

基于拓扑排序方法的预约检查流程优化^{*}

李 斌¹, 周毓旻¹, 傅春瑜¹, 钟力炜¹, 吴惠静²

(1. 上海第二工业大学 计算机与信息工程学院, 上海 201209;

2. 上海交通大学附属第一人民医院 医务处, 上海 200080)

摘要:【目的】为了优化医疗服务流程,改善患者就医体验。【方法】将图论中的拓扑排序的模型和算法应用到医院的计算机信息系统中。【结果】在线性时间复杂度 $O(|V| + |E|)$ 内,可为门诊患者相关医技检查提供精准预约和流程排序优化的服务信息。在比较精准预约和流程优化实施前后的效果时,选取了一定时间段内 200 例患者的数据,采用随机数表法进行分配,分为观察组和对照组,每组人数为 100 例。对照组采用以前的医技检查流程,观察组采用的是就诊精准预约和流程排序优化方法,观察两组患者在医技检查流程中所花费的时间以及患者的满意度。【结论】采用精准预约和流程排序优化方法后,使得医院和患者双方的流程更加合理优化,提高了患者对医技检查次序清楚的程度,有序的就诊流程改善了患者群体就医的满意度,也有助于提高医院的医疗服务水平和管理效率。

关键词:精准预约;流程优化;图算法;深度优先搜索;拓扑排序

中图分类号:O157.5

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2022)01-0108-10

随着“健康中国”理念的推进,人们的医疗就诊意识得到了较大提升,到医院就诊的患者数量也不断增加,这也导致在一些必要的医技检查项目流程中面临着检查科室环节多、人工安排效率低、排队等候时间长等问题,使得患者当日未能检查,不得不再次预约,这不但为患者带来极大不便,还有可能耽误对患者的治疗^[1-2]。因医技检查项目导致的就诊总时长增加在很大程度上既影响了患者的就医体验,又会对医院的医疗资源、运营管理、能源效率、环境安全等产生影响。由于不同检查科室的专业准备条件各异,若由医师在诊疗时为患者进行预约安排,需与患者做多次沟通来确认具体时间,还要向患者详细告知检查的流程步骤,这将会增加医师的非医疗性质的接诊时间,降低工作效率。此外,如果检查完后再回诊,患者需要重新排队,则增加了患者就诊的总时长^[1,3]。

为构建更加优化的就诊流程,提升患者就医体验,可通过应用自动精准医技检查预约和流程排序管理系统,改进传统安排模式,让医师在开立医嘱同时,由计算机信息系统根据检查科室实时情况,自动提供当前最优预约检查时间和流程排序,以满足患者群体对精准服务的需要,减少患者就诊检查的总时间^[2,4-5]。为实现此目标,本文采用有向图中的一种拓扑排序模型和算法,它的计算时间复杂度是线性 $O(|V| + |E|)$,具有实时、高速、高效的特点,适合于对动态流程排序有优化要求的场景。

1 就诊流程的分析

1.1 图论模型和算法

患者就诊中存在一些数据具有不确定性,难以用数学解析公式直接定义和描述。例如,患者实际就诊时间、需检查的项目、各检查项目当天的检查人数等等。为了更好地研究三级医院诊疗流程和患者就诊之间的复杂关系,将医院的建筑体空间结构抽象化后,把患者就诊时的行为过程用图论(Graph)的概念进行描述。把患者到达的科室部门分别用顶点(Vertex)符号来表示,将患者从科室 v 到其它科室 u 的就诊过程用一条有箭头方向的边(Edge)来表示。因此,患者的全部就诊过程就形成了一个有向图(Directed graph) $D=G(V,E)$ 。为了准确用图概念描述问题,给出如下的一些定义^[6-7]。

定义 1 从顶点 v 出发可到达顶点 u ,符号记为 $v \rightarrow u$ 。如果 $v \rightarrow u \in E$,则表示存在一条有方向的边 $e(v,u)$,

* 收稿日期:2021-08-23 修回日期:2021-09-22 网络出版时间:2022-02-09 14:34

资助项目:国家自然科学基金(No. 71931008)

第一作者简介:李斌,男,高级工程师,博士研究生,研究方向为计算机科学与技术,E-mail:libin@sspu.edu.cn

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.n.20220209.1203.010.html

可以从顶点 v 出发,沿着有方向的边到达顶点 u 。且称顶点 v 是顶点 u 的祖先,而顶点 u 是顶点 v 的后裔。

在有向图 $D=G(V,E)$ 中,边 $e(v,u)$ 有许多种类型,对于这些边的分类也有明确的定义。

定义 2 树边(Tree edge)是深度优先搜索(Depth-first search,DFS)树中过程的实际的边组成部分。前向边(Forward edge)是 DFS 树中从一个顶点指向这个顶点的一个非子顶点的后裔的一条边。回边(Back edge)是 DFS 树中从一个顶点指向祖先的边。横向边(Cross edges)既不是从一个顶点指向后裔的边,也不是指向祖先顶点的边,事实上横向边是从一个顶点指向一个已经完全被访问过的顶点。

