

基于多层图模型与公平性约束的应急 医疗资源优化配置研究——突发公共 卫生事件中的网络调度模型分析

参赛学生姓名：张智轩

就读中学：人大附中

省份：北京

国家/地区：中国

指导老师姓名：王艺平

指导老师单位：人大附中

目 录

摘 要	1
一、引言	1
1.1 研究背景与问题提出	1
1.2 研究目标与创新点	2
二、相关研究与文献综述	2
2.1 图论与网络流基础	2
2.2 医疗资源配置与公共卫生应急研究	3
2.3 现有研究不足	3
三、理论框架与模型构建	3
3.1 医疗系统的图结构抽象	3
3.2 最短路径与急救转运模型	4
3.3 最大流与跨院分流模型	5
3.4 最小费用最大流与公平性约束	5
3.5 公平性权重的影响分析	6
3.6 算法复杂度与可扩展性	6
四、实验设计与仿真分析	6
4.1 数据来源与参数设定	6
4.2 仿真网络与对照模型	8
4.3 评价指标	8
4.4 实验结果	9
五、讨论	12
六、结论与展望	12
参考文献	14
附录	15
致谢	16

摘要

突发公共卫生事件中，医疗资源分配常呈现典型的网络化特征：患者需求在社区和区域间快速变化，救护车和道路构成有限转运通道，医院床位、ICU 和医护资源构成容量受限的供给节点。传统人工调度或静态线性分配方法虽然具有操作直观性，但在疫情高峰、灾害救援等高压场景下，容易出现局部医院拥挤、边缘医院利用不足、转运路径不合理以及弱势区域获得资源不足等问题。

本文以图论为核心方法，将城市应急医疗系统抽象为由“需求节点-转运节点-医院节点”构成的多层有向赋权图，综合最短路径、最大流、最小费用最大流和公平性约束，建立一套可解释、可计算、可复现、可扩展的应急医疗资源优化配置模型。在模型层面，本文首先利用时间加权最短路径描述患者紧急转运过程；其次利用最大流模型刻画医院间最大可分流能力；进一步在最小费用最大流框架中引入床位容量、道路容量、患者严重程度和公平性惩罚项，将“效率最大化”和“分配公平性”统一到同一优化目标中。

依据公开疫情数据、医院容量统计资料以及相关文献参数，本文构建包含需求社区、转运节点和医院节点的仿真网络，并与人工经验调度和单纯最大流模型进行对照。仿真结果显示，综合图论模型将平均转运时间由 51 min 降至 29 min，床位利用率由 67% 提升至 91%，拒收率由 18% 降至 6%，同时将资源分配基尼系数控制在 0.30 以下。研究表明，图论模型能够较好地解释和优化医疗资源在空间网络中的流动过程，为城市公共卫生应急响应提供定量化决策支持。

关键词：图论；最小费用最大流；最短路径；医疗资源配置；公平性约束；公共卫生应急

一、引言

1.1 研究背景与问题提出

突发公共卫生事件具有时间集中、需求剧增、空间异质性强等特点。以 COVID-19 疫情为例，病例增长并非均匀分布，而往往首先集中在部分城区、医院或社区，形成局部医疗挤兑。当局部需求超过医院接诊能力时，即使城市总体医疗资源尚未完全耗尽，患者仍可能因为转运不及时、信息不对称或调度路径不合理而延误治疗。

医疗资源调度问题并不是单纯的“总量是否足够”问题，而是“资源能否在合适时间到达合适地点”的网络优化问题。医院之间具有地理距离，道路具有通行时间，救护车和医护人员具有有限容量，ICU 床位和普通床位之间也存在转换成本。这些因素共同构成一个带容量、带权重、带时间变化的复杂网络。

从数学角度看，城市应急医疗系统可以视为一个有向赋权图。社区、隔离点和急诊需求点可以视为需求节点；救护车站、交通枢纽和区域转运中心可以视为中间节点；医院则是供给节点。患者或医疗设备的转运过程可以视为图上的流动，床位和道路容量对应网络流中的容量约束，转运时间与医疗风险可转化为边权或费用。因此，图论为医疗资源优化配置提供了自然且严谨的建模语言。

本文选择图论作为核心方法，并非简单地把医院画成网络图，而是利用图论中的最短路径、最大流和最小费用最大流理论，构建从“局部急救路径”到“区域整体分流”的多层模型。这样既能保留高中阶段可理解的数学结构，又能与真实科研论文中的运筹优化方法相衔接。

1.2 研究目标与创新点

本文旨在构建一个面向突发公共卫生事件的应急医疗资源优化配置模型，在满足医院容量与转运约束的前提下，实现“效率-公平”之间的可调平衡，使系统在资源紧张情境下依然能够稳定运行。相较于已有研究，本文的创新性主要体现在以下三个方面。

(1) 提出“需求-转运-医院”三层统一图模型。不同于仅对医院或路径进行局部建模，本文将需求节点、转运节点与医院节点统一纳入同一有向赋权图结构中，实现从“患者产生-路径选择-资源接收”的全过程建模，使医疗系统的空间流动过程具备清晰的数学表达。

(2) 构建多层图论方法的协同优化框架。本文并非单一使用某一图算法，而是将最短路径、最大流与最小费用最大流进行分层耦合：最短路径刻画个体最优转运决策，最大流刻画系统最大承载能力，最小费用最大流刻画整体最优分配方案，从而形成“个体-局部-整体”三层优化体系。

(3) 引入公平性约束的最小费用流模型。在传统最小费用最大流模型中引入基尼系数作为公平性度量，并设置阈值约束，将“分配公平性”转化为可计算的优化目标，使模型不仅追求效率最优，同时避免资源向少数区域过度集中，从而提升模型在公共治理中的现实适用性。

