

“非常态”交通“非常管”

刘 玥

(美国威斯康辛大学, 美国 密尔沃基 53211)

摘要: 伴随新型冠状病毒肺炎疫情爆发, 应对“非常态”条件下的交通管理引起业内人士广泛讨论和重视。首先总结“非常态”交通管理面临的挑战和常用方法的优缺点。提出基于信号控制的“软隔离”与基于交通组织的“硬隔离”协同优化的交通管理方法、模型基础、解决方案和工具。最后, 结合中国实际对未来“非常态”交通从应急规划和实时管理两个方面给出建议。

关键词: 非常态; 信号控制; 交通组织; 交通管理; 道路网络交通建模

Non-Recurrent Traffic Management

Liu Yue

(University of Wisconsin - Milwaukee, Milwaukee WI 53211, USA)

Abstract: Grounded on the synthesis of non-recurrent traffic management challenges and practices, this paper proposes a non-recurrent traffic management method based on optimal integration of signalized and uninterrupted flow strategies with respect to modeling, solution, and tools. It also provides guidelines for the proposed method's application in China from the perspectives of planning and real-time operations.

Keywords: non-recurrent; signal control; traffic organization; traffic management; network modeling

收稿日期: 2020-02-12

作者简介: 刘玥(1980—), 男, 河北秦皇岛人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 交通管理与运筹。E-mail: liu28@uwm.edu

近日新型冠状病毒肺炎疫情爆发, 应对“非常态”条件下的交通管理引起业内人士广泛讨论和重视, 疫情当前十万火急, 保证人员救助和物资供应是重中之重。此外, 春节后大量积压的返城交通需求会涌现出来, 城市交通也面临非常大的压力和挑战。这进一步对“非常态”交通管理从预案和规划阶段走向落地阶段提出了明确的需求。本文从面向问题、解决问题的战术角度谈“非常态”交通管理, 探讨我们应该如何行动, 在科学决策方面应该从哪些方面着手。

1 “非常态”交通管理在战术层面面临的挑战

当下疫情控制形势下的交通管理面临以下挑战:

- 1) 如何最大限度地配合封城隔离控制, 但又能保证物资和人员救助的需要;
- 2) 新的交通需求模式下如何最大化提

高通行效率、可达性和安全性;

- 3) 交通信号控制应该扮演什么角色, 如何与隔离措施以及警力安保最佳结合;
- 4) 在疫情初步控制后, 如何过渡到常态交通管理状态;
- 5) 如何提升“非常态”交通管理的科学性、系统性。

当然, 以上挑战也或多或少地存在于灾害应急和大型事件处置情况下, 因此探讨这个问题非常必要。只有常备, 才能真正做到无患。

2 传统的“非常态”交通管理方法

所谓的“非常态”对交通管理而言包括以下几种情况:

- 1) 交通需求激增超越道路网络容量极限(如大型赛事活动对路网造成的局部冲击);
- 2) 道路网络通行权受阻或缺失无法满足现状交通需求(如灾害事件);

