

# 一种基于均衡的医疗资源配置求解方法

鞠永和<sup>1,2</sup>, 王静成<sup>2</sup>, 朱俊武<sup>3</sup>, 宋 衡<sup>3</sup>, 陶立坚<sup>1</sup>

(1.中南大学公共卫生学院,湖南 长沙 410083)

(2.扬州大学临床医学院,江苏 扬州 225001)

(3.扬州大学信息工程学院 江苏 扬州 225000)

[摘要] 在医疗系统中,医疗资源的配置通常以资源配置均衡和最大化医疗资源总体收益为目标.为了通用化模型,本文将医疗资源模型化为 Agent,提出一种基于社会最优配置的 Agent 联盟收益均衡配置方法.首先,针对所有可能的联盟求得满足社会最优配置的 Agent 分组;在均衡配置存在的条件下,使用不断迭代的方式使得个体 Agent 产生的收益逼近均衡配置状态,得到一个同时具备 Agent 配置均衡和总体收益最大化两个属性的配置解.在配置护士到病房的应用表明,本方法有效地得到了一个满足利益均衡的联盟策略与收益配置方案.

[关键词] 医疗资源,结盟,均衡,社会最优,资源配置

[中图分类号]TP391 [文献标志码]A [文章编号]1001-4616(2019)02-0030-07

## A Method of Medical Resource Allocation Based on Equilibrium

Ju Yonghe<sup>1,2</sup>, Wang Jingcheng<sup>2</sup>, Zhu Junwu<sup>3</sup>, Song Heng<sup>3</sup>, Tao Lijian<sup>1</sup>

(1.School of Public Health, Central South University, Changsha 410083, China)

(2.Medical College, Yangzhou University, Yangzhou 225001, China)

(3.School of Information Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225000, China)

**Abstract:** In the medical system, the medical resource allocation aims at the equilibrium of resource allocation and the maximization of the total revenue. In order to generalize our model, this paper models the medical resource as agent, and presents a methods for finding the equilibrium of resource allocation with agents' alliance based social optimal allocation. Firstly, the agents' groups which meet social optimality are found in the all possible allied pairs; Under the condition of equilibrium exists, the revenue of individual agent will be close to equilibrium after multiple iterations, and an allocation solution which satisfies allocation equilibrium and maximum total revenue is generated. Finally, the example about allocating nurses to sickroom is given to show that this method effectively get an alliance strategy and a revenue allocation scheme satisfied equilibrium.

**Key words:** medical resource, alliance, equilibrium, social optimization, resource allocation

医疗资源(包括医务人员)科学合理的配置,是每家医院行政管理层必须要考虑的重点问题<sup>[1]</sup>. 合理有效地配置医疗资源,能够在提高资源利用率并大幅度减少资源的浪费和闲置的同时,还能够获得更加高效的医疗卫生服务产出,还能够极大地缓解病人对医疗服务需要增长与医疗资源稀缺之间的矛盾<sup>[2]</sup>. 由于医疗资源具有相互之间的互补性,因此医疗资源通常利用搭配使用或者联盟的方式以期能够获得更大的个体收益. 如果一个医疗资源通过搭配使用参加资源竞争能够得到超过其独立使用带来的收益,则从博弈论和数学的角度来看,医院管理层一定会采用将该医疗资源与其他医疗资源进行搭配使用以达到该资源能够获得最大化收益<sup>[3-4]</sup>. 在国家网球队参加网球比赛时可以两两组队,对于任意参赛球员来说,可根据自己需求选择参加个人单打或寻求伙伴双打的其中一种方式. 因此,每个参赛队员都会在权衡是选择单打还是与他人合作,最终进行决策的依据是自己是否能够利益最大化<sup>[5]</sup>. 在本文中,为使得问题模

收稿日期:2018-12-19.

基金项目:国家自然科学基金(61872313)、江苏省科技发展计划(BR2012025)、江苏省卫生计生委信息化科研课题项目(X201608)、扬州市科技发展计划项目(YZ2014199).

通讯联系人:朱俊武,教授,研究方向:云计算,博弈论,机制设计方面. E-mail: jwzhu@yzu.edu.cn

型更具通用化,我们将医疗资源称为智能体,即 Agent,将医疗资源搭配使用或医务人员形成合作伙伴这一行为称为结盟.在此基础上,我们给出了二元 Agent 结盟的模型,并且证明了该二元 Agent 结盟存在均衡状态的必要不充分条件.此外,我们还证明二元 Agent 结盟在均衡状态下,系统模型能够获得最大的总收益,并且具有较为稳定的状态,理性的个体 Agent 不会有动机脱离该状态.

