

引用格式:黄奕俊,肖健,彭依明,等.基于边缘计算的新型电力系统分布式状态估计[J].电力科学与技术学报,2025,40(1):77-84.

Citation: HUANG Yijun, XIAO Jian, PENG Yiming, et al. Distributed state estimation of new power system based on edge computing[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(1): 77-84.

# 基于边缘计算的新型电力系统分布式状态估计

黄奕俊<sup>1</sup>, 肖健<sup>1</sup>, 彭依明<sup>1</sup>, 桂文豪<sup>2</sup>, 辛海滨<sup>2</sup>

(1. 广东电网有限责任公司广州供电局, 广东 广州 510000; 2. 东方电子股份有限公司, 山东 烟台 264000)

**摘要:** 可再生能源发电大量并入新型电力系统使运行数据呈现级数增长。由于可再生能源时序波动剧烈、扰动量大,使新型电力系统中涌现大量的不良数据和恶数据,并且这些运行数据呈现分布式管理方式,使传统集中式的状态估计方法在计算精度、计算速度等方面陷入困境,为此,提出基于边缘计算的新型电力系统分布式状态估计。首先,给出传统集中式状态估计方法的不足,设计以协调变量为核心的分布式状态估计私密性的计算思路;其次,在传统非线性状态估计模型基础上,提出改进型的线性状态估计方法以提高计算速度;随后,提出边缘计算的多目标蚁群分布式求解算法,实现所提出的分布式状态估计;最后,以某实际新型电力系统融合的IEEE 57系统为例,对所提状态估计算法进行仿真验证,结果表明所提方法的精确性和高计算速度。

**关键词:** 边缘计算; 分布式; 状态估计; 新型电力系统

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2025.01.008 中图分类号: TM76 文章编号: 1673-9140(2025)01-0077-08

## Distributed state estimation of new power system based on edge computing

HUANG Yijun<sup>1</sup>, XIAO Jian<sup>1</sup>, PENG Yiming<sup>1</sup>, GUI Wenhao<sup>2</sup>, XIN Haibin<sup>2</sup>

(1. Guangzhou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510000, China;

2. Dongfang Electronics Co., Ltd., Yantai 264000, China)

**Abstract:** The large-scale integration of renewable energy generation into new power systems has led to an exponential increase in operational data. Due to the severe temporal fluctuations and large disturbances of renewable energy, a large amount of bad and malicious data can emerge in the new power system. In addition, these operational data are managed in a distributed manner, leading to the poor performance of traditional centralized state estimation methods in calculation accuracy, speed, and other aspects. To solve this problem, distributed state estimation of new power systems based on edge computing is proposed. Firstly, the shortcomings of traditional centralized state estimation methods are pointed out, and a calculation approach for privacy in distributed state estimation is designed, with coordinated variables as the core. Secondly, based on traditional nonlinear state estimation models, an improved linear state estimation method is proposed to improve computational speed. Next, a multi-objective ant colony distributed algorithm based on edge computing is proposed to realize distributed state estimation. Finally, by taking the IEEE57 system integrated into a real-life new power system as an example, the proposed state estimation algorithm is simulated and verified, and the results confirm its accuracy and high computational speed.

**Key words:** edge computing; distributed; state estimation; new power system

状态估计一直以来就是电力系统能量管理系统的核心,是潮流计算、经济调度以及电压安全评

估等方面的基础<sup>[1-4]</sup>。随着风电、光伏、水电等可再生能源发电以分布、集群形式高比例并入电力系统

收稿日期: 2024-03-21; 修回日期: 2024-06-21

基金项目: 广东电网有限责任公司广州供电局生产技术改造项目(030108GS62220005)

通信作者: 黄奕俊(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事继电保护自动化研究; E-mail: dickwang78@126.com

输电网和配电网中,使得电网规模和电网数据采集监控(supervisory control and data acquisition, SCADA)系统和同步相量测量单元(phasor measurement unit, PMU)获取的电网数据呈现级数增长;同时,风电、光伏、水电等的波动性和随机性变化以及电动汽车等负荷的随机性充放电对电网运行产生随机性强的冲击,加剧了传统集中式状态估计的置信度水平和错误率。此外,由于输电网、配电网的量测数据呈现分散管理方式,风电、光伏在配电网中高比例分布且以分散形式予以管理,导致传统集中式的状态估计无法获取整个电网的信息,计算精确度低下。

为了适应量测数据分散管理的形势,提高状态估计的计算效率和精度,分布式状态估计是目前研究的热点,引起了国内外专家学者的高度重视,已经出现了较多的理论研究和实际应用成果。文献[5-6]针对传统集中式状态估计数据通信任务重、计算量大、计算效率低下和精度问题,提出了基于一致性算法的不重叠区域分布式状态估计方法,但该方法计算耗时较大;文献[7-9]在广域量测系统基础上,基于有限时间平均一致性协议,获得了多区域最小二乘加权分布式状态估计模型,该方法本质上仍然属于集中式方法;文献[10-11]提出了容积卡尔曼滤波和最小二乘估计相互融合的分布式状态估计方法,该方法没有考虑区域内部的隐私性;文献[12]将有源配电网进行划分子区域分析,建立了分区拉格朗日松弛技术的目标函数,并考虑了约束条件,采用分布式并行环境下求解状态估计,但该方法没有给出并行计算的先后顺序;文献[13-16]采用各个区域估计器进行状态估计,通过平均一致性算法获取全局信息进行整体修正,但修正时间较长;文献[17-19]针对配电网中高比例分散并入的光伏发电、风力发电和电动汽车等,基于PMU采用拉格朗日线性模型进行状态估计,其本质上仍属于集中式计算方法;文献[20-23]针对天然气与火电融合的电网,基于测量系统的分布式管理,提出了时域卡尔曼滤波的分布式状态方法,但该方法计算精度受到挑战。

根据现有研究成果可知,分布式状态估计是目前电力系统状态估计研究的主流和热点,虽然目前的分布式状态估计已经出现了较多成果,但本质上采取的仍然是传统集中式状态估计的思路。由于这些方法无法实时获取电网所有节点、支路上的电压和电流相量等信息,从而使计算速度较慢、计算

