

1-2-2019

A Simulation Study of Appointment Rules in CT Department

Li Jun

1.School of Economics and Management, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; ;

Xuemei Lin

1.School of Economics and Management, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; ;

Zhou Jie

2.Business School, Sichuan Normal University, Chengdu 610101, China;

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.

A Simulation Study of Appointment Rules in CT Department

Abstract

Abstract: A discrete event simulation model was established on ExtendSim software, with the average patient waiting time, average idle time of the examination rooms and total cost which was the linearly weighted sum of them being as performance measures. *Estimated value and sample data of these performance measures of 9 basic appointment scheduling rules and 9 adjusted ones were produced by the de-duplication method so that analysis of variance and efficient frontier were carried out to compare the effects of different "staggered reservation rules" on this queuing system. It was shown that, for different beneficiaries (patients, hospital or both), the appointment scheduling rules characterized by "appointment intervals gradually increase toward the middle and then decrease slightly at the end of the session" perform optimally which had been concluded based on the single-phase, single-server queuing system in previous research, but the change law of number of patients in each slot and method of adjustment for the enhanced scan patients were different.*

Keywords

appointment scheduling rule, CT examination, discrete event simulation, ExtendSim

Recommended Citation

Li Jun, Lin Xuemei, Zhou Jie. A Simulation Study of Appointment Rules in CT Department [J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(3): 976-986.

CT 检查预约规则的仿真模拟研究

李军¹, 林雪梅¹, 周杰²

(1. 西南交通大学经济管理学院, 四川 成都 610031; 2. 四川师范大学商学院, 四川 成都 610101)

摘要: 以病人等待时间、检查室空闲时间及其线性总成本为性能指标, 利用 ExtendSim 建立离散事件仿真模型, 采用重复删除法得到9种基本预约规则和9种调整预约规则的性能指标估计值及其样本数据, 采用方差分析和有效边界分析比较不同“分时预约规则”对该排队系统的影响。结果表明: 从不同利益主体(病人、医院或双方)出发, 最优预约规则都具有“时间槽长度先增大后减小”的特点, 与以往基于单阶段、单服务台的研究结论相同, 而每个时间槽的预约人数变化规律和针对强扫描病人调整的方法不同。

关键词: 预约规则; CT 检查; 离散事件仿真; ExtendSim

中图分类号: C934, N945.13 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2018) 03-0976-11

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201803026

A Simulation Study of Appointment Rules in CT Department

Li Jun¹, Lin Xuemei¹, Zhou Jie²

(1. School of Economics and Management, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Business School, Sichuan Normal University, Chengdu 610101, China)

Abstract: A discrete event simulation model was established on ExtendSim software, with the average patient waiting time, average idle time of the examination rooms and total cost which was the linearly weighted sum of them being as performance measures. Estimated value and sample data of these performance measures of 9 basic appointment scheduling rules and 9 adjusted ones were produced by the de-duplication method so that analysis of variance and efficient frontier were carried out to compare the effects of different “staggered reservation rules” on this queuing system. It was showed that, for different beneficiaries (patients, hospital or both), the appointment scheduling rules characterized by “appointment intervals gradually increase toward the middle and then decrease slightly at the end of the session” perform optimally which had been concluded based on the single-phase, single-server queuing system in previous research, but the change law of number of patients in each slot and method of adjustment for the enhanced scan patients were different.

Keywords: appointment scheduling rule; CT examination; discrete event simulation; ExtendSim

引言

构建仿真模型是研究医疗资源日常调度问



收稿日期: 2016-03-10 修回日期: 2016-06-11;
基金项目: 国家自然科学基金(71490725, 71671146, 71601135);
作者简介: 李军(1967-), 女, 四川资阳, 博士, 教授, 研究方向为资源优化管理; 林雪梅(1988-), 女, 重庆, 硕士, 研究方向为业务流程再造。

题的有效方法^[1-3]。通过建模和仿真工具对医疗服务系统的外部性和内部性能指标进行分析, 可得到病人等待时间和医疗资源平均空闲时间等评价医疗机构成本和服务质量的重要指标^[1]。调控病人等待时间和医疗资源空闲时间的一个有效手段是预约规则设计。目前对于预约规则的研究大都集中于单阶段、单服务台排队系统环境下的门诊, 对多阶段、

多服务台环境下的医技检查的预约规则研究较少。实地调研发现, CT 检查是医院的瓶颈之一, 它影响着病人的整个就诊时间。因此, 对 CT 检查预约规则的研究, 从理论和实践上选择有效的预约规则都有重要意义。

以往研究集中于门诊预约规则, 且采用“分时预约”方式, 在给定服务机构总工作能力(或容量)的条件下, 确定每个时间段的长度和预约人数, 一个时间段通常被称为时间槽或块, 因此这种预约方式也被称为块预约(Block Appointment)。Cayirli 等提出每个时间槽的长度相等或不等、预约人数 ≥ 1 ; 第一个时间槽的预约人数 \geq 其他时间槽^[4]。Bailey 研究了 IBFI(Individual-block/Fixed-interval, 单人块/固定时间间隔), 即每个时间槽的长度相等、预约人数均等于 1。研究表明, 在 IBFI 的基础上, 第一个时间槽预约两个人时, 能够平衡病人等待时间和医生空闲时间, 这种规则在之后的文献中常被称为“2BEG”, 或者“Bailey’s rule”^[5]。Klassen 等在第一个时间槽安排了 4 个病人, 并将其称为“4ATBEG”^[6]。White 等研究表明, 在 IBFI 的基础上, 每个时间槽的预约人数大于 1 时, 不仅可以减少服务时间波动对医疗资源利用率造成的负面影响, 而且避免病人不准时或爽约引起的医疗资源空闲, 该规则称为 MBFIMultiple-block/Fixed-interval, 块/固定时间间隔^[7]。该规则是国内使用最普遍的预约规则, 时间槽长度大都为便于记忆的一刻钟、半小时或一小时, 人数由平均服务时间确定^[8]。由于采用 IBFI 时, 安排在后面到达的病患者的等待时间比安排在前面的长, Ho 等提出了时间槽长度不等的预约规则, 使前一部分人的到达间隔时间小于服务时间均值, 后一部分大于服务时间均值, 能够控制设备空闲时间和顾客等待时间^[9]; Klassen 等明确指出这种预约规则有利于改善公平性指标^[6], 相关文献将其称为 OFFSET。Wang 研究表明服务时间服从指数分布时, 若时间槽长度先增大再减小, 病人平均在系统时间和当天总服务时间的线性和最小^[10]。Wang 研究表明服务时间服从爱尔朗分