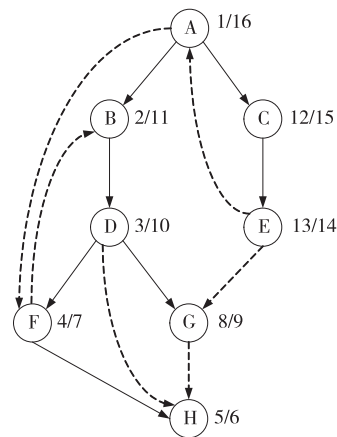
对于图 $D=G(V,E)$ 中的每个顶点 $v \in V$,用 DFS 算法遍历过程,可以在每个顶点 $v \in V$ 上标记两个重要的事件发生时刻的信息,一个信息表示最先被搜索访问到这个顶点 $v \in V$ 的时刻,记为 t_{arrive} ;另外一个信息表示最后离开这个顶点 $v \in V$ 的时刻,记为 t_{quit} 。这两个信息在顶点 $v \in V$ 上标记为 $\frac{t_{\text{arrive}}}{t_{\text{quit}}}$ 。因为每次用 DFS 搜索 $D=G(V,E)$ 某个顶点 $v \in V$ 的次序是不同的,所以得到 DFS 对于 $D=G(V,E)$ 中同一个顶点 $v \in V$ 的标记 $\frac{t_{\text{arrive}}}{t_{\text{quit}}}$ 时刻也可以是不同值^[6-8]。

表 1 是一个 DFS 算法的伪代码,图 1 是对于某一个有向图 $D=G(V,E)$ 进行 DFS 以后的 $\frac{t_{\text{arrive}}}{t_{\text{quit}}}$ 标记结果。

表 1 DFS 算法的伪代码

Tab. 1 Depth-first search algorithm pseudocode

算法:DFS
<pre> procedure DFS($D=G(V,E)$) 1. for all $v \in V$:图上搜索每个顶点 2. $visited(v) = false$ 3. end for 4. for all $v \in V$:在图上每个顶点 5. if not $visited(v)$:$explore(D=G(V,E),u)$ 6. end if 7. end for 8. end procedure 9. procedure $explore(D=G(V,E),u)$ 10. Input:$D=G(V,E)$是一个有向图;顶点 $v,u \in V, (v,u) \in E$. 11. Output:$visited(u)$ 是从顶点 v 可以到达顶点 u 的全部结果集合 12. $visited(v) = true$ 13. $arrivetime(v)$ 14. for each edge $(v,u) \in E$: 15. if not $visited(u)$:$explore(u)$ 16. $quittime(v)$ 17. end if 18. end for 19. procedure $arrivetime(v)$ 20. $arr[v] = clock$ 21. $clock = clock + 1$ 22. end procedure 23. procedure $quittime(v)$ 24. $quit[v] = clock$ 25. $clock = clock + 1$ 26. end procedure </pre>

图 1 一个有向图 $D=G(V,E)$ 的 DFS 结果Fig. 1 DFS result of a directed graph $D=G(V,E)$

1.2 一种单机处理方法

门诊患者在就诊过程中的典型例子可用图 2 描述。顶点 $v \in V$ 对应各个科室,有向边上的数字 s_i 代表进入该检查科室需要等候的时间。通常患者在进入检查科室前会耗费大量的时间排队,因此,检查的项目越多,就诊的时间就越长。就诊花费的总时间可以近似等于每条边上的时间总和,即 $T = \sum_{i=1}^n s_i$ 。

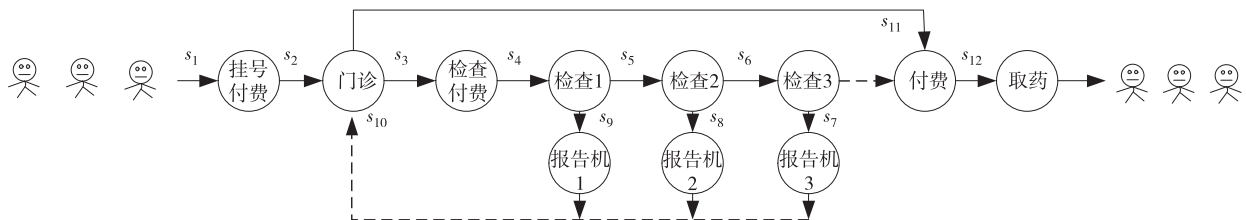


图 2 一个典型的门诊患者就诊过程图

Fig. 2 A typical outpatient visit process

根据医院统计情况,就诊过程中患者最耗时的阶段主要集中在检查 1、检查 2、检查 3 和回诊的等候阶段,即时间 $s_4, s_5, s_6, s_7, s_8, s_9, s_{10}$ 。假设当时医院的医务人员、医疗设备、物理空间是一个常量值时,如果患者群体就诊和排队的总人数越多,则可以很明显地观察到此时每个患者的就诊总时间就越长。

门诊医生医嘱中的医技检查是为判断病情,保护医生和患者双方权益的一种医学上的循证规范。检查结果的数据信息是可以通过先进的互联网和无线通信技术在计算机、手机端推送,或在医院科室设备之间实现快速传递和交互式会诊。充分利用这些技术可以使得患者更加快捷便利地获取检查报告,从而实现部分流程的优化,这在一定的程度上,既最大限度地保证门诊诊疗质量,又尽可能地减少患者的总就诊时间 T 。

$$\begin{aligned} \min T &= \sum_{i=1}^n s_i = \sum_{i=1}^n f_i(N_i), i \in [1, n], \\ \text{s. t. } &\forall N_i \in \mathbf{N}, \min s_i. \end{aligned} \quad (1)$$

