

# 控制与决策

Control and Decision

## 基于负荷平衡的柔性预约决策

季孟忠, 项薇, 彭俊, 黄益槐, 张肖建, 何达

引用本文:

季孟忠, 项薇, 彭俊, 等. 基于负荷平衡的柔性预约决策[J]. 控制与决策, 2021, 36(1): 226–233.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1690>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 基于知识粒度特征的多目标粗糙集属性约简算法

Multi objective rough set attribute reduction algorithm based on characteristics of knowledge granularity

控制与决策. 2021, 36(1): 196–205 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0490>

### 基于TOPSIS方法改进的多属性决策模型:最小化偏好反转

Modified MCDM model based on TOPSIS method: Minimizing preference reversal

控制与决策. 2021, 36(1): 216–225 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0536>

### 考虑个体累积共识贡献的犹豫模糊语言自适应共识模型

Adaptive consensus model with hesitant fuzzy linguistic information considering individual cumulative consensus contribution

控制与决策. 2021, 36(1): 187–195 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0556>

### 考虑时间序列的动态大群体应急决策方法

Dynamic large group emergency decision-making method considering time series

控制与决策. 2020, 35(11): 2609–2618 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0088>

### 基于行为流图的可信交互检测方法

Trustworthy interaction detection method based on user behavior flow diagram

控制与决策. 2020, 35(11): 2715–2722 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1618>

## 基于负荷平衡的柔性预约决策

季孟忠<sup>1</sup>, 项薇<sup>1,2†</sup>, 彭俊<sup>1</sup>, 黄益槐<sup>1</sup>, 张肖建<sup>1</sup>, 何达<sup>3</sup>

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波大学 先进储能技术与装备研究院, 浙江 宁波 315211; 3. 宁波市鄞州区妇幼保健院, 浙江 宁波 315125)

**摘要:** 针对目前国内医疗机构普遍以步入病人求诊为主且个别时段密集到达的就诊需求特点, 引入负荷均衡的思想, 提出一种多目标优化的柔性门诊调度决策方法. 根据实际负荷分布, 合理利用柔性的预约负荷平衡调整各时段的总负荷, 基于多种预约率、预约和排队规则形成方案集, 在多目标灰靶决策模型下, 优化出各应用场景下的最优调度方案. 数值实验表明, 所提出模型较其他模型能够有效降低等待时间高达 77.2%. 在实际应用分析中, 所提出模型能够提高有效资源利用率 66.7%, 降低高空闲时间导致的资源敏感度.

**关键词:** 预约调度; 灰靶决策; 步入病人; 负荷平衡; 柔性预约; 预约决策

中图分类号: C931

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.1690

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 季孟忠, 项薇, 彭俊, 等. 基于负荷平衡的柔性预约决策[J]. 控制与决策, 2021, 36(1): 226-233.

## Flexible outpatient appointment decision model with loading balance

Ji Meng-zhong<sup>1</sup>, Xiang Wei<sup>1,2†</sup>, Peng Jun<sup>1</sup>, Huang Yi-huai<sup>1</sup>, Zhang Xiao-jian<sup>1</sup>, He Da<sup>3</sup>

(1. Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 2. Institute of Advanced Energy Storage Technology and Equipment, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 3. Yinzhou District Maternal and Child Health Care Hospital (Ningbo), Ningbo 315125, China)

**Abstract:** In view of the medical service demand features faced by the present domestic medical institutions, i.e. mostly the walk-ins patient and the patient arrival surge, the idea of load balancing is introduced and a flexible outpatient scheduling method with multi-objective appointment optimization is proposed. According to the distribution of the actual walk-in load, the total load is balanced with flexible appointment load balance model in each period. Several appointment rules, queuing rules and reservation rates combinations are utilized to integrate a large number of decision schemes. The optimal solution under different scenarios is screened out by multi-attribute decision model of grey targets. The experiments show that the average wait time can be released to 77.2% comparing to other models. Application case show that resource use rate be improved by 66.7% than before, and the resource sensitivity is lower by using the proposed model.

**Keywords:** appointment scheduling; grey target decision model; walk-in patients; load balancing; flexible appointment; appointment decision

## 0 引言

医疗产业的本质是服务型产业, 一家医院的核心竞争力就是为患者提供高质量的服务. 国内综合性医院普遍存在晨间接诊高峰, 造成候诊室拥堵不堪, 病人等待时间过长. 合理运用预约策略来减少门诊患者等待时间, 近年来一直是医院科学管理的热点研究<sup>[1-4]</sup>. 欧美国家的典型医疗环境以病人预约问诊为主, 故研究集中在纯预约(包括传统预约和当天即时预约)模式下的科学问题. 通过预约规则可以根

据一天中的服务负荷将整段工作时间分成多个时间间隔<sup>[1,5-6]</sup>, 而通过对时间间隔的长短控制能够有效地规划时间间隔中的服务人数(负荷)和一天中的总服务人数(总容量), 进而提高医疗系统的运作效率<sup>[7-10]</sup>. 但就当下中国国情, 大部分民众仍习惯于步入式就诊模式, 片面地引入西方的纯预约就诊方式, 将难以满足步入病人的就诊需求. 故应针对步入式就诊需求为主的特点, 设计合理有效的门诊预约调度方式.

