

基于大规模智能电网网格结构的查询方法

王 妍, 郝秀苹, 宋宝燕*, 李雪城, 邢增伟

(辽宁大学 信息学院, 沈阳 110036)

(*通信作者电子邮箱 bysong@lnu.edu.cn)

摘 要: 由于智能电网输电线路监测系统的查询多数是针对无线传感器网络(WSN)的全局式查询, 不能满足用户基于任意区域的灵活高效的查询需求, 根据该系统的网络布局和查询特点, 提出了一种基于大规模智能电网网格结构的查询方法 MSQuery。MSQuery 将不同网格内的查询节点的数据汇聚到一棵或多棵逻辑查询树上, 采用逻辑查询树的合并策略建立优化的回收路径。将 MSQuery 与采用路线型结构进行查询的 RSA 算法和采用簇型结构进行查询的 SkySensor 算法进行对比, 结果显示 MSQuery 的平均传输消耗最小, 平均剩余能量最大。实验结果表明, MSQuery 可以快速返回查询窗口内的查询结果, 降低通信消耗, 节省传感器节点能量。

关键词: 智能电网; 监测系统; 无线传感器网络; 网格结构; 查询树合并

中图分类号: TP311.13 **文献标志码:** A

Query algorithm based on mesh structure in large-scale smart grid

WANG Yan, HAO Xiuping, SONG Baoyan*, LI Xuecheng, XING Zengwei

(College of Information, Liaoning University, Shenyang Liaoning 110036, China)

Abstract: Currently, the query of transmission lines monitoring system in smart grid is mostly aiming at the global query of Wireless Sensor Network (WSN), which cannot satisfy the flexible and efficient query requirements based on any area. The layout and query characteristics of network were analyzed in detail, and a query algorithm based on mesh structure in large-scale smart grid named MSQuery was proposed. The algorithm aggregated the data of query nodes within different grids to one or more logical query trees, and an optimized path of collecting query result was built by the merging strategy of the logical query tree. Experiments were conducted among MSQuery, RSA which used routing structure for querying and SkySensor which used cluster structure for querying. The simulation results show that MSQuery can quickly return the query results in query window, reduce the communication cost, and save the energy of sensor nodes.

Key words: smart grid; monitoring system; Wireless Sensor Network (WSN); mesh structure; query tree merging

0 引言

所谓智能电网,就是在传统电网的基础上构建起来的集传感、通信、计算、决策与控制为一体的综合数字复合系统^[1]。将传感器技术应用于智能电网输电线路监测系统中,可对电网的输电线路进行实时的状态数据采集^[2],及时发现故障隐患,保障输电安全,提高供电可靠性。因此,针对大规模智能电网的高效查询成为当前智能电网研究中的一个关键问题^[3]。

近年来,国内外针对智能电网输电线路的在线监测技术作了大量的研究。文献[4]采用分层通信拓扑结构,通过采集输电线路以及线路铁塔的运行环境等数据信息,完成对输电线路故障的实时监测与管理。文献[5]构建了一套基于无线传感器网络的电力设施冰灾实时监测与预警系统,通过在杆塔部署不同类型的传感器节点,并将杆塔上监测的数据通过多跳方式传输给监控中心进行处理,实现输电线路的在线监测。除了理论研究外,目前已经存在一些实际运行的输电线路在线监测技术,例如,输电线路远程可视监控系统、输电

线路覆冰雪在线监测系统、输电线路防盗报警监测系统^[6]。但是,这些系统通常采用全局式的查询方法,将整个监控区域的查询结果返回到监控中心进行筛选和处理。然而,由于大规模智能电网输电线路的查询具有区域任意性,对实时性和可靠性要求很高,全局式的查询方法会给系统带来负担。因此,现有的输电线路在线监测系统已经不能满足大规模智能电网输电线路查询区域性及实时性的要求。