误差较大。考虑边缘计算能够解决分布式计算问题,且具有计算速度快、精确度高的优点,因此,本文采用边缘计算中的多目标蚁群分布式算法进行分布式状态估计,以解决计算速度和精度问题。

## 1 分布式状态估计思路

### 1.1 传统集中式状态估计不足

目前,电力系统状态估计方法主要采用PMU和SCADA量测手段,其中PMU以0~10 ms时间间隔进行数据采集而得到广泛应用。

电网采集量主要包含母线节点上的电压相量、注入电流相量和输电线路上的电流相量,可以将母线节点上电压相量作为状态估计的目标,建立线性量测方程:

$$\begin{cases} \dot{V}_b(t) = E \cdot \dot{V}_b(t) \\ \dot{I}_b(t) = Y \cdot \dot{V}_b(t) \\ \dot{I}_l(t) = Y_l \cdot \dot{V}_b(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\dot{V}_b(t)$ 为由电网母线上的电压相量构成的列向量; $E$ 为单位向量; $\dot{I}_b(t)$ 为由母线节点上的电流相量构成的列向量; $Y$ 为系统去除参考节点的导纳矩阵; $\dot{I}_l(t)$ 为由输电线路上的电流相量构成的列向量; $Y_l$ 为由支路-节点构成的导纳矩阵; $t$ 为量测时间。

设量测数据矩阵为 $Z(t) = [\dot{I}_b(t) \quad \dot{I}_l(t)]^T$ ,状态估计待确定量向量设为 $X(t) = \dot{V}_b(t)$ ,按照传统估计方法可得如下模型:

$$Z(t) = S(t)X(t) + \xi(t) \quad (2)$$

式中, $S(t)$ 为状态估计量测匹配矩阵; $\xi(t)$ 为状态估计误差。

式(2)通常采取移动平均最小二乘法寻找最优化的解向量 $X(t)$ ,满足优化目标:

$$f(X(t)) = \min \left\{ [Z(t) - S(t)X(t)]^T \cdot \Omega(t)[Z(t) - S(t)X(t)] \right\} \quad (3)$$

式中, $\Omega(t)$ 为移动平均最小二乘法相关系数矩阵。

在PMU和SCADA量测过程中,尤其在某一时间窗口内,经常因设备老化精度下降、设备通信延迟、外界环境以及人为攻击等因素影响,出现不良数据和恶数据,而式(2)、(3)未考虑恶意攻击和虚假数据对状态估计的影响。为此,对式(2)、(3)进行改进,改进模型为

$$\begin{cases} Z(t) = S(t)X(t) + \xi(t) + \psi(t) \\ f(X(t)) = \min \left\{ \left[ Z(t) - S(t)X(t) - \psi(t) \right]^T \cdot \right. \\ \left. \Omega(t) \left[ Z(t) - S(t)X(t) - \psi(t) \right] \right\} \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $\psi(t)$  为不良数据和恶数据对状态估计精度的影响向量。

式(4)是在式(1)的基础上而获得,即必须已知式(1)的关系才能实现,而式(1)中的导纳矩阵  $Y$ 、 $Y_1$  必须获得电网全网信息,即必须获得全网各个节点、支路阻抗和导纳信息。但是新型电力系统的信息是分布式管理的,即在输电网、配电网以及分散的可再生能源高渗透率并网的趋势下,输电网和风光等可再生能源按照其特性分类分布式管理,较难获得式(1),导致式(4)状态估计精度受到极大挑战,这也是本文所要解决的问题。

### 1.2 分布式状态估计思路

目前,风力、光伏发电集群等以分散的方式大规模并入新型电力系统,使新型电力系统输电网呈现分散管理形式,输电网中的微电网、可再生能源集群之间呈现分散管理方式,实际上输电网就是各个集群分散管理模式,每个集群内部独立管控,具有私密性,集群之间通过母线节点相互关联协调。2个集群之间的关联关系如图1所示,对于多集群之间的关系具有相似的原理。

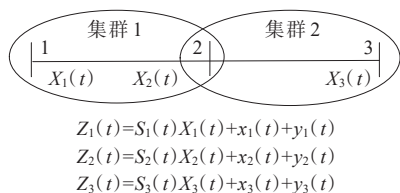


图1 集群互联结构

Figure 1 Cluster interconnection structure

图1中  $Z_1(t)$ 、 $Z_2(t)$ 、 $Z_3(t)$  分别表示节点1、2、3的状态估计方程;集群1包含节点1、2,集群2包含节点2、3,节点2是2个集群的边界量,也是协调量。

集群1独立计算其内部的状态估计,同时集群2独立计算其内部的状态估计,节点2作为2个集群的隐私保护量,用于协调2个集群之间的状态估计,从而从整体上保证系统运行的统一性和集群之间的隐私保护性,如图2所示(箭头表示协调),集群1中的节点2'属于边界节点,其状态估计量为  $X_2(t)$ ,是集群1、2的公共边界,属于协调变量,在集群1状态估计量  $X_1(t)$ 、集群2的分布式状态估计中分别进

行计算,并将计算结果相互反馈,再次迭代求解,  $X_3(t)$  表示节点3的状态估计量。

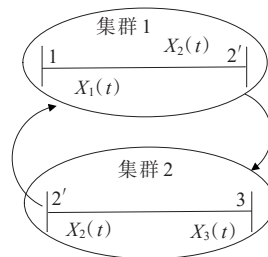


图2 集群1、2分布式状态估计结构

Figure 2 Distributed state estimation structures of clusters 1 and 2

## 2 分布式状态估计模型

### 2.1 非线性求解模型

根据文1.2中的分布式状态估计思路,将式(4)的集中式状态估计改进为如下模型:

$$\begin{cases} Z_i(t) = S_i(t)X_i(t) + \xi_i(t) + \psi_i(t) \\ Z_e(t) = S_e(t)X_e(t) + \xi_e(t) + \psi_e(t) \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $Z_i(t)$  为集群内部量测及其状态估计模型;  $Z_e(t)$  为集群边界协调量测及其状态估计模型。

