

第三章 可变限速控制下交通流仿真计算

交通仿真是研究复杂交通问题的重要工具，通过一定数学模型对交通流运行进行描述，可以动态、准确地模拟交通流运行规律，对交通流时间和空间变化特征予以再现。可变限速控制的核心即对交通流运行状态进行主动干预，因此交通流仿真计算需要准确地模拟可变限速控制对交通流的影响，并能够实现复杂的可变限速控制策略，从而准确地对可变限速控制效果进行评价。本章主要针对可变限速控制下交通流仿真计算进行研究。

3.1 研究动机与思路

交通流仿真计算需要能够准确地模拟快速道路交通流运行特征，从而使仿真研究结果具有较高可信度。以往学者建立了多种交通流仿真模型用于可变限速控制研究，主要包括微观仿真模型以及宏观仿真模型。每类交通仿真模型都有其独特的优势，但也都存在一定的问题。可变限速控制研究中需要根据研究目标以及研究手段，综合分析各种仿真模型的优点与问题，对比各种仿真模型用于可变限速控制的效果及精度，从而选择适合可变限速控制研究的交通流仿真计算模型。

常见的交通流仿真模型均能够实现对快速道路上普遍交通流特征的模拟，例如交通拥堵的生成、传播与消散等。本文研究目标为分析可变限速控制对快速道路交通安全以及通行效率的影响，因此建立的交通流仿真模型需要能够准确模拟影响安全与效率的关键交通流现象，例如瓶颈区域通行能力下降现象等。交通流仿真模型还需要能够准确模拟可变限速控制对交通流运行状态改变的影响，以提高仿真效果的可靠度。此外，交通流仿真模型需要能够方便自主地进行二次开发，从而实现复杂的可变限速控制策略及优化控制算法，实现论文研究目标。

本章针对可变限速控制下交通流仿真计算进行研究，用于后续章节可变限速控制策略的仿真效果分析。本章 3.2 节首先阐述了可变限速控制下交通流仿真关键问题，3.3 阐述了交通流仿真计算模型的建立与改进，3.4 节阐述了仿真模型参数标定与验证，3.5 节对本章进行了小结。

3.2 可变限速控制下交通流仿真关键问题

根据论文研究目标，可变限速控制下交通流仿真计算主要包括如下关键问题。首先，交通流仿真计算模型需要能够准确模拟快速道路上动态交通流状态演化过程。以往研究通常采用集计交通流参数特征（如速度、密度、流量等）衡量快速道路上交通流运行安全以及通行效率，根据交通流状态变化对可变限速控制效果进行分析。因此研究对于宏观交通流状态的仿真计算精度要求较高，实际上对于可变限速控制下个体车辆微观行为并不十分关注。

其次，交通流仿真计算需要能够准确地模拟关键交通流特征与现象。快速道路上影响交通安全与效率的关键特征包括瓶颈区域通行能力下降现象，以及拥堵交通流中时走时停（stop-and-go）现象。通行能力下降是快速道路通行延误增加的主要原因，影

响着快速道路上拥堵交通流速度、拥堵传播速度等重要特征；时走时停现象导致交通流运行速度出现较大波动，容易诱发交通事故的发生。如何对交通流仿真计算模型进行改进与开发，使其能够准确地模拟通行能力下降幅度以及时走时停交通流波动，是可变限速控制下交通流仿真研究中的关键问题之一。

再次，交通流仿真计算模型需要能够准确模拟可变限速对交通流运行的影响。不同限速值可能导致不同交通流运行状态，从而给交通安全与效率带来不同影响。如何对可变限速控制下交通流状态与交通参数的改变进行准确描述，是建立交通流仿真计算模型中需考虑的关键问题之一。如何在交通流仿真计算中实现对驾驶员对限速值遵从度的模拟，也是可变限速控制下交通流仿真计算中需要考虑的问题之一。

此外，交通流仿真计算模型中需要允许用户充分进行改进与二次开发。可变限速控制中需要对快速道路实时交通流运行状态进行判别，如何将复杂的可变限速控制策略与控制逻辑植入仿真模型中，也是交通流仿真计算中的关键问题。此外，本文提出了多种可变限速控制策略优化算法，如何在交通流仿真中植入优化控制算法以实现优化控制效果，也是仿真模型建立过程需要考虑的重要问题。仿真模型需要具有较快运算速度，以满足用户进行大量仿真实验测试的需求。交通流仿真计算模型还需要能够方便地进行参数标定工作，使其能够准确地模拟快速道路上交通流运行。

对以往研究中建立的可变限速控制下交通流仿真计算模型进行分析。微观仿真模型中 **Paramics** 是可变限速控制研究中采用最多的模型，它具有细致的路网建模、灵活的车辆控制、完善的路径诱导以及详细的数据分析等特点，能仿真交通信号、匝道控制、检测器、可变信息板、车内信息显示装置，车内信息顾问，路径诱导等。**Paramics** 中提供了大量丰富的可编译程序，允许用户对仿真规则进行个性化修改与设计，但 **Paramics** 太多关注驾驶行为细节，导致计算量巨大，仿真速度相对缓慢，且二次开发具有一定难度。

宏观仿真模型中，**METANET** 与元胞传输模型是可变限速控制中采用最多的仿真模型。**METANET** 通过二阶模型描述了局部路段内宏观交通流参数之间的关系，从而进行路段内交通流演化规律的模拟。元胞传输模型是运动学模型（**Lighthill - Whitham - Richards**，简称 **LWR**）的差分离散形式，被广泛应用于模拟快速道路交通流运行之中。元胞传输模型能够清楚地描述排队的物理效应以及交通流动力学特征，例如运动波、拥堵行程与消散过程、多路段间交通流相互影响等，对于描述波动较大的交通流特征具有明显优势。元胞传输模型能够充分兼顾到交通流的微观特性，关注小群体车辆之间交通状态传递，对于非饱和、饱和以及过饱和下交通流具有准确的描述效果。元胞传输模型采用开源模式，用户可以对模型内部所有规则进行自主改进与开发，同时可以方便地植入复杂控制模型以及优化算法，适用于各种复杂交通流下控制策略研究。

为了选择适合论文研究目的的可变限速控制下交通流仿真计算模型，本节主要从以下几个方面详细对比了 **Paramics** 模型和元胞传输模型的适用性：

（1）对交通流运行模拟的准确度

Paramics 和元胞传输模型均可以获取快速道路上任意位置的宏观交通流参数，可以模拟快速道路上常见宏观交通流现象。**Paramics** 中通过建立微观跟驰、变道决策行为模型，对每个车辆个体行驶行为进行模拟，通过对个体车辆信息进行集计获得宏观

交通流信息，但对宏观交通流特征的仿真精度有所下降。元胞传输模型对宏观交通流运行状态的演化进行模拟，可以更好仿真宏观交通流特征。对于关键交通流现象的模拟上，元胞传输模型比 Paramics 更具有优势。针对瓶颈区域通行能力下降现象的模拟，元胞传输模型中通过对交通流基本图特征进行修改，可以准确地模拟通行能力下降幅度以及诱发通行能力下降的占有率/密度阈值。由于通行能力下降现象与微观驾驶行为之间的相关性尚未得到研究证实，因此在 Paramics 中较难通过对跟驰模型及换道模型中参数进行调节，实现不同幅度的通行能力下降。

(2) 仿真模型参数标定的难易程度

Paramics 和元胞传输模型中均可以对快速道路几何特征参数（如车道数、出入口匝道位置等）进行描述，两者差异主要在于对交通流运行参数的标定上。Paramics 中待标定参数为驾驶员微观跟驰以及变道行为参数，如平均目标车头时距（mean target headway）、平均驾驶员反应时间（mean drivers' reaction time）等，标定过程中通常以仿真的交通流量、速度等宏观参数与实测数据之差最小为优化目标，对参数值进行调整直到满足误差要求。其参数标定过程时间较长，计算量较大，仿真参数组合过多时需要采用遗传算法等进行参数优化。元胞传输模型中参数标定简单直观，根据实测的交通流数据绘制交通流基本图特征，然后相应确定模型中若干关键参数（如自由流速度、运动波传播速度、通行能力、关键密度等），可以准确地模拟宏观交通流运行特征，参数标定时间较短，计算量很小，标定后仿真精度较高。

(3) 二次开发的难易程度

Paramics 仿真软件中提供了编辑器（programmer），通过应用程序接口 API 允许用户修改仿真运行规则。Paramics 接口采用了标准化函数命名系统，用户遵守模型函数命名与调用规则，通过利用 C++平台对运行规则与控制策略进行编译，形成动态链接库插入仿真模型中，Paramics 加载路网时会自动对插件进行加载与运行。Paramics 中二次开发难度较高，需要在模型接口定义的复杂规则下进行二次开发，对于检测器数据实时数据调用并不准确，出现问题时查错难度较高。元胞传输模型中进行二次开发相对简单，很多二次开发过程可通过对交通流基本图的改变而实现，对于交通流数据的实时调用以及控制策略的开发均不受接口规则的限制，因此具有很高的开发自由度，能够实现复杂可变限速控制策略与优化算法的植入。

