小 型 微 型 计 算 机 系 统
Journal of Chinese Computer Systems

2009 年 9 月 第 9 期
Vol. 30 No. 9 2009

系统多维可扩展理论的研究

曹 锐,吴建平,徐明伟

(清华大学 计算机科学与技术系,北京 100084)
E-mail:mirake@ csnet1. cs. tsinghua. edu. cn

摘 要: 为了研究互联网系统的评价指标随系统参数变化而改变的特性,本文分析系统多维可扩展性的 4 个基本要素,提出一种评价数学模型. 该模型给出了可扩展性的数学定义、几何意义及计算方法. 本文还利用该模型比较了两种域名解析系统规模可扩展性好坏并由此得出了系统部署的指导原则,实验模拟结果与理论计算结果一致. 实验说明本文提出的理论模型能够分析互联网系统可扩展性的客观规律,对于系统选择和部署有现实的指导意义.

关 键 词: 可扩展性;多维可扩展;数学模型

中图分类号: TP301 文献标识码:A 文 章 编 号:1000-1220(2009)09-1697-05

Research on Multidimensional Scalability of System

CAO Rui, WU Jian-ping, XU Ming-wei

(*Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing* 100084, *China*)

Abstract: In order to study the characteristic of variation for a system's evaluation metrics as the system parameters change, this paper analyzes the four basic elements of multi-dimensional scalability of a system and proposes a mathematical model. This model gives the definition, the geometrical meaning and calculation method. The paper also compares two kinds of domain name systems, using this mathematical model and gives a guid rule for deploying them. The simulation result is also given and it is consistent with the theoretical result. The experiment shows the proposed theoretical model can help to analyze the rule of multi-dimensional sacalability and has good sense in choice and deployment of a network system.

Key words: scalability; multidimensional scalability; mathematical model

1 引 言

随着互联网的发展,网络的规模和复杂性、应用的多样性在大幅的增加,用户的行为特征也变得越来越复杂,不同的新技术对于互联网也有着各自不同的需求. 一个网络体系结构是否能够很好的适应未来互联网的发展需求,它的功能、性能、成本等各方面的指标是否能够对这些变化的因素具有很好的可扩展性? 这一问题越来越受到人们的重视. 互联网体系结构的多维可扩展性问题已经成为了新一代网络体系结构研究中的重要课题,当前的研究主要集中在如何提高特定场景下某个特定指标的可扩展性,但是缺乏一个广泛有效的普适的理论和评价分析方法.

对了对互联网体系结构进行可扩展性的分析,首先需要理解可扩展性的概念. B. Clifford Neuman 在[1]中对系统可扩展性给出了如下的定义:用户和系统资源的增加不会导致系统性能的明显下降以及增加管理的复杂性. 当此系统专指网络时,某网络具有良好的"可扩展性"是指:网络规模扩大后(主要是节点和链路数量的增加),不会使在此网络上测量获得的各项指标参数发生明显的下降.

研究可扩展性的分析和评价方法主要有两种,一种是进行理论分析,另外一种是实验模拟. 其中模拟的方法较简单,容易获得比较结果,但是很难根据结果对体系结构进行改进,也很难发现系统的本质问题. 而理论分析恰好相反,我们可以根据理论分析的结果发现系统的本质特征,从而改进优化体系结构. 但是由于网络的多样性、复杂性、稳定性等特点,数学理论分析是一件比较困难的事情,而且不同的系统目前有着不同的分析方法,而没有一种可以广泛适合于所有体系结构的理论模型和分析方法.

本文对任意一个互联网系统的可扩展性问题进行了研究与分析,给出了一个普适的可扩展性理论以及数学模型和分析方法. 并从理论上给出了一维可扩展和多维可扩展的定义、数学分析和计算方法. 并通过分析两个具体的系统来比较它们的多维可扩展性的好坏.

本文的组织如下. 第二章介绍可扩展性的相关研究,第三章给出了与多维可扩展性相关的一些基本概念,而多维可扩展性数学模型以及理论计算方法在第四章给出. 第五章通过一个具体的问题介绍该数学模型的使用方法. 最后是本文的结论.