本文充分考虑了大规模智能电网对数据的传输和查询的客观要求,提出了一种基于大规模智能电网网格结构的查询方法(Query algorithm based on Mesh Structure in large-scale smart grid, MSQuery)。该方法把不同网格内的查询节点的数据汇聚到一棵或多棵逻辑查询树上,采用节点着色策略获取源网格内查询回收时的关联节点;利用范围相交法来确定查询窗口内包含的网格;利用范围比较法来确定查询窗口内网格的级别,并找出查询结果汇聚的目的网格;采用逻辑查询树的合并策略建立优化的回收路径,将源网格内的感知数据通过关联节点汇聚到目的网格的传感器节点上作进一步处理,减少无线传感器网络中数据的传输量,提高输电线路监测系

收稿日期: 2014-06-05; 修回日期: 2014-08-12。 基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAF13B08, 2012BAK24B01)。

作者简介: 王妍(1978-),女,辽宁抚顺人,副教授,博士研究生,主要研究方向:数据流处理、感知数据处理、智能电网数据处理; 郝秀苹(1988-),女,辽宁朝阳人,硕士研究生,主要研究方向:智能电网数据处理; 宋宝燕(1965-),女,辽宁开原人,教授,博士,主要研究方向:数据库、RFID数据处理、智能电网数据处理; 李雪城(1990-),女,辽宁抚顺人,硕士研究生,主要研究方向:智能电网数据处理。

统的网络寿命。

1 大规模智能电网的网络结构

输电线路是大规模智能电网的重要组成部分,担负着输送和分配电能的任务。因此,保证输电线路安全运行是整个电网正常运行的前提和保障^[7]。本文将大规模智能电网输电线路以区(县)为单位划分成大小相等的二维逻辑网格,并将该网格放在二维坐标系的第一象限,根据各区(县)的真实地理位置相邻顺序唯一确定其所在网格在坐标系中的坐标。并且,假设将整个区(县)输电线路的监测中心放置在距离区(县)中心位置较近的变电站,抽象出来的逻辑模型如图 2 所示。在二维坐标系中每个网格都有自己唯一的 ID 号 G_{ID} ,用 (x, y) 表示,即 $G_{ID} = (x, y)$,其中 x, y 均为正整数。每个区域包含了计算 IED(Intelligent Electronic Devices)节点^[8]、逻辑根节点、汇聚节点和感知节点。

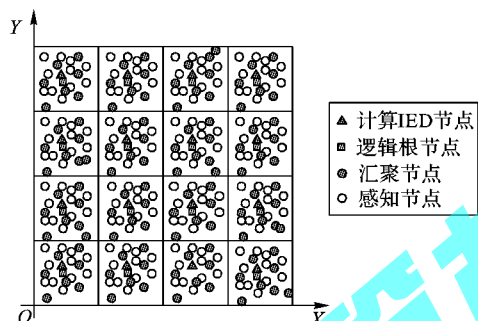


图 1 大规模智能电网的网络结构

感知节点放置在杆塔塔身或与杆塔连接处的导线表面,负责感知温度、湿度等参数,具有简单的计算、感知和转发能力。同一塔杆上的感知节点划分成 1 个簇,在顶部设置一个簇头节点,即汇聚节点,它具有感知、参与查询下发、结果汇聚及转发等功能。逻辑根节点是一类特殊的节点,它只负责计算 IED 节点与汇聚节点、感知节点之间的通信,但具有一定的计算、存储和转发能力。根据实际的需求,计算 IED 节点放置在每个网格的中心位置上,集成了较强的计算和适量的存储模块,具有参与查询下发、接收数据并对其进行处理和转发等功能。

在大规模智能电网中,可能会存在部分汇聚节点之间由于超出了传输范围而无法相互通信的情况,可以通过增设中继节点来解决此问题,最终实现整个输电线路的汇聚节点全连通。本文假设所有汇聚点之间能够相互通信。

2 基于网格结构的查询

2.1 逻辑查询树的建立

在大规模智能电网中,为实现对任意区域的实时查询,本文将每个网格代表的区(县)输电线路覆盖的汇聚节点建成一棵逻辑查询树,每棵树的 ID 号与其所在网格 ID 号相同,则各个区域对应的查询树构成带有编号的查询森林。所有节点在逻辑查询树建立的过程中确定了相互间的父子关系,并被置成不同的颜色,同时计算出自身的最大覆盖范围上传至父亲节点。

