

Web 日志挖掘技术应用研究*

吕 佳

(重庆师范大学 数学与计算机科学学院, 重庆 400047)

摘 要 随着 Internet 的迅速发展, Web 在人们的日常生活和工作中的地位日益显著。Web 日志挖掘就是通过通过对 Web 日志记录的挖掘, 发现用户访问的 Web 页面的浏览模式, 从而进一步分析和研究 Web 日志记录中的规律, 改进 Web 站点的性能和组织结构, 提供个性化服务。本文首先分析了 Web 日志的分布和特点, 再对 Web 日志挖掘中的两个阶段即数据预处理和日志挖掘算法做了详细介绍, 最后对 Web 日志挖掘技术做了展望。

关键词 :Web 日志挖掘 ;Web 日志 ;数据预处理 ;日志挖掘算法

中图分类号 :TP393

文献标识码 :A

文章编号 :1672-6693(2006)04-0039-06

Research on Application of Web Log Mining Technology

LV Jia

(College of Mathematics and Computer Science, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China)

Abstract :With the rapid development of Internet, Web plays an increasingly important role in people's daily life and work. Web log mining is to find browsing pattern of user accessing Web pages by mining Web log records, accordingly to analyze and research rules hidden in Web log and improve the performance and structure of web station, thus can provide personalization services. This paper firstly analyzed Web log distribution and feature, then introduced two stages of Web log mining in detail, i. e. data preprocessing and log mining algorithms, finally expected Web log mining technology.

Key words :Web log mining ;Web log ;data preprocessing ;log mining algorithms

Web 作为目前 Internet 上信息发布的主要渠道, 已经显示出巨大的商业价值和应用潜力。Web 中包含了 Web 页面的内容信息、超链接信息, 以及 Web 页面的访问和使用信息, 为数据挖掘提供了丰富的资源。Web 挖掘^[1,2]旨在应用数据挖掘技术从与 WWW 相关的资源和用户浏览行为中提取隐含的、未知的、对决策有潜在价值的知识和模式的过程。

Web 是一个无统一结构、无标准查询语言和数据模型的分布式信息系统, 对其挖掘是困难的。但每一个提供信息资源的服务器都保留了一个结构化较好的日志文件, 记录了用户访问该网站的交互信息, 用户每访问一个页面, 日志文件就会相应地增加一条记录。Web 日志挖掘就是通过对 Web 日志记录的挖掘, 发现用户访问的 Web 页面的浏览模式, 从而进一步分析和研究 Web 日志记录中的规律, 以

期改进 Web 站点的性能和组织结构, 提高用户查找信息的质量和效率, 并通过统计和关联分析找出特定用户与特定地域、特定时间、特定页面等要素之间的内在联系。

作为 Web 挖掘的一个重要组成部分, 通过对 Web 日志的挖掘, 可以帮助作者更好地分析和理解用户使用 Web 的行为特点, 发现隐藏在用户行为背后的更深层次的动因和规律, 从而开发 Web 的最大经济潜力^[3,4]。本文分析了 Web 日志的分布和特点, 对 Web 日志数据预处理及挖掘算法做了详细分析, 最后指出该领域当前存在的问题以及下一步研究方向。

1 Web 用户访问日志分布及特点

Web 用户访问日志主要来源于 Web 服务器 (Web server)、Web 代理服务器(proxy)和客户端

* 收稿日期 2006-04-25

资助项目 :重庆师范大学科研基金(No. 05XLY003)

作者简介 :吕佳(1978-)女, 四川达州人, 讲师, 硕士, 研究方向为数据挖掘。

(client)^[5,6]。这 3 处日志数据集记录了用户使用网络资源的不同模式。Web 服务器端日志数据记录了多个 Web 用户对单个站点的访问行为;Web 代理服务器日志数据记录了多个 Web 用户向多个 Web 服务器的请求;客户端日志数据记录了单个用户访问多个 Web 服务器的模式。其中前两者数据的收集是由服务器自动记录的,而客户端日志数据则需要专门的程序收集,如客户端的代理软件或者使用修改过的浏览器。相对而言,服务器端日志格式标准化程度最高。

W3C 组织规定了服务器日志的两种格式^[7]通用日志格式(Common Log Format)和扩展型日志格式(Extended Log Format)。以下为重庆大学 Web 服务器上记录的一条完整的日志项。

