

# 基于 WAMS 动态轨迹的电力系统功角广域实时测量方法\*

段秦刚<sup>1</sup> 黎 晓<sup>2</sup> 刘崇茹<sup>2</sup> 娄源媛<sup>1</sup> 钱 峰<sup>1</sup>

( 1.广东电网有限责任公司电力调度控制中心 广州 510600;

2.华北电力大学 北京 102206)

**摘 要:** 为了提高电力系统的稳定性,需要进行电力系统功角的优化测量,提出一种基于 WAMS 动态轨迹的电力系统功角广域实时测量方法,构建电力系统功角广域实时测量的参数估计模型,采用互相关时延估计方法进行电力系统功角广域测量数据的动态拟合,构建电力系统功角广域 WAMS 动态轨迹分布模型,结合锐化互相关函数峰值补偿方法进行测量误差补偿修正,提高电力系统功角广域测量的准确性,采用奇异值分解的广义互相关参数估计方法,实现电力系统功角广域实时测量。仿真结果表明,采用该方法进行电力系统功角广域实时测量的准确性较高,对动态轨迹的修正能力较强,测量误差较小。

**关键词:** WAMS 动态轨迹; 电力系统; 功角; 实时测量

中图分类号: TP29

文献标识码: A

DOI 编码: 10. 14016/j.cnki. 1001-9227. 2019. 11. 165

## Power angle wide-area real-time measurement method based on WAMS dynamic trajectory

DUAN Qingang<sup>1</sup> ,LI Xiao<sup>2</sup> ,LIU Chongru<sup>2</sup> ,LOU Yuanyuan<sup>1</sup> ,QIAN Feng<sup>1</sup>

( 1.Power dispatching control center of Guangdong Power Grid Co. ,Ltd. ,Guangzhou 510600 ,China;

2.North China Electric Power University ,Beijing 102206 ,China)

**Abstract:** In order to improve the stability of power system ,it is necessary to optimize the power angle measurement of power system.A wide area real-time measurement method of power angle based on WAMS dynamic trajectory is proposed.The parameter estimation model of power angle wide-area real-time measurement in power system is constructed.The power angle wide-area WAMS dynamic trajectory distribution model is constructed by using cross-correlation time-delay estimation method to dynamically fit the power angle wide-area measurement data.Combined with the peak compensation method of sharpened cross-correlation function ,the measurement error compensation is corrected to improve the accuracy of power angle wide-area measurement in power system.The singular value decomposition ( SVD) generalized cross - correlation parameter estimation method is used.The real time measurement of power angle in power system is realized.The simulation results show that the proposed method has higher accuracy ,better correction ability to dynamic trajectory and less measurement error.

**Key words:** WAMS dynamic trajectory; power system; power angle; real-time measurement

### 0 引言

随着电力传感技术的快速发展,构建大规模的电力系统,实现电力组网的优化设计,在大规模电力系统组网设计中,需要对电力系统的功角进行优化测量,提高电力系统网络传输的均衡性,在电力系统输出功角失衡下进行电力系统信道资源均衡调度技术设计,结合功角广域测量方法建立电力系统输出功角信道多模控制模型,进行电力系统输出功角失衡下的资源均衡调度和传输信道均衡控制。采用扩频技术进行电力系统功角广域实时测量,采用动态补偿技术进行电力系统的电磁辐

射干扰抑制,提高电力系统输出稳定性,研究电力系统功角广域实时测量方法具有重要意义<sup>[1]</sup>。

传统方法中,对电力系统功角广域实时测量方法是建立在对码元输出调制基础上,结合电力系统功角输出的链路均衡配置和输出探测协议设计,进行电力系统功角广域实时测量和信道扩频调度,提高电力系统输出功角的准确性,从而提高电力系统功角的信道资源配置能力<sup>[2-3]</sup>,文献[4]中提出一种基于多径效应评估的电力系统功角广域实时测量方法,构建电力系统输出功角失衡下的信道解析模型,采相关性调制方法实现电力系统输出功角测量,但该方法的计算开销较大,抗干扰性不好;文献[5]中提出采用随机序列码扩频方法进行电力系统信道均衡配置和功角测量,该方法的测量精度不好,自适应性不好。

