

面向智能电网架空线的传感器故障容忍机制

唐晓璇* 郭少勇 齐峰
(北京邮电大学 北京 100876)

摘要: 在配用电网络全网的监控过程中, 杆塔等设施的状态监测与故障容忍成为电力系统亟待解决的问题。现有的监控系统由于网络线性拓扑结构等限制, 故障发生时无法及时维护, 影响到电力生产业务, 易造成电力重大事故。该文面向利用传感器监控电网架空线的背景, 提出一个针对传感器部署的故障容忍机制。首先, 依据 $N-x$ 原则等, 最小化冗余备份节点和无线模块的数量, 达到成本最小化的目的。其次, 综合考虑时延约束、 $N-x$ 原则的数量约束等构建数学优化模型。基于该模型, 利用聚类合并思想, 构建了一个面向智能电网架空线的传感器故障容忍机制。最后, 仿真实验证明, 以此机制部署的传感器监测网络能够在成本最小化的基础上, 有效地容忍故障。

关键词: 智能电网; 故障容忍; 无线传感器网; 遗传算法

中图分类号: TN915

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2016)03-0700-07

DOI: 10.11999/JEIT150576

Fault Tolerance Mechanism for Sensors Monitoring Overhead Transmission Line in Smart Grid

TANG Xiaoxuan GUO Shaoyong QI Feng

(Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: In the process of monitoring and controlling power distribution network, condition monitoring and fault tolerance of towers and other facilities become an urgent problem in power system. The existing monitoring system can not maintain transmission of distributed power timely when fault occurs because of the limitations such as linear topology. Therefore, it may result in serious power system accidents, influencing production business of electric power. Based on the background of using sensors to monitor overhead transmission line, a fault tolerance mechanism for sensors deployment is proposed. First, according to $N-x$ principle, the number of backup nodes and cellular-enabled modules is minimized to achieve the goal of cost minimization. Second, the number constraint of $N-x$ principle and delay constraint is integrated into establishing a mathematical optimization model. Based on this model and by using clustering algorithm, a fault tolerance mechanism is built for sensors monitoring overhead transmission line in smart grid. Finally, the simulation experiment shows that sensor monitoring network deployed with this mechanism can tolerate the faults on the basis of minimized cost effectively.

Key words: Smart grid; Fault tolerance; Wireless Sensor Network (WSN); Genetic algorithms

1 引言

随着智能电网的发展, 越来越多的电力子系统通过协同通信来保障电网的可靠运行。电力通信网承载着电力通信业务, 作为重要的基础支撑设施, 其可靠性的研究成为电力通信网中重要研究方向, 尤其是针对配用电通信网络的故障容忍研究。为此, 本文围绕着架空输电线的监测网络, 展开故障容忍

问题的研究。智能配用电网的监控信息可支撑、辅助相关人员的决策, 输电状态的监控是保证配用电安全的重要手段。在保证监控的准确、有效、可靠基础上, 需要在故障发生时利用节点的冗余备份来恢复监控网络的通信, 通过增加无线模块减小信息传输的时延, 对配电网的监控与故障容忍是当下的研究热点。由于人工的故障检测与修复非常费时、费力、低效^[1], 如何利用无线传感器网络^[2]对架空输电线进行监控、利用冗余传感器减少故障造成的损失仍需要进行更为深入的研究。

为了实现线性拓扑结构的电力传输线的有效监控, 需要沿线部署大规模的无线传感器, 并结合无线模块通过公网与控制中心通信组成电力传输线监控网络。如何提高该网络的故障容忍能力, 需要进

收稿日期: 2015-05-15; 改回日期: 2015-12-08; 网络出版: 2016-01-22

*通信作者: 唐晓璇 xxtang@bupt.edu.cn

基金项目: 国家 863 计划项目(2012AA050801), 国家自然科学基金(61121061)

Foundation Items: The National 863 Program of China (2012AA050801), The National Natural Science Foundation of China (61121061)

