

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.07.020

# 基于小世界模型的光伏板组件 网络查询策略研究\*

唐婷婷, 谭大鹏\*

(浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室, 浙江 杭州 310014)

**摘要:**为解决对光伏微网系统中光伏板组件的工作状态监控问题,将复杂网络中的小世界网络模型应用到对光伏板组件的性能参数的监测中。开展了对光伏板组件性能参数的跟踪查询分析,建立了由光伏板组件形成的拓扑结构与小世界网络模型之间的关系,提出了一种基于小世界网络模型的查询策略(QueryWSN)。对由光伏板组件形成的拓扑结构是否符合小世界网络模型的特性进行了评价,在 NS-2 及其扩展程序的仿真实验平台上对该查询策略进行了建模与仿真分析。通过单片机采集了光伏板组件的状态信息,同时对信息进行存储,并将其抽象为查询的节点,以逻辑关联作为长程连接,降低了网络的特征路径长度。仿真结果表明:QueryWSN 能够精确地查询光伏板组件的状态信息,同时具有良好的可扩展性,为光伏微网技术的推广应用奠定了基础。

**关键词:**光伏板组件;小世界模型;查询策略

中图分类号:TM615;TP24

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)07-0982-05

## Research on wireless sensor networks of photovoltaic panels based on small world model

TANG Ting-ting, TAN Da-peng

(Key Laboratory of E&M, Ministry of Education & Zhejiang Province,  
Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014 China)

**Abstract:** Aiming at solving the problem of monitoring the working condition of photovoltaic(PV) panel in PV micro-grid system, the small world network model in complex networks was applied to the monitoring of PV panel. Carried out the analysis of the parameters of PV panel, established the relationship between the topological structure formed by the PV panel with the small world network model, and a query strategy based on the small world network model (QueryWSN) was presented. Evaluated whether the topological structure formed by the PV panel components with the characteristics of small world network model, modeling and simulation analysis were carried out on the NS-2 simulation platform. Stated and storage the information acquisition of PV panel through the singlechip, and the logical association was taken as a long distance connection to reduce the characteristic path length of the network. The results indicate that QueryWSN can accurately query the PV panel's state information and also had a good scalability which laid the foundation to popularize and apply PV micro-grid technology.

**Key words:** photovoltaic panel; small world model; query strategy

## 0 引 言

随着 21 世纪全球经济的快速发展,对能源的需求越来越大,传统的石油、煤等能源逐渐枯竭,清洁且无

污染的可再生能源的发展和越来越受到世界各国的广泛关注<sup>[1-3]</sup>。20 世纪就有专家学者语言:21 世纪将是人类进入直接使用太阳作为能源的一个新世纪。太阳能光伏发电具有清洁、环保、可再生性的特点成为

收稿日期:2015-01-09

基金项目:国家高技术研究发展计划“863”计划资助项目(2013AA050405);国家自然科学基金资助项目(51375446)

作者简介:唐婷婷(1989-),女,江苏盐城人,主要从事光伏微网监控方面的研究。E-mail:threety1990@163.com

通信联系人:谭大鹏,男,副教授,硕士生导师。E-mail:tandapeng@zjut.edu.cn

世界各国发展的重点,因此由其组成的光伏微网具有广阔的应用情景<sup>[4-7]</sup>。

微网<sup>[8]</sup>是指由分布式电源、储能装置、能量转换装置、相关负荷和监控以及保护装置汇集而成的小型发电系统,是一个能够实现自我控制、保护以及管理的自治系统,既可以与外部电网并网运行,也可以离网运行,是智慧电网的重要组成部分。光伏微网属于微网的一个分支,却又是很重要的一部分,光伏板组件为光伏微网提供电能,其由几片或几十片光伏板组成,常年工作于露天环境,其性能的稳定性关系到光伏电站的稳定运行。王成山等人<sup>[9]</sup>对实际小型光伏微网系统进行了设计,文中提到了通过上层控制器通过 RS-485 总线对光伏微网系统的性能参数进行采集和控制。马定宇等人<sup>[10]</sup>通过使用 DSP 控制器对光伏电站进行了远程控制,张海良等人<sup>[11]</sup>通过 Modem 通信对光伏电站进行了远程的监控,然而只是对单个光伏电站进行远程的监控,并未对多个光伏电站进行远程的监控。尽管目前国内外专家学者对光伏微网进行了深入的研究,但是对于分布在不同区域的光伏微网的监控并未见相关文献的报导。

