

基于混沌遗传算法和物元可拓的特高压输电线路评估

李昊伦, 段贺礼, 孙祺渊, 范金枝, 夏子杰, 赵康

长沙理工大学, 数学与统计学院, 湖南 长沙

收稿日期: 2023年6月17日; 录用日期: 2023年7月21日; 发布日期: 2023年7月28日

摘要

随着国民经济的增长, 中国用电需求不断增加。为减少输电线路的损耗, 节约宝贵的土地资源, 特高压网络不断发展。本文综合考虑中小尺度天气、地形高程障碍、输电塔布局等方面的因素, 运用混沌遗传算法进行初步线路规划, 再利用物元拓扑对初始最优线路进行综合效益评估, 以此得到预特高压输电线路的优化路径及其可行性分析, 同时添加时间因子针对面临工程延期等问题提供可靠保障, 为实际工程的实施提供有效参考。

关键词

特高压输电, 混沌遗传算法, 混沌扰动, 扰动因子, 综合效益评价, 时间因子, 改进物元可拓

Evaluation of UHV Transmission Lines Based on Chaotic Genetic Algorithm and Element Extension

Haolun Li, Heli Duan, Qiyuan Sun, Jinzhi Fan, Zijie Xia, Kang Zhao

School of Mathematics and Statistics, Changsha University of Science and Technology, Changsha Hunan

Received: Jun. 17th, 2023; accepted: Jul. 21st, 2023; published: Jul. 28th, 2023

Abstract

With the growth of the national economy, China's demand for electricity is increasing. In order to reduce the loss of transmission lines and save precious land resources, the UHV network is devel-

文章引用: 李昊伦, 段贺礼, 孙祺渊, 范金枝, 夏子杰, 赵康. 基于混沌遗传算法和物元可拓的特高压输电线路评估[J]. 理论数学, 2023, 13(7): 2111-2119. DOI: 10.12677/pm.2023.137218

oping continuously. This project considers the small and medium scale weather, terrain elevation obstacle, transmission tower layout factors, uses the chaotic genetic algorithm preliminary line planning, reuses the initial comprehensive benefit assessment of the optimal line, to get the UHV transmission line optimization path and feasibility analysis, and adds time factor for problems such as engineering delay, to provide effective reference for actual engineering implementation.

Keywords

UHV Transmission, Chaos Genetic Algorithm, Chaos Disturbance, Perturbation Factor, Comprehensive Benefit Evaluation, Time Factor, Improve the Topology of Objects

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

我国幅员辽阔，地形复杂。中国特高压输电项目实现了快速的发展，已经建成和正在建设的特高压电力线路已经超过 30 条，总长度超过 4 万公里，形成了我国特高压输电网络体系。在输电线路的路径规划中，要做到高效避让复杂地形，合理选择算法是重中之重。为了弥补目前研究特高压输电线路规划的整体评估性，本文首先利用混沌遗传算法，综合考虑地形高程障碍、地区生态状况、小范围气候影响等多种因素进行初步的线路规划，再基于贝叶斯最优最劣和改进物元可拓的方法对初步线路进行调度评估并加入时间因子提高方案整体的灵活性。

2. 初步线路规划

遗传算法在路径规划中应用广泛，且能在给定的一个大范围内快速求解目标函数，并在搜索过程中不断调整最优解的结构。但是在实际过程中，部分信息可能不能被利用，且在一定范围内经常会出现不必要的迭代步骤，不仅占用电脑内存，而且耗时耗力。有时收敛过早，有时收敛太晚，导致结果与预期值差距较大。为了克服该缺陷，本文引入混沌优化算法[1][2][3][4]，与遗传算法相结合来达到预期的目标。在同样的范围内，添加混沌变量进行寻优的结果是要比使用随机函数寻优的结果好，而且在很大程度上可以避免局部最优解的产生，混沌优化算法和遗传算法二者结合能够提高遗传算法的寻优速度和效果。

