

# 基于涌现视角的类 BitTorrent 性能分析模型

黄红兵,任传俊,金士尧

(国防科学技术大学计算机学院,湖南长沙 410073)

**摘要:** BitTorrent 作为一种典型的实际 P2P 系统,在理论和实践中引起了广泛关注. 给出一个有效的类 BitTorrent 系统分析模型一直是人们努力的一个方向. 本文基于系统科学中的涌现概念,从微观到宏观来研究 BitTorrent 系统,给出了 BitTorrent 系统的微-宏观分析模型. 首先从相对清晰的系统微观(结点)状态和行为入手,选取表征 BitTorrent 结点的参数,称为微观参数;根据 BitTorrent 的结点行为,基于这些微观参数,给出系统的微观行为描述;选取表征 BitTorrent 宏观态的变量,称为宏观变量;然后依据宏观变量与微观变量的关系,基于微观行为描述,建立系统的宏观演化方程;进而研究系统的宏观特性. 实验表明该模型能够有效刻画 BitTorrent 系统的行为.

**关键词:** BitTorrent 系统;性能分析;涌现;微-宏观模型

**中图分类号:** TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 02-0307-08

## A Performance Analysis Model for BitTorrent-Like Peer-to-Peer Systems Based on the Notion of Emergence

HUANG Hong-bing, REN Chuan-jun, JIN Shi-yao

(School of Computer Science, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract:** As a typical and practical peer-to-peer system, BitTorrent gets amount of attention in theory and practice. The work that has been taken great efforts is to provide an effective model for analyzing BitTorrent. Based on the notion of emergence in system science, this paper investigates BitTorrent in a broad view which is from microscopic to macroscopic, and gives a micro-macro analytical model for them. To obtain this model, we start from the states of microscopic BitTorrent, i. e. nodes' states, and get the parameters that represent a node, called microscopic parameters. Based on these parameters and the activities of a node, the microscopic behaviors of BitTorrent are characterized. At the same time, several macroscopic parameters are chosen to describe systematic states of BitTorrent. Based on the microscopic behaviors, by exploring the relationship between microscopic and macroscopic parameters, the macroscopic equations characterizing BitTorrent's evolution are established. And based these equations, macro properties of BitTorrent can be obtained. Experiment results indicate that this model can effectively catch the behaviors of BitTorrent.

**Key words:** BitTorrent; performance analysis; emergence; micro-macro model

### 1 引言

作为一种典型的实际 P2P 系统, BitTorrent<sup>[1]</sup>已经在理论和实践中都引起了广泛关注. 一方面人们通过跟踪测量<sup>[2~6]</sup>或仿真分析<sup>[7,8]</sup>,发现了 BitTorrent 的一些系统特性;另一方面希望通过建立起 BitTorrent 的数学模型,来理解这些特性,并期望找到影响系统性能的因素<sup>[9~18]</sup>.

BitTorrent 系统的数学模型中,以流体模型(Fluid Model)影响最为深远. 第一个 BitTorrent 流体模型是 Qiu 和 Srikant 在 2004 年的 SIGCOMM 上给出的<sup>[9]</sup>. 这一模型以请求者到达速率、上传带宽、下载带宽、下载中止率、种子离去率、文件共享效率为参数,描述了 BitTorrent 系

统中种子结点和下载结点的演化;给出了平均种子数、平均下载结点数、平均下载时间与这些参数之间的关系. 但是,这一模型只是一个一般化的模型,抽象掉了许多细节问题,特别是没有考虑结点的异构性.

针对这些不足,人们给出了许多改进模型<sup>[10~16]</sup>. Lei 等人<sup>[10]</sup>基于大量的测量和跟踪分析,确定了请求者到达的时间分布,进而给出了种子数、下载结点数等随时间变化的具体函数关系. 文献[11]给出的模型,考虑了带宽约束和结点的连接概率,区分了两类下载结点. Wang 等人<sup>[12]</sup>在建立模型时,考虑了下载结点和种子结点的忍耐力,即影响下载中止率和种子离去率的要素. 而文献[13]和[14]中的模型中考虑了异构网络环境,即有两类网络访问带宽的情况. 而文献[15]给出的模型则

根据下载结点拥有的文件块数,对结点的状态进行了区分,在系统层面上考察各种状态结点数目的变化.薛广涛等<sup>[16]</sup>考虑了网络拓扑,并针对他们改进的层次化 BitTorrent,给出了数学模型.

以上这些 BitTorrent 流体模型基本都是系统的宏观模型,在揭示结点行为和系统特性之间的联系方面比较弱.有鉴于此,本文基于系统科学中的涌现概念,从微观到宏观来研究 BitTorrent,以建立起能够揭示结点特征和系统性能之间定量关系的分析模型.

## 2 涌现视角下的 BitTorrent 系统

### 2.1 BitTorrent 系统

BitTorrent 的基本思想是将一个共享文件分成许多大小相等的文件块(chunk 或 piece),系统中的每个结点拥有这一文件的部分或全部的文件块;当系统的一个结点试图下载文件时,它同时和其他若干结点连接,并行地从这些结点下载同一文件的不同块;同时该结点也为其他请求结点上传自己拥有的文件块.那些拥有部分文件块的结点称为下载结点(Downloader 或 Leech),而拥有全部文件块的结点称为种子(Seed).

