

6-3-2020

Multi-Agent Based Modelling and Simulation for Understanding Tempo-Spatial Patterns of Surgery Wait Times

Tao Li

Department of Computer and Information Science, Southwest University, Chongqing 400715, China;

Luo Liang

Department of Computer and Information Science, Southwest University, Chongqing 400715, China;

Zili Zhang

Department of Computer and Information Science, Southwest University, Chongqing 400715, China;

Lai Hong

Department of Computer and Information Science, Southwest University, Chongqing 400715, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Multi-Agent Based Modelling and Simulation for Understanding Tempo-Spatial Patterns of Surgery Wait Times

Abstract

Abstract: *In order to characterize the self-organized tempo-spatial patterns of wait times in a healthcare service system, a multi-agent cardiac surgery service model (MA-CSS model) was proposed based on the multi-agent modeling within the context of cardiac surgery services. This model pays a special attention to how patients' and hospitals' behaviors and interactions affect the dynamics and relevant patterns of wait times with respect to some key factors, such as geographic accessibility to services, hospital resourcefulness, and wait times. By experimenting with the MA-CSS model, it was observed that certain regularities in wait times emerged from the simulation, which were similar to those discovered from the real world. It reveals the patients' hospital-selection behaviors, hospitals' service-adjustment behaviors, and their interactions via wait times may account for the self-organized tempo-spatial patterns of wait times in cardiac surgery services.*

Keywords

healthcare service systems, cardiac surgery, wait times, tempo-spatial patterns, multi-agent modeling

Authors

Tao Li, Luo Liang, Zili Zhang, Lai Hong, and Fuyuan Xiao

Recommended Citation

Tao Li, Luo Liang, Zhang Zili, Lai Hong, Xiao Fuyuan. Multi-Agent Based Modelling and Simulation for Understanding Tempo-Spatial Patterns of Surgery Wait Times[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(5): 979-987.

基于 Multi-Agent 的手术等待时间时空模式建模与仿真

陶丽, 骆亮, 张自力, 赖红, 肖富元

(西南大学计算机与信息科学学院, 重庆 400715)

摘要: 为刻画病人就医等待时间的时空规律, 以心脏病手术为例, 基于多 Agent 建模技术, 搭建心脏病手术服务系统 MA-CSS(Multi-Agent Cardiac Surgery Service) 模型。该模型重点关注病人就医距离、医疗资源丰富程度、医院和病人个体行为等多种因素对等待时间动态性的交互影响。基于 MA-CSS 模型的仿真实验较好地复现真实心脏病手术等待时间的时空规律, 同时揭示病人择医行为、医院服务能力调整行为和等待时间之间的交互是自组织形成等待时间时空模式的可能原因。

关键词: 医疗服务系统; 心脏病手术; 等待时间; 时空模式; Multi-Agent 建模

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2017) 05-0979-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201705007

Multi-Agent Based Modelling and Simulation for Understanding Tempo-Spatial Patterns of Surgery Wait Times

Tao Li, Luo Liang, Zhang Zili, Lai Hong, Xiao Fuyuan

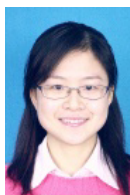
(Department of Computer and Information Science, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: In order to characterize the self-organized tempo-spatial patterns of wait times in a healthcare service system, a multi-agent cardiac surgery service model (MA-CSS model) was proposed based on the multi-agent modeling within the context of cardiac surgery services. This model pays a special attention to how patients' and hospitals' behaviors and interactions affect the dynamics and relevant patterns of wait times with respect to some key factors, such as geographic accessibility to services, hospital resourcefulness, and wait times. By experimenting with the MA-CSS model, it was observed that certain regularities in wait times emerged from the simulation, which were similar to those discovered from the real world. It reveals the patients' hospital-selection behaviors, hospitals' service-adjustment behaviors, and their interactions via wait times may account for the self-organized tempo-spatial patterns of wait times in cardiac surgery services.

Keywords: healthcare service systems; cardiac surgery; wait times; tempo-spatial patterns; multi-agent modeling

引言

病人等待就医时间过长是医疗服务系统中受



收稿日期: 2016-09-05 修回日期: 2016-10-31;
基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(XDJK
2014C152, XDJK2015C153, XDJK2016C043, SWU11
4112), 重庆市科技研发基地建设计划(国际科技合作)
(cstc2015ghz40002), 西南大学博士基金(SWU115091);
作者简介: 陶丽(1981-), 女, 重庆, 博士, 研究方向
为复杂医疗服务系统建模与优化、复杂网络等。

到长期关注的一大问题。据加拿大 2008-2014 的统计结果显示, 非紧急心脏病病人的平均手术等待时间超过两个月^[1]。另据广东省省情调查研究中心 2010 年发布的报告显示, 等待时间长仍是大多数三甲医院需要改进的主要问题^[2]。因此, 了解医疗服务系统内病人就医等待时间产生的原因, 掌握其动态变化的内部机理, 是引导就医人群在系统内有

