

《考虑交通时间与设备转换时间的跨区域就医调度优化问题》 (中国管理科学)

第 29 卷 第 9 期
2021 年 9 月

中国管理科学
Chinese Journal of Management Science

Vol 29, No 9
September, 2021

文章编号:1003-207(2021)09-0180-08

DOI:10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2020.2386

考虑交通时间与设备转换时间的跨区域 就医调度优化问题

刘伟波,张皓悦,张江华

(山东大学管理学院,山东 济南 250100)

摘 要:在资源共享时代背景下,跨区域就医可以很好地解决患者日益增长的就医需求与医疗资源紧张的矛盾。本论文以医疗联盟为研究对象,在关键医疗资源共享的前提下,通过患者跨区域就医实现就医诊断延误最小化,以满足患者就医需求。本研究同时考虑了患者跨区域交通时间与基于患者诊断类型的设备转换时间,以最小化患者就医总延迟为目标,分配患者就诊医院及优化患者就诊/检查顺序。针对该问题,论文首次提出以最早交货期原则(EDD rule)为基础,以患者再分配为主导的 EDD-ReAss1 和 EDD-ReAss2 启发式算法,结合局部搜索算法以进一步提高就医调度方案的质量,缩短患者诊断/检查等待时间。实验结果表明,新启发式算法 EDD-ReAss1 和 EDD-ReAss2 算法性能显著好于 EDD, SPT 和 LPT 等调度规则;在较短运算时间内 Swap 局部搜索算法性能最优。

关键词:交通时间;设备准备时间;跨区域就医;调度优化

中图分类号:G632 文献标识码:A

(1) 研究对象

以**磁共振成像设备(MRI)医学检查**为例，研究医疗联盟下的跨区域就医调度优化问题。

(2) 研究问题

在医疗联盟关键医疗资源共享前提下，考虑**患者跨区域交通时间**与**基于患者诊断类型的设备转换时间**，以最小化患者就医总延迟为目标，优化医疗联盟内部 MRI 资源的最大化利用。

(3) 方法论

①提出以最早交货期原则 (EDD rule) 为基础，以患者再分配为主导的**EDD-ReAss 1和EDD-ReAss 2启发式算法**；

②启发式算法结合**局部搜索算法**，进一步提高调度方案的质量，缩短患者诊断 / 检查等待时间。

一、引言

(1) 研究背景

① 当前我国对医疗资源缺乏统一管理，稀缺医疗资源不能被充分利用，造成了**医疗资源供给与患者就医需求不匹配、医疗资源配置不平衡、患者就医排队等待时间长**等问题。

② **如何优化医疗资源配置实现资源共享与高效利用**，正成为资源共享时代下最重要的问题之一，也是当前医疗保健管理面临的突出问题。

一、引言

(2) 相关文献

①提出**跨区域资源共享**是解决资源需不匹配问题的重要途径^[1];

②分析当前医疗资源问题主要聚焦于提高**医护人员、病床、医院内部设备**等医疗资源的利用率;

③提出**医院内部资源利用率的提高**不能很好地解决医疗资源需不匹配的问题, 需要更多关注**不同区域、不同医院的医疗资源共享和系统优化**。

[1]刘征驰, 邹智力, 马滔. 技术赋能、用户规模与共享经济社会福利[J]. 中国管理科学, 2020, 28(1): 222-230.

[2]张晨晓, 祝蕊, 刘海月, 等. 考虑伤员心理状况的应急医疗救护问题研究[J]. 中国管理科学, 2017, 25 (10): 187-196.

二、问题描述

医疗联盟下磁共振成像检查（MRI）的跨区域就医调度优化问题

(1) 建立假设

(1) 医院要求每位患者在进行 MRI 检查之前进行预约就诊；

(2) 每位患者在入院登记时即确定检查类型，该类型影响 MRI 检查设备准备时间；

(3) 由于患者检查项目不同，MRI 设备提供多种类型服务；

(4) 如果 MRI 设备连续进行两种不同类型的检查，则需要额外的设备准备时间；

(5) 为了保证患者尽快就诊检查，每个患者从入院登记开始即设定最迟就诊完成时间，超越该时间则产生就诊延迟；

(6) 每个患者依据就近原则划分归属医院，如果需要跨区域就医则会产生交通时间；

(7) 患者跨区域交通时间由归属医院与就诊医院距离确定。

- ① 患者检查前预约就诊；
- ② MRI 设备提供多种服务；
- ③ 不同服务之间需要设备准备时间；
- ⑤ 设定患者入院登记时确定检查类型；
- ④ 不同的检查最迟就诊完成时间；
- ⑥ 跨区域就医产生交通时间；
- ⑦ 交通时间取决于医院距离。

