

基于时空消耗法及运行效率的路网容量

邵长桥¹, 庞佳骏¹, 吕 颀², 李晓明²

(1. 北京工业大学城市交通学院, 北京 100124; 2. 万达文化旅游规划研究院有限公司, 北京 100022)

摘要: 时空消耗法是计算路网容量的重要模型,为了提高传统时空消耗法计算路网容量的准确性,克服其计算过程中忽略道路等级,未考虑车辆在不同等级道路上运行差异性的问题,提出基于道路分级的时空消耗改进模型. 车头间距为模型中的关键参数之一,是得到合理路网容量的基础,为此,针对车头间距标定的方法进行了研究;将运行效率理论作为参数标定的基础,并结合 Van Aerde(VA)交通流模型得到车头间距与运行效率之间函数关系. 针对北京地区,基于上述理论计算得到快速路、主干路以及次干路运行效率达到最大时对应的车头间距分别为 27.92、25.56、21.88 m. 最后,以新规划的北京城市副中心——通州区的核心区域(155 km²)内的路网作为模型的应用案例,根据交通调查等方法得到的数据及信息,应用改进后的模型计算得到该区域内主干路、次干路的路网容量为 56~60 万辆次/d.

关键词: 路网容量; 时空消耗法; 道路等级; 运行效率; 车头间距; Van Aerde(VA)模型

中图分类号: U 491.1⁺3

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2019)09-0895-09

doi: 10.11936/bjgtxb2018060016

Road Network Capacity Based on the Time-Space Consumption and the Traffic Operation Efficiency Theory

SHAO Changqiao¹, PANG Jiajun¹, LÜ Kun², LI Xiaoming²

(1. College of Metropolitan Transportation, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Wanda Cultural Tourism Plannings Research Institute, Beijing 100022, China)

Abstract: Time-space consumption method is one of the most essential methods for calculating the capacity. To promote the accuracy of the calculation result and cope with the defect of traditional method that neglects vehicles' operating heterogeneities on different levels of the road, a graded time-space consumption method was proposed. The space headway is a key parameter that is the basis for obtaining reasonable results so that the calibration method for space headway is proposed incorporated with the efficiency theory. The functional relationship between efficiency and space headway was obtained associated with Van Aerde traffic flow model. For road network in Beijing, based on the proposed model, the space headways of vehicles operating on express ways, arterials and sub-arterials were obtained and they are 27.92, 25.56, and 21.88 m, respectively. Finally, taking the new planned Beijing sub hub, core area of Tong Zhou district (155 km²) as case study, the total road network capacity of arterial and sub-arterial was calculated by using the modified time-space consumption method and the result is 0.56 – 0.60 million pcu times per day according to the data from investigation.

Key words: road network capacity; time-space consumption method; road levels; traffic operating efficiency; space headway; Van Aerde (VA) traffic model

收稿日期: 2018-06-14

基金项目: 国家“973”计划资助项目(2012CB723303)

作者简介: 邵长桥(1972—),男,副教授,主要从事交通流理论、道路通行能力、交通数据分析方面的研究, E-mail: shaocq@bjut.edu.com

路网容量是指在特定的条件下,单位时间内路网能够容纳的最大车辆数.路网容量反映了城市路网的承载能力,对交通规划和机动车管理具有重要意义.常用的路网容量的计算方法有时空消耗法、线性规划法、割集法、交通分配模拟法以及狭义路网容量模型等^[1].其中,时空消耗法物理意义明确,具有原理简单、便于理解的特点,被研究人员广泛运用.

目前,时空消耗法的运用仍然存在一定问题,致使其计算结果的可靠性和准确性不足.本文分析传统计算方法的不足之处,建立了分级的时空消耗法计算模型,并基于运行效率理论对模型中的关键参数进行标定.改进后的时空消耗法计算模型可以得到路网运行效率最大时的路网容量,且提高了计算结果的可靠性.

1 研究现状

时空消耗法最初是由法国工程师路易·马尚提出的,他认为空间和时间是约束城市路网容量的重要因素,因此将路网容量可以看作一个空间和时间的容器,定义简单、直观且具有明确的物理意义,被大量学者广泛采用.在该理念的基础上,许多研究人员考虑到不同的影响因素并建立了时空消耗法的改进模型. Yang 等^[2]考虑了土地的利用以及城市路网的布局问题,对该模型进行了改进; Asakura 等^[3]考虑到了停车对路网容量带来的影响,从而改进了原有的计算模型; Chen 等^[4]提出的改进模型充分考虑了路网的结构.此外,一些研究还分别根据不同的网运行状态、应用场景、用途等对模型加以改进,使得时空消耗法计算模型更加成熟^[5-9].然而,此前的研究仍然存在一定缺陷.