(4) 对可变限速控制影响的模拟

Paramics 和元胞传输模型中均可通过调节路段最高允许速度实现可变限速控制，但是对于可变限速对交通流影响的描述存在一定差异。由于可变限速对微观驾驶员行为影响的研究并不充分，目前学术界尚未清楚可变限速控制如何影响个体驾驶员行为，以及个体驾驶员行为的改变如何导致宏观交通状态的改变。此外，Paramics 仿真中对于限速值如何影响驾驶行为具有一定内在假设，例如默认驶员行驶车速的会超过限速值 5-10km/h 左右。因此，Paramics 用于可变限速控制研究的仿真结果存在一定不确定性。Paramics 的优势在于模拟驾驶员对限速值遵从度时，可以反应不同个体驾驶员遵从度的差异性。元胞传输模型中可以通过分析可变限速下交通流基本图特征，可以直观地对可变限速对交通流状态的影响进行准确描述，但在描述驾驶员遵从度时只能描述平均情况，无法反映个体遵从度的差异。

(5) 仿真运行计算的时间

Paramics 中包含大量个体车辆行驶信息, 因此仿真计算工作量较大, 仿真过程较为缓慢。元胞传输模型关注于宏观交通流演化规律, 因此仿真计算量较小、仿真速度较快。为了对比两种模型的仿真时间, 论文在 Paramics 和元胞传输模型中通过二次开发植入同样控制逻辑的可变限速控制策略, 在同一电脑上测试了两类模型的仿真时间。结果表明, 包含插件的 Paramics 仿真速度十分缓慢, 1 小时交通仿真大概需要真实时间 10 分钟。而在 VB 语言编译的元胞传输模型中, 1 小时交通仿真大概时间为 2 秒。对比结果表明, 元胞传输模型在仿真计算时间方面具有巨大优势, 可以在短时间内测试大量控制策略及优化算法, 相比 Paramics 节约巨大工作时间与计算量。

总之, 论文通过对 Paramics 和元胞传输模型进行对比分析表明, 元胞传输模型能够更加直观地对交通流运行规律进行仿真模拟, 其参数标定更为方便、准确, 能够允许用户自主地进行二次开发, 能够准确地模拟可变限速控制对交通流状态的影响, 且在仿真速度上更具有无法比拟的优势。虽然元胞传输模型在模拟驾驶员对可变限速值遵从度方面存在一定劣势, 但是元胞传输模型仍然比 Paramics 更符合本文的研究目标与研究内容。因此, 论文采用元胞传输模型用于分析可变限速控制策略对快速道路交通安全与通行效率的影响。

3.3 可变限速控制下交通流仿真计算

3.3.1 基本元胞传输模型

元胞传输模型从 LWR 模型发展而来, 原始 LWR 模型把车流看成可压缩流体。Daganzo 在假设路段上交通流量和密度间存在相关性的基础上, 构造了元胞传输模型, 从而简化了 LWR 模型的解法^[148]。元胞传输模型将路段划分为具有相同性质等距小段(元胞), 并将时间细分成相等时间间隔来模拟交通流运行, 其元胞长度等于每时间间隔内车辆以自由流速度行驶的距离。在 k 时刻, 系统状态由每个元胞 i 中车辆数所确定。模型通过不断更新元胞状态, 模拟交通流状态的时空变化规律以及交通流动力学特性。模型可以通过设置不同时间间隔以满足不同仿真系统的精度要求。

元胞传输模型中, 每个元胞内交通状态均按照交通流基本图特征来进行更新。元胞传输模型仿真流程如图 3-1 所示, 每个时间单位各元胞内交通流状态按照以下步骤进行更新: (1) 确定各时间段主线起点、入口匝道以及出口匝道上交通需求; (2) 在某时刻 t , 根据各元胞内交通流状态, 计算每个元胞内允许流入及流出的最大车辆数; (3) 根据相邻元胞内流入及流出车辆数, 计算各元胞内交通流量; (4) 从起点元胞向终点元胞依次传递元胞内交通流量, 更新各元胞内交通密度; (5) 根据交通流基本图中流量-密度-速度关系, 计算各元胞内交通流速度。

假设元胞传输模型中交通流符合三角形基本图特征, 如图 3-2 所示。基本图中左枝用于计算某元胞单位时间内能够为下游元胞提供的最大车辆数(也称为发送能力), 设为 $\sigma(k)$; 右枝用于计算某元胞单位时间内能够接受从上游元胞流入的最大车辆数(也称为接受能力), 设为 $\delta(k)$, 其计算公式为:

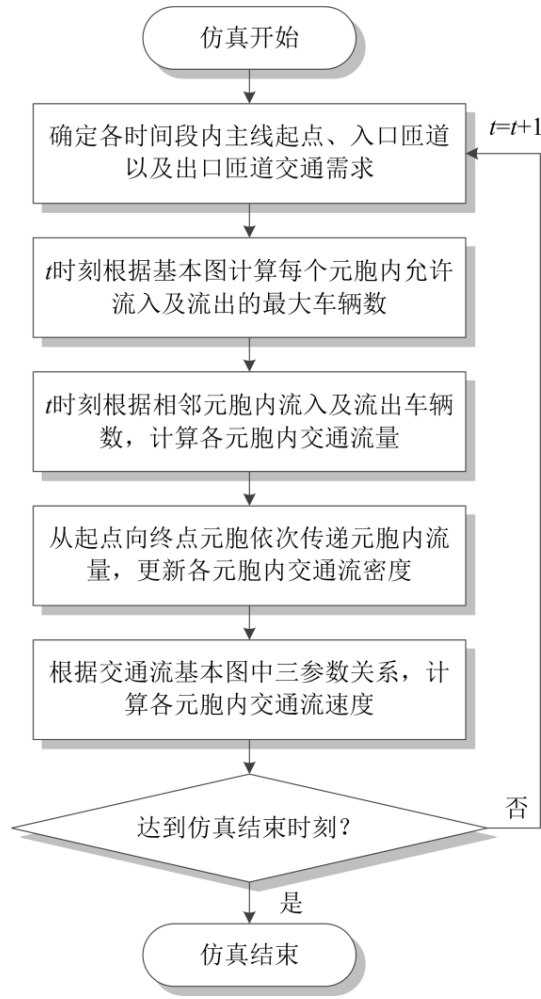


图 3-1 元胞传输模型中仿真流程图

$$\sigma(k) = \min\{V_F d(k) n, Q\} \quad (3-1)$$

$$\delta(k) = \min\{w (d_{jam} - d(k)) n, Q\} \quad (3-2)$$

式中， V_F 为自由流速度， $d(k)$ 为 k 时刻元胞中交通流密度， n 为车道数， Q 为通行能力， w 为运动波传播速度， d_{jam} 为阻塞密度。

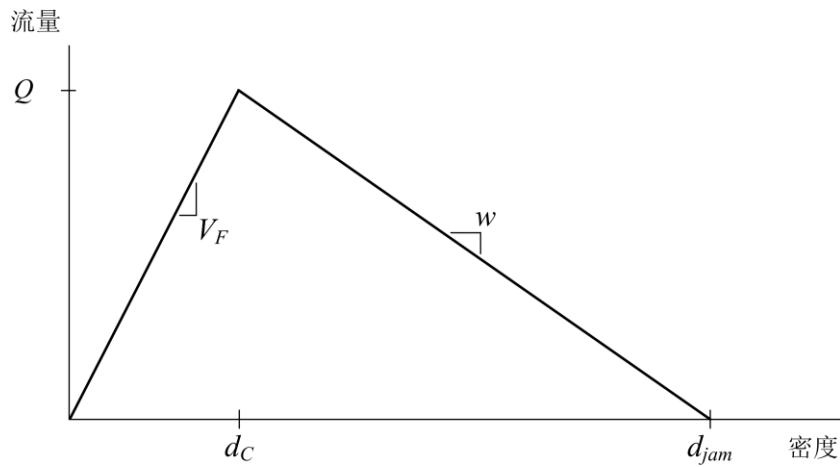


图 3-2 元胞传输模型中交通流基本图

确定了某时刻每个元胞内允许流入及流出的车辆数后，根据相邻元胞车辆流向，计算每个元胞内单位时间的流量值。快速道路上主线路段、入口匝道与主线交汇区

域、出口匝道与主线交汇区域的交通流量计算方法存在差异，下面将针对每类情况一一介绍。

(1) 主线元胞

主线上元胞间车辆传递最为直观，车辆仅能从上游元胞流入下游元胞，如图 3-3 所示。某元胞 i 内 k 时刻的流量 $q_i(k)$ 为 i 元胞能够提供的车辆数 $\sigma_i(k)$ 和元胞 $i+1$ 能够接受的车辆数 $\delta_{i+1}(k)$ 的较小值，其计算公式为：

