

考虑双侧量测误差的配电网拓扑识别及参数联合估计方法

吴龙腾¹, 徐春华¹, 邱泽坚², 程涛², 陈凤超²

(1. 广东电网有限责任公司, 广东 广州 510000; 2. 广东电网有限责任公司东莞供电局, 广东 东莞 523000)

摘要: 配电网参数估计和拓扑识别是配电网规划、运行分析和安全控制的基础, 传统线性回归方法对量测数据误差或噪声数据具有较高要求, 只有在无噪声情况下, 估计才是准确的。然而实际输入测量值(如电压幅值和相位角)和输出测量值(如有功和无功功率)均存在噪声数据, 对于拓扑估计, 即使量测误差很小, 回归方法也无法得到准确拓扑。针对上述问题, 首先构建了配电网参数估计的基本模型, 并定量分析了量测误差对线路参数估计和拓扑识别的影响。在此基础上, 建立了考虑双侧量测误差的线路参数估计模型。针对其非凸导致的难以求解的问题, 基于拉格朗日函数进行等价转化, 得到易于求解的最小化瑞利熵问题。最后, 基于 IEEE 8 节点系统进行仿真分析, 并与传统线性回归、最小二乘法进行对比, 证明所提方法在量测误差达到 10% 时, 依然具有良好的估计精度。

关键词: 配电网; 拓扑识别; 参数估计; 双侧量测误差; 等价模型

Topology identification and joint parameter estimation of a distribution network considering bilateral measurement errors

WU Longteng¹, XU Chunhua¹, QIU Zejian², CHENG Tao², CHEN Fengchao²

(1. Guangdong Power Grid Corp, Guangzhou 510000, China; 2. Dongguan Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Dongguan 523000, China)

Abstract: Distribution network parameter estimation and topology identification are the basis of network planning, operational analysis and security control. The traditional linear regression method has high requirements for measurement data error or noise data, and the estimation is accurate only when there is no noise. However, the actual input measurement values (such as voltage amplitude and phase angle) and output measurement values (such as active and reactive power) have noise data. For topology estimation, even if the measurement error is small, the regression method cannot get accurate topology. Given this, the basic model of distribution network parameter estimation is constructed first, then the influence of measurement error on line parameter estimation and topology identification is quantitatively analyzed. A line parameter estimation model considering the bilateral measurement error is established. It is difficult to analyze the model because of its non-convexity, the minimum Rayleigh entropy problem is obtained by equivalent transformation based on the Lagrange function. Finally, simulation analysis based on the IEEE 8-node system is carried out, and compared with traditional linear regression and the least squares method. This proves that the proposed method has good estimation accuracy even when the measurement error reaches 10%.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52077196).

Key words: distribution network; topology identification; parameter estimation; bilateral measurement error; equivalent model

0 引言

在“双碳”目标背景下, 新型电力系统建设势在必行。预计 2050 年, 可再生能源和其他分布式能

源(distributed energy resources, DERs)将满足 50% 以上的电力需求^[1-3]。但分布式电源接入引起的运行不确定、双向流动等新特性将不利于配电网的安全稳定性^[4-9]。准确的配网拓扑和参数估计是安全分析的基础, 因此配电网的拓扑分析及参数估计依然是亟需解决的问题。

目前电网拓扑分析方法主要包括基于关联矩

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52077196); 中国南方电网公司科技项目资助(031900KK52200015)

阵^[10]或邻接阵的方法^[11-12]、基于网络拓扑追踪的方法^[13]、基于面向对象技术的方法^[17]，以及基于图论的方法^[15]。但上述方法依然存在以下3个问题：① 线路参数依赖规划文件和铭牌参数，具有时限性；② 当前配网量测手段和验证工具无法感知拓扑更新，需要人工维护节点和支路拓扑参数信息，工作量大，错误率高；③ 二次配电网中的拓扑信息缺失严重。现代配电网亟需新的工具和手段进行拓扑识别以及参数估计^[16-19]。

随着“新基建”战略的持续推进，配电网中先进计量基础设施(advanced metering infrastructures, AMIs)^[20]和微相量测量单元(micro-phasor measurement unit, μ PMU)^[21-22]的部署不断增多，为配网拓扑和线路参数估计提供了丰富的数据基础。文献[23-24]通过节点量测数据和线路量测数据估计单个线路参数，但要求每个节点和线路均配置传感器且要求配网拓扑已知，目前两者均无法满足；文献[25-28]不要求所有拓扑严格已知，但假定所有线路量测数据均是可用的，提出了基于数据驱动的线路参数估计方法，但实际配网量测数据存在较多误差和噪声，会造成较大误差；针对配网量测数据误差较大的问题，文献[29-30]考虑了量测输入和输出的误差，但模型只能估计两侧都有传感器的输电线路参数，无法估计配电网的拓扑结构，从而估计其他线路参数。通过研究可知，若要基于当前量测数据对配网参数全面感知，配网拓扑和参数估计必须同步进行，否则只能估计量测线路的参数。而目前研究大多要么不考虑噪声数据，要么无法联合估计。

针对上述问题，首先构建了配电网参数估计的基本模型，并定量分析了量测误差对线路参数估计和拓扑识别的影响。基于此建立了考虑双侧量测误差的线路参数估计模型，针对其非凸导致的难以求解的问题，基于拉格朗日函数进行等价转化，得到易于求解的最小化瑞利熵问题，易于求解。

1 传统配网拓扑识别与线路参数联合估计模型

假定节点有功注入功率为 p ，无功注入功率为 q ，节点电压负荷和相角分别为 $|v|$ 和 θ ，在不考虑噪声数据和量测误差的情况下，潮流方程^[31-32]可写为

$$\begin{cases} p_i = \sum_{k=1}^n |v_i| |v_k| (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) \\ q_i = \sum_{k=1}^n |v_i| |v_k| (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) \end{cases} \quad (1)$$

