

交通系统仿真模型分类研究综述

姜冠舟

重庆交通大学 交通运输学院, 重庆 400074

发布日期: 2025年11月06日

摘要

随着国家经济实力的不断提升, 交通领域也得到前所未有得飞速发展, 而其中交通系统仿真是交通运输工程领域的重要技术和方法。通过交通系统仿真建立相关模型, 不仅可以在城市规划中起到提高城市交通利用效率的作用, 还可以对现存的某些交通问题进行优化, 促进交通领域的可持续发展。本文首先阐述了交通系统仿真模型的具体概念, 并且从微观、中观、宏观这三方面具体论述了交通系统仿真模型的发展现状, 以及三类模型的特点, 最后选取每一类交通系统仿真的具体模型进行具体分析。通过对交通系统仿真模型的概述, 可以提高大众对交通系统仿真的认知度, 对城市交通的发展提供帮助。

关键词

交通系统; 仿真模型; 模型分析

Overview of traffic system simulation model

Guanzhou Jiang

School of Traffic & Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China
Email: 2134289254@qq.com

Abstract

With the continuous improvement of national economic strength, the transportation field has also been developed at an unprecedented speed, and the transportation system simulation is an important technology and method in the field of transportation engineering. Establishing relevant models through traffic system simulation can not only improve the efficiency of urban traffic utilization in urban planning, but also optimize some existing traffic problems and promote the sustainable development of the traffic field. This paper first describes the specific concept of the traffic system simulation model, and discusses the development status of the traffic system simulation model from the microscopic traffic simulation model, the mesoscopic traffic simulation model, and the macroscopic traffic simulation model, as well as the characteristics and differences of the three types of models. Finally, it selects examples of each type of simulation model for specific analysis. The overview of the traffic system simulation model can improve the public's awareness of the traffic system simulation and help the specific development of urban traffic.

Keywords

Traffic system; simulation model; model analysis

Copyright © 2025 by author(s) and Erytis Publishing Limited.

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

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



引言

交通系统由信息管理系统和交通运行安全监控系统构成。信息管理系统为所有的运输提供包括计划、控制、跟踪（车辆调度）、检查（监督）、数据交换和共享等服务，实现运输的信息自动化处理。信息管理系统对各种运输提供综合分析和计划，对交通的安全性进行控制和监督，为驾驶员提供一个可以安全驾驶的环境。监控系统用于检查交通流、车辆位置以及道路周围环境状况等服务。运输监控中心主要是提供在整个运输过程中有关车辆行驶状态（包括行驶速度、运行时间和距离等）的信息，以及与驾驶员交流有关的驾驶状态的信息。

交通系统所设计到的元素有人、车、路和环境，该系统的特征较多，其中随机性和复杂性最为明显。国内外学者有针对该系统展开各类研究，而其中最早的研究是建立在交通信号控制的基础上的，其内容包括信号配时，信号控制，效益研究等，交通系统研究方法分为传统方法和现代方法[2]，对比如表 1[3]所示：

表 1. 传统与现代方法研究对比表

对比方法	传统方法	现代方法
建模方法	数理统计、微分方程	计算机技术、智能算法
建模目标	近似数学模型	输出拟合效果
数据获取	实证调查	自动检测
模型评估	理论值与观测值对比	综合效用函数评估

仿真对真实的事物进行模拟，通过变换数据或者环境条件探索该事物在不同条件下的状态，以达到优化的目的。仿真也具有较长的历史，在计算机技术尚不发达的时候，人们通常是利用实物仿真，这种仿真耗时大且结果并不准确，误差较大。随着科技的发展，计算机技术日益提高，现状的仿真则多是通过计算机进行，仿真速度快并且精度较高，成本较低。交通仿真中最重要的步骤即是对事物的仿真建模，因此，本文将对交通系统的仿真模型进行探究，为未来交通系统仿真提供帮助。

1. 交通系统仿真模型

交通仿真是交通运输发展以来不可或缺的一部分，随着计算机技术的兴起，在交通领域中某些复杂的交通现象可以用计算机进行建模分析，不仅可以将该交通现象从时间和空间上进行模拟，还可以通过模型来判断其是否可以优化。

