

考虑多因素条件下的择期手术排程约束规划模型

孟凡睿 陈淮莉

(上海海事大学物流科学与工程研究院 上海 201306)

摘要 在手术排程问题涉及到的众多影响因素中,综合考虑术中和术后两个阶段。从手术优先级、依赖于手术序列的术间准备时间,以及医生资源的有限性和术后麻醉恢复床位的有限性 4 方面对手术室成本进行优化。寻求最优的手术与手术室以及麻醉恢复床位的分配方法和手术顺序以降低手术室的超时占用时间。在合理假设的基础上,建立择期手术排程问题的约束规划模型,并在 ILOG CPLEX 中通过算例对模型的有效性进行了验证。应用结果表明,利用约束规划模型解决择期手术排程问题是合理可行的。

关键词 择期手术排程 术间准备时间 麻醉恢复床位 手术室成本 约束规划算法 CP 求解器

中图分类号 TP3

文献标识码 A

DOI:10.3969/j.issn.1000-386x.2018.12.016

CONSTRAINT PROGRAMMING MODEL FOR ELECTIVE OPERATION SCHEDULING BASED ON MULTIPLE FACTORS

Meng Fanrui Chen Huaili

(Institute of Logistics Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract Among a lot of influencing factors involved in the operation scheduling problem, we considered two phases of during the operation and after the operation. We optimized the costs of operation rooms from four aspects which were priorities, setup time that depended on the sequence, limited doctors and limited anesthesia beds. We searched for the optimal allocation method and operation sequence of operation room and anesthesia bed so as to decrease the overtime of operation room. Based on the reasonable hypothesis, constraint programming model for elective operations scheduling problem was constructed. The validity of the model was proved by numerical examples in ILOG CPLEX. The result shows that it is reasonable and feasible to use the constraint programming model to solve the elective operations scheduling.

Keywords Elective operation scheduling Setup time Anesthesia beds Operation room cost Constraint programming
Constraint programming solver

0 引言

医疗卫生行业的发展在我国一直是社会关注的焦点。尽管医疗体制改革正在日益深化,但是人口基数大与人口老龄化现象逐渐加剧的社会现状,仍旧造成了社会医疗资源严重紧缺的问题。手术室作为医院资源存在最为密集的地方,其投入资金占医院财政支出的 10%^[1],利润占医院总盈利的 40%^[2]。据不完全统计,手术的进行会关系到医院 70% 的部门^[3]。因此,

对手术室的合理利用可以有效地提高资源利用率,从而降低医院的运营成本。

择期手术排程,即在一个排程周期内对已知将要进行的手术在有限的手术室及医护人员等资源下进行合理安排。几十年来,诸多学者从多种角度对该问题进行了研究。文献[4]首先提出将手术排程分为前期计划和分配排程,前期计划即为确定某台手术的手术日期,而分配排程则是就某一天的所有手术进行排序,即确定手术的开始时间。文献[5]将待手术的患者按病情严重程度划分为不同的优先级,在考虑医护人员

加班和手术延期的双重成本下进行择期手术日期指派,并依照优先级进行手术。文献[6]在模型中考虑了术前准备时间及术后清洁时间,使模型更贴近实际手术流程。文献[7]将不同技术类别的医护人员,如麻醉师、医生、护士组成一个手术小组,在手术室优化与调度的同时完成了医护人员的调度。文献[8]基于防止医护人员因过劳而造成医疗事故,引入了休息日等限制条件,使得手术排程更人性化。文献[9]在考虑医护人员和医疗器械的资源限制下,研究了多手术室调度问题,建立了最大化患者满意度和最小化医院运作成本的多目标数学模型。

在解决问题的方法上,文献[10]在 MIP 模型中利用 0-1 变量确定某一天内的手术和手术室的匹配情况。文献[11]开发了改进的遗传算法,目标是提医疗器械的使用效率,减少患者的等待时间。文献[12]采用蒙特卡洛模拟来评估手术顺序在诸多方面产生的影响,并基于此提出了一种“按手术时长分类排程”的方法,并采用蒙特卡洛模拟,取得了较好的研究成果。文献[13]将手术排程抽象为柔性车间调度问题,建立了两阶段随机规划模型,并先后开发了遗传算法和启发式决策规则以求解手术开始时间和麻醉复苏床位的使用时间。文献[14-15]利用不同的改进遗传算法分别对医患满意度和手术室利用效率进行了优化。