布时, 该结论仍成立^[11]。基于该规则, Cayirli 等提出在第一个时间槽预约两个病人的 2BGDM 和每个时间槽的预约人数多于 1 个的 MBDM, 这两种规则是以 2BEG 和 MBFI 为基础的“DOVE 模式”预约规则^[12]。将具有“时间槽长度先增大后减小”特点的预约规则统称为“DOVE 模式”预约规则。

然而, 这些研究均以单阶段、单服务台门诊排队系统为研究对象, 而医院 CT 室的排队系统有多个检查室, 且不同检查室设备分工不完全相同, 不能假设为单服务台排队系统; 病人的流程因其检查项目不同而不同, 增强扫描(简称强扫)的病人进入检查室之前需要进行 15~20 min 测试, 不能假设为单阶段排队系统。因此, 有必要研究以往的预约规则在多阶段、多服务台排队系统的适用性, 根据 CT 科室业务流程找出其他预约阶段决定的因素, 并应用于预约规则设计中。

本文基于国内某三甲医院(简称 A 医院)CT 科室的业务流程, 以由历史数据进行统计分析得到的分布和参数为仿真输入数据, 利用 ExtendSim 仿真软件建立离散事件仿真模型。利用多次运行仿真模型得到的样本数据估计性能指标, 通过有效边界分析得到在病人平均等待时间和 CT 设备平均空闲时间之间取得最佳平衡的预约规则, 以期为该科室的预约规则设计提供参考。

1 现状调查

A 医院是三甲医院, 拥有病床 2 300 张, 2011 年门急诊 360 万人次, 出院 10.1 万人次, 每年来院就医的患者同比增长 15% 以上。CT 室的病人有门诊、住院和体检三类, 根据 2011 年 4 月至 2012 年 3 月期间病人的实时记录, 得到三类病人所占比例分别是 65.97%、25.35% 和 8.68%, 各种检查项目病人的比例见表 1。检查的核心步骤为预约(仅非急诊病人)、登记和检查。CT 室共有 3 检查室, 每个检查室的队列都采用先到达先检查(FIFO)的规则; 有两个专门的预约登记服务台, 但预约时间由工作人员手工确定, 病人等待和检查室空闲同时出

现的现象时有发生。其运作策略如下：

(1) 非节假日周一至周五的 8:00~12:00 和 14:00~17:30 为正常工作时间，否则都是加班时间。每个检查室都会完成相应预约期(Session)病人的 CT 扫描才午休或下班。

(2) 正常工作时间内，3 号检查室为急诊专用，即使设备空闲也不安排非急诊病人。病人预约时，若为强扫，则指定到 1 号检查室；若为双源、血管成像等特殊扫描，则指定到 2 号检查室；否则，指定到可预约时间较早的一个检查室。

(3) 要求预约的病人按其预约时间到达，因为病人为了尽早看病，基本都会早到。

表 1 各种检查项目、急诊病人的百分比
Tab. 1 The proportion of each examination items and emergency patient %

类型	双源、血管成像、三维重建	增强扫描	平扫急诊	平扫非急诊	合计
门诊	6.37	18.08	27.35	48.20	100
住院	10.08	26.42	40.02	23.48	100
体检	5.14	1.68	0.00	93.08	100

由于目的在于研究 CT 室预约规则对该排队系统性能的影响，这里不考虑 3 号检查室的运作，CT 室仿真模型的逻辑流程如图 1 所示。

2 仿真输入数据

仿真模型中涉及的分布包括病人到达间隔时间分布、检查室服务时间分布和准备间工作时间分布。采用到达时间在周一至周五 8:00~12:00 和 14:00~18:00 范围内的记录数据。分布拟合通过 ExtendSim 自带的专业分布拟合软件 Stat::Fit 实现，ExtendSim 是由美国 Imagine That 公司开发的通用仿真平台。

2.1 到达间隔时间分布

一般假设病人的到达过程为泊松过程，受时间因素(星期和小时)以及病人类型(门诊、住院、体检)影响，所以对每类病人以小时为单位计数，例如每周三 9:00~10:00 的病人数为一组样本。其中 60%

样本的容量少于 50，有的甚至只有 10 个，所以采用 K-S(Kolmogorov-Smirnov)拟合优度检验，显著性水平为 0.05。结果表明样本数据对泊松分布的拟合基本都能通过拟合优度检验，只有四组体检病人的样本数据不能通过，鉴于这些数据来源于实际过程，筛选和修正时不可能排除所有干扰因素的影响，仍然采用泊松分布的拟合结果(见文献[13])。最后，将单位时间内到达病人数的泊松分布转换为病人到达间隔时间的指数分布。

