

公共卫生事件下应急医疗运输专用道网络研究

梁 桢, 梁士栋

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2024年11月24日; 录用日期: 2025年2月4日; 发布日期: 2025年2月12日

摘 要

在大城市院前应急中, 急救中心派遣车辆及时到达需求点并送患者至医院对生命安全至关重要。为缩短救援时间, 合理规划救援专用道尤为关键。然而, 大城市医院周边路网复杂多变, 针对这一特点, 本文从宏观角度研究一种具备方向救援专用道保留问题, 以提升应急救援效率。本文提出双层规划模型, 上层以最小化专用道总长度、救护车行驶时间及冲突强度为目标, 决定哪些路段保留专用道并设置其行驶方向; 下层结合基于车道数的改进Dijkstra算法, 优化救护车行驶路径, 保证出行时效性。为求解模型, 设计了基于权重的遗传算法, 并通过实例验证其在大规模应急响应中的有效性与实用性, 显著提升了救援车辆优先通行的效率与时效。

关键词

应急专用道布设, 冲突强度, 最短路径, 双层规划

Research on Emergency Medical Transport Network of Dedicated Lanes under Public Health Emergencies

Zhen Liang, Shidong Liang

Business School, University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai

Received: Nov. 24th, 2024; accepted: Feb. 4th, 2025; published: Feb. 12th, 2025

Abstract

In urban pre-hospital emergency scenarios, the timely dispatch of ambulances by emergency centers to meet demand points and transport of patients to hospitals is critical to ensuring life safety. To reduce rescue time, the rational planning of dedicated rescue lanes is especially important. However, the road networks surrounding hospitals in large cities are complex and dynamic. Addressing

this characteristic, this study investigates, from a macro perspective, a directional rescue lane retention problem to enhance emergency response efficiency. The study proposes a bi-level programming model. The upper level aims to minimize the total length of dedicated lanes, ambulance travel time, and conflict intensity, determining which road segments should retain rescue lanes and their travel directions. The lower level, incorporating an improved Dijkstra algorithm based on lane numbers, optimizes ambulance travel routes to ensure timeliness. To solve the model, a weight-based genetic algorithm is designed, and its effectiveness and practicality in large-scale emergency responses are validated through case studies. The results demonstrate a significant improvement in the efficiency and timeliness of priority passage for rescue vehicles.

Keywords

Emergency Lane Planning, Conflict Intensity, Shortest Path, Dual-Layer Planning

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着交通需求的迅速增加和城市化进程的不断加快,城市交通问题日趋严重,交通拥堵已成为制约城市发展的重大挑战,尤其是在大城市中。高人口密度的大都市中,交通事故、疾病和急救事件的发生频率较高,导致对救护车的需求持续上升,同时对救护车响应时间的要求也愈加严格[1][2]。据统计数据表明,急救反应时间超过 5 min 的患者死亡概率为 1.58%,而低于 5 min 的患者死亡概率为 0.51% [3]。因此,制定先进的交通管理策略,充分利用现有交通网络,优先保障急救车辆通行显得尤为重要和必要。车道保留策略为特殊任务车辆提供了畅通的通行环境,确保其能够在规定时间内完成运输任务。然而,这种措施可能会加剧相邻非专用车道上的社会车辆拥堵。因此,需要审慎选择哪些车道应设为专用道,以满足特殊运输需求,同时将对整体路网交通的负面影响降到最低。这一问题被称为车道保留问题(LRP)。

众所周知,公交专用道作为一个 LRP 问题的成果案例,许多学者对公交专用道的布局方法和有效性进行了评价。总体上,研究结果可分为两类:微观仿真评价和宏观网络设置优化。前者主要使用仿真工具来评价公交专用道设置方案的有效性;后者通常采用双层规划模型来确定公交专用道的最优布局。Xu 等人[4]介绍了一个综合框架,用于城市专用公交车道网络的性能监测。它从旅行者和交通管理者的角度确定了明确的定量绩效指标。Mesbah 等人[5]首先将 LRP 视为一场斯塔克尔伯格竞赛,其中交通主管作为领导者,而乘客作为追随者。他们为现有的公交专用道交通优化建立了一个双级规划模型。上层的目标是在车辆运行处于预算约束下时最小化用户旅行时间,而下层则由模态分裂和用户均衡(UE)分配模型组成。该实验以 38 个节点和 9 条总线为例。然后, Mesbah 等人[6]对上述问题进行了大规模的扩展,并开发了一种更精细的遗传算法。

2009 年, Wu 等[7]人根据 2010 年广州亚运会的要求,首次制定了一个 ILP 来研究时间受限 LRP 问题。提出了一个构造启发式算法,得到了一个在网络中有 23 个节点和 11 个任务的小实例的接近最优解。随后,为了有效地解决[7]中 LRP 的大型实例,学者分别在[8]和[9]中提出了 tabu 搜索算法和改进的量子进化算法(QEA)。Fang 等人[10]提出了一种具有残余容量约束(CLRP)的 LRP。提出了一种 ILP 方法,并提出了一种切割求解方法。工作[11]通过引入切割平面技术改进了[12]中的算法,并解决了网络中多达 120

个节点和 30 个任务的实例。从路网的角度对 LRP 的研究也集中在不同的场景上, 如应急物资[10]、大型事件运输[13] [14]、危险物质运输和自动卡车运输等。由于不同 LRP 的特殊特点, 考虑到容量或预算等不同的约束条件, 建立了一些改进的整数程序。此外, 与上述研究不同的是, Bai 等人[15]在车道保留决策中考虑了环境因素, 并制定了一个整数线性规划, 以最小化总碳排放。虽然静态和确定性模型可以捕捉到 LRDP 的内在特征, 但它们没有考虑到道路旅行时间的不确定性, 这阻碍了它们在现实环境中的适用性和可行性。在道路旅行时间不确定的情况下, LRP 很少被关注。Fang 等人[16]提出了一个动态 LRP, 该 LRP 将道路旅行时间离散到多个时代, 每个时代都是不同的。然而, 周期的最大函数是 6 个。Wu 等人[17]研究了一种鲁棒的 LRDP, 以最小化由车道保留造成的行驶延迟, 并最大限度地提高对不确定的道路行驶时间的鲁棒性。为此建立了一个双目标 MILP 模型。文献中关于城市道路保留策略的理论类型研究较少。