本研究提出一种基于小世界模型的查询光伏板组件性能参数的策略(QueryWSN)。该策略通过单片机采集光伏板组件的性能参数,将其抽象为小世界网络模型中的节点,并辅助于关联节点,能够降低查询网络的特征路径长度,提高查询的效率。基于小世界模型的查询算法能够实现对于分布式的光伏板组件进行全方位的监控,是保证光伏微网系统连续稳定运行的基础,并为光伏微网系统的推广应用奠定基础。

## 1 网络模型和问题描述

### 1.1 网络模型

光伏板组件是光伏微网系统的供电装置,因此需要对光伏板组件的状态信息进行采集和监控,以保证整个光伏微网系统能够在长期无人值守的情况下连续可靠的运行。系统主要的监测参量为光伏板组件的输出电压。远程监控终端采用单片机为核心的监控装置,光伏板组件的输出电压经过转换处理后储存在单片机中,同时将单片机抽象为小世界网络模型的节点,并将该监控网络称为单片机节点查询网络。

本研究论述的单片机节点查询网络符合下述特点:

(1)所有单片机节点均匀地部署在一个二维、边长为  $h$  和  $w$  的监控区域  $X$  内, $X$  足够大。

(2)节点采用布尔感知模型,即每个节点的感知范围是以节点为圆心、通信半径  $R$  为半径的圆,在通信范围内的所有节点都可以接收到其发送的消息,否则接收不到其发送的消息。

(3)所有节点部署后不再移动,无需人为进行看护,而且是同构的。

(4)节点不配备 GPS 等任何能够确定节点具体地理位置、距离和方向的设备。

### 1.2 问题描述

单片机节点上存储的数据(光伏板组件输出电压、输出电流、温度、风速)称为资源。查询策略是某个单片机节点能够获得其他节点上资源的方法,属于分布式查询。QueryWSN 策略设计的目的是实现较高的查询成功率,以便对光伏板组件进行切实有效的监控。难点在于:

- (1)源节点不知道目标资源的位置和方向;
- (2)需要尽量实现较高的查询成功率。

### 1.3 评价指标

基于 HELMY A. 的研究成果<sup>[12-13]</sup>,本研究选取查询成功率(query success rate)作为评价查询策略性能的标准,其定义为:

查询成功率 = 能够查询到的节点数量 / 总节点数。

## 2 QueryWSN 查询策略

### 2.1 理论依据

QueryWSN 查询策略的理论基础为小世界网络(Small World Networks)模型<sup>[14]</sup>。20 世纪 60 年代,美国哈佛大学心理学家 Stanley Milgram 实验发现,地球上任意两个人之间的平均距离是 6,也就是说中间通过平均 5 人次传递就可以把地球上任意两个人联系起来,这就是著名的六度分离推断,这种现象被称之为小世界现象。小世界现象表明,当网络呈现某种拓扑结构时,仅利用网络节点的局部信息就可以实现高效的分布式信息搜索。WS 和 NW 是两种典型的小世界模型,本研究以 WS 为基础设计监控光伏微网的单片机节点网络的查询策略。

WS 模型<sup>[14]</sup>的算法实现为:①规则图:一个含有  $n$  个节点的最近邻耦合网络,它们围成一个环,其中每个节点都与它左右相邻的各  $m/2$  个节点相连( $m$  是偶数,也就是节点的度);②随机化重连:以概率  $p$  随机地重新连接网络中的每个边,即将边的一个端点保持不变,而另一个端点取为网络中随机选择的一个节点。

