

异构无线传感器网络中异构节点的部署与优化

俞黎阳 王 能 张 卫

(华东师范大学计算机科学技术系 上海 200241)

摘 要 在无线传感器网络中适当地部署少量的异构传感器节点能够有效地延长网络寿命,提高网络的可靠性。本文主要研究无线传感器网络中异构节点的部署问题,提出了基于选址问题的异构节点部署算法,以优化无线传感器网络中异构节点的数量和位置。与其它算法相比,该算法对无线传感器网络的拓扑结构没有特定的要求,可以支持随机部署或人工部署的各种传感器网络,最后还给出了该算法的仿真测试结果。

关键词 异构,无线传感器网络,部署

Placement of Heterogeneous Nodes in Wireless Sensor Networks

YU Li-yang WANG Neng ZHANG Wei

(Dept. of Computer Science & Technology, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract Placing few heterogeneous nodes in wireless sensor network is an effective way to increase network lifetime and reliability. We address the deployment problem of heterogeneous wireless sensor networks. We present an algorithm to decide how many and where heterogeneous nodes should be deployed in the wireless sensor network. The core algorithm, based on the locations of all sensor nodes, can optimize placement of heterogeneous nodes in an arbitrary sensor network. Finally, the evaluation results of this algorithm are shown in this paper.

Keywords Heterogeneous, Wireless sensor networks, Deployment

1 引言

近几年,无线传感器网络因其广泛的应用前景和独特的挑战性,吸引了众多学者的研究兴趣。目前,对无线传感器网络技术的研究,国内外学者大部分以同构的无线传感器网络作为研究对象。所谓同构,是指无线传感器网络的所有传感器节点都是同一类型的,特别是在电源、传输带宽、计算能力、存储空间等系统资源方面是基本相同的。

而在实际应用中,可能会部署一些异构的无线传感器网络。也就是说,构成无线传感器网络的节点中,有一小部分异构节点,与其它大部分廉价的节点相比,在电源、传输带宽、计算能力、存储空间等方面存在明显的优势。当然,这些异构节点的成本相对较高。理论分析和实验结果表明,无线传感器网络中,适量的异构节点,不仅能明显提高无线传感器网络的数据传输成功率,而且能有效地延长网络的寿命^[4,6]。

本文将异构的无线传感器网络为研究对象,讨论如何构建异构的无线传感器网络,提出部署异构节点的数量和位置。Mark Yarvis 研究并提出了网格状的异构无线传感器网络中异构节点数量和位置的推算方法^[8]。但他的解决方案对传感器网络的拓扑结构有很严格的要求,即要求所有的传感器节点呈规则的格子状分布。而在实际应用中很难找到这样的实例,所以他的解决方案实用价值较低。文献^[2,4,5,7]虽然对异构无线传感器网络的性能进行了一些理论分析和实验测试,但没有解决如何部署异构节点的问题。

本文提出的解决方案能够适用于任意拓扑结构的无线传感器网络,对传感器节点的分布没有特殊要求。

2 异构无线传感器网络

通常,异构无线传感器网络是指具有少量异构节点的无线传感器网络,与大部分普通传感器节点相比,异构节点在电源、传输带宽、计算能力和存储空间等资源方面具有较大的优势。下面将从异构无线传感器网络的应用实例出发,来探讨异构的类型、意义及部署问题。

2.1 应用实例

异构无线传感器网络的典型应用之一是各类室内监控传感器网络。例如在大型温室内,为了确保各种农作物的生长条件,可以在温室内外部署大量的传感器节点,实时采集温室内外温度、湿度、二氧化碳含量、氧气含量、光照强度等指标,并根据采集的数据对温室进行调控。通常,这些传感器节点都采用无线方式进行通信,并依靠电池进行供电,以解决电源线和网络线布线的困难和不便。为了提高网络的可靠性和使用寿命,可以在温室内再部署少量的异构节点,这些异构节点通常可以利用温室墙壁或柱子上的电源插座供电,也可以通过以太网或 802.11 无线局域网进行高速的数据传输。

2.2 异构的类型

根据异构节点所含优势资源的类型,可以将异构节点分为三种类型:链路异构(Link heterogeneity)、电源异构(Energy heterogeneity)和计算异构(Computational heterogeneity)^[8]。