现有文献表明, 对于大城市应急救援车辆的专用车道保留问题, 相关研究仍然不足, 特别是针对医院救援车辆这一特殊类型的研究较为匮乏。同时, 在大城市路网层面上合理设置救援专用道的研究也较少。然而, 急救需求和响应时间对于大城市至关重要。为此, 本文提出了一种新的车道保留问题(LRP), 聚焦大城市院前急救车辆, 优化布设具有方向性的救援专用道。研究的目标是优化选择哪些道路需要作为救援专用道, 避免救护车因频繁进出专用道而影响整体交通效率。最终, 本文实现了一种以医院为核心、向外辐射分布, 具备正向、反向、双向的救援专用道布局, 确保救援专用道、医院和急救车辆之间的高效协同。因此为了填补上述空白, 本研究做出了以下贡献:

- 1) 针对院前救援车辆的特殊需求, 提出了基于医院附近路网特性的有向专用道保留问题, 并构建了考虑车道数因素的 LRP 双层模型, 用于优化有向救援专用道的布设。
- 2) 采用遗传算法应对复杂路网的快速求解需求, 在包含 75 个节点、117 条弧的真实路网中验证了算法的高效性和适用性。
- 3) 运用排队论量化路网终点的冲突强度, 将交叉口和道路抽象为服务台和排队列, 提供了公式化描述方法。

2. 问题描述

在大规模医疗急救需求背景下, 随着急救呼叫频率的急剧上升, 大城市中医护车辆的行驶时间和距离显著增加, 对车辆的需求量也随之激增。城市交通拥堵与复杂路网的叠加进一步恶化了医院周边的交通状况, 严重影响了医疗急救服务的响应速度和效率, 使救援车辆难以及时到达患者身边, 增加了患者生命安全和健康的风险。因此, 本文以大城市为背景, 围绕医院为中心, 根据应急点需求, 在复杂路网中寻找合适路段设置专用道。这些专用道能够高效连接医院与应急点, 确保医护车辆快速抵达并返回, 从而缩短救援时间, 降低患者生命受到威胁的可能性。如图 1 所示。

3. 双层优化模型

3.1. 模型假设

- 1) 静态城市道路网络: 假设城市道路网络是已知的和固定的, 包括道路、交叉口节点、医院和紧急事件位置。
- 2) 道路属性: 每条道路的长度和行驶时间是已知的, 可以从实际路况中获取。在紧急情况下, 假设救护车可以不受限制地使用专用车道, 从而大大缩短了行驶时间, 大大减少了在常规道路上的行驶时间。
- 3) 最短时间路径: 在紧急情况下, 救护车始终选择从医院到紧急事件地点的最短路线。
- 4) 专用车道的建设: 专用车道的建设不受任何物理或预算限制的限制。

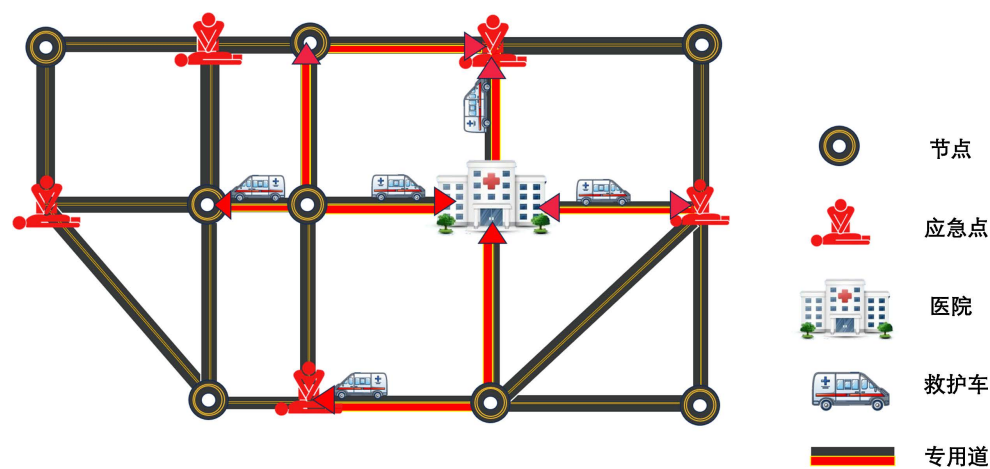


Figure 1. Schematic diagram of emergency dedicated lane layout
图 1. 应急专用道布设示意图

3.2. 变量描述

符号	描述
V	节点集合
E	道路段集合
$G(V,E)$	包含节点 V 和边 E 的有向图
K_{rs}	从起点 r 到终点 s 的所有可用路径集合
S	起始节点
D	目标终点的集合
w_d	与每个目标节点 $d \in D$ 相关的权重
t_e	边 $e \in E$ 的原始行程时间
q_{rs}	从节点 r 到节点 s 的交通需求量
α	总行程时间的权重系数
β	专用道长度的权重系数
γ	冲突强度的权重系数
δ_{ek}	指示函数，若边 e 在路径 k 上 $\delta_{ek}=1$ ；否则 $\delta_{ek}=0$
f_e	边 e 上的总交通流量
t'_e	应用专用道调整后边 e 的修改行程时间
P_d	修改后图中从起始节点 S 到目标节点 d 的最短路径
T_d	路径 P_d 的总行程时间
T	所有目标节点的总加权行程时间
L	被指定为专用道的边的总长度
C	衡量因专用道产生的冲突强度的冲突得分