一步研究传感器的冗余备份节点和无线模块的部署问题，以保障该监控网络满足 $N-x$ 原则。文献[3]在一个适用于智能电网状态监测、诊断与监控的混合网络环境下，提出了一个面向电力通信业务的接入选择算法。文献[4]提出能耗、故障和时延是监控配用电网络的关键因素。文献[5]提出无线传感器网络的部署问题涉及覆盖、连接和节约能量消耗 3 个方面，但缺少故障容忍问题的考虑。文献[6]提出了一种传感器故障容忍网络框架来保障监控信息的获取，并未提供具体的网络部署方案。文献[7, 8]提出了面向节点能量耗尽和随机失效综合故障优化的 WSNs 容错拓扑控制方法，并不完全适用于配用电通信网络线性拓扑。文献[9]构建了一个部署有大量备份节点的动态容错传感器网络，但缺少对成本的考虑。文献[10]提出用低时延、低功耗的反向传输策略来处理传感器节点的故障。文献[11]在对输电线塔杆进行分组的基础上，提出了利用无线技术降低时延的高性能分层网络结构。鉴于线性网络结构不能较好地支持数据分发中的实时过载需求，文献[12]提出了一个使用蜂窝网络的新模型。然而，这些成果缺乏对故障必然性和故障容忍网络重要性的考虑。

为了解决上述问题，本文提出了一种面向智能电网架空线的传感器的故障容忍机制，以指导处于建设初期配用电杆塔监控方案的优化。首先，本文结合电力通信网安全可靠运行的要求，综合节点成本、 $N-x$ 原则、时延约束、覆盖范围等因素抽象出了一种基于混合网络架构和分组思想的最优化问题模型。随后，利用遗传算法的思想，进一步改进其中的算子，以快速解决该组合优化问题，解决了备份节点和无线模块的部署问题。最后，通过仿真验证，该算法在比例成本、备份节点数目、无线模块数目等指标上，相对于其他算法均较优，提高了整个网络运行的可靠性和组网的经济性，为智能配用电传感器监控方案的生成提供了一种有效的解决途径。

2 问题模型

2.1 问题描述

在智能电网的实际建设中，针对配电网的线性拓扑结构和拓扑脆弱性的特点，提出监控配电网的混合网络结构。如图 1 中圆圈代表传感器，无线标志代表安装有无无线模块，灰色代表备份有冗余的节点。在这个网络中需要解决两个挑战：

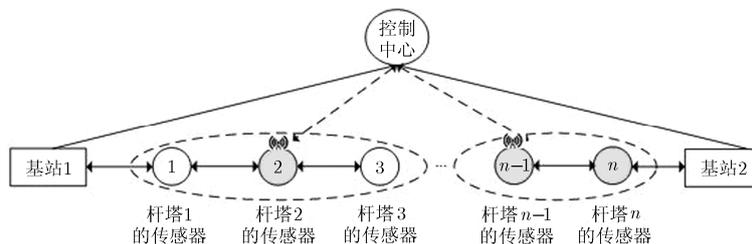


图 1 混合网络架构

(1)通过部署无线模块来提高数据传输的效能。两个杆塔之间有一定的距离，安装在杆塔上传感器的任务为对数据进行采集和转播，通常通过短距离通信技术以逐跳方式将信息传递从中间各节点，传至两边的基站，然后再通过基站与控制中心交互信息。如图 1 所示，杆塔 3 上传感器中的信息需依次经过杆塔 2、杆塔 1 和基站 1 的转播，才能传至控制中心。由于受线性拓扑结构与逐跳通信方式的制约，传统的数据转播方式会产生较大的时延与能量消耗。而与基站临近的传感器，如图 1 中杆塔 1 和 n 上的传感器，由于需要转发其他所有节点的信息，承担着很大的通信压力。在杆塔上安装无线模块可以显著减少数据转播时延，如图 1 中的杆塔 2 安装了无线模块，以它为中心进行分组，分组中其他节点以逐跳的方式将数据向各组的中心节点汇聚，这