二、问题描述

(2) 设定变量和约束

患者数量 N ，医院数量 M ，检查类别数量 Q ；

t_j ：患者 j 检查时间；

d_j ：患者 j 检查最迟完工时间；

$S_{i,j}$ ：患者 j 在患者 i 后的检查类型不同时的设备准备时间；

$c_{w,k}$ ：患者从归属医院 w 转到医院 k 的交通时间；

C_p^k ：在 k 医院位置 p 的患者检查完工时间；

T_p^k ：在 k 医院位置 p 的患者就诊延迟时间。

二、问题描述

(2) 设定变量和约束

决策变量 $x_{j,p}^k$ $\begin{cases} x_{j,p}^k = 1, \text{ 患者 } j \text{ 被安排在 } k \text{ 医院位置 } p; \\ x_{j,p}^k = 0, \text{ 患者 } j \text{ 未被安排在 } k \text{ 医院位置 } p; \end{cases}$

决策变量 $y_j^{w,k}$ $\begin{cases} y_j^{w,k} = 1, \text{ 患者 } j \text{ 由归属地医院 } w \text{ 转到医院 } k \text{ 就诊;} \\ y_j^{w,k} = 0, \text{ 患者 } j \text{ 没有由归属地医院 } w \text{ 转到医院 } k \text{ 就诊;} \end{cases}$

二、问题描述

(3) 构建模型

目标函数：患者就诊延迟总时间最小化

$$\text{Min } \sum_{p=1}^N \sum_{k=1}^M T_p^k$$

S.T.

$$\sum_{p=1}^N x_{j,p}^k \leq 1, \forall j, k \quad \text{任一患者只能安排在医院排队序列中一个位置 } p ;$$
$$\sum_{j=1}^N x_{j,p}^k \leq 1, \forall p, k \quad \text{医院排队序列中任一位置只能安排一位患者 } j ;$$
$$\sum_{k=1}^M x_{j,p}^k \leq 1, \forall j, p \quad \text{患者只能被安排在任一医院 } k ;$$
$$\sum_{w=1}^N y_j^{w,k} \leq 1, \forall j, k \quad \text{患者的归属地医院 } w \text{ 唯一} ;$$

二、问题描述

(3) 构建模型

续:

患者检查完成时间 \geq 前一个患者检查完成时间 + 患者检查时间 + 设备准备时间 + 交通时间

$$C_p^k \geq \underline{C_{p-1}^k} + \underline{\sum_{j=1}^N x_{j,p}^k t_j} + \underline{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_{j,p-1}^k x_{j,p}^k S_{i,j}} + \underline{\sum_{j=1}^N \sum_{w=1}^M x_{j,p}^k y_j^{w,k} c_{w,k}}, \quad \forall p \geq 2, k$$

$$C_1^k = \underline{\sum_{j=1}^N x_{j,1}^k t_j} + \underline{\sum_{j=1}^N \sum_{w=1}^M x_{j,1}^k y_j^{w,k} c_{w,k}}, \quad \forall k$$

