

文章编号: 2095-2163(2024)02-0076-07

中图分类号: TP301.6

文献标志码: A

嵌入学习效应的多目标应急伤员手术调度

吴丹妮, 叶春明

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 为了合理高效地解决突发事件后医院手术室资源调度问题, 本文在经典车间调度模型的基础上, 提出了应急手术调度模型。以手术室救治总成本最低以及伤员的手术完成时间最短为目标, 重点考虑了学习效应对手术完成时间的影响, 并对对比分析了不同学习因子下的调度结果。利用带有精英策略的非支配排序遗传算法求解多目标手术调度问题, 并通过仿真对比实验证明了模型和算法的有效性。

关键词: 手术调度; 学习效应; 多目标手术调度; 非支配排序遗传算法

Multi-objective emergency casualty surgical scheduling with embedded learning effects

WU Danni, YE Chunming

(Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In response to the critical need for effective resource allocation in hospital operating rooms in the aftermath of emergencies, this paper evolves from the traditional workshop scheduling paradigm to introduce an innovative emergency surgical scheduling model. This model is oriented towards dual goals: minimizing the overall cost of operating room treatments and ensuring the swiftest possible completion of surgeries for the injured. A key feature of this model is its consideration of the learning effect on the duration of surgeries, coupled with a comparative analysis of scheduling results influenced by different learning factors. To tackle the complex multi-objective surgery scheduling issue, the research utilizes a sophisticated Non-dominated Sorting Genetic Algorithm enhanced with an elite strategy. The efficacy of this model and the algorithm is validated through comprehensive simulation and empirical comparisons.

Key words: surgical scheduling; learning effects; multi-objective surgical scheduling; non-dominated genetic algorithm

0 引言

环境恶化自然灾害频发, 例如: 2022年9月5日四川省甘孜州泸定县发生6.8级地震, 93人遇难, 50余人住院治疗, 造成重大人员伤亡和经济损失。手术调度是指在人员、时间、床位等资源约束下合理安排各例手术, 提高手术室的利用率。手术室拥有大量高精密医疗设备和专业医护团队, 根据美国的一项测算, 一间普通手术室的运行成本平均为62美元/分钟^[1]。提高手术室的运营效率也是降低手术成本、提高医院核心竞争力的最具潜力的手段^[2]。突发背景下的调度问题具有一定复杂性和多变性, 是一个典型的多约束问题。在医疗资源缺乏、伤员数量巨大的背景下, 以最小的资源成本满足应急手术调度需要是医院面临的新课题。

1 相关研究综述

近几十年来, 大量关于手术室资源管理以及手术调度的相关研究, Magerlein等^[3]提出分配调度与提前调度的概念; Blake等^[4]将手术调度问题分为战略、战术和操作3个层次, 同时指出手术所需资源分配是从非常长期的问题到非常短期的问题; McIntosh等^[5]研究了特定资源分配对麻醉组和手术室生产率的影响。早期的研究主要以时间框架来考虑, 但实际医院手术调度中所有问题往往都涉及医生技术及患者伤势等多方因素, 每一项都影响着手术持续时间; Mobasher等^[6]研究了护士的能力对手术调度的影响, 提出基于解决方案池的思想和修改目标规划的变体这两种思路, 利用多目标整数规划方法对模型求解; Min D等^[7]建立了一个随机动态

作者简介: 吴丹妮(1999-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 医疗调度、应急管理; 叶春明(1964-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 智能算法、生产调度。

收稿日期: 2023-02-17

哈尔滨工业大学主办 ◆ 系统开发与应用

规划模型,在手术排程中考虑患者优先级。近年来计算机建模仿真技术的发展为多目标调度问题的研究开辟了新的思路;Amjad^[8]通过文献整理发现,近二十多年目标柔性车间作业调度问题的研究中有大约26.4%采用遗传算法求解;景志强^[9]等研究证明了NSGA-II(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II)算法在求解多目标优化问题上有着良好的求解能力;郝志刚^[10]运用非支配排序遗传算法求解多目标手术排程问题,确定最优开启手术室数量,降低手术成本;朱悦等^[11]考虑了手术过程中的学习效应和恶化效应,以最小化所有手术完成时间为目标,构建了包含手术间准备时间排程模型。