BitTorrent 的基本组成和协议过程如图 1<sup>[17]</sup>所示.为实现 BitTorrent 的部署,共享文件的初始提供者需要将该文件的元信息文件(扩展名为 .torrent)发布到一个 Web 服务器上,然后其它结点通过浏览网页(图 1 中的 1)发现该文件的发布信息,如果感兴趣则下载元信息文件(图 1 中的 2);通过它完成和 Tracker 服务器的联接(图 1 中的 3),Tracker 服务器随后会随机给出一个拥有该文件的若干结点的信息(图 1 中的 4),通过这些信息,这个结点就可以和其他结点建立链接,进行上传和下载(图 1 中的 5).

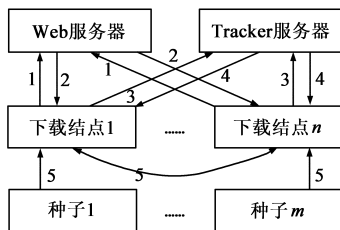


图1 BitTorrent的系统组成和协议过程<sup>[17]</sup>

### 2.2 涌现视角下的 BitTorrent 系统

在系统科学中,涌现这一概念通常用来指称这样的微-宏观效应或现象:“因局部组分之间的交互而产生系统全局行为”或“缘起于微观的宏观效应”,而这些宏观全局行为或特征是微观组分所不具有的,只能通过整体体现出来.因此,一般地,涌现是表征系统微观和宏观之间的关系的范畴<sup>[18]</sup>.涌现概念给出的视角,是从系统的微观、宏观以及微观和宏观之间的联系等多角

度、多方面考察、分析认识系统的.

从涌现的角度看,BitTorrent 系统在微观层面上由结点的状态和行为来描述;在宏观层面上由系统的行为特征来表达;而在微观和宏观的联系上,系统的属性和行为根源于结点的状态和行为以及结点之间的交互,如图 2.

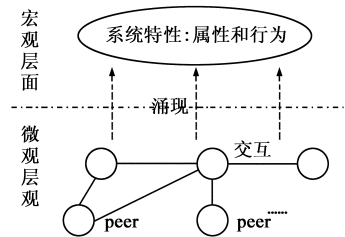


图2 涌现视角下的BitTorrent系统

采取这一视角的原因在于:一方面,BitTorrent 系统的结点是相对容易刻画的,而其系统特性往往难以清晰描述,需要通过结点的特性和系统微-宏观联系来确定;另一方面,在通过测量获得 BitTorrent 的一些系统特性时,希望能够认识产生这些特性的内在机理.

基于涌现概念建立起的 BitTorrent 性能分析模型,我们称为微-宏观性能分析模型.而微-宏观分析模型的建立,需要依赖于微-宏观分析方法.

### 2.3 基于数学解析的 MAS 微-宏观分析方法

一般地,P2P 系统可以抽象为一个多 Agent 系统,即由相对自主的计算实体(Agent)互相交互构成的系统.这里从一般的基于数学解析 MAS 微-宏观分析方法,给出建立 BitTorrent 微-宏观分析模型的一般过程.

基于数学解析的 MAS 微-宏观分析的基本思路和过程如下:选取表征实际 MAS 的微观态的变量,称为微观变量;根据 MAS 的微观活动,基于这些微观变量,给出系统的微观行为描述;选取表征 MAS 宏观态的变量,称为宏观变量;然后依据宏观变量与微观变量的关系,基于微观行为描述,通过数学推导(或使用数学分析工具)求解并建立系统的宏观演化方程;进而研究系统的宏观特性.如图 3.

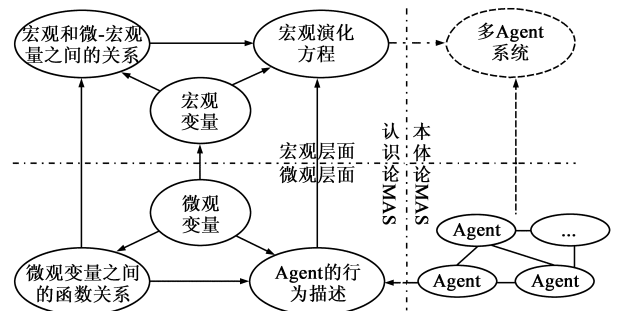


图3 基于数学解析的MAS微-宏观分析的基本过程

### 3 BiTorrent 的微-宏观分析模型

#### 3.1 结点的状态参数与行为

##### (1) 状态参数

表 1 给出了描述 BiTorrent 结点的状态参数。

表 1 描述结点的状态参数

参数	参数含义
$n$	结点拥有的 chunk 数
$v$	结点的下载速度 (B/s)
$\mu$	结点的上传带宽 (B/s)
$k$	上传结点的个数
$s$	对文件的兴趣度, 对文件感兴趣程度的度量
$w$	作种子的自愿度, 下载完成后, 作为种子为其他结点服务的自愿程度的度量

表 1 的参数中, 对于确定的结点来说,  $\mu$  可以认为不变;  $s$  和  $w$  在一个 BiTorrent 生命周期内也可以认为是不变的;  $k$  由 BiTorrent 协议实现给出, 是一定的; 因为实际结点的上传带宽通常远远小于其下载带宽, 而整个系统中  $\Sigma v < \Sigma \mu$ , 所以结点的下载速度  $v$  往往小于其下载带宽  $c$ . 为分析系统性能, 这里将结点的下载速度而不是下载带宽作为描述结点的参数。

