

单向双车道立交匝道路面加宽理论计算及仿真分析

殷宇翔, 陈竞飞

(广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司, 广东 广州 510440)

摘要: 为确定不同条件下单向双车道立交匝道的加宽值, 本文对比分析了中国、日本及美国规范中关于加宽值的计算思路, 提出较为合理的单向双车道匝道加宽计算方法, 并分析设计速度和曲线半径对加宽值的影响, 对立交细则中Ⅱ型匝道加宽值进行了修正, 使用仿真软件 Vissim 分析不同交通环境下行车道宽度对通行情况的影响, 最后结合工程实践, 详细介绍了加宽计算方法, 可为单向双车道立交匝道路面加宽提供参考。

关键词: 道路工程; 立交匝道; 加宽值; 通行条件; Vissim 仿真

中图分类号: U416.2

文献标识码: A

Theoretical Calculation and Simulation Analysis of Pavement Widening for One-way Two-lane Interchange Ramps

YIN Yuxiang, CHEN Jingfei

(Guangdong Communication Planning & Design Institute Group Co., Ltd., Guangzhou 510440, Guangdong, China)

Abstract: In order to determine the widening value of one-way two-lane interchange ramps under different conditions, this paper compares and analyzes the calculation ideas of widening value in Chinese, Japanese and American specifications, puts forward a more reasonable calculation method of one-way two-lane ramp widening, analyzes the influence of design speed and curve radius on the widening value, modifies the widening value of type II ramp in *Guidelines For Design of Highway Grade-Separated Intersections*, uses the simulation software Vissim to analyze the traffic conditions of lane width in different traffic environments, and introduces the widening calculation in detail in combination with engineering practice. The analysis can provide a reference for pavement widening of one-way two-lane interchange ramps.

Key words: road engineering; ramp; widening; traffic condition; Vissim simulation

道路平曲线加宽是指汽车在平曲线上行驶时为满足车辆轨迹及安全需要等, 较标准行车道断面相应增加的路面宽度^[1]。设置加宽主要基于两点考虑: 一是在平曲线上行驶时, 车辆前后轮行驶轨迹不同, 导致曲线段行驶时车身掠过的宽度比直线行驶时的宽度有所增大; 二是车辆在行驶时难以保持行驶轨迹完全符合理论轨迹线, 会产生一定的偏移, 即“摆幅”。

对于单向双车道立交匝道, 一般应根据设计速度、通行条件以及平面圆曲线半径等确定行车道加宽值。目前各类规范均给出了不同曲线半径

下的某类标准断面加宽取值表^[2-5], 但鉴于工程实践中标准断面宽度、代表车型尺寸以及设计线位置等因素与规范规定并非完全一致^[6-7], 易导致设计人员在设计过程中对于匝道行车道加宽取值产生困惑, 因此很有必要梳理出具有普适性的加宽计算方法。显然, 加宽值 ΔW 等于曲线段行驶时路面所需宽度 W_n 与路面标准宽度 W_s 之间的差值, 从设计角度而言, 计算加宽值的核心在于确定路面所需宽度 W_n 。

目前对于路面加宽后的通行效果评价主要有现场实测和模拟仿真两类方法, 其中基于车辆之

收稿日期: 2024-03-14

作者简介: 殷宇翔, 路桥工程师, 硕士, 研究方向为公路总体及路线设计

间相互作用的微观交通仿真研究较为成熟。微观交通仿真方法广泛运用于交织区通行能力、区段拥堵优化、立交出入口改善等方面的研究^[8-9],该方法的主要优点是能较为真实地模拟交通系统各要素及细节行为。

基于此,本文汇总各规范中单向双车道匝道加宽值的计算思路,对比分析计算过程中各参数意义及取值依据,总结出较为合理的加宽值计算方法。同时利用仿真软件 Vissim 模拟不同交通环境下的通行情况并加以分析,从目的导向的角度评价行车道加宽方案的优化效果,最后结合实际工程案例,详细介绍加宽计算方法。

1 国内外加宽计算方法

1.1 公路立体交叉设计细则

《公路立体交叉设计细则》(JTJ/T D21—2014)(以下简称立交细则)条文 9.4.1 规定了匝道路面的通行条件,条文 9.4.2 中规定了一般通行条件下的各类型匝道路面加宽值^[3]。对于单向双车道Ⅱ型,一般通行条件是两辆铰接列车能慢速并行^[10]。其路面所需宽度 W_n 计算公式为:

$$W_n = B + R_{d1} - \sqrt{(\sqrt{R_{d1}^2 - L_1^2} - B/2)^2 - L_2^2} + R_{d2} - \sqrt{(\sqrt{R_{d2}^2 - L_1^2} - B/2)^2 - L_2^2} + a_1 + 2a_2 \quad (1)$$

