

区别服务下的P2P网络性能分析

任 婕

燕山大学理学院, 河北 秦皇岛

收稿日期: 2024年3月20日; 录用日期: 2024年4月18日; 发布日期: 2024年4月26日

摘 要

为研究P2P网络性能, 降低系统能耗, 抑制“搭便车”现象, 更好的提升系统性能。本文将混合P2P网络中节点的动态变化抽象为排队模型, 建立具有两类服务台、部分服务台异步多重休假的M/M/c + h排队模型。通过矩阵几何解方法, 对系统的稳态分布进行求解, 进而给出系统平均队长、平均等待时间以及系统总能耗等性能指标。通过数值实验, 分析重要参数对各指标的影响, 并探讨该模型下的纳什均衡与社会最优策略, 得到最优参数, 为降低P2P网络系统能耗提供理论支持。

关键词

社会最优策略, P2P网络, 休假策略, 纳什均衡, 激励机制

P2P Network Performance Analysis under Differentiated Services

Jie Ren

School of Science, Yanshan University, Qinghuangdao Hebei

Received: Mar. 20th, 2024; accepted: Apr. 18th, 2024; published: Apr. 26th, 2024

Abstract

To study the performance of P2P networks, reduce system energy consumption, suppress free riding, and better improve system performance, this article abstracts the dynamic changes of nodes in hybrid P2P networks as a queuing model and establishes an M/M/c + h queuing model with two types of service stations and asynchronous multiple vacations for some service stations. By using the matrix geometry solution method, the steady-state distribution of the system is solved, and performance indicators such as the average system length, average waiting time, and total system energy consumption are given. Through numerical experiments, analyze the impact of important parameters on various indicators, and explore the Nash equilibrium and social op-

timal strategies under this model, obtain the optimal parameters, and provide theoretical support for reducing energy consumption in P2P network systems.

Keywords

Social Optimal Strategy, P2P Network, Vacation Strategy, Nash Equilibrium, Incentive Mechanism

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

P2P 网络的不断发展使其在现代互联网中扮演着非常重要的角色。过去 P2P 网络在文件共享、音乐分享、视频分享等领域被广泛应用，极大地便利了互联网用户。近年来，随着区块链技术兴起，P2P 网络的应用范围得到了显著的拓展，在数字货币交易、智能合约执行以及去中心化应用等多个领域发挥了重要作用。在这些应用场景中，P2P 网络展现了其卓越的性能和高效的服务能力。例如，在数字货币交易领域，P2P 网络能够促进更快速的交易处理和更低的交易成本。同时，在智能合约的执行过程中，P2P 网络为参与者提供了一个更加安全、可靠的执行环境。但是，P2P 网络也面临一些挑战，当 P2P 网络中的用户数量增加时，网络的价值也会随之增加。因此，许多用户会选择加入 P2P 网络，以享受更多的资源和更好的服务，而并不愿意为网络贡献资源[1]。此外，一些用户可能并不了解 P2P 网络的工作原理，或者认为 P2P 网络中的资源可以免费获取，从而选择成为搭便车用户。虽然搭便车用户在一定程度上可以增加 P2P 网络的用户数量，提高网络的规模效应，从而使得更多的用户可以享受到更好的服务，也可以为 P2P 网络带来更多的流量，从而使得网络更加活跃，资源更加丰富。但是搭便车用户并不会为 P2P 网络贡献资源，这会导致网络中的资源和带宽分配不均，使得其他用户的体验变差，同时搭便车用户可能会消耗过多的网络资源，从而使得 P2P 网络的性能下降，甚至出现网络崩溃的情况。因此可以采用一定的措施去抑制搭便车节点。

有学者尝试建立贡献评价机制来对搭便车节点进行抑制，P2P 网络可以建立贡献评价机制，对每个节点进行评分，并根据评分来分配资源。这样可以鼓励节点积极参与资源贡献，同时限制搭便车节点的数量。Sarfaraj [2]提出基于分数的激励机制，计算对等节点的评分值，激励网络中搭便车节点，以提高网络的性能。Yousafzai [3]提出将供应节点的服务货币化，形成激励机制以减少节点流失和搭便车现象。刘浩 [4]提出了一种针对移动 P2P 网络的资源搜索机制，通过中继节点进行信息转发，通过分析节点的主观转发率，建立激励机制，以激励节点积极参与资源搜索。Ojo 等[5]利用博弈论提出了一种新的对等辅助流模型，提出了一个奖惩机制，对“搭便车”用户施加惩罚来鼓励资源共享。

通过控制 P2P 网络中资源的分配和利用，可起到抑制搭便车节点的作用。具体来说可通过设计 P2P 网络的资源分配策略，例如，根据每个节点的贡献情况来分配资源，或者设置合理的等待时间和优先级，使得资源可以被有效地利用，同时避免资源浪费。有很多学者在为请求节点设置优先级上进行了讨论，马占友等[6]对带抢占优先权和同步多重休假的排队模型进行了研究并描绘出参数变化对系统性能指标的影响。王荣[7]将抢占优先权的排队系统与 P2P 网络相结合，使用自私性节点需接受第二次查询服务的策略，激励节点积极参与资源查询。针对系统能耗问题，王豆豆[8]提出了一种自适应主动推送文件策略，旨在保持文件供需的平衡。同时，通过优化单向反馈路径和搜索信令的设计，提高了资源传输效率，从

