引文格式：邹时容,卢有飞,梁雪青,等. 非欧氏度量空间下的选线优化设计方法[J]. 地理空间信息, 2024, 22(9): 57-60. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.09.012

# 非欧氏度量空间下的选线优化设计方法

邹时容[1]，卢有飞[1]，梁雪青[1]，卢宾宾[2*]
（1. 广州供电局有限公司，广东 广州 510620；2. 武汉大学 遥感信息工程学院，湖北 武汉 430079）

**摘　要：**作为城市基础设施之一，输电线路是城市治理中的关键环节。针对输电线路建设，综合考虑道路距离、变压器负载、故障率、施工成本等约束条件，设计了一种非欧氏度量空间下的优化线路设计方法。结合自适应邻近变压器点位搜索算法和基于近邻关系的点—线拓扑整合方法，实现了结合复杂时空要素的优化选线设计。以广州市海珠区、白云区为例，综合利用道路网络、变压器点位、维修驻点位置等多源数据，为区域内某一新建楼栋选择最佳供电变压器，并规划了输电线路，完整验证了该算法流程的可行性，为电力线路规划与建设提供了行之有效的决策支持工具。

**关键词：**路网距离；拓扑一致性；自适应搜索；多源数据；成本约束
**中图分类号：**TU994　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）09-0057-04

## Power Route Selection Optimization Method in Non-Euclidean Metric Space

ZOU Shirong[1], LU Youfei[1], LIANG Xueqing[1], LU Binbin[2]
(1. Guangzhou Power Supply Co., Ltd., Guangzhou 510620, China;
2. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** As one of the urban fundamental infrastructures, power transmission lines are essential in urban governance. For constructing power transmission lines, we proposed a multi-objective optimization line design method in a non-Euclidean metric space with concerning multiple constraints such as road distance, transformer load, failure rate and construction cost. Combining with the adaptive point searching algorithm of alternative transformer and point-line topology integration method based on nearest neighbor relation, we realized the optimal route selection design under the complex spatio-temporal constraints. Taking a case study in Haizhu District and Baiyun District of Guangzhou City, we used the road network data, transformer locations and maintenance station locations to optimize both the transformer and power transmission line of a specific building in the study area, which could verify the feasibility of method proposed in this paper, and provide an effective decision support tool for planning and constructing power transmission line.

**Key words:** road network distance, topology consistency, adaptive searching, multi-source data, cost constraint

电力线路是现代电网的核心组成部分[1]。随着经济的发展和城市的扩张，居民对电力的需求与日俱增，使得城市中心区的电力线路越发密集，然而城市中心区地理条件复杂且空间狭小，居民区、公园和其他特殊区域[2]等复杂地理区域特征给电力线路规划带来了许多困难。因此，电力行业亟需设计一种能降低线路建设成本、提高选线工作效率的电力线路优选方法[3-4]。计算机、GIS等信息技术在电力行业得到了越来越广泛的应用[4]，如利用GIS管理通信设备[5]、采集管理电力设施数据[6]、提升电力线路巡检效率[7]等。输电线路作为典型的人工构造物，与地理空间信息密切相关，其选线问题是GIS算法中最优线路规划的经典问题，需综合地理背景、环境信息与限制条件以解决规划设计[8]、路径优化[9]等问题。如何更好地利用GIS最优线路规划算法来实现实际电力线路规划选址仍是值得探究的问题。

传统最优输电线路规划算法多依赖于欧氏空间前提假设，未将路网拓扑信息考虑在内。由于输电线路建设过程中架设特定成本条件的限制，使用非欧氏度量空间下的路网距离对于实际应用更有意义[10]。鉴于此，本文以广州市为例，提出了一种非欧氏度量空间下的输电线路选线优化方法，利用路网、变压器点位、现有维修驻点位置等多源数据，综合考虑可行性、建设成本、维护效率等条件实现输电线路

收稿日期：2023-07-12。
项目来源：国家自然科学基金资助项目（42071368）。
第一作者简介：邹时容（1981—），硕士研究生，高级工程师，研究方向为电力大数据，E-mail：zousr@guangzhou.csg.cn。
通信作者：卢宾宾（1984—），博士，副教授，研究方向为空间统计、数据科学，E-mail：binbinlu@whu.edu.cn。

