

文章编号: 1005-0523(2019)04-0081-07

二流理论的解析与城市路网动态评价方法

吴 中¹, 吕文轩¹, 叶奕辰²

(1. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210024; 2. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510641)

摘要:为了能够动态、实时地评价城市路网的运行状况,在经典二流理论的基础上,通过引入交通流理论和生长模型的方法,对二流理论服务质量参数 n 进行了推导和解析,发现由于没有考虑网络车速分布的影响, n 的取值存在不唯一性,不能很好地评价城市路网的运行状况。进而根据二流理论的基础假定,结合动态 **OD** 矩阵,提出了以停车时间比例 f_s 为指标的新的实时动态评价方法。结合仿真发现,该方法能够避免二流理论用 n 参数评价路网的不足,更好地对路网的实时运行状况进行评价,评价指标 f_s 越小表示路网运行状况越好。最后以南京市主干路网为例验证了所提方法的有效性。

关键词:二流理论;城市路网;动态评价

中图分类号: U491

文献标志码: A

城市路网构成城市的骨架,其运行状况关系到整个城市的发展,如何合理的对当今城市交通便捷化发展下的城市路网运行的优劣进行评价,是交通工程急需解决的课题。科学的分析和选取能够反映网络运行顺畅度的动态评价指标,提出合理的交通网络评价方法,对于城市建设有着至关重要的作用。

关于城市路网运行状况的评价,国内外学者的研究主要集中于以下几方面:拥堵程度评价^[1],运行效率评价^[2],实测数据评价^[3]和二流理论评价。其中,二流理论由国外学者 Herman 和 Prigogine^[4]提出后,得到了不断的完善和发展,并被广泛应用于路网的动态评价,采用服务质量参数 n 作为评价指标。Herman 和 Ardekani 利用高空和地面数据验证了二流模型中的假设关系^[5]。Williams 利用测试车结合仿真方法标定出了二流模型参数^[6]。Dixit 分析了受道路线形、事故率、信号灯密度等因素影响的个人驾驶行为对模型参数的影响^[7]。国内学者张脩将二流理论应用于城市干道交通特性及其评价方法研究^[8]。姚荣涵基于二流理论,用流量守恒方程建立了拥挤车流当量排队长度的模型^[9]。王殿海提出了将二流模型与最佳路网容量结合起来判断网络宏观交通状态的方法^[10],并得到了广泛应用^[11-12]。张振宇对新技术条件下二流理论的未来发展和应用进行了展望^[13]。管政霖成功将二流理论应用于评价集装箱码头集疏运路网的布置^[14]。虽然二流理论的应用取得了一定成果,但在研究和发展过程中,对服务质量参数 n 的物理意义和变化规律并未做详细的阐释,因此有必要对该问题展开研究,以便得出更加合理完善的路网评价方法。

本文在充分研究经典二流理论的基础上,对服务质量参数 n 做了进一步的数学推导和讨论,探究其与路网停车时间比例以及平均车流密度的关系,发现参数 n 单一指标并不能很好地评价路网的运行状况。而以往的路网评价研究中又缺乏能够结合动态 **OD** 矩阵进行实时评价的方法。针对这些不足,提出了以停车时间比例为新的指标,结合动态 **OD** 矩阵的评价方法,该方法能够实时动态的评价路网的运行状况,为交通管理提供更直观的决策依据。

收稿日期: 2019-04-03

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(2018B114314)

作者简介: 吴中(1964—),男,教授,博士,研究方向为交通运输规划与管理。

1 经典的二流理论

二流理论认为道路网络交通流中只有两类车辆,一类是运动的车辆,一类是停止的车辆。运动车辆是指某时间段内在路网中行驶的车辆,停止车辆是指在路网中暂时完全停顿下来的车辆,包括因交通信号、标志、拥堵、临时上下客停止车辆等,但不包括停车场车辆。定义所有停止车辆的时间和占路网全部车辆的总行程时间和的比例为 f_s ,如果总行驶时间比例为 f_r ,显然有 $f_r+f_s=1$ 。

二流理论假定:

- 1) 车辆在路网中的平均行驶速度与运行车辆所占的比重成比例;
- 2) 路网中循环试验车辆(即交通观测车)的停车时间比例与路网中同期运行车辆的停车时间比例相等。

根据假定,道路网络中所有车辆的平均行驶速度 u_r 和行驶车辆占路网全部车辆比重 f_r 的关系为

$$u_r = u_m f_r^n \quad (1)$$

式中: u_m 为最大平均行驶速度, n 为服务质量参数。

定义道路网络中平均行程速度 $u_t = u_r f_r$,则式(1)可写成

$$u_t = u_m (1 - f_s)^{n+1} \quad (2)$$

(2)式满足自然边界条件, $f_s=0$ 时, $u_t = u_m$; $f_s=1$ 时, $u_t = 0$ 。若 T_s, T, T_m 分别为单位距离平均停止时间、平均行驶时间、平均行程时间、平均最短行程时间,则有停车比例 $f_s = T_s/T$,单位距离平均行程时间可表示如下

$$T = T_m (1 - f_s)^{-(n+1)} \quad (3)$$

综合上述各式可得二流模型各类时间与参数 n 的关系表达式^[1]

$$\ln T_r = \frac{1}{n+1} \ln T_m + \frac{n}{n+1} \ln T \quad (4)$$

经典的二流理论认为,城市路网的交通状态可用参数 (T_m, n) 来表示,其评价应用需根据路网中观测车辆所测得的平均行驶时间 T_r 和平均行程时间 T 来推算路网的 (T_m, n) 值。其中 n 值作为路网服务质量参数,能够表达路网在整个研究时段内的平均运行水平, n 越大则表示路网变坏的程度越快^[15]。但经典二流理论并未描述参数 n 的物理意义,也没有给出严格的数学表达,其变化规律及评价原理不够清晰。故本文对参数 n 做进一步讨论和研究。

2 服务质量参数 n 的讨论

2.1 参数 n 的表达式推导

根据式(4),可得 n 的表达式如下

$$n = \frac{\ln \frac{T_m}{T_r}}{\ln \frac{T_r}{T}} \quad (5)$$

由单位路程上的平均时间 $T = 1/u_t$, $T_m = 1/u_m$, $f_r = T_r/T$,代入式(5)可得

$$n = \frac{\ln \frac{u_r}{u_m}}{\ln(1 - f_s)} \quad (6)$$

不同车流密度下的路网车辆平均行驶速度会有所不同,现引入系数 α 表达路网中平

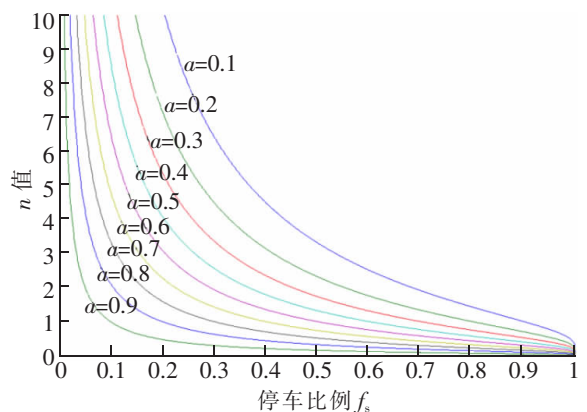


图1 二流理论 f_s-n 关系图

Fig.1 The relationship between f_s and n in two-fluid model

均行驶速度与最大行驶速度的关系(反映了网络车辆速度的快慢分布),路网中行驶车辆的平均行驶速度为

$$u_r = \alpha u_m, \alpha \in (0, 1) \tag{7}$$

结合式(1)、式(7)有

$$\alpha = f_r^n = (1 - f_s)^n \tag{8}$$

$$n = \frac{\ln \alpha}{\ln(1 - f_s)} \tag{9}$$

基于二流理论假设的式(9)为恒等式,无法推导出参数 n 的表达式。式(8)有明确的物理意义,反映行驶车辆速度分布的参数 α 由停车时间比例 f_s 和参数 n 决定。 α 越小则说明路网中低速车辆所占行驶总车辆的比重越大,运动车流在速度分布上较宽; α 越大则说明路网的行驶车辆平均车速越接近最快速度值,运动车流速度分布值较窄。根据式(8),得到 f_s 与 n 的关系图如图 1,从图中可以发现:

1) n 值与 f_s 的关系不是一一对应的单值关系, n 值的大小还受到行驶车速分布 α 的影响, n 值单个指标可能难以准确表达网络交通运行状况;

2) 在 α 值不变时,同一交通网络 n 值越大则 f_s 越小;在 f_s 值不变时,同一交通网络 n 值越大则 α 越小,一般认为,网络中停驶车辆比例 f_s 越小、行驶车速平均值越高,网络交通运行情况越好、服务水平越高。

2.2 n 与路网平均车流密度的关系

车辆在网络中运行,其相对密度与因拥堵而造成的停车时间比例的关系与生物种群扩展的生长规律类似,可采用经典的生长曲线函数来描述。车辆在网络中运行,其相对密度与因拥堵而造成的停车时间比例 f_s 的关系与生物增长曲线类似。当车辆密度小时发生拥堵的机会不多,车辆密度增长只会使停车时间比例缓慢增加;车辆密度达到一定的阈值后,发生拥堵的机率增加、停车时间比例会因拥堵增加而快速增加。如果车辆密度接近最大阻塞密度时,因停车时间比例已经较高,车辆密度增长也只能缓慢增加停车时间比例。

假定路网最大阻塞密度为 k_j , $\frac{k}{k_j}$ 为路网平均相对密度,则 f_s 与 $\frac{k}{k_j}$ 的关系可由图 2 表达。由于城市道路网中存在因信号灯引起的固定延误,即使在低密度情况下, f_s 也不为零。举例说明,取 $\frac{k}{k_j} = 0$ 时 f_s 为 0.08(固定延误引起的停车),有 f_s 生长模型表达式

$$f_s = \frac{1}{1 + e^{-12(\frac{k}{k_j} - 0.8)}} + 0.08 \tag{10}$$

实际应用中,各路网的固定延误、路段长度、道路等级组成和拓扑结构不同,式(10)需要实测标定。不失

规律性和一般性, f_s 与 $\frac{k}{k_j}$ 的关系图如图 2 所示。经

典的二流理论对 f_s 与 $\frac{k}{k_j}$ 的关系未作规定。

可以看到,当 $\frac{k}{k_j} > 0.3$ 时, f_s 随着 $\frac{k}{k_j}$ 的增大而增大,增长速率先缓中快后再缓,符合生长曲线的“S”形特征。图 2 案例在 $\frac{k}{k_j} = 0.77$ 处, f_s 的增长速率达到最大。

将式(10)代入式(9),可得 $\frac{k}{k_j}$ 与 n 的关系式

如式(11)所示, $\frac{k}{k_j}$ 与 n 的关系图如图 3 所示。

$$n = \frac{\ln \alpha}{\ln(0.92 - \frac{1}{1 + e^{-12(\frac{k}{k_j} - 0.8)}})} \tag{11}$$

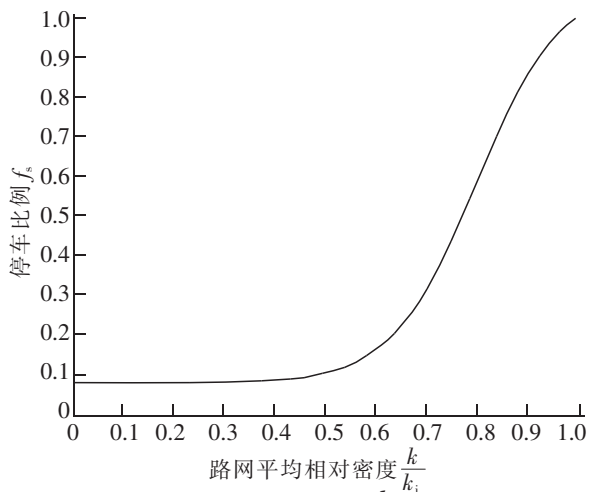


图 2 交通网络相对密度 $\frac{k}{k_j}$ - f_s 关系图

Fig.2 The relationship between $\frac{k}{k_j}$ and f_s

与道路交通流理论相似, $\frac{k}{k_j}$ 是描述网络运行状况的另一重要指标。引入交通网络相对密度 $\frac{k}{k_j}$ 与停车时间比 f_s 的关系后, 从图 3 中可以发现:

1) 对一个交通网络而言, 当行驶车速值较低时, n 值较大; 当 $\frac{k}{k_j}$ 较小时, n 值较大。这与图 1 规律一致;

2) 如果 α 值不变, 当 $\frac{k}{k_j}$ 较小时, n 值变化很小, 它表达了路网中车辆密度在低密度范围内时, 网络中车辆运行的状态变化不大。 $\frac{k}{k_j}$ 由 0 变化至 1, n 值的变化规律类似反向的“S”生长曲线, 与道路基本段交通流速度与密度 $V-k$ 曲线近似。 $\frac{k}{k_j}$ 较小时因 α 值不同, n 值相差较大; 当 $\frac{k}{k_j}$ 较大时, 不同 α 值下的 n 值向 0 聚集, n 值的大小相差逐步减小。

初步分析表明, 二流理论在判定网络运行状态时, 没有考虑平均行驶车速大小对 n 取值的影响, n 值的变化规律和取值的不唯一性不能很好地表达或评价城市道路网络交通运行的状况。

3 路网的评价

3.1 评价指标

二流理论中的停驶车辆总时数与总车辆行程总时数的比值, 对衡量网络运行水平具有普遍意义。停驶车辆越少、停驶时间越短, 网络的运行效率就越高, 网络的运行水平也就越高。用 f_s 衡量网络的运行水平与其他交通设施服务水平评价思想一致。

为进行城市道路网的动态评估, 定义瞬时的停车比例

$$f_s = \frac{P_s}{P} \quad (12)$$

式中: P_s 是某瞬时或短时段路网内所有停驶车当量总数, pcu; P 是某瞬时或短时段路网内所有车当量总数, pcu。

定义时段平均的停车比例

$$\bar{f}_s = \frac{\sum_{i=1}^n (T_{s_i} \cdot E_i)}{\sum_{i=1}^n (T_i \cdot E_i)} \quad (13)$$

式中: T_{s_i} 为某时段内 i 车辆的停驶时间, s; T_i 为某时段内 i 车辆的行程时间, s; E_i 是 i 型车辆的当量标准车数, pcu。

f_s 或 \bar{f}_s 表达了路网中瞬时或平均的停车总时数与其对应的行程总时数的比例关系, 它具有明确的物理意义。相比于经典二流理论中的 (T_m, n) , f_s 或 \bar{f}_s 没有多值性, 也不涉及具体的网络或道路的等级指标, 具有普遍意义, 可以作为衡量网络运行水平的参数。

作为一个客观的评判指标, f_s 包含了道路网中多重因素对交通流的影响, 影响停车时间比例的不仅有路网本身建设水平, 还包括交通控制、路网拓扑结构和负载的均衡性。多种因素的综合影响与作用反映在 f_s 指标上。