大大缩短了通信的距离。通过部署多少无线模块来提高传输的效率成为本文解决的问题之一。

(2)通过部署备份节点来提高网络的故障容忍能力。若其中某些传感器发生故障，为了能够使系统能继续正常运转，需要冗余一定量的传感器来对故障节点进行备份。如杆塔 n 的传感器若发生了故障，其分组的中心节点监测到它的故障，其已部署的备份节点可以及时地继续完成其监测与转播功能，保障网络的正常运行。最有效的保障方法是在每个杆塔上都部署备份节点，但是从成本上考虑，这种方式是不可行的，因此备份节点的部署是有选择性的。确定需要部署多少备份节点才能保证一定的可靠性成为本文解决的另一个问题。

因此需要考虑到数量最小问题即是在 $N-x$ 原则指导下，同时考虑成本、通信节点的最小时延、

无线模块的服务范围等因素, 求出备份的传感器节点数和无线模块数。本文将问题的优化目标定义为总成本 C 最小化

$$C = \left\{ \begin{array}{l} \sum_i \text{cost}(\text{sensor}) \\ + \sum_i \text{cost}(\text{cellular}) + \text{cost}(\text{subscription}) \end{array} \right\} \quad (1)$$

s.t. $\left\{ \begin{array}{l} \text{约束1: 需要满足 } N-x \text{ 原则} \\ \text{约束2: 需要满足节点的最小时延要求} \\ \text{约束3: 需要满足无线模块的服务范围要求} \end{array} \right.$

2.2 问题分析

2.2.1 节点的成本分析 成本作为目标函数, 包括两大部分, 一部分是备份节点的购买成本, 另一部分是无线网络的成本。其中, 无线网络的成本不仅是无线模块的购买成本, 还包括蜂窝网络的租用成本, 即 3G/LTE/GSM 的租用/使用费用。此外, 考虑到网络的扩容, 还需要一定比例的预留成本。

设向量 $\mathbf{BP} = \{\text{BP}_i, i = 1, 2, \dots, N\}$ 和 $\mathbf{CP} = \{\text{CP}_i, i = 1, 2, \dots, N\}$, 其中 BP_i 和 CP_i 分别表示第 i 个杆塔上是否有备份传感器节点和无线模块, BP_i 和 CP_i 均为 $(0, 1)$ 变量。因此, 以备份传感器节点数 $N_b = \sum \text{BP}_i$ 和无线模块数 $N_c = \sum \text{CP}_i$ 为所求变量, 以最小化系统成本为目标函数, 所定义优化目标模型为

$$C = \min_{N_b, N_c} \left\{ (1 + \text{RR}) \cdot [E_b \cdot N_b + (E_c + \text{EB}_c) \cdot N_c] \right\} \quad (2)$$

其中, RR 表示预留成本的比例, E_b 表示传感器节点的成本, E_c 表示租用蜂窝无线网络的成本, EB_c 表示租用每个无线网络的定金。

2.2.2 $N-x$ 约束分析 假设每个传感器节点的故障发生是相互独立的, 因此部署在 N 个杆塔上的传感器发生故障的概率可以认为是服从伯努利分布的。同时, 由于故障类型的不同, 故障发生的概率也是不同的。基于上述假设, 第 i 个节点发生故障的概率记为 p_i , 未发生故障的概率记为 $q_i = 1 - p_i$, 假设总共发生的故障数记为 X , 则 N 个节点中, 有 x 个节点发生故障的概率为 $P\{X=x\} (x=1, 2, \dots, N)$ 。当 $x=1$ 时, 即 $P\{X=1\}$, 表示在 N 个传感器节点中, 有 1 个节点发生了故障, 则根据 $N-1$ 原则, 在这种情况下, 系统仍应当能够正常运行。同理, $P\{X=x\}$ 表示在 N 个传感器节点中, 有 x 个发生了故障, 则根据 $N-x$ 原则, 在这种情况下, 系统仍应当能够正常运行^[13]。根据伯努利的性质有

$$P\{X=x\} = \binom{N}{x} p^x q^{N-x} \quad (3)$$

式(3)是一个二项分布式, 假设该二项分布的期望值为 μ ^[14], 则

$$\mu = E[X] = \sum_{i=1}^N p_i \cdot \text{BP}_i \quad (4)$$

则此二项分布的上界定义为

$$P\{X=x\} \leq \binom{\sum_{i=1}^N p_i}{x} \binom{\sum_{i=1}^N q_i}{N-x} \quad (5)$$