车头间距是时空消耗法的重要参数之一,对模型的计算精度有重要影响.由于缺乏理论支撑,在实际应用中该参数往往依靠经验取值,致使计算结果可靠性和实用性不足.例如:刘拥华等^[5]在计算昆明路网容量时,采用临界车头间距作为单车消耗的计算标准;田润良等^[6]采用时空消耗法解决军事交通流分配问题时,同样以临界车头间距作为计算参数.临界车头间距是指当道路交通流处于临界状态运行时,车流所保持平均车头间距. Eleferiadou 等^[10]指出,路网在实际运行过程中交通流率达到临界状态的持续时间短,交通中断的概率高达 70%,具有不稳定性.

另有一些研究,例如初彦龙^[7]、单文胜^[8]等则采用最小车头间距作为计算车辆消耗时空资源的计算基准.最小车头间距是车辆在行驶过程中与前车保持的最小安全车头间距,其与车辆运行速度有关,在实际应用中难以确定其具体的取值.

李淑庆^[9]在计算路网容量时根据服务水平确定车流密度,而不同等级服务水平对应的车流密度不同,得到路网容量计算结果不唯一且无法求得最优解.

陈春妹等^[11]在研究时空消耗法计算模型的过程中指出了车头间距的重要性,并对该参数进行了进一步研究,定义临界车头间距为车辆平均时空消耗最小时对应的车头间距,结合经典的车辆跟驰模型建立了车头间距的计算模型.在采取数据标定模型时,该研究选取了二环路、长安街、平安大街等道路,数据选取范围涵盖了快速路与主干路,得到北京市路网临界速度为 24.95 km/h,对应的临界车头间距为 13.4 m.然而,对于自由流速度为 80 km/h 的二环路而言,该临界状态的速度对应服务水平相比主干路而言更低,交通运行状态差,鉴于此,该指标适用性不足.此外,已有的文献^[5-9],在计算路网总的时空资源时均没有考虑车辆在不同等级道路运行的异质性,忽略了车道宽度、限速、交通控制等因素的影响.

综上,目前的研究在运用时空消耗法计算路网容量时的不足之处主要体现在:1)忽略了不同等级道路车辆运行的异质性;2)车头间距的取值过度理想化,从而导致了计算结果可靠性的降低.针对以上不足,本文依据道路等级提出了分级的时空消耗模型;综合考虑路网运行稳定性、运行速度以及流量等因素,引入交通效率理论,提出了时空消耗模型中关键参数——车头间距的标定方法,为车头间距的选择提供了理论支撑.

2 分级时空消耗模型的提出

本章节首先阐述了传统的时空消耗法计算模型的模型框架,并针对传统方法的局限性,提出了分级时空消耗法的计算模型.

2.1 传统时空消耗模型

杨涛等^[12]在时空消耗概念基础上,提出了城市道路总体容量的广义概念,将城市道路设施的总容量定义为

$$C = AT \quad (1)$$

式中: C 为道路设施所提供的时空容量, $\text{m}^2 \cdot \text{h}$; A 为城市道路设施有效面积, m^2 ; T 为有效运行时间, h .

为了更加直观,将容量转化为车辆数,因此路网容量被定义为

$$N = \frac{C}{C_v} = \frac{AT}{C_v} \quad (2)$$

式中: N 为路网容量,辆次/d; C_v 为单车占有的时空资源.

由式(2)可见,路网容量的计算主要分为2个部分,分别为道路时空资源计算和单车消耗时空资源计算. 其中,城市道路设施有效面积可以表示为

$$A = L_r W_r \quad (3)$$

式中: L_r 为路网中道路的有效总长度, m ; W_r 道路的有效宽度, m .

单车占有时空资源可以表示为

$$C_v = h_s W_v t \quad (4)$$

式中: h_s 为车辆运行过程中的平均车头间距, m ; W_v 为车辆运行过程中所占用空间的平均宽度,包括车身宽度和侧向净空, m ; t 为车辆在路网上的平均出行时间, h .

城市路网通常由城市快速路、主干路、次干路以及支路组成,各等级道路有不同的设计标准. 受到道路条件等因素影响,车辆在不同等级道路上运行时会表现出不同的运行特性,例如车道宽度的差异导致车辆运行速度有所不同,从而车辆保持的车头间距和侧向净空不同,对路网容量的计算带来一定影响. 所以在计算路网容量过程中,应考虑道路等级所带来的影响.

