(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 107563550 A
(43)申请公布日 2018.01.09

(21)申请号 201710731467.7

(22)申请日 2017.08.23

(71)申请人 武汉大学
地址 430072 湖北省武汉市武昌区珞珈山武汉大学

(72)发明人 乐健 李星锐 庞凯元 王曹

(74)专利代理机构 武汉科皓知识产权代理事务所(特殊普通合伙) 42222
代理人 鲁力

(51)Int.Cl.
G06Q 10/04(2012.01)
G06Q 10/06(2012.01)
G06N 3/12(2006.01)
G06Q 50/06(2012.01)
H02J 3/06(2006.01)

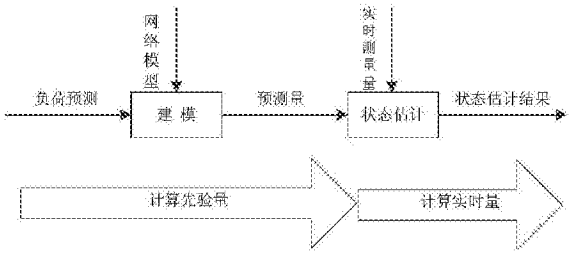
权利要求书5页 说明书10页 附图2页

(54)发明名称

一种基于PMU的配电网实时分布式状态估计及PMU的优化配置方法

(57)摘要

本发明涉及一种基于PMU的配电网实时分布式状态估计及PMU的优化配置方法。主要是利用最小均方差估计算法(MMSE)与潮流模型作为核心计算得到分布式电网状态估计量;利用遗传算法作为核心计算得到PMU配置位置优化方案。实时PMU状态估计方法在分布式电网的潮流快速变化中,计算得到较准确的电压、相角估计值,保证电力系统的稳定运行与调控;通过遗传算法优化PMU配置位置,减小状态估计误差。该状态估计及其优化方法能提高在含有分布式电能资源的电网中状态估计的精度,使电网中风能、光伏发电产生的电压快速波动问题对状态估计产生的影响得到解决。



CN 107563550 A

1.一种基于PMU的配电网实时分布式状态估计及PMU的优化配置方法，其特征在于，

步骤1、通过随机抽样得到电网的电阻、电抗；并定义节点有功功率、无功功率服从高斯分布，将二者的标准差设为定值，对其平均值进行随机抽样，得到有功，无功功率高斯分布函数；根据前推回代法计算配电网实际潮流、幅值与相位；

步骤2、根据配备了PMU装置的节点得到测量点电压幅值与相位；通过最小均方估计与最小二乘估计法，利用有功、无功功率计算得到其余节点的电压幅值、相位，比较其与实际值的误差，计算绝对误差，评估状态估计效果；

步骤3、利用遗传算法对PMU装置的配置位置进行优化，找到最小均方根误差值(ARMSE)的PMU配置节点位置，从而得到最优方案。

2.根据权利要求1所述的一种基于PMU的配电网实时分布式状态估计及PMU的优化配置方法，其特征在于，所述步骤1中，定义配电网各节点电阻r_i，电抗x_i服从随机分布，对r_i，x_i进行采样；并定义各节点有功功率p_i、无功功率q_i服从高斯分布 $p_i \sim N(\mu_i^p, \sigma_i^p)$， $q_i \sim N(\mu_i^q, \sigma_i^q)$，然后对$p_i$、$q_i$进行采样。

3.根据权利要求1所述的一种基于PMU的配电网实时分布式状态估计及PMU的优化配置方法，其特征在于，所述步骤2具体包括以下子步骤：

步骤3.1、由选取的安装PMU装置测量点，求取测量过渡矩阵P_m；每个节点与其相邻节点的电压幅值、相位差Δy可表示为：

$$\Delta y \triangleq \begin{bmatrix} y_2 - y_1 \\ y_3 - y_2 \\ \vdots \\ y_N - y_{N-1} \\ \delta_2 - \delta_1 \\ \delta_3 - \delta_2 \\ \vdots \\ \delta_N - \delta_{N-1} \end{bmatrix} \qquad \text{式一}$$

式中，y_i表示节点电压幅值，δ_i表示节点电压相位；

随机选取测量点k、k+3的幅值：

$$\begin{aligned} y_{k+3} - y_k &= (y_{k+3} - y_{k+2}) + (y_{k+2} - y_{k+1}) + (y_{k+1} - y_k) \\ &= \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_{k+1} - y_k \\ y_{k+2} - y_{k+1} \\ y_{k+3} - y_{k+2} \end{pmatrix} \qquad \text{式二} \\ &= P_m \Delta y \\ &= \Delta y_m \end{aligned}$$

式中，Δy_m表示相邻两测量点幅值、相位差：

$$\Delta y_m=\begin{pmatrix} y_{m_2}-y_{m_1} \\ \vdots \\ y_{m_M}-y_{m_{M-1}} \\ \delta_{m_2}-\delta_{m_1} \\ \vdots \\ \delta_{m_M}-\delta_{m_{M-1}} \end{pmatrix} \qquad \text{式三}$$

同理求取状态估计过渡矩阵P_e；计算测量点为k、k+3，状态估计点为k+1、k+2的幅值：

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} y_{k+1}-y_k \\ y_{k+2}-y_{k+1} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_{k+1}-y_k \\ y_{k+2}-y_{k+1} \\ y_{k+3}-y_{k+2} \end{pmatrix} \\ &= P_e \Delta y \\ &= \Delta y_e \end{aligned} \qquad \text{式四}$$

式中，Δy_e表示相邻两状态估计点幅值、相位差；

步骤3.2、计算支路潮流矩阵S：

$$S=\begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & \vdots & \vdots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & & & & \ddots & \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 & 1 & \cdots & 1 \\ \vdots & \ddots & & \vdots & 0 & 1 & 1 & \vdots \\ & & \ddots & & \vdots & & \ddots & \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1^n \\ p_2^n \\ \vdots \\ p_N^n \\ q_1^n \\ q_2^n \\ \vdots \\ q_N^n \end{bmatrix} \qquad \text{式五}$$

$$= P_b S_n$$

其中，p_k^n，q_k^n分别表示支路净有功，无功功率；s_n表示净功率；

步骤3.3、由经典潮流方程推导配电网中节点电压幅值、相位与有功、无功功率间的关系；

考虑一节点集合为V＝{1,2,…,N}的树状配电馈线，其中根节点编号为1，且由根节点开始，每个节点的子节点编号比其父节点要大，表示为$G \triangleq (V,E)$，其中V表示总节点或母线数，E表示支路；定义i的子节点集合为$C_i \triangleq \{j \in V : i > j, (i,j) \in E\}$，经典潮流方程如下：

$$\begin{aligned} P_{ij} &= \sum_{k \in C_j} P_{ij} + r_{ij} l_{ij} + p_j^c - p_j^g \\ Q_{ij} &= \sum_{k \in C_j} Q_{ij} + x_{ij} l_{ij} + q_j^c - q_j^g \\ v_j^2 &= v_i^2 - 2(r_{ij} P_{ij} + x_{ij} Q_{ij}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) l_{ij} \end{aligned} \qquad \text{式六}$$

