

## 流媒体点播中用户交互式行为建模

刘 威 程文青

(华中科技大学电子与信息工程系智能互联网络技术湖北省重点实验室 武汉 430074)

**摘 要:** 现有的流媒体点播用户行为模型对用户的交互性考虑不足, 该文提出了一种新的用户交互式行为模型。仿真结果表明, 该模型可生成不同交互强度和请求模式的流媒体用户行为合成记录, 其统计特征更为合理, 拟合实际交互式用户记录较好。

**关键词:** 交互式流媒体; 用户行为模型

**中图分类号:** TP37, TP393.03

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2007)09-2252-05

## Modeling Interactive User Behavior in Streaming-on-Ddemand

Liu Wei Cheng Wen-qing

(Dept. of Electronics and Information Eng., Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Current user behavior models in streaming application ignore user interactivity, a new model is proposed for interactive user behavior in steaming-on-demand. Simulation results show that it can generate synthetic traces with different interactivity degree and user request mode. The statistical characteristics of main objects in synthetic traces are more reasonable, and the inner content popularity approximates actual interactive user traces well.

**Key words:** Interactive streaming; User behavior model

### 1 引言

用户在流媒体点播应用中的行为特征是设计流媒体分发方案的基础。研究用户行为特征的主要手段是建立用户行为记录的生成模型, 模拟用户发起各种动作的机制。现有相关工作按照研究背景分成两类: 组播视频点播(Multicast VOD)系统中的用户行为生成模型<sup>[1-5]</sup>, 基于互联网的内容分发系统中用户行为生成模型<sup>[6,7]</sup>。

在组播视频点播的研究中出现过的用户行为生成模型包括, 文献[1,2]用泊松分布描述用户交互请求的到达过程和强度, 文献[3-5]采用固定概率描述交互式动作的转移过程。由于组播系统关心用户请求在时间上的分布特性, 因此忽略了受访媒体热点的相关特征, 如用户发起请求点的位置、交互式请求持续时间长度等。

在对互联网媒体分发系统的研究中广泛采用合成用户访问模型进行性能评估。例如, 美国波士顿大学研发的 GISMO<sup>[6]</sup>、美国杜克大学和惠普公司联合研发的 SynMedia<sup>[7]</sup> 等用户记录合成工具。这些工具对媒体流行度特征、会话到达率、会话间隔时间等特征进行建模, 但目前都没有考虑用户交互式行为的建模。

在交互式流媒体应用场景下的用户行为建模, 不但需考

虑用户在某个会话中的各种动作转移, 还需对媒体对象、会话对象等整体特性进行描述。本文结合前人在上述两个领域的研究成果, 以符合实际观察结果的统计模型随机生成受访媒体、用户会话等对象, 以符合用户动作产生机制的模型对用户交互动作特征进行建模。

### 2 现有用户行为模型的不足

现有交互式流媒体系统中对各对象统计特性的研究, 主要是对远程教育系统中的学生交互行为的分析, 如文献[8]对美国威斯康星州大学 eTeach 系统和美国加州伯克利大学 BIBS 系统的统计和分析; 文献[9]对美国华盛顿大学校园网流媒体流量的统计和分析; 文献[10]对澳大利亚墨尔本大学外语教学系统的分析等。表 1 中总结了文献[8-10]中关于用户交互式行为的统计特征。

现有用户交互式行为的模型主要涉及交互式动作的转移概率模型和交互式动作的到达分布模型。在动作的转移概率方面, 文献[5]以二状态马尔可夫模型(正常播放、快进或快倒)描述用户是否采用交互式动作; 文献[3]中将二状态马尔可夫模型的非播放状态扩展为其它交互式动作; 文献[4]采用九状态马尔可夫模型描述各种 VCR 操作的状态, 规定了所有用户会话中交互式动作转移概率。在动作的到达分布方面, 文献[1,2]中假设用户发起的交互式动作在到达时间上服从泊松分布; 在 GISMO<sup>[6]</sup> 的交互式模型生成中, 对相同媒体的会话发起时间服从 Pareto 分布。