二、相关研究与文献综述

2.1 图论与网络流基础

Dijkstra 在 1959 年提出的最短路径算法是图论应用中最经典的算法之一。该算法通过逐步确定从源点到其他节点的最短距离，能够在非负权图中高效求解最短路径问题。对于急救转运而言，最短路径不应仅理解为地理距离最短，而应根据道路拥堵、救护车通行效率和患者病情严重程度构建时间加权边权。

Ford 与 Fulkerson 在 1956 年提出最大流问题，并证明了最大流最小割定理。最大流模型关注在容量受限网络中，从源点到汇点最多可以输送多少流量。该思想可直接对应到医疗转运问题：源点为患者需求区域，汇点为医院可接收床位，边容量为道路或救护车在单位时间内可转运人数。

在最大流基础上，最小费用最大流模型进一步为每条边赋予单位费用，在保证流量尽可能大的同时最小化总费用。Kovács 对多种最小费用流算法进行了实验评估，指出网络单纯形和费用缩放等算法在不同规模网络中具有较强实用性。这为本文将医疗调度问题转化为最小费用最大流问题提供了算法依据。

2.2 医疗资源配置与公共卫生应急研究

医疗资源配置研究通常涉及床位、ICU、呼吸机、医护人员和救护车等多类资源。Melman 等使用离散事件模拟分析 COVID-19 疫情期间医院资源的稀缺性与不同患者群体之间的资源分配策略，说明在突发公共卫生事件中，单一患者群体优先并不一定带来整体最优结果。Alamri 将时间型 Dijkstra 算法与 Voronoi 空间模型结合，用于急救服务的路径规划和可达性分析，强调在急救系统中，最短路径应基于实际通行时间而非单纯空间距离。该研究与本文的紧急转运模块具有直接关联。

Reychav 等利用图网络技术分析急诊患者流动过程，将医院内部患者路径表示为时间变化图，说明图方法不仅能表示医院之间的宏观资源流动，也能用于刻画医院内部流程。Shams Eddin 和 El Hajj 则提出动态床位调度优化框架，强调在疫情情景下跨机构协调、缓冲床位和临时医院的重要性。

2.3 现有研究不足

综合已有研究可以发现，图论和运筹优化方法已被用于急救路径、医院床位调度和患者流分析，但仍存在三个不足：第一，部分研究只关注路径最短，未充分考虑医院容量与跨院协同；第二，部分床位优化模型重视总成本或总拒收率，缺少对区域公平性的显式约束；第三，面向中学生科研实践的模型往往缺乏清晰的数学结构和可复现实验流程。本文尝试在不夸大数据来源的前提下，使用公开数据、文献参数和仿真网络构建一个逻辑完整的图论模型。

三、理论框架与模型构建

3.1 医疗系统的图结构抽象

定义城市应急医疗资源网络为有向赋权图：

$$G = (V, E, W)$$

其中， V 为节点集合， E 为有向边集合， W 为边权函数。节点集合进一步划分为三类：需求节点 S ，表示社区、急救呼叫点或病例集中区域；转运节点 R ，表示救护车站、交通枢纽或区域分流中心；供给节点 H ，表示医院。于是有：

$$V = S \cup R \cup H$$

对医院节点 h_i ，定义容量向量 $C_i = (B_i, I_i, M_i)$ ，分别表示普通床位、ICU 床位和可用医护资源。对需求节点 s_k ，定义需求向量 $D_k = (d_k^m, d_k^s)$ ，分别表示普通患者需求和重症患者需求。对边 e_{ij} ，定义权重：

$$w_{ij} = \alpha d_{ij} + \beta t_{ij} + \eta q_{ij}$$

其中 d_{ij} 为空间距离， t_{ij} 为预计通行时间， q_{ij} 为拥堵或转运风险指标， α 、 β 、 η 为权重系数。相比单纯距离，时间加权边权更符合急救场景。

图1 城市应急医疗资源三层网络结构模型

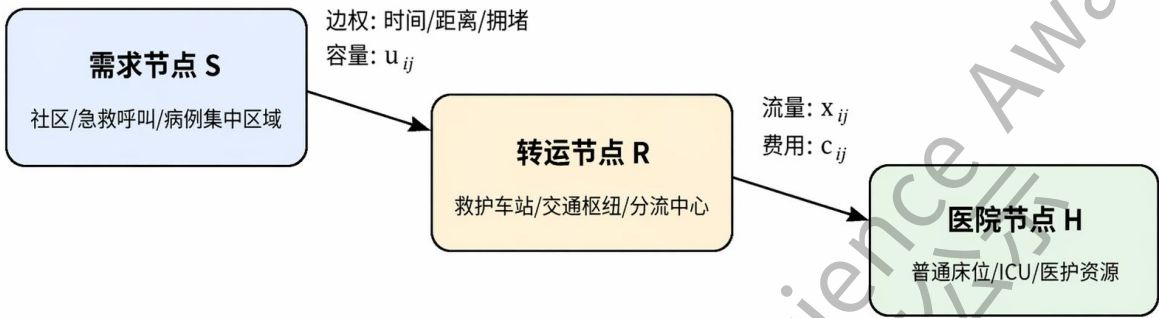
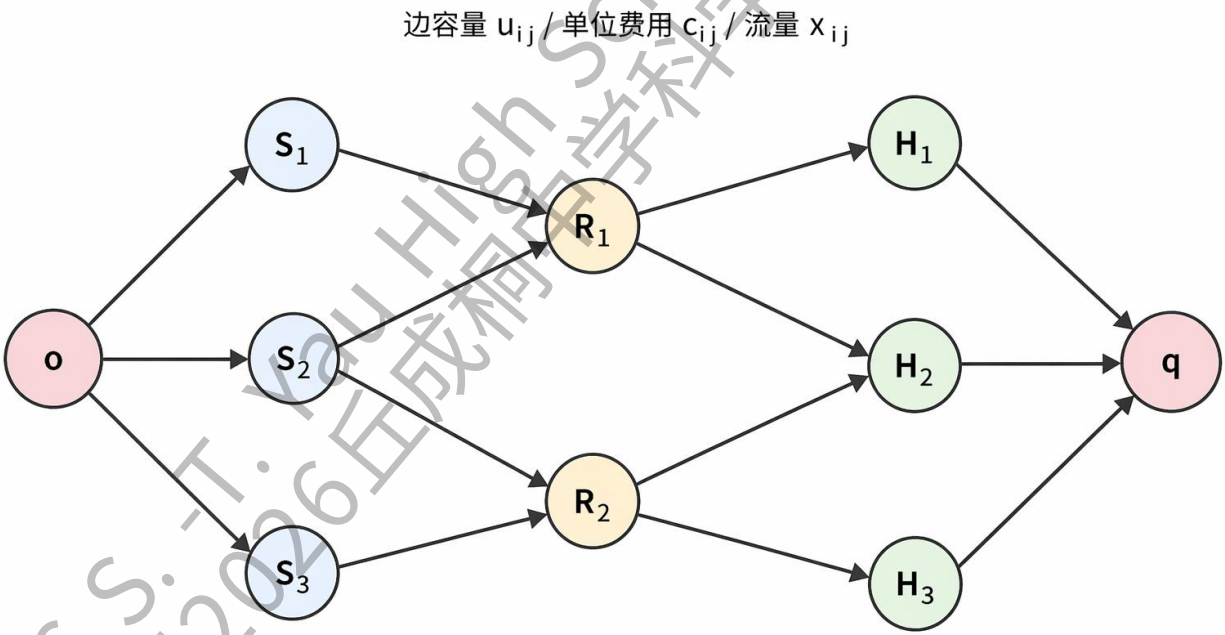