而降低了由于洪泛式搜索引起的网络流量消耗。同时通过采用排队论中的休假策略也可降低系统能耗，关于异步休假策略，也有很多学者进行了研究，田乃硕[9]研究了部分服务台异步多重休假的M/M/c模型，邓春华[10]在此基础上拓展并研究了具有可变输入率且部分服务台异步多重休假模型。Ma [11]提出了通过加入异步单重休假策略降低了系统能耗。

本文将两类服务台与部分服务台异步多重休假的排队策略应用于解决P2P网络中搭便车问题，将服务节点抽象为服务台，请求节点抽象为顾客，服务节点的睡眠过程抽象为休假过程，建立两类服务台、部分服务台异步多重休假的M/M/c + h排队模型，利用拟生灭过程和矩阵几何解的方法得到系统性能指标，在此基础上进行数值实验，研究各类请求节点的时间成本以验证模型在抑制搭便车节点上的可行性。

2. 混合P2P网络与建模

在本文所探讨的混合P2P网络架构中，节点根据其特性被划分为三个主要类别：超级节点、有线节点和无线节点。这些节点相互协作，形成簇结构，其中每个簇由一个超级节点以及若干个有线和无线节点组成。这些簇之间纯P2P连接。

为了有效地抑制搭便车现象，本系统实施了一种区别化的服务策略。超级节点负责汇总簇内资源信息，并根据节点的贡献程度将请求节点分为合作节点和非合作节点。在节点分类过程中，我们引入了一个信誉机制，通过该机制，上传资源会被奖励积分，而下载资源则会扣除积分，同时，将积分正向的节点被视为合作节点，而积分负向的节点则被分类为非合作节点。此外，其他信誉机制也可以用于节点的分类，这些机制均适用于本模型。

在完成节点分类后，系统将节点分配到不同服务速率的服务台。其中，一类服务节点是由有线节点组成，它们为合作节点提供高速服务；另一类服务节点由无线节点组成，它们为非合作节点提供较低速率的服务。这种分配策略旨在激励节点积极参与资源分享，同时确保网络资源得到合理利用和公平分配。

对于混合P2P网络中节点的动态变化，可将其抽象为排队模型来进行分析，本文研究具有两类服务台且其中一类部分服务台异步多重休假，另一类服务台同步多重休假的M/M/c + h排队模型，其运行机制如图1所示。

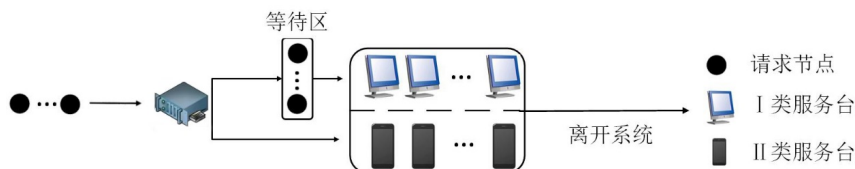


Figure 1. Schematic diagram of node changes in hybrid P2P network

图 1. 混合 P2P 网络节点变化示意图

该排队模型的基本假设如下：

(1) 分别将有线节点和无线节点视为 I 类服务台以及 II 类服务台，I 类服务台在系统中的 I 区，I 区有缓冲区，缓冲区中可容纳无限顾客，II 类服务台在系统中的 II 区且 II 区没有缓冲区来容纳顾客。

(2) 假设 I 类服务台的数量为 c ，且服务台的服务时间服从参数为 μ_1 ($\mu_1 > 0$) 的指数分布，同时引入部分服务台异步休假策略起到在减小能耗的基础上还能保证节点收益的作用，即 I 类服务台中处于休假状态的服务台在任意时刻都小于等于 d ($d < c$)，若某时刻休假服务台数小于 d ，则服务台服务完成且等待区无等待顾客时，其进入多重休假状态；若某时刻服务台服务完成，但休假台数等于 d ，则其进入空闲状态。同时为了保障 I 类顾客可以快速享受到服务，当服务台休假台数小于 d 时，正在工作的服务台将提升一定倍率的速率，提升至 $s\mu_1$ ($\mu_1 > 0$)。II 类请求节点到达间隔服从参数为 λ_2 ($\lambda_2 > 0$) 的指数分布。

当 $i > c$ 时, 有

$$C = \begin{bmatrix} \lambda_1 \mathbf{I} & & & \\ & \lambda_1 \mathbf{I} & & \\ & & \ddots & \\ & & & \lambda_1 \mathbf{I} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} (c-d)s\mu_1 \mathbf{I} & & & \\ & (c-d+1)s\mu_1 \mathbf{I} & & \\ & & \ddots & \\ & & & cs\mu_1 \mathbf{I} \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} \gamma_d & \varphi_d & & & \\ & \gamma_{d-1} & \varphi_{d-1} & & \\ & & \ddots & \ddots & \\ & & & \gamma_1 & \varphi_1 \\ & & & & \gamma_0 \end{bmatrix}.$$