1) 节点着色。

为快速找到逻辑查询树合并时的关关节点,在逻辑查询树建立的过程中,本文将汇聚节点置成灰色;同时,将感知节

点置成白色。

2) 节点的最大覆盖范围。

智能电网中节点类型不同,其最大覆盖范围的含义也不同。计算 IED 节点的覆盖范围是指它拥有的 WSN 的范围^[9]。传感器节点的最大覆盖范围是指遍历其所有子孙节点上传的地理位置(实际安装时获知^[10]),得出最大、最小经、纬度构成的最小矩形范围,用 $max-range$ 表示。特别地指出,叶子节点的最大覆盖范围是其地理位置的经纬度。

各网格内逻辑查询树建立后,计算 IED 节点生成 $(G_{ID}, Ng, G.max-range)$ 消息,并将该消息发送到集控中心,集控中心将该消息进行存储。其中: G_{ID} 代表该查询树编号, Ng 和 $G.max-range$ 代表该计算 IED 节点的地理位置和最大覆盖范围。

2.2 查询初始化

大规模智能电网输电线路涉及的地域范围广,如果进行全局查询会产生大量的传输消耗。因此,对用户指定的实际查询区域(查询窗口)进行实时查询时,如图 2 所示,虚线代表查询区域,虚线内的节点则是用户需要查询的节点,在查询初始化阶段,先通过范围相交法确定出虚线内节点所在网格的 G_{ID} ,再通过范围比较法确定查询窗口内各网格在查询回收时的级别。

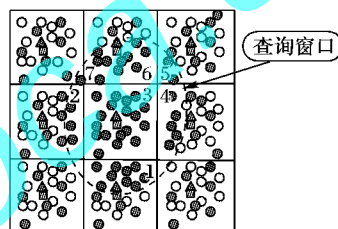


图 2 逻辑网格内查询窗口的示意图

2.2.1 查询窗口内网格的确定

当用户通过查询语句对大规模智能电网中的某个区域的输电线路等设备进行查询时,本文提出一种范围相交的判断方法,即通过判断用户需要查询的实际地理范围的最大覆盖范围与各计算 IED 节点的最大覆盖范围是否相交,来决定该网格是否在查询窗口内。

1) 查询窗口的获取。

在集控中心,对用户指定的查询的地理范围包含的全部地理坐标点进行提取,组成坐标点集合并定义为“查询窗口”,用 QW 表示。采用 2.1 节确定节点最大覆盖范围的方法,得到查询窗口的最大覆盖范围,称为查询最大覆盖范围,用 $Q.max-range$ 表示。

2) 范围相交判断。

为确定属于查询窗口内的网格,集控中心通过判断 $Q.max-range$ 与各网格内计算 IED 节点的 $G.max-range$ 是否相交来决定。规则如下:

a) $Q.max-range \cap G.max-range = \emptyset, G_{ID}$ 不在查询窗口内。

b) $Q.max-range \cap G.max-range \neq \emptyset$, 提取 $Q.max-range$ 与 $G.max-range$ 交集内的查询窗口,形成子集 QW' 。如果 QW' 内没有节点,则 G_{ID} 不在查询窗口内;否则 G_{ID} 在查询窗口内,并对 QW' 进行存储。

2.2.2 查询窗口内网格的级别

属于查询窗口内的网格确定后,如图 2 中虚线内的网格,

由于每个网格代表的区(县)输电线路区域范围极广,如果对只有少数节点属于查询窗口内的网格(如网格2)进行本网格数据的回收,会产生大量的传输消耗,同时会损耗节点有限的能量。因此,可以采用将网格2中查询窗口内的查询结果汇聚到网格3中进行处理。那么,像网格3这样的网格就称为目的网格;像网格2这样的网格则称为源网格,集控中心对目的网格和源网格的相关信息存储。