2006-02-07 收到, 2006-12-22 改回

国家自然科学基金(60572049, 60602029)和湖北省自然科学基金(2005ABA264)资助课题

表 1 交互式流媒体系统中各对象的统计特性

名称	描述
请求到达率	多假设为泊松(Poisson)分布, 文献[8]观察到尾部裁剪 Pareto 分布(Heavy-tailed Pareto) 分布
时域临近性	用户访问热点视频的动作在时间上非常接近 <sup>[9]</sup> ; 在每个小时所访问的新媒体对象的大多数在未来 8 小时也不会被访问 <sup>[9]</sup>
空域临近性	对热点媒体对象的选择较为集中, 超过 40%的会话所访问的媒体对象可以共享 <sup>[9]</sup>
视频对象的流行度	多数情况下媒体对象的流行度可用类 Zipf 分布描述 <sup>[9]</sup> , 某些情况下双 Zipf 分布更加接近 <sup>[9]</sup>
会话持续时间	较长视频对象的会话长度可用混合型的 Gamma/ Pareto 分布拟合; 较短视频对象的会话长度分布可用对数正态(Lognormal)分布或指数(Exponential)分布拟合 <sup>[9]</sup>
用户交互性特征	交互请求数量随着视频媒体的长度而增加, 平均每个会话内的交互动作低于 10 个 <sup>[9]</sup> ; 采用快速快倒(FP/FB)的情况非常少 <sup>[8,10]</sup> ; 较短视频对象中跳倒(JB)动作较为普遍, 较长视频对象中跳进(JF)动作与跳倒(JB)有同样的发生概率 <sup>[9]</sup> ; 跳进跳倒(JF/JB)动作的请求间隔时间和请求持续时间可用对数正态(Lognormal)分布拟合 <sup>[10]</sup>

上述这些对用户行为模型并不完善, 主要表现为没采用符合实际统计特征的数学模型, 提出的模型与所观测到的统计特征脱节。同时, 在对交互式用户行为的刻画方面也存在很多不足:

(1)缺乏用户交互特征合理的整体刻画。例如, 文献[4]将非播放的交互式动作的转移概率大小视为交互强度, 文献[1,2]将用户在单位时间内发起的平均 VCR 动作数量作为交互强度。这些模型中可能存在用户在一个会话中发起数百个交互式动作的不合理情况。

(2)没有对用户交互动作发生状态进行全面考虑。现有工作简化甚至忽略请求播放点、请求持续的距离等特征。例如, 文献[11]直接假设用户的交互式行为就是播放到内容的 40% 或者 60%。但事实上用户发起交互式动作时与其播放点、媒体对象长度等因素有关, 如用户在热点内容部分很少发起跳转动作, 对较短媒体对象很难发起大量交互式动作。

(3)现有用户交互模型不能涵盖从实际观察到的多种用户请求模式。定义“用户请求模式”为用户在访问流媒体对象时的兴趣趋势。最简单的用户请求模式是“从头播放到结尾”(play-to-the-end), 即无任何交互式动作。常见用户请求模式是“从头播放中途离开”或“提前离开”(early-abort), 即用户从头播放到媒体某个部分即离开。这种用户请求模式多次在对实际流媒体访问日志中观察到<sup>[8,9]</sup>。更为普遍的用户请求模式是“随机”请求模式, 即用户对媒体起始部分以外的内容也会表现出兴趣, 在近期研究中被观察到<sup>[12]</sup>, 但尚无相关建模工作。

3 交互式用户请求的建模

为简化起见, 本文在建模过程中主要考虑在互联网媒体

点播应用中最常用的播放(Play)、跳进(Jump Forward, JF)、跳倒(Jump Backward, JB)、中止(Abort)等动作。用户请求记录的建模包括两个部分: 媒体对象和会话对象的生成模型, 用户会话中交互式用户动作的生成模型。

3.1 媒体对象和会话对象的生成模型

媒体对象集合的统计特征包括媒体对象文件大小的分布、媒体对象的流行度分布等。对媒体的访问会话特征也是媒体的特征之一。会话(Session)定义为用户对某个媒体对象的一系列请求操作, 以用户的第一次访问开始到用户选择离开结束。GISMO<sup>[6]</sup>给出几种典型的媒体对象和用户会话的统计特征。参考前文表 1 综述的实际观察到的统计特性, 定义生成媒体对象的主要统计特征如表 2 所示。生成模型将媒体对象和会话对象的数量作为输入参数, 用表 2 中的模型和参数获得媒体对象的长度、媒体对象的流行度(以媒体对象的受访会话数量衡量)、会话发起间隔时间等随机量。

