

## 大规模 WSN 的三层拓扑架构及其拓扑控制

韩双霞<sup>1</sup>, 范一鸣<sup>1</sup>, 张 露<sup>1</sup>, 罗富荣<sup>2</sup>

(1. 浙江工业大学(浙西分校) 计算机应用技术研究所, 浙江 衢州 324000;

2. 浙江金凯门业有限责任公司, 浙江 江山 324100)

(zxzd@163.com)

**摘 要:**针对多 sink 的大规模 WSN, 提出一种新的三层网络拓扑架构, 以解决现有平面型和两层分簇型拓扑架构与大规模 WSN 环境不相适应的问题; 在分析各层数据通信策略的基础上, 重点研究了基于瓶颈 sink 节点的关键层拓扑控制算法, 为核心层数据通信提供可靠性支持。仿真实验表明, 所提出的大规模 WSN 三层拓扑控制结构和拓扑控制算法有助于平衡全局通信负载, 控制关键通信层能量消耗, 提高网络监测的鲁棒性。

**关键词:**大规模无线传感器网络; 拓扑控制; 瓶颈节点

**中图分类号:** TP393.02 **文献标志码:** A

### Three-layer topology architecture and topology control algorithm for large-scale wireless sensor network

HAN Shuang-xia<sup>1</sup>, FAN Yi-ming<sup>1</sup>, ZHANG Lu<sup>1</sup>, LUO Fu-rong<sup>2</sup>

(1. Computer Application Technology Research Institute,

West Branch of Zhejiang University of Technology, Quzhou Zhejiang 324000, China;

2. Zhejiang Jinkai Door Industry Company Limited, Jiangshan Zhejiang 324100, China)

**Abstract:** Aimed at the application characteristics of the large-scale Wireless Sensor Network (WSN) with more sink nodes, a new 3-layer topology architecture was proposed to solve the problem of the incompatibility of the traditional topology structure in large-scale WSN. The data communication strategy for each level was analyzed, and a topology control algorithm for top-level was proposed based on the bottleneck-nodes, which would provide higher reliability control for the key-level. The experimental results indicate that, the new topology control strategy helps to balance the communication load of the nodes, and the energy consumption in the key-level can be reduced remarkably.

**Key words:** large-scale Wireless Sensor Network (WSN); topology control; bottleneck node

## 0 引言

近年来,随着无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)技术的发展,诸如大区域环境监测、流域生态监控、远程大气监测等大规模 WSN 应用开始出现。与只有几十个传感节点、覆盖半径在几十米到上百米的小型 WSN 相比较,大规模 WSN 具有节点广泛分布、覆盖区域大,多 sink 协同工作,数据通信机制复杂以及全局能量负载均衡要求更高等重要特性。在大规模 WSN 环境下,由于节点类型复杂、分布区域广、通信距离远、外界影响大,使得网络拓扑更加具有不稳定、易变化的特性,现有的拓扑控制算法不能很好地适应此类环境,需要进行适应性改进。

在 WSN 设计中,考虑到传感器节点的能量储备十分有限<sup>[1]</sup>,故需要良好的网络拓扑结构和控制机制以提高路由协议和 MAC 协议的效率,为数据融合、时间同步和目标定位等提供基础,达到节省能耗,延长网络的生存寿命的目标。WSN 能量消耗特性分析表明,无线通信是传感节点最主要的能量消耗环节<sup>[2]</sup>。为此,从提高大规模 WSN 网络鲁棒性,延长生存周期的目标出发,需要针对大规模 WSN 应用环境,深入研究与能耗关系密切的网络拓扑控制问题。

## 1 大规模 WSN 拓扑问题概述

WSN 拓扑控制主要研究的问题是:在满足网络覆盖度和连通度的前提下,通过功率控制和骨干节点选择,剔除节点之间不必要的通信链路,形成一个数据转发的优化网络结构。

就通常意义下的 WSN 而言,其拓扑控制的共性目标主要包含:保障节点间可达性、降低能量损耗、提升网络容量、减小信道干扰以及增强空间复用率等。对于某些特定应用,拓扑控制的目标还涉及支持弱移动性、减小传输延迟、优化通信链路质量等其他方面。

