

基于马尔可夫决策过程的接纳控制模型研究*

史继飞^a, 刘婷^b, 李浩^c

(重庆邮电大学 a. 计算机科学与技术学院; b. 自动化学院; c. 通信与信息工程学院, 重庆 400065)

摘要: 针对异构网络中系统容量有限、资源利用率低的问题,在分析对比传统呼叫接纳控制模型的基础上,提出一种基于马尔可夫决策过程理论的接纳控制模型。理论采用定义五元组的方式来描述建模过程,推导出目标评价函数,并通过求解具有 QoS 约束条件下的方程进行数值分析。仿真结果表明,该模型能满足网络动态实时性,解决系统容量有限情况下的最优接纳控制问题,从而能够在一定程度上降低各类呼叫业务的阻塞概率,达到提高不同用户服务质量的体验性、网络的系统收益最大化的目的。

关键词: 异构网络; 呼叫接纳控制; 马尔可夫决策过程; QoS 约束; 系统收益

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2014)04-1163-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2014.04.050

Research of admission control model based on Markov decision processes

SHI Ji-fei^a, LIU Ting^b, LI Hao^c

(a. School of Computer Science & Technology, b. School of Automation, c. School of Communication & Information Engineering, Chongqing University of Posts & Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: According to the existing problems of the limited system capacity and low resource utilization in heterogeneous network, compared to the traditional admission control, this paper proposed the model of admission control based on the theory of Markov decision. It defined quintuple way to describe the modeling process, and derived objective evaluation function and by solving with QoS constraints equations numerical analysis. Simulation results show that the model can meet the network dynamic realtime, solve the problem about optimal admission control under circumstances of the limited system capacity, which reduced the probability of call blocking for various types of service, to improve the quality of service of different users experiential and maximize the network system revenue.

Key words: heterogeneous network; call admission control (CAC); Markov decision process (MDP); QoS constraints; system revenue

随着网络通信技术的迅速发展,网络融合已成为一种必然趋势,并为用户提供无缝业务连接和全球移动性。具有不同接入技术和服务类型的异构网络,能够支持具有不同服务质量需求的多媒体业务。不同的接入技术具有不同的覆盖范围、系统容量、安全性和花费代价。因此,研究优化的接纳控制模型对于保证移动用户任何时候和任何地点都能永久在线并合理分配网络有限资源是非常必要的。移动用户根据网络的当前状态和个人偏好进行不同网络接入技术的合适选择,同时网络提供商也希望提供最大化的网络收益,充分利用网络资源。因此,在保证用户服务质量的同时,合理选择不同的接入技术,这正是优化呼叫接纳控制模型研究的重点。本文对异构网络中业务接纳控制机制进行研究,首先给出了异构无线网络的典型拓扑结构,对其中涉及的网元进行详细说明;然后基于马尔可夫决策过程理论^[1],提出异构网络中优化接纳控制模型,详细说明了马尔可夫决策过程中五元组并推导了网络性能的平均效用一般表达式;进一步根据当前网络性能状态,在保证业务接入和切换成功率的基础上,推导出效用最大的优化接纳控制策略。

1 相关研究

目前,国内外对于异构网络系统资源管理中接纳控制也有了相关的研究。蜂窝网络中无线资源管理模块通过提供高效空口资源利用率来满足不同用户 QoS (quality of service) 需求。接纳控制策略的研究是非常重要的,因为它会直接影响到系统资源利用率,从而影响到各类型业务服务质量的体验性。相关接纳控制研究在不同类型网络中均已涉及。文献[2,3]介绍了传统的 CDMA (code division multiple access) 蜂窝移动通信网络系统中的接纳控制;文献[4,5]介绍了传统的基于阈值的宽带预留保护信道的接纳控制机制;文献[6]中介绍了新型 4G 移动无线通信网络系统中支持 QoS 约束的接纳控制算法;文献[7]中介绍了在无线 Mesh 特殊网络中的接纳控制及路由机制;文献[8]介绍了无线局域网中的接纳控制机制。接纳控制相关研究除了在单一网络中进行了研究外,随着无线网络接入技术种类的不断增长,也逐渐在多种网络同时存在的系统环境下进行了一定的研究。文献[9]中提出了多媒体网络 3G/WLAN (third generation cellular networks and wireless local area