$$q_i(k) = \min\{\sigma_i(k), \delta_{i+1}(k)\} \quad (3-3)$$

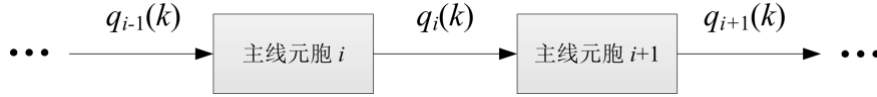


图 3-3 主线元胞车辆传递示意图

(2) 入口匝道元胞

入口匝道与主线交汇区域，汇入区之后主线元胞 $i+1$ 中的车辆来源于主线上游元胞 i 以及入口匝道元胞 j ，如图 3-4 所示。当主线元胞 $i+1$ 在 k 时刻接受能力大于上游主线元胞 i 以及匝道元胞 j 发送能力之和时，即 $\delta_{i+1}(k) \geq \sigma_i(k) + \sigma_j(k)$ ，主线及匝道元胞流量的计算公式为：

$$q_i(k) = \sigma_i(k) \quad (3-4)$$

$$q_j(k) = \sigma_j(k) \quad (3-5)$$

当主线元胞 $i+1$ 接受能力小于上游主线元胞 i 以及匝道元胞 j 发送能力之和时，主线和匝道元胞内仅有部分车辆能够流入下游主线元胞 $i+1$ 中。以往研究通常以入口匝道汇入主线的最大率，设为 p_{on} 。此情况下，主线及匝道元胞流量的计算公式为：

$$q_i(k) = \max\{\delta_{i+1}(k) - \sigma_j(k), \delta_{i+1}(k) (1 - p_{on})\} \quad (3-6)$$

$$q_j(k) = \min\{\sigma_j(k), \delta_{i+1}(k) p_{on}\} \quad (3-7)$$

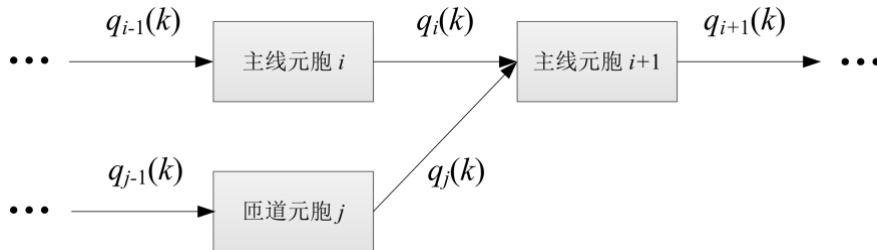


图 3-4 入口匝道与主线交汇区域车辆传递示意图

(3) 出口匝道元胞

出口匝道与主线交汇区域，主线元胞 i 中车辆流入主线下游元胞 $i+1$ 和出口匝道元胞 $j+1$ 中，如图 3-5 所示。假设元胞 i 中离开主线的比例为 p_{off} ，当出口匝道元胞 $j+1$ 在 k 时刻接受能力大于离开主线车辆数时，即 $\delta_{j+1}(k) \geq \sigma_i(k) \cdot p_{off}$ ，主线及匝道元胞流量的计算公式为：

$$q_i(k) = \min\{\sigma_{i-1}(k) \cdot (1 - p_{off}), \delta_{i+1}(k)\} \quad (3-8)$$

$$q_j(k) = \sigma_i(k) \cdot p_{off} \quad (3-9)$$

当出口匝道元胞 j 在时刻接受能力小于离开主线车辆数时，主线上仅有部分车辆可以离开主线，此情况下，主线及匝道元胞流量的计算公式为：

$$q_i(k) = \min\{\delta_{i+1}(k), \delta_{j+1}(k) (1 - p_{off})/p_{off}\} \quad (3-10)$$

$$q_j(k) = \delta_{j+1}(k) \quad (3-11)$$

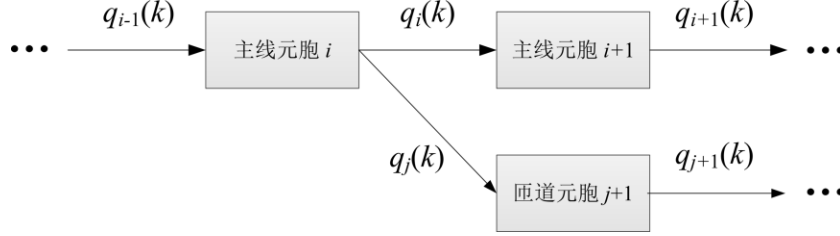


图 3-5 出口匝道与主线交汇区域车辆传递示意图

当确定了 k 时刻主线与匝道元胞内流量后，对 $k+1$ 时刻各元胞内车辆数进行更新，计算各元胞内交通流密度：

$$d_i(k+1) = d_i(k) + \Delta T / (L_i n_i) (q_{i-1}(k) - q_i(k)) \quad (3-12)$$

式中 ΔT 为仿真时间步长，等于车辆以自由流速度行驶过单位元胞的时间， L_i 为单位元胞的长度。

元胞 i 内交通流占有率 $o_i(k)$ 可以根据密度 $d_i(k)$ 和拥堵密度 $d_{i,jam}$ 进行计算：

$$o_i(k) = d_i(k) / d_{i,jam} \quad (3-13)$$

每个元胞中交通流速度可以根据密度值进行计算，其计算公式为：

$$v(k) = \begin{cases} V_F, & \text{if } d(k) \leq d_c \\ [d_{jam}(k) - d(k)] \cdot w / d(k), & \text{if } d(k) > d_c \end{cases} \quad (3-14)$$

元胞传输模型采用一系列公式来模拟交通流演化过程，因此可以采用任意编程语言对于基于元胞传输模型的仿真平台进行搭建。元胞传输模型仿真过程中，对每个元胞内实时交通流参数数据进行保存与输出。本研究中元胞传输模型仿真时间约为 6 秒，即每 6 秒计算和更新一次元胞内交通流状态。如本文第 2-4 节所阐述，实时交通事故风险预测模型通常采用每 30 秒交通流数据。因此，元胞传输模型仿真中需要按照 30 秒精度对交通流数据进行集计处理。

3.3.2 元胞传输模型的改进

基本元胞传输模型能够模拟快速道路上交通拥堵生成与传播过程，但对于交通流状态的假设过于简单，基本模型无法模拟快速道路上通行能力下降及时走时停交通流特征，也无法直接模拟不同驾驶员遵从度下可变限速控制对交通流影响。本节对于基本元胞传输模型进行了改进与二次开发，使其能够满足本研究仿真分析需求。

3.3.2.1 瓶颈区域通行能力下降现象仿真

快速道路瓶颈元胞中包含通行能力下降的交通流基本图如图 3-6 所示，其中 Q_d 为通行能力下降后流量， d_d 为通行能力下降发生时刻的密度阈值。当交通流密度超过阈值 d_d 时，瓶颈区车辆通过流量从通行能力 Q 下降到 q_d 。从图 3-6 中可以看出，通行能

力下降现象对最大瓶颈元胞接受车辆数产生影响。基于改进的交通流基本图，对瓶颈元胞传输模型进行修正，其瓶颈元胞的最大接受车辆数为：

$$\delta(k) = \begin{cases} \min\{w \cdot [d_{jam} - d(k)] \cdot n, Q\}, & \text{if } d(k) \leq d_d \\ w \cdot [d'_{jam} - d(k)] \cdot n, & \text{if } d(k) > d_d \end{cases} \quad (3-15)$$

式中 d'_{jam} 为瓶颈元胞的拥堵密度。将式 3-17 代入元胞传输模型中，既可以实现对瓶颈元胞通行能力下降现象的仿真。通行能力下降的幅度和密度阈值需根据真实交通流数据进行参数标定，将在后续章节阐述。