交通仿真研究有两大核心内容，一是模型的建立，二是实验系统的开发。经过半个多世纪的系统化研究产生了许多成熟的交通仿真模型和仿真软件[4]，如表 2 所示：

表 2. 交通仿真模型及软件

模型类型	模型名称	软件名称
宏观仿真模型	LW 模型、Payne-Whitham 模型、Ross 模型、Michalopoulos 模型	TransModeler TRANSYT
中观仿真模型	车头时距分布模型、排队-服务模型、流体动力学模型	INTEGRATION DynaCHINA Cube

微观仿真模型	刺激反应模型、模糊推理模型、基于Agent 模型	Vissim、Aimsun2、Corsim NETSIM
--------	--------------------------	---------------------------------

1.1. 宏观仿真模型

宏观模型是从整体的角度针对事物建立的模型，其具有整体性和平均性。在交通领域中，宏观模型可以用来描述车辆的整体流动特征，而正因为其具有平均性，该模型往往会忽略较多细节，例如车辆驾驶员的某些行为特征，车辆的结构特征等，因此，该模型通常用来研究道路网的交通状态。

宏观模型拥有的特性决定了其只能对交通流进行整体描述，例如交通流的流速、车辆行驶时间和速度等，而不能针对交通现象做出细节性的描述，例如驾驶员的行驶状态、反映时间、车辆在道路上的行驶行为等。在交通领域宏观仿真模型中有一个重要问题，即交通分配理论。

交通分配理论是指交通运输系统中各种车辆在各时间和空间上的行驶状况。而其核心是研究交通量的分配问题，也就是交通系统中各种车辆在某一时刻的运行状况。这一理论主要研究的是交通量与时间和空间之间的关系，为人们合理分配城市交通资源提供理论依据。交通分配理论最早应用于交通规划领域，通过将调查统计或预测得到的出行分布矩阵（包括人、车、路）合理的分配到现有的道路网上，从而可以估算每条道路的交通量，为后续的道路规划提供参考，常用的交通分配方法有四阶段法、连续平均分配法等。

1.2. 中观仿真模型

中观仿真系统介于微观仿真系统与宏观仿真系统之间，多用于仿真规模庞大，数据获取困难的交通现象，以及大中型的路网状况仿真。中观交通仿真的主要功能是研究交通流在各车辆之间的相互作用，具体操作上，考虑整个系统中的车辆之间的相互作用，将整个系统划分为多个车辆流子系统，其中一个车辆流子系统又可以划分为入口、出口、路段和节点。因此不仅可以描述该车队在路段和设置节点地的流入流出行为，对车辆在道路上的变道、超车等行为也可以简单描述[5]。

1.3. 微观仿真模型

微观仿真系统是目前交通运输领域所用最为广泛的仿真系统，在宏观、中观、微观这三种仿真模型中，微观仿真模型对交通系统中某些要素的具体行为描述程度最高。然而正因为其描述程度较高的特点，该模型仿真速度慢并且依赖计算机的配置（运算速度等）[6-7]，因此一般适用于中小型路网。

微观交通系统仿真模型的构成要素有以下几类：

（1）道路条件

道路条件包括道路的几何条件、路面参数、交通信号、交通标志标线等等。道路的条件并非一成不变，其根据具体的仿真要求可以做出适当的变化，提高仿真效果。

（2）车辆特征

车辆的特征可以分为静态和动态两种，其中静态特征主要包括车辆的动力性能、车辆构造、几何特性等等；动态特征则是车辆在道路上的行为，例如行驶位置、车辆速度、车道等等。

（3）驾驶员特征

驾驶员驾驶车辆特征有反应时间、理想车速等。驾驶员的反应时间会受外界环境和自身条件的影响，例如大雨或大雾天反应时间会增加，驾驶员自身疲劳也会影响反应时间。

（4）跟驰行为

车辆在道路上会受前车速度的影响，从而自发调节自身与前车的距离，这种行为称为跟驰行为。若是发现两辆车的间距超过了规定的限值，说明后车的车速在驾驶员的理想车速间浮动，该车处于自由状态中。