在医疗资源结盟处于均衡状态的时候,医院本身一定具备最大的社会总收益,采用计算最大社会总收益的方式,我们能够获得处于均衡状态下的医疗资源结盟形式;另外从单个医疗资源的角度来看,均衡合作配置后的收益再次分配必须大于其它任意非均衡状态的收益,以便最后结盟能够处于稳定状态,因此计算处于均衡配置下的医疗资源收益配置是十分有必要的,并且具备较大的实用价值.

本文提出一种医疗资源形成联盟的收益均衡的求解方法.本文组织如下:在介绍了 Agent 形成伙伴以及收益配置的相关工作之后,第二节给出了问题的形式化模型以及概念定义;第三节提出了基于最大社会收益的配置求解算法.第四节以第三节算法为基础,提出了联盟内利益迭代分配算法,并进一步分析这两个算法的性能;第五节以将护士分配病房的实际应用场景为例,我们阐述了 Agent 结盟的收益均衡求解方法的详细过程;最后我们总结全文并展望下一步研究工作.

## 1 相关工作

合理有效地配置医疗资源,将对医院稳定和健康的发展发挥极其重要和持续的作用<sup>[6]</sup>.医院在医疗资源总量保持不变的情况下,合理有效地配置医疗资源能够极大地提升医疗资源的利用率,并获得明显的经济效益.因此,合理配置医疗资源是医生、病人和医院双赢的战略<sup>[7]</sup>.目前已有许多关于医疗资源合理配置的研究,其主要总结如下:文献[8-9]介绍了一种医疗资源配置方法——模糊层次分析法,并提出了一种基于多级评价指标体系的评价模型,用于评价医疗资源配置的有效性.文献[10]针对已知存在需要相应治疗的患者,在不超过固定成本的前提下,提出一种方案,在提高治疗效果的同时,降低了治疗成本.作者对该问题进行了形式化表述,并用数学方法进行了计算.得到并证明了最优解.文献[11]首先介绍了宏观调控和微观分布,忽略了一些因素,得到了医疗资源的简化配置.对这个简化问题进行了一系列的研究和探索.

然而,目前很少有从博弈论均衡的角度进行医疗资源配置研究的相关工作,事实上,博弈论和社会选择理论为研究具备均衡属性的医疗资源合理配置提供了新的思路:在医疗资源联盟中寻求利益的均衡分配,属于合作博弈中的解决和成本分担问题.由于成本分配的特殊性,通常将成本分配作为合作博弈的一个独立部分来研究<sup>[12]</sup>.在合作博弈<sup>[13]</sup>中,利益的最终分配是多个博弈主体形成联盟时最基本的问题之一.当  $N$  个代理组成联盟时,如何分配联盟产生的利润是需要解决的关键问题. Gillies D B 首先提出了“核心”的概念,作为研究稳定集的工具.所有稳定合作的分配集都被称为核心<sup>[9]</sup>.建立新的合作关系不能使参与者群体获得更多的利益.核心中的任何分配都不会导致任何参与者离开联盟.事实上,核心是分销方案“不偏离任何子联盟”.埃奇沃思于 1881 年首次提出这一想法.他设想这个概念可以取代华莱士的竞争平衡<sup>[15-16]</sup>.

“核心”的定义表明,“核心”将包含许多解,构成一个集称为“解空间”.解集可以用线性规划法精确求解,但许多解都存在“核心”的不可避免缺陷:在处理同一冲突和纠纷时,每个主体都有自己的解,每个解都有自己的合理性,但这不利于最终问题的解决,因此,有效地处理解空间具有重要的现实意义.

1953 年 Shapley 提出的 Shapley 值<sup>[17-18]</sup>很好地解决了这个问题.它能够根据所有边际贡献分享成本或收益.为了解决 Shapley 值的缺点, Aumann 和 Mashler<sup>[19]</sup>于 1964 年提出了讨价还价的多重博弈思想.此外,1969 年 Schmeidler<sup>[20]</sup>提出核仁的思想,主要内容是“单点利润分配向量”<sup>[21]</sup>.

因此,针对规模小于或等于 2 的医疗资源联盟伙伴关系形成的博弈模型,本文提出了一种基于社会最优配置的联盟利益均衡算法,获得了医疗资源配置博弈的整体最大效益.在获得最大总收入的情况下,从众多解决方案的“核心”出发,找到了一个较为合理的医疗资源配置博弈模型的“一点解”,使医疗资源配置均衡稳定.