序流动、提高医疗资源利用率、改善系统服务效能的关键。

由于医疗服务系统是一个复杂系统^[3],病人就医行为会受到病人的个体特征、教育和收入状况、医院设施和等待时间等因素的影响。而病人就医人群的动态变化、医院的软硬设施、医生的诊治行为等因素又会影响病人就医等待时间^[4]。由于影响因素之间还可能存在着各种形式的相互影响和正负反馈^[5],可能形成等待时间越长的医院吸引越多病人^[6]、或者病人在医院间“钟摆式”流动、或者医院等待队列规律性变化^[7]等常理难以解释的自组织现象(Self-organized regularities)和时空特性(Tempo-spatial patterns),从而导致某些医疗资源没有充分利用,致使病人等待较长时间。自上世纪 90 年代以来,国际上渐有研究者运用复杂系统理论对医疗服务系统进行研究。Priesmeyer^[8]、Arndt^[9]等学者相继运用混沌理论(Chaos theory)和经典复杂系统理论(Complex systems theories)探讨了医疗服务系统的复杂性和将这些理论应用到医疗服务管理领域的可行研究方向。然而,对医疗服务系统中病人就医等待时间时空模式如何产生这一问题有待进一步探讨。

以心脏病手术为具体应用背景,从复杂系统自组织角度,基于多 Agent 建模方法,搭建医疗服务系统模型(Multi-agent based complex healthcare service system model, MA-CSS),以揭示该医疗服务系统中手术等待时间形成特定时空模式的内部机理。本文模型重点考虑以下几点:

(1) 建模尺度:由于医疗服务系统涉及到病人、医护人员、医院、手术室等多种不同类型、不同粒度的实体(entities)。这些实体的行为受到个体特征、社会经济环境、医疗软硬设施等多维度、多因素的影响^[6]。例如,病人选择某医院就医的行为易受医院的软硬件资源(如新的先进仪器设备)和医疗服务质量(如就医等待时间)的显著影响,因此,某医院资源的相对变化,可能导致病人选择该医院意愿的变化,进而影响其病人就医等待时间。

而医疗资源和等待时间的变化,又会影响到后续病人的就医选择行为。因此,需要厘清哪些因素、实体和交互过程与系统中涌现的时空模式紧密相关,值得在建模过程中考虑:

(2) 交互关系:由于影响因素和系统变量之间可能存在直接、间接、调节等多种类型的关系,多个影响因素和变量之间还可能形成正负反馈环。因此,建模需要厘清影响因素和被影响的系统变量之间如何交互;

(3) 异构性:由于系统内病人、医护人员、医院等实体具有不同的个体特征,因此,不同病人的择医行为、不同医院的手术调度行为、服务能力调整行为等均各不相同,具有异构性。因此,如何在建模过程中考虑实体的异构性较为关键。

1 就医等待时间建模方法概述

现有研究多采用排队论(Queueing theory)、离散事件模拟(Discrete event simulation)、系统动力学(System dynamics)、基于 Agent 的建模(Agent-based modeling, ABM)等方法,从不同的角度对等待时间的动态性进行刻画。

1.1 排队论和离散事件模拟

由于医疗服务系统病人入院就医、医生诊治病人等行为均具有随机特性,研究者们通常运用排队论和离散事件模拟对医疗服务系统中的等待时间进行建模和仿真^[10]。基于排队论的模型能够估算出一个或多个变量影响下的某种系统状态出现的概率,因此常用于分析医院在不同资源配置情况下病人等待时间和等待队列的变化,从而为医院优化资源配置和管理措施提供决策建议。在医疗服务研究领域, Schoenmeyr^[11]、周文正^[12]等学者通过建立排队模型,对手术室、病房的使用情况进行了刻画,并对医院在不同资源配置场景下的等待时间和等待队列长短进行了预测。Jacobson^[13]、Cardoen^[14]等学者综述了运用排队论和离散事件模拟来分析和预测病人和就医等待时间的动态性,用于优化手术室人员配置和资源调度的策略设计。但是,采用

排队论等运筹学方法来理解等待时间时空模式的涌现机理不太合适, 因为: (1) 排队论中关于随机变量服从某一统计分布的假设在现实世界中不一定满足; (2) 排队论通常假设系统中的个体都是被动的, 即病人、医院等均不能自主决策, 因此较难刻画病人和医院服务的自治行为。

1.2 系统动力学

一些研究者运用系统动力学, 从复杂系统分析角度, 通过刻画变量之间的交互和反馈, 来研究老龄化、国家宏观政策、医生和医疗设施变化等因素对病人就医等待时间变化的影响^[15-16]。然而, 基于系统动力学的建模方法也难以解释医疗服务系统中自组织现象的形成原因, 原因是: (1) 该方法通常假设变量具有同质性(Homogeneous), 难以刻画真实系统中病人、医院等异构(Heterogeneous)个体的不同特征和行为; (2) 变量之间的交互关系预先定义并在模拟过程中保持不变, 因此难以刻画病人和医院的自治行为。

1.3 多 Agent 建模

一些研究运用基于多 Agent 的建模(后文简称 ABM)技术, 通过定义复杂适应系统中 Agent(即自治个体, 如病人或者医院)的行为和交互来实现对系统行为和动态性的刻画^[17]。一些研究者通过构建不同的 ABM 模型来衡量医生的行为对医疗服务质量的影响^[18], 探讨城市医疗系统中大医院和社区医院资源优化配置对病人就医等待时间的影响^[19]。由于 Agent 的自治性和交互性, 一个简单的 Agent 模型都可能出现涌现行为, 从而为解释医疗服务系统中的自组织现象和时空特性的内部机理提供可能。