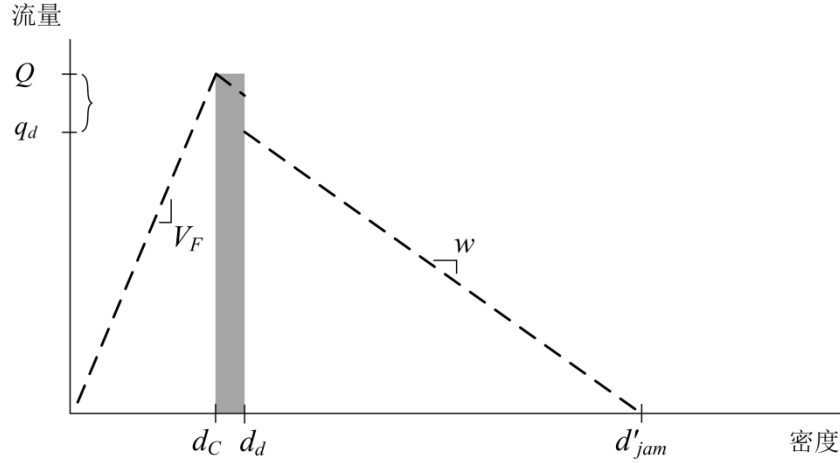


图 3-6 瓶颈元胞中包含通行能力下降的基本图

3.3.2.2 拥堵交通流中时走时停现象仿真

拥堵交通流中时走时停现象由瓶颈路段车辆激进变道行为所产生^{[149][150][151][152]}，并向上游路段逐渐传播，时走时停波动幅度不断增加，从而引发较大交通流速度波动，导致安全隐患和通行效率下降。传统的元胞传输模型无法模拟时走时停交通现象，因此传统元胞传输模型仿真的拥堵交通流比真实情况平滑很多。需要对传统元胞传输模型进行改进，以模拟时走时停交通流现象。

本文在元胞传输模型中增加了一系列随机性因素，以在元胞传输模型中产生交通流波动。拥堵状态下决定交通流量的是元胞的接受能力，因此对元胞传输模型中瓶颈元胞的最大接受车辆数公式进行如下修改：

$$\delta(k) = \delta(k) + e(k) \quad (3-16)$$

$$e(k) = \varphi \delta(k) \varepsilon(k), \text{ where } \varepsilon(k) \in [-1, 1] \quad (3-17)$$

式中 $e(k)$ 为 k 时刻随机部分， $\varepsilon(k)$ 为 k 时刻产生的随机噪声， φ 为决定时走时停交通流波动幅度的参数。

瓶颈元胞内时走时停运动波由一定概率产生，其公式为：

$$\delta(k) = \delta(k) + e(k), \text{ if } \zeta(k) < \phi \text{ and } v(k) < V_{TH} \quad (3-18)$$

$$\delta(k) = \delta(k), \text{ else} \quad (3-19)$$

式中 $\zeta(k)$ 是介于 $[0,1]$ 之间随机数， ϕ 是产生时走时停波动的概率阈值， V_{TH} 为判断交通流是否拥堵的速度阈值（通常取值为 50 mph 或 80 km/h）。当时走时停运动波在瓶颈

元胞产生后，会不断向上游路段传播，导致上游路段内速度出现较大波动。时走时停现象参数标定方法将在后续章节阐述。

3.3.2.3 可变限速控制对交通流影响仿真

可变限速控制下交通流基本图如图 3-7 所示，首先假设驾驶员完全遵从限速值，自由流枝斜率等于限速值 V_{SL} ，该限速值下最大流量为 Q_{VSL} ，对应的密度为 d_{VSL} 。根据交通流基本图，可变限速控制下元胞流入及流出车辆数的计算公式为：

$$\sigma(k) = \min\{V_{SL}(k) d(k) n, Q_{VSL}\} \quad (3-20)$$

$$\delta(k) = \min\{w (d_{jam} - d(k)) n, Q_{VSL}\} \quad (3-21)$$

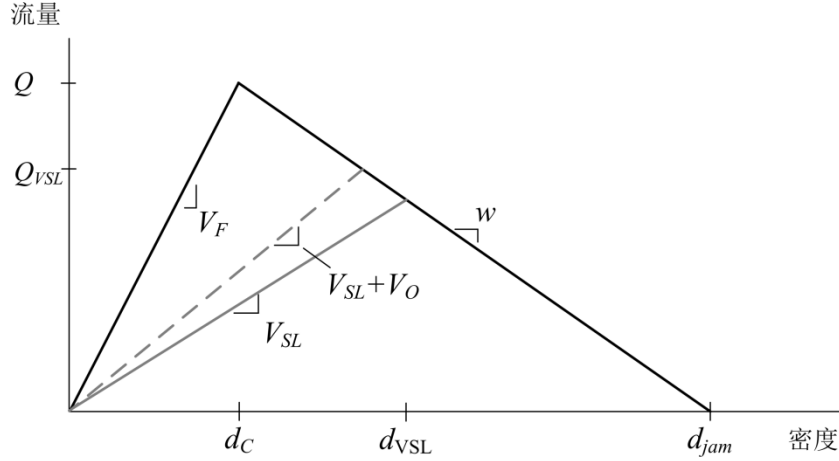


图 3-7 可变限速控制下交通流基本图

可变限速控制下各元胞中交通流速度根据密度和限速值共同决定，计算公式为：

$$v(k) = \begin{cases} \min\{V_F, V_{SL}(k-1)\}, & \text{if } d(k) \leq d_{VSL} \\ \left[\frac{d_{jam}(k) - d(k)}{d_{jam}(k)} \right] \cdot w, & \text{if } d(k) > d_{VSL} \end{cases} \quad (3-22)$$

本文后续章节研究了匝道控制与可变限速控制的结合，因此，在元胞传输模型中需要增加对匝道控制影响的模拟。匝道控制对入口匝道汇入主线的车辆数进行调节，因此匝道控制下入口匝道元胞 j 的发送车辆数计算公式为：

$$\sigma_j(k) = \min\{r_j(k), \delta_j(k)\} \quad (3-23)$$

式中 $r_j(k)$ 为匝道控制下入口匝道单位时间内进入主线车辆数。将公示 3-23 带入元胞传输模型仿真过程，可以模拟匝道控制对交通流运行的影响。

3.3.2.4 驾驶员对可变限速遵从情况仿真

驾驶员平均行驶车速普遍高于限速值一定幅度。在微观仿真模型中，可以对限速值下个体驾驶员车速分布进行设置。在元胞传输模型中，同样可以对驾驶员速度超过限速值的现象进行仿真模拟。考虑驾驶员遵从度的可变限速控制下交通流基本图如图 3-7 所示。可以看出，驾驶员遵从度越低，自由流枝斜率越大，某密度值对应的流量越大，最大流量对应的关键密度越小。

论文采用驾驶员超速幅度表示驾驶员对限速值遵从情况，超速幅度越大，驾驶员遵从度越低。例如，当超速幅度为 5mph 时，表明当限速值为 50mph 时，车辆平均速

度为 50+5=55mph。考虑驾驶员遵从度的元胞传输模型中元胞最大流入车辆数的计算公式为：

$$\sigma(k)=\min\{V'_{SL}(k) d(k) n, Q_{VSL}\} \quad (3-24)$$

$$V'_{SL}(k)=V'_{SL}(k)+V_O \quad (3-25)$$

式中 $V'_{SL}(k)$ 为限速值为 $V_{SL}(k)$ 时车辆平均速度， V_O 为超速幅度。

将公式 3-24 及 3-25 用于元胞传输模型仿真之中，可以有效模拟驾驶员不同遵从度（超速幅度）下交通流运行特征，以评价不同驾驶员遵从度下可变限速控制效果。

3.4 仿真模型参数标定与验证

3.4.1 参数标定与验证方法

用于快速道路可变限速控制效果的仿真分析之前，需要对交通流仿真计算模型进行参数标定与验证工作，以提高仿真结果的有效性与准确度。参数标定即通过对仿真模型中关键参数取值进行确定，使交通流仿真结果尽可能接近真实交通流运行情况。仿真模型验证即根据标定好的模型对某时段内交通流进行仿真，将仿真结果与真实交通流情况进行对比，分析仿真误差是否在可接受范围之内。

论文提出改进的元胞传输模型参数标定与验证流程如图 3-8 所示。首先确定快速道路研究路段，获取路段内道路几何特征数据以及检测器位置交通流数据。之后，在元胞传输模型中对元胞基本属性进行设置，包括元胞长度、个数、车道数、出入口匝道位置等。之后，根据检测器交通流数据计算关键交通流参数值，对主线及匝道元胞交通流基本图进行确定，对元胞内关键参数进行标定。此后，对快速道路瓶颈通行能力下降和时走时停现象进行标定。首先根据交通瓶颈上下游检测器数据，计算通行能力下降幅度及对应的占有率阈值，相应对瓶颈元胞中交通流基本图进行确定，并进行瓶颈元胞通行能力下降相关参数的标定。之后根据检测器交通流数据对时走时停交通流波动幅度进行参数标定。此后，根据快速道路上交通流速度数据与限速值数据，对驾驶员超速幅度参数进行标定。完成参数标定后，根据标定好的元胞传输模型进行仿真效果验证，将仿真交通流数据与真实交通流数据进行对比，如仿真误差满足精度要求，则完成参数标定工作；如误差不满足精度要求，则重复上述步骤直至满足要求。