式中，$j \in C_i$，r_{ij}和x_{ij}分别表示节点i与节点j之间的电阻和电抗，P_{ij}和Q_{ij}分别表示从节点i流向节点j的有功功率与无功功率，p_j^c和q_j^c表示节点j消耗的实际有功与无功功率，p_j^g

和q_j^g表示节点j的有功和无功电源，v_i表示节点i的电压幅值，l_{ij}表示支路(i，j)电流的平方；

在非线性电力系统中，支路两端电压相位差计算公式如下：

$$\sin(\delta_j-\delta_i)=\frac{-x_{ij}P_{ij}+r_{ij}Q_{ij}}{v_iv_j}$$　　式七

式中：δ_i表示i点的电压相位；通过近似认为$l_{ij}\approx0$，且电压幅值约等于标幺值；定义：$y_i\triangleq\frac{1}{2}v_i^2$，并将其带入式六和式七中，得到近似的线性潮流计算公式：

$$\begin{aligned}&P_{ij}\approx\sum_{k\in C_j}P_{ik}+p_j^c-p_j^g\\&Q_{ij}\approx\sum_{k\in C_j}Q_{ik}+q_j^c-q_j^g\\&y_i-y_j\approx r_{ij}P_{ij}+x_{ij}Q_{ij}\\&\delta_i-\delta_j\approx x_{ij}P_{ij}-r_{ij}Q_{ij}\end{aligned}$$　　式八

对于直线型网络，即所有的母线均朝同一个方向排列，每个节点有一个向上的和一个向下的支路，则式八可简化为：

$$\begin{aligned}&P_{k+1}=P_k-p_{k+1}^c+p_{k+1}^g\\&Q_{k+1}=Q_k-q_{k+1}^c+q_{k+1}^g\\&y_{k+1}=y_k-r_kP_k-x_kQ_k\\&\delta_{k+1}=\delta_k-x_kP_k+r_kQ_k\end{aligned}$$　　式九

式中：k＝0，1，...，N-1；可将式四改写为：

$$\begin{aligned}&P_k=\sum_{i=k+1}^{N}(p_i^c-p_i^g)=\sum_{i=k+1}^{N}p_i^n\\&Q_k=\sum_{i=k+1}^{N}(q_i^c-q_i^g)=\sum_{i=k+1}^{N}q_i^n\end{aligned}$$　　式十

式中：p_i^n和q_i^n分别表示节点i的净有功功率和净无功功率；结合式五，式九和式十，建立节点的有功功率、无功功率与电压幅值、相位间的方程：

$$\begin{aligned}\Delta y&=\begin{bmatrix}-diag(r)&-diag(x)\\-diag(x)&diag(r)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}P_1\\\vdots\\P_N\\Q_1\\\vdots\\Q_N\end{bmatrix}\\&=Z_bS\\&=Z_bP_bs_n\\&=Z_ns_n\end{aligned}$$　　式十一

步骤3.4、将式十一带入式三，式四，求得Δy_m，Δy_e：

$$\begin{aligned}\Delta y_m &= P_m \Delta y \\ &= P_m Z_n s_n \\ &= Z_m s_n \\ \Delta y_e &= P_e \Delta y \\ &= P_e Z_n s_n \\ &= Z_e s_n\end{aligned}$$ 式十二

步骤3.5、此时获得的状态估计值Δy_e误差较大，进一步用最小均方差估计法(MMSE)与最小线性二乘法(LLSE)建立状态估计器更新估计结果；在贝叶斯估计方程中，假定给定联合分布(X,Z)，其中Z为测量量，X为估计量，虚构造估计函数Y＝g(Z)，使均方误差E(||X-Y||^2)最小；在已经给定Z的条件下，MMSE等价于条件期望E[X|Y]；定义估计量与测量量在分布区间内都是线性的，得到测量量的最小均方误差也是线性的，即线性最小二乘估计，表示为L[X|Y]，即关于Z的线性方程a+bZ使得E((X-a-bZ)^2)最小；在多变量条件下，对于关于X、给定Z的线性方程L[X|Y]＝a+bZ表示使$E(\|X-a-bZ\|_2^2)$最小；对于上述条件中，最优线性估计方程为：

$$L[X|Z] = E(X) + \frac{\mathrm{cov}(X,Z)}{\mathrm{var}(Z)}(Z - E(Z))$$ 式十三

式中：cov(X,Z)表示变量X和Z的协方差；var(Z)表示Z的方差；

若Z的标准差矩阵Σ_Z是可逆的，则：

$$L[X|Z] = E(X) + \sum\nolimits_{X,Z} \sum\nolimits_{Z}^{-1} (Z - E(Z))$$ 式十四

将X＝Δy_e，Z＝Δy_m带入式十四，可得：

$$\begin{aligned}L[\Delta y_e|\Delta y_m] &= E(\Delta y) + \sum\nolimits_{\Delta y,\Delta y_m} \sum\nolimits_{\Delta y_m}^{-1} (\Delta y_m - E(\Delta y_m)) \\ &= Z_e \mu_s + Z_e \sum\nolimits_s (t) Z_m^T [Z_m \sum\nolimits_s (t) Z_m^T](\Delta y_m - Z_m \mu_s)\end{aligned}$$ 式十五

式中，μ_s表示净功率平均值：

$$\mu_s = \left(\mu_2^p \quad \cdots \quad \mu_n^p \quad \mu_2^q \quad \cdots \quad \mu_n^q\right)^T$$ 式十六