收稿日期: 2013-06-12; 修回日期: 2013-07-30 基金项目: 重庆市教委科学技术研究基金资助项目 (KJ100517)

作者简介: 史继飞 (1989-), 男, 江苏淮安人, 硕士研究生, 主要研究方向为网络优化 (shijifeilove@163.com); 刘婷 (1989-), 女, 重庆人, 硕士研究生, 主要研究方向为语音识别; 李浩 (1989-), 男, 河南许昌人, 硕士研究生, 主要研究方向为未来网络。

networks)的接纳策略;文献[10]描述了一种基于松耦合方式的网络架构模型;文献[11]阐述了异构网络中多媒体业务的联合接纳控制策略;文献[12]研究了基于博弈论的接纳控制机制。上述文献虽然也提出了异构网络系统中的接纳控制策略,但关注重点仍然偏向于网络静态特征,或者研究实现起来具有一定的复杂性。为了更加合理地考虑网络系统状态,近年来,相关研究人员开始考虑异构网络动态下接纳控制策略,并提出了利用马尔可夫决策过程模型进行动态网络分析。文献[13]中提出的马尔可夫决策过程(Markov decision processes, MDP)是基于离散时间模型,垂直切换决策是由周期性地执行,而不是由网络变化触发。在文献[14]中,作者对一种基于负载均衡的接纳控制算法进行了研究分析。

以上相关研究,大多数未能综合权衡考虑用户移动性及网络动态性。同时,随着业务到达率的增长,传统网络接纳机制存在严重的阻塞问题,对到达新业务不能进行合理有效的接纳处理,不能有效地优化网络系统。而利用随机系统中马尔可夫决策过程理论可以有效考虑网络动态性,结合 QoS 约束,设定异构网络系统中业务到达时的阻塞上限目标值。通过本文提出的优化接纳控制模型研究,可以解决关注动态网络时刻变化,支持移动切换,降低网络阻塞率,提高系统收益,保障用户体验性。

2 网络拓扑及模型分析

2.1 拓扑分析

本文为了解决异构无线网络中业务接纳控制问题,结合目前实际网络特征,假设如图 1 所示的异构无线网络拓扑结构。在该网络拓扑示意图中,UMTS(universal mobile telecommunications system)为目前广泛使用的第三代移动通信(3G)蜂窝网络;WLAN 为无线局域网;BS 为基站;负责移动终端之间信息的传递。