为确定查询窗口内网格的级别,本文提出了一种范围比较法,即将查询窗口中属于某个网格的 QW' 覆盖的实际查询范围 $Q.range$ 与该网格的 $G.max-range$ 进行比较。判定规则如下:

- a) $Q.range \geq (1/2) \times G.max-range$, 则该网格为目的网格,并形成对应的 (G_{id}, QW', Ng) 元组存储在 G_{dest} 表里。
- b) $Q.range < (1/2) \times G.max-range$, 则该网格为源网格,并形成对应的 (G_{id}, QW', Ng) 元组存储在 G_{src} 表里。

当所有查询窗口内的网格按以上规则进行判断后, G_{dest} 表为空时,说明没有找到符合要求的目的网格,则遍历 G_{src} 表,对各网格的 QW' 覆盖的实际查询范围进行比较,选择包含查询范围最大的网格作为目的网格,并形成 (G_{id}, QW', Ng) 元组存储在 G_{dest} 表里。

2.3 查询下发

集控中心确定查询窗口内网格的级别后,将携带着目的网格信息的查询消息下发至传感器节点,在集控中心和计算 IED 节点采取不同的下发策略。同时,为查询回收选取合适的关联节点。

2.3.1 集控中心到计算 IED 节点的下发

网格级别确定后,集控中心将携带目的网格信息 (G_{id}, QW', Ng) 的查询消息下发至查询窗口内每个网格的计算 IED 节点进行实时查询。 G_{dest} 表中的网格属于目的网格,查询下发时把该表的记录信息下发至相应的网格。 G_{src} 表中的网格是源网格,在下发消息 (G_{id}, QW', Ng) 时,需要为每个源网格确定该网格的目的网格编号。 G_{id} 计算方法是利用欧氏距离公式,通过查找 G_{dest} 表,分别为每个源网格找到距离其最近的目的网格。

2.3.2 计算 IED 节点到传感器节点的下发

计算 IED 节点接到集控中心下发的查询消息后,解析查询消息并采用将其携带的查询窗口转化为一个映射数组^[11],以便在查询下发的过程中,将不属于查询窗口内的节点削减掉。

计算 IED 节点接收到 (G_{id}, QW', Ng) 后,判断该消息中 G_{id} 与自己的编号是否相同。若相同,表明该节点是目的网格内的节点,这时只需把携带 (G_{id}, QW') 信息的查询消息下发。若不相同,表明该节点是源网格内的节点,这时需要把查询消息直接下发。

2.3.3 关联节点的选取

对于源网格内的传感器节点,根据接收到的目的网格的 Ng 确定感知数据的转发方向,并将逻辑查询树的每个分支中第一个属于查询窗口内的节点置成黑色,定义为关联节点,用 T 表示。 T 节点的主要功能是在数据回收时,回收该节点所在分支的感知数据进行处理,并将查询结果转发到目的网格内某个传感器节点上。 T 节点对于查询树的合并至关重要。

2.4 基于逻辑查询树合并的数据收集

由于用户对区域的查询具有任意性,可能导致一棵或者

多棵逻辑查询树的部分传感器节点处于查询窗口中(如图3所示),如果将左侧树的查询结果回收其计算 IED 节点,会产生大量的传输消耗;同时,回收路径上非查询窗口内的节点也会消耗掉部分能量。针对以上问题,本文充分考虑了剩余能量、与计算 IED 节点的距离及角度三方面因素,提出了一种查询窗口内逻辑查询树的合并方法,即将源网格内的查询结果汇聚到目的网格的某个汇聚节点作进一步处理,合并规则分为源网格数据的汇聚、目的网格接收节点的选取和数据的转发和处理几个步骤,可以减少无线传感器网络中数据的传输量,提高监测系统的网络寿命。