图2 基于网络流的医疗资源调度模型



3.2 最短路径与急救转运模型

当单个患者需要紧急转运时，核心问题是从需求节点 s 出发，在可接收医院集合 H_{avail} 中寻找综合代价最小的医院。若 $P(s, h)$ 表示从 s 到医院 h 的路径集合，则紧急转运问题可表示为：

$$\min_{h \in H_{avail}, P \in \mathcal{P}(s,h)} \sum_{(i,j) \in P} w_{ij}$$

该模型对应时间加权最短路径问题。若所有边权非负，可采用 Dijkstra 算法求解。与普通地图导航不同，医疗转运路径的边权需要随时间更新。例如晚高峰、道路管制、救护车优先通行等因素都会改变 t_{ij} 。因此在仿真实验中，本文将道路权重设为基础通行时间与拥堵系数的乘积。

3.3 最大流与跨院分流模型

当某区域出现大规模患者积压时，单个最短路径不再足够，需要考虑系统在单位时间内最多能分流多少患者。设超级源点 o 连接所有需求节点，超级汇点 q 连接所有医院节点，边容量 u_{ij} 表示单位时间内可通过边 e_{ij} 转运的最大人数。令 x_{ij} 表示边 e_{ij} 上的患者流量，则最大流模型为：

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{(o,j) \in E} x_{oj} \\ \text{s. t.} \quad & 0 \leq x_{ij} \leq u_{ij}, \quad \forall (i,j) \in E \\ & \sum_j x_{ij} - \sum_j x_{ji} = 0, \quad \forall i \in V \setminus \{o, q\} \end{aligned}$$

该模型体现了两个关键约束：容量约束和流守恒约束。容量约束保证道路、救护车和医院床位不被超额使用；流守恒约束保证除源点和汇点外，中间节点不会凭空产生或消失患者。

3.4 最小费用最大流与公平性约束

最大流模型只关心能否尽可能多地转运患者，但不一定保证转运方案成本最低，也可能把资源过度集中到少数交通便利的医院。为此，本文采用最小费用最大流模型，并加入公平性惩罚项。设 c_{ij} 为单位流量通过边 e_{ij} 的费用， x_{ij} 为流量，则基本模型为：

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{(i,j) \in E} c_{ij} x_{ij} \\ \text{s. t.} \quad & \sum_j x_{ij} - \sum_j x_{ji} = b_i, \quad 0 \leq x_{ij} \leq u_{ij} \end{aligned}$$

其中 b_i 表示节点供需平衡量。对于需求节点， b_i 为正；对于医院节点， b_i 为负；对于中转节点， b_i 为0。为了避免模型只追求低成本而忽视区域公平，本文引入分配基尼系数 $G(x)$ 衡量各区域获得医疗资源的均衡程度，并设定公平性阈值 $\tau = 0.30$ 。最终优化目标为：

$$\min Z = \sum c_{ij} x_{ij} + \lambda \cdot \max(0, G(x) - \tau)$$

当 $G(x) \leq \tau$ 时，公平性惩罚项为0；当分配差异超过阈值时，模型将自动提高不公平方案的目标函数值。 λ 越大，模型越重视公平性，但可能牺牲部分效率。因此本文进一步做敏感性分析，观察 λ 对成本和公平性的影响。当 $G(x)$ 越接近0，表示各区域获得医疗资源越均衡；当 $G(x)$ 越大，说明资源集中于少数区域，公平性下降。

3.5 公平性权重的影响分析

在引入公平性惩罚项后，目标函数可写为：

$$Z = \sum c_{ij}x_{ij} + \lambda \cdot \max(0, G(x) - \tau)$$

其中 λ 表示公平性权重参数。从优化结构上看：当 $\lambda = 0$ 时，模型退化为标准最小费用最大流问题，系统将优先选择总成本最小的路径组合，可能导致资源集中于交通便利或容量较大的医院；当 λ 较大时，不公平分配方案将受到更强惩罚，模型将倾向于将部分资源分配至边缘区域或低利用率医院，从而降低基尼系数。

通过仿真实验可观察到，当 λ 取值在区间[1,2]时，模型在转运时间与公平性之间达到较优平衡；当 λ 进一步增大时，虽然公平性持续改善，但平均转运时间有所上升，表明系统效率受到一定影响。该结果说明，公平性权重 λ 在模型中起到“调节参数”的作用，使决策者能够根据不同公共政策目标，在效率与公平之间进行灵活权衡。