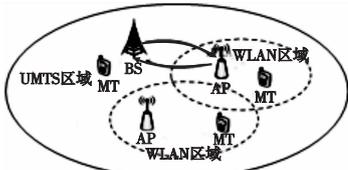


图1 异构无线网络典型拓扑示意图

在图 1 中,考虑到将整个异构网络划分成 UMTS 和 WLAN 区域。异构网络中存在的服务类型主要有新呼叫、水平切换、垂直切换。其中,当移动终端从一个基站覆盖范围内移动到另一个基站覆盖范围时会发生相应切换。在同一个无线区域不同基站间移动时发生水平切换,在不同无线区域不同基站移动时发生垂直切换。而呼叫接纳控制机制则是用来当新业务到达或者切换时,根据相应情况决定接受或者拒绝请求,这主要基于网络系统负载状态和服务类型优先权。因此,本文中 w_n, w_{th}, w_{hh} 分别表示新呼叫、水平切换、垂直切换的权重因子; $P_n^*, P_{th}^*, P_{hh}^*$ 分别表示以上任何一种类型到达时所满足 QoS 约束的最大允许阻塞率(或者掉话率)的上限目标值; O_n, O_{th} 和 O_{hh} 分表表示三种呼叫类型的优先权。在此,假设 $P_{hh}^* \leq P_{th}^* \leq P_n^*$ 和 $w_{hh} \geq w_{th} \geq w_n$ 且 $O_{hh} > O_{th} > O_n$ 来反映三种呼叫类型之间的优先顺序关系。因此,可以延伸出 K 种优先权业务具有下列关系: $O_{c_1} > O_{c_2} > \dots > O_{c_K}$ 。在这种情况下,可以得知: $P_{c_1}^* \leq P_{c_2}^* \leq \dots \leq P_{c_K}^*$ 和 $w_{c_1} \geq w_{c_2} \geq \dots \geq w_{c_K}$ 。当系统资源充足时支持所有类型呼叫。本文使

用以下一般假设:a)第 K 类业务($1 \leq k \leq K$)服从 λ_k 的泊松分布;b)第 k 类业务的逗留时间服从均值 $1/\mu_k$ 的指数分布。对于每一个异构网络系统模型,最大系统容量 C 是事先设定的。 C 是一个整数,代表特定系统的可用资源,它还可能代表着系统中最大的信道容量。

2.2 模型建立

为了进一步解决接纳控制问题,在网络拓扑给出的基础上,本节将提出一种基于马尔可夫决策过程理论的接纳模型,通过对该理论分析、推导、验证来评价异构无线网络中不同业务的呼叫接纳控制带来的网络性能。当各类呼叫业务到达网络时,网络运营商根据当前各网络状态(state space)和用户的业务类型进行相应的接纳控制决策,包括是否接纳该呼叫以及接纳到何种网络。在该马尔可夫决策过程模型中,主要有决策时刻、状态空间、行为空间、收益函数和转移概率。

2.2.1 决策时刻

考虑到动态过程中在时刻 $T = T_0, T_1, T_2 \dots$ 时,当网络中有业务事件到达或离开该网络系统时,网络运营商需要根据当前网络状态和用户的业务类型作出相应决策,这些时刻被称为马尔可夫决策过程中的决策时刻。一旦呼叫被允许接入或者离开系统后,系统状态也随之改变。

2.2.2 状态空间

在决策时刻,用 X 表示系统中状态的集合、 K 类型业务所占系统信道的集合。对于状态空间 X ,满足

$$X = \{x = (x_1, x_2, \dots, x_K) \mid x_1, \dots, x_K \geq 0, \sum_{k=1}^K x_k \leq C\} \quad (1)$$

其中: C 为系统总信道数, x_k 表示呼叫类型 k 所占据的信道数目。

2.2.3 行为空间

在决策时刻,用 A 表示系统中行为空间, A 由包含 K 位二进制元素组成,表示为

$$\{a = (a_1, a_2, \dots, a_K) \mid a_1, a_2, \dots, a_K \in \{0, 1\}\} \quad (2)$$

其中: a_k 为决策时刻每一种类型对应的行为。如果 $a_k = 0$,表示第 k 类业务拒绝接入,如果 $a_k = 1$,表示第 k 类业务允许接入。对于 x 属于 X 对应的行为空间 A_x 可以表示为

$$A_x = \begin{cases} \{a = (1, 1, \dots, 1)\} & \text{if } x = (0, 0, \dots, 0) \\ \{a = (0, 0, \dots, 0)\} & \text{if } \sum_{k=1}^K x_k = C \\ \{a = (a_1, a_2, \dots, a_K) \mid a_1, a_2, \dots, a_K \in \{0, 1\}\} & \text{if } 0 < \sum_{k=1}^K x_k < C \end{cases} \quad (3)$$