步骤3.6、计算协方差$\Sigma_s(t)$：

$\Sigma_s(t) = E((s_n - \mu_s)(s_n - \mu_s)^T)$　　式十七

式中，t表示采样次数；

步骤3.7、将$Z_m = P_m Z_n$，$Z_e = P_e Z_n$式十六，式十七带入式十五，得到更新后的状态估计值Δy_e。

4.根据权利要求1所述的一种基于PMU的配电网实时分布式状态估计及PMU的优化配置方法，其特征在于，所述步骤3具体方法是：利用遗传算法对PMU配置位置进行优化；定义均方根误差(ARMSE)：

$$ARMSE = \sqrt{\frac{1}{N-M} \sum_{n=1}^{N} \|y_r(n) - y_e(n)\|_2^2}$$ 式十八

式中，N表示总节点个数，M表示测量点个数，$y_r(n)$表示实际电压幅值、相位值，$y_e(n)$表示经MMSE更新后的状态估计值；

以ARMSE作为适应度函数进行优化，经过编码、交叉、变异、选择操作后更新配置方案，得到使ARMSE值最小时的PMU配置位置。

一种基于PMU的配电网实时分布式状态估计及PMU的优化配置方法

技术领域：

[0001] 本发明涉及电力系统状态估计的技术领域，特别涉及基于PMU的含分布式电能资源的电网状态估计及其优化方法。

背景技术

[0002] 目前随着电力电力系统的调度自动化水平越来越高，加强实时数据库的可靠性和准确性成为对电网实施有效控制与操作的前提。但配网遥测设备经常受随机误差、仪表误差和模式误差的干扰而导致数据不准，直接利用仪器传送上来的数据进行计算不能满足要求。

[0003] 就目前而言，各区域电网的调度中心拥有并维护着所辖电网的详细参数。各调度中心都针对所辖区域内的电网建立了较为详细的电力系统模型，而对相邻电网的模型则在一定程度上进行简化和等值，并在此系统模型的基础上进行计算机仿真，这样就为电力调度与电网监控提供了重要依据。上述简化等值的方法克服了由于电力系统数据资源广域分布所带来的数据难以收集的困难，降低了系统仿真的复杂程度，对于联系不太紧密的子网在一定的精度范围内能够满足实际工程需要，但简化等值模型的适用范围有限。

[0004] 输电网一般三相平衡且对称，有很多的量测仪表，环网结构，而配电网网络拓扑为放射状，在正常运行时是开环，只有在倒换负荷或发生故障时才有可能出现环网运行情况。配电网的另一个特点是配电线路的总长度较输电线路要长且分支较多，配电线的线径比输电网细，导致配电网r/x比较大，且线路的充电电容可以忽略。有单相、双相、三相不对称负荷，量测仪表相对不足，状态估计需要预测的负荷数据才行。配电网自身的特点决定网络雅克比矩阵的条件数增大，呈现不同程度的病态特征，传统的输电系统的状态估计方法如快速分解状态估计法来计算配电网时收敛效果都不好。

[0005] 在大电网供电的基础上，在配电系统靠近用户侧引入容量不大的分布式电源供电，可以综合利用现有资源和设备，向用户提供可靠和优质的电能。当在配电系统中引入分布式电源形成分布式发电系统后，引起了配电线路中传输的有功和无功功率的数量和方向的改变，配电系统成为了一个多电源的系统，而且不一定能维持严格的辐射型结构。因此需要对现有的配电网状态估计算法进行改造和调整。

[0006] 为了解决目前功率预测方法仍存在的较大误差难以满足高精度系统状态估计要求的问题，应用同步相量测量(PMU)装置实现区域电网状态估计的研究逐步增多，一些研究提出了诸如利用PMU装置和SCADA系统混合估计、PMU测量信息结合节点净功率预测等解决方法，但由于PMU装置高昂的价格等实现困难的原因制约了这些方法的应用。

[0007] 因此，若能设计一种能对分布式电网进行实时状态估计的方法，同时通过优化，高效利用PMU装置测量信息实时并且高精度测量电压幅值与相角的优点，将能保证电力系统在接入分布式电能资源后的稳定运行，提高状态估计的精度。

发明内容：

[0008] 本发明的目的在于提供一种基于PMU的配电网实时分布式状态估计及PMU的优化配置方法。该方法能够高效利用PMU装置测量信息实时并且高精度测量电压幅值与相角的优点，能提高接入分布式电能资源后状态估计的精度。

[0009] 本发明可通过以下的技术方案加以实现：

[0010] 一种基于PMU的配电网实时分布式状态估计及PMU的优化配置方法，其特征在于，

[0011] 步骤1、通过随机抽样得到电网的电阻、电抗；并定义节点有功功率、无功功率服从高斯分布，将二者的标准差设为定值，对其平均值进行随机抽样，得到有功，无功功率高斯分布函数；根据前推回代法计算配电网实际潮流、幅值与相位；

[0012] 步骤2、根据配备了PMU装置的节点得到测量点电压幅值与相位；通过最小均方估计与最小二乘估计法，利用有功、无功功率计算得到其余节点的电压幅值、相位，比较其与实际值的误差，计算绝对误差，评估状态估计效果；

[0013] 步骤3、利用遗传算法对PMU装置的配置位置进行优化，找到最小均方根误差值(ARMSE)的PMU配置节点位置，从而得到最优方案。

[0014] 在上述的一种基于PMU的配电网实时分布式状态估计及PMU的优化配置方法，所述步骤1中，定义配电网各节点电阻r_i，电抗x_i服从随机分布，对r_i，x_i进行采样；并定义各节点有功功率p_i、无功功率q_i服从高斯分布$p_i \sim N(\mu_i^p, \sigma_i^p)$，$q_i \sim N(\mu_i^q, \sigma_i^q)$，然后对$p_i$、$q_i$进行采样。

[0015] 3.根据权利要求1所述的一种基于PMU的配电网实时分布式状态估计及PMU的优化配置方法，其特征在于，所述步骤2具体包括以下子步骤：

[0016] 步骤3.1、由选取的安装PMU装置测量点，求取测量过渡矩阵P_m。每个节点与其相邻节点的电压幅值、相位差Δy可表示为：

[0017] $$\Delta y \triangleq \begin{bmatrix} y_2 - y_1 \\ y_3 - y_2 \\ \vdots \\ y_N - y_{N-1} \\ \delta_2 - \delta_1 \\ \delta_3 - \delta_2 \\ \vdots \\ \delta_N - \delta_{N-1} \end{bmatrix}$$ 式一

[0018] 式中，y_i表示节点电压幅值，δ_i表示节点电压相位。

[0019] 随机选取测量点k、k+3的幅值计算：

$$y_{k+3}-y_k=(y_{k+3}-y_{k+2})+(y_{k+2}-y_{k+1})+(y_{k+1}-y_k)$$
$$=\begin{pmatrix}1&1&1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}y_{k+1}-y_k\\y_{k+2}-y_{k+1}\\y_{k+3}-y_{k+2}\end{pmatrix}$$
$$=P_m\Delta y$$
$$=\Delta y_m$$

