

基于仿真分析的医疗应急人力资源配置研究

倪玉丽, 李树刚

(上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘要:研究医疗应急系统人力资源配置问题。现阶段我国各医疗服务机构在面对突发应急事件时,往往都是根据事前制定的静态应急预案或者经验以及主观判断来调配应急人力资源,从而易造成应急过程资源匮乏或浪费现象。为解决上述问题,建立了一个医疗应急实时响应系统来对应急人力资源配置进行动态分析。首先采用系统动力学的方法建立了医疗应急系统的仿真模型;然后结合上海市某三甲医院应急响应的实际情况进行了应急系统仿真和案例研究,得到了该医院在各种医疗应急人力资源配置下的系统性能。仿真结果表明了所建模型的有效性,从而为医院使用最小代价合理应对突发事件提供决策支持。

关键词:医疗应急;资源配置;系统动力学;系统性能;仿真

中图分类号:TP391.9 **文献标识码:**A

Research on Allocation of Medical Emergency Human Resources Based on Simulation

NI Yu-li, LI Shu-gang

(College of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

ABSTRACT: The human resources allocation of medical emergency system was studied. Currently, when in the face of a sudden emergency event, the medical services agencies often deploy emergency human resources according to the prior static contingency preplans or based on their experience and subjective judgments, which would easily lead to resource lack or waste in emergency process. To solve these problems, this paper established a medical real-time emergency response system to dynamically study the emergency human resources allocation. First, the system dynamics method was used to establish a simulation model of the medical emergency system. Then combined with the actual emergency response situation of a third-grade class-A hospital in Shanghai, we implemented its emergency system simulation and case study. From the simulation, different system performances of a variety of human resources allocation were obtained. The simulation results show the validity of the model, and provide decision support to help the hospital respond emergencies using the minimum cost.

KEYWORDS: Medical emergency; Resource allocation; System dynamics; System performance; Simulation

1 引言

医院应急管理是突发公共事件应急管理的核心问题。在多数情况下,医院是为政府及社会监控突发公共卫生事件的第一战线,提高救治率,降低突发公共卫生事件所致的人员伤亡则主要由医院承担^[1]。因此,一个有效的医疗应急响应系统对于医院动态响应应急情况以及快速、合理进行应急资源配置意义重大。

目前,国内外各医疗服务机构应对各种内外部突发事件的基本策略都是通过成立相应的应急领导和工作小组如以

及制定相应的应急预案,如跨地区医疗应急预案^[2]、医疗应急队^{[3]-[4]}等。而对医院在应急响应过程中的资源配置问题,一般会通过预测、计算机仿真以及建立各种优化模型等手段来对其进行研究。Anderson, TA(2003)就量化了流感发生时澳大利亚和新西兰医疗服务机构的额外病床和呼吸机需求量^[5];Su, S(2002)采用计算机仿真的方法对应急医疗服务系统中的资源分配问题进行了研究,主要分析了救护车数量分配对减少成本的影响^[6];Lee, Eva K(2009)等也从成本角度,研究了应对突发公共卫生事件的公共基础设施的资源分配策略^[7]。相比于国外,我国对医疗服务系统应急资源配置的理论研究较少。一方面,我国对医疗应急资源配置的研究多为城市或区域性的,而对医疗机构本身的应急资源

基金项目:国家自然科学基金重点项目(71131005)

收稿日期:2012-10-11

本文研究过程如下:首先采用系统动力学的方法建立了医院面对外部突发事件的应急系统的仿真模型,量化描述了医院应急流程环节。在模型基础上,本文结合上海市某三甲医院应急响应的实际情况进行了应急系统仿真和人力资源配置的案例研究。

突发病人时,医院将开通绿色通道并调用专门的应急资源(本文主要考虑医生资源)为此类突发病人就诊。因此,在本文的仿真模型中,医院应急系统涉及的要素主要是病人和医生。病人作为医院应急情况的外部输入,其特征表征了外部突发事件的严重程度;而医院资源数量则代表了医院的内部资源状态。其中,应急事件中涉及的病人及医生都有各自的静态和动态特征,如病人的到达分布、生理状态、恶化情况、就诊规则,医生的能力水平、数量、评估病情过程等。根据这些特征,将建立系统的动力学模型,来客观描述系统的整个流程。在建模过程中,首先设计了一般医院的应急响应系统流程图,如图 1 所示。其中,“□”表示系统状态变量,“×”为速率变量,“☉”表示源点和汇点,“○”表示模型中涉及到的相关参变量。系统中共涉及分诊护士、一般医师和专家三种医疗人力资源。