收稿日期:2008-04-14 收修改稿日期:2008-05-20 基金项目:国家"九七三"重点基础研究发展计划项目(2003CB314801)资助;国家自然科学基金项目(90604024)资助;国家"八六三"高技术研究发展计划项目(2007AA01Z2A2)资助;华为基金项目资助. 作者简介:曹 锐,男,1978 年生,博士研究生,主要研究方向为计算机网络体系结构;吴建平,男,1953 年生,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究方向为计算机网络体系结构,计算机网络协议测试,形式化技术;徐明伟,男,1971 年生,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究方向为计算机网络体系结构,形式化方法,协议一致性测试.

2 相关研究

当前,对网络可扩展性的模拟分析和理论研究主要集中在 ad hoc 网络,而且针对比较具体的指标或者约束条件.

[2-4]通过模拟对 ad hoc 网络的路由协议的可扩展性和其它性能进行了分析,模拟结果尽管也能够说明一些问题,但是模拟的过程和结果往往限制在特定的场景中,并且无法使研究人员深入理解协议的限制以及相关的系统参数和环境特征.我们很难从中获得改进协议设计的新思路.

Santivanez, McDonald, Stavrakakis, and Ramanathan 在[5]中定义了网络可扩展性,它使用 $Tr(\lambda_1,\lambda_2,\cdots)$ 来表示在条件 $\lambda_1, \lambda_2,\cdots$ 下网络中的最小流量负载,并用 $\psi_{\lambda_i}=\lim\limits_{\lambda_i\to\infty}\frac{\log Tr(\lambda_1,\lambda_2,\cdots)}{\log\lambda_i}$ 来定义网络可扩展性.该定义将可扩展性数量化,同时在不同的参数下具有随着网络负载的增加而增大的特点,符合真实网络的特点.用此方法可以在不同的网络(有线,移动,ad hoc 等)之间比较网络可扩展性,并使用量化后数值来说明一种网络的可扩展性优于其它网络.[5]中说明一个网络在参数 λ_i 时被称为可扩展的,只有当参数 λ_i 增加时,网络的最小流量负载的增长速度不超过网络速率 R^{net} 能够支持的能力.如下:

$$\psi_{\lambda_i}=\lim_{\lambda_i\to\infty}\frac{\log R^{net}(\lambda_1,\lambda_2,\cdots)}{\log\lambda_i}$$

依据这种分析,只要 $\Psi N<=1$ 就可以认为网络具有可扩展性.所以在有线网络中全连接的拓扑 $\Psi N=1$,这表示网络具有理论上的可扩展性.在具体实现时,全连接拓扑随着网络规模的增大,每个节点的度将无限增加,这将导致拓扑维护的花费过大,使得系统的可扩展性比较差.

网络完全可扩展(absolute scalability)、优化的可扩展(optimal scalability)和弱可扩展(weak scalability)在[6]中被定义,并进行了比较.尽管它是定义在 ad hoc 网络中的,但基本思想依然可以运用到所有类型的网络中.[6]将可扩展性的模型定义为三元组(environment, parameter, metric),如(only single-hop communications, number of nodes, required storage at each node).其中"完全可扩展"不依赖参数变化,持续保持可扩展性;而"优化可扩展性"定义了在给定条件下获得的最好的可扩展性;"弱可扩展"仅在有限条件下具有可扩展性.我们更感兴趣的是"弱可扩展",我们可以知道当参数超过某个值后,可扩展性将不存在.网络类型选择应更注重于应用需求而不是可扩展性.各种应用需求在[7]中得到归纳.这里仅定义了某个场景下可扩展性的概念,没有考虑到网络拓扑结构本身对可扩展性的限制.

在 overlay 网络的可扩展性研究[8-12]中,通过对 overlay 网络体系结构的研究,认为通过改进网络拓扑的组织方式,可以增强网络的可扩展性.这说明网络拓扑结构也是影响可扩展性的重要因素,但是没有进行定量分析,缺乏可比较性.