[0020] 式二

[0021] 式中，Δy_m表示相邻两测量点幅值、相位差：

[0022] $$\Delta y_m=\begin{pmatrix}y_{m_2}-y_{m_1}\\\vdots\\y_{m_M}-y_{m_{M-1}}\\\delta_{m_2}-\delta_{m_1}\\\vdots\\\delta_{m_M}-\delta_{m_{M-1}}\end{pmatrix}$$ 式三

[0023] 同理求取状态估计过渡矩阵P_e。计算测量点为k、k+3，状态估计点为k+1、k+2的幅值：

[0024] $$\begin{pmatrix}y_{k+1}-y_k\\y_{k+2}-y_{k+1}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&0\end{pmatrix}\begin{pmatrix}y_{k+1}-y_k\\y_{k+2}-y_{k+1}\\y_{k+3}-y_{k+2}\end{pmatrix}$$
$$=P_e\Delta y$$
$$=\Delta y_e$$

式四

[0025] 式中，Δy_e表示相邻两状态估计点幅值、相位差；

[0026] 步骤3.2、计算支路潮流矩阵S：

[0027] $$S=\begin{bmatrix}1&1&\cdots&1&0&\cdots&\cdots&0\\0&1&\cdots&\vdots&\vdots&\ddots&&\vdots\\\vdots&&\ddots&&&&\ddots&\\0&0&\cdots&1&0&\cdots&\cdots&0\\0&0&\cdots&0&1&1&\cdots&1\\\vdots&\ddots&&\vdots&0&1&1&\vdots\\&&\ddots&&\vdots&&\ddots&\\0&\cdots&\cdots&0&0&0&\cdots&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}p_1^n\\p_2^n\\\vdots\\p_N^n\\q_1^n\\q_2^n\\\vdots\\q_N^n\end{bmatrix}$$
$$=P_bs_n$$

式五

[0028] 其中，p_k^n，q_k^n分别表示支路净有功，无功功率；s_n表示净功率。

[0029] 步骤3.3、由经典潮流方程推导配电网中节点电压幅值、相位与有功、无功功率间的关系。

[0030] 考虑一节点集合为V＝{1,2,…,N}的树状配电馈线，其中根节点编号为1，且由根节点开始，每个节点的子节点编号比其父节点要大，表示为$G\triangleq(V,E)$，其中V表示总节点或

母线数，E表示支路。定义i的子节点集合为$C_i \triangleq \{j \in V : i > j, (i,j) \in E\}$，经典潮流方程如下：

$$P_{ij} = \sum_{k \in C_j} P_{ij} + r_{ij} l_{ij} + p_j^c - p_j^g$$

[0031] $$Q_{ij} = \sum_{k \in C_j} Q_{ij} + x_{ij} l_{ij} + q_j^c - q_j^g \qquad \text{式六}$$

$$v_j^2 = v_i^2 - 2(r_{ij} P_{ij} + x_{ij} Q_{ij}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) l_{ij}$$

[0032] 式中，j∈Ci，rij和xij分别表示节点i与节点j之间的电阻和电抗，Pij和Qij分别表示从节点i流向节点j的有功功率与无功功率，p_j^c和q_j^c表示节点j消耗的实际有功与无功功率，p_j^g和q_j^g表示节点j的有功和无功电源，vi表示节点i的电压幅值，lij表示支路(i，j)电流的平方。

[0033] 在非线性电力系统中，支路两端电压相位差计算公式如下：

[0034] $$\sin(\delta_j - \delta_i) = \frac{-x_{ij} P_{ij} + r_{ij} Q_{ij}}{v_i v_j} \qquad \text{式七}$$

[0035] 式中：δi表示i点的电压相位。通过近似认为lij≈0，且电压幅值约等于标幺值。定义：$y_i \triangleq \frac{1}{2} v_i^2$，并将其带入式六和式七中，得到近似的线性潮流计算公式：

$$P_{ij} \approx \sum_{k \in C_j} P_{ik} + p_j^c - p_j^g$$

[0036] $$Q_{ij} \approx \sum_{k \in C_j} Q_{ik} + q_j^c - q_j^g \qquad \text{式八}$$

$$y_i - y_j \approx r_{ij} P_{ij} + x_{ij} Q_{ij}$$

$$\delta_i - \delta_j \approx x_{ij} P_{ij} - r_{ij} Q_{ij}$$

[0037] 对于直线型网络，即所有的母线均朝同一个方向排列，每个节点有一个向上的和一个向下的支路，则式八可简化为：

$$P_{k+1} = P_k - p_{k+1}^c + p_{k+1}^g$$

[0038] $$Q_{k+1} = Q_k - q_{k+1}^c + q_{k+1}^g \qquad \text{式九}$$

$$y_{k+1} = y_k - r_k P_k - x_k Q_k$$

$$\delta_{k+1} = \delta_k - x_k P_k + r_k Q_k$$

[0039] 式中：k＝0，1，...，N-1。可将式四改写为：

$$P_k = \sum_{i=k+1}^{N} (p_i^c - p_i^g) = \sum_{i=k+1}^{N} p_i^n$$

[0040] $$Q_k = \sum_{i=k+1}^{N} (q_i^c - q_i^g) = \sum_{i=k+1}^{N} q_i^n \qquad \text{式十}$$

[0041] 式中：p_i^n和q_i^n分别表示节点i的净有功功率和净无功功率。结合式五，式九和式十，建立节点的有功功率、无功功率与电压幅值、相位间的方程：

[0042] $$\Delta y=\begin{bmatrix}-diag(r) & -diag(x)\\ -diag(x) & diag(r)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}P_1\\ \vdots\\ P_N\\ Q_1\\ \vdots\\ Q_N\end{bmatrix}$$ 式十一

$$=Z_bS$$
$$=Z_bP_bs_n$$
$$=Z_ns_n$$

[0043] 步骤3.4、将式十一带入式三，式四，求得Δym，Δye：

[0044] $$\Delta y_m=P_m\Delta y$$
$$=P_mZ_ns_n$$
$$=Z_ms_n$$
$$\Delta y_e=P_e\Delta y$$
$$=P_eZ_ns_n$$
$$=Z_es_n$$ 式十二

