

# 基于秘密共享方案的可生存存储系统可用性评价<sup>\*</sup>)

王彦龙 李战怀 林伟 徐娟  
(西北工业大学计算机学院 西安 710072)

**摘要** 高可用性是可生存存储系统所追求的目标之一,而基于秘密共享方案的可生存存储系统可用性评价方法比较缺乏。本文提出了一种简单可用性评价方法和一种基于马尔可夫链模型的可用性评价方法,并给出了二者的描述模型与计算模型,然后分别利用两种评价方法对基于秘密共享方案的可生存存储系统进行了可用性评价,进而对结果进行了详细分析,并讨论了两种可用性评价方法的应用范围。两种可用性评价方法不仅可以实现对基于秘密共享方案的可生存存储系统可用性的科学评价,而且可以分析得出影响系统可用性的元素,为设计合理的高可用可生存存储系统提供了支持。

**关键词** 可用性,秘密共享,可生存存储,马尔可夫链

## An Evaluation Method for Availability of Survivable Storage System on Secret-Sharing Scheme

WANG Yan-Long LI Zhan-Huai LIN Wei XU Juan  
(School of Computer Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

**Abstract** High-Availability is one of the goals Survivable Storage System pursuing, and there are few evaluation methods for Availability of Survivable Storage System on Secret-Sharing Scheme. A Simple Evaluation Method for Availability(SEMA)and a Markov-chained Evaluation Method for Availability(MEMA)are both proposed, and their description and calculation model are also given. Availability of Survivable Storage System on Secret-Sharing Scheme is evaluated separately by the two evaluation methods, and the results are analyzed in details. In addition, the application scopes of the two evaluation methods are discussed. The two evaluation methods can evaluate Availability of Survivable Storage System on Secret-Sharing Scheme and find the factors affecting the Availability, which is helpful to design a High-Availability Survivable Storage System.

**Keywords** Availability, Secret-sharing, Survivable storage, Markov-chain

## 1 引言

可生存存储系统(Survivable Storage System, SSS)<sup>[1]</sup>的目标是基于分布式存储系统构建一个以数据永久可用和安全为目标的信息存储系统,可以确保用户能够安全地存储关键信息,保证信息的可用性(Availability)和机密性。代表性的研究项目包括CMU并行数据实验室(PDL)的PISIS项目、IBM Almaden研究中心的e-Vault项目,Microsoft研究院的Farsite文件系统项目,MIT的Free Haven项目,UC Berkeley的Oceanstore项目,AT&T实验室的Publius项目等,它们通过将分布式存储系统(含P2P存储系统)、数据分布技术以及动态自维护技术相结合,创建了具有强生存力的信息存储系统。所以,建立一个对可生存存储系统可用性的科学评价方法对于设计一个高可用的可生存存储系统具有重要意义。

目前,可生存存储系统主要采用完全复制(Full Replication)、纠删码(Erasure-Code)与秘密共享方案(Secret-Sharing Scheme)等数据分布方法来增强系统信息的可用性和机密性,提高系统的可生存能力,而且研究人员也已经建立起了对基于完全复制和纠删码的可生存存储系统可用性的简单评价方法<sup>[2,3]</sup>。其中,纠删码的原理是将原始数据对象(文件或对象)分成 $m$ 个大小相等的块, $m$ 个块进行纠删码编码后就成