多 Agent 面向自治计算方法是一种基于多 Agent, 从复杂系统自组织角度出发的计算范型^[20]。该方法重点关注那些可能引发系统自组织和涌现行为的个体、个体行为、个体间的交互和反馈, 通过构建一组异构个体的自治行为和复杂交互实现对复杂系统的刻画。构建的模型还将基于实验仿真, 借助试错法(Try-and-error)通过多次迭代逼近

真实系统形成的时空特性来修正模型。最后通过定性定量比较修正后模型在仿真实验中涌现出的自组织现象与真实系统所观察的自组织现象来验证模型的有效性。本文借助将多 Agent 面向自治计算方法来搭建心脏病手术医疗服务系统模型。

2 医疗服务系统模型

基于多 Agent 面向自治计算技术, 搭建医疗服务系统模型的主要建模步骤包括: (1) 识别医疗服务系统中的主要异构实体, 关键影响因素, 实体和因素之间的交互, 以及在交互中形成的反馈回路; (2) 对实体所处环境、异构实体、实体和因素之间的交互、实体的自治行为等进行建模刻画; (3) 基于构建的多 Agent 模型进行仿真实验。

2.1 实体、主要因素、反馈回路的识别

根据病人就医和医院诊治病人的实际情况^[21], 当病人需要接受心脏病手术时, 病人会根据自身和门诊医生(或家庭医生)的推荐, 选择某一家医院进行手术治疗。当病人入院以后, 医院将随之提供相应的手术和术后康复等相关医疗服务。据此, 本文将刻画的两个关键实体: 病人和医院。

现实生活中, 有多种因素直接、或间接、或交互地影响病人就医和医院服务性能, 造成医疗服务系统的复杂性(如图 1 所示)。这些因素总体可分为两类: (1) 影响病人总人数的因素: 根据文献^[2,4,24], 某地区的人口总数、年龄分布、收入、教育程度等人口结构、社会经济特征会影响到该地区患心脏病的病人数目, 而天气等环境因素会影响心脏病发作, 导致病人接收手术治疗。(2) 影响病人到某医院就医的因素: 基于文献^[6,22-25], 病人决定去哪家医院进行手术治疗的主要因素包括家到医院的距离、医疗资源丰富程度、医院等待时间等服务性能、以及病人的决策类型。本文将在建模中综合考虑以上因素。其中, 影响病人种群数的因素将用于在仿真实验时初始化病人种群数, 而影响病人到某医院就医的因素将在病人和医院的行为规则设计过程中考虑。

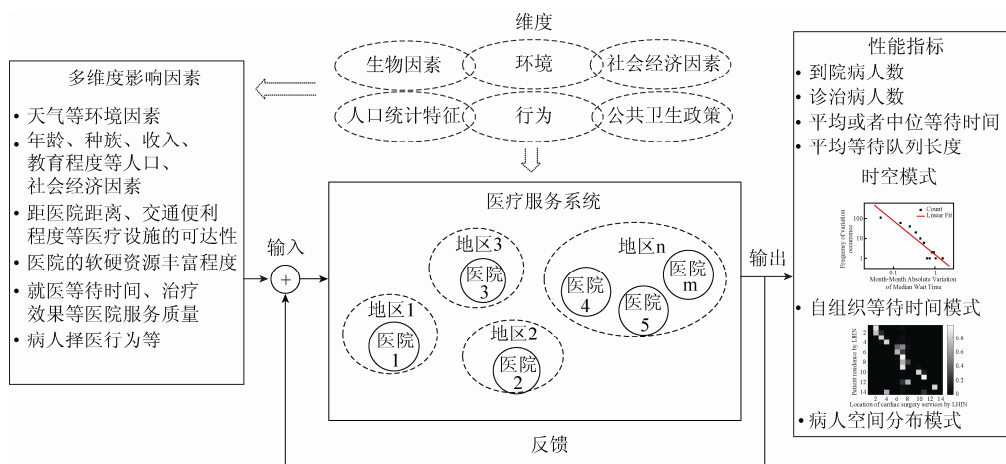


图 1 复杂医疗服务系统示例

Fig. 1 A schematic diagram for illustrating a complex healthcare service system

考察的影响因素之间存在多种类型的交互和关系，如图 2 所示。图中，“+”表示两个影响因素之间存在正相关关系，而“-”表示两个因素之间存在负相关关系。本文在建模考察的影响因素之间识别出两个反馈环。一个是由用户择院行为导致的“入院病人-医院等待时间”负反馈环，另一个是因病人入院行为和医院服务行为产生的“医院病人-医院服务数-医院等待时间”正反馈环。

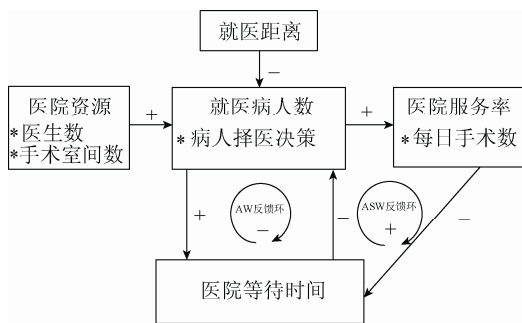


图 2 影响等待时间的交互和反馈环路

Fig. 2 The interactions and the relevant feedback loops between impact factors of wait times

