

# 面向延时敏感患者的转诊系统定价与能力规划<sup>①</sup>

陈妍<sup>1</sup>, 周文慧<sup>2\*</sup>, 华中生<sup>3</sup>, 单汨源<sup>1</sup>

(1. 湖南大学工商管理学院, 长沙 410082; 2. 华南理工大学工商管理学院, 广州 510640;  
3. 浙江大学管理学院, 杭州 310058)

**摘要:** 针对我国当前社区医院首诊而后向上转诊系统中医疗资源利用严重失衡的现状, 研究了我国医疗转诊系统的服务能力设计与定价问题. 通过建立一个排队和博弈的集成模型, 分析了延时敏感病人选择行为下, 三甲医院以利润最大化、社区医院以服务人数最大化的不同目标的竞争均衡. 发现社区医院的最优服务能力随政府的补贴递增、三甲医院的诊疗费在政府补贴超过某个阈值时开始下降. 结果表明政府的补贴政策是医疗转诊体系优化设计中有效的协调机制.

**关键词:** 延时敏感; 转诊系统; 服务能力; 定价

**中图分类号:** F282      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1007-9807(2015)04-0073-11

## 0 引言

我国现行医疗卫生服务系统面临由资源利用严重失衡引发的供需矛盾, 有效的政策和运作管理可以优化资源配置、提高资源的使用效能. 我国当前医疗资源总体较丰富, 实行由社区医院首诊而后向上转诊的医疗保险制度, 但目前全国普遍三甲医院人满为患, 社区医院却门可罗雀, 日均诊疗量仅为十余人<sup>[1]</sup>. 这种医疗资源利用失衡使得我国“看病难”和“看病贵”的形势依然严峻. 因此, 为调节分流病人、有效利用医疗资源, 本文结合实际当中延时敏感的病人, 研究我国转诊医疗服务系统的能力设计和定价问题.

近年来, 国外学者对于最优化利用医疗资源的定量分析多使用排队理论建模. McManus等<sup>[2]</sup>研究了ICU室的最优床位数, Green和Linda<sup>[3]</sup>研究实现减少医疗交付的延迟, Griffiths等<sup>[4]</sup>、Green等<sup>[5]</sup>则分析了医院容量、等候时间及病人服务之间的关系与平衡. Goddard和Tavakolib<sup>[6]</sup>研究了

手术排队等候清单及优先权的设定, 提出基于需求“定量供给”来配置有限的医疗资源; Yankovic和Green<sup>[7]</sup>则同时考虑时变需求下床位和护士两种资源的配置问题. 关于此类的综述性文献可参见Fomundam等<sup>[8]</sup>、Soni等<sup>[9]</sup>. 目前涉及整个国家或地区医疗体系的协调优化研究还较少, Thunhurst<sup>[10]</sup>比较了发达国家和发展中国家的公共医疗服务系统; Sadat等<sup>[11]</sup>则利用约束理论就公共医疗系统的性能改善方面进行了研究. 国内也有一些学者开始开展医疗运作管理领域的研究, 如赵卫东等<sup>[12]</sup>、刘作仪<sup>[13]</sup>、陈超等<sup>[14]</sup>学者结合中国实际, 通过拓展能力分配模型研究了我国社区医院的病房能力分配. 而孟潇等<sup>[15]</sup>则就我国医疗服务业中医疗资源配置不平衡现象, 通过结构方程模型分析了医疗机构的融资问题. 综述类文献可参见杜少甫等<sup>[16]</sup>.

在Afèche和Mendelson<sup>[17]</sup>、Michael等<sup>[18]</sup>等越来越多关于企业(主要是服务业)市场策略的

① 收稿日期: 2013-12-25; 修订日期: 2014-10-13.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71271089; 71131003; 71090403; 71090400); 广东省哲学社会科学“十二五”规划一般资助项目(GD12CGL16); 教育部新世纪人才资助项目(NCET-12-0191).

通信作者: 周文慧(1976—), 男, 湖南郴州人, 博士, 教授. Email: whzhou@scut.edu.cn

文献中,延时被作为服务质量的重要度量,在讨论服务需求时需要考虑顾客的延时敏感性.顾客在等待时的急躁心理与其他机会成本共同形成延时成本,这个延时成本通常随等待时间的延长而增大,使得顾客接受服务的效用值降低,进而影响到他们的选择行为.例如,在呼叫中心、数字通讯、交通运输、银行、医院及政府等服务中,都会出现顾客因等待服务时间过长而离开的情形.对医疗服务系统的研究,也需要考虑病人的延时敏感性.此时,影响病人选择的不仅仅是价格,还有等待时间. Naor<sup>[19]</sup>是第一个利用排队模型研究延时敏感顾客对定价的影响,他考虑一类在  $M/M/1$  排队系统中的顾客,假设他们的延时成本为延时与某一正常数之积.在此之后,许多学者采用同样的设置研究延时敏感顾客对系统策略的影响<sup>[20-28]</sup>.

从上述文献可以发现,在对服务系统的定价策略与能力规划研究中,已经有越来越多的学者考虑到顾客的延时敏感性.在医疗服务运作管理领域中,也有一部分是面向延时敏感病人的研究,但主要都集中在如何根据病人的到达需求匹配相应的床位、医生、护士、手术室等医疗资源,对整个医疗体系的优化、设计关注极少.目前,还没有文献专门针对我国这种转诊医疗系统,研究如何通过竞争和政府协调机制实现最优定价与服务能力设计.本文考虑由一家最大化服务量的社区医院和一家利润导向的三甲医院组成的两级转诊医疗服务系统,研究延时敏感病人的行为选择以及医院间的竞争均衡,并讨论政府如何采取对三甲医院进行征税和对社区医院进行补贴的政策协调整个转诊系统.为此,本文将在病人、医院和政府三方中建立一个两阶段的 Stackelberg 博弈过程.

## 1 模型描述

考虑转诊系统中的两家医院,一家是看病收费的三甲医院,记作  $H_A$ ;另一家是具有公益性质的社区医院,记作  $H_C$ .实际中,社区医院与三甲医院相比收费低廉且报销比例大,在本模型中视为免费服务.两家医院分别形成一个  $M/M/1$  排队系统,服务时间服从独立同指数分布,服务规则均为先到达先服务 (FCFS).类似于 Chen 和

Frank<sup>[21]</sup>,假设短期内  $H_A$  的服务资源是不变的,即有固定的服务能力  $\mu_A$ ,单位时间内服务成本为  $c_1$ ,它对直接到达就诊的病人收取统一的诊疗费  $p$ .  $H_C$  对参加过政府医疗保险的病人提供免费服务,平均服务能力为  $\mu_C$ ,单位时间的服务成本为  $c_2$ .进一步假设,  $H_A$  较  $H_C$  有更好的医疗水平和医疗条件,因此所有病人都可在  $H_A$  被治愈,而  $H_C$  的治愈率为  $1 - \alpha$  (其中  $0 < \alpha < 1$ ).我国对社会保险实施以社区医院为首选的定点医疗及转诊制度,在社区医院未治愈者可向上转诊到三甲医院继续治疗,这部分转诊病人依据医保政策在三甲医院享有报销比例为  $1 - \theta$  ( $0 < \theta < 1$ ) 的费用优惠,也就是说,这部分病人实际需支付  $\theta p$  的诊疗费.