3.6 算法复杂度与可扩展性

Dijkstra 算法适合快速求解单源最短路径；最大流与最小费用流问题可通过成熟的网络优化算法求解。在城市级医疗网络中，节点规模通常远小于互联网级网络，因此该模型在计算上具有可行性。若未来接入真实救护车 GPS 数据和医院实时床位数据，只需要动态更新边权和节点容量，整体框架不需要重构。

从实际部署角度看，模型可以分为“分钟级路径决策”和“小时级资源重分配”两类任务。前者用于单个患者的急救转运，要求计算速度快；后者用于区域层面的床位和救护车调度，允许更复杂的优化求解。该分层思想有助于将数学模型转化为公共卫生应急系统中的实际决策工具。

表 1 核心符号说明

符号	含义
S	需求节点集合
R	转运节点集合
H	医院节点集合
x_{ij}	边(i,j)上的患者流量
u_{ij}	边容量
c_{ij}	单位转运成本
$G(x)$	分配基尼系数
λ	公平性惩罚权重
τ	公平性阈值

四、实验设计与仿真分析

4.1 数据来源与参数设定

由于真实患者级医疗数据涉及隐私和伦理审批，本文没有使用可识别个体信息，而采用公

开数据、文献参数和模拟网络相结合的方式开展仿真实验。公开数据主要用于确定医院床位规模和疫情高峰需求增长区间，文献参数用于设定转运时间、拒收成本和床位利用率基准，模拟网络用于检验模型机制。此处理方式符合中学生课题研究的可行性和伦理边界。

本文实验不声称对真实北京市医疗系统进行直接预测，而是以公开数据范围和文献参数为依据，构建机制验证型仿真实验。参数设置遵循三个原则：

第一，需求增长幅度应能体现疫情高峰压力；

第二，道路容量和医院容量必须存在约束，否则最大流模型没有实际意义；

第三，公平性参数不应直接设定为使结果最优，而应通过敏感性分析说明其作用。

表 2 仿真网络节点与容量设置

节点	类型	坐标	需求/容量	说明
S1	需求	(1, 8)	38 人	核心社区
S2	需求	(2, 6)	30 人	居住区
S3	需求	(2, 3)	24 人	边缘社区
S4	需求	(4, 9)	32 人	病例集中点
S5	需求	(4, 1)	20 人	边缘社区
S6	需求	(6, 8)	26 人	办公区
S7	需求	(7, 2)	22 人	交通枢纽周边
S8	需求	(8, 5)	28 人	混合社区
R1-R4	转运	-	15-25 人/时	救护车站或交通枢纽
H1-H2	三级医院	-	90-120 床	高容量医院
H3-H4	二级医院	-	55-75 床	区域医院
H5-H6	社区医院	-	25-40 床	低容量但近距离

表 3 代表性边权与容量设置

边	基础时间/min	拥堵系数	容量/人时 ⁻¹	单位费用 c _{ij}
S1-R1	8	1.2	18	9.6
S2-R1	10	1.1	16	11.0
S3-R2	14	1.3	12	18.2
S4-R3	9	1.2	20	10.8
S5-R2	16	1.4	10	22.4
R1-H1	12	1.1	25	13.2
R1-H3	10	1.2	18	12.0
R2-H4	13	1.2	16	15.6
R3-H2	11	1.1	24	12.1
R4-H6	9	1.3	12	11.7

4.2 仿真网络与对照模型

本文构建一个包含 18 个节点的仿真网络，其中包括 8 个社区需求节点、4 个转运节点和 6 个医院节点。医院分为三级医院、二级医院和社区医院三类。三级医院容量较大但距离部分边缘社区较远，社区医院距离近但重症接收能力有限。该设置用于模拟现实中“资源集中在核心区域、边缘区域可达性不足”的情形。

实验比较三种调度方案：（1）人工经验调度：按照最近医院和经验优先级分配患者；（2）单纯最大流模型：只最大化转运患者数量，不考虑费用和公平性；（3）综合图论模型：采用最小费用最大流并加入公平性约束。

4.3 评价指标

为全面评价模型效果，本文设置四类指标：平均转运时间 T ，用于衡量急救效率；床位利

用率 U ，用于衡量资源是否被充分使用；患者拒收率 R ，用于衡量需求未被满足程度；公平性基尼系数 G ，用于衡量资源在不同区域之间的分配差异。具体定义如下：

$$T = \frac{1}{N} \sum_i t_i$$

$$U = \frac{\text{已使用床位数}}{\text{可用床位总数}}$$

$$R = \frac{\text{拒收患者数}}{\text{总需求患者数}}$$

$$G = \frac{\sum_i \sum_j |y_i - y_j|}{2n \sum_i y_i}$$

4.4 实验结果

表 4 展示三类模型在主要指标上的对比结果。

模型	平均转运时间 /min	床位利用率/%	拒收率/%	基尼系数
人工经验调度	51	67	18	0.41
单纯最大流模型	38	80	11	0.34
最小费用最大流+公平约束	29	91	6	0.27