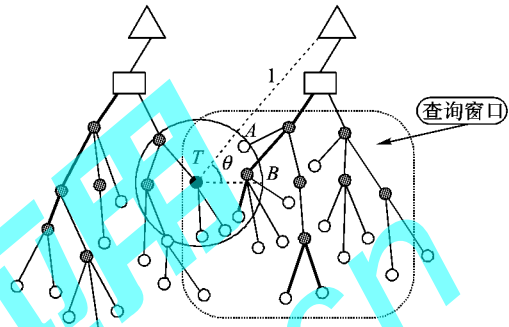


图3 数据转发的示意图

2.4.1 源网格数据的汇聚

源网格进行数据回收时,查询窗口内的非叶子节点将感知数据上传到父亲节点,父亲节点对这些数据和本地的感知数据进行处理,并继续上传。所有节点在上传感知数据前,先判断自己是否为关联节点(即是否被置成黑色),如果不是,则继续上传;否则终止上传。

2.4.2 目的网格接收节点的选取

针对大规模智能电网的路由特征,在角度一定的情况下,本文提出了一种基于距离和剩余能量两方面因素考虑的目的网格接收节点的选取方法。该方法是在当前节点的经度坐标所在的直线与该节点和目的网格计算 IED 节点之间连线的夹角 θ ($\theta \leq 90^\circ$) 范围内,通过式(1)计算目的网格内的接收节点,即 NV 值最大的节点,其中,初始状态的当前节点为关联节点。

$$NV = (1 - \alpha) / \beta \times L + \alpha \times E_i \quad (1)$$

其中: L 是当前节点到下一跳节点 i 的距离, E_i 为节点 i 的剩余能量。参数 β 用于调整 L 与 E_i 之间存在的数量级差异,使两者达到均衡。此外,为应对各个监测中心对数据传输效率和传感器节点的完整性要求的侧重点不同,设定一个调整权重的参数 α ($0 < \alpha < 1$)。例如,当某个监测中心相对于节点剩余能量更偏重数据传输效率,则 α 取值范围为 $0 < \alpha \leq 0.5$;反之, α 取值范围为 $0.5 < \alpha < 1$ 。

1) 选取范围。

选取的范围用 θ 表示, θ 为当前节点的经度坐标所在的直线与该节点和目的网格计算 IED 节点之间连线的夹角。 θ 的计算公式如式(2)所示:

$$\theta = \arctan | (lat - lat_i) / (lon - lon_i) | \quad (2)$$

其中: (lon_i, lat_i) 为当前节点地理位置, (lon, lat) 为目的网格计算 IED 节点地理位置。当 θ 范围内不存在传感器节点时,可以扩大 θ 为 2θ 。

2) 接收节点选取的规则。

当 θ 确定后,当前节点在自己的通信半径内,向 θ 范围内

的节点发送建立连接消息 ($G_{ID}, message$), 然后根据返回消息 (G_{ID}, E_j, Ng) 计算并选择下一跳接收节点。其中, G_{ID} 和 Ng 为接收节点所在的网格 ID 号 and 该节点的地理位置。考虑到传感器节点的能量、内存等资源有限, 只有 $E_j > \varepsilon$ (ε 是传感器节点接近消亡的能量阈值) 的节点才能根据式 (1) 选取 NN 值最大的节点成为下一跳接收节点。以此类推, 直到找到目的网格接收节点为止。

3) 查询结果的收集。

目的网格的接收节点选取后, T 节点将查询结果转发到该节点。该节点将接收的源网格的查询数据在本地进行处理后, 上传到其父亲节点。

2.5 基于网络结构的查询算法

算法 1 基于网络结构的查询方法。

```

输入  查询窗口  $QW$ , 网格的 ID 号  $G_{ID}$  的集合  $M$ 。
输出  查询结果  $result$ 。
1)  for each  $G_{ID}$  in  $M$ 
2)    { create( $G_{ID}$ );           // 网格  $G_{ID}$  创建逻辑查询树
3)      send( $G_{ID}, G.max-range, Ng$ ); }
4)  if ( $Q.max-range \cap G.max-range$ )
5)    if (select( $QW'$ ))
6)      tempSet = tempSet +  $G_{ID}$ ;
7)  destinationSet = decideMainGrid(tempSet); // 确定目的网格
8)  sendQuery(destinationSet,  $QW'$ );
9)  if ( $G_{ID} \notin mainSet$ )
10)   selectTnode( $QW'$ ); // 源网格选择关联节点
11)    $R = mergeQueryTree()$ ; // 合并查询树
12)   return  $R$ 