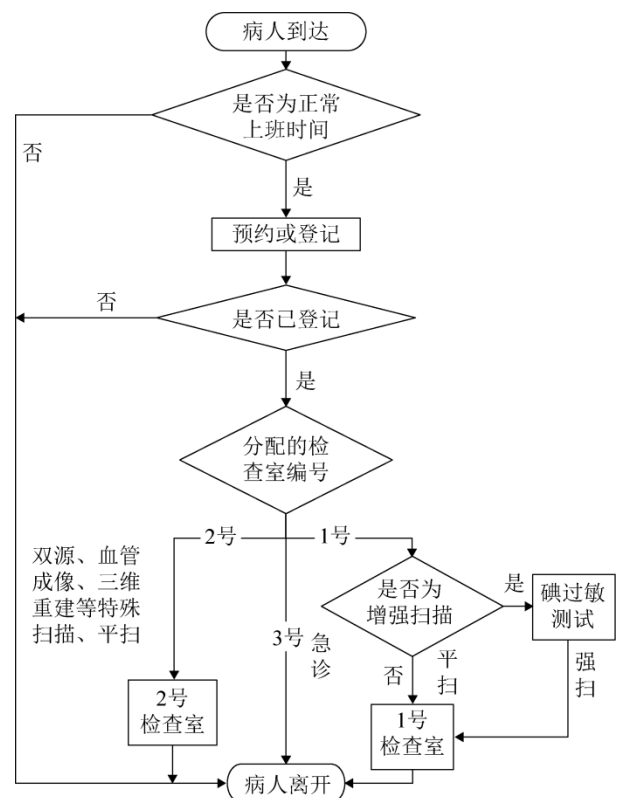


图 1 CT 室仿真模型的逻辑流程图
Fig. 1 The flowchart of CT simulation model

2.2 检查服务时间分布

Law 等证明了服务时间服从对数正态分布^[14]。Klassen 等研究表明服务时间服从爱尔朗分布时，模型更容易处理^[15]。以检查室最繁忙月份最繁忙小时(3 月 09:00:00-10:00:00)范围内的检查时间为样本数据，采用 K-S 和 A-D(Anderson-Darling)拟合优度检验，显著性水平为 0.05。当 p 值在 0.5 左右为好，例如在 0.3~0.7 或 0.25~0.75 范围内，认为拟

合的比较好; p 值在 0.1~0.3 范围内尚可^[16]。由表 2 中 P 值, 两检查室的服务时间均服从爱尔朗分布, 单位: min。

表 2 CT 检查室的服务时间分布

Tab. 2 The service time distribution of CT rooms

检查室	服务时间分布/min	样本量	K-S 检验 P 值	A-D 检验 P 值
1 号	Erlang(4,5.893)	134	0.249	0.255
2 号	Erlang(1,5.364)	115	0.282	0.562

2.3 准备间服务时间分布

一般情况下, 强扫病人的碘过敏测试需要 15~20 min, 且波动性不大, 采用均匀分布 $U(15,20)$, 单位: min。

3 仿真建模

采用 ExtendSim 模拟 A 医院 CT 室的运作过程并量化其性能, 性能指标为 CT 检查室平均空闲时间 ($IDLE$)、病人平均等待时间 (WT) 及总成本 ($TC = IDLE \times C_i + WT \times C_p$)^[17], C_i 和 C_p 分别是 $IDLE$ 和 WT 的单位时间成本。ExtendSim 仿真软件可以对离散事件系统建模, 具有多种功能模块和可视化功能, 用户采用 C 语言即可实现复杂功能, 建模效率高, 所有模块功能的详述, 参见文献[18]。

3.1 基本假设

根据现状调查中的运行策略, 基本假设如下:

(1) 检查室供预约的时间是周一至周五的上午(8:00-12:00)和下午(14:00-17:30), 且每个检查室上午和下午都可能要加班才能完成已预约病人的扫描, 预约病人按照先到先预约(FCFS)的规则进入检查室。

(2) 为非急诊病人预约时, 按照病人的检查类型指定到 1 号或 2 号检查室。若为强扫, 指定到 1 号检查室; 若为双源、血管成像等特殊扫描, 指定到 2 号检查室; 否则(平扫), 指定到可预约时间较早的一个检查室。

(3) 不考虑病人在预约登记服务台耗费的时间, 将病人的到达时刻定义为完成预约或者登记时

的时刻。

(4) 预约病人均准时到达, 即不存在爽约和迟到的现象。

(5) 等候检查的病人不能换队。

3.2 预约规则

首先, 根据文献研究得到适用于“单阶段、单服务台”排队系统的九种预约规则, 称之为“基本预约规则”。其次, 根据 CT 科室“强扫病人比别人多一个准备工作”的特点, 考虑现场工作人员的经验, 对这九种预约规则修改得到九种新的预约规则, 称之为“调整预约规则”。

3.2.1 基本预约规则

根据 Cayirli 等研究中 IBFI、2BEG、MBFI、OFFSET、DOME、2BGDM 和 MBDM 的预约时间计算公式^[12]和 2BGOS、MBOS 的含义得到现有九种预约规则预约时间计算公式及示意图, 如表 3 所示。 t_b 和 t_e 表示一个周期(S)的起始和结束时刻, S 被分成若干块, 每一块的宽度表示时间槽的长度, 数字或字母 m 表示该时间槽的预约人数。预约时间(t_i)以病人次序(i)为变量, 容量(N)、检查室服务时间均值(μ)和标准差(σ)、 m 、 k_1 、 k_2 、 β_1 、 β_2 、 β'_1 、 β'_2 和 β_3 均为参数。

由表 3 可知, 基本预约规则可以用每个时间槽的长度变化规律和预约人数变化规律来描述, 具体如下:

(1) 从每个时间槽长度的变化规律来看, IBFI、2BEG 和 MBFI(FI 模式)的固定不变; OFFSET、2BGOS 和 MBOS(OFFSET 模式)在 FI 模式基础上将一个预约期分成两部分, 使前一部分病人预约时间提前, 后一部分病人预约时间推迟, 分界点为 k_1 ; β_1 、 β_2 分别调节提前、推迟的程度, 数值越大调节幅度越大。DOME、2BGDM 和 MBDM(DOME 模式)在 FI 模式基础上将一个预约期分成三部分, 使第一部分病人预约时间提前, 第二部分病人预约时间推迟, 第三部分病人预约时间提前, 分界点为 k_1 和 k_2 ; β'_1 、 β'_2 和 β_3 分别