202. 202. 3. 4—[06/12/2004 :17 :51 :33 +0800]“ GET /images/index_bg_15.gif HTTP/1.1 ” 304 0 “ http://www.cqu.edu.cn/ ” “ Mozilla/4.0 (compatible; MSIE 6.0; Windows NT 5.0)”。

下面对服务器日志文件的具体格式稍作解释。

第一部分包含有关访问服务器主机的信息,从第 1 条记录可知,发出请求的主机的 IP 地址为 202. 202. 3. 4。

第 2 部分指明了访问的日期和时间。这次访问发生在 2004 年 12 月 6 日 17 51 33 ,+0800 说明重大的 Web 服务器位于第 8 时区。

第 3 部分是该主机发出的请求浏览网页的指令内容,包括请求方式、请求的页面(URL)和采用的协议。请求方式一般有 3 种,即 GET、POST 和 HEAD。GET 指从 Web 服务器请求了一个对象;POST 表示向服务器发送信息;HEAD 指只取一个对象的头。这条记录显示访问的类型是“GET”行为,被访问的内容是位于/images/目录下的一个图片文件 index_bg_15.gif,所用的协议是 HTTP/1.1。

第 4 部分为服务器执行该请求的结果状态信息和请求网页的字节数。200 表示请求成功,304 表示网页内容没有改变,404 是最常见的错误信息,它表示请求的文件没有找到。

第 5 部分为用户访问网站的主页 URL 地址。记录显示的都是 http://www.cqu.edu.cn/。

第 6 部分为用户使用的浏览器以及操作系统的版本。该记录显示,使用的浏览器是 Mozilla/4.0,操作系统版本为 Windows NT 5.0。

2 Web 日志挖掘的一般流程

Web 日志挖掘的研究依然遵循数据挖掘的研究

思路,挖掘过程一般分为 4 个阶段,即数据预处理阶段、日志挖掘算法实施阶段、模式分析阶段和可视化阶段^[8],其流程如图 1 所示。

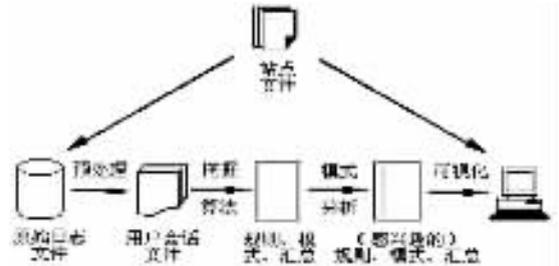


图 1 Web 日志挖掘的一般流程

数据预处理阶段是将原始的 Web 日志文件转化为适合进行数据挖掘的可靠的规范的数据格式。日志挖掘算法实施阶段是对数据预处理的结果施用挖掘算法产生规则与模式。数据预处理和日志挖掘算法是 Web 日志挖掘中的关键技术,数据预处理的结果作为挖掘算法的输入直接影响日志挖掘算法产生的规则与模式。模式分析阶段分析挖掘得到的规则和模式,提取有意义的、感兴趣的规则与模式作为挖掘结果。可视化则是用图形化界面将挖掘的结果显示出来。

3 Web 日志挖掘的数据预处理分析

数据预处理就是要根据挖掘目的,对原始 Web 日志文件中的数据有针对性地进行提取、分解、合并,最后转化为适合进行数据挖掘的数据格式,并保存到关系型数据库表或数据仓库中,等待进一步处理。这个环节是整个过程的基础和实施有效挖掘算法的前提,在 Web 日志挖掘中起着非常重要的作用。这一过程主要包括数据清洗、用户识别、会话识别、路径补充等步骤,如图 2 所示。

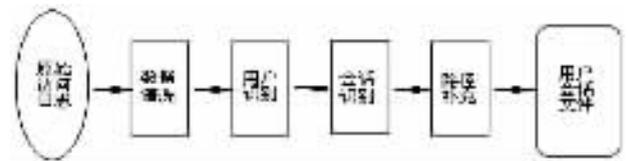


图 2 Web 日志挖掘中数据的预处理过程

3.1 数据清洗

当用户请求一个网页时,与这个网页有关的图片、音频等信息会自动下载并记录在日志文件中,用户请求页面时发生错误的记录也会记录在日志文件中,数据清洗就是要删除这些无关紧要的嵌入式文件和错误记录。一般采用的方法是除去 URL 中包含后缀.gif、.GIF、.jpeg、.JPEG、.jpg、.JPG、.SWF、

