

基于 P2P 的数字图书馆信息检索模型 研究与设计^①

Design of Digital Library Based on P2P Information Retrieval Model

张 贤 周 娅 (桂林电子科技大学 计算机与控制学院 广西 桂林 541004)

摘 要: 在分析了现有数字图书馆现状和对等网(P2P)拓扑结构的特点上,将动态的、易维护的、可扩展的、鲁棒性强的 P2P 网络运用到数字图书馆中,设计了一个基于 P2P 的数字图书馆信息检索模型,简要介绍了模型系统的功能,并针对构建过程中存在的问题引入均衡负载,自我调节和心跳策略来解决。最后,用模拟实验验证了其有效性和可用性。

关键词: 数字图书馆 P2P 信息检索 均衡负载 自我调节 心跳策略

对等网(Peer to Peer, P2P)技术是目前国际计算机网络技术领域研究的一个热点,被《财富》誉为将改变 Internet 未来的四大新技术之一,包括微软、Sun、IBM 等很多著名的企业和公司都投入到对其技术的研究之中。对等网 P2P 指的是网络中没有专用的服务器,每一台计算机的地位都是平等的网络^[1]。数字图书馆(Digital Library, DL)是指基于分布式存储的一种数字信息的获取系统,可获取的信息包括文本、数据、音频、视频等^[2]。目前 Internet 上有许多具体数字图书馆的应用实例,尽管它们的数字化资源可以是分布式存放的,但仍需集中式管理,更新和维护,它们仍属于集中化系统,以 C/S 模式和用户进行交互。本文通过引入 P2P 技术到数字图书馆,研究如何构建基于 P2P 网络的数字图书馆的模型。

1 P2P网络运用在数字图书馆中的原因

一直以来,由于数字图书馆自身的特点,也就是涵盖范围,主题等方面存在很大的差异,单个图书馆不可能提供给用户想要的全部资料。因而就想将多个相互感兴趣的数字图书馆联合在一起,形成一个更宽广的领域进行共享。目前数字图书馆是以 C/S 结构和用户进行交互的,对于这个结构仍存在很大问题:

① 瓶颈:当大量客户端同时请求时,服务器性能将成为系统瓶颈。

② 依赖性:所有的客户端完全依赖于服务器。当服务器发生故障时,系统将不能运行。

不同于 C/S 结构,P2P 网络最大的优点在于它们减少了对服务器的依赖性。将 P2P 网络运用于数字图书馆中,通过分布式重载给节点,能够解决负载问题。P2P 能够容忍多个节点失败,从而增强了数字图书馆系统的鲁棒性。

P2P 的拓扑结构可分为 4 种形式:中心化拓扑、全分布式非结构化拓扑、全分布式结构化拓扑和半分布式拓扑^[3]。其中半分布式结构吸取了中心化结构和全分布式非结构化拓扑的优点,它会选择性能较高(处理、存储、带宽等方面性能)的节点作为超级节点,在各个超级节点上存储系统中其它部分节点的信息,查找方式仅在超级节点之间转发,超级节点再将查询请求转发给适当的叶子节点。所以说半分布式结构 P2P 网络能够利用异构的优势,在网络大小剧增时,能够让那些反应能力更强的节点去处理请求答复,而不会像其它结构的 P2P 网络那样,出现响应时间慢以及资源紧缺的现象。

① 基金项目:广西青年科学项目(桂科青 0832101)

收稿时间:2008-09-09

2 基于P2P的数字图书馆模型构造

2.1 基于 P2P 的数字图书馆模型

半分布式拓扑结构 P2P 网络有利于网络资源的快速检索，不会由于某个节点失败导致整个系统瘫痪，具有更强的容错性。半分布式拓扑结构 P2P 网络是由提供查询服务的超级节点和它的普通客户节点组成，并且在资源共享方面，所有节点的地位相同。因而本文提出一个基于 P2P 的数字图书馆的模型。基于 P2P 的数字图书馆的模型示意图如下：