为了增加算法的搜索空间，提高算法的全局搜索能力，使算法更容易找到全局最优解，本文加入了混沌扰动和扰动因子。

初始化混沌扰动变量：先产生一个随机向量 $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ ， $\xi_i \in [0, 1]$ 。由 Logistic 映射，得到 mn 个混沌变量：

$$\xi_{i+1,j} = 4\xi_{ij}(1 - \xi_{ij}) \quad (1)$$

初始化混沌变量：

$$\eta(i, j) = \eta \min(j) + (\eta \max(j) - \eta \min(j)) \times \xi(i, j) \quad (2)$$

计算数据中将优化变量范围控制在 $[a_0, b_0]$ 内，优化结果为

$$\eta_{ij} = a_0 + (b_0 - a_0) \xi_{ij} \quad (3)$$

3. 线路综合效益评估

下面将对这些初步线路进行综合的效益评估并筛选出最优路径，另外为了增加输电项目的灵活性，本文添加时间因子，具体实施步骤如下：

3.1. 特高压输电线路综合效益指标构架

本文从以下四个方面对特高压输电线路设计一套较为全面的指标构架。

1) 输送效果。传统输电的大部分只考虑输电能力和输电效率，本文选取输电量、输电损耗率、能量不可利用率等指标对输电能力进行整体评价。

2) 经济效益。项目的盈利能力和偿还债务的能力是反映项目整体经济效益的两个重要的参考因素，因此本文综合选取偿债覆盖率和投资回收年限两个指标对特高压输电项目进行经济效益评估。

3) 环境效益。当前，加快建设特高压电网，充分发挥特高压远距离、大容量、低损耗、少占地的优势，建设“资源节约型、环境友好型”社会，促进经济、社会、环境可持续发展，已成为各方的广泛共识。因此本文综合考虑了清洁能源的输送。

4) 社会效益。由于特高压输电电网需要进行大规模的建设，因此前期需要投入大量的资金和人力、物力，对社会有着较大的影响，与此同时也存在着诸多不确定的因素。因此特高压输电工程项目的社会效益需要详细讨论，其中对人民生活效果的影响是一个重要的指标。

3.2. 特高压输电线路综合效益评价模型

3.2.1. 贝叶斯最优最劣方法

和传统的层次分析法相比较来说，最优最劣方法(best-worst method, BWM)更加便捷高效[5]。BWM确定权重的具体步骤如下：

1) 根据特高压输电线路综合效益评价指标 $\{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ ，来确定最优指标 d_B 和最劣指标 d_W 。

2) 将 d_B 与其他指标 d_j 进行两两之间的对比，用数字 1~9 来表示 d_B 与其他指标之间的重要程度，其中 1 表示 d_B 与 d_j 重要程度等同，9 表示 d_B 重要程度远高于 d_j ，最优比较向量可表示为：

$$A_B = (a_{B1}, a_{B2}, \dots, a_{Bn})$$

其中 $a_{Bj} (j=1, 2, \dots, n)$ 表示 d_B 相比于 d_j 的重要程度。

3) 将最劣指标 d_W 与其他指标 d_j 两两对比，其中 1 表示 d_j 与 d_W 重要程度等同，9 表示 d_j 重要程度远高于 d_W ，最劣比较向量可表示为：

$$A_W = (a_{1W}, a_{2W}, \dots, a_{nW})$$

其中 $a_{jW} (j=1, 2, \dots, n)$ 表示 d_j 相比于 d_W 的重要程度。

4) 确定最优指标权重值 $(w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*)$ ，当然这个过程也可以转化成最优化问题，即：

$$\begin{cases} \min \max_j \left\{ \left| \frac{w_B}{w_j} - a_{Bj} \right|, \left| \frac{w_j}{w_W} - a_{jW} \right| \right\} \\ \text{s.t.} \begin{cases} \sum_j w_j = 1 \\ w_j \geq 0, j=1, 2, \dots, n \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

将模型(4)转化为非线性约束优化问题，即：

$$\begin{cases} \min \sigma \\ \left| \frac{w_B}{w_j} - a_{Bj} \right| \leq \sigma \\ \left| \frac{w_j}{w_W} - a_{jW} \right| \leq \sigma \\ \sum_j w_j = 1 \\ w_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (5)$$