续表

l_{ij}	连接交叉口 i 与 j 专用道路的长度
N_{ij}	连接交叉口 i 与 j 道路的新增停车位数之和
T_{ij}	判断参数, 当交叉口 i 与交叉口 j 相邻时, 值为 1; 反之, 则为 0
λ_{ij}	单位时间内专用道路 ij 的车辆平均到达率
μ_{ij}	第 i 个交叉口单位时间内专用道路 ij 的平均服务率
$\rho_{ij} = \lambda_{ij} / \mu_{ij}$	专用道路 ij 的繁忙度
D_{ij}	专用车道路 ij 医疗车辆平均等待时间
P_n	系统中有 n 辆医疗车的概率
L_{ij}	第 ij 条专用道的平均医疗车辆数
$C(g_e)$	第 i 个交叉口的冲突强度
m	路网交叉口总数
Tc_{ij}	表示在道路 (i, j) 未设置专用道时, 救护车通行的基准时间
M_{ij}	表示道路 (i, j) 上的车道数
Ts_{ij}	表示在道路 (i, j) 设置了专用道后, 救护车的通行基准时间
y_{ij}^k	救护车从医院到紧急事件发生地点 k 是否经过道路 (i, j)
决策变量	
g_e	$g_e = 0$: 边 e 没有专用道 $g_e = 1$: 边 e 的固有方向上设置专用道
f_k^{rs}	从节点 r 到节点 s 的路径 k 上的交通流量

3.3. 上层模型

$$\min_{g_e} F = \alpha T(f^*, g_e) + \beta L(g_e) + \gamma C(g_e) \quad (1)$$

约束条件为:

$$g_e \in \{0, 1\}, \quad \forall e \in E \quad (2)$$

3.4. 下层模型

$$\min \sum_{(i, j) \in A} ((1 - g_e) Tc_{ij} / M_{ij} + g_e Ts_{ij} / M_{ij}) y_{ij}^k \quad (3)$$

约束条件为:

交通需求满足对于每个 OD 对 (r, s) :

$$\sum_{k \in K_{rs}} f_k^{rs} = q_{rs} \quad (4)$$

交通流守恒约束

对于每条边 $e \in E$:

$$f_e = \sum_{(r,s)} \sum_{k \in K_{rs}} \delta_{ek} f_k^{rs} \quad (5)$$

非负性约束:

$$f_k^{rs} \geq 0, \forall k \in K_{rs} \forall (r,s) \quad (6)$$

用户均衡条件:

对于每个 OD 对 (r,s) , 所有被使用的路径 k 满足:

$$c_k = \min_{p \in K_{rs}} c_p \quad (7)$$

其中, 路径 k 的行程时间 c_k 计算为:

$$c_k = \sum_{e \in E} \delta_{ek} t'_e \quad (8)$$

3.5. 冲突强度的计算

为了求解式(1)中的交叉路口冲突强度 $C(g_e)$, 需要引入更具体的模型来描述和分析路网的交通流情况。本文将通过推导多线路单服务台的排队论模型, 以量化路网交通流的冲突强度。多线路单服务台排队论模型对于解决这个问题具有重要意义。在交通高峰期间, 医疗车辆在交叉口处等待和通过的情况类似于排队论中的顾客在服务台前等待服务的场景。通过多线路单服务台排队论模型, 可以将复杂的交通流情况简化为易于处理的数学问题。在排队论中, 顾客的到达和离开时间、等待时间和服务时间等都可以被精确地量化。同样地, 多线路单服务台排队论模型也可以分析医疗车辆在交叉节点的等待时间和冲突情况, 从而得到交叉节点的冲突强度。

首先建立双线路单服务台的排队论模型: 将专用道 ij 与专用道 ik 的冲突区域看作一个服务台, 同时服务两条专用道上的医疗车辆。在此情况下, 将 ij 与 jk 两条专用道上的医疗车辆汇聚为一条车道, 并使用 $M/M/1$ 车辆排队模型。其中冲突区域的定义为: 在交叉路口两条存在冲突的专用道车道的汇交区域(例如 T 形交叉路口上与侧边进口道左转相冲突)。

3.5.1. 双线路单服务台下排队论模型下的 $C(g_e)$

对于共有 n 条专用道交汇而成的交叉节点 i , 其冲突强度可表示为:

现在使用 $M/M/1$ 模型来描述这个过程。在 $M/M/1$ 车辆排队系统中将一辆医疗车辆到来看作“生”, 一辆医疗车辆服务完离开看作“死”, 设 $N(t)$ 为任意时刻 t 排队系统的状态。

$$C(g_e) = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{\lambda_{ij}}{\left(\mu_{i1} - \sum_{j=1}^{n-1} \lambda_{ij} T_{ij} \right)^2}}{\sum_{j=1}^n \frac{\lambda_{ij}}{\mu_{i1} - \sum_{j=1}^{n-1} \lambda_{ij} T_{ij}}} \quad (9)$$

对于给定 $N(t) = n$, 到下一辆医疗车辆到达的间隔时间服从参数为 $\lambda_n (n = 0, 1, 2, \dots)$ 的负指数分布; 到下一辆车离开的间隔时间服从参数为 $\mu_n (n = 0, 1, 2, \dots)$ 的负指数分布。设 $P_n(t)$ 为任意时刻 t 系统中有 n 辆医护车的概率, P_0 为系统内有 0 辆医护车的概率。在 $M/M/1$ 车辆排队系统运行很长一段时间后会抵达平稳状态, 对于任意的 n , $P_n(t)$ 满足以下状态平衡方程:

$$P_n[t] = P\{N(t) = n, n = 0, 1, 2, \dots\} = P_n = \rho^n (1 - \rho) \quad (10)$$

其中 $N(t)$ 为任意时刻 t 系统的状态。

对于只有两条专用道路的情况, 可以将其视为双线路单服务台的排队论模型。主次专用道路的马尔可夫链如图 2 所示。主线道路作为优先通行的专用道, 根据经典排队论中 $M/M/1$ 模型得到其相关参数的表达式, 对于交叉口 i , 由主线专用道路 $i1$ 的车辆到达率 λ_{i1} 和服务台的服务效率 μ_{i1} 构建出主线专用道路上出现 n 辆车的概率计算公式 P'_n , 如式(11)所示。