## 2 问题模型

为使得问题模型通用化,本文将医疗资源(包括医务人员)称为智能体(Agent),而医疗资源配置搭配

使用或医务人员合作这一行为称为结盟. 根据实际需求(如医院引进一批护士,为每个病房最多配置 2 个护士,最少 1 个护士的需求),我们定义每个 Agent 最多与一个 Agent 形成合作伙伴关系<sup>[6]</sup>,并给出了如下的二元 Agent 结盟模型.

假设 Agent 的集合表示为  $M = \{1, 2, \dots, m\}$ . 我们设每个 Agent 最多只能寻求一个 Agent 形成合作伙伴关系来获得收益. 假设  $M$  中的任意两个 Agent  $i$  和  $j$  都能够联盟,则将获得收益  $v(\{i, j\})$ , 如果  $N$  中的 Agent  $i$  不与其他任何智能体结盟时,则我们将该智能体获得的收益记为  $v(\{i\})$ . 假设收益向量  $\mathbf{r} = (r_1, r_2, \dots, r_m)$ , 其中  $r_i$  表示 Agent  $i$  最后能够得到的收益. 令  $I_k = \{1, \dots, k\}, k > 0$ . 我们令  $M$  的一个划分  $P = \{U_1, \dots, U_k\}$ , 对于任意的  $h \in I_k$  都有  $|U_h| \leq 2$ , 那么可以称  $P$  是  $N$  上的一个配置. 均衡配置的定义如下:

**定义 1** 如果  $M$  的一个配置  $(P^*, \mathbf{r}^*)$  满足对  $i \in M$ , 都有  $r_i^* \geq v(\{i\})$ , 对于任意的  $j, h \in M$ , 有  $r_j^* + r_h^* \geq v(\{j, h\})$ , 那么称分配  $(P^*, \mathbf{r}^*)$  是均衡配置.

从定义 1 可以知道,处于均衡配置状态的任何一个 Agent 都不愿意离开当前配置. 在均衡配置中,任何一个 Agent 的利益不仅大于其自身完成某项任务的利益,而且还大于与其他任何 Agent 结盟时候所能获得收益. 因此,通过对联盟对象的修改, Agent 不能获得更多的利益,并且在现有的分配状态是感到满意的. 本文旨在设计一种实现医疗资源均衡配置的方法.

**定义 2** 对于  $M$  上的配置  $P = \{U_1, \dots, U_l\}$ , 如存在配置  $\bar{P} = \{\bar{U}_1, \dots, \bar{U}_k\}$  满足

$$\sum_{i=1}^k v(\bar{U}_i) \geq \sum_{j=1}^l v(U_j),$$

则我们可以称该分配  $\bar{P}$  是社会最优配置. 对于任意的社会最优配置  $\bar{P} = \{\bar{U}_1, \dots, \bar{U}_k\}$ , 称  $\sum_{i=1}^k v(\bar{U}_i)$  为博弈  $(N, v)$  的社会最大收益,我们将其记为  $v(N)$ .

根据定义 2 可知,社会最优配置是所有医疗资源配置方式中能够获得最大收益的配置方式,可能存在多种社会最优配置.

**定义 3** 如果 Agent  $i$  和 Agent  $j$  的收益满足不等式  $v(\{i, j\}) \geq v(\{i\}) + v(\{j\})$ , 则可以称 Agent  $i$  和  $j$  是理性结盟 (Reasonable Alliance, RA). 记理性结盟的 Agent 集合为  $RA = \{\{i, j\} \mid v(\{i, j\}) \geq v(\{i\}) + v(\{j\})\}$ .

**定义 4** 我们将 Agent  $i$  和 Agent  $j$  的边际收益定义为:  $m(\{i, j\}) = v(\{i, j\}) - v(\{i\}) - v(\{j\})$ . 从该定义我们可以看出,理性结盟就是能为 Agent 带来正值边际收益的 Agent 结盟.

**定义 5** 博弈配置是一个三元组,表示的是博弈的一种配置. 定义为  $IPV = (I, P, V)$ , 其中  $I = \{i \mid f(i) = i\}$ ,  $P = \{(j, h) \mid f(j) = h, j \neq h\}$ ,  $V = \sum_{i \in I} v(i) + \sum_{\{j, h\} \in P} v(\{j, h\})$ , 表示的是 Agent 所能够获得的总收益,我们用  $IPVS$  表示所有的配置集合,记  $IPV_i \in IPVS, 0 \leq i \leq t$ , 其中  $t$  表示的是可能的配置方案数量.