5) 根据式(5)计算一致性比率(concordance ratio, CR)。其中一致性比率越接近 0, 一致性越高。

$$\chi_{CR} = \sigma / \chi_{CI} \quad (6)$$

由于 BWM 在多个赋权情况下往往不能很好地解决, 所以对这一方法进行了改进, 将贝叶斯方法与 BWM 进行结合[6], 进而有了 BBWM 方法来解决多权重问题。

3.2.2. 改进物元可拓方法步骤

步骤一: 设置经典域、节域和待评物元。经典域 R_j 为:

$$R_j = (P_j, D_j, G_{ij}) = \begin{bmatrix} P_j & d_1 & g_{1j} \\ & d_2 & g_{2j} \\ & \vdots & \vdots \\ & d_n & g_{nj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_j & d_1 & \langle a_{1j}, b_{1j} \rangle \\ & d_2 & \langle a_{2j}, b_{2j} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & d_n & \langle a_{nj}, b_{nj} \rangle \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中 P_j 表示第 j 个评价等级, $\{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ 表示 P_j 的特征, $\{g_1, g_2, \dots, g_n\}$ 表示 P_j 的经典域, $\langle a_{ij}, b_{ij} \rangle$ 分别表示 g_{ij} 的上下界。节域 R_p 为:

$$R_p = (P, D_i, G_{ij}) = \begin{bmatrix} P_j & d_1 & g_{1p} \\ & d_2 & g_{2p} \\ & \vdots & \vdots \\ & d_n & g_{np} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_j & d_1 & \langle a_{1p}, b_{1p} \rangle \\ & d_2 & \langle a_{2p}, b_{2p} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & d_n & \langle a_{np}, b_{np} \rangle \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中 P 表示全部评价等级, $\{g_{1p}, g_{2p}, \dots, g_{np}\}$ 分别为 P 对应 $\{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ 的取值范围, 即节域。

待评物元 R_0 为:

$$R_0 = (P_0, D_i, G_i) = \begin{bmatrix} P_0 & d_1 & g_1 \\ & d_2 & g_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & d_n & g_n \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中 $\{g_1, g_2, \dots, g_n\}$ 为 P_0 对应 $\{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ 的实测数据。

当评价指标实测数据超过节域范围时, 便无法通过关联函数计算其与各等级的关联数值。所以物元可拓法具有很大的局限性, 我们对其进行改进[7], 改进方式如步骤(2)所示。

步骤二: 规格化处理经典域和待评物元。

步骤三: 确定指标权重。根据前述的 BBWM 算法可以得到各个指标的权重大小。

步骤四: 建立贴进度函数并计算贴进度函数值。由于传统的物元可拓方法有可能造成信息损失等不可逆的后果, 导致项目整体的实施效果降低[8], 所以本文将利用贴合度原则来对物元可拓方法进行优化。规格化节域与待评物元的距离为:

$$D(g') = \left| g' - \frac{a'_{ij} + b'_{ij}}{2} \right| - \frac{b'_{ij} - a'_{ij}}{2} \quad (10)$$

其中 a, b 分别为规格化节域的左右端点值。非对称贴合度为:

$$K = 1 - \frac{1}{k(k+1)} \sum_{i=1}^n D w_i \quad (11)$$

其中 K 为贴合度, D 为距离, w_i 为权重。将上述两式结合便可得到待评物元与评价等级的贴合度为:

$$K_j(p_0) = 1 - \frac{1}{k(k+1)} \sum_{i=1}^n D_j(g_i) w_i(X) \quad (12)$$

其中 $K_j(p_0)$ 为待评物元与各个评价指标的贴合度, $w_i(X)$ 为各个指标的权重, $D_j(g_i)$ 为待评物元与各个指标的距离, k 为指标数量。

步骤五: 评定等级。 $K_j(p_0) = -\min\{K_j(p_0)\}, j=1,2,3,\dots,m$ 意味着待评物元 R_0 与等级 j' 更加接近。

经过这五个步骤可以对初步线路进一步的筛选从而在这个时段得到一个综合效益最好的特高压输电线路。

3.3. 添加时间因子

在实际情况中, 各个评定指标都会随时间进行一定的改变, 如果遇到突发情况例如恶劣气候、经济赤字等使得项目工程延期, 那么就会导致整体评估失效, 所以本文在实施混沌遗传算法与改进物元可拓方法的基础上添加时间因子以增加方案的灵活性与时效性, 具体步骤如下:

步骤一: 在已知特高压输电工程综合效益评价指标 (d_1, d_2, \dots, d_n) 的情况下将最优比较向量 A_B 与最劣比较向量 A_W 变化为关于时间 τ 的函数即:

$$A_B(\tau) = (a_{B1}(\tau), a_{B2}(\tau), \dots, a_{Bn}(\tau))$$

$$A_W(\tau) = (a_{W1}(\tau), a_{W2}(\tau), \dots, a_{Wn}(\tau))$$

步骤二: 进行前述的 BBWM 算法可以得到具备时间因子的规格化待评物元和经典域:

$$R'_j(\tau) = (P_j(\tau), D_i, G'_{ij}(\tau)) = \begin{bmatrix} P_j(\tau) & d_1 & g'_{1j}(\tau) \\ & d_2 & g'_{2j}(\tau) \\ & \vdots & \vdots \\ & d_n & g'_{nj}(\tau) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_j(\tau) & d_1 & \left\langle \frac{a_{1j}(\tau)}{b_{1p}(\tau)}, \frac{b_{1j}(\tau)}{b_{1p}(\tau)} \right\rangle \\ & d_2 & \left\langle \frac{a_{2j}(\tau)}{b_{2p}(\tau)}, \frac{b_{2j}(\tau)}{b_{2p}(\tau)} \right\rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & d_n & \left\langle \frac{a_{nj}(\tau)}{b_{np}(\tau)}, \frac{b_{nj}(\tau)}{b_{np}(\tau)} \right\rangle \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$R'_0(\tau) = (P_0(\tau), D_i, G'_i(\tau)) = \begin{bmatrix} P_0(\tau) & d_1 & \frac{g_1(\tau)}{b_{1p}(\tau)} \\ & d_2 & \frac{g_2(\tau)}{b_{2p}(\tau)} \\ & \vdots & \vdots \\ & d_n & \frac{g_n(\tau)}{b_{np}(\tau)} \end{bmatrix} \quad (15)$$

同时可以得到关于时间因子的贴合度：

$$K_j^*(\tau) = 1 - \frac{1}{k(k+1)} \sum_{i=1}^n D_j(\tau) w_i(\tau) \tag{16}$$

步骤三：进行时间剖分

分析各个评价指标近期随时间的波动状况并确定基准值 μ_i 和阈值 $M_i^{\tau_j}$ ，记 $\omega(t)$ 为 t 时刻实际值与基准值差的绝对值， $\varpi_i(\tau_j)$ 为所选时间区间内的 $\omega(t)$ 总和即：

$$\bar{\omega}(\tau) = \int_{t_1}^{t_2} \omega(t) dt \tag{17}$$

设 E 为全部满足 $\varpi_i(\tau_j) \leq M_i^{\tau_j}$ 的 τ_j 全体，记作 $E[\varpi_i(\tau_j) \leq M_i^{\tau_j}]$ ， $j=1,2,\dots,n'$ (n' 为所选的时间区间总数)，那么最终可以获得最佳时间区间为：

$$\tau^* = \inf_{j=1,2,\dots,n'} \left\{ mE[\varpi_i(\tau_j) \leq M_i^{\tau_j}] \right\} \tag{18}$$