```

根据以上对基于网络的查询算法的描述, 该算法的时间复杂度理想情况下是 $O(n)$, 最坏情况下是 $O(n^2)$, 这与巨大的通信代价相比, 计算过程只消耗较少的能量, 可以忽略不计。

3 实验与分析

3.1 实验设置

本节中实现了基于网络的查询优化算法 MSQuery, 并将 MSQuery 与 RSA^[12]、SkySensor^[13] 在平均传输消耗、节点的平均剩余能量两方面进行了比较。RSA 是采用路线型结构进行查询的算法, Skysensor 则是采用簇型结构进行查询的算法。实验中假设各个传感器被统一部署且位置均为静态, 拥有一定的内存、计算能力和通信范围, 部署密度为 1 node/10 m², 将整个查询范围划分为 9 个大小相等的逻辑网格。本实验假设测试数据被均匀地分布在 n 个传感器节点上, 每个节点每个时刻感知 1 个元组数据, 元组的属性维度为 3, 每个属性占 4 个字节。在传感器网络中, 数据以包的形式传输, 并且规定传感器可以发送的最大数据包的长度为 48 个字节。根据文献 [14], 无线通信电路发送和接收 1 Byte 的能量消耗公式为 $E_t = \alpha + \gamma \times d^n$, $E_r = \beta$ 。采用文献 [15] 的参数: $\gamma = 10$ pJ/bit/m², $\alpha = 45$ nJ/bit, $\beta = 135$ nJ/bit, $n = 2$ 。实验中所要考察的主要参数及其变化范围和默认值在表 1 中列出。每次实验变化其中一种参数, 而将其余参数设为默认值。

本实验中采用的合成数据为轮廓查询的标准测试数据集^[16], 智能电网监测系统应用中感知数据各维属性之间没有内在的关系, 因此, 本实验主要考察各个算法在独立分布下的性能。

表 1 实验参数

| 类别 | 传感器节点数 | 网络规模 |
|------|-------------------------|---|
| 默认值 | 300 | 300 m × 300 m |
| 变化范围 | 100, 200, 300, 400, 500 | 100 m × 100 m, 200 m × 200 m, 300 m × 300 m, 400 m × 400 m, 500 m × 500 m |

3.2 平均传输消耗的测试

本实验主要考察各个算法在网络规模、节点数目两种情况下数据回收时产生的平均传输消耗。

从图 4 可看出, 随着节点数目的增加, 各算法的平均传输消耗随之增大。这是由于节点数目的增加, 导致参加计算的元组数量增多, 各算法的平均传输消耗也随之增加。本文提出的 MSQuery 能够快速定位查询区域, 并且采用逻辑查询树的合并策略建立优化的回收路径, 将源网格内的感知数据通过关联节点转发到目的网格的传感器节点进行处理, 无需收回到本网格的计算 IED 节点, 因此传输消耗最小。RSA 在查询消息发送至查询区域后, 查询区域内的所有代表节点 (除最后一个代表节点外) 都需要广播一次部分查询结果和查询消息, 使得其下一个网格中的所有节点均能收到该消息。而 SkySensor 将数据传输到聚簇的代价不再被多个查询所分担, 因此传输代价最高。

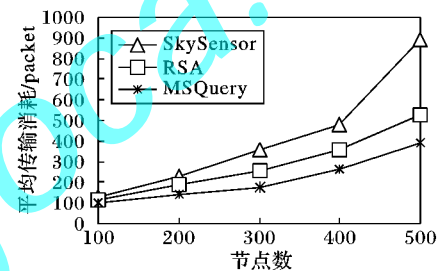


图 4 不同节点数目下平均传输消耗的对比

图 5 表明, 随着网络规模的增加, 各算法的平均传输消耗也随之增大。SkySensor 和 RSA 的平均传输消耗增长较快, MSQuery 增长相对较慢。在 MSQuery 中, 当逻辑查询树只有一个或者几个小的查询分支属于查询窗口时, 可以通过关联节点将源网格的查询结果转发到目的网格的传感器节点进行处理, 所以平均传输消耗最小。当网络规模扩大时, MSQuery 还具有较好的扩展性。