2.2.4 收益函数

收益函数 $r(x, a)$ 表示在特定状态 $x \in X$ 和特定行为 $a \in A_x$ 下的回价值。对于每一个状态的效益函数

$$r(x, a) = \sum_{k=1}^K w_k \cdot a_k \quad (4)$$

其中: w_k 为每一种呼叫类型的收益权重。

2.2.5 转移概率

转移概率为系统从一个状态经过一段时间后跳转到另外一个状态的概率。这里考虑系统处于某个特定状态 $x \in X$ 、行为 $a \in A_x$ 时逗留时间。期望逗留时间值可以表示为

$$\tau(x, a) = \left\{ \sum_{k=1}^K \lambda_k a_k + \sum_{k=1}^K x_k \mu_k \right\}^{-1} \quad (5)$$

其中: a_k 表示每一种类型的优化呼叫接入控制的行为决策。从状态 x 转移到状态 y 的转移概率可以表示为

$$p(y|x,a) = \begin{cases} a_1 \cdot \lambda_1 \cdot \tau(x,a) & \text{if } y = x + (1,0,\dots,0) \\ a_2 \cdot \lambda_2 \cdot \tau(x,a) & \text{if } y = x + (0,1,\dots,0) \\ \vdots & \vdots \\ a_K \cdot \lambda_K \cdot \tau(x,a) & \text{if } y = x + (0,0,\dots,1) \\ x_1 \cdot \mu_1 \cdot \tau(x,a) & \text{if } y = x - (1,0,\dots,0) \\ x_2 \cdot \mu_2 \cdot \tau(x,a) & \text{if } y = x - (0,1,\dots,0) \\ \vdots & \vdots \\ x_K \cdot \mu_K \cdot \tau(x,a) & \text{if } y = x - (0,0,\dots,1) \\ 0 & \text{if } y = x \end{cases} \quad (6)$$

2.2.6 平均效用

本文中,选用平均效用值作为评价该模型中涉及的性能标准。对于任一段时间,平均收益效用可以近似表示为

$$\hat{U} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E \left\{ \sum_{k=10}^T \int_{k=10}^T w_k \cdot a_k(t) dt \right\} \quad (7)$$

2.2.7 线性目标模型和目标函数

MDP 问题可以转换成求解线性目标问题,目标函数对应的不同约束条件组合可以用来阐述不同的 MDP 模型问题。在本文中,主要考虑最优接入控制策略。在追求系统最大收益的同时,考虑到用户对于不同类业务的阻塞忍受程度,设置一定的阻塞率(掉话率)上限来优化接纳控制。即对比本文提出的具有 QoS 约束的接纳控制模型与传统完全共享(complete sharing, CS-CAC)^[15]不具有 QoS 约束的接纳控制机制下的异构网络系统性能收益。对于式(8)~(11)的组合可以看成求解目标 1,不具有任何约束条件下的系统最大接纳效用。目标 1 和式(12)组合可以看成求解目标 2,具有切换阻塞上限的 QoS 约束条件下的系统最大接纳效用。目标 2 和式(13)组合可以看成求解目标 3,具有切换阻塞上限和新呼叫阻塞上限的 QoS 约束条件下追求系统最大收益。

最大接纳效用

$$\max \sum_{x \in X} \sum_{a \in A_x} r(x,a) \tau(x,a) \pi(x,a) \quad (8)$$

约束条件

$$\sum_{a \in A_y} \pi(y,a) - \sum_{x \in X} \sum_{a \in A_x} p(y|x,a) \pi(x,a) = 0 \quad (9)$$

$$\sum_{x \in X} \sum_{a \in A_x} \tau(x,a) \pi(x,a) = 1 \quad (10)$$

$$\pi(x,a) \geq 0, \quad x \in X, a \in A_x \quad (11)$$

$$\sum_{x \in X} \sum_{a \in A_x \cap A_{vh}} \tau(x,a) \pi(x,a) \leq P_{vh}^* \quad (12)$$

$$\sum_{x \in X} \sum_{a \in A_x \cap A_{hh}} \tau(x,a) \pi(x,a) \leq P_{hh}^* \quad (13)$$