规划优化，为电网公司线路修建或改造提供重要的决策支持。

## 1 数据来源

1）城市道路数据。本文采用成都比格图数据处理有限公司提供的国产GIS基础软件BIGEMAP (http://www.bigemap.com/) 制作的广州市海珠区、白云区路网矢量数据，集合了百度、高德地图等多种在线地图资源，并提供了矢量地图数据下载功能。

2）变压器点位数据为现有变压器点位的点状矢量数据，包含变压器的地理位置、负载压力和故障率。负载压力数据根据变压器状态得出，单位为kW，反映当前变压器所承担的负载量；故障率根据过去半年内该变压器的故障次数得出，单位为次/半年。

3）维修驻点数据为当前维修驻点位置的矢量数据，包含现有维修驻点的地理空间位置。在后续选线优化过程中，需综合考虑线路故障的维修效率，可利用该数据进行辅助判断。

## 2 电力选线优化算法设计

为提供一种多维成本要素约束下的电网选线优化设计方法，本文以非欧氏空间下的旅行距离为核心指标，结合历史风险信息、施工成本等相关指标，形成以综合得分为评估标准的优化计算方法，最终达到输电线路优化选线的目的。

### 2.1 电力优化选线算法设计

本文方法遵循“电力选线沿路网（管网）成本最低”的前提假设，综合利用多种空间数据，根据熵权法提供的权重计算候选变压器的综合得分情况，算法流程见图1。首先对多源数据进行预处理，采用基于迭代计算的自适应点位搜索算法计算候选变压器点位；再将目标点位和候选变压器点位映射至数据集中的路网或管网数据，即可计算非欧氏空间下的旅行距离；然后综合利用旅行距离得分、历史风险得分、负载得分和成本得分等指标计算候选变压器的综合得分；最后挑选出最优的变压器，变压器与目标间的道路线路即为最优电力选线。

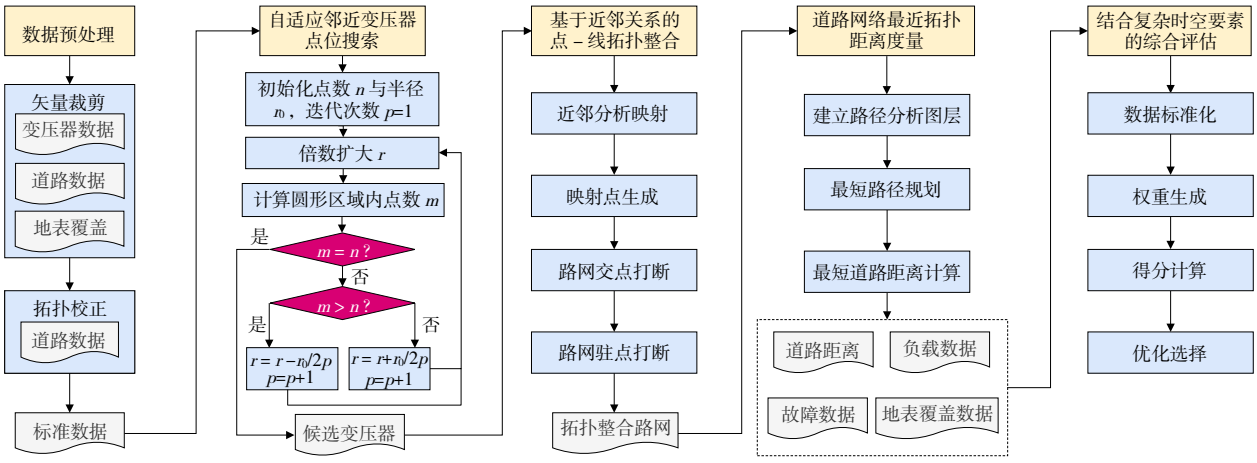



图1 电力优化选线方法流程图

### 2.2 电力选线优化算法流程

1）数据预处理包括矢量数据裁剪与网络拓扑检查两个部分。矢量数据裁剪的目的是根据目标区域边界裁剪道路网、变压器点位等空间要素，得到后续操作标准化数据。网络拓扑检查的目的是便于进行路径规划等操作，一般选择与道路网络相关的拓扑规则，如去掉悬挂点、伪节点等操作[11]。