当前研究所建立的手术调度模型仅是医疗资源的简单排序,较少考虑操作者的体验感,学习效应在手术调度中的应用较少。本文提出嵌入学习效应的多目标应急伤员手术调度问题的核心目标:应急手术调度总时间最短,应急救治总成本最低,并利用带有精英策略的非支配排序遗传算法对模型求解,最终得出伤员的手术时间安排以及不同救治阶段的医生最优指派方案。

2 应急手术调度问题

2.1 应急手术调度问题描述

手术室资源调度与生产中的车间调度的本质是类似的,因此可以将车间调度理论应用到应急手术调度中^[12]。在应急调度中主要涉及医护人员、医疗设备等等,可以将医生类比为加工零件的机器,需要救治的伤员类比为需要加工的工件,伤员的救治步骤类比为工件的加工步骤。则多名医生对伤员进行救治的过程就是多台机器对零件进行加工的过程。本文研究的是突发事件发生后,若干个伤员到达救助医院后应急手术救治过程。伤员的救治过程分为术前准备阶段(伤口预处理、麻醉)、手术阶段和手术恢复阶段(普通病房、重症监护室)。每位伤员都需要进行三阶段的救治步骤完成治疗,每位伤员的治疗时间是与医生能力水平有关的函数。伤员救治步骤示意图如图1所示。

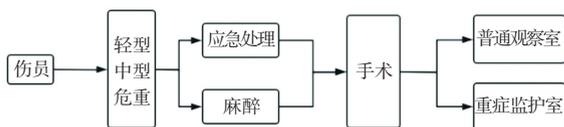


图1 伤员救治步骤示意图

Fig. 1 Pipeline of treatment on the wounded

2.2 学习效应相关研究

在救治伤员过程中,医疗团队存在学习效应。Biskup D^[13]和 Cheng 等^[14]对单机条件下目标函数为极小化总完工时间的调度问题进行了研究,率先在调度领域中提出学习效应。在实际的车间生产中,由于操作者重复无变化的步骤,随着操作者的经验累积,学习效应会缩短单位工件的加工时间。同理,在应急手术调度中,伤员的伤情往往是类似的,医疗团队通过反复操作相同的步骤积累经验,当医生再次参与同类型救治时,所需时间更短。在实际的应急手术调度中,由于不同的执刀医生的任职时间、知识水平、以往累积经验不完全相同,从而对操作的熟练程度存在差异,在处理同类型的救治步骤时,能力水平高的执刀医生需求更短的时间。因此,本文的模型考虑了医生的能力水平高低对手术各步骤持续时间的影响,使得模型更贴合实际。

2.3 应急手术调度模型

2.3.1 问题描述

伤员手术流程一般包括术前准备、术中、恢复3个阶段。手术调度问题涉及术前伤口的应急处理、术中医疗设备选择、手术后恢复室及各步骤操作医生选择等等。手术调度的核心目标是提高各阶段资源的利用率。由于突发事件的不可预测性,在应急手术调度中需要的人力成本往往是比较昂贵的,所以手术调度问题不仅需要考虑流程完成时间,还必需考虑手术各阶段救治成本。

2.3.2 问题假设

在伤员的应急救治过程中,为简化问题本文做出如下假设:

- (1) 所有伤员的应急手术流程相同(术前-术中-术后),不同伤势伤员手术步骤不完全相同;
- (2) 同一个伤员手术的3个阶段不能改变顺序,不存在特殊情况;
- (3) 每个伤员在应急救助中有平等接受救治的权利,救治没有先后之分均可在0时刻开始;
- (4) 所有伤员送到医院时均可立即开始手术;
- (5) 不同医生对不同救治步骤的熟练程度不完全相同;
- (6) 每位医生同一时间不能参与两个及以上的救治;
- (7) 手术过程不允许有任何干扰,不能中断;
- (8) 除执刀医生、其它医疗设施等资源默认为准备就绪,均处于正常状态;
- (9) 医生在救治过程中存在学习效应;

(10) 伤员病情以及手术三阶段不同步骤的需求时间可由伤员伤情识别系统预先测定;

(11) 计算总时间时不考虑患者抢占、排队、时滞, 不考虑各步骤转换与准备时间;