针对上述问题,提出一种基于 WAMS 动态轨迹的电力系统功角广域实时测量方法,构建电力系统功角广域

收稿日期: 2019-01-11

\* 基金项目: 广东电网有限责任公司科技项目 ( No. GDKJXM00000030)

作者简介: 段秦刚( 1988-) ,男,甘肃秦安人,硕士,工程师,主要研究方向为电力系统分析、电网调度运行。

实时测量的参数估计模型,采用互相关时延估计方法进行电力系统功角广域测量数据的动态拟合,构建电力系统功角广域 WAMS 动态轨迹分布模型,结合锐化互相关函数峰值补偿方法进行测量误差补偿修正,提高电力系统功角广域测量的准确性,采用奇异值分解的广义互相关参数估计方法,实现电力系统功角广域实时测量。最后进行仿真实验分析,得出有效性结论。

## 1 电力系统传输信道模型及特性分析

### 1.1 电力系统多径传输信道模型描述

为了实现电力系统输出功角的优化测量,首先构建信道失衡下的电力系统的电力资源传输和均衡调度模型,用随机序列码扩频方法进行电力系统信道的码间干扰抑制,结合自适应反馈均衡技术进行电力系统输出功角失的稳态性调节和控制,将电力系统功角测量模型分为确定性模型和不确定模型<sup>[6]</sup>,分别为  $\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$  和  $u_c(t) = Kx_c(t)$ ,得到电力系统信道转移和闭环测量系统为:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + BKx(t - d_s(t) - d_a(t)) \quad (1)$$

采用 WAMS 动态轨迹修正方法进行电力系统的传输信道测量<sup>[7]</sup>,构建电力系统输出功角失衡下的输出功角边界条件描述为:

$$\frac{dx_2}{dt} = r_2 x_2 \left( 1 - \sigma_2 \frac{x_1}{N_1} - \frac{x_2}{N_2} \right) \quad (2)$$

采用空间波束形成方法进行电力系统输出功角阵列采样节点的组网结构设计,设计的近场源电力系统输出功角阵列采样节点部署模型为一个线性阵列分布结构模型,电力系统输出功角阵列信号矢量求转置,构建电力系统功角广域实时测量的参数估计模型,采用互相关时延估计方法进行电力系统功角广域测量数据的动态拟合<sup>[8]</sup>,拟合模型描述为:

$$\varphi(x_1, x_2) = 1 - \frac{x_1}{N_1} - \sigma_1 \frac{x_2}{N_2} = 0 \quad (3)$$

$$\psi(x_1, x_2) = 1 - \sigma_2 \frac{x_1}{N_1} - \frac{x_2}{N_2} = 0 \quad (4)$$

上式将电力系统功角的动态轨迹测量问题分为轨迹学习过程和轨迹泛化过程,当  $p > 2$  时, WAMS 动态轨迹跟踪误差满足:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} E[\sup |X(t) - y(t)|^p] = 0 \quad (5)$$

可见,采用本文方法进行电力系统功角测量的轨迹跟踪误差收敛到 0 的,验证测量算法的稳定性,设计 Lyapunov 函数为  $V = \frac{1}{2} \sigma^T \sigma$ ,采用 MUSIC 算法进行电力系统输出功角阵列信号滤波,结合噪声干扰抑制,根据 Lyapunov 稳定性原理,求导,则:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \sigma^T \dot{\sigma} = \sigma^T C_n \{ f(X, t) - x_{1d}^n - p(t)^{(n)} + C_n^{-1} \sum_{k=1}^{n-1} C_k [e^{(k)} - p(t)^{(k)}] \} \\ &+ \sigma^T C_n b(X, t) u + \sigma^T C_n [\Delta f(X, t) + d(t)] \\ &\leq \sigma^T C_n \{ f(X, t) - x_{1d}^n - p(t)^{(n)} + C_n^{-1} \sum_{k=1}^{n-1} C_k [e^{(k)} - p(t)^{(k)}] \} \end{aligned}$$

$$+ \sigma^T C_n b(X, t) u + \|\sigma^T C_n\| \cdot \|\Delta f(X, t) + d(t)\| \quad (6)$$