现有的 WSN 网络拓扑主要有:平面型拓扑(星型结构)、分簇拓扑(多级簇树结构)和网状网络拓扑(无规则多跳结构)<sup>[3]</sup>等,它们大多针对单 sink 节点的 WSN 环境而提出,如:COMPOW 等功率分配算法、LINT/LILT 和 LMN/LMA<sup>[4]</sup>等基于节点密度的算法、CBTC 等<sup>[5]</sup>基于邻近图的近似算法;在层次型拓扑控制方面,有 TopDisc 分簇算法、改进的 GAF 虚拟地理网格分簇算法,以及 LEACH 和 HEED<sup>[6]</sup>等自组织成簇算法。

对于大区域覆盖、多 sink 协作的 WSN 而言,不能简单地直接使用前述的平面型节点功耗控制和两层拓扑结构。原因

收稿日期:2009-01-04;修回日期:2009-03-02。 基金项目:浙江省自然科学基金资助项目(Y1080023)。

作者简介:韩双霞(1970-),女,河北藁城人,讲师,硕士,主要研究方向:数据库、无线传感与通信控制; 范一鸣(1964-),男,浙江绍兴人,副教授,硕士,CCF 会员,主要研究方向:无线传感器网络、路由技术; 张露(1981-),女,陕西绥德人,助教,硕士,主要研究方向:普适计算、传感技术; 罗富荣(1964-),浙江江山人,高级工程师,主要研究方向:工业过程控制、系统监控。

在于:

1) 多个 sink 节点间需要根据其所属传感节点分簇域的地理分布和通信流量均衡其负载;

2) 不同分簇的簇首由于承担较多的通信中继任务需要更好的平衡其通信能耗负载;

3) 不同层面的数据通信,包括:传感节点-簇首、簇首-sink、sink-基站,需要引入不同的拓扑控制策略;

4) 从网络生存期这一主要设计因素考虑,基站-sink 通信层的拓扑控制是全局的关键,需要有比较完善的拓扑控制算法支持,以增强全网数据通信的可靠性。

基于以上分析,现有的网络拓扑控制主要存在以下两个问题:首先,平面型及两层分簇型拓扑结构与大规模 WSN 环境不相适应。大规模 WSN 通信涉及的对象复杂:可分为传感节点、簇首节点、sink 节点和基站等;通信层次复杂:包括传感节点之间的通信、传感节点和 sink 节点之间的通信、sink 节点之间的通信以及 sink 节点到监测基站的通信,等等<sup>[7]</sup>。其次,数据通信关键层上缺乏必要的可靠性控制。针对由多个 sink 节点构成的监测网络,sink 节点承担了基站到传感节点域的通信中继核心任务,是整个数据通信网络的关键对象。因此,该层的拓扑控制问题需要重点加以研究,尤其是对关键层通信能耗有着至关重要影响的“瓶颈 sink 节点”的发现和消除算法及策略。

## 2 三层拓扑结构及顶层拓扑控制

### 2.1 三层拓扑结构

根据大规模 WSN 中不同通信层所涉及的通信对象、传输类型和数据流量的基本特性,我们将整个监测网络划分成一种三层结构(如图1所示),即:顶层网络(由基站与 sink 构成)、二层子域网(sink 和域内簇首构成)及底层分簇(簇首和传感节点构成)。