2.2 分级时空消耗模型

考虑到车辆的运行特性会受到路网中道路等级的影响,在应用时空消耗法计算路网容量时要分别计算不同等级道路的路网容量后再求和,使其计算结果更贴切真实路网容量,消除路网中道路级配所带来的影响. 根据路网容量的定义,将式(3)(4)代入式(2)中并整理,得到

$$N = \frac{L_r W_r T}{h_s W_v t} \quad (5)$$

在实际运行过程中,车辆通常沿车道行驶,因此式(5)中道路有效宽度与车辆动态宽度之比可用路段的车道数替代($W_r/W_v = n$),模型由二维降至一维,其计算结果反映出在现有交通组织情况下的实际路网容量,可操作性强且更具有实际意义. 不同等级道路的各路段情况不同,需要分别计算各路

段容量后求和得到总体路网容量. 车辆在路网中运行时,会受到诸多因素的干扰,例如平面过街设施、路侧出入口等. 综上,路网容量计算模型可以改进为

$$N = \sum_{i,j} \frac{n_{ij} L_{ij} T \lambda_{ij}}{h_{ij}(s) t} \quad (6)$$

式中: n_{ij} 为路段的车道数; L_{ij} 为路段的长度, m ; λ_{ij} 为综合修正系数; $h_{ij}(s)$ 为车头间距, m ; i 为道路等级; j 为路段编号.

考虑到信号控制交叉口对路段有效运行时间的影响, T 可以表示为

$$T = T_l R \quad (7)$$

式中: T_l 为总运行时间,根据需求可以选择高峰时长(2 h)、白天时长(18 h)或者全天时长(24 h), h ; R 为路段的有效利用时间与运行时间之比,可采用绿信比.

传统的时空消耗模型常采用式(5)作为计算模型,而式(5)中需要根据经验标定车辆运行过程中的动态宽度,不仅忽略了实际的交通渠化,增加了计算难度,而且忽略了道路等级对机动车运行过程中所带来的影响,导致计算精度不足;而式(6)将道路宽度与车辆的动态宽度之比化简为车道数,并分别计算各等级道路的路网容量,避免了车辆动态宽度的标定,考虑了交通渠化以及道路等级,提高了计算结果的可靠性.

3 关键参数标定方法

根据式(6),不难发现,车头间距是时空消耗法的关键参数之一,因此在选取车头间距时应充分考虑路网运行稳定性、运行速度等因素. 如果车头间距取值过小,计算得到的路网容量则会过大,车辆在实际运行过程中难以维持该车头间距,同时还会造成车流量密度过大,路网瘫痪概率增大等后果,降低了计算结果的可靠性和实用性;反之,倘若车头间距取值过大,计算结果偏小,以该结果作为交通规划的参考指标会导致路网密度、道路利用率过低,造成资源浪费.

综上,在计算路网容量过程中,要充分考虑路网的运行状态、资源利用率等因素,确定合适的车头间距.

3.1 基于运行效率及VA模型的车头间距标定

本节首先阐述了运行效率理论的计算模型,采用数学方法证明了运行效率有且只有唯一最大值,

再结合具有良好适应性的 Van Aerde (VA) 交通流模型, 推导得到运行效率与车头间距之间的函数关系, 并计算出不同等级道路运行效率最大时对应的车头间距, 为未来的应用提供参考。

3.1.1 运行效率理论

运行效率理论最初是由 Chen 等^[13]提出的, 理论指出了仅仅从车流量或者运行速度考虑交通运行状态具有一定的局限性, 难以找到路网运行的最佳状态, 应当将车辆运行速度以及流量综合考虑, 使路网既能达到一定的流量, 又能保证合适的运行速度, 因此提出运行效率刻画路网交通状态。相关文献^[14]对该理论进行了进一步探讨, 并指出采用运行效率作为评价道路设施运行的指标比单独采用速度或流量具有明显优点: 1) 其综合考虑了道路设施疏导能力、车辆运输效率(快速运行)以及尾气污染; 2) 交通流率处于运行效率最大状态时运行稳健, 交通中断概率小, 更具有实际意义; 3) 运行效率最大值唯一。运行效率可以定义为^[14]

$$E = qv \quad (8)$$

式中: E 为运行效率, $\text{pcu} \cdot \text{km}$; q 为高峰小时交通流率, pcu/h ; v 为运行速度, km/h 。

根据速度、流量以及密度的三者关系, 速度 v 可以表示为密度 k 的函数: $v = f(k)$, 带入式(8)可得

$$E = k [f(k)]^2 \quad (9)$$

显然, 速度随着密度的增加而下降, $v = f(k)$ 为单调递减函数, 因此

$$\frac{dE}{dk} = f(k) [f(k) + 2kf'(k)] \quad (10)$$

有且仅有唯一解, 即存在运行效率最大的状态。

以运行效率最大化作为采用时空消耗法计算路网容量时车头间距的取值依据, 记 k_E 为满足 $\frac{dE}{dk} = 0$ 的最优密度, 根据车头间距和流密度的倒数关系, 可求得最优车头间距

$$h_E (s) = \frac{1}{k_E} \quad (11)$$

3.1.2 VA 交通流模型

为得到运行效率与车头间距之间的函数关系, 需要引入适当的交通流模型 $f(k)$ 。首先提出并被广泛应用的交通流模型为 Greenshields 模型, 该模型建立在速度和密度为线性关系的假设基础之上, 因此该模型刻画了理想状态下的交通流速度、密度以及流量之间的关系。但是该模型适应性较差, 难以刻