式(5)的最优求解模型为

$$\begin{cases} f(X(t)) = \min \left\{ g(X_i(t)) + y(X_e(t)) \right\} \\ g(X_i(t)) = \sum_{j=1}^{N_1} \left\{ \left[ Z_j(t) - S_j(t)X_j(t) - \psi_j(t) \right]^T \cdot \right. \\ \left. \Omega_j(t) \left[ Z_j(t) - S_j(t)X_j(t) - \psi_j(t) \right] \right\} \\ y(X_e(t)) = \sum_{k=1}^{N_2} \left\{ \left[ Z_k(t) - S_k(t)X_k(t) - \psi_k(t) \right]^T \cdot \right. \\ \left. \Omega_k(t) \left[ Z_k(t) - S_k(t)X_k(t) - \psi_k(t) \right] \right\} \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $g(X_i(t))$  为集群内部状态估计函数;  $y(X_e(t))$  为集群边界节点状态估计函数;  $N_1$  为集群总数;  $N_2$  为边界变量总数。

由式(6)可见,最优状态估计就是保证系统中所有集群状态估计误差最小,包含集群内部和边界节点。传统上对于任意集群内部或者边界节点状态估计的求解如下:

$$\begin{cases} X(k+1) = X(k) + G^{-1}(k) \Pi^T \Omega \left[ Z(t) - \right. \\ \left. S(t)X(t) - \psi(t) \right] \\ \Pi = \partial \left[ S(t)X(t) \right] / \partial X(t) \\ G(k) = \Pi^T \Omega \Pi \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $\Pi$  为雅可比矩阵,由量测矩阵式(2)计算偏导

数获得,该矩阵中的元素是式(1)中对变量 $X(t)=\dot{V}_b(t)$ 计算偏导数; $G$ 为增益矩阵; $k+1,k$ 分别表示第 $k+1,k$ 次迭代。

式(7)中主要采用的是矩阵求偏导并进行迭代求解方法,求解效率偏低,且不属于分布式求解模式,本文将对其进行改进。

## 2.2 改进的快速线性求解模型

根据式(1)可得,量测量包含节点上量测的电压相量、电流相量以及输电线路上的电流相量,则输电线路上的潮流方程可以表达为量测方程:

$$\tilde{S}_{ij} = P_{ij} + jQ_{ij} = \dot{V}_i \left[ \frac{\dot{V}_i - \dot{V}_j}{x_{ij}} \right]^* \quad (8)$$

式中, $\tilde{S}_{ij}$ 为输电线路 $ij$ 上的复功率,线路两端节点为 $i,j$ ;  $P_{ij}, Q_{ij}$ 分别为输电线路 $ij$ 上的有功、无功功率;  $\dot{V}_i, \dot{V}_j$ 分别为节点 $i,j$ 上的电压相量;  $x_{ij}$ 为输电线路 $ij$ 上的电抗;符号\*表示共轭。式(8)中的各个量均为经过标么化的量。

对式(8)两边除以电压相量 $\dot{V}_i$ 可得:

$$\frac{\tilde{S}_{ij}}{\dot{V}_i} = P_{ij} + jQ_{ij} = \left[ \frac{\dot{V}_i - \dot{V}_j}{x_{ij}} \right]^* \quad (9)$$

在不同的量测时刻,由于 $\dot{V}_i$ 会有小范围变化,且作为状态估计量,设随时间的扰动量为 $\dot{V}'_i$ ,则在该量测量附近有波动量:

$$1 + \dot{V}'_i = \dot{V}_i \quad (10)$$

式中, $1 + \dot{V}'_i$ 为标么化后的参考节点电压相量,标么值状态下电压幅值通常在1附近波动。

将式(10)代入式(9)有

$$\frac{\tilde{S}_{ij}}{1 + \dot{V}'_i} = P_{ij} + jQ_{ij} = \left[ \frac{\dot{V}_i - \dot{V}_j}{x_{ij}} \right]^* \quad (11)$$

将式(11)中的 $1/(1 + \dot{V}'_i)$ 进行泰勒展开并采用线性近似得到:

$$\begin{aligned} \frac{1}{1 + \dot{V}'_i} &= 1 - \dot{V}'_i + (\dot{V}'_i)^2 - (\dot{V}'_i)^3 + \dots = \\ &\sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k (\dot{V}'_i)^k \approx 1 - \dot{V}'_i \end{aligned} \quad (12)$$

忽略式(12)中的高次项,保留前两项,并结合式(10)得到:

$$\frac{1}{1 + \dot{V}'_i} \approx 1 - \dot{V}'_i = 1 - (\dot{V}_i - 1) = 2 - \dot{V}_i \quad (13)$$

将式(13)代入式(11)得到:

$$(2 - \dot{V}_i) \tilde{S}_{ij} \approx P_{ij} + jQ_{ij} = \left[ \frac{\dot{V}_i - \dot{V}_j}{x_{ij}} \right]^* \quad (14)$$

与式(8)类似,对于节点 $m$ 注入的量测量,如节点电压相量、注入电流相量来说,根据潮流方程可以表达为功率的形式:

$$[\tilde{S}_m]^* = P_m - jQ_m = \dot{V}_m^* \sum_{i=1}^n (Y_{mi} \dot{V}_i) \quad (15)$$

式中, $[\tilde{S}_m]^*$ 为节点 $m$ 的注入复功率共轭; $P_m, Q_m$ 分别为节点 $m$ 的注入有功、无功功率; $\dot{V}_m, \dot{V}_m^*$ 分别为节点 $m$ 的电压相量、电压相量共轭; $n$ 为节点总数; $Y_{mi}$ 为系统导纳矩阵的第 $m$ 行第 $i$ 列元素; $\dot{V}_i$ 为节点 $i$ 的电压相量。