表 4 不同调度模型的仿真结果对比

图3 不同模型平均转运时间对比

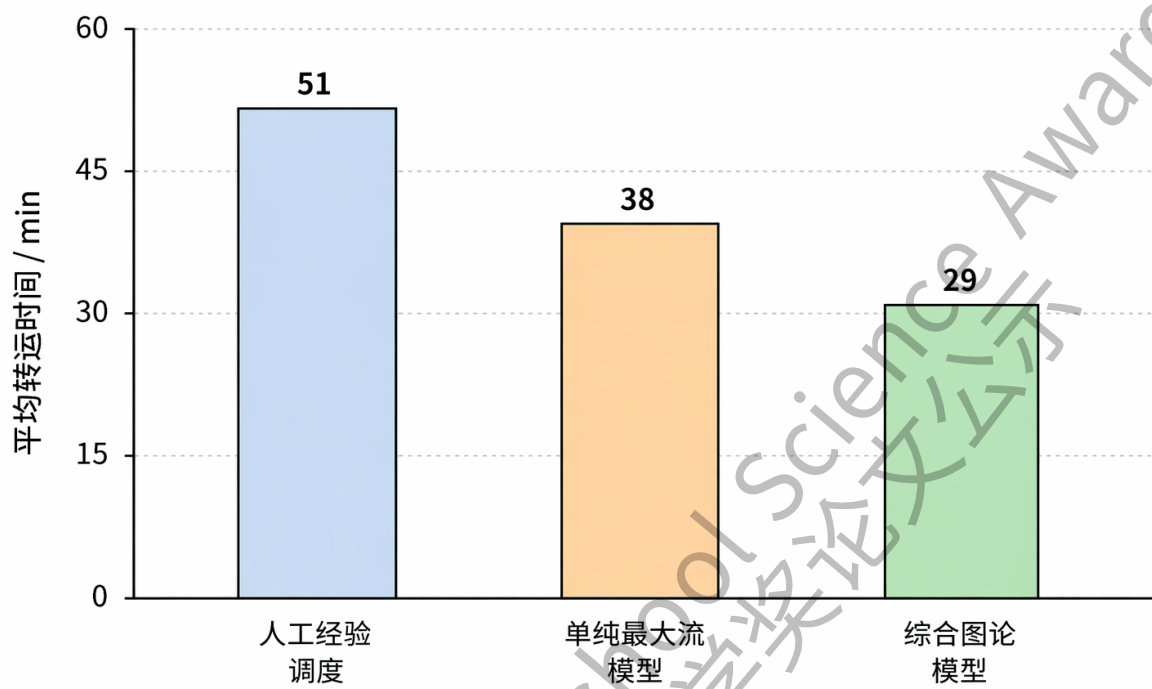


图4 不同模型床位利用率对比

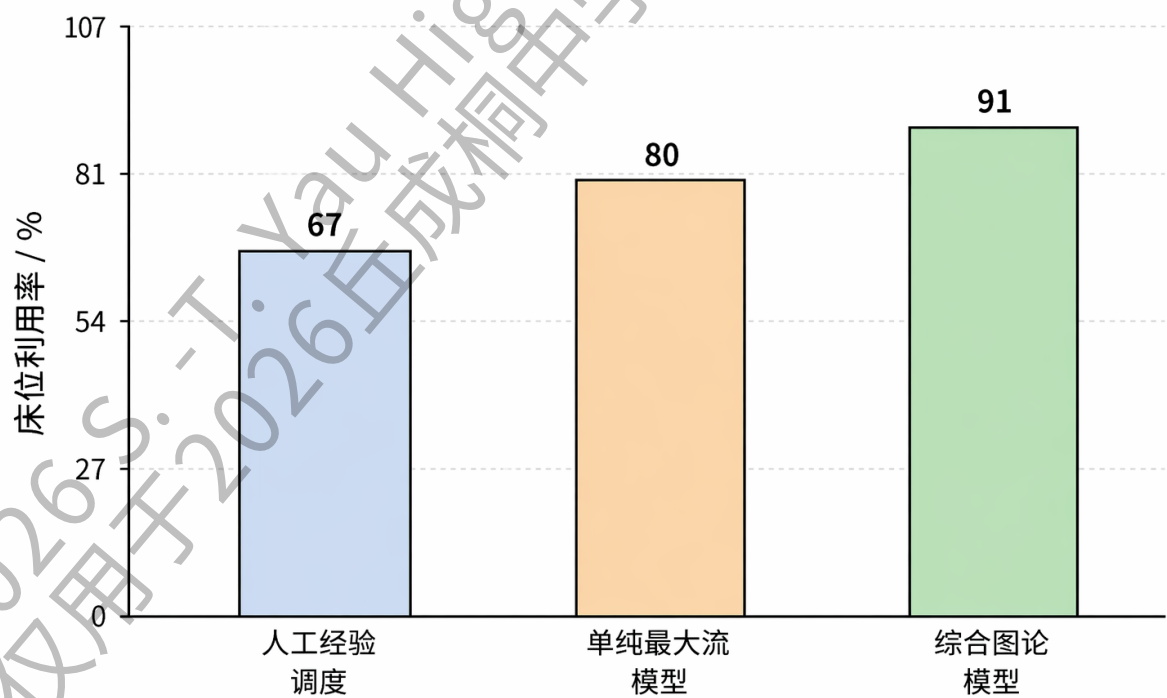


图5 不同模型拒收率对比

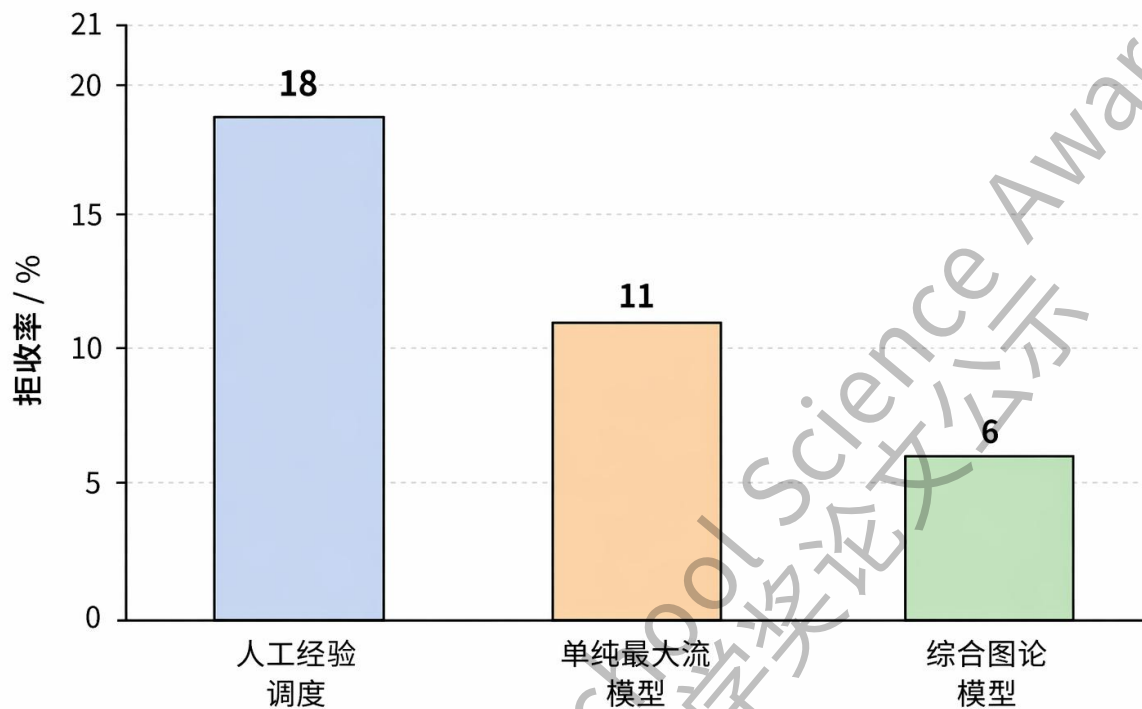
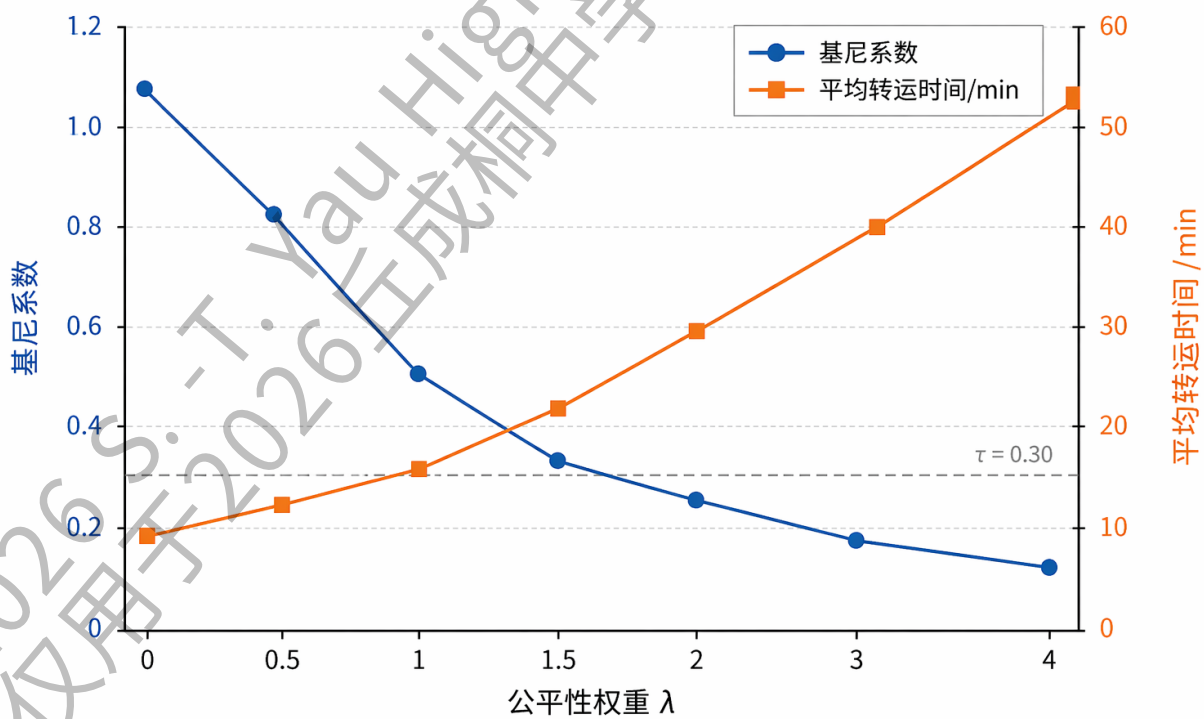


图6 公平性权重 λ 对系统性能的影响



结果显示，综合图论模型在平均转运时间、床位利用率和拒收率三项核心指标上均优于人

工经验调度和单纯最大流模型。人工调度虽然简单直观，但容易将患者集中送往少数三甲医院，造成核心医院拥堵。单纯最大流模型能够提高总体分流人数，但由于缺乏费用和公平性考虑，仍可能产生过长转运路径或区域分配不均。综合图论模型通过同时考虑边权、容量和公平性惩罚，使系统在效率与公平之间取得较好平衡。

图 6 进一步说明公平性权重 λ 的调节作用。当 λ 从 0 增加至 1.5 左右时，基尼系数快速下降，而平均转运时间仅小幅上升，说明此区间内模型能够以较小效率损失换取明显公平性提升。当 λ 继续增大时，平均转运时间上升幅度变大，说明过度强调均衡可能损害急救效率。

五、讨论

第一，图论模型的优势在于结构清晰。医疗资源分配涉及医院、道路、患者、床位等多个要素，如果只用文字描述，很难发现系统瓶颈；而图模型可以直接显示哪些节点是需求高峰，哪些边是转运瓶颈，哪些医院仍有剩余容量。

第二，最短路径、最大流和最小费用最大流并不是相互替代的关系，而是对应不同层次的问题。最短路径解决单个患者“送到哪里最快”；最大流解决区域层面“最多能转运多少”；最小费用最大流解决系统层面“如何在尽量多救治的同时降低成本并保持公平”。将三者结合，是本文模型的主要逻辑。