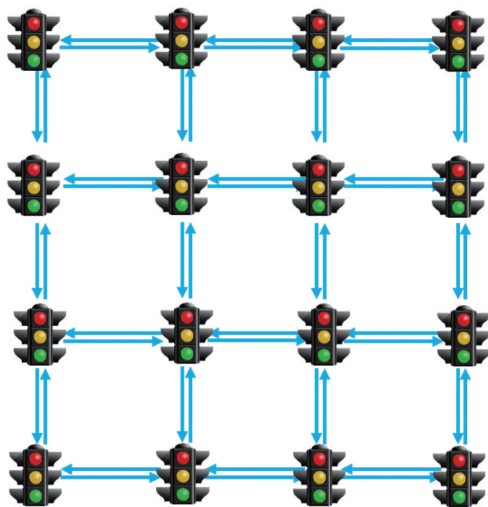


图1 全路网信号控制示意

Fig.1 signalized intersection only

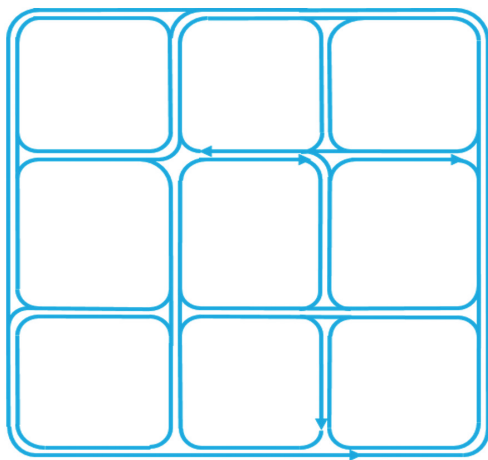
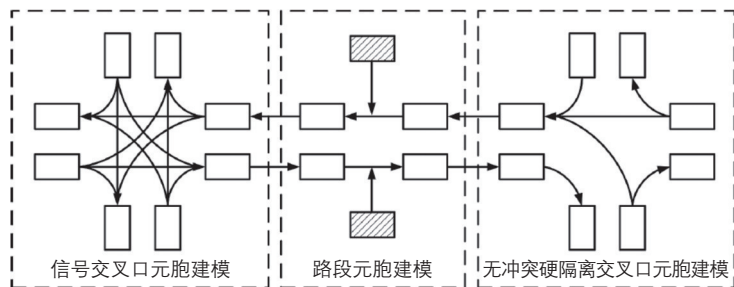
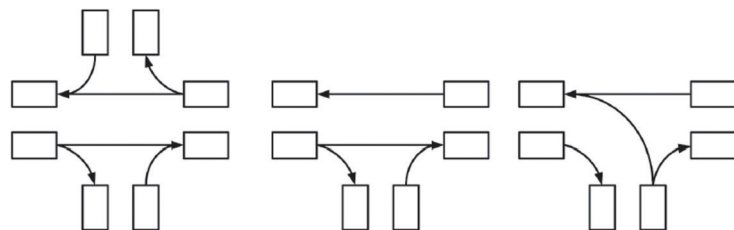


图2 全路网无冲突硬隔离设置

Fig.2 Cross-elimination only setting in the network



a 软、硬隔离混合情况下的交通网络元胞建模



b 硬隔离冲突流向消除示例

图3 元胞网络模型与交通控制和交通组织决策变量的融合建模

Fig.3 CTM based network representation

资料来源：文献[1]。

3) 交通需求模式发生显著变化(如道路施工、大型工程项目施工导致);

4) 出行者行为发生极大变化(如疫情影响)。

面对以上情况，在交通政策层面应对的有效策略并不多，基本上以交通信号和交通组织策略为主。需要注意的是，本文不探讨限行、限号出行这些以牺牲出行者机动性、可达性换取局部交通管理效益的需求管理措施，严格意义上来说其不属于交通与管理控制的范畴。

方法1：启动针对“非常态”交通需求的信号优化预案，通常以过饱和控制为主要导向，以通过量、排队控制和疏散效率最大为目标；

方法2：对局部路网进行变结构梳理，例如实施路段流向禁行、限行等，核心目的也是简化复杂交叉口的相位结构，提升交通控制的弹性；

方法3：主干路交叉口实施“主路黄闪+次路红闪”结合的控制策略(在美国被广泛使用)，或者实施次干路最小绿灯。其核心目的是保证主干路方向的通行效率，类似快速路的匝道控制；

方法4：最近一些城市在疫情控制中将交叉口全部设为红灯，限制出行，这也不失为一种快速解决方案，但是可能会产生一些问题。因为这种做法误解了交通信号灯存在的意义和作用，信号灯的设置是为了明确通行权的时间分配，所以设置全红和不设置信号灯对于路权而言没有区别，换句话说它没有解决疫情控制情况下的通行权如何分配问题，交叉口的冲突和安全风险反而增加。

当然，很多城市会结合自身实际道路情况因地制宜地制定相应的交通管理措施，但是基本离不开以上几种方法的结合使用。

3 “非常态”交通管理亟须精细化和系统化

交通管理的关键依然还是信号控制和交通组织。首先解析信号控制和交通组织究竟在解决什么问题。如果用当下最热的词“隔离”来打比方，信号控制就是一种把交叉口冲突在时间上隔离的措施，本文称其为“软隔离”；而交通组织(限流、禁行等)则是将交通冲突在空间上隔离的一种措施，称其为“硬隔离”。通常在常态交通管理下，软隔离

的使用具有高频性，而硬隔离由于成本、人力耗费原因使用不多，直到“非常态”的出现。因此，无论是常态还是“非常态”交通管理，其核心都是结合使用软隔离与硬隔离实现动态最优。要将两样性质完全不同的方法结合起来，就要先理清它们各自的特征。