步骤四：判定项目是否重新信息搜寻

由前述得知最佳时间区间后，若项目延期时长未超过区间 τ^* 则不需要重新搜寻信息，反之则需要重新搜寻各个指标信息再进行综合效益评价得到最优化方案。

4. 实证分析

本节以滨金直流工程为例，其综合效益评定为五个等级：1：差，2：较差，3：适中，4：较好，5：极好。

1) 设定经典域 classical field

综合效益评定包括定性分析和定量分析两方面，定量方面需要参考相关文献、国家指标及项目预期成果，定性方面需要咨询专业评定规则、进行实地考察并采取合理评估打分规则。

$$R_1 = \begin{bmatrix} P_1 & D_1 & <0,90> \\ & D_2 & <0,42> \\ & D_3 & <8,10> \\ & D_4 & <0.5,1> \\ & D_5 & <0,1> \\ & D_6 & <0,9> \end{bmatrix}, R_2 = \begin{bmatrix} P_2 & D_1 & <90,170> \\ & D_2 & <40,77> \\ & D_3 & <8,11> \\ & D_4 & <0.3,0.4> \\ & D_5 & <1,1.5> \\ & D_6 & <10,16> \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} P_3 & D_1 & <177,266> \\ & D_2 & <80,123> \\ & D_3 & <6,12> \\ & D_4 & <0.13,0.22> \\ & D_5 & <1.6,2> \\ & D_6 & <16,20> \end{bmatrix}, R_4 = \begin{bmatrix} P_4 & D_1 & <260,353> \\ & D_2 & <121,160> \\ & D_3 & <3.6,6> \\ & D_4 & <0.11,0.16> \\ & D_5 & <1.2,3.2> \\ & D_6 & <20,33> \end{bmatrix}, R_5 = \begin{bmatrix} P_5 & D_1 & <356,444> \\ & D_2 & <160,205> \\ & D_3 & <0,3.6> \\ & D_4 & <0,0.2> \\ & D_5 & <3,11> \\ & D_6 & <30,50> \end{bmatrix}$$

2) 设定节域和待评价物元

$$R_p = \begin{bmatrix} P & D_1 & <0,444> \\ & D_2 & <0,205> \\ & D_3 & <0,12> \\ & D_4 & <0,1> \\ & D_5 & <0,11> \\ & D_6 & <0,50> \end{bmatrix}, R_0 = \begin{bmatrix} P_0 & 178.33 \\ & 91.02 \\ & 4.5 \\ & 0.16 \\ & 0.56 \\ & 12.33 \end{bmatrix}$$

3) 规格化处理

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \begin{bmatrix} P_1 & D_1 & \langle 0,0.2 \rangle \\ & D_2 & \langle 0,0.2 \rangle \\ & D_3 & \langle 1,1.1 \rangle \\ & D_4 & \langle 0.3,1.1 \rangle \\ & D_5 & \langle 0,0.2 \rangle \\ & D_6 & \langle 0.6,1 \rangle \end{bmatrix}, \quad R_2 = \begin{bmatrix} P_2 & D_1 & \langle 0.2,0.5 \rangle \\ & D_2 & \langle 0.2,0.4 \rangle \\ & D_3 & \langle 0.8,0.9 \rangle \\ & D_4 & \langle 0.3,0.4 \rangle \\ & D_5 & \langle 0.1,0.13 \rangle \\ & D_6 & \langle 0.3,0.6 \rangle \end{bmatrix}, \\
 R_3 &= \begin{bmatrix} P_3 & D_1 & \langle 0.4,0.6 \rangle \\ & D_2 & \langle 0.4,0.6 \rangle \\ & D_3 & \langle 0.6,0.8 \rangle \\ & D_4 & \langle 0.16,0.2 \rangle \\ & D_5 & \langle 0.15,0.2 \rangle \\ & D_6 & \langle 0.2,0.3 \rangle \end{bmatrix}, \quad R_4 = \begin{bmatrix} P_4 & D_1 & \langle 0.6,0.9 \rangle \\ & D_2 & \langle 0.6,0.8 \rangle \\ & D_3 & \langle 0.4,0.6 \rangle \\ & D_4 & \langle 0.1,0.15 \rangle \\ & D_5 & \langle 0.2,0.3 \rangle \\ & D_6 & \langle 0.1,0.2 \rangle \end{bmatrix}, \\
 R_5 &= \begin{bmatrix} P_5 & D_1 & \langle 0.8,1 \rangle \\ & D_2 & \langle 0.8,1.1 \rangle \\ & D_3 & \langle 0,0.33 \rangle \\ & D_4 & \langle 0,0.1 \rangle \\ & D_5 & \langle 0.3,1 \rangle \\ & D_6 & \langle 0,0.1 \rangle \end{bmatrix}, \quad R_0 = \begin{bmatrix} P_0 & D_1 & 0.42 \\ & D_2 & 0.44 \\ & D_3 & 0.44 \\ & D_4 & 0.15 \\ & D_5 & 0.05 \\ & D_6 & 0.25 \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