为 $n$ 个块(大小与先前相等,且 $n>m$ )并被保存在 $n$ 个存储节点上,当用户需要访问该数据对象时,可以从 $n$ 个存储节点中任意选取 $m$ 个节点读出相应的 $m$ 个块恢复出原始数据对象,而基于纠删码的可生存存储系统可用性评价方法就是基于其工作原理进行构建,例如,文[2]在假定 $n$ 个存储节点中有 $l$ 个不可用的前提下,定义了一个数据对象的可用性为 $A = \frac{\sum_{i=0}^{n-m} C_l^i * C_{n-i}^{n-i}}{C_n^n}$ ,即等于将编码后的 $n$ 个块中的 $i$ 个( $0 \leq i \leq n-m$ )不可用的块放置在 $i$ 个不可用的存储节点上,而将其余可用块放置到其余存储节点上的概率;文[3]在假设各个存储节点可用性均为的 $\mu$ 基础上,定义了一个数据对象的可用性为 $A = \sum_{i=m}^n C_n^i \mu^i (1-\mu)^{n-i}$ ,即等于将编码后的 $n$ 个块中 $i$ 个( $m \leq i \leq n$ )选取出来用于恢复数据对象的可用性。文[2,3]的不足之处在于将系统可用性用数据对象的可用性来代替表示,并且将所有存储节点的可用性看成一个固定值,未能体现出影响各存储节点可用性的元素,缺乏对可用性更细致的评价。

由于完全复制具有空间效率低的缺点,而纠删码具有编码复杂度高的不足,所以秘密共享成为现有可生存存储系统最常用的数据分布方法之一,但是对基于秘密共享方案的可生存存储系统可用性评价方法比较缺乏。所以,在借鉴基于

<sup>\*</sup>)本文得到国家自然科学基金(No. 60573096)的资助。王彦龙 博士研究生,研究方向:数据库理论与技术、存储管理等;李战怀 教授,博士生导师,主要研究领域为数据库理论与技术、网络存储等;林伟、徐娟 博士研究生。

纠删码的可生存存储系统可用性评价方法的基础上,本文针对秘密共享方案的特点,首先提出了一种简单可用性评价方法(Simple Evaluation Method for Availability, SEMA),然后提出一种基于马尔可夫链的可用性评价方法(Markov-chained Evaluation Method for Availability, MEMA),实现对可生存存储系统可用性的科学评价。

## 2 可生存存储系统

基于秘密共享方案的可生存存储系统主要采用 Shamir 所提出的  $(k, n)$  秘密共享方案,该方案基于 Lagrange 插值公式将一个数据对象分成  $n$  个子份额,分别交给  $n$  个保管者进行保管,而当获得任意不少于  $k$  ( $1 \leq k \leq n$ ) 个子份额即可恢复原始数据对象,但根据任意少于  $k$  个子份额则无法恢复原始数据对象,所以  $(k, n)$  秘密共享方案可以提高信息的机密性和可用性<sup>[4]</sup>。

基于  $(k, n)$  秘密共享方案的可生存存储系统的工作原理如下:

(1)分发:规定数据对象  $s$ 、子份额  $s_i$ 、存储节点(保管者)  $p_i$  均在整群  $Z_p$  上,其中  $p$  是素数,并且  $p > n$ ,则  $s, s_i$  和  $p_i$  均转化为一个整数,  $p_i$  直接用  $i$  代替表示。如果选择一个常数项为  $s$ ,其他系数任意选取的  $k-1$  阶多项式  $a(x)$ ,其中  $a_1, a_2, \dots, a_{k-1}$  也在群  $Z_p$  上,则可以根据公式(1)对每个  $i \in P$  ( $P$  为存储节点集合)生成相应份额:

$$s_i = a(i) = s + a_1 i^1 + \dots + a_{k-1} i^{k-1} \quad (1)$$

(2)重建:规定  $Q$  为授权子集,即可以重建原始数据对象的存储节点子集,且  $|Q| = k$ 。根据所得用于数据对象重建的  $k$  对二元组  $(i, s_i)$ ,其中  $i \in A$ ,则可以利用公式(2)所示 Lagrange 插值公式,计算出原始数据对象  $s$ :

$$s = \sum_{i \in Q} b_i s_i, \text{ 其中 } b_i = \prod_{j \in Q(i) \setminus \{i\}} \frac{j}{j-i} \quad (2)$$

从上述工作原理可以看出,基于  $(k, n)$  秘密共享方案的可生存存储系统可用性体现在数据对象重建的过程中,即可以保证用户在访问相关文件或对象时能够及时重建,确保系统所存储信息对用户的永远可用。