其中 A, B, C 为 $(2h+1) \times d$ 维方阵。

3.2. 系统稳态分析

观察矩阵 Q , 可知其为三对角矩阵, 那么 Markov 过程 $\{(L_1(t), L_2(t), J_1(t), J_2(t)), t \geq 0\}$ 是一个拟生灭过程, 若其正常返, 那么其稳态分布如下:

$$\Pi = (\pi_0, \pi_1, \pi_2, \dots),$$

其中:

$$\pi_i = (\pi_{i,0,0,d}, \pi_{i,1,0,d}, \pi_{i,1,1,d}, \pi_{i,2,0,d}, \pi_{i,2,1,d}, \dots, \pi_{i,h,1,d}), 0 \leq i \leq c-d,$$

$$\pi_i = (\pi_{i,0,0,d}, \pi_{i,1,0,d}, \pi_{i,1,1,d}, \dots, \pi_{i,h,1,d}, \pi_{i,0,0,d-1}, \pi_{i,1,0,d-1}, \dots, \pi_{i,h,1,d-1}, \dots, \pi_{i,0,0,c-i}, \dots, \pi_{i,h,1,c-i}), c-d < i \leq c,$$

$$\pi_i = (\pi_{i,0,0,d}, \pi_{i,1,0,d}, \pi_{i,1,1,d}, \dots, \pi_{i,h,1,d}, \pi_{i,0,0,d-1}, \pi_{i,1,0,d-1}, \dots, \pi_{i,h,1,d-1}, \dots, \pi_{i,h,0,0}, \dots, \pi_{i,h,1,0}), i > c,$$

QBD $\{(L_1(t), L_2(t), J_1(t), J_2(t)), t \geq 0\}$ 正常返的充分必要条件为矩阵方程

$$R^2 B + RA + C = 0$$

有最小非负解 R , 同时谱半径 $SP(R) < 1$, 且 $(2h+1) \times ((d+1)! + c-d)$ 维随机矩阵

$$B[R] = \begin{bmatrix} A_0 & C_0 & & & \\ B_1 & A_1 & C_1 & & \\ & B_2 & A_2 & C_2 & \\ & & \ddots & \ddots & \ddots \\ & & & B_c & RB + A \end{bmatrix}$$

有左零向量。在 QBD 正常返的情况下, 稳态分布满足如下方程组

$$\begin{cases} (\pi_0, \pi_1, \dots, \pi_c) B[R] = 0, \\ \sum_{i=0}^{c-1} \pi_i e + \pi_c (I_1 - R)^{-1} e = 1, \\ \pi_i = \pi_c R^{i-c}, i \geq c \end{cases}$$

在此, e 表示一个全由 1 组成且维度适宜的列向量。对于上述结论, 其分析和证明采用了矩阵几何解法, 其中的最小非负解可以选择采用 Gauss-Seidel 迭代法来求得其近似解, 具体流程见表 1。

Table 1. Steps of Gauss-Seidel iteration method

表 1. Gauss-Seidel 迭代法步骤

步骤	操作
第一步	定义初始值 $c, d, h, s, \lambda_1, \lambda_2, \mu_1, \mu_2, \mu_3, \theta, \theta_1, \eta$ ($\eta = 10^{-10}$), 且设 $R = 0$
第二步	输入矩阵 A, B, C

续表

第三步	令 $\mathbf{R}_n = \mathbf{R}$ ，可求出 $\mathbf{R}_{n+1} = -(\mathbf{R}_n^2 \mathbf{B} + \mathbf{C}) \mathbf{A}^{-1}$
第四步	若 $\ \mathbf{R}_{n+1} - \mathbf{R}_n\ > \eta$ ，则令 $n = n + 1$ 返回第三步继续迭代， 若 $\ \mathbf{R}_{n+1} - \mathbf{R}_n\ < \eta$ ，停止迭代，进入第五步。
第五步	得到率阵 \mathbf{R} 的近似解： $\mathbf{R} = \mathbf{R}_{n+1}$

3.3. 系统性能指标

在求解到率阵 \mathbf{R} 后，通过稳态分布方程组可求出 $\pi_{i,j,m,k}$ 的数值结果，从而能够推导出系统的性能指标。

(1) 系统中 I 区的平均请求节点数为

$$E(L_1) = \sum_{i=0}^{\infty} iP(L_1 = i) \\ = \sum_{i=0}^{c-d} i \left(\pi_{i,0,0,d} + \sum_{j=1}^h \sum_{m=0}^1 \pi_{i,j,m,d} \right) + \sum_{i=c-d+1}^c i \left(\sum_{k=c-i}^d \pi_{i,0,0,k} + \sum_{j=1}^h \sum_{k=c-i}^d \sum_{m=0}^1 \pi_{i,j,m,k} \right) \\ + \sum_{i=c+1}^{\infty} i \left(\sum_{k=0}^d \pi_{i,0,0,k} + \sum_{j=0}^h \sum_{k=0}^d \sum_{m=0}^1 \pi_{i,j,m,k} \right).$$