所谓链路异构是指具有高速网络链路的节点,比如具有 802.3 以太网或 802.11 无线局域网等类型的网络接口。而电源异构是具备持续供电条件或带有发电设施(如太阳能发

俞黎阳 讲师,CCF 会员,主要研究方向为无线传感器网络;王 能 教授,博士生导师,主要研究方向为无线移动通信、协议一致性测试等;张 卫 教授,博士生导师,主要研究方向为无线传感器网络、组播技术等。

电装置)的节点,而不是通过电池供电。计算异构主要是指具有更快速的微控制器(MCU)和更多存储空间节点,具有快速运算处理能力,能够存储更多临时数据。在这三种类型的异构节点中,电源异构是最为基本和重要的,因为链路异构和计算异构意味着需要更多的电源,如果没有电源的支持,链路异构和计算异构反而会因过多消耗能量起反作用。

2.3 异构的意义及性能分析

在同构无线传感器网络中,传感器节点采集的数据将通过其它传感器节点以中继的方式发送给 Sink 节点。而在异构无线传感器网络中,部署少量异构节点使得网络中数据传输方式发生了重大改变。普通传感器节点只要设法将数据传输给离自己最近的异构节点,然后由异构节点将数据转发给 Sink 节点。

假设在同构无线传感器网络中,从数据源节点到 Sink 节点的平均数据转发次数为 F_{homo} ;又假设在同分布下的异构无线传感器网络中,从数据源节点到最近的异构节点的平均数据转发次数为 F_{hetero} 。随着网络的规模增长, F_{homo} 值将会变大。而在异构无线传感器网络中, F_{hetero} 值主要取决于异构节点的数量及分布, F_{hetero} 值将随着异构节点的增加而减少。通常情况下, $F_{hetero} < F_{homo}$ 。异构节点越多, F_{homo} 与 F_{hetero} 间的差值将越大。当异构节点分布最为合理的情况下,即所有普通传感器节点的无线覆盖范围内都至少有一个异构节点,此时 $F_{hetero} = 1$ 。

由于异构无线传感器网络中数据转发次数的明显减少,给异构无线传感器网络带来了以下三方面的优势:

(1) 数据传输的可靠性将显著提高

假设无线传感器网络中每次无线传输的可靠性为 P 。那么,同构情况下,数据传输的平均成功率为 $P^{F_{homo}}$;异构情况下,数据传输的平均成功率为 $P^{F_{hetero}}$,最佳情况下, $P^{F_{hetero}} = P$ 。

通常情况下,由于 $F_{hetero} < F_{homo}$,因此 $P^{F_{hetero}} \gg P^{F_{homo}}$ 。而且随着传感器网络规模的增长,两者间的差距将越大。

(2) 数据传输的能耗将大大降低,进而可以有效地延长网络寿命

假设无线传感器网络中每发送一个数据包的平均能耗为 E_t ,每接收一个数据包的平均能耗为 E_r 。同构情况下,若传感器节点总数为 n ,且有 m 个节点会直接发送数据给 Sink 节点或将其余节点的数据转发给 Sink 节点,那么所有 n 个节点都发送 1 个数据包时,这 m 个节点将平均耗能

$$E_{homo} = \frac{n}{m} E_t + \left(\frac{n}{m} - 1 \right) E_r \quad (1)$$

显而易见,这 m 个节点是所有节点中消耗能量最多的一部分节点,而且这 m 个节点的使用寿命将决定着整个传感器网络的寿命。

在异构无线传感器网络中,最为理想的情况下,每个普通传感器节点直接将数据发送给最近的异构节点。此时,所有 n 个节点都发送 1 个数据包时,每个传感器节点消耗的能量都是

$$E_{hetero} = E_t \quad (2)$$

比较公式(1)和(2),可知 $E_{hetero} \leq E_{homo}$ 。只有当 $n = m$ 时,也就是同构网络中所有传感器节点都可以直接与 Sink 节点进行通信时,该式才取等号。而随着网络规模的增大, $n \gg m$,因此将会出现 $E_{hetero} \ll E_{homo}$ 。