分布。

2.2.2 病人健康动态子模型

在本文的模型中,病人的健康状况是一个随时间变化的潜在变量。模型中,病人的健康状况从到达医院开始就随时恶化,直到其死亡或得到相应诊治决策为止。

1) 病人生理状态 $P(t)$

设病人到达医院的初始生理状态为 P_0 ,其健康恶化率为 d ,病人在任意时间点 t 时刻的生理状态用 $P(t)$ 表示, $P(t) \in [0,1]$ (1 为良好的生理状态,0 为非常不好,即死亡)。即病人的初始病情 $P(t=0) = P_0$,然后 $P(t)$ 随时间不断恶化直至 $P(t) = 0$ 或得到最终诊断决策。 $P(t)$ 可用以下数学函数来表示:

$$P(t) = \begin{cases} P_0 - dt & 0 \leq t < P_0/d \\ 0 & t \geq P_0/d \end{cases} \quad (1)$$

其中恶化率 d 在区间 $(0,0.01)$ 之间(见下文)。 d 越大,表示病人病情恶化越快。不同病人的 P_0 和 d 不相同。

2) 病人真实健康状况 $H_r(t)$

病人在时间点 t 的真实健康状况度量, $H_r(t)$, 是一个全面度量病人在 t 时刻的生理状态 $P(t)$ 和恶化率 d 的变量。因此, $H_r(t)$ 是 $P(t)$ 和 d 的数学函数。用以下函数表示:

$$H_r(t) = P(t)(1 - 60d) \quad (2)$$

由于 $P(t) \in [0,1]$, $d \in (0,0.01)$, 所以 $H_r(t) \in [0,1]$, 越接近 1 表示健康状态越好。 $H_r(t)$ 越接近于 1 时表示病人的生理状态越好而且恶化率小,而越接近于 0 表示病人的生理状态越严峻而且恶化率快。

2.2.3 医生评估子模型

此模型的输入为两个变量:病人健康动态子模型中的真实健康状况 $H_r(t)$ 和医生的专业能力水平 L 。一般医师和专家根据此来进行病情评估。

本文定义,分诊护士、一般医师和专家的专业能力水平分别为 $L_{\text{护士}} = 10$, $L_{\text{一般医师}} = 20$, $L_{\text{专家}} = 30$,数值越大,说明此级别医生的临床能力水平越高。

1) 生成健康评估结果 $H_{es}(t)$

护士、一般医师和专家对病人的病情都有一个类似的评估模型以生成对病人的评估结果。本文用 $H_{es}(t)$ 表示医生对病人健康状况的评估结果。

对于一给定的病人真实健康状况 $H_r(t)$,越高的专业能力水平 L 则意味着医生的评估结果 $H_{es}(t)$ 的方差越低;而对于一给定级别的医生,即 L ,当病人真实情况 $H_r(t)$ 越接近于极限值(0 或 1) 时,医生的评估结果 $H_{es}(t)$ 的方差越低。

根据上述特性,本文采用 beta 分布来描述随机变量 $H_{es}(t)$, $H_{es}(t) \in (0,1)$ 。令此分布的参数为 (a,b) , $a, b > 1$ 。令此分布的众数 $\frac{a-1}{a+b-2} = H_r(t)$,其中的一个参数 b 等于医生的专业水平 L ,另一个参数 a 可通过上式计算。

2) 生成评估信心 $C(t)$

对于各个级别的医生,对不同病情病人的评估信心都不一样,将他们对病人健康的评估信心记为 $C(t)$ 。同样, $C(t)$ 的两个输入变量也是 $H_r(t)$ 和 L 。

记 $C(t)$ 是一个服从 beta 分布的随机变量。令此分布的众数为 $C_m(t)$,且

$$C_m(t) = 1 - \frac{25[1 - H_r(t)]H_r(t)}{L} \quad (3)$$

同样令该分布的其中一个参数为 L 。通过式 (3) 知道,对于给定的 $H_r(t)$, L 越高诊断信心众数 $C_m(t)$ 越高,即医生评估过程越容易;而对于给定的医生专业能力水平 L , $H_r(t)$ 越接近于极限状态(0 或 1 时), $C_m(t)$ 越高。