3.2 交互式动作的生成模型

本文提出一套全新的交互式动作生成模型, 以符合实际观察到的特征分布生成随机请求行为, 包括交互式动作转移模型、交互式动作时间状态模型、交互式动作与媒体内容偏好关系模型。

3.2.1 交互式动作转移模型 采用类马尔可夫状态转移图描述动作的转移。约定用户在每个时刻只能采用一个交互式动作, 且该动作仅仅依赖于前一个动作。描述动作相关性的动作转移模型见图 1。

图 1 中以播放状态(Play/Resume)为各状态的核心, 设定播放到其他动作的转移概率分别为  $Pr_{play}$ ,  $Pr_{abort}$ ,  $Pr_{jf}$  和  $Pr_{jb}$  (满足  $Pr_{play} + Pr_{jf} + Pr_{jb} + Pr_{abort} = 1$ )。约定在每个跳进动

表 2 媒体对象和会话对象的统计特征

对象	数学模型	分布密度函数	典型参数配置
媒体对象受访次数	Zipf-like	$f(x) \sim 1/x^{\alpha}, x=1,2,\dots,N$	$\alpha=0.73, N=100$
会话的时间相关度	Pareto	$f(x) = e^{-(\ln x - \mu)^2 / 2\sigma^2} / (x\sigma\sqrt{2\pi}), x>0$	$\beta=1.0, k=0.05$
媒体对象的大小	Log-normal	$f(x) = \alpha k^{\alpha} x^{-\alpha-1} / (1-k^{\alpha}), k<x<1$	$\mu=10.5, \sigma=0.5$

作(JF)和跳退动作(JB)之后都是播放动作(Play),即到播放的转移概率为 1;约定中止动作(Abort)作为动作转移过程的结束,即到播放的转移概率为 0。

**3.2.2 交互式动作时间状态模型** 目前还没有对交互式动作持续时间的建模工作,本文提出一种新的生成模型如图 2 所示。

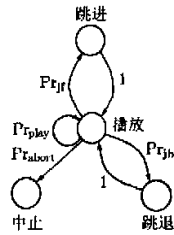


图 1 交互式动作转移模型示意图

假设视频对象被等分为可数的播放单元,即图 2 中圆形部分。播放单元是交互式动作操作的原子级对象,例如对应于 1s 播放时间的存储单位。在播放单元上所采用的不同交互动作视为该单元的状态,则用户会话可被描述为播放单元的状态转移过程。在某个播放单元上所采用某个动作的概率由交互式动作转移模型描述,交互动作所持续的时间由交互式动作时间状态模型描述。如文献[10,13]中观察到的,播放和跳转动作的持续时间呈现对数正态(Lognormal)分布。按文献[10]的观察结果,我们约定 60%的跳转动作是跳进。

交互式动作时间状态模型的生成过程如下:首先,约定用户第一个动作为正常播放,播放距离是服从对数正态分布播放单元的随机数;此后,以概率  $Pr_{play}$ ,  $Pr_{abort}$ ,  $Pr_{jf}$  和  $Pr_{jb}$  选择下一个动作,播放或者跳转的距离为服从对数正态分布的播放单元的随机数;这种过程不断进行下去,直到该用户会话的结束。会话结束的标志为发生中止操作、或者播放点到达媒体结尾。

**3.2.3 交互式动作与媒体内容偏好关系模型** 现有文献多假设各种动作的转移发生概率在所有的播放点都是一致的<sup>[3-5]</sup>。然而,该假设与实际情况不符,如用户因不熟悉媒体内容和关心内容结局在起始部分和结尾部分很少跳进。每个媒体一般会有某个部分是用户访问热点,例如娱乐电影的剧情高潮部分、远程教育中难以理解的章节等,这些部分将是用户重复访问的内容。

对交互式动作与媒体播放点的关系进行初步建模,引入“内容偏好”的概念来描述跳转动作的趋势和目标。约定跳

转动动作的目的地以概率  $Pr_{bias}$  落入内容偏好区间、然后播放 0 至内容偏好区间的结束,如图 3 所示。

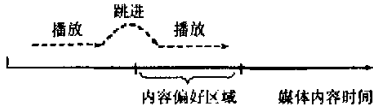


图 3 交互式动作与媒体内容偏好关系模型示意图

图 3 中,紧跟在播放动作如果发生跳转动作,将以概率  $Pr_{bias}$  把跳转结束点落于内容偏好区域内,其后的播放动作将延续至内容偏好区域的结束。内容偏好的引入是为了对随机跳转动作的作用距离进行约束,从而刻画媒体热点内容的产生。需要指出的是,由于目前还没有媒体热点分布的统计观察结果,因此建模过程中对每个视频采取了随机选取中间附近部分为内容偏好区间的方法。考虑到实际媒体内容编排时,情节高潮一般在中间部分,这种简单的假设也是合理的。