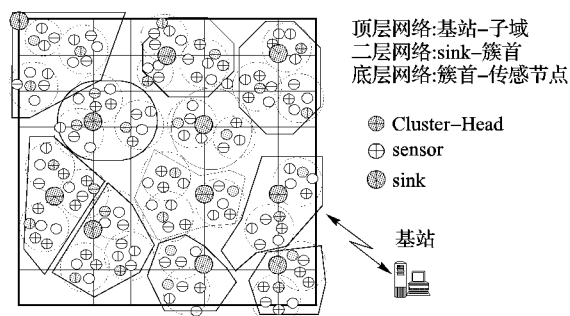


图1 WSN 三层网络拓扑结构

第1层 覆盖整个监测区域的顶层通信网络:全局通信的核心层。该层由基站和多个 sink 节点构成,数据通信在监测基站和多个 sink 节点之间发生,sink 节点承载了网络的核心数据汇聚和通信任务。

第2层 以单个 sink 为中心的子域监测网:该层由 sink 节点和对应覆盖划分子域中的簇首节点构成。每个划分子域中的传感节点采用动态分簇方式,进一步划分成多个监测簇(Cluster)。该层的数据通信在 sink 节点和各个簇首之间发生,数据流量介于一层和三层之间。

第3层 覆盖单个簇的传感节点网络:该层对应一个监测子域中的单个分簇,由簇首和簇内传感节点构成。类似 LEACH 算法,每个分簇采用时间轮转的方法实现簇的组建、簇首选举、数据通信和簇的维护任务。本层数据通信在簇首节点和其他传感节点之间发生。

在上述三层网络结构中,需要逐层分析其数据通信策略和适用的路由通信协议。首先,对底层网络,由于它所对应的是一个传感节点的分簇,由单个簇首和簇成员构成。此时传感节点到簇首的数据传输可采用经典协议 LEACH 中的方式,即各成员节点依据所分配的 TDMA 时隙,把监测数据单跳传输到簇首节点。其次,对于二层网络,由于整个监测覆盖区域经子域划分后,二层网络(即每个子域)中的数据通信问题已被局部化为传统的“单 sink + 多分簇”通信问题。在大区域覆盖的大规模 WSN 环境下,考虑到每个“单 sink + 多分簇”所构成的子域地理跨度可能很大,因此,可以利用改进分簇协议<sup>[8]</sup>,即基于簇首最小生成树的集中式动态自适应路由协议,解决 sink 与各分簇簇首间的数据通信问题。最后,对于由监测基站和多 sink 组成的顶层网络,由于基站和 sink 节点具有比一般传感节点更强的存储处理能力、更充足的电力支持,故该层的路由协议可以采用 WSN 中具有动态自修复特性的 LTP<sup>[9]</sup> 协议,以提高网络健壮性,延长生存期。

### 2.2 基于瓶颈 sink 节点的顶层拓扑控制算法

#### 2.2.1 WSN 的瓶颈节点

在一个随机部署的无线传感器网络中,常常可能存在一些连接两个以上区域的孤立节点,这些节点独自负责转发多个区域间的数据,且没有邻居节点的支援。一旦这些节点消亡,就会造成整个网络的割裂,这些节点就是“瓶颈节点”。

瓶颈节点问题等价于图论中的最小割集问题。如果网络中某个节点可以得到全网拓扑信息,那么利用文献[10]提出的 MINCUT 算法可以发现并标识它们。如图2,如果汇聚节点位于区域1,而被监测的目标位于区域2(或区域3,4),则图中标注的节点就是瓶颈节点。如果它们消亡,整个网络将会被分割成4个不相连的部分,网络的监测能力将大受影响。对实际应用的 WSN,由于计算和存储资源的紧缺,维护整个网络的拓扑信息是一项非常困难、开销巨大甚至不可能的任务<sup>[11]</sup>。