1) “非常态”交通信号控制(软隔离)的利与弊。

如图1所示，一个区域路网中的交叉口都采用信号控制，对其优缺点进行分析。①优点。信号控制是在多流向冲突条件下保障道路网络可达性的最好方式，因为不管交叉口冲突流向有多少，它们对于交叉口而言都是可达的，不需要绕行。所以信号控制的优点主要体现在可达性好。②缺点。因为可达性提升了，冲突流向都集中在交叉口，导致延误大大增加，相位会变得更加复杂，损失时间会增加，周期越来越长，通行能力下降，即提升可达性失去了机动性。因此在“非常态”下，对所有交叉口实施信号控制不是一种很好的策略。

2) “非常态”下无冲突交叉口(硬隔离)设置的利与弊。

如图2所示，与全网信号控制对立的另一个极端是牺牲可达性，保证通行效率。可以发现，同一个路网经过硬隔离，避免了所有交叉口的冲突，对其优缺点进行分析。①优点。交叉口没有冲突，车流延误大大降低，交叉口通行能力大大提升。②缺点。交叉口可达性下降，一些流向不得不绕行到其他交叉口才能通行。此外，设置硬隔离需要人力、财力、物力保证，只适合“非常态”。另外，过多的网络内绕行会增加出行者的焦虑和紧张，特别是在紧急状况下。

通过以上分析不难发现，在“非常态”条件下，使用单一交通管理办法的效果都是不理想的。交通管理者如何能在软隔离和硬隔离之间寻求最佳的平衡点决定着“非常态”交通管理的实际落地效果。具体而言，“非常态”交通管理的精细化和系统化需要解决以下关键技术难题：

1) 对于一个城市道路网络区域，是否存在最佳的软隔离与硬隔离的配比，如果这个最佳配比存在，如何找到它？

2) 路网中哪些交叉口要软隔离？相应的信号控制方案和渠化方案如何优化？

3) 硬隔离在哪些交叉口实施最适合？如何生成车道级的冲突消除方案？

4) 软隔离和硬隔离的交叉口方案如何

协同优化？

5) 在有限的资金条件和人力、物力保障下，如何对方案进行取舍？

4 解决方案与工具

要解决以上技术难点，需要对道路交通网络进行精确的建模，建模不只是网络拓扑层面的，还涉及交通控制和交通流层面。此处建模与传统意义上的交通规划和仿真模型有着很大区别。规划或仿真模型是面向方案

表1 模型变量释义
Tab.1 Notation of key model parameters and variables

项目	符号	释义
集合	S	元胞集
	A	元胞关联集
	G	非常态下交通网络， $G=(S,A)$
	S_r	源元胞集
	S_s	目的元胞集
	A_l	交叉口元胞连接集
	A_s	目的元胞连接集
	$N, n \in N$	路网交叉口集， $N=N_s \cup N_U$
	N_s, N_U	软隔离与硬隔离交叉口集
	G_n	交叉口子网
	A_n	交叉口元胞连接集
	$P_n, p \in P_n$	交叉口相位集
	A_n^p	交叉口 n 在相位 p 允许通行的连接集
参数与变量	Γ_i^+	元胞 i 的上游元胞集
	Γ_i^-	元胞 i 的下游元胞集
	$(i,j) \in A$	元胞 i 和 j 的连接
	$T, t \in T$	管理时段与时间步长
	D	非常态交通需求
	D_i	元胞 i 上的交通需求， $i \in S_r$
	d_i^t	元胞 i 在 t 时刻的交通需求， $i \in S_r, t \in T$
	f_{ij}^t	连接 (i,j) 在 t 时刻的交通量
	f_i^t	元胞 i 在 t 时刻的交通量， $i \in S, t \in T$
	π_i^0	元胞 i 的初始交通量
	v_i	元胞 i 自由行驶车速， $\forall i \in S/S_s$
	N_i^t	元胞 i 在 t 时刻的容量， $\forall i \in S/S_s, t \in T$
	R_i^t	元胞 i 在 t 时刻下游接收能力， $i \in S/S_r, t \in T$
	S_i^t	元胞 i 在 t 时刻的输送能力， $i \in S/S_s, t \in T$
	Q_i^t	元胞 i 在 t 时刻最大能输出的交通量， $\forall i \in S/S_s, t \in T$
	Q_{ij}^t	连接 (i,j) 在 t 时刻的通行能力， $\forall (i,j) \in A, t \in T$
	λ_{ij}^t	连接 (i,j) 流向在 t 时刻的绿信比， $\forall (i,j) \in A, t \in T$
	w_i^t	元胞 i 在 t 时刻的交通流波速， $\forall i \in S/S_s, t \in T$
	$\lambda_{\min}$	最小绿信比
决策变量	$x_n, n \in N$	交叉口 n 是否为硬隔离，1是；0否
	λ_n^p	交叉口 n 在相位 p 的绿信比
	y_{ij}	连接 (i,j) 通行权变量，1通行；0不通行， $\forall (i,j) \in A_l$

