

基于回归分析的交织区通行能力模型

A Regression-Based Capacity Model for Weaving Areas

赵 靖¹, 白 玉², 杨晓光²

(1.上海市市政工程设计研究总院,上海 200092;2.同济大学交通运输工程学院,上海 201804)

ZHAO Jing¹, Bai Yu², YANG Xiao-guang²

(1. Shanghai Municipal Engineer Design General Institute, Shanghai 200092, China; 2. School of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

摘要: 针对以往交织区通行能力回归分析中缺乏较为通用的回归模型、导致模型设计盲目性较大的问题,以 HCM2000 中交织区通行能力建议值为基础,建立模型的基本形式。研究表明,双曲线模型可较好地描述交织区通行能力与交织区长度的关系,模型参数可通过对交织区类型、交织流量比、交织区车道数和自由流车速等因素进行多元线性回归拟合得到。经检验,模型拟合度为 0.918,平均误差为 4.4%,说明模型可用且准确性较高。将模型应用于天津市快速路交织区通行能力计算中,验证了模型的实用性和可移植性。

Abstract: Due to a lack of regression models generally used for weaving area capacity analyses, which leads to a blindness in model design, this paper develops a base model, based on the suggested values of weaving area capacity by HCM2000. Results show that the hyperbolic model yields a good illustration of relationship between weaving capacity and weaving length, and that the model parameters can be calibrated through a multi-linear regression by considering factors like weaving types, weaving flow ratios, number of weaving lanes, and free speeds. A statistic test shows the model is promising, with a good-fitness of 0.918, and an average error of 4.4%. A demonstration in capacity analysis of an expressway in Tianjin shows the model is applicable elsewhere as well.

关键词: 交通工程;通行能力;回归分析;交织区

Keywords: traffic engineering; capacity; regression analyses; weaving area

中图分类号: U491.1⁺12 文献标识码: A

收稿日期: 2009-01-14

基金项目:国家自然科学基金重点项目(70631002)和国家自然科学基金(50578123)

作者简介:赵靖(1983—),男,上海人,硕士,主要研究方向:道路交通设计。E-mail:angeletzhao@hotmail.com

交织是指行驶方向相同的两股或多股交通流沿一定长度的道路区段、不借助交通控制设施进行的交叉^[1]。交织区在道路网中十分普遍,高速公路、多车道公路、双车道公路、立交、城市道路或集散道路等各种类型的道路上都会有交织区。由于交织区是道路系统的重要组成部分,受到研究人员的长期关注,但其中直接估算交织区通行能力的研究却较少^[2-3]。因此,本文对连续流条件下交织区通行能力模型进行讨论。

1 研究综述

以往对交织区通行能力计算方法的研究主要包括4类:

1) 基于环形交叉口的估算方法。20世纪50—60年代,人们认为交织区是决定环形交叉口通行能力的关键,研究中使用较为广泛的有Wardrop公式、英国环境部公式等。随着认识水平的提高,发现环形交叉口入口是限制其通行能力的关键因素,因此,大多采用间隙接受理论计算环形交叉口通行能力,但针对环形交叉口交织区通行能力的研究却逐渐减少^[4-10]。

2) 基于实测数据的估算方法。多年来对交织区的研究,收集、积累了大量实地数据,提出了一些计算方法。由于交织区交通流非常复杂,大多数分析都是基于某个交织区或是对某一地区的实例进行分析,给出建议值或图表。但是到目前为止,尚未形成通用的分析方法,尤其

是对于数据回归分析中模型的基本形式, 缺乏一致的研究成果, 给数据拟合工作带来了很大困难^[1-3,11]。

3) 基于理论解析的估算方法。通过分析交织区的运行机理, 采用理论解析方法建立交织区通行能力计算模型, 以使模型具有广泛适用性。例如, Wardrop公式及其改进模型中, 考虑了交织宽度、交织流量比、入口宽度、交织区长度等参数计算基本通行能力, 并在此基础上给出了城市规模、道路环境类型和路边干扰等修正系数; 文献[12—13]以交织区最大通行能力为目标函数, 以交织区各流向的车流量比例和通行能力为限制条件, 应用线性规划理论求解交织区通行能力; 还有一些研究结合车道变换理论和间隙接受理论, 推导出交织区通行能力计算模型。由于理论解析方法假设条件较多、计算复杂, 且难以反映各地区的交通运行特性, 因此难以普遍推广^[2,12-15]。