(2) 系统中 II 区的平均请求节点数为

$$E(L_2) = \sum_{j=0}^{\infty} jP(L_2 = j) = \sum_{j=1}^h j \left(\sum_{i=0}^{c-d} \sum_{m=0}^1 \pi_{i,j,m,d} \right) + \sum_{j=1}^h j \left(\sum_{i=c-d+1}^c \sum_{k=c-i}^d \sum_{m=0}^1 \pi_{i,j,m,d} \right) + \sum_{j=1}^h j \left(\sum_{i=c+1}^{\infty} \sum_{k=0}^d \sum_{m=0}^1 \pi_{i,j,m,d} \right).$$

(3) 利用 Little 公式可求出 I 区和 II 区请求节点的平均逗留时间为

$$E(W_1) = \frac{1}{\lambda_1} E(L_1).$$

$$E(W_2) = \frac{1}{\lambda_2} E(L_2).$$

(4) 系统中 I 区处于工作状态的有线节点的平均耗能为

$$G_1 = g_1 \left(\sum_{i=0}^{c-d} \left(i\pi_{i,0,0,d} + \sum_{j=1}^h \sum_{m=0}^1 i\pi_{i,j,m,d} \right) \right) + g_4 \left(\sum_{i=c-d+1}^c \left(\sum_{k=c-i}^d (c-k)\pi_{i,0,0,k} + \sum_{j=0}^h \sum_{k=c-i}^d \sum_{m=0}^1 (c-k)\pi_{i,j,m,k} \right) \right) \\ + \sum_{i=c+1}^{\infty} \left(\sum_{k=0}^d (c-k)\pi_{i,0,0,k} + \sum_{j=0}^h \sum_{k=0}^d \sum_{m=0}^1 (c-k)\pi_{i,j,m,k} \right)$$

(5) 系统中 I 区处于空闲状态的有线节点的平均耗能为

$$G_2 = g_2 \left(\sum_{i=0}^{c-d} \left((c-d-i)\pi_{i,0,0,d} + \sum_{j=0}^h \sum_{m=0}^1 (c-d-i)\pi_{i,0,m,d} \right) \right).$$

(6) 系统中 I 区处于睡眠状态的有线节点的平均耗能为

$$G_3 = g_3 \left(\sum_{i=0}^{c-d} \left(d\pi_{i,0,0,d} + \sum_{j=1}^h d\pi_{i,j,m,d} \right) \right) + \sum_{i=c-d+1}^c \left(\sum_{k=c-i}^d k\pi_{i,0,0,k} + \sum_{j=1}^h \sum_{k=c-i}^d \sum_{m=0}^1 k\pi_{i,j,m,k} \right) \\ + \sum_{i=c+1}^{\infty} \left(\sum_{k=0}^d k\pi_{i,0,0,k} + \sum_{j=0}^h \sum_{k=0}^d \sum_{m=0}^1 k\pi_{i,j,m,k} \right)$$

(7) 系统中 II 区处于工作状态的无线节点的平均耗电能为

$$G_4 = g_5 \left(\sum_{i=c-d+1}^c \sum_{j=1}^h \sum_{k=c-i}^d j\pi_{i,j,1,k} + \sum_{i=c+1}^{\infty} \sum_{j=1}^h \sum_{k=0}^d j\pi_{i,j,1,k} \right).$$

(8) 系统中 II 区处于工作休假状态的无线节点的平均耗电能为

$$G_5 = g_6 \left(\sum_{i=0}^{c-d} \sum_{j=1}^h \sum_{m=0}^1 j\pi_{i,j,0,d} + \sum_{i=c-d+1}^c \sum_{j=1}^h \sum_{k=c-i}^d j\pi_{i,j,0,k} + \sum_{i=c+1}^{\infty} \sum_{j=1}^h \sum_{k=0}^d j\pi_{i,j,0,k} \right).$$

(9) 系统总能耗

$$G = G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + G_5$$

4. 数值实验

4.1. 参数变化对合作节点等待时间与等待队长的影响

利用 MATLAB 研究参数 d 对合作节点的平均队长 $E(L_1)$ 的影响, 可得图 2 所示的结果。可知在参数 μ_1 固定的情况下, I 区平均队长随着最多休假节点数增加而增加, 呈同向变动的趋势; 当最多休假节点数不变时, I 区平均队长与服务速率呈逆向变动趋势。出现上述现象的原因是最多休假有线节点数增加时, 处于工作状态的有线节点数相应减少, 系统中 I 区整体服务速率下降, 导致平均队长增大; 当 I 区服务台速率增大时, 在最多休假有线节点数不变的情况下, I 区整体服务速率增大, 快速为顾客服务, 出现平均队长减小的情况。所以可通过提高服务台服务速率或减少最多休假台数的方法来提高系统的服务速率。