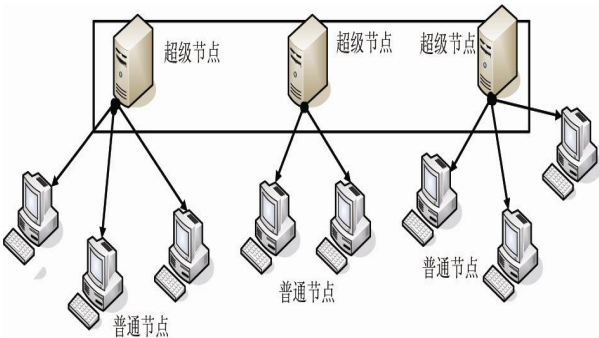


图 1 基于 P2P 的数字图书馆的模型示意图

在基于 P2P 的数字图书馆的模型中，涉及到几个对象：

① 聚簇：一个超级节点与受其管辖的普通对等点组成一个聚簇。聚簇的大小就是在该聚簇中节点的数量，包括超级节点本身。在极端的情况下，一个纯 P2P 网络能够被作为一个超级节点网络的退化，其簇的大小为 1，每个节点就是没有客户端的超级节点。每个聚簇只有一个超级节点。

② 超级节点 (Super-Peer, SP)：超级节点的功能要大大强于普通对等点。在 P2P 网络中，SP 可以为其它的对等点提供一个网络位置，通过它可以定位其它对等点和资源。所有普通对等点都向它发送请求，超级节点提供它所知道的对等点的信息。

③ 普通对等点 (Common-Peer, CP)：存储和提供检索资源。

④ 父节点：超级节点 SP 是它本身所在聚簇的所有 CP 的父节点。

⑤ 子节点：在同一个聚簇中，所有的 CP 都是该簇的 SP 的子节点。

2.2 基于 P2P 的数字图书馆模型功能

基于 P2P 的数字图书馆模型如图 2 所示，提供的

服务有注册服务、查询服务和传输服务。其中，用户进行注册服务时需要通过解析验证和路由选择；在进

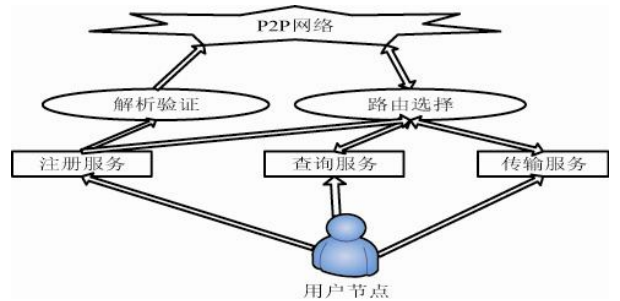


图 2 基于 P2P 的数字图书馆模型功能示意图

行查询和传输服务时需要经过路由选择，以选择相应的最佳路径。本文设计的基于 P2P 的数字图书馆的模型主要模块有：

- ① 系统初始化
- ② 资源注册
- ③ 信息查询
- ④ 访问电子资源

2.2.1 系统初始化

由于该系统中的超级节点和普通对等点具有不同特性：超级节点要求具有较强的处理计算能力，高网络带宽，较大的物理存储容量；普通对等点则拥有的计算能力相对较弱，低带宽。为提高整个 P2P 系统的总体性能，应当充分发挥高性能的节点性能，选择高性能的节点作为超级节点，以便提高网络中的解析验证和路由服务；提高网络中主要的信息检索效率。

当一个新节点加入系统时，将以普通对等点 CP 的身份连接到一个特定的超级节点 SP (这个 SP 通常跟新的 CP 处于同一子网内部)，并开始上传节点共享内容的资源索引 (Resources Index, RI)。RI 的内容是资源的描述，包括书名、作者、出版社等。超级节点同时承担着维护普通对等点信息以及普通对等点的 RI 任务。当普通对等点 CP 离开时，与之相连的超级节点应当更新索引以表明普通对等点资源已经不再可用。

2.2.2 资源注册

系统中的节点必须在 P2P 网络中进行注册之后，它所提供的资源才会被网络中的其它普通对等点检索。注册资源包括资源的提供者愿意对某一类查询信息作出应答的条件，注册资源被发送到超级节点之后，

当超级节点上有符合条件的查询时,就会被路由到愿意做出应答的其它节点,由它来做出相应的应答。此外,系统中的普通对等点如果想要公布新的资源信息时,也必须向父节点进行注册,待父节点验证通过注册资源信息之后,父节点才会保存普通对等点新公布的资源信息到 RI 中。