并且规定任意两个不同节点之间至多只能有一条边, 每一个节点都不能有边与自身相连。这样就会产生  $pnm/2$  条长程边把一个节点和远处的节点联系起来。

记  $D(i, j)$  为节点  $i$  和  $j$  之间的路径长度, 特征路径长度  $L$  的计算公式如下:

$$L = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{1 \leq i < j \leq n} D(i, j) \quad (1)$$

特征路径长度描述了网络中节点间的分离程度, 即网络有多小。

当  $p \approx 0$  时,  $L = n/2m$ , 此时网络呈现规则的拓扑结构, 如图 1(a) 所示。当  $p = 0$  时, 网络呈现完全规则的拓扑结构, 当  $p = 1$ , 网络呈现完全随机的拓扑结构, 如图 1(c) 所示。

当  $0.001 < p < 0.01$  时,  $L = \ln n / \ln m$ ,  $p = 0.1$  时网络拓扑结构如图 1(b) 所示, 此时网络节点不仅与其相邻节点存在连接, 还与远处的节点建立了少量的长程连接, 正是这些长程连接的存在有效地缩短了网络的特征路径长度, 使得整个网络呈现小世界的特性。

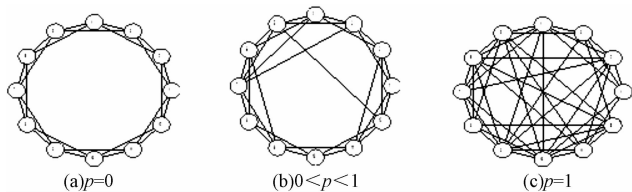


图 1 网络结构演变图

单片机节点查询网络中的节点只能与处在通信半径范围内的节点进行通信, 基本符合规则的网络拓扑结构, 其特征路径较长。如果要使单片机节点查询网络的拓扑结构呈现小世界特性, 需要在其中引入长程连接, 以缩短网络的特征路径长度, 使其网络特性符合小世界模型的特征。长程连接有两种: 逻辑长程连接和物理长程连接<sup>[15]</sup>, 物理连接会增加硬件的成本、系统的能耗以及维护成本, 因此 QueryWSN 策略采用逻辑长程连接。

## 2.2 相关定义

**定义 1** 节点。单片机查询网络中的节点由单片机抽象而得, 且节点具有一定的通信能力。

**定义 2** 信息资源。单片机采集和存储光伏板组件的状态信息, 同时节点存储其邻居节点的资源信息, 并周期性和触发性的方式更新节点的信息, 以保证查询资源的有效性和时效性。

**定义 3** 邻居节点。能够与源节点直接进行通信的节点, 其定义为:

$$A(x, y) = \{ \forall (x', y') \in Y | (x' - x)^2 + (y' - y)^2 \leq R^2 \} \quad (2)$$

**定义 4** 关联节点最大距离  $r$ 。关联节点距离源节点的最大距离, 为了避免重叠, 满足如下条件:

$$r > 2R \quad (3)$$

**定义 5** 最大关联节点数量  $N$ 。即每个源节点可以选择关联节点的最大数量。

**定义 6** 最大搜索深度  $D$ 。即源节点查询目标资源时, 搜索关联节点级数(如关联的关联)的最大值。

## 2.3 QueryWSN 查询原理

QueryWSN 查询策略的实现原理是: 首先, 在单片机节点网络中加入辅助的关联节点(即逻辑长程连接), 使其拓扑结构呈现小世界网络模型的特征, 以便在单片机节点网络中使用小世界模型; 其次, 利用小世界模型的小世界特征实现对单片机节点网络的稳定高效的资源查询。基本实施步骤如下:

(1) 当某个单片机节点产生资源查询请求时, 执行资源查询机制。该节点首先检索邻居资源内是否存在目标资源(以下简称  $T$ )。如果存在, 则查询成功; 否则, 则产生查询消息(以下简称  $QM$ ), 将  $QM$  发送到所有辅助的关联节点。 $QM$  中包含: 源节点的 ID、目标资源  $T$  以及资源的查询深度(以下简称  $d_q$ ), 初始时  $d_q = 0$ 。