(3) 数据传输的延迟时间将明显减少

假设无线传感器网络中每次无线传输的延迟时间为 t_1 ,

中间节点转发延迟时间为 t_2 。那么,同构情况下,数据从源节点到 Sink 节点的平均延迟时间为

$$T_{homo} = (F_{homo} + 1)t_1 + F_{homo}t_2 \quad (3)$$

而异构情况下,数据从源节点到 Sink 节点的平均延迟时间为

$$T_{hetero} = (F_{hetero} + 1)t_1 + F_{hetero}t_2 \quad (4)$$

最佳情况下, $T_{hetero} = 2t_1 + t_2$ 。

通常情况下,由于 $F_{hetero} < F_{homo}$,所以 $T_{hetero} < T_{homo}$ 。而且随着传感器网络规模的增长,两者间的差距将越大。

通过以上对比分析可知,异构无线传感器网络与同构无线传感器网络相比,在数据传输的可靠性、能耗、延迟时间等方面具有明显的优势,而且网络规模越大,优势越为明显。

3 异构节点的部署问题

构建异构传感器网络的核心问题之一是确定异构节点的数量和位置,本节将主要讨论这一问题,并给出解决方案。

3.1 部署普通传感器节点

部署异构无线传感器网络首先是部署普通传感器节点。根据应用实际需求的不同,普通传感器节点的部分方法会有所不同。有的应用是通过随机撒播的方式部署,如森林火灾监测传感器网络;而有的应用则是靠手工的方式进行部署,如大楼结构监测系统。

部署好普通传感器节点后,汇聚节点将通过泛洪的方式发出一个查询请求,要求所有的传感器节点返回自己的地理位置信息。每个传感器节点接收到该查询请求后,将向自己的所有邻居节点转发,但只转发一次,随后接收到的查询请求报文都将被丢弃。同时,传感器节点将沿着接收查询请求报文相反的方向向汇聚节点发送应答报文。

通过这种简单的方式,汇聚节点可以收集到网络中所有普通传感器节点的地理位置信息。随后,汇聚节点或控制台节点可以利用这些信息按照下面的算法计算异构节点的位置和数量。

3.2 计算异构节点的位置

本文给出的异构节点位置的计算算法是基于选址理论^[9]的,它根据网络中所有普通传感器节点的地理位置来优化异构节点的位置和数量。

3.2.1 单个异构节点的位置

首先,讨论如何计算单个异构节点的位置。这是一种比较简单情况,整个网络中只有一个异构传感器节点。

假设无线传感器网络中有 n 个普通传感器节点,普通传感器节点的地理位置为 $L_i = (x_i, y_i)$,其中 $1 \leq i \leq n$ 。那么这个唯一的异构节点应该部署在 $P_H = (u, v)$,可以使所有普通节点到最近的异构节点的通信开销 $C(u, v)$ 最小。其中,

$$C(u, v) = \sum_{i=1}^n w_i [(u - x_i)^2 + (v - y_i)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

其中, w_i 表示节点 i 的通信量,通常情况下,可以认为所有普通传感器节点具有相同的通信量,即 $w_i = 1$ 。接下来,可以通过多次迭代的方法计算出变量 u 和 v 的值,使得 $C(u, v)$ 的值最小。

首先,定义异构节点的初始位置,即第 0 轮位置为 $P_0 = (u^0, v^0)$,其中,

$$u^0 = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad v^0 = \frac{\sum_{i=1}^n w_i y_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (6)$$

在已知异构节点第 k 轮位置 $P_k = (u^k, v^k)$ 的情况下,可以

通过下列公式计算出异构节点第 $k+1$ 轮位置 $P_{k+1}=(u^{k+1}, v^{k+1})$ 的值:

$$u^{k+1} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n d_i^k}, \quad v^{k+1} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i y_i}{\sum_{i=1}^n d_i^k} \quad (7)$$

其中, d_i^k 表示节点 i 到异构节点第 k 轮位置的距离, 即

$$d_i^k = [(u^k - x_i)^2 + (v^k - y_i)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

这样, 随着迭代过程的不断重复, 可以得到越来越小的 $C(u^k, v^k)$ 。当异构节点第 $k+1$ 轮位置与第 k 轮位置的距离值小于预定的精度 p 时, 即 $d(P_k, P_{k+1}) < p$, 迭代过程将结束。此时得到的 P_{k+1} 值就是异构节点的最终位置, 即 $P_H = P_{k+1}$ 。