考虑就诊流程是在一种抽象化条件下的情况时,此时根据理想的单机调度中的最短等待加工时间理论要求,应该先做能够在最短时间内完成的任务。评价静态排序调度的性能测试指标^[9]有调度时间长度(Schedule length (makespan)):

$$T_{\max} = \min \left\{ \sum T_i \right\} \quad (2)$$

和平均流程时间(Mean flow time):

$$T_{\text{ave}} = \frac{1}{n} \sum_j^n T_{j, \text{start}} \quad (3)$$

例如,假设 A, B, C, D 这 4 位患者在医技科室单机设备上做检查时所用的时间分别为 25, 5, 5, 10 min, 图 3 为这 4 位患者的检查次序安排,图 3a 为随机检查次序安排,图 3b 为优化后的检查次序安排。

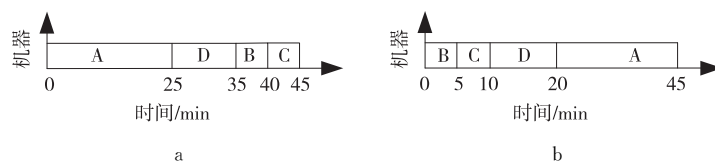


图 3 1 种单机加工的检查次序安排

Fig. 3 An inspection sequence arrangement for single machine processing

按照对于图 3a 的检查次序安排,4 位患者的等待检查时间分别为: $A=0 \text{ min}$, $D=25 \text{ min}$, $B=35 \text{ min}$, $C=40 \text{ min}$ 。则 4 位患者等待针对项检查的平均耗费时间是 $t_{\text{ave}} = \frac{0+25+35+40}{4} = 25 \text{ min}$ 。

按照对于图 3b 的检查次序安排,4 位患者的等待检查时间分别为: $B=0 \text{ min}$, $C=5 \text{ min}$, $D=10 \text{ min}$, $A=20 \text{ min}$ 。则 4 位患者等待针对项检查的平均耗费时间是: $t_{\text{ave}} = \frac{0+5+10+20}{4} = 8.75 \text{ min}$ 。

显然,按照理想单机调度理论优化后的检查排序安排可降低患者群体检查时的平均等待时间。

在患者实际就诊过程中,由于信息不对称,他们通常不知道相关检查项目的等候人数,也不一定清楚检查项目是否存在先后顺序,且医技检查部门分布分散,因此他就会在检查科室之间往返等候,从而给医院的就诊环境、电梯设备、安全等带来潜在的压力。

事实上,虽然专用医疗检查仪器设备需放置在有特殊要求的建筑结构内部,与门诊科室之间存在物理空间距离。但三级医院各科室设施配置相对完备,完全可以实现信息数据流的院内相互传输。所以在允许的通信延迟时间内,每个部门之间的计算机是可以实现图像、声音、文字等信息数据的实时通信^[2,4]。

因此,为了最大限度地减少患者的总就诊时间,对门诊诊疗中需要进行的、与检查项目有关的检查 1、检查 2、检查 3 和回诊阶段流程优化,即如何减少 $s_4, s_5, s_6, s_7, s_8, s_9, s_{10}$ 时间成为重要的研究方向。通过在门诊时给患者提供医技检查的精准预约和对流程进行排序优化,以及由医生对检查结果会诊后将结论发送到计算机、手机端等方法,减掉回诊流程,就构成有向无环的流程,这样可以有效地减少患者的就诊总时间。

2 DAG 拓扑排序和优化

2.1 拓扑排序方法

任务的排序调度是一个复杂的系统,在一般情况下的最优排序调度问题已被证明是一个 NP-完全问题。即使是对于研究在 2 个处理机上的最优任务调度问题也是一个 NP-难的问题。通常排序调度问题属于广义上的组合搜索问题。很多的排序和调度问题最后可归纳于需要计算有向无环图 DAG 的拓扑排序^[8-9]。

当患者群体需要在医院进行各种项目检查时,某个患者只能先做完一个检查项目后,再做另一个检查项目,即只能串行做不能并行做。虽然患者是可以自己决定做检查的先后次序,但是他并不知道不同检查项目中的其他患者排队情况。医院的计算机信息系统可以实时获取相对应的患者就诊数据状态。将就诊检查过程用有向无环图表示,用拓扑排序计算的结果可以为患者提供一个做医技检查的安排次序,因为拓扑排序是满足了有向图之中的检查项目之间的先后依赖关系,所以这种排序结果可以为患者提供一个简洁、有效的检查流程指导,减少由于患者不清楚流程所导致的时间耗费和无序的情况,降低患者的就诊时间增长的可能性^[10]。图 4 是医技检查预约排序系统。