调节三部分提早、推迟和提早的程度，数值越大调节幅度越大。

(2) 从每个时间槽的预约人数来看，IBFI、OFFSET 和 DOME 中每个时间槽预约人数均为 1，统称为“IB”类型预约规则；2BEG、2BGOS 和 2BGDM 的第一个时间槽预约人数均为 2，统称为“2BEG”类型预约规则；MBFI、MBOS 和 MBDM 中每个时间槽预约人数均大于 1，统称为“MB”类型预约规则。

因此，按照每个时间槽的长度变化规律和预约

人数规律描述基本预约规则之间的关系，如图 2 所示。

对于某种预约规则，要得到一个预约期内所有可预约的时间(或时刻)，必须首先确定其中的参数。根据所研究科室的历史数据得到的参数取值如下：

(1) μ 、 σ 和 N ：前两个参数取值表 2 中检查室服务时间分布得到。最佳容量等于预约期除以其均值^[5]，上午和下午的工作时间分别是 240 min 和 210 min。因此，这 3 个参数的取值如表 4 所示。

表 3 基本预约规则的预约时间计算公式和示意图
Tab. 3 The appointment time formulas and sketches of the basic appointment scheduling rules

预约规则	$t_i(h)$	示意图							
IBFI	$t_i = (i - 1) \times \mu + t_b (i = 1, 2, \dots, N)$	<table border="1"><tr><td>1</td><td>1</td><td>...</td></tr></table> $t_b t_e$	1	1	...				
1	1	...							
2BEG	$t_1 = t_2 = t_b; t_i = (i - 2) \times \mu + t_b (i = 2, \dots, N)$	<table border="1"><tr><td>2</td><td>1</td><td>...</td></tr></table> $t_b t_e$	2	1	...				
2	1	...							
MBFI	$m \in N^+, m > 1; t_i = \dots = t_{i+m-1} = (i - 1) \times \mu + t_b (i \in N^+, i \leq N, \text{mod}(i - 1/m) = 0)$	<table border="1"><tr><td>m</td><td>m</td><td>...</td></tr></table> $t_b t_e$	m	m	...				
m	m	...							
OFFSET	$t_1 = t_b; t_i = (i - 1) \times \mu - \beta_1 \times (k_1 - i) \times \sigma + t_b (i = 2, \dots, k_1)$ $t_i = (i - 1) \times \mu + \beta_2 \times (i - k_1) \times \sigma + t_b (i = k_1 + 1, 2, \dots, N)$	<table border="1"><tr><td>1</td><td>...</td><td>1</td><td>...</td></tr></table> $t_b \quad t_{k_1} t_e$	1	...	1	...			
1	...	1	...						
2BGOS	$t_1 = t_2 = t_b; t_i = (i - 2) \times \mu - \beta_1 \times (k_1 - i) \times \sigma + t_b (i = 3, \dots, k_1)$ $t_i = (i - 2) \times \mu + \beta_2 \times (i - k_1) \times \sigma + t_b (i = k_1 + 1, 2, \dots, N)$	<table border="1"><tr><td>2</td><td>1</td><td>...</td><td>1</td><td>...</td></tr></table> $t_b \quad t_{k_1} t_e$	2	1	...	1	...		
2	1	...	1	...					
MBOS	$m \in N^+, m > 1; t_1 = \dots = t_m = t_b; t_{k_1} = (k_1 - 1) \times \mu + t_b$ $t_i = \dots = t_{i+m-1} = (i - 1) \times \mu - \beta_1 \times (k_1 - i) \times \sigma + t_b (i \in N^+, m < i < k_1, \text{mod}(i - 1/m) = 0)$ $t_i = \dots = t_{i+m-1} = (i - 1) \times \mu + \beta_2 \times (i - k_1) \times \sigma + t_b (i \in N^+, k_1 < i \leq N, \text{mod}(i - 1/m) = 0)$	<table border="1"><tr><td>m</td><td>...</td><td>m</td><td>...</td></tr></table> $t_b \quad t_{k_1} t_e$	m	...	m	...			
m	...	m	...						
DOME	$t_1 = t_b; t_i = (i - 1) \times \mu - \beta_1 \times (k_1 - i) \times \sigma + t_b (i = 2, \dots, k_1)$ $t_i = (i - 1) \times \mu + \beta_2 \times (i - k_1) \times \sigma + t_b (i = k_1 + 1, 2, \dots, k_2 - 1)$ $t_i = (i - 1) \times \mu - \beta_3 \times (i - k_2) \times \sigma + t_b (i = k_2, \dots, N)$	<table border="1"><tr><td>1</td><td>...</td><td>1</td><td>...</td><td>1</td><td>...</td></tr></table> $t_b \quad t_{k_1} \quad t_{k_2} t_e$	1	...	1	...	1	...	
1	...	1	...	1	...				
2BGDM	$t_1 = t_2 = t_b; t_i = (i - 2) \times \mu - \beta_1 \times (k_1 - i) \times \sigma + t_b (i = 3, \dots, k_1)$ $t_i = (i - 2) \times \mu + \beta_2 \times (i - k_1) \times \sigma + t_b (i = k_1 + 1, 2, \dots, k_2 - 1)$ $t_i = (i - 2) \times \mu - \beta_3 \times (i - k_2) \times \sigma + t_b (i = k_2, \dots, N)$	<table border="1"><tr><td>2</td><td>1</td><td>...</td><td>1</td><td>...</td><td>1</td><td>...</td></tr></table> $t_b \quad t_{k_1} \quad t_{k_2} t_e$	2	1	...	1	...	1	...
2	1	...	1	...	1	...			
MBDM	$m \in N^+, m > 1; t_1 = \dots = t_m = t_b; t_{k_1} = (k_1 - 1) \times \mu + t_b$ $t_i = \dots = t_{i+m-1} = (i - 1) \times \mu - \beta_1 \times (k_1 - i) \times \sigma + t_b (i \in N^+, m < i < k_1, \text{mod}(i - 1/m) = 0)$ $t_i = \dots = t_{i+m-1} = (i - 1) \times \mu + \beta_2 \times (i - k_1) \times \sigma + t_b (i \in N^+, k_1 < i < k_2, \text{mod}(i - 1/m) = 0)$ $t_i = \dots = t_{i+m-1} = (i - 1) \times \mu - \beta_3 \times (i - k_2) \times \sigma + t_b (i \in N^+, k_2 \leq i \leq N, \text{mod}(i - 1/m) = 0)$	<table border="1"><tr><td>m</td><td>...</td><td>m</td><td>...</td><td>m</td><td>...</td></tr></table> $t_b \quad t_{k_1} \quad t_{k_2} t_e$	m	...	m	...	m	...	
m	...	m	...	m	...				