**定义 6**<sup>[6]</sup> 令  $\mathbf{r}^N = (v(\{1\}), \dots, v(\{n\}))$  表示所有 Agent 不与其他任何人合作所能获得的收益向量. 对于收益向量  $\mathbf{r}, \mathbf{r} \geq \mathbf{r}^N$  当且仅当  $\mathbf{r}$  是合理收益向量. 给定任意收益向量  $\mathbf{r}$ , 对于每个 Agent  $i \in N$ , 定义 Agent  $i$  的净收益函数为  $L^i(\mathbf{r}) = \max\{r_i, v(\{i, h\}) - r_h, h \neq i\}$ .

**定理 1**<sup>[6]</sup> 如果一个配置  $(P^*, \mathbf{r}^*)$  是均衡分配,分配  $P^*$  是社会最优配置.

**证明** 设  $P^* = \{U_1^*, \dots, U_k^*\}$ , 我们取  $N$  中的配置  $P = \{U_1, \dots, U_l\}$ , 设  $K = \{U_i \mid |U_i| = 1, i \in I_l\}$ ,  $L = \{U_i \mid |U_i| = 2, i \in I_l\}$ . 因为  $(P^*, \mathbf{r}^*)$  是  $(N, v)$  中的一个配置, 故有  $\sum_{i=1}^k v(U_i^*) = \sum_{i \in N} r_i^*$ , 根据均衡配置的定义, 有:

$$\sum_{i=1}^k v(U_i^*) = \sum_{i \in N} r_i^* = \sum_{\{i\} \in K} r_i^* + \sum_{\{j, h\} \in L} (r_j^* + r_h^*) \geq \sum_{\{i\} \in K} v(\{i\}) + \sum_{\{j, h\} \in L} (v(\{j, h\})) = \sum_{j=1}^l v(U_j),$$

这表明分配  $P^*$  是社会最优配置.

### 3 社会最优分配求解算法

在资源配置中,假设 Agent  $i$  和  $j$  合作后的收益大于等于他们单独获得的收益和,也就是  $v(\{i, j\}) > v(\{i\}) + v(\{j\})$ , 那么它们就能够形成合作关系,因为合作后的收益是增加的,边际收益为  $m(\{i, j\}) = v(\{i, j\}) - v(\{i\}) - v(\{j\})$ . 因此,为了找到最优的社会分配,只有合作后边际收益为正数的 Agent 才能找

到形成最大总收益的分配. 具体社会最优配置求解算法(Society Optimal Allocation Algorithm, SOAA)执行过程可参见算法 1 伪代码.

算法 1: 社会最优配置求解算法(SOAA 算法)

输入: ①未进行分配的博弈配置 uIPVS; ②理性结盟 RA; ③智能体个数  $n$

输出: 社会最优配置 IPVS

SOAA(IPVS, RA,  $n$ )

```

1.  count ← 0;
2.  Create IPVS NIPVS; //创建 IPVS 集合
3.  for each IPV in uIPVS do
4.      if Exist  $\{i \in (I \in IPV), j \in (I \in IPV)\} \in RA$  then //存在理性的合作伙伴
5.           $P \leftarrow \{i, j\} \cup \{P \in IPV\}$  //取出合作伙伴  $i$  和  $j$ 
6.           $I \leftarrow I \setminus \{i\} \setminus \{j\}$ 
7.          value ←  $\sum_{i \in I} v(i) + \sum_{\{j, h\} \in P} v(\{j, h\})$  //计算两个合作伙伴的合作价值
8.          NIPVS ← NIPVS  $\cup (I, P, V)$ 
9.          count ← count + 1
10.     else
11.         NIPVS ← NIPVS  $\cup IPV$ 
12.     end if
13. end for
14. if count  $\neq 0$  then //递归调用
15.     SOAA(NIPVS, RA,  $n$ )
16. else
17.     return NIPVS 中具有最大社会最大收益的配置 IPVS
    
```

本算法采用递归方法. 在递归过程中, 将连续地减去不符合要求的 Agent 组合划分. 当树节点无法继续分区时, 这些节点就成了生成树的叶节点, 最大总收益的划分必须在生成树的叶节点上.