4) 基于仿真的估算方法。20世纪90年代后, 有学者采用仿真方法对交织区进行研究, 这种方法成本低、直观易操作且易于控制变量, 给研究分析带来许多便利。但由于计算机仿真是在一定的模型基础上运行(例如跟驰模型、车道变换模型、超车模型等), 其自身具有局限性, 一般可用来进行模型检验, 对于直接得出交织区通行能力的结论尚未得到普遍认可。

理论解析和数据回归分析是目前最为常用的估算交织区通行能力的方法, 在未能用数学语言完全揭示交织区运行机理的情况下, 采用实测数据进行分析具有更高的准确性。但是, 目前对于交织区通行能力与各影响因素间没有建立统一的关系模型, 导致数据拟合缺少合理指导, 模型设计盲目性和随机性较大^[16-17]。本研究利用《道路通行能力手册》(Highway Capacity Manual, HCM) 2000年版中的交织区通行能力数据, 通过模型建立和检验, 建立了基于回归分析的交织区通行能力模型, 为基于实测数据分析交织区通行能力提供依据。

2 模型建立

交织区通行能力与各影响因素间的关系模型是数据回归分析的基础。HCM2000中不同交织区

通行能力的建议值具有较高的参考价值, 依据此数据建立模型, 以保证模型具有较高可信度。

研究表明, 交织区通行能力随着交织区类型、车道数、自由流速度、交织区长度以及交织流量比的不同而变化, 其中交织区长度是较关键的影响因素。通过分析HCM2000中不同类型交织区通行能力建议值, 提出交织区通行能力与交织区长度的关系, 符合双曲线模型的假定。即假定交织区通行能力 CAP_w 与交织区长度 L_w 满足

$$CAP_w = \frac{L_w}{kL_w + b}, \quad (1)$$

式中: k 和 b 为参数。

将式(1)作适当变换, 得

$$\frac{L_w}{CAP_w} = kL_w + b, \quad (2)$$

即交织区长度与交织区通行能力的比值和交织区长度呈线性关系。对HCM2000原表(EXHIBIT 24-8)^[1]中各组数据用式(2)拟合, 可得不同交织类型、自由流车速、交织流量比、交织区车道数情况下交织区通行能力与交织区长度的关系, 见图1, 图中每一条直线(每一组数据)分别对应HCM2000中某一自由流车速、交织流率以及交织区车道数情况下的交织区通行能力与交织区长度的关系。

为检验 $\frac{L_w}{CAP_w}$ 与 L_w 是否线性相关, 采用相关系数 r 进行拟合优度检验, 结果见表1。针对A, B, C三种类型交织区的拟合数据共286行, 因篇幅所限, 表1中仅列出A型交织区在自由流车速为 $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、3车道情况下的部分数据。对于样本量 $n=5$, 显著性水平 $\alpha=0.001$ (显著性水平 α 一般可取0.05, 这里取0.001表明拟合结果更好), 查相关系数临界值 r_{α} 表, 得 $r_{\alpha}=0.9912 < |r|$, 检验满足。由此说明交织区通行能力与交织区长度符合双曲线模型。