针对这一典型 NP-hard 问题,前人多是考虑单一手术阶段且利用遗传算法等智能算法来解决。本文将综合考虑上述多种影响因素,采用约束规划模型和 IL-OG CPLEX 中的 CP 求解器,对手术及手术室的匹配,手术与麻醉恢复床位的匹配,以及单一手术室内的手术顺序进行决策,以实现手术室的高效利用。

1 问题描述与假设

1.1 问题描述

本文综合考虑手术和术后观察两个阶段。对于手术室而言,手术阶段又包括术前准备、手术执行以及术后清洁。以一个工作日为排程周期,对单日内开放的所有手术室和麻醉恢复室床位与预先确定的待执行手术进行匹配。所有手术室为有差别资源,由于配备的医疗器械类型不同等,可接纳的手术类型也不同。同时手术的分配还受执刀医生的影响,执刀医生不能同时进行两台以上的手术。在手术与手术室的匹配确定之后,对单一手术室内将进行的所有手术进行排序,根据手术类型的不同,两台连续进行的手术之间存在时长不等的准备时间。根据实际医院对手术的管理规

定,手术的执行具有优先级,对于择期手术而言,时间较长,难度较大的手术具有高优先级,对手术室造成的污染程度最高的手术具有最低的优先级,高龄和低龄患者的手术具有较高优先级。在术后阶段,大部分全身麻醉或术后未能达到意识恢复标准的患者需要在麻醉恢复室(PACU)进行生命体征的观察。国内大型医院的麻醉恢复床位数量约为手术台数量的一半,因此只有 PACU 有空余床位时,患者才可以被转送去 PACU,否则要在手术室滞留,直至有空余麻醉恢复床位。每台手术的两阶段手术流程如图 1 所示。如果手术安排不合理,就会导致手术室和麻醉恢复床位利用率低。

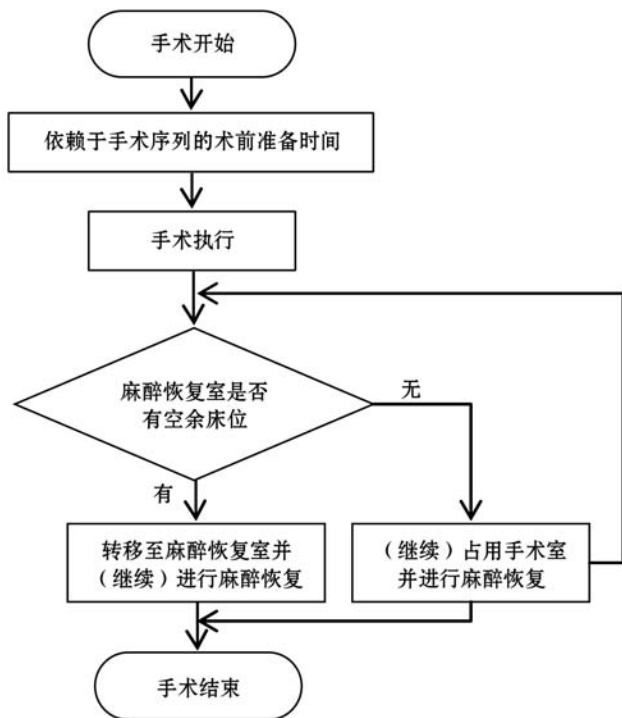


图1 每台手术的两阶段手术流程

1.2 问题假设

本文做如下假设:

(1) 在择期手术中,不考虑耗时过长的科室联合大型手术。

(2) 手术一旦开始,就不再中断。

(3) 待排手术的手术时长和麻醉恢复时长是通过经验丰富的医生和护士长的判断预先确定的,在排程中不考虑现实手术过程和麻醉恢复过程中的不可控因素。

(4) 对手术时长的预估已将术后清洁时间包括在内,且术前准备时间根据医院历史数据,假设两台接台手术为同类型时,准备时间为 15 min,否则为 30 min。

(5) 手术所需的所有医护人员和器械资源都是充足的并且能够准时到位,同时病人也具备能够按时进

行手术的条件。

(6) 每个手术室排成日内的第一台手术的术前准备时间不予考虑。

其中假设(1)避免了大型手术可能会占用手术室时间过长,导致该手术室无法安排其他手术。

2 约束规划排程模型

2.1 约束规划与模型特征

约束规划是专门用来解决实际优化调度和规划中的有限域约束问题,它是人工智能的重要组成部分。约束规划算法综合了人工智能中一致性算法和启发式搜索算法,将求解问题的重点由算法的设计与实现转向对问题的模型建立,并采用约束推理方法,很好地解决了约束条件多,搜索时间长的问题。