在本文算法中, 设有  $n$  个 Agent, 则可知算法的运行时间为  $T(n)$ . 该算法在最坏运行情况下,  $n$  个 Agent 每两两合作都可形成理性的合作伙伴, 因此:

$$T(n) = \begin{cases} C_n^2 T(n-2) & n > 2 \\ 1 & n = 2 \end{cases}$$

则  $T(n) = C_n^2 * C_{n-2}^2 * C_{n-4}^2 * \dots * C_2^2$ , 则  $T(n) = [n(n-1)/2] * [(n-2)(n-3)/2] * [(n-4)(n-5)/2] * \dots * [2 * 1/2] = n! / 2^{\frac{n}{2}} = O(n!)$

## 4 一种均衡利益分摊算法

在社会最优配置中, 对于不寻求合作关系的 Agent  $i$ , 其所得的收益  $r_i = v(\{i\})$ . 在本算法中, 假设优先级  $j > h$ , 通过  $r_j = v(\{j, h\}) - v(\{h\})$ ,  $r_h = v(\{h\})$  的方式初始化收益向量  $\mathbf{r}^0$ , 通过令  $r_j = L^j(r) = \max\{r_j, v(\{j, i\}) - r_i, i \neq j\}$ , 则 Agent  $j$  具有最大潜力收益  $r_j$ , 此时, Agent  $h$  的收益就为  $r_h = v(\{j, h\}) - r_j$ . 此时将生成新的收益向量  $\mathbf{r}^1 = (r_1^1, \dots, r_n^1)$ , 然后再次确定下合作 Agent 中的  $h$  的收益  $r_h$  与  $L^h(\mathbf{r}^1)$  的大小. 如果  $r_h \geq L^h(\mathbf{r}^1)$ , 则表明 Agent  $h$  满足均衡配置条件, 如果  $r_h < L^h(\mathbf{r}^1)$ , 则令  $r_h = L^h(\mathbf{r}^1)$ ,  $r_j = v(\{j, h\}) - r_h$  获得新的收益向量  $\mathbf{r}^2$ , 如此迭代, 最后所有的 Agent  $j$  都能满足约束条件  $r_j \geq L^j(\mathbf{r}^n)$ , 此时获得的收益向量为均衡配置收益向量  $\mathbf{r}^*$ . 具体利益均衡分摊算法(Equilibrium Utility Sharing Algorithm, EUSA)执行过程可参见算法 2 伪代码.

算法 2: 利益均衡分摊算法(EUSA 算法)

输入: 社会最优配置 IPVS

输出: 均衡配置收益向量  $\mathbf{r}^*$

EUSA(IPVS)

```

1.  for each IPV in IPVS do //遍历理性合作伙伴集合的每个合作伙伴
2.      for each  $i \in (I \in IPV)$  do
    
```

```

1.    $r_i \leftarrow v(\{i\})$ 
2.   end for
3.   for each  $(j, h) \in P$  do
4.      $r_j \leftarrow v(\{j, h\}) - v(\{h\})$  //分别计算  $j$  和  $h$  的收益
        $r_h \leftarrow v(\{h\})$ 
5.   end for
9.   while exit  $(i, j) \in \text{Partners}$  and  $r_i < L^i(r)$  //存在剩余价值
10.     $r_i \leftarrow L^i(r)$ ,
11.     $r_j \leftarrow v(\{i, j\}) - r_i$ 
12.  end while
13.   $r^* \leftarrow r^* \cup r$ 
14. end for
15. return  $r^*$ ;

```

由定理 1 可知,均衡配置一定满足社会最优分配的条件. 因此,我们可以通过先求得社会最优配置,以便寻找均衡配置. 假定社会最优配置中不寻求合作伙伴关系的 Agent  $i$  的收益为  $r_i = v(\{i\})$ ,对于形成联盟的 Agent 组合,通过  $r_j = v(\{j, h\}) - v(\{h\})$ ,  $r_h = v(\{h\})$  的方式使得每个的 Agent 都满足  $r_i^n \geq L^i(r^{n-1})$ ,当每个 Agent  $i$  都有  $r_i^n \geq L^i(r^{n-1})$ ,其收益收敛有  $r_i^n = r_i^{n-1}$ ,则收益向量  $r^n$  满足均衡分配. 证明如下:对于每个选择合作关系的 Agent  $i$ ,有  $r_i^n \geq L^i(r^{n-1}) \geq v(\{i, j\}) - r_j^n$  ( $i \neq j$ ),即  $r_i^n + r_j^n \geq v(\{i, j\})$ .

在  $n$  个 Agent 情况下的算法运行时间为  $T(n)$ ,最坏运行情况需要经过  $k$  次 while 循环退出,每次循环所需要的时间为  $(n/2) * (n/2) + (n/2) * (n/2) = n^2/2$ ,故  $T(n) = (1/2) * kn^2 = O(n^2)$ .

