

[输电线路]

基于多目标优化的电网输电线路布局方法研究

文/杨小波
四川红华实业有限公司

提出一种基于多目标优化的输电线路布局方法。通过构建包含经济性、环境影响和技术性能等目标的多目标优化模型，采用帕累托前沿分析优化算法，对候选方案进行筛选与评估。研究不仅从理论上阐明了多目标优化模型的构建与求解过程，还结合案例对所提方法进行了验证，结果表明该方法在协调目标冲突、提高规划效率和方案科学性方面具有显著优势。

输电线路是电网的关键组成部分，其布局对电网的安全性、经济性以及环境友好性具有重要影响。然而，在实际的输电线路规划中，需要综合考虑多种相互制约的因素，如线路长度、建设成本、运行损耗、环境影响以及社会接受度等。这种多目标的特性使得输电线路布局问题成为一个复杂的优化问题。

传统的输电线路规划方法多以单一目标为导向，如最小化建设成本或最大化输电能力。然而，这些方法往往忽略了其他重要因素，难以满足现代电网规划对多目标平衡的需求。同时，随着可再生能源的大规模接入，土地资源的日益紧张以及公众环保意识的提高，电网规划面临的挑战日益加剧，亟需一种能够综合考虑多目标因素的系统化方法^[1]。

近年来，多目标优化技术在电网规划中逐渐受到关注。多目标优化不仅可以同时处理多个目标，还能为决策者提供一组帕累托最优解，从而在不同目标之间寻求平衡。这为输电线路布局提供了新的解决思路和技术支持。通过引入多目标优化模型，可以更系统地权衡建设成本、环境影响和运行效率等多方面因素，从而实现更优的布局方案。

本文旨在研究基于多目标优化的输电线路布局

方法，构建综合考虑经济性、环境友好性和运行可靠性的多目标优化模型，并结合智能优化算法对模型进行求解。通过对不同规划场景的案例验证，验证所提方法的有效性，为输电线路布局提供理论依据和技术支持。

建立多目标优化的电网输电线路布局目标函数

1. 目标函数设计

在电网输电线路布局中，常见的多目标优化目标函数可以综合考虑关键因素包括经济性（建设成本和运行成本）、环境影响（生态破坏和社会影响）以及技术性能（线路损耗和运行可靠性）^[2]。需要对以上目标进行目标函数的设计。首先确定整体目标函数，设优化变量为线路走廊的坐标 $X=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ，目标函数可表示为

$$\min F(X) = \{f_1(X), f_2(X), f_3(X)\} \quad (1)$$

经济性目标函数主要目的是实现最小化建设成本与运行成本。线路建设成本和运行成本主要由线路长度和导线规格决定，可定义为

$$f_1(X) = C_{\text{build}}(X) + C_{\text{run}}(X) \quad (2)$$

式中， $C_{\text{build}}(X)$ 代表线路建设成本，通常与线路长度 $L(X)$ 成正比，表示为 $C_{\text{build}}(X) = c_1 L(X)$ ，其中 c_1 为单位

长度的建设成本； $C_{\text{run}}(X)$ 代表运行成本，与线路损耗相关，可表示为 $C_{\text{run}}(X)=c_2 \cdot P_{\text{loss}}(X)$ ，其中 $P_{\text{loss}}(X)$ 为线路功率损耗。

环境影响目标函数主要目的是达到最小化生态与社会影响的效果。环境影响主要考虑沿线生态破坏、土地占用和对居民区的影响，函数表达式为

$$f_2(X) = \int_{\text{线路}} E(x) dx \quad (3)$$

式中， $E(x)$ 表示线路经过区域的环境敏感度函数，数值越高表示区域越敏感，如自然保护区、农田或居民区等。通过将敏感区域分配权重，可以对线路走廊进行优化。

技术性能目标函数的目标效果是达到最小化运行损耗与提升可靠性效果^[3]。技术性能目标函数主要考虑输电损耗和运行可靠性，函数表达式为

$$f_3(X) = P_{\text{loss}}(X) + R_{\text{failure}}(X) \quad (4)$$

式中， $P_{\text{loss}}(X)$ 代表输电线路的功率损耗，与线路长度 $L(X)$ 和负载电流有关，可表示为

$$P_{\text{loss}}(X) = I^2 R L(X) \quad (5)$$

式中， R 为单位长度线路的电阻。

$R_{\text{failure}}(X)$ 代表运行故障风险函数，可基于历史数据和区域条件建模。

2. 多目标优化模型

综合上述目标函数，可建立如下多目标优化模型

$$\min F(X) = \{f_1(X), f_2(X), f_3(X)\} \quad (6)$$

多目标优化模型存在三个约束条件，包括地理约束、技术约束和法规约束。地理约束是指线路应避免不可通行区域，如湖泊、河流和自然保护区等。技术约束是指满足输电能力和电气性能要求。法规约束是指符合当地法规对线路布局的要求，如与居民区的最小距离。