Michael 等<sup>[18]</sup>、王崇和李一军等<sup>[29]</sup>等讨论顾客的选择行为时都应用了顾客感知价值.与 Zaithaml 在 1988 年给出的定义一致, Sharma 等<sup>[30]</sup>认为感知价值反映了消费者对决策对象的主观判断和总体评价.同 Michael 等<sup>[18]</sup>,本文直接设病人对医疗服务的感知价值为  $U$  而并不关注其具体构成.病人对延时敏感且有相同的单位延时成本  $h$ .病人到达医院的过程服从泊松过程,潜在到达率为  $\Lambda$ .假设病人在到达前不能观测到队长并且到达后就不会离开.记病人直接进入  $H_A$  的到达率为  $\lambda_A$ 、 $H_C$  的首诊到达率为  $\lambda_C$  ( $\lambda_A + \lambda_C \leq \Lambda$ ).在非紧急救治情况下,病人有两类选择:一是到  $H_C$  免费首诊;二是支付诊疗费  $p$  直接去  $H_A$  就诊. Chen 和 Wan<sup>[24]</sup>以及 Afanasyev 和 Mendelson<sup>[31]</sup>都指出,延时敏感顾客是否进入某企业取决于服务的“净效用值”——顾客感知的总价值减去价格和延时成本.其中,延时成本是关于等候时间线性的,若令  $W(\lambda_i, \mu_i)$  ( $i = A, C$ ) 为就诊病人的期望等候时间,则他们的延时成本为  $hW(\lambda_i, \mu_i)$ .病人选择进入一家医院当且仅当其净效用值  $U - p - hW(\lambda_i, \mu_i)$  非负.

将  $H_A$  与  $H_C$  的竞争建立为一个以  $H_A$  为领导者、 $H_C$  为跟随者的 Stackelberg 博弈模型:首先,  $H_A$  决策诊疗费  $p$  以最大化自身利润;然后,在观测到  $p$  后,  $H_C$  选择服务能力  $\mu_C$  以实现服务人数最大化的目标.在这一系统中,政府采取税收和补贴政策协调两医院的竞争.政府对  $H_A$  收税为  $T$  ( $T \geq 0$ ),同时对  $H_C$  提供总额为  $B$  ( $B > 0$ ) 的

补贴.此外,以就医率为目标的我国政府对医疗服务实施指导定价,则由  $U - p - \frac{h}{\mu_A - \alpha\lambda_C - \lambda_A} > U - p - \frac{h}{\mu_A - \Lambda} \geq 0$  给定收费上限为  $U - \frac{h}{\mu_A - \Lambda}$ , 同时假设  $H_A$  服务能力足够大以使  $\Lambda < \mu_A$ . 此时,病人进入  $H_A$  总获得正的净效用.

引理1 当  $p \leq U - \frac{h}{\mu_A - \Lambda}$  时,所有病人都会选择去医院就诊,即  $\lambda_A + \lambda_C = \Lambda$ .

论文关注已经存在的转诊体系中病人到达受服务能力和价格的影响,因此不考虑这种两级医疗系统不存在的情形.

假设1 诊疗费  $p$  有下界  $\frac{c_1\mu_A + T}{\theta\alpha\Lambda}$ .

假设1表明诊疗费不能低于  $H_A$  在只有转诊病人就医时的平均成本,否则  $H_A$  会因利润小于零而退出市场.此外,为保证诊疗费  $p$  逻辑上存在,其下界应低于指导定价的上限,于是有

假设2 病人的感知效用值  $U$  足够大,使得  $\frac{c_1\mu_A + T}{\theta\alpha\Lambda} < U - \frac{h}{\mu_A - \Lambda}$  成立.

为了求得医院  $H_A$  与  $H_C$  之间 Stackelberg 博弈的均衡解,论文采取逆向归纳法.从讨论病人的选择行为开始,先在给定诊疗费  $p$  的情况下研究  $H_C$  的最优服务能力决策问题,然后再求解  $H_A$  的最优定价决策.

## 2 病人选择行为

病人决策到  $H_C$  首诊或直接到  $H_A$  看病以最大化自己的期望净效用.若病人直接进入  $H_A$ ,净效用值(记为  $U_A$ )等于感知价值  $U$  减去全费用的差,其中  $H_A$  的实际到达率为  $\lambda_A$  与经  $H_C$  首诊后部分未治愈的转诊病人  $\alpha\lambda_C$  之和;若病人选择在  $H_C$

$$\lambda_C^* = \frac{A_0(1-\alpha)\mu_C - A_0A_2 - 2A_1 + \sqrt{[A_0(1-\alpha)\mu_C + A_0A_2]^2 + 4A_1^2}}{2A_0(1-\alpha)} \quad (6)$$

其中  $A_0 = p(1-\theta\alpha)$ ,  $A_1 = (1-\alpha)h$ ,  $A_2 = \mu_A - \Lambda$ ; 否则,  $H_C$  的首诊率  $\lambda_C^* = 0$ .

首诊,其净效用值(记为  $U_C$ )由两部分组成,一部分是在  $H_C$  被治愈的期望净效用值,另一部分是未被治愈而需转诊的期望净效用值,其中病人在  $H_C$  看病的费用为零,但若转诊进入  $H_A$  则要支付费用  $\theta p$ . 即

$$U_A = U - p - \frac{h}{\mu_A - \alpha\lambda_C - \lambda_A} \quad (1)$$

$$U_C = (1-\alpha)\left(U - \frac{h}{\mu_C - \lambda_C}\right) + \alpha\left(U - \frac{h}{\mu_C - \lambda_C} - \frac{h}{\mu_A - \alpha\lambda_C - \lambda_A} - \theta p\right) = U - \frac{h}{\mu_C - \lambda_C} - \frac{\alpha h}{\mu_A - \alpha\lambda_C - \lambda_A} - \alpha\theta p \quad (2)$$

记  $\lambda_A^*$  和  $\lambda_C^*$  分别为进入  $H_A$  和  $H_C$  的病病人的均衡到达率,很容易有如下结论<sup>②</sup>:

定理1 两家医院的病人均衡到达率  $(\lambda_A^*, \lambda_C^*)$  满足下式

$$p(1-\theta\alpha) = \frac{h}{\mu_C - \lambda_C^*} - \frac{(1-\alpha)h}{\mu_A - \alpha\lambda_C^* - \lambda_A^*} \quad (3)$$

## 3 社区医院的服务能力设计

社区医院作为公共医疗服务机构,其目标是在政府补贴  $B$  下通过设定服务能力  $\mu_C$  最大化服务人数,即首诊率  $\lambda_C$ . 于是

$$\max_{\mu_C \geq 0} \lambda_C(\mu_C) \quad (4)$$

$$\text{s. t. } B \geq c_2\mu_C \quad (5)$$

由引理1以及定理1,可以推导得出均衡条件下  $H_C$  的首诊率  $\lambda_C^*$ .