2.2.3 信息查询

查询请求由普通对等点在查询时向父节点发出,当父节点收到查询请求消息,就运行本地的查询解析验证和路由服务,并查询本地的资源索引,并将查询结果包含在返回消息中一起发送回给普通对等点。如果不能在父节点上找到查询结果,父节点将根据具体策略,从本地开始转发查询,和相邻的超级节点进行联合查询,当相邻的超级节点所在聚簇中的节点有满足要求的结果时,邻聚簇中的节点就将结果传给它的父节点,然后邻聚簇中的父节点再把结果返回给发出请求的本地超级节点,本地超级节点最后将结果返回给子节点。从而,实现超级节点间联合查询。

这种联合查询的工作流程就好像是当一个超级节点接收到普通对等点的请求时,它就提交这个好像是自己的请求给它相邻的超级节点,并转发任何返回的信息给请求的普通对等点。换言之,从聚簇的外部节点角度来看,一个普通对等点的请求将等同于一个超级节点的请求。该策略的优势在于普通对等点可以不再处理外界的任何请求而直接交给父节点处理,从而节省了网络带宽。因此,能力弱的节点(比如说,被限制网络带宽的节点)就可以充当普通对等点,而超级节点就被形成一个全分布式非结构化网络,超级节点间使用 Gossiping 协议^[4]进行消息的随机转发。

2.2.4 访问电子资源

普通对等点收到返回的查询结果,再决定需要使用的资源,然后普通对等点可以直接和拥有资源的节点建立连接并使用它的资源。普通对等点可以从资源拥有者那里获取文件,还可以作为资源提供者向需要资源的节点传送资源和存储资源。这些访问电子资源的方式都会导致普通对等点资源状态变化,普通对等点应及时向相连的超级节点发送资源更新消息。

3 关键问题分析

3.1 超级节点的选择

超级节点网络可看作是纯 P2P 模型和 C/S 模型的

合并。一个超级节点(如图 1)被作为一个普通对等点子集的中央服务器。普通对等点提交请求到相关联的超级节点,然后再从超级节点上接收结果。在超级节点间形成一个纯 P2P 系统,并且超级节点在普通对等点和自身节点间占主导地位,主要负责提交和回答请求。在选取超级节点时,本文考虑到可以允许那些活跃的节点发现已有的超级节点并主动连接到它上面,或者如果找不到超级节点,但自身有能力接收普通对等点,可以毛遂自荐作为超级节点。在数字图书馆 DL 系统中,最初没有超级节点可用,只有那些能力强的节点才有机会充当超级节点。由于不同的节点具有不同的计算能力和资源,所以超级节点一定是具有很强的计算能力,存储能力和丰富的资源,而弱节点只能充当普通对等点。

3.2 负载均衡

数字图书馆 DL 是高度动态的,即新节点可以在任何时间加入,而且存在的节点可以继续保留下去或者可以很容易离开。也就是说,超级节点的能力相对于大规模的 DL 来说是受限的。因此,单独的超级节点仅能连接一定数量的邻节点,并且在一个聚簇中普通对等点的实际数量是由超级节点的最大能力 CS 所决定。CS 是由节点的计算能力,存储能力和带宽来决定。然而,一些超级节点可能有很大的能力可以接收更多新的普通对等点,而其它的超级节点由于自身能力的影响,只能接收少量节点。对于后者来说,如果不能减轻弱的超级节点的负载,这些弱的超级节点容易产生瓶颈(比如说超载)。

为此引入一个两步负载均衡的策略,该策略应用于超级节点和相邻超级节点间的分布式动态负载中。第一步,使用 Gossiping 协议初始化所有的节点作为超级节点,一旦有新的节点加入到网络,就和某特定的超级节点相连。其中,能力低的节点可能被能力强的超级节点归并到一个簇中。第二步很关键,对外界来说是透明的。当一个超级节点容量达到饱和,不能再接收新的普通对等点,它就把普通对等点“推”给那些当前负载还没达到最大限制的相邻超级节点。如果超级节点容量呈过饱和状态时,该超级节点就自动分裂,超级节点从它当前的子节点中推荐出能力较强的节点作为新的超级节点,形成新的聚簇,从而分离出过量的子节点。此外,能够承受更大负载的强节点也会主动地“拉”普通对等点到本地聚簇中。在“推

拉策略”中,游离态的节点都存储在一张非簇节点的列表中,非簇列表充当中间件可以接收被“抛弃的”但又很活跃的节点。一旦一个普通对等点加入到一个簇中,就将它从非簇列表中删除。