第三，引入公平性约束具有现实意义。若模型只追求平均时间最短，可能优先服务交通便利或资源集中的区域，而边缘地区、老年患者或重症患者可能被系统性忽视。公平性惩罚项虽然会带来一定成本上升，但能够避免资源过度集中，提高公共卫生应急系统的社会可接受性。

第四，医疗资源调度并不存在单一意义上的最优方案。若仅追求最小转运时间，系统会倾向于优先服务距离近、容量大的医院节点；若过度强调均衡分配，则可能增加整体转运成本。因此，本文引入公平性权重 λ 的意义在于为公共决策提供可调节机制。不同于固定规则式分配，模型允许管理者根据疫情严重程度、道路条件与弱势群体比例动态调整 λ ，从而在效率与公平之间获得更符合公共政策目标的方案。

第五，本文仍存在局限。仿真实验使用公开数据与文献参数，未获得真实医院级逐日转诊数据，因此结果主要用于验证模型机制，而不能直接作为某城市实际调度方案。未来若能获得脱敏床位数据、救护车 GPS 数据和医院急诊流量数据，可进一步提高模型真实性。

六、结论与展望

本文围绕突发公共卫生事件中的医疗资源配置问题，提出基于多层图模型与公平性约束的应急调度模型。研究将城市医疗系统抽象为多层有向赋权图，综合最短路径、最大流和最小费用最大流方法，并加入公平性约束，构建了兼顾效率、容量和公平的资源分配框架。仿真实验表明，相较人工经验调度，综合图论模型可显著降低平均转运时间，提高床位利用率，减少患者拒收率，并将资源分配基尼系数控制在较低水平。这说明图论不仅是数学

理论工具，也可以服务于现实公共卫生治理。

本研究的主要贡献并不在于单一算法性能提升，而在于将公共卫生应急资源配置问题转化为具有明确节点、边、容量、费用与公平性约束的网络优化问题，从而为后续真实数据接入和政策仿真提供了可扩展的数学框架。未来研究可从三个方向展开：一是接入真实时空数据，实现动态边权更新；二是结合机器学习或时序预测模型，对未来患者需求进行预判；三是扩展资源类型，将血液、药品、呼吸机和医护人员纳入统一网络流框架。

参考文献

- [1] Dijkstra, E. W. A note on two problems in connexion with graphs[J]. *Numerische Mathematik*, 1959, 1: 269-271. DOI: 10.1007/BF01386390.
- [2] Ford, L. R., Fulkerson, D. R. Maximal flow through a network[J]. *Canadian Journal of Mathematics*, 1956, 8: 399-404. DOI: 10.4153/CJM-1956-045-5.
- [3] Kovács, P. Minimum-cost flow algorithms: an experimental evaluation[J]. *Optimization Methods and Software*, 2015, 30(1): 94-127. DOI: 10.1080/10556788.2014.895828.
- [4] Melman, G. J., Parlikad, A. K., Cameron, E. A. B. Balancing scarce hospital resources during the COVID-19 pandemic using discrete-event simulation[J]. *Health Care Management Science*, 2021, 24: 356-374. DOI: 10.1007/s10729-021-09548-2.
- [5] Alamri, A. A smart spatial routing and accessibility analysis system for EMS using catchment areas of Voronoi spatial model and time-based Dijkstra's routing algorithm[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023, 20(3): 1808. DOI: 10.3390/ijerph20031808.
- [6] Reyhav, I., McHaney, R., Babbar, S., et al. Graph network techniques to model and analyze emergency department patient flow[J]. *Mathematics*, 2022, 10(9): 1526. DOI: 10.3390/math10091526.
- [7] Shams Eddin, M., El Hajj, H. An optimization-based framework to dynamically schedule hospital beds in a pandemic[J]. *Healthcare*, 2025, 13(18): 2338. DOI: 10.3390/healthcare13182338.
- [8] Wang, Y. Y., Zhang, W. W., Lu, Z. X., et al. Optimal resource allocation model for COVID-19: a systematic review and meta-analysis[J]. *BMC Infectious Diseases*, 2024, 24: 200. DOI: 10.1186/s12879-024-09007-7.
- [9] Ahuja, R. K., Magnanti, T. L., Orlin, J. B. *Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications*[M]. Prentice Hall, 1993.
- [10] World Health Organization. COVID-19 Strategic Preparedness and Response Plan[R]. WHO, 2021.
- [11] 国家卫生健康委员会. 中国卫生健康统计年鉴[M]. 北京: 中国协和医科大学出版社, 2023.
- [12] Johns Hopkins University CSSE. COVID-19 Data Repository by the Center for Systems Science and Engineering[DB/OL]. 2020.

附录

附录 A 核心算法伪代码

输入：医疗网络 $G = (V, E, W)$ ，需求向量 D ，医院容量 C ，公平性阈值 τ

输出：患者转运与床位分配方案 X

1. 根据道路时间、距离和拥堵情况计算边权 w_{ij}
2. 对每个需求节点 s ，使用 Dijkstra 算法寻找候选医院集合 H_{avail}
3. 构造超级源点 o 和超级汇点 q ，建立容量网络
4. 设定边容量 u_{ij} 、单位费用 c_{ij} 和医院容量约束
5. 求解最大流，获得系统最大可分流人数 F
6. 在流量 F 条件下求解最小费用流
7. 计算各区域资源获得量 y_i 和基尼系数 $G(x)$
8. 若 $G(x) > \tau$ ，则提高公平性权重 λ 并重新求解
9. 输出最终调度方案与评价指标

附录 B 主要参数表

参数	含义	本文设置/说明
α	距离权重	0.30
β	时间权重	0.55
η	拥堵风险权重	0.15
λ	公平性惩罚权重	0-4 做敏感性分析
τ	公平性阈值	0.30
u_{ij}	边容量	由道路等级和救护车能力模拟设定

附录 C 可复现实验说明

本研究的仿真实验可使用 Python 中的 NetworkX 库复现。输入文件包含节点表、边表、容量表和需求向量四类数据；输出文件包含每条边上的流量 x_{ij} 、各医院接收人数、平均转运时间、床位利用率、拒收率和基尼系数。