将式(15)按照式(11)形式改写为

$$P_m + jQ_m = \dot{V}_m \sum_{i=1}^n (Y_{mi} \dot{V}_i)^* \quad (16)$$

式中, $(Y_{mi} \dot{V}_i)^*$ 为 $Y_{mi} \dot{V}_i$ 的共轭。

将式(16)两边同时除以 $\dot{V}_m$ 得到:

$$\frac{P_m + jQ_m}{\dot{V}_m} = \sum_{i=1}^n (Y_{mi} \dot{V}_i)^* \quad (17)$$

将式(17)按照式(14)表达为泰勒展开简化式,即

$$(2 - \dot{V}_i)(P_m + jQ_m) \approx \sum_{i=1}^n (Y_{mi} \dot{V}_i)^* \quad (18)$$

$\sum_{i=1}^n (Y_{mi} \dot{V}_i)^*$ 是节点导纳矩阵元素和节点电压相量相乘的形式,按照导纳矩阵及节点电压的计算原理,可以展开为线路上导纳及对应节点电压的表示形式,即可表达为

$$(2 - \dot{V}_i)(P_m + jQ_m) \approx \sum_{i=1}^n (Y_{mi} \dot{V}_i)^* = \sum_{i \in X(m)} \left( \frac{\dot{V}_i - \dot{V}_m}{x_{mi}} \right)^* \quad (19)$$

式中, $X(m)$ 为与节点 $m$ 直接相连的节点集合。

式(14)、(19)是关于电压相量的方程,对于其中任一电压相量 $\dot{V}_i$ ,将其表达为

$$\dot{V}_i = V_i (\cos \varphi_i + j \sin \varphi_i) \quad (20)$$

式中, $V_i, \varphi_i$ 分别为节点 $i$ 的电压幅值、电压相位。

将式(14)、(18)、(19)统一表达为矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} B_r + C_r & -B_i + C_i \\ B_i + C_i & B_r - C_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ V_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_r \\ S_i \end{bmatrix} \quad (21)$$

式中, $B_r, C_r$ 为化简得到的实部系数; $B_i, C_i$ 为化简得到的虚部系数; $V_r, V_i$ 分别为电压实部、虚部; $S_r, S_i$ 分别为复功率实部、虚部。

由式(13)可见,式(21)实际上不是完全等式形

式,而应该是近似表达,所以对式(21)加入如式(2)的误差量,得到:

$$\begin{bmatrix} B_r + C_r + \xi_r & -B_i + C_i + \omega_i \\ B_i + C_i + \omega_i & B_r - C_r + \xi_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ V_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_r \\ S_i \end{bmatrix} \quad (22)$$

式中,  $\xi_r, \omega_i$  分别为实部、虚部噪声数据。

### 2.3 多目标蚁群分布式求解方法

多目标蚁群分布式算法是边缘计算框架下的一种算法<sup>[24]</sup>,在每一个集群内设置一个优化目标,模拟蚂蚁在该集群内寻找最优食物的路径。多个集群之间的边界协调变量作为多个集群内蚁群的信息更新量,这种算法具有分布计算、信息正反馈和启发式搜索的特点,能够完成全局优化算法的分布启发搜索,已经在分布式经济调度、故障分析等领域得到广泛应用。

传统多目标蚁群算法存在寻优过程效率较低、容易陷入局部最优等问题,本文对其进行改进,改进思路:将蚂蚁寻找食物的寻优路线作为单个集群内状态估计的寻优过程,蚂蚁群体的所有寻优路线构成多个集群寻优过程,最先找到食物的蚂蚁反馈信息作为集群边界协调变量反馈给其他蚂蚁,以此类推,最终整个蚁群获得食物。求解流程如下。

1) 将式(22)表达为蚁群的寻优模型:

$$AX = b \quad (23)$$

$$A = \begin{bmatrix} B_r + C_r + \xi_r & -B_i + C_i + \omega_i \\ B_i + C_i + \omega_i & B_r - C_r + \xi_r \end{bmatrix}$$

$$X = [V_r \quad V_i]^T, b = [S_r \quad S_i]^T$$

2) 设第  $i$  个集群内的蚂蚁初始随机移动寻优位置为

$$X_k^i = \left\{ 0, \text{sum} [2\text{rand}(K_1^i) - 1], \right. \\ \left. \text{sum} [2\text{rand}(K_2^i) - 1], \dots, \right. \\ \left. \text{sum} [2\text{rand}(K_{\max}^i) - 1] \right\} \quad (24)$$

式中,  $X_k^i$  为第  $i$  个集群内的状态估计电压;  $\text{sum}$  为求和函数,是对蚂蚁路径计算总和;  $K_1^i$  为第  $i$  个集群内的第 1 次路径迭代计算;以此类推,  $K_{\max}^i$  为第  $i$  个集群内的最大次路径迭代计算;  $\text{rand}$  为随机计算函数,其计算准则为

$$\text{rand}(K) = \begin{cases} 1, \text{rand}(0, 1) > 0.5 \\ 0, \text{rand}(0, 1) \leq 0.5 \end{cases} \quad (25)$$

式中,  $\text{rand}(K)$  函数即为式(24)中的表达式,参数为  $K_1^i$  等。

3) 各个集群内的蚁群按照式(24)相同的求解过程,依次对每个集群内的状态估计变量  $X$ (节点电

压相量)进行求解,其寻优路径更新规则如下:

$$K_i = \arg \max \left\{ \left( q \right)^\alpha \left( \frac{1}{d_K} \right)^\beta \cdot \frac{1}{\omega^\gamma} \cdot \frac{1}{z^\epsilon} \right\} \quad (26)$$

式中,  $q$  为路径  $K$  上每一次迭代过程中的蚂蚁释放的信息浓度总量;  $\alpha$  为蚂蚁寻优路径浓度的重要性值;  $\beta, \gamma, \epsilon$  为路径启发式的函数程度因子;  $d_K$  为路径  $K$  的寻优步骤距离;  $\omega$  为时间计时长度,时间越小表示计算越密集、越重要;  $z$  为状态估计误差,误差越低,说明蚂蚁寻优路径的信息浓度越高,需要按照该条路径进行寻优。

4) 集群边界节点的反馈更新表达为

$$\begin{cases} q_k(t+1) = (1-p)q_k(t) + \frac{q_k(t)}{l_k(t)} + \zeta f_k(t) \\ f_k(t+1) = \mu f_k(t) [1-f(t)] \end{cases} \quad (27)$$