2.2.4 医生诊断决策子模型

以上评估模型的输出 $H_{es}(t)$ 和 $C(t)$ 将作为医生诊断模型的输入。各级别医生的诊断决策分别如下:

1) 护士分流决策

护士对于病人没有诊断决策权,而只是根据自己对病人评估的健康状态 $H_{es}(t)$ 以及诊断信心 $C(t)$ 来选择将病人分流到一般医师或者专家处。在此,定义一个严重度指标, S_l 。护士根据 S_l 判断分流决策, S_l 计算如下:

$$S_l^2 = [1 - H_{es}(t)]^2 + \frac{[1 - C(t)]^2}{3} \quad (4)$$

因为 $H_{es}(t) \in (0,1)$, $C(t) \in (0,1)$; 所以 $S_l \in (0,1.16)$ 。当 $H_{es}(t)$ 和 $C(t)$ 的取值很小时, S_l 取值则大,即表示一个高严重度,因而需要专家级别医生来就诊。在本文中,定义严重度阈值 S_{lc} 。当 $0 < S_l < S_{lc}$ 时,护士将病人送往一般医生处就诊。当 $S_l \geq S_{lc}$ 时,则直接送往专家处就诊。

2) 一般医师诊断决策

一般医师和专家负责接收分流病人,对病人有诊断决策权。

a) 信心评判

一般医师对于病人的诊断有两种结果,一是当诊断信心充足时,则自己做出诊断决策;当信心不足时,则将病人转移至专家处就诊。因此,定义医师的诊断信心阈值 C_c 。即当一般医师的诊断信心 $C(t) \geq C_c$ 时,自己做出诊断决策;当 $C(t) < C_c$ 时,转移病人到专家处就诊。

b) 诊断决策

当一般医师的诊断信心 $C(t) \geq C_c$, 他会根据对病人健康状况的评估结果 $H_{es}(t)$ 来决定对病人做出何种水平的诊断决策,即抢救、住院、留观或回家。在此,将 $H_{es}(t)$ 分为四个区间, R_{rescue} , $R_{\text{hospitalization}}$, $R_{\text{observation}}$, R_{home} , 分别对应上述四种诊断决策水平:抢救、住院、留观、回家。因此,

$$R_{\text{rescue}} \cup R_{\text{hospitalization}} \cup R_{\text{observation}} \cup R_{\text{home}} = (0,1)$$

$$R_{\text{rescue}} \cap R_{\text{hospitalization}} \cap R_{\text{observation}} \cap R_{\text{home}} = \emptyset$$

3) 专家诊断决策

不管对于病情如何复杂的病人,专家必须做出诊断决策,即抢救、留观、住院或回家。而对病人采取何种水平的诊

断,跟一般医师一样,也是由其对病人健康状态的评估结果 $H_{es}(t)$ 来决定。同样将 $H_{es}(t)$ 分为上述四个区间 R_{rescue} , $R_{hospitalization}$, $R_{observation}$, R_{home} 。

2.2.5 临床医生的评估时间子模型

各级别医生对于病人的病情评估都会造成一个时间延迟。记一般医师和专家对不同病人的评估时间是一个服从 γ 分布的随机变量。令其分布的均值和方差等于在医院调研中实际观察到的各医生的评估时间均值和方差。

而护士对病人的评估时间用参数为 μ 的指数分布表示。

2.2.6 病人的排队子模型

病人在护士、一般医师和专家处就诊时都遵循先到先服务的排队规则。系统中,队列都为单队列多服务台的排队模型,即护士、一般医师和专家的数量是多个且有限的,并假定系统容量和排队长度无限。

病人在排队过程中,存在排队等待时间的延迟,在此延迟过程中,病人的健康状况将随时间继续恶化。

上述6个子模型及其各因素间存在着相互联系和影响,通过各个子模型间的连接,一起构成了医院整体应急系统模型。将上述过程视为一个事件,即从病人到达医院且病情开始恶化起,直到其健康状况恶化到0(即死亡)或者医生对其做出诊断决策。若病人在任意时刻死亡,则此时事件立即结束。

2.3 模型参数的确定

本文所涉及的数据全部来自上海某三甲医院的调研以及专家医师的访谈。同时,基于这些数据和仿真模型,本文采用历史统计、迭代运行模型等手段确定了模型中的待估参数。

1) 初始参数的确定

设定病人平均到达率 $\lambda = 1$ 人/min、仿真对象为2小时内到达的病人,仿真结束时刻为所有的病人都得到相关诊治或者死亡为止。在此情况下,该医院采用的护士、一般医师和专家数量分别是3,7,6。