为了保证 $N-x$ 原则, 传感器备份节点的数量必须满足式(6)

$$\sum_{i=1}^N \text{BP}_i \geq N \cdot \binom{\sum_{i=1}^N p_i}{x} \binom{\sum_{i=1}^N q_i}{N-x} \quad (6)$$

2.2.3 时延约束分析 数据流量方面, 本文参考了文献[13]和文献[15], 其中测试平台设置了 4 种类型的传感器, 如有 2 kHz 的采样频率和 500 Hz 的数据收集频率的感应传感器。由于在原始节点处于最坏情况时, 备份节点应及时分发一个相同的数据。每个传感器每 0.5 s 给中继节点发送一次数据。特别地, 靠近原传感器的活动冗余节点必须备份相同的数据^[16], 可以推断传输数据的大小为 4 k~8 k, 表示为 D_s 。

让 d_i 表示第 i 个传感器的最小时延。由于能量的限制, 传感器上的数据应根据最小时延的周期来发送。无线信道是共享的, 因此最常见的技术是 CSMA/CA, 故需要考虑为避免碰撞而产生的延迟。访问通道的平均延迟是 T 。总延迟分为两部分, 分别是信道接入延迟 T 和传输延迟 D_s/v_d , 其中 v_d 为数据传输的速度。对于所有的备份节点 BP_i , 即 $\forall \text{BP}_i$, 需满足:

$$\left(\frac{D_s}{v_d} + T \right) \cdot \text{BP}_i \leq d_i \quad (7)$$

2.2.4 无线模块的覆盖范围约束分析 不同于无线基站, 针对有无线模块的备份节点在偏远地区的覆盖范围需要进行具体分析。第 i 个杆塔的无线模块收集信息时, 其无线信号可以覆盖到的直线距离为 L_i , l_i 代表传感器的位置, $i \in \mathbf{BP}$, 可以覆盖的传感器数量 CN 至少是

$$CN=2 \cdot \frac{L_i}{\max_{i,j \in BP} |l_i - l_j|} + 1 \quad (8)$$

实际上, CN 虽然是传感器的数目, 式(8)计算得到的结果并不一定是整数。然而, 本文已经由分母取最大值为求得满足全覆盖确切数字留了一定的余地。

2.3 问题模型

综上所述, 该问题模型定义为一个最优化的问题模型:

$$\begin{aligned} \min_{N_b, N_c} & \{(1+RR) \cdot [E_b \cdot N_b + (E_c + EB_c) \cdot N_c]\} \\ \text{s.t.} & \left\{ \begin{aligned} \sum_{i=1}^N BP_i & \geq N \cdot \left(\frac{\sum_{i=1}^N p_i}{x} \right)^x \cdot \left(\frac{\sum_{i=1}^N q_i}{N-x} \right)^{N-x} \\ \forall BP_i, & \left(\frac{D_s}{v_d} + T \right) \cdot BP_i \leq d_i, \quad \forall i \in 1, 2, \dots, N \\ \sum_{i \in N} CP_i \cdot 2 \cdot & \left(\frac{L_i}{\max_{i,j \in N} |l_i - l_j|} + 1 \right) \geq N, \quad \forall i, j \in 1, 2, \dots, N \\ \sum_{i \in N} CP_i & \leq \sum_{i \in N} BP_i, \quad \forall i \in 1, 2, \dots, N \\ N_b = \sum_i & BP_i, \quad \forall i \in 1, 2, \dots, N \\ N_c = \sum_i & CP_i, \quad \forall i \in 1, 2, \dots, N \\ BP_i, CP_i \in & \{0, 1\}, \quad \forall i \in 1, 2, \dots, N, \forall j \in 1, 2, \dots, N \end{aligned} \right. \end{aligned} \quad (9)$$

