

# 基于数值模拟的某城市快速路交织区控制管理研究

吴文刚

广州高新技术产业开发区民营科技园管理委员会

**摘要：**针对城市快速路交织区高峰期拥堵问题，以提高交织车辆行驶速度和主线优先通行原则，通过提前分道各性质匝道车流以稳定交织区行车秩序，并以匝道单向换道增加快速路交织区驶离车流可利用车道数的方式设计了4车道/5车道非中断控制方案。从数值模拟结果看：交织区小交织比大流量时，比起原有设计方案，4车道/5车道非中断控制方案在保障主线优先行驶上更有效果。

**关键词：**快速路；交织区；非中断控制

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.14.005

## 引言

在城市交通路网中，快速路是重要组成部分，大中城市的主城区大量交通大都由内环快速路承担。从现有交通出行状况数据分析情况看，内环快速路拥堵情况不断恶化，其中，内环路交通效率严重受限于高峰区交织区交通。因此，在已有道路设施的基础上，加强快速路交织区的交通管控是解决高峰期内环路交通拥堵问题的重要举措。

本文将以内环快速路交织区为依托，深入探讨其运行机理，合理优化城市快速路高峰期非中断静态控制方法，为交通管控提供参考借鉴。

## 一、非中断控制方案

### (一) 交织区概况

某内环快速路交织区如图1所示，快速路主线为单向三车道。



图1 交织区构造示意图

上游与下游隧道的主线上升到地面，且并列于地上双车道。辅道的作用包括加、减速带以及进出匝道的的作用，并构成5车道交织区。辅线2车道在离开交织区后发展成6车道，并连接到其他道路。为确保车辆顺利

掉头，将掉头车道设在扩展辅线前。不同于高速公路交织区，城市内环快速路交织区主线和辅线的限速分别为  $60\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $40\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ ，在一定程度上限速限制了辅线的加减速道作用。

因第6车道为断头路和公交专用道路，因此在后续研究分析中不考虑该车道，这不会对分析结论造成影响。

### (二) 理论分析

根据美国《公路通行能力手册》分析交织区服务水平 and 通行能力。其中，交织强度为：

$$W_i = \frac{a(1+VR)^b \left(\frac{V_i}{V}\right)^c}{L^d} \quad (1)$$

式中：

$W_i$ —交织强度因子；

$i$ —非交织与交织两种运营状态；

$VR$ —交通量的比值，即交织区段总交织交通量  $V_w$ /总交通量  $V$ 。

$L$ —交织区总长度；

$N$ —交织区车道数；

$a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ —常数，取决于交织区运行状态。

车速比为：

$$\frac{S_w}{S_{nw}} = 24 + \frac{S_{max}-16}{1+W_i} \quad (2)$$

式中：

$S_{max}$ —限速条件下，交织区最大车流速度。

因背景内环路交织区主辅线有不同的限速标准，而  $S_w$ 、 $S_{nw}$  的真实值必然大于主辅线均限速  $40\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$  的工况，小于主辅线均限速  $60\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$  的工况。以  $S_{Fmax}$  表示主线限速、 $S_{Rmax}$  表示辅线限速，则可用下式分析估算交织流速和非交织流速的关系：

$$\frac{S_w}{S_{nw}} = 24 + \frac{(S_{Fmax}+S_{Rmax})/2-16}{1+W_i} \quad (3)$$

### 二、设计控制方案

背景内环路为该城市的主要快速路，在高峰期时呈

现出低速高密度的车流特点，不利于快速路通行效率，严重甚至可能引起全线拥堵。通过交织强度和车速比值的计算式可看出，VR过大、L过短均会降低交织区的车辆行驶速度；交织区车辆的交织行驶速度较慢时占用车道数较多，会在一定程度上约束交织车流运行状态，不利于交织速度和车辆行驶的安全性。非中断控制方法是提升高峰期交织区服务水平的重要举措。

(一) 现行上下快速流线分离方案

背景交织区等分分成上、下两段。其中，上半段仅可主线-辅线(F-R)交织车流换道，下半段仅可辅线-主线(R-F)交织车流换道。该种交通管制方式有利于分离上下快速车流，且先上后下设置交织区单向换道线的方式充分彰显了主线优先通行的原则。具体见图2。