2) 病人初始生理状态 P_0 和恶化率 d

初始生理状态用来表征病人刚到达医院时的病情严重程度。本文定义病人的 P_0 为0.5-1 间的随机参数。

而恶化率 d 的确定则是通过与医生访谈。访谈后,知道对于大部分病人从非常良好的健康状态 ($P=1$) 恶化到很严重的健康状态 ($P=0$) 的时间间隔在100分钟 ($d=0.01$) 到1000分钟 ($d=0.001$) 间。因此,本文假定 d 服从参数为(2, 2)的 β 分布,即 $d \sim 0.01 * \beta(2, 2)$ 。即对于大部分病人,健康恶化率一般在0.005左右,恶化时间约为200分钟。

3) 医生评估时间

调研中获得的医生评估时间信息如表1所示。其中护士的评估时间服从指数分布,其他医生的评估时间服从 γ 分布。

表1 评估时间信息 (min)

过程	均值	方差
护士评估	1	
一般医师评估	31	452.83
专家评估	29.57	488.65

4) 其它待估参数

基于实际中收集到的概率信息,重复运行仿真模型以估计模型中的参数阈值。在估计参数过程中,应确保仿真模型得到的概率与实际调研数据接近。最终参数估计结果为: $SL_c = 0.63$; $C_c = 0.7$; $R_{rescue} = (0 \ 0.25]$, $R_{hospitalization} = (0.25 \ 0.4]$, $R_{observation} = (0.4 \ 0.6]$, $R_{home} = (0.6 \ 1)$ 。

本文采用 matlab 工具来对上述模型进行仿真。模型最终选取病人系统平均逗留时间、死亡率以及诊断决策百分比(包括抢救病人比率、住院病人比率、留观病人比率、回家病人比率)6个输出变量来表征此应急系统性能。

3 模型有效性检验

本文主要通过模型的内部有效性检验、参数有效性检验以及模拟结果与现实数据比较来验证模型的有效性,以确保模型具有应用上的可行性。

3.1 模型的内部有效性评价

本文通过多次重复运行模型来确定模型内部随机可变性的大小,模型50次运行结果的误差如表2。

表2 模型内部有效性评价结果

输出变量	变化范围	最大绝对误差
病人平均逗留时间 (min)	80.99-93.42	12.42
病人死亡率 (%)	3.08-3.91	0.83
抢救率 (%)	28.02-29.95	1.93
住院率 (%)	29.61-31.39	1.79
留观率 (%)	24.7-26.63	1.93
回家比率 (%)	10.93-11.86	0.93

由表2看出,多次运行模型后,绝大多数结果的最大绝对误差都较小,因此可认为模型内部随机可变性较小。

3.2 模型参数有效性检验

模型的参数检验即通过改变模型的内部参数值和输入值,观察其对模型输出结果的影响,并判断这种影响关系与真实系统是否一致。本文主要对系统中的病人到达率、医疗人力资源数量、一般医师诊断信心阈值等关键参数进行了有效性检验,检验结果与真实系统的变化趋势一致。

3.3 模拟结果与现实数据检验

通过对医院现实应急各环节进行数据的核对,并通过运行系统、运行的结果和现实相一致,表明模型的正确性。本

模型运行结果的模拟值与实际值间的误差较小,从而可认为模型较真实的反映了现实情况。

经过对模型的上述检验,可认为此模型通过了有效性检验。

4 案例应用分析

针对上海市某三甲医院的具体情况,本文对其在不同应急人力资源配置下的系统性能进行了分析。

4.1 单一资源数量对系统性能的影响

在第二章节所述的仿真模型得到了病人到达率 $\lambda = 1$ 人/min 时的仿真结果。下面分析当突发病人较多时,即 $\lambda = 2$ 人/min,医院应该配置的人力资源数量。

根据模型运行结果,若在 $\lambda = 2$ 人/min 依然采用原始人力资源配置时,系统性能会明显变差。因此,需要增加医疗资源数量。

为此,本文在将每种资源数量在原来基础上分别增加 1 至 10 个,看各种资源数量变化对系统性能(以病人系统平均逗留时间和死亡率为例)的影响,结果如图 2 和 3 所示。