定理2 当且仅当  $\mu_C \geq \frac{\mu_A - \Lambda}{1-\alpha}$ , 医院  $H_C$  的首诊率

定理2表明,受政府补贴的社区医院  $H_C$  必须达到一定规模以上,即服务能力  $\mu_C$  不应小于三甲

② 文中所有证明都在附录中给出.

医院  $H_A$  的剩余服务能力与  $H_C$  治愈率的比值, 否则病人会因其净效用值太低而不去  $H_C$  首诊.

推论 1 当  $\mu_C \geq \frac{\mu_A - \Lambda}{1 - \alpha}$ ,  $\lambda_C^*$  随服务能力  $\mu_C$

的提高而增大, 即  $\frac{\partial \lambda_C^*}{\partial \mu_C} > 0$ .

根据定理 2,  $H_C$  的决策问题为

$$\max_{\mu_C \geq 0} \lambda_C^*(\mu_C) = \frac{A_0(1 - \alpha)\mu_C - A_0A_2 - 2A_1 + \sqrt{[A_0(1 - \alpha)\mu_C + A_0A_2]^2 + 4A_1^2}}{2A_0(1 - \alpha)} \quad (7)$$

$$\text{s. t. } B \geq c_2\mu_C \quad (8)$$

$$\mu_C \geq \frac{\mu_A - \Lambda}{1 - \alpha} \quad (9)$$

定理 3 给定  $H_A$  的诊疗费  $p$ , 若  $B \geq \frac{c_2(\mu_A - \Lambda)}{1 - \alpha}$  则社区医院  $H_C$  的最优服务能力为  $\mu_C^* = B/c_2$ , 此时  $\lambda_C^* > 0$ ; 否则社区医院将退出市场, 即  $\lambda_C^* = 0$ .

定理 3 表明了政府补贴对社区医院首诊率的影响, 仅当补贴达到一定额度以上 ( $B \geq \frac{c_2(\mu_A - \Lambda)}{1 - \alpha}$ ),  $H_C$  才会有病人就诊.

### 4 三甲医院的定价策略

预期到  $H_C$  的这种服务能力规划, 三甲医院

$$p_0 = \frac{A_1 [(1 - \alpha)(\Lambda - A_3\mu_C^*) + A_2A_3]}{A_3 [(1 - \alpha)\mu_C^* + A_2] \sqrt{(1 - \alpha)(2A_3\mu_C^* - \Lambda) [(1 - \alpha)\Lambda + 2A_2A_3]}}$$

其中  $A_1 = (1 - \alpha)h$ ,  $A_2 = \mu_A - \Lambda$ ,  $A_3 = (1 - \theta\alpha)/2$ .

定理 4 三甲医院  $H_A$  在满足  $\Lambda < \mu_A \leq \Lambda + \frac{1 - \alpha}{1 - \theta\alpha} \cdot \Lambda$  时有最优诊疗费策略  $p^*$  并且:

1) 当  $\frac{c_2(\mu_A - \Lambda)}{1 - \alpha} \leq B \leq \frac{c_2\Lambda}{1 - \theta\alpha}$ , 即  $\frac{\mu_A - \Lambda}{1 - \alpha} \leq \mu_C^* \leq \frac{\Lambda}{1 - \theta\alpha}$  时,  $p^* = U - \frac{h}{\mu_A - \Lambda}$ ;

2) 当  $B > \frac{c_2\Lambda}{1 - \theta\alpha}$ , 即  $\mu_C^* > \frac{\Lambda}{1 - \theta\alpha}$  时, 有  $p^* = \min\left\{p_0, U - \frac{h}{\mu_A - \Lambda}\right\}$ .

定理 4 表明了社区医院的服务能力设计是如何影响三甲医院的诊疗费制定策略的. 当社区医院的服务能力设计较小 ( $\frac{\mu_A - \Lambda}{1 - \alpha} \leq \mu_C^* \leq$

$H_A$  则通过选择诊疗费  $p$  以最大化其期望利润  $\pi(p)$ . 注意到它的服务能力满足  $\mu_A > \Lambda$ , 因此其决策不受服务能力的限制, 决策模型可表示为

$$\begin{aligned} \max_{p \geq 0} \pi(p) &= p\lambda_A + \theta p\alpha\lambda_C - c_1\mu_A - T \\ \text{s. t. } \frac{c_1\mu_A + T}{\theta\alpha\Lambda} &\leq p \leq U - \frac{h}{\mu_A - \Lambda}. \end{aligned}$$

命题 1 三甲医院的利润  $\pi(p)$  是关于诊疗费  $p$  的凹函数.

由此, 当诊疗费逐渐上涨的时候, 三甲医院的利润呈现出先随之增大而后回落减少的情形. 也就是说, 实际当中对于希望创收的三甲医院而言, 诊疗费也并非越高越好. 为了更好的表述如下定理. 定义:

$\frac{\Lambda}{1 - \theta\alpha}$ ) 时, 三甲医院的利润随诊疗费的升高而增大. 此时政府的指导定价是一个紧约束, 即三甲医院以政府的限价作为最优诊疗费决策. 而当社区医院的服务能力足够大 ( $\mu_C^* > \frac{\Lambda}{1 - \theta\alpha}$ ) 时, 其市场竞争力增大, 此时若政府限价较宽松, 则三甲医院可选取使利润达到最大时相应的诊疗费作为最优策略; 否则, 仍只能以政府的限价为最优策略. 同时由定理 4 的证明过程得知, 三甲医院其服务能力若超过病人到达总量近一倍时, 会因运作成本过高无法盈利而退出市场.

因此, 在以三甲医院为领导者、社区医院跟随的 Stackelberg 博弈中, 三甲医院的服务能力应满足  $\Lambda < \mu_A \leq \Lambda + \frac{1 - \alpha}{1 - \theta\alpha} \cdot \Lambda$ , 并且在政府补贴  $B \geq \frac{c_2(\mu_A - \Lambda)}{1 - \alpha}$  时, 存在唯一的均衡策略. 在均

衡点,通过对政府补贴、成本等参数做比较静态分析,可以得到关于均衡解的一些性质.

推论2 在两家医院的竞争均衡下,

(I) 社区医院的服务能力  $\mu_c^*$  关于补贴  $B$  递增,关于服务率成本  $c_2$  递减.

(II) 当补贴  $B$  在  $\left[ \frac{c_2(\mu_A - \Lambda)}{1 - \alpha}, \frac{c_2\Lambda}{1 - \theta\alpha} \right]$  之间时,诊疗费  $p^*$  不随  $B$  变化,却随三甲医院服务能力  $\mu_A$  的提高而上升,随病人到达总量  $\Lambda$  的扩大而下降.