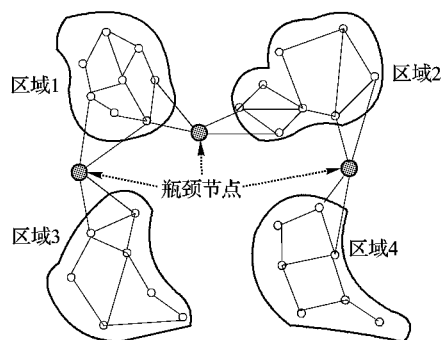


图2 WSN 中的瓶颈节点

观察发现,几乎所有的瓶颈节点都有一个共同特点,那就是它们的邻居节点可以分为多个不相交的节点集,当这些不同节点集中的节点需要互相通信时,只能通过该节点的中继。因此,可以根据该特点去寻找此类节点,并称其为“准瓶颈节点”。

为了便于算法描述,引入以下形式化定义:

**定义1** 顶层网络用一个无向图来表示: $G = (V, E)$ , sink 节点集记为  $V$ , sink 间的双向链路集记为  $E$ 。对于  $\forall S_i \in V$ ,  $R$  为其最大通信距离,  $A_{S_i}$  表示  $S_i$  的射频覆盖范围。发送节点  $S_i$  与接收节点  $S_j$  之间的距离用  $d(S_i, S_j)$  表示。 $d(S_i, S_j) \leq R$  时,边  $e(s_i, s_j) \in E$ 。

**定义2** 对于有  $N$  个 sink 节点的顶层传感器网络,其节点集  $V = \{v_0, v_1, \dots, v_n\}$ , 其中  $v_0$  为监测基站,  $V_N = V - \{v_0\}$

为 sink 节点集。

**定义3** 由所有瓶颈 sink 节点组成的集合记为  $V_{BN}$ , 由所有非瓶颈 sink 节点组成的集合记为  $V_{CN}$ 。

**定义4** 对于任意 sink 节点  $S_i$  和  $S_j$ , 若  $d(S_i, S_j) \leq R$ , 则称  $S_i$  和  $S_j$  为邻居节点, 并定义  $Ns_i = \{s_j \mid d(s_i, s_j) \leq R, j \neq i\}$  为  $S_i$  的邻居节点集合。

**定义5** 对于  $G$  的一个连通子图  $comp_i = (V_{comp_i}, E_{comp_i})$ ,  $V_{comp_i} \subseteq V_{CN}$ ,  $E_{comp_i} = \{e(u, v) \mid u, v \in V_{comp_i}, e(u, v) \in E\}$ , 称为图  $G$  的一个连通区域。对于图  $G$  的所有连通区域, 有  $\bigcup_{\forall i} comp_i = V_{CN}$ ,  $\bigcap_{\forall i} comp_i = \emptyset$ 。

### 2.2.2 瓶颈 sink 节点判定算法 FIND\_BNN

**算法思想:** 根据一个节点的邻居节点是否可以分为多个互不相邻的子集判断其是否为瓶颈节点。算法的形式化描述:

```

FIND_BNN( $N, s$ )
{
    //判定  $s$  是否是一个瓶颈节点
     $m = 0$ ;  $SETA = \emptyset$ ;  $SETB = \emptyset$ ;
    for ( $j = 0$ ;  $j < n$ ;  $j++$ )
    {
        if ( $neighbor\_node(s, s_j)$ ) {
            put_set( $SETB, s_j$ );
             $m++$ ;
        }
        // neighbor_node() 判断两个节点是否相邻
    }
     $ss = delete\_set(SETB)$ ; // 从集合中取出一个元素
     $m--$ ; put_set( $SETA, ss$ );
    while (NOT empty( $SETB$ )) {
         $ss = delete\_set(SETB)$ ;
        if ( $neighbor(SETA, ss)$ ) put_set( $SETA, ss$ );
    }
    if (empty( $SETB$ )) { return 1 }
    else return 0
}