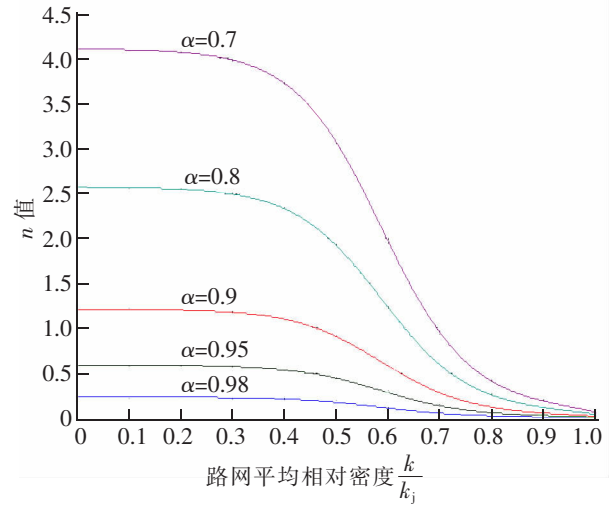


图 3 交通网络相对密度 $\frac{k}{k_j}$ - n 关系图

Fig.3 The relationship between $\frac{k}{k_j}$ and n

3.2 结合仿真的评价方法

由于城市道路网络规模大、结构复杂,准确评价网络交通运行状态难度较大。经典的二流理论评价方法需要使用观测车收集部分路段数据,评价成本很高,观测评价结论也比较粗糙。

利用交通仿真软件建立评价道路交通网络的模型,可以详尽的表达出网络的物理特性和交通控制措施。在 OD 矩阵的流量加载下,可以得到整个网络在交通负载下各条路段的交通参数,也可以获得整个网络瞬时 f_s 和某时段的平均 \bar{f}_s 。由于仿真实用户最优的 UE 或随机用户最优 SUE 原则进行路径分配,从仿真模型上得到的交通数据应该是在给定 OD 矩阵下的最优交通分配的交通流数据,具有唯一性,由此评价的结论也具有输入 OD 的针对性。

4 评价应用

4.1 评价模型检验

利用 VISSIM 软件对两种微小区别的放射型局部路网进行评价,具体形式见图 4。给两个路网加载相同的 OD ,并不断提高加载强度(OD 中分配比例不变,流量加倍),利用仿真数据可以得到两路网的 f_s 和 n 随加载强度变化的值(图 5)。

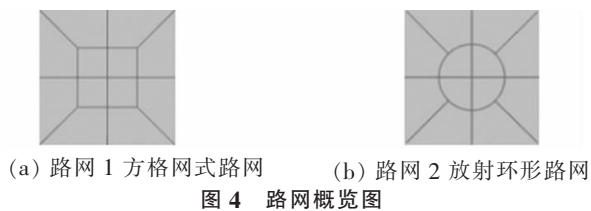


图 4 路网概览图

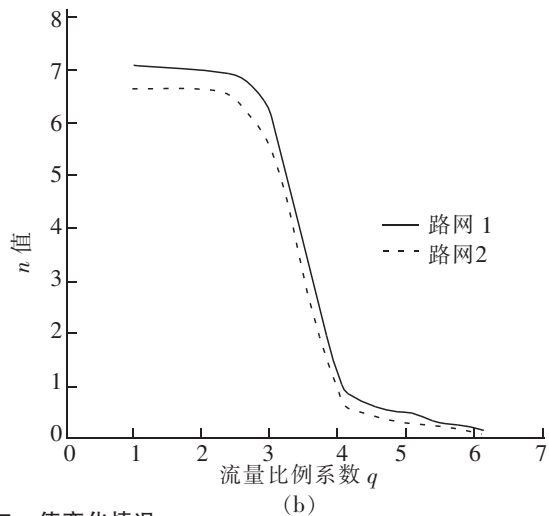
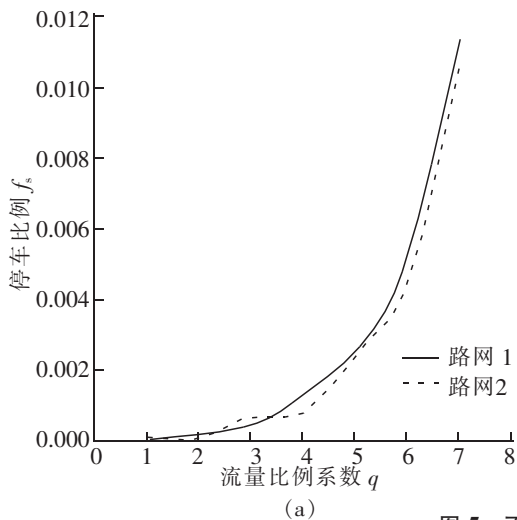


图 5 不同强度加载的 f_s 与 n 值变化情况

Fig.5 Variation of f_s and n under different strength loading

图 5 可以看出,随着网络加载强度的增加,停车时间比例也在不断增加,呈现指数上升的规律。同样,交通强度上升,导致以二流理论为基础的 n 值下降, f_s 与 n 的变化规律与图 1、图 3 所揭示的规律相同(两路网相对密度接近)。从图 5 中还可以看出路网 2 的停车时间比例 f_s 要略小于路网 1, n 值也略小于路网 1,这与路网 2 的空间容量稍大有关。因此,可以说在给定 OD 下,路网 2 的运行状态会略优于路网 1。图 5 同时也表达可以采用 f_s 替代 n 参数评价网络的优劣和运行状态。