本文所建立的 CP 模型是利用 IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12.2 平台中自带的 OPL 语言实现的。其优势在于 OPL 语言针对排程调度问题提出了区间变量和区间序列变量的概念,作为决策变量,区间变量表示一项任务或活动,具有起点、终点和过程长度等内在属性。在本文中,手术、手术室以及麻醉恢复床位均为区间变量,具有开始时间、结束时间和时长等属性。

2.2 模型构建

2.2.1 参数设定

O_i 为所有已知待排手术, $i = 1 \cdots I$;

R_j 为所有开放的待排手术的手术室, $j = 1 \cdots J$;

B_a 为所有待安排术后患者的麻醉恢复床位, $a = 1 \cdots A$;

D_k 为所有待排手术的执刀医生, $k = 1 \cdots K$;

T_i 为手术 i 的手术过程持续时间, $i = 1 \cdots I$;

AT_i 为手术 i 的患者麻醉恢复持续时间, $i = 1 \cdots I$;

P_j 为手术室 j 的正常开放时长, $j = 1 \cdots J$;

S 根据两台接台手术的不同类型所产生的术间准备时间集合;

$Qualified_i$ 为可执行手术 i 的手术室集合, $i = 1 \cdots I$;

OD_i 为每台手术 i 对应的执刀医生集合, $i = 1 \cdots I$ 。

2.2.2 定义决策变量

定义区间变量如下:

① o_i 表示任务集合中在手术室执行的手术 i 。

在 OPL 语言中,该区间变量定义为:

$$\text{dvar interval } o[i \text{ in } O_i] \text{ size } T[i]$$

其中 size 定义了第 i 个区间变量的值。

② an_i 表示任务集合中在麻醉恢复室进行观察恢复的手术 i 。在 OPL 语言中,该区间变量定义为:

$$\text{dvar interval } o[i \text{ in } O_i] \text{ size } AT[i]$$

③ $room_j$ 表示任务集合中待安排手术的手术室 j 。

④ bed_a 表示任务集合中待安排术后患者的麻醉恢复床位 a 。

⑤ OR_{ij} 为二维区间变量,表示任务执行手术 i 的手术室 j 的时间窗口。在 OPL 语言中,该二维区间变量定义为:

$$\text{dvar interval } OR[i \text{ in } O_i][j \text{ in } R_j] \text{ optional}$$

其中 optional 表示该二维区间变量是一个可选择变量。

⑥ OA_{ia} 为二维区间变量,表示进行了手术 i 的患者进行术后观察的麻醉恢复床位的时间窗口。在 OPL 语言中,该而为变量定义为:

$$\text{dvar interval } OA[i \text{ in } O_i][a \text{ in } B_a] \text{ optional}$$

定义区间序列变量如下:

⑦ Q_j 表示手术室 j 中的手术进行顺序,在 OPL 语言中定义为:

$$\text{dvar sequence } Q[j \text{ in } R_j] \text{ in all}(i \text{ in } O_i) OR[i][j]$$

⑧ A_a 表示麻醉恢复床位 a 上进行术后观察的手术患者的顺序,在 OPL 语言中定义为:

$$\text{dvar sequence } A[a \text{ in } B_a] \text{ in all}(i \text{ in } O_i) OA[i][a]$$

2.2.3 约束条件

① 分配约束:

$$\text{alternative}(O_i, (OR_{i1}, OR_{i2}, \dots, OR_{ij})) \\ \forall i \in O_i, j \in R_i \quad (1)$$

$$\text{alternative}(O_i, (OA_{i1}, OA_{i2}, \dots, OA_{ia})) \\ \forall i \in O_i, a \in B_a \quad (2)$$