2. 各类模型实例

2.1. 宏观仿真模型-Payne-Whitham 模型

宏观交通流理论采用交通流量 $q(x, t)$ -在单位时间内通过单位道路的车辆数，交通密度 $\rho(x, t)$ ，以及交通流平均速度 $u(x, t)$ 来对交通流进行描述，LW 由一个简单的守恒方程构成[8]：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial q_e}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

其中, $q_e = \rho u_e(\rho)$ 表示平衡状态下的交通流量, $u_e(\rho)$ 表示平衡交通的速度-密度关系, 满足 $U'_e(\rho) \leq 0$, 本文将采用 Greenshields 提出的速-密公式[9]:

$$u_e(\rho) = u_f - \frac{u_f}{\rho_{jam}} \rho \quad (2)$$

PW 模型是宏观仿真模型中的一种, PW 型宏观交通流模型在守恒方程(1)的基础上引进了动量方程, 模型的一般形式为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{du}{dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{\tau} (u - u_e(\rho)) - \frac{C^2(\rho)}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} \quad (4)$$

这里, 参数 τ 表示实际平均车速变化到平衡车速所需要的松弛时间, 通常认为是常数; 式(4)中 $C(\rho)$ 取为不同的形式即得到不同的模型, 特别地, 若 $C(\rho) = C_0 < 0$ 为常数, (4)可以写为:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{\tau} (u - u_e(\rho)) - \frac{C_0}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} \quad (5)$$

其中, 当 $C_0 = -\sqrt{-\frac{1}{2\tau}} u'_e$ 时, 即为 Payne 模型[10], 而当 $C_0 = -\sqrt{v}$, $v > 0$ 为任一常数时, 为 Whitham 模型[11]。

该模型加入了动量方程, 可以更好的描述非平衡交通状态, 特别是交通拥堵时的交通状态。

2.2. 中观仿真模型-改进 LWR 模型

在交通仿真模型的研究中, 我国对于微观仿真模型的研究已经较为深入, 而关于宏观交通仿真模型的研究尚在起步中, 马健, 张丽岩[12]等提出了一种在宏观模型 LWR 基础上做出改进的中观仿真模型。传统的 LWR 模型[13-14]是在流体运动学理论的基础上构建的模型, 多用于描述交通系统在时间空间上的变化规律, 该模型的表达式可写为:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = g(x, t) \quad (6)$$

$$q = k \cdot u \quad (7)$$

$$u = u_e(k) \quad (8)$$

k 为交通密度; q 为交通流量; x 和 t 分别为空间和时间; $g(x, t)$ 为所研究的路段中有车辆出入时的出入流量; u 为车流平均速度; $u_e(k)$ 为平衡状态下 u 与 k 之间的关系。

针对该模型的改进则是运用加权余量法的思想, 构建积分方程式得到改进后的 LWR 模型如下:

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{\Delta v} \frac{\partial k}{\partial t} dv dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_{\Delta v} \frac{\partial q}{\partial x} dv dt = \int_t^{t+\Delta t} \int_{\Delta v} g(x, t) dv dt$$

(9)

改进后 LWR 模型相对于改进前的模型在交通仿真中, 可以保持高效的积分守恒性, 且由于其属于积分形式, 相对于微分形式传统模型, 它允许出现间断, 整体灵活且通用性强。

2.3. 微观仿真模型-跟驰模型

微观仿真模型在我国研究较深入, 相关的模型也较多, 本文选择研究种类较多的跟驰模型作进一步研究。当驾驶员发现某一车辆有明显的跟随行为时, 就表示驾驶员注意力保持集中。跟驰模型可以较好的描述人的行为, 从而以较高的程度来模拟交通现状, 针对某些特定的交通现象, 研究跟驰模型可以帮助解决大多数困难。

2.3.1. 基于安全距离的车辆跟驰模型

该模型也可以称为防撞模型 (CA) 模型[15], 主要用于在道路上两辆车之间的安全距离的研究, 若前车发生事故, 而后车与前车的距离小于给定的安全距离时, 就有可能对后车造成影响, 例如碰撞等, 该模型的表达式为:

$$\Delta x(t-T) = \alpha V_{n-1}^2(t-T) + \beta_1 V_n^2(t) + \beta v_n(t) + b_0 \quad (10)$$