(12) 各阶段中途不能中断, 即分配给一个步骤的医生只能等该阶段治疗结束才能被分配到下一阶段的治疗。

2.3.3 模型构建

本文以最小化最大完工时间 (f_1) 以及最小化救治成本 (f_2) 为目标函数。

应急救援过程中, 伤员批量大、伤势复杂, 因此救援时间至关重要。最小化救援时间不仅可以提高患者满意度, 减少医生加班, 还可以体现整个应急救援的时间周期以及救援效率, 因此最小化最大完工时间是衡量应急手术调度方案的根本指标。本文中最大完成时间是指所有伤员同时开始救治, 最后一个救治步骤完成所花费的时间。时间越短, 表明方案越好。最小化最大完工时间的计算见公式(1):

$$f_1 = \min t = \max_{1 \leq d \leq m} FT_d \quad (1)$$

其中, m 表示伤员的数量; d 表示伤员的编号 ($1 \leq d \leq m$); FT_d 表示伤员 d 的手术流程结束时间, 公式(2):

$$FT_d = ST_d + T_d \quad (2)$$

其中, ST_d 表示伤员 d 的救治流程开始时间, T_d 表示伤员 d 的救治流程持续时间, 公式(3):

$$T_d = \max_{j \in J_d} (T_{ijd} x_{ijd}) \quad (3)$$

其中, i 表示医生的编号 $1 \leq i \leq n$; j 表示每个伤员经过的救治步骤 $1 \leq j \leq 5$; x_{ijd} 为 $0 \sim 1$ 决策变量, 若 $x_{ijd} = 1$, 表示医生 i 参与伤员 d 步骤 j 的治疗, 否则为 0 , T_{ijd} 表示医生 i 参加治疗伤员 d 的救治步骤 j 的时间, 公式(4):

$$T_{ijd} = \frac{T_{jd}^{\min}}{E_{ij}} \quad (4)$$

其中, T_{jd}^{\min} 表示伤员 d 所需步骤 j 的最短完工时间, E_{ij} 表示医生 i 处理步骤 j 的水平高低。

$E_{ij} = 1$ 表示医生 i 对步骤 j 的熟练程度最高; $E_{ij} = 0$ 表示医生 i 不具备参与步骤 j 的能力。

在应急救援中, 由于突发事件不可预测, 在一定的时间内, 能快速调度的医疗资源如: 医护团队、呼吸机、麻醉机等等是有限的, 未必能及时到达现场, 对有限资源的合理利用能在一定程度上提高手术的效率、患者的治愈率以及救治数量。本文在考虑最小化最大完工时间的同时, 还要考虑到救援

的总成本, 将医院的救援成本量化为医生救治的总成本, 公式(5):

$$f_2 = \min C = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^s \sum_{d=1}^m x_{ijd} T_{ijd} C_i \quad (5)$$

其中, C_i 表示单位时间的救援成本。

模型的具体约束条件如下:

(1) 每项救治任务的每一个步骤要求有且只有一位医生完成, 即 $\sum_i x_{ijd} = R_d^j$, R_d^j 表示患者 d 是否需要步骤 j , 若需要则 $R_d^j = 1$, 否则 $R_d^j = 0$;

(2) 伤员 d 所需要的救治步骤 j 只能由具备该救治能力的医生 i 完成, 即 $\sum_{j=1}^s x_{ijd} = 1$;

(3) 三阶段包含救治步骤总和为救治总步骤数目, 即 $\sum_{p=1}^3 P_j = s$, P_j 表示不同阶段所包含的救治步骤;

(4) 同一时刻一个医生只能参加一个步骤, 即 $\sum_{j=1}^s \sum_{d=1}^m y_{ijdt} = 1$, 其中 y_{ijdt} 为 $0 \sim 1$ 辅助变量, 若 $y_{ijdt} = 1$, 表示医生 i 在时段 t 参加患者 d 的步骤 j 治疗, 否则为 0 ;

(5) 变量 x_{ijd} 与变量 y_{ijdt} 之间的关系约束:

$$x_{ijd} = \begin{cases} 1 & \forall t, \exists y_{ijdt} = 1 \\ 0 & \forall t, \exists y_{ijdt} = 0 \end{cases}$$