2.2 环境的定义

模型中，病人实体和医院实体通过环境 E 来获取和释放信息。本文采用二分网络 CH 刻画环境 E 的结构。该二分网络的定义见定义 1，环境 E 的定义见定义 2。

定义 1 住地-医院网络 CH : 病人住地和医院之间的结构可用一个二分网络 CH 来描述， $CH \leq$

$C, H, F, I >$ 。病人的住地节点集 $C(N) = \{c_i\}$ ($i \in [1, N]$) 表示 N 个病人居住的城市。医院节点集 $H(M) = \{h_j\}$ ($j \in [1, M]$) 表示 M 个提供某种医疗服务的医院， $C \cap H = \emptyset$ 。邻接矩阵 $F = \{f_{ij}\}_{N \times M}$ ($f_{ij} \in [0, 1]$ ， $\sum_{j \in [1, M]} f_{ij} = 1$) 表示是否有病人在节点 c_i 和 h_j 之间流动。 $I = \{inf_{ij}\}_{N \times M}$ 表示环境中节点对 c_i 和 h_j 之间的静态或者动态信息。

定义 2 环境 E : MA-CSS 模型中的环境 E 用于维护病人、医生和医院的信息，用三元组 $\langle D, R, W \rangle$ 来描述。 D 表示距离信息， $D = \{d_{ij} | i \in [1, N], j \in [1, M]\}$ ，本模型中，节点 c_i 和 h_j 之间的距离 d_{ij} 由开车时间来衡量； R 表示医院医疗服务资源信息， $R = \{r_j | j \in [1, M]\}$ ，其中 r_j 表示 h_j 的医生人数； W 记录医院的等待时间， $W = \{w_{j,t} | j \in [1, M]\}$ ，其中 $w_{j,t}$ 记录医院 h_j 在时间轮 t 的等待时间信息。这里，一个时间轮 t 表示医院用于调整工作计划安排的时间段，比如一个月或者一个季度；每个时间轮 t 包含 T 个单位时间步 t ， t 是纪录医院工作的单位时间，模型中为 1 天，即 $\tau = T \times t$ 。

2.3 实体

本文根据病人就医决策时是否需要等待时间将所刻画的病人分为两类，等待时间敏感型和等待时间非敏感型。敏感型病人在选择医院时将考虑住址到医院的距离、医院资源和等待时间这 3 个因素，而非敏感型病人在决策时将不会考虑医院的等

待时间信息。病人实体定义如下:

定义 3 病人实体 patient: 病人实体由元组 $\langle \text{patientID}, \text{cityID}, P_r, \text{rule}, \text{hospitalID}, \text{type}, \text{joinTime}, \text{endTime}, \text{wp} \rangle$ 来描述, 其中:

PatientID: 病人实体的唯一标识;

cityID: 病人居住地区的唯一标识;

P_r : 某个病人选择医院时考虑等待时间的概率;

rule: 病人选择医院的行为规则;

hospitalID: 病人所选医院的唯一标识;

type: 病人心脏病的危重程度, 从危重到非危重可划分为 K 类;

joinTime: 病人加入某医院手术等待队列的时间;

endTime: 病人在某医院接受心脏病手术的时间;

wp: 病人在某医院等待手术的总时间, $\text{wp} = \text{endTime} - \text{joinTime}$ 。

定义 4 医院实体: 医院实体 Hospital[M] 纪录医院的所有信息。每个医院实体 $h_j (h_j \in H)$ 由元组 $\langle \text{hospitalID}, \text{cityID}, A_k(t), \mu(t), \text{rule}, w(\tau), \text{queue} \rangle$ 描述, 其中,

hospitalID: 医院的唯一标识;

cityID: 某医院所在地区的唯一标识;

$A_k(t)$: 类型为 $k (k \in K)$ 的病人人数信息, $A_k(t) = \{a'_{i,k}(t)\}$ 。 $a'_{i,k}(t)$ 表示在每个时间步 t 地区 c_i 到医院做心脏病手术的 k 类型病人数;

$\mu(t)$: 医院在时间步 t 以该服务率诊治病人;

rule: 医院根据入院病人累积情况调整服务率的行为规则;

$w(\tau)$: 纪录医院在过去一段时间内的等待信息。在本文中, 在时间轮次 τ 将被医院释放到环境当中的是医院在过去的时间轮次 $\tau-1$ 的等待信息。

queue: 纪录每个时间步在医院等待心脏病手术的病人信息。

2.4 行为规则

2.4.1 病人选择医院的行为规则

基于文献分析, 总结出以下 3 条影响病人选择

医院行为的客观事实:

事实 1: 病人更倾向于选择离家近的医院, 且选择医院的概率与病人到医院的距离呈指数递减关系^[22]。

事实 2: 病人更倾向于选择医生等人力资源、手术室等物质资源更为丰富的医院^[6,23]。所以, 病人到医院的人数与医院资源丰富程度成正相关关系。

事实 3: 病人更倾向于选择等待时间短的医院^[24-25]。但是, 大部分病人, 尤其是老年病人, 无法获知医院的等待时间, 因此, 在医院选择的时候, 可能不会考虑等待时间这一影响因素^[24]。