根据真实交通流数据对元胞传输模型基本图进行确定。如图 3-2 所示，三角形交通流基本图需要确定 3 个参数即可完全确定整个基本图形状。考虑到各参数获取的难度和准确度，本文选择对自由流速度、通行能力和运动波传播速度三个参数进行标定。自由流速度标定相对简单，交通流处于非拥堵状态下的平均速度即为自由流速度。为确定自由流速度，可绘制交通流速度和占有率随时间波动图，如果出现速度突然下降及占有率突然上升，表明交通流从自由流阶段转变为拥堵阶段，采用拥堵时刻之前的交通流平均速度作为自由流速度。

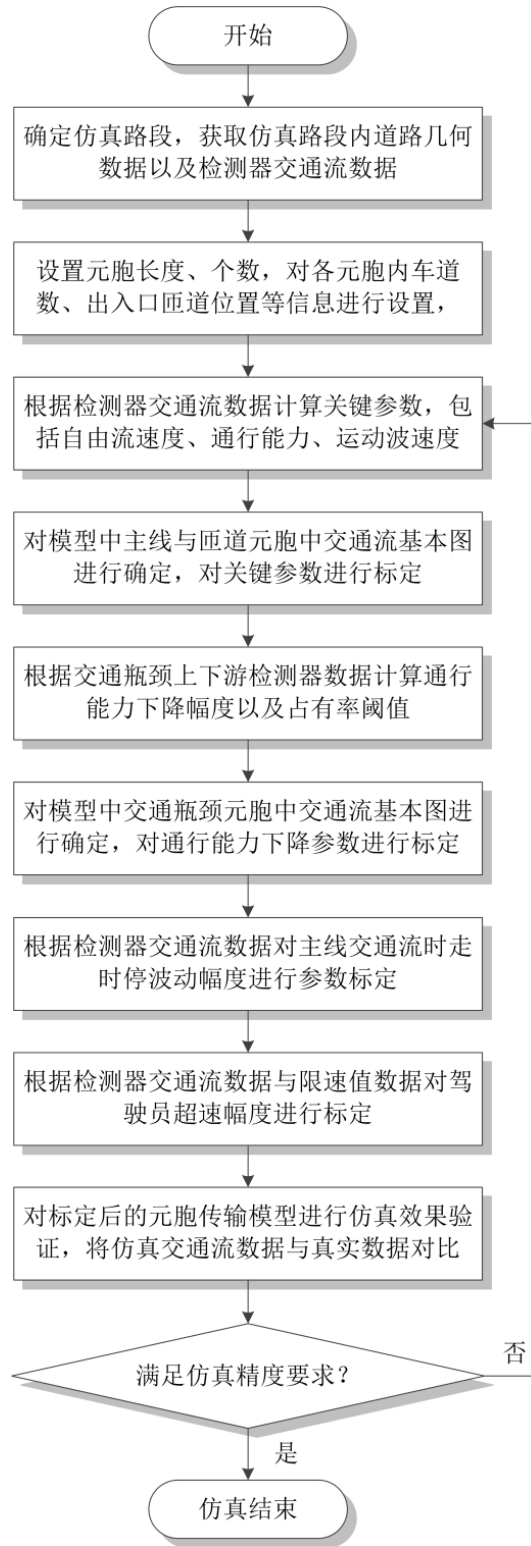


图 3-8 元胞传输模型参数标定与验证流程

采用累计流量曲线方法确定快速道路路段交通流通行能力。斜累计流量曲线由原始流量累计曲线减去基本流量而得出，计算公式为：

$$C'_q(t) = C_q(t) - q_0(t - t_0) \quad (3-26)$$

$$C_q(t) = \sum_{i=1}^t q(i) \quad (3-27)$$

式中 $C'_q(t)$ 为 t 时刻斜累计流量, $C_q(t)$ 为 t 时刻累计流量, q_0 为基本流量, t_0 为起始时间, $q(i)$ 为 i 时刻通过道路断面车辆数。设置基本流量的目的为使累计曲线上波动更加明显, 放大累计曲线中流量的变化幅度^{[103][104]}。

绘制斜累计流量和交通流速度随时间波动图, 如果出现速度突然下降, 表明交通流从自由流阶段转变为拥堵阶段。拥堵时刻之前一段时间内稳定的流量均值作为路段通行能力。采用累计流量曲线方法确定运动波传播轨迹并计算运动波传播速度。根据路段主线上多个交通流检测器数据, 分别绘制拥堵交通流中多个位置的斜累计流量波动曲线, 从图中可以识别运动波的生成时间、波动幅度以及传播过程。运动波传播速度可以由相邻检测器间距除以运动波在相邻检测器间传播时间进行计算。

同样采用累计流量曲线方法确定瓶颈路段通行能力下降幅度。与确定路段通行能力不同, 用于分析通行能力下降的交通流数据应该来源于瓶颈位置下游的第一个检测器以及瓶颈位置上游的第一个检测器。分别绘制瓶颈下游检测器位置斜累计流量曲线以及瓶颈上游检测器位置交通流速度、占有率随时间波动曲线, 如果累计流量曲线上拐点时刻附近对应着交通流速度明显下降以及占有率明显上升, 表明通行能力下降现象发生。累计流量曲线拐点前后的交通流量之差即通行能力下降的幅度, 同样可以确定通行能力下降时刻所对应的占有率阈值。

为了标定拥堵交通流时中走时停现象, 需要对公式 3-16 至 3-19 中的 φ 和 ϕ 两个参数进行标定。考虑到时走时停交通流中的速度波动是导致交通事故的主要原因^{[75][121][122][126][127][128][133]}, 本文对时走时停现象进行参数标定的目标设定为路段内仿真速度标准差 χ^S 与真实速度标准差 χ^M 之间误差最小, 其目标函数为:

$$\min Z = \sum_{k=1}^T \sum_i^N [\chi_i^M(k) - \chi_i^S(k)]^2 / N \times T \quad (3-28)$$

采用试验-误差 (Trail-and-error) 法对上述两参数取值进行分析, 根据多次仿真结果选择仿真中速度波动与真实情况最为接近的参数, 作为元胞传输模型中时走时停现象参数标定的取值。驾驶员超速幅度标定过程中, 应选择自由流交通状态下、车流量相对较小的情况, 获取驾驶员主观意愿下超速幅度 (如论文第 2 节所示)。根据自由流状态下交通流平均速度与限速值之差, 可以计算得到驾驶员对限速值的超速幅度, 用于元胞传输模型中相关参数标定。

仿真模型验证环节中, 将快速道路上主线及匝道上交通需求输入元胞传输模型, 采用标定后的模型对快速道路某交通流运行进行仿真, 将仿真时间内各交通流检测器位置交通流数据进行输出。采用交通流速度和流量的平均绝对百分比误差 (MAPE) 来衡量仿真结果验证的误差, 其计算公式为:

$$MAPE = \frac{1}{2 \cdot T \cdot N} \left[\sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N \frac{|F_M(n, t) - F_S(n, t)|}{|F_M(n, t)|} + \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N \frac{|V_M(n, t) - V_S(n, t)|}{|V_M(n, t)|} \right] \quad (3-29)$$

式中 T 为仿真时间长度, N 为交通流检测器个数, $F_M(n, t)$ 为观测到的检测器 n 在 t 时间的流量, $F_S(n, t)$ 为仿真输出的检测器 n 在 t 时间的流量, V_M 为实际观测到的速度, V_S 为仿真输出的速度。根据公式 (3-29) 计算得到的 MAPE 值越小, 表明仿真结果与真实数据间误差越小, 说明仿真模型验证效果越好。

3.4.2 参数标定与验证实例分析

本节以美国加利福尼亚州 I-80 高速公路为例，具体阐述元胞传输模型中参数标定与验证过程。首先介绍元胞传输模型中元胞设置，该高速公路上某 2 英里路段如图 3-9

(a) 所示，路段内车道数为 4 车道，路段内包含一个入口匝道和一个出口匝道，及 3 个交通流检测器。在元胞传输模型中对上述参数进行设置，如图 3-9 (b) 所示，每个元胞长度设置为 0.1 英里，出入口匝道元胞位置和真实情况一致，将交通流检测器位置对应的元胞标记为检测器元胞。