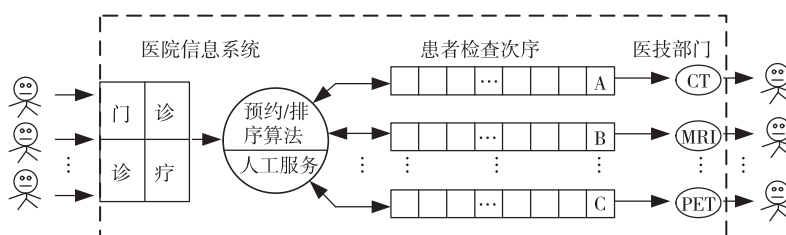


图 4 医技检查预约排序系统

Fig. 4 Medical and technical examination appointment sequencing system

定义 3 一个图 $D=G(V,E)$ 是有向无环图(Directed acyclic graph, DAG), 是指连接顶点之间的边是有方向的, 并且它的边是无闭环形状的(Acyclic)的图。

定义 4 一个有限 DAG 的全部顶点集合 $V=\{V_1, V_2, \dots, V_{n-1}, V_n\}$ 的拓扑排序(Topological sort, TS), 是对集合中元素的次序排列 $\{V_{k_1}, V_{k_2}, \dots, V_{k_{n-1}}, V_{k_n}\}$, 若 $0 \leq i, j \leq n$, 则在 $V(V_{k_i}, V_{k_j})$ 存在一条从顶点 V_{k_i} 可到达顶点 V_{k_j} 的路径, 且 $i < j$ 。

定理 1 一个有向图是称为 DAG, 当且仅当这个图有一个拓扑排序 TS。

证明 先证 DAG 有一个拓扑排序。如果有向图不是 DAG 的, 则没有拓扑排序。假设有向图不是 DAG 的, 则表明在这个图中存在一个闭环路径, 对于顶点 $v_i, v_j \in V, i, j \in \mathbf{N}$, 有从 v_i 到 v_j 的边, 在拓扑排序中顶点 v_i 在 v_j 之前。但是该边也能从 v_j 到 v_i , 在拓扑排序中顶点 v_j 在 v_i 之前。显然这样两种情况时的排序是无法同时满足的。所以说这个图是没有拓扑排序。

再证明如果一个图是 DAG 时, 那么这个图有拓扑排序。因为是有向无环图 DAG, 在图中不存在闭环。基本事实是对于只有两个顶点的 DAG, 根据定义显然该图有拓扑排序。

当假设有 n 个顶点的 DAG, 该图有拓扑排序。则对于 $n+1$ 个顶点的 DAG 中, 至少存在一个顶点 v_x , 它的入度(In-degree)为 0, 表明不存在从其它顶点到 v_x 的边, 顶点 v_x 可以出现在任何其它顶点之前。删除该点以后, 具有 n 个顶点的图仍是 DAG, 根据前面的假设, 这个图是可以有拓扑排序的。证毕

定理 2 一个有限的 DAG 是至少要存在一个拓扑排序 TS 的。

证明 假设在一个有限的 DAG 中不存在一个拓扑排序, 那么遍历 DAG 图中就一定会存在一个有向边和对应的顶点 (v, u) , 根据定义 4, 无法从顶点 (v, u) 到达其它顶点 (u, v) 的, 即在一个有限的 DAG 中, 存在一条有向的边, 它的顶点即不能 $v \rightarrow u$, 也无法 $u \rightarrow v$ 。而这个情况是和 DAG 的先前定义相矛盾的。证毕

性质 一个有限的 DAG 的拓扑排序不是唯一的。

定理 3^[6] 计算 DAG 拓扑排序的时间复杂度是 $O(|V| + |E|)$ 。

证明 设 $|V|$ 和 $|E|$ 分别代表 DAG 的顶点数和边数。用 DFS 算法计算时, 在访问一个顶点的过程中计算机做了两个操作。第一步, 对于一个顶点的访问进行标记, 执行操作是常量时间 $\frac{t_{arrive}}{t_{quit}}$ 操作。对全部顶点的访问, 计算时间耗费是 $O(|V|)$ 。第二步, 在 DFS 过程中, 每条有向边 $(v, u) \in E$ 需要检查两次, 一次是搜索顶点 v , 一次是搜索顶点 u , 计算时间耗费是 $O(|E|)$ 。所以 DFS 的计算时间复杂度是 $O(|V| + |E|)$, 是 DAG 输入规模的线性时间。证毕

在 DAG 中, 每条边的方向都指向一个 t_{quit} 值更小的一个顶点。正是由于 DAG 中可以通过对顶点的 t_{quit} 值按照降序方法进行线性化的排序, 则最小的值的顶点出现在线性排序的最后面, 而最大的值的顶点出现在排序的起始顶点。

为了使拓扑排序的结果呈现符合人们的日常生活习惯, 采用一维的线性方式, 将顶点从左边往右边, 按次序将顶点位置排序, 即顶点排在左边是起始位置, 排在右边顶点位置是目标点^[6,8]。