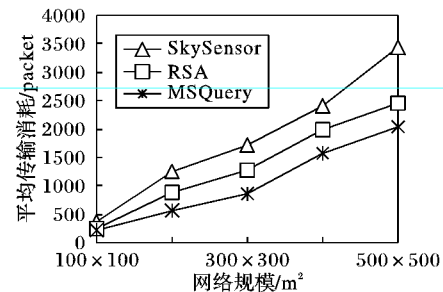


图 5 不同网络规模下平均传输消耗的对比

3.3 节点能量消耗的测试

能量消耗是指计算 IED 节点在发送查询到得到结果的过程中, 所有节点产生的能量消耗。

图 6 表明, 随着节点数目的增多, 各算法的能量消耗都呈上升趋势, RSA 和 Skysensor 的能量消耗要大于 MSQuery。MSQuery 在发送查询时, 每个监测区域都拥有自己的逻辑查

询树,而无需再建立,在数据回收的过程中,每个传感器节点只需将感知数据发送到自己的父亲节点,而不是采用广播的方式发送,因此能量消耗最小。RSA 则根据查询区域来划分网格,进行查询下发及感知数据的回收,在每个网格内除代表节点外每个节点都会广播一次部分查询结果和查询消息,当感知数据增多时,发送和接收感知数据会越来越大,能量消耗也会大于 MSQuery。Skysensor 无法确定实际的查询区域,而是采用全局查询的方法,每个节点的感知数据不是进行本地存储,而是通过数据插入机制转发到本簇内符合要求的节点,因此能量消耗最大。

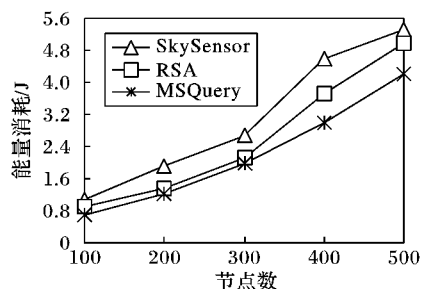


图6 不同节点数目下能量消耗的对比

图7表明,随着网络规模的增大,除 MSQuery 外,Skysensor 和 RSA 的能量消耗增长较快,MSQuery 增长相对缓慢。MSQuery 无需根据查询区域建立逻辑查询树,直接进行查询下发和数据的回收,并且将查询窗口内一个或者几个分支的感知数据转发到目的网络的传感器节点进行处理,削减掉一部分不属于查询结果的感知数据,同时本逻辑查询树中其余传感器节点因无需继续进行感知数据的回收而节省大量的能量,延长自己的寿命,因此能量消耗最少。

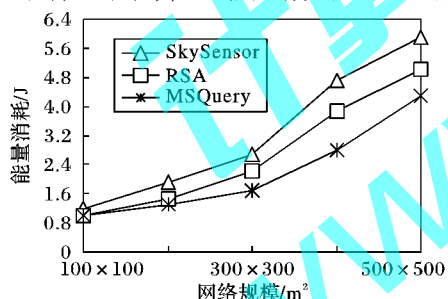


图7 不同网络规模下能量消耗的对比

4 结语

针对大规模智能电网输电线路的查询范围辽阔多变,涉及的感知设备数量众多等特点,提出了一种基于大规模智能电网网格结构的查询方法。该方法把不同网格内查询节点的数据汇聚到一棵或多棵逻辑查询树上,采用节点着色策略确定源网格内查询回收时的关联节点,该节点用于源网格和目的网格之间数据的转发;利用范围相交法来确定查询窗口内包含的网格,同时利用范围比较法来确定查询窗口内网格的级别,并找出查询结果汇聚的目的网格;采用逻辑查询树的合并策略建立优化的回收路径,将源网格内的感知数据通过关联节点汇聚到目的网络的传感器节点上作进一步处理,减少了无线传感器网络中数据的传输量。实验结果表明,MSQuery 可以极大地减少 WSN 中的平均传输消耗,节省节点的能量,提高输电线路监测系统的网络寿命。

参考文献:

[1] CAO J, WAN Y, TU G, *et al.* Information system architecture for

smart grids [J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 1(12): 143 - 167. (曹军威, 万宇鑫, 涂国焯, 等. 智能电网信息系统体系结构研究[J]. 计算机学报, 2013, 1(12): 143 - 167.)