收稿日期: 2019-12-02; 修回日期: 2020-03-11.

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(51705263).

责任编辑: 刘士新.

†通讯作者. E-mail: xiangwei@nbu.edu.cn.

现有考虑步入式就诊需求的相关文献中多为纯预约模式, 针对爽约情况, 考虑吸纳少量步入病人以补偿医院的收入损失<sup>[3,11]</sup>, 这类研究主要根据爽约率对步入式患者的占比进行仿真优化<sup>[12-13]</sup>. 还有一些研究考虑在引入少量步入病人后, 针对病人的类型进行优先级和排队规则的决策优化研究<sup>[14-16]</sup>.

本文关注的角度与上述研究不同, 基于混合步入式和预约式的就诊需求模式, 研究分析如何柔性配置两者的比例及在此模式下的最优预约和排队规则. 所提出的柔性预约调度方法以预测的当日步入式就诊需求为数据驱动, 评估不同时段中步入负荷, 从负荷均衡角度决定是否插入预约病人, 以降低并平衡步入病人和预约病人的等待时间. 进一步优化考虑混合模式下的预约规则和排队规则, 引入多指标灰色决策模型, 实现针对不同场景下的柔性预约决策.

### 1 负荷均衡预约模型

制造企业中, 生产订单到达的离散性导致生产负荷不平衡, 平整化生产的思路就是根据负荷情况调整生产次序和节奏, 使得负荷均衡且与生产能力相平衡<sup>[17]</sup>. 在服务系统中, 同样存在服务能力与负荷不平衡的问题: 当 $j$ 时段的到达病人人数 $X_j$ 高于服务能力 $M_{serve}$ 时, 便会造成病人的等待. 而密集到达情况下, 往往连续几个时段到达人数高于水平的服务能力, 进而造成极长的等待. 譬如现有的开放预约模式, 在原有步入队列的基础上, 增加具有优先级的预约队列, 导致连续几个时段内的负荷密集加剧, 等待时间延长. 因此借鉴制造系统的平整化思想, 研究基于负荷平衡的预约机制显得尤为重要.

### 1.1 理论及符号说明

针对具有密集步入负荷为主且超过服务能力为特征的混合就诊模式, 本文提出基于负荷均衡的预约机制, 以提高整体预约率(降低步入率 $r$ ), 使得当天步入人数峰值降低至服务能力 $M_{serve}$ . 如果 $j$ 时段内步入人数 $X_{w_j}$ 未达到服务能力 $M_{serve}$ , 则补充预约病人人数 $X_{s_j}$ , 使得各个时段的负荷和服务能力相平衡, 有

$$X_{w_j} + X_{s_j} \leq M_{serve}. \tag{1}$$

$$r_j = \begin{cases} M_{serve}/X_j, & X_j > M_{serve}; \\ 1, & X_j \leq M_{serve}. \end{cases} \tag{2}$$

$$X_{w_j} = \text{int}(X_j r). \tag{3}$$

$$X_{s_j} = \begin{cases} \max \left\{ 0, \min \left\{ M_{serve} - X_{w_j}, \sum_{t=1}^{TT/Tp} (X_t - X_{w_t}) \right\} \right\}, & j = 1; \\ \max \left\{ 0, \min \left\{ M_{serve} - X_{w_j} - \max \left\{ 0, \sum_{t=1}^{j-1} (X_{s_t} + X_{w_t} - M_{serve}) \right\} \sum_{t=1}^{TT/Tp} (X_t - X_{w_t}) - \sum_{t=1}^{j-1} X_{s_t} \right\} \right\}, & j > 1. \end{cases} \tag{4}$$

符号集合如下:

$$I: i \in \{1, 2, \dots, M_{serve}\};$$

$$J: j \in \{1, 2, \dots, TT/Tp\};$$

TT (total time): 一天内有效工作总时长为 480 min;