对于上述问题,可以利用线性规划(linear programming)来求解各目标下的最优接纳控制策略。其中, $\pi(x,a)$ ($x \in X, a \in A_x$) 为决策变量, $\tau(x,a) \pi(x,a)$ 表示系统处于状态 X 并且选择接纳行为 a 的稳态概率。约束条件式(9)为稳态平衡等式,式(10)保证稳态概率之和为 1,式(11)表示 LP 最优解要存在。

3 仿真及分析

为了验证本文提出的基于马尔可夫决策过程的接纳控制模型的有效性,本章主要给出该模型与传统的完全共享下的接纳控制模型的性能比较,利用 MATLAB 实验平台验证其合理性。

3.1 仿真参数设置

仿真网络拓扑示意图如图 1 所示,考虑到 UMTS/WLAN 异构网络中存在多种服务类型,为了降低仿真复杂度,本文假设 $K=3$,即存在水平切换、垂直切换、新呼叫服务类型。同时,

虽然 UMTS 蜂窝网络具有软容量^[16]特性,但这不是本文研究的重点,同样为了降低仿真复杂度,在不影响实验验证正确性的基础上假设异构容量上限值 $C=10$ 。各业务到达系统服从参数 λ 的泊松分布,并且业务呼叫期望逗留时间服从参数为 μ 的指数分布。各呼叫类型逗留服务时间为 $\mu_n=1, \mu_{vh}=1.5, \mu_{hh}=2$,且选择不同类型接纳的相对权重分别为 $w_n=1, w_{vh}=5, w_{hh}=10$ 。呼叫到达率 $\lambda_n=\lambda_{vh}=\lambda_{hh}=\lambda$,范围为 $1 \sim 5$ 。新呼叫、垂直切换呼叫、水平切换呼叫掉话率上限值分别为 $P_n^*=2\%, P_{vh}^*=5\%$ 和 $P_{hh}^*=7\%$,其中 $P=P_{成}/P_{总}$ 。

3.2 性能分析

由对比图 2(a)可见,随着网络各业务类型到达率的逐渐上升,基于马尔可夫决策过程的接纳控制模型由于能够根据网络收益最大化进行不同呼叫类型的优先选择,在网络容量允许的情况下优先选择收益大的网络进行接纳;而完全共享机制则随机选择到达的业务。故当异构网络系统中业务种类及数目越来越多时,本文提出的策略模型具有更优的效果,即与传统共享机制相比,获得的平均收益将更加突出。由对比图 2(b)可知,当系统中业务到达量较小时,传统接纳模型由于不独立设定容量上限,只要整个网络中有容量即可接纳,而本文所提出的接纳控制模型由于需要考虑网络接纳收益,适当会以牺牲增加阻塞概率来换取较大网络收益,故而增加了水平切换的次数,相对传统接纳模型而言有稍高的水平阻塞率。但随着业务数目的逐渐增加,传统的接纳模型也必须进行大量的水平切换,两者水平切换阻塞率相差不大,然后本文所提出的接纳控制模型将水平阻塞率设定了一个上限,控制在一个相对合理且可接受的范围内。对于对比图 2(c),由于垂直切换具有相当高的优先权重,选择接纳具有非常高的收益。为了减少垂直切换引起的令人难以忍受的掉话情况的发生,当业务量到达系统很少时,仍优先选择垂直切换,因而相对传统接纳模型而言,其一直保持相对低的垂直切换掉话率。同时,由于设定了上限,故可以将其控制在可以接受的范围内。