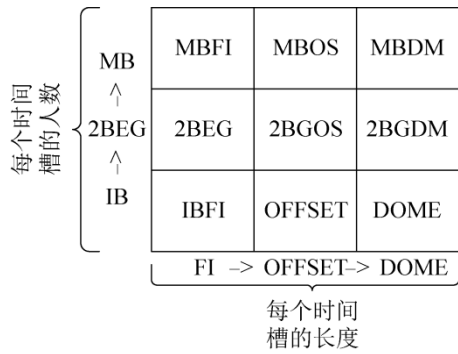


图 2 9 种基本预约规则之间的关系
Fig. 2 The relationship of the basic appointment scheduling rules

表 4 1 号和 2 号检查室 μ , σ 和 N

Tab. 4 The value of μ , σ and N in room 1 and room 2

检查室	μ/min	σ/min	上午容量(人)	下午容量(人)
1 号	5.893	2.947	40	35
2 号	5.364	5.364	44	39

(2) m : 分时预约时, 该 CT 科室时间槽长度习惯采用 1 小时。若 1 号检查室采用 MBFI、MBOS 或 MBDM, 则该参数的取值为 $10(60/5.893)$; 在 2 号检查室该参数取值为 $11(60/5.364)$ 。

(3) k_1, k_2 : Ho 等的研究表明, OFFSET 中 k_1 的最优取值为其容量的 0.5 倍^[19]。Cayili 等的研究表明 DOME 中 k_2 的最优取值为其容量的 0.9 倍^[12]。在“MB”类型预约规则中, k_1 和 k_2 的取值必须是 m 的整数倍加 1, 计算公式如(1)和(2)所示。

$$k_1 = \left\lfloor \frac{N \times 0.5}{m} \right\rfloor \times m + 1 \quad (1)$$

$$k_2 = \left\lfloor \frac{N \times 0.9}{m} \right\rfloor \times m + 1 \quad (2)$$

此外, 为了保证预约规则的可比性, “IB”类型预约规则中 k_1 和 k_2 取值的计算公式与“MB”类型预约规则的相同。那么, k_1 和 k_2 的取值如表 5 所示。

表 5 k_1 和 k_2 的取值
Tab. 5 The value of k_1 and k_2

参数	1 号检查室		2 号检查室	
	上午	下午	上午	下午
k_1	21	11	23	12
k_2	31	31	34	34

(4) $\beta_1, \beta_2, \beta'_1, \beta'_2$ 和 β_3 : 除 IBFI、2BEG 和

MBFI 之外, 时间槽长度随其次序变动, 这三个参数需要满足一定的条件才能保证“病人先到先安排”($t_{i+1} > t_i$)和“最后一个预约时间不能超过预约期”($t_{i+1} < S$), 这三个参数的取值范围如下:

① OFFSET、2BGOS 和 MBOS 中 β_1 和 β_2 的公式如下:

$$0 < \beta_1 < \frac{1}{k_1 - 2} \times \frac{\mu}{\sigma} \quad (3)$$

$$0 < \beta_2 < \frac{S - (N - 1) \times \mu}{(N - k_1) \times \sigma} \quad (4)$$

带入参数得: $0 < \beta_1 < 0.1, 0 < \beta_2 < 0.044$ 。Ho 等对 OFFSET 中 β_1 和 β_2 最优取值的研究^[19]及其对这两个参数的讨论^[9]表明: β_2 是 β_1 的两倍时系统性能最优。为简化实验, 取参数 $\beta_1=0.02, \beta_2=0.04$ 。

②DOME、2BGDM 和 MBDM 中 β_1 (同 β_1)、 β'_2 和 β_3 的公式如下:

$$0 < \beta'_2 < \frac{1}{k_2 - k_1 - 1} \times \frac{\mu}{\sigma} \quad (5)$$

$$0 < \beta_3 < \frac{\mu}{\sigma} \quad (6)$$

带入参数得: $0 < \beta'_1 < 0.048, 0 < \beta'_2 < 0.048, 0 < \beta_3 < 1$ 。Cayirli 的研究结果表明“DOME 模式”预约规则与 OFFSET 相似, 取值时 β'_2 是 β'_1 的两倍, β_3 的取值不会显著影响系统性能^[17]。为简化实验和提高预约规则之间的可比性, 令 $\beta'_1=0.02, \beta'_2=0.04$ 和 $\beta_3=0.02$ 。

3.2.2 调整预约规则

姜慧杰等针对强扫病人需要检查前准备这一特点, 提出“在每个强扫病人之后, 安排三个平扫病人”, 以便为下一个强扫病人留出足够的准备时间^[20]。基于该思想, 在基本预约规则基础上, “按比例交叉预约平扫和强扫病人”。此外, 当核心医疗资源之前还有一个准备工作时, 提前完成该准备工作有助于提高系统性能。因此, 为了真正实现这两种病人的“无缝衔接”, 达到“平扫病人接受检查的同时强扫病人做准备工作”的目的, 还需要让强扫病人提前一段时间到达 CT 科室。对于现有九种预约规则, “MB”类型预约规则, 由于平扫病人和

强扫病人交叉预约已经能够实现“平扫病人检查的同时强扫病人做准备工作”，所以不需要强扫病人提前一段时间到达。为了区别调整前后的预约规则，用0和1分别表示“调整前”和“调整后”，例如“IBFI-0”表示基本预约规则，“IBFI-1”表示调整后的预约规则。