##### (2) 结点行为

BiTorrent 结点的行为和状态变化如图 4 所示。

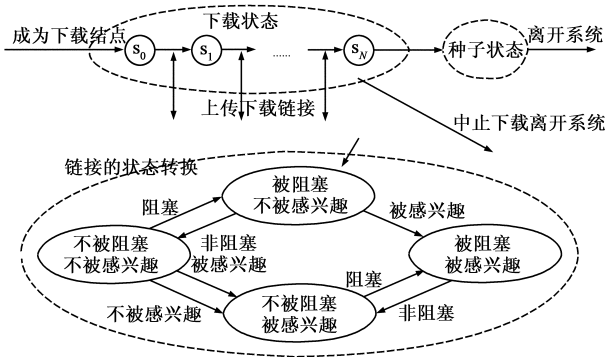


图 4 BiTorrent 结点的行为和状态变化

(a) 成为下载结点. 一个结点在成为下载结点之前, 首先必须是一个潜在的下载结点. 也就是说, 该结点会浏览该 Web 网站并且对该文件感兴趣。

(b) 下载. 结点的下载行为主要涉及: ① 下载对象的选择, 即向邻居结点请求下载哪些文件块或子块; ② 从那些结点下载; ③ 下载速度. BiTorrent 系统采用的是最少最优先 (rarest-first) 策略来选择要下载的文件块. 而下载速度通常决定于邻居结点的上传选择策略和上传带宽. 下载结点和其所有邻居结点保持链接, 而能否从这些邻居结点下载, 要看这些结点是否有该结点感兴趣的文件块以及它是否被邻居结点阻塞 (见图 4 中的链接状态转换), 这一行为使得结点拥有的 chunk 及其数目发生变化  $\mu$ . 图 4 中的  $s_1, s_2, \dots, s_N, N$  为文件被分割

成的 chunk 数). 假设文件长度是  $L$ , 那么拥有的 chunk 数的变化可以用如下方程表达:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{v}{L/N} = \frac{vN}{L}$$

(c) 上传. 涉及结点的上传行为的主要有: ① 上传结点的选择; ② 上传带宽. BiTorrent 结点在选择上传结点时采用针锋相对 (tit-for-tat) 策略, 即结点选择上传的结点是为自己提供最快下载速率的  $k-1$  个邻居结点 (非阻塞结点, 见图 4 中的链接状态转换), 另外 1 个上传结点称为乐观非阻塞 (optimistic unchoke) 结点, 它是从其它邻居结点中随机选取的, 与其上传速率无关。

一般地, 结点以上传带宽全力上传. 但是还存在一个上传带宽  $\mu$  的利用率的问题. 考虑这样的情况: 结点拥有的文件块不被其邻居结点感兴趣, 即每个邻居结点都拥有该结点所含的全部文件块, 发生这种情况的概率为

$$P_{uninterest} = \left( \sum_{m=n}^N \frac{1}{N} \binom{N-n}{m-n} \right) / \binom{N}{m}^{neighbors}$$

此时, 上传带宽  $\mu$  的利用率为  $1 - P_{uninterest}$ .

上传带宽  $\mu$  的利用率在宏观上体现为文件的共享效率 (见 3.2 节)。

(d) 中止下载. 结点在下载时都有一定的忍耐度, 也就是说, 下载结点在系统中持续一段时间  $t$  后会中止下载. 文献 [10] 的测量表明, 结点的忍耐度只与它对文件的兴趣度有关, 而与其它因素的关系较小. 因此可以认为结点的持续时间  $t$  的分布满足无记忆性. 而唯一满足无记忆性的连续分布是指数分布 [19], 因此可以认为, 在中止前下载结点在系统中持续一段时间  $t$  的分布为

$$F_{abort}(t) = 1 - e^{-\frac{t}{s}}$$

其均值为  $s$ .

(e) 作为种子离开系统. 结点作为种子也会在持续一段时间  $t$  后离开系统, 而此时的持续时间与结点作种子的自愿度密切相关. 和中止下载一样, 也可以认为结点作为种子的持续时间  $t$  满足指数分布, 即

$$F_{seed\_leave}(t) = 1 - e^{-\frac{t}{w}}$$

其均值为  $w$ .

#### 3.2 系统参数及其与结点参数和行为的关系

在系统层面上, 模型考虑的是异构的 BitTorrent, 而将同构的系统作为其特例. 这里的异构指的是结点状态的异构, 主要包括下载进度和上传带宽。

##### 3.2.1 系统宏观参数

在宏观上, BiTorrent 可以通过表 2 给出的系统参数来刻画。

对于实际的  $\mu$  和  $p$ , 可能取值太多或取连续值. 为减少系统状态, 同时又能反映系统特性, 分别将它们离

散化为  $N_\mu$  和  $N_p$  种取值.  $x_{u_i, p_j}$  就是系统中上传带宽在  $[\mu_{min} + i(\mu_{max} - \mu_{min})/N_\mu, \mu_{min} + (i + 1)(\mu_{max} - \mu_{min})/N_\mu]$  之间和下载进度在  $[j/N_p, (j + 1)/N_p]$  之间的下载结点数.

表 2 BitTorrent 系统的宏观参数

参数	参数含义
$x_{\mu, p}(t)$	时刻 $t$ 时, 系统中具有上传带宽 $\mu$ 和下载进度 $p$ 的下载结点数. 这里 $\mu$ 和 $p$ 取离散值(或连续值的离散化), 并且分别有 $N_\mu$ 和 $N_p$ 种取值.
$x_\mu(t)$	$\sum_p x_{\mu, p}(t)$ . $t$ 时刻, 系统中具有上传带宽 $\mu$ 的下载结点数.
$x_p(t)$	$\sum_\mu x_{\mu, p}(t)$ . $t$ 时刻, 系统中具有下载进度 $p$ 的下载结点数.
$x(t)$	$\sum_{\mu, p} x_{\mu, p}(t)$ . $t$ 时刻, 系统中存在的下载结点数
$y_\mu(t)$	时刻 $t$ 时, 系统中具有上传带宽 $\mu$ 的种子结点数.
$y(t)$	$\sum_\mu y_\mu(t)$ . $t$ 时刻, 系统中存在的种子结点数
$\lambda_\mu$	具有上传带宽 $\mu$ 的新请求结点进入系统的速率
$\lambda$	$\sum \lambda_\mu$ . 新的请求结点进入系统的速率
$r_\mu(p_i, p_{i+1})$	具有上传带宽 $\mu$ 的结点从下载进度 $p_i$ 到 $p_{i+1}$ 的转换速率
$\sum_{i, p_i, p_{i+1}} r_\mu(p_i, p_{i+1})$	所有结点从下载进度 $p_i$ 到 $p_{i+1}$ 的转换速率.
$\theta$	系统中的下载结点中止下载而退出系统的速率
$\gamma$	系统中的种子结点终止服务而退出系统的速率
$\eta$	系统中的文件共享效率

