

排队论在生化恐怖袭击的医疗救助中的 决策支持^①

Decision Support for Anti-Biochemical Attack about Medical Capacity Analysis Based on Queuing Theory

周宁 于华 隋杰 (中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要: 生化恐怖袭击事件是危害性极大的小概率事件, 并且无法通过历史经验和真实实验来提高应急响应能力。以评估医疗救助能力的排队论模型为例, 提出了应对生化恐怖袭击的非稳态系统的建模和求解方法, 建立了适合生化恐怖袭击事件特性的多库决策支持系统结构, 将有关生化恐怖袭击事件处置的模型和算法集成到系统中, 验证了系统的可行性和实用性。

关键词: 生化恐怖袭击 决策支持系统 排队论 医疗救助能力

日本东京地铁沙林恐怖事件和美国“9.11”事件之后的“炭疽事件”生化恐怖袭击事件发生以来, 如何防范和应对生化恐怖袭击事件已经成为反恐工作中的一项重要任务。这类事件具有的发生概率小, 并且难于利用真实实验获取经验的特性, 若利用计算机建立相应模型, 并对整个过程进行模拟, 可以为相关决策过程提供支持, 在这类事件发生时可以高效及时地处理各种情况, 而且还可以运用于平时的防范训练中。

1 引言

1.1 文章安排

本文第2节介绍生化袭击中的非稳态系统建模与计算。第3节给出决策支持系统的实现。第4节给出结论以及未来工作。

1.2 基本介绍

关于计算机决策支持系统和应用的研究, 主要分为两类: 一类侧重于系统开发, 比如有决策支持系统在城市供水防洪抗旱及环境保护生态建设的应用^[1]。北京大学数字地球工作室国家“863”计划数字城市项目组, 进行了面向突发事件的数字城市应急指挥系统的总体设计, 成功的指导并实施运行了“北京市传

染性非典型肺炎疫情(SARS)分析决策支持系统”和“合肥地区非典防治决策支持系统”^[2]。另一类侧重于有关模型算法的应用方面, 魏宏业等人提出了智能交通系统体系结构, 采用数据挖掘及人工智能等技术, 对交通系统和突发事件提出优化方案, 为决策者提供决策支持^[3]。

本文利用排队论的理论方法, 通过对生化袭击中的受害者到达医院的到达速率、在医院等待救治的等待时间、医院的救治能力等因素的研究, 建立了非稳态排队论模型。并将有关生化恐怖袭击事件处置的模型和算法集成到信息系统中, 建立了适合生化恐怖袭击事件特性的多库DSS系统结构, 通过决策支持模型模拟生化事件发生后的环境, 能更有效地解决突发事件中管理调度和决策支持问题。应急管理决策支持可以帮助决策者提高决策水平和质量, 从而降低生化恐怖事件造成的损失。

2 生化袭击中的非稳态系统建模与计算

当发生生化恐怖事件时, 根据生化物质特性和日本沙林事件的经验教训, 除了一部分直接中毒者需要等待现场救治外, 大部分人都自行涌向医院。此时有

① 收稿时间:2009-03-04

必要对相关医院的救治能力进行考察,为采取进一步的措施,诸如转送受害者到其它医院、或派遣医生到救治医院等。

鉴于医院的救治能力并非只是简单的取决于急诊室的床位,医生等条件所决定,还与时间、受害者的到达率等诸多因素有关,本文中采用排队论对非稳态系统进行建模,针对生化事件发生后所设定的不同条件进行了建模和求解。

生化恐怖袭击事件发生后,最佳救治时间不应超过“黄金一小时”,否则可能影响受害者的预后效果,甚至造成伤亡的增加。为此需要根据医院的条件和受害者的人数等情况,计算出受害者的平均等待时间等参数,由此得出“黄金一小时”内可以救治的人数,即医院的救治能力。超出此人数的受害者则需要及早、尽快转移到其它医院。

本研究的设定场景如下:在某年某月某时刻,某地铁站台有数百余人在地铁中。从某毒剂疑似物中突然出现刺激性气味,并不断向站内空间蔓延,已有部分人群出现恶心,流泪等症状,极少数离疑似物较近者已产生严重症状,甚至倒地。此时可以想象将引起人群的恐慌,会争先恐后涌出地铁,必然向最近的医院求救,而且由于此类事件的独特性,无法以是否有外伤确定受到伤害与否,所以几乎站内的所有人员都涌向医院就诊。根据对现实情景的分析和经验可知,大部分受害者将会涌向离事发地点较近的某医院。