学习效应会对医生处理步骤的具体时长产生影响, E_{ij} 表示医生 i 在 t 时刻处理步骤 j 的水平, 公式(6):

$$E_{ij} = E_{ij}^s t_{ij}^{a_{ij}} \quad (6)$$

其中, E_{ij}^s 表示医生 i 在 t 时刻处理步骤 j 的初始水平; t_{ij} 表示医生 i 参与步骤 j 的总时间长度; a_{ij} 表示医生 i 针对步骤 j 的学习因子, a_{ij} 的值越大, 则医生 i 的学习效应越大, 公式(7):

$$a_{ij} = \frac{-\ln(l_{ij})}{\ln 2} \quad (7)$$

其中, l_{ij} 为医生 i 对步骤 j 的学习率。

3 算法设计

3.1 带有拥挤策略的非支配排序遗传算法

本文建立多目标优化模型 (Multi-objective Optimization Problem, MOP)。在 MOP 中, 改善一个目标往往会降低另一个目标的性能, 无法同时实现多个目标, 只能在多个目标中进行权衡, 使所有目标尽量达到最优, 得到帕累托解集^[15]。非支配排序遗传算法 (NSGA-II) 在解决 MOP 问题上具有良好的表现。

Srinivas 和 Deb 于 1995 年提出了非支配排序遗

传算法 (Non-dominated Sorting Genetic Algorithms, NSGA), 这是一种基于帕累托最优概念的遗传算法, 原理简单但计算复杂度较高, 算法的执行速度慢。为了提高算法的运算速度和鲁棒性, 并保证帕累托最优解的均匀分布, 以获得更多和更好的解, Deb 等在 2002 年提出了 NSGA-II 算法^[16]。相对于 NSGA 算法, NSGA-II 算法降低了算法运算复杂度, 采用精英策略, 优化效果更好。

3.2 算法设计

3.2.1 编码与解码

由于调度问题是离散型的, 因此本文需要对伤员救治步骤和处理伤员的医生资源进行编码。例如: 针对医生资源编码 [2 4 6 6 3 4 2], 编码中数字出现的次数表示在该调度过程中医生的开工次数, 如 6 出现了两次表明 6 号医生在该调度过程中参与了两次救治步骤。

针对患者救治流程编码, 将每一个手术步骤中伤员的救治时间使用矩阵进行存储, X_{ij} 表示伤员 i 的第 j 个处理步骤, 在矩阵中所有非 0 元素对应的位置对应每个伤员救治需要经过的步骤。例如: 患者编码为 $\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$, X_{21} 位置的数字为 1, 表示第二个患者的第一个处理步骤; X_{31} 位置的数字为 0, 代表第三个患者救治不需要经过第一个步骤。

3.2.2 个体的适应度的确定

通用计算非支配排序和个体的拥挤距离可以确

定个体适应度。对每个个体的目标函数求解, 确定非支配等级, 从而求得最优解集。个体拥挤距离的计算方法, 公式(8):

$$iD = \sum_{k=1}^n \frac{|f_{k(i+1)} - f_{k(i-1)}|}{f_{kmax} - f_{kmin}} \quad (8)$$

其中, n 表示的是目标个数; $i + 1, i - 1$ 表示与个体 i 相邻的两个个体; f_{kmax}, f_{kmin} 表示目标函数 f_k 的最大值和最小值。

3.2.3 算法主要步骤

算法流程图如图 2 所示。

第 1 步 设计编码方式和初始化种群 $P(0) = (X_1, X_2, \dots, X_n)$, 其中 n 是种群的大小, 初始代数为 $gen = 0$;

第 2 步 非支配排序后通过遗传算法的选择、交叉、变异 3 个基本操作得到第一代子种群 $Q(0)$;

第 3 步 从第二代开始将父代种群 $P(0)$ 与子代种群 $Q(0)$ 合并, 此时种群规模变为 $2n$, 进行快速非支配排序, 同时根据公式(8)对每个非支配层中的个体进行拥挤度计算;

第 4 步 实行精英保留策略, 合并父代种群以及子代种群;

第 5 步 再次求出非支配排序等级以及拥挤距离;

第 6 步 新种群通过精英保留产生;

第 7 步 根据迭代步数判断, 假如达到则终止, 假如未达到, 转入第 3 步;