## 3 简单的可用性评价方法

### 3.1 可用性标准

定义 1. 在允许的极限故障情况发生范围内,系统按规范成功运行的概率称为系统可用性。计算机系统的可用性是通过系统的可靠性(Reliability)和可维护性(Maintainability)来衡量<sup>[5]</sup>。

由于通常用平均无故障时间 MTBF(Mean Time Between Failure)来度量系统的可靠性,用平均维修时间 MTTR(Mean Time To Recover)来度量系统的可维护性,则系统可用性可定义为系统保持正常运行时间的百分比,具体表示为:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \times 100\% \quad (3)$$

假设基于  $(k, n)$  秘密共享方案的可生存存储系统的  $n$  个存储节点可用性相互独立,且每个节点正常工作时寿命分布函数为  $F_i(t) = 1 - e^{-\lambda t}$ ,失效时修复时间或者重新加入时间分布函数为  $G_i(t) = 1 - e^{-\mu t}$ ,  $\lambda$  为故障率 ( $0 \leq \lambda \leq 1$ ),  $\mu$  为修复率 ( $0 \leq \mu \leq 1$ ),则可以计算出:

$$MTBR = \int_0^{\infty} t F'_i(t) dt = \frac{1}{\lambda}, MTTR = \int_0^{\infty} t G'_i(t) dt = \frac{1}{\mu}$$

$$A_{Node} = \frac{1}{\frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\mu}} = \frac{\lambda \mu}{\lambda + \mu} \quad (4)$$

从公式(4)可以看出,  $A_{Node}$  随着  $\mu$  的增大而增大,随着  $\lambda$  的增大而减小。

### 3.2 SEMA

借鉴文[3]的可用度计算模型,即通过所访问数据对象的可用性来代替系统可用性,则引入公式(4),可以推导出基于秘密共享方案的可生存存储系统中数据对象的可用度为:

$$A_S = \sum_{i=k}^n C_n^i A_{Node}^i (1 - A_{Node})^{n-i} = \sum_{i=k}^n C_n^i \frac{\lambda^i * \mu^{n-i}}{(\lambda + \mu)^n} \quad (5)$$

以上式作为系统可用性的计算模型,此方法称为可用性简单评价方法(SEMA)。此评价方法完全借鉴了文[3]的可用度计算公式,当  $k=m$  时,即可用于对基于纠删码的可生存存储系统进行可用性评价。

## 4 基于马尔可夫链的可用性评价方法

### 4.1 马尔可夫链

定义 2 设随机过程  $X = \{X(t), t \in T\}$  的状态空间为  $I$ , 对任意  $n$  个时刻  $0 \leq t_1 < t_2 < \dots < t_n, t_k \in T, k = 1, 2, \dots, n$ , 在条件  $X(t_k) = x_k, x_k \in I, k = 1, 2, \dots, n-1$  下均有  $P\{X(t_n) = x_n | X(t_1) = x_1, \dots, X(t_{n-1}) = x_{n-1}\} = P\{X(t_n) = x_n | X(t_{n-1}) = x_{n-1}\}$ , 则称  $X = \{X(t), t \in T\}$  具有马尔可夫性,或称此过程为马尔可夫过程。时间和状态都是离散的马尔可夫过程称为马尔可夫链,简称马氏链<sup>[6]</sup>。