[2] CHANDA S, DE A. A multi-objective solution algorithm for optimum utilization of smart grid infrastructure towards social welfare [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2014, 58: 307 - 318.

[3] MINGJUN W. Some highlights in relation to smart grid [J]. Power System Technology, 2009, 33(18): 9 - 16.

[4] CASEY P R, JABER N, TEPE K E. Design and implementation of a cross-platform sensor network for smart grid transmission line monitoring [C]// Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Smart Grid Communications. Piscataway: IEEE Press, 2011: 285 - 290.

[5] WANG Y, YIN X, YOU D, *et al.* A real-time monitoring and warning system for electric power facilities icing disaster based on wireless sensor network [J]. Power System Technology, 2009, 33(7): 14 - 19. (王阳光, 尹项根, 游大海, 等. 基于无线传感器网络的电力设施冰灾实时监测与预警系统[J]. 电网技术, 2009, 33(7): 14 - 19.)

[6] HUANG X, ZHANG G. Status quo analysis of online monitoring techniques of transmission lines [J]. Guangdong Electric Power, 2009, 22(1): 13 - 20. (黄新波, 张国威. 输电线路在线监测技术现状分析[J]. 广东电力, 2009, 22(1): 13 - 20.)

[7] ZHENG M, YU Z, ZHENG W. An icing on-line monitoring system of transmission lines based on WSN [C]// Proceedings of the 2013 Fifth International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. Piscataway: IEEE Press, 2013: 194 - 197.

[8] SONG B, ZHANG H, WANG Y, *et al.* Data storage method supporting large-scale smart grid [J]. Journal of Computer Applications, 2012, 32(9): 2496 - 2499. (宋宝燕, 张红梅, 王妍, 等. 一种支持大规模智能电网的数据存储方法[J]. 计算机应用, 2012, 32(9): 2496 - 2499.)

[9] LIN X, YUAN Y, WANG W. Stabbing the sky: efficient skyline computation over sliding windows [C]// ICDE 2005: Proceedings of the 21st International Conference on Data Engineering. Piscataway: IEEE Press, 2005: 502 - 513.

[10] FAGIN R, AMNON L, MONI N. Optimal aggregation algorithms for middleware [J]. Journal of Computer and System Sciences, 2003, 66(4): 614 - 656.

[11] CHRN H, LI Z, JIN H, *et al.* MDS: efficient multi-dimensional query processing in data-centric WSNs [C]// Proceedings of the 2008 Real-Time Systems Symposium. Piscataway: IEEE Press, 2008: 355 - 364.

[12] LIU L, QIN X, LI B, *et al.* Robust spatial window aggregation query processing algorithm in wireless sensor network [J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(7): 1465 - 1470. (刘亮, 秦小麟, 李博涵, 等. 鲁棒的无线传感器网络空间范围聚集查询处理算法[J]. 电子学报, 2012, 40(7): 1465 - 1470.)

[13] SU I, CHUNG Y, LEE C, *et al.* Efficient skyline query processing in wireless sensor networks [J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2010, 70(6): 680 - 698.

[14] RAPPAPORT T S. Wireless communications: principles and practice [M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1996.

[15] BHARDWAJ M. Power-aware systems [EB/OL]. [2014-03-21]. http://www.mtl.mit.edu/researchgroups/icsystems/pubs/theses/manishbsm_2001.pdf.

[16] BORZSONYI S, STOCKER K, KOSSMANN D. The Skyline operator [C]// Proceedings of the 17th International Conference on Data Engineering. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2001: 421 - 430.