第 8 步 符合终止条件则输出最终结果结束。

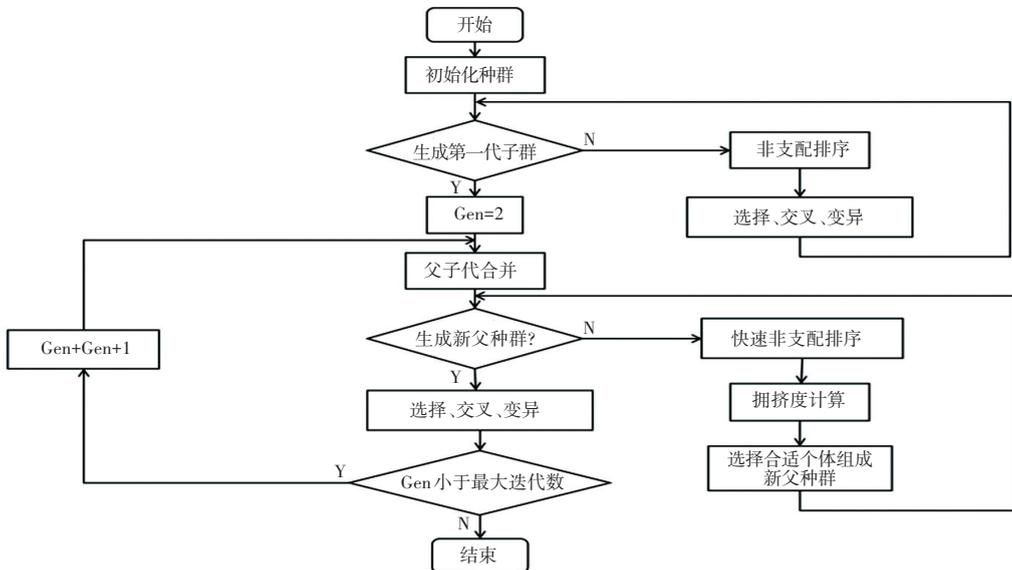


图 2 算法流程图

Fig. 2 Algorithm flowchart

4 实验与结果

4.1 实验背景

假设某地突发地震后,共有12名伤员,分别为 $D_1, D_2 \dots D_{12}$ 送达A医院。伤势情况:2名轻型、6名中型、4名危重,该医院可参与救治的医生共有40位。每位伤员的应急手术流程步骤总数为5种:术前:S1 应急处理, S2 麻醉;术中:S3 手术;术后:S4

重症监护病房观察, S5 普通病房观察。不同伤势的患者需要的处理步骤不完全相同。从理论和实际统计数据来看,手术流程第一阶段麻醉根据医师和伤员个人情况不同,麻醉时间相差1~2 min。本算例中每个伤员在3个手术阶段的所需时间由历史经验确定,手术流程中各步骤最短时间需求见表1,单位时间救援成本见表2,各步骤的医生能力水平值见表3。

表1 手术流程中各步骤最短时间需求

Table 1 Minimum time requirements for each step in the surgical procedure (min)

手术阶段	手术流程	伤员编号											
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12
P1	S1	2	4	-	-	4	2	3	-	3	-	4	-
	S2	5	3	3	4	-	-	5	3	3	4	-	4
P2	S3	40	80	95	60	30	42	96	92	100	122	20	76
P3	S4	-	40	35	-	-	-	30	36	50	45	-	-
	S5	10	-	-	8	5	7	-	-	-	-	12	3

表2 单位时间救援成本

Table 2 Rescue cost per unit time

医生序号	单位时间内救治成本/(元/分钟)										
1~10	8	6	10	12	70	15	10	6	9	8	
11~20	7	8	11	12	7	10	13	9	10	9	
21~30	10	7	9	9	8	15	12	12	9	8	
31~40	9	10	12	10	8	8	10	13	9	10	

表3 各步骤的医生能力水平值

Table 3 Level of doctors' ability in each step

步骤	医生序号	医生初始水平值
S1	1,3,5,6,8,9,10,12,16,18,21,22,37	0.8,1,0.6,0.8,0.7,0.5,0.7,0.9,0.8,0.9,0.7,0.6,0.8
S2	2,4,5,6,7,8,9,11,13,16,20,21,25,27,28,29,30,31,33	0.6,0.7,0.8,0.8,0.8,1,0.9,0.8,0.6,0.7,0.8,0.5,0.7,0.6,0.7,0.8,0.5,0.6,0.8
S3	3,6,25,26,28,32,34,35,36,37,38,39	0.8,0.7,0.8,1,0.7,0.6,0.5,0.8,0.7,0.9,0.8,0.8,1
S4	14,15,16,17,18,19,20,23,24,25,40	0.5,0.7,0.6,0.9,0.8,1,0.8,0.8,0.8,0.6,0.8
S5	2,3,4,5,7,8,9,10,13,15,16,18,22,30,31,35,37	0.9,0.7,0.8,0.8,0.9,1,0.9,0.8,1,0.9,0.8,0.5,0.7,1,0.7,1,0.8