该模型有以下特点: 一是该模型是建立在离散仿真时钟步长的基础上, 在实际仿真中, 车辆状态是按照顺序来更新的, 例如更新前车的状态时, 后车默认保持静止; 更新后车状态时, 前车保持静止[16]。二是该模型实际运用较为困难, 车辆大多不是按照顺序来运行的。三是该模型没有考虑驾驶员的状态以及“感知阈值”这一参数[17]。

2.3.2. 基于生理-心理的车辆跟驰模型

上文所简述的安全距离跟驰模型并未考虑到驾驶员的行为特征, 而生理-心理车辆跟驰模型则是以驾驶员的感知为研究对象, Michaels 学者在前人的研究基础上, 提出了生理-心理模型, 简称 AP 模型, 表达式如下:

$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{w \cdot \Delta v}{R^2} \quad (11)$$

其中, w 为观察目标的宽度; R 为观察者与目标之间的距离; θ 为视角。模型特点为: 一是, 在驾驶员所感知得相对速度与车辆行驶过程的实际速度之前存在一种线性关系, 但是该模型却忽略了这层关系; 二是该模型在实际操作的参数认定上存在困难。

3. 总结

本文通过对交通系统的仿真模型进行分类, 从宏观、中观和微观这三方面对交通系统仿真模型进行阐述。在对这三种模型的探索中发现, 对于交通仿真模型来说, 参数的设定非常重要, 若是参数设定不

合理或是未考虑到某个影响因素，都对最后的仿真效果有较大的影响。

交通系统是交通行业发展中不可忽视的部分，而对道路交通状况、交通流进行仿真又是优化交通系统的重要方式之一，本文对该内容进行了梳理，希望可以对未来交通系统的发展提供帮助。

参考文献

- [1] 陆化普,张永波,刘庆楠. 城市步行交通系统规划方法[J]. 城市交通, 2009, 7(6): 53-58.
- [2] Emmanuel Lopez-Nera, et al. A modeling framework for urban traffic systems microscopic simulation [J]. Simulation Modelling Practice and Theory.18 (2010)1145-1161.
- [3] 程子龙,邱晓刚.交通系统建模研究综述[C]//第三十一届中国控制会议论文集 D 卷.[出版者不详],2012:1516-1522.
- [4] 何碧玉. 城市交通系统仿真模型概述[J]. 现代商贸工业,2013, 25(06): 157-158.
- [5] 温培培,苏子毅,翟润平.中观交通仿真研究综述[J]. 湖北警官学院学报,2009, 22(03): 84-86.
- [6] 裴玉龙, 张亚平.道路交通系统仿真[J].北京:人民交通出版社,2004.
- [7] 刘运通, 石建军, 熊辉.交通系统仿真技术[J].北京:人民交通出版社,2002.
- [8] Light hill M J and Whitham G B. On kinematic waves II: A theory of traffic flow on long crowded roads[J]. 1955, A229: 317-345.
- [9] 王炜, 过秀成等. 交通工程学[J]. 南京: 东南大学出版社, 2000.
- [10] Payne H J. Models of freeway traffic and control[J]. Simulation Councils Proc, Series: Mathematical Model of Public Systems, 1971, 1(1), ed. George A. Bekey.
- [11] Whitham G B. 线性与非线性波[J]. 北京:科学出版社, 1986, 65-77.
- [12] 马健, 张丽岩, 李克平等. 一个新的基于 LWR 模型的中观交通流运动学模型[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2013, 37(04): 707-712.
- [13] LIGHTHILL M J, WHITHAM J B. On kinematic waves. I: flow movement in long rivers; II: a theory of traffic flow on long crowded roads[C]// Proceed-ings of Royal Society, Series A, 1995, 229:281-345.
- [14] RICHARDS P I. Shockwaves on the highway[J]. Operations Research(0030-364X), 1956, 4:42-51.
- [15] 张洪宾, 高兴超. 交通仿真车辆跟驰模型研究[J]. 山东交通科技, 2007, (04):12-15.
- [16] G. F. Newell. A simp lifted car flowing theory a lower order model Transportation Research B[J]. 2000,36 (2002):195—205.
- [17] 王晓原, 隗志才, 贾洪飞等. 基于安全间距的车辆跟驰模型研究综述[J].长安大学学报(自然科学版), 2004,24(6).