初始化电力系统功角的关联度为  $\tau_s = \tau_c + \tau_{CSA}$ ,得到电力系统功角的连续测量误差,结合误差调节进行系统优化设计。

### 1.2 电力系统功角广域实时测量的参数估计

对采样的电力系统输出功角阵列信号采用分布式的 DOA 估计方法进行参量估计<sup>[9]</sup>,用矩阵表示一组多维传感器采集的近场源阵元输出电力系统输出功角阵列信号模型,给定电力系统功角广域功角的初始值  $r = 1$ ,  $k_j' = k_j$ ,  $b_j' = b_j$ , ( $j = 1, 2, \dots, m$ ),  $X = \emptyset$ ,  $Y = \emptyset$ ,  $K' = \cup_j \{k_j'\}$ ,  $B' = \cup_j \{b_j'\}$ , 得到:

$$\dot{V} \leq \|\sigma^T C_n \Delta f(X, t) + d(t)\| - \frac{\sigma^T C_n C_n^T \sigma}{\|C_n^T \sigma\|} [F(X, t) + D(t) + K] \quad (7)$$

输出的特征变量为  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ,定义电力系统输出功角的联合特征函数为:

$$\Phi(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n) = E\{\exp[j(\omega_1 x_1 + \omega_2 x_2 + \dots + \omega_n x_n)]\} \quad (8)$$

由于  $\sigma^T C_n C_n^T \sigma = \|C_n^T \sigma\|^2$ ,得到在最优轨迹跟踪平面内电力系统输出功角估计的 Lyapunov 泛函满足:

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq \|C_n^T \sigma\| \{ \|\Delta f(X, t) + d(t)\| - [F(X, t) + D(t)] - K \|C_n^T \sigma\| \\ &= \|C_n^T \sigma\| \{ \|\Delta f(X, t) - F(X, t) + [\|d(t)\| - D(t)] - K \|C_n^T \sigma\| \\ &\leq -K \|C_n^T \sigma\| < 0 \quad (|\sigma| \neq 0) \end{aligned} \quad (9)$$

结合 Lyapunov 稳定性原理,构建电力系统功角的动态运动基元线性测量矩阵,采用  $k$  阶不变矩和  $k$  阶累积量联合估计<sup>[10]</sup>,得到 WAMS 动态运动基元的学习轨迹为:

$$\begin{aligned} \Psi_1(d_1(t)) &= \Psi + d_1(t) K(Z_1 + Z_2 + Z_3)^{-1} K^T \\ &+ (h_1 - d_1(t)) [WZ_1^{-1} W^T + L(Z_2 + Z_3)^{-1} L^T] \quad (10) \\ \Psi_2(d_2(t)) &= \Psi + (h_2 - d_2(t)) L(Z_2 + Z_3)^{-1} L^T \\ &+ d_2(t) M^T(Z_2 + Z_3)^{-1} M^T \quad (11) \end{aligned}$$

将电力系统功角轨迹采用分段式轨迹学习方法进行跟踪融合,提取功角参量的最大均方根误差估计值为:

$$B_j(A) = \min_{\beta \neq 0} \{w(\beta) + w(A^T \cdot \beta)\} \quad (12)$$

式中  $A^T$  表示矩阵  $A$  的转置,电力系统功角的基元函数记为:

$$k_1 = \max_{t \in I} \int_0^1 |G(t, s) a(s)| ds \quad (13)$$

$$k_2 = \max_{t \in I} \int_0^1 |G'(s, \tau) a(\tau)| d\tau \quad (14)$$

$$k = \max\{k_1, k_2\} \quad (15)$$

$$d = \max\{2A_1, AA_2\} \quad (16)$$

根据上述分析,构建电力系统功角广域 WAMS 动态轨迹分布模型,结合锐化互相关函数峰值补偿方法进行测量误差补偿修正,结合时滞系统进行轨迹跟踪识别,提高对电力系统功角广域测量能力。