式中， G 和 B 为导纳矩阵的实部和虚部。

对线路参数进行估计的本质就是求解式(1)中的 G 和 B 。由于 G 和 B 为对称结构且配电网并联电阻可以忽略不计，则 G_{ik} 和 B_{ik} 可表示线路电导 g_j 和线路电纳 b_j 的函数^[33-34]，可写为

$$\begin{cases} \begin{cases} G_{ik} = G_{ki} = -g_j \\ B_{ik} = B_{ki} = -b_j \end{cases} & \text{分支 } j \text{ 连接母线 } i \text{ 和母线 } k \\ \begin{cases} G_{ii} = \sum_{\tau=1}^l g_{j_\tau} \\ B_{ii} = \sum_{\tau=1}^l b_{j_\tau} \end{cases} & \text{母线 } i \text{ 与母线 } k_\tau \text{ 连接，对应分支为 } j_\tau \end{cases} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)，可得

$$\begin{cases} p_i = \sum_{j=1}^m g_j |s_{ji}| \left(v_i^2 - |v_{u_{j1}}| |v_{u_{j2}}| \cos(s_{ji}(\theta_{u_{j1}} - \theta_{u_{j2}})) \right) - \\ \quad b_j |s_{ji}| |v_{u_{j1}}| |v_{u_{j2}}| \sin(s_{ji}(\theta_{u_{j1}} - \theta_{u_{j2}})) \\ q_i = \sum_{j=1}^m b_j |s_{ji}| \left(|v_{u_{j1}}| |v_{u_{j2}}| \cos(s_{ji}(\theta_{u_{j1}} - \theta_{u_{j2}})) - v_i^2 \right) - \\ \quad g_j |s_{ji}| |v_{u_{j1}}| |v_{u_{j2}}| \sin(s_{ji}(\theta_{u_{j1}} - \theta_{u_{j2}})) \end{cases} \quad (3)$$

式中： m 是分支数； $s_{ji} \in \{1, -1, 0\}$ ，表示关联关系，分别表示第 j 条分支离开、进入或与第 i 条母线没有物理连接； U 表示索引矩阵，其中 u_{j1} 和 u_{j2} 是第 j 分支的起始母线编号和结束母线编号。

由式(3)可知，节点注入功率与待估计参数 g 和 b 呈线性关系，可推导得到：

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} &= A \begin{bmatrix} g \\ b \end{bmatrix} \Leftrightarrow y = Ax \\ x &= \begin{bmatrix} g \\ b \end{bmatrix}, y = \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

式中， A 为系数矩阵，可表示为

$$A = \begin{bmatrix} M & N \\ N & -M \end{bmatrix} \quad (5)$$

M 、 N 的元素为

$$\begin{cases} m_{ij} = |s_{ji}| \left(v_i^2 - |v_{u_{j1}}| |v_{u_{j2}}| \cos(s_{ji}(\theta_{u_{j1}} - \theta_{u_{j2}})) \right) \\ n_{ij} = -|s_{ji}| |v_{u_{j1}}| |v_{u_{j2}}| \sin(s_{ji}(\theta_{u_{j1}} - \theta_{u_{j2}})) \end{cases} \quad (6)$$

根据式(4)可知，基于数据驱动的配网线路参数和拓扑联合估计可表述为：已知节点注入功率 p 和

q , 以及根据运行方式得到的 A , 估计 g 和 b 的最佳值; 然后根据估计的线路参数确定配网拓扑结构。

在不丧失一般性的情况下, 使用 A 和 y 来简洁地表示上下文中所有历史数据的集合:

$$\begin{cases} A = [A_1; \dots; A_T] \\ y = [y_1; \dots; y_T] \end{cases} \quad (7)$$

当无误差时, A 、 y 完全符合潮流方程(4), 因此, 通过求解式(4)中的线性方程, 可得线路参数 g 和 b 。

由式(4)可知, 若量测数据均是无差的, 即 y 和 A 的值均为真实值, 那么只要将式(7)所示的量测值代入式(4), 即可准确求解线性方式(4)的解, 求出线路参数 g 和 b 。

2 基于误差模型的线路参数估计

第1节潮流方程中并没有考虑量测误差或噪声数据, 然而在实际应用中, 测量误差是不可避免地, 本节首先分析量测误差对参数估计和拓扑识别的影响, 然后提出了考虑测量误差的线路参数估计方法。

2.1 量测误差对参数估计和拓扑识别的影响

1) 理论分析

由式(4)可以看出, 针对任意一次量测, 当 y 增加时, x 的值增加, 当 A 的值减小时, x 的值减小, 由于 y 和 A 的量测误差具有不确定性, 因此 x 的估计值也不确定, 因此针对任意一次量测而言, y 和 A 的量测误差对 x 的估计值的影响也无法确定。

但从统计学的角度来看, 通过大量量测数据, x 的估计值的方差 $\text{Var}(x)$ (或标准差)会随 y 和 A 的量测误差方差 $\text{Var}(y)$ 和 $\text{Var}(A)$ (或标准差)的增大而增大, 即从大量数据整体角度来看, 量测误差越大, 配电网的估计误差也就越大。现证明如下:

不妨设节点注入变量 y , 状态变量参数 A , 配网参数 x 的真实值分别为 y_t 、 A_t 、 x_t , 则其满足:

$$y_t = A_t x_t \quad (8)$$

考虑量测误差的状态变量参数 A 和节点注入功率 y 记作 A_m 、 y_m , 配网参数 x 的估计误差为 x_m , 则

$$y_m = A_m x_m \quad (9)$$

记状态变量参数 A 和节点注入变量 y 的量测误差为 ξA 和 ξy , 由 ξA 和 ξy 引起的配网参数 x 的估计误差为 ξx , 则

$$\begin{cases} A_m = A_t + \xi A \\ y_m = y_t + \xi y \\ x_m = x_t + \xi x \end{cases} \quad (10)$$