4) 确定指标权重

根据多位专家意见, 确定综合效益评价指标体系, 其中最优与最劣指标如表 1 所示。

Table 1. The best and worst criteria determined by five invited experts
表 1. 五位专家确定的最优指标和最劣指标

专家号码	最优指标	最劣指标
1	C1	C6
2	C1	C6
3	C1	C5
4	C1	C5
5	C2	C5

在最优最劣指标基础上与其他指标进行对比, 形成最优最劣比较向量 A_{best}^k 和 A_{worst}^k 。
即:

$$A_{best}^{1:5} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 4 & 3 & 5 & 3 \\ 1 & 2 & 3 & 3 & 5 & 4 \\ 1 & 2 & 3 & 3 & 6 & 4 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 7 & 4 \\ 2 & 1 & 3 & 2 & 5 & 4 \end{bmatrix}, \quad A_{worst}^{1:5} = \begin{bmatrix} 8 & 7 & 5 & 6 & 4 & 6 \\ 7 & 7 & 6 & 5 & 4 & 5 \\ 8 & 7 & 6 & 6 & 3 & 5 \\ 8 & 7 & 6 & 5 & 2 & 5 \\ 8 & 8 & 6 & 7 & 5 & 4 \end{bmatrix}$$

以上共有五位专家决策。

由此算得综合权重 w ，结果如表 2 所示：

Table 2. Weights of each indicator
表 2. 各指标权重

指标	权重
C1	0.227
C2	0.203
C3	0.158
C4	0.163
C5	0.105
C6	0.144

其中输电量(C1)指标权重最高，输电损耗率(C2)和偿债覆盖率(C4)紧随其后，相比而言，对人民生活影响效果(C6)指标权重最低。

5) 计算贴进度及等级评定

$$K_1(p_0) = 1 - \frac{1}{6 \times (6+1)} \sum_{i=1}^6 D_j(g_i) w_i = 0.99915$$

$$K_2(p_0) = 1 - \frac{1}{6 \times (6+1)} \sum_{i=1}^6 D_j(g_i) w_i = 0.99816$$

$$K_3(p_0) = 1 - \frac{1}{6 \times (6+1)} \sum_{i=1}^6 D_j(g_i) w_i = 0.99933$$

$$K_4(p_0) = 1 - \frac{1}{6 \times (6+1)} \sum_{i=1}^6 D_j(g_i) w_i = 0.99869$$

$$K_5(p_0) = 1 - \frac{1}{6 \times (6+1)} \sum_{i=1}^6 D_j(g_i) w_i = 0.99918$$

式中： $K_1(p_0)$ ， $K_2(p_0)$ ， $K_3(p_0)$ ， $K_4(p_0)$ ， $K_5(p_0)$ 分别代表综合效益评估的 5 个等级从优到劣间的贴合度。根据贴合度结果可以看出，在宾金直流工程中， ± 800 kV 直流输电的综和效益较好。

5. 总结

当前，用电需求迅猛增长，为了给出更有效的特高压输电线路，本项目利用混沌遗传算法与改进的物元可拓方法得到了初步的较优方案，后面考虑到不可控因素的影响可能导致方案偏离目标，本文添加了时间因子来增加线路方案的时效性，从而在面临工程延期，资金紧缺等问题时，系统化模型能够进行合理的调整并提供更有效的方案。最终项目技术路线图如图 1 所示：