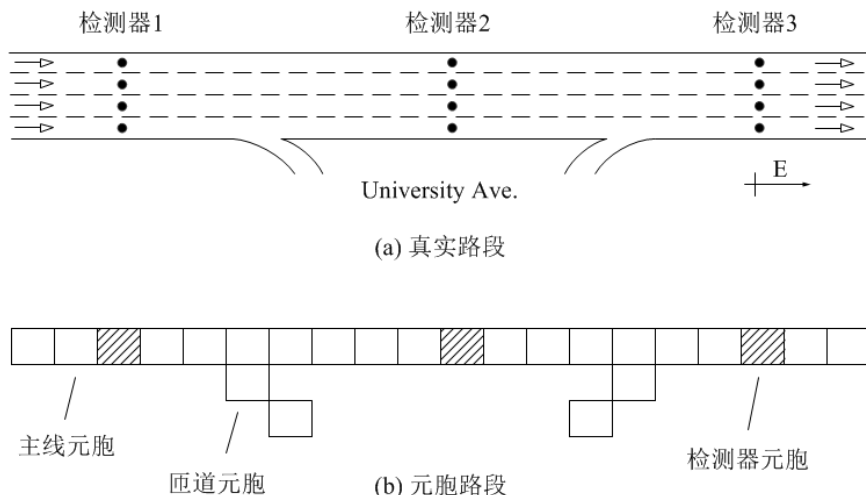


图 3-9 路段几何特征与仿真模型中元胞设置

采用真实交通流数据对元胞传输模型中关键参数进行标定。根据真实数据绘制交通流速度和占有率随时间波动情况，如图 3-10 所示。可以看出，17:04 时刻交通流速度出现突然下降，占有率突然上升，表明交通流从自由流状态转变为拥堵状态。采用 17:04 时刻之前的交通流平均速度作为自由流速度。本例中，自由流速度为 65mph。绘制斜累计流量和交通流速度随时间波动情况，如图 3-11 所示。可以看出，16:55 时刻速度突然下降，表明交通流从自由流转变为拥堵状态。采用 17:04 时刻之前的路段高峰期平均流量作为路段通行能力。本例中，路段的通行能力为 7980 辆/小时。采用研究路段内三个交通流检测器数据，绘制了拥堵状态下三个位置斜累计流量波动曲线，如图 3-12 所示。从图中可以明显看出运动波的生成时间、波动幅度以及传播过程。运动波传播速度等于相邻检测器间距除以运动波在相邻检测器间传播时间。本例中，运动波的传播速度为 12mph。

绘制研究路段交通瓶颈下游检测器位置以及瓶颈上游检测器位置的斜累计流量曲线以及交通流速度、占有率随时间波动曲线，如图 3-13 所示。其中图 (a) 为两个检测器的斜累计流量曲线，图 (b) 为各检测器位置速度曲线，图 (c) 为 1 分钟移动平均占有率曲线。从图中可以看出，瓶颈区域交通流在时刻 17:04 之前保持了较高流量值，为 6456 辆/小时，两个检测器位置交通流均为自由流速度；时刻 17:07 之后两条累计流量曲线出现下降拐点，表明此时通行能力下降发生，下降后最大车辆流量为 5680 辆/小时，通行能力下降的比例为 12.02%，对应着检测器 2 上平均速度大幅下降；时刻 17:48 之后两个检测器位置交通流量呈现上升趋势，表明瓶颈区域交通拥堵开始消散，通行能力逐渐恢复，其瓶颈上游交通流速度也逐渐上升到自由流值。瓶颈下游检测器位置速度始终为自由流速度，表明瓶颈下游交通流一直处于自由流状态。