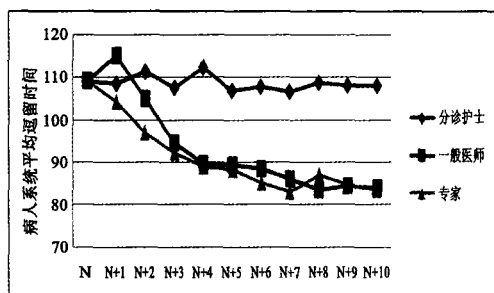


图2 医生数量对病人系统逗留时间的影响

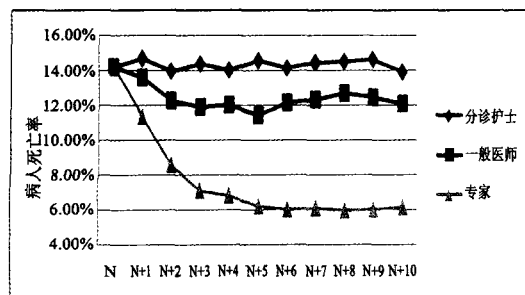


图3 医生数量对病人死亡率的影响

图 2 和图 3 表明,分诊护士数量的增加对于减小病人系统平均等待时间和死亡率基本无影响,而增加一般医师和专家资源数量则对其影响很大。尤其在减小病人死亡率方面,专家数量的增加要比增加一般医师数量对其影响大得多。

另外,从图 3 可以看出,一般医师的数量和专家数量在原有基础上增加至一定值时,再增加其数量已对系统逗留时间和病人死亡率无改善。

上述单一资源数量分析有助于医院快速发现流程中的

关键环节,从而合理进行不同应急资源配备。

4.2 不同资源组合下的系统性能

上节分析了单一资源数量变化对系统性能的影响。而在实际应用中,医院是根据内部的人力资源状态来对资源进行不同组合以应对应急事件的。因此,出于实际应用考虑,本文欲对每种人力医疗资源进行定性分类(即较多和较少),考察各种定性组合下,系统的性能随病人到达率变化的趋势。分析中,根据上节规律,设定分诊护士、一般医师和专家数量上限分别 10,20,20。8 种人力医疗资源组合下,病人系统平均逗留时间和病人死亡率随病人到达率变化分别如图 4 和图 5 所示。图中,图例(8,18,18)表示分诊护士、一般医师和专家数量分别为 8,18,18;即各种医疗资源数量都较多,其它图例以此类推。

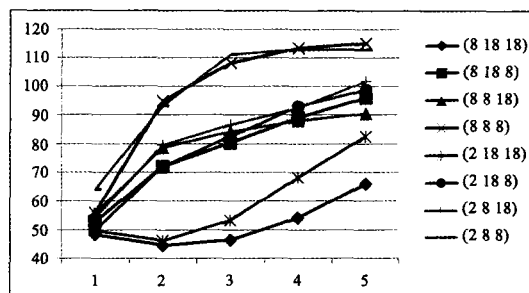


图4 病人到达率对病人系统平均逗留时间的影响

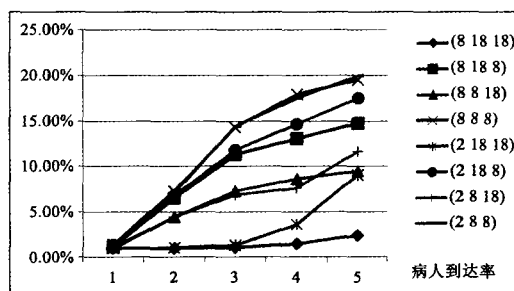


图5 病人到达率对病人死亡率的影响

由图 4 和图 5 可以看出,和上节规律一致,一般医师和专家数量对不同到达率情况下的系统性能影响较大,而分诊护士数量影响则较小。具体如下:①在一般医师和专家数量都较多时(即都为 18),在各种到达率情况下的系统性能都是最好的,但随着病人到达率的增加,分诊护士的数量多少对其影响也会相应增加。②当一般医师或专家数量任一资源较少时,无论分诊护士数量多少,系统性能都会明显下降,且下降比率几乎一致。同时,从图中还可看出,专家数量的减少比一般医师数量减少对系统死亡率的影响更大,而对系统平均逗留时间影响差不多。③当一般医师或专家数量都较少时,系统性能最差,对病人到达率的敏感程度也最高。④到当到达率较低时,各种资源组合下的系统性能差别都不大。