**3.2.4 生成交互式动作模型的小结** 交互式动作的统计特征及其配置如表 3 和表 4 所示:表 3 中采用各种交互动作的转移概率服从文献[4]等中的通行假设;跳转动作方向分布服从文献[10]中观察到的 60%跳进的情况;表 4 中每个播放或者跳转动作的持续时间服从文献[10,13]观察到的统计分布。

4 仿真与评估

4.1 用户交互式行为模型的合理性分析

本文采用 Matlab6.5 为平台编制了生成交互式用户请求的生成工具。采用前文提出的模型,配置表 3 和表 4 中各种参数,获得不同交互强度和用户请求模式的用户请求记录如表 5 所示。其中,按照请求模式的不同和交互强度的增加,依次将这些记录记为 A 到 C。每个用户记录都有 100 个视频媒体对象和 2000 个用户会话。其中,以非正常播放动作发生的概率(即  $1 - Pr_{play}$ )以及跳转动作发生的概率( $Pr_{jump} = Pr_{jb} + Pr_{jf}$ )来表征交互强度的大小,通过配置  $Pr_{play}$ ,  $Pr_{jump}$  和  $Pr_{abort}$  实现不同的用户请求模式。

4.1.1 合成用户记录的整体统计特性 表 6 列出了用户记录

表 3 交互式动作的生成参数

名称	描述	典型配置
$Pr_{play}$	播放动作的发生概率	0.70
$Pr_{abort}$	中止动作的发生概率	0.05
$Pr_{jf}$	跳进动作的发生概率	0.15
$Pr_{jb}$	跳退动作的发生概率	0.10
$Pr_{bias}$	跳入内容偏好区间的概率	0.60

表 4 交互式动作的统计特征

对象	数学模型	分布密度函数	典型参数配置
跳转持续时间	Log-normal	$f(x) = e^{-(\ln x - \mu)^2 / 2\sigma^2} / (x\sigma\sqrt{2\pi}), x > 0$	$\mu = -3.76, \sigma = 1.01$
播放持续时间	Log-normal	$f(x) = e^{-(\ln x - \mu)^2 / 2\sigma^2} / (x\sigma\sqrt{2\pi}), x > 0$	$\mu = -4.19, \sigma = 1.13$

表 5 合成交互式用户请求记录的配置

序号	媒体播放平均长度 (min)	生成记录的统计特征		
		所有媒体大小(GB)	会话平均动作个数	会话平均持续时间(s)
A	2698.96	26.99	2.0	2928.18
B	2974.53	29.75	2.0	822.79
C	2540.26	25.40	6.12	1163.73

表 6 合成交互式用户请求记录的统计特征

序号	用户请求模式	交互式动作的发生概率		
		$Pr_{play}$	$Pr_{jump}$	$Pr_{abort}$
A	从头播放到结尾	1.00	0.00	0.00
B	从头播放中途离开	0.90	0.00	0.10
C	随机播放	0.80	0.15	0.05

A 到 C 的统计特性,其中视频媒体长度以分钟为单位,媒体文件大小按照 25fps 的帧速率和 4kB 的平均帧大小计算。表 6 中,可以发现获得的统计特征基本符合对交互强度的理解。从头播放中途离开的用户模式(记录 B),随着中止动作发生概率的增加,则用户交互强度增大,会话的平均持续时间减小。随机播放的用户模式(记录 C),随着跳转动作发生概率的增加,则用户交互强度增大,会话中的平均交互式动作的个数增多。

**4.1.2 合成用户记录的内容流行度分布** 定义对每个媒体访问的会话的累计总数为媒体流行度;定义对媒体各部分的累计访问次数,作为媒体内容流行度。考察各用户记录中流行度最高的媒体对象的媒体内容流行度,是否符合我们对用户请求模式的建模要求。选择 A 到 C 中会话个数最多的视频对象作为样例,做出其媒体内容的流行度如图 4 所示。