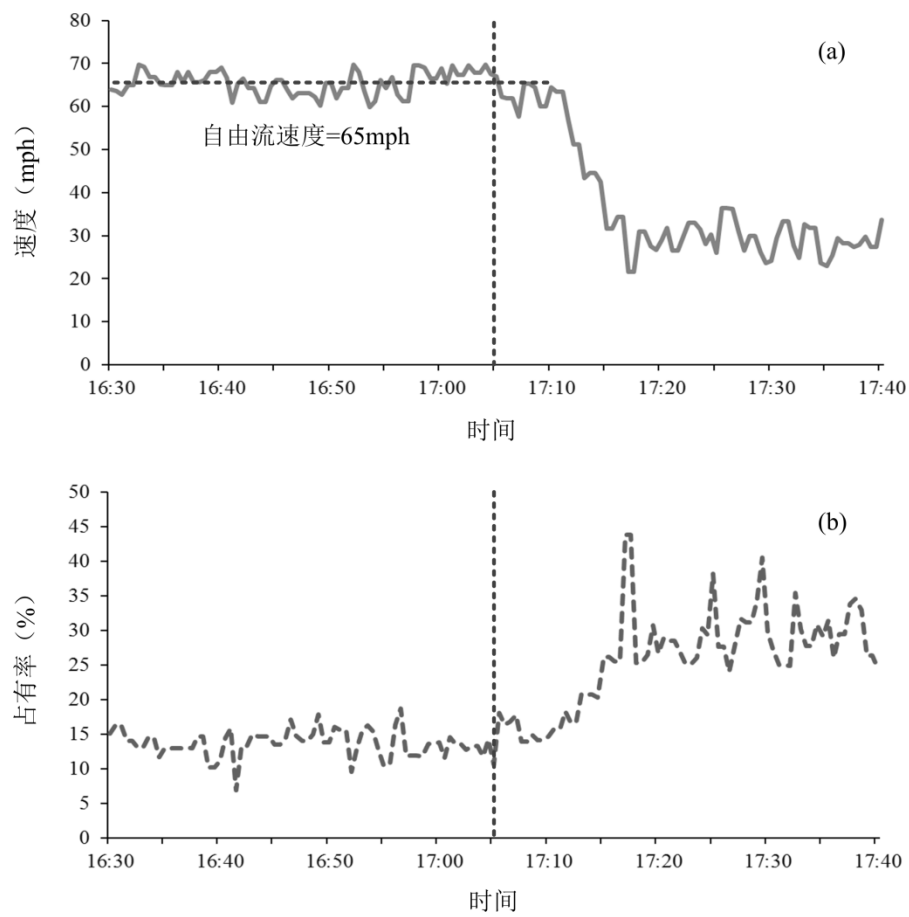


图 3-10 路段内速度、占有率随时间变化情况

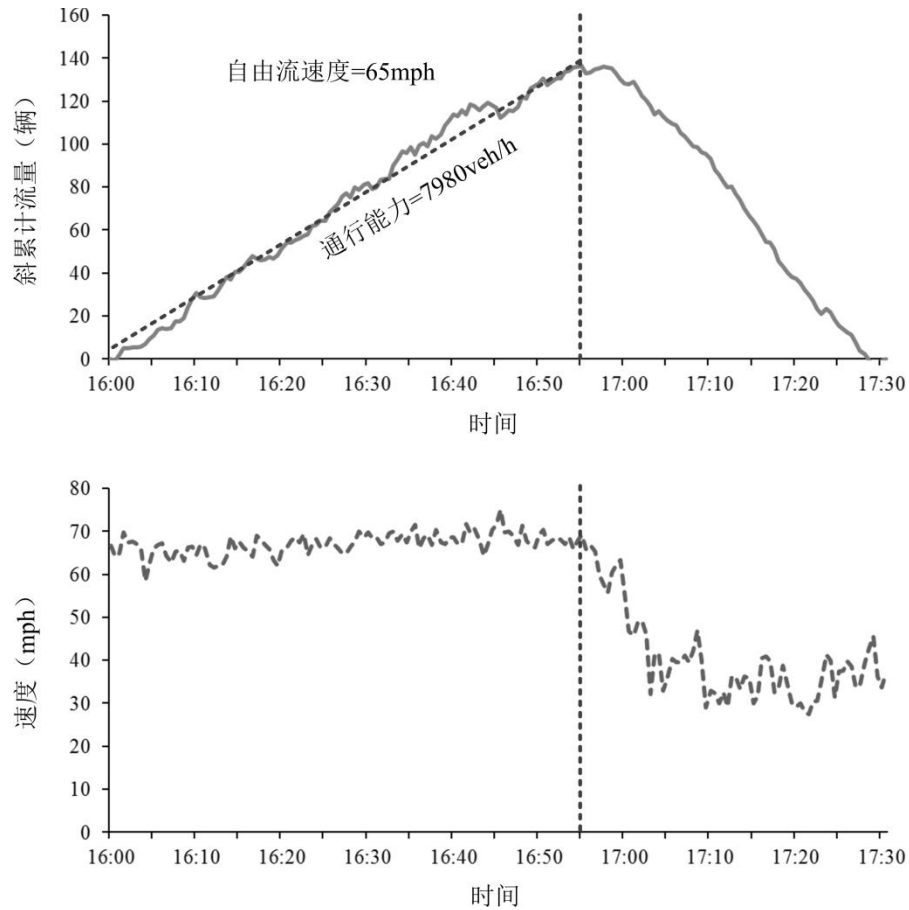


图 3-11 路段内累计流量与速度曲线

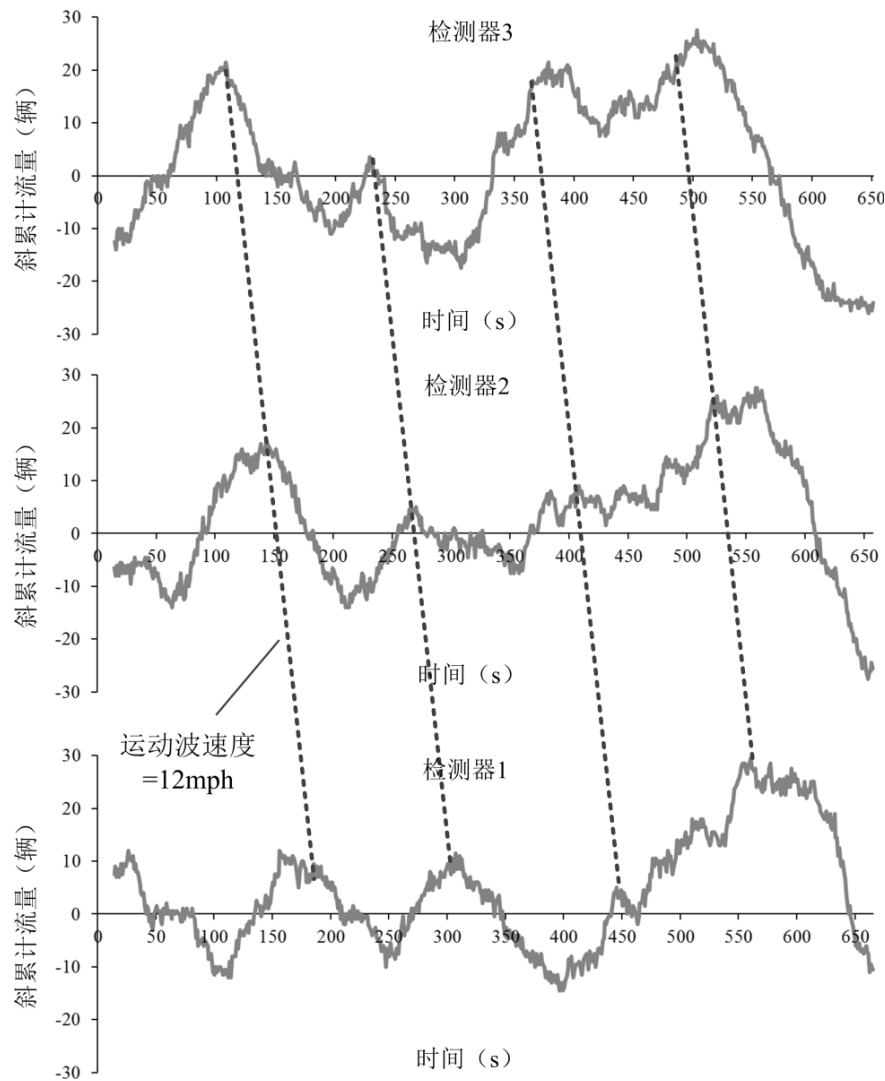


图 3-12 路段内累计占有率曲线及运动波传播过程

论文对以往研究中通行能力下降幅度进行了总结, 结果如表 2-8 所示。可以看出, 不同交通瓶颈路段的通行能力下降幅度的波动较大, 从 0.54% 至 18% 不等。以往研究中采用交通流密度 46 辆/千米/车道至 56 辆/千米/车道以及移动平均占有率 17% 作为通行能力下降的预测指标^{[107][161]}, 与本文数据分析结果一致。

表 2-8 以往研究中通行能力下降幅度

文献	瓶颈类型	车道数	通行能力下降幅度 (%)
Bank (1990) ^[153]	入口匝道	4	0.50~4.04
Hall and Agyemang-Duah (1991) ^[154]	入口匝道	3	0~10.36
Persaud <i>et al.</i> (1998) ^[155]	入口匝道	3	11.6~15.3
Cassidy and Bertini (1999) ^[156]	入口匝道	3	4~10
Bertini and Malik (2004) ^[157]	入口匝道	2	2~5
Bertini and Leal (2005) ^[158]	-	2	6.7~10.7
Cassidy and Rudjanakanoknad (2005) ^[106]	入口匝道	4	8.3~17.3
Banks (2006) ^[159]	入口匝道、曲线、车道变少、出口匝道	2~5	5.6~15.4
Chung <i>et al.</i> (2007) ^[107]	入口匝道、车道变少	2~4	3~18
Oh and Yeo (2012) ^[160]	非匝道、出口匝道	2~5	8.85~16.33

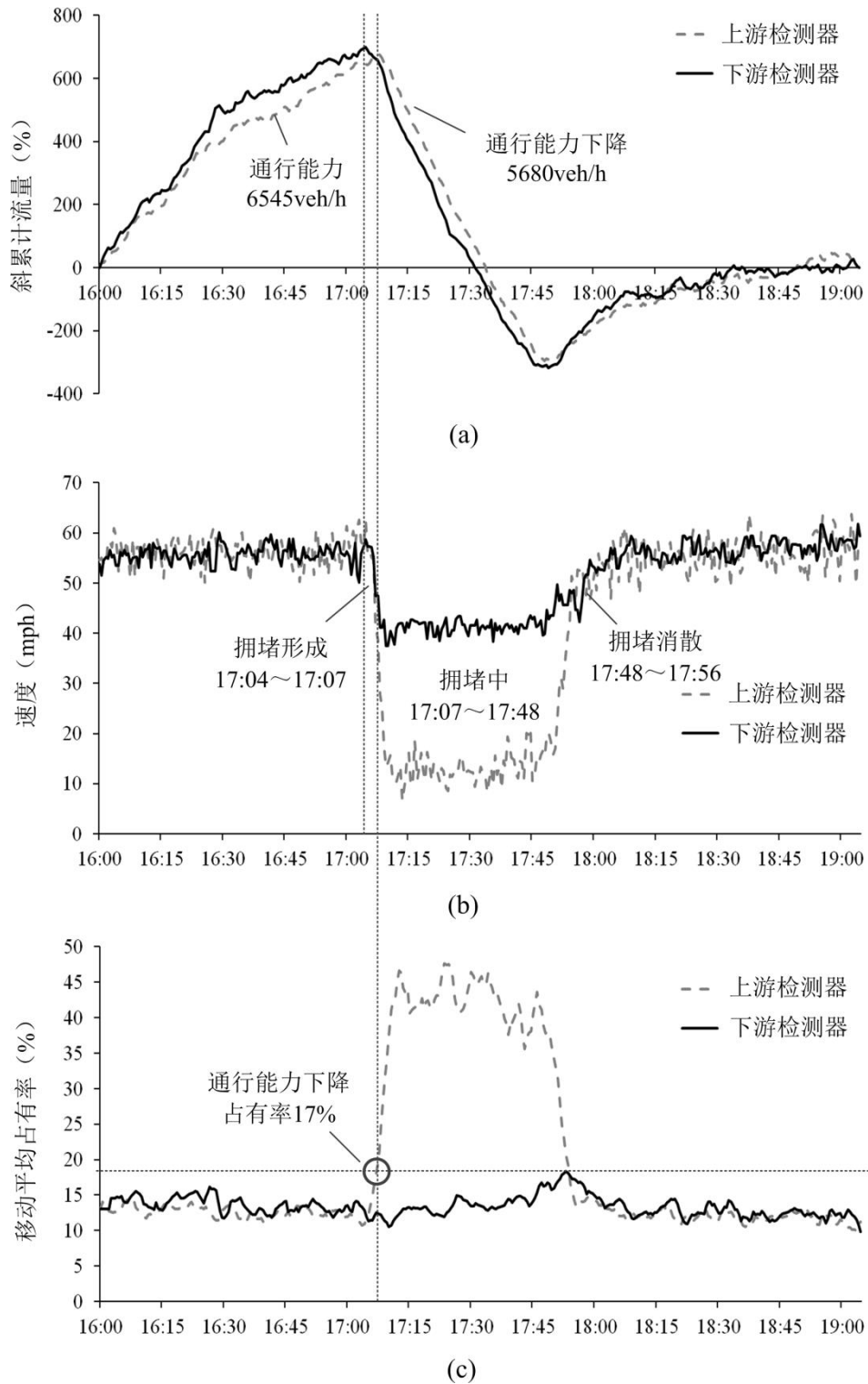


图 3-13 瓶颈路段通行能力下降分析

对比图 3-13 (a) 和 (c) 发现, 移动平均占有率曲线可用于判断瓶颈通行能力下降现象发生。自由流状态下占有率曲线始终保持在 15% 以下; 拥堵生成后上游检测器位置占有率值迅速上升并一直保持较高值 (高于 35%)。详细对比分析发现, 瓶颈位置发生通行能力下降时刻的上游检测器位置占有率为 17%, 因此可以采用该值作为瓶颈通行能力下降是否发生的预测指标。