2）自适应邻近变压器点位搜索。通常需从邻近的变压器设施中挑选出最合适的目标设施，但由于研究区内的变压器设施数量较大，若遍历所有变压器设施并计算其道路距离和总得分，计算量巨大且绝大多数变压器的结果是冗余的，因此根据经验，一般选择距离目标点位较近的变压器设施。基于上述假设，本文设计了基于点位搜索数量的自适应邻近点位搜索算法，可大大减少计算消耗和提升算法效率。该算法的主要步骤为：①初始化最大点数 $n$ 与初始半径 $r_0$，初始放缩次数 $p=1$；②以目标点为圆心、初始半径为搜索半径，计算落在搜索区域内的变压器数 $m$，递增搜索半径为 $2r_0$，直至 $m$ 超过 $n$ 为止；③若 $m>n$，则以 $r-r_0/(2p)$ 为新半径搜索，同时 $p=p+1$，若 $m<n$，则以 $r+r_0/(2p)$ 为新半径搜索，同时 $p=p+1$，若 $m=n$ 则停止搜索，将当前变压器位置记录为候选点位。

3）基于近邻关系的点—线拓扑整合。通常待通

电的目标位置与变压器点位均不会位于道路之上，因此为计算道路网络距离，需要基于近邻关系进行点—线拓扑整合，本文采用近邻分析方法将独立的目标点和变压器点通过最短距离映射到道路网络上[12]，即将点与线对象的最短距离点作为映射点，一般为点到线段的垂线或最邻近端点的距离。

4）道路网络距离计算。将待通电的目标位置、变压器点等空间点数据与道路网络数据建立完整的拓扑连接关系，再采用Igraph函数包中的Dijkstra算法工具计算道路网络距离[13]。

5）结合复杂时空要素的综合评估。综合考虑与选线相关的多种因素影响，构建目标函数，实现输电线路的最优规划。目标优化中涉及的要素包括道路网络距离、变压器负载、故障率、施工成本等（表1）。

表1　成本参数表

| 成本类型 | 变量名 | 单位 | 因素类型 | 描述 |
|---|---|---|---|---|
| 道路网络距离 | $D$ | m | 负向 | 基于最短路径规划的道路网络距离成本 |
| 变压器负载 | $L$ | kW | 负向 | 当前变压器所承担的负载量 |
| 故障率 | $E$ | 次/半年 | 负向 | 监测时段内变压器的故障次数 |
| 施工成本 | $P$ | 元 | 负向 | 当前变压器所处位置得出的人员、设备等施工成本 |

本文采用熵权法确定各要素在综合得分中的权重，即

$$\boldsymbol{W}=\begin{bmatrix} w_d \\ w_l \\ w_e \\ w_p \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中，$w_d$、$w_l$、$w_e$、$w_p$分别为道路网络距离、变压器负载、故障率和施工成本对应的权重。

为保证最终得分不受分项成本绝对值的影响，在得分计算前需进行标准化操作。本文采用的4个成本均为负向指标，其值越小，越有利于被选为目标变压器。根据熵权法原理，采用的标准化公式为：

$$Y_{ij}=\frac{\max X_i - X_{ij}}{\max X_i - \min X_i} \tag{2}$$

成本参数权重的计算公式为：

$$p_{ij}=\frac{Y_{ij}}{\sum_{i=1}^{n} Y_{ij}} \tag{3}$$

$$E_j=-\ln(n)^{-1}\sum_{i=1}^{n} p_{ij}\ln p_{ij} \tag{4}$$

$$w_j=\frac{1-E_j}{m-\sum_{j=1}^{m} E_j} \tag{5}$$

式中，$i$为候选点数量；$j$为成本参数数量。当$p_{ij}$=0时，$p_{ij}\ln p_{ij}$=0。

目标规划得分的计算公式为：

$$\min \text{Score}=\boldsymbol{Y}\times\boldsymbol{W} \tag{6}$$

$$\boldsymbol{Y}=[\boldsymbol{D}\ \boldsymbol{L}\ \boldsymbol{E}\ \boldsymbol{P}] \tag{7}$$

