

# 自动控制电力网络中路由节点故障检测方法研究

电力网络系统处于复杂的工作环境中，控制参数复杂和不确定，导致路由节点的故障频发，需要进行更有效的电力网络系统的路由节点故障检测，提高电力网络的生命周期和自动控制性能。传统的电力网络路由节点故障检测方法采用离谱加权的网络故障信源分析方法，通过对电力网络的信源阵列信号慢变幅度估计，实现故障节点检测，但由于电力节点收发数据产生的阵列信源特征的不稳定性，导致电力网络自动控制性能不好，节点故障检测性能降低。提出一种基于路由节点故障源慢变幅度估计的自动控制电力网络中的路由节点故障检测算法。进行自动控制电力网络的阵列分布模型和故障信号特征模型构建，采用MUSIC方法估计电力网络路由故障信号的方位信息，基于路由节点故障源慢变幅度估计，直接获取信源二维参数，实现故障检测。仿真实验表明，该方法能有效实现对电力网络的路由节点故障检测，提高故障检测准确率，实现对电力网络的路由故障节点的准确定位，故障诊断自动控制性能较好。

马 涛/北京联合大学师范学院

杨海涛/中国能源建设集团北京电力建设公司



马 涛/实验师

## 关键词/Keywords

自动控制·  
电力网络·  
路由节点·  
故障检测·

为了实现有序稳定的生产生活，需要首先保证电力网络的无故障稳定运行。在现有电力网络硬件设施的条件下，由于电力网络系统处于复杂的工作环境中，控制参数复杂和不确定，导致路由节点的故障频发，需要进行更有效的电力网络系统的路由节点故障检测，对电力系统进行软件上的升级，在计算机技术的辅助发展下，通过路由分发和路由协议优化设计，在电力网络资源管理终端进行网络传输和节点汇聚，并为用户提供服务的计算机，提高电力网络自动控制性能。电力网络系统分为发电、输电和配电三大系统，电力网络的自动控制系统是实现电力分配和电力调

度的智能管理关键技术。通过电力自动控制和路由节点网络设计，进行变换电压和交流调度的方法进行功率分段调度，向终端用户分配电能，实现电网优化和智能管理，但由于自动控制电力网络路由节点故障影响了网络的稳定性，需要研究网络路由节点故障检测方法，对提高电力网络的安全稳定运行性能具有积极重要的意义<sup>[1]</sup>。

传统方法中，对自动控制电力网络故障节点检测，需要分析自动控制电力网络路由节点故障源阵列信号的幅度特征。目前，对自动控制电力网络的信源阵列信号的处理分析的研究正处于起步阶段，相关算法研究还不成熟，典型算法主要有基于支持向量机（Support Vector Machine, SVM）的故障检测算法，基于神经网络控制的路由节点故障检测算法和基于信号故障源方位估计的路由节点故障检测算法<sup>[2-5]</sup>，其中基于信号故障源方位估计的路由节点故障检测算法较为常用。但这些算法存在计算复杂，能量采集和消耗不均衡，簇节点生存期缩短等问题。

针对上述问题，本文提出一种基于路由节点故障源慢变幅度估计的自动控制电力网络中的路由节点故障检测算法。首先构建自动控制电力网络路由模型，进行路由节点故障信号模型构建和特征提取分析，基于路由节点故障源慢变幅度估计，进行路由节点故障检测算法改进设计，最后进行仿真实验，得出有效性结论。

## 自动控制电力网络模型构建与信号提取

### 1. 自动控制电力网络模型构建

在自动控制电力网络路由节点故障源节点定位和检测算法设计中, 首先一步是进行系统模型构建, 自动控制电力网络的阵列分布如图1所示。

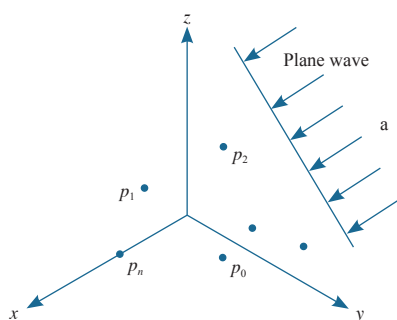


图1 自动控制电力网络节点阵列分布

图1中, 自动控制电力网络每个节点 $b_i$ , 在簇头生成过程中形成 $K_b$ 个帧, 时间间隔为 $T_b$ , 得到基于自动控制电力网络几何模型以及参数估计算法, 其中,  $l \in [0, L-1]$ ,  $\tau_0 < \tau_1 < \dots < \tau_{L-1}$ , 得到自动控制电力网络通信信道特征分解函数为<sup>[6-7]</sup>

