnika.v13i1.1274>
- [15] 王沛栋. 改进蚁群算法及在路径规划问题的应用研究[D]: [博士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [16] Ho, S.L., Yang, S., Bai, Y., et al. (2013) An Ant Colony Algorithm for Both Robust and Global Optimizations of Inverse Problems. *IEEE Transactions on Magnetics*, **49**, 2077-2080. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2013.2242860>

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: jee@hanspub.org