画实际交通流运行过程中速度、密度以及流量之间相互作用, 许多学者对该模型进行修正和优化, 发展出 Pipe 模型、Underwood 模型等。Rakha 等^[15]指出, VA 提出的四参数模型具有更高的自由度, 可以更好地适应不同地区、不同道路设施以及不同驾驶行为条件下的交通流状态。此外, 假设该模型参数较少, 所需数据获取简单, 对于大规模路网交通流研究具有一定的优势。综上, 本文采用 VA 交通流模型作为计算基础。

为了验证该模型是否适用于北京地区的交通流, 采用北京四环路交通流实测数据与 VA 模型的模拟数据进行对比, 其对比结果如图 1 所示。

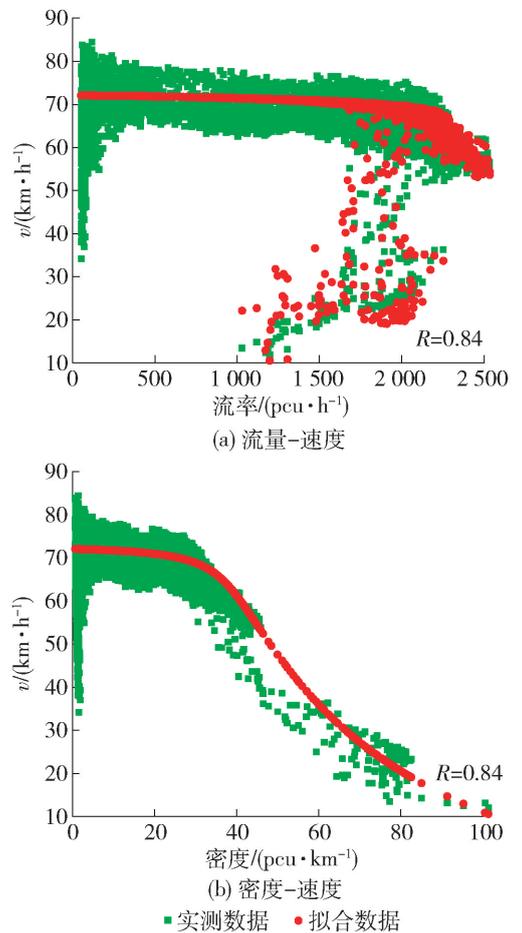


图 1 VA 模型拟合结果与北京四环路实测数据对比

Fig. 1 Comparison between the data fitting of VA model and the observed data of Beijing 4th ring road

实测数据与拟合数据之间的皮尔森系数为 0.84 ($R = 0.84$), 体现出 VA 交通流模型较强的适应性, 可以用于模拟北京的交通流特性。因此, 采用该模型推导车头间距与运行效率之间的函数关系。

VA 模型中对车头间距的描述可以表示为^[16-17]

$$h(s) = \frac{1}{k} = c_1 + \frac{c_2}{v_f - v} + c_3 v \quad (12)$$

式中: $h(s)$ 为平均车头间距, km; k 为交通流密度, 辆/km; v_f 为自由流速度, km/h; v 为车速, km/h; c_1 为固定车头间距参数, km; c_2 为第一车头时距参数, km²/h; c_3 为第二车头时距参数, h.

3 个参数的计算方法分别为^[18]

$$c_1 = \frac{v_f(2v_c - v_f)}{k_j v_c^2} \quad (13)$$

$$c_2 = \frac{v_f(v_c - v_f)^2}{k_j v_c^2} \quad (14)$$

$$c_3 = \frac{1}{q_c} - \frac{v_f}{k_j v_c^2} \quad (15)$$

式中: v_c 为临界速度, km/h; k_j 为阻塞密度, pcu/h; q_c 为道路设施单位时间内可通过的最大车辆数, km/h.

3.1.3 运行效率与车头间距函数关系

Rakha 在 VA 模型的基础上, 得到出车头间距与和速度之间的关系^[18-20]

$$v = f(\bar{h}_s) = \frac{-c_1 + c_3 v_f + \bar{h}_s - [(\bar{h}_s - c_1 - c_3 v_f)^2 + 4c_2 c_3]^{0.5}}{2c_3} \quad (16)$$

将式(16)带入式(6), 最终得到运行效率与车头间距之间的关系

$$E = \frac{\{-c_1 + c_3 v_f + \bar{h}_s - [(\bar{h}_s - c_1 - c_3 v_f)^2 + 4c_2 c_3]^{0.5}\}^2}{2c_3 \bar{h}_s} \quad (17)$$

假设快速路、主干路以及次干路的自由流速度 v_f 分别为 80、60、40 km/h, 阻塞密度 k_j 为 150 pcu/km, 临界速度 $0.5v_f$, 得到各等级道路车头间距与运行效率之间关系, 如图 2 所示.