```

### 2.2.3 瓶颈 sink 节点标识算法 LABEL\_BNN

**算法思想:** 算法 FIND\_BNN 解决了一个节点是否为瓶颈节点的判断问题, 在其基础上可以采用广度优先的搜索策略 (BFS), 完成对连通区域和准瓶颈节点的标记。算法的形式化描述:

```

LABEL_BNN( $VN$ ) {
    // 标识  $VN$  中的瓶颈节点和连通区域
     $BN = \emptyset$ ;  $m = 0$ ;
    while (NOT empty( $VN$ )) {
         $si = delete\_set(VN)$ ;
        if ( $BNN\_D(VN, si)$ ) put_set( $BN, si$ );
        // BN—瓶颈节点集合
    }
    else {
         $m++$ ; empty( $VCONP[m]$ );
        // VCONP[] 为连通域节点集
        put_set( $VCONP[m], si$ );
        for ( $j = 0$ ;  $j < n$ ;  $j++$ ) {
             $s_j = get\_next(VN)$ ;
            if ( $neighbor\_node(si, s_j)$ ) en_queue( $Q, s_j$ );
        }
        while (NOT empty_queue( $Q$ )) {
             $ss = de\_queue(Q)$ ;
            if ( $BNN\_D(VN, ss)$ ) put_set( $BN, ss$ );
            else {
                put_set( $VCONP[m], ss$ );
                find_all_neighbor( $VN, Q, ss$ );
            }
        }
    }
}

```

// 在  $VN$  中找到  $ss$  的全部邻居加入  $Q$

## 3 算法分析及实验仿真

鉴于模拟三层拓扑结构的大规模 WSN 仿真环境难以建立。本文中, 为了分析引入瓶颈节点消除算法后对 WSN 拓扑控制算法性能的影响, 我们利用网络仿真工具 OPNET, 用单层的节点结构模拟大规模 WSN 的顶层场景进行实验分析。实验仿真在典型分簇拓扑控制算法 LEACH 的基础上进行, 重点比较算法在不考虑消除瓶颈节点和引入瓶颈节点消除算法后的性能差异, 相当于在上述三层拓扑结构的顶层上进行实验仿真。

仿真实验中, 在 LEACH 分簇拓扑控制算法的基础上, 引入 FIND\_BNN 和 LABEL\_BNN 机制构成新的算法 LEACH\_B。LEACH\_B 能够及时发现和标识瓶颈节点, 并且当识别出一个瓶颈节点及其边界时, 算法通过模拟节点移动或者改变其连通集中某些节点的位置消除瓶颈节点。

实验中, WSN 网络预置 160 个节点, 分别运行未引入瓶颈节点消除算法的分簇拓扑控制算法 LEACH 和引入瓶颈节点消除算法后的分簇拓扑控制算法 LEACH\_B。仿真分析涉及下列指标:

1) 平均节点度。节点度是一个节点的所有距离该节点一跳距离的邻居节点数目。节点度小有利于空间的重用, 减少分组传播碰撞的概率。

2) 节点平均发送半径。平均发送半径越小, 发送数据所需的能量就越少。

3) 若干轮成簇后节点的平均剩余能量。

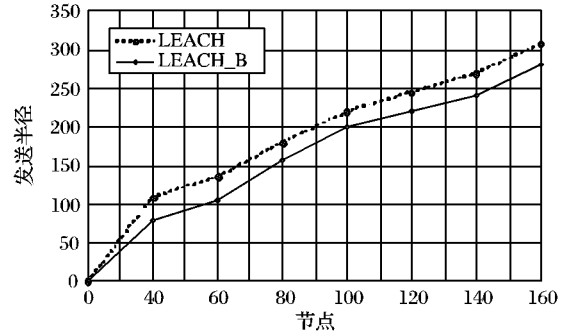


图3 平均发送半径

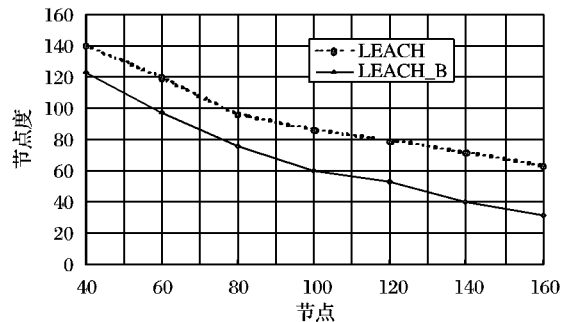


图4 平均节点度

在仿真过程中, 节点数分别取 40、60、80、100、120、160, 每次分别随机生成 2 个场景, 记录各项数据, 按照上述的性能比较指标计算并取平均值。图 3~5 对两个算法各项数据进行