基于交织区通行能力影响因素观察, 假定模型中参数 k 和 b 与交织区类型、车道数、自由流速度以及交织流量比有关。由于上述各因素之间没有交互作用, 将这些因素与参数 k 和 b 建立多元线性回归模型

$$k = m_1 + m_2 \cdot VR + m_3 N + m_4 V, \quad (3)$$

$$b = n_1 + n_2 \cdot VR + n_3 N + n_4 V, \quad (4)$$

式中: VR 为交织流量比; N 为交织区车道数; V 为自由流车速; $m_1, m_2, m_3, m_4, n_1, n_2, n_3, n_4$ 为待计算的回归系数。式(1), (3), (4)组成了交织区通行能力模型的基本形式, 利用MATLAB计算得到不同类型交织区通行能力模型中各参数的回归系数, 见表2。

3 模型检验

对交织区通行能力的模型进行假设检验, 确定其结果是否满足数理统计学要求。

1) 回归系数置信区间分析。如表3所示, 所有回归系数的置信区间都不含零点, 表明对于各种类型的交织区, 交织流量比、车道数和自由流车速对模型参数 k 或 b 所产生的影响具有单调性, 即通行能力总是随交织流量比的增加而减少, 随车道数和自由流速度的增加而增大, 表明模型具有较好的稳定性。

2) 拟合优度检验。在置信度为95%, 样本量 $n = 1\,000$ (HCM2000中共1 000个数据)的条件下,

检验统计量 r 值为0.958, 大于 r 的临界值0.062。此时 $r^2 = 0.918$, 即所需求解问题(交织区通行能力)中91.8%可由上述模型确定, 因而模型是可用的。

3) 拟合精度检验。对比模型计算结果与HCM2000原表中数据, 平均误差为4.4%, 误差在10%以内的概率为85%, 如图2所示, 表明模型有较高的准确性。

因此, 应用上述模型来拟合交织区通行能力是完全可行的。实际应用中, 只需采用相应数据对上述模型进行标定, 便可得到所研究交织区的通行能力计算模型。

4 案例分析

为了进一步验证模型的可用性及可移植性, 利用天津市快速路交织区(即已建的东南半环立交交织区)通行能力的相关数据对模型进行标定, 并对结果进行检验。该交织区以5车道A型交织区为主, 见图3, 设计车速为 $80\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, 这两个数

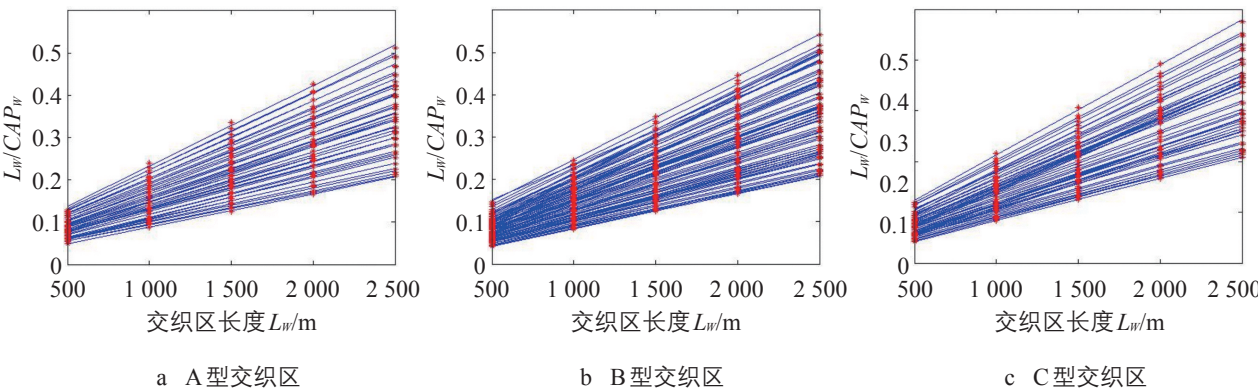


图1 曲线拟合图示
Fig.1 Fitting curve

表1 拟合及 r 检验表
Tab.1 Fitting and r -test results

交织流量比 VR	拟合参数		检验	
	k	b	r	$r_{0.001}$
0.1	1.32E-04	4.54E-03	0.999 640	> 0.991 2
0.2	1.27E-04	9.45E-03	0.999 688	> 0.991 2
0.3	1.34E-04	1.15E-02	0.999 406	> 0.991 2
0.4	1.54E-04	1.06E-02	0.998 993	> 0.991 2
0.45	1.59E-04	1.25E-02	0.998 428	> 0.991 2