(III) 当补贴  $B > \frac{c_2\Lambda}{1 - \theta\alpha}$  时,若政府的限价满足  $U - \frac{h}{\mu_A - \Lambda} > p_0$ ,则诊疗费  $p^*$  随  $B$  的增大而下降;否则,诊疗费不随  $B$  改变.

(IV) 社区医院的到达率  $\lambda_c^*$  随诊疗费  $p$  的升高而增大.

在推论2中,结论(I)表明,政府对社区医院的补贴越多,其服务能力越高;而在补贴一定的情况下,单位时间服务成本的增加会起到相反作用.当补贴在较小范围内时,社区医院难以与三甲医院竞争,此时,所有病人都到三甲医院就医,三甲医院的收益随诊疗费升高而增大;但受政府限价影响,三甲医院只有在提升服务能力后考虑到相应增加的服务成本才能提高收费标准,在病人到达总量扩大时反而要降低诊疗费以保证公众就医率,因此,该情形下三甲医院并不能真正实现最大利润.而结论(III)表明,当政府投入补贴超过某个阈值时,社区医院与三甲医院形成激烈竞争,此时三甲医院在社区医院服务能力不断增强的情形下不得不考虑通过降价来吸引病人.三甲医院提高诊疗费会促使到社区医院首诊病人增多的结论是很直观的.

## 5 数值分析

### 5.1 政府补贴 $B$ 对系统性能的影响

下文检验补贴  $B$  对此转诊医疗系统性能的

影响. 设定参数为:

$$c_1 = 1.1, c_2 = 1, \alpha = 0.3, \theta = 0.6, h = 15, \\ U = 120, \Lambda = 1, T = 1, \mu_A = 1.5.$$

图1描述了在满足条件  $\Lambda < \mu_A \leq \frac{(2 - \alpha)\Lambda}{1 - \theta\alpha}$

下,转诊系统内两家医院的均衡策略受政府补贴的影响.在图1-1中,当  $B < B_0$  时,社区医院首诊人数为零,图1-3显示三甲医院的诊疗费取政府限价,由于吸引了全部病人,其利润也达到最大,见图1-4.图1-2表明,补贴一旦超过  $B_0$ ,社区医院的服务能力开始随之递增,同时引起了图1-1中两家医院病人到达率的显著变化:超过40%的病人从三甲医院转而进入社区医院,并且首诊人数随补贴增加迅速增多.由图1-3和1-4可观察到,补贴从  $B_0$  增加到  $B_1$  期间,三甲医院仍取政府限价,但利润开始迅速下滑,这是因为越来越多的病人从三甲医院转到社区医院.从补贴超过  $B_1$  开始,图1-2所示社区医院服务能力越来越接近三甲医院,竞争压力下三甲医院采取了降价对策(如图1-3).这种降价策略使得图1-1中三甲医院的病人到达数反弹增加,同时也带来了图1-4利润的小幅上涨.社区医院的服务能力随补贴增加继续增强,到  $B = 1.5$  时  $\mu_c = \mu_A$ ,之后三甲医院的降价策略作用越来越有限,从图1-1中可以看到  $\lambda_A$  经过短期上升之后开始下降至零,图1-3显示诊疗费最后设置在下限,三甲医院此时的收益仅能维持运转(如图1-4).由此可见,政府补贴政策可以对转诊体系中病人分流和诊疗费设定都起到显著的协调作用.

### 5.2 病人到达总量 $\Lambda$ 对系统性能的影响

下文探讨不同补贴对应社区医院服务能力不同竞争力时病人到达总量  $\Lambda$  对医疗系统性能的影响,其竞争力定义为社区医院与三甲医院服务能力的比值.假设模型参数如下:

$$c_1 = 1.1, c_2 = 1, \alpha = 0.3, \theta = 0.6, h = 15, \\ U = 120, T = 1, \mu_A = 1.5, \Lambda \in [0, 1.4].$$