因此，对基本预约规则的调整实际上分为以下两类：

第一类：对于“MB”类型预约规则，在每个时间槽(批)安排一定比例的平扫和强扫病人，将其命名为MBFI-1、MBOS-1和MBDM-1，分别与MBFI、MBOS和MBDM对应。需要特别说明的是，无论这两种病人的实际比例是多少，都必须满足“平扫病人的期望总检查时间不小于一个强扫病人的平均准备工作时间”。

第二类：对于“IB”和“2BEG”类型预约规则，在整个预约期内循环安排一定数量的平扫和强扫病人，要求强扫病人提前一段时间到达，将其命名为IBFI-1, OFFSET-1, DOME-1, 2BEG-1, 2BGOS-1和2BGDM。每次两种病人的数量与“MB”类型中相同，强扫病人提前的时间不小于一个强扫病人的平均准备工作时间，并根据平扫病人平均服务时间将其折合为平扫病人个数。需要说明的是，为了保持“2BEG”类型预约规则“在第一个时间槽储存病人”的特点，在第一个时间槽安排两个平扫病人，但不计入折合的病人个数里。

实际上，由于只有1号检查室为强扫病人服务，所以只有1号检查室可能采用调整预约规则。那么，需要确定的参数是每批预约病人中平扫和强扫病人的人数，计算过程如下：

(1) 检查室服务时间均值为5.894 min，强扫病人的准备工作时间服从 $U(15,20)$ ，为了保证每批平扫病人的期望总检查时间不小于强扫病人的准备工作时间，每个时间槽的平扫病人至少3个(17.5/5.894)。

(2) 由表1中各种检查项目病人的比例、3类病人所占比例和表4中1号检查室的容量计算可得1

号检查室平扫和强扫病人的比例为2:3，每批预约病人人数为10，所以平扫和强扫病人人数为4和6。

综上所述，仿真实验涉及18个方案，输出结果是每个方案下的CT检查室平均空闲时间和病人平均等待时间，结合之前的仿真模型流程图和仿真输入数据，利用ExtendSim软件建立仿真模型。其中9种基本方案下1号和2号检查室均采用相同的基本预约规则；9种调整方案下1号检查室采用调整预约规则，而2号检查室仍然采用相应的基本预约规则。因此，每种方案的影响因素有两个：“基本预约规则”(表3中9种)和“调整与否”(2种，0表示否，1表示是)，分别以“AR”和“AJ”表示。

4 仿真实验和分析

采用重复删除法进行仿真输出分析，预实验结果表明，当每个方案运行50次、每次模拟运行4400 h(预热期为2000 h)时，性能指标的半宽以95%的置信水平不超过1 min，性能指标估计值及其半宽如表6所示。

表6 性能指标估计值及其半宽
Tab. 6 The estimated values and halfwidth of the performance measures /min

AR	统计值	AJ=0		AJ=1	
		IDLE	WT	IDLE	WT
IBFI	平均值	49.615	38.728	70.858	46.114
	半宽	0.430	0.322	0.520	0.442
2BEG	平均值	47.052	40.324	71.664	47.897
	半宽	0.333	0.370	0.570	0.398
MBFI	平均值	79.990	65.068	67.096	59.629
	半宽	0.371	0.429	0.324	0.454
OFFSET	平均值	51.751	38.138	70.171	44.936
	半宽	0.472	0.396	0.532	0.510
2BGOS	平均值	49.428	40.042	72.931	47.563
	半宽	0.453	0.400	0.518	0.470
MBOS	平均值	82.021	65.589	69.332	59.404
	半宽	0.387	0.441	0.262	0.444
DOME	平均值	57.884	12.105	39.419	11.918
	半宽	0.515	0.125	0.469	0.121
2BGDM	平均值	48.122	13.050	30.339	13.639
	半宽	0.451	0.140	0.420	0.147
MBDM	平均值	42.435	26.967	30.810	23.410
	半宽	0.404	0.144	0.432	0.124

对于单个性能指标(*IDLE* 或 *WT*), 采用两因素方差分析检验 *AR* 和 *AJ* 的主体作用、交互作用是否显著。对于由 *IDLE* 和 *WT* 线性加权得到的 *TC*, 采用有效边界分析得到 C_i 和 C_p 不同比例下的最优预约规则。

4.1 两因素方差分析

由于每种方案独立重复运行得到的 50 个样本数据都是均值, 所以各组方案的样本数据之间既相互独立又服从正态分布, 而且对于多因素方差分析, 方差齐性检验往往限于理论探讨^[21]。那么, 样本数据能够满足两因素方差分析的 3 个前提条件。利用 SPSS 得到的分析结果(显著性水平为 0.05)如表 7 所示。

由表 7 中的相伴概率(0.000)小于显著性水平 0.05 可知, *AR* 和 *AJ* 对 *IDLE*、*WT* 的主体作用和交互作用均显著; 由离差平方和大小可知, *AR* 的主体作用最大、两者的交互作用次之、*AJ* 的主体作用最小。

由 *AR* 和 *AJ* 对 *IDLE*、*WT* 的交互作用图(分别见图 3 和图 4)可得一个因素的某个水平对另一个因素所有水平的影响, 具体如下:

(1) 在 *AR* 的各因子水平中, *AJ* 各因子水平的作用。*AR* 为“MB”类型预约规则(MBFI、MBOS 和 MBDM)时, 调整 $AR(AJ=1)$ 有助于同时减少 *IDLE* 和 *WT*; *AR* 为非“MB”类型的“DOME 模式”预约规

则(DOME、2BGDM)时, 调整 $AR(AJ=1)$ 有助于同时减少 *IDLE*, *WT* 基本不变; 否则, 调整 $AR(AJ=1)$ 同时增大 *IDLE* 和 *WT*。因此, 采用“MB”类型或“DOME 模式”预约规则时, 应按照 3.2.2 中的方法调整。