4.2 实验结果

实验的运行环境为 Inter (R) Core (TM) i5-8250U CPU,主频 1.8 GHz, Win10 64 位操作系统,仿真软件为 Matlab2022a。

本文的目标函数是最小化伤员的最大应急手术救援时间(f_1),最小化手术室救援成本(f_2),将带

有学习因子的调度模型与传统的手术调度模型进行对比实验。为了保证结果的可靠性,分别对两组实验独立运行并设置算法的总迭代次数为100次,交叉概率取0.7,变异概率取0.3,前20组帕累托解结果见表4。

表 4 模型运行结果对比

Table 4 Comparison of results from different models

序号	无学习率		学习率为 0.93	
	f_1	f_2	f_1	f_2
1	137.1	12 149.3	137.1	7 985.1
2	818.9	9 674.8	548.9	3 780.2
3	170.0	11 529.1	504.4	3 800.2
4	143.8	11 776.8	167.5	6 177.9
5	730.0	9 749.3	182.5	6 000.7
6	151.0	11 692.4	428.8	3 905.0
7	186.0	11 241.2	368.9	4 295.8
8	360.0	10 347.9	143.8	7 383.8
9	245.0	10 759.7	162.0	6 704.7
10	796.7	9 722.1	195.0	5 549.2
11	200.0	11 127.7	140.0	7 689.1
12	460.0	10 034.8	252.5	4 948.0
13	487.8	9 991.5	326.3	4 301.8
14	272.5	10 629.4	238.8	5 273.1
15	650.0	9 829.3	288.8	4 670.9
16	441.1	10 108.2	403.8	4 007.4
17	385.6	10 256.2	151.0	7 103.2
18	321.1	10 495.1	207.5	5 414.8
19	521.1	9 987.6	235.6	5 355.7
20	422.5	10 145.1	266.3	4 729.9
平均值	395.0	10 562.4	267.5	5 453.8

由模型结果对比可知,学习效应的存在确实会影响优化目标值。针对目标函数 f_1 ,救援时间平均值由 395 降至 267.5,缩短了约 32.3%;针对目标函数 f_2 ,救治成本由 10 562.4 降至 5 453.8,下降了约 48.4%。

受医生手术累积经验、应急手术资源、医疗团队的配合程度等限制,会产生不同的学习率。当学习率取 0.99,0.97,0.95,0.93 时,模型运行 20 次后的实验结果见表 5。由表 5 可知,随着学习率的递减,手术总流程时间和手术总成本都呈现下降的趋势。

算法迭代过程中的帕累托最优解示意图如图 3 所示。由图 3 可知,帕累托可行解分散均匀,证明不同学习率下帕累托最优解的有效性。

没有考虑学习率以及学习率为 0.99、0.97、0.95、0.93 时最小化手术完成时间的收敛曲线如图 4 所示,横坐标表示迭代次数,纵坐标表示目标函数的变化。由图 4 可知学习率对模型的收敛状态影响较大。

表 5 不同学习率下的实验结果

Table 5 Experimental results under different learning rates

序号	学习率为 0.99		学习率为 0.97		学习率为 0.95		学习率为 0.93	
	f_1	f_2	f_1	f_2	f_1	f_2	f_1	f_2
平均值	396.5	9 053.2	259.6	7 683.0	255.5	6 523.2	267.5	5 453.8