本文针对这一场景,利用排队论的方法首先计算受害者在每一时刻内到达医院的人数,作为最初应急响应的判断依据。再根据在“黄金一小时”内可能救治人数的概率的计算,分析医院救治能力即可留治的受害者人数,为采取进一步的措施提供依据。

为解决此问题,可根据受害人在单位时间内到达医院的平均到达率(λ)和医院的总平均服务率(μ)之间的关系,分为(λ)<(μ)和(λ)>(μ)两种的情况讨论。

2.1 参数说明

- λ 单位时间到达的受害人数;
- μ 单位时间每位医生救治的受害人数;
- S 并行服务台数;
- c 医院可容纳人数(系统容量);
- $N(t)$ 在时刻 t 系统中的受害者人数;
- ρ 系统的客流密度;
- $P_{ij}(\Delta t)$ 在时刻 t 系统中已有 i 位受害者的条件

下,在时间 Δt 内系统中有 j 位受害者的概率;

π_j $\lim_{t \rightarrow \infty} P_{ij}(t) = \pi_j$, 表示稳态时任意时刻队长为 j 的概率;

q_j 能进入系统的受害者进入系统时看到系统中有 j 个受害者的稳态概率;

L 系统稳态时平均队长;

L_q 系统稳态时任意时刻的平均等待队长;

$W(t)$ 系统稳态时受害者逗留时间的分布函数;

W 系统稳态时受害者的逗留时间;

W_q 系统稳态时受害者的平均等待时间;

W_s 系统稳态时受害者接受服务的平均时间;

ρ_s 有 S 个服务台时的客流密度;

π_s $\pi_s = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{N(t) = S\}$, 即任一时刻队长为 S 的概率;

$W_q(t)$ 系统内受害者等待时间的分布函数。

2.2 $\lambda < \mu$ 时医院救治能力的计算

当受害人在单位时间内到达医院的平均到达率(λ)不超过医院的总平均服务率(μ)时,可以利用排队系统(M/M/S/GD/ ∞/∞)方法计算医院的救治能力。此时系统为到达与救治均服从负指数分布,每个受害者所需救治时间独立,有 S 个并行服务台(包括医生和护士),系统容量不限。

假设受害者到达的时间间隔为 Δt ,每小时到达速率为 λ ,每小时救治速率 μ ,因 $\lambda < \mu$,所以此系统处于稳态。此时医院内受害者的平均等待时间的计算公式为:

$$W_q(t) = \frac{\rho_s}{\lambda(1-\rho_s)^2} \pi_s \quad (1)$$

医院内受害者的平均逗留时间的计算公式为:

$$W = W_q + \frac{1}{\mu} \quad (2)$$

在此情况下,医院能够在黄金一小时内救治所有受害者,我们只需计算出平均等待时间和平均等待人数,为救治的引导工作作参考。

2.3 $\lambda > \mu$ 时医院救治能力的计算

当受害人在单位时间内到达医院的平均到达率(λ)超过医院的总平均服务率(μ),即救治能力不足时,可以用有限容量的排队系统(M/M/S/GD/ c/∞)方法计算医院的救治能力。此时系统到达时间间隔、服务时间间隔服从负指数分布,有 S 台并行服务台,

系统容量 c 为有限, 顾客源无限。由于系统有限, 所以当系统中已有 c 位受害者时, 后到者将不能进入系统(在实际问题中就表现为需要将超出的受害者进行及时转院)。因而, 这时即使到达速率大于服务速率, 系统也不会产生“爆炸”, 并处于稳态。

下面讨论这一系统的各参数的计算。

设伤员为先到先救治, 设 q_j 表示到达且进入系统的受害者, 看到 j 个受害者的平稳概率: 则

$$q_j = \frac{\pi_j}{1 - \pi_c} \quad (j = 1, 2, \dots, c - 1) \quad (3)$$

等待时间服从 $j - c + 1$ 阶的埃尔朗分布, 受害者等待时间的分布函数为:

$$W_q(t) = P\{W_q \leq t\} = \begin{cases} \sum_{j=0}^{S-1} q_j & (t=0) \\ \sum_{j=0}^{S-1} q_j + \sum_{j=S}^{c-1} q_j \int_0^t \frac{S\mu(S\mu x)^{j-S}}{(j-S)!} e^{-S\mu x} dx & (t>0) \end{cases} \quad (4)$$