$$h(t) = \sum_{l=0}^{L-1} a_l \delta(t - \tau_{l,0}) \quad (1)$$

考虑维护自动控制电力网络模型的检修基地、供变电、通信信号和指挥控制中心等的影响, 以上述实体为路由节点, 得到故障信号的特征输入量为

$$E = \sum_{p=1}^n E_p = \frac{1}{l} \sum_{p=1}^n \sum_{k=1}^l [r_p(k) - y_p(k)]^2 \quad (2)$$

假设自动控制电力网络由 $N$ 台计算机作为分发节点均匀地分布在协同任务布置区域, 执行周期性的数据监测和发送任务, 自动控制电力网络的覆盖区域为 $W$ , 各个任务节点的坐标参数为 $(x_i, y_i)$ , 采用宽频带零超宽频带解调方式进行宽频带数据采集系统的设计, 数据采集系统在1.5~2.7 GHz工作频段内具有一定的中频干扰抑制性能, 需要对故障信号进行增益扩展, 得到故障信号的频域特性为

$$E(p) = [0, 0, \dots, 0, \frac{\gamma_{ih} \sigma^2}{h_i [G - (n-k-1) \gamma_{ih}]}, \dots,$$

$$\frac{\gamma_{ih} \sigma^2}{h_i [G - (n-k-1) \gamma_{ih}]}]^T \quad (3)$$

每个自动控制电力网络节点距离基站的距离采用欧式距离计算得到

$$h(w_i, k) = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \quad (4)$$

式中,  $x_i, y_i$ 分别为网络监测半径, 相对与每个自动控制电力网络节点, 对应一个扩展节点坐标, 圆心为 $W_i = \{x_i, y_i, r\}$ 。

通过上述处理, 构建自动控制电力网络模型, 为进行路由节点故障检测提供模型基础。

### 2. 自动控制电力网络路由节点的故障信号模型特征分析

在上述网络模型构建的基础上, 分析自动控制电力网络路由节点的故障信号模型, 并进行特征提取预处理, 为最后实现故障检测和故障节点定位提供数据基础。自动控制电力网络路由节点采用无向图 $G=(V, E)$ 设计, 用 $d_G(u, v)$ 表示图 $G$ 中从 $u$ 到 $v$ 的OFDM多载波调制向量。  $N_1(u) = \{v | (u, v) \in E\}$ 表示路由节点 $u$ 监测点集合, 数学表达式为

$$\mu_k(t+1) = \frac{\sum_{i=1}^N \delta_{ik}(t) U_i}{\sum_{i=1}^N \delta_{ik}(t)} \quad (5)$$

在路由节点故障定位中, 根据训练样本找到一个实值函数 $g(x)$ 即给定一个新的模式, 根据训练集推断它所对应的类别(如: +1, -1), 也就是使用 $y = \text{sign}[g(x)]$ 来推断任一输入 $x$ 所对应的类别<sup>[8-10]</sup>。基于路由节点故障源慢变幅度估计, 进行故障定位, 假设 $R$ 方阵自动控制电力网络簇头节点帧级偏移输入相关矩阵, 其中主对角线上的各项是输入信号的诸元素的均方值, 得到故障信源的MUSIC方法的谱函数为

$$P(\theta, r) = [a^H(\theta, r) V_n V_n^H a(\theta, r)]^{-1} \quad (6)$$

利用信号子空间 $V_s$ 和噪声子空间 $V_n$ 的正交性, 对于半波长间隔均匀分布线阵列的自动控制电力网络路由节点故障信源, 每条直线采用相同加权, 形成可分离谱加权自动控制, 得到相关分布源模型为

$$z(t) = \sum_{i=1}^p s_i(t) b_i(\theta_i) + n(t) \quad (7)$$

对自动控制电力网络每个路由节点分配一个时间片,使该路由节点在监测点连通性信息表征空间中的竞争集的定义为

$$CS(u) = N(p(u)) \cup (\cup_{v \in N(u) \setminus CH(u)} CH(v)) \setminus \{u, p(u)\} \quad (8)$$