## 2 电力系统功角广域实时测量优化

### 2.1 电力系统功角广域 WAMS 动态轨迹分布

在构建电力系统功角广域实时测量的参数估计模型的基础上,进行电力系统功角广域实时测量算分的优化设计,提出一种基于 WAMS 动态轨迹的电力系统功角广域实时测量方法。对于  $n$  维随机分布的近场源目标电力系统输出功角阵列信号,采用 IIR 滤波方法进行电力系统输出功角阵列干扰滤波,不同的积分步数下进行 WAMS 动态轨迹纠偏测量<sup>[11]</sup>,在电力系统输出功角阵列上采用空间波束形成进行矢量误差修正,结合相关性检测结果,得到电力系统动态轨迹误差修正矩阵描述如下:

$$A = \begin{bmatrix} f_{x_1} & f_{x_2} \\ g_{x_1} & g_{x_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 \left( 1 - \frac{2x_1}{N_1} - \frac{\sigma_1 x_2}{N_2} \right) & -\frac{r_1 \sigma_1 x_1}{N_2} \\ -\frac{r_2 \sigma_2 x_2}{N_1} & r_2 \left( 1 - \frac{\sigma_2 x_1}{N_1} - \frac{2x_2}{N_2} \right) \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$p = -(f_{x_i} + g_{x_i})|_{p_i}, \quad i=1, 2, 3, 4 \quad (18)$$

$$q = \det A|_{p_i}, \quad i=1, 2, 3, 4 \quad (19)$$

根据上述分析,采用轨迹终点位置误差偏移纠正方法进行测量过程的轨迹修正,实现电力系统功角的最优轨迹搜索<sup>[12]</sup>。进行电力系统输出功角阵列信号建模,得到功角参量估计的互相关核为:

$$R_s(\psi) = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} a(\theta) p_{ij}(\theta, \theta'; \psi_i, \psi_j) a^H(\theta') d\theta d\theta' \quad (20)$$

在异构有向传感器网络中,将电力系统功角的特征提取结果输入到 BP 神经网络中<sup>[13]</sup>,构建双曲微分方程进行功角特征估计,微分方程为:

$$\begin{cases} u_u - \Delta u + |u|^4 u = 0, \\ (u, \partial_t u)|_{t=0} = (u_0, \mu_1) \in \dot{H}_x^1 \times \dot{H}_x^{-1} \end{cases} \quad (21)$$

其中  $u: I \times \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$  是实值函数,  $d \geq 4$ 。进行电力系统功角参量的自动调节,当干扰观测器的小扰动输出满足:

$$\Psi(h_1, h_2) = \Psi + h_1 K (Z_1 + Z_2 + Z_3)^{-1} K^T + h_2 M (Z_2 + Z_3)^{-1} M^T < 0 \quad (22)$$

同一平面的相邻 2 个 WAMS 动态轨迹中,提取异构电力系统功角的高阶谱特征量<sup>[14]</sup>,得到功角检测的收敛条件:

$$\Psi(h_1, 0) = \Psi + h_1 K (Z_1 + Z_2 + Z_3)^{-1} K^T + h_2 L (Z_2 + Z_3)^{-1} L^T < 0 \quad (23)$$

在电力系统功角存在扰动条件下,设定电力系统功角实时测量的特征分解值满足:

$$f(x_1, x_2, i) - g(y_1, y_2, i) + \int (h(x_1, x_2, i) - g(y_1, y_2, i)) x du < x(|x-y|^2 + x|x-y|) \quad (24)$$

其中,  $\forall x_1, x_2, y_1, y_2 \in \mathbb{R}$ , 设  $x^*$  是电力系统功角量化特征解在最优解集  $\{x_k\}$  中的一个极限点,根据以上分析,实现电力系统功角的 WAMS 动态轨迹分布设计<sup>[15]</sup>。

### 2.2 功角广域实时测量

采用模糊聚类方法进行电力系统功角广域实时检

测,在广域子空间中,电力系统功角测量的有向决策问题描述为:

$$\begin{cases} \varphi_1 = r_1 c_1 \\ \varphi_2 = r_2 c_2 \\ \varphi = \varphi_1 + \varphi_2 \\ p = \frac{\varphi_1 p_0 + \varphi_2 g}{\varphi_1 + \varphi_2} \end{cases} \quad (25)$$