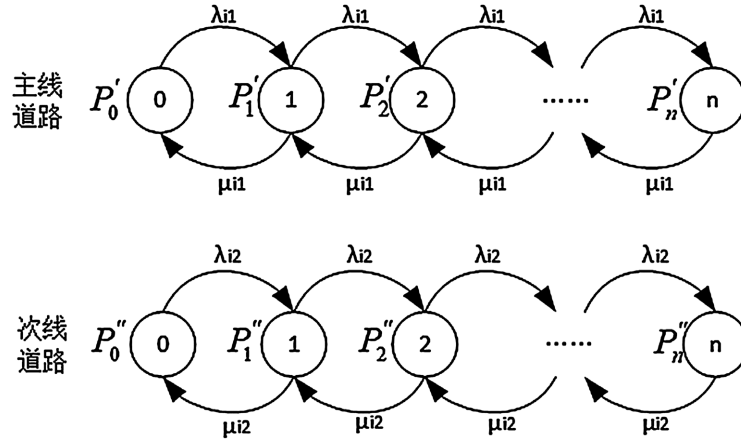


Figure 2. Markov chain diagram

图 2. 马尔科夫链示意图

$$\begin{cases} P'_0 = 1 - \frac{\lambda_{i1}}{\mu_{i1}} \\ P'_n = \left(\frac{\lambda_{i1}}{\mu_{i1}} \right)^n \left(1 - \frac{\lambda_{i1}}{\mu_{i1}} \right) \end{cases} \quad (11)$$

对于次优先专用道路 $i2$, 由于其受到主线专用道路交通状态的制约, 如果主专用道线有排队车辆, 那么必须先放行直线车辆, 然后再放行次优先道路车辆。因此, 次优先专用道路上的释放效率要低于主线专用道路释放效率, 根据具体物理含义, 次优先专用道路的服务效率 μ_{i2} 计算公式可以写作公式(12)。

$$\mu_{i2} = P'_0 \cdot \mu_{i1} \quad (12)$$

次优先专用道路的到达率不受主线道路的影响, λ_{i2} 是一个可以调查得到的常数, 因此, 次优先专用道路上的排队车辆数出现的概率 p_n 为公式(13)所示。

$$\begin{cases} P''_0 = 1 - \frac{\lambda_{i2}}{\mu_{i2}} = 1 - \frac{\lambda_{i2}}{P'_0 \cdot \mu_{i1}} = 1 - \frac{\lambda_{i2}}{\mu_{i1} - \lambda_{i1}} \\ P''_n = \left(\frac{\lambda_{i2}}{\mu_{i2}} \right)^n \cdot \left(1 - \frac{\lambda_{i2}}{\mu_{i2}} \right) = \frac{\lambda_{i2}}{\mu_{i1} - \lambda_{i1}} \cdot \left(1 - \frac{\lambda_{i2}}{\mu_{i1} - \lambda_{i1}} \right) \end{cases} \quad (13)$$

由经典排队论公式(14)可分别计算出主线专用道路与次优先专用道路各自的排队长 L_{i1} 式(15)与 L_{i2} 式(13)

$$L = \sum_{n=0}^{\infty} n P_n \quad (14)$$

$$L_{i1} = \sum_{n=0}^{\infty} n \left(\frac{\lambda_{i1}}{\mu_{i1}} \right)^n \cdot \left(1 - \frac{\lambda_{i1}}{\mu_{i1}} \right) = \frac{\lambda_{i1}}{\mu_{i1} - \lambda_{i1}} \quad (15)$$

$$L_{i2} = \sum_{n=0}^{\infty} n \left(\frac{\lambda_{i2}}{\mu_{i2}} \right)^n \left(1 - \frac{\lambda_{i2}}{\mu_{i2}} \right) = \frac{\lambda_{i2}}{\mu_{i1} - \lambda_{i1} - \lambda_{i2}} \quad (16)$$

具体推导过程如下:

对于主线道路与次优先道路各自的排队长, 可看作求解幂级数 $n\rho_{i1}^n$ 的和函数, 其中

$$\rho_{i1} = \frac{\lambda_{i1}}{\mu_{i1}} \quad (17)$$

令和函数为 S :

$$L_{i1} = S(1 - \rho_{i1}) \quad (18)$$

$$S = \rho_{i1} + 2\rho_{i1}^2 + \cdots + n\rho_{i1}^n \quad (19)$$

$$\rho_{i1}S = \rho_{i1}^2 + 2\rho_{i1}^3 + \cdots + n\rho_{i1}^{n+1} \quad (20)$$

由式(19)减式(20)可得:

$$(1 - \rho_{i1})S = \rho_{i1} + \rho_{i1}^2 + \cdots + \rho_{i1}^n - n\rho_{i1}^{n+1} \quad (21)$$

由等比数列求和公式可得:

$$S \cdot (1 - \rho_{i1}) = \frac{\rho_{i1}^{n+1} - \rho_{i1}}{\rho_{i1} - 1} - n\rho_{i1}^{n+1} \quad (22)$$

将等式两边同除 $1 - \rho_{i1}$ 可得:

$$S = \frac{\rho_{i1}(1 - \rho_{i1}^n)}{(\rho_{i1} - 1)^2} - \frac{n\rho_{i1}^{n+1}}{\rho_{i1} - 1} \text{ 其中 } \rho \neq 0 \quad (23)$$

因 $\rho_{i1} = \lambda_{i1}/\mu_{i1}$, 且根据 λ_{i1} 与 μ_{i1} 的定义易知 $0 < \rho_{i1} < 1$, 所以 $0 < \rho_{i1} < 1$ 恒成立, 由极限的定义可知 $n\rho_{i1}^n, n\rho_{i1}^{n+1} \sim 0$, 保留式(23)的非零项可得:

$$S = \frac{\rho_{i1}}{(\rho_{i1} - 1)^2} \quad (24)$$

$$S = \frac{\rho_{i1}}{(\rho_{i1} - 1)^2} \quad (25)$$

将式(17)与式(25)代入式(18)即可以得到 L_{i1} , L_{i2} 表达式:

$$L_{i1} = \frac{\rho_{i1}}{(1 - \rho_{i1})^2} (1 - \rho_{i1}) = \frac{\rho_{i1}}{1 - \rho_{i1}} = \frac{\lambda_{i1}}{\mu_{i1} - \lambda_{i1}} \quad (26)$$

$$L_{i2} = \frac{\rho_{i2}}{1 - \rho_{i2}} = \frac{\lambda_{i2}}{\mu_{i2} - \lambda_{i2}} = \frac{\lambda_{i2}}{\mu_{i1} - \lambda_{i1} - \lambda_{i2}} \quad (27)$$