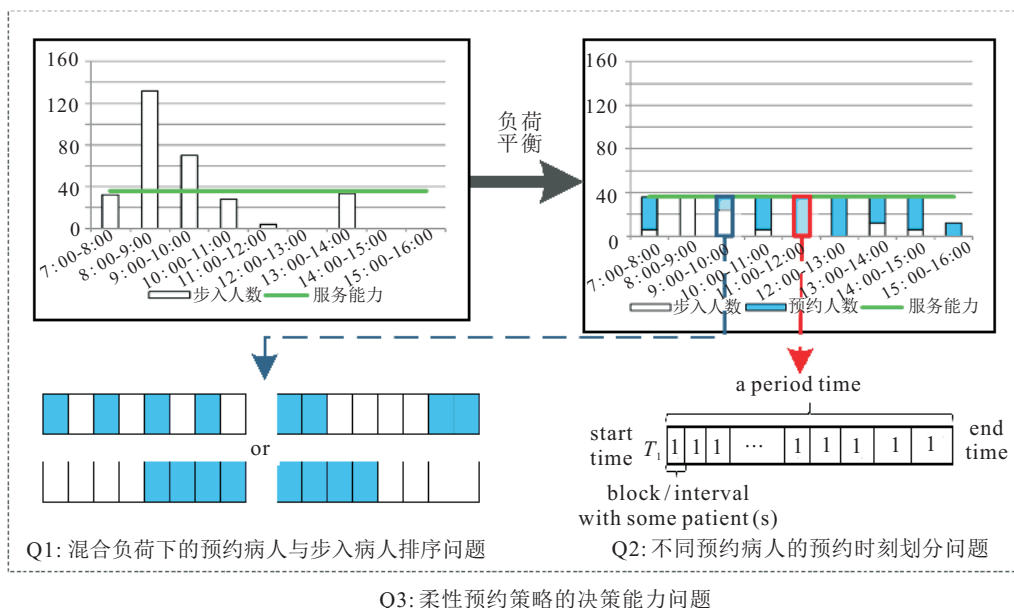


图1 预约决策问题

$T_p$ : 单一时段时长, 长度为 60 min, 每天共有 8 个时段;

$M_{serve}$ : 服务能力, 定义为  $M_{serve} = T_p/\mu$ ;

$r_j$ : 步入率 (预约率为  $1 - r_j$ );

$X_j$ :  $j$  时段到达人数;

$X_{sum}$ : 到达总人数, 定义为  $X_{sum} = \sum X_j$ ;

$X_{w_j}$ : 调整后,  $j$  时段内的步入人数;

$X_{s_j}$ : 调整后,  $j$  时段内的预约人数;

$AT_i$ :  $i$  病人到达医院时刻;

$ST_i$ :  $i$  病人开始服务时刻;

$PT_i$ :  $i$  病人服务持续时长,  $PT \in \text{random}(\mu, \sigma)$ ;

$\mu$ : 平均服务时间;

$\sigma$ : 服务时间标准差;

$WT_i$ :  $i$  病人等待时间, 定义为  $WT_i = ST_i - AT_i$ .

### 1.2 预约策略集的提出

基于负荷平衡的预约决策主要通过柔性混合负荷的方式将整体负荷平整化, 并进一步明确以下策略 (如图 1):

Q1: 当某一时段内同时存在步入和预约病人时, 如何排序以最优化系统运作效率和降低管理难度;

Q2: 引入预约负荷后, 如何将整个时段进行合理规划, 以保障每个病人的就诊时间, 并且使有效的预约间隔划分能够减少病人的等待时间、医生的空闲时间和加班时间;

Q3: 如何根据不同的密集负荷情况, 从系统运作效率最优的角度实现柔性的负荷调度决策能力, 并给出匹配的预约方案.

#### 1.2.1 步入率策略集 A

步入率策略集  $A$  是由多种步入率策略  $a_\alpha$  组成的集合, 其中  $a_\alpha \in [1, 2, \dots, TT/T_p]$ ,  $a_\alpha$  代表  $A$  集中的一个步入率  $r_j$  策略, ( $a_1 \sim r_1, a_2 \sim r_2, \dots, a_\alpha \sim r_\alpha$ ),

有

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_\alpha\}. \quad (5)$$

#### 1.2.2 预约规则集 B

为了将医生的工作时间合理地分配给每个病人, 研究汇总 10 种具有代表性的规则, 将多种规则合并为集合  $B = \{b_1, b_2, \dots, b_{10}\}$ , 其中  $b_\beta$  为第  $\beta$  种预约规则,  $\beta \in [1, 2, \dots, 10]$ . 按照区间间隔和区间容量的变化进行归类, 如图 2 所示.

根据区间间隔可分为 FI 型、OFFSET 型和 DOME 型<sup>[9]</sup>, 定义如下:

FI 型: 每个区间间隔等长;

OFFSET 型: 整个预约时间段中各区间间隔先缩短再增长;

DOME 型: 与 OFFSET 型相反, 将区间间隔先增长再缩短;

圆顶型: 综合考虑多种环境因素 (如医生成本和病人等待成本等) 对区间间隔进行调整, 具体表现为两端短, 中间长<sup>[10]</sup>.

根据区间容量 (服务人数) 的变化分为 IB 类、2BEG 类 (后简称为 2B 类) 和 MB 类<sup>[9]</sup>, 定义如下:

IB 类: 每个区间间隔中的服务容量为 1 (每个区间间隔只预约 1 个服务者);

2B 类: 第 1 个区间间隔的服务容量为 2, 其余间隔的服务容量为 1;

MB 类: 每个区间间隔的服务容量 ( $N$ ) 相等, 且均大于 1.

#### 1.2.3 排队规则集 C

当某一时间段内同时具有步入式病人  $X_{w_j}$  和预约病人  $X_{s_j}$  时, 需要明确两者的排队规则. 本文提出了排队规则集  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_4\}$ ,  $c_\gamma$  为第  $\gamma$  种排队规则,  $\gamma \in [1, 2, 3, 4]$ .