.MID、.MP3、.AVI 等的日志项,删除由 Java applet 文件、.js 脚本文件、CSS 层叠式样式表文件等产生的日志项以及删除那些错误的访问记录。当然,如果这些文件都是由用户主动点击浏览的,则这些访问记录不能删除。

3.2 用户识别

由于本地缓存、代理服务器(包括网吧、局域网等环境)以及防火墙的使用,使得在日志中辨识每一个用户变得较为复杂。可以通过 Cookie 和用户注册来辨识用户,但因涉及隐私问题需依赖用户的合作,故不易实现。一些启发式信息可以用来帮助辨识用户^[4]。目前辨识用户的通用方法是:只有 IP 地址、操作系统、浏览器、浏览器版本以及 Http 协议版本都完全相同才视为同一用户。

3.3 会话识别

会话识别的目的就是把用户的访问日志分割成一个个的会话。一般常以时间长度来确定用户会话,即设置一个时间阈值 $Timeout$ 来划分不同的用户会话。日志中第 i 条记录和第 j 条记录的访问时间只要满足 $Time_i - Time_j \leq Timeout$ 就认为是同一会话。 $Timeout$ 取值常为 30 min。另外,通常用户会在其感兴趣的页面上停留较长时间,这类页面视为目标网页。目前普遍采用的确定目标网页的方法是基于时间^[9]。同一个用户按照时间顺序先后访问的两个网页的时间差值,表示前一个网页的停留时间,若超过某一给定阈值 η ,则认为这个网页为该用户感兴趣的目标网页。另外,可假设用户访问的最后一个网页为该用户感兴趣的目标网页。图3为标识3的会话片断。 η 为 30 s,最后一个页面停留时间设为 500 s。以请求编号为“151”的网页这条日志记录为例,它的停留时间是 49 s,超过 η ,所以网页“151”是该用户的一个目标网页。

user_id	ip	id	time	span
3	172.30.12.13	132	2004-12-6 18:07:52	9
3	172.30.12.13	130	2004-12-6 18:08:01	975
3	172.30.12.13	145	2004-12-6 18:40:24	284
3	172.30.12.13	11	2004-12-6 18:45:08	4
3	172.30.12.13	10	2004-12-6 18:45:12	23
3	172.30.12.13	161	2004-12-6 18:51:12	49
3	172.30.12.13	144	2004-12-6 18:52:01	196
3	172.30.12.13	104	2004-12-6 18:55:17	12
3	172.30.12.13	109	2004-12-6 18:55:29	52
3	172.30.12.13	105	2004-12-6 18:56:21	45
3	172.30.12.13	110	2004-12-6 18:57:06	500

图3 用户会话部分片断

3.4 路径补充

由于存在客户端缓存等原因,使得 Web 服务器

日志中并没有完整地记录下用户的访问行为,路径补充就可以将遗漏的信息补充进来。例如,如果一个用户一次请求的页面不是从上一次请求的页面中链接而来的,并且这一次请求的页面是用户最近曾经请求过的页面,那么可以假设用户的请求是通过本地(如在 IE 中按“后退键”)或 Proxy 端的缓冲区得到满足的,因此服务器端无法记录此次请求,这样就需要进行路径补充,同时还可以结合站点的拓扑结构来补充路径。

在数据集经历以上步骤之后,用户会话数据必须被格式化符合相应数据挖掘算法的数据模型,这一步工作称之为数据转化。例如,进行关联规则挖掘的数据格式和进行序列挖掘的数据格式就可能不同。显然,对于不同的数据集,应如何进行预处理,应处理成什么种类的数据源,这不仅依赖于数据挖掘要求本身和一些通用的知识,而且更依赖于挖掘算法所应用的具体领域的专家经验和知识。

4 Web 日志挖掘算法

目前国内外已陆续开发出一些商业化 Web 日志分析工具,这些工具主要注重统计页面的点击次数、用户在站点的停留时间和用户访问的 URL 等。对分析网络个体行为和群体行为特征分析,还存在着一定的局限性。在学术界,对于日志挖掘的研究,试图从社会学和心理学的角度,解释数据统计规律和分布特征,以发现日志中隐含的关系,并进行相关的行为分析。常用的 Web 日志挖掘技术有统计分析、序列模式分析、关联规则、分类和聚类等。