由经典排队论对于车辆平均等待时间的定义式(28)可得到主线专用道路与次优先专用道路的平均延误计算式:

$$D = 1/(\mu - \lambda) \quad (28)$$

$$D_{i1} = 1/(\mu_{i1} - \lambda_{i1}) \quad (29)$$

$$D_{i2} = 1/(\mu_{i2} - \lambda_{i2}) = 1/(\mu_{i1} - \lambda_{i1} - \lambda_{i2}) \quad (30)$$

最后再根据主线专用道路与次优先专用道路各自的平均延误 D_{i1} 和 D_{i2} , 由式(31)计算整个系统的平均延误, 也就是车辆平均等待时间。

$$C(g_e) = \frac{L_{i1}D_{i1} + L_{i2}D_{i2}}{L_{i1} + L_{i2}} = \frac{\frac{\lambda_{i1}}{(\mu_{i1} - \lambda_{i1})^2} + \frac{\lambda_{i2}}{(\mu_{i2} - \lambda_{i2})^2}}{\frac{\lambda_{i1}}{\mu_{i1} - \lambda_{i1}} + \frac{\lambda_{i2}}{\mu_{i2} - \lambda_{i2}}} \quad (31)$$

3.5.2. 多线路单服务台下排队论模型下的 $C(g_e)$

将式(31)推广至多线路单服务台情况下, 即存在 n 条专用道路的情况下。对于交叉口 i , 先对 μ_{in} 的表达式进行推导:

$$\begin{cases} \mu_{i2} = P'_0 \cdot \mu_{i1} = \left(1 - \frac{\lambda_{i1}}{\mu_{i1}}\right) \cdot \mu_{i1} = \mu_{i1} - \lambda_{i1} \\ \mu_{i3} = P''_0 \cdot \mu_{i2} = \left(1 - \frac{\lambda_{i2}}{\mu_{i2}}\right) \cdot \mu_{i2} = \mu_{i2} - \lambda_{i2} = \mu_{i1} - \lambda_{i1} - \lambda_{i2} \\ \vdots \\ \mu_{in} = P_0^{n'} \cdot \mu_{i(n-1)} = \left(1 - \frac{\lambda_{i(n-1)}}{\mu_{i(n-1)}}\right) \cdot \mu_{i(n-1)} = \mu_{i(n-1)} - \lambda_{i(n-1)} T_{i(n-1)} = \mu_{i1} - \sum_{j=1}^{n-1} \lambda_{ij} T_{ij} \end{cases}$$

随后代入 μ_{in} 的表达式易得 L_{in} , D_{in} , $C(g_e)$ 的数学表达式可由式(32), 式(33)和式(34)分别表示:

$$L_{in} = \frac{\lambda_{in}}{\mu_{in}} \xrightarrow{\mu_{in} = \mu_{i1} - \sum_{j=1}^{n-1} \lambda_{ij} T_{ij}} \frac{\lambda_{in}}{\mu_{i1} - \sum_{j=1}^{n-1} \lambda_{ij} T_{ij}} \quad (32)$$

$$D_{in} = \frac{1}{\mu_{i1} - \sum_{j=1}^{n-1} \lambda_{ij} T_{ij}} \quad (33)$$

最终可以得到在 α 条道路情况下交叉口 α 的冲突强度 $C(g_e)$ 表达式:

$$C(g_e) = \frac{\sum_{j=1}^n L_{ij} D_{ij}}{\sum_{j=1}^n L_{ij}} = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{\lambda_{ij}}{\left(\mu_{i1} - \sum_{j=1}^{n-1} \lambda_{ij} T_{ij}\right)^2}}{\sum_{j=1}^n \frac{\lambda_{ij}}{\mu_{i1} - \sum_{j=1}^{n-1} \lambda_{ij} T_{ij}}} \quad (34)$$

4. 求解算法

针对院前救援专用道布设问题我们使用一个 LRP 双层规划模型来确定路网上专用道的布设位置。在该双层优化模型中, 上层模型通过设定决策变量为 0 (不设立专用道) 或 1 (设立专用道), 以决定路网中哪些道路为应急专用道。接着, 下层模型根据这些决策, 结合基于车道数的改进 dijkstra 算法为每一辆救护

车计算出最短路径, 为上层模型提供反馈。这种反馈机制使得上层模型得以调整其决策, 确保专用道布设的效果, 同时也实现了救护车行驶时间的最小化。即使是具有线性目标函数和约束的最简单的双层规划问题也被证明是一个 **np-hard** 问题, 而 **LRP** 问题是一个具有二元决策变量和随网络规模呈指数增长的非线性组合优化问题, 因此, **LRP** 问题也是一个 **NP-hard** 问题。对于实际情况, 使用当前的计算技术是不可能对其进行完全的枚举的。对于较大路网, 由于处理信息矩阵需要大量复杂的交通路网分析以及编码和解码操作, 精确的算法很难胜任, 因此我们针对这个问题可以考虑一种启发式算法的遗传算法来在合理的时间内找到高质量的解决方案。

遗传算法的寻优过程是通过将问题的解编码成染色体后对染色体种群进行选择、交叉和变异等遗传进化操作来完成的。在该问题中, 本文以路段是否设置专用道来作为变量进行编码, 每条路段有两个基因组成, 当基因组合为 1~0 时为正向专用道, 当基因组合为 0~1 时为反向专用道, 当基因组合为 1~1 时为双向专用道, 当基因组合为 0~0 时不设置专用道。在适应度函数部分对三个部分进行考虑, 分别是所布设的总专用道总长度, 冲突强度最小以及路网中每条道路流量与其容量的比值。遗传操作则利用轮盘赌选择法和精英保留策略的组合选择方式, 利用个体的适应度函数值决定个体的选择概率, 适应度函数值越大的个体被选中向下一代繁殖的概率越大, 交换采用单点交换, 变异操作采用单点变异(0 变异为 1, 1 变异为 0), 交叉与变异操作后, 生成下一代新总群。