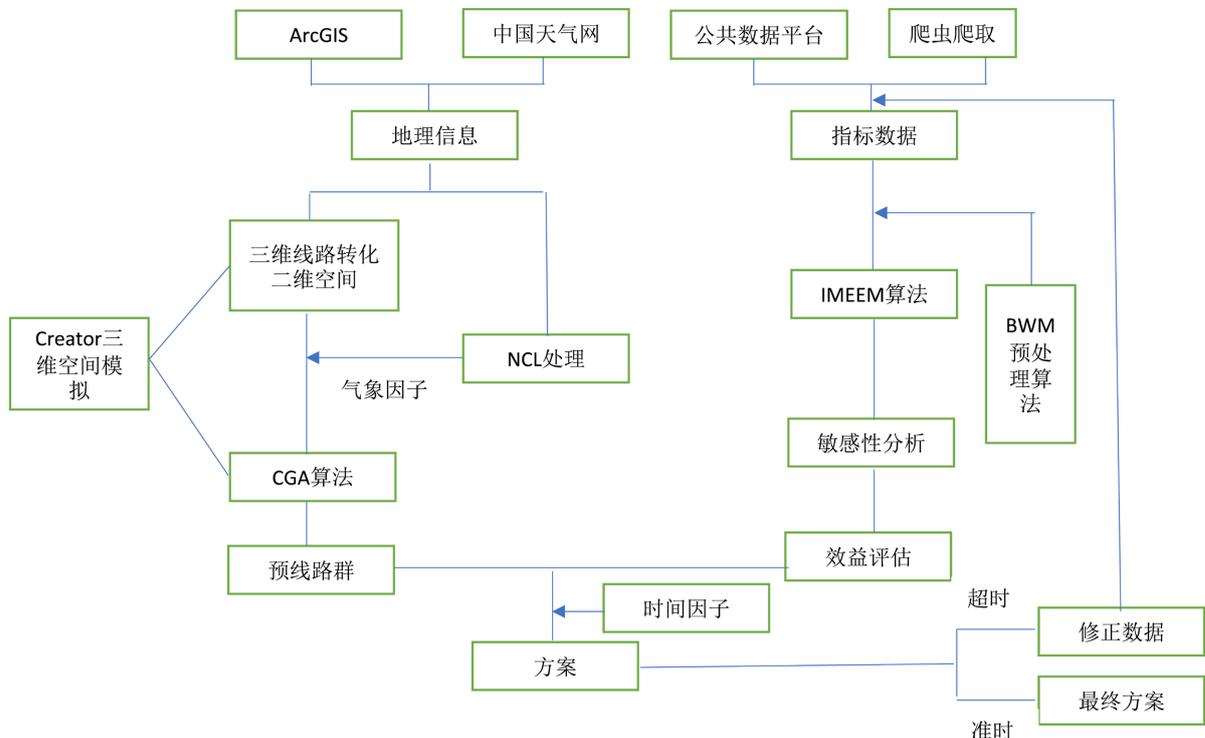


Figure 1. Final project roadmap
图 1. 最终项目路线图

在后面的深入研究中我们也将力求解决本项目的缺陷短期内进行合理的线路调度统筹与综合效益评估系统化问题。利用可变化性空间地理信息与价值系数面对社会实时性问题。

基金项目

长沙理工大学大学生创新训练项目“基于混沌遗传算法和物元可拓的特高压输电线路规划评估与优化”，湖南省普通高等学校教学改革研究一般项目(编号：HNJG-2021-1311)，长沙理工大学教学改革研究项目(编号：XJG21-050)。

参考文献

- [1] 姜文琦, 张华美, 王祥夫. 基于混沌遗传算法的二维平面阵研究[J]. 电子技术应用, 2023, 49(4): 68-72.
- [2] 岳茹. 一种结合混沌搜索的改进云自适应遗传算法[J]. 长春师范大学学报, 2023, 42(2): 60-64.
- [3] 易春磊, 柴良明, 王世友, 贺柱. 基于改进型混沌遗传算法的农村配电网无功补偿研究[J]. 电气自动化, 2022, 44(4): 40-43.
- [4] 姚俊峰, 梅炽, 彭小奇. 混沌遗传算法(CGA)的应用研究及其优化效率评价[J]. 自动化学报, 2002(6): 935-942.
- [5] Rezaei, J. (2015) Best-Worst Multi-Criteria Decision-Making Method. *Omega*, **53**, 49-57. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.11.009>
- [6] Mohammadi, M. and Rezaei, J. (2020) Bayesian Best-Worst Method: A Probabilistic Group Decision Making Model. *Omega*, **96**, 102075. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2019.06.001>
- [7] 李泓泽, 郭森, 唐辉, 等. 基于改进变权物元可拓模型的电能质量综合评价[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 653-659.
- [8] 陈耀辉, 孙春燕. 模糊综合评判法中的最大隶属原则有效度[J]. 重庆师范学院学报(自然科学版), 2001, 18(1): 45-47.