由此,根据上述规律,各医院可根据实际的病人到达情况和医院的服务目标、内部人力资源状态等要求合理进行人力资源配置。表3就例举了当医院服务目标为系统平均逗留时间 $\leq 90\text{min}$,病人死亡率 $\leq 10\%$ 时,在各种到达率情况下的资源配置建议。

表3 资源配置决策表

到达率(人/min)	资源配置决策
1	三种人力资源都较少即可
2	一般医师/专家数量需较多
3	专家数量需较多
4	专家数量需较多
5	护士和专家数量需较多/一般医师和专家数量较多

(服务目标为 $T \leq 90$; $\text{Death_rate} \leq 10\%$)

由上文可见,本模型为医院评估不同场景下的系统性能提供了一个决策支持平台,有利于帮助医院使用最小代价来合理应对突发事件,从而在保证医院服务率的基础上又不造成大的资源浪费。

5 总结

本文研究结果表明,为医疗服务机构设计一个动力学系统能有效研究医院应急响应系统的动态性能,帮助医疗服务机构快速了解和分析不同场景下的系统动态性能,从而帮助医疗服务机构快速、动态地进行应急人力资源配置,从而克服了一般应急资源配置的静态性。本文研究结果为医院使用合理人力资源以及最小代价来应对突发事件提供了决策支持。同时,医院还能根据现有的系统性能,如抢救病人率、住院率等合理安排医院手术室、病床等其它应急设备资源,从而有效提高医院的应急能力。同时,本文的仿真系统模型具备较大柔性,

值得注意的是,虽然本文主要分析了医疗服务机构应急响应系统的人力资源数量配置问题。但在实际的应急系统中,医院还可根据实际需要动态分析系统中的其它变量对系统性能的影响,如医生的能力水平、突发事件造成的病人病情严重程度、就诊规则,从而帮助医院有效设计合理应急策略。因此,本文的仿真系统模型具备较大柔性。

参考文献:

[1] 李继光. 浅论医院应对突发公共卫生事件能力的提高[J]. 中国医院, 2003, 7(17): 17-19.

[2] H A Adams, L Mahlke, C Lange. Medical contingency concept for supraregional assistance in the event of mass casualties[J]. Anesthesiologie & Intensivmedizin, 2005, 46: 215-223.

[3] R Bellomo, D Goldsmith, S Uchino. A prospective before-and-after trial of a medical emergency team[J]. Medical Journal of Australia. 2003, 179(6): 283-287.

[4] R R Sumant, D A Andrew, J H Caroline, O R Keith and G S Kaveh. Effects of Rapid Response Systems on Clinical Outcomes: Systematic Review and Meta-Analysis[J]. Journal of Hospital Medicine, 2007, 2(6): 422-432.

[5] T A Anderson, G K Hart, M A Kainer. Pandemic influenza-implications for critical care resources in Australia and New Zealand[J]. Journal of Critical Care, 2003, 18(3): 173-180.

[6] S Su, C L Shih. Resource reallocation in an emergency medical service system using computer simulation[J]. American Journal of Emergency Medicine, 2002, 20(7): 627-634.

[7] Eva K Lee, Chen Chien-Hung, Pietz Ferdinand. Modeling and Optimizing the Public-Health Infrastructure for Emergency Response[J]. Interfaces, 2009, 39(5): 476-490.

[8] 张念. 基于自然灾害的应急资源配置[J]. 物流科技, 2010, 2: 19-21.

[9] 郭怀成. 洛阳城市水污染控制系统研究[J]. 地理学报, 1988, 43(4): 318-328.

[10] Holloway, Lawrence, Wang, Shuli. Analysis of Hospital Rapid Response Protocols Using Simulation[C]. 8th IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, 2012.

[11] 鲁翔. 大型医院医疗流程和资源配置的仿真决策系统研究[J]. 中国医院管理, 2005, 25(1): 10-13.

[作者简介]



倪玉丽(1988-),女(汉族),安徽黄山人,硕士生,研究方向:复杂系统建模与仿真;
李树刚(1973-),男(汉族),黑龙江齐齐哈尔人,博士,副教授,主要研究方向:医疗服务系统管理,信息系统与信息管,数据挖掘,软计算与人工智能,供应链与物流,网络游戏管理。