5. 实例分析

本节对中国上海市的真实交通网络进行了实验, 以验证所提算法的性能。该算法采用 python3.10 求解器进行编码。所有的实验都是在一台 Windows 11 机器上完成的, 它带有英特尔(R)核心(TM)AMD Ryzen 7 6800 CPU 3.2 GHz 和 16 GB 内存。每种方法的 CPU 时间限制都设置为 3600 s。算法参数设置为: 种群规模 N_{pop} 为 100, 交叉率 P_c 为 0.3, 变异率 P_m 为 0.2, 最大迭代次数 G_m 为 1500 次。如图 3 所示。若将所有地点、交叉口及它们之间的道路都绘制出来, 这样的交通网络图是非常复杂和庞大的, 其次, 将某些顶点之间的道路合并为一条道路并省略掉它们之间的中间顶点, 对解决实际救援问题影响不大。因此, 在进行实验时, 需要在实际交通网络的基础上进行抽象、归纳和简化处理, 在真实的原始数据基础上进行加工得到实验源数据, 最后在实际交通网络上进行简化得到所研究问题的交通网络拓扑结构。为使问题更具一般性, 本文假设每个路段都具备设置专用车道的条件, 即不考虑路段的拥堵情况。在实验中, 设定其交通网络的基本拓扑结构不变, 即包括节点数目、节点与节点之间的连接状况及路段数目不变。该路网较为复杂且不规则, 有较多的不必要的道路以及节点。为了更好地检验算法的性能, 需要将实际路网进行简化处理得到图 3, 该路网包括 75 个节点, 117 条弧, 节点代表真实交通网络中的交叉口, 弧代表真实交通网络中的道路, 该弧保留真实路网道路的长度属性以及车道数属性。在该路网中我们将上海瑞金医院作为起始节点, 并在路网随机分布 15 个应急需求点, 应急需求点可以理解为一应急范围,



Figure 3. Schematic diagram of example road network acquisition

图 3. 实例路网获取示意图

对于每个应急范围我们都有对应的次数权重以此来模拟在该范围内的多次应急需求。假设应急车辆在每条道路的平均速度为 40 km/h。

在实验中我们考虑三个因素对应急救援专用道布设的影响, 其一是医院到多个应急点的路径行驶时间, 这一因素关系到救援效率, 其二是所布设专用道的总长度, 这一因素一是可以有效的类比于专用道的布设成本, 专用道布设长度越长对道路资源的占据也会更多, 其三是路网的冲突强度。三者的考虑意味着我们既希望救援效率能够得到有效的提升的同时也尽量减少专用道的布设成本, 保证道路资源的不浪费。在算法中我们将三个考虑因素作为适应度函数中的三个权重系数。本文将行驶时间设置为 α , 专用道总长度设置为 β , 冲突强度设置为 γ 。如图 4, α 为 0.9, β 为 0.1, γ 为 0.3。

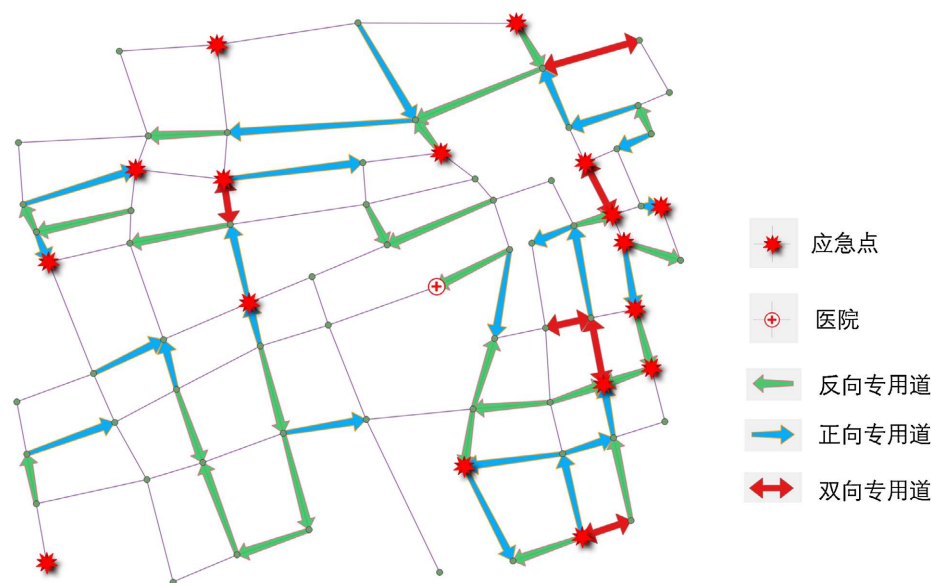


Figure 4. Optimization diagram of dedicated lane layout
图 4. 专用道布设优化图

图 4 展示了一个城市路网的应急专用道规划方案, 其中涵盖了应急点、医院位置及多类型专用道的设置, 从中可以看出优化布设显示了一个从医院为起点向周围放射状扩展的救援专用道路网, 这样的布局可以最大化覆盖城市的主要区域, 确保任何紧急情况都可以得到快速响应。专用道的规划分为三种类型: 正向专用道(蓝色箭头)、反向专用道(绿色箭头)以及双向专用道(红色双箭头)。规划中, 正向和反向专用道主要分布在连接应急点和医院的次要路径上, 旨在提高道路的单向通行效率, 而双向专用道集中在医院周边以及关键交通枢纽路段, 以满足高需求路段的双向通行需求。这种分布方式有效减少了车辆通行冲突, 同时优先保障了医院周边的急救车辆通行效率。该规划方案通过合理分配专用道类型和方向, 有效提升了急救效率, 兼顾了资源利用率与交通流畅性。但在某些区域的覆盖平衡性上仍需进一步改进, 以全面优化路网结构, 缩短远距离救援路径的时间成本。

车道数也是影响专用道在路网中布设的一个重要的因素, 车道数影响着每条路的交通容量, 对于 L 双层模型的下层模型我们考虑了车道数这一因素对于应急专用道布设的影响。考虑车道数与不考虑车道数在专用道布设中是两种完全不同的策略, 它们会导致不同的结果, 因此我们以是否考虑车道数为变量, 为了更直观的观察到两者的结果我们将 α 设置为 0.9, β 设置为 0.1, γ 为 0.3, 其他参数均不变做了对比实验, 并使用 QGIS 软件对专用道的布设方案进行了可视化如图 5 所示, 为了进一步知晓车道数对结果的影响, 我们使用相同的参数和设置对不考虑车道数和考虑车道数两种策略分别运行三次遗传算法。记