通过对目标函数采用帕累托最优解方法，可为电网输电线路布局提供一组优化方案，供决策者选择^[4]。

以非支配排序遗传算法II为求解策略，该算法是一种经典且高效的求解帕累托前沿的多目标优化方法。

首先初始化种群，随机生成初始种群 P_0 ，大小为 N 。每个个体 X 表示一种可能的输电线路布局方案。个体由设计变量（如线路路径的坐标点）组

成。其次计算目标函数值，对于每个个体 X ，计算所有目标函数值 $f_1(X), f_2(X), \dots, f_k(X)$ ，确定个体是否满足约束条件。若不满足，则施加惩罚。再次要将种群分为多个等级，第一等级包含所有非支配解，第二等级包含去除第一等级后剩余的非支配解，依次类推。在每个等级中，计算解的拥挤距离，按目标函数值对解排序。对每个目标函数，计算相邻解的距离。累计所有目标函数上的距离，得到个体的拥挤度。拥挤度大的个体优先保留，以保持解的多样性。然后合并种群并进行更新，将父代 P_t 和子代 Q_t 合并为 $R_t = P_t \cup Q_t$ 。对 R_t 进行非支配排序。选择前 N 个解作为下一代 P_{t+1} ，优先选择非支配等级低和拥挤度大的解。最后重复排序和合并种群，直到满足达到最大迭代次数 T_{max} 。帕累托前沿的收敛度和多样性满足预设标准。

多目标优化的电网输电线路布局规划

1. 问题描述与模型构建

首先确定问题特性，电网输电线路布局规划需要综合多个目标，如经济性、环境友好性和技术性能，问题与目标函数中的影响因素相同。

层次结构模型分为三个层次，分别是目标层、准则层和方案层。目标层代表电网输电线路的最优布局规划。准则层包括经济性、环境影响和技术性能。方案层代表候选线路布局方案。

构建一个判断矩阵，针对准则层和方案层的每一对元素，构建两两比较的判断矩阵，基于Saaty标度（1~9分制）进行评分，评分等级及含义见表1。

表1 Saaty标度含义图

评分	含义
1	两元素重要性相等
3	一元素稍微重要于另一元素
5	一元素明显重要于另一元素
7	一元素强烈重要于另一元素
9	一元素极端重要于另一元素
2、4、6、8	介于上述两种判断之间

2. 电网输电线路布局规划

首先对构建好的模型进行一致性检验。确保决策逻辑一致。计算一致性指标 CI

$$CI = \frac{\lambda_{\text{max}} - n}{n - 1} \quad (7)$$

其中 λ_{max} 为判断矩阵的最大特征值， n 为矩阵

阶数。

计算一致性比率CR

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (8)$$

CR 为随机一致性指标,依据表格取值。若 $CR < 1$,则矩阵一致性通过。

然后进行权重计算，对准则层和方案层的判断矩阵进行归一化，计算权重向量 W 。将目标层到方案层的权重通过层次逐级汇总，计算每个方案的综合得分

$$S_i = \sum_{j=1}^m W_j P_{ij} \quad (9)$$

式中, W_j 是准则 j 的权重; P_{ij} 是方案 i 在准则 j 下的得分。

3. 电网输电线路布局方案确定

首先完成数据准备工作。确定候选方案，基于初步设计生成多个线路方案（如不同路径或技术设计）。

然后确定准则层的指标数据, 获取候选方案的经济性、环境影响和技术性能数据。

再判断矩阵构建与计算。以三个候选方案为例，根据专家或数据分析，构建经济性、环境影响、技术性能的判断矩阵。对准则层（经济性、环境影响及技术性能）进行两两比较，确定重要性顺序。

之后进行权重与评分计算。对准则层和方案层矩阵进行归一化, 计算权重。使用综合权重公式计算每个方案的总得分。

最后确定最优方案。根据得分从高到低排列,选择综合得分最高的方案作为最优线路布局方案。

实验研究

确定候选方案为方案A、方案B和方案C。设定准则层权重中通过专家判断得出经济性（50%）、环境影响（30%）和技术性能（20%）。然后建立准则层判断矩阵（经济性vs环境影响vs技术性能）

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 4 \\ \frac{1}{2} & 1 & 3 \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{3} & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

建立方案层判断矩阵 (以经济性为例)

$$\begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 \\ \frac{1}{3} & 1 & 2 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