在 OPL 语言中利用 alternative 函数定义任务分配的唯一性,约束式(1)表示如果第 i 台手术 o_i 出现在最终的排程调度中,那么执行手术 i 的 j 个手术室 OR_{ij} 中,只能有一个出现在最终排程结果中。同样,约束式(2)表示如果第 i 台手术 O_i 出现在最终的排程调度中,那么用来进行手术 i 术后观察的 a 个麻醉恢复床位 OA_{ia} 中,也只能有一个出现在最终排程结果中。

由于手术室为有差别资源,因此约束式(3)表示手术 o_i 只能在可接纳该手术类型的手术室 $room_j$ 内执行。

$$(room_j \text{ not in } Qualified_i) \Rightarrow OR_{ij} \neq j \\ \forall i \in O_i, j \in R_i \quad (3)$$

由于医生资源有限,因此存在一名医生需要执刀两台以上手术的情况。约束式(4)表示一名医生在同一时刻只能在一个手术室进行一台手术。

$$(OD_i = OD_u = k) \Rightarrow$$

$$\begin{aligned} & (\text{endOf}(o_i) < \text{startOf}(o_u)) \vee \\ & (\text{endOf}(O_i) > \text{startOf}(O_u)) \\ & \forall i, u \in O_i \quad i \neq u, k \in D_k \end{aligned} \quad (4)$$

② 时间约束:

$$\text{span}(\text{room}_j, (OR_{1j}, OR_{2j}, \dots, OR_{ij})) \quad \forall j \in R_j \quad (5)$$

$$\text{span}(\text{bed}_a, (OA_{1a}, OA_{2a}, \dots, OA_{ia})) \quad \forall a \in B_a \quad (6)$$

约束式(5)、式(6)利用 span 函数确保手术室 room_j 的开放时间和麻醉恢复床 bed_a 的总利用时间覆盖所有被分配到该手术室执行的手术 OR_{ij} 和被分配到该麻醉恢复床的手术 OA_{ia} 的总持续时间。

约束式(7)、式(8)利用 noOverlap 函数确保区间序列变量 Q_j 和 A_a 中的手术任务在时间上不重叠,且由于两台连续的手术因手术类型的不同存在时长不等的准备时间,因此在约束式(4)中,约束规划求解器会将相继的两台手术的类型与 S 集中的元组匹配,从而得到相对应的准备时间。

$$\text{noOverlap}(Q_j, S) \quad \forall j \in R_j \quad (7)$$

$$\text{noOverlap}(A_a) \quad \forall a \in B_a \quad (8)$$

③ 顺序约束:

$$\begin{aligned} & \text{endBeforeStart}(OR_{ij}, OR_{uj}) \\ & \forall i, u \in O_i \text{ 且 } i \neq u, j \in R_j \end{aligned} \quad (9)$$

每台手术都具有一定的优先级,约束式(9)利用 endBeforeStart 函数表示在分配到手术室 room_j 的若干台手术中,具有高优先级的手术需要在具有低优先级的手术开始之前完成。

在大型医院,患者从手术室转送到 PACU 进行术后观察的转移时间通常不超过 5 min,因此约束式(10)表示手术 an_i 的术后观察时间在手术 o_i 执行结束后的第 5 min 时开始。

$$\begin{aligned} & \text{endBeforeStart}(OR_{ij}, OA_{ia}, 5) \\ & \forall i \in O_i, j \in R_i, a \in B_a \end{aligned} \quad (10)$$

2.2.4 目标函数

$$\text{Min} \sum_{j=1}^J \max[0, (\text{endOf}(\text{room}_j) - P_j)] \quad (11)$$

目标函数式(11)表示最小化所有手术室的超时占用时间。

3 算例分析

3.1 算例数据

为验证第 2 节提出的约束规划模型的有效性,选取某地方三甲医院的某日待排手术信息,模拟手术排程,确定最优的手术顺序。具体手术相关信息如表 1

所示。在手术排程日内,待排手术列表上共有 40 台手术,该医院共开放 10 间手术室,其中手术持续时长及麻醉恢复持续时长均为医护人员根据手术类型、患者身体情况等预估所得。表 2 为该医院根据手术室配备的不同医疗器械等规定的每间手术室可接纳手术类型,如骨科手术只能在配备 X 光设备的手术室进行。