录每个类型车道所占其专用道方案专用道总数的比值，取三次实验不同车道类型平均值做比较。如表 1 和表 2 所示。

Table 1. Considers the number of lanes

表 1. 考虑车道数

车道类型	1	2	3	4	5
实验 1	41.70%	16.70%	25%	8.30%	8.30%
实验 2	31.80%	31.80%	22.70%	9%	4.50%
实验 3	33.30%	28.60%	19%	14.30%	4.80%
平均值	35.60%	25.70%	22.23%	10.53%	5.87%

Table 2. Does not consider the number of lanes

表 2. 未考虑车道数

车道类型	1	2	3	4	5
实验 1	47.80%	21.70%	13%	8.60%	8.60%
实验 2	48.10%	18.50%	18.50%	7.40%	7.40%
实验 3	36.70%	26.70%	23.30%	10%	3.30%
平均值	44.20%	22.30%	18.27%	8.67%	6.43%

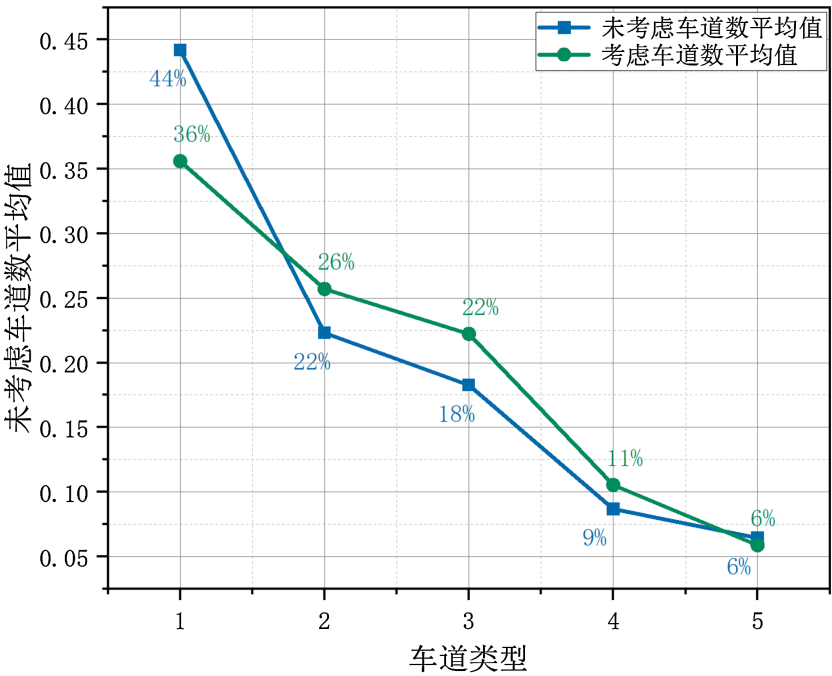


Figure 5. Diagram considering the number of lanes

图 5. 考虑车道数的示意图

从图 5 可以明显的看出，考虑车道数与未考虑车道数两组实验在不同车道类型的选择上存在明显的差异。在未考虑车道数的情况下一车道类型平均值为 44%高于考虑车道数情况的平均值 36%，而二车道三车道四车道的未考虑车道数平均值均低于考虑车道数情况下的平均值。对于五车道两种情况的差别并

不大。综上所述所观察的数据我们可以得出以下的结论：车道数的多少直接影响了道路的通行能力和应急车辆的行驶速度，更多的车道通常意味着更大的通行能力，车辆可以以较高的速度行驶，从而选择到达目的地的路径。因此在紧急情况下，救援车辆需要尽快到达现场，他们倾向于选择能够提供更高通行能力的道路。在考虑车道数的情况下，专用道的布设更倾向于选择车道数多的路段。其次在多车道道路上，普通车辆更容易让行给紧急服务车辆，从而减少了事故的风险。有效的平衡社会车辆和急救车辆的出行效率。这样不仅能够避免交叉口的堵塞问题来进行救援车辆的提速，同时还能更好的进行道路资源的使用，尽可能的减小应急专用道布设对社会车辆以及整个路网的交通性能的影响。综上所述，考虑车道数能够有效的增加救援车辆应急的可靠性和稳定性，同时也使得所布设的应急专用道更贴近实际情况。

在本文中，我们采用遗传算法对医院附近的路网进行了专用道的优化布设，为了验证算法的稳定性评估算法的收敛速度本文设置染色体交叉率为 0.8，变异概率为 0.1，种群 100，最大迭代次数为 1400，在此设置下进行了多次实验，图 6 为其中一次生成的迭代图。