在这些参数下, BitTorrent 的系统模型如图 5 所示.

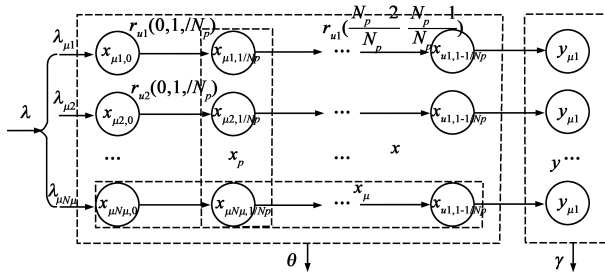


图 5 BitTorrent 的系统模型

### 3.2.2 系统参数与结点参数和行为的联系

(1)  $\lambda$

许多 BitTorrent 模型都认为或假定请求结点进入系统的过程服从泊松分布<sup>[9,11~16]</sup>, 其速率是一个定值. 而文献[10]通过宏观测量, 发现结点进入系统的速率是负指数递减的. 显然, 这里存在着冲突. 这里通过考察结点的行为及其宏观效应, 来解决这种矛盾.

对于一个文件, 通常存在一个潜在的下载结点集合, 其变化受两个因素决定: ①结点成为潜在下载结点的速率; ②潜在下载结点进入系统成为下载结点的速率, 如图 6.

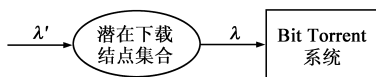


图 6 潜在下载结点集合的变化

潜在下载结点集合大小的变化, 可以由下式给出

$$\frac{dn_c}{dt} = \lambda'(t) - \lambda(t) \quad (1)$$

因为结点行为是独立的, 因此  $\lambda$  正比于  $n_c$ , 即  $\lambda = kn_c$ .

实际中, 一个结点成为某一文件潜在下载结点的方式, 可分粗略地为两类: ①在文件产生时就可确定是不是; ②随着时间的推移而变成潜在下载结点. 属于哪一种主要与文件的属性有关. 对于一些流行性的文件, 如电影、流行音乐等, 其潜在下载结点的集合在其发布的时候就基本确定, 也就是说,  $\lambda' \approx 0$ . 此时由式(1)有

$$\lambda(t) = kn_{c_0} e^{-kt}$$

因为目前的大部分 BitTorrent 系统是传输流行性文件, 所以会出现文献[10]的测量结果.

而对于一些常用文件, 如一些软件,  $\lambda' \neq 0$ , 如果  $\lambda' \approx \lambda$ , 有  $\lambda = kn_{c_0}$  是常数, 因而请求结点进入系统的过程服从泊松分布, 即符合一些文献的假定.

对于  $\lambda_\mu$ , 如果具有上传带宽  $\mu$  的潜在下载结点在下载结点集合中的比例为  $\rho_\mu$ , 那么  $\lambda_\mu = \rho_\mu \lambda$ .

(2)  $r$

对于具有上传带宽  $\mu$  和下载进度  $p_i$  的结点的转换速率  $r_\mu(p_i, p_{i+1})$ , 可以通过下式计算

$$r_\mu(p_i, p_{i+1}) = \frac{x_{\mu, p_i} v_{\mu, p_i}}{L(p_{i+1} - p_i)}$$

其中,  $v_{\mu, p_i}$  是具有上传带宽  $\mu$  和下载进度  $p_i$  的结点的下载速度,  $L$  为文件长度.

(3)  $\theta$

从 3.1 节知道, 对于兴趣度为  $s$  的结点, 在中止下载前它在系统中持续时间  $t$  的分布是以  $s$  为均值的指数分布. 根据统计规律<sup>[19]</sup>, 这类结点中止下载而退出系统的速率是参数为  $1/s$  的泊松分布. 如果  $s$  在系统结点中的分布为  $F_s(s)$ , 那么

$$\theta = \int_0^{+\infty} \frac{1}{s} F'_s(s) ds$$

为方便计算, 这里假定各结点的兴趣度是一样的, 从而有  $\theta = 1/s$ .

(4)  $\gamma$

和  $\theta$  的计算类似, 如果  $w$  在系统结点中的分布为  $F_w(w)$ , 那么

$$\gamma = \int_0^{+\infty} \frac{1}{w} F'_w(w) dw$$

假定各结点的自愿度是一样的, 则有  $\gamma = 1/w$ .

(5)  $\eta$

系统中的文件共享效率和下载结点的上传带宽利用率密切相关, 是其宏观表现. 和 3.1 节(2)(c)中下载结点的上传带宽利用率的计算类似, 文献[9]计算了整

个系统的文件共享效率,它非常接近于 1.