表 1 待排手术相关信息表

手术编号	患者年龄	手术持续时长/min	执刀医生编号	手术类型编号	污染程度	麻醉恢复持续时长/min
1	43	90	15	8	low	0
2	50	60	1	1	high	60
3	32	60	13	7	high	30
4	78	150	1	1	low	60
5	37	60	6	3	low	0
6	31	60	2	1	medium	0
7	51	120	4	2	low	30
8	67	180	1	1	low	30
9	25	90	6	3	low	0
10	48	180	8	4	low	60
11	29	60	14	7	high	0
12	42	210	10	5	low	60
13	23	90	15	8	low	0
14	46	90	4	2	medium	30
15	18	90	12	6	medium	30
16	47	180	5	2	medium	60
17	48	180	9	4	low	60
18	64	180	11	5	low	30
19	38	90	12	6	high	30
20	36	90	2	1	low	30
21	64	210	10	5	low	30
22	43	60	5	2	medium	30
23	62	120	14	7	low	30
24	40	90	7	3	low	30
25	72	210	8	4	low	30
26	29	90	4	2	low	30
27	6	150	18	9	medium	30
28	25	60	1	1	high	0
29	44	120	6	3	low	60
30	24	60	16	8	low	0
31	42	120	12	6	low	30
32	50	180	3	1	low	60

续表 1

手术编号	患者年龄	手术持续时长/min	执刀医生编号	手术类型编号	污染程度	麻醉恢复持续时长/min
33	71	180	2	1	low	60
34	29	90	2	1	medium	0
35	34	60	13	7	medium	0
36	13	180	18	9	low	30
37	7	180	17	9	low	30
38	10	180	17	9	low	30
39	48	60	7	3	low	30
40	62	150	3	1	low	60

表 2 待排手术室可执行手术类型

手术室编号	手术室可接纳手术类型
1	1 2 3 4 5 6 7
2	1 2 6 7
3	1 3 4 6
4	1 2 4 5 6 7 9
5	1 2 4 5 6 7 9
6	1 2 4 5 6 7 9
7	1 2 4 5 7 8
8	1 4 5 8 9
9	1
10	1 2 4 5 6 7 8 9

3.2 运算结果

本节报告数值实验结果,将约束规划模型用 IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12.2 中的 OPL 语言实现,并用 CP 求解器求解。测试硬件平台为 Intel Core i3-2370M, 2.40 GHz CPU, 4 GB 内存。通过改变默认参数设置及搜索策略,提高 CP 求解器的求解效率,IL-OG OPL 语言提供了丰富的变量启发式及值启发式搜索策略,包括搜索阶段的设定、变量或值的选择器等。其中,搜索阶段可以令 CP 求解器优先搜索某一区间变量。我们在 CP 求解器中尝试了几种不同的搜索次序,最终发现先固定 operation 区间变量数组,再固定 room 区间变量数组,能够有效地提升 CP 求解器的求解效率。搜索阶段在用 OPL 定义如下:

cp. setSearchPhases

(f. searchPhase(o), f. searchPhase(room))

所有手术室正常开放时间均为 8 小时,以 8 点作为 0 时刻,16 点作为 480 时刻,超过 480 时刻的使用时间均算作超时占用。在允许最大失败 100 000 次的条件下,编程求解后得到最优解。对应目标函数最小值

为 826,CP 求解器求解速度如图 2 所示。可见 CP 求解器收敛速度快,在求解大规模排程问题时,能够在较短的时间内求得问题的最优解。除 6 号手术室外,其余 9 间手术室存在超时占用时间,在最优解的情况下,手术与手术室和手术与麻醉恢复床位排程方案的甘特图如图 3 和图 4 所示。其中图 3 中斜线图案填充部分表示由于没有空闲的麻醉恢复床位,第 15 台和第 33 台手术只能分别在手术室占用 15 min 和 30 min 来进行术后观察,待有空余床位或麻醉结束后再移送麻醉恢复室或结束麻醉恢复。在寻求得到的排程方案下,麻醉恢复床位利用率如表 3 所示。