		每个区间间隔的服务容量差异		
		IB 类	2BEG 类	MB 类
区间间隔的长度差异	OFFSET 型	OFFSET 	2BOGS 	MOBS 
	FI 型	IBFI 	2BEG 	MBFI 
	DOME 型	DOME 	2BGDM 	MBDM 
	圆顶型	圆顶规则 		

图 2 规则分类

$c_1$ : begin型排队规则. 第  $j$  时段内, 步入式病人排在预约式病人之前, 体现步入病人(急诊)优先, 可降低步入病人等待时间, 特别适合我国医院中步入病人远多于预约病人情形.

$c_2$ : end型排队规则. 第  $j$  时段内, 预约式病人排在步入式病人之前, 预约优先, 适合专家门诊情形将一天就诊序列中的后几个名额(间隔)开放给步入病人, 以确保吸引到足够的步入病人而减少损失.

$c_3$ : mid型排队规则. 第  $j$  时段内, 步入式病人排在整个队列中间位置, 针对队列前端失约率普遍高于队列后端<sup>[13]</sup>的研究发现, 将服务序列中间名额开放给步入病人, 以及时弥补前面失约导致的资源浪费.

$c_4$ : even型排队规则. 第  $j$  时段内, 预约式病人与步入式病人交叉间隔排序, 均衡步入与预约的优先.

为简化模型考虑, 作如下假设:

- 1) 预约病人会在预约时刻准时到达医院;
- 2) 不考虑预约病人爽约的情况;
- 3) 步入病人到院的时刻服从负指数分布;
- 4) 步入式病人之间依据 FIFS (first in first served)

规则接受服务.

### 1.3 评价指标

本文研究多预约率、预约规则和排队规则相混合的预约决策问题, 为了科学地评价每个决策方案, 引入文献中常见的5个评价指标<sup>[4]</sup>:

- 1)  $d^1$ , 就诊病人平均等待时间

$$\overline{WT} = \sum WT_i / X_{sum}. \quad (6)$$

- 2)  $d^2$ , 步入式病人平均等待时间

$$\overline{WT_w} = \sum (ST - AT_w) / \sum X_w. \quad (7)$$

- 3)  $d^3$ , 预约病人平均等待时间

$$\overline{WT_s} = \sum (ST - AT_s) / \sum X_s. \quad (8)$$

- 4)  $d^4$ , 医生空闲时间

$$IT = \sum_{i=2}^{X_{sum}} [ST_i - (ST_{i-1} + PT_{i-1})]. \quad (9)$$

- 5)  $d^5$ , 医生加班时间 OT: 由最后一人的结束服务时间与全天额定工作总时长之差得到, 当上述差值为负数时, 认为医生未加班(加班时长为0), 有

$$OT = \max\{0, ST_{X_{sum}} + PT_{X_{sum}} - TT\}. \quad (10)$$

## 2 多指标灰靶决策模型

复杂系统决策的若干方法包括专家评价法、层次分析法(AHP)、TOPSIS、技术边界法、模糊综合评价法(FCE)、群决策和灰色系统理论等<sup>[18-20]</sup>. 多目标灰靶决策模型源自于灰色系统理论, 适用于解决多指

标、小数据量(灰色)的复杂决策问题<sup>[19-20]</sup>, 但模型的优化效果取决于适合的评价标准(临界值和靶心).

本研究就前文所提出的  $\alpha$  种步入率 ( $A$  集)、 $\beta$  个预约规则 ( $B$  集) 和  $\gamma$  个排队规则 ( $C$  集), 排列组合形成决策方案集  $S$ , 其中每一个方案  $S_{\alpha\beta\gamma}$  均由3个分集组成, 且每个方案有5个评价指标 ( $d^k, k \in (1, 2, \dots, 5)$ ). 换言之, 对医院某日门诊调度提供建议时, 需要考查每个方案的所有指标, 再综合作出决策. 为了快速并有效地作出最优决策, 引入多指标灰靶决策模型, 该决策模型由决策规则集  $A, B, C$ 、决策方案集  $S$  以及决策效果集  $U$  构成.

决策方案集  $S$  是由众多决策方案  $S_{\alpha\beta\gamma}$  组成的集合 ( $S = B \cdot C \cdot A$ ),  $S_{\alpha\beta\gamma}(b_\beta, c_\gamma, a_\alpha)$  为该集合中一个由  $a_\alpha$  步入率、 $b_\beta$  预约规则和  $c_\gamma$  排队规则组成的决策方案, 有

$$S = \left[ \begin{array}{ccc} S_{111} & \cdots & S_{\gamma 11} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{\beta 11} & \cdots & S_{\beta \gamma 1} \end{array} \right] \cdots \left[ \begin{array}{ccc} S_{11\alpha} & \cdots & S_{1\gamma\alpha} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{\beta 1\alpha} & \cdots & S_{\beta \gamma\alpha} \end{array} \right]. \quad (11)$$

决策指标即为第1.3节中  $d^1(\overline{WT})$ 、 $d^2(\overline{WT_w})$ 、 $d^3(\overline{WT_s})$ 、 $d^4(IT)$  和  $d^5(OT)$ . 效果集  $U$  由每个决策方案  $S_{\alpha\beta\gamma}$  在每个评价指标  $d^k$  下的效果值  $u_{\alpha\beta\gamma}^k$  组成

$$u_{\beta\gamma\alpha}^k \in [d_1^k, d_2^k]. \quad (12)$$

例如  $u_{111}^2$  代表预约规则为 OFFSET、排队规则为 BEGIN 和步入率为  $r_1$  组成的决策方案在评价指标  $\overline{WT_w}$  下的值.