式中,  $f_k$  为 Logistic 混沌映射获取的路径信息量;  $t, t+1$  均为迭代更新次数;  $\zeta$  为更新系数,根据系统环境设置;  $\mu$  为迭代方向的指示因子,取值范围为 [3.0, 3.5];  $l_k(t)$  为  $t$  迭代时刻步长。

通过上述步骤可以极大提高求解速度和效率。求解流程如图 3 所示。

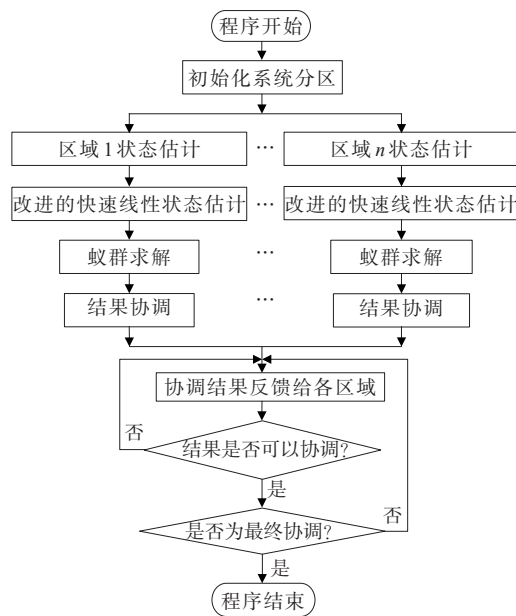


图 3 本文所提分布式状态估计流程

Figure 3 Flowchart of proposed distributed state estimation

## 3 算例分析

为了检验本文所提方法的有效性,在单台 PC 机 windows10 系统下,使用 Python 程序设计工具对所提方法在精度、收敛性及速率等方面进行验证。程序设计运行环境为 Intel(R) Core(TM)

I5-6500CPU@3.2 GHz, 在内存 16 G 的 PC 机上运行。本文设计的多目标蚁群优化算法中参数: 蚂蚁数量为 100, 最大迭代次数为 200, 信息素强度  $q = 60$ ,  $\alpha = 1.6$ ,  $\beta = 3$ ,  $\gamma = 1$ ,  $\varepsilon = 1.5$ 。

采用山东省某城市 2022 年 8 月 1 日至 10 月 31 日的负荷及发电数据(共 92 d, 每天按 24 h, 每小时按 5 min 为间隔采集), 对应至图 4 系统中并进行潮流计算, 将获得的节点电压相量、节点注入复功率及输电线路首末端复功率作为真实值。在真实值基础上, 节点电压幅值叠加高斯分布白噪声, 其标准差设置为  $\sigma_1 = 0.025$ ; 设置节点注入、输电线路首末端复功率叠加高斯分布白噪声的标准差分别为  $\sigma_2 = 0.0045$ ,  $\sigma_3 = 0.005$ 。

### 3.1 算例 1

采用 IEEE 57 系统验证本文所提分布式状态估计方法, 如图 4 所示, 该系统按照均衡分区方法划分为 2 个集群, 虚线框内为集群 1, 其余电网为集群 2; 系统中包含 57 个节点、7 个发电机节点和 50 个负荷节点; 节点 6 上的发电机表示风力发电机组, 节点 1 为参考节点, 其相位为 0。设置集群 1、2 内各存在一个节点电压相量为伪量测, 分别为 20、57; 集群 1、2 的边界节点设置为 6、7、10、13、24、26、38、50。

为了检验本文所提方法的计算精确度, 以某时刻下的潮流计算真值、量测值及状态估计值为例, 采用传统集中式最小二乘法与本文所提分布式方法进行对比(不考虑传统集中式最小二乘法则无法

获取全网信息问题), 如表 1 所示, 可以看出, 本文所提方法比较接近真值, 而传统集中式最小二乘法对于每一个节点电压幅值误差较大。

传统集中式最小二乘法和本文所提方法计算误差如图 5 所示, 可以看出, 本文所提方法计算误差在 0.1% 以内, 低于同节点的传统集中式最小二乘法计算误差。误差计算公式为

$$e = \frac{|r - p|}{|r|} \times 100\% \quad (28)$$

式中,  $e$  为误差;  $r$  为真值;  $p$  为计算值。

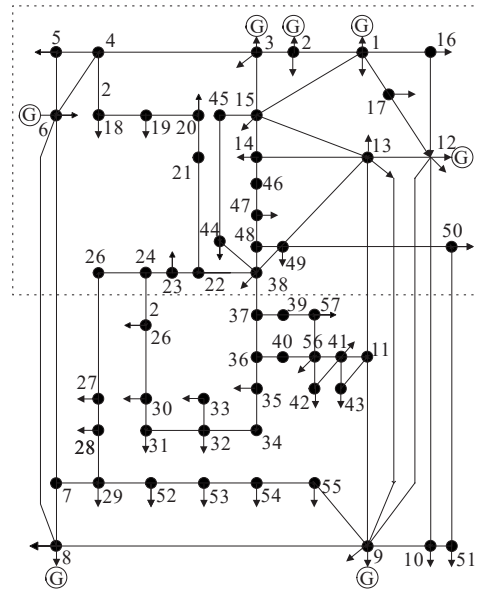


图 4 IEEE 57 系统(划分为 2 个集群)

Figure 4 IEEE 57 system (divided into two clusters)

表 1 传统集中式最小二乘法、本文所提方法电压幅值状态估计结果

Table 1 Voltage magnitude state estimation results of traditional centralized least square method and proposed method p.u.