显然, 车流的运行效率受到道路等级的影响. 高等级道路车流在运行效率最大状态时, 平均车头间距大于低等级道路.

从式(17)中可以看出, c_1 、 c_2 、 c_3 值的确定是关键, 3 个参数的确定与自由流速度、临界车速以及最大小时流率相关, 不同等级道路对应的交通流特性不同. 北京城区路网主要由快速路、主干路、次干路和支路组成, 由于支路情况复杂, 通行能力低下, 不作为区域路网的主要通道, 因此在评估路网容量时不予以考虑.

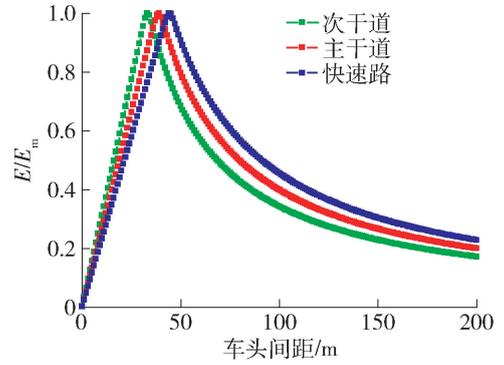


图 2 不同等级道路车头间距与运行效率关系

Fig. 2 Relationship between space headway and operation efficiency of different levels of roads

3.1.4 车头间距标定方法

首先, 建立优化模型

$$\min \sum \left[E_i - \frac{v_i^2}{\left(c_1 + c_3 v_i + \frac{c_2}{\hat{v}_f - v_i} \right)} \right]^2 \quad (18)$$

式中: $E_i = q_i v_i$ (观测数据计算得到的运行效率, q_i 、 v_i 分别为观测流量和速度); \hat{v}_f 为估计自由流速度, km/h.

采用 Gauss-Newton 法计算得到 c_1 、 c_2 、 c_3 的估计值, 记为 \hat{c}_1 、 \hat{c}_2 和 \hat{c}_3 , 运行效率的经验模型即可表示为

$$\hat{E} = \frac{v_i^2}{\hat{c}_1 + \hat{c}_3 v_i + \frac{\hat{c}_2}{\hat{v}_f - v_i}} \quad (19)$$

根据式(19)计算得到运行效率最大值 E_m 以及对应的最优速度 v_E , 则最优车头间距为

$$\hat{h}_s = \hat{c}_1 + \hat{c}_3 v_E + \frac{\hat{c}_2}{\hat{v}_f - v_E} \quad (20)$$

根据北京地区的观测数据, 采用上述方法计算得到快速路、主干路以及次干路运行效率达到最大时对应各参数的值, 如表 1 所示.

表 1 基于运行效率指标的平均车头间距划分

Table 1 Calibration values of space headway based on operation efficiency theory

道路等级	速度/ (km·h ⁻¹)	流率/ (pcu·h ⁻¹)	\bar{h}_s /m
快速路	55	1 970	27.92
主干路	46	1 800	25.56
次干路	35	1 600	21.88

为分析基于运行效率的各等级道路车头间距参

数标定结果与其他研究中采用的最小车头间距以及临界车头间距的区别,以陈春妹等^[11]与初彦龙^[7]的研究为例,其中陈春妹等^[11]在研究中采用的是临界车头间距,通过对北京市二环路、平安大街等道路进行调查得到;初彦龙^[7]采用的是最小动态车头间距,根据交通调查得到研究区域的平均车速为 20 km/h 时计算得到. 由于二者研究的区域主要以主干路为主,因此分别对主干路的车头间距、运行速度进行对比. 此外,分级时空消耗模型提出在计算路网容量时,应对不同等级道路分别计算,并根据运行效率理论分别标定车辆在不同等级道路中运行时,运行效率最大时的车头间距,鉴于此,以陈春妹等^[11]未考虑道路分级的得到的车头间距以及相关

参数的标定结果作为例进行对比,对比结果如表 2、3 所示. 根据表 2 的对比结果可以看出,主干路的运行效率达到最大值时的车头间距显著大于临界车头间距,运行速度大于临界车速,小时流率略低于临界状态下的通行能力. 文献[14,21]指出,交通中断的概率可以由 Weibull 分布表述为

$$F(q) = e^{-\left(\frac{q-q_0}{\beta}\right)^\alpha} \quad q \leq q_0 \quad (21)$$

式中 α, β, q_0 为模型参数.

由于 $q_E < q_1, F(q_E) < F(q_1)$, 因此运行效率最大时车流运行更加平稳高效. 车辆平均运行速度在 20 km/h 时,对应的最小动态车头间距为 15.81 m,在该状态下,小时流率与车辆运行速度显著低于运行效率最大时的小时流率与车辆运行速度.