(2) 在 *AJ* 的各因子水平中, *AR* 各因子水平的作用。①不调整 $AR(AJ=0)$ 时, 同种类型(“IB”、“2BEG”或“MB”)预约规则中“FI 模式”和“OFFSET 模式”的 *IDLE* 和 *WT* 基本相同, 这两种模式预约规则中“MB”类型的 *IDLE* 和 *WT* 最大, 其他两种类型的 *IDLE* 和 *WT* 差异不大; “DOME 模式”预约规则中 *IDLE* 随“IB”、“2BEG”和“MB”类型依次减少, *WT* 依次增大, 除“IB”类型(DOME)比另外两种模式中该类型(IBFI 和 OFFSET)的 *IDLE* 大之外, 该模式的 *IDLE* 和 *WT* 都小于其他预约规则。因此, 不调整基本预约规则时, 应采用 DOME 模式预约规则。②调整 $AR(AJ=1)$ 时, “FI 模式”和“OFFSET 模式”6 种预约规则的 *IDLE* 基本相同, “MB”类型的 *WT* 最大, 其他两种类型的 *WT* 基本相同; “DOME 模式”预约规则的 *IDLE* 和 *WT* 均小于其他预约规则, *IDLE* 随“IB”、“2BEG”和“MB”类型依次减少, *WT* 依次增大。因此, 调整基本预约规则时关于预约规则的结论与不调整时相同。

综上所述, 从病人利益出发, 应采用调整后的 MBDM; 从医院利益出发, 应采用调整后的 DOME。

表 7 *IDLE* 和 *WT* 的两因素方差分析结果
Tab. 7 The two factor variance analysis of the *IDLE* and *WT*

Source	<i>IDLE</i>					<i>WT</i>				
	离差平方和	df	均方	F	Sig.	离差平方和	df	均方	F	Sig.
Corrected Model	223878.615	17	13169.330	5399.377	0.000	281422.162	17	16554.245	10550.085	0.000
Intercept	2952198.499	1	2952198.499	1210390.499	0.000	1339883.661	1	1339883.661	853913.130	0.000
AR	147169.368	8	18396.171	7542.362	0.000	274033.566	8	34254.196	21830.334	0.000
AJ	569.725	1	569.725	233.585	0.000	583.919	1	583.919	372.134	0.000
AR * AJ	76139.522	8	9517.440	3902.115	0.000	6804.677	8	850.585	542.081	0.000
Error	2151.239	882	2.439			1383.955	882	1.569		
Total	3178228.353	900				1622689.778	900			
Corrected Total	226029.854	899				282806.117	899			

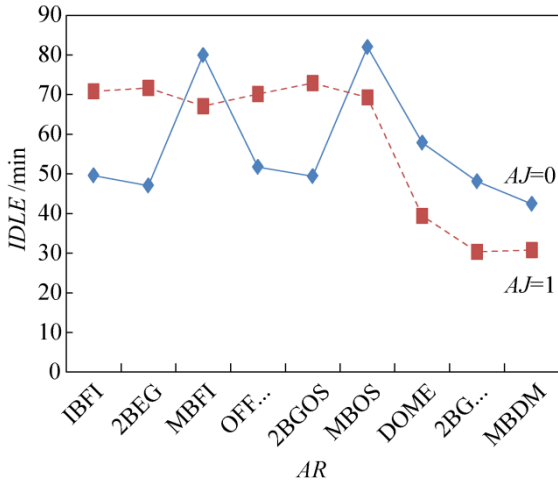


图 3 AR 和 AJ 对 IDLE 的交互作用图
Fig. 3 The interaction between AR and AJ for IDLE

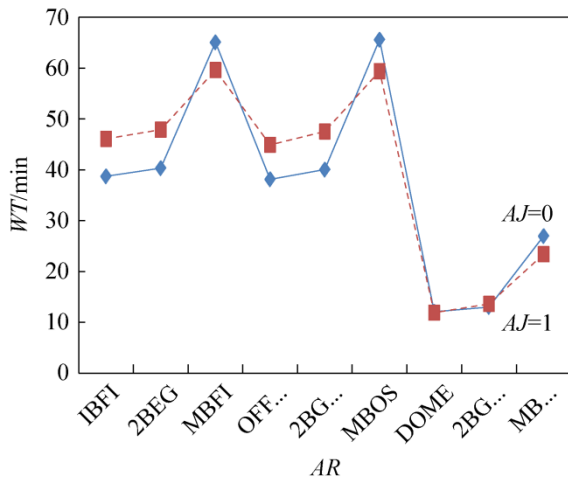


图 4 AR 和 AJ 对 WT 的交互作用图
Fig. 4 The interaction between AR and AJ for WT

4.2 有效边界分析

以 IDLE 为横坐标、WT 为纵坐标绘制散点图，当一个点满足“不存在任何一个点的横纵坐标均小于该点的横纵坐标”时，该点对应的方案为一个非劣解，有效边界由所有非劣解的点构成。由两变量线性规划图解法可知，使 TC 最小的方案一定位于有效边界上，且取决于 IDLE 和 WT 单位成本的比值 C_i/C_p 。

由图 5 可知，调整后的两个非“MB”类型的“DOME 模式”预约规则(DOME 和 2BGDM)在有效边界上。由表 6 中性能指标估计值计算得到：2BGDM 和 DOME 所在直线斜率的绝对值是

0.190。因此，若 $C_i/C_p \geq 0.190$ ，调整后的 2BGDM 最优；否则，调整后的 DOME 最优。因此，从病人和医院双方利益出发，应采用调整后的 2BGDM 或 DOME，临界值是 0.190。