马氏链常用条件概率  $P_{ij}(m, m+n) = P\{X_{m+n} = a_j | X_m = a_i\}$  来表示其在时刻  $m$  处于状态  $a_i$  条件下,在时刻  $m+n$  转移到状态  $a_j$  的转移概率。由转移概率组成的矩阵  $P(m, m+n) = (P_{ij}(m, m+n))$  称为马氏链的转移概率矩阵。当转移概率只与  $i, j$  及时间间距  $n$  有关即  $P_{ij}(m, m+n) = P_{ij}(n)$  时,称转移概率具有平稳性,也称此链是齐次。在马氏链为齐次的情形下,由  $P_{ij}(m, m+n) = P\{X_{m+n} = a_j | X_m = a_i\}$  定义的转移概率  $P_{ij}(n) = P\{X_{m+n} = a_j | X_m = a_i\}$  称为马氏链的  $n$  步转移概率,而常用到的是一步转移概率  $p_{ij} = P_{ij}(1) = P\{X_{m+1} = a_j | X_m = a_i\}$ 。

### 4.2 描述模型

定义 3 基于  $(k, n)$  秘密共享方案的可生存存储系统的  $n$  个存储节点中,某个存储节点发生故障或者离开系统,称该节点处于失效状态,反之则称该节点处于工作状态。当系统中有  $i \in \{0, 1, 2, \dots, n-k\}$  个存储节点处于失效状态时,系统则处于正常工作状态(可用);当系统中有  $j \in \{n-k+1, n-k+2, \dots, n\}$  个存储节点处于失效状态时,系统则处于失效状态(不可用)。

因此,考虑采用失效节点数来描述系统状态:

(1)系统工作时状态为失效节点数  $i$ ;

(2)若出现  $n-k+1$  个失效节点时,系统会进入失效状态,而剩余  $k-1$  个正常节点会停止工作直到有故障的节点被修复或者有新的正常节点加入之后进入工作,系统重新恢复到工作状态,那么系统失效时状态为失效节点数  $n-k+1$ 。即

$$X(t) = \begin{cases} i & \text{系统工作}(i=0, 1, \dots, n-k) \\ n-k+1 & \text{系统失效} \end{cases} \quad (6)$$

根据定义 2 可知,在公式(6)中,  $X(t)$  为一个拥有  $n-k+2$  个不同状态的马尔可夫链。

### 4.3 MEMA

假设  $n$  个节点所处状态是相互独立的,可以同时两个或更多个节点失效的情况,但每次只允许一个故障节点得到修理或者重新加入,同时沿用 3.1 节的假设,即每个节点正常工作时寿命分布函数为  $F_i(t) = 1 - e^{-\lambda t}$ ,失效时修复时间或者重新加入时间分布函数为  $G_i(t) = 1 - e^{-\mu t}$ 。在公式(6)情况下,系统状态分布类似于一个拥有  $n-k+2$  个单元的并联可修复系统<sup>[7]</sup>。基于此状态分布来计算系统可用性的方法称为基于马尔可夫链的可用性评价方法(MEMA)。

$$\begin{pmatrix} P'_0(t) \\ P'_1(t) \\ P'_2(t) \\ \dots \\ P'_{n-k}(t) \\ P'_{n-k+1}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -n\lambda & \mu & 0 & \dots & 0 & 0 \\ n\lambda & -(n-1)\lambda - \mu & \mu & \dots & 0 & 0 \\ 0 & (n-1)\mu & -(n-2)\lambda - \mu & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -k\lambda - \mu & \mu \\ 0 & 0 & 0 & \dots & k\lambda & -\mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_0(t) \\ P_1(t) \\ P_2(t) \\ \dots \\ P_{n-k}(t) \\ P_{n-k+1}(t) \end{pmatrix}$$

考虑平稳状态下  $t \rightarrow \infty, P_i(t) \rightarrow p_i, P'_i(t) \rightarrow 0 (i=0, 1, \dots, n-k+1)$  时上述方程的解得

$$p_i = \frac{1}{\sum_{j=0}^{n-k+1} \frac{1}{(n-j)!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^j} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^i, i=0, 1, \dots, n-k+1$$

进而得到真正意义上的系统可用性:

$$A = \sum_{i=0}^{n-k} \frac{1}{(n-i)!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^i \quad (7)$$