基于这些客观事实, 本文为病人的择医行为设计了 DRW 和 DH 两条行为规则。

定义 5 DRW 规则: 该规则表示在某时刻 τ , 一名居住在某地区 $c_i (c_i \in C)$ 的病人如何根据某医院 $h_j (h_j \in H)$ 离居住地的距离 d_{ij} 、该医院的资源丰富程度 r_j 、以及等待时间 $w_j(\tau)$ 来估算选择该医院就医的概率, 计算公式如下:

$$a_{ij} = f(d_{ij}) \times f(r_j) \times f(w_j(\tau)) \mathbb{Z};$$

$$f(d_{ij}) = \frac{d'_{ij}}{\sum_{h_k \in H} d'_{ik}}; \quad d'_{ij} = \frac{\sum_{h_k \in H} d_{ik}^{\alpha_d}}{d_{ij}^{\alpha_d}};$$

$$f(r_j) = \frac{r_j^{\alpha_r}}{\sum_{h_k \in H} r_k^{\alpha_r}}; \quad f(w_j(\tau)) = \frac{\sum_{h_k \in H} w_k^{\alpha_w}(\tau)}{w_j^{\alpha_w}(\tau)}.$$

其中: $\alpha_d (\alpha_d \in [1, +\infty))$, $\alpha_r (\alpha_r \in [1, +\infty))$, 和 $\alpha_w (\alpha_w \in [1, +\infty))$ 是用于表示病人对距离、医院资源丰富程度、和等待时间 3 个影响因素敏感程度的指数型参数。

定义 6 DH 规则: DH 是距离(Distance)和医院资源(Hospital resourcefulness)这两个影响病人择医行为因素的英文单词缩写。这条规则用于刻画病人如何根据到某医院 $h_j (h_j \in H)$ 的距离 d_{ij} 和该医院的资源丰富程度 r_j 来选择就医的医院。选择某医院的概率计算方式如下:

$$a_{ij} = f(d_{ij}) \times f(r_j); \quad f(d_{ij}) = \frac{d'_{ij}}{\sum_{h_k \in H} d'_{ik}};$$

$$d'_{ij} = \frac{\sum_{h_k \in H} d_{ik}^{\alpha_d}}{d_{ij}^{\alpha_d}}; f(r_j) = \frac{r_j^{\alpha_r}}{\sum_{h_k \in H} r_k^{\alpha_r}}$$

2.4.2 医院服务能力调整的行为规则

由于到医院就医病人数的不确定性, 医院会周期性的调整服务能力。因此, 本文假设医院的服务能力和等待就医的队列长度线性相关, 并据此设计医院调整服务能力的 S 规则。

定义 7 S 规则: 是服务能力(Service rate)的英文缩写。该规则描述在某个时段 T , 医院 $h_j (h_j \in H)$ 如何根据上一时段 $T-1$ 的病人等待队列长度来调整服务能力 $\mu_j(T)$ 。服务能力调整的计算公式如下:

$$\mu_j(T) = \bar{\mu}_j \times \left(\frac{a_j \times A_j(T-1)}{\bar{A}_j} + b_j \right)$$

式中: T 是医院用于检查和调整服务能力的时间段, 比如, 一周^[26]; $\mu_j(T)$ 是医院 h_j 在时段 T 的服务能力; $\bar{\mu}_j$ 是医院 h_j 的平均服务能力; $A_j(T-1)$ 是医院在 $T-1$ 的累积等待病人数; \bar{A}_j 是医院 h_j 的平均病人就诊人数; a_j 和 b_j 是两个调节参数。

3 仿真实验

3.1 实验设置

本文以加拿大安大略省的心脏病手术服务作为研究背景。模拟实验采用 2005-2006 年加拿大安大略省的心脏病手术服务数据^[27]和人口普查数据^[28]对 MA-CSS 模型的参数进行了初始化。同时, 根据已有研究, 大约 20% 的病人在选择医院的时候不会考虑等待时间^[27], 因此, 本文在仿真实验中假设 $P_r = 0.2$ 。基于已有研究^[24], 病人在医院通常会被归类为紧急病人和非紧急病人两大类, 紧急病人享有优先服务权。因此, 本文假设 $K=2$, 且紧急病人和非紧急病人的比例约为 0.23: 0.77^[24]。用于表示人对距离、医院资源丰富程度、和等待时间等影响因素敏感程度的参数 α_d 、 α_r 和 α_w 通过对真实病人流的空间分布模式拟合所获得, 分别是 $\alpha_d=4$, $\alpha_r=1$, 和 $\alpha_w=1$ 。

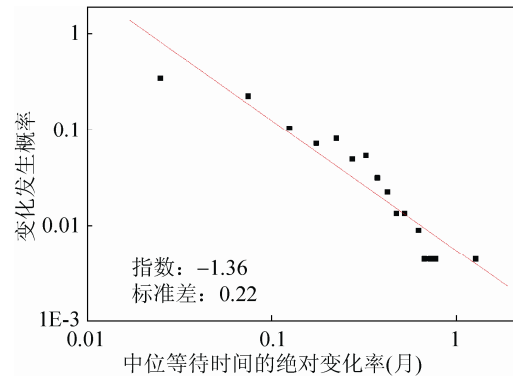
根据已有文献^[27], 医院 h_j 在时间段 τ 内各病人等待时间的中位数(后文称为中位等待时

间) $Me(w_j(\tau))$ 是衡量医院服务质量的一大性能指标。因此, 本文选择中位等待时间的绝对变化 $|Me(w_j(\tau)) - Me(w_j(\tau-1))|$ 作为等待时间变化的观测指标。为同真实的数据相比较, 本文仿真实验的时长设为两年, 即 365×2 个时间步。在每一个模拟的时间步(等同一天), 仿真实验将运行 1 000 次以降低随机数的影响