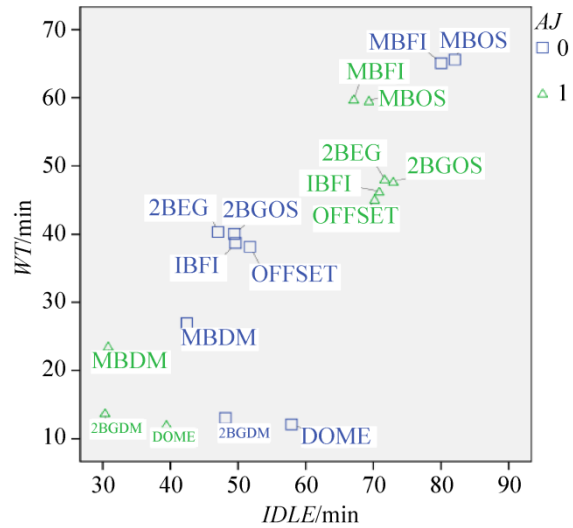


图 5 各种方案的 IDLE-WT 散点图
Fig. 5 The scatter plot of IDLE-WT under each scheduling rules

5 结论

基于 A 医院 CT 室(两阶段、两服务台排队系统)的运作过程，利用 ExtendSim 建立仿真模型并输出检查室平均空闲时间和病人平均等待时间样本数据，利用方差分析和有效边界分析比较了 18 种预约规则(9 种考虑时间槽长度和预约人数的基本预约规则+针对强扫病人调整的 9 种预约规则)的系统性能。结果表明，最优预约规则的时间槽长度变化规律都具有“DOME 模式”：将预约期分为三段，第二个时间段的时间槽长度最大，第一个的次之，第三个的最小。与固定时间槽长度相比，该规则将预约期前 50%和预约期后 10%病人的预约时间提前；中间 40%病人的预约时间推后。该结论与以往基于“单阶段、单服务台”的研究结论相同。然而，从不同利益主体出发，最优预约规则的预约人数变化规律和针对强扫病人的调整的方法不同，具体如下：

(1) 从医院利益出发, 应采用每次预约一个病人的“DOME 模式”预约规则, 且先预约几个平扫病人、再预约几个强扫病人, 如此循环直到填满整个预约期;

(2) 从病人利益出发, 应采用每次预约多个病人的“DOME 模式”预约规则, 且每次预约的病人中均包含一定比例的平扫病人和强扫病人;

(3) 从医院和病人双方利益出发, 需根据双方的单位时间成本做出选择——从医院利益出发的最优预约规则或以该规则为基础在预约期起始点多一个平扫病人的预约规则, 临界值为 0.190。

在下一步研究中, 应从以下几方面着手:

(1) 考虑两检查室共一个队列的情况, 检验结论的稳健性;

(2) 将爽约和不准时的病人对排队系统的影响考虑到预约规则设计中;

(3) 将急诊专用的 3 号检查室统一考虑到预约规则设计中, 并考虑在空闲时可接受其他病人的情况。

参考文献:

- [1] 伍宏伟, 杨东. 基于赋时层次有色 Petri 网的医疗服务流程建模与优化[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(8): 1657-1663, 1699.
Wu Hongwei, Yang Dong. Hierarchical Timed Coloured Petri-Net Based Approach to Analyze and Optimize Medical Treatment Process [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(8): 1657-1663, 1699.
- [2] 王丹华, 卢威, 潘金贵, 等. 基于自动化安全分析的仿真模型构建方法[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(5): 899-906.
Wang Danhua, Lu Wei, Pan Jingui, et al. Simulation Modeling Method Based on Automatic Safety Analysis Techniques [J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(5): 899-906.
- [3] 王昱, 唐加福, 曲刚, 等. 医院手术调度问题的多目标粒子群优化方法[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(8): 1658-1665.
Wang Yu, Tang Jiafu, Qu Gang, et al. Multi-objective Particle Swarm Optimization Method on Operating Room Scheduling Problem [J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(8): 1658-1665.
- [4] Cayirli T, Veral E. Outpatient scheduling in health care: a review of literature [J]. Production and Operations Management (S1937-5956), 2003, 12(4): 519-549.
- [5] Bailey N. A study of queues and appointment systems in hospital outpatient departments with special reference to waiting times [J]. Journal of the Royal Statistical Society (S0964-1998), 1952, 14: 185-199.
- [6] Klassen K J, Rohleder T R. Scheduling outpatient appointments in a dynamic environment [J]. Journal of Operations Management (S0272-6963), 1996, 14(2): 83-101.
- [7] White M J B, Pike M C. Appointment systems in outpatients' clinics and the effect on patients' unpunctuality [J]. Medical Care (S0025-7079), 1964, 2(3): 133-145.
- [8] 钮罗涌, 王平, 朱大荣, 等. 医技检查分时段预约系统设计与实现[J]. 中国数字医学, 2013, 8(2): 11-13.
NIU Luo-yong, WANG Ping, ZHU Da-rong, et al. Design and Realization of Sub-periods Appointment System in Medical Inspection[J]. China Digital Medicine, 2013, 8(2): 11-13.
- [9] Ho C, Lau H, Li J. Introducing variable-interval appointment scheduling rules [J]. International Journal of Operations & Production Management (S0144-3577), 1995, 15(6): 59-68.
- [10] Wang P P. Static and dynamic scheduling of customer arrivals to a single-server system [J]. Naval Research Logistics (S1520-6750), 1993, 40(3): 345-360.
- [11] Wang P P. Optimally scheduling N customer arrival times for a single-server system [J]. Computers and Operations Research (S0305-0548), 1997, 24(8): 703-716.
- [12] Cayirli T, Veral E, Rosen H. Designing appointment scheduling systems for ambulatory care services [J]. Health Care Management Science (S1386-9620), 2006, 9: 47-58.
- [13] 林雪梅, 李军, 周杰. 医院 CT 室病人到达规律分析[J]. 工业工程与管理, 2014, 19(1): 103-107.
Lin Xue-mei, Li Jun, Zhou Jie. Analysis of Arrival Pattern in a hospital CT Department [J]. Industrial Engineering and Management, 2014, 19(1): 103-107.
- [14] Law A M, Kelton W D. Simulation modeling and analysis [M]. 2nd Edition. New York: McGraw-Hill, 2007.
- [15] Klassen K J, Yoogalingam R. Improving performance in outpatient appointment services with a simulation optimization approach [J]. Production and Operations Management (S1937-5956), 2009, 18(4): 447-458.