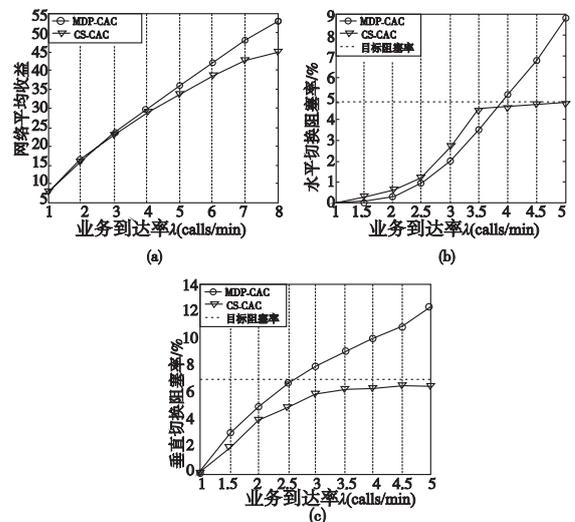


图2 仿真结果对比

仿真结果表明,本文所提出的基于马尔可夫决策过程的接纳控制模型可以很好地满足其 QoS 约束目标函数值不超过设定的上限值。为了保证系统负载的均衡性,业务从 UMTS 蜂窝网络基站下移动到另外一个 UMTS 蜂窝网络基站时发生水平切换,本文设定水平目标阻塞率上限值为 5%,通过理论分析和仿真实验得出最优接纳控制机制策略可以控制水平切换率

在一定范围,防止网络拥塞发生。而传统的完全共享信道机制因不具有相应 QoS 约束,则不能保证可控范围内的水平阻塞率,其相应阻塞概率值则会随着业务量增多而持续上升。同样,本文所提出的接纳控制机制也通过设定垂直切换目标上限值来将业务响应阻塞率控制在特定范围内,调整网络负载均衡,提高网络平均效用,保证了用户良好的体验性,最终达到网络平均收益最大化的目的。

4 结束语

本文对于异构无线网络中具有 QoS 约束条件下的优化呼叫接纳控制模型进行了研究,基于马尔可夫决策过程理论定义了异构网络中不同类型业务接纳控制行为并推导了状态转移概率和效用评价机制。通过仿真分析可以表明,异构无线网络中优化接纳控制机制能够在保证不同类型业务接入和切换成功率的基础上最大化平均接纳效用,能够更好地满足用户和网络需求。

参考文献:

- [1] 刘克. 实用马尔可夫决策过程[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
- [2] JEON W S. Call admission control for CDMA mobile communications systems supporting multimedia services [J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2002, 1(4): 649-659.
- [3] WANG Lei, ZHUANG Wei-hua. A call admission control scheme for packet data in CDMA cellular communications [J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2006, 5(2): 406-416.
- [4] HONG D, RAPPAPORT S S. Traffic model and performance analysis for cellular mobile radio telephone systems with prioritized and nonprioritized handoff procedures [J]. *IEEE Trans on Vehicular Technology*, 1986, 35(3): 77-92.
- [5] 卢辉斌, 周新建, 李娜. 3G 动态预留呼叫接纳控制算法研究[J]. *通信技术*, 2008, 41(12): 235-238.
- [6] NIYATO D, HOSSAIN E. Call admission control for QoS provisioning in 4G wireless networks: issues and approaches [J]. *IEEE Network*, 2005, 19(5): 5-11.
- [7] ZHANG Shi-ying, YU R R, LEUNG V C M. Joint connection admission control and routing in IEEE 802.16-based Mesh networks [J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2010, 9(4): 1370-1379.
- [8] 陈明欣, 刘干, 朱光喜. WLAN 中基于效用的呼叫接纳控制策略[J]. *电子学报*, 2008, 36(7): 1429-1434.
- [9] LI Wei, CHAO X. Call admission control for an adaptive heterogeneous multimedia mobile network [J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2007, 6(2): 515-525.
- [10] SONG Wei, JIANG Hai, ZHUANG Wei-hua, et al. Resource management for QoS support in cellular/WLAN interworking [J]. *IEEE Network*, 2005, 19(5): 12-18.
- [11] 王亚楠, 夏海轮, 冯春燕. 异构网络中多媒体业务的联合呼叫接纳控制[J]. *西安电子科技大学学报*, 2010, 37(5): 953-959.
- [12] 陈明欣, 朱光喜, 刘干. 异构网络无线资源管理中的非合作博弈[J]. *小型微型计算机系统*, 2009, 30(3): 446-450.
- [13] CHEN Huan, KUMAR S, KUO C C J. Dynamic call admission control scheme for QoS priority handoff in multimedia cellular systems [C]//Proc of IEEE Wireless Communications and Networking Conference. 2002: 114-118.
- [14] SON H, LEE S, KIM S C, et al. Soft load balancing over heterogeneous wireless networks [J]. *IEEE Trans on Vehicular Technology*, 2008, 57(4): 2632-2638.
- [15] 许应新, 许都. 基于短包优先的动态阈值共享缓存管理策略的研究[J]. *计算机应用研究*, 2011, 28(5): 1805-1807.
- [16] 李鹏, 王海燕. CDMA2000 系统小区无线容量分析[J]. *海南大学学报:自然科学版*, 2006, 24(3): 261-264, 270.
- [7] (上接第 1157 页) and Modeling of Computer Systems. New York: ACM Press, 2011: 305-316.
- [9] KIM J W, KUMAR V S, MARATHE A, PEI G, et al. Modeling cellular network traffic with mobile call graph constraints [C]//Proc of Winter Simulation Conference. [S. l.]: IEEE Press, 2011: 3165-3177.
- [10] ZHANG Ying, ARVIDSSON A. Understanding the characteristics of cellular data traffic [C]//Proc of ACM SIGCOMM Workshop on Cellular Networks: Operations, Challenges, and Future Design. New York: ACM Press, 2012: 13-18.
- [11] ZHUO Xue-jun, GAO Wei, CAO Guo-long. An incentive framework for cellular traffic offloading [J]. *IEEE Trans on Mobile Computing*, 2014, 13(3): 541-555.
- [12] LESKOVEC J, BACKSTROM L, KUMAR R, et al. Microscopic evolution of social networks [C]//Proc of the 14th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. New York: ACM Press, 2008: 462-470.
- [13] FIGUEIREDO F, BENEVENUTO F, ALMEIDA J M. The tube over time: characterizing popularity growth of YouTube videos [C]//Proc of the 4th ACM International Conference on Web Search and Data Mining. New York: ACM Press, 2011: 745-754.
- [14] KAIRAM S, WANG D J, LESKOVEC J. The life and death of online groups: predicting group growth and longevity [C]//Proc of the 5th ACM International Conference on Web Search and Data Mining. New York: ACM Press, 2012: 673-682.
- [15] PARK K, WILLINGER W. The Internet as a large-scale complex system [M]. Oxford: Oxford University Press, 2005.
- [16] LIU Y B, YUAN P. A study of user downloading behavior in mobile Internet using clickstream data [C]//Proc of the 3rd International Symposium Intelligent Information Technology and Security Informatics. [S. l.]: IEEE Press, 2010: 255-257.
- [17] KOHLI S, KUMAR E. Evolution of user dependent model to predict future usability of a search engine [C]//Proc of World Congress on Information and Communication Technologies. [S. l.]: IEEE Press, 2011: 285-290.
- [18] ZAVADSKAS E K, TURSKIS Z. A new logarithmic normalization method in games theory [J]. *Informatica*, 2008, 19(2): 303-314.
- [19] DIAKOULAKI D, MAVROTAS G, PAPAYANNAKIS L. Determining objective weights in multiple criteria problems: the critic method [J]. *Computers and Operations Research*, 1995, 22(5): 763-770.
- [20] LIU Zi-long, XU Jian. Study on the effects of virtual community involvement on online stickiness and repurchase intention [C]//Proc of International Conference on e-Education, e-Business, e-Management and e-Learning. [S. l.]: IEEE Press, 2010: 79-83.