[13]中研究了网络移动能力对可扩展性的影响,但是没有考虑存储器容量以及链路延迟等方面的因素.但是,对于实际的网络来说,存储器容量不可能无限扩大,也不能容忍无限增长的延迟.

3 可扩展性理论概述

本章将提出系统可扩展性的数学模型,该模型不依赖于任何具体的系统类型或网络类型,也不依赖于具体的评价指标或约束条件,而是一个更加抽象的数学定义.

3.1 系统可扩展性的四要素

系统可扩展性指对于一个系统的评价指标随若干约束条件在一定范围内变化而变化的特性.它包括了四个要素.

3.1.1 约束条件

它是系统中那些本身可以客观改变的因素.例如端系统的报文发送速率,链路带宽,互联网规模、拓扑等.约束条件根据其数值是否连续可以分为连续约束条件和离散约束条件.如报文发送速率、链路带宽是连续约束条件,而互联网规模、拓扑则为离散约束条件.这是系统可扩展性的变化因素,它决定了可扩展性是否全面的考虑进了所有的因素,是适用范围的体现.

3.1.2 约束区间

它是指约束条件变化的范围.约束区间对于可扩展性的好坏有着直接的影响,不同的约束区间可能会得到完全不同的结论.它决定了可扩展性评价结论成立的有效范围区间,超出这个区间则是无意义的.如果两个互联网体系结构五年之内系统性能可扩展性 A 好 B 差,那么十年之内孰好孰坏,我们是无法知道的.

3.1.3 评价指标

是指我们所考查的系统具有的某个具有优劣意义的特性,例如吞吐量、稳定性、网络成本等.系统的评价指标会随着约束条件的变化而发生变化,例如吞吐量可能随着端用户报文发送速率的改变而增大、减小或者保持不变.在一定范围内(约束区间的范围)两个系统的吞吐量具有不同的综合优劣特性,即使可能一段范围内 A 好,另一段范围内 B 好.它是我们考查互联网体系结构的目标,也是反应了可扩展性是否全面的因素之一.评价指标越少系统可扩展性越不全面,反之则越全面,越能反应系统的整体可扩展特性.

3.1.4 变化规律

即评价指标随约束条件变化的规律.它是可扩展性的一个直接体现.例如性能随指数增长的系统肯定比线性增长的体系的可扩展性要好.系统利用率始终保持 100% 常数的系统肯定比始终达不到 100% 的系统要好.

3.2 可扩展性的分类

按照我们考查的目的不同,多维扩展性可以分为动态可扩展性和综合可扩展性.

动态可扩展.当我们研究评价指标在约束条件取某一值的时刻随约束条件变化而变化的快慢.例如 3 个网络系统,他们的系统总吞吐量,一个随着端用户速率成线性增长,一个保持不变,一个成倒数下降.那么它们 3 个在吞吐量这一评价指标上动态可扩展性是依次下降的.

综合可扩展.是系统在约束条件的变化范围内的综合特

性,与某约束条件取什么值无关.

按照约束条件的数量不同可以分为一维可扩展性和多维可扩展性.

(1) 一维可扩展性是指评价指标随着某一个约束条件变化而具有的可扩展性.

(2) 多维可扩展性是指评价指标在多个维度上随着不同约束条件变化而具有的可扩展性.

4 数学模型

4.1 基本概念

任意一个系统,定义 $X=\{x_1,x_2,\cdots,x_n\}$ 为可量化的约束条件集合,变化范围为 $X\in\Phi=\{x'_i\leqslant x_i\leqslant x''_i\}$,定义被量化后的评价指标 y,则 y 一定是 X 的函数(评价函数),即有:

$$y=f(X)=f(x_1,x_2,\cdots,x_n),X\in\Phi$$

需要说明的是,x_i 可以是连续变量也可以是离散变量,我们在数学定义上不加以区分. 当 x_i 连续时,我们假设 f_i 是一个连续平滑的函数,即处处可导.

当 $n=1$ 时,$X=x_1=x$,多约束的可扩展性退化为单一约束的可扩展性,因此一维可扩展是多维可扩展的一种特殊情况,所以本文接下来只讨论多维可扩展性的各个定义和计算方法.