每个决策指标  $d^k$  均有其上下临界值 ( $d_1^k, d_2^k$ ), 临界值具有的意义如下: 1) 缩小解空间; 2) 避免极端值对最终结果的影响. 只有当某个方案的每个效果值  $u_{\alpha\beta\gamma}^k$  都处于该范围内, 方案才可以被认为是可行方案, 即

$$S_{\beta\gamma\alpha} \{ (u_{\beta\gamma\alpha}^1, u_{\beta\gamma\alpha}^2, \dots, u_{\beta\gamma\alpha}^k) | d_1^k \leq u_{\beta\gamma\alpha}^k \leq d_2^k \}. \quad (13)$$

集合  $r_0$  表示评价指标最优效果集合(最优效果向量), 如本文中当就诊病人平均等待时间、步入病人平均等待时间、预约病人平均等待时间、医生加班时间、医生空闲时间都为0, 即

$$r_0 = (r_0^1 = 0, r_0^2 = 0, \dots, r_0^k = 0) \quad (14)$$

时, 将  $r_0$  作为靶心, 各可行方案与靶心比较, 得到最小靶心距方案, 即

$$\min(|u_{\beta\gamma\alpha} - r_0|) = \min \left( \left( \sum_{k=1}^K (u_{\beta\gamma\alpha}^k - r_0^k)^2 \right)^{1/2} \right). \quad (15)$$



进而方案  $S_{\alpha\beta\gamma}(b_\beta, c_\gamma, a_\alpha)$  为所有可行方案下的最优决策方案。

### 3 数值实验分析

为验证本文柔性预约模型的有效性,基于文献[21]提供的实验数据,通过一系列数值仿真实验进行同等条件下的对比验证。

#### 3.1 实验场景/数据介绍

实验总时间设置:总实验时间设置为4h(240min),根据医生平均服务时间10min,进一步将总时间划分为24段。

服务时间设置:详细调研步入病人与预约病人的服务时间,验证步入与预约病人无明显差别(与本文原先假设相符),将医生平均服务时间设置为9.99min,标准差为2.89。

实验负荷(组)设置:与文献中等同条件的数据进行比较,医生同时接受步入病人与预约病人(未设置优先级标准,服从FIFS规则)总人数(负荷)为30人,其中步入病人为20人,预约病人为10人,得到总步入率为66.6%。文中负荷分为两类,分别具有不同的达到模式,步入病人根据各时段的步入速率到达、预约病人根据时段的人数准点到达。因此根据不同的总负荷分布情况,实验分为3组(case1~case3),如图3所示。

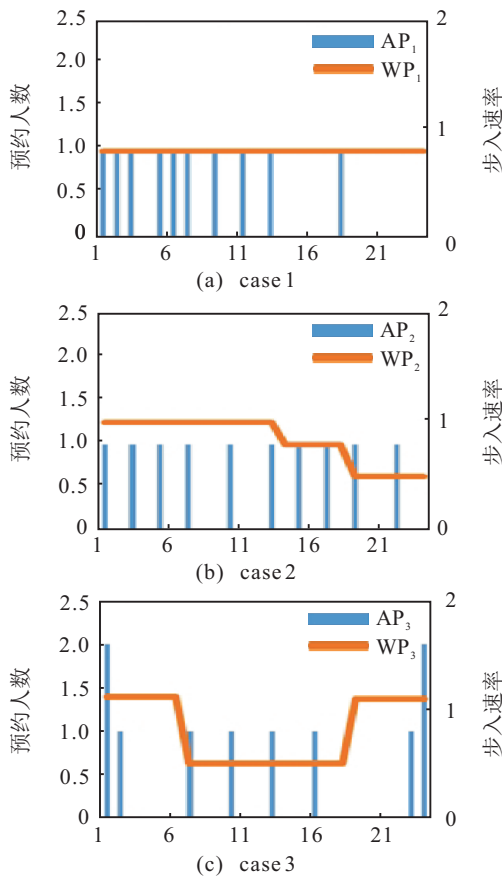


图3 负荷分布

#### 3.2 实验指标

考虑到实验数据的可对比性,以文献[21]中的评价指标作为本文的评价指标:  $d^1$  预约病人平均等待时间(AP wait time),  $d^2$  步入病人平均等待时间(WP wait time),  $d^3$  最大完工时间(makespan). 为使比较效果更加直观,以文献中的实验结果作为本文的临界判断值  $d_2^k$ , 汇总上述指标于表1。

	min		
	$d^1$ AP wait time	$d^2$ WP wait time	$d^3$ makespan
$d_1^k$	0	0	0
$d_2^k$	18	44	311

#### 3.3 实验数据

将第3.1~第3.2节数据代入柔性预约模型,得到实验结果如表2和表3所示。表2为临界值判断结果(即第1次筛选),仅当每个方案的所有指标  $d^k \in [d_1^k, d_2^k]$  时,认为该方案通过筛选(Y),否则未通过(N)。表3为最终实验结果(即第2次筛选),基于第1次筛选结果,对表2的所有“Y”方案进行靶心距比较,得到case1~case3的最优方案(最小靶心距),即最优方案会通过临界值检验和靶心距检验两次筛选。