联合式(8)一式(10), 可得由 ξA 和 ξy 引起的配网参数 x 的估计误差 ξx 为

$$\xi x = \frac{\xi y - \xi A x_t}{A_t + \xi A} = \frac{\xi y}{A_t + \xi A} + \frac{-\xi A x_t}{A_t + \xi A} = \xi x_y + \xi x_A \quad (11)$$

由式(11)可知, 配网参数估计误差由 ξx_y 和 ξx_A 两部分组成, 其中

$$\begin{cases} \xi x_y = \frac{\xi y}{A_t + \xi A} \\ \xi x_A = \frac{-\xi A x_t}{A_t + \xi A} \end{cases} \quad (12)$$

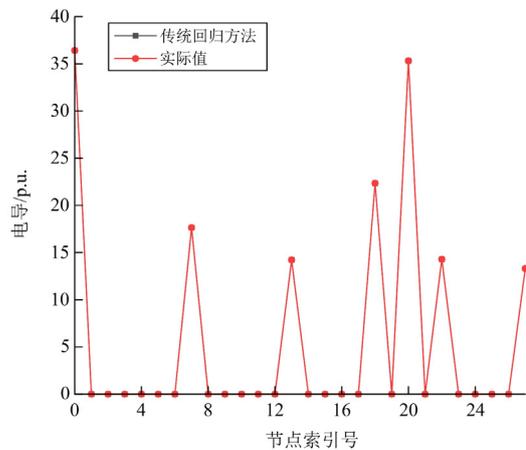
对于 ξx_y , $A_t + \xi A = A_m > 0$, ξx_y 会随着 ξy 的增加而增加, 且符号相同, 因此, ξx_y 的方差 $\text{Var}(\xi x_y)$ (标准差)会随着 ξy 的方差 $\text{Var}(\xi y)$ (标准差)的增加而增加。

对于 ξx_A , 由于 $A_t + \xi A = A_m > 0$, $x_t > 0$, ξx_A 与 ξA 符号相反; 另一方面, 随着 ξA 的增加, ξx_A 减小, 综上, $|\xi x_A|$ 随着 $|\xi A|$ (应看绝对值的相对变化)的增加而增加。因此, ξx_A 的方差 $\text{Var}(\xi x_A)$ (标准差)会随着 ξA 的方差 $\text{Var}(\xi A)$ (标准差)的增加而增加。

综上所述, 整体上, 配网参数 x 的估计误差 ξx 会随着状态变量参数 A 和节点注入变量 y 的量测误差的增大而增大。

2) 量测误差对参数估计的影响

基于 IEEE 8 节点系统进行说明, 该系统共有 28 种可能的连接。其节点注入功率均为 IEEE 规定的标准数据, 并在量测中注入不同水准的高斯噪声, 以电导参数为例, 图 1 为量测误差对参数估计的影响。



(a) 相对误差标准差0

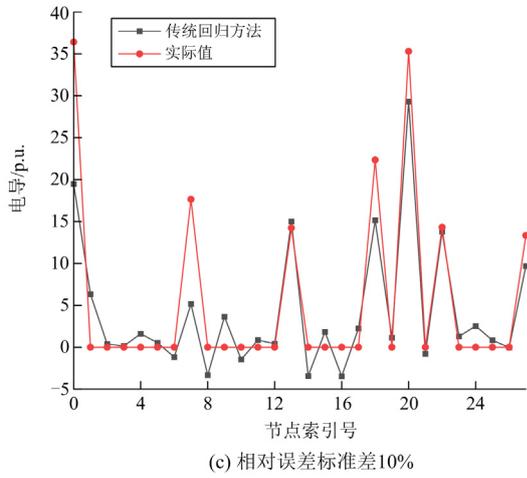
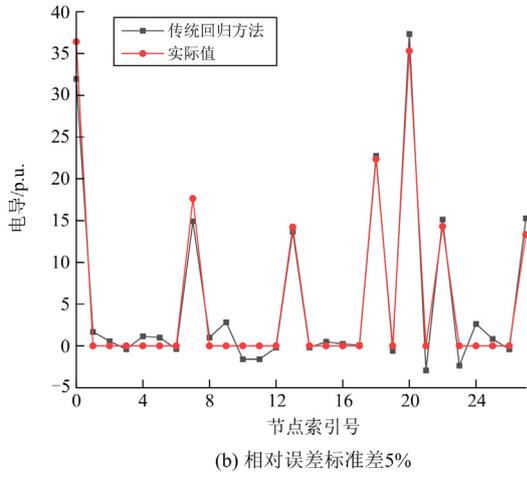


图 1 量测误差对参数估计的影响

Fig. 1 Effect of measurement error on parameter estimation

由图 1 可知，随着测量误差标准差的增加，线路参数的估计值与实际值的偏差越大，说明在存在测量误差或噪声时，传统估计方法不准确。这是由于传统方法的本质是回归模型，只有在原始量测数据点准确的情况下才能得到准确估计值。

3) 量测误差对拓扑识别的影响

采用阈值法得到相关的拓扑，即通过设置电导阈值，将电导大于阈值的边视为连通边，电导小于阈值的边视为断开边。

为了量化分析量测误差对拓扑识别准确度的影响，首先定义 Jaccard 相似系数表征拓扑估计的精度，其计算公式为

$$J(\mathbf{R}, \mathbf{F}) = \frac{|\mathbf{R} \cap \mathbf{F}|}{|\mathbf{R} \cup \mathbf{F}|} \quad (13)$$

式中： \mathbf{R} 为实际拓扑连通的边集； \mathbf{F} 为估计连通边集。

若 \mathbf{R} 和 \mathbf{F} 中的元素重复越多，即 $|\mathbf{R} \cap \mathbf{F}|$ 的规模越大， $J(\mathbf{R}, \mathbf{F})$ 的值越大，拓扑估计越准确。