约束中的第1部分保证了上述分析满足 $N-x$ 原则; 第2部分考虑了满足避免碰撞的约束所得的最小时延。第3个约束确保了无线模块的覆盖范围可以包含所有节点。因为决策变量是二元变量, 且公式为线性整数程式, 可以使用解决组合优化问题的智能算法进行求解, 因此本文拟采用改进的遗传算法进行求解, 如第3节所示。

3 基于改进遗传算法的故障容忍规划算法

针对故障容忍规划的问题, 本文提出了一种基于遗传算法的故障容忍规划算法。遗传算法的主要思想为: 将实际数值进行编码, 产生初始种群; 在种群个体满足限制条件、数目达到种群规模要求时, 进行选择、交叉和变异操作, 直至满足停止准则时停止迭代。

3.1 故障容忍规划算法

在智能电网的故障容忍规划中, 问题可以简化

表示为 0-1 规划, 以 1 表示部署有备份节点或者无线模块, 否则标记为 0。由于在智能电网的规划中, 需要遵从 $N-x$ 原则、最小时延、覆盖范围等约束条件, 随机产生的初始种群并不一定能满足问题的约束条件, 本文根据电网的实际要求在种群产生后进行了一系列的约束判断, 以加快收敛。遗传算法的基本执行过程是(图2所示):

步骤1 初始化。导入电力通信网各节点故障数据, 设置算法参数, 随机生成 P 个个体作为初始种群 $X(0)$; 置进化代数计数器 $t=1$ 。

步骤2 检验约束条件。根据问题模型中的约束条件, 对初始种群进行筛选, 淘汰掉不符合客观条件的个体。如果种群的个体都满足约束, 进入步骤4; 否则进入步骤3。

步骤3 重置生成的初始种群。淘汰 x 个不符合约束条件的个体, 重新随机生成 x 个个体补全初始种群, 并进入步骤2重新检验。

步骤4 检验停止准则。若满足停止准则, 则输出最优解, 并停止迭代; 否则进入步骤5。

步骤5 个体评价。计算 $X(t)$ 中各个体的成本值。

步骤6 种群进化。从 $X(t)$ 中运用选择算子, 选择出 $M/2$ 对母体 ($M \geq P$); 依概率 P_c 执行交叉形成 M 个中间个体; 对 M 个中间个体分别依概率 P_m 执行变异, 形成 M 个候选个体。从上述所形成的 M 个候选个体中选择出 P 个适应度值较大的个体组成新一代种群 $X(t+1)$ 。

步骤7 终止检验。如 $t > t_{\max}$, 则输出 $X(t+1)$ 中具有最大适应度的个体作为最优解, 终止计算; 否则置 $t=t+1$ 并转步骤2。

3.2 算子设计

(1) 适应度函数: 为了能定量的寻求备份节点与无线模块部署的最低成本, 用式(2)中的 C 表示。因此, 个体的适应度函数为

$$f(N_b, N_c) = K - (1+RR) \cdot [E_b \cdot N_b + (E_c + EB_c) \cdot N_c] \quad (10)$$

其中 K 为一个大数, 保证 $f(N_b, N_c)$ 的值为正。

(2) 选择算子: 传统的选择算子有各种形式——轮盘赌方法每次迭代解空间进行随机选择, 易造成优良解难易继承; 排序方法只依据适应度大小选择, 易破坏优良解和子代的多样性。综上, 解空间分组在保留局部最优解直接遗传后, 再使用轮盘赌方法选择个体进行交叉、变异等操作, 保证算法的收敛性与解空间的优良性。