式中: W_n 为一般通行能力条件下路面所需宽度; B 为铰接列车宽度; L_1 为铰接列车前端至后轮车轴中心的距离; L_2 为铰接列车挂车的轴距; R_{d1} 为双车道外侧铰接列车行驶时的外侧端部转弯半径; R_{d2} 为双车道内侧铰接列车行驶时的外侧端部转弯半径; a_1 为车辆之间的安全距离; a_2 为车辆与路面边缘之间的距离。

1.2 日本道路构造令

日本道路构造令针对不同类型的匝道,根据给定的设计车辆诸要素、不同通行条件下的车辆布置,计算出匝道路面在不同半径下的加宽量^[4]。其计算思路与立交细则基本一致,但在代表车辆尺寸参数及侧向净宽取值方面有区别,具体见表 1。

表 1 代表车辆尺寸及侧向净宽参数取值对比表

单位: m				
规定	L_1	L_2	B	a_1
立交细则	3.3	11	2.55	1.0
日本道路构造令	5.3	9	2.5	0.7

1.3 美国 AASHTO

AASHTO 分为平曲线上行车道和交叉口处转向道路两类路段来进行路面加宽的分析 and 计算,其基本思路是一致的,主要区别在于参数取值的不同,其中交叉口转向道路更接近立交匝道的行驶情况^[5]。AASHTO 中路面所需宽度的计算公式为:

$$W_n = N(U + C) + (N - 1)F_A + Z \quad (2)$$

$$U = u + R - \sqrt{R^2 - \sum L_i^2} \quad (3)$$

$$F_A = \sqrt{R^2 + A(2L + A)} - R \quad (4)$$

$$Z = \frac{0.1V}{\sqrt{R}} \quad (5)$$

式中: N 为车道数; U 为设计车辆的轨迹宽度; C 为横向净距; F_A 为内车道上行驶车辆的前悬宽度; Z 为额外允许宽度; u 为设计车辆在直线段上的轨迹宽度; R 为曲线半径; L_i 为连续轴与铰接点之间的轴距; A 为车辆前悬长度; L 为单独车辆的轴距; V 为设计速度。

1.4 小结

立交细则与日本道路构造令中对加宽计算的思路和方法基本一致,区别仅在于参数的取值。美国 AASHTO 中加宽计算的核心思路与立交细则基本一致,但在具体计算公式中存在一定差异。对比结果如下:

(1) 加宽计算的基本思路: 确定路段通行条件,由对应通行条件的车辆布置情况确定计算公式及参数取值,计算时主要考虑曲线行驶的轨迹掠过宽度、驾驶过程中的摆幅值、车辆侧向净距等三个因素。

(2) 在考虑曲线行驶轨迹掠过宽度时,立交细则和日本构造令的计算思路一致,均以车辆在平面上布置的几何关系一体计算,美国 AASHTO 则将其拆分成轮胎轨迹宽度和前悬径向宽度分别计算。按照立交细则和日本构造令方法计算时可代入计算模型中多条轨迹线半径,而按 AASHTO 计算时则简化了半径的选取,就该项计算而言,立交细则和日本构造令方法更为合理。

(3) 在考虑驾驶过程中的摆幅时,立交细则和日本道路构造令中均未显示该值,而是将其包含在车辆间安全距离 a_1 里,由于计算中 a_1 取定值,故两者均未考虑速度和曲线半径对摆幅的影响。美国 AASHTO 则给出了摆幅值 Z 的经验公式,该值与行驶速度及曲线半径有关,这与实际情况相契合,就该项计算而言,美国 AASHTO

方法更为合理。

(4) 各规定对考虑安全因素的侧向净距取值不同。对于双车道匝道两辆车并行,立交细则和日本道路构造令中取 0.25 m,美国 AASHTO 取 0.6 m。

(5) 以上各规定在计算加宽值时扣减路面标准宽度均默认标准宽度中包含硬路肩宽度,即默认曲线行驶时路面所需宽度由硬路肩和行车道共同分担。

2 单向双车道匝道加宽计算方法

2.1 加宽值计算步骤

综合各规定中加宽计算方法,提出适用于单向双车道匝道的加宽计算步骤:

(1) 确定匝道通行条件。对于单向双车道匝道,一般通行条件为“两辆铰接列车能慢速并行”,特殊通行条件为“铰接列车与载重汽车能慢速并行”,具体设计时也根据实际交通需求选择其他合理的通行条件。

(2) 根据选定的通行条件,确定相应的设计车型及车辆布置,不同通行条件下的车辆布置如图 1 所示。代表车型及尺寸要素应根据实际交通组成合理选用。当无详细交通资料时,可依据《公路路线设计规范》(JTG D20—2017)选用代

表车型的尺寸,其中铰接列车尺寸参数为: $L_1 = 4.8 \text{ m}$, $L_2 = 11 \text{ m}$, $B_1 = 2.55 \text{ m}$,载重汽车尺寸参数为: $L_0 = 8 \text{ m}$, $B_2 = 2.5 \text{ m}$ 。

(3) 根据车辆布置几何关系计算路面所需宽度 W_n ,当选定一般通行条件时,可依据式(6)~(8)计算 W_n ,当选定特殊通行条件时,依据式(7)~(9)计算 W_n 。

$$W_n = B_1 + R_{d1} - \sqrt{(\sqrt{R_{d1}^2 - L_1^2} - B_1/2)^2 - L_2^2} + R_{d2} - \sqrt{(\sqrt{R_{d2}^2 - L_1^2} - B_1/2)^2 - L_2^2} + a_1 + 2a_2 \quad (6)$$

$$a_1 = 2a_2 + Z \quad (7)$$

$$Z = 0.1V/\sqrt{R} \quad (8)$$

$$W_n = \frac{B_1}{2} + R_{d1} - \sqrt{(\sqrt{R_{d1}^2 - L_1^2} - B_1/2)^2 - L_2^2} + B_2 + R_{d2} - \sqrt{R_{d2}^2 - L_0^2} + a_1 + 2a_2 \quad (9)$$

式中: B_1 为铰接列车宽度,单位为 m,下同; L_1 为铰接列车前端至后轮车轴中心的距离; L_2 为铰接列车挂车的轴距; B_2 为载重汽车宽度; L_0 为载重汽车前端至后轮车轴中心的距离; R_{d1} 为双车道外侧车辆行驶时的外侧端部转弯半径; R_{d2} 为双车道内侧车辆行驶时的外侧端部转弯半径; R 为曲线半径; a_1 为车辆之间的安全距离; a_2 为车辆与路面边缘之间的距离,按照立交细则规定,取 0.25 m。 V 为行驶速度,单位为 km/h。

(4) 计算加宽值 ΔW 。

$$\Delta W = W_n - W_s \quad (10)$$

式中: W_s 为路面标准宽度(行车道+两侧硬路肩,单位为 m)。

2.2 加宽值影响因素

由式(6)~(9)可知,当通行条件和代表车型尺寸确定后,影响加宽值计算的主要因素为曲线半径和设计速度。不同设计速度下路面所需宽度 W_n 随半径的变化趋势见图 2。由于匝道在不同设计速度时圆曲线有最小半径限制,因此对应不同设计速度,其半径变化起始点不同,起点半径值按照立交细则规定选取。

可知,路面所需宽度随半径的增大逐渐减小。当设计速度在 30~40 km/h 范围内减小时,路面所需宽度亦有减小,但减小幅度的不大。当路面标准宽度为立交细则中单向双车道 II 型匝道 9 m 宽度时,一般通行条件下,设计速度 30 km/h、35 km/h、40 km/h 对应的不设置加宽的最小半径