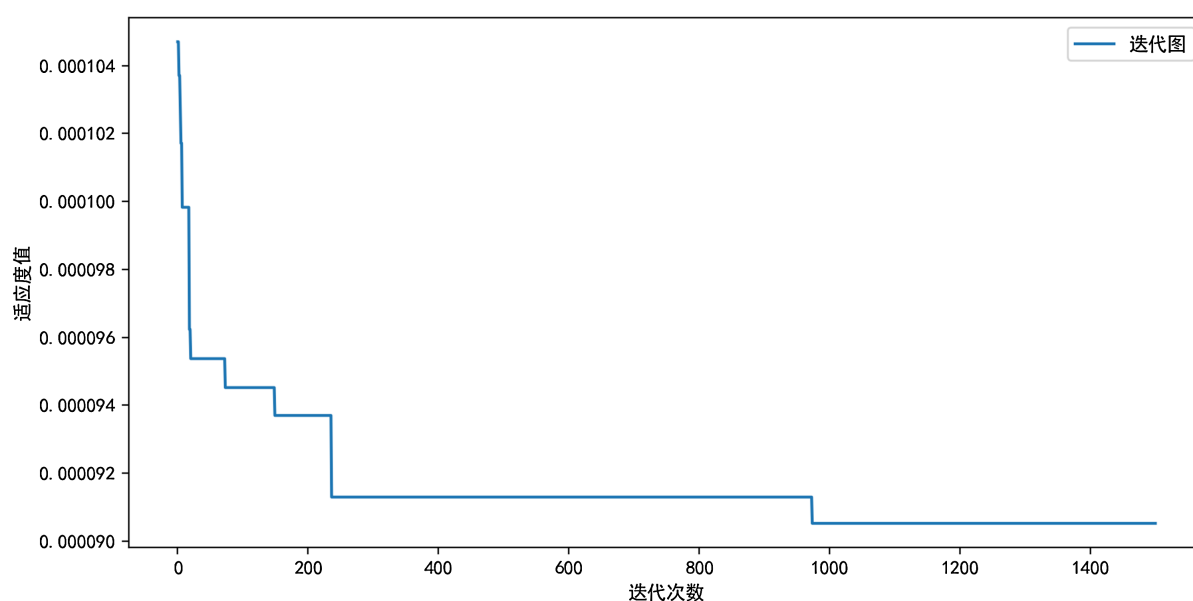


Figure 6. Genetic algorithm iteration chart

图 6. 遗传算法迭代图

从图 6 中可以看出，适应度函数的值随着代数的增加而增加，这表明算法随着时间的推移而逐渐找到更优的路网配置。初始阶段，适应度函数的值迅速增加，这表明算法探索了大量不同的解决方案，并快速排除了那些性能较差的基因序列。随着迭代的继续，适应度的提升速度减慢，进入一个平稳状态，在 1000 代迭代后算法的趋势趋于稳定，表明种群已经成熟，算法收敛性较好。

6. 结论

本研究针对提高应急救援效率的问题，提出了一种基于方向的救援专用道保留双层规划模型。模型从宏观网络视角出发，以满足大城市背景下院前急救的时间约束，同时综合考虑行驶时间、专用道长度及路网冲突强度，并分析了车道数对模型和布设结果的影响。通过遗传算法对上海市瑞金医院周边真实路网的案例分析，验证了模型的有效性。

我们未来的研究打算：

- 1) 扩展模型以考虑动态交通流量变化，研究时间依赖的稳健车道保留问题。

- 2) 探讨车辆切换与干扰问题, 特别是在混合交通情境下的异质性行为分析。
- 3) 纳入交通流量再分配的影响, 将其整合至 LRP 模型并开发高效求解方法。

参考文献

- [1] Qu, X., Yang, Y., Liu, Z., Jin, S. and Weng, J. (2014) Potential Crash Risks of Expressway On-Ramps and Off-Ramps: A Case Study in Beijing, China. *Safety Science*, **70**, 58-62. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2014.04.016>
- [2] Kuang, Y., Qu, X. and Wang, S. (2015) A Tree-Structured Crash Surrogate Measure for Freeways. *Accident Analysis & Prevention*, **77**, 137-148. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2015.02.007>
- [3] Blackwell, T.H. and Kaufman, J.S. (2002) Response Time Effectiveness: Comparison of Response Time and Survival in an Urban Emergency Medical Services System. *Academic Emergency Medicine*, **9**, 288-295. <https://doi.org/10.1197/aemj.9.4.288>
- [4] Xu, F., Du, Y. and Sun, L. (2013) A Framework for Ongoing Performance Monitoring of Bus Lane System. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, **96**, 175-181. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.08.023>
- [5] Mesbah, M., Sarvi, M., Ouveysi, I. and Currie, G. (2011) Optimization of Transit Priority in the Transportation Network Using a Decomposition Methodology. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **19**, 363-373. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2010.05.020>
- [6] Mesbah, M., Sarvi, M. and Currie, G. (2011) Optimization of Transit Priority in the Transportation Network Using a Genetic Algorithm. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, **12**, 908-919. <https://doi.org/10.1109/tits.2011.2144974>
- [7] Wu, Y., Chu, C., Chu, F. and Wu, N. (2009) Heuristic for Lane Reservation Problem in Time Constrained Transportation. 2009 *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*, Bangalore, 22-25 August 2009, 543-548. <https://doi.org/10.1109/coase.2009.5234190>
- [8] Yingfeng Wu, and Naiqi Wu, (2010) An Approximate Algorithm for the Lane Reservation Problem in Time Constrained Transportation. 2010 *2nd International Conference on Advanced Computer Control*, Shenyang, 27-29 March 2010, 192-196. <https://doi.org/10.1109/icacc.2010.5487042>
- [9] Che, A., Wu, P., Chu, F. and Zhou, M. (2015) Improved Quantum-Inspired Evolutionary Algorithm for Large-Size Lane Reservation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, **45**, 1535-1548. <https://doi.org/10.1109/tsmc.2015.2417509>
- [10] Wu, P., Chu, F., Che, A. and Zhou, M. (2018) Bi-Objective Scheduling of Fire Engines for Fighting Forest Fires: New Optimization Approaches. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, **19**, 1140-1151. <https://doi.org/10.1109/tits.2017.2717188>
- [11] Fang, Y., Chu, F., Mammar, S. and Zhou, M. (2012) Optimal Lane Reservation in Transportation Network. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, **13**, 482-491. <https://doi.org/10.1109/tits.2011.2171337>
- [12] Fang, Y., Chu, F., Mammar, S. and Shi, Q. (2015) A New Cut-And-Solve and Cutting Plane Combined Approach for the Capacitated Lane Reservation Problem. *Computers & Industrial Engineering*, **80**, 212-221. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.12.014>
- [13] Black, J. (2004) Strategic Transport Planning, Demand Analysis of Transport Infrastructure and Transport Services for the 27th Summer, Olympiad Held in Sydney, Australia, 2000. *Journal of Transportation Engineering and Information*, **2**, 14-30.
- [14] Wu, P., Che, A., Chu, F. and Fang, Y. (2017) Exact and Heuristic Algorithms for Rapid and Station Arrival-Time Guaranteed Bus Transportation via Lane Reservation. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, **18**, 2028-2043. <https://doi.org/10.1109/tits.2016.2631893>
- [15] Bai, X., Zhou, Z., Chin, K. and Huang, B. (2017) Evaluating Lane Reservation Problems by Carbon Emission Approach. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **53**, 178-192. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.04.002>
- [16] Fang, Y., Chu, F., Mammar, S. and Che, A. (2013) A Cut-And-Solve-Based Algorithm for Optimal Lane Reservation with Dynamic Link Travel Times. *International Journal of Production Research*, **52**, 1003-1015. <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.828169>
- [17] Wu, P., Che, A., Chu, F. and Zhou, M. (2015) An Improved Exact ϵ -Constraint and Cut-And-Solve Combined Method for Biobjective Robust Lane Reservation. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, **16**, 1479-1492. <https://doi.org/10.1109/tits.2014.2368594>