3.3 自我调节与心跳策略

本文设计的基于 P2P 的数字图书馆的模型中,每个聚簇中普通对等点只能和本地聚簇超级节点进行通讯,不能和外部聚簇中的任何节点进行通讯,聚簇间只有超级节点才能进行相互通讯。所以需要考虑这种情况,如果一个超级节点失效或者离开,所有的普通对等点的连接将丢失。本文引入自我调节的策略来解决超级节点失效或者离开的情况,以增强数字图书馆的鲁棒性。

首先,假设模型中的所有节点(超级节点和普通对等点)都有一个标志符。

其次,数字图书馆 DL 允许普通对等点或超级节点使用心跳策略以检测相邻节点的在线状态。普通对等点可以每隔一定时间周期 T 发送 Ping 命令给父节点 SP,如果超级节点在线,就返回一个 Ping 命令给普通对等点,使普通对等点知道父节点 SP 在线,本文设定了一个 TTL 值(TTL 代表发送 Ping 命令的生命周期),Ping 命令每传递一个节点 TTL 减 1,直到 TTL 值为 0, Ping 命令就不再转发,自动丢弃,而发出 Ping 命令的普通对等点若没有收到父节点发出的 Pong 命令,就主动认为父节点 SP 不在线。相反,超级节点也可以每隔一定周期发送 Ping 命令给相邻的超级节点,以查询相邻的超级节点在线状态。

然后,假设有一个超级节点失效,所有的普通对等点连接都将加入到一个非簇列表中。按照负载均衡策略,列表中每个节点将分配到专门的聚簇中;或者能力强的节点将自己定义为一个新的超级节点,以接收其它普通对等点并与之相连,最终形成一个新的聚簇。

4 实验分析

为了说明对上述三个关键问题,即超级节点的选择、节点负载均衡和自我调节与心跳策略的有效性,本文使用 P2P 模拟器 PeerSim 分别作了三个实验。首先对实验所需的一些参数进行配置:网络节点大小为 5000,相邻的超级节点出度最大是 30 个,每个超级节点最多容纳 100 个普通对等点 CP,最少 1 个普通对

等点 CP。

利用 Gossiping 协议生成一个 5000 个节点的网络,Gossiping 协议的优点在于能够在任意连接的网络节点中进行计算和信息交换。初始化时,实验中的每个节点都作为超级节点,可以和其它节点进行任意连接,同时给每个节点指定一个最大出度的邻节点来连接,选出邻节点中节点能力大于当前节点能力的节点作为超级节点。网络的拓扑结构遵循 power-laws^[5],用 power-laws 分布 $P(x) = \beta x^{-\alpha}$ 来决定节点的能力,其中 x 作为节点在 $[C_{min}, C_{max}]$ 的能力(例如,实验中设置的 $[1, 100]$), $P(x)$ 是 x 节点具有特殊能力的概率, β 和 α 是常量。实验中设定 $\beta = 1$ 和 $\alpha = 2$ 。

① 实验 1: 超级节点的选择分析

图 3 表示由 Gossiping 协议产生的超级节点网络,表示一个 5000 个节点大小的网络,出度参数设为固定值 30,并给节点的最大容纳能力设置不同的值,分别为 50, 100 和 250。在图 3 中,超级节点数量的不同与节点的最大容纳能力是成反比关系。容纳能力越大,超级节点需要的越少,超级节点间通讯费用越少。

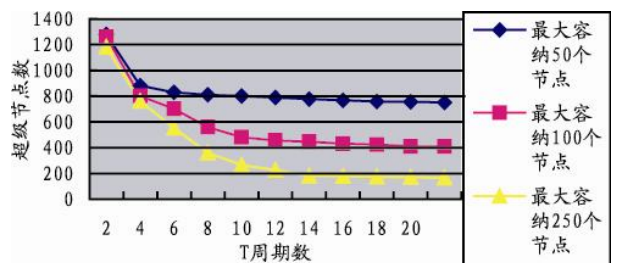


图 3 Gossiping 协议产生超级节点网络

② 实验 2: 节点负载均衡分析

该实验中有 1000 个新节点不断地从第 35 周期到第 45 周期加入网络。新节点被加入,系统将发生紊乱。图 4 表示节点的负载均衡。当新节点加入时,超级节点将不断增加,是因为最初设置所有新节点充当超级节点角色,然后在后面时间周期中节点间不断进行调整,当没有新的节点加入到系统中,出现急剧减少的波动在第 45 周期,但系统最后还是达到一个稳定的状态(比如,图 4 在第 55 周期后),尽管超级节点的数量比系统规定的超级节点数略微大一点点,但还是可以说明节点负载均衡能力是不错的。