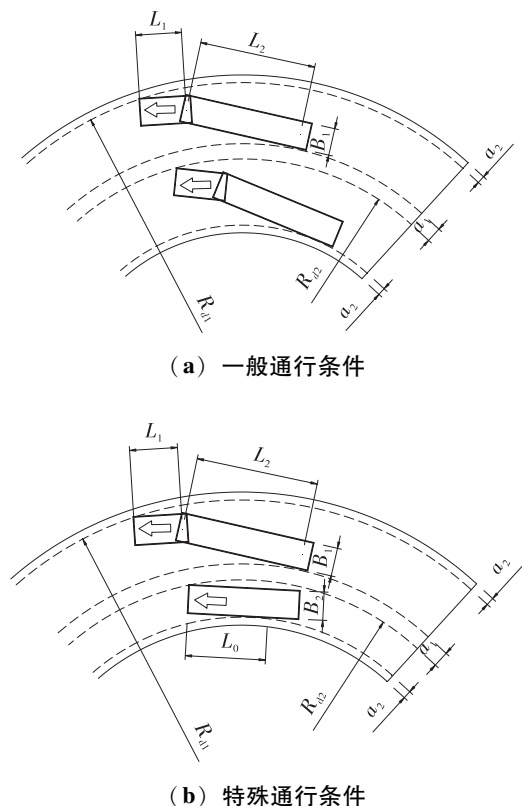
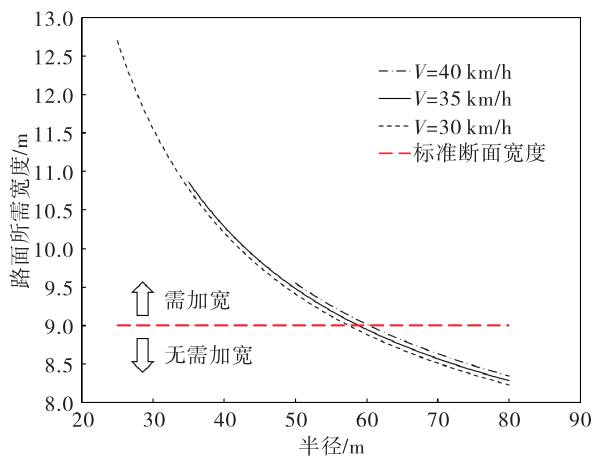
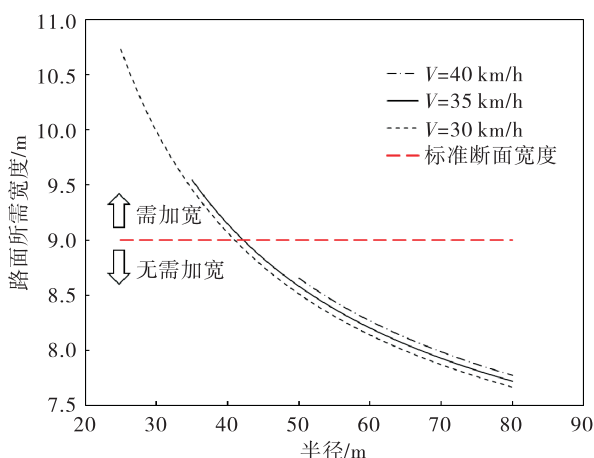


图 1 一般通行条件下车辆布置示意图



(a) 一般通行条件



(b) 特殊通行条件

图2 路面所需宽度变化图

分别为 58 m、59 m、61 m；特殊通行条件下，设计速度 30 km/h、35 km/h 对应的不设置加宽的最小半径分别为 41 m、43 m，设计速度为 40 km/h 时，若圆曲线半径满足立交细则中规定的平面最小半径要求时，即可无需加宽。

2.3 立交细则加宽值修正

由于立交细则在加宽计算时未考虑车辆前悬尺寸，从而导致加宽结果与实际需求存在差异。由本文式 (6)~(8) 计算得到的加宽值与立交细则对比见图 3。此处计算的前提与立交细则保持一致，即曲线半径位置为双车道中心线，通行条件为一般通行条件。可见，立交细则在未计入车辆前悬的计算结果基础上，考虑设计及施工便利性，按每级增加 0.25 m 来规定不同曲线半径下的路面加宽值，该加宽值小于本文考虑车辆前悬尺寸的计算结果。故对立交细则中单向双车道 II 型匝道路面加宽值进行修正，具体修正结果见表 2。