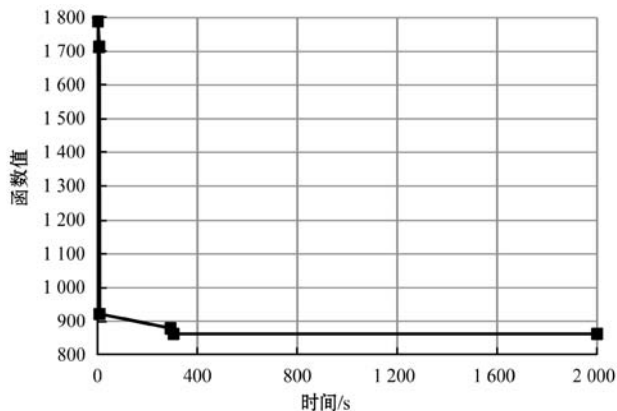


图 2 CP 求解器求解速度

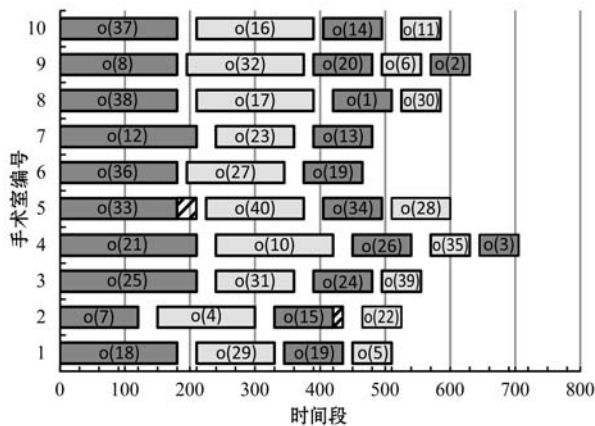


图 3 手术室排程方案甘特图

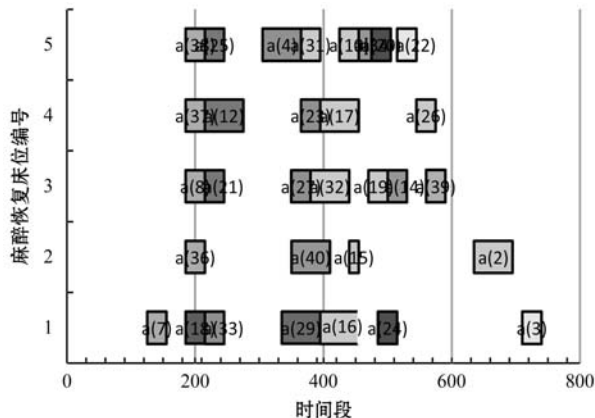


图 4 麻醉恢复室排程方案甘特图

表3 麻醉恢复床位利用率

麻醉恢复床位编号	开始占用时间	结束占用时间	占用时长	麻醉恢复床位利用率
1	125	740	270	43.90%
2	185	695	165	32.35%
3	185	590	240	59.26%
4	185	575	210	53.85%
5	185	545	260	72.22%

3.3 对比分析

由于实际手术过程中的不确定性,实际手术时长与预估手术时长存在或大或小的差异。对于大小不同的差异,文献[16]研究发现 T'_i 与 T_i 存在一种数学关系,令 T_i 乘以一个随机数 r , r 分别服从正态分布 $N(1, 0.15)$ 、 $N(1, 0.25)$ 、 $N(1, 0.5)$, 即可得到与预估手术时长 T'_i 的差异分别为小、中、大的实际手术时长 T'_i 。我们运用上述方法,根据3.1节中医护人员对40台手术的预估时长得到它们的实际时长。在三种不同程度变化差异情况下分别产生10组对比数据,共30组对应的最优目标函数值如表4所示。由实际手术时长得到的最优目标值与由预估手术时长得到的最优目标值计算得出相对变化百分比,再分别得出三种不同变化规模差异下10组数据的平均变化百分比。所得结果均在10%的变化差异以内。可见,约束规划模型可以有效地解决该实际排程问题。