进一步将最优方案(实验数据)与文献数据进行对比,以验证模型的有效性。对比结果如表3所示,其中PAN/MO/AF/WO/WANG/REAL为对照组(皆取自3种case下的最优数据),REAL为医院实际数据[21],case1~cases3为本文实验组。

#### 3.4 实验结果分析

从表2和表3可知:

1) 表2中每case下“Y”的数量远多于“N”,表示大部分方案是可行的,故可推断出基于负荷平衡理论可以有效降低等待时间和最大完工时间。而各方案的差异性又取决于不同的规则组合策略,引入灰靶决策模型的意义便在于“优中选优”,使得模型能够根据不同情况得到最优的调度策略。

2) 预约病人等待时间对比: case1~case3的预约病人等待时间(2.54min)低于PAN/MO/AF/WO/WANG组,略高于REAL组(0min),表明本文模型在降低预约病人等待时间方面具有显著优势。

3) 步入病人等待时间对比: case1~case3的单项/综合平均等待时间最低,为PAN/MO/AF/WO/WANG等模型的57.9%~68.2%,为REAL模型的25.4%~30.0%,表明本文模型在降低步入病人等待时间方面具有明显优势。

4) 最大完成时间对比: case1和case2的数值

表 2 方案汇总及初步筛选结果

		DOME	IBFI	OFFSET	2BEG	2BGDM	2BOGS	MBDM	MBFI	MBOS	圆顶
case1	BEGIN	Y	Y	Y	Y	N	Y	Y	Y	N	Y
	END	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	N	N
	MID	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	Y
	EVEN	Y	Y	N	Y	Y	Y	Y	Y	N	N
case2	BEGIN	N	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	N
	END	Y	Y	N	Y	Y	Y	N	Y	N	N
	MID	Y	Y	N	Y	Y	Y	N	N	N	Y
	EVEN	Y	Y	Y	N	Y	Y	Y	Y	N	N
case3	BEGIN	Y	Y	Y	N	Y	N	N	Y	Y	Y
	END	Y	Y	Y	N	Y	Y	Y	Y	N	N
	MID	Y	N	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N
	EVEN	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	N	N

表 3 分组实验结果

实验组	case1	case2	case3	PAN	MO	AF	WO	WANG	REAL
AP wait time /min	2.54	2.55	2.81	18	25	3	18	3	0
WP wait time /min	27.28	27.04	23.15	44	40	49	40	52	91
Makespan /min	299.76	293.95	303.81	311	309	311	315	310	300
步入率 /%	66.7	66.7	66.7	66.7	66.7	66.7	66.7	66.7	66.7

均低于对比组的数值,同时低于标准工作时间 300 min, case3 仅高于 REAL 组,约为 3.8 min(其中 REAL 为对比组中数值最低),表明基于该模型能够有效利用医生工作时间,减少无效的加班时间,最大化利用资源(甚至可增加就诊号源).

### 4 实例应用

为了进一步将柔性预约决策模型应用于实际的系统运作中,选取某市区级妇幼保健院,通过对该院 HIS (health information system) 系统进行数据采集发现,该院平均每天有 145 人次接受会诊服务,服务对象的到达时段集中于全天 8 个时段(一天工作时长 8 小时)的前几个时段,造成晨间会诊室拥堵,待服务孕妇等待时间过长,满意率低下. 医院管理人员为了提高医院服务质量,缓解晨间拥堵,将开放的诊室由原有 4 个诊室提高至现有 6 个诊室. 本文将现有模型(模型 1)和纯步入模型(模型 2)进行方案对比,并提出改善意见.

#### 4.1 实验设置

以合作医院的瓶颈部门作为应用对象,基于医院实测数据与流程建立实验模型. 分别利用模型 1 和模型 2 仿真医院开放诊室数量为 2~6 个的情况,进一步从医院管理者的角度上考虑到了医院方面承担

的成本指标 cost, 本文成本数据取自于《中国统计年鉴》<sup>[22]</sup>.

1) 实验模型及流程: 病人根据实验负荷分布产生并依次进入诊室就诊,在完成就诊后离开诊室;

2) 仿真总时长: 工作人员实行坐班制度(非高尔夫政策<sup>[14]</sup>, 医生未达下班时间不能够离开医院),全天常规工作时间 TT 设定为 360 min;

3) 服务时间: 各诊室均同质,且服务时间均设置为  $(\mu : 6.09, \sigma : 1.71)$ ;

4) 评价指标: 平均等待时间、步入病人平均等待时间、诊室空闲时间、诊室加班时间、医院成本  $(cost = \sum_i^{num} (aTT + bOT_i))$ , 其中 num 为开放科室数量, a 为单位工作时间成本, b 为单位加班时间成本,  $OT_i$  为 i 科室的加班时间;

5) 实验组设置: 设置两个实验变量(诊室数量 2~6 个和 2 类模型), 共计 10 个实验组,用于比较两类接诊策略的优劣性和资源数量的影响.