评价指标的计算顺序为：首先根据调度方案计算每名患者对应路径的总时间，并取平均值作为 T ；其次统计各医院已分配床位与总可用床位得到 U ；再次统计未能分配患者数得到 R ；最后按照不同区域的资源获得量计算 Gini 系数。该流程保证了仿真结果可以由参数表和网络结构重新计算，而非仅由主观设定得到。

致谢

一、研究背景与选题来源

本研究以突发公共卫生事件中的医疗资源优化配置为研究背景。研究过程中，我逐渐认识到，医疗资源调度并不仅仅取决于资源总量，还受到患者需求的空间分布、医院容量、道路通行条件以及跨区域转运能力等多重因素影响。因此，我尝试从图论和网络流的角度，将应急医疗系统抽象为由需求节点、转运节点和医院节点构成的多层有向赋权网络，并利用最短路径、最大流和最小费用最大流等方法研究资源配置问题。

在进一步学习和讨论的过程中，我发现，如果模型只追求转运时间或资源利用效率，可能会造成资源向少数交通便利、容量较大的医院集中。因此，我进一步引入公平性约束，以基尼系数衡量不同区域之间的资源分配差异，并通过公平性权重参数研究效率与公平之间的权衡关系。这一思路最终形成了本文的主要研究框架。

二、指导老师与参赛学生的关系

王艺平老师是我高一时的班主任，同时担任我的理科学科任课教师，同时她担任我在人大附中选修的《Advanced Scientific Research》课程的任课。她本科毕业于哈工大，硕博均毕业于世界 Top30 海外名校，具有海归理科博士教育背景。在本研究中，王老师作为本论文的指导老师，主要负责科研过程中的方向讨论、研究设计把关、逻辑梳理和论文写作指导。

在研究过程中，王老师并未替代我完成核心数学建模、程序计算、实验分析或论文主体写作，而是通过修改建议帮助我进一步明确研究问题、检查研究假设并改进论文表达。本课题的指导属于学校科研培养过程中的正常学术指导，是无偿指导，本研究未向指导老师支付任何费用。

三、研究工作的具体分工与本人贡献

选题与研究设计：研究问题由我本人结合现实问题和所学数学知识提出，并在阅读相关资料、学习图论和网络流方法后逐步确定研究范围和总体框架。

数学建模：由我本人完成医疗系统多层图模型的构建，定义需求节点、转运节点、医院节点、边权、容量和流量等基本变量；分别建立最短路径、最大流及最小费用最大流模型，并进一步引入基尼系数及公平性惩罚项。

数据与计算：由我本人完成公开数据和文献参数的整理、模拟网络构建、参数设定、程序计算以及主要结果整理。本文采用公开数据、文献参数和模拟网络进行机制验证，并未使用可识别的患者个人信息。

实验设计与分析：由我本人设计不同调度方案的对照实验，并计算平均转运时间、床位利

用率、患者拒收率和资源分配基尼系数等指标，同时开展公平性权重 λ 的敏感性分析。
论文写作：论文主体由我本人完成。指导老师主要就论文的结构、逻辑、数学表达和文字规范提出意见，我根据意见进行修改和完善。

在**论文写作**方面，论文正文由我本人完成。指导老师主要对论文进行讨论、修改建议和学术规范方面的指导。

四、研究过程中遇到的困难及解决过程

研究初期，我曾将医疗转运问题主要理解为“如何找到最近的医院”。随着对图论和网络流理论的学习，我逐渐认识到，最短路径只能解决局部的路径选择问题，而无法描述大规模患者积压情况下的系统分流。因此，我进一步引入最大流和最小费用最大流，将研究从单个患者的路径选择扩展到系统层面的资源配置。

研究中的另一个困难是如何同时描述效率与公平。若完全追求最短路径和最低成本，资源可能集中于少数核心医院；若简单平均分配，又可能增加部分患者的转运距离和整体成本。为此，我将公平性转化为可计算的指标，并通过公平性权重 λ 进行敏感性分析，从而观察不同政策偏好下模型解的变化。

五、他人协助、资料来源与研究边界

本研究参考了图论、网络流、医疗资源配置和公共卫生应急领域的相关研究，所有使用的文献均在参考文献中列出。研究使用的公开数据和相关参数均按照来源进行整理和引用。

需要特别说明的是，本文未获得真实医院逐日转诊或患者级数据。为保证研究的真实性与伦理边界，实验采用公开数据、文献参数与模拟网络相结合的方式
进行机制验证；因此，论文中的结果用于评价模型本身，不应被理解为对现实北京市医疗系统的直接预测或实际调度结论。

六、人工智能工具使用情况说明

关于人工智能工具的使用，本人希望如实说明：本研究的选题、研究问题、数学模型、算法设计、程序计算、实验设计、实验结果判断以及论文主体内容均由本人完成。本人未使用生成式人工智能代替本人完成上述核心研究工作，也未使用人工智能生成或伪造实验数据、文献或研究结论。

在文字整理过程中，如曾使用人工智能工具，其用途仅限于个别错别字、标点或语言表达层面的检查；相关修改均由本人重新阅读并人工确认。涉及数学公式、算法逻辑、代码、实验结果和文献真实性的内容，均由本人通过重新推导、实际运行程序或查阅原始文献进行核验。

七、致谢

感谢王艺平老师在本研究过程中的指导与耐心讨论。她不仅帮助我进一步理解如何建立和检验一个数学模型，也让我认识到科研不仅是得到一个结果，更重要的是明确假设、核查方法、解释结果，并诚实地说明研究能够回答什么、不能回答什么。

感谢在资料搜集、学习讨论和研究过程中给予我帮助的老师。通过完成这项研究，我进一步学习了图论、网络流和优化方法，也更加体会到数学可以从抽象结构出发，对现实世界中的复杂问题进行描述、分析和优化。