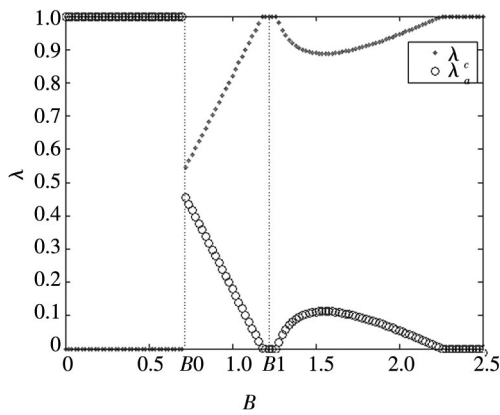


图 1-1 两家医院的到达率

Fig. 1-1 Arrival rate of the two hospitals

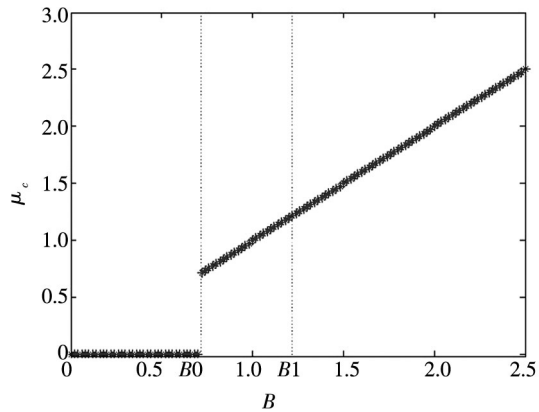


图 1-2 社区医院的服务能力

Fig. 1-2 Service capabilities of the community hospital

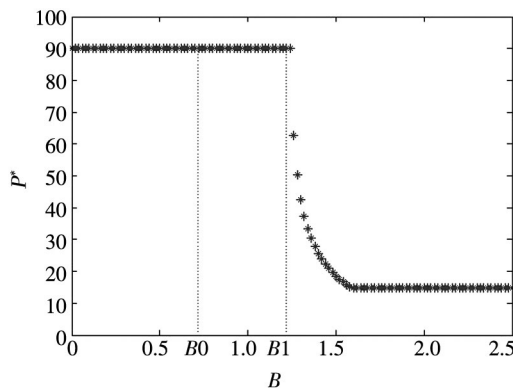


图 1-3 三甲医院的诊疗费

Fig. 1-3 Price of the class 3-A hospital

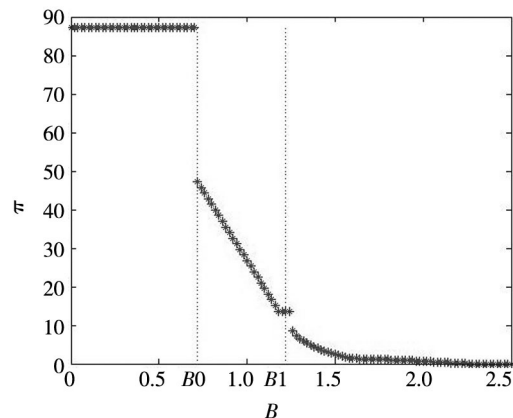


图 1-4 三甲医院的利润

Fig. 1-4 Profit of the class 3-A hospital

图 1 政府预算 B 对转诊体系的影响

Fig. 1 Impact of government budget B on the referral system

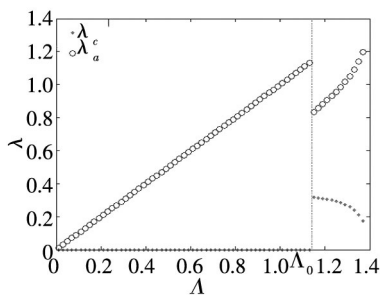


图 2-1 两家医院的到达率

Fig. 2-1 Arrival rate of the two hospitals

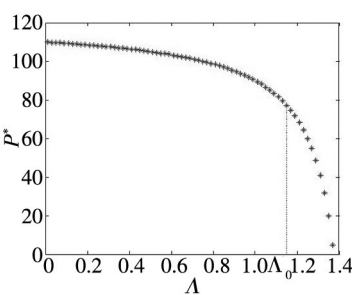


图 2-2 三甲医院的诊疗费

Fig. 2-2 Price of the class 3-A hospital

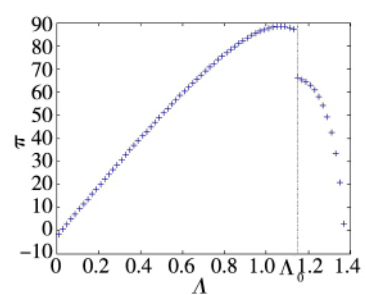


图 2-3 三甲医院的利润

Fig. 2-3 Profit of the class 3-A hospital

图 2 补贴预算较小时 Λ 对系统性能的影响

Fig. 2 Impact of Λ on system performance when the subsidy is small

图 2 描述了  $B$  取 0.5 从而  $\mu_c : \mu_a = 0.45$  时,  $\Lambda$  变化对系统性能的影响. 由图 2-1 看到, 当到达总量  $\Lambda$  很小时, 病人选择进入三甲医院均能获得更大的净效用, 因此, 尽管图 2-2 中诊疗费 (取政府限价) 随整个到达总量的增大而降低, 但三甲医院的利

润却因病人到达总数的扩大而增加 (如图 2-3). 由于三甲医院随病人总量增大延长的等待时间使得病人进入的边际净效用递减, 因此图 2-1 中当  $\Lambda$  增大到  $\Lambda_0$  时有部分病人退出而进入社区医院.  $\Lambda$  继续增大, 社区医院的病人到达率却逐渐减少. 这是因为相

比较而言社区医院的服务能力太小,病人总量增大带来的边际净效用递减率远远大于三甲医院,因此图 2-1 显示三甲医院的病人到达率仍在社区医院之上,且以较快的速率递增. 而从图 2-2 和 2-3 可

知,三甲医院在  $\Lambda_0$  处同时受降价和病人退出的影响,利润陡然下跌. 此后由于  $\Lambda$  继续增大时降价的影响远比病人到达率上升的影响大,三甲医院的利润一直下降.

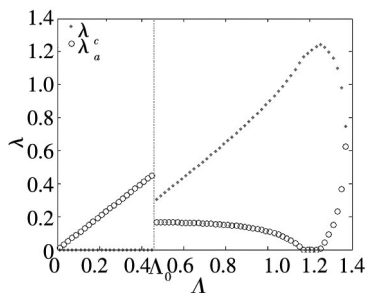


图 3-1 两家医院的到达率

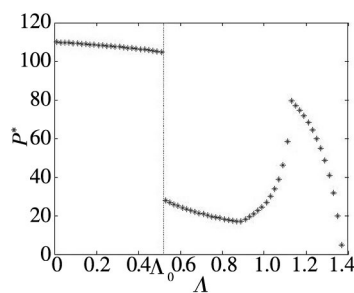


图 3-2 三甲医院的诊疗费

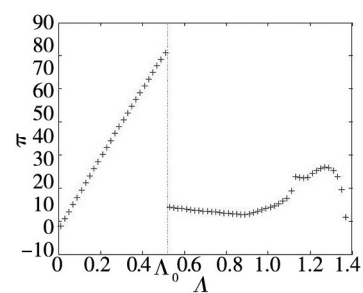


图 3-3 三甲医院的利润

Fig. 3-1 Arrival rate of the two hospitals Fig. 3-2 Price of the class 3-A hospital Fig. 3-3 Profit of the class 3-A hospital

图 3 补贴预算较大时  $\Lambda$  对系统性能的影响

Fig. 3 Impact of  $\Lambda$  on system performance when the subsidy is large

图 3 描述了增加政府补贴  $B$  到 1.4 使得服务能力竞争力为  $\mu_c : \mu_a = 0.93$  的情形. 比较图 3-1 与图 2-1, 与之前不同的是, 在较小的到达总量  $\Lambda_0$  处就有大部分病人转而进入了社区医院, 并且首诊量反而在三甲医院之上. 由图 3-2 看到三甲医院同时采取了大幅度的降价策略, 图 3-3 则显示此时利润出现了大幅下跌. 较强的服务能力竞争力使得图 3-1 中  $\lambda_c$  随  $\Lambda$  增大而递增,  $\lambda_a$  却逐渐减少至零. 这期间三甲医院出现了小幅降价而后随着病人总量的扩大开始涨价(如图 3-2), 结合图 3-1 和图 3-3 可以看到, 其涨价期间到达率虽在减少但利润却随之上升.  $\Lambda$  继续增大, 到社区医院的病人因为增加的等待时间使得边际净效用递减, 于是图 3-1 中开始有病人逐渐从社区医院转而进入三甲医院的情形. 而图 3-2 显示三甲医院此时诊疗费已涨至政府限价, 之后随病人总量的扩大开始下降, 图 3-3 则出现了利润随病人数增加波动上升之后又受降价影响而下跌的情形. 由此可见, 投入社区医院的政府补贴不同, 病人到达总量发生改变时对两家医院的决策和病人到达影响也是不同的.

## 6 结束语

本文讨论了对等待时间敏感的病人选择行为

下我国社区医院转诊系统的服务能力规划与定价问题. 在给出这种医疗转诊系统存在的条件之后, 考虑了病人的选择行为, 使用 Stackelberg 博弈模型研究了转诊系统中社区医院与三甲医院分别以不同目标竞争时的最优策略. 证明了竞争均衡的存在并推导了其充要条件. 在分析两家医院的均衡策略时发现, 政府补贴的大小对社区医院的服务能力和三甲医院的诊疗费设定都有较大影响, 当补贴额较少时, 社区医院的服务能力不足以与三甲医院竞争, 此时我国的物价政策对三甲医院诊疗费制定起主导作用; 当补贴较大时, 社区医院较大的服务能力会促使三甲医院主动选取较低的诊疗费对策. 后面的数值分析验证了政府的补贴政策是这种医疗转诊系统内部竞争的重要协调机制, 即使在不同的病人达到总量下不同的补贴大小对系统性能的影响也是不同的, 从而为我国实际医疗转诊系统的病人分流和诊疗费调控提供了理论参考依据.