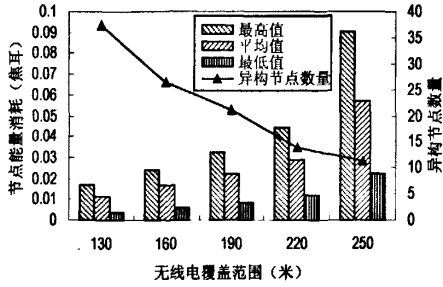


图1 不同无线覆盖范围下节点能量消耗情况和异构节点数量对比结果图

3.2.2 多异构节点的位置

在单个异构节点位置计算算法的基础上, 可以来计算多个异构节点的位置。假设由 n 个普通传感器节点构成的无线传感器网络中需要部署 m 个异构节点, 那么可以通过下列方法计算出该 m 个异构节点的位置:

- (1) 将 n 个普通传感器节点近似等分为 m 个组;
- (2) 按照单个异构节点位置计算算法, 为每个小组分别计算出一个异构节点的临时位置;
- (3) 根据 m 个异构节点的临时位置, 每个普通传感器节点找到一个离自己最近的一个异构节点, 并加入到该异构节点所在的组;
- (4) 检查新的分组, 如果某个分组有新加入的普通传感器节点, 则回到(1)进行下一轮计算, 否则计算过程中止, 得到 m 个异构节点的最终位置以及对应的组成员 (即普通传感器节点)。

3.3 异构节点的数量

部署异构无线传感器网络的另一个重要问题是计算异构节点的数量。决定和影响异构节点数量的因素主要有两个: 整个无线传感器网络的成本和无线覆盖范围。

通常, 异构节点因具有更多系统资源, 相对普通传感器节点成本要高出不少。部署越多异构节点就意味着整个无线传感器网络成本的提高。因此, 异构节点的数量会受到整个无线传感器网络成本的制约。但传感器网络成本问题超出了技术范畴, 本文不对其进行详细分析。

普通传感器节点的无线覆盖范围是本文研究的重点之一。从无线覆盖范围的角度来看, 异构节点的理想数量应该满足所有普通传感器节点的无线覆盖范围内都有且只有一个异构节点。但是, 由于普通传感器节点通常是随机部署的, 实际网络中, 很难达到这样的理想状况。

给定一个拥有 n 个普通传感器节点的无线传感器网络,

并假设所有传感器节点的无线电覆盖范围均为 R , 可以通过下列算法确定异构节点数量 m (m 的初始值设为 1):

- (1) 根据 3.2.2 节给出的算法, 计算出 m 个异构节点的位置, 令 $t=0$;
- (2) 计算每个普通传感器节点到其对应的异构节点的距离 L , 如果 L 大于 R , 那么令 $t=t+1$;
- (3) 如果 $t>0$, 那么令 $m=m+1$, 然后回到第(1)步, 否则计算结束。

通过上述方法, 可以满足每个普通传感器节点的无线覆盖范围内有至少有一个异构节点。

4 仿真评估

为了对本文提出的异构节点部署方案的性能进行评估, 本文采用了 ns-2.29^[1] 对其进行了仿真测试, 采用了 802.11 DCF 作为底层 MAC 协议。本节中首先介绍无线电覆盖距离对异构网络的性能影响, 然后介绍与 LEACH 协议的仿真对比。

所有仿真测试的运行时间均为 200 秒, 每项仿真测试均在三种不同的随机拓扑结构下各运行一次, 取平均值后得到相应的仿真结果。仿真测试过程中, 每 2 秒钟随机选取 20 个传感器节点向 Sink 节点发送长度为 64 字节的数据报文。另外, 计算异构节点位置时所用到的精度 p 取值为 0.01 米。

4.1 无线覆盖距离的影响

无线覆盖距离 R 是计算异构节点位置的重要参数, 为了评估其对异构网络性能的影响, 选取一个 $1200 \text{ m} \times 1000 \text{ m}$ 大小的网络, 该网络中包含了 300 个普通传感器节点和 1 个 Sink 节点。仿真测试中, R 分别取 70 米、100 米、130 米、160 米、190 米、220 米和 250 米。