式中，$\boldsymbol{D}=\begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \cdots \\ d_{10} \end{bmatrix}$，$\boldsymbol{L}=\begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \cdots \\ l_{10} \end{bmatrix}$，$\boldsymbol{E}=\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \cdots \\ e_{10} \end{bmatrix}$，$\boldsymbol{P}=\begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \cdots \\ p_{10} \end{bmatrix}$为标准化后的成本数值。

通过在可行值域范围内进行优化搜索，使得目标规划得分达到最大，以获得最优的输电线路线路规划方案。

## 3　案例分析

本文以广州市海珠区、白云区为例，利用电力相关数据对本文提出的电力选线优化算法进行验证。

1）数据预处理。首先根据海珠区、白云区行政边界裁剪道路网、变压器点位等空间要素，然后对海珠区、白云区道路网络进行拓扑校正，数据处理结果见图2、3。

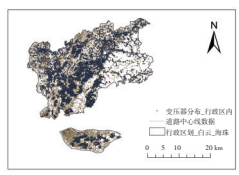



图2　空间要素裁剪后的标准数据

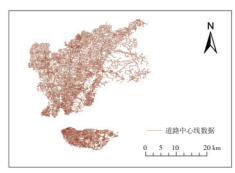



图3　拓扑校正后的道路中心线网络

审图号：粤S(2023)040号　　审图号：粤S(2023)040号

2）候选变压器选择。考虑到需要足够的候选点支撑多要素的综合评估，但候选点增多将使后续变压器距离过远，显著增加建设成本，因此在本案例中设置最大点数为10。利用本文设计的自适应邻近点位迭代算法，以目标点为中心，$r$为半径进行点位搜索，迭代后可绘制出一个圆形范围，该范围可覆盖目标点数的变压器设施，即候选变压器位置。优化搜索后的结果见图4，红色中心点为某新建楼栋，黑色点为变压器位置，以$r$为半径的圆包含了10个候选变压器。

3）点—线拓扑关系整合。通过邻近算法将候选变压器和目标楼栋映射至道路网络，便于后续规划最佳路径。映射过程的具体步骤包括：①利用距离关系找到变压器点和目标点在道路上的最邻近点（垂足或

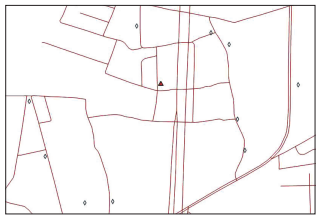
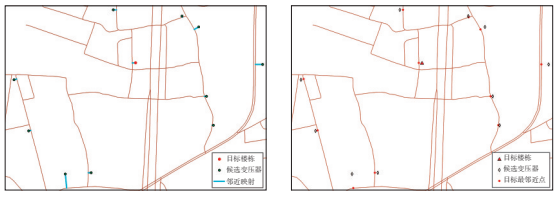


图4 新建楼栋位置与候选变压器点位示意图

端点）；②利用ID将点数据映射至道路网络上；③通过打断路段、创建新节点和更新道路网络拓扑等方式整合点—线拓扑关系。利用中垂线算法找到的道路最近点见图5 a，图5b中道路上的红色点为映射点。



a 邻近关系映射 b 最终点位映射

图5 点—线拓扑关系整合结果示意图

4）最优路径规划。利用Dijkstra算法计算得到每个候选变压器到目标楼栋的最优路径规划，即道路网络距离成本（表2），其中1号候选变压器道路网络距离成本最低。

表2 候选变压器距离成本

| 变压器编号 | 距离成本 | 变压器编号 | 距离成本 |
|---|---|---|---|
| 1 | 334.83 | 6 | 679.51 |
| 2 | 419.49 | 7 | 530.23 |
| 3 | 1 258.95 | 8 | 808.37 |
| 4 | 872.76 | 9 | 1 061.14 |
| 5 | 1 042.90 | 10 | 516.25 |