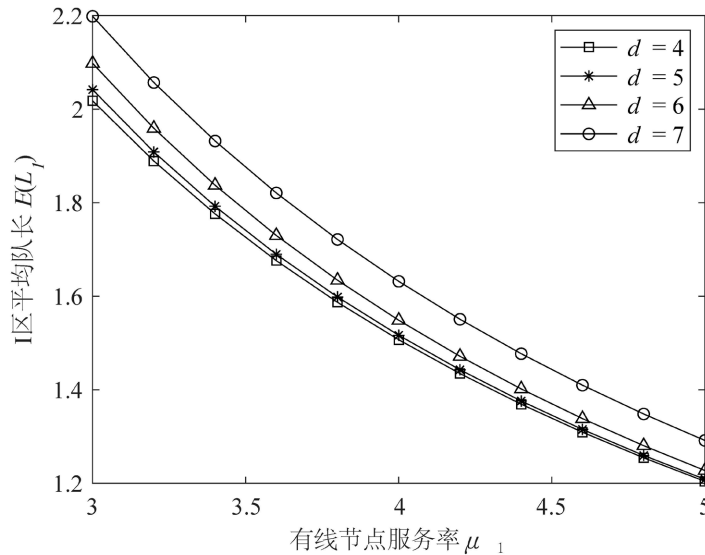


Figure 2. The relationship between average team length and service rate of wired nodes

图 2. 平均队长与有线节点服务率的关系

图 3 中展示了在 d 与 λ_1 的不同取值下, 等待时间 $E(W_1)$ 的变化情况。观察图像可知, 在到达率 λ_1 的值不变时, 等待时间 $E(W_1)$ 与最多休假节点数 d 呈同向变动趋势; 在最多休假节点数 d 不变时, 等待时间 $E(W_1)$ 与到达率 λ_1 成正比。对上述现象, 可做如下解释: 随着最多休假有线节点数的增加, 有更多完

成服务的空闲节点可以进入休假状态，导致处于空闲状态的有线节点数量减少，从而使得等待时间得变长。另外，当有线节点的到达速率提升时，队列长度增加，相应的等待时间也随之增加。

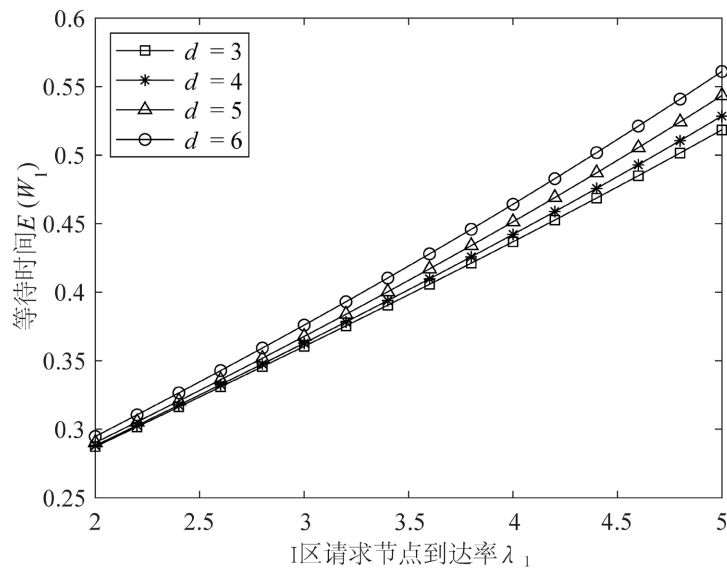


Figure 3. The relationship between average team length and request node arrival rate

图 3. 平均队长与合作节点到达率的关系

4.2. 对非合作节点激励作用的验证

表 2 是 $c=h=9$, $d=5$, $\mu_1=3$, $\mu_2=1$, $\mu_{2v}=0.5$, $s=1.1$, $\theta=1.5$, $\theta_1=0.5$ 时, λ_1 和 λ_2 取不同值的情况下 $E(W_1)$ 和 $E(W_2)$ 的取值。

Table 2. Waiting time comparison

表 2. 等待时间比较

$\lambda_1 = \lambda_2$	$E(W_1)$	$E(W_2)$
3	0.3378	1.0848
4	0.3387	1.0205
5	0.3391	0.9737
6	0.3408	0.9286
7	0.3444	0.8802

通过表 2 信息可知, 在所有参数相同的情况下, 非合作节点的等待时间远大于合作节点的等待时间, 该数据说明说明当为两种节点提供区别式的服务时, 非合作节点接受服务的成本明显大于合作节点接受服务的时间成本, 这种情况下, 能够激励非合作节点向合作节点进行转变。

4.3. 参数变化对 P2P 网络系统能耗的影响

本节利用数值实验研究系统整体能耗, 给定能耗参数 $g_1=1$, $g_2=2$, $g_3=3$, $g_4=3.5$, $g_5=2$, $g_6=1.5$, 改变其他重要参数, 观察参数变化对能耗的影响。参数表达的意义如表 3 所示。

Table 3. The significance of some parameters
表 3. 部分参数的意义

参数	操作
g_1	系统中 I 区有线节点在工作状态的平均能耗
g_2	系统中 I 区有线节点在空闲状态的平均能耗
g_3	系统中 I 区有线节点在休假状态的平均能耗
g_4	系统中 I 区有线节点在高速工作状态的平均能耗
g_5	系统中 II 区无线节点在工作状态的平均能耗
g_6	系统中 II 区无线节点在工作休假状态的平均能耗