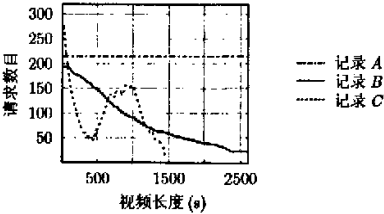


图 4 各合成用户记录样例的媒体内容流行度

图 4 中,记录 A 样例的各部分流行度基本相同,符合从头播放到结尾的用户请求模式。记录 B 样例的内容流行度随着媒体内容时间的增加而下降,符合从头播放中途离开的用户请求模式。记录 C 样例的内容流行度都在媒体内容的中间部分出现了热点部分,热点片段区域随着跳转动作发生概率的增加而更加明显、内容流行度分布曲线更加陡峭,符合随机播放的用户请求模式。

4.2 用户交互式行为模型对实际记录的拟合

本文收集了两个实际交互式媒体点播服务的用户访问记录,考察用户交互式行为模型对实际记录的拟合程度。一

个用户记录来自于长江网(www.cjmedia.com.cn)的一个提供娱乐视频流媒体点播的商业网站,日志记录涵盖了 210 天内用户付费点播娱乐节目的情况<sup>[14]</sup>。另一个用户记录来自于美国威斯康星州大学的 eTeach 远程教学系统,日志记录涵盖了 440 天内用户点播教学视频的情况<sup>[8,12]</sup>。由于学生用户对教学视频热点内容的反复学习播放,播放教育视频具有比娱乐视频更大的交互程度。本小节面向流媒体分发应用需求,分别选取娱乐视频和教育视频访问日志中典型的热门视频对象,采用本文交互式行为模型对其视频内容流行度进行拟合。

**4.2.1 对交互式娱乐视频记录的拟合** 选取娱乐视频中较为热门的一个视频对象作为拟合对象,该对象累计访问次数为 60 次。初步分析可知,用户对该视频对象的交互式访问符合“从头播放中途离开”的用户请求模式。因此,配置交互式动作模型参数为:  $Pr_{play}=0.7$ ,  $Pr_{jf}=0.1$ ,  $Pr_{jb}=0$ ,  $Pr_{abort}=0.2$ , 无内容偏好,会话对象以及交互式动作的统计特征同前文配置。多次实验,做出视频内容流行度拟合结果如图 5 所示。

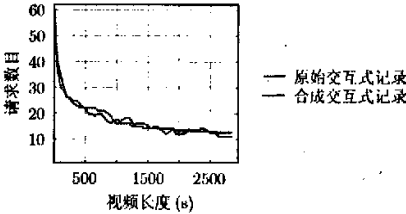


图 5 对交互式娱乐视频内容流行度数据的拟合

图 5 中,两条曲线拟合的结果为:归一化协方差值 0.95565,  $R^2$  值 0.99515。因此,合成交互式记录较好拟合了原始实际记录的内容流行度。

**4.2.2 对交互式教育视频记录的拟合** 选取教育视频中较为热门的一个视频对象为拟合对象,该对象累计访问次数为 80 次。初步分析可知,用户对该视频对象的交互式访问符合内容流行度符合“随机播放”的交互式模式。因此,配置交互式动作模型生成参数为:  $Pr_{play}=0.75$ ,  $Pr_{jf}=0.14$ ,  $Pr_{jb}=0.06$ ,  $Pr_{abort}=0.05$ ,  $Pr_{bias}=0.4$ , 内容偏好区间为视频长度的 0.6 倍左右,会话对象以及交互式动作的统计特征同前文配置。多次实验,做出视频内容流行度拟合结果如图 6 所示。

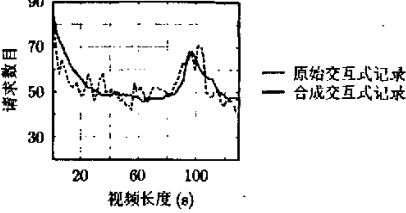


图 6 对热门交互式教育视频内容流行度数据的拟合

图 6 中,实际的原始交互式记录曲线在多处呈现出“毛刺”,即局部内容热点,其中在 80~110s 之间的热点的最高请求次数接近起始播放点的播放次数,属于典型的随机播放模

式。图中可以看到合成交互式记录较好地拟合了原始交互式记录的变化趋势。两条曲线拟合的结果为：归一化协方差值 0.77843,  $R^2$  值 0.94047。因此, 合成交互式记录较好地反映了原始的实际记录的整体内容流行度特征。