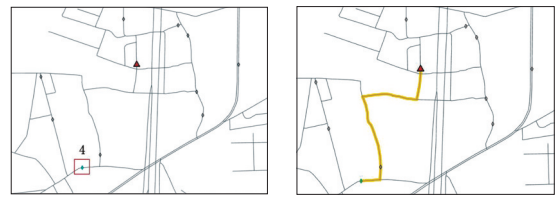
5）综合评估。本案例中各成本原始数据见表3，标准化后的结果见表4。通过熵权法计算得到的要素权重为[0.189, 0.297, 0.306, 0.208]；结合权重直接利用表中数据计算得到了最终得分。结果表明，4号变压器的得分最高。最终选择的候选变压器点位和最优电力选线规划见图6。

表3 成本原始数据

| 变压器编号 | 距离成本 | 变压器负载 | 故障率 | 施工成本 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 334.83 | 96.41 | 5 | 29 167 |
| 2 | 419.49 | 78.67 | 3 | 33 848 |
| 3 | 1 258.95 | 98.08 | 4 | 47 266 |
| 4 | 872.76 | 24.87 | 1 | 30 558 |
| 5 | 1 042.90 | 74.78 | 0 | 15 621 |
| 6 | 679.51 | 23.50 | 5 | 34 985 |
| 7 | 530.23 | 58.11 | 2 | 44 253 |
| 8 | 808.37 | 19.09 | 1 | 37 543 |
| 9 | 1 061.14 | 19.05 | 4 | 27 596 |
| 10 | 516.25 | 73.41 | 2 | 37 237 |

表4 得分计算过程

| 变压器编号 | *D* | *L* | *E* | *P* | 最终得分 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1.000 | 0.021 | 0.000 | 0.572 | 0.314 |
| 2 | 0.908 | 0.246 | 0.400 | 0.424 | 0.455 |
| 3 | 0.000 | 0.000 | 0.200 | 0.000 | 0.061 |
| 4 | 0.418 | 0.926 | 0.800 | 0.528 | 0.709 |
| 5 | 0.234 | 0.295 | 1.000 | 1.000 | 0.646 |
| 6 | 0.627 | 0.944 | 0.000 | 0.388 | 0.479 |
| 7 | 0.789 | 0.506 | 0.600 | 0.095 | 0.502 |
| 8 | 0.488 | 0.999 | 0.800 | 0.307 | 0.698 |
| 9 | 0.214 | 1.000 | 0.200 | 0.622 | 0.528 |
| 10 | 0.804 | 0.312 | 0.600 | 0.317 | 0.494 |



a 优选变压器 b 电力线路规划

图6 最终优选变压器与电力线路规划

## 4 结 语

在城市快速发展与扩张的过程中，电力基础设施的修建需求不断增加，输电线路的规划非常重要。本文设计了一种非欧氏度量空间下的电网优化选线设计方法，基于“电力选线沿路网（管网）成本最低”的前提假设，综合利用道路、变压器点位、维修驻点位置等多源数据，在道路距离、变压器负载、故障率、施工成本等条件约束下，提出了电力选线优化算法。基于广州市海珠区、白云区的路网数据和电力相关数据，利用自适应邻近变压器点位搜索算法和基于近邻关系的点—线拓扑整合方法实现了优化选线算法求解，为区域内某一新建楼栋选择了最佳供电变压器，并最终规划了输电线路，完整验证了本文算法的可行性。本文算法仍存在不足之处，主要体现在成本要素有限。受限于数据的可获取性，本文只考虑了路网距离、变压器负载、故障率、施工成本4种成本要素，能在一定程度上反映电力单位最关心的核心指标，但城市环境较复杂，且影响电力施工的要素众多，目标规划过程中纳入更多的成本要素能更加准确地计算得分，如地下管网数据等，从而规划出更符合设计与施工要求的电力线路。

## 参考文献

[1] 罗平霖. 导航软件在电力线路巡检中的选择与应用[J]. 电工技术,2020(13):52-54

（下转第79页）