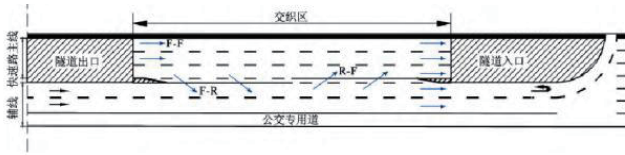


图2 交织空间流线分离控制(现有方案)

从车速比值可见，高峰期间部分工况下，1独立辅线、1并列辅线、3主线的4车道交织区和2并列辅线、3主线的5车道交织区有非常接近的交织车流速度，说明在控制交织流线和利用辅线两个角度有较大可挖掘潜力。

(二) 4车道/5车道方案

辅线间单向换道的4车道/5车道方案如图3。

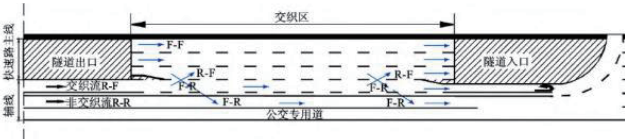


图3 辅线间单向换道的4车道/5车道方案

非交织车流R-R和交织车流R-F分流始于辅线入口位置，且仅允许非交织车流行驶在第5车道、禁止交织区段换道。交织车流R-F可行驶在1-4交织区车道上；当主线上的主线-辅线(F-R)交织车流驶离后，可行驶到第4车道，或从第4车道换至第5车道，使两辅线车辆驶离速率得到充分平衡，并发挥外侧辅线的作用。此外，也在一定程度上空出交织中心位置的第4车道，便于后续交织车辆的驶入。在交织区内，上下快速交织车辆可使用4条或5条车道，因此，4车道或5车道控制方案命名。该方案交织车流秩序更强，车道选择更多，

主线运行效率更高。

(三) 基于交织流线分离的4车道/5车道方案

在以上两种方案的基础上，迭加构建以交织流线分离为基础的4车道/5车道方案。该方案中，F-R车流分布于交织区上游，有利于交织区F-R车流从4车道换至外侧车道。从第4车道的车流可被第5车道承接的角度看，该种方案完美结合了上述两种方案。具体见下图4。

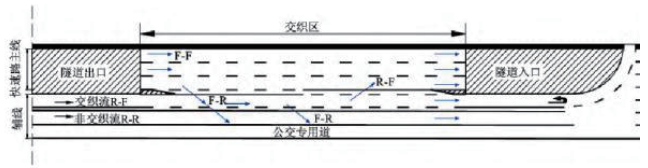


图4 基于交织流线分离的4车道/5车道方案

三、仿真分析

在所依托交织区中，总长共151m，两端所设置鱼腹线各10m，交织段有效长度仅131m。

(一) 仿真模型

以VISSIM软件搭建交织区数值模型。其中，1车道至3车道为 $60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 限速的快速路主线、4车道和5车道为 $40\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 限速的辅线，模型根据车道设定限制速度。模型中，为方便入流车辆进行车头时距的调整，入口与交织区保持有100m的距离。交织区下游有100m长度，有效保障仅有非中断控制会对交织区车流造成影响。

仿真模拟时共设置4种控制方案，方案中的输入车流和道路尺度均相同。方案A：原设计方案。1-3车道为主线、4-5车道为辅线，未限制交织区车辆的交织秩序，R-R和R-F车流可自由从4或5车道驶入；方案B：见图3。控制R-F和R-R车流在4车道和5车道行驶，且仅允许交织区辅道从4车道换至5车道；方案C：参考图2。R-F交织车流和R-R非交织车流可从4车道或5车道自由选择驶入，上游半幅3、4车道仅可从3车道变道至4车道，下游半幅仅允许4车道换至3车道；方案D：见图4。仅允许R-F和R-R车流分别走4、5车道，仅允许交织区辅线段从4车道换至5车道，交织区上游端和下游端4车道和5车道分隔线上下游各30m区段内禁止换道。

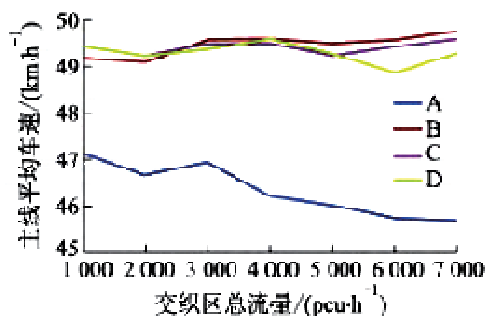
仿真工况各参数为： $VR=0.3$ 、 $R=0.3$ 、 $L=131$ 、 $V=1000、2000\text{...}7000\text{pcu}\cdot\text{h}^{-1}$ ，快速路和辅线分别限速 $60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $40\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