此时医院内受害者的平均等待时间的计算公式为:

$$W_q(t) = \sum_{j=S}^{c-1} \frac{j - S + 1}{S\mu} q_j \quad (5)$$

医院内受害者的平均逗留时间的计算公式为:

$$W = W_q + \frac{1}{\mu} \quad (6)$$

但由于 $\lambda > \mu$, 此时医院不能满足在“黄金一小时”内救治所有进入系统的受害者, 而且不能直接计算这一人数。在此使用受害者等待时间的分布函数, 以等待时间不超过“黄金一小时”的人数进行试算, 然后以一个可接受的概率, 确定医院可收治的人数。

为此, 当 $t \geq 0$ 时, 可由 (4) 式展开后得到(7)式, 即为受害者在医院等待救治的时间不超过“黄金一小时”概率。

$$W_q(t) = P\{W_q \leq t\} = \sum_{j=0}^{S-1} \frac{\pi_j}{1 - \pi_c} + \frac{\pi_0}{(1 - \pi_c)S!} (\rho^S (1 - e^{-S\mu t})) + \frac{\rho^{S+1}}{S} (1 - e^{-S\mu t} - S\mu t e^{-S\mu t}) + \frac{\rho^{S+2}}{S^2} (1 - e^{-S\mu t} - S\mu t e^{-S\mu t} - \frac{1}{2!} (S\mu t)^2 e^{-S\mu t}) + \dots + \frac{\rho^{c-1}}{S^{c-S-1}} (1 - e^{-S\mu t} - S\mu t e^{-S\mu t} - \dots - \frac{(S\mu t)^{c-S-1}}{(c-S-1)!} e^{-S\mu t}) \quad (7)$$

通过以上公式即可计算“黄金一小时”内可救治的人数、平均等待时间, 以及与此相对应的可得到救治的概率。计算结果如表 1 所示, 可以看出若以在“黄金一小时”内得到救治的概率大于 0.95 作为判断标

准, 有 10 名医生时, 可救治 58 人; 有 20 名医生时, 则有 123 人可以得到救治。

表 1 受害者的平均等待时间和概率

医生人数	可救治人数	平均等待时间(Hr)	60 分钟内可救治的概率
10	50	0.66	0.99
	53	0.71	0.99
	55	0.75	0.98
	58	0.80	0.95
	60	0.83	0.92
	65	0.91	0.77
	70	1.00	0.53
20	110	0.74	1.00
	120	0.83	0.98
	122	0.84	0.96
	123	0.85	0.95
	130	0.91	0.85
	135	0.95	0.71

由此可得到以下分析结果: ①超出救治能力的受害者须尽快转院, 其转院目的地医院的救治能力也可用此方法计算; ②第二种方法就是请求更多的医生来支援, 例如在本例中如果第一收治医院只有 10 医生, 只能救治 58 人, 如果再有 10 名医生来支援就可以达到 123 人的收治条件。虽然从理论上讲, 可以通过上述计算, 抽调足够的医生来第一收治医院以满足救治全部受害者的需求, 但考虑到医院条件(例如急诊室床位, 救助设备等)的限制, 转院治疗将是最可行的方式。

因此, 通过在决策支持系统中建立医院数据库和模型计算法库, 就可以利用这一模型和公式得到医院的救治能力。为事件发生时医院选择的决策作出支持。

3 决策支持系统的实现

在上节非稳态排队论模型的基础上, 建立生化恐怖袭击应急管理决策支持系统, 以实现以下功能: 第一, 作为事件发生时指挥决策的支持; 第二, 平时作为防灾反恐的训练; 第三, 要能与有关的信息平台集成。

在系统功能构成上, 用户通过决策指挥交互系统, 实现和数据库、模型库、算法库、GIS 库及相应的管理系统的交互过程, 如图 1 所示。模型库包括信息识别与提取模型、事件发展与影响等模型。算法库主要是根据不同的现场条件或不同的事件需求, 进行计算或推理等操作。数据库存储系统初始数据和产生的数据, 便于数据的存储、修改、查询以及运算统计功能。GIS 不但提供了地理信息更使得系统得到更直观的表达方式。