图 2 为不同量测误差标准下拓扑估计的 Jaccard 相似系数。由图 2 可知，与参数估计相似，当量测误差增大时，传统回归模型拓扑估计的误差增大。

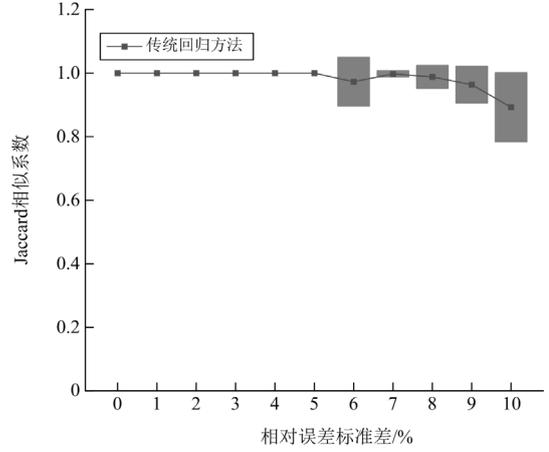


图 2 量测误差对拓扑估计的影响

Fig. 2 Influence of measurement error on topology estimation

2.2 考虑测量误差的线路参数估计

根据 2.1 节可知，系数矩阵 \mathbf{A} 和输出矩阵 \mathbf{y} 包含量测误差 $\xi\mathbf{A}$ 和 $\xi\mathbf{y}$ 。为了降低量测误差的影响，需要引入矫正向量 $\Delta\mathbf{A}$ 补偿 $\xi\mathbf{A}$ 的影响，引入矫正向量 $\Delta\mathbf{y}$ 补偿 $\xi\mathbf{y}$ 的影响，从而将含量测噪声的方程转变为不含误差的方程，方便求解。基于上述分析可得

$$\begin{cases} \mathbf{y} + \Delta\mathbf{y} = \mathbf{y}_t + \xi\mathbf{y} + \Delta\mathbf{y} \Rightarrow \mathbf{y}_t \\ \mathbf{A} + \Delta\mathbf{A} = \mathbf{A}_t + \xi\mathbf{A} + \Delta\mathbf{A} \Rightarrow \mathbf{A}_t \end{cases} \quad (14)$$

从而可得

$$(\mathbf{A} + \Delta\mathbf{A})\mathbf{x} = \mathbf{y} + \Delta\mathbf{y} \Rightarrow \mathbf{A}_t\mathbf{x} = \mathbf{y}_t \quad (15)$$

当进行误差补偿时，自然是希望矫正向量 $\Delta\mathbf{A}$ 和矫正向量 $\Delta\mathbf{y}$ 尽可能地小，因此，线路参数估计模型可表达为

$$\begin{aligned} \min_{\Delta\mathbf{A}, \Delta\mathbf{y}, \mathbf{x}} \quad & \|\Delta\mathbf{A}\|_F^2 + \|\Delta\mathbf{y}\|_2^2 \\ \text{subject to} \quad & (\mathbf{A} + \Delta\mathbf{A})\mathbf{x} = \mathbf{y} + \Delta\mathbf{y} \end{aligned} \quad (16)$$

式中， $\|\cdot\|_F$ 表示 F 范数。

可构造其拉格朗日函数对模型进行求解，如式 (17) 所示。

$$\mathcal{L}(\Delta\mathbf{A}, \Delta\mathbf{y}, \lambda) = \|\Delta\mathbf{A}\|_F^2 + \|\Delta\mathbf{y}\|_2^2 + 2\lambda((\mathbf{A} + \Delta\mathbf{A})\mathbf{x} - \mathbf{y} - \Delta\mathbf{y}) \quad (17)$$

当且仅当存在 λ 使得式(18)成立时，模型有解。

$$\begin{cases} \nabla_{\Delta\mathbf{A}} \mathcal{L} = 2\Delta\mathbf{A} + 2\lambda\mathbf{x}^T = \mathbf{0} \\ \nabla_{\Delta\mathbf{y}} \mathcal{L} = 2\Delta\mathbf{y} - 2\lambda = \mathbf{0} \\ (\mathbf{A} + \Delta\mathbf{A})\mathbf{x} = \mathbf{y} + \Delta\mathbf{y} \end{cases} \quad (18)$$

由此可得

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{A} = -\frac{(\mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{y})\mathbf{x}^T}{\|\mathbf{x}\|^2 + 1} \\ \Delta \mathbf{y} = \frac{\mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{y}}{\|\mathbf{x}\|^2 + 1} \end{cases} \quad (19)$$

将式(19)代入式(18), 可得等价目标函数为

$$\min_{\Delta \mathbf{A}, \Delta \mathbf{b}, \mathbf{x}} \frac{(\mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{y})^2}{\|\mathbf{x}\|^2 + 1} \quad (20)$$

式(20)相比式(16)形式更加简单, 但仍然是非凸的, 难以求解, 可进一步将上述模型等价转换为

$$\min_{\Delta \mathbf{A}, \Delta \mathbf{b}, \mathbf{x}} \left\{ \frac{(\mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{y})^2}{\|\mathbf{x}\|^2 + t} : t = 1 \right\} \quad (21)$$

定义 $\mathbf{z} = [\mathbf{x}^T, t]^T$, 上述问题可简化为

$$\begin{cases} f^* = \min_{\mathbf{z} \in \mathbb{R}^{n+1}} \left\{ \frac{\mathbf{z}^T \mathbf{B} \mathbf{z}}{\|\mathbf{z}\|^2} : \mathbf{z}_{n+1} = 1 \right\} \\ \mathbf{B} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{A} & -\mathbf{A}^T \mathbf{y} \\ -\mathbf{y}^T \mathbf{A} & \|\mathbf{y}\|^2 \end{pmatrix} \end{cases} \quad (22)$$