表4 不同规模差异情况下最优目标值对比

对比组编号	小规模差异情况		中等规模差异情况		大规模差异情况	
	最优目标值	相对变化百分比	最优目标值	相对变化百分比	最优目标值	相对变化百分比
1	760	-7.99%	751	-9.08%	953	15.38%
2	863	4.48%	770	-6.78%	1 032	24.94%
3	751	-9.08%	832	0.73%	716	-13.32%
4	982	18.89%	953	15.38%	213	-74.21%
5	770	-6.78%	1013	22.64%	858	3.87%
6	832	0.73%	712	-13.80%	431	-47.82%
7	882	6.78%	1072	29.78%	830	0.48%
8	918	11.14%	901	9.08%	699	-15.38%
9	1 218	47.46%	944	14.29%	1 123	35.96%
10	732	-11.38%	877	6.17%	695	-15.86%
平均变化百分比	-	5.42%	-	6.84%	-	-8.60%

4 结 语

手术室的成本对于医院的运营起着至关重要的作用。本文以最小化手术室超时占用时间为目标,降本升效,充分考虑手术的术中和术后两个阶段,以及手术优先级、依赖于手术序列的术间准备时间、医生资源的有限性和手术室资源的差异性,建立了约束规划排程模型。利用 CPLEX 的 CP 求解器对模型进行求解,通过对算例的求解分析,验证了约束规划模型对于解决排程问题的可行性与高效性。但是在现实医院的手术排程过程中,存在着更多的潜在约束条件和诸多不确定性因素,因此,日后可就此做更深入的研究。

参 考 文 献

- [1] Aida J, Atidel B, Hadj A. Operating rooms scheduling[J]. International Journal of Production Economics, 2006, 99: 52-62.
- [2] Bowers J, Mould G. Ambulatory care and orthopaedic capacity planning[J]. Health Care Management, 2005, 8(1): 41-47.
- [3] 罗利, 石应康. 医疗服务资源调度优化理论、方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [4] Magerlein J M, Martin J B. Surgical demand scheduling: a review[J]. Health Services Research, 1978, 13(4): 418-433.
- [5] Daiki M, Yuehwern Y. An elective surgery scheduling problem considering patient priority[J]. Computers & Operations Research, 2010, 37(6): 1091-1099.
- [6] Lamiri M, Xie X, Dolgui A. A stochastic model for operating room planning with elective and emergency demand for surgery[J]. European Journal of Operational Research, 2008, 185(3): 1026-1037.
- [7] Kharraja S, Albert P, Chaabane S. Block scheduling: Toward a master surgical schedule[J]. 2006 International Conference on Service Systems and Service Management, 2006, 1/2: 429-435.
- [8] Wang Y, Tang J, Qu G. A genetic algorithm for solving patient-priority-based elective surgery scheduling problem[J]. Springer Berlin Heidelberg, 2010, 6329: 297-304.
- [9] Velásquez R, Melo M T. A Set Packing Approach for Scheduling Elective Surgical Procedures[C]//Operations Research Proceedings 2005, Selected Papers of the International Conference of the German Operations Research Society. DBLP, 2006: 425-430.
- [10] Marques I, Captivo M E, Pato M V. An integer programming approach to elective surgery scheduling[J]. Or Spec-