表 2 不同运行状态下参数比较

Table 2 Parameters comparison under different operation status

对比对象	速度/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	车头间距/ m	流率/ ($\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$)	对比结果		
				v_E/v_i	h_E/h_i	q_E/q_i
临界车头间距	$v_1 = 24.95$	$h_1 = 13.40$	$q_1 = 1861$	1.884	1.844	0.967
最小动态车头间距	$v_2 = 20.00$	$h_2 = 15.81$	$q_2 = 1265$	1.617	2.300	1.433
基于运行效率的车头间距	$v_E = 46.00$	$h_E = 25.56$	$q_E = 1800$			

表 3 不同等级道路参数比较

Table 3 Parameters comparison under different road levels

对比对象	临界状态	效率最大	效率最大 时增益/%
h	$h_1 = 24.95$	$h_E = 55.00$	120.44
快速路	$v_1 = 13.40$	$v_E = 27.92$	108.36
q	$q_1 = 1861$	$q_E = 1970$	5.86
h	$h_1 = 24.95$	$h_E = 46.00$	84.37
主干路	$v_1 = 13.40$	$v_E = 25.56$	90.75
q	$q_1 = 1861$	$q_E = 1800$	-3.28
h	$h_1 = 24.95$	$h_E = 35.00$	40.28
次干路	$v_1 = 13.40$	$v_E = 21.88$	63.28
q	$q_1 = 1861$	$q_E = 1600$	-14.02

根据表 3 的对比结果可以看出,各等级道路车辆运行效率达到最大时,车辆运行速度以及车头间距均显著高于临界状态,在该状态下,驾驶员的行车舒适性较高,且根据不同等级道路分别计算出适用于该等级道路的计算参数,提高了计算精度和可靠性.

3.2 修正系数选择

路段在运行过程中会受到诸多因素影响,这些影响因素会降低道路的通行能力,使得路网所提供的有效时空资源小于实际所拥有的时空资源. 影响路段时空资源的主要影响因素有路段长度、路侧出入口、公交停靠站、平面过街设施等.

文献[22]研究结果表明,路段对车辆运行效率影响显著,路段越短,运行速度越低;路段越长,运行速度越高. 当路段长度大于 1.1 km 时,路段长度变化对速度影响不明显. 因此,路段有效长度一般取实际长度的 0.7 ~ 1.0 倍.

路侧出入口对车辆运行的影响可用路段出入口密度衡量,根据文献[22]对出入口影响程度的研究,确定出入口影响修正系数,取值如表 4 所示.

表 4 出入口修正系数

Table 4 Modification of entrances and exits

出入口密度/ ($\text{个} \cdot \text{km}^{-1}$)	≤ 5	6	7	8	9	10
出入口修正系数	1	0.86	0.81	0.75	0.69	0.61

公交停靠站对路段上车辆运营影响修正系数可

根据站点公交停靠次数决定,一般取 0.60 ~ 1.00. 平面过街设施对机动车运行过程中造成一定影响,驾驶员遇到平面过街设施时,会提高警惕性,降低车速,甚至会停车让行. 因此,需要对平面过街设施修正,通常取 0.64 ~ 1.00. 路网在运行过程中会受到各种因素影响,使路网实际提供的时空资源较理想情况下有所降低. 在具体应用中,应根据路网中道路实际情况,确定具体影响因素对其进行修正.

4 模型应用

城市副中心——通州区的发展具有重要的战略作用,受到广泛关注^[23-25]. 为提出相应的交通管理政策,保障该区域的交通出行效率,对其路网容量进行评估具有重要意义. 对此,选用新规划的北京城市副中心——通州区的核心区域作为研究案例,采用改进后的时空消耗法模型计算该区域路网容量. 通州区如图 3(a)所示,红色区域为通州核心区;具体的路网情况如图 3(b)所示. 其中,新规划的北京城市副中心核心区域面积约为 155 km²,规划主干路 39 条,总长度为 64.722 6 km;次干路 23 条,总长度为 36.352 9 km(本文主要计算城市副中心内部道路的路网容量,作为跨境通道的快速路和高速公路没有考虑).

计算过程中所需要的数据源自 2016 年 11 月对该区域开展的大规模交通调查. 该调查主要包括交通调查以及道路信息采集 2 个部分.