在不考虑 $\mathbf{z}_{n+1} = 1$ 约束的情况下, 式(22)为

$$\mathbf{g}^* = \min_{\mathbf{z} \in \mathbb{R}^{n+1}} \left\{ \frac{\mathbf{z}^T \mathbf{B} \mathbf{z}}{\|\mathbf{z}\|^2} : \mathbf{z} \neq \mathbf{0} \right\} \quad (23)$$

式(23)是典型的最小化瑞利熵问题, 矩阵 \mathbf{B} 的最小特征值对应的特征向量就是 \mathbf{z} 的解。

式(23)虽然容易求解, 但很显然其并不能满足 $\mathbf{z}_{n+1} = 1$ 的约束条件, 其解与式(22)并不等价。但基于下述引理 1, 可获得式(22)的最优解。

引理 1: 令 \mathbf{z}^* 表示优化问题(23)的最优解, 并且 $\mathbf{z} \neq \mathbf{0}$, 则 $\tilde{\mathbf{z}} = \frac{\mathbf{z}^*}{\mathbf{z}_{n+1}^*}$ 是问题(22)的整体最小二乘解。

通过上述分析, 可得初始模型(16)的求解步骤如下所述。

步骤 1: 首先根据量测数据构造 \mathbf{B} 矩阵;

步骤 2: 计算矩阵 \mathbf{B} 的特征值 $\lambda(\mathbf{B})$ 和特征向量 $\mathbf{z}(\mathbf{B})$;

步骤 3: 筛选出矩阵 \mathbf{B} 最小特征值 $\lambda_{\min}(\mathbf{B})$ 对应的特征向量 $\mathbf{z}_{\min}(\mathbf{B})$;

步骤 4: 计算 $\tilde{\mathbf{z}} = \frac{\mathbf{z}_{\min}^*}{\mathbf{z}_{n+1}^*}$, 然后根据 \mathbf{z} 和 \mathbf{x} 的关系

反推出 \mathbf{x} , 得到最终解。

3 参数和拓扑联合估计方法

基于上文所述, 本节提出配电网线路参数和拓

扑联合估计方法(joint estimation of line parameters and topology, JELT)程序流程图, 如图 3 所示。

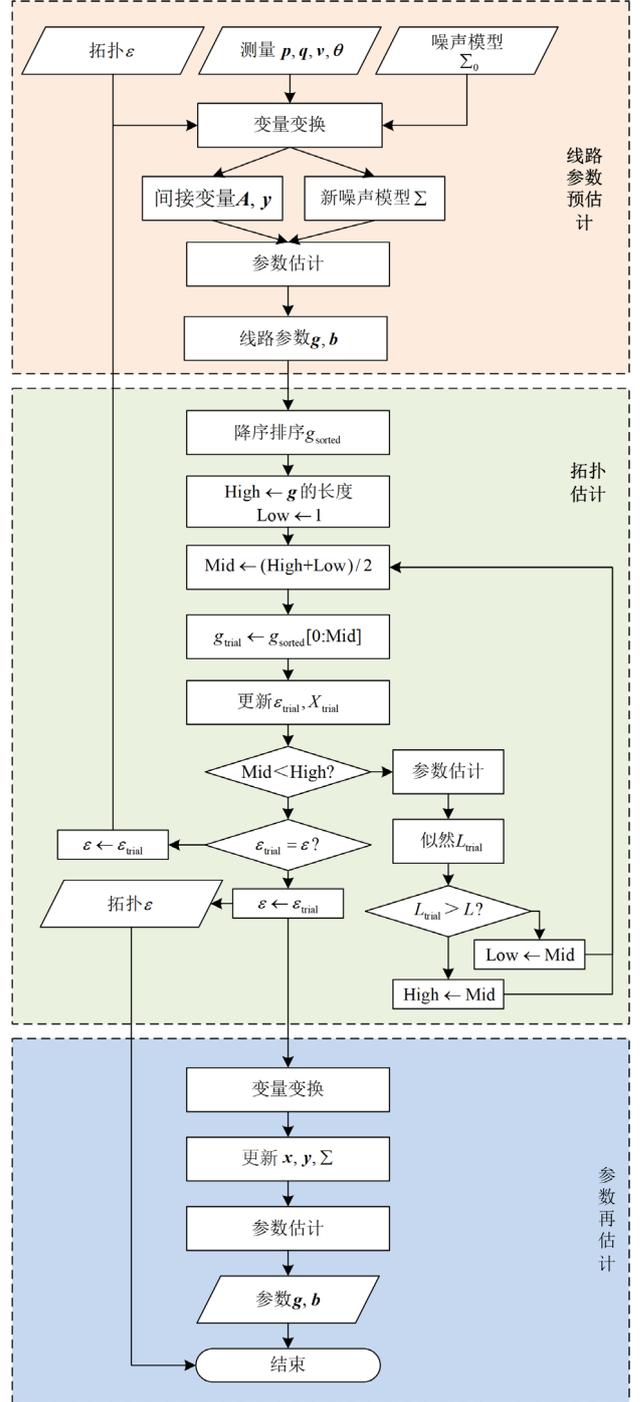


图 3 JELT 方法程序流程图

Fig. 3 Flow chart of JELT method procedure

其包含 3 个步骤, 如下所述。

1) 图 3 中红色区域为线路参数初步估计部分, 依据初始拓扑信息对线路参数进行估计;