对采集的电力系统传输数据进行低维度的特征集构造,根据电力系统传输网络的信道结构进行优先级配置,采用能耗均衡控制模型得到电力系统中电力信息传输能量控制函数:

$$v(t+1) = \omega v(t) + \varphi(p-x(t)) \quad (26)$$

$$x(t+1) = x(t) + v(t+1) \quad (27)$$

根据上述分析,构建电力系统传输信道模型,分析电力系统信道的多径特性,得到攻击测量的迭代模型描述为:

$$x(t+1) + (\varphi - w)x(t) = \varphi p \quad (28)$$

在电力系统功角广域测量的复合型矩阵中,结合自适应转发控制方法进行信道测量,得到测量误差满足  $u(t) \in L^2(\mathbb{R})$ , 则  $u(t)$  的评判函数定义为:

$$\varphi_{ws}(s, \sigma) = |\chi_{ws}(s, \sigma)|^2 \quad (29)$$

式中:

$$\chi_{ws}(s, \sigma) = \sqrt{s} \int_{-\infty}^{+\infty} u(t) u^*[s(t-\tau)] dt \quad (30)$$

采用动态补偿技术进行电力系统输出功角失衡下电力系统传输信道的符号采样,功角测量的扩展函数定义为:

$$\theta(t) = 2\pi \int_{-T/2}^{t/a} \left( \frac{K}{t_0 - t'} \right) dt' = -2\pi K \ln \left( 1 - \frac{t}{at_0} \right) + \theta_0 \quad (31)$$

其中  $\theta_0 = -2\pi K \ln \left( 1 + \frac{T}{2t_0} \right)$ , 构建电力系统输出信道失衡下的功角测量模型,结合 WAMS 动态轨迹规划方法进行信道均衡设计,在瞬时状态下,电力系统输出功角的多个任务流集合定义为:

$$\mu = \sum_{i=1}^L \lambda_i / \sum_{j=1}^H \lambda_j (L \leq H) \quad (32)$$

其中,下标  $i$  表示电力系统输出功角测量的优先级属性,结合锐化互相关函数峰值补偿方法进行测量误差补偿修正,提高电力系统功角广域测量的准确性,综合分析,实现测量算法的改进设计。

### 3 仿真实验分析

为了测试本文算法在实现电力系统的功角广域测量和输出均衡配置中的应用性能,进行仿真实验。实验建立在 Matlab 仿真软件上,实验中电力系统功角配置的采样频谱特征量为 1 200,采用 BPSK 调制序列进行电力系统输出信号测量,构建电力系统输出比特序列流模型,输出信噪比固定为 15 dB,电力系统的输出阵元域的快拍数从 200 变化到 2 000,根据上述仿真环境和参数设

定,进行电力系统功角广域实时测量,采用 WAMS 动态轨迹分布模型进行功角测量,得到 WAMS 动态轨迹分布如图 1 所示。

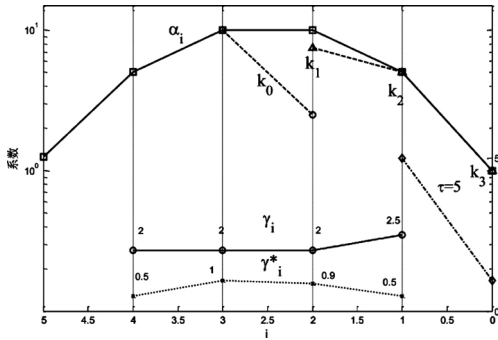


图 1 WAMS 动态轨迹分布

根据 WAMS 动态轨迹分布结果进行参数估计,结合锐化互相关函数峰值补偿方法进行测量误差补偿修正,提高电力系统功角广域测量的准确性,得到电力系统功角广域实时测量结果如图 2 所示,分析图 2 得知,测量的功角为 0.025 和 0.187,功角广域测量的准确性较高。