在上述能耗参数固定的假设下, 令 $c=h=9$, $\lambda_2=7$, $\mu_1=5$, $\mu_2=2$, $\mu_{2v}=0.5$, $s=1.1$, $\theta=1.5$, $\theta_1=0.5$, 观察系统总能耗在 $d=3,4,5,6$ 的情况下随 I 区请求节点到达率 λ_1 的变动情况, 结果如图 4 所示。在参数 d 不变的情况下, 系统能耗随请求节点到达率 λ_1 的增大而增大, 这是因为当到达率增大时, 有更多的 I 类顾客进入系统, 就有更多的节点从空闲状态以及休假状态进入到工作状态, 又由于单个服务台工作状态的能耗大于休假或空闲状态的能耗, 导致系统能耗增大。在参数 λ_1 不变的情况下, 可知系统能耗与最大休假台数 d 的数量呈逆向变动趋势, 出现上述现象的原因是, 由于采用了部分服务台异步多重休假, 最多休假台数 d 越小则可进入休假的服务台数越少, 在系统中 I 区顾客数小于 $(c-d)$ 时, I 区的空闲服务台将不能进入能耗更低的休假状态, 所以当最多休假台数 d 越小时系统的整体能耗越高。

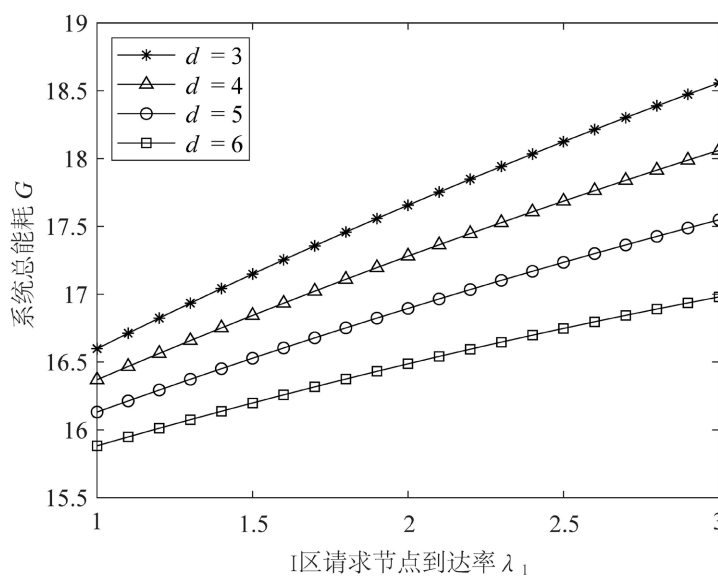


Figure 4. The relationship between total system energy consumption and request node arrival rate

图 4. 系统总能耗与请求节点到达率的关系

令 $c=h=9$, $\lambda_1=3$, $\lambda_2=7$, $\mu_2=2$, $\mu_{2v}=0.5$, $s=1.1$, $\theta=1.5$, $\theta_1=0.5$, 观察系统总能耗在 $d=3,4,5,6$ 的情况下随 I 区请求节点到达率 μ_1 的变动情况, 结果如图 5 所示, 在最多休假不变的情况下, 系统能耗随服务速率的增大而减小, 这是因为若 I 区中服务台的速率高时, 可以快速为顾客提供服务, 更快的进入空闲状态或者休假状态, 单个服务台的能耗降低, 所以系统的能耗降低。

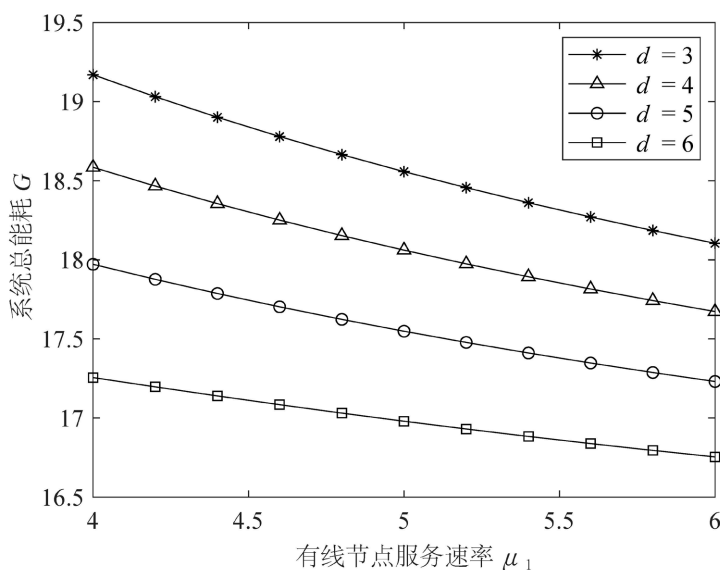


Figure 5. The relationship between total system energy consumption and service rate of wired nodes