自动控制电力网络信道的选择权值 $sw(u)$ ,用一个三元组表示为

$$\varepsilon_i(i, j) = \frac{\alpha_i(i) a_{ij} b_j(o_{i+1}) \beta_{i+1}(j)}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \alpha_i(i) a_{ij} b_j(o_{i+1}) \beta_{i+1}(j)} \quad (9)$$

通过可分离谱加权,得到自动控制电力网络路由节点故障源空域滤波预处理后的信号输出慢变幅度特征估计为

$$R = E[z(t)z^H(t)] = BP_s B^H + \sigma_n^2 I_M \quad (10)$$

$$B = [b_1(\theta_1), b_2(\theta_2), \dots, b_q(\theta_q)]^T \quad (11)$$

通过上述处理,实现了自动控制电力网络路由节点的故障信号模型特征分析,为实现故障检测提供准确的数据基础。

## 故障检测方法改进设计与实现

在上述进行电力网络模型和路由节点故障特征分析的基础上,进行故障检测算法改进设计。分析上述模型可见,传统的电力网络路由节点故障检测方法采用离谱加权的网络故障信源分析方法,通过对电力网络的信源阵列信号慢变幅度估计,实现故障节点检测。由于电力节点收发数据产生的阵列信源特征的不稳定性,导致电力网络自动控制性能不好,节点故障检测性能降低。针对传统方法的弊端,本文进行改进,提出一种基于路由节点故障源慢变幅度估计的自动控制电力网络中的路由节点故障检测算法。假设故障路由节点存在系统功率衰减,得到自动控制电力网络通信信道功率衰减系数为

$$k = \text{Int}(\frac{n\bar{Q}}{1-\bar{Q}}) + 1 \quad (12)$$

式中, $\bar{Q}$ 为系统补偿功率加权平均。

将自动控制电力网络接收端和发送端数据的信息熵作为信道传递向量函数,为

$$\begin{aligned} f_{lg-M}(z) &= [f_{lg}(z), f_{lg-x}(z), f_{lg-y}(z)] \\ &= [f_{lg}(z), h_x f_{lg}(z), h_y f_{lg}(z)] \end{aligned} \quad (13)$$

电力系统故障网络运转控制器使用零阶保持器设计传递函数,为

$$w'_{sjh}(n_0 + 1) = w'(n_0) - \eta'_{sjh} \frac{\partial J}{\partial w'_{sjh}} \quad (14)$$

式中, $w'(n_0)$ 为 $n_0$ 时刻供电系统管理采样节点; $\eta'$ 为系统滞后拍控制系数; $w'_{sjh}(n_0 + 1)$ 为刷新时刻的无差拍控制输出。

考虑自动控制电力网络路由节点子载波同步误差为

$$\begin{aligned} z &= \sum_{k=0}^{N-1} k p_k \\ &= \sum_{k=0}^{N-1} k \binom{N-1}{k} p_{2D}^k (1-p_{2D})^{N-1-k} \\ &= \sum_{k=0}^{N-1} k \binom{N-1}{k} (\pi R^2 / A)^k (1-\pi R^2 / A)^{N-1-k} \\ &= (N-1)(\pi R^2 / A) \end{aligned} \quad (15)$$

式中, $k$ 为子载波衰减系数; $R$ 为自动控制电力网络网格覆盖面积; $p_{2D}$ 为故障路由节点生成概率,计算公式分别为

$$p_{2D} = \pi R^2 / A \quad (16)$$

$$p_k = \binom{N-1}{k} p_{2D}^k (1-p_{2D})^{N-1-k}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N \quad (17)$$

得到故障路由节点在特别故障类别数下的优化目标函数为

$$\arg \max_{\Omega} N \sum_{c \in \Omega} \sum_{d \in c} \{H(d) - H(c)\} \quad (18)$$