2) 绿色区域为拓扑估计部分, 过程中采用了二

分搜索法。其具体步骤如下：

a) 将估计得到的线路电导，按照最大和最小搜索位置“High”和“Low”进行初始化，长度和为1，搜索位置“Mid”设置为“High”和“Low”的平均值；

b) 若所建立模型的相关可能性小于假设所有线均连接模型的可能性，则将最小搜索位置“Low”更新为“Mid”；

c) 若所建立模型可能性大于假设模型可能性，则将最大搜索位置“High”更新为“Mid”；

d) 继续迭代直至“High”位置与“Mid”位置相遇。

3) 最终的拓扑估计结果再次进入参数估计步骤，以获取最终输出结果，其步骤为图3中蓝色区域。

4 仿真分析

4.1 数值设置

为了验证本文方法的正确性，本文采用 IEEE 8 节点系统进行仿真分析，在量测中注入不同水准的高斯噪声。

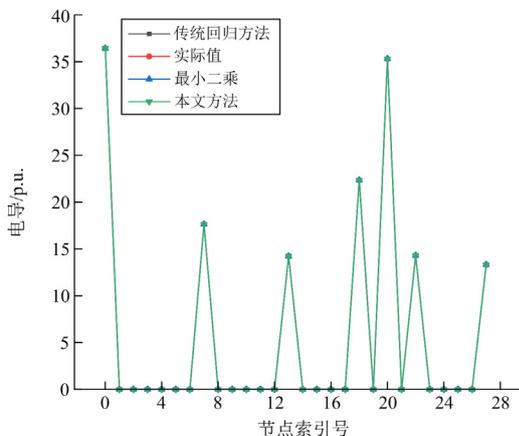
4.2 不同噪声水平下的参数估计

对于 IEEE 8 节点系统，有 28 种潜在连接，如图 4 的 x 轴所示，由于配电网多采用辐射状结构，实际连接有 7 个。对于每个潜在连接，对应的拓扑和参数估计如 y 轴所示。

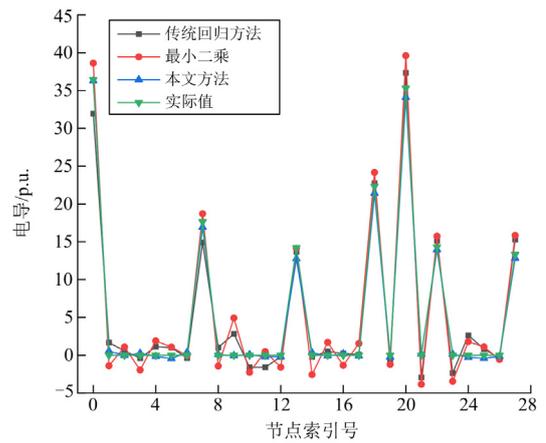
由图 4 可知：

1) 当不存在噪声数据时，所有方法得到的估计值均与实际值完美匹配，具有较好的估计精度。

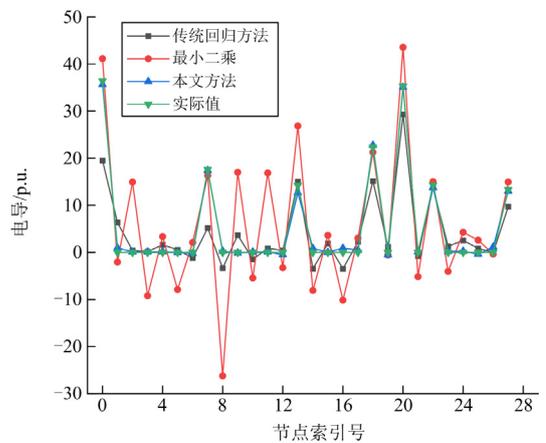
2) 当存在量测噪声时，传统回归和最小二乘法的估计精度均有所下降，尤其当相对误差标准差达到 10% 时，两个方法的估计误差不可忽视，但本文方法依然可以保证良好的估计精度。



(a) 相对误差标准差0



(b) 相对误差标准差5%



(c) 相对误差标准差10%

图 4 不同噪声水平下的参数估计

Fig. 4 Parameter estimation under different noise levels

4.3 不同噪声水平下的拓扑估计

3 种方法进行拓扑估计时，得到的 Jaccard 相似系数如图 5 所示。

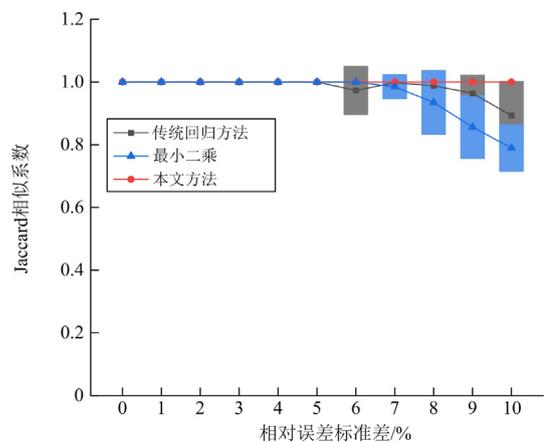


图 5 不同噪声水平下的拓扑估计

Fig. 5 Topological estimation under different noise levels

由图 5 可知: 在相对误差标准差小于 5% 时, 3 种方法的 Jaccard 相似系数基本均为 1, 说明在量测误差较小的时候, 3 种方法的拓扑估计均比较准确; 但当量测误差增加时, 传统回归法和最小二乘法的 Jaccard 相似系数均显著降低, 说明这两种方法的拓扑估计均出现较大偏差, 但本文方法的拓扑估计依然保持较高的准确度。