有的就诊流程可能比较简单, 而有的就可能比较复杂。为了更好地描述患者就诊流程, 在本文中将流程抽象成为 DAG 作为一种表示方法, 便于分析在就诊流程中的一些复杂任务问题。在复杂就诊流程中可能会有某一类任务集合存在先后次序的约束要求, 即要求必须先做完某一项科室的检查任务, 然后才能做后续科室的检查。对于这样有先后次序要求的检查流程, 可以等效为一个排序或调度的优化问题, 用 DAG 中顶点代表对应的科室, 用有方向的边代表任务先后的约束条件。患者的检查项目排序是一种对检查项目的先后步骤合理安排的次序。拓扑排序是对 DAG 中的顶点集合进行线性排序的一种算法^[8-10]。排序后生成的顶点次序可以为患者检查流程提供依据。

图 5 展现了某一患者按医嘱需做 4 项检查, 系统根据医院信息系统中获得各项检查的实时等候人数情况形成的该患者检查流程 DAG, 边的方向是从人数少指向人数多的顶点, 同时要满足检查项目之间存在的先后依赖关系(图 5a), 用拓扑排序算法得出的一种排序结果(图 5b), 其中图 5a 相应的邻接矩阵为:

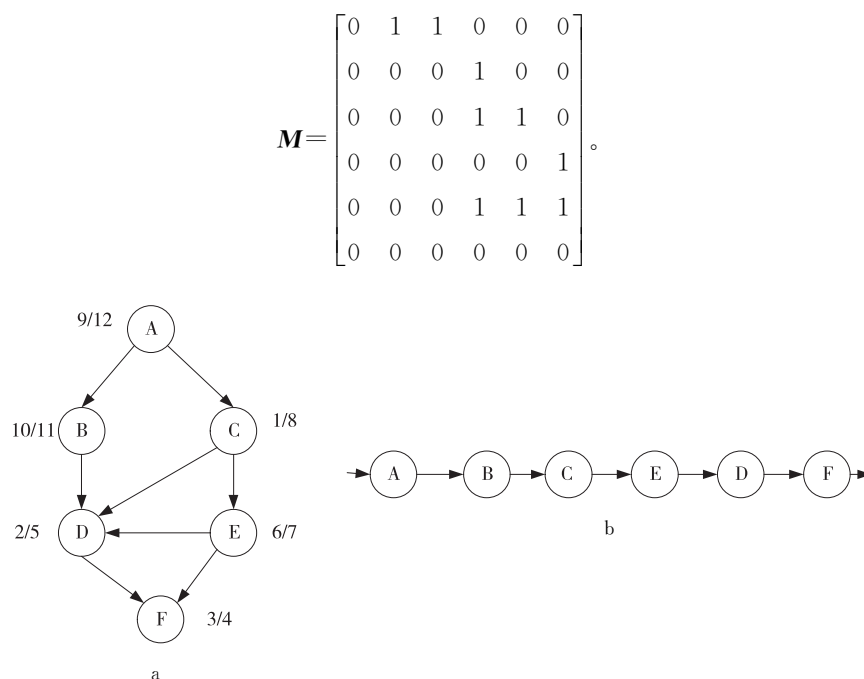


图 5 某个患者检查流程 DAG 和 1 种拓扑排序结果

Fig. 5 A patient examination process DAG, and a topological sorting result

假设在门诊诊疗中有 7 位患者 A,B,C,D,E,F,G 都要去检查室 1、检查室 2 和检查室 3 做医技检查,如果将一些条件进行抽象化假设,且忽略检查室之间的实际距离和患者的行走速度等因素,理论上,患者 A,B,C,D,E,F,G 合理的检查流程应该参照 DAG 排序以后的结果进行,见图 6。

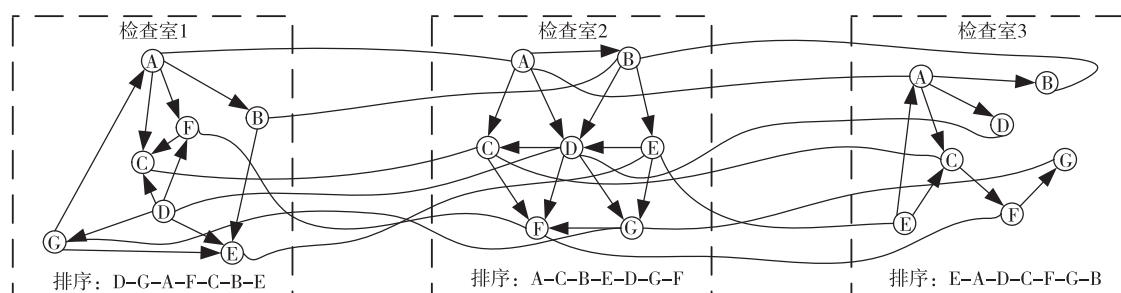


图 6 7 位患者在检查室 1,2,3 等候检查的排序

Fig. 6 Sequencing of 7 patients waiting to be examined in examination room 1,2,3

图 6 中各小图对应的邻接矩阵分别为:

$$M_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, M_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, M_3 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

2.2 启发并行调度

用 DAG 表示的任务流程总是可以利用拓扑排序算法,使得有先后依赖关系的任务在单机上按照排序结果执行。当有两台以上的医技设备能同时执行一个以上的检查任务时,例如假设某大型三级医院医技科室中有两

台 CT/MRI 检查设备,每台 CT/MRI 检查设备可针对患者身体的不同部位做多种内容的检查项目,则该医技科室就可以同时对两位以上的患者进行不同种类的内容检查项目。此时的任务排序就是为两台机器工作的任务提供调度排序,目标依然是让患者们的总就诊时间减少。