从而得到改进的自动控制电力网络故障路由节点定位网格模型中的位置四元组表达为

$$A = \sqrt{f_{lg}^2 + f_{lg-x}^2 + f_{lg-y}^2} \quad (19)$$

$$\phi = -\text{sign}(f_{lg-x}) \text{atan} 2(\sqrt{f_{lg-x}^2 + f_{lg-y}^2} / f_{lg}) \quad (20)$$

$$\theta = \text{atan}(f_{lg-y} / f_{lg-x}) \quad (21)$$

$$p(d|c^\wedge) = p(w_1|c^\wedge)p(w_2|c^\wedge) \cdots p(w_N|c^\wedge) \quad (22)$$

通过节点定位网格模型四元组描述,在干扰下实现对故障路由节点的准确定位检测,得到自动控制电力网络信道接收端路由节点峰均功率比为

$$\tilde{y}_\tau = \frac{1}{P_s} \binom{N-1}{k} p_{2D}^k \sum_{i=1}^{\infty} \lambda_s^i y_{(\tau-i)} \quad (23)$$

采用MUSIC方法估计电力网络路由故障信号的方位信息,直接获取信源二维参数,从而得到与路由节点故障信号分量相对应的故障信号子空间以及与信号分量相正交的噪声子空间为

$$s(t)=[s_1(t),s_2(t),\cdots,s_q(t)]^T \quad (24)$$

自动控制电力网络路由节点在动态移位中产生动态差分毗邻干扰映射到噪声子空间上,与信号子空间进行正交分解,混迭谱得到分离,从而输出有用信息,进行慢变幅度估计,实现对故障信源的准确定位。在对自动控制电力网络路由节点故障检测中,可以在上述算法设计的基础上,通过自动跟踪、自动调度和自动排故等,在控制中心(OCC)设中心计算机,实现对电力网络的故障自动诊断和智能控制。

## 仿真实验与结果分析

为了验证本文算法在实现自动控制电力网络中的路由节点故障检测中的性能,进行仿真实验,采用计算机A和计算机B进行电力网络的路由通信。仿真环境计算机的配置信息:计算机A型号Dell 2210b,处理器为Intel Core2 Duo1.80 GHz,1 G内存,主频为DDR2 667;计算机B型号Lenovo KM400,处理器为AMD Athlon 1.83 GHz,2 G内存,主频为DDR 333。电力网络通信协议采用的是一种高效可靠、低成本的MAC协议,采用IEEE 802.15.4路由协议模型构建自动控制电力网络的电力数据传输模型。采用Matlab仿真工具,在簇头生成过程中形成 $N_f$ 个帧,时间间隔为 $T_f$ ,信道带宽为 $T_s=N_fT_f$ ,设置 $N_f=25$ , $T_f=100$  ns, $T_c=2$  ns,对自动控制电力网络路由节点进行路由样本平均采样,路由节点样本取值为1 000个,得到电力网络的初始路由分布节点模型如图2所示。

根据上述仿真环境和路由分布结构,进行节点故障检测,采集故障信号样本,样本分为故障状态和正常收发状态,每种状态样本为100个,这样可以获得400个样本,样本按4:1分成训练集和测试集两部分。得到路由节点故障信源直达信号的波束模型如图3所示。

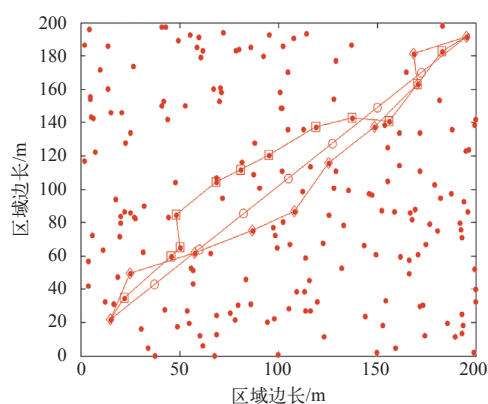


图2 电力网络路由节点分布模型

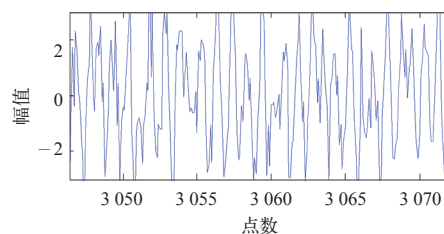


图3 路由节点故障信源直达信号的波束

以上述故障信源直达信号的波束为基础,对自动控制电力网络路由节点故障源空域滤波预处理,有效去除干扰噪声。采用本文方法,对电力网络路由节点的故障信号慢变幅度进行估计,得到估计结果如图4所示。