4.1 统计分析

统计分析是最常用的从 Web 用户行为中抽取知识的方法。对 Web 日志进行统计分析可以获得有关站点使用的基本信息,如页面访问次数、页面的平均访问人数、最频繁访问的页面、浏览站点的路径平均长度等,还可以进行有限的错误分析,如非法用户登录等。这些统计数据都是基于用户浏览页面的时间、用户的浏览路径和路径长度以及用户的访问行为和习惯等信息。这种分析虽然看起来不能进行深层次的数据分析,但是分析结果往往对提高系统性能、加强系统安全性、优化站点结构、提供市场决策等方面大有帮助。目前已有许多 Web 跟踪与流量分析工具实现了这些最基本的统计功能。

Han 等人^[10]依据 Web 日志建立数据立方体(Datacube),然后对数据立方体进行数据挖掘和联

机分析处理(OLAP)。基于数据立方体的挖掘侧重于将 Web 日志转变为结构化的数据立方体,能从多角度全面地进行挖掘和分析,并能引进各种成熟的数据挖掘技术,有利于 Web 挖掘与数据挖掘技术的迅速融合与发展。郭岩等人^[11]围绕网络日志中是否蕴含用户访问 Web 的规律性以及如何利用这些特性,用统计的方法研究了日志规模与用户数、Web 文档数以及单位用户访问 Web 文档数的关系,最后得出了一定时间段的 Web 访问日志中蕴含了用户的稳定兴趣的结论。

4.2 序列模式

序列模式指在时序数据集中发现在时间上具有先后顺序的数据项。在 Web 日志挖掘中,序列模式识别指寻找用户会话中在时间上有先后关系的页面请求。在 Web 服务器日志里,用户的访问是以一段时间为单位记载的。经数据预处理后,成为一个间断的时间序列,这些序列模式可以预测用户即将可能请求的页面,这样就可以针对特定的用户组在页面中放置不同的广告条来增加广告的点击率,还可以进行商业和市场的决策,站点结构的优化。

Markov 模型常用来发掘序列模式。通常,一个 Markov 模型由一个状态集合和一个状态转移概率矩阵组成。用 Markov 模型对页面访问序列进行建模,把从一个页面的访问到另一个页面的访问看成是状态的转移,用 Markov 链描述页面访问之间的概率转移。文献[12,13]使用 Markov 模型生成序列模式,用于 Web 预取和系统优化。

4.3 关联规则

关联规则技术主要用于发现用户会话中经常被用户一起访问的页面集合,这些页面之间没有顺序关系。挖掘关联规则通常使用 Apriori 算法或其变形算法,从事务数据库中挖掘出最大频繁访问项集,这个项集就是关联规则挖掘出的用户访问模式。例如,IBM 对 Official 1996 Olympics Web 站点服务器的日志进行关联规则的挖掘,结果发现(1)访问室内排球页面的用户,其中的 45% 也访问手球页面;(2)访问羽毛球和跳水页面的用户,其中的 59.7% 也访问桌球页面。

关联规则可以作为站点设计者优化站点的参照,也是在 Web 上进行商业和市场决策的依据,而且还可以作为启发式规则为远程客户预取可能请求的页面。

文献[14]提出使用多种最小支持度阈值的策

略,用户可以对不同的页面指定不同的支持度,从而保证频繁集中能够包含那些较少出现但很重要的页面。Chen 等人^[15]最早提出基于 Web 事务的 Web 日志挖掘技术。将数据挖掘技术应用于 Web 服务器日志文件,提出最大前向引用(Maximal Forward Reference,简称 MFR)系列的概念,用于在日志预处理阶段辨识用户访问事务,然后采用与关联规则相似的方法挖掘频繁访问路径,以发现用户浏览模式。

4.4 分类和聚类

分类是将一个对象分到事先已定义好的类中。在 Web 日志挖掘中,分类可以用来为一组特定的用户建立简档,这就要求抽取关键属性描述已知的用户类别。可以使用监督学习算法来分类,如决策树分类法、贝叶斯分类法、最近邻分类法、支持向量机等。例如对服务器日志做分类,可能会发现类似这样的有趣规则:通过/Product/Music 提交订单的用户中,有 30% 是居住在西海岸并且年龄在 18~25 岁之间。

聚类分析是多元统计分析的一种,也是非监督模式识别的一个重要分支,在模式识别、图像分割、特征提取等领域中得到了广泛应用。对于一个特定的 Web 站点,其拓扑结构、页面个数都是已知的,虽然同一个用户在不同时期可能有不同的浏览模式,但其长期趋势应该是稳定的。因此,分析一定时期内用户的访问信息便可以了解用户的访问模式,实现用户聚类和页面聚类。用户聚类主要是把用户划分成若干组,具有相似浏览模式的用户分在一组,这类知识在电子商务和为用户提供个性化服务等应用中特别有用,页面聚类则可以找出具有相关内容的页面集,这对网上搜索引擎和调整页面结构等应用很有用。