任意医院一个患者检查完成时间

$$T_p^k \geq C_p^k - \sum_{j=1}^N x_{j,p}^k d_j, \quad \forall p, k$$

患者就诊延迟时间 \geq 检查完成时间 - 检查最迟完工时间

$$T_p^k \geq 0, \quad C_p^k \geq 0, \quad \forall p, k$$

检查完工时间与延迟时间非负性

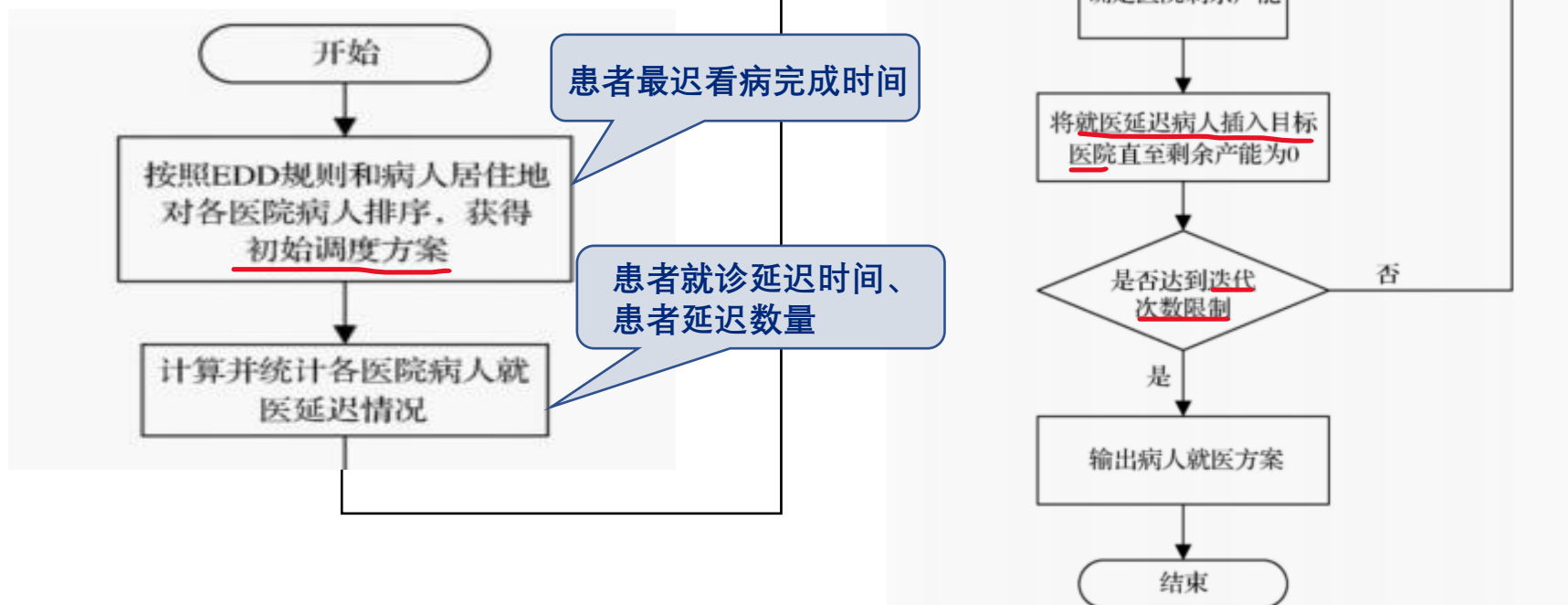
$$S_{i,j} \geq 0, \quad t_i, t_j \geq 0, \quad \forall i, j$$

设备准备时间与患者检查时间非负性

三、启发式算法

(1) EDD - ReAss算法

提出以EDD规则为基础，患者再分配为主的启发式算法；



三、启发式算法

(2) EDD - ReAss与局部搜索算法

【局部搜索算法可以显著增强算法性能^[3]】

三种局部搜索算法：2-Opt、成对交换Swap、Des-Cons算法。

2-Opt算法：随机选择**两个点位的患者**，对该区间内的患者进行**倒序排列**；

成对交换Swap算法：随机选择**两个点位的患者**进行**位置交换**；

Des-Cons算法：从患者排队序列中**随机抽取一定数量患者**，为**每一位患者选择最优位置插入**，直至所有患者被重新安排位置。

[3] Ruiz R, Pan Q K, Naderi B. Iterated Greedy methods for the distributed permutation flowshop scheduling problem[J]. Omega, 2019, 83: 213-222.