## 5 案例与分析

本节列举一个实际应用案例,为了便于理解和计算,取智能体的个数  $n=5$ .

在一次人才引进中,苏北人民医院人事处引进了 5 个护士,分别为护士 A,护士 B,护士 C,护士 D,护士 E. 苏北人民医院计划将这 5 个护士分配到 3 个病房,且每个病房至多配备 2 个护士且至少配备 1 个护士. 经过院人力资源管理部发现,不同的护士分配到不同的病房,其产生的收益是不同的:将护士 A 单独分配到一个病房可产生 100 收益值,将护士 B 单独分配到一个病房可产生 300 收益值,将护士 C 单独分配到一个病房可产生 400 收益值,将护士 D 单独分配到一个病房可产生 700 收益值,将护士 E 单独分配到一个病房可产生 100 收益值;而护士 A 与其他护士 B, C, D, E 结盟分配到同一病房可产生合作收益值分别为 100 收益值, 600 收益值, 1100 收益值, 700 收益值;护士 B 与其他护士 C, D, E 结盟分配到同一病房可产生合作收益值分别为 1 200 收益值, 800 收益值, 300 收益值;护士 C 与其他护士 D, E 结盟分配到同一病房可产生合作收益值分别为 1 600 收益值, 1 700 收益值;护士 D 与其他护士 E 结盟分配到同一病房可产生合作收益值分别为 400 收益值;

对上述案例进行建模,记为  $(N, v)$ , 其中:

$$\begin{aligned}
 N &= \{A, B, C, D, E\}; \\
 v(\{A\}) &= 100, v(\{B\}) = 300, v(\{C\}) = 400, v(\{D\}) = 700, v(\{E\}) = 100; \\
 v(\{A, B\}) &= 100, v(\{A, C\}) = 600, v(\{A, D\}) = 1100, v(\{A, E\}) = 700; \\
 v(\{B, C\}) &= 1200, v(\{B, D\}) = 800, v(\{B, E\}) = 300; \\
 v(\{C, D\}) &= 1600, v(\{C, E\}) = 1700; \\
 v(\{D, E\}) &= 400;
 \end{aligned}$$

根据 RA 的定义,有  $RA = \{\{A, C\}, \{A, D\}, \{A, E\}, \{B, C\}, \{C, D\}, \{C, E\}\}$ . 初始  $IPVS = \{\{A\}, \{B\}, \{C\}, \{D\}, \{E\}\}$ , 则有

$NIPVS = \{\{\{A, C\}, \{B\}, \{D\}, \{E\}\}, \{\{A, D\}, \{B\}, \{C\}, \{E\}\}, \{\{A, E\}, \{B\}, \{D\}, \{C\}\}, \{\{B, C\}, \{A\}, \{D\}, \{E\}\}, \{\{D, C\}, \{B\}, \{A\}, \{E\}\}\}$ .

令  $IPVS = NIPVS$ , 则对于  $IPV = \{\{A, C\}, \{B\}, \{D\}, \{E\}\}$ , 递归执行后,集合  $I$  中的 Agent 为  $\{B, D, E\}$ . 对于  $IPV = \{\{\{A, D\}, \{B\}, \{C\}, \{E\}\}\}$ , 递归执行后,集合  $I$  的 Agent 为  $\{B, C, E\}$ , 其两两结盟有  $P = \{\{B, C\},$

$\{C, E\} \subseteq RA$ , 则  $IPV$  递归后有  $IPV = \{\{A, D\}, \{B\}, \{C\}, \{E\}\} \Rightarrow \{\{A, D\}, \{B, C\}, \{E\}\}, \{\{A, D\}, \{B\}, \{C, E\}\}$ .