据在分析中按常量考虑。经调查分析, 交织区通行能力推荐值如表4所示^[15]。

应用模型, 即式(1), (3), (4)进行回归分析得
 $CAP_w = L_w / [(8.82 \cdot 10^{-5} + 1.59 \cdot 10^{-4} \cdot VR) \cdot L_w + (3.72 \cdot 10^{-4} + 8.87 \cdot 10^{-4} \cdot VR)]$

在置信度95%的条件下对模型进行显著性检验, 检验统计量 t 值为0.997 5, 高于 t 的临界值0.576(样本量 $n = 12$)。 CAP_w 计算结果及模型精度检验结果见表5, 计算结果相对误差均小于1%, 说明模型准确性较高。因此, 交织区通行能力模型适用于天津市快速路立交交织区。

5 结论

1) 针对回归分析方法计算交织区通行能力时

存在模型设计盲目性较大的问题, 提出了模型结构, 对该研究方法的推广应用提供了便利、科学的模型依据。

2) 利用HCM2000中相关数据对交织区通行能力模型进行检验的结果表明, 交织区通行能力的91.8%可由模型确定, 论证了模型的可用性。

3) 交织区通行能力模型在天津市快速路交织区通行能力计算中得到了实际应用, 数据拟合结果良好, 验证了模型的实用性与可移植性。

由于模型是在分析了HCM2000中相关数据的基础上提出的, 受其数据的影响, 研究中仅考虑了交织区类型、车道数、自由流车速、交织区长度以及交织流量比几个影响因素。为进一步证明模型的普适性, 还可以通过更丰富的实测数据加以完善。

表2 交织区通行能力模型中各参数的回归系数

Tab.2 Regression coefficient of each parameter in weaving area capacity model

交织区类型	参数	回归模型
A型交织区	k	$2.923E-04 + 9.541E-05 \cdot VR - 3.064E-05 N - 7.141E-07 V$
	b	$1.674E-02 + 1.326E-02 \cdot VR - 1.919E-03 N - 4.185E-05 V$
B型交织区	k	$1.903E-04 + 1.232E-04 \cdot VR - 1.760E-05 N - 3.368E-07 V$
	b	$2.404E-02 + 5.005E-03 \cdot VR - 3.302E-03 N - 8.294E-05 V$
C型交织区	k	$2.227E-04 + 9.015E-05 \cdot VR - 2.269E-05 N - 3.922E-07 V$
	b	$1.851E-02 + 1.012E-02 \cdot VR - 2.544E-03 N - 6.989E-05 V$

表3 回归系数置信区间及检验统计量($\alpha = 0.05$)

Tab.3 Confidence intervals and test statistic ($\alpha = 0.05$) of regression coefficient