### 3.3 系统的若干宏观分布

#### (1) 下载速度

制约 BitTorrent 系统性能的通常是结点的上传带宽,可以认为结点的下载速度不受下载带宽的限制,只受限于邻居结点的上传带宽.考虑到结点上传带宽的使用效率(这里使用其宏观效应  $\eta$  来近似),有

$$\sum_x v \approx \sum_x \mu \eta + \sum_y \mu$$

由此通过  $\mu$  和  $\eta$  可以确定总的下载速度.

下面分析下载速度  $v$  随  $\mu$  在系统结点中的分配.

首先,一个下载结点的上传带宽有  $1/k$  分配给乐观非阻塞结点,而乐观非阻塞结点是随机选择的.所以,一个下载结点的上传带宽分配给具有  $\mu_i$  带宽的结点的比例平均为

$$\rho_{opt\_unchoke}(\mu_i) = \frac{1}{k} \cdot \frac{x_{\mu_i}}{x}.$$

对于其余  $k-1$  个普通的非阻塞结点,由于采用了针锋相对策略,选择到具有  $\mu_i$  带宽的结点的概率与两个因素有关:①具有  $\mu_i$  带宽的下载结点在总的下载结点中的比例;②  $\mu_i$  的相对大小.所以,一个下载结点的上传带宽分配给具有  $\mu_i$  带宽的非阻塞结点的比例平均为

$$\rho_{unchoke}(\mu_i) = \frac{k-1}{k} \cdot \frac{(\mu_i - \mu_{\min})x_{\mu_i}}{\sum_j (\mu_j - \mu_{\min})x_{\mu_j}}$$

其次,由于种子只给  $k-1$  个具有较快上传速率的下载结点上传,因此种子结点上传带宽的分配比例由下式给出

$$\rho_{from\_seed}(\mu_i) = \frac{(\mu_i - \mu_{\min})x_{\mu_i}}{\sum_j (\mu_j - \mu_{\min})x_{\mu_j}}$$

综上,一个具有  $\mu_i$  带宽的结点的平均下载速度为

$$\begin{aligned} v(\mu_i) &= \frac{1}{x_{\mu_i}} \times \left( (\rho_{opt\_unchoke}(\mu_i) + \rho_{unchoke}(\mu_i)) \right. \\ &\quad \cdot \eta \sum_j \mu_j x_{\mu_j} + \rho_{from\_seed}(\mu_i) \sum_j \mu_j y_{\mu_j} \left. \right) \\ &= \frac{1}{x_{\mu_i}} \times \left( \left( \frac{k-1}{k} \cdot \frac{(\mu_i - \mu_{\min})x_{\mu_i}}{\sum_j (\mu_j - \mu_{\min})x_{\mu_j}} + \frac{1}{k} \cdot \frac{x_{\mu_i}}{x} \right) \right. \\ &\quad \cdot \eta \sum_j \mu_j x_{\mu_j} + \left. \frac{(\mu_i - \mu_{\min})x_{\mu_i}}{\sum_j (\mu_j - \mu_{\min})x_{\mu_j}} \cdot \sum_j \mu_j y_{\mu_j} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

由于  $x$  与  $y$  随时间变化,各结点的  $v$  也是一个时间的函数.下载速度  $v$  的分布决定了不同类型结点的转换速率  $r_{\mu}$ .

#### (2) 下载结点关于 $\mu$ 和 $p$ 的分布

下载结点关于  $\mu$ 、 $p$  以及  $\mu$  和  $p$  的分布分别由  $x_{\mu}(t)$ 、 $x_p(t)$  以及  $x_{\mu,p}(t)$  与  $x(t)$  的比值确定.

#### (3) 种子结点关于 $\mu$ 的分布

种子结点关于  $\mu$  的分布由  $y_{\mu}(t)$  与  $y(t)$  的比值确定.

### 3.4 系统的宏观行为

#### (1) 系统的演化方程

若记  $\lambda = r(p_{-1}, p_0)$ , 根据图 5 的系统模型,系统的演化可以通过下面的系列方程来表达

$$\frac{dx_{\mu_i, p_j}}{dt} = r_{\mu_i}(p_{j-1}, p_j) - r_{\mu_i}(p_j, p_{j+1}) - \theta \cdot x_{\mu_i, p_j},$$

$$i = 0, 1, \dots, N_{\mu} - 1; j = -1, 0, \dots, N_p - 1$$

$$\frac{dy_{\mu_i}}{dt} = r_{\mu_i}(p_{N_p-1}, p_{N_p}) - \gamma \cdot y_{\mu_i}, i = 0, 1, \dots, N_{\mu} - 1$$

较粗略地,有

$$\frac{dx_{\mu_i}}{dt} = \lambda_{\mu_i} - \theta \cdot x_{\mu_i} - \frac{v_{\mu_i} x_{\mu_i}}{L}, i = 0, 1, \dots, N_{\mu} - 1$$

$$\frac{dy_{\mu_i}}{dt} = \frac{v_{\mu_i} x_{\mu_i}}{L} - \gamma \cdot y_{\mu_i}, i = 0, 1, \dots, N_{\mu} - 1$$

基于这些方程,可以考察 BitTorrent 系统整个生命周期内的行为(见第 4 节的实验).

#### (2) 稳态性能

在稳定状态下,拥有不同上传带宽的下载结点数和种子结点数的变化率均为 0, 所以有

$$0 = \lambda_{\mu_i} - \theta \cdot \bar{x}_{\mu_i} - \frac{v_{\mu_i} \bar{x}_{\mu_i}}{L} \quad 0 = \frac{v_{\mu_i} \bar{x}_{\mu_i}}{L} - \gamma \cdot \bar{y}_{\mu_i}$$

由此得到下载结点数和种子结点数的稳态值

$$\bar{x}_{\mu_i} = \frac{\lambda_{\mu_i}}{\theta + v_{\mu_i}/L}$$

$$\bar{y}_{\mu_i} = \frac{\lambda_{\mu_i} v_{\mu_i}}{\gamma(\theta L + v_{\mu_i})} \quad (3)$$

从上面式(2)和式(3)可以看出,系统中拥有较大上传带宽的下载结点相对较少,而种子相对较多.