节点	电压幅值		真值	节点	电压幅值		真值	节点	电压幅值		真值
	传统	本文			传统	本文			传统	本文	
1	1.089 0	1.081 2	1.081 6	16	1.129 4	1.127 8	1.127 7	31	1.021 9	1.020 8	1.020 3
2	1.094 0	1.089 2	1.089 4	17	1.024 7	1.022 6	1.022 8	32	1.191 4	1.194 8	1.195 0
3	1.708 0	1.703 0	1.704 0	18	0.944 3	0.953 6	0.953 2	33	1.041 2	1.040 2	1.040 0
4	0.998 8	0.996 3	0.996 5	19	0.871 9	0.861 5	0.861 6	34	1.190 4	1.194 2	1.194 5
5	1.079 9	1.079 3	1.079 2	20	1.025 5	1.023 3	1.023 5	35	0.937 7	0.936 1	0.936 3
6	1.038 0	1.036 2	1.036 1	21	1.101 9	1.092 7	1.092 8	36	1.062 7	1.066 5	1.066 8
7	1.059 4	1.061 3	1.061 6	22	0.980 7	0.981 8	0.981 7	37	0.984 0	0.986 2	0.986 5
8	1.086 1	1.087 2	1.087 7	23	0.956 9	0.956 5	0.956 2	38	1.071 0	1.069 4	1.069 1
9	1.090 8	1.093 2	1.093 8	24	0.979 1	0.976 5	0.976 7	39	1.069 4	1.065 8	1.065 9
10	0.965 3	0.972 1	0.972 4	25	0.900 3	0.895 3	0.895 4	40	0.991 4	0.987 7	0.987 2
11	1.021 0	1.025 4	1.025 9	26	0.960 7	0.962 5	0.962 0	41	0.877 3	0.876 9	0.876 2
12	1.122 9	1.117 1	1.117 8	27	0.991 9	0.986 2	0.986 5	42	0.865 9	0.864 0	0.864 1
13	0.981 0	0.971 5	0.971 7	28	1.014 6	1.010 6	1.010 5	43	1.050 2	1.048 9	1.048 6
14	1.136 2	1.139 5	1.139 8	29	1.003 6	1.008 8	1.008 9	44	1.157 0	1.160 4	1.160 9
15	1.057 5	1.050 9	1.050 2	30	1.071 1	1.069 8	1.069 4	45	0.977 3	0.976 6	0.976 1
								46	1.091 2	1.095 5	1.095 8
								47	1.064 6	1.062 5	1.062 5
								48	0.904 8	0.908 4	0.908 7
								49	1.049 7	1.047 3	1.047 6
								50	0.944 8	0.935 7	0.935 5
								51	1.161 6	1.165 8	1.165 5
								52	1.006 7	1.006 0	1.005 0
								53	1.173 6	1.171 7	1.171 8
								54	0.967 5	0.975 9	0.975 5
								55	1.068 9	1.072 6	1.072 7
								56	1.003 7	1.002 5	1.002 0
								57	0.907 8	0.910 6	0.910 4

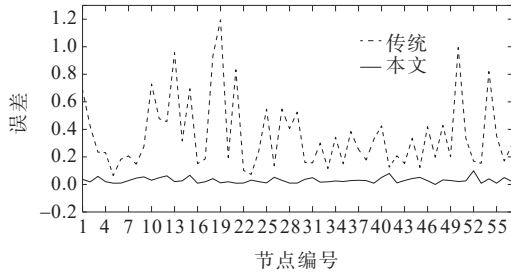


图5 传统集中式最小二乘法和本文所提方法计算误差  
Figure 5 Calculation errors of traditional centralized least square method and proposed method

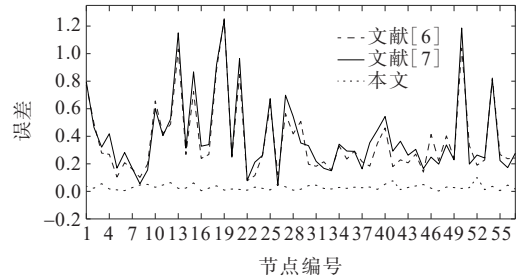


图7 文献[6],[7]计算方法与本文所提方法结果误差  
Figure 7 Calculation errors of methods in references [6,7] and proposed method

### 3.2 算例 2

为了进一步验证本文所提方法的精确性和计算速度,采用算例 2 进行验证,如图 6 所示,此系统在图 4 基础上设置非均衡集群 1、2、3。

1) 检验本文所提方法的精确性。将文献[6]、[7]中所提分布式方法与本文所提方法计算误差进行比较,计算结果如图 7 所示(按式(28)计算误差),可以看出,本文所提方法计算误差较低,稳定在 0.1% 以内,相对而言,文献[6]、[7]中所提方法计算误差相对较高。

2) 验证本文所提方法的计算速度。任意选择 100 次状态估计进行计算,与文献[6]、[7]中的分布式状态估计方法计算时间的对比结果如图 8 所示,可以看出,本文所提方法使用时间在 0.02 s 以内,而其他方法所用时间都在 0.02 s 以上,由此可见,本文所提方法所用时间较短、计算速度较快。

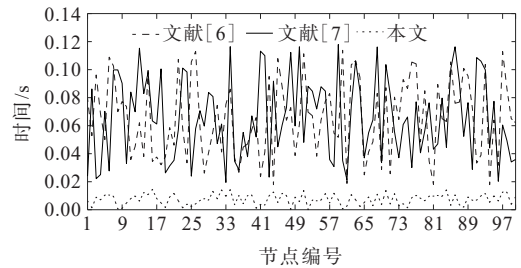


图8 本文所提方法与文献[6],[7]中方法计算时间对比  
Figure 8 Calculation time of proposed method and methods in references [6,7]

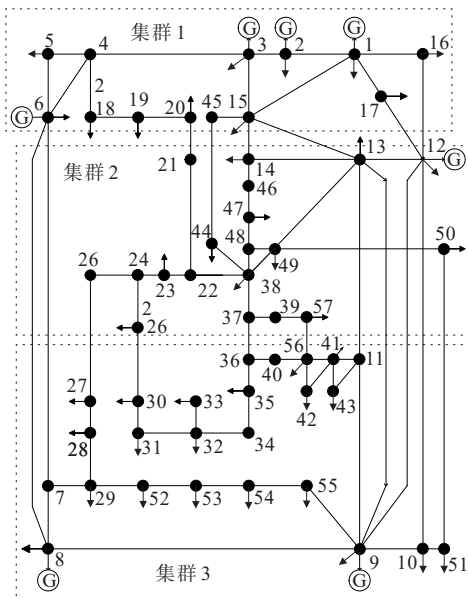


图6 IEEE 57 系统(划分为 3 个集群)  
Figure 6 IEEE 57 system (divided into three clusters)