(二) 仿真结果分析

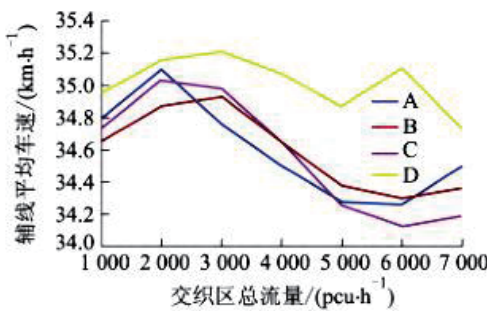
因限速、长度等不同，加减速道功能无法被辅线所取代、必然要借由主线第3车道实现上下快速路加减速部分功能，在一定程度上降低了交织区车辆交织效率。

低速高密度时，因难以再增加车流密度，因此可将空间平均车速与密度的乘积视为交通流量。第3车道和第4车道为交织中心，所有交织车辆均需跨越这两条车道的分隔线。车辆驶入新车道时会对该车道上车流造成一定影响。车道车流在干扰越大时的速度就越慢。3车道平均车速是评价交织质量的重要指标。从仿真结果可见，大流量期间，方案B的交织区有较高运行水平，且1车道是F-F非交织车流主要行驶车道。此外，四种方案的第1车道车速接近。

主线和辅线在不同交织比时的平均车速如下图4。



(a) 主线



(b) 辅线

图4 R=0.3时的平均车速

方案4主线和辅线平均车流有一定规律性。交织区非中断控制可使交织区交织长度较短的主线车速显著提高，其中，方案A车速最低，说明短交织区服务水平受交织秩序影响较大。在四种方案，当R=0.3时，在主线大流量情况下主线车速最大，虽然比起方案A，方案C、D提升显著，但仍低于方案B，方案D辅线车流有最佳表现，其余方案仅有较小差别。在R=0.5时，上快速路

和下快速路两股交织流量相等，方案C和方案D因具备流线分离控制成分而有较好表现。当R=0.5时，方案C、D的表现好于R=0.3工况，基本一致的表现。四种方案相比之下，辅线方案D有更明显的优势，方案B次之。方案C和方案D因具备车流先分流控制而对交织比R更为敏感。方案C、D中，3、4车道有等长的单向换道标线，在R=0.5时最适用。当上、下交织量不等时，必定出现交织车流堵塞在某一方向的情况。对比方案C、D，主线在大流量时的表现较差，表明控制措施过多难以适应车流多变工况，反而会导致交织车流自组织能力有所受限。方案D主线表现次之，导致主线下快速路通过率较小，并使辅线上平均速度较高。

结语

方案B对车流秩序有一定约束作用，且可提供车道数更多，并较少限制较小交织比工况下交织车流的组织能力，有较强适应性。此外，可使快速路平均车速显著提升，控制效果较好，建议采用方案B。

方案C可显著改善快速路主线服务效率，但考虑到交织比需要匹配资源划分，建议交织区交织段较长时应用该方案。

方案D有复杂控制策略，车流自组织能力有所限制，且难以匹配各交通流，主线车流服务水平较低，应慎重使用。

方案A（即现有方案）仅符合驶入车速较大和车流有较大车头时距时的情况。此外，从仿真结果看，低速高密度的城市快速路交织区通行能力的影响因素包括交通量比和交织比，而通行能力与交织比呈正比例关系。4车道/5车道交织区控制方案可较好降低低速高密度时交织比对通行能力造成的影响。

参考文献

[1] SUN S C, AN X, ZHAO J, et al. Modeling and simulation of lane-changing management strategies at on-ramp and off-ramp pair areas based on cellular automaton [J]. IEEE Access, 2021, 9: 35034 - 35044.

[2] 谢济铭, 彭博, 蔡晓禹, 等. 城市快速路交织区控制策略研究综述 [J]. 公路与汽运, 2020 (1): 24 - 31.