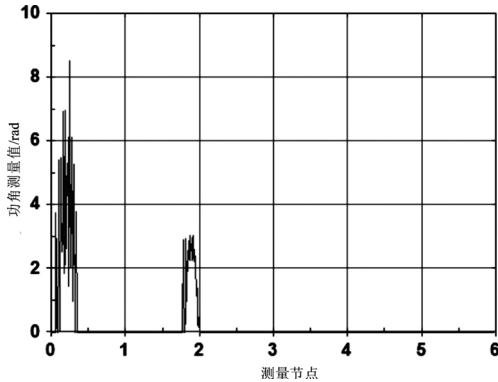


图 2 电力系统功角广域实时测量估计输出

采用不同方法,得到功角测量误差性能对比结果见表 1,分析得知,本文方法进行电力系统的功角测量的误差较低。

表 1 功角测量误差性能对比测试

测试规模/MBit	本文方法	文献[4]方法	文献[6]方法
100	0.043	0.132	0.212
200	0.013	0.116	0.118
300	0.004	0.069	0.098
400	0.005	0.031	0.065

## 4 结语

对电力系统的功角进行优化测量,提高电力系统网络传输的均衡性,在电力系统输出功角失衡下进行电力系统信道资源均衡调度技术,结合功角广域测量方法建立在电力系统输出功角信道多模控制模型,提出一种基于 WAMS 动态轨迹的电力系统功角广域实时测量方法,构建电力系统功角广域实时测量的参数估计模型,采用互相关时延估计方法进行电力系统功角广域测量数据的动态拟合,构建电力系统功角广域 WAMS 动态轨迹分

布模型,结合锐化互相关函数峰值补偿方法进行测量误差补偿修正,提高电力系统功角广域测量的准确性,采用奇异值分解的广义互相关参数估计方法,实现电力系统功角广域实时测量。研究得知,本文方法进行功角广域测量的精度较高,误差较小。

## 参考文献

- [1] LIU Y. Joint resource allocation in SWIPT-based multi-antenna decode-and-forward relay networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66 ( 10 ): 9192 - 9200.
- [2] WANG W, WANG R, MEHRPOUYAN H, et al. Beamforming for simultaneous wireless information and power transfer in two-way relay channels [J]. IEEE Access, 2017 ( 5 ): 9235-9250.
- [3] 华磊杰,江峰,赵斌,等.基于自适应下垂控制的柔性能源变换器[J].电源学报,2018,16(2):59-68.
- [4] WANG Youcheng, ZHANG Feng, FANG Guangyou, et al. A novel ultrawideband exponentially tapered slot antenna of combined electric-magnetic type [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016, 15: 1226-1229.
- [5] 李丹,梁吉,孙荣富,等.并网电厂管理考核系统中 AGC 调节性能补偿措施[J].电力系统自动化,2010,34(4):107-111.
- [6] 唐坤杰,董树锋,宋永华,等.基于 GPU 加速的大规模系统 N-1 安全校验中电网连通性的检验方法[J].中国电机工程学报,2018,38(18):5461-5468.
- [7] HE HAO, BORHAN M S, KAMESHWAR P, et al. Aggregate flexibility of thermostatically controlled loads [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(1): 189-198.
- [8] 李万磊,陈天星,刘善邦,等.基于数据处理一体化的输变电工程标准测量系统构建[J].电子设计工程,2018,26(20):133-136.
- [9] 李宾皓,高岩,王晓波,等.“互联网+”技术在输变电工程管理中的研究与应用[J].电气技术,2018,19(07):87-92.
- [10] 蒋宇,单鸿涛,施一萍,等.基于 Fuzzy-AHP 的输变电工程评价系统设计[J].电力科学与工程,2018,34(06):30-36.
- [11] 李国文,刘迪,罗海红.基于有向聚类的输变电工程造价风险因素分析[J].电气技术,2018,19(03):90-94+99.
- [12] 薛建议,王涵,李科峰,等.直流 GIL 中盆式绝缘子表面电荷分布特性研究[J].中国电机工程学报,2018,38(20):6164-6172.
- [13] 刘刚,肖烨然,孙庆文.基于改进反电势积分的永磁同步电机位置检测[J].电机与控制学报,2016,20(02):36-42.
- [14] 蒋雯雯.电子自动化装置的干扰与抑制技术研究[J].自动化与仪器仪表,2017,(6):62-63,66.
- [15] 吕伟嘉,翟术然,乔亚男.电力电能计量与采集网格化融合体系研究与应用[J].中国电子科学研究院学报,2018,13(05):595-600.