4.2 多维可扩展性的定义

4.2.1 动态可扩展性

我们首先考虑约束条件全部为连续约束的情况. 多约束的动态可扩展性定义比单约束的可扩展性定义要复杂一些,我们需要考虑各个约束条件的相关性.

首先我们假设任意两个约束条件不具有相关性,即任一个 x_i 的取值都与 x_j 无关. 则它的动态可扩展性定义为

$$D(X_0)=\left.\frac{\partial^n f(x)}{\partial x_1\partial x_2\cdots\partial x_n}\right|_{X=X_0} \tag{1}$$

我们再假设所有的 x_i 都是相关的,它们都是另外一个变量 t 的函数,即有:

$x_i=z_i(t)$

$y=f(X)=f(z_1(t),\ z_2(t),\cdots,\ z_n(t))\ =\ g(t)$

则,这时动态可扩展性则简化为一维动态可扩展性,即

$$D(X_0)=\left.\frac{dg(t)}{dt}\right|_{t=t_0}=g'(t_0),\text{其中} \tag{2}$$

$X_0=(x_{10},x_{20},\cdots,x_{n0})=(z_1(t_0),z_2(t_0),\cdots,z_n(t_0))$

考虑一般性,如果多个约束条件当中前 $t(1)$ 个与 t_1 相关,接下来的 $t(2)$ 个与 t_2 相关……$t(l)$ 个与 t_l 相关,最后 r-$q+1$ 个不相关,即 $(x_{i,1},\ x_{i,2},\cdots,\ x_{i,t(i)})$ 与 t_i 相关,$x_{i,j}=z_{ij}(t_i)$,$x_q,\ x_{q+1},\cdots,x_r$ 不与任何 x 相关,其中 $i=1,2,\cdots,l,j=1,2,\cdots,t(i)$,则有:

$$\sum_{i=1}^{l}t(i)+(r-q+1)=n \tag{3}$$

于是 $f(X)$ 可以写成,

$$f(X)\ =\ g(t_1,\ t_2,\cdots,t_l,\ x_q,\ x_{q+1},\cdots,x_r) \tag{4}$$

则动态可扩展性的定义如下:

$$D(X_0)=\left.\frac{\partial^{l+r-q+1}g}{\partial t_1\partial t_2\cdots\partial t_l\cdot\partial x_q\cdots\partial x_r}\right|_{t_i=t_{i0},x_i=x_{i0}} \tag{5}$$

其中,当 $t_i=t_{i0}(i=1,2,\cdots,l)$ 且 $x_i=x_{i0}(i=q,q+1,\cdots,r)$ 时,$X=X_0$.

4.2.2 综合可扩展性

根据约束条件彼此的相关性不同,我们先假设所有的约束条件不相关,则综合可扩展性定义为:

$$C=\int_{X\in\Phi}f(X)dX=\int_{x_{11}}^{x_{12}}\int_{x_{21}}^{x_{22}}\cdots\int_{x_{n1}}^{x_{n2}}f(x_1,x_2,\cdots,x_n)dx_n\cdots dx_2dx_1 \tag{6}$$

由定义可以看出,它是函数 $f(X)$ 在 $x\in\Phi$ 内围成的 n 维曲面柱体的体积,X 的取值范围应当为一个 n 维立方体(图1左图为 $n=2$ 时的示例). 当所有的约束条件都与 t 相关时,我们定义它的综合可扩展性为:

$$C=\int_l f(X)ds$$

其中 l 是曲线 $x_i=z_i(t)$ 的方程式,ds 是曲线 l 上的微分元. C 的几何意义是 $f(X)$ 对该 n 维曲线(图1右图为 $n=2$ 时的示例)的第一类线积分. 因为 $ds=\sqrt{dx_1^2+dx_2^2+\cdots+dx_n^2}=\sqrt{\sum_{j=1}^{n}z_j'(t)^2}\,dt$,所以

$$C=\int_{t_1}^{t_2}f(X)\sqrt{\sum_{j=1}^{n}z'_j(t)^2}\,dt \tag{7}$$

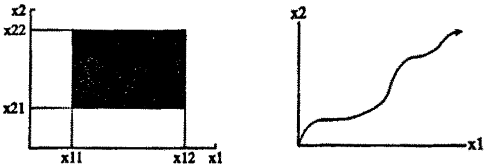

图1　完全不相关和全相关的约束条件取值范围几何含义

Fig. 1　Geometry figures of value range for fully-irrelevant and fully-relevant constrain condition