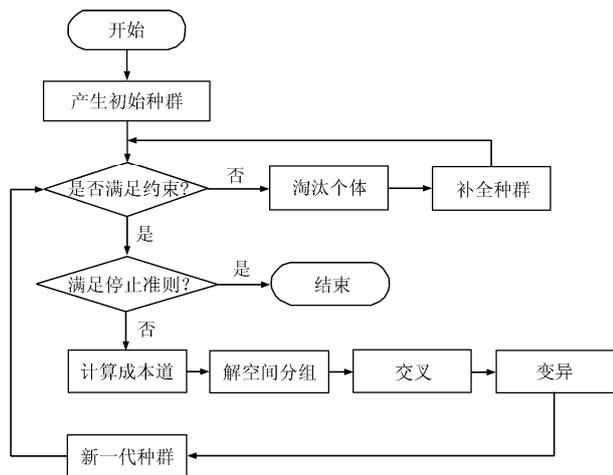


图2 故障容忍规划算法

(3)在该遗传算法中,产生新种群依旧采用了交叉、变异等标准遗传算子。

4 实验分析

4.1 实验环境

设定杆塔间最长距离为 100 m,杆塔数目即种群大小为 100 个。由于节点以备份模式传输同样的数据,所以数据大小为 8 kB。由于时延不是监测控制和数据采集产生的,而只是监测,故其大小为 300 ms。无线模块分为两种,其覆盖距离分别为 5.5 km 或 10.5 km。长距离的数据传输速度为 31.25 kbps。本文仿真所使用数据为某电网公司提供的台账,由于环境、设备等因素,每个地区的故障频率不同。根据此公司已有标准,将告警记录根据严重程度聚类后,忽略对网络影响不大的告警,计算出平均故障频率为 0.1%左右。

4.2 结果分析

对各仿真参数进行初始化, $N-x$ 原则中的 x 取值为 1,备份节点、安装无线模块、租用无线模块的成本比例设为 1:20:10,预留成本比例 $RR=20\%$,仿真代数 $T=500$,采用的无线模块覆盖距离

为 5.5 km,每个节点发生故障的概率都为 0.1%,表 1,表 2 为仿真结果。依此可知,本故障容忍机制可以准确地求出近似最优解,来辅助电网工作人员进行决策。

基于上述的问题模型,仿真实验输入参数后可以得出建议的部署位置,仿真结果为 1 维向量,前 N 个元代表备份节点的部署情况,后 N 个元代表无线模块的部署情况,1 为有部署,0 为不部署。前 10 个杆塔的部署情况如表 1 所示。

如表 2 所示为不同遗传代数的实验结果,由仿真可知,对应的比例成本为 367,最优配置里的备份节点数目 $N_b=36$,无线模块数目 $N_c=9$ 。随着遗传算法迭代次数的增加,目标函数越趋于理想大小,并在 320 代左右即达到最优值。

不同地区各传感器节点发生故障的概率是不一样的,当只改变实验中节点发生故障的概率时,其他参数与表 1 对应的实验相同时,所得对比结果如表 3 所示。当改变故障频率时,备份节点的数目会发生改变,无线模块数目不受影响。随着故障发生概率的减小,总成本随之减小。故在实际环境中,故障频率较高的区域在规划故障容忍网络时,需要部署较多的备份节点,可不改变无线模块的数目。

由于对可靠性要求不同, $N-x$ 原则中的 x 取值在不同地区是不一样的。当只改变 $N-x$ 原则里的 x 在实验中的取值,其他参数与表 1 对应的实验相同时,可得到如图 3、表 4 所示,随着 $N-x$ 里的 x 值增大,即对网络的可靠性要求增高时,备份节点数目增加,而无线模块数目不变。故在实际环境中,为了提高网络的可靠性,在网络设计时,在成本可接受的范围内,可适当增加备份节点的数目。

当实验中备份节点成本、无线模块购买成本、蜂窝网络租用成本比例发生变化,其他参数与表 1 对应的实验相同时,可以得到以下结果。如图 4,表 5 所示,当三者比例为 1:100:5 时,总比例成本最大。无线网络的成本大于备份节点的成本和无线网

表 1 部分杆塔部署情况

杆塔	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
备份节点部署	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1
无线模块部署	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0

表 2 不同代数的实验结果

代数	10	20	50	100	150	200	250	300	320	350	400	500
总比例成本	1068	884	559	512	410	406	368	368	367	367	367	367
备份节点数目	50	47	46	37	42	39	37	37	36	36	36	36
无线模块数目	28	23	14	13	10	10	9	9	9	9	9	9