根据对该区域的交通调查,得到该区域的交通组成、车辆平均出行时间 t (车辆每次出行在通州核心区路网中的平均运行时间为 0.24 ~ 0.31 h)、绿信比等数据. 根据参数标定结果:对于主干路路网,车头间距取值为 25.56 m,对于次干路路网,车头间距取值为 21.88 m. 该区域每辆车的平均时空消耗量为

$$S_{ij} = h(s)_{ij}t$$

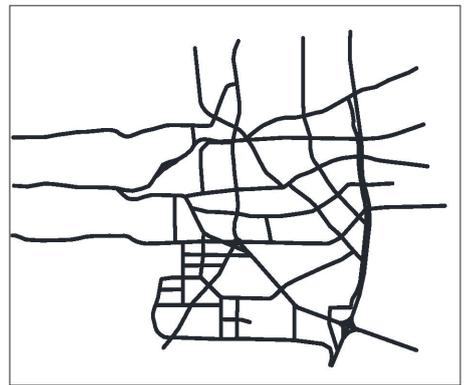
通过网络地图提取道路信息(交通组织、路段长度、出入口密度、公交车站密度及停靠频率等),得到各车道数 n_{ij} 、长度 L_{ij} 以及综合修正系数 λ_{ij} , (该地区路网容量的综合修正系数的取值在 0.10 ~ 0.35). 假设研究时段为全天,则 $T = 24$ h,计算得到等级为 i 的第 j 路段的全天时空资源

$$Z_{ij} = 24n_{ij}L_{ij}\lambda_{ij}$$

最后,将各路段的计算结果相加求和,得到北京城市副中心路网容量为 56 ~ 60 万辆次/d.



(a) 城市副中心位置



(b) 城市副中心路网

图 3 北京城市副中心概况

Fig. 3 Illustration of the Beijing sub hub area

5 结论

本文改进了传统的时空消耗模型,并结合运行效率理论提出了车头间距的标定方法,研究结果主要有

1) 针对机动车在不同等级道路上运行特性的差异以及道路等级、道路的宽度、隔离形式、限速等对路网容量的影响,指出分级计算路网容量的必要性,并提出分级时空消耗模型.

2) 综合考虑道路运行过程中交通流率和车辆运行速度等因素,基于运行效率理论提出了时空消耗模型中关键参数——车头间距的标定方法. 以运行效率作为衡量路网运行状态的指标,选取最大运行效率对应的车头间距作为时空消耗模型的计算参数. 并基于北京市路网运行数据,给出了相应的车头间距取值.

3) 对比了不同标定方法(临界车头间距、运行效率最大时的车头间距以及最小动态车头间距)的参数标定结果;对比了单一参数与各等级道路的标定参数,以及在不同状态下的流率、运行速度. 结果

表明,路网运行效率最大的状态下,车辆运行速度显著高于其他标定方法中所对应的车辆运行速度,且路网运行稳定性较高,交通中断概率较低。不同等级道路所对应的参数标定结果不同,具有异质性,因此采用单一参数进行路网容量计算易受道路级配影响。

4) 应用文中提出的路网容量计算方法,分析了新规划的北京城市副中心路网容量。

综上所述,本文综合考虑了道路网络的运行状态、道路等级等因素,得到运行效率最大时的路网容量,对城市规划以及交通需求管理提供了参考依据。但是该方法计算路网容量仍然存在一定局限性:

1) 文中给出的结果是根据北京的交通运行状况得到的车头间距值,若计算其他城市道路的路网容量,则需根据当地各等级道路运行情况确定自由流速度、临界车速以及最大小时流率,重新标定车头间距。

2) 采用该方法虽然可以得到可靠的路网容量,但是仍然需要对该地区进行大量的交通调查才可以确定相应参数。

参考文献:

[1] 陈春妹. 路网容量研究[D]. 北京:北京工业大学, 2002.
CHEN C M. Research on capacity of road network [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2002. (in Chinese)

[2] YANG H, BELL M G H, MENG Q. Modeling the capacity and level of service of urban transportation networks [J]. Transportation Research Part B, 2000, 34(4): 255-275.

[3] ASAKURA Y, KASHIWADANI M. Estimation model of maximum road network capacity with parking constraints and its application [J]. Infrastructure Planning Review, 1993, 11: 129-136.

[4] CHEN Z, WANG X. Effects of network capacity under variations of network structure and routing strategy [C] // IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control. Piscataway: IEEE, 2006: 150-155.

[5] 刘拥华,王永清,孙静怡. 城市道路网机动车通行容量模型的改进及应用[J]. 昆明理工大学学报(理工版), 2006, 31(6): 79-82.
LIU Y H, WANG Y Q, SUN J Y. Improvement and application of the capacity of city road network of motoring lane [J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Science and Technology), 2006, 31(6): 79-

82. (in Chinese)

[6] 田润良,向群,苗雨欣,等. 基于时空消耗法的道路军事交通流分配研究[J]. 军事交通学院学报, 2009, 11(5): 14-16.
TIAN R L, XIANG Q, MIAO Y X, et al. Study of military traffic assignment by road based on time and space consumption method [J]. Journal of Academy of Military Transportation, 2009, 11(5): 14-16. (in Chinese)