交织区类型	k			b		
	回归系数	估计值	置信区间	回归系数	估计值	置信区间
A型交织区	m_1	$2.923E-04$	$[2.687E-04, 3.159E-04]$	n_1	$1.674E-02$	$[1.366E-02, 1.983E-02]$
	m_2	$9.541E-05$	$[7.635E-05, 1.145E-04]$	n_2	$1.326E-02$	$[1.078E-02, 1.575E-02]$
	m_3	$-3.064E-05$	$[-3.363E-05, -2.765E-05]$	n_3	$-1.919E-03$	$[-2.310E-03, -1.529E-03]$
	m_4	$-7.141E-07$	$[-8.955E-07, -5.327E-07]$	n_4	$-4.185E-05$	$[-6.553E-05, -1.816E-05]$
B型交织区	m_1	$1.903E-04$	$[1.550E-04, 2.256E-04]$	n_1	$2.404E-02$	$[1.785E-02, 3.023E-02]$
	m_2	$1.232E-04$	$[1.089E-04, 1.374E-04]$	n_2	$5.005E-03$	$[2.508E-03, 7.503E-03]$
	m_3	$-1.760E-05$	$[-2.160E-05, -1.360E-05]$	n_3	$-3.302E-03$	$[-4.003E-03, -2.601E-03]$
	m_4	$-3.368E-07$	$[-6.288E-07, -4.477E-08]$	n_4	$-8.294E-05$	$[-1.341E-04, -3.176E-05]$
C型交织区	m_1	$2.227E-04$	$[1.940E-04, 2.597E-04]$	n_1	$1.851E-02$	$[1.293E-02, 2.409E-02]$
	m_2	$9.015E-05$	$[6.874E-05, 1.116E-04]$	n_2	$1.012E-02$	$[6.482E-03, 1.376E-02]$
	m_3	$-2.269E-05$	$[-2.640E-05, -1.898E-05]$	n_3	$-2.544E-03$	$[-3.174E-03, -1.914E-03]$
	m_4	$-3.922E-07$	$[-6.630E-07, -1.214E-07]$	n_4	$-6.989E-05$	$[-1.159E-04, -2.388E-05]$

参考文献：

References:

[1] National Research Council. Highway Capacity Manual 2000[M]. Washington DC: Transportation Research Board, 2000.

[2] Ponlathap Lertworawanich. Capacity Estimation for Weaving Areas Based on Gap Acceptance and Linear Optimization[D]. Pennsylvania: The Pennsylvania State University, 2003.

[3] ZHANG Yi-hua. Capacity Modeling of Freeway Weaving Sections[D]. Virginia: Virginia Polytechnic

Institute and State University, 2005.

[4] Arem, Bart van. Capacities and Delays at Roundabouts in The Netherlands[C] // TRB. Proceedings of Seminar

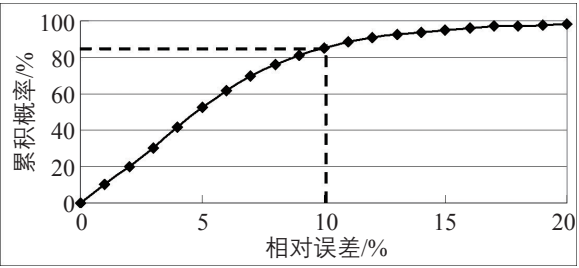


图 2 相对误差累积分布图示

Fig.2 Cumulative distribution of relative errors

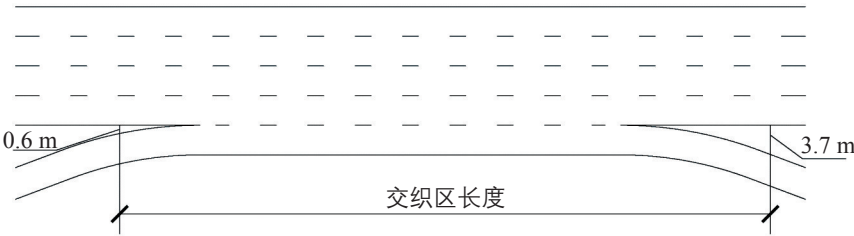


图 3 天津市快速路交织区调查图示

Fig.3 Tianjing expressway weaving area survey

表 4 基于调查的 CAP_w 推荐值

Tab.4 CAP_w suggested values based on survey 辆·h⁻¹

交织区长度/m	交织流量比			
	0.1	0.2	0.3	0.4
156	9 280	8 140	7 200	6 360
222	9 340	8 220	7 260	6 400
250	9 360	8 250	7 280	6 430

表 5 CAP_w 计算结果及模型精度检验

Tab.5 CAP_w results and model accuracy testing

交织流量比	计算结果	交织区长度/m		
		156	222	250
0.1	通行能力/(辆·h ⁻¹)	9 345	9 422	9 443
	相对误差/%	0.70	0.88	0.89
0.2	通行能力/(辆·h ⁻¹)	8 098	8 167	8 186
	相对误差/%	0.52	0.64	0.78
0.3	通行能力/(辆·h ⁻¹)	7 145	7 208	7 224
	相对误差/%	0.76	0.72	0.77
0.4	通行能力/(辆·h ⁻¹)	6 393	6 450	6 465
	相对误差/%	0.52	0.78	0.54