## 4 结语

新型电力系统中高渗透率的分布式可再生能源使电力系统运行状态发生不规则的变化形态,为了高效率地获得分布式系统运行状态,本文提出了基于边缘计算的分布式状态估计方法,通过实际系统的仿真验证,可得到如下结论:

- 1) 采用分布式状态估计方法合理,能够解决电力系统节点电压、电流相量分布量测管理的实际情况;
- 2) 采用改进的线性状态估计方法的精度较高,且计算速度较快;
- 3) 基于多目标蚁群的状态估计能够快速获得集群内部及全网的状态结果。

### 参考文献:

[1] 沙伟燕,胡伟,何宁辉,等. 大规模虚拟储能平抑新能源功率预测误差优化调度方法[J]. 电力科学与技术学报, 2023,38(6):167-174.  
SHA Weiyang, HU Wei, HE Ninghui, et al. Optimal scheduling method for stabilizing power prediction error of new energy by large-scale virtual energy storage[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(6): 167-174.

[2] 周鑫,程松,任景,等. 含储热型热电联产机组的电力系统源荷联合优化调峰方法[J]. 电力科学与技术学报, 2023,38(5):12-21.

- ZHOU Xin, CHENG Song, REN Jing, et al. A source-load joint optimization peak regulation method of power system with heat storage combined heat and power units [J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2023, 38(5): 12-21.
- [3] 杨家俊, 邓星, 朱克东, 等. 基于异构图学习的新能源出力预测模型推理方法[J]. *电力建设*, 2023, 44(8): 41-51.  
YANG Jiajun, DENG Xing, ZHU Kedong, et al. Inference method for new energy power prediction models based on heterogeneous graph learning[J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(8): 41-51.
- [4] 潘旭, 王会超, 王建中, 等. 基于优先消纳新能源的电网调峰难度分析指标体系研究[J]. *供用电*, 2023, 40(2): 78-84.  
PAN Xu, WANG Huichao, WANG Jianzhong, et al. Index system research on difficulty analysis of power grid peak shaving with priority consumption of new energy[J]. *Distribution & Utilization*, 2023, 40(2): 78-84.
- [5] 夏世威, 张茜, 余璟, 等. 基于一致性理论的多区域电力系统分布式状态估计[J]. *电力自动化设备*, 2019, 39(12): 140-147.  
XIA Shiwei, ZHANG Qian, YU Jing, et al. Distributed state estimation of multi-area power systems based on consensus algorithm[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(12): 140-147.
- [6] 方陈, 姚维强, 魏新迟, 等. 考虑节点时空相关性的有限配电网 PMU 装置优化部署[J]. *电网与清洁能源*, 2023, 39(8): 105-115.  
FANG Chen, YAO Weiqiang, WEI Xinchang, et al. Optimal placement of limited distribution PMU considering spatiotemporal correlation of nodes[J]. *Power System and Clean Energy*, 2023, 39(8): 105-115.
- [7] 江楠, 董熙, 高原, 等. 基于暂态录波与多元状态估计的阀冷系统故障预警及识别[J]. *电气技术*, 2024, 25(2): 45-61.  
JIANG Nan, DONG Xi, GAO Yuan, et al. Fault warning and identification of valve cooling system based on transient recording and multivariate state estimation[J]. *Electrical Engineering*, 2024, 25(2): 45-61.
- [8] 李媛. 基于智能电表数据的配电网状态估计[J]. *电测与仪表*, 2023, 60(4): 182-185.  
LI Yuan. Distribution network state estimation based on smart meter data[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023, 60(4): 182-185.
- [9] 夏添梁, 张玉敏, 杨明, 等. 联合长短期记忆神经网络和粒子滤波的配电网预测辅助鲁棒状态估计方法[J]. *高压技术*, 2022, 48(4): 1343-1355.  
XIA Tianliang, ZHANG Yumin, YANG Ming, et al. Robust forecasting-aided state estimation method of distribution network based on long-short term memory neural network and particle filter[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(4): 1343-1355.
- [10] 方春华, 陶玉宁, 吴田, 等. 基于 HHT 的绝缘子泄漏电流分析及放电状态分类识别[J]. *高压电器*, 2024, 60(1): 25-32.  
FANG Chunhua, TAO Yuning, WU Tian, et al. Leakage current analysis and classification of discharge state identification of insulator based on HHT[J]. *High Voltage Apparatus*, 2024, 60(1): 25-32.
- [11] 周文斌, 靳阳, 刘士峰, 等. 基于两阶段状态估计的配电网智能计量系统设计[J]. *电子器件*, 2022, 45(6): 1418-1423.  
ZHOU Wenbin, JIN Yang, LIU Shifeng, et al. Design of distribution intelligent system based on two-stage state estimation[J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2022, 45(6): 1418-1423.
- [12] 刘科研, 盛万兴, 何开元, 等. 基于拉格朗日松弛技术的复杂有源配电网分布式状态估计[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(15): 125-132.  
LIU Keyan, SHENG Wanxing, HE Kaiyuan, et al. Distributed state estimation of complex active distribution network based on Lagrange relaxation technique[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(15): 125-132.
- [13] 乐健, 李星锐, 周谦, 等. 电力系统多区域分布式状态估计方法[J]. *电力自动化设备*, 2020, 40(5): 165-172.  
LE Jian, LI Xingrui, ZHOU Qian, et al. Multi-area distributed state estimation method for power system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(5): 165-172.
- [14] 张铎, 吴丽珍. 计及坏数据辨识与修正的配电网状态估计[J]. *电气技术*, 2022, 23(11): 1-12.  
ZHANG Shuo, WU Lizhen. Distribution network state estimation considering bad data identification and correction[J]. *Electrical Engineering*, 2022, 23(11): 1-12.
- [15] 郭梦芳, 杜翔, 王飞. 考虑边界等式约束的电-气-热综合能源系统鲁棒状态估计方法[J]. *中国电力*, 2023, 56(6): 101-106.  
GUO Mengfang, DU Xiang, WANG Fei. Robust state estimation method for electric-gas-heat integrated energy system considering boundary equation constraints[J]. *Electric Power*, 2023, 56(6): 101-106.
- [16] 翟苏巍, 李文云, 周成, 等. 基于改进概率神经网络的储能电池荷电状态估计[J]. *智慧电力*, 2024, 52(2): 94-100.  
ZHAI Suwei, LI Wenyun, ZHOU Cheng, et al. State-of-charge estimation of energy storage batteries based on modified probabilistic neural networks[J]. *Smart Power*, 2024, 52(2): 94-100.
- [17] 黄哲洙, 金鹏, 王洋, 等. 含光伏发电的配电网分布式状态估计方法[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(7): 167-174.  
HUANG Zhezhu, JIN Peng, WANG Yang, et al. A distributed state estimation method for distribution networks containing photovoltaic power generation[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2021, 42(7): 167-174.