图 1 显示了不同无线覆盖距离下节点能耗情况和异构节点的数量。其中柱形图分别表示普通传感器节点能耗的最大值、平均值和最小值, 而曲线表示异构节点的数量。仿真测试的结果表明无线覆盖距离越远, 普通传感器节点将消耗更多的能量, 而异构节点的数量则更少。

4.2 与 LEACH 协议的比较

本节通过与 LEACH 协议在传感器节点能耗与分组发送成功率等方面的比较对异构无线传感器网络的性能进行仿真测试。之所以选择 LEACH 协议是因为异构无线传感器网络与 LEACH 协议具有类似的层次结构。

本节的仿真测试选取了 6 种不同规模的网络场景: 75 个普通节点分布在 $600 \times 500 \text{ m}^2$ 的区域内, 108 个普通节点分别在 $720 \times 600 \text{ m}^2$ 的区域内, 147 个普通节点分别在 $840 \times 700 \text{ m}^2$ 的区域内, 192 个普通节点分别在 $960 \times 800 \text{ m}^2$ 的区域内, 243 个普通节点分别在 $1080 \times 900 \text{ m}^2$ 的区域内, 300 个普通节点分别在 $1200 \times 1000 \text{ m}^2$ 的区域内。所有网络场景中都只有一个汇聚节点, 位于网络的正中间。异构网络中无线覆盖距离 R 为 160 米。

首先, 对普通传感器节点的平均能耗情况进行了评估测试, 结果显示在图 2 中。从图中的曲线可知, 异构无线传感器网络中普通节点的平均能耗要明显低于 LEACH 协议中传感器节点的平均能耗。随着传感器网络规模的增加, LEACH 协议中传感器节点不得不采用长距离的无线通信, 节点能耗将显著增加。而在异构网络中, 普通节点的无线通信距离是固定的, 因此节点能耗不会受网络规模的影响。另外, 由于不同规模的网络中, 普通节点发送的报文总数是相同的 (均为

2000个),平均每个节点发送的报文数量会随网络规模的增大而减少,所以造成了网络规模越大节点能耗越低的现象。

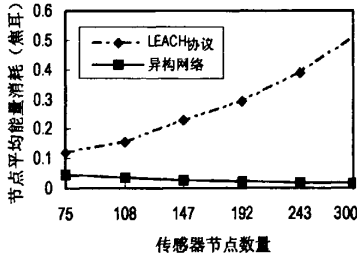


图2 不同网络规模下异构网络和 LEACH 协议节点平均能量消耗对比结果图

然后,针对分组发送成功率进行了仿真测试,结果如图3所示。从图中可以得出两点结论:(1)异构网络的分组发送成功率总是高于 LEACH 协议,尤其在大规模的网络场景中;(2)在各种异构网络场景中,分组发送成功率基本上保持在99%左右。

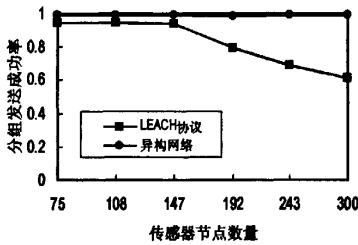


图3 不同网络规模下异构网络和 LEACH 协议分组发送成功率对比结果图

结束语 针对异构无线传感器网络中异构节点的部署问

题(包括异构节点的数量和位置),本文提出了一种基于选址问题理论的解决方法。理论分析和仿真测试的结果表明,该算法可以适用于随机部署的无线传感器网络,能够明显延长网络寿命、提高分组发送成功率。

参考文献

- [1] ns-2 Network Simulator. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [2] Cerpa A, Elson J, Estrin D, et al. Habitat monitoring: application driver for wireless communications technology // ACM SIGCOMM Workshop on Data Communications in Latin America and the Caribbean. Costa Rica, April 2001
- [3] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670
- [4] Kumar R, Tsiatsis V, Srivastava M B. Computation Hierarchy for In-Network Processing // The 2nd Intl. Workshop on Wireless Networks and Applications. San Diego, CA, Sept. 2003
- [5] Mainwaring A, Polastre J, Szewczyk R, et al. Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring // Intl. Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA '02). Atlanta, GA, Sept. 2002
- [6] Rhee S, Seetharam D, Liu S. Techniques for Minimizing Power Consumption in Low Data-Rate Wireless Sensor Networks // IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Atlanta, GA, March 2004
- [7] Wang H, Estrin D, Girod L. Preprocessing in a Tiered Sensor network for Habitat Monitoring // IEEE Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Hong Kong, China, April 2003
- [8] Yarvis M, Kushalnagar N, Singh H, et al. Exploiting Heterogeneity in Sensor Networks. IEEE InfoCom, Miami, FL, 2005
- [9] 束金龙, 闻人凯. 线性规划理论与模型应用. 北京: 科学出版社, 2005