将式(3)代入式(2)得到方程数为  $N_{\mu}$ , 变量数亦为  $N_{\mu}$  的关于  $v_{\mu}$  的方程组,因此理论上可以求解  $v_{\mu}$ . 但这一方程组并不是线性的,给出  $v_{\mu}$  的解析解比较困难.但是可以通过叠代计算,求出它们的近似解  $\hat{v}_{\mu_i}$ , 然后在  $\hat{v}_{\mu_i}$  的基础上计算  $\bar{x}_{\mu_i}$  和  $\bar{y}_{\mu_i}$ .

而从图 5 的系统模型不难得出,对于同一  $\mu_i$ ,  $\bar{x}_{\mu_i, p_j}$  是比值为  $(1-\theta)$  的等比级数,它们之和为  $\bar{x}_{\mu_i}$ , 因此有

$$\bar{x}_{\mu_i, 0} \cdot \sum_{j=0}^{N_p-1} (1-\theta)^j = \bar{x}_{\mu_i}$$

由此,很容易计算  $\bar{x}_{\mu_i, p_j}$ .

和文献[9]一样,为计算节点的平均下载时间,应用 Little 定律,得到如下关系

$$\frac{\lambda_{\mu_i} - \theta \cdot \bar{x}_{\mu_i}}{\lambda_{\mu_i}} = (\lambda_{\mu_i} - \theta \cdot \bar{x}_{\mu_i}) T_{\mu}, T_{\mu} = \frac{1}{\theta + v_{\mu_i}/L}$$

### 4 实验结果

为验证基于涌现视角的 BitTorrent 微-宏观模型的正确性,我们构造了 BitTorrent 的仿真系统进行实验.其中的参数设置如表 3.

表 3 实验的参数设置

参数	取值	参数	取值
$L$	200MB	$\mu_1$	10KB/s
$k$	5	$\mu_2$	50KB/s
$\theta$	0.001 个/s	$\mu_3$	100KB/s
$\gamma$	0.001 个/s		

在系统中,结点的上传带宽有三种, $\mu_1, \mu_2, \mu_3$ ,取值如表 3.前三个实验针对传输常用文件的 BitTorrent 系统,即请求结点的进入满足泊松分布的系统.三个实验中,上传带宽在新请求结点中分布不同,分别称为类均匀分布、类正态分布、类长尾分布(类幂律分布),它们通过不同的  $\lambda_\mu$  取值来体现.第四个实验针对流行性文件的 BitTorrent 系统,采用的  $\lambda_\mu$  的分布为类均匀分布.

#### 实验一:类均匀分布

$\lambda_\mu$  取值: $\lambda_{\mu_1} = 0.333, \lambda_{\mu_2} = 0.333, \lambda_{\mu_3} = 0.333$ .三种不同带宽的下载结点和种子结点,随时间的变化如图 7 和 8.其中分别给出了模型数据和仿真实验数据.

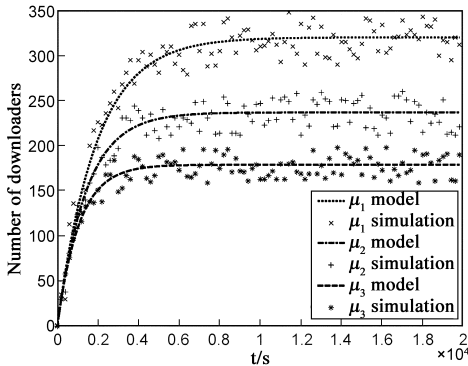


图 7 类均匀分布条件下下载结点的变化

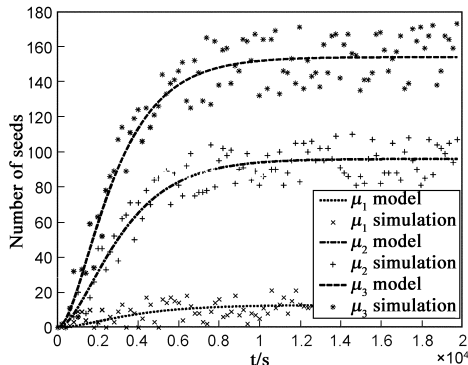


图 8 类均匀分布条件下种子数的变化

#### 实验二:类正态分布

$\lambda_\mu$  取值: $\lambda_{\mu_1} = 0.2, \lambda_{\mu_2} = 0.6, \lambda_{\mu_3} = 0.2$ .三种不同带宽的下载结点和种子结点,随时间的变化如图 9 和 10.