## 5 评价与比较

### 5.1 可用性评价结果

根据公式(5)和(7)可以分别计算出系统的可用性,参见图 1 和图 2。

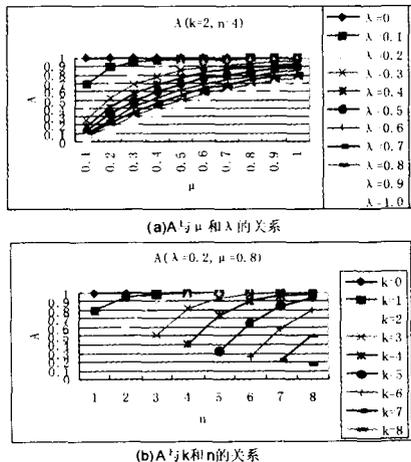


图 1 SEMA 评价结果图

从上图中所给出的系统可用性  $A$  随相关元素的变化情况可以看出:

(1)在秘密共享方案的  $k$  和  $n$  确定的情况下( $k=2, n=4$ ),可用性  $A$  决定于存储节点可用性  $A_{Node}$ ,即决定于  $\lambda$  和  $\mu$  的共同影响:当  $\lambda$  不变而  $\mu$  增大时,可用性增大;当  $\mu$  不变而  $\lambda$  增大时,可用性降低。

(2)在存储节点可用性  $A_{Node}$  确定的情况下( $\lambda=0.2, \mu=0.8$ ),可用性  $A$  决定于  $k$  和  $n$  的组合关系:当  $k$  不变而  $n$  增大

可以得到转移概率:

$$\begin{cases} P_{i(i-1)}(\Delta t) = (n-i)\lambda\Delta t + o(\Delta t) \\ P_{ii}(\Delta t) = 1 - [\mu + (n-i)\lambda]\Delta t + o(\Delta t), i=0, 1, \dots, n-k \\ P_{i(i-1)}(\Delta t) = \mu\Delta t + o(\Delta t), i=1, 2, \dots, n-k \\ P_{(n-m+1)(n-m+1)}(\Delta t) = 1 - \mu\Delta t + o(\Delta t) \\ P_k(\Delta t) = o(\Delta t), \text{其它} \end{cases}$$

利用全概率公式,并求  $\Delta t \rightarrow 0$  时的极限,可得微分方程组:

时,可用性增大(即  $k$  个秘密份额的选取更容易),但会导致机密性降低;当  $n$  不变而  $k$  增大时,可用性降低,而机密性相应增加。

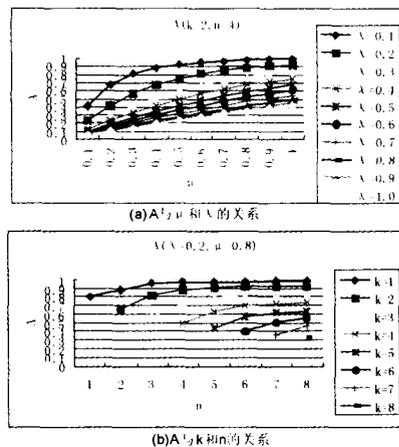


图 2 MEMA 评价结果图

因此,在理论上,设计基于秘密共享方案的可靠存储系统时,应尽量选取故障率低、修复率高的存储节点( $\lambda \ll \mu$ ),并保证存储节点尽可能多而门限要求尽可能低( $n \gg k$ ),从而获得较高的可用性。

但是,在实际应用中,为了在提高可用性的同时兼顾机密性,往往需要在  $n$  和  $k$  的取值上进行权衡,建议选取  $n$  略大于  $2 \times k$ 。

### 5.2 SEMA 与 MEMA 比较

(1)相同点:根据公式(5)和(7)可以看出,SEMA 方法和 MEMA 方法的计算模型均是  $\lambda, \mu, k$  和  $n$  四个元素的影响,且根据图 1 和图 2 可以看出,两种评价方法的计算结果保持相近分布规律,均可以反映系统的可用性。