(2) 如果  $QM$  在传递过程中出现了断路, 则执行路径修复。如未修复成功则向源节点返回错误信息。

(3) 当关联节点收到  $QM$ , 首先执行查询环路与重复查询的检查, 如果存在则抛弃  $QM$ 。否则, 查询邻居资源中是否存在  $T$ , 若存在, 则返回查询结果; 否则, 令  $QM$  中的  $d_q = d_q + 1$ , 然后将更新后的  $d_q$  转发至其关联节点。

(4) 重复第 2 步和第 3 步, 若查询到目标资源  $T$ , 则查询成功, 并向源节点返回查询结果; 若  $d_q$  达到  $D$  而未找到  $T$ , 则向源节点返回查询失败的信息。

QueryWSN 查询策略模型以及上述的相关定义的直观描述如图 2 所示。QueryWSN 策略最重要的部分是使监控光伏微网的单片机节点网络的拓扑结构符合小世界网络模型的拓扑结构, 其实现方法是通过在单片机节点网络中引入辅助的关联节点来缩短网络的特征路径长度, 使其符合小世界模型的特征, 从而利用小世界的特性实现资源的高效查询, 实现过程中最重要的问题是如何选择辅助的关联节点。

在 QueryWSN 查询策略中, 单片机节点网络中的每个节点不仅仅存储自身采集到的光伏板组件的信息, 且保存邻居节点的资源信息, 并周期性和触发性地更新, 以保证节点存储的资源的时效性。

QueryWSN 查询策略的查询策略主要包括如下两个步骤: ① 路径查询, 该阶段采用迭代的方法, 基本原理是给定查询的最大搜索深度, 源节点在其邻居中未

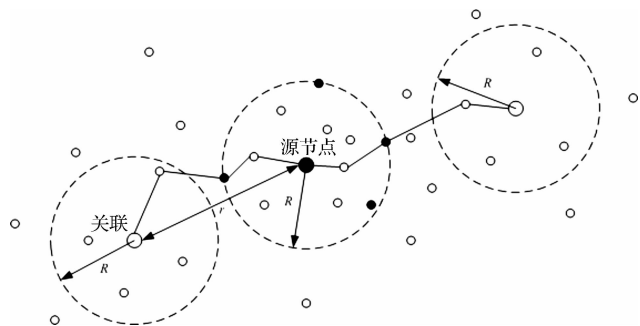


图2 QueryWSN 查询策略基本原理图

查询到目标资源的情况下,以关联节点的级数递增的次数,依次查询辅助的关联节点的邻居中是否存在目标资源。②路径回复,该阶段指的是上述机制查询到目标资源后,将其返回到查询信息返回到源节点的过程。

辅助的关联节点的选择是 QueryWSN 查询策略的核心,它的前提是网络中的节点存储其邻居信息。选择关联节点的时候需要满足的两个条件为:①源节点的邻居与其任意关联节点的邻居之间未发生重叠;②同一个源节点的不同关联节点的邻居之间未发生重叠。这两个条件的实现可以降低系统的冗余度,提高查询的效率。

### 3 QueryWSN 查询策略仿真分析

本研究提出的 QueryWSN 查询策略的仿真程序的流程图如图3所示。主要包括:①光伏板组件各项性能参数的搜集,即单片机节点的生成(正常工作的单片机、异常工作的单片机即目标资源  $T$ );②选取某一块光伏板组件某项性能参数作为网络中的源节点,并查询源节点的  $ID$  设置,即查询消息  $QM$  的生成;③通信半径  $R$ 、关联节点最大距离  $r$ 、最大搜索深度  $D$ 、最大关联节点数量  $N$  的设置;④辅助的关联节点的设置,需满足上述的两个条件。