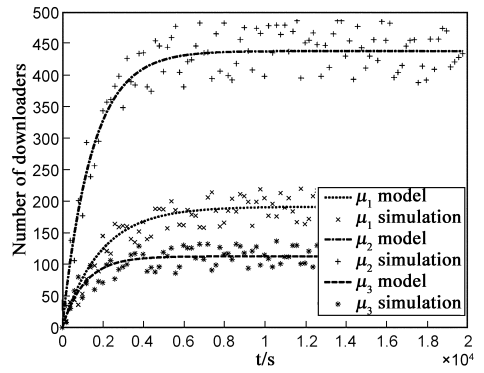


图 9 类正态分布条件下下载结点的变化

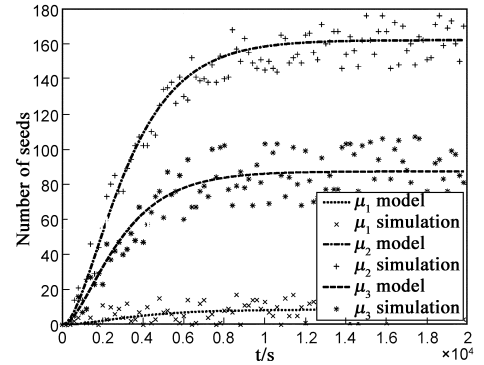


图 10 类正态分布条件下种子数的变化

#### 实验三:类长尾分布

$\lambda_\mu$  取值: $\lambda_{\mu_1} = 0.7, \lambda_{\mu_2} = 0.2, \lambda_{\mu_3} = 0.1$ .三种不同带宽的下载结点和种子结点,随时间的变化如图 11 和 12.

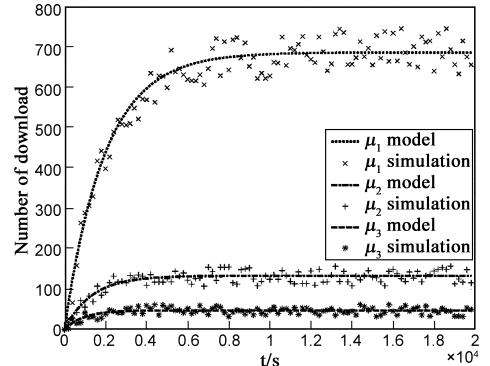


图 11 类长尾分布条件下下载结点的变化

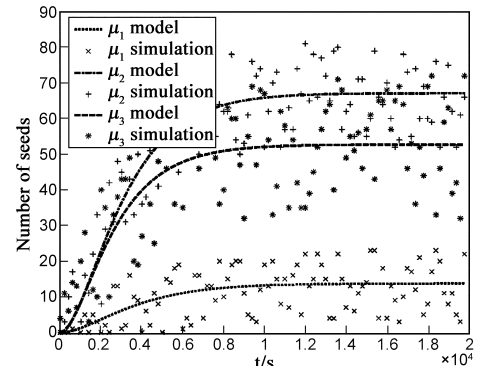


图 12 类长尾分布条件下种子数的变化

### 实验四:流行性文件

$\lambda_{\mu}$  取值:  $\lambda_{\mu_1} = 0.333, \lambda_{\mu_2} = 0.333, \lambda_{\mu_3} = 0.333$  三种不同带宽的下载结点和种子结点, 随时间的变化如图 13 和 14.

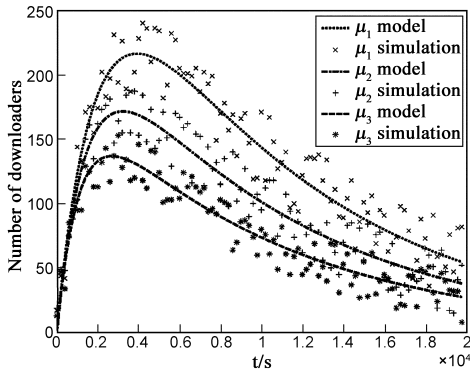


图13 流行性文件BT系统下载结点数变化的变化

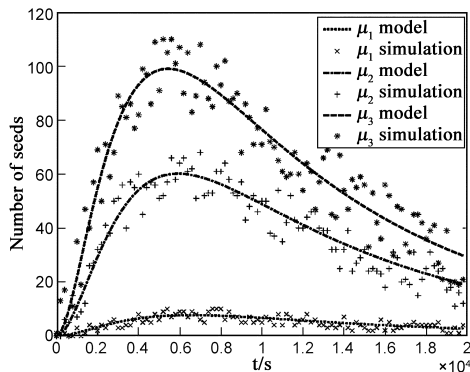


图14 流行性文件BT系统种子数的变化

从实验结果可以得出如下结论:

(1) 在不同实验配置下, 模型数据和仿真实验数据吻合较好, 因此第 3 节给出的基于涌现视角的模型能够很好地刻画 BitTorrent 系统的行为;

(2) 从所有实验中可以发现, 上传带宽低的结点在下载结点中的比例  $x_{\mu_1}/x$ , 比  $\lambda_{\mu_1}/\lambda$  要大, 而在种子中则刚好相反. 这正是文献[10]通过测量统计得出的异构 BitTorrent 系统中存在的不公平性. 模型数据很好的反映了这一点;

(3) 模型数据反映了 BitTorrent 系统在达到稳态前常见的 Flash Crowd 过程<sup>[3]</sup>;

(4) 对流行性文件的实验结果和我们日常经验(如用 BitTorrent 下载电影)非常吻合. 而基于涌现视角的模型不仅刻画了文献[10]的测量结果, 而且给出了产生这一结果的原因, 因而揭示其本质, 而不仅仅是现象描述.

## 5 总结

为实际 P2P 系统, 如 BitTorrent, 建立一个有效的分析模型一直是人们努力的一个方向. 本文基于系统科

学中的涌现概念, 从微观到宏观来研究 BitTorrent 系统. 首先考察相对清晰的系统微观(结点)状态和行为, 然后通过联系微观和宏观的系统参数, 以及宏观分布约束, 给出了 BitTorrent 系统的微-宏观分析模型. 实验表明该模型能够有效刻画 BitTorrent 系统的行为.