理论上能够将加工任务的条件和加工机器进行一种抽象化的假设,但是在一般情况下的,具有 n 个多台机器多种类型任务的最优调度问题仍是个属于 NP-完全问题。在用 DAG 进行任务排序和调度中的一些评价参数主要有^[9-11]: $w(v_i)$ 表示顶点 v_i 在执行任务时的计算权值; $c(i, j)$ 表示从顶点 v_i 到顶点 v_j 的通信权值,当任务是在同一个处理机上时 $c(i, j)=0$; $t_{\text{start}}(v_i)$ 表示实际调度过程中的一个任务顶点开始时间; $t_{\text{finish}}(v_i)$ 表示实际调度过程中的一个任务完成时间;任务开始时间和完成时间之间的关系表示为 $t_{\text{finish}}(v_i)=t_{\text{start}}(v_i)+w(v_i)$,式中 $w(v_i)$ 是顶点 v_i 的计算权值;makespan 表示从最后顶点输出时的最大完工时间,即任务调度的时间长度;当所有顶点表示的任务被调度完成以后,则对于全部处理器上的任务调度长度就是 $\max_i \{t_{\text{finish}}(v_i)\}$,调度优化的目标是 $\min(\max_i \{t_{\text{finish}}(v_i)\})$ 。

由于对于 DAG 拓扑排序算法可以实现线性时间的排序,当进行普通门诊的就诊检查时,利用 DAG 拓扑算法可为两台机器上简单的多任务调度算法提供一种启发,所以可以在 $O(|V|+|E|)$ 线性时间内有效地实现多检查任务的调度工作。

图 7a 是某个 CT/MRI 检查室在对等候的患者们进行项目检查时一种 DAG 图,对检查过程的时间统计并给出充分的余量后,以 5 min 作为 1 个检查单元时间,顶点上的数字 2 代表 2 个单元时间即 10 min,同理类推。将有向边上的通信权值抽象化,并考虑到根据进行检查项目的顺序要求。图 7b 是基于 Matlab 软件的拓扑排序算法计算出的结果,将该结果作为 2 台检查设备的并行调度的启发式方法,在医技室中有 2 台 CT/MRI 设备上工作所执行的检查任务的优化并行调度图见图 7c,该拓扑排序算法的伪代码见表 2。

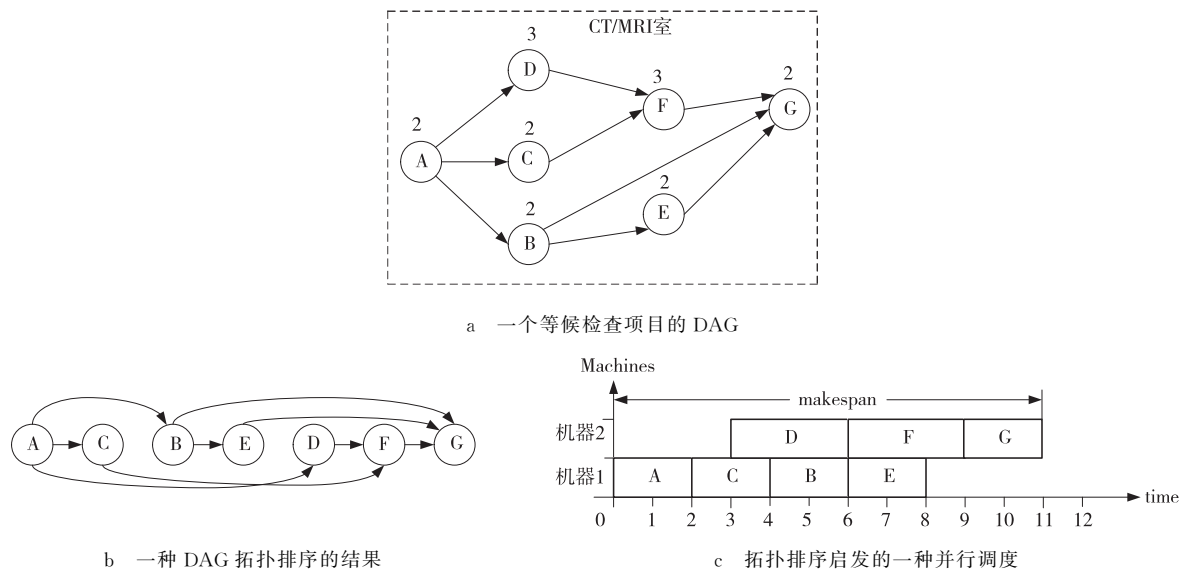


图 7 1 种拓扑排序结果启发的并行调度

Fig. 7 A parallel scheduling inspired by topological sorting results

图 7a 对应的邻接矩阵为:

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

表 2 拓扑排序算法伪代码

Tab. 2 Topological sorting algorithm pseudocode

算法:TS
Procedure Topological sorting (DAG,order)
1. Input: $D=G(V,E)$ 是有向无环图 DAG, $u,v\in V,(u,v)\in E$
2. Output:排序结果 $order(u)<order(v)$ whenever edge $u\rightarrow v$
3. for every $v\in V$ compute in-degree $d_{in}(v)$
4. for every $v\in V$ do
5. if $d_{in}(v)=0$ then 将顶点 v 放入队列 Q 中
6. $i=1$
7. end if
8. while $Q\neq\varnothing$ do
9. 从队列 Q 中移除掉第一个顶点 u
10. $order(u)=i$
11. $i=i+1$
12. for every edge $u\rightarrow v$ do
13. $d_{in}(v)=d_{in}(v)-1$
14. if $d_{in}(v)=0$ then 将顶点 v 放入队列 Q 中
15. end if
16. end for
17. end while
18. end for
19. end for
20. end Procedure

3 结果统计与分析

3.1 数据和样本

本研究以上海市第一人民医院南部院区为例,选取 2019 年 1—12 月在该院普通门诊、专家、特需门诊的预约医技检查的普通患者 200 例,按照随机数字法分为精准预约组(下文称为“观察组”)和对照组,每组 100 例样本。其中,精准预约组的患者在医师诊间开立医嘱后,系统自动分配当前最优时间,即时自动打印生成预约申请单。预约后患者在 2 h 内付费即完成预约检查流程,而对照组的患者按传统模式前往预约中心人工预约后排队检查。观察组中男性 47 例,女性 53 例,年龄 25~62 岁,平均年龄为(39±2)岁;对照组中男性 52 例,女性 48 例,年龄 24~63 岁,平均年龄为(38±2)岁。两组患者基本信息差异无统计学意义($p>0.05$)。

3.2 人性化措施设计

通过系统开立医技检查医嘱后,完成自动无感预约,可精准预约至分钟,简化了就医流程,缩短预约患者的排队等候时间。通过对预约中心相关历史数据计算和分析,即每个检查类型在 1 天内各个时间段能做多少患者人数,或者多少部位数,包括机器的使用率、单人检查项目所需时间等,预测开放的预约号源数并分配至每个时段。

根据开放号源设置预约规则:1) 相对区分住院号源和门诊号源,根据使用量及实际需求,动态调整号源;2) 对于有项目检查要求的,例如空腹、憋尿等,相对给予特殊时段分配和人数的限制;3) 因老旧设备存在的局限性,设备的功能性及灵敏性等因素对结果准确度有一定影响,在内置预约规则时还需考虑仪器设备更新换代等因素;4) 同一患者在不同科室或不同时间开立的多项医技检查医嘱时,系统根据优先级算法,自动合并、靠拢各项

预约时间,得出最优预约时间建议;5) 根据不同检查项目所需检查时间,各科室合理安排号源及排班,设置分时段号源的数量。同时,也可根据实际检查需求,对未预约的号源实时修改。门诊办公室对排班情况、号源预约动态、机房检查状态,设备使用等情况可监控、可调整。通过定期分析,与相关科室沟通,优化号源的使用;6) 设定人性化改约途径和方法,除预约中心外,诊区服务台设置通柜服务,增加取消或改约功能。实现检查预约闭环管理,确保检查号源的有效利用,提高医技设备使用效率;7) 预约申请单包含详细的检查信息和项目需知,如:检查时间、检查房间号、注意事项等。系统保留开单后 2 h 内付费的时间效期。若超过预留付费时间效期或取消预约,则号源重新释放回号源池重新分配,保证号源利用最大化^[3-4]。

采用拓扑排序的模型和算法是建立在对实际就诊情况的模拟和抽象基础上,这种方法比较适合于普通型的患者就诊的情况,然而现实中情况仍具有许多不确定性因素。所以在医院服务台还需要提供一种可以随时由人工介入处理的灵活应对方式。

3.3 评价指标与统计分析

通过第三方机构满意度调查问卷,对两组患者通过不同方式进行医技检查预约流程的时间进行对比,主要包括:检查预约时间、检查等候时间、缴费结算时间、工作人员预约检查时间,同时对两组患者对于检查预约流程的整体满意度,包括:非常满意、满意、一般、不满和很不满意,用 1~5 分划分 5 个等级^[4]。

采用 SPSS 19.0 软件对所有数据进行统计学处理,计量资料呈正态分布的定量数据以 $(\bar{X} \pm s)$ 的形式表示,组间比较采用 t 检验;计数资料以 $n(\%)$ 的形式表示,应用 χ^2 检验,以 $p < 0.05$ 表示差异具有统计学意义。

应用实践结果的统计结果见表 3。诊间精准预约和排序优化有效缩短患者排队预约时间、等候检查时间、缴费结算时间、工作人员预约检查所用时间,并有效提升了患者就医满意度。

表 3 诊间精准预约体系应用实践结果

Tab. 3 Practice results of the application of interval precision appointment system

组别	例数	排队预约时间/min	等候检查时间/min	缴费结算时间/min	工作人员预约检查时间/min	就医满意度
对照组	100	92.58±0.42	43.23±0.81	33.51±1.21	12.78±1.08	3.95±0.12
观察组	100	0±0	23.78±1.02	30.04±0.53	0±0	4.38±0.02
p		<0.05	<0.05	>0.05	<0.05	<0.05