- control by PV inverters[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2016,7(4):1624-1633.
- [15] KARAGIANNOPOULOS S, MYLONAS C, ARISTIDOU P, et al. Active distribution grids providing voltage support: the Swiss case[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2021,12(1):268-278.
- [16] 蔡永翔,唐巍,张博,等. 适应高比例户用光伏的中低压配电网集中-分布式协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2020,40(15):4843-4854.  
CAI Yongxiang, TANG Wei, ZHANG Bo, et al. Centralized-distributed multi-objective coordinated control for MV and LV distribution networks adapting to high-proportion residential PV units[J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(15):4843-4854.
- [17] VALENCIA A, HINCAPIE R A, GALLEGO R A. Optimal location, selection, and operation of battery energy storage systems and renewable distributed generation in medium-low voltage distribution networks [J]. Journal of Energy Storage,2021,34:102158.
- [18] LEISSE I, SAMUELSSON O, SVENSSON J. Coordinated voltage control in medium and low voltage distribution networks with wind power and photovoltaics [C]//2013 IEEE Grenoble Conference. Grenoble, France. IEEE,2013:1-6.
- [19] LI X Z, WANG W Q, WANG H Y, et al. Dynamic environmental economic dispatch of hybrid renewable energy systems based on tradable green certificates[J]. Energy,2020,193:116699.
- [20] 曹敏健,胡泽春,孟颖,等. 含抽蓄电站与新能源发电的柔性直流系统日前优化调度方法[J]. 电力系统自动化, 2021,45(15):36-44.  
CAO Minjian, HU Zechun, MENG Ying, et al. Day-ahead optimal dispatch method for flexible DC system with pumped storage hydropower plant and new energy power generation[J]. Automation of Electric Power Systems,2021,45(15):36-44.
- [21] 张博,唐巍,蔡永翔,等. 基于一致性算法的户用光伏逆变器储能分布式控制策略[J]. 电力系统自动化,2020, 44(2):86-94.  
ZHANG Bo, TANG Wei, CAI Yongxiang, et al. Distributed control strategy of residential photovoltaic inverter and energy storage based on consensus algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020,44(2):86-94.
- [22] STETZ T, MARTEN F, BRAUN M. Improved low voltage grid-integration of photovoltaic systems in Germany[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2013,4(2):534-542.
- [23] HE M Y, SOLTANI Z, GHALJEHEI M, et al. A SOCP-based ACOPF for operational scheduling of three-phase unbalanced distribution systems and coordination of PV smart inverters[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024,39(1):229-244.
- [24] 郭沛,王利利,李锰,等. 基于灵敏度聚类的含DG配电网电压分区控制方法[J]. 电力科学与技术学报,2022,37 (6):100-107.  
GUO Pei, WANG Lili, LI Meng, et al. Voltage partition control method for distribution network with DG based on sensitivity clustering[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2022,37(6):100-107.
- 
- (上接第84页 Continued from page 84)
- [18] 徐俊俊,吴在军,胡素然,等. 考虑多类型分布式电源和负荷不确定性的主动配电网区间状态估计[J]. 中国电机工程学报,2018,389(11):3255-3266.  
XU Junjun, WU Zaijun, HU Qinran, et al. Interval state estimation for active distribution networks considering uncertainties of multiple types of DGs and loads[J]. Proceedings of the CSEE,2018,389(11):3255-3266.
- [19] ISSICABA D, COSTA A S, COLOMBO J L. Real-time monitoring of points of common coupling in distribution systems through state estimation and geometric tests[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2016,7(1):9-18.
- [20] 尹冠雄,陈彬彬,孙宏斌,等. 综合能源系统分析的统一能路理论(四):天然气网动态状态估计[J]. 中国电机工程学报,2020,40(18):5827-5837.  
YIN Guanxiong, CHEN Binbin, SUN Hongbin, et al. Energy circuit theory of integrated energy system analysis (IV): dynamic state estimation of the natural gas network[J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(18):5827-5837.
- [21] 龙文,黄涛,朱燕,等. 基于状态估计的配电网多源信息数据辨识[J]. 电子器件,2022,45(6):1408-1412.  
LONG Wen, HUANG Tao, ZHU Yan, et al. Multi-source information data identification in distribution network based on state estimation[J]. Chinese Journal of Electron Devices,2022,45(6):1408-1412.
- [22] ZANG H X, GENG M H, HUANG M Y, et al. Asynchronous and adaptive state estimation of integrated electricity-gas energy systems[J]. IEEE Internet of Things Journal,2023,10(9):7636-7644.
- [23] CHEN L, LI Y, HUANG M Y, et al. Robust dynamic state estimator of integrated energy systems based on natural gas partial differential equations[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2022,58(13):3303-3312.
- [24] 陈远东,孟辉,包森布尔,等. 基于边缘计算的新能源电网云-边协同优化调度模型研究[J]. 可再生能源,2023, 41(3):377-383.  
CHEN Yuandong, MENG Hui, BAO Fenbuer, et al. Research on cloud-Side collaborative optimal scheduling model of new energy grid based on edge computing[J]. Renewable Energy Resources,2023,41(3):377-383.