图 5. 系统总能耗与有线节点服务率的关系

根据上述分析可知，为减小系统能耗，可从增大系统服务率，减少到达率的角度进行考虑，在部分服务台异步多重休假的休假策略下，还可通过增加最多休假台数的方式来减小系统总能耗。

4.4. 纳什均衡

在 P2P 网络中，请求节点在接入系统前并不了解系统内部的情况，且大部分请求节点更愿意享受服务而不是提供服务。由于系统中单个节点的平均净收益与其平均等待时间成反比，而平均等待时间又与系统中请求节点的数量成正比，所以系统中请求节点的增加会导致单个节点的平均净收益下降。对于非合作节点，它们在进入系统后，如果有空闲的无线节点，就会直接接受服务；如果没有空闲节点，就会离开系统，其收益只有两种可能：固定值或零。因此，对非合作节点的研究并没有实际价值。而对于合作节点，如果进入系统后找不到空闲的服务节点，可以选择进入等待缓冲区。因此，合作节点的平均等待时间和单个节点的平均净收益是变化的，可以通过建立模型来研究纳什均衡的实现情况。以下是对这种情况的假设：

- (1) 假定合作节点完成信息传输服务的收益为 R ；
- (2) 假定合作节点接受一次信息传输需要耗费成本为 f_1 ；
- (3) 假定合作节点接受资源信息传输服务时，每单位延迟时间的成本为 f_2 。

用 U 表示单个合作节点的平均净收益，则有：

$$U = R - f_1 - f_2 E(W_1)$$

令 $c = h = 9$ ， $\lambda_2 = 7$ ， $\mu_1 = 5$ ， $\mu_2 = 2$ ， $\mu_{2v} = 0.5$ ， $s = 1.1$ ， $\theta_1 = 0.5$ ，图 6 清晰地展示了在不同参数 λ_1 和 θ 取值条件下，单个请求节点的平均净收益的变化情况。在保持 θ 值恒定的前提下，随着 λ_1 值的增加，合作节点的平均延迟也增大，进而导致了净收益的降低。观察图像，当 λ_1 值保持不变时， θ 值增大净收益也随之增大。这一现象的产生，主要是由于在其他参数保持不变的条件下，合作节点的到达率提高，导致了节点平均等待时间的延长，即单个节点的平均延迟增加。由于节点的净收益与其延迟时间成反比关系，因此，到达率越高，单个有线节点的净收益反而越低。另一方面，当合作节点的睡眠参数增

大时，有线节点单次休假的时间缩短，有线节点在到达后能更快地进入工作状态，有效降低了单个合作节点的平均延迟，从而使得单个节点的净收益提高。图中可以发现有线节点的个人净收益呈现出单调递减的趋势，并与 $U = 0$ 相交，该交点为纳什均衡点，此时的到达率即为纳什均衡到达率。

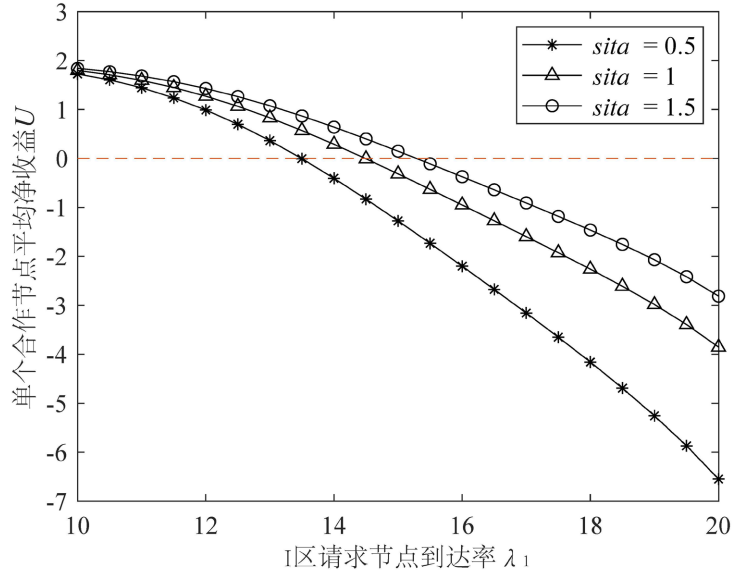


Figure 6. The relationship between average net profit of nodes and the arrival rate of request nodes