的一种反馈，它们本身并不能产生方案。要生成优化方案，还需要运筹层面的建模，也就是说不但需要预演结果，还要自动优化生成方案。

为此，我们开发建立了一套基于元胞的精细化道路网络模型^[1]，基于元胞模型的优点在于它是对LWR模型的一阶近似，有利于大规模网络优化模型的求解。此外，还需要对交叉口信号控制和车道级的交通组织优化决策变量进行梳理、标定并与元胞模型进行深度融合(见图3)，这样才能建立一整套“非常态”交通管理优化模型体系，如公式(1)~(23)所示，变量释义见表1。

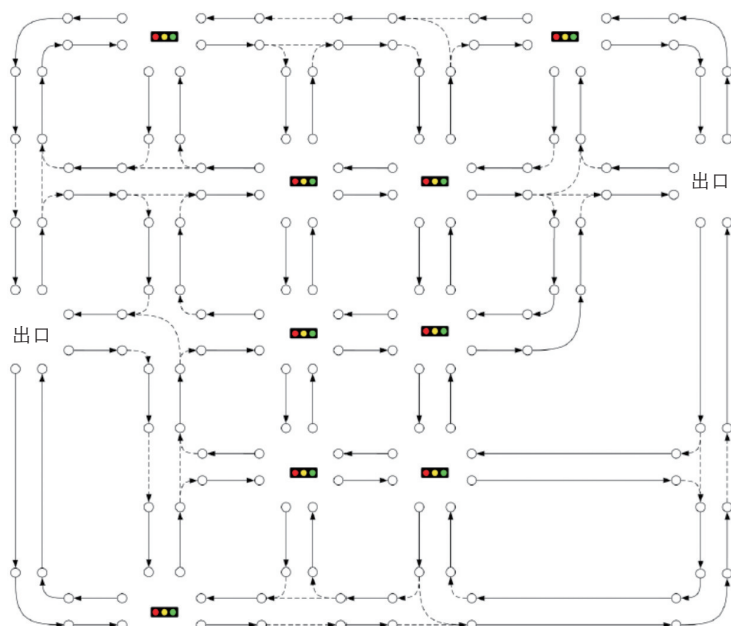


图4 信号控制方案和车道级的交通组织方案示例

Fig.4 Lane-based signal and cross-elimination strategies

资料来源：文献[1]。

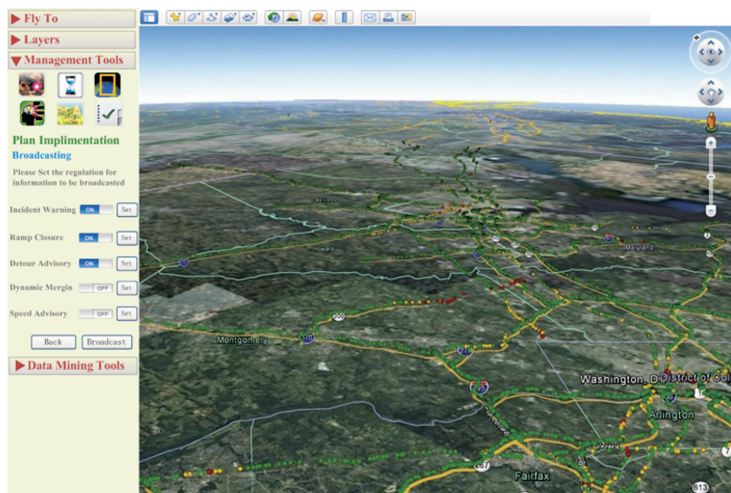


图5 “非常态”交通管理方案预演评估系统

Fig.5 Non-recurrent traffic management decision support system

$$\min z(\omega) = \max \{t \in T | f_{ij}^t > 0, \forall (i, j) \in A_s\}, \quad (1)$$