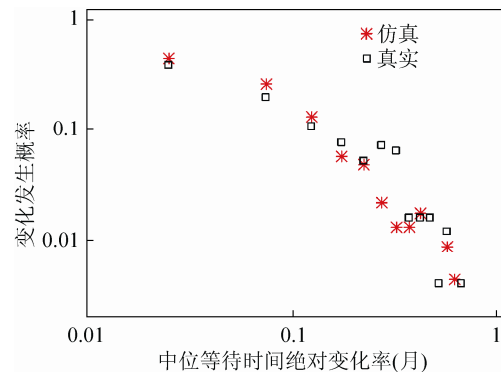
3.2 实验结果

3.2.1 等待时间的统计规律

图 3(a)展示了仿真实验中中位等待时间变化的统计分布。经 Clauset 方法^[29]验证, 中位等待时间的绝对变化服从幂指数为 -1.47 的幂律分布 ($p < 0.1$)。图 3(b)比较了真实数据和仿真实验所获得的中位等待时间变化的统计分布。仿真实验和真实数据中中位等待时间变化的相对熵(Kullback-Leibler 距离)为 0.122 7, 表明两个分布具有相似性。



(a) 中位等待时间绝对变化的统计分布



(b) 真实和仿真实验等待时间变化的对比

图 3 仿真实验中等待时间的统计规律

Fig. 3 Statistical regularities of wait times in simulations

3.2.2 等待时间的动态性

图 4 展示了安大略省 6 家提供心脏病手术医院真实和仿真等待时间的变化情况(图中, R 表示相关性系数, p 值表示统计显著性)。如图 4 所示, 各医院仿真所获得的中位等待时间的时间模式变化趋势与真实观测现象基本吻合。经相关性分析, 各

医院仿真和真实数据的变化趋势均为正相关。这表明, 本文提出的 MA-CSS 模型能够较好的复现中位等待时间在现实世界中的时空规律。同时表明, 病人的择医行为、医院服务能力调整行为和就医等待时间之间的交互和反馈是医疗服务系统中等待时间时空模式涌现的可能原因。

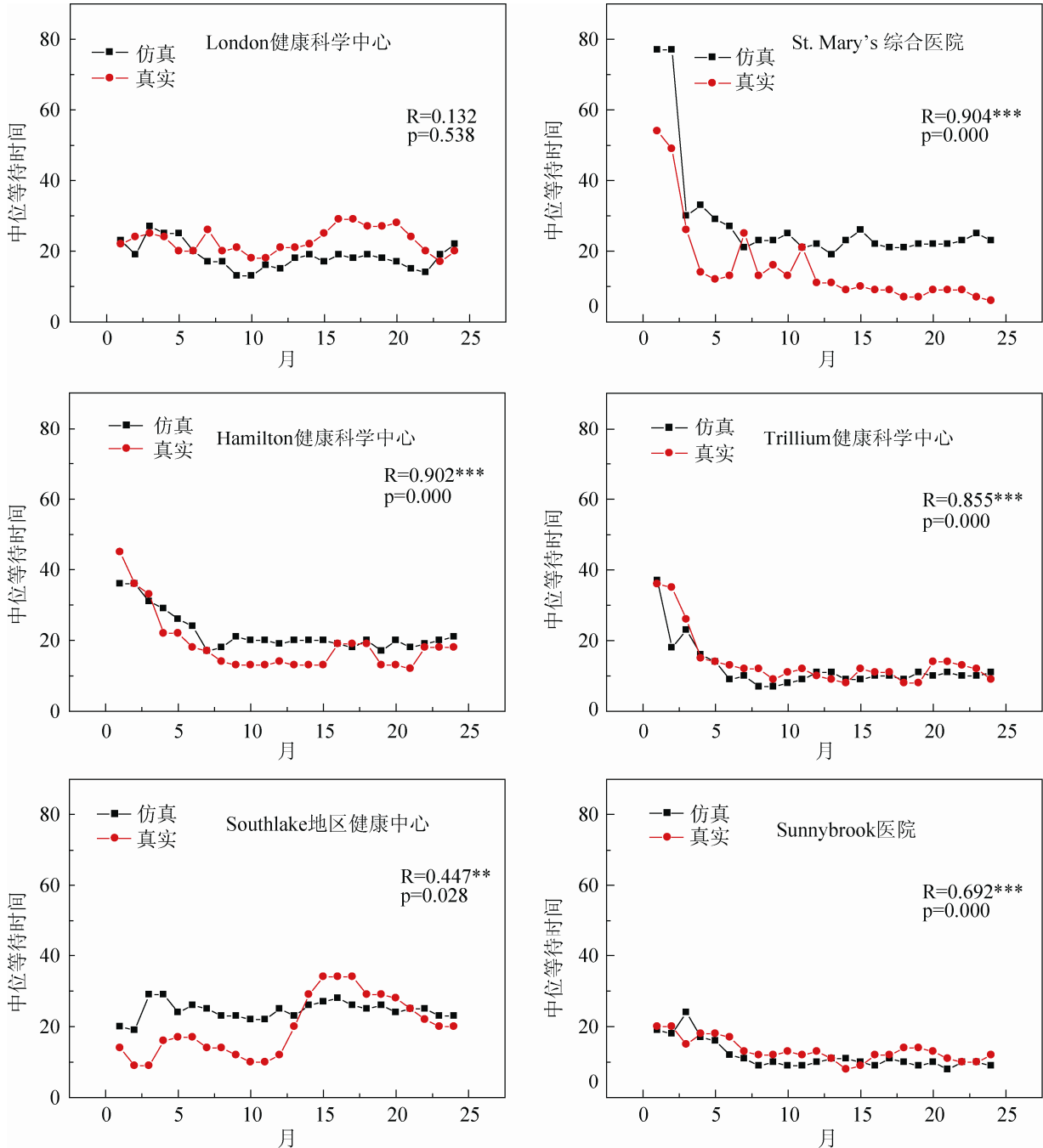


图 4 真实和仿真实验的各医院等待时间变化模式对比
Fig. 4 The observed and simulated temporal patterns in wait times in exemplified hospitals