同理对于  $IPV = \{A, D\}, \{B\}, \{C\}, \{E\} \Rightarrow \{\{A, E\}, \{C, D\}, \{B\}\}, \{\{A, E\}, \{D\}, \{B, C\}\}$ , 对于  $IPV = \{B, C\}, \{A\}, \{D\}, \{E\} \Rightarrow \{\{B, C\}, \{A, D\}, \{E\}\}, \{\{B, C\}, \{A, E\}, \{D\}\}$ , 对于  $IPV = \{D, C\}, \{B\}, \{A\}, \{E\} \Rightarrow \{D, C\}, \{A, E\}, \{B\}$ , 自此, 每个配置都只剩下一个集合  $I$  的 Agent, 无法再形成  $RA$ , 此时我们计算每个配置的收益值. 对于配置  $\{A, D\}, \{B, C\}, \{E\}$ , 可获得收益  $v(\{A, D\}) + v(\{B, C\}) + v(\{E\}) = 2\ 400$ ; 对于配置  $\{A, D\}, \{B\}, \{C, E\}$ , 可获得收益  $v(\{A, D\}) + v(\{B\}) + v(\{C, E\}) = 3\ 100$ ; 对于配置  $\{A, E\}, \{C, D\}, \{B\}$ , 可获得收益  $v(\{A, E\}) + v(\{B\}) + v(\{C, D\}) = 2\ 600$ ; 对于配置  $\{A, E\}, \{D\}, \{B, C\}$ , 可获得收益  $v(\{A, E\}) + v(\{D\}) + v(\{B, C\}) = 2\ 600$ ; 对于配置  $\{B, C\}, \{A, D\}, \{E\}$ , 可获得收益  $v(\{B, C\}) + v(\{E\}) + v(\{A, D\}) = 2\ 400$ ; 对于分配  $\{B, C\}, \{A, E\}, \{D\}$ , 可获得收益  $v(\{B, C\}) + v(\{A, E\}) + v(\{D\}) = 2\ 600$ ; 对于配置  $\{D, C\}, \{A, E\}, \{B\}$ , 可获得收益  $v(\{C, D\}) + v(\{A, E\}) + v(\{B\}) = 2\ 600$ ; 收益值最大的分配为  $\{A, D\}, \{B\}, \{C, E\}$ , 其收益值为 3 100, 故该分配为社会最优配置. 图 1 表示的是本案例“社会最优配置求解算法”的执行过程:

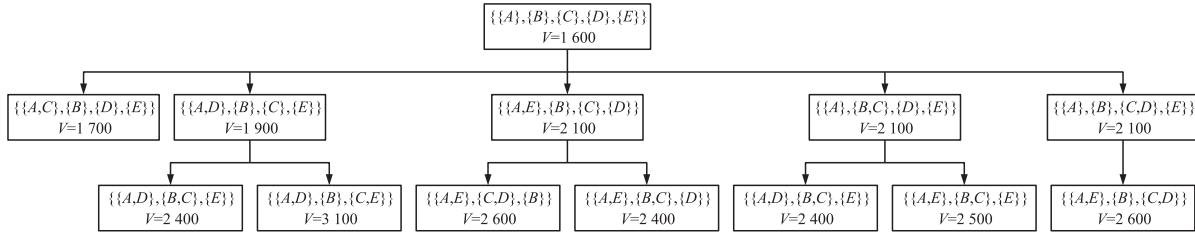


图 1 寻找社会最优配置生成树

Fig. 1 The spanning tree for searching socially optimal assignment

收益的配置方式直接影响护士联盟的形成. 定义收益向量  $\mathbf{r} = (r_A, r_B, r_C, r_D, r_E)$ ,  $r_i$  表示的是护士  $i$  所获得的收益. 社会最优配置是  $\{A, D\}, \{B\}, \{C, E\}$ , 令初始收益向量  $\mathbf{r} = (100, 300, 400, 1\ 000, 1\ 300)$ ; 在这个社会最优配置中护士  $A$  与护士  $D$  结盟被配置到同一病房, 护士  $C$  与护士  $E$  结盟被分配到同一病房, 护士  $B$  单独被配置到一病房, 则护士  $B$  产生的收益值  $r_B = v(\{B\}) = 300$ ;  $r_A^1 = L^A(\mathbf{r}) = v(\{A, C\}) - r_C \neq r_A$ ,  $r_D^1 = v(\{A, D\}) - r_A^1 = 900$ ,  $r_C^1 = L^C(\mathbf{r}) = v(\{B, C\}) - r_B \neq r_C$ ;  $r_E^1 = v(\{C, E\}) - r_C^1 = 800$ . 因此  $\mathbf{r}^1 = (200, 300, 900, 900, 800)$ ,  $\mathbf{r}^2 = (200, 300, 900, 900, 800)$ , 所以, 护士产生的收益值向量  $\mathbf{r}^* = (200, 300, 900, 900, 800)$  是本案例的一个均衡配置收益, 能保证护士联盟稳定, 不脱离现有的联盟关系.