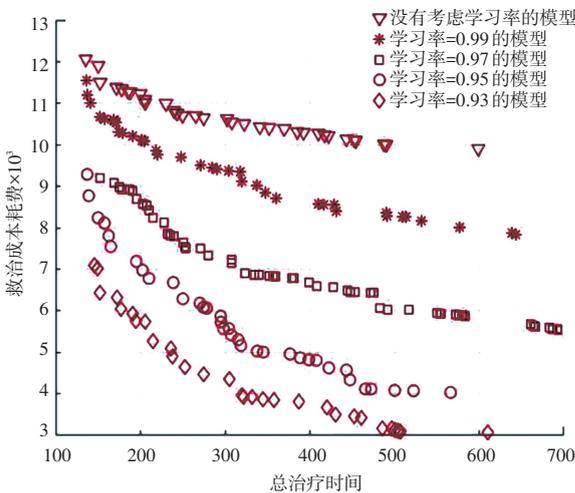


图 3 Pareto 最优解示意图

Fig. 3 Schematic diagram of Pareto optimal solution

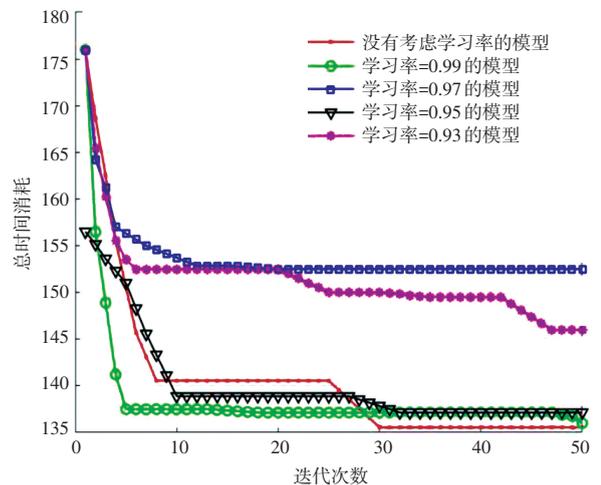


图 4 收敛曲线图

Fig. 4 Convergence curve

5 结束语

本文从医生、患者、医院3种角度出发,以最小化手术流程总时间和手术室救援总成本为目标,建立了多目标优化下的应急手术室调度模型,利用带有精英策略的非支配遗传算法对模型求解。考虑了不同医生的能力水平以及工作中存在的学习效应,构建了带有学习效应的伤员应急手术调度模型,并进一步分析了改进模型方案的收敛性和灵敏度。未来可进一步考虑不确定因素对资源的扰动,针对性地探索资源中断等问题,进行不确定背景下的手术调度研究。

参考文献

- [1] 张强,李灵,王嘉凌. 从手术室管理看医院精细化运营[J]. 中国卫生,2022(7):53-54.
- [2] 王舒,韩锋. 精益管理在医院手术室管理中的应用性探析[J]. 济宁医学院学报,2012,35(2):131-133.
- [3] MAGERLEIN J M, MARTIN J B. Surgical demand scheduling: A review[J]. Health Services Research, 1978, 13(4): 418.
- [4] BLAKE J T, CARTER M W. Surgical process scheduling: A structured review[J]. Journal of the Society for Health Systems, 1997, 5(3): 17-30.
- [5] MCINTOSH C, DEXTER F, EPSTEIN R H. The impact of service-specific staffing, case scheduling, turnovers, and first-case starts on anesthesia group and operating room productivity: a tutorial using data from an Australian hospital[J]. Anesthesia and Analgesia, 2006, 103(6): 1499-1516.
- [6] MOBASHER A, LIM G, BARD J F, et al. Daily scheduling of nurses in operating suites [J]. IIE Transactions on Healthcare Systems Engineering, 2011, 1(4): 232-246.
- [7] MIN D, YIH Y. An elective surgery scheduling problem considering patient priority [J]. Computers & Operations Research, 2010, 37(6): 1091-1099.
- [8] AMJAD M K, IKRAMULLAH B S, RUBEENA K, et al. Recent research trends in genetic algorithm based flexible job shop scheduling problems [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018(2018): 9270802.
- [9] 景志强,王兆辉,高琦. 混合NSGA-II算法求解多目标柔性作业车间调度问题[J]. 组合机床与自动化加工技术,2019(7):138-140.
- [10] 郝志刚. 考虑医患满意度和手术成本的日手术排程方法[J]. 工业工程,2017,20(4):49-56,71.
- [11] 朱悦,玉林,宋攸珊. 考虑手术间及医疗团队间准备时间的手术排程[J]. 东南大学学报(自然科学版),2015,45(6):1218-1222.
- [12] BI X, WANG C. An improved NSGA-III algorithm based on elimination operator for many-objective optimization [J]. Memetic Computing, 2017, 9: 361-383.
- [13] Biskup D. Single-machine scheduling with learning considerations [J]. European Journal of Operational Research, 1999, 115(1): 173-178.
- [14] CHENG T C E, WANG G. Single machine scheduling with learning effect considerations [J]. Annals of Operations Research, 2000, 98: 273-290.
- [15] 吴秀丽,崔琪. 考虑可再生能源的多目标柔性流水车间调度问题[J]. 计算机集成制造系统,2018,24(11):2792-2807.
- [16] KALYANMOY D. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.