4.2 工程实例

南京市进入新世纪以来,实施跨江发展的战略,现有过江通道 6 条,但仍然无法满足快速增长的过江交通需求,过江通道成为南京主干交通网中的瓶颈。现计划和和燕路与浦仪路新增两条东西向与南北向的过江通道。为评价新建通道的功效,结合预测的南京市 2023 年全天各小时 OD ,利用路网动态加载的交通仿真和新的二流理论评价方法分别对原有 6 条过江通道和新增和燕路与浦仪路过江通道后的南京市主干道路网进行动态评价(所选取的路网范围包含南京市绕城、绕越公路、内环线以及东西、南北走向的主干道路,基本包括了整个南京市干线网的主要道路)。仿真获得的 \bar{f}_s 曲线如图 6 所示。

从图6中可以看出,扩建后南京主干路网运行状态比原网络有较大改善。从0时至早晨8时,由于网络内车辆较少,计划新建的和燕路、浦仪路过江通道对提高网络服务质量贡献不大。但从早高峰9时开始至晚23时,和燕路、浦仪路过江通道分担了原有7条过江通道的交通量,优化了扬州方向、合肥方向和北方交通的选择路径,使这三个方向途径南京的车流不必进入南京市内与市内车辆争抢其他过江通道,从而也极大缓解了和燕路与江北大道主干线的拥堵,提升了整个南京干线网的运行水平。通道的建设使南京干线网9时至23时的平均停车时间比例降低了17.1%,全天平均停车时间比例降低了14.4%。图6的曲线较好地表达了路网在不同时段的停车时间比例,也表达了路网运行水平。

实例仿真结果表明,新的二流理论评价方法能够根据 OD 矩阵的动态平衡分配来反映网络对于交通量变化的时变性特征和响应水平。所得到的网络全天的运行状况曲线(图6),不仅能够直观、定量的表现出路网在优化前后其运行的改善情况以及优化数值,还能找出路网运行不畅的时间段,为交通管理者采取有针对性的管控措施提供更加丰富的参考信息,为交通网络规划提供新的依据。

5 结语

通过引入交通流理论及生长模型对二流理论 n 参数的解析发现,传统的二流理论 n 参数与路网中行驶车辆的平均行驶速度有关, n 参数既没有单值性、物理意义也不够明确。用于对路网优劣的评价还不够完善。

两个路网交通流的相对密度相同时, n 值越大表明路网中行驶车辆的平均速度越低,路网所提供的服务与效能就越低(由拓扑结构、交通控制、道路等级等因素决定);当路网行驶车辆平均速度与最大速度的关系相同(α 值相等)时, n 值越大表明路网中车辆的负载越低、网络服务水平较高。

由于路网中车辆行驶速度不单一、分布复杂,参数 n 单一指标很难对路网运行状况进行合理的评价。通过图5、图6实例分析,将网络中的停车时间比例 f_s 作为评价指标完全可以替代参数 n 。 f_s 不仅具有明确的物理含义,对应网络的运行状况也具有单值性。与 OD 矩阵相结合的评价方法可以进行网络实时状况的评价也可以进行平均时段的评价。网络评价引入 OD 矩阵,使得评价结果依赖于网络交通量的输入,使评价更加准确、客观、全面。 f_s 越小表示路网运行状况越好。

利用 f_s 进行网络运行状况评价仍然是基于二流理论的假设,没有考虑行驶车辆速度的分布。实际的路网中平均车速的大小也是考察路网能力的一个标准,考虑速度的路网评价方法还有待深入研究。

参考文献:

- [1] 冶志良,李浩. 基于速度感知差异性的交通拥堵评价分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2016,40(6):1088-1093.
- [2] HE Y, QIN J, HONG J. Comparative analysis of quantitative efficiency evaluation methods for transportation networks[J]. Plos One, 2017, 12(4): e0175526.
- [3] 曲腾姣. 多源数据融合的城市道路交通状态实时判别方法研究[D]. 青岛:青岛理工大学,2016.