#### 4.2 指标对比

通过运行两个实验模型,得到相应的实验数据如表 4 所示. 由表 4 可见:

1) 从院方的角度考虑,当医院开放相同数量的诊室后,其成本在模型 1 和模型 2 中并未表现出明显差

异,当医院增加开放诊室数量时,会使得医院的成本快速提高,并且与诊室数量基本成线性关系;

2) 随着开放诊室数量的增加(2个→4个),模型2的(步入)平均等待时间减少,但始终高于模型1,当诊室数量增加至4个以上时,医院加班时间接近于0,而空闲时间进一步增加,导致两个模型的(步入)等待时间趋于平整(低资源状态下,模型1较模型2表现出明显优势);

3) 在就诊病人平均等待时间中,虽然模型2的平均等待时间(28.4 min, 诊室数6个)略好于模型1(33.4 min, 诊室数2个),但此时模型2的医院成本(1638.7元, 诊室6个)远高于具有近似效果的模型1成本(668.1元, 诊室2个);

4) 模型2中,随着开放诊室数量的增加,病人平均等待时间减少,晨间的拥堵情况得以改善,但与此同时,诊室的空闲时间也大幅提高,医院诊室的利用率由原59.85%下降为38.13%。

表4 实验数据

诊室数量	模型类型	平均等待时间	步入等待时间	空闲时间	加班时间	医院成本
2个	模型1	33.4	83.6	10.16	85.6	668.1
2个	模型2	146.33	146.3	1.77	69.2	664.4
3个	模型1	32.7	42.8	112.1	9.3	820.6
3个	模型2	69.1	69.1	109.4	3.9	819.4
4个	模型1	31.2	37.5	201.9	7.1	1107.3
4个	模型2	39.8	39.8	194.3	0	1105.7
5个	模型1	29.7	36.8	249.7	1.6	1366
5个	模型2	31.9	31.9	241.9	0	1365.6
6个	模型1	28.5	34.3	305.3	0.4	1638.7
6个	模型2	28.4	28.4	297.8	0	1638.7

4.3 敏感度分析

敏感度指标设置:

1) 等待时间变化率  $|\Delta A/A|$ , 表明自变量(诊室数量)变化后,造成的平均等待时间  $A$  变化;

2) 敏感度 ( $|SAF|$ ):  $|SAF|$  越大, 平均等待时间  $A$  对自变量(诊室数量)的依赖程度(敏感度)越高,反之同理。

表5 敏感度对比结果 %

	2人	3人	4人	5人	6人
$ \Delta A_1/A_1 $	0	2.10	4.59	4.81	4.04
$ \Delta A_2/A_2 $	0	52.77	42.40	19.85	10.97
$ SAF_1 $	无	4.19	4.59	3.21	2.02
$ SAF_2 $	无	105.54	42.40	13.23	5.49

敏感度对比结果如表5所示,由表5可见:

1)  $|\Delta A_2/A_2| \geq |\Delta A_1/A_1|$ , 随诊室数量的增加, 模型2的平均等待时间变化明显, 模型1的平均等待时间变化不明显;

2)  $|SAF_2| \geq |SAF_1|$ , 随诊室数量的增加, 模型2的  $|SAF_2|$  快速下降, 而模型1的  $|SAF_1|$  相对平稳, 表明模型2对诊室数量变化的敏感度远高于模型1, 进一步表明模型2对资源的依赖程度更高。

5 结论

在现实的医疗环境中, 纯步入接诊模式会使病人密集到达, 而在某一阶段内负荷超过医院服务能力, 从而造成病人的长期等待。本文以密集分布下的负荷均衡为出发点, 提出负荷平衡的服务资源调度思路。通过提高预约率, 降低步入式负荷, 将部分步入负荷转化为预约负荷, 并将预约符合插空至服务能力溢出, 达到各个时段的负荷均衡。在此基础上进一步考虑病人占据的服务资源问题和单一时段内预约病人和步入病人混合排队问题, 提出了多种预约/排队规则, 并针对不同负荷下的多指标决策问题提出了多目标灰靶决策的柔性预约模型。通过与现有类似研究进行比较可以发现, 所提出模型在预约病人平均等待时间、步入病人平均等待时间和最大完成时间3个参数上具有显著的优势(等待时间最高可降低77.2%), 表明了本文负荷平衡下柔性预约思路的有效性。通过进一步实际案例研究发现, 所提出模型不仅在降低等待时间等指标上有显著效果, 而且其指标对资源变化的敏感度远低于纯步入方案, 表明能够帮助医院提高资源利用率(66.7%)和服务质量, 降低院方的成本支出。

本文为医院门诊方式的改革提供了不同于以往纯步入或纯预约的方案, 完善了相应的理论依据和模型, 医院管理者可以接受本文方法作为医院从纯步入接诊到纯预约接诊过程中的过渡形式, 同时也应根据自身情况因地制宜地采取变化策略。

参考文献(References)

[1] Cayirli T, Veral E A. Outpatient scheduling in health care: A review of literature[J]. Production and Operations Management, 2009, 12(4): 519-549.