3.3 讨论

由于总人群中在择医决策时考虑等待时间信息的人数比例 P_r 的变化, 可能影响各医院病人数的动态变化, 从而对医院等待时间的变化产生影响, 因此, 本节将对 MA-CSS 模型这一重要参数 P_r 进行敏感性分析。

图 5 显示不同的 P_r 取值对医院等待时间变化的影响。表 1 给出针对不同的 P_r 取值, 采用 Clauset 方法^[29]进行幂律分布测试后的结果。根据图 5 和表 1, 当没有病人在择医决策时考虑等待时间的时候, 等待时间的绝对变化将不再服从幂律分布 ($p=0.13$)。因为此时, 由于等待信息不再影响病人的择医决策, 病人择医行为和等待时间之间的反馈环将不存在。因此, 病人人数将不会随着医院等待时间的变化而自适应的调节。

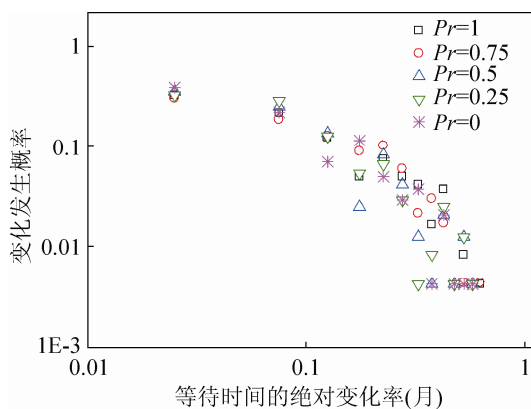


图 5 随 P_r 值变化的等待时间动态变化的统计分布
Fig. 5 Distributions of absolute wait time variations in cardiac surgery services with respect to different P_r .

表 1 不同 P_r 值的幂律测试结果

Tab. 1 The p-values of power-law tests for distributions of absolute wait time variations with respect to different P_r

P_r	1	0.75	0.5	0.25	0
p 值	0.16	30	0.16	0.10	0.13

注: 如果 $p \leq 0.1$, 表明测试数据服从幂律分布^[29]。根据图 5 和表 1, 当有少部分病人在选择医院时考虑等待时间信息, 比如 $P_r=0.25$, 中位等待时间的绝对变化服从幂律分布 ($p=0.10$) 这表明, 由于考虑等待时间的病人会随着各医院等待时间的动态变化而选择不同的医院, 从而使得整个医疗服务系统实现自

我调节。然而, 如图 5 和表 1 所示, 当 P_r 取值继续增大, 比如, 当取值为 0.5, 0.75, 1 时, 等待时间的绝对变化又将不再服从幂律分布, 因为 Clauset 测试的所有 $p > 0.1$ 。这表明如果医疗服务系统中存在大量的对等待时间敏感的病人, 整个系统将不能实现自我调节, 因为这些病人会造成各医院就医人数的剧烈变化。

4 结论

本文基于多 Agent 建模技术, 搭建了用于刻画自组织复杂医疗服务系统的 MA-CSS 模型。仿真实验表明, 本模型能够较好的复现心脏病手术等待时间的变化规律和时空特性。本模型表明, 病人的择医行为、医院服务能力调整行为和就医等待时间之间的交互关系是形成心脏病手术医疗服务系统中手术等待时间自我调节现象的可能原因。

参考文献:

- [1] Amado J, Bento D, Silva D, et al. Changes in referral protocols for cardiac surgery: Do financial considerations come at a cost? [J]. Revista Portuguesa de Cardiologia (S0870-2551), 2015, 34(10): 575-581.
- [2] 广东省省情调查研究中心. 2010广东三级甲等医院服务满意度调查报告 [EB/OL]. (2011-07-28) [2017-04-25]. <http://www.gdsqfb.org.cn/text/946.html>. (Guangdong Provincial Research Center. Investigation report on service satisfaction of Grade III-A hospitals in Guangdong province, 2010. [EB/OL]. (2011-07-28) [2017-04-25]. <http://www.gdsqfb.org.cn/text/946.html>.)
- [3] Lipsitz L A. Understanding health care as a complex system: The foundation for unintended consequences [J]. JAMA: the journal of the American Medical Association (S1538-3598), 2012, 308(3): 243-244.
- [4] Wijeyundera H, Stukel T, Chong A, et al. Impact of clinical urgency, physician supply and procedural capacity on regional variations in wait times for coronary angiography [J]. BMC Health Services Research (S1472-6963), 2010, 10(5): 1-9.
- [5] Plsek P, Greenhalgh T. The challenge of complexity in health care [J]. BMJ (S1470-2738), 2001, 323(7313): 625-628.
- [6] Smethurst D P, Williams H C. Are hospital waiting lists self-regulating? [J]. Nature (S0028-0836), 2001,