[0045] 步骤3.5、此时获得的状态估计值Δye误差较大，进一步用最小均方差估计法(MMSE)与最小线性二乘法(LLSE)建立状态估计器更新估计结果。在贝叶斯估计方程中，假定给定联合分布(X,Z)，其中Z为测量量，X为估计量，虚构造估计函数Y＝g(Z)，使均方误差E(||X-Y||^2)最小。在已经给定Z的条件下，MMSE等价于条件期望E[X|Y]。定义估计量与测量量在分布区间内都是线性的，得到测量量的最小均方误差也是线性的，即线性最小二乘估计，表示为L[X|Y]，即关于Z的线性方程a+bZ使得E((X-a-bZ)^2)最小。在多变量条件下，对于关于X、给定Z的线性方程L[X|Y]＝a+bZ表示使$E(\|X-a-bZ\|_2^2)$最小。对于上述条件中，最优线性估计方程为：

[0046] $$L[X|Z]=E(X)+\frac{\mathrm{cov}(X,Z)}{\mathrm{var}(Z)}(Z-E(Z))$$ 式十三

[0047] 式中：cov(X,Z)表示变量X和Z的协方差；var(Z)表示Z的方差；

[0048] 若Z的标准差矩阵ΣZ是可逆的，则：

[0049] $$L[X|Z]=E(X)+\sum\nolimits_{X,Z}\sum\nolimits_{Z}^{-1}(Z-E(Z))$$ 式十四

[0050] 将X＝Δye，Z＝Δym带入式十四，可得：

[0051] $$L[\Delta y_e|\Delta y_m]=E(\Delta y)+\sum\nolimits_{\Delta y,\Delta y_m}\sum\nolimits_{\Delta y_m}^{-1}(\Delta y_m-E(\Delta y_m))$$
$$=Z_e\mu_s+Z_e\sum\nolimits_s(t)Z_m^T[Z_m\sum\nolimits_s(t)Z_m^T](\Delta y_m-Z_m\mu_s)$$ 式十五

[0052] 式中，μs表示净功率平均值：

[0053] $$\mu_s=\left(\mu_2^p\ \ \cdots\ \ \mu_n^p\ \ \mu_2^q\ \ \cdots\ \ \mu_n^q\right)^T$$ 式十六

[0054] 步骤3.6、计算协方差Σs(t)：

[0055] Σs(t)＝E((sn-μs)(sn-μs)^T) 式十七

[0056] 式中，t表示采样次数。

[0057] 步骤3.7、将$Z_m=P_mZ_n$，$Z_e=P_eZ_n$式(16)，式十七带入式十五，得到更新后的状态估计值Δy_e。

[0058] 在上述的一种基于PMU的配电网实时分布式状态估计及PMU的优化配置方法，所述步骤3具体方法是：利用遗传算法对PMU配置位置进行优化。定义均方根误差(ARMSE)：

[0059] $$ARMSE=\sqrt{\frac{1}{N-M}\sum_{n=1}^{N}\left\|y_r(n)-y_e(n)\right\|_2^2} \qquad \text{式十八}$$

[0060] 式中，N表示总节点个数，M表示测量点个数，$y_r(n)$表示实际电压幅值、

[0061] 相位值，$y_e(n)$表示经MMSE更新后的状态估计值。

[0062] 以ARMSE作为适应度函数进行优化，经过编码、交叉、变异、选择操作后更新配置方案，得到使ARMSE值最小时的PMU配置位置。

[0063] 本发明的有益效果是：本发明的基于PMU的配电网实时分布式状态估计及PMU的优化配置方法同时具有估计量精度高和测量与计算响应速度快的优点，能提高接入分布式电能资源后电网的稳定性，将利于实现更加快速与精准的调度。同时通过优化提高了PMU装置的利用效率，使状态估计效果得到优化。

附图说明：

[0064] 图1是基于PMU装置的实时分布式电网状态估计原理图；

[0065] 图2是IEEE33节点配电系统接线图。

[0066] 图3是含PMU装置状态估计结果与实际值分布图。

[0067] 图4是含PMU装置状态估计结果绝对误差柱状图。

[0068] 图5是遗传算法优化最优个体均方根误差(ARMSE)变化折线图。

具体实施方式：

[0069] 下面结合附图对本发明专利进一步说明。本发明主要包括以下步骤：

[0070] (1)假定配电网各节点电阻r_i，电抗x_i服从随机分布，对r_i，x_i进行采样；假定各节点有功功率p_i、无功功率q_i服从高斯分布$p_i\sim N(\mu_i^p,\sigma_i^p)$，$q_i\sim N(\mu_i^q,\sigma_i^q)$，对$p_i$、$q_i$进行采样。

[0071] (2)由选取的安装PMU装置测量点，求取测量过渡矩阵P_m。每个节点与其相邻节点的电压幅值、相位差Δy可表示为：

[0072] $$\Delta y\triangleq\begin{bmatrix} y_2-y_1 \\ y_3-y_2 \\ \vdots \\ y_N-y_{N-1} \\ \delta_2-\delta_1 \\ \delta_3-\delta_2 \\ \vdots \\ \delta_N-\delta_{N-1} \end{bmatrix} \qquad \text{式一}$$

[0073] 式中，y_i表示节点电压幅值，δ_i表示节点电压相位。

[0074] 以选取测量点k、k+3的幅值计算为例：

[0075]
$$\begin{aligned} y_{k+3}-y_k &= (y_{k+3}-y_{k+2})+(y_{k+2}-y_{k+1})+(y_{k+1}-y_k) \\ &= \begin{pmatrix}1 & 1 & 1\end{pmatrix}\begin{pmatrix} y_{k+1}-y_k \\ y_{k+2}-y_{k+1} \\ y_{k+3}-y_{k+2}\end{pmatrix} \\ &= P_m\Delta y \\ &= \Delta y_m \end{aligned}$$ 式二

[0076] 式中，Δy_m表示相邻两测量点幅值、相位差：

[0077]
$$\Delta y_m = \begin{pmatrix} y_{m_2}-y_{m_1} \\ \vdots \\ y_{m_M}-y_{m_{M-1}} \\ \delta_{m_2}-\delta_{m_1} \\ \vdots \\ \delta_{m_M}-\delta_{m_{M-1}}\end{pmatrix}$$ 式三