为了更形象地展示本文方法的精度, 将 IEEE 8 节点系统实际值与本文方法的估计值进行对比, 如图 6 所示。

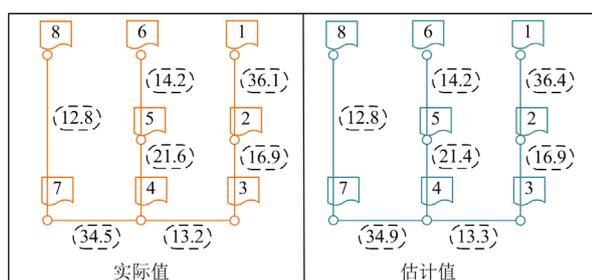


图 6 实际值与估计值对比

Fig. 6 Actual value vs. estimated value

4.4 计算复杂度对比分析

基于单核 2.6 GHz Intel Core i5 CPU 和 4 GB 内存仿真环境进行评估, 各方法的计算时间成本如图 7 所示。

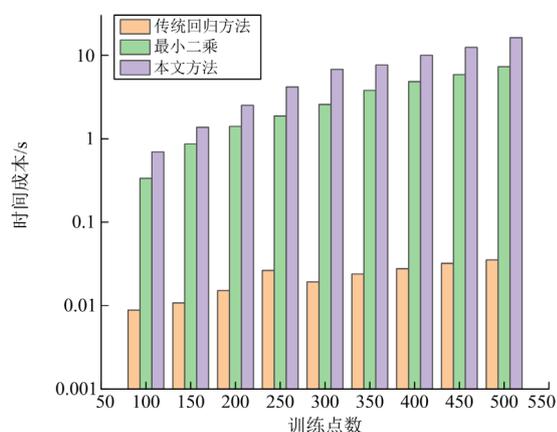


图 7 时间复杂度评估

Fig. 7 Time complexity evaluation

由图 7 可知, 本文方法时间成本最大, 且随着训练集的增加而增加, 主要原因是本文算法涉及内二值搜索和外迭代, 收敛速度较快, 时间成本主要与奇异值分解矩阵有关, 而奇异值分解矩阵的大小与训练数据集的大小成正比。线性回归的估计时间最短, 对于 500 个训练样本, 时间消耗小于 0.1 s, 这是由于线性回归只需要矩阵求逆。

虽然本文方法所用时间较长, 但线路参数估计一般都是离线使用, 即使在线使用, 也可以通过并行计算以及构造系数矩阵等方式降低计算复杂度, 提高计算效率。

5 结论

针对目前配电网参数估计要么不考虑噪声数据, 要么无法联合估计的问题, 本文基于已有 AMIs 和 μ PMU 量测数据, 提出考虑双侧量测误差的配电网拓扑识别及参数联合估计方法, 得到的主要结论如下:

1) 本文方法对量测数据误差或噪声数据不敏感, 在相对误差标准差达到 10% 时, 依然具有较高的参数估计精度和拓扑识别准确度, 而传统线性回归和最小二乘法的估计误差显著增加;

2) 由于本文方法涉及大量矩阵计算, 故计算成本相对较长, 更适用于离线应用; 对于在线应用, 可通过并行计算等方式提高计算效率。

参考文献

- [1] 王成山, 王瑞, 于浩, 等. 配电网形态演变下的协调规划问题与挑战[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(8): 2385-2396.
WANG Chengshan, WANG Rui, YU Hao, et al. Challenges on coordinated planning of smart distribution networks driven by source-network-load evolution[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(8): 2385-2396.
- [2] 刘华晶, 许振波, 董苒, 等. 提升配电网供电性能的风光-储两阶段规划与配置[J]. 电测与仪表, 2022, 59(9): 23-30.
LIU Huajing, XU Zhenbo, DONG Ran, et al. Wind-solar-storage two-stage planning and configuration to improve power supply performance of distribution networks[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(9): 23-30.
- [3] 杨志淳, 沈煜, 杨帆, 等. 基于数据关联分析的低压配电网拓扑识别方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(18): 5-11.
YANG Zhichun, SHEN Yu, YANG Fan, et al. Topology identification method of low voltage distribution network based on data association analysis[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(18): 5-11.
- [4] 高泽璞, 赵云, 余伊兰, 等. 基于知识图谱的低压配电网拓扑结构辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 34-43.
GAO Zepu, ZHAO Yun, YU Yilan, et al. Low-voltage distribution network topology identification method based on knowledge graph[J]. Power System Protection and

- Control, 2020, 48(2): 34-43.
- [5] 唐广瑜, 金鑫琨. 基于全网供电拓扑模型的图模数据共享技术研究与应用[J]. 电测与仪表, 2022, 59(6): 105-112. TANG Guangyu, JIN Xinkun. Research and application of graphic model data sharing technology based on power supply topology model of the whole network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(6): 105-112.
- [6] BARAN M E, WU F F. Optimal capacitor placement on radial distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(1): 725-734.
- [7] 孔顺飞, 胡志坚, 谢仕炜, 等. 考虑分布式储能与电动汽车充电网络的配电网多目标规划[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(1): 106-116. KONG Shunfei, HU Zhijian, XIE Shiwei, et al. Multi-objective planning of distribution network considering distributed energy storage and electric vehicle charging network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(1): 106-116.
- [8] 吴在军, 谢兴峰, 杨景刚, 等. 直流配电网电压控制技术综述[J]. 电力工程技术, 2021, 40(2): 59-67. WU Zaijun, XIE Xingfeng, YANG Jinggang, et al. A review on voltage control strategies in DC distribution network[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2): 59-67.
- [9] 李桂鑫, 徐科, 刘英英, 等. 基于分布式模型预测控制的含分布式储能有源配电网动态电压控制[J]. 电力建设, 2021, 42(6): 116-126. LI Guixin, XU Ke, LIU Yingying, et al. Dynamic voltage control based on DMPC for active distribution network with distributed energy storage systems[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(6): 116-126.
- [10] HE X, QIU R C, AI Q, et al. A hybrid framework for topology identification of distribution grid with renewables integration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(2): 1493-1503.
- [11] 罗群, 刘春雨, 顾强, 等. 基于最优匹配回路功率的配电网拓扑辨识方法[J]. 电测与仪表, 2019, 56(19): 1-6. LUO Qun, LIU Chunyu, GU Qiang, et al. A topology identification method of distribution network based on optimal matching loop power[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(19): 1-6.
- [12] 许栋梁, 赵健, 王小宇, 等. 基于有向邻接矩阵的配电网拓扑检测与识别[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(16): 76-85. XU Dongliang, ZHAO Jian, WANG Xiaoyu, et al. Distribution network topology detection and identification based on a directed adjacency matrix[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(16): 76-85.
- [13] 盛万兴, 吴鸣, 季宇, 等. 分布式可再生能源发电集群并网消纳关键技术及工程实践[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(8): 2175-2186. SHENG Wanxing, WU Ming, JI Yu, et al. Key techniques and engineering practice of distributed renewable generation clusters integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(8): 2175-2186.
- [14] MACEDO L H, FRANCO J F, RIDER M J, et al. Optimal operation of distribution networks considering energy storage devices[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(6): 2825-2836.
- [15] 刘凯, 李镇海, 吕利, 等. 基于聚类分析的配电台区拓扑识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(6): 165-171. LIU Kai, LI Zhenhai, LÜ Li, et al. Topology identification method of distribution station area based on cluster analysis[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(6): 165-171.
- [16] 王日宁, 武一, 魏浩铭, 等. 基于智能终端特征信号的配电网台区拓扑识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(6): 83-89. WANG Rining, WU Yi, WEI Haoming, et al. Topology identification method for distribution network substation based on intelligent terminal signature[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(6): 83-89.
- [17] FARZIN H, FOTUHI-FIRUZABAD M, MOEINI AGHTAIE M. Role of outage management strategy in reliability performance of multi-microgrid distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 2359-2369.
- [18] 陈招安, 黄纯, 张志丹, 等. 基于 T 型灰色关联度和 KNN 算法的低压配电网台区拓扑识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 163-169. CHEN Zhao'an, HUANG Chun, ZHANG Zhidan, et al. A topology identification method for low-voltage distribution network based on T-type grey correlation degree and KNN algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 163-169.
- [19] 王旭东, 王高猛, 林济铿, 等. 基于 AMI 量测信息的低压配电网线路参数辨识方法[J]. 中国电力, 2019, 52(5): 63-69. WANG Xudong, WANG Gaomeng, LIN Jikeng, et al. Method for parameter identification of LV distribution network based on AMI metering data[J]. Electric Power, 2019, 52(5): 63-69.
- [20] 刘羽, 霄张宁, 康重庆. 数据驱动的电力网络分析与优化研究综述[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(6): 157-167.