- H Held at the PTRC Transport, Highways and Planning Summer Annual Meeting. Washington DC: Planning and Transport Res and Computation Co., Ltd, 1992: 257 – 267.
- [5] Bared, Joe G, Prosser, et al. State of the Art Design of Roundabouts[C] // TRB. Transportation Research Board Annual Meeting. Washington DC: TRB, 1997: 1 – 10.
- [6] Brilon, Werner. Traffic Engineering and the New German Highway Capacity Manual[J]. Transportation Research A, 1994, 28 A(6): 469 – 481.
- [7] Brilon, Werner, Stuwe, et al. Capacity and Design of Traffic Circles in Germany[C] // TRB. Transportation Research Record. Washington DC: TRB, 1993: 61 – 67.
- [8] Troutbeck R J. Capacity and Delays at Roundabouts: A Literature Review[J]. Australian Road Research Board, 1984, 14(4): 205 – 216.
- [9] Troutbeck R J. Capacity and Design of Traffic Circles in Australia[C] // TRB. Transportation Research Record. Washington DC: TRB, 1993: 68 – 74.
- [10] Edmund Waddell. Evolution of Roundabout Technology: A History-Based Literature Review[EB/OL]. [2009 – 01 – 10]. <http://www.k-state.edu/roundabouts/research/Waddell.pdf>.
- [11] Leisch J E, et al. Procedure for Analysis and Design of Weaving Sections[R]. Washington DC: US Department of Transportation, 1985.
- [12] Lertworawanich P, Elefteriadou L. Capacity Estimations for Type B Weaving Areas Based on Gap Acceptance[C] // TRB. Transportation Research Record. Washington DC: TRB, 2001: 24 – 34.
- [13] Lertworawanich P, Elefteriadou L. Methodology for Estimating Capacity at Ramp Weaves Based on Gap Acceptance and Linear Optimization[C] // TRB. Transportation Research Record. Washington DC: TRB, 2003: 459 – 483.
- [14] 陈金川, 刘小明, 任福田, 等. 道路交织区运行分析研究进展[J]. 公路交通科技, 2000, 17(1): 46 – 50.
- CHEN Jin-chuan, LIU Xiao-ming, REN Fu-tian, et al. Overview of the Research on the Operation Analysis of Highway Weaving Sections[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2000, 17(1): 46 – 50.
- [15] 天津市市政工程设计研究院. 天津市城市快速路互通立交通行能力研究[R]. 天津: 天津市市政工程设计研究院, 2007.
- [16] Skabardonis, Cassidy A, May M, et al. Application of Simulation to Evaluate the Operation of Major Freeway Weaving Sections[C] // TRB. Transportation Research Record. Washington DC: TRB, 1989: 91 – 98.
- [17] Raymond Vermijs. New Dutch Capacity Standards for Freeway Weaving Sections Based on Micro Simulation[EB/OL]. [2009 – 01 – 10]. http://www.fosim.nl/Documenten/CIA-1_CapweefUK.pdf.

协办单位

广州市交通规划研究所
 深圳市城市交通规划研究中心
 北京交通发展研究中心
 深圳市市政工程咨询中心
 南京林业大学汽车与交通工程学院
 重庆市城市交通规划研究所
 武汉市交通科学研究所
 昆明市城市交通研究所
 中国地铁工程咨询有限责任公司

南京市交通规划研究所有限责任公司
 上海济安交通工程咨询有限公司
 武汉市城市综合交通规划设计研究院
 北京九州联宇信息技术有限公司
 深圳市综合交通设计研究院
 武汉市城市规划设计研究院
 中国浙江道明光学股份有限公司
 南京仁本交通咨询有限责任公司