[0078] 同理求取状态估计过渡矩阵P_e。计算测量点为k、k+3，状态估计点为

[0079] k+1、k+2的幅值：

[0080]
$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} y_{k+1}-y_k \\ y_{k+2}-y_{k+1}\end{pmatrix} &= \begin{pmatrix}1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0\end{pmatrix}\begin{pmatrix} y_{k+1}-y_k \\ y_{k+2}-y_{k+1} \\ y_{k+3}-y_{k+2}\end{pmatrix} \\ &= P_e\Delta y \\ &= \Delta y_e \end{aligned}$$ 式四

[0081] 式中，Δy_e表示相邻两状态估计点幅值、相位差。

[0082] (3)计算支路潮流矩阵S：

[0083]
$$S = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & \vdots & \vdots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & & & & \ddots & \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 & 1 & \cdots & 1 \\ \vdots & \ddots & & \vdots & 0 & 1 & 1 & \vdots \\ & & \ddots & & \vdots & & \ddots & \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} p_1^n \\ p_2^n \\ \vdots \\ p_N^n \\ q_1^n \\ q_2^n \\ \vdots \\ q_N^n \end{bmatrix}$$ 式五

$$= P_b s_n$$

[0084] 其中，p_k^n，q_k^n分别表示支路净有功，无功功率；s_n表示净功率。

[0085] (4)由经典潮流方程推导配电网中节点电压幅值、相位与有功、无功功率间的关系。

[0086] 考虑一节点集合为V＝{1,2,…,N}的树状配电馈线，其中根节点编号为1，且由根节点开始，每个节点的子节点编号比其父节点要大，表示为$G \triangleq (V,E)$，其中V表示总节点或

母线数，E表示支路。

[0087] 定义i的子节点集合为$C_i \triangleq \{j \in V : i > j, (i,j) \in E\}$，经典潮流方程如下：

$$P_{ij} = \sum_{k \in C_j} P_{ij} + r_{ij} l_{ij} + p_j^c - p_j^g$$

[0088] $$Q_{ij} = \sum_{k \in C_j} Q_{ij} + x_{ij} l_{ij} + q_j^c - q_j^g \qquad \text{式六}$$

$$v_j^2 = v_i^2 - 2(r_{ij} P_{ij} + x_{ij} Q_{ij}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) l_{ij}$$

[0089] 式中，j∈Ci，rij和xij分别表示节点i与节点j之间的电阻和电抗，Pij和Qij分别表示从节点i流向节点j的有功功率与无功功率，p_j^c和q_j^c表示节点j消耗的实际有功与无功功率，p_j^g和q_j^g表示节点j的有功和无功电源，vi表示节点i的电压幅值，lij表示支路(i，j)电流的平方。

[0090] 在非线性电力系统中，支路两端电压相位差计算公式如下：

[0091] $$\sin(\delta_j - \delta_i) = \frac{-x_{ij} P_{ij} + r_{ij} Q_{ij}}{v_i v_j} \qquad \text{式七}$$

[0092] 式中：δi表示i点的电压相位。

[0093] 通过近似认为lij≈0，且电压幅值约等于标幺值。定义：$y_i \triangleq \frac{1}{2} v_i^2$，并将其带入式六和式七中，得到近似的线性潮流计算公式：

$$P_{ij} \approx \sum_{k \in C_j} P_{ik} + p_j^c - p_j^g$$

[0094] $$Q_{ij} \approx \sum_{k \in C_j} Q_{ik} + q_j^c - q_j^g \qquad \text{式八}$$

$$y_i - y_j \approx r_{ij} P_{ij} + x_{ij} Q_{ij}$$

$$\delta_i - \delta_j \approx x_{ij} P_{ij} - r_{ij} Q_{ij}$$

[0095] 对于直线型网络，即所有的母线均朝同一个方向排列，每个节点有一个向上的和一个向下的支路，则式八可简化为：

$$P_{k+1} = P_k - p_{k+1}^c + p_{k+1}^g$$

[0096] $$Q_{k+1} = Q_k - q_{k+1}^c + q_{k+1}^g \qquad \text{式九}$$

$$y_{k+1} = y_k - r_k P_k - x_k Q_k$$

$$\delta_{k+1} = \delta_k - x_k P_k + r_k Q_k$$

[0097] 式中：k＝0，1，...，N-1。可将式四改写为：

$$P_k = \sum_{i=k+1}^{N} (p_i^c - p_i^g) = \sum_{i=k+1}^{N} p_i^n$$

[0098] $$Q_k = \sum_{i=k+1}^{N} (q_i^c - q_i^g) = \sum_{i=k+1}^{N} q_i^n \qquad \text{式十}$$

[0099] 式中：p_i^n和q_i^n分别表示节点i的净有功功率和净无功功率。结合式五，式九和式十，建立节点的有功功率、无功功率与电压幅值、相位间的方程：

[0100] $$\Delta y=\begin{bmatrix}-diag(r) & -diag(x)\\ -diag(x) & diag(r)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}P_1\\ \vdots\\ P_N\\ Q_1\\ \vdots\\ Q_N\end{bmatrix}$$ 式十一

$$=Z_bS$$
$$=Z_bP_bs_n$$
$$=Z_ns_n$$

[0101] (5)将式十一带入式三,式四,求得Δym,Δye:

[0102] $$\Delta y_m=P_m\Delta y$$
$$=P_mZ_ns_n$$
$$=Z_ms_n$$
$$\Delta y_e=P_e\Delta y$$
$$=P_eZ_ns_n$$
$$=Z_es_n$$ 式十二

[0103] (6)此时获得的状态估计值Δye误差较大,进一步用最小均方差估计法(MMSE)与最小线性二乘法(LLSE)建立状态估计器更新估计结果。在贝叶斯估计方程中,假定给定联合分布(X,Z),其中Z为测量量,X为估计量,虚构造估计函数Y=g(Z),使均方误差E(||X-Y||^2)最小。在已经给定Z的条件下,MMSE等价于条件期望E[X|Y]。

[0104] 假设估计量与测量量在分布区间内都是线性的,得到测量量的最小均方误差也是线性的,即线性最小二乘估计,表示为L[X|Y],即关于Z的线性方程a+bZ使得E((X-a-bZ)^2)最小。在多变量条件下,对于关于X、给定Z的线性方程L[X|Y]=a+bZ表示使$E(\|X-a-bZ\|_2^2)$最小。对于上述条件中,最优线性估计方程为:

[0105] $$L[X|Z]=E(X)+\frac{\mathrm{cov}(X,Z)}{\mathrm{var}(Z)}(Z-E(Z))$$ 式十三

[0106] 式中:cov(X,Z)表示变量X和Z的协方差;var(Z)表示Z的方差;