(2)不同点:根据公式(5)和(7)可以看出,SEMA 方法计算模型的核心是组合运算,而 MEMA 方法计算模型的核心是排列运算,所以前者的计算复杂度要低于后者;从各自工作原理及图 1 和图 2 可以看出,SEMA 方法是通过求解数据对象的可用性来表示系统的可用性,而 MEMA 方法所求则是真正意义上的系统可用性,且计算结果更符合实际情况。

因此,SEMA 方法可以用于对基于秘密共享方案的可靠存储系统可用性的简单、粗略评价,而 MEMA 方法则可用于对

基于秘密共享方案的可生存存储系统可用性的详细评价。

**结论** 本文在借鉴基于纠删码的可生存存储系统可用性评价方法的基础上,面向基于秘密共享的可生存存储系统的设计需求,提出了一种简单可用性评价方法(SEMA),并基于马尔可夫链模型提出了一种新型的可用性评价方法(MEMA),建立起了基于秘密共享方案的可生存存储系统可用性的科学评价标准,最后给出了基于两种评价方法的评价结果,并进行了科学分析。

本文所提出的两种评价方法为基于秘密共享可生存存储系统可用性的评价提供了一种解决方案,具有较好的实用性。

## 参考文献

1 Wylie J J, Bigrigg M W, Strunk J D, et al. Survivable Informa-

(上接第 63 页)

环境有很多限制,例如:要求主题相对稳定,有一部分静态节点(节点 ID 不变,拥有的主题不变)。

遍历主题子网有“深度优先(Depth-First)”和“广度优先(Breadth-First)”两种方法。在实际应用环境中,常常不需要遍历整个子网,只要满足一定的条件就可以结束,例如:发现第一个目标资源结束,遍历到一定深度结束,发现一定数量的目标资源结束。需要指出,在实际应用中,通常从主题子网中的几个不同的节点开始遍历,因此遍历算法需要保证不会出现重复遍历。

在一些应用环境(例如:P2P Web 内容搜索)中,可能出现跨子网遍历的情况,即在遍历资源的过程中,根据一定的条件进入另一个主题网络。

## 5 应用示例

基于主题相关的 P2P 网络可以应用于各种 P2P 资源共享系统,例如:Web 缓存共享<sup>[10]</sup>、Web Service 发现<sup>[11]</sup>,基于 P2P 的商品网络、文件共享、Web 内容搜索等。在这些应用中,都可以建立相关的主题,把拥有相同主题的资源节点互联起来,形成动态的、松散的主题子网。如果把这些应用建立在基于主题相关的 P2P 网络上,可以大大的改善系统的质量。

下面以 Web Service 发现为例,说明基于主题相关的 P2P 网络的应用。Web 服务技术的兴起为 Web 的使用提出了新的计模型,构造基于面向服务的构架(SOA)的应用是未来分布式计算的发展方向。在 SOA 所要解决的技术问题中,服务的自动发现是难点和关键。文<sup>[11]</sup>提供的解决方案是把具有语义相关度的节点组成组(Group),由组服务器维护各节点的目录,负责组间路由,这是一种半结构化的 P2P 网络。这种解方案存在如下问题:(1)存在单结点失败问题,组服务器是一个分散的中间服务器,组服务器的异常将给网络造成较大影响;(2)一个节点常常提供多类 Web 服务,有多种相关性较小的语义,把这些拥有不同语义的 Web 服务的节点强制归入一个组是不合理的,不利于服务的发现,例如一个软件企业的 Web 服务可能提供产品询价服务,产品自动升级服务,Bug 报告服务,要把这些语义相关不大的服务归入一个组是比较困难的,即使勉强归入一个组,对服务发现也是极为不利的。