患者群体在就诊过程中,通过精准预约和排序流程,减少了排队等候的总时间。患者不仅可以精准预约,还可根据实际需求合理修改预约时间,很好提升了患者群体就医的满意度。

4 结论

在三级公立医院的医技检查中采用诊间精准预约和流程排序的优化方法,依靠先进的互联网、通信、计算机、大数据等基础设施和技术,在计算复杂度是线性时间 $O(|V| + |E|)$ 内,可为患者群体提供精准预约和检查流程排序优化服务,合理灵活地使用可以使得等候排队的人数减少,缩短了患者就诊检查排队耗费的总时间。医院通过信息系统实时提供自动精准预约和流程排序消息,在满足日常门诊就诊服务的同时,使患者的等待时间减少满意度提高。该模型和算法对于缓解患者无序拥挤,提高医院医疗技术服务水平、管理优化和改善就诊环境等方面,有一定的提升作用。

参考文献:

- [1] 张竞秋,徐亚香,邵军,等. 大数据驱动下精准检查预约的探索与实践[J]. 江苏卫生事业管理,2020,31(1):72-74.
ZHANG J Q, XU Y X, SHAO J, et al. Exploration and practice of precision check reservation driven by big data[J]. Jiangsu Health System Management, 2020, 31(1): 72-74.
- [2] 吴强山. 信息化助推门诊检查诊间结算预约服务[J]. 世界最新医学信息文摘, 2019, 19(72): 263.
WU Q S. Information technology boosts outpatient checkup inter-office billing appointment service [J]. World Latest Medicine Information, 2019, 19(72): 263.
- [3] 姚侃敏,王文菁,潘自来,等. 完善预约模式优化医技检查流程[J]. 中国医疗设备, 2015, 30(4): 123-125.
YAO K M, WANG W J, PAN Z L, et al. Improvement of the registration management system for optimization of medical

- examination workflows[J]. *China Medical Devices*, 2015, 30(4):123-125.
- [4] 陶沈力, 翁卫群, 韩悦, 等. 智能化系统在缩短门诊患者候诊时间中的应用现状[J]. *现代医学与健康研究电子杂志*, 2020, 4(3): 155-157.
- TAO S L, WENG W Q, HAN Y, et al. Current status of application of intelligent system in reducing waiting time of outpatients [J]. *Modern Medicine and Health Research*, 2020, 4(3):155-157.
- [5] 李斌, 李群, 刘奕萍. 基于图论的预约分配模型与算法研究[J]. *重庆师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 36(4):22-30.
- LI B, LI Q, LIU Y P. A study of model and algorithm based on graph theory for appointment-allocation[J]. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science)*, 2019, 36(4):22-30.
- [6] SHIMON E, GUY E. *Graph algorithms*[M]. 2nd Edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- [7] ERCIYES K. *Guide to graph algorithms sequential, parallel and distributed*[M]. New York: Springer, 2018.
- [8] KOCAY W, KERHER D L. *Graphs, algorithms, and optimization*[M]. 2nd Edition. Boca Raton: Chapman Hall, 2016.
- [9] BLAZEWCZ J, ECKER K H, PESCH E, et al. *Handbook on scheduling from theory to practice*[M]. 2nd Edition. New York: Springer, 2019.
- [10] GANDOMI A H, EMROUZNEJAD A, JAMSHIDI M M, et al. *Evolutionary computation in scheduling*[M]. New Jersey: Wiley, 2020.
- [11] 万国华. *排序与调度的理论、模型和算法*[M]. 北京: 清华大学出版社, 2019.
- WAN G H. *Scheduling theory, models and algorithms* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2019.

Operations Research and Cybernetics

Optimization of Appointment Checking Process Based on Topological Sorting Method

LI Bin¹, ZHOU Yumin¹, FU Chunyu¹, ZHONG Liwei¹, WU Huijing²

(1. Department of Computer Science and Technology, Shanghai Polytechnic University, Shanghai 201209;

2. Department of Medical Affairs, Shanghai General Hospital Affiliated to Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200080, China)

Abstract: [Purposes] The health China goal points out that it is necessary to improve the high-quality medical technology level and service efficiency of third-tier public hospitals, optimize the medical treatment process and improve the experience of patient crowds.

[Methods] The topological sorting model and algorithm in graph theory are applied to the computer information system in the hospital. Within the linear time complexity of $O(|V| + |E|)$, it can provide outpatient patients with precise appointment and process ranking optimized service information for examination in various medical technology departments. [Findings] When comparing the effects before and after the implementation of precise appointment and process optimization, the data of 200 patients in this hospital were selected and distributed by random number table method. They were divided into observation group and control group, with 100 patients in each group. The control group used the previous medical technology examination process, and the observation group used the methods of precise appointment and process sequencing optimization to observe the time spent in the medical technology examination process and the satisfaction of patients in the two groups. [Conclusions] The statistical results show that after the precise appointment and process sequencing optimization method are adopted, the processes of the hospital and patients are more reasonably optimized, and the patients' unclear degree of medical technology examination order is reduced. The orderly treatment process improves the satisfaction of patients crowds medical treatment, and also helps to improve the medical service level and management efficiency of the hospital.

Keywords: precise appointment; process optimization; graph algorithm; deep first search; topological sorting

(责任编辑 黄颖)