同理,当约束条件部分相关部分不相关时,它的综合可扩展性定义为:

$$C=\int_{t_{11}}^{t_{12}}\cdots\int_{t_{l1}}^{t_{l2}}\int_{x_{q1}}^{x_{q2}}\cdots\int_{x_{r1}}^{x_{r2}}g(t_1,\cdots,t_l,x_q,\cdots x_r)dx_r\cdots dx_qdt_l\cdots\cdots dt_1 \tag{8}$$

以上,我们只考虑了连续约束条件的情况,相类似的,当约束条件为离散条件时,动态可扩展性定义为

$$D_l(X_k)=\frac{g_{l,k+1}-g_{l,k}}{\Delta x_k} \tag{9}$$

其中 $g_{l,k}=g_l(t_{1,k},\cdots,t_{l,k},x_{q,k},\cdots,x_{r,k})$

表示当约束条件取第 k 个离散值时的评价函数值. t、l、q、r 和(3)的定义是一样的,评价函数可以写成(4)的形式.

$\Delta x_k=(t_{1,k+1}-t_{1,k})\cdots(t_{l,k+1}-t_{l,k})(x_{q,k+1}-x_{q,k})\cdots(x_{r,k+1}-x_{r,k})$

综合可扩展性可以定义为:

$$C=\sum_{t_1}\cdots\sum_{t_l}\sum_{x_q}\cdots\sum_{x_r}g_{l,k}\Delta x_r\cdots\Delta x_q\Delta t_l\cdots\Delta t_1 \tag{10}$$

4.3 多维可扩展性的运用

通过对一个系统的多维可扩展性的定义,我们可以了解一个系统随着约束条件的变化,其评价指标的变化情况. 但是它更重要的作用是比较两个系统的优劣.

若两个系统 S1 和 S2，假设它们的评价函数 $f_1(X)$ 和 $f_2(X)$ 都是非严格单调递增，且函数值越大标识评价指标越好，则

若 $\forall X$，都有 $f_1(X) > f_2(X)$，则 S1 的可扩展性好.

若 $f_1(X_0) > f_2(X_0)$，但 $f_1'(X) < f_2'(X)$，则 S2 的可扩展性好.

当 $f_1(X)$ 或 $f_2(X)$ 时而递增时而递减，则需要用综合可扩展性来进行判断. 若 $\int f_1(X)dX > \int f_2(X)dX$，则 S1 的可扩展性好，反之则 S2 的可扩展性好.

5 可扩展理论模型的运用

本节将运用前面定义的系统可扩展理论模型分析两种域名解析系统的性能多维可扩展性，比较它们的好坏.

DNS[14,15] 系统是一种树形结构的分布式系统，每一台域名服务器是树形结构中的一个节点. 当一台服务器收到对一个域名的解析请求时，如果本地没有储存这个域名的信息，则需要向父亲节点查询，如果父亲节点也没有这个信息，但它知道该域名能由那个子节点查询，则将请求转发给这个子节点，或者告诉查询节点这个子节点的地址. DNS 通过这种方式完成一个域名查询的过程.

CoDoNS[16] 是对 DNS 的改进. 它将全世界的 DNS 服务器构成一个 DHT 结构的 P2P 网络，解析的过程通过这个 DHT 完成. DHT 采用了 Beehive 结构，它在大负载的环境下可以采用跨层备份机制可以使得解析延迟固定为 O(1)，但代价是使得数据被大量的备份. 在一般情况下，不采用跨层备份机制的解析延迟复杂度是 O(logN).

接下来我们通过比较同等规模下 DNS 和 CoDoNS 在最坏情况下延迟的多维可扩展性，得出两个系统分别在何种情况下解析性能要优于对方.