表 3 3 种节点平均故障概率的实验结果

节点平均故障概率(%)	0.1	0.05	0.01
总比例成本	376	374	369
备份节点数目	43	42	38
无线模块数目	9	9	9

表 4 3 种 $N-x$ 中 x 取值的实验结果

$N-x$	$x=1$	$x=3$	$x=5$
总比例成本	376	378	381

表 5 3 种备份节点成本、无线模块购买成本、蜂窝网络租用成本比例的实验结果

3 个成本的比例	1:100:5	1:50:5	1:20:10
总比例成本	1696	1045	370

网络的租用费，即备份节点的数目大于无线模块的数目，无线网络的建设是影响总成本最重要的因素。虽然无线模块数目较少，但由于其购买价格比较高，总比例成本依旧较大。因此，在建设故障容忍网络时，尽量选择价格较低的无线模块，以降低故障容忍网络的总成本。

不同的无线模块的覆盖范围是不同的，由于所采购的模块类型不同，无线覆盖范围也会发生变化，进而影响网络的规划。当改变实验中无线覆盖范围，其他参数与表 1 对应的实验相同时，可得到如图 5，表 6 所示结果，当无线覆盖范围由 5.5 km 增大至 10.5 km 时，可覆盖的节点数目增至 10，需要的无线模块数目将减少，对备份节点数目基本没有影响，比例总成本值降低。因此，在建设故障容忍网络时，

表 6 两种无线覆盖范围的实验结果

无线覆盖范围(km)	5.5	10.5
总比例成本	376	230

若无线模块安装成本相同，尽量选择覆盖范围较大的无线模块，以降低故障容忍网络的总成本。

本文对基于遗传算法和平均部署的故障容忍规划算法进行了比较，两种算法的各项仿真参数值都与表 1 对应的实验相同，在同样进行 500 次迭代运算后所得实验结果如表 7 所示，改进的遗传算法所用计算时间短，故本文采用的基于遗传算法的故障容忍机制具有更好的性能。

5 结束语

为了保障智能电网传感器网络的可靠性，本文提出了面向智能电网架空线的传感器故障容忍机制。在以成本最小的基础上，加入了 $N-x$ 原则、最小时延、无线覆盖范围等约束，并基于改进的遗传算法在 Matlab 平台上对此机制进行仿真验证。实验结果表明，所提算法在考虑故障频率、 $N-x$ 原则中 x 取值、成本中 3 个部分的比例值和无线模块覆盖范围不同后能提出有效的规划方案。实验的仿真环境是一种简化的理想状态，在实际环境中，每

表 7 两种机制的实验结果

机制类型	总比例成本	备份节点数目	无线模块数目	所用时间(s)
本文所采用机制	367	36	9	4.028
传统平均部署机制	1034	52	27	9.262

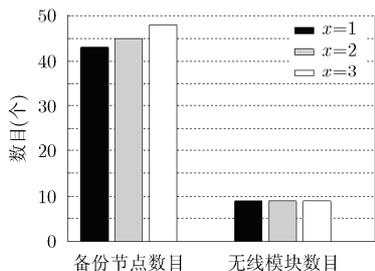


图 3 3 种 $N-x$ 中 x 取值的实验结果

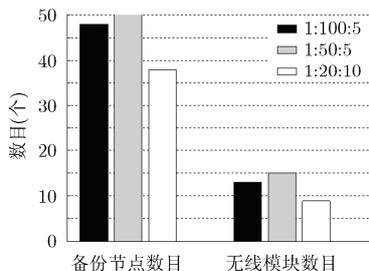


图 4 3 种备份节点成本、无线模块购买成本、蜂窝网络租用成本比例的实验结果

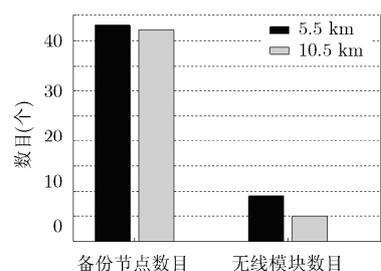


图 5 两种无线覆盖范围的实验结果

个杆塔的故障概率受其所处环境、前期故障频率、发生的故障类型和设备寿命等影响。要考虑更多的因素,采取更为科学的算法,通过对每个杆塔设置不同的权重,来解决备份节点部署的具体位置问题。根据上述多方面要求改进的备份节点具体分配算法是本文下一步的工作方向。