$$y_{ij} + \sum_{(k,l) \in I_{ij}^{(k,l)}} y_{kl} \leq 1 + M(1 - x_n), \forall n \in N, (i, j) \in A_n, \quad (2)$$

$$\arg \min z(f) = \sum_{(i,j) \in A_s, t \in T} f_{ij}^t L_{it}, \quad (3)$$

$$L_t - L_{t-1} > (L_T - L_t)D, \forall t \in T, \quad (4)$$

$$f_{ij}^t - f_{ij}^{t-1} + \sum_{j \in I_i^+} f_{ij}^{t-1} - \sum_{j \in I_j^+} f_{ij}^{t-1} = 0, \forall i \in S/(S_r \cup S_s), t \in T, \quad (5)$$

$$f_{ij}^t - f_{ij}^{t-1} + \sum_{j \in I_i^+} f_{ij}^{t-1} - d_i^t = 0, \forall i \in S_r, t \in T, \quad (6)$$

$$\sum_{j \in I_i^+} f_{ij}^t \leq Q_i^t, \forall i \in S/S_r, t \in T, \quad (7)$$

$$\sum_{j \in I_i^+} f_{ij}^t \leq N_i^t - f_i^t, \forall i \in S/S_r, t \in T, \quad (8)$$

$$\sum_{j \in I_i^+} f_{ij}^t \leq \frac{w_i^t}{v_i} (N_i^t - f_i^t), \forall i \in S/S_r, t \in T, \quad (9)$$

$$\sum_{j \in I_i^+} f_{ij}^t \leq Q_i^t, \forall i \in S/S_s, t \in T, \quad (10)$$

$$\sum_{j \in I_i^+} f_{ij}^t \leq N_i^t, \forall i \in S/S_s, t \in T, \quad (11)$$

$$\sum_{j \in I_i^+} f_{ij}^t \leq f_i^t, \forall i \in S/S_s, t \in T, \quad (12)$$

$$f_{ij}^t \leq Q_{ij}^t [\lambda_{ij}^t (1 - x_n) + x_n], \forall (i, j) \in A_n, n \in N, t \in T, \quad (13)$$

$$f_{ij}^t \leq M y_{ij}, \forall (i, j) \in A, t \in T, \quad (14)$$

$$\lambda_{ij}^t = \lambda_n^p, \forall (i, j) \in A_n^p, p \in P_n, n \in N, t \in T, \quad (15)$$

$$\lambda_n^p \geq \lambda_{\min}, \forall p \in P_n, n \in N, \quad (16)$$

$$\sum_{p \in P_n} \lambda_n^p \leq 1 + M x_n, \forall n \in N, \quad (17)$$

$$f_i^0 = \pi_i^0, \forall i \in S/S_r, \quad (18)$$

$$f_i^0 = D_i, \forall i \in S_r, \quad (19)$$

$$f_{ij}^0 = 0, \forall (i, j) \in A, \quad (20)$$

$$\sum_{i \in S_s} f_i^{T+1} = \sum_{i \in S_r} D_i, \quad (21)$$

$$f_{ij}^t \geq 0, \forall (i, j) \in A, t \in T, \quad (22)$$

$$f_i^t \geq 0, \forall i \in S, t \in T, \quad (23)$$

式中： z 为目标函数；模型解 $\omega = (x, y, \lambda)$ ，

$x = (x_n | n \in N)$ ， $y = (y_{ij} | (i, j) \in A_i)$ ， $\lambda = (\lambda_n^p | p \in P_n,$

$n \in N)$ ； L_t 是一系列随时间变化递增的正整数； M 为一个很大的正整数。

该模型优化求解后可完全根据道路网络结构和交通状况生成最佳的软隔离与硬隔离配比、相应方案实施的交叉口位置、信号控制方案和落实到车道级的交通组织方案(见图4)，预估得出实施方案需要的人力、物力花费并预演评估方案实施的效果(见图5)。

以上模型体系和决策支持工具已经在美国华盛顿特区和马里兰州得到实践和应用。

5 建议

结合中国实际，未来中国城市“非常态”交通管理可从以下战术层面着手：

1) 从应急规划(emergency planning)角度

(下转第32页)