通过计算准则层权重综合得分, 方案A为0.78分, 方案B为0.65分, 方案C为0.60分。根据综合得分选择方案 A 作为最优线路布局方案。

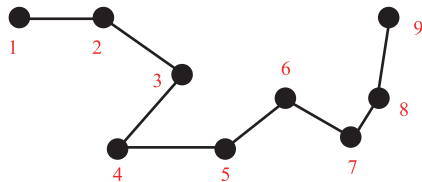


图1 电网输电线路布局方案A

如图1所示为本文多目标优化方法下的电网输电线路布局最佳方案。为了验证本文方法的有效性,在相同的准则层权重基础上进行文献[5]和文献[6]方法的实验。实验结果如图2所示。

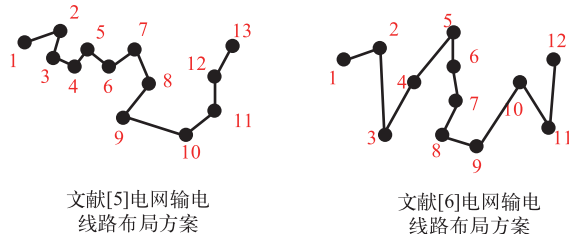


图2 文献[5]和文献[6]方法电网输电线路布局方案结果

根据图2与图1中的布局方案结果可知,本文方法下的电网输电线路只需要10个电网节点即可完成输电线路,且线路长度较短,而文献[5]和文献[6]方法中的电网输电线路布局方案中分别需要13和12个节点才能够完成输电线路的规划,且线路较长,无论是从经济的角度还是后期设备维护的角度,本文方法下的布局方案均具有一定的优势。本文方法下布局方案更佳的原因是,分别建设了经济目标函数、环境目标函数以及技术目标函数,三个函数同步规划,能够得到更优解。

本文还对三种方法的规划效率进行比较, 比较结果如图3所示。

根据图中的比较结果可知,本文方法的规划进程中获取最优解时间为42 s,文献[5]和文献[6]方法中获取最优解时间分别为61 s和70 s。由此可知,

本文方法在规划效率方面具有更佳的表现，主要是本文以非支配排序遗传算法II为求解策略，能够根据约束条件快速确定最优解。

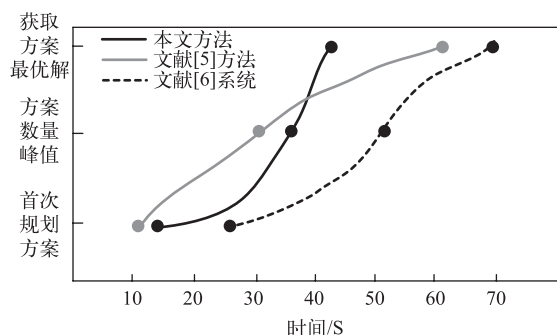


图3 三种方法的规划效率

结束语

电网输电线路的布局规划是一项复杂的多目标优化问题，涉及经济性、环境保护和技术性能等多方面因素。本文通过构建多目标优化模型，综合考虑了各目标的权衡关系，并引入先进的优化算法，如帕累托算法，提出了科学合理的输电线路布局规划方法。

研究表明，多目标优化方法能够有效协调不同目标之间的冲突，为电网输电线路的布局提供最优解。通过实际案例验证，所提出的方法具备较强的适用性和高效性，能够满足复杂条件下的电网规划需求。

未来，随着电力系统规模的扩大和可再生能源接入的增加，输电线路布局规划将面临更多挑战。

将人工智能、大数据和数字孪生技术与多目标优化方法结合，开展动态规划和实时优化研究，是实现智能电网布局规划的必然趋势。希望本文的研究能够为电网输电线路布局优化领域提供参考，为实现可持续电网建设和高效能源传输贡献力量。EA

(收稿日期：2025-07-25)

参考文献

- [1] 王明周. 多目标优化方法在架空输电线路规划中的应用研究[J]. 今日自动化, 2023(9): 125-127.
- [2] 李仕林, 方程, 赵明, 等. 基于动态风险评估的输电线路巡检计划优化研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(1): 119-124.
- [3] 程登峰, 林世忠, 尚文迪. 输电线路固定翼无人机多目标巡检线路优化[J]. 自动化仪表, 2023, 44(12): 21-25.
- [4] 王军燕, 高方景, 田磊, 等. 基于多目标进化算法的输电线路架空地线节能接地技术[J]. 光学与光电技术, 2022, 20(6): 117-124.
- [5] 朱险峰, 刘子伟, 申冉, 等. 基于HSA-FNSA混合算法的配电网群故障恢复多目标优化决策[J]. 智慧电力, 2023, 51(5): 23-29.
- [6] 龚邻晓, 李文辉, 徐军忠, 等. 基于多目标优化的高频DAB变换器混合多重移相控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(4): 1517-1533.