参考文献

- [1] FATEH B, GOVINDARASU M, and AJJARAPU V. Wireless network design for transmission line monitoring in smart grid[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2013, 4(2): 1076-1086.
 - [2] YANG Y, DIVAN D, HARLEY R G, *et al.* Design and implementation of power line sensor network for overhead transmission lines[C]. Power & Energy Society General Meeting, PES'09, IEEE, Calgary, 2009: 1-8.
 - [3] SALVADORI F, GEHRKE C S, de OLIVEIRA A C, *et al.* Smart grid infrastructure using a hybrid network architecture[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2013, 4(3): 1630-1639.
 - [4] VENKATESAN L, SHANMUGAVEL S, and SUBRAMANIAM C. A survey on modeling and enhancing reliability of wireless sensor network[J]. *Wireless Sensor Network*, 2013, 5(3): 41-51.
 - [5] 刘丽萍, 王智, 孙优贤. 无线传感器网络部署及其覆盖问题研究[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(9): 1752-1757.
LIU Liping, WANG Zhi, and SUN Youxian. Survey on coverage in wireless sensor networks deployment[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 28(9): 1752-1757.
 - [6] FANG X, MISRA S, XUE G, *et al.* Smart grid — The new and improved power grid: A survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2012, (4): 944-980.
 - [7] 尹荣荣, 刘彬, 刘浩然等. 基于节点综合故障模型的无线传感器网络容错拓扑控制方法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(10): 2375-2381. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.00361.
YIN Rongrong, LIU Bin, LIU Haoran, *et al.* The fault-tolerant topology control approach in wireless sensor networks based on integrated fault model of node[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(10): 2375-2381. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.00361.
 - [8] 刘彬, 董明如, 刘浩然, 等. 基于综合故障的无线传感器网络无标度容错拓扑模型研究[J]. 物理学报, 2014, 63(17): 170506-170506.
 - LIU Bin, DONG Mingru, LIU Haoran, *et al.* A scale-free fault tolerant topology model in wireless sensor network for toleration of comprehensive fault[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(17): 170506-170506.
 - [9] MAHAPATRO A and KHILAR P M. Fault diagnosis in wireless sensor networks: a survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2013, 15(4): 2000-2026.
 - [10] RUI Yun, BU Z, TANG Liang, *et al.* A reverse transmission mechanism for surveillance network in smart grid[J]. *IEEE Conference on Computer Communications Workshops*, 2013, 12(11): 61-66.
 - [11] WU YC, CHEUNG LF, LUI KS, *et al.* Efficient communication of sensors monitoring overhead transmission lines[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2012, 3(3): 1130-1136.
 - [12] SHORTLE J, REBENNACK S, and GLOVER F W. Transmission-capacity expansion for minimizing blackout probabilities[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 29(1): 43-52.
 - [13] HUNG K S, LEE W K, LI V O K, *et al.* On wireless sensors communication for overhead transmission line monitoring in power delivery systems[C]. 2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications, Gaithersburg, 2010: 309-314.
 - [14] CORMEN T H, LEISERSON C E, RIVEST R, *et al.* Introduction to Algorithms[M]. 3rd Edition. The MIT Press, 2009: 703-704.
 - [15] MELIPOULOS A P S, COKKINIDES G J, MOHAGHEGHI S, *et al.* A laboratory setup of a power system scaled model for testing and validation of EMS applications[C]. IEEE Conference on Bucharest Powertech, Bucharest, 2009: 1-8.
 - [16] XIA J, YU K, YUN C, *et al.* A novel mechanism for surveillance transmission in smart grid[C]. IEEE International Conference on Smart Grid Engineering, Oshawa, 2012: 1-8.
- 唐晓璇: 女, 1991年生, 博士生, 研究方向为移动通信网和电力通信网。
郭少勇: 男, 1985年生, 讲师, 研究方向为终端管理和泛在网。
元峰: 男, 1971年生, 教授, 研究方向为通信软件、智能电网信息通信。