基于主题相关的 P2P 网络的解决方案是:把各节点的 Web 服务根据语义分析,把语义相关较紧密的 Web 服务归入一个主题。一个节点可以拥有多个主题,一个 Web 服务也可

tion Storage Systems[J]. Computer, 2000,33(8):60~68

- 2 Weatherspoon H, Kubiatowicz J. Erasure coding vs. replication: A quantitative comparison. In: Proceedings of the First international Workshop on Peer-to-Peer Systems (IPTPS 2002)
- 3 Lin W K, Chiu D M, Lee Y B. Erasure Code Replication Revisited. In: Fourth International Conference on Peer-to-Peer Computing (P2P'04), (Zurich, Switzerland), August 2004. 90~97
- 4 Shamir A. How to Share a Secret[J]. Communication of the ACM, 1979, 22(11):612~613
- 5 林晓东,刘心松. 高可用性系统结构的研究[J]. 计算机应用, 1997, 17(4):15~18
- 6 毛用才,胡奇英编著. 随机过程. 西安电子科技大学出版社, 1998
- 7 茆诗松,王玲玲编著. 可靠性统计. 华东师范大学出版社, 1984

以属于多个主题,这样基于主题的归类更合乎实际,也更有助于提高 Web 服务发现的查准率。拥有相同主题的节点组成主题子网,服务发现时只需要遍历整个主题子网就能发现所有 Web 服务,这样能大大提高查全率,提高网络的利用率,缩短发现时延(latency)。这种解决方案也能消除单点失败的缺点,提高系统的容错性,即使网络中多个节点异常,剩下的节点也能正常提供服务。

**结束语与展望** 上述在分析现有 P2P 网络优缺点的基础上提出了基于主题相关的 P2P 网络,讨论了相关概念及网络建立算法,并用示例说明了可能的应用。后续研究工作主要集中在两个方面:一是建立最优性能主题网络的数学模型,为实际应用提供理论指导,二是将主题应用于内容搜索,建立应用案例。

## 参考文献

- 1 Lu Qin, Cao Pei, Cohen Edith, Li Kai, Scott Shenker Search and Replication in Unstructured Peer-to-Peer Networks. ACM, 2002, 84~95
- 2 Napster Home Page. <http://www.napster.com/>
- 3 Freenet website <http://freenet.sourceforge.net>.
- 4 Druschel P, Rowstron A. PAST: A large-scale persistent peer-to-peer storage utility. In: Elphinstone K, ed. Proc. of the HotOS VIII. Schloss Elmau: IEEE Press, 2001. 65~70
- 5 Ratnasamy S, Francis P, Handley M, et al. A scalable content-addressable network. In: Proc. ACM SIGCOMM, San Diego, CA, August 2001. 161~172
- 6 Stoica I, Morris R, Karger D, et al. Chord: A scalable peer-to-peer lookup service for internet applications. In: Proceedings of SIGCOMM, Aug. 2001
- 7 Rowstron A, Druschel P. Pastry: Scalable, distributed object location and routing for large-scale peer-to-peer systems. In: Proceedings of the 18th IFIP/ACM International Conference on Distributed Systems Platforms (Middleware 2001), Nov. 2001
- 8 Hildrum K, Kubatowicz J D, et al. Distributed Object Location in a Dynamic Network. In: Proc. 14th ACM Symp. on Parallel Algorithms and Architectures (Aug. 2002)
- 9 Balakrishnan H, Kaashoek M F, Karger D, Morris R. LOOKING UP DATA IN P2P SYSTEMS
- 10 凌波,陆志国,黄维雄,钱卫宁,周傲英. PeerIS: 基于 Peer-to-Peer 的信息检索系统. 软件学报, 15(9):1375~1384
- 11 LING Bo, WANG Xiao-Yu, ZHOU Ao-Ying, Ng Wee-Siong. A Collaborative Web Caching System Based on Peer-to-Peer Architecture. Chinese Journal of Computers, 2005, 28(2):170~178
- 12 Cheng De-Wei, Xu Bin, Cai Yue-Ru, et al. A P2P Based Web Service Discovery Mechanism with Bounding Deployment and Publication. Chinese Journal of Computers, 2005, 28(4):615~626