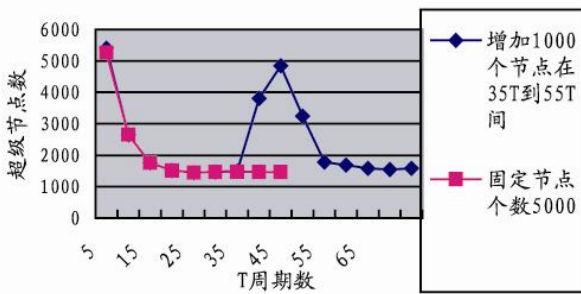


图 4 节点负载均衡

③ 实验 3: 自我调节与心跳策略的分析

当节点离开时, 采用了自我调节策略, 并表明由它们而引起的变化。超级节点仅维护相邻超级节点的索引信息而不考虑子节点。超级节点每隔一定的时间周期 T 检测相邻节点的在线状态并更新那些不在线的节点索引信息。实验中设定时间周期 $T = 10$ 秒。普通对等点在发送查询请求之前一定要向父节点 SP 发送 $Ping$ 命令以检测父节点在线状态。实验中普通对等点如果等待返回 $Pong$ 命令的周期超出 TTL (设定 TTL 的值 5 跳(hops)), 则认为父节点不在线, 就开始搜索能力更强的超级节点, 找到后就加入到该超级节点所在的聚簇。如果没有超级节点接纳它, 那么它最终决定自己成为超级节点, 等待新的普通对等点加入到自身的聚簇。实验 3 表示节点不断离开的情况, 实验中设置 500 个节点连续不断的从第 10 周期到第 90 周期离开网络。图 5 表示每次自我调节的超级节点数量变化都按照一个起伏的波动进行, 大量的超级节点的趋势随着运行周期增长而不断减少, 总节点数也不断减少。

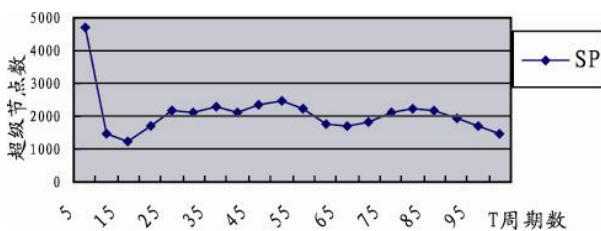


图 5 节点不断离开的自我调节情况

综上所述, 实验表明采用超级节点的选择策略, 负载均衡策略, 自我调节和心跳策略更能满足基于 $P2P$ 的数字图书馆模型构建过程中的应用需求, 具有更高的有效性。

5 结束语

尽管现有数字图书馆的部分数据存放已经拥有分布式存储的技术, 但从用户交互的角度来看, 仍然局限于 C/S 模式, 这种模式有着固有的网络瓶颈, 单点故障, 扩展性弱等缺陷。对此, 本文提出运用具有鲁棒性, 易扩展的 $P2P$ 网络来组建数字图书馆的构想, 设计了一个基于 $P2P$ 的数字图书馆模型, 简要介绍了该模型的功能, 深入探讨了构建模型的过程中存在的问题, 并针对所存在的问题采用相应的改进策略, 通过实验证明所采用的策略是有效的。

参考文献

- 1 Aberer K, Despotovic Z. Managing Trust in a Peer-to-Peer Information System. Proc. of 10th Int'l. Conf. on Information and Knowledge Management(CI KM), 2001:310 - 317.
- 2 Borgman CL. Challenges in Building Digital Libraries for the 21st Century. University of California, Los Angeles, 2002.
- 3 罗杰文. Peer to Peer(P2P)综述. [2005-11-3]. <http://www.intsci.ac.cn/users/luojw/papers/p2p.htm>
- 4 Aberer MHK, Cudre-Mauroux P. The chatty web: Emergent Semantics through gossiping. The International World Wide Web Conference, Hungary, 2003.
- 5 Palmer CR, Steffan JG. Generating Network topologies that obey power laws. Proceedings of GLOBECOM'2000, 2000.