为了标定拥堵中交通流时走时停现象，需要对 ϕ 和 ϕ 两个参数进行标定，其中 ϕ 和 ϕ 的取值范围均为[0, 1]。对不同参数组合情况下的仿真结果进行分析，对仿真精度进行计算与对比。采用试验-误差（trail-and-error）方法对两个参数取值进行测试，多次仿真结果表明，当 ϕ 取值为 0.25 及 ϕ 取值为 0.1 时，元胞传输模型中仿真的时走时停交通流速度波动与真实情况最为接近。其真实检测器数据与元胞传输模型仿真结果如图 3-14 所示。

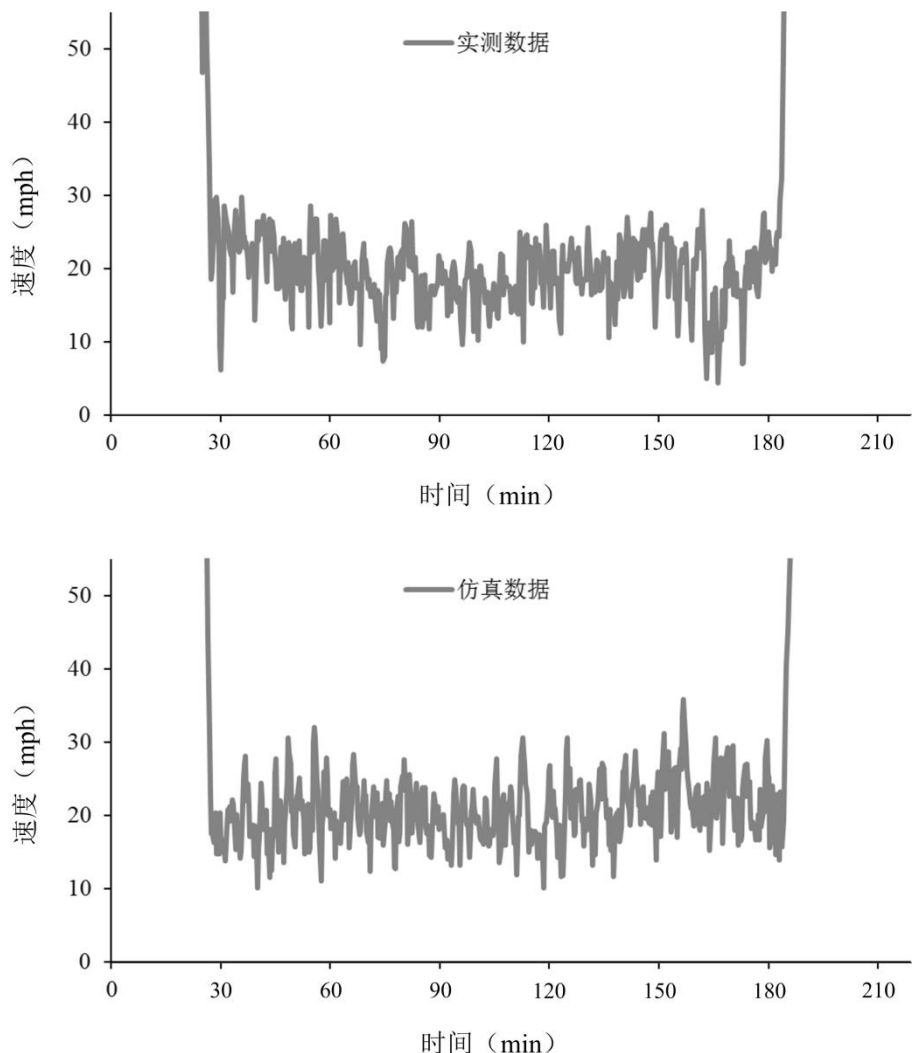


图 3-14 时走时停速度波动的实测和仿真数据

根据标定好的元胞传输模型，对加利福尼亚州 I-880 高速公路北向路段交通流进行仿真效果验证。该路段内真实交通流速度时空图如图 3-15 (a) 所示，图中横坐标为时间，纵坐标为行驶方向，颜色较深区域代表交通流速度较低，颜色较浅部分代表速度较高。图中可见，路段内存在若干交通瓶颈，且交通拥堵的传播与消散现象十分明显。在元胞传输模型仿真中对交通需求进行设置，根据仿真结果计算各交通流检测器位置速度，元胞传输模型仿真获得的交通流速度时空图如图 3-15 (b) 所示，可以看出仿真模型能够较为准确地模拟交通拥堵生成与消散的过程，仿真结果与真实情况较为接近。根据公式 3-29 计算得到，仿真结果与真实数据的平均绝对百分比误差为 8.4%，表明标定后的元胞传输模型能够较为准确地模拟快速道路上交通流运行特征。

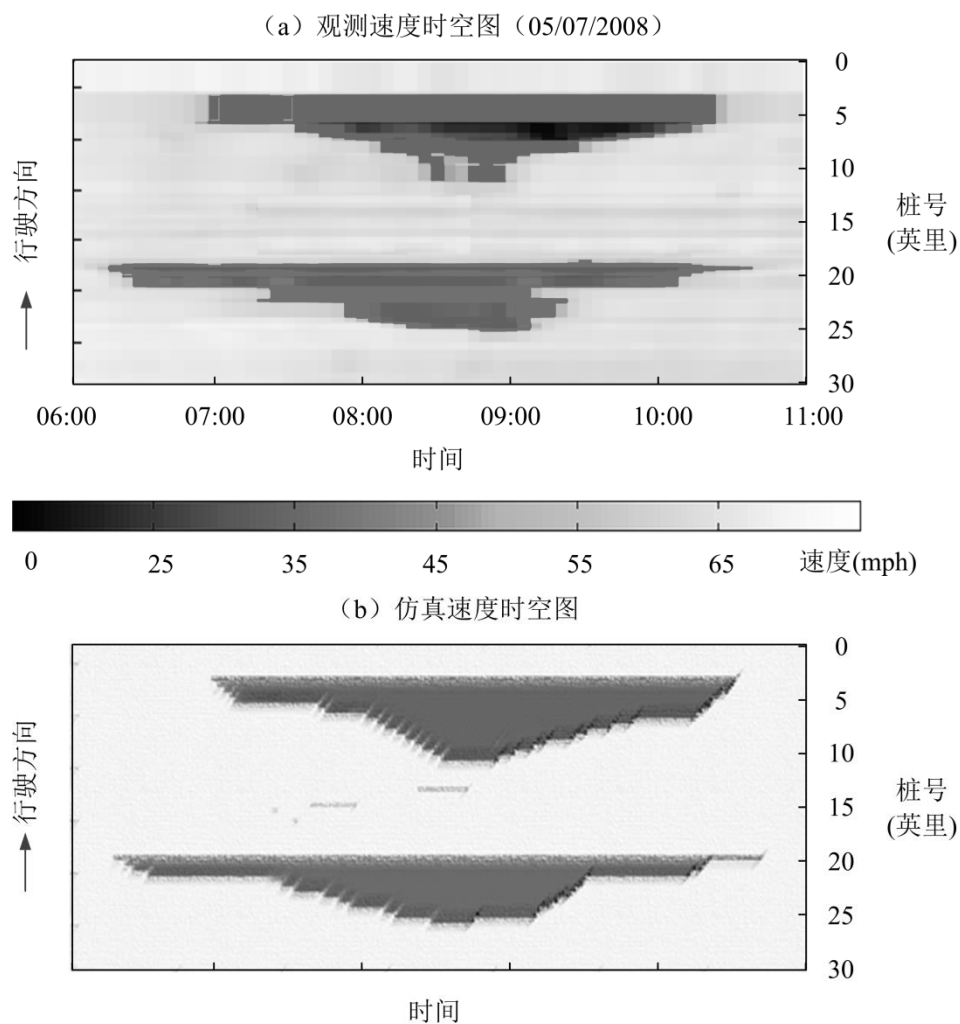


图 3-15 仿真模型验证路段内交通流特征

3.5 本章小结

本章针对可变限速控制下交通流仿真计算进行研究, 首先分析了可变限速控制下交通流仿真计算的关键问题, 对比了不同仿真模型用于可变限速控制研究的适应性, 选择元胞传输模型用于论文仿真研究。阐述了基本元胞传输模型的建立, 对模型进行改进与二次开发使其能够模拟瓶颈区域通行能力下降现象、拥堵交通流中时走时停现象以及不同驾驶员遵从度下可变限速控制对交通流运行影响。阐述了用于可变限速控制研究的元胞传输模型参数标定与验证流程, 提出了关键交通流参数及交通现象标定方法, 并基于实例分析阐述了元胞传输模型参数标定与验证过程。本章研究为后续章节中准确地仿真计算可变限速控制对交通安全及通行效率的影响奠定了基础。