### 参考文献:

- [1] Cohen B. Incentives build robustness in BitTorrent[A]. In Proc P2P Economics Workshop[C]. Berkeley: ACM Press, 2003. 43 - 48.
- [2] Izal M, Urvoy-Keller G., Biersack E W, Felber P, Al Hamra A, Garcés-Erice L. Dissecting BitTorrent: five months in a torrent's lifetime[A]. Proceedings of Passive and Active Measurements[C]. Berlin: Springer-Verlag, 2004. 1 - 11.
- [3] Pouwelse J, Garbacki P, Epema D, Sips H. The BitTorrent P2P file-sharing system: measurements and analysis[A]. In Proc. of International Workshop on Peer-to-Peer Systems[C]. Berlin: Springer-Verlag, 2005. 205 - 216.
- [4] Erman D, Ilie D, Popescu A. BitTorrent traffic characteristics [A]. International Multi-Conference on Computing in the Global Information Technology (ICCGI'06)[C]. Washington: IEEE Computer Society, 2006. 42 - 42.
- [5] Neglia G., Reina G, Zhang H, Towsley D, Venkataramani A, Danaher J. Availability in BitTorrent systems[A]. In 26th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM 2007)[C]. Piscataway: IEEE Press, 2007. 2216 - 2224.
- [6] 陈亮, 龚俭. 大规模网络中 BitTorrent 流行为分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2008, 38(3): 390 - 395.  
Chen Liang, Gong Jian. Analysis of BitTorrent flow behavior on large-scale networks[J]. Journal of Southeast University (Nature Science Edition), 2008, 38(3): 390 - 395. (in Chinese)
- [7] Bharambe A R, Herley C, Padmanabhan V N. Analyzing and improving a bitTorrent network's performance mechanisms [A]. In 25th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM 2006)[C]. Piscataway: IEEE Press, 2006. 1 - 12.
- [8] Urvoy-Keller G, Michiardi P. Impact of inner parameters and overlay structure on the performance of bitTorrent [OL]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.60.5264,2008-06-04>.
- [9] Qiu D, Srikant R. Modeling and performance analysis of Bittorrent-like peer-to-Peer Networks [J]. SIGCOMM Computer Communication Review, 2004, 34(4): 367 - 378.
- [10] Guo L, Chen S-Q, Xiao Z, Tan E-H, Ding X-N, Zhang X-D. A performance study of BitTorrent-like Peer-to-Peer Systems [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2007, 25(1): 155 - 169.
- [11] Fan B, Chiu D-M, Lui J. Stochastic differential equation ap-

- proach to model BitTorrent-like P2P systems [A]. In 2006 IEEE International Conference on Communications vol. 2 [C]. Piscataway: IEEE Press, 2006. 915 – 920.
- [12] Wang J, Yeo C, Prabhakaran V, Ramchandran K. On the Role of helpers in peer-to-peer file download systems: design, analysis, and simulation [OL]. research. microsoft. com/workshops/IPTPS2007/papers/WangYeoPrabhakaranRamchandran. pdf, 2008-5-14.
- [13] Piccolo F, Neglia G. The effect of heterogeneous link capacities in bittorrent-like file sharing systems [A]. In: Proc of 1st International Workshop on Hot Topics in Peer-to-Peer Systems [C]. Washington: IEEE Computer Society, 2004. 40 – 47.
- [14] Clevenot F, Nain P, Ross K. Multiclass P2P Networks: static resource allocation for service differentiation and bandwidth diversity [J]. Performance Evaluation, 2005, 62 (1 – 4): 32 – 49.
- [15] Tian Y, Wu D, Ng K W. Modeling, Analysis and improvement for bittorrent-like file sharing networks [A]. In Proceedings of 25th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM 2006) [C]. Piscataway: IEEE Press, 2006. 1 – 11.
- [16] 薛广涛, 俞嘉地, 尤晋元. 基于临近结点聚类构建层次化 BitTorrent 文件共享系统 [J]. 电子学报, 2008, 36(2): 291 – 297.  
Xue Guang-tao, Yu Jia-di, You Jin-yuan. Building hierarchical bittorrent-like peer-to-peer file sharing systems based on proximity-aware peer clustering [J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(2): 291 – 297. (in Chinese)
- [17] Teo Wei Ling Michelle. A BitTorrent implementation and simulation [OL]. www. comp. nus. edu. sg/~ teoweili/BitTorrent. pdf, 2008-6-5.
- [18] 金士尧, 黄红兵, 范高俊. 面向涌现的多 Agent 系统研究及其进展 [J]. 计算机学报, 2008, 31(6): 881 – 895.  
Jin SY, Huang HB, Fan GJ. Emergence-oriented research on

multi-agent systems and its state of arts [J]. Chinese Journal of Computers, 2008, 31(6): 881 – 895. (in Chinese).

- [19] Michael Mitzenmacher, Eli Upfal. 概率与计算 [M]. 史道济等译. 北京: 机械工业出版社, 2007 年 4 月.

Michael Mitzenmacher, Eli Upfal. Probability and Computing: Randomized Algorithms and Probabilistic Analysis [M]. Cambridge, England: Cambridge University Press, 2005.

#### 作者简介:



**黄红兵** 男, 1977 年生于安徽太湖, 国防科技大学计算机学院, 博士生, 主要研究领域为多 Agent 系统和复杂系统建模与仿真.

E-mail: hbh\_yellow@163.com.



**任传俊** 男, 1982 年生于山东济宁, 国防科技大学计算机学院博士研究生, 主要研究方向为多 Agent 系统和复杂系统建模与仿真.

E-mail: saunala@126.com.



**金士尧** 男, 1937 年生, 国防科技大学计算机学院, 教授, 博导. 主要研究领域为系统仿真、多 Agent 系统、分布式计算、虚拟现实等.

E-mail: syjin1937@163.com