本研究采用 NS-2 及其扩展程序作为仿真实验平台,场景的长  $h$  和宽  $w$  分别为 400 m 和 160 m,在该区域中产生 300 个节点(即 300 块光伏板组件的性能参数),并通过随机函数产生状态有误的节点(即异常工作的光伏板组件)。仿真实验结果如图4所示,反映出参数选择与查询成功率之间的关系。生成图4的各曲线的网络参数选择是依据文献[13]的研究经验选取的,各曲线的网络参数选择如下:①  $D$  与查询成功率的关系曲线: $r = 2R + 1, R = 3, N = 4$ ;②  $R$  与查询成功率的关系曲线: $r = 2R + 1, D = 1, N = 4$ ;③  $N$  与查询成功率的关系曲线: $r = 2R + 1, D = 1, R = 3$ ;④  $r$  与查询成功率的关系曲线: $D = 1, R = 3, N = 4$ 。

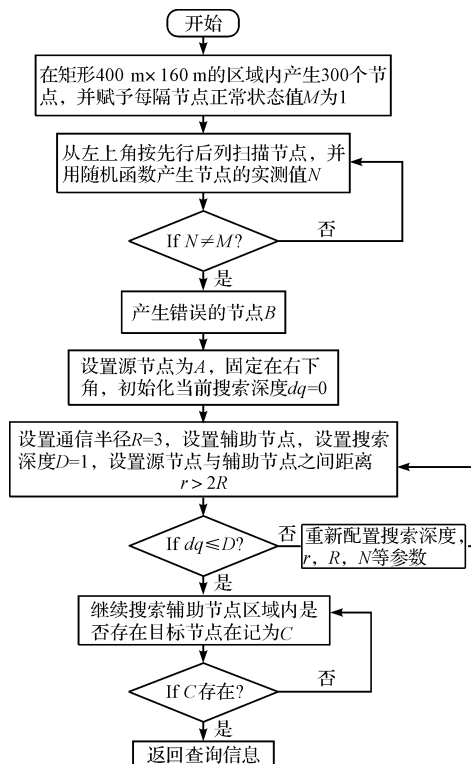


图3 QueryWSN 查询策略的仿真程序流程图

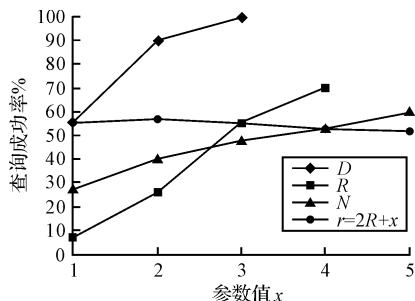


图4 参数变化对与 QueryWSN 策略查询成功率的关系

由图4所示的仿真实验结果可得出,随着  $D, R$  和  $N$  参数值的增大,查询成功率迅速提高,其中  $D$  对查询成功率的影响最大,参数  $r$  对查询成功率的影响较小。

### 4 结束语

本研究提出的 QueryWSN 查询策略能够成功地应用于光伏板组件网络的状态信息查询,属于分布式的查询策略,该策略通过引入辅助的关联节点,使得单片机节点查询网络的特征路径显著缩短,呈现小世界的特性,从而提高了查询的效率。同时,研究成果为光伏微网系统的推广应用奠定了基础。

QueryWSN 查询策略的优势在于其将关联节点的引入使得网络的拓扑结构基本符合小世界网络模型的拓扑结构,实现了高效的分布式信息搜索。同时,在不需要节点地理位置信息的前提下,本研究通过获得边节点的相对位置,提高了选择关联节点的质量和搜索资源的效率。

参考文献 (References) :

[1] 潘铭航,苏秀蓉,王正仕. 基于反激拓扑的高效率太阳能微型单级并网逆变器[J]. 机电工程,2013,30(4):485-488.

[2] 刘杨华,吴政球,涂有庆,等. 分布式发电及其并网技术综述[J]. 电网技术,2008,32(15):71-76.

[3] STEEMAN R A. Photovoltaics: From Alternative Energy to Mature Industry[C]//Proceeding of the 2010 IEEE 17th International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits. Singapore:[s. n.],2010:1-4.

[4] 张 淳,潘再平. 逆变电源在微网中的控制策略[J]. 机电工程,2013,30(4):472-475.

[5] NORIDZUAN I, AHMAD M O, SHAARI S. Stand-Alone Photovoltaic Power System applications in Malaysia[C]//4th International Power Engineering and Optimization Conference,PEOCO. Shah Alam:[s. n.],2010:474-479.