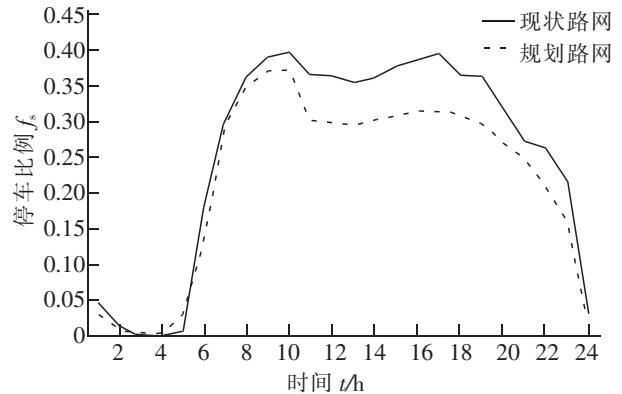


图6 过江通道扩建前后干线路网全天 f_s 曲线图
Fig.6 Full-day f_s curve of main road network before and after the expansion of river-crossing passage

- [4] HERMAN R, PRIGOGINE I. A two-fluid approach to town traffic[J]. Science (New York, N.Y.), 1979, 204(4389): 148-151.
- [5] ARDEKANI S, HERMAN R. Urban network-wide traffic variables and their relations[J]. Transportation Science, 1987, 21(1): 1-16.
- [6] WILLIAMS J C, MAHMASSANI H S, HERMAN R. Sampling strategies for two-fluid model parameter estimation in urban networks[J]. Transportation Research Part A Policy & Practice, 1995, 29(3): 229-244.
- [7] DIXIT, VINAYAK V. Behavioural foundations of two-fluid model for urban traffic[J]. Transportation Research Part C, 2013, 35(9): 115-126.
- [8] 张翥, 杜豫川, 董茂强, 等. 基于二流理论的城市干道交通特性及其评价方法研究[J]. 交通信息与安全, 2005, 23(2): 4-7.
- [9] 姚荣涵, 王殿海, 曲昭伟. 基于二流理论的拥挤交通流当量排队长度模型[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2007, 37(3): 521-526.
- [10] 王殿海, 陈松, 魏强, 等. 基于二流理论的路网宏观交通状态判断模型[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2011, 41(5): 1098-1103.
- [11] 杨育捷, 张幸幸, 李思嘉. 交通事故影响下路段排队长度模型[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2015, 36(4): 37-41.
- [12] 黄智. 基于二流理论对占用车道引发交通拥堵的研究[J]. 科技广场, 2017(4).
- [13] 张振宇. 新技术条件下二流理论模型发展的展望[J]. 交通节能与环保, 2016, 12(2): 27-29.
- [14] 管政霖, 周强, 梁孝诚, 等. 基于二流理论的自动化集装箱码头集疏运路网布置评价方法研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2018, 42(5): 137-141.
- [15] 王殿海. 交通流理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.

Analysis of Two-Fluid Theory and Dynamic Evaluation Method of Urban Traffic Network

Wu Zhong¹, Lv Wenxuan¹, Ye Yichen²

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China;

2. College of Civil and Transportation Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: In order to evaluate the operation status of urban traffic network dynamically, based on the two-fluid theory, the two-fluid service level parameter n is deduced and analyzed by introducing traffic flow theory and logistic growth model. It is found that the value of n is not unique because the influence of network speed distribution is not taken into account, so the operation status of the network could not be evaluated well and accurately. Based on the basic assumption of the two-fluid theory and the dynamic OD matrix, a new real-time dynamic evaluation method is proposed, which takes the parking time ratio f_s as the index. The simulation results show that this method can avoid the shortcomings of the two-fluid theory in evaluating the road network with parameter n , and better evaluate the real-time operation status of the road network. The operation status of the network is better as the ratio f_s decreases. The validity of the evaluation method is verified by an example of Nanjing road network of trunk line.

Key words: two-fluid theory; urban traffic network; dynamic evaluation