由于 DNS 具有层次结构，而 CoDoNS 无结构，所以我们假设 DNS 拓扑结构有 L 层节点，每个节点有 k 个子节点. 一般情况下，$L \in [2,8]$，$k \geqslant 2$. 因此我们可以计算出，这个拓扑下，所有 DNS 服务器的数量为：

$$N = 1 + k + \cdots + k^{L-1} = \frac{k^L - 1}{k - 1}$$

因此相应规模下的 CoDoNS 的节点数量也应该为 N.

最坏情况下，DNS 的解析应该经过一次完整的从树的叶子节点到根节点再到叶子节点的过程，因此以延迟为评价目标的评价函数为：

$$D_1 = f_1(L,k) = 2(L\text{-}1)$$

而最坏情况下 CoDoNS 的解析需要查询 $\log N$ 次才能完成解析，因此以延迟为评价目标的评价函数为：

$$D_2 = f_2(L,k) = \log N = \log\frac{k^L - 1}{k - 1}$$

由于我们主要为了比较两个系统，因此这里不直接计算它们的导数，而是在 k 的维度上进行比较.

$$\frac{\partial D_2}{\partial k} > \frac{\partial D_1}{\partial k} = 0 \tag{11}$$

当 $k = L = 2$ 时，$f_1(L,k) > f_2(L,k)$，由(11)可以知道 D_1 和 D_2 的函数曲线必然相交，当 L 一定时，DNS 的延迟先大于后小于 CoDoNS. 我们现在求解这个交点的 k 的取值.

我们令 $D_1 = D_2$，解方程

$2(L-1) = \log\dfrac{k^L - 1}{k - 1}$，而这个方程等价于

$$f(L,k) = k^L - 1 - (k-1)2^{2(L-1)} = 0 \tag{12}$$

由于(12)不容易直接求代数解，因此我们通过计算机带入不同的 L 和 k，算出 $f(L,k)$ 的值. 图 2 是计算机计算结果的图像表示. 当柱状向上延伸时表示 $f(L,k)$ 大于 0，也就是 DNS 的延迟要小于 CoDoNS；当柱状向上延伸时表示 $f(L,k)$ 小于 0，即 CoDoNS 的延迟要小于 DNS 的延迟. 柱状高度增长的快慢体现了动态可扩展性的好坏.

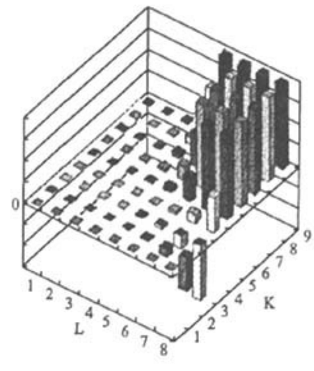

图 2 公式(12)中 $f(L,k)$ 值的图像表示

Fig. 2 Figure for values of $f(L,k)$ in formula (12)

由计算结果可以看出，当 L 或 k 非常小的时候，$f(L,k)$ 小于 0. CoDoNS 的延迟要小于 DNS，但是随着 k 的增大，其延迟会迅速大于 DNS. 同时我们还发现，当 $k \leqslant 4$ 时，L 越大，DNS 的延迟越大. 但是当 $k > 3$ 时，L 越大，CoDoNS 的延迟越大. 由此我们可以得出两个系统可扩展性方面的两个结论：

(1) 在节点数量同样的规模下，当 DNS 的节点度小于等于 3 时，CoDoNS 无论在 L 的维度上还是 k 的维度上，可扩展性都优于 DNS.

(2) 当 k 大于 3 时，DNS 无论在 L 的维度上还是 k 的维度上，可扩展性都优于 CoDoNS.