[7] 初彦龙. 基于城市路网容量的机动车保有量饱和分析[J]. 交通与运输, 2015(1): 14-17.
CHU Y L. Saturation analysis of motor vehicle ownership based on urban road network capacity [J]. Traffic & Transportation, 2015(1): 14-17. (in Chinese)

[8] 单文胜. 基于时空消耗理论的城市宏观路网供需研究[J]. 物流工程与管理, 2011, 33(8): 125-128.
SHAN W S. Study on the demand and supply analysis of urban road network based on space-time capacity [J]. Logistics Engineering and Management, 2011, 33(8): 125-128. (in Chinese)

[9] 李淑庆. 城市路网容量约束下的机动车发展规模研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2008, 27(1): 100-104.
LI S Q. Study on city motor-vehicle possession scale restrained by road network capacity [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2008, 27(1): 100-104. (in Chinese)

[10] ELEFERIADOU L, ROGER P R, WILLIAM R M. Probabilistic nature of breakdown at freeway merge junctions [J]. Transportation Research Record, 2001, 1484: 80-89.

[11] 陈春妹,任福田,荣建,等. 理想条件下路网临界车头间距的研究[J]. 公路交通科技, 2003, 20(1): 118-121.
CHEN C M, REN F T, RONG J, et al. Research on critical headway under ideal condition [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2003, 20(1): 118-121. (in Chinese)

[12] 杨涛,徐吉谦. 城市道路网广义容量研究及其应用[J]. 城市道桥与防洪, 1989(1): 1-7.
YANG T, XU J Q. Study and application of urban road network with broad definition [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 1989(1): 1-7. (in Chinese)

[13] CHEN C, JIA Z, VARAIYA P P. Causes and cures of highway congestion [J]. IEEE Control Systems, 2001, 21(6): 26-32.

[14] 邵长桥,郑加菊,张可. 基于运行效率的通行能力计算方法[J]. 北京工业大学学报, 2016, 42(1): 107-

111.
SHAO C Q, ZHENG J J, ZHANG K. Freeway capacity estimation method based on traffic operational efficiency [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2016, 42(1): 107-111. (in Chinese)
- [15] RAKHA H, CROWTHER B. A comparison of the greenshields, pipes, and Van Aerde car-following and traffic stream models [J]. Transportation Research Record, 2002, 1802: 248-262.
- [16] VAN AERDE M, RAKHA H. Multivariate calibration of single regime speed-flow-density relationships [C] // Proceedings of the 6th Vehicle Navigation and Information Systems Conference. Piscataway: IEEE, 1995: 334-341.
- [17] VAN AERDE M. Single regime speed-flow-density relationship for congested and uncongested highways [C] // 74th TRB Annual Conference. Washington D C: Transportation Research Board, 1995: Paper No. 950802.
- [18] DEMARCHI S. A new formulation for Van Aerde's speed-flow-density relationship. (in Portuguese) [C] // XVI Congresso De Pesquisa e Ensino em Transportes. Natal, RN, Brazil: Transportes, 2002: 313-324.
- [19] RAKHA H, PASUMARTHY P, ADJERID S. A simplified behavioral vehicle longitudinal motion model [J]. Transportation Letters, 2009, 1(2): 95-110.
- [20] RAKHA H, PASUMARTHY P, ADJERID S. Modeling longitudinal vehicle motion: issues and proposed solutions [C] // Transport Science and Technology Congress. Amsterdam: Elsevier B V, 2004: p. [PAN103].
- [21] BRILON W, GEISTEFELDT J, REGLER M. Reliability of freeway traffic flow: a stochastic concept of capacity [C] // International Symposium on Transportation & Traffic Theory Flow. Maryland: College Park, 2005: 125-144.
- [22] WANG Z L, SHAO C Q, RONG J. Analysis of vehicle running speed and its influencing factors on urban major streets [C] // Tenth International Conference of Chinese Transportation Professionals. Reston: ASCE, 2010: 1827-1834.
- [23] 李秀伟, 路林, 赵庆楠. 北京城市副中心战略规划 [J]. 北京规划建设, 2019(2): 8-15.
LI X W, LU L, ZHAO Q N. The strategic planning of Beijing sub-center [J]. Beijing Planning Review, 2019 (2): 8-15. (in Chinese)
- [24] 本刊编辑部. 未来之城: 北京城市副中心规划愿景 [J]. 北京规划建设, 2019(2): 2-7.
Journal Editorial Department. The city of the future: the planning prospects of Beijing sub-center [J]. Beijing Planning Review, 2019(2): 2-7. (in Chinese)
- [25] 张鹏飞, 王玉海, 刘学敏. 北京城市副中心建设效应分析 [J]. 城市发展研究, 2018, 25(9): 159-164.
ZHANG P F, WANG Y H, LIU X M. Analysis on the construction effect of Beijing sub-center [J]. Urban Studies, 2018, 25(9): 159-164. (in Chinese)

(责任编辑 杨开英)