[6] 吴小云,顾广娟. 用户侧光伏微电网发展机遇与挑战[J]. 大功率变流技术,2011(6):39-43.

[7] FUNABASHI T, YOKOYMA R. Micro grid field test experiences in Japan[C]//2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting, PES. Montreal:[s. n.],2006:1-2.

[8] MANOLAKOS D, PAPADAKIS G, PAPANTONIS D, et al. A stand-alone photovoltaic power system for remote villages

using pumped water energy storage [J]. **Energy**, 2009, 29 (1):57-69.

[9] 王成山,杨占刚,武 震. 一个实际小型光伏微网系统的设计与实现[J]. 电力自动化设备,2011,31(6):6-10.

[10] 马定宇. 基于 DSP 的光伏发电远程监控系统的研究 [D]. 天津:南开大学信息技术科学学院,2010.

[11] 张海良. 光伏电站远程监控系统的设计和实现 [D]. 秦皇岛:燕山大学电气工程学院,2006.

[12] HELMY A. Mobility-assisted resolution of queries in large-scale mobile sensor network(MARQ) [J]. **Computer Networks Journal**,2003,43(4):437-458.

[13] HELMY A. CAPTURE: Location-free contact-assisted power-efficient query resolution for sensor networks [J]. **ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review**,2004,8(1):27-47.

[14] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamics of 'small-world' networks [J]. **Nature**, 1998, 393 (4): 440-442.

[15] SHARMA G, MAZUMDAR R. Hybrid sensor networks -A smallworld[C]//Proceedings of the 6th ACM international symposium on Mobile Ad Hoc networking and computing. Urbana2Champaign: ACM Press,2005:366-377.

[编辑:洪炜娜]

本文引用格式:

唐婷婷,谭大鹏. 基于小世界模型的光伏板组件网络查询策略研究[J]. 机电工程,2015,32(7):982-986.

TANG Ting-ting, TAN Da-peng. Research on wireless sensor networks of photovoltaic panels based on small world model[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015,32(7):982-986.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 965 页)

提供了依据,同时监控界面的设计为塔机群体协调工作的仿真设计做了良好的尝试,从而奠定了进一步研究的基础。

致 谢

感谢宜昌微特电子设备责任有限公司为塔机防碰撞算法研究提供良好的设计与调试平台,并在技术和现场测试方面给予的大力支持。

参考文献 (References) :

[1] 傅建中. 智能造装备的发展现状与趋势[J]. 机电工程, 2014,31(8):959-962.

[2] 王积永,宋世军. 塔式起重机安全装置的现状浅析[J]. 工程机械,2000(12):21-23.

[3] 令召兰,杨 静. 基于多 Agent 系统的塔群防碰撞控制系统研究[J]. 计算机应用与软件,2008,25(8):190-192.

[4] 闫佳妮. 塔机群防碰撞监测系统的研究 [D]. 南京:南京航空航天大学航空宇航学院,2011.

[5] 陈 帮,张洪涛. 基于嵌入式 Linux 的塔机群防碰撞控制系统[J]. 机电工程,2011,28(3):345-349.

[6] 周见行,马东方,姜 伟,等. 塔机群无线实时通信的研究 [J]. 机电工程,2011,28(8):975-977.

[7] 马东方,周见行,姜 伟. 塔机群防碰撞避让算法研究 [J]. 机电工程,2011,28(10):1222-1225.

[8] 刘晓胜,周 进. 塔机运行的关键控制算法研究[J]. 科学技术与工程,2010,10(24):5689-5894.

[9] 周见行,陈 龙,姜 伟,等. 基于 QT 技术的塔机障碍物数据录入系统开发[J]. 机电工程,2011,28(11):1339-1341.

[10] 陈 龙,周见行,姜 伟,等. 塔机障碍物避让算法的研究[J],机电工程,2011,28(9):1056-1059.

[11] 杨清泉,刘春林;塔机防碰撞及工作区域限制技术[J]. 建筑机械,2004(7):78-80,85.

[编辑:洪炜娜]