## 6 结语

模型化医疗资源为智能体, 并以资源配置均衡和最大化医疗资源总体收益为目标, 本文提出了两个算法, 其能够在医疗资源配置中计算得到一个符合均衡配置收益向量, 并给出配置护士到病房的应用案例, 表明所求得的收益向量是稳定的. 此外, 如果在资源配置过程中, 如果存在较多的潜在结盟, 求解社会最优配置的算法仍然需要较多的时间. 在未来的工作中, 我们将继续探究一种更加高效可靠的近似算法以便求得社会最优配置.

## 【参考文献】

- [1] 吴琪, 苗瑞, 宋雨沁, 等. 面向分级诊疗的医疗资源配置决策研究[J]. 工业工程与管理, 2018, 23(3): 150–156.
- [2] 黄舒婷, 庞震苗, 邹晓琦, 等. 基于数据包络分析的广东省中医医院医疗资源配置效率分析[J]. 中国卫生统计, 2017(1): 118–120.
- [3] HERRERA J G, BOTERO J F. Resource allocation in NFV: a comprehensive survey[J]. IEEE transactions on network & service management, 2017, 13(3): 518–532.
- [4] SFAR A R, CHALLAL Y, MOYAL P, et al. A game theoretic approach for privacy preserving model in IoT-based transportation[J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2019(99): 1–10.

- [5] CINTUGLU M H, MARTIN H, MOHAMMED O A. Real-time implementation of multiagent-based game theory reverse auction model for microgrid market operation[J]. IEEE transactions on smart grid, 2015, 6(2):1064–1072.
- [6] 张映芹, 王青. 我国城乡医疗卫生资源配置均衡性研究[J]. 医学与社会, 2016(1):7–9.
- [7] 曹宇, 温小霓. 基于系统动力学模型的医疗资源配置与优化[J]. 现代医院管理, 2012, 1:19–23.
- [8] WEN T, ZHANG Z, QIU M, et al. A multi-objective optimization method for emergency medical resources allocation[J]. Journal of medical imaging and health informatics, 2017, 7(2):393–399.
- [9] EICHBAUM, QUENTIN. Better allocation and sharing of resources in global medical education[J]. Academic medicine, 2017, 92(10):1363.
- [10] ZHU M, CHEN R, ZHONG S, et al. Medical resource preparation and allocation for humanitarian assistance based on module organization[J]. Minerva medica, 2017, 108(1):20.
- [11] ZHANG X, WU K. The construction of evaluation model of Chinese traditional culture multimedia teaching resources allocation in big data environment[C]//International Conference on Intelligent Transportation. IEEE Computer Society, 2018.
- [12] KUNST R, AVILA L, PIGNATON E, et al. Improving network resources allocation in smart cities video surveillance[J]. Computer networks, 2018, 134:228–244.
- [13] FERDOWSI A, SANJAB A, SAAD W, et al. Game theory for secure critical interdependent gas-power-water infrastructure[J]. IEEE resitence week (RWS), 2017:184–190.
- [14] SERRANO R. Cooperative game core and shapely value[M]. Encyclopedia of Complexity and System Science. Berlin: Springer-Verlag, 2007.
- [15] FELE F, MAESTRE J M, CAMACHO E F. Coalitional control: cooperative game theory and control[J]. IEEE control systems, 2017, 37(1):53–69.
- [16] CHENG J Q, WELLMAN M P. The WALRAS algorithm: a convergent distributed implementation of general equilibrium outcomes[J]. Computational economics, 1998, 12(1):1–24.
- [17] HERNÁNDEZ, ROBERTO, CÁRDENAS, et al. Game theory applied to transportation systems in smart cities: analysis of evolutionary stable strategies in a generic car pooling system[J]. International journal on interactive design and manufacturing, 2017.
- [18] XIAO-HUI Y U, ZHANG Q. Profit allocation in production cooperative game based on interval shapley value[J]. Transaction of Beijing Institute of Technology, 2008, 28(7):655–658.
- [19] ZHANG F, ZHENG Z, JIAO L. Dynamically optimized sensor deployment based on game theory[J]. Journal of systems science and complexity, 2018, 31(1):276–286.
- [20] GENG C, QU S Y, XIAO Y Y. Diffusion mechanism simulation of cloud manufacturing complex network based on cooperative game theory[J]. Journal of systems engineering and electronics, 2018, 29(2):103–117.
- [21] KUIPERS J, MOSQUERA M A, ZARZUELO, JOSÉ M. Zarzuelo. Sharing costs in highways: a game theoretic approach[J]. European journal of operational research, 2013, 228(1):158–168.

[责任编辑:陆炳新]