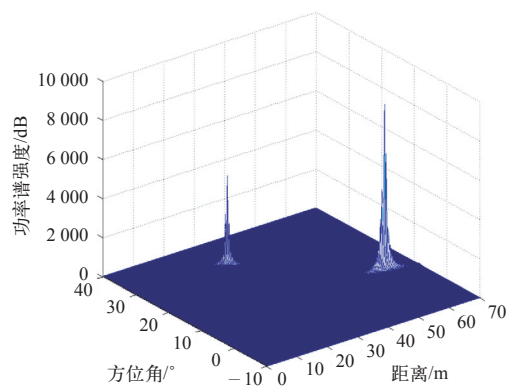


图4 路由节点故障信息特征估计结果

根据图4给出的自动控制电力网络的路由节点故障信息特征估计可见,采用本文算法,具有较强烈的故障特征估计峰值,能有效实现对故障路由节点的方位定位,达到故障准确检测的目的。为了对比算法性能,采用本文算法和传统算法,以故障准确检测概率为测试指标,得到仿真结果

如图5所示。从图5可见,采用本文算法,具有更高的故障准确检测率,性能优越。

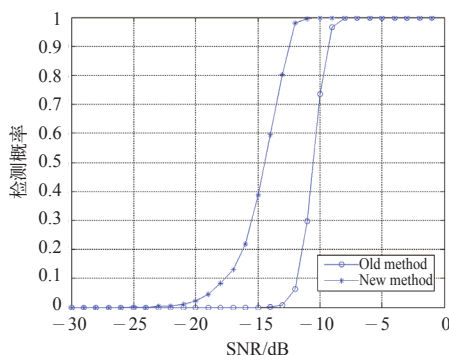


图5 故障检测性能对比

## 结束语

在现有电力网络硬件设施的条件下,由于电力网络系统处于复杂的工作环境中,控制参数复杂和不确定,导致路由节点的故障频发,需要进行更有效的电力网络系统的路由节点故障检测。本文提出一种基于路由节点故障源慢变幅度估计的自动控制电力网络中的路由节点故障检测算法。首先构建自动控制电力网络路由模型,进行路由节点故障信号模型构建和特征提取分析,基于路由节点故障源慢变幅度估计,进行路由节点故障检测算法改进设计。实验分析得出,采用本文算法能有效实现对电力网络的路由节点故障检测,提高故障检测率,实现对电力网络故障的自动控制和故障诊断。

## 参考文献

- [1] 南洋,阎巍,齐景嘉. 基于网格平台的实时任务调度算法[J]. 科技通报, 2012, 28 (12): 131-133.

- [2] 樊晓平,杨玺,刘少强,等. 具有能量补给的无线传感器网络分簇路由算法[J]. 计算机工程, 2008, 11 (34): 120-123.
- [3] 傅菊平,齐小刚. 基于剩余能量和节点度的无线传感器网络分簇算法[J]. 计算机应用研究, 2011, 28 (1): 250-252.
- [4] Shim W, Han Y, Kim Sehun. Fairness-aware resource allocation in a cooperative OFDMA uplink system[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59 (2): 932-939.
- [5] Lijun Zu, Yusheng Ji, Liping Wang, et al. Joint Optimization in Multi-User MIMO-OFDMA Relay-Enhanced Cellular Networks [C]. // Proc of IEEE Wireless Communications and Networking Conference. [S.l.]: IEEE Press, 2011: 13-18.
- [6] Kang J, Ranka S. Dynamic slack allocation algorithms for energy minimization on parallel machines. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2010, 70 (5): 417-430.
- [7] 王景欣,袁坚,耿军伟,等. 移动互联网基于用户网络结构的信息过滤机制[J]. 计算机科学, 2011, 38 (10): 128-133.
- [8] 张学. 无线网络的拓扑控制[J]. 软件学报, 2007, 18 (4): 943-952.
- [9] 张永铮. 网络风险评估中网络路由节点关联性的研究[J]. 计算机学报, 2007, 30 (2): 253-256.
- [10] 柳虹,周根贵,傅培华. 分层供应链复杂网络局部演化模型研究[J]. 计算机科学, 2013, 40 (2): 270-273.

(收稿日期: 2014-02-10) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告