三、启发式算法

(2) EDD - ReAss与局部搜索算法

1) 统一算法比较标准

以运算时间为统一标准进行局部搜索算法性能比较，避免因局部搜索算法**复杂度不同**影响搜索强度与算法性能。

2) 构建新的算法

【调度规则/启发式算法+局部搜索算法 ➡ 形成新的算法】

例如：

EDD-ReAss 1+ 2-Opt ➡ EDD-ReAss 1-2-Opt 算法

EDD-ReAss 2+ Swap ➡ EDD-ReAss 2- Swap 算法

四、实验设置及结果分析

(1) 算例生成

患者总数分别为 $n = [600, 650, 700, 750, 800, 850, 900, 1000]$;

医院数量分别为 $m = [5, 6, 7, 8, 9, 10]$;

检查类型数量 $c = 6$; 每种参数组合随机产生 10 个算例【480个算例】

(2) 时间分布

患者最迟就诊完成时间: $U[1, 5]$ 天; MRI 检查时间: $U[10, 30]$ 分钟;

设备准备时间: $U[0, 10]$ 分钟; 跨区域交通时间: $U[0, 24]$ 分钟;

MRI 工作时间: 8 小时/天。

四、实验设置及结果分析

(1) 调度规则及启发式算法性能对比

调度规则: **最早交货期规则 (EDD)**、**最短加工时间规则 (SPT)**、**最长加工时间规则 (LPT)**。

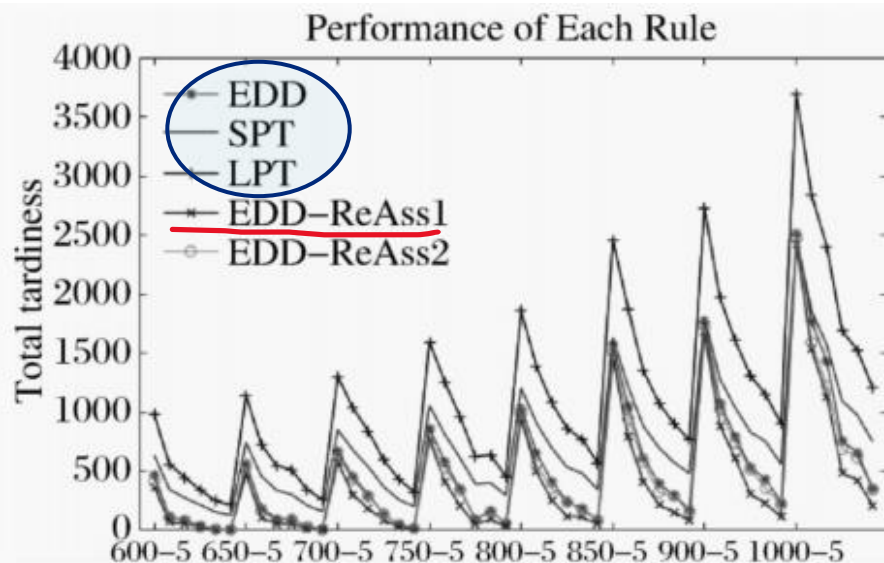


图 2 调度规则及启发式算法结果

对比结果:

启发式算法 **EDD-ReAss 1**

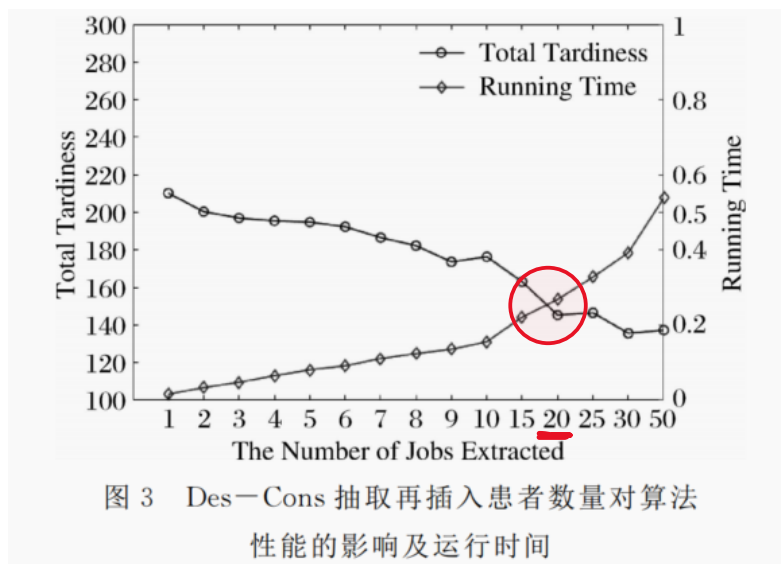
取得了最好的结果。

四、实验设置及结果分析

(2) 局部搜索算法性能比较

以调度规则或者启发式算法作为初始解，与不同的局部搜索算法结合，进一步比较调度规则/启发式算法算法性能。

①选择局部搜索算法的患者数量



抽取再插入患者数量超过20时，算法性能提升速度变慢，运行时间大幅增加，故选定患者数量为20。

四、实验设置及结果分析

(2) 局部搜索算法性能比较调度规则对比

② 确定各局部搜索算法的运行次数

Des-Cons 耗费时间长, 根据 Des-Cons 算法完成一次的时间, 确定 Swap 和 2-opt 搜索次数均为 1800 次。

③ 局部搜索算法的性能比较

总延迟的平均值

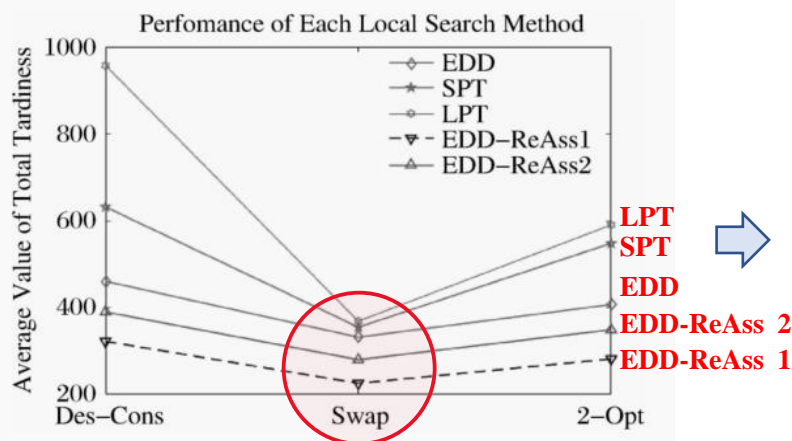


图 4 局部搜索算法性能比较

对比结果：成对交换Swap算法

与调度规则/启发式算法相结合

均取得最好的实验结果。

四、实验设置及结果分析

(2) 局部搜索算法性能比较调度规则对比

④ 极限性能对比【没有时间限制】

以 EDD - ReAss 1 产生的解为初始解，测试各局部搜索算法的性能。

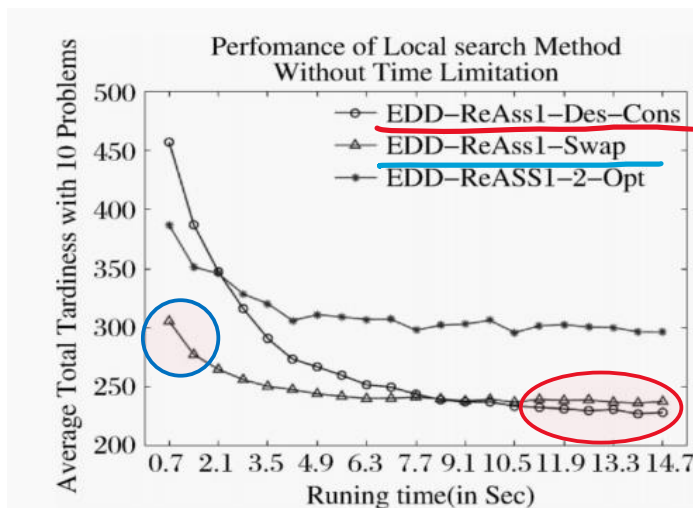


图 5 局部搜索算法性能 ($n=900, m=7, c=6$)

对比结果：在运算时间比较充裕条件下，Des-Cons局部搜索算法可以获得最好的调度方案。

【医院实际运营：Swap局部搜索算法√】

10个随机算例 ($n=900, m=7, c=6$)