[0107] 若Z的标准差矩阵ΣZ是可逆的,则:

[0108] $$L[X|Z]=E(X)+\sum\nolimits_{X,Z}\sum\nolimits_{Z}^{-1}(Z-E(Z))$$ 式十四

[0109] 将X=Δye,Z=Δym带入式十四,可得:

[0110] $$L[\Delta y_e|\Delta y_m]=E(\Delta y)+\sum\nolimits_{\Delta y,\Delta y_m}\sum\nolimits_{\Delta y_m}^{-1}(\Delta y_m-E(\Delta y_m))$$
$$=Z_e\mu_s+Z_e\sum\nolimits_s(t)Z_m^T[Z_m\sum\nolimits_s(t)Z_m^T](\Delta y_m-Z_m\mu_s)$$ 式十五

[0111] 式中,μs表示净功率平均值:

[0112] $$\mu_s=\left(\mu_2^p\quad\cdots\quad\mu_n^p\quad\mu_2^q\quad\cdots\quad\mu_n^q\right)^T$$ 式十六

[0113] (7)计算协方差Σs(t):

[0114] Σs(t)=E((sn-μs)(sn-μs)^T) 式十七

[0115] 式中，t表示采样次数。

[0116] (8)将$Z_m=P_mZ_n$，$Z_e=P_eZ_n$，式十六，式十七带入式十五，得到更新后的状态估计值Δy_e。

[0117] (9)利用遗传算法对PMU配置位置进行优化。定义均方根误差(ARMSE)：

[0118] $$ARMSE=\sqrt{\frac{1}{N-M}\sum_{n=1}^{N}\left\|y_r(n)-y_e(n)\right\|_2^2} \qquad \text{式十八}$$

[0119] 式中，N表示总节点个数，M表示测量点个数，$y_r(n)$表示实际电压幅值、相位值，$y_e(n)$表示经MMSE更新后的状态估计值。

[0120] 以ARMSE作为适应度函数进行优化，经过编码、交叉、变异、选择操作后更新配置方案，得到使ARMSE值最小时的PMU配置位置。

[0121] 附图1为本发明采用的基于PMU装置的实时分布式电网状态估计原理图，包括计算先验量与实时量两个部分。在进行状态估计前，由配电网结构与负荷预测建立电网模型，将预测量输入到状态估计器中，并结合PMU装置测得的实时测量量得到其余节点的电压幅值、相位。

[0122] 下面结合附图2说明上述算法的具体技术实现。

[0123] 以IEEE33节点配电系统接线图电压幅值状态评估为例，假定PMU放置在第1、6、11、16、21、27节点处。假定各节点电阻r_k、电抗x_k服从均匀分布U(0.01,0.11)Ω，采用蒙特卡洛法进行随机抽样；节点1处电压$v_0=12kV$；各节点有功、无功功率服从高斯分布，$p_i\sim N(\mu_i^p,\sigma_i^p)$，$q_i\sim N(\mu_i^q,\sigma_i^q)$，其中平均值$\mu_i^p$，$\mu_i^q$均随机分布在(-1,1)kW内，标准差$\sigma_i^p=\sigma_i^q=30\%$，抽样得到各节点有功功率$p_i$，无功功率$q_i$。

[0124] 采用前推回代法计算得到配电网实际潮流u_r，i_r和幅值y_r，相位δ_r；根据式十五计算得到Δy_e。

[0125] 利用遗传算法进行PMU配置位置的优化，操作方法为：遗传算子的选择采用轮盘赌法；杂交采用两点交叉方式；变异采用单点变异，即随机选择一个位置，将该点基因取反。其中交叉概率：$P_C=0.25$，变异概率：$P_M=0.01$，规模M=30，代数G=10。

[0126] 附图3为PMU放置在第1、6、11、16、21、27节点处时实际电压幅值y_r与状态估计值y_m的对比图；附图4为各节点电压幅值绝对误差$|y_m-y_r|$分布；附图5为每代最优个体ARMSE变化图。

[0127] 因此，本发明提出的基于PMU的配电网实时分布式状态估计及PMU的优化配置方法同时具有估计量精度高和测量与计算响应速度快的优点，能提高接入分布式电能资源后电网的稳定性，将利于实现更加快速与精准的调度。同时通过优化提高了PMU装置的利用效率，使状态估计效果得到优化。

[0128] 以上实施例仅供说明本发明之用，而非对本发明的限制，有关技术领域的技术人员，在不脱离本发明的精神和范围的情况下，还可以作出各种变换或变型，因此所有等同的技术方案也应该属于本发明的范畴之内，应由各权利要求限定。

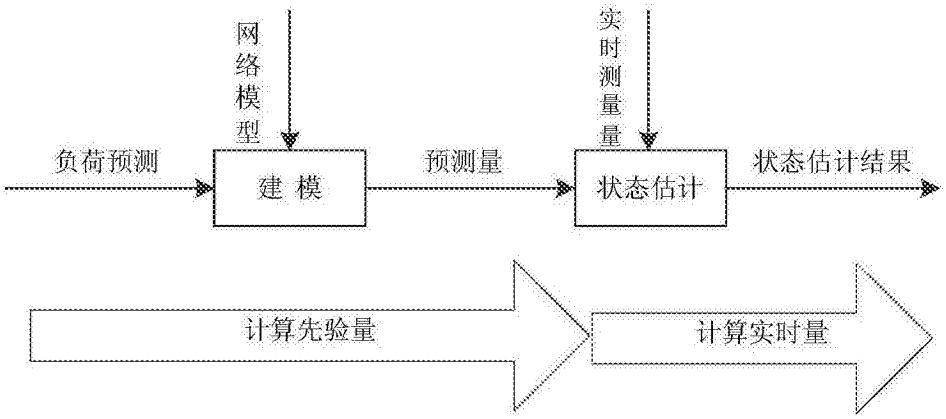

网络模型
实时测量量
负荷预测
建 模
预测量
状态估计
状态估计结果
计算先验量
计算实时量

图1

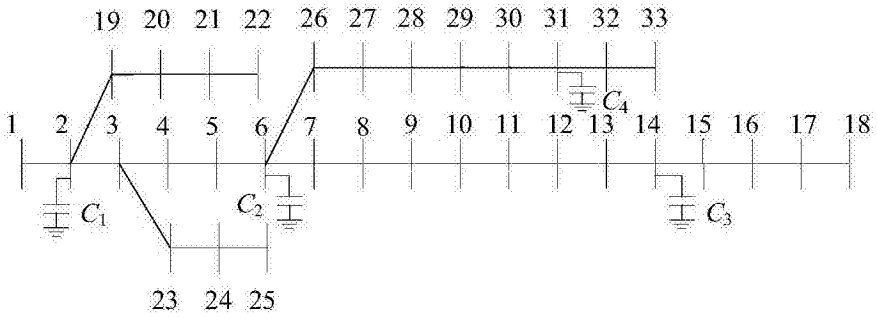

19 20 21 22 26 27 28 29 30 31 32 33
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
23 24 25
C1
C2
C3
C4