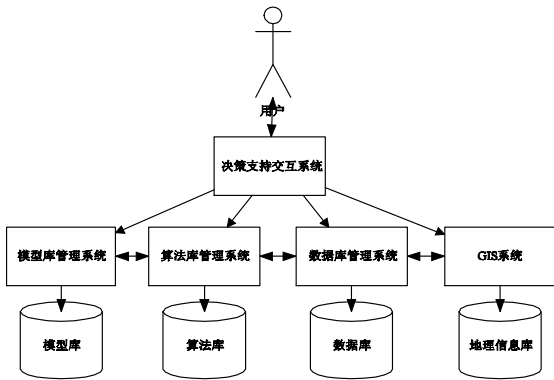


图 1 系统功能构成图

在本研究中采用 B/S 结构，主要处理客户端浏览器的服务请求,Web 服务器是本系统最重要的一层，系统所提供的各种功能都在这一层实现。

运算及模型服务器为一组应用服务器，该组服务器与以往的应用服务器层不同的是，该应用服务器层是由很多 XML Web Services 组成的，每个 XML Web Services 实现一个或几个运算模型的功能模块。由于很多模型的算法的运算开销很大，将这组服务器从 Web 服务器中分离出来，以提高整个系统的性能。这些 Web Services 可以完成 Web 服务器的 Web Services client 实现分布式调用请求。作为排队论的医疗救助的模型算法通过程序实现在 Web Services 的服务器端供 Web 服务器调用，如图 2 所示。



图 2 Webservice 分布式调用结构图

系统包含 Web GIS 的显示功能，Web GIS 采用微软的 VirtualEarth，通过 javascript 脚本在上 Virtual arth 进行二次开发，在其基础上我们开发了信息查询功能。用户在地图上点击某实体时，将属性显示在属性窗口。其中实体包括事发地点、医院基本信息以及医院救助能力等信息；查询定位功能可以在单位查询面板通过关键字查询某单位，在查询结果窗口选择查

询结果，可以快速定位到目标位置；在高级查询功能中能动态生成医院分布图。

图 3 表示在本系统中利用上节中的模型和算法输出表示的医疗救治能力的界面。当假设事发地点为玉泉路地铁站时，系统即可立刻找出附近的数个医院，并将医院的位置，可救治能力等信息表达出来。

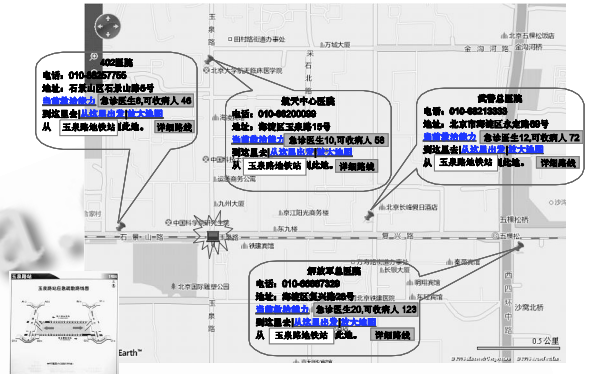


图 3 医院救治能力查询结果界面

4 决策支持系统的实现

本文利用排队论模型算法建立了瞬变行为系统，根据受害者到达速率和医院救治速率的关系，建立了医院救治能力的模型和求解公式，对可救治的人数、平均等待时间进行预测。

本文还介绍了基于 Webservice 实现的应急管理决策支持原型系统，以及其在医院救治能力的模块中的应用，初步验证了本系统用于生化恐怖事件处置过程中的决策支持能力。

在本文的后续研究中还将针对到达速率的函数，多队多台乃至多个医院协同等方面的模型计算和方法开展进一步的研究。同时进一步完善系统，扩展应用，并使之能够集成于国家应急管理信息系统中。

参考文献

- 1 田忠禄.有决策支持系统的枢纽橡胶坝安全运行管理自动化系统研究.国水利水电科学研究院学报, 2008,6(1):56-59.
- 2 李琦,郭玲玲,甘杰夫.城市突发公共卫生疫情分析与决策系统的设计.计算机工程, 2006,32(3):9-11.
- 3 魏宏业,吕永波,刘志硕.基于数据挖掘的智能交通系统的决策方法研究.交通运输系统工程与信息, 2003, 3(1):23-27.