本文没有深入涉及税收对补贴的影响, 如何通过税收同时调节三甲医院的利润分配及社区医院的投入补贴以提升医疗系统性能是将来有待进一步探讨的问题. 同时, 针对实际当中转诊进入三甲医院的病人设置优先级以提高病人在社区医院获得的净效用也可成为医疗转诊系统的研究拓展之一.

## 参考文献:

- [1]邓 峰,高建民. 我国医疗资源与利用相关情况回顾分析[J]. 中国卫生经济,2013,32(2): 83-85.  
Deng Feng, Gao Jianmin. Retrospective analysis of China medical resources and resource utilization[J]. Chinese Health Economics, 2013, 32(2): 83-85. (in Chinese)
- [2]McManus M L, Long M C, Cooper A, et al. Queueing theory accurately models the need for critical care resources[J]. Anesthesiology, 2004, 100(5): 1271-1276.
- [3]Green Linda. Queueing Analysis in Healthcare in Randolph W. Hall. Patient Flow: Reducing Delay in Healthcare Delivery [M]. New York: Springer, 2006: 281-307.
- [4]Griffiths J D, Lloyd N P, Smithies M, et al. A queueing model of activities in an intensive care unit[J]. IMA J Management Mathematics, 2006, 17(3): 277-288.
- [5]Green Linda V, Peter J, et al. Coping with time-varying demand when setting staffing requirements for a service system[J]. Production and Operations Management, 2007, 16(1): 13-39.
- [6]Goddard J, Tavakolib M. Efficiency and welfare implications of managed public sector hospital waiting lists[J]. European Journal of Operational Research, 2008, 184(2): 778-792.
- [7]Yankovic N, Green L V. Identifying good nursing levels: A queueing approach[J]. Operations Research, 2011, 59(4): 942-955.
- [8]Fomundam S, Herrmann J. A Survey of Queueing Theory Applications in Healthcare [R]. Maryland: University of Maryland, 2007.
- [9]Soni K, Saxena K. A study of applicability of waiting line model in health care: A systematic review[J]. Operation Research, 2011, 19(1): 75-91.
- [10]Thunhurst C. Public health systems analysis: The transfer of learning between developed and developing countries[J]. Health Care Management Science, 2012, 15(3): 283-291.
- [11]Sadat S, Carter M W, Golden B. Theory of constraints for publicly funded health systems[J]. Health Care Management Science, 2013, 16(1): 62-74.
- [12]赵卫东,李旗号,盛昭翰. 基于案例推理的决策问题求解研究[J]. 管理科学学报, 2000, 3(4): 29-36.  
Zhao Weidong, Li Qihao, Sheng Zhaohan. Decision problem solution based on case-based reasoning[J]. Journal of Management Sciences in China, 2000, 3(4): 29-36. (in Chinese)
- [13]刘作仪. 2011年我国管理科学青年学者取得的巨大成就[J]. 管理科学学报, 2011, 14(9): 86-90.  
Liu Zuoyi. Achievements in management sciences of Chinese young scholars in 2011[J]. Journal of Management Sciences in China, 2011, 14(9): 86-90. (in Chinese)
- [14]陈 超,朱 岩,朱 涛,等. 能力分配模型在中国社区医院病房管理中的应用[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, 50(6): 961-964.  
Chen Chao, Zhu Yan, Zhu Tao, et al. Capacity allocation mode and its application in community hospital ward management [J]. Journal of Tsinghua University, Science and Technology, 2010, 50(6): 961-964. (in Chinese)
- [15]孟 潇,徐丹丹,孙雅琳. 我国医疗服务融资难之症结所在与政策建议——基于问卷调查与计量分析[J]. 现代财经(天津财经大学学报), 2012, 1(264): 86-96.  
Meng Xiao, Xu Dandan, Sun Yalin. On the research of financing problem in medical care service industry in China and its policy and suggestion: Based on the questionnaire of medical service industry present financing situation and its measurement analysis[J]. Modern Finance and Economics, Journal of Tianjin University of Finance and Economics, 2012, 1(264): 86-96. (in Chinese)
- [16]杜少甫,谢金贵,刘作仪. 医疗运作管理: 新兴研究热点及其进展[J]. 管理科学学报, 2013, 16(8): 1-19.  
Du Shaofu, Xie Jingui, Liu Zuoyi. Progress and prospects in an emerging hot topic: Healthcare operations management [J]. Journal of Management Sciences in China, 2013, 16(8): 1-19. (in Chinese)
- [17]Philipp Afèche, Haim Mendelson. Pricing and priority auctions in queueing systems with a generalized delay cost structure [J]. Management Science, 2004, 50(7): 869-882.



- [18] Michael S, Pangburn, Euthemia Stavoulaki. Capacity and price setting for dispersed, time-sensitive, customer segments [J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 184(2008): 1100–1121.
- [19] Naor P. The regulation of queue size by levying tolls [J]. *Econometrica*, 1969, 37(1): 15–24.
- [20] Mendelson H, Whang S. Optimal incentive-compatible priority pricing for the M/M/1 queue [J]. *Operations Research*, 1990, 38(5): 870–883.
- [21] Hong Chen, Murray Frank. Monopoly pricing when customers queue [J]. *IIE Transactions*, 2004, 36: 1–13.
- [22] De Vany A S, Saving T R. The economics of quality [J]. *The Journal of Political Economy*, 1983, 91(6): 979–1000.
- [23] Lederer P J, Li L. Pricing, production, scheduling, and delivery-time competition [J]. *Operations Research*, 1997, 45(3): 407–420.
- [24] Hong Chen, Wan Y. Capacity competition of make-to-order firms [J]. *IIE Transactions*, 2003, 35(9): 817–832.
- [25] Yu D Z, Zhao X, Sun D. Optimal pricing and capacity investment for delay-sensitive demand [J]. *Engineering Management, IEEE Transactions on*, 2013, 60(1): 124–136.
- [26] 陈剑, 张楠. 针对等待敏感顾客的缺货补偿与库存策略研究 [J]. *管理科学学报*, 2008, 11(3): 53–63.  
Chen Jian, Zhang Nan. Study on backorder incentives and inventory control policies with time-based customer-choice behavior [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2008, 11(3): 53–63. (in Chinese)
- [27] 唐毓敏, 冯苏苇. 政策博弈下的道路交通拥挤定价 [J]. *管理科学学报*, 2008, 11(4): 76–82.  
Tang Yumin, Feng Suwei. Model of traffic behavior based on game theory under road-pricing regulation of government [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2008, 11(4): 76–82. (in Chinese)
- [28] 田琼, 黄海军. 城市公交系统内乘客出行动态均衡模型 [J]. *管理科学学报*, 2008, 12(1): 1–8.  
Tian Qiong, Huang Haijun. Dynamic model for passengers' equilibrium commuting in urban transit systems [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2008, 12(1): 1–8. (in Chinese)
- [29] 王崇, 李一军, 吴价宝. 基于感知效用的消费者购物渠道决策分析与实证研究 [J]. *管理评论*, 2012, 10(24): 85–93.  
Wang Chong, Li Yijun, Wu Jiabao. Analysis and empirical research on consumer's channel decision from the perspective of perceived utility [J]. *Management Review*, 2012, 10(24): 85–93. (in Chinese)
- [30] Arun Sharma, Anuj Mehrotra. Choosing an optimal channel mix in multichannel environments [J]. *Industrial Marketing Management*, 2007, (36): 21–28.
- [31] Maxim Afanasyev, Haim Mendelson. Service provider competition: Delay cost structure segmentation, and cost advantage [J]. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2010, 2(12): 213–235.