- 410(6829): 652-653.
- [7] O Gally. Agent-based routing in queueing systems-self-organization in production and service networks: From stylized models to applications [M]. Germany: Lambert Academic Publishing, 2010.
- [8] Priesmeyer H R, Sharp L F. Phase plane analysis: Applying chaos theory in health care [J]. *Quality Management in Health Care* (S1063-8628), 1995, 4(1): 62-70.
- [9] Amdt M, Bigelow B. Commentary: The potential of chaos theory and complexity theory for health services management [J]. *Health Care Management Review* (S0361-6274), 2000, 25(1): 35-38.
- [10] Lakshmi C, Sivakumar A I. Application of queueing theory in health care: A literature review [J]. *Operations Research for Health Care* (S2211-6923), 2013, 2(1): 25-39.
- [11] Schoenmeyr T, Dunn P, Gamamik D, et al. A model for understanding the impacts of demand and capacity on waiting time to enter a congested recovery room [J]. *Anesthesiology* (S1365-2044), 2009, 110(6): 1293-1304.
- [12] 周文正. 排队论模型在医疗服务系统中的应用研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2011. (Zhou W. Application research of queueing theory model in medical service system [D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2011.)
- [13] Jacobson S, Hall S, Swisher J. Application of discrete-event simulation in health care clinics: A survey [C]// Hall R W, eds., *Patient flow: reducing delay in healthcare delivery*. New York, USA: Springer, 2006.
- [14] Cardoen B, Demeulemeester E, Belien J. Operating room planning and scheduling: A literature review [J]. *European Journal of Operational Research* (S0377-2217), 2010, 201(3): 921-932.
- [15] Cardiac Care Network of Ontario. Cardiac surgery in Ontario: Ensuring continued excellence and leadership in patient care [EB/OL]. (2006-10-31) [2016-04-25]. http://www.ccn.on.ca/ccn_public/uploadfiles/files/Surgical_Report_October31_2006_BOARD.pdf.
- [16] Homer J, Hirsch G. System dynamics modeling for public health: Background and opportunities [J]. *American Journal of Public Health* (S1541-0048), 2006, 96(3): 452-458.
- [17] 廖守义, 戴金海. 复杂适应系统及基于Agent的建模与仿真方法 [J]. *系统仿真学报*, 2004, 16(1): 113-117. (Liao S, Dai J. Study on complex adaptive system and agent-based modeling & simulation [J]. *Journal of System Simulation*, 2004, 16(1): 113-117.)
- [18] Leykum L, Kumar P, Parchman M, et al. Use of an agent-based model to understand clinical systems [J]. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* (S1460-7425), 2012, 15(3): 2.
- [19] 徐旭雁. 基于代理的城市医疗系统资源优化配置的研究 [D]. 北京: 清华大学, 2009. (Xu X. Agent-based urban health care resource allocation research [D]. Beijing, China: Tsinghua University, 2009.)
- [20] Liu J, Jin X, Tsui K. *Autonomy oriented computing: from problem solving to complex systems modeling* [M]. New York, USA: Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [21] Cardiac Care Network of Ontario. Advanced adult cardiac care patient access management process: Better access to quality cardiac care [EB/OL]. (2006-10-31) [2016-04-25]. http://www.ccn.on.ca/ccn_public/uploadfiles/files/Patient%20Access%20Mgmt%20diagram.pdf.
- [22] Seidel J E, Beck C A, Pocobelli G, et al. Location of residence associated with the likelihood of patient visit to the preoperative assessment clinic [J]. *BMC Health Services Research* (S1472-6963), 2006, 6(1): No.13.
- [23] Kinchen K S, Cooper L A, Levine D, et al. Referral of patients to specialists: Factors affecting choice of specialist by primary care physicians [J]. *Annals of Family Medicine* (S1544-1717), 2004, 2(3): 245-252.
- [24] Cardiac Care Network of Ontario. Patient, Physician and Ontario Household Survey Reports: Executive Summaries [EB/OL]. (2005-08-15) [2016-04-25]. http://www.ccn.on.ca/ccn_public/UploadFiles/files/CCN_Survey_Exec_Sum_200508.pdf.
- [25] Lakha S F, Yegneswaran B, Furlan J C, et al. Referring patients with chronic noncancer pain to pain clinics [J]. *Canadian Family Physician* (S1715-5258), 2011, 57(3): e106.
- [26] Office of the Auditor General of Ontario. 2009 annual report: 4.09 hospitals—management and use of surgical facilities [EB/OL]. (2009-12-07) [2016-04-25]. <http://www.auditor.on.ca/en/content/annualreports/arreports/en09/409en09.pdf>.
- [27] Alter D A, Cohen E A, Wang X, et al. Cardiac procedures [C]// Tu J V, Pinfold S P, Mccolgan P, Laupacis A, eds., *Access to health services in Ontario*. 2nd ed. Toronto, Canada: ICES, 2006.
- [28] Statistics Canada. 2006 Census Database [EB/OL]. (2006-05-16) [2013-01-21]. <http://www12.statcan.ca/census-recensement/2006/index-eng.cfm>.
- [29] Clauset A, Shalizi C R, Newman M E J. Power-law distributions in empirical data [J]. *SIAM Review* (S1095-7200), 2009, 51(4): 661-703.