- LIU Yuxiao, ZHANG Ning, KANG Chongqing. A review on data-driven analysis and optimization of power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(6): 157-167.
- [21] ZAMANI V, BARAN M. Topology processing in distribution systems by branch current based state estimation[C] // 2015 North American Power Symposium (NAPS), 2015, Charlotte, NC, USA: 1-5.
- [22] 王献志, 李铁成, 郭少飞, 等. 基于 μ PMU 电压相位数据的配电网拓扑辨识[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(6): 54-63.
WANG Xianzhi, LI Tiecheng, GUO Shaofei, et al. Identification of distribution network topology based on μ PMU voltage phase data[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(6): 54-63.
- [23] 李昂, 刘亚东, 孙鹏, 等. 基于 PMU 相位数据的配电网拓扑识别方法[J]. 智慧电力, 2017, 45(11): 31-36.
LI Ang, LIU Yadong, SUN Peng, et al. Distribution network topology identification method based on phase data of μ PMU[J]. Smart Power, 2017, 45(11): 31-36.
- [24] 蒋玮, 汤海波, 祁晖, 等. 基于集成深度神经网络的配电网联络关系辨识技术[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(1): 101-108.
JIANG Wei, TANG Haibo, QI Hui, et al. Distribution network connectivity recognition based on ensemble deep neural network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(1): 101-108.
- [25] 栾文鹏, 王兵, 周宁, 等. 基于量测数据的低压配电网精确建模[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3141-3146.
LUAN Wenpeng, WANG Bing, ZHOU Ning, et al. Modeling of LV distribution network based on metering data[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3141-3146.
- [26] LIU L, HE J H. Application of weighted least square algorithm in distribution network state estimation with finite measurement information[C] // 2014 International Conference on Power System Technology, October 20-22, 2014, Chengdu, China: 134-138.
- [27] CUNHA V C, FREITAS W, TRINDADE F C L, et al. Automated determination of topology and line parameters in low voltage systems using smart meters measurements[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(6): 5028-5038.
- [28] ZHANG J, WANG Y, WENG Y, et al. Topology identification and line parameter estimation for non-PMU distribution network: a numerical method[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(5): 4440-4453.
- [29] JABR R A. Minimum loss operation of distribution networks with photovoltaic generation[J]. IET Renewable Power Generation, 2014, 8(1): 33-44.
- [30] 刘羽霄, 张宁, 康重庆. 数据驱动的电力网络分析与优化研究综述[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(6): 157-167.
LIU Yuxiao, ZHANG Ning, KANG Chongqing. A review on data-driven analysis and optimization of power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(6): 157-167.
- [31] LARE Y, SAGNA K, GBOGLO A D, et al. Simulation of the power flow state of the main electrical distribution grid of Abomey-Calavi (BENIN) and Lomé Golfe (TOGO)[J]. Science Publishing Group, 2021(4).
- [32] CUI Z, JIAN C, LIU C, et al. Time-domain continuous power flow calculation of electricity-gas integrated energy system considering the dynamic process of gas network[J]. Energy Reports, 2022, 8: 597-605.
- [33] HAO B A, XT B, ZY A, et al. A novel three-phase unbalanced power flow solution for islanded microgrids with distributed generations under droop controls[J]. Energy Reports, 2022, 8: 1438-1447.
- [34] KETTNER A M, REYES-CHAMORRO L, BECKER J, et al. Harmonic power-flow study of polyphase grids with converter-interfaced distributed energy resources, part I: modelling framework and algorithm[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(1): 458-469.

收稿日期: 2022-10-25; 修回日期: 2023-02-06

作者简介:

吴龙腾(1988—), 男, 学士, 工程师, 主要从事配网电力调度控制与运行管理方面的研究;

徐春华(1976—), 女, 学士, 高级工程师, 主要从事电力系统运行方式管理、并网技术方面的研究;

邱泽坚(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事配网电力调度控制、监视运行、并网技术方面的研究。E-mail: ygdsoihrgonjyv@163.com

(编辑 魏小丽)