## Pricing and capacity planning of the referral system with delay-sensitive patients

CHEN Yan<sup>1</sup>, ZHOU Wen-hui<sup>2\*</sup>, HUA Zhong-sheng<sup>3</sup>, SHAN Mi-yuan<sup>1</sup>

1. School of Business Administration, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. School of Business Administration, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

3. School of Management, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

**Abstract:** To relieve the serious utilization imbalance of medical resource in the community hospital referral system in China, this paper studies the service capacity design and its pricing via an integrated model of the queuing and game theory. The behavior of delay-sensitive patients is first captured, followed by a competition equilibrium between a profit-oriented class 3-A hospital and a community hospital, whose goal is to serve more patients. We show that the optimal service capacity of community hospital is increasing in the government's subsidy, while the price of class 3-A hospital is decreasing if the subsidy is sufficiently large. Our result also shows that the subsidy policy is an effective coordination mechanism to relieve the mentioned imbalance.

**Key words:** delay-sensitive; referral system; service capacity; pricing

附录

定理1 证明 由个体理性约束和激励相容约束可知,病人选择  $H_A$  就诊当且仅当满足  $U_A \geq 0$  和  $U_A \geq U_C$ ; 同理,病人选择  $H_C$  首诊当且仅当满足  $U_C \geq 0$  和  $U_C \geq U_A$ . 由于在均衡状态下,病人对于两家医院的选择是无差异的(否则病人总是只选择某一家医院),从而可得  $U_A = U_C$ . 分别以式(1)和式(2)代入该等式,化简得式(3). 证毕.

定理2 证明 由式(3)可整理得

$$A_0(1-\alpha)\lambda_c^2 + (2A_1 - A_0(1-\alpha)\mu_c + A_0A_2)\lambda_c + (A_2h - A_0A_2\mu_c - A_1\mu_c) = 0$$
 其中  $A_0 = p(1-\theta\alpha) > 0$ ,  $A_1 = (1-\alpha)h > 0$ ,  $A_2 = \mu_A - \Lambda > 0$ .

设  $\lambda_c = x$ , 则  $x$  满足二次方程式:  $B_0x^2 + B_1x + B_2 = 0$ , 其中  $B_0 = A_0(1-\alpha)$ ,  $B_1 = 2A_1 - A_0(1-\alpha)\mu_c + A_0A_2$ ,  $B_2 = A_2h - A_0A_2\mu_c - A_1\mu_c$ .

由于  $\Delta = B_1^2 - 4B_0B_2 = 4A_1^2 + A_0^2(1-\alpha)^2\mu_c^2 + A_0^2A_2^2 + 2A_0^2A_2(1-\alpha)\mu_c = [A_0(1-\alpha)\mu_c + A_0A_2]^2 + 4A_1^2 > 0$ .  $\therefore x_{1,2} = (-B_1 \pm \sqrt{\Delta}) / (2B_0)$ .

$$\text{又} \because x_1 = \frac{-B_1 - \sqrt{\Delta}}{2B_0} = \frac{A_0(1-\alpha)\mu_c - A_0A_2 - 2A_1 - \sqrt{(A_0(1-\alpha)\mu_c + A_0A_2)^2 + 4A_1^2}}{2A_0(1-\alpha)} <$$

$$\frac{A_0(1-\alpha)\mu_c - A_0A_2 - 2A_1 - \sqrt{(A_0(1-\alpha)\mu_c + A_0A_2)^2 + 4A_1^2} - 4A_1(A_0(1-\alpha)\mu_c + A_0A_2)}{2A_0(1-\alpha)} =$$

$$\frac{A_0(1-\alpha)\mu_c - A_0A_2 - 2A_1 - |(A_0(1-\alpha)\mu_c + A_0A_2) - 2A_1|}{2A_0(1-\alpha)} < 0, \text{所以舍去此根.}$$

$$\text{对于 } x_2 = \frac{-B_1 + \sqrt{\Delta}}{2B_0} = \frac{A_0(1-\alpha)\mu_c - A_0A_2 - 2A_1 + \sqrt{(A_0(1-\alpha)\mu_c + A_0A_2)^2 + 4A_1^2}}{2A_0(1-\alpha)},$$

当  $A_0(1-\alpha)\mu_c - A_0A_2 \geq 0$  时, 即  $\mu_c \geq \frac{\mu_A - \Lambda}{1-\alpha}$  时,  $x_2$  为正, 从而取  $\lambda_c^* = x_2$ . 证毕.

推论1 证明 由式(6)不难得到  $\frac{\partial \lambda_c^*}{\partial \mu_c} = \frac{1}{2} + \frac{A_0(1-\alpha)\mu_c + A_0A_2}{2\sqrt{[A_0(1-\alpha)\mu_c + A_0A_2]^2 + 4A_1^2}}$ ,

其中  $A_0 = p(1-\theta\alpha) > 0$ ,  $A_2 = \mu_A - \Lambda > 0$ , 因此  $\frac{\partial \lambda_c^*}{\partial \mu_c} > 0$ . 证毕.

定理3 证明 由式(8)和式(9)推得  $B \geq \frac{c_2(\mu_A - \Lambda)}{1-\alpha}$ , 再由推论1可知式(7)在  $\mu_c^* = B/c_2$  时取得最大值. 证毕.