- trum, 2012, 34(2):407-427.
- [11] Chien C, Tseng F, Chen C. An evolutionary approach to rehabilitation patient scheduling: a case study[J]. *European Journal of Operational Research*, 2008, 189(3):1234-1253.
- [12] Lebowitz P. Schedule the short procedure first to improve or efficiency[J]. *Aorn Journal*, 2003, 78(4):651-654.
- [13] Lee S, Yih Y. Reducing patient-flow delays in surgical suites through determining start-times of surgical cases[J]. *European Journal of Operational Research*, 2014, 238(2):620-629.
- [14] 郝志刚. 考虑医患满意度和手术成本的手术排程方法[J]. *工业工程*, 2017, 20(4):49-71.
- [15] 刘洪伟, 张天奕, 许丹. 多科室择期手术日排程与医生指派研究[J]. *工业工程与管理*, 2016, 21(6):10-16.
- [16] Hsu V N, Matta R D, Lee C Y. Scheduling patients in an ambulatory surgical center[J]. *Naval Research Logistics*, 2003, 50(3):218-238.
- ~~~~~
- (上接第 6 页)
- [10] 曹东岩. 基于强化学习的开放领域聊天机器人对话生成算法[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2017.
- [11] 孙冰. 微软“小冰”的爆红与暴毙[J]. *中国经济周刊*, 2014(22):64-65.
- [12] 李伶俐. 一种基于 MFCC 和 SVM 的语音识别方法[J]. *软件导刊*, 2012, 11(3):153-154.
- [13] 元传伟. 基于 Bot Framework 的高职自主学习智能平台[J]. *濮阳职业技术学院学报*, 2017, 30(3):66-68.
- [14] Jurafsky D, Martin J H. *Speech and language processing* [M]. 2nd ed. Prentice-Hall, Inc. 2009.
- [15] 冯升. 聊天机器人系统的对话理解研究与开发[D]. 北京:北京邮电大学, 2014.
- [16] 夏天, 樊孝忠, 刘林. ALICE 机理分析与应用研究[J]. *计算机应用*, 2003, 23(9):1-5.
- [17] Zhang H, Kishore R, Sharman R, et al. Agile Integration Modeling Language (AIML): A conceptual modeling grammar for agile integrative business information systems[J]. *Decision Support Systems*, 2008, 44(1):266-284.
- [18] 李臻贤. 中文问答系统知识库的自动构建问题研究[D]. 济南:山东财经大学, 2015.
- [19] Sutskever I, Vinyals O, Le Q V. Sequence to sequence learning with neural networks[C]//*Proceedings of Advances in neural information processing systems*. 2014: 3104-3112.
- [20] Cho K, Merriënboer B V, Gulcehre C, et al. Learning phrase representations using RNN Encoder-Decoder for statistical machine translation[EB]. arXiv preprint arXiv:1406.1078, 2014.
- [21] Vinyals O, Le Q. A neural conversational model[EB]. arXiv preprint arXiv:1506.05869, 2015.
- [22] Rumelhart D E, Hinton G E, Williams R J. Learning representations by back-propagating errors[J]. *Nature*, 1986, 323:533-536.
- [23] Hochreiter S, Schmidhuber J. Long short-term memory[J]. *Neural Computation*, 1997, 9(8):1735-1780.
- [24] Cho K, Merriënboer B V, Bahdanau D, et al. On the properties of neural machine translation: Encoder-Decoder approaches[EB]. arXiv preprint arXiv:1409.1259, 2014.
- [25] Williams J, Raux A, Ramachandran D, et al. The dialog state tracking challenge[C]//*Proceedings of the SIGDIAL 2013 Conference*. 2013:404-413.
- [26] Henderson M, Thomson B, Williams J D. The second dialog state tracking challenge[C]//*Proceedings of the 15th Annual Meeting of the Special Interest Group on Discourse and Dialogue (SIGDIAL)*. 2014:263-272.
- [27] Henderson M, Thomson B, Williams J D. The third dialog state tracking challenge[C]//*Proceedings of IEEE Spoken Language Technology Workshop (SLT)*. IEEE, 2014:324-329.
- [28] Kim S, D'Haro L F, Banchs R E, et al. The fourth dialog state tracking challenge[C]//*Proceedings of the 7th International Workshop on Spoken Dialogue Systems (IWSDS)*. 2016:1-14.
- [29] Kim S, D'Haro L F, Banchs R E, et al. The fifth dialog state tracking challenge[C]//*Proceedings of Spoken Language Technology Workshop*. IEEE, 2016:511-517.
- [30] 吴友政, 赵军, 段湘煜, 等. 构建汉语问答系统评测平台[C]//*第一届全国信息检索与内容安全学术会议*. 2004: 315-323.
- [31] 王东升, 王卫民, 王石, 等. 面向限定领域问答系统的自然语言理解方法综述[J]. *计算机科学*, 2017, 44(8):1-8.
- [32] Voorhees E M, Dang H T. Overview of the TREC 2005 question answering track[C]//*Proceedings of the Fourteenth Text REtrieval Conference (TREC 2005)*. New York, 2005: 1-15.
- [33] 王恒. 中文问答系统的研究与实现[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2008.
- [34] Noguera E, Llopis F, Ferrandez A, et al. Evaluation of Open-Domain Question Answering systems within a time constraint[C]//*International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops*. IEEE Computer Society, 2007:260-265.
- [35] 王正华. 自动问答系统的研究与实现[D]. 绵阳:西南科技大学, 2015.
- [36] 夏斌. 聊天机器人会成“键盘终结者”吗[N]. *解放日报*, 2016-08-01(12).