图2

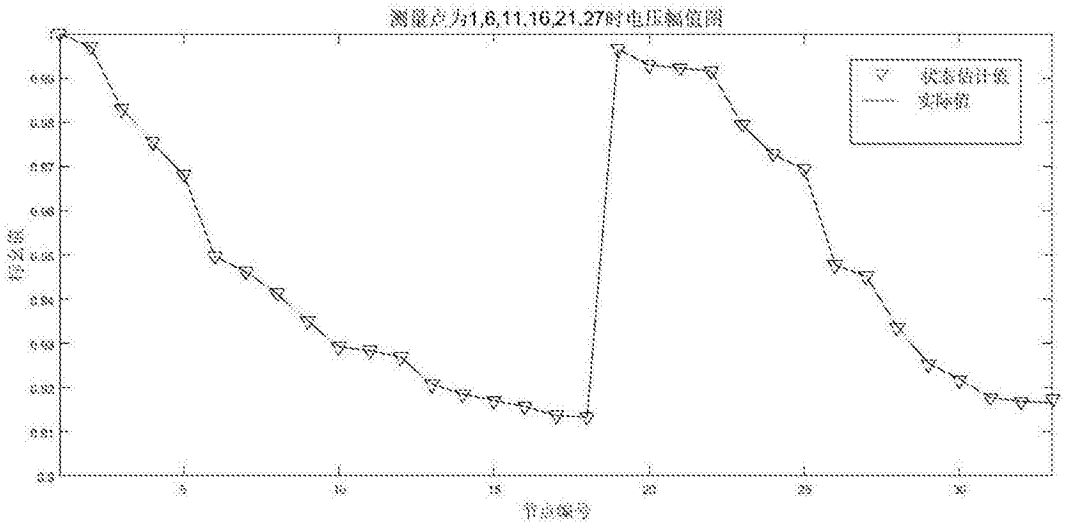

状态估计值
实际值

图3

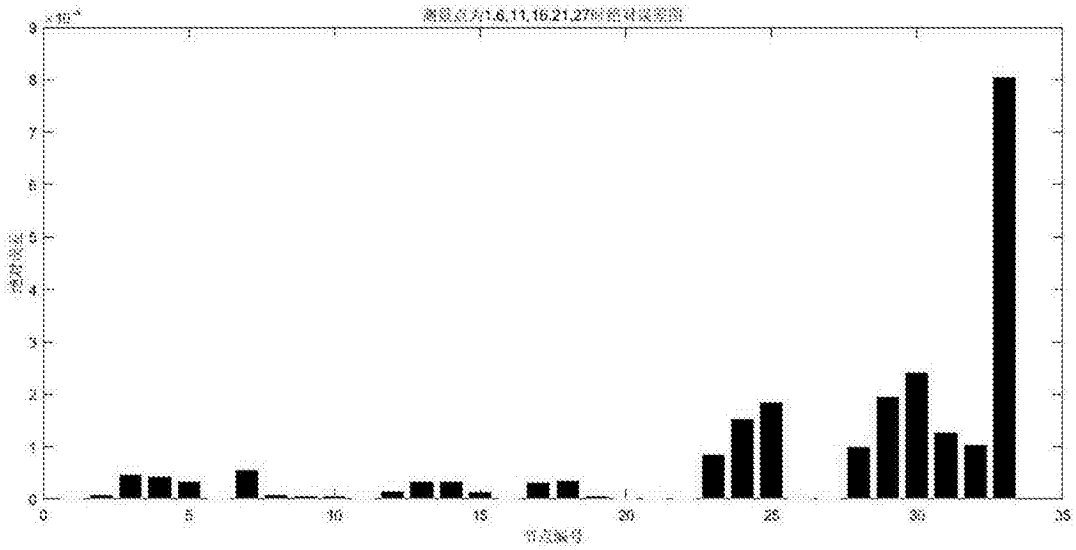

×10^4
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
0
5
10
15
20
25
30
35

图4

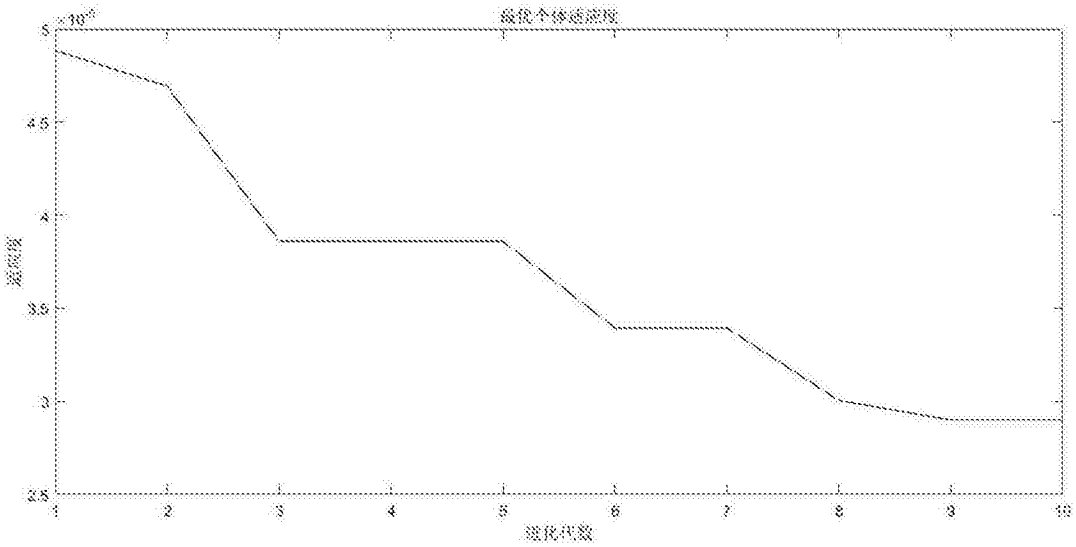

×10^4
5
4.5
4
3.5
3
2.5
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

图5