了对比。图 3 表明,引入瓶颈节点消除算法前后,随着节点数的增加,节点的平均发送半径明显下降,而且 LEACH\_B 比 LEACH 更小;图 4 表明两个拓扑控制算法作用下,网络中平均节点度较为稳定,两者差异并不大。说明节点相互之间的干扰较少;图 5 表明,引入了瓶颈节点消除机制的 LEACH\_B 算法的节点平均能耗显著优于单纯的 LEACH 算法。后者大约在 1600 轮左右,节点能量基本耗尽;而 LEACH\_B 则能维持到大约 1800 轮。

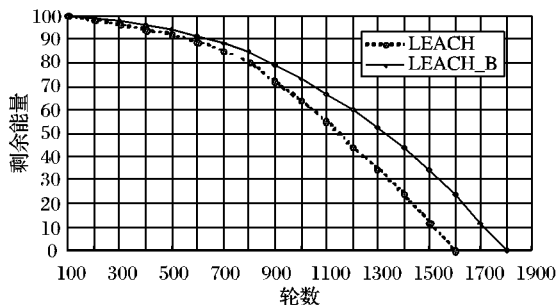


图 5 节点平均剩余能量

#### 4 结语

本文研究了大区域覆盖、多 sink 传感器网络的拓扑控制问题,给出了一种由顶层网络(由基站与 sink 构成)、二层子域网(sink 和域内簇首构成)及底层分簇(簇首和传感节点构成)的三级网络结构;分析了各层的数据通信策略,研究并提出了顶层网络中瓶颈 sink 节点的发现和标识算法;通过基于 OPNET 的仿真实验验证了新的拓扑控制策略的性能。

上述工作尚遗留一些需要进一步深入研究和解决的问题,如:如何通过诸如部署增援节点等方法,有效地消除瓶颈节点;如何降低算法 *FIND\_BNN()* 和 *LABTEL\_BNN()* 的时间复杂度等。这些都是我们后续研究的主要方向。

#### 参考文献:

- [1] 程大伟,赵海,孙佩刚,等. 能量高效的无线传感器网络传输可靠性研究[J]. 计算机应用,2008,28(1):25-28.
- [2] 张学,陆桑璐,陈贵海,等. 无线传感器网络的拓扑控制[J]. 软件学报,2007,18(4):943-954.
- [3] BAO L, GARCIA J J. Topology management in Ad Hoc networks [C]// *MobiHoc2003: Proceedings of the Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing*. New York: ACM Press, 2003, 5: 129-140.
- [4] KUBISCH M, KARL H, WOLISZ A, *et al.* Distributed algorithms for transmission power control in wireless sensor networks [C]// *Proceedings of the IEEE Wireless communications and Networking Conference*. New Orleans: IEEE Press, 2003: 558-563.
- [5] LI N, HOU J C, SHA L. Design and analysis of an MST-based topology control algorithm [C]// *Proceedings of the 12th Joint Conference on IEEE Computer and Communications Societies*. San Francisco: IEEE Press, 2003: 1195-1206.
- [6] SANTI P, SIMON J. Silence is golden with high probability: Maintaining a connected backbone in wireless sensor networks [C]// *Proceedings of the 1st European Workshop on Wireless Sensor Networks*. Berlin: Springer, 2004: 106-121.
- [7] 何国圆,陈涤. 一种新的基于动态最优簇数目的 WSN 分簇协议[J]. 计算机应用,2008,28(11):2778-2780.
- [8] KARGER D R, STEIN C. A new approach to the minimum cut problem [J]. *Journal of the ACM*, 1996, 4(43): 601-640.
- [9] 范一鸣,陈庆章,余建军. 一种基于簇首生成树的传感器网络分簇路由协议[J]. 传感技术学报,2008,12:2067-2072.
- [10] LEE M, WONG V W S. LPT for data aggregation in wireless sensor networks [C]// *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference 2005*. Washington, DC: IEEE Press, 2005, 5: 2969-2974.
- [11] WANG G L, CAO G H, PORTA T A, *et al.* Sensor relocation in mobile sensor networks [C]// *INFOCOM 2005: 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*. New York: IEEE Press, 2005: 2302-2312.
- [12] 田乐,谢东亮,韩冰. 无线传感器网络中瓶颈节点的研究[J]. 软件学报,2006,17(4):830-837.