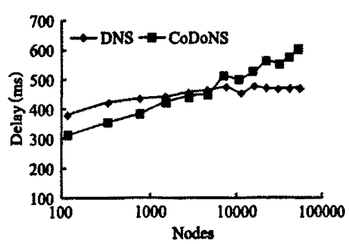

图 3 DNS 和 CoDoNS 的实际模拟延迟结果

Fig. 3 Delay simulation of DNS and CoDoNS

因此，我们通过分析和比较两个系统的动态可扩展性，可以得到一个在 DNS 和 CoDoNS 之间的选取原则：如果互联网

中域名树的层数较多,但每个域的子域数量小于等于3时,应当以DHT的结构部署解析服务器,即部署CoDoNS;反之,采用DNS的树型结构会具有更好的可扩展性.图3(见上页)是实际模拟的结果,其中$k=4$,从图上也能看出来,规模达到大约5000个节点时,CoDoNS的延迟超过了DNS,而低于这个规模时,DNS的延迟要大于CoDoNS.而理论计算的该规模值是5461,与实际实验基本相符.

6 总　结

本文提出了一种可以适用于分析任何系统多维可扩展性的数学理论.理论模型建立在四要素的基础上,根据评价函数的变化特征定义了动态可扩展性和综合可扩展性.同时针对约束条件的数量和彼此相关性的不同,给出了多维的动态和综合可扩展性的定义和计算方法.最后本文通过比较DNS和CoDoNS这两种解析系统的二维可扩展性,我们得出了有关部署两者系统的实际指导原则.而实验模拟的结果和理论计算结果基本吻合.

References:

[1] Clifford Neuman B. Scale in distributed systems. In Casavant T, Singhal M, editors, Readings in distributed computing system [M]. IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, CA, USA, 1994, 463-489.

[2] Broch J, Maltz D, Johnson D, et al. A performance comparison of multihop wireless ad hoc network routing protocols[C]. Proceedings of MOBICOM'98, Dallas, TX., October 1998,85-97.

[3] Park V D, Corson S. A performance comparison of the temporally-ordered routing algorithm and ideal link-state routing[C]. Proceedings of IEEE Symposium on Computers and Communications ISCC'98, Athens, Greece, June 1998,592.

[4] Perkins C E, Royer E M, Das S R, et al. Performance comparison of two on-demand routing protocols for ad hoc networks[J]. IEEE Personal Communications, Feb. 2001,8(1):16-28.

[5] Santivanez, McDonald, Stavrakakis, et al. On the scalability of ad hoc routing protocols[C]. IEEE INFOCOM02, New York, June 2002.

[6] Arpacioglu, Small, Haas. Notes on scalability of wireless ad hoc networks[Z]. Internet draft, Work in Progress, 2003.

[7] Yang, Conner, Guo, et al. Common wireless ad hoc network usage scenarios[S]. Internet draft, Work in Progress, 2003.

[8] Qin Lv, Sylvia Ratnasamy, Scott Shenker. Can heterogeneity make gnutella scalable? [C]. Lecture Notes in Computer Science, IPTPS 2002, 2429, 94-103.

[9] Ratnasamy S, Francis P, Hanley M, et al. A scalable content-addressable network[C]. In Proceedings of SIGCOMM 2001, Aug. 2001, 161-172.

[10] Rowstron A, Druschel P. Storage management and caching in PAST, a largescale, persistent peer-to-peer storage utility[C]. In Proceedings of the Eighteenth SOSP (2001), ACM, 2001,35 (5):188-201.

[11] Stoica I, Morris R, Karger D, et al. A scalable peer-to-peer lookup service for internet applications[C]. In Proceedings of SIGCOMM 2001 (Aug. 2001).

[12] Zhao B, Kubiatowicz J, Joseph A. Tapestry: an infrastructure for fault-tolerant wide-area location and routing[R]. UCB Technical Report, 2001.

[13] Grossglauser M, Tse D. Mobility increases the capacity of ad-hoc wireless networks[C]. In Proceedings of IEEE Infocom'2001, Anchorage, Alaska, April 2001.

[14] Mockapetris P. Domain names: concepts and facilities[S]. RFC 1034, Nov 1987.

[15] Mockapetris P. Domain names: implementation and specification [S]. RFC 1035, Nov 1987.

[16] Ramasubramanian V, Sirer E G. The design and implementation of a next generation name service for the internet[C]. SIGCOMM 2004, Aug 2004.