图 6. 节点平均净收益与请求节点到达率的关系

4.5. 社会最优策略

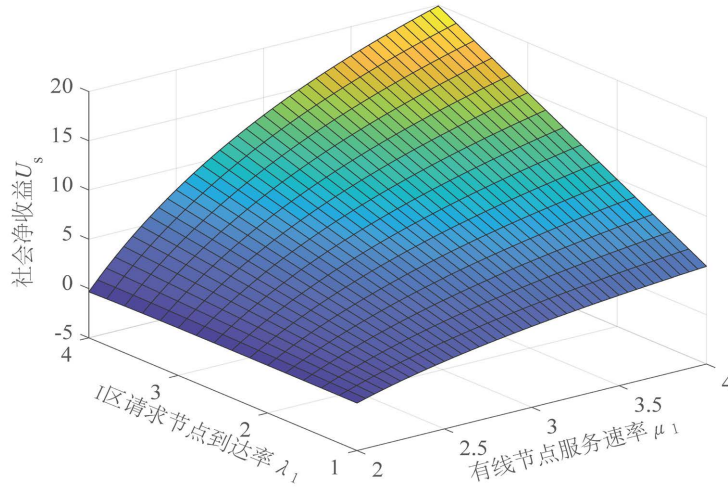


Figure 7. Social net income

图 7. 社会净收益

为确保合作节点总收益的最大化，本文对社会最优策略进行了深入探讨。已知单个合作节点的平均净收益为：

$$U = R - f_1 - f_2 E(W_1),$$

社会净收益函数为

$$U_s = \lambda_1 (R - f_1 - f_2 E(W_1)).$$

令 $c = h = 9$, $\lambda_2 = 7$, $\mu_2 = 2$, $\mu_{2v} = 0.5$, $s = 1.1$, $\theta = 1.5$, $\theta_1 = 0.5$, 图 7 所示为 I 类顾客社会收益随 I 类顾客到达率与 I 类服务台服务速率的变化情况, 在 I 类顾客到达速率不变时, I 类服务台的服务速率越大, I 类顾客的社会收益越大; 在 I 类服务台的服务速率不变时, I 类顾客到达速率越大, I 类顾客的社会收益越大。这是由于, 在其他参数固定的情况下, 增大 I 类服务台的服务速率, 系统中 I 区的平均延迟减小, 根据上述等式可知: 平均延迟越小, 社会收益越大; 当 I 类顾客的到达率增大时, 有更多的 I 类顾客到达 I 区接受服务, 从而导致系统中合作节点的社会收益增大。

5. 结论

本研究采用排队论模型对混合 P2P 网络进行了深入分析, 以优化系统中的“搭便车”现象并降低系统能耗。提出了部分服务台异步多重休假策略, 并建立了一个包含两类服务台的 M/M/c + h 排队模型。通过矩阵几何方法, 求得该模型的性能指标, 并进行了数值实验, 以分析关键参数对性能指标的影响。此外, 本文比较了合作节点和非合作节点的平均等待时间, 并分析了各参数对系统总能耗的影响。在此基础上构建了单个有线节点的平均净收益函数, 并对社会最优策略进行了数值分析。结果显示, 该模型能有效地为两类节点提供区别式服务, 增大非合作节点接受服务的成本以改善“搭便车”现象。此外, 本文数值实验证明通过增加最多休假台数或降低合作节点到达率, 可以减小系统总能耗, 同时, 提高合作节点到达率和有线节点服务率有助于提升社会收益。

参考文献

- [1] Ripeanu, M., Iamnitchi, A. and Foster, I. (2002) Mapping the Gnutella Network. *IEEE Internet Computing*, **6**, 20-57. <https://doi.org/10.1109/4236.978369>
- [2] Ansari, S.A., Pal, K., Govil, M.C., Ahmed, M. and Chawla, T. (2021) Score-Based Incentive Mechanism (SIM) for Live Multimedia Streaming in Peer-to-Peer Network. *Multimedia Tools and Applications*, **80**, 19263-19290. <https://doi.org/10.1007/s11042-021-10709-2>
- [3] Yousafzai, A., Kumar, P.M. and Hong, C.S. (2021) CROWD-CDN: A Cryptocurrency Incentivized Crowdsourced Peer-to-Peer Content Delivery Framework. *Computer Communications*, **179**, 260-271. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2021.08.007>
- [4] 刘浩, 张连明, 陈志刚. 移动 P2P 网络中节点激励机制研究[J]. 小型微型计算机系统, 2017, 38(3): 431-436.
- [5] Ojo, O., Iyadi, C., Oluwatope, A., et al. (2020) AyoPeer: The Adapted Ayo-Game for Minimizing Free Riding in Peer-Assisted Network. *Peer-to-Peer Networking and Applications*, **13**, 1672-1687. <https://doi.org/10.1007/s12083-020-00913-6>
- [6] 马占友, 王文博, 郑晓铭. 带抢占优先权和同步多重工作休假的 M/M/c 排队模型[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2018, 35(3): 96-100.
- [7] 王荣, 马占友, 闫苗, 等. 基于抢占优先排队的 P2P 网络资源搜索机制及性能分析[J]. 系统科学与数学, 2023, 43(05): 1242-1259.
- [8] 王豆豆. 基于混合分层移动 P2P 架构的资源调度算法研究与实现[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京邮电大学, 2021.
- [9] 田乃硕, 岳德权. 拟生灭过程与矩阵几何解[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 2-30.
- [10] 邓春华. 具有可变输入率且部分服务台异步多重休假的 M/M/c 排队系统研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆师范大学, 2011.
- [11] Ma, Z.Y., Guo, S.S. and Wang, R. (2023) The Virtual Machines Scheduling Strategy Based on M/M/c Queueing Model with Vacation. *Future Generation Computer Systems*, **138**, 43-51. <https://doi.org/10.1016/j.future.2022.08.001>