四、实验设置及结果分析

(3) 算法综合性能比较与分析

【Swap局部搜索算法+各调度规则//启发式算法】性能比较

比较结果：各调度规则//启发式算法性能均提升，但EDD - ReAss 1仍然保持最优。

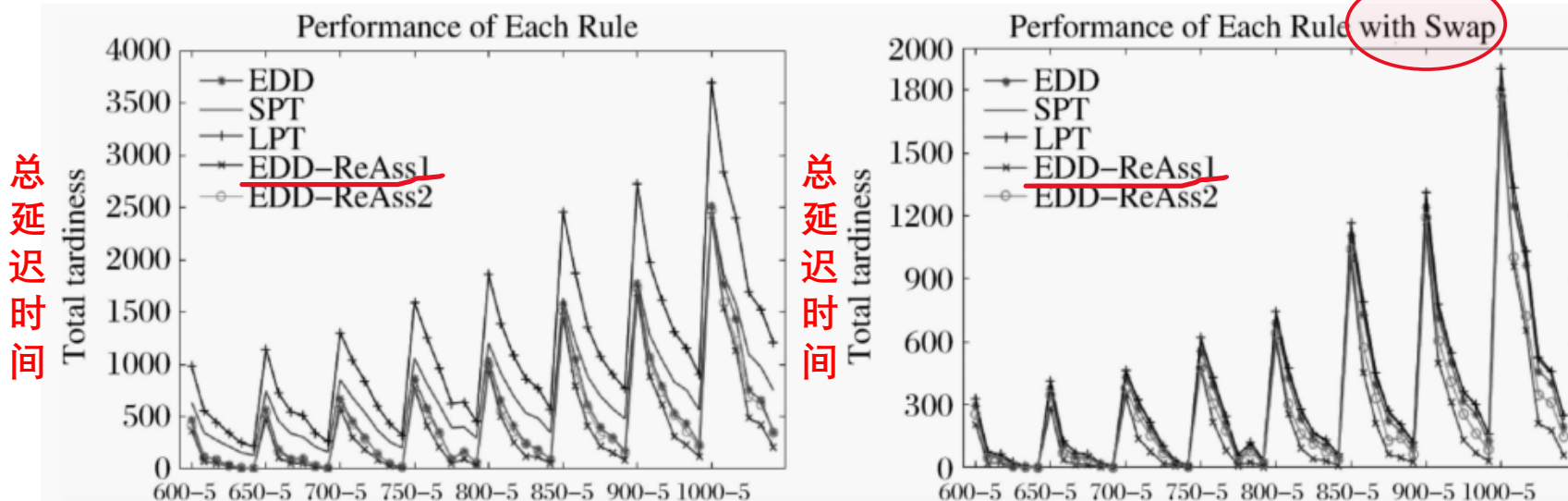


图 6 调度规则及启发式算法与成对交换 Swap 组合对比

五、结语

(1) 研究内容

提出**EDD-ReAss 1**和 **EDD-ReAss 2 启发式算法**，并结合**局部搜索算法**以缩短患者诊断 / 检查等待时间。

(2) 算例验证

EDD-ReAss 1和 **EDD-ReAss 2 算法**性能优于EDD、SPT 和 LPT 等调度规则；在较短运算时间**Swap局部搜索算法**性能最优。

(3) 下一步计划

以**EDD-ReAss 1算法结果**作为初始解，提出新的**元启发式算法**，以提供更好的患者转诊调度方案。

补充:

EDD - ReAss 算法伪代码

表 1 EDD—ReAss 算法伪代码

Heuristic algorithm: EDD—ReAss

Input: $N, M, Q, t_j, d_j, s_{i,j}, C_p^k, T_p^k$

Output: S

- 1: Generate an initial solution according to the EDD rule, S ;
- 2 : repeat
- 3: Calculate patients' tardiness for each hospital, i. e. $\max(C_p^k - \sum_{j=1}^N x_{j,p}^k d_j, 0)$, and get the delayed patients P with tardiness;
- 4: Find the busiest hospital with $\max(\text{sum}(T_p^k))$;
- 5: Choose the idlest hospital with $\min(\text{sum}(C_p^k - \sum_{j=1}^N x_{j,p}^k d_j))$
(Case 1) or the nearest one (Case 2);

补充:

EDD - ReAss 算法伪代码

```
6: Determine the remaining capacity (rem_cap) of the idlest or nearest hospital according to  $\text{mean}(\text{sum}(C_p^k - \sum_{j=1}^N x_{j,p}^k d_j))$ ;
7: req_cap = 0;
8: repeat
9:   for  $j=1, \dots, \text{size}(P)$  do
10:    req_cap = req_cap +  $t_j + s_{i,j} + c_{w,k}$ ;
11:   end for
12: until req_cap > rem_cap
13:   remove patients  $P(1:j)$  from the busiest hospital and insert them into the idlest/nearest hospital
14:   update solution  $S$ 
15: until the maximum iteration is completed
16: return solution  $S$ 
```