命题1 证明 由定理2中的  $\lambda_c^*$  以及  $\lambda_A + \lambda_c = \Lambda$  可得

$$\pi(p) = \Lambda \cdot p - A_3\mu_c^* \cdot p + \frac{A_2A_3}{(1-\alpha)} \cdot p - \frac{\sqrt{4A_3^2 [(1-\alpha)\mu_c^* + A_2]^2 \cdot p^2 + 4A_1^2}}{2(1-\alpha)} + h - c_1\mu_A - T,$$

其中  $A_1 = (1-\alpha)h$ ,  $A_2 = \mu_A - \Lambda$ ,  $A_3 = (1-\theta\alpha)/2$ ,  $\mu_c^* = B/c_2$ .

$$\text{从而有 } \frac{\partial \pi}{\partial p} = \Lambda - A_3\mu_c^* + \frac{A_2A_3}{(1-\alpha)} - \frac{1}{(1-\alpha)} \cdot \frac{2A_3^2 [(1-\alpha)\mu_c^* + A_2]^2 \cdot p}{\sqrt{4A_3^2 [(1-\alpha)\mu_c^* + A_2]^2 \cdot p^2 + 4A_1^2}},$$

$$\text{并且 } \frac{\partial^2 \pi}{\partial p^2} = -\frac{2A_3^2 [(1-\alpha)\mu_c^* + A_2]^2}{(1-\alpha)} \cdot \frac{4A_1^2}{\sqrt{[4A_3^2 [(1-\alpha)\mu_c^* + A_2]^2 \cdot p^2 + 4A_1^2]^3}} \leq 0. \text{ 证毕.}$$

定理4 证明 由于

$$\frac{\partial \pi}{\partial p} = \frac{[(1-\alpha)(\Lambda - A_3\mu_c^*) + A_2A_3] \cdot \sqrt{4A_3^2 [(1-\alpha)\mu_c^* + A_2]^2 + \frac{4A_1^2}{p^2}} - 2A_3^2 [(1-\alpha)\mu_c^* + A_2]^2}{(1-\alpha) \cdot \sqrt{4A_3^2 [(1-\alpha)\mu_c^* + A_2]^2 + \frac{4A_1^2}{p^2}}}, \text{上式}$$

分母大于 0 而分子

$$\begin{aligned} & [(1-\alpha)(\Lambda - A_3\mu_c^*) + A_2A_3] \cdot \sqrt{4A_3^2 [(1-\alpha)\mu_c^* + A_2]^2 + \frac{4A_1^2}{p^2}} - 2A_3^2 [(1-\alpha)\mu_c^* + A_2]^2 > \\ & [(1-\alpha)(\Lambda - A_3\mu_c^*) + A_2A_3] \cdot 2A_3 \cdot [(1-\alpha)\mu_c^* + A_2] - 2A_3^2 [(1-\alpha)\mu_c^* + A_2]^2 = \\ & 2A_3(1-\alpha)(\Lambda - 2A_3\mu_c^*) [(1-\alpha)\mu_c^* + A_2] \end{aligned}$$

若  $\Lambda - 2A_3\mu_c^* \geq 0$  即  $\mu_c^* \leq \frac{\Lambda}{1-\theta\alpha}$  时,  $2A_3(1-\alpha)(\Lambda - 2A_3\mu_c^*) [(1-\alpha)\mu_c^* + A_2] \geq 0$  分子也大于 0 此时恒有  $\frac{\partial \pi}{\partial p} > 0$ . 又由定理 2 和定理 3 可知  $\mu_c^* \geq \frac{\mu_A - \Lambda}{1-\alpha}$ , 于是只有在  $\frac{\mu_A - \Lambda}{1-\alpha} \leq \frac{\Lambda}{1-\theta\alpha}$  即  $\Lambda < \mu_A \leq \Lambda + \frac{1-\alpha}{1-\theta\alpha} \cdot \Lambda$  时, 有  $\frac{\mu_A - \Lambda}{1-\theta\alpha} \leq \mu_c^* \leq \frac{\Lambda}{1-\theta\alpha}$  成立. 此时最优解在  $p$  的上限取得, 即  $p^* = U - \frac{h}{\mu_A - \Lambda}$ .

而当  $\mu_c^* > \frac{\Lambda}{1-\theta\alpha}$  时, 由最优化的一阶条件有:

$$\Lambda - A_3\mu_c^* + \frac{A_2A_3}{(1-\alpha)} - \frac{1}{(1-\alpha)} \cdot \frac{2A_3^2 [(1-\alpha)\mu_c^* + A_2]^2 \cdot p}{\sqrt{4A_3^2 [(1-\alpha)\mu_c^* + A_2]^2 \cdot p^2 + 4A_1^2}} = 0$$

求解此等式可得  $p_0$ .

此时若  $\frac{c_1\mu_A + T}{\theta\alpha\Lambda} \leq p_0 \leq U - \frac{h}{\mu_A - \Lambda}$  则最优解为  $p^* = p_0$ ; 若  $p_0 > U - \frac{h}{\mu_A - \Lambda}$  则  $p^* = U - \frac{h}{\mu_A - \Lambda}$ . 证毕.

推论 2 证明 (II) 此时由  $p^* = U - \frac{h}{\mu_A - \Lambda}$  可推导得  $\frac{\partial p^*}{\partial \mu_A} > 0$  与  $\frac{\partial p^*}{\partial \Lambda} < 0$ . (III) 此时由  $p^* = p_0$

可知

$$\frac{\partial p_0}{\partial \mu_c^*} = \frac{-A_4(A_1A_4\mu_c^* + A_1A_2A_3 + 1) \cdot \sqrt{M} - A_4(A_4\Lambda + 2A_2A_3^2) \cdot [(1-\alpha)\mu_c^* + A_2]}{(A_4\mu_c^* + A_2A_3)^2 M^{\frac{3}{2}}} < 0,$$

其中  $A_1 = (1-\alpha)h$ ,  $A_2 = \mu_A - \Lambda$ ,  $A_3 = (1-\theta\alpha)/2$ ,  $A_4 = (1-\alpha)A_3$ ,  $M = (1-\alpha)(2A_3\mu_c^* - \Lambda) [(1-\alpha)\Lambda + 2A_2A_3]$ . 并且  $\frac{\partial \mu_c^*}{\partial B} > 0$ , 于是  $\frac{\partial p_0}{\partial B} = \frac{\partial p_0}{\partial \mu_c^*} \cdot \frac{\partial \mu_c^*}{\partial B} < 0$ . 由此得到结论(III).

$$(IV) \frac{\partial \lambda_c^*}{\partial p} = \frac{h}{(1-\theta\alpha)p^2} - \frac{2A_1h}{(1-\theta\alpha)p^3 \cdot \sqrt{(1-\theta\alpha)^2 [(1-\alpha)\mu_c^* + A_2]^2 + 4A_1^2p^{-2}}} =$$

$$\frac{\sqrt{(1-\theta\alpha)^2 [(1-\alpha)\mu_c^* + A_2] \cdot h^2p^2 + 4A_1^2h^2} - \sqrt{4A_1^2h^2}}{(1-\theta\alpha)p^3 \cdot \sqrt{(1-\theta\alpha)^2 [(1-\alpha)\mu_c^* + A_2]^2 + 4A_1^2p^{-2}}} > 0.$$

因此, 到达率  $\lambda_c^*$  与诊疗费  $p$  成正比.

证毕.