[2] Ahmadi-Javid A, Jalali Z, Klassen K J. Outpatient appointment systems in healthcare: A review of optimization studies[J]. European Journal of Operational Research, 2017, 258(1): 3-34.

[3] Gupta D, Denton B T. Appointment scheduling in health care: Challenges and opportunities[J]. IIE Transactions,



- 2008, 40(9): 800-819.
- [4] Marynissen J, Demeulemeester E. Literature review on multi-appointment scheduling problems in hospitals[J]. *European Journal of Operational Research*, 2019, 272(2): 407-419.
- [5] Robinson L W, Chen R R. A comparison of traditional and open-access policies for appointment scheduling[J]. *Manufacturing and Service Operations Management*, 2010, 12(2): 330-346.
- [6] Denton B, Gupta D. A sequential bounding approach for optimal appointment scheduling[J]. *IIE Transactions*, 2003, 35(11): 1003-1016.
- [7] Bailey N T J. A study of queues and appointment systems in hospital out-patient departments, with special reference to waiting-times[J]. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B: Methodological*, 1952, 14(2): 185-199.
- [8] White M J B, Pike M. Appointment systems in out-patients' clinics and the effect of patients unpunctuality[J]. *Medical Care*, 1964, 2(3): 133-145.
- [9] Cayirli T, Veral E, Rosen H. Designing appointment scheduling systems for ambulatory care services[J]. *Health Care Management Science*, 2006, 9(1): 47-58.
- [10] Cayirli T, Yang K K, Quek S. A universal appointment rule in the presence of no-shows and walk-ins[J]. *Production and Operations Management*, 2012, 21(4): 682-697.
- [11] El-Sharo M, Zheng B C, Yoon S W, et al. An overbooking scheduling model for outpatient appointments in a multi-provider clinic[J]. *Operations Research for Health Care*, 2015, 6: 1-10.
- [12] Liu N, Ziya S. Panel size and overbooking decisions for appointment-based services under patient no-shows[J]. *Production and Operations Management*, 2014, 23(12): 2209-2223.
- [13] Qu X L, Peng Y D, Shi J, et al. An MDP model for walk-in patient admission management in primary care clinics[J]. *International Journal of Production Economics*, 2015, 168: 303-320.
- [14] Peng Y D, Qu X L, Shi J. A hybrid simulation and genetic algorithm approach to determine the optimal scheduling templates for open access clinics admitting walk-in patients[J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2014, 72: 282-296.
- [15] Borgman N J, Vliegen I M H, Boucherie R J, et al. Appointment scheduling with unscheduled arrivals and reprioritization[J]. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 2018, 30(1): 30-53.
- [16] Cayirli T, Dursun P, Gunes E D. An integrated analysis of capacity allocation and patient scheduling in presence of seasonal walk-ins[J]. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 2019, 31(2): 524-561.
- [17] 晁永生, 孙文磊, 袁亮. 平行装配线平衡性的多目标优化[J]. *计算机集成制造系统*, 2016, 22(5): 1211-1219. (Chao Y S, Sun W L, Yuan L. Parallel assembly line balancing based on multi-objective optimization[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2016, 22(5): 1211-1219.)
- [18] 王红卫, 祁超, 魏永长, 等. 基于数据的决策方法综述[J]. *自动化学报*, 2009, 35(6): 820-833. (Wang H W, Qi C, Wei Y C, et al. Review on data-based decision making methodologies[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2009, 35(6): 820-833.)
- [19] 邓聚龙. 灰色系统综述[J]. *世界科学*, 1983(7): 1-5. (Deng J L. Overview of grey system[J]. *World Science*, 1983(7): 1-5.)
- [20] 刘思峰, 胡明礼, Jeffrey F, 等. 灰色系统模型研究进展[J]. *南京航空航天大学学报*, 2012, 29(2): 103-111. (Liu S F, Hu M L, Jeffrey F, et al. Progress of grey system models[J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2012, 29(2): 103-111.)
- [21] Pan X W, Geng N, Xie X L, et al. Managing appointments with waiting time targets and random walk-ins[J]. *Omega*, 2019, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2019.04.005>.
- [22] 国家统计局. 中国统计年鉴2018[Z]. 北京: 中国统计出版社, 2018. (CSY. 2018 China statistical yearbook[J]. Beijing: Statistical Publishing House, 2018.)

## 作者简介

季孟忠(1995—), 男, 硕士生, 从事制造/服务系统工程的研究, E-mail: Mengzhong.JI@foxmail.com;

项薇(1971—), 女, 教授, 博士, 从事工业与系统工程等研究, E-mail: xiangwei@nbu.edu.cn;

彭俊(1995—), 女, 硕士生, 从事制造/服务系统工程的研究, E-mail: 877165782@qq.com;

黄益槐(1997—), 男, 硕士生, 从事制造/服务系统工程的研究, E-mail: 623764597@qq.com;

张肖建(2000—), 男, 本科生, 从事工业工程的研究, E-mail: 839593595@qq.com;

何达(1974—), 男, 副主任医师, 从事公共卫生管理研究, E-mail: 88642894@qq.com.

(责任编辑: 郑晓蕾)