(上接第 1519 页)

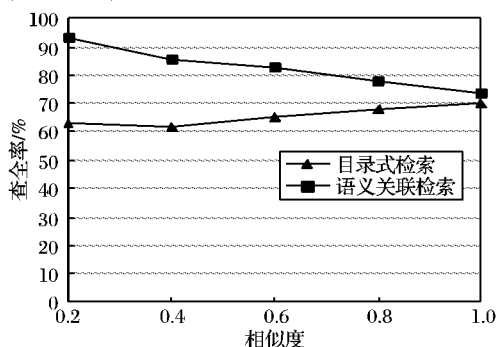


图 3 实验查全率比较

图中的相似度是指式(4)中的相似度系数。从图 2、3 可以看出,查准率随相似度的增大有所增大,查全率随相似度增大而有所减小,因为相似度系数增大,关联度系数则减小,故查全率随着减小。还可以看出:将基于元数据语义关联的检索方法应用到网格信息服务系统 MDS 中,有效提高了信息检索性能。因此采用基于语义关联的信息检索方式更适应于海量资源的网格环境,能够大大提高资源的检索效率。

#### 4 结语

网格技术作为下一代 Internet 的关键技术,可以消除信息孤岛和知识孤岛,实现资源的共享,是目前对资源信息有效利

用较好的解决方案。本文在分析了网格信息服务系统 MDS 系统的基础上,将语义关联的信息检索技术与网格信息服务技术有效结合,进一步提高了检索效率,这对在海量的信息中发现有效信息具有积极的促进作用。

#### 参考文献:

- [1] 都志辉,陈渝,刘鹏. 网格计算[M]. 北京:清华大学出版社,2002:74-84.
- [2] 杨辉,南凯,马永征,等. 数据网格中信息服务技术的研究与实现[J]. 计算机应用研究,2007,24(7):246-248.
- [3] ANYANWU K, SHETH A.  $\rho$ -queries: Enabling querying for semantic associations on the semantic Web [C]// *Proceedings of the WWW 2003*. New York: ACM Press, 2003: 690-695.
- [4] 胡美枝,郑纬民,武永卫,等. 基于语义关联的网格监控元数据管理[J]. 清华大学学报:自然科学版,2008,48(1):109-112.
- [5] FELLBAUM C. WordNet an electronic lexical database [M]. Cambridge: MIT Press, 1998: 285-303.
- [6] LI YU-HUA, BANDAR Z, McLEAN D. An approach for measuring semantic similarity between words using multiple information sources [J]. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2003, 15(4): 871-882.
- [7] XIN DONG, HALEVY A, MADHAVAN J, *et al.* Similarity search for Web services [EB/OL]. [2008-10-10]. <http://www.vldb.org/conf/2004/RS10P1.PDF>.
- [8] 吴健,吴朝晖,李莹,等. 基于本体论和词汇语义相似度的 Web 服务发现[J]. 计算机学报,2005,28(4):595-601.