## 5 结束语

交互式的流媒体点播应用是互联网上占据主要流量的重要应用。用户行为的生成模型是设计流媒体分发方案的基础。过去在此方面的建模忽略了用户的交互性, 不能有效地模拟用户访问热点的形成。

本文提出了一种全新的用户交互式行为的建模方案, 该方案以符合实际观察结果的数学模型生成流媒体应用中的媒体对象、会话对象等, 然后以用户交互式动作转移模型、用户交互式动作时间状态模型、交互式动作与媒体内容偏好关系模型等对用户交互式行为进行全面的刻画描述。仿真结果表明, 利用该模型研制的用户交互式行为仿真工具可以形成不同用户交互强度和用户请求模式的合成记录, 而且媒体对象、会话对象的统计特征符合设定的数学模型, 交互式动作在各方面的累计效果特征合理且符合实际。该模型可以较好地拟合实际的交互式娱乐视频和教育视频的不同用户请求模式的用户访问热点。

## 参考文献

- [1] Kim S E, Sivasubramaniam A, and Das C R. Analyzing cache performance for video servers. In Proc. of International Conf. on Parallel Processing (ICPP) 1998, Minneapolis, Minnesota, USA, August 1998: 38-47.
- [2] Kim S E and Das C R. A reliable statistical admission control strategy for interactive video-on-demand servers with interval caching. In Proc. of International Conf. on Parallel Processing (ICPP) 2000, Los Alamitos, CA, USA, 2000: 135-144.
- [3] Li Victor O L, Liao Wanjiun, Qiu Xiaoxin, and Wong Eric W M. Performance model of interactive video-on-demand systems. *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, 1996, 14(6): 1099-1109.
- [4] Abram-Profeta E L and Shin K G. Providing unrestricted VCR functions in multicast video-on-demand servers. In Proc. International Conf. on Multimedia Computing and Systems (ICMCS) 1998, Austin TX, USA, June 1998: 66-75.
- [5] Dey-Sircar J K, Salehi J D, Kurose J F, and Towsley D. Providing VCR capabilities in large-scale video servers. In Proc. ACM International Conference on Multimedia 1994, New York, USA, October 1994: 15-23.
- [6] Jin S and Bestavros A. GISMO: A generator of Internet streaming media objects and workloads. In Proc. ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review, December 2001, 29(3): 2-10.
- [7] Tang W, Fu Y, Cherkasova L, and Vahdat A. Medisyn: A synthetic streaming media service workload generator. In Proc. of International Workshop on Network and Operating Systems Support for Digital Audio and Video (NOSSDAV) 2003, Monterey, CA, USA, June 2003: 12-21.
- [8] Almeida J M, Krueger J, Eager D L, and Vernon M K. Analysis of educational media server workloads. In Proc. of International Workshop on Network and Operating Systems Support for Digital Audio and Video (NOSSDAV) 2001, New York, USA, June 2001: 21-30.
- [9] Chesire M, Wolman A, Voelker G M, and Levy H M. Measurement and analysis of a streaming-media workload. In Proc. USENIX Symp. on Internet Technologies and Systems 2001, Boston, Massachusetts, USA, March 2001: 1-12.
- [10] Branch P, Egan G, and Tonkin B. A client caching scheme for interactive video-on-demand. In Proc. IEEE of International conf. on Networks (ICON) 1999, Melbourne, Australia, September 1999: 391-397.
- [11] Wu K L, Yu P S, and Wolf J L. Segment-based proxy caching of multimedia streams. In Proc. of ACM WWW 2001, Hong Kong, China, May 2001: 36-44.
- [12] Costa C, Cunba I, Borges A, and Ramos C, *et al.* Analyzing client interactivity in streaming media. In Proc. of ACM WWW 2004, New York, USA., May 2004: 534-543.
- [13] Padhye J and Kurose J. Continuous-media courseware server: A study of client interactions. *IEEE Internet Computing Magazine* 1999, 3(6): 65-73.
- [14] Zongkai Y, Tai W, Xu D, and Wei L, *et al.* Investigation on the content popularity distribution under K-transformation in streaming applications. In Proc. IEEE TENCON'05, Melbourne, Australia, November 2005: 1659-1663.

刘威: 男, 1977年生, 副教授, 博士, 研究方向为多媒体内容分发技术、无线通信网络等。

程文青: 女, 1964年生, 教授, 博士, 研究方向为多媒体网络通信、无线通信网络等。