(上接第33页)

结束语 本文研究了如何在开放的、可扩展的网络应用环境下建立按需动态配置的存储服务管理。基于存储虚拟化技术,将文献[16]的资源服务模型引入到了存储领域,提出了VS³模型,设计了VS³模型中的服务发现机制、数据传输机制。同时在减少原有设备成本的前提下,设计了计算和存储资源相分离的策略,从而为合成新应用服务提供了必要的资源准备。

下一步研究将以此模型为原型构建面向GIS(Geographic Information System, 地理信息系统)领域的应用,从现实应用的角度实现VS³思想,同时进一步为面向存储服务、按需服务提供更为切实的尝试。

参考文献

- [1] Golding R, et al. Storage Resource Management for the Enterprise Server. BMC Software, Inc. 2001
- [2] 俞建新, 等. 网络存储新技术评析. 计算机工程, 2006(10)
- [3] 李志刚, 舒继武, 等. 一种基于集群环境的虚拟存储系统研究与实现. 小型微型计算机系统, 2006(6)
- [4] 张成峰, 等. 网络存储的统一与虚拟化. 计算机科学, 2006(6)
- [5] 王迪, 舒继武, 等. 块级别的海量存储虚拟化系统. 清华大学学报(自然科学版), 2007(1)
- [6] 黄华, 许鲁, 等. 蓝鲸分布式文件系统的分布式分层资源管理模型. 计算机研究与发展, 2005(6)
- [7] Pazel D P, Eilam T, Fong L L, et al. A Dynamic Resource Allocation and Planning System for a Cluster Computing Utility // Cluster Computing and the Grid, 2002 2nd IEEE/ACM Interna-

- tional Symposium, May 2002; 57-57
- [8] Shen K, Yang T, Chu L. Clustering support and replication management for scalable network services. Parallel and Distributed Systems. IEEE Transactions, 2003, 14(11): 1168 - 1179
- [9] Fong L L, Kalantar M, Pazel D P, et al. Dynamic resource management in an eUtility // Network Operations and Management Symposium 2002, NOMS 2002, 2002 IEEE/IFIP. April 2002; 727-740
- [10] Appleby K. Oceano-SLA based management of a computing utility // Integrated Network Management Proceedings, 2001 IEEE/IFIP International Symposium, May 2001; 855-868
- [11] Kim H L, Jeong C S. Distributed Object-Oriented Virtual Environment using Web Services on Grid // Computer and Information Technology, 2006. CIT '06. The Sixth IEEE International Conference. Sept. 2006; 66
- [12] Zhu Zhenmin, Su Xiaoli, Li Jintao, et al. A User-centric Service Framework for Pervasive Computing // Pervasive Computing and Applications, 2006 1st International Symposium. Aug. 2006; 1-4
- [13] Rousselle P, Tynmann P, Hariri S, et al. The virtual computing environment // High Performance Distributed Computing, 1994 Proceedings of the Third IEEE International Symposium. Aug. 1994; 7-14
- [14] Casselman S. Virtual computing and the Virtual Computer // FPGAs for Custom Computing Machines, 1993 Proceedings. IEEE Workshop. April 1993; 43 - 48
- [15] Xu Huiying, Zhao Jianmin, Zhu Xinzong, et al. Web Services Based On Grid Technology // Computer Supported Cooperative Work in Design, 10th International Conference. May 2006; 1-4
- [16] 王敏, 等. 一种虚拟化资源管理服务模型及其实现. 计算机学报, 2005(5)
- [17] 吴松, 金海. 存储虚拟化研究. 小型微型计算机系统, 2003(4)
- [18] 马一力, 等. 存储与计算的分离. 计算机研究与发展, 2005(3)