文献[16]提出了一种基于低复杂性模糊关联聚类算法用于 Web 日志挖掘,该算法采用模糊 C-medoids 思想对关系数据进行聚类,在 Web 文档及 Web 日志分析中都取得了很好的效果。文献[17]提出了 K-paths 路径聚类方法,他们认为用户对 Web 站点的访问代表了用户对 Web 站点上页面的访问兴趣,这种兴趣程度可以通过用户对 Web 站点上页面的浏览顺序表现出来。故根据群体用户对 Web 站点的访问顺序进行聚类。文献[18,19]分别采用了相似性分析和 Max-Min 模糊相似性度量规则对所构建 URL-UserID 关联矩阵进行了相关页面分析,并提出了 Web 页面和客户群体的模糊聚类算法,以此

发现用户频繁访问路径,实现网站优化,提供个性化服务。文献[20]提出了一种基于竞争的自激励神经网络学习算法 SIN,该算法综合了自适应谐振理论和竞争型神经网络的特点,在隐层采用了 Hebb 学习规则,既能保证原有信息不受影响,又能对新的信息加以记忆,具有较好的学习速度和分类效果,并能有效剔除噪声,得到较为理想的用户聚类和页面聚类的结果。文献[21-22]采用 Page Gather 算法在 Web 站点上寻找相关页面集合。对聚类结果中的每一个聚类,系统自动生成一个包含该聚类中所有页面链接的 Web 页面,即索引页面。每一个索引页面反映了一组用户可能具有的共同兴趣。利用索引页面,可以提高用户的浏览效率。由于索引页面是系统自动生成的,因此该算法可以使 Web 站点的结构自动改变,具有自适应性。

5 Web 日志挖掘技术展望

Web 是信息发布、交互及获取的主要工具,Web 上的信息量正以惊人的速度不断增长。面对日益增长的 Web 信息,Web 日志挖掘研究的需求量也日益增加,具有广阔的发展和前景。而 Web 日志挖掘技术还有许多问题需要解决,有待研究者们进一步开展深入的研究工作。目前 Web 日志挖掘研究主要面临以下问题。

(1) Web 是一个异质、分布、动态的信息源。Web 页面支持多种媒体的表达,半结构化或无结构的数据的复杂程度要高于任何传统的文本文件结构。数据更新快,增长快,且无固定的模式。页面本身的内容和相关链接经常更新。这些都造成 Web 数据非常复杂。

(2) 本地和各级浏览器缓存、防火墙和代理服务器的存在,以及 Cookie 使用条件的约束和相同 IP 不同用户的集中请求行为,难以有效地进行用户识别和会话识别,这成为 Web 日志预处理过程的重点和难点。

(3) Web 上的数据海量增长,真正有用的信息可能只占其中的较小的一个部分,而这部分数据往往“淹没”在庞大的数据之中了,因此针对不同的目的,需要考虑的是如何设计行之有效的算法^[23]挖掘出有用的信息,如何评价挖掘算法在海量数据挖掘时的适应性和时效性问题。

(4) Web 日志挖掘中内在机理及新的挖掘体系和结构的研究。

因此,下一步要解决的问题就主要集中在 Web 日志挖掘中的数据预处理和日志挖掘算法以及 Web 日志挖掘中新的挖掘体系的研究上,这需要寻找新的途径来解决上述问题,同时综合利用现有的成熟技术,取长补短,必然也会产生新的思想和方法,也将推动 Web 日志挖掘的研究。

参考文献:

- [1] COOLEY R, MOBASHER R, SRIVASTAVA J. Web Mining: Information and Pattern Discovery on the World Wide Web [A]. In: Proc of the 9th IEEE International Conf on Tools with Artificial Intelligence [C]. Newport Beach, CA, USA: IEEE, 1997. 558-567.
- [2] WANG Jicheng, HUANG Yuan, WU Gangshan, et al. Web Mining: Knowledge Discovery on the Web [A]. Systems, Man, and Cybernetics, IEEE SMC 99 Conference Proceedings [C]. Japan: IEEE, 1999. 2: 137-141.
- [3] 陈新中, 李岩, 杨炳儒, 等. Web 日志挖掘技术进展 [J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(4): 492-495.
- [4] 郭岩, 白硕, 于满泉. Web 使用信息挖掘综述 [J]. 计算机科学, 2005, 32(1): 1-7.
- [5] 张娥, 冯耕中, 郑斐峰. Web 用户访问日志数据挖掘研究 [J]. 情报技术, 2003, 22(9): 48-50.
- [6] 张娥, 冯耕中, 郑斐峰. Web 日志数据挖掘的数据预处理方法研究 [J]. 计算机应用研究, 2004, 21(2): 58-60.
- [7] PHILLIP M H B, BRIAN B. Extended Log File Format [EB/OL]. <http://www.w3.org/pub/WWW/TR/WD-logfile.html>, 1996-03-23/2006-04-02.
- [8] 费爱国, 王新辉. 一种基于 Web 日志文件的信息挖掘方法 [J]. 计算机应用, 2004, 24(6): 57-59.
- [9] MOBASHER B, DAI H, LUO T, et al. Effective Personalization Based on Association Rule Discovery from Web Usage Data [A]. In: Proceedings of the 3rd ACM Workshop on Web Information and Data Management (WIDM01) [C]. New York: ACM Press, 2001. 9-15.
- [10] ZAIANE O R, XIN M, HAN J. Discovering Web Access Pattern and Trends by Applying OLAP and Data Mining Technology on Web Logs [A]. In: Proc of Advances in Digital Libraries [C]. CA: IEEE, 1998. 19-29.
- [11] 郭岩, 白硕, 杨志峰, 等. 网络日志规模分析和用户兴趣挖掘 [J]. 计算机学报, 2005, 28(9): 1483-1496.
- [12] DESHPANDE M, KARYPIS G. Selective Markov Models for Predicting Web Page Accesses [A]. In: Proc of the First SIAM International Conf on Data Mining [C]. USA: Chicago, IL, 2001. 7-14.
- [13] SARUKKAI R R. Link Prediction and Path Analysis Using Markov Chains [A]. In: Proc of the 9th International

- World Wide Web Conference [C]. Netherlands :Amsterdam ,2000 ,33(1-6) :377-386.
- [14] LIU B ,HSU W ,MA Y. Mining Association Rules with Multiple Minimum Supports [A]. In : Proc of the ACM SIGKDD Intl Conf on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD99 ,Poster) [C]. USA :ACM Press ,1999 ,337-341.
- [15] CHEN M S , PARK J S , YU P S. Data Mining for Path Traversal Patterns in a Web Environment [A]. In Proc of the 16th International Conf on Distributed Computing Systems [C]. Hong Kong : IEEE , 1996 ,27-30 :385-392.
- [16] KRISHNAPURAM R , JOSHI A , NASRAOUI O , et al. Low-Complexity Fuzzy Relational Clustering Algorithms for Web Mining [J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems ,2001 ,9 (4) :595-607.
- [17] 王实 ,高文 ,李锦涛 等. 路径聚类 :在 Web 站点中的知识发现 [J]. 计算机研究与发展 ,2001 ,38(4) :482-486.
- [18] 宋擒豹 ,沈钧毅. Web 日志的高效多能挖掘算法 [J]. 计算机研究与发展 ,2001 ,38(3) :328-333.
- [19] 刑东山 ,沈钧毅 ,宋擒豹. 从 Web 日志中挖掘用户浏览偏爱路径 [J]. 计算机学报 ,2003 ,26(11) :1518-1523.
- [20] 董一鸿 ,庄越挺. 基于新型的竞争型神经网络的 Web 日志挖掘 [J]. 计算机研究与发展 ,2003 ,40(5) :661-667.
- [21] PERKOWITZ M , ETZIONI O. Towards Adaptive Web Sites : Conceptual Framework and Case Study [J]. Artificial Intelligence ,2000 ,118(1-2) :245-275.
- [22] PERKOWITZ M , ETZIONI O. Adaptive Web Sites : Automatically Synthesizing Web Pages [A]. In : Proc of the 15th National Conf on Artificial Intelligence (AAAI98) [C]. Menlo Park , CA : AAAI Press/MIT Press , 1998. 727-732.
- [23] 吕佳. 基于人工免疫网络的多峰值函数优化 [J]. 重庆师范大学学报(自然科学版) 2006 ,23(3) :45-48.

(责任编辑 游中胜)