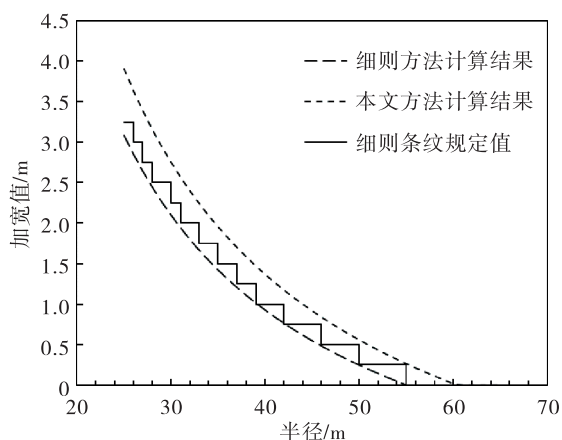


图3 单向双车道 II 型匝路面加宽对比图

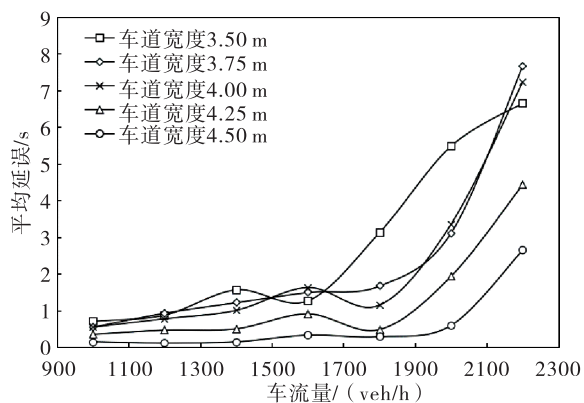
表2 单向双车道 II 型匝路面加宽值表

匝道圆曲线半径 R/m		路面加宽值/m
立交细则	本文计算	
—	$27 \leq R < 28$	3.5
$25 \leq R < 26$	$28 \leq R < 29$	3.25
$26 \leq R < 27$	$29 \leq R < 30$	3.00
$27 \leq R < 28$	$30 \leq R < 32$	2.75
$28 \leq R < 30$	$32 \leq R < 33$	2.50
$30 \leq R < 31$	$33 \leq R < 35$	2.25
$31 \leq R < 33$	$35 \leq R < 37$	2.00
$33 \leq R < 35$	$37 \leq R < 39$	1.75
$35 \leq R < 37$	$39 \leq R < 42$	1.50
$37 \leq R < 39$	$42 \leq R < 44$	1.25
$39 \leq R < 42$	$44 \leq R < 48$	1.00
$42 \leq R < 46$	$48 \leq R < 51$	0.75
$46 \leq R < 50$	$51 \leq R < 56$	0.50
$50 \leq R < 55$	$56 \leq R < 61$	0.25
$R \geq 55$	$R \geq 61$	0

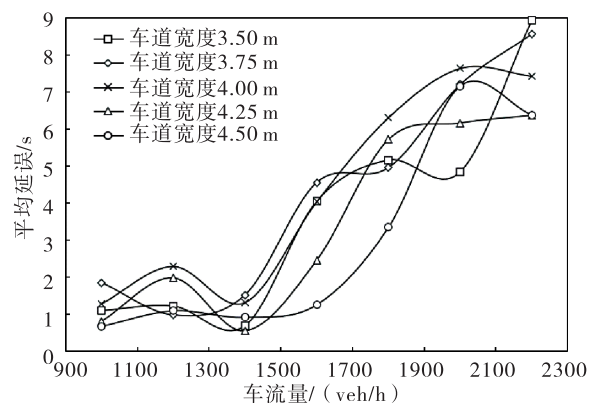
3 单向双车道匝道仿真分析

使用 Vissim 软件对单向双车道匝道在不同行车道宽度下的通行情况进行仿真分析。Vissim 软件对于驾驶行为的模拟主要是通过内置的跟驰模型和车道变换模型来实现，本文中跟驰模型选用 Wiedemann99 模型，车道变换选用自由车道选择模式。分别构建圆曲线半径 R 为 60 m 和 50 m 的单向双车道匝道模型，模拟不同交通流量、不同客货比以及不同车道宽度时的车辆行驶状态，测定匝道模型中某一区段的出行时间，以平均延误值作为评价指标，仿真结果见图 4 和图 5。

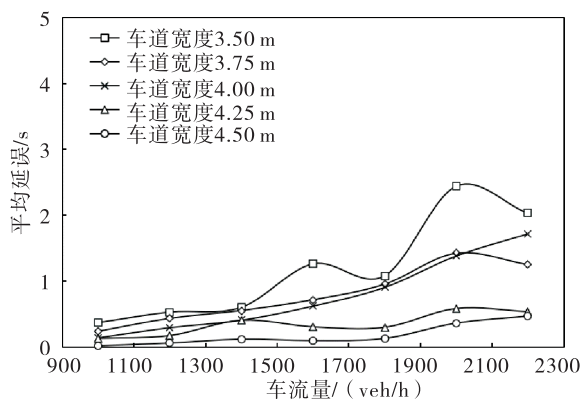
仿真结果表明，在不同客货比条件下，不同车道宽度对于车流量的适应性不尽相同。当匝道半径为 60 m 时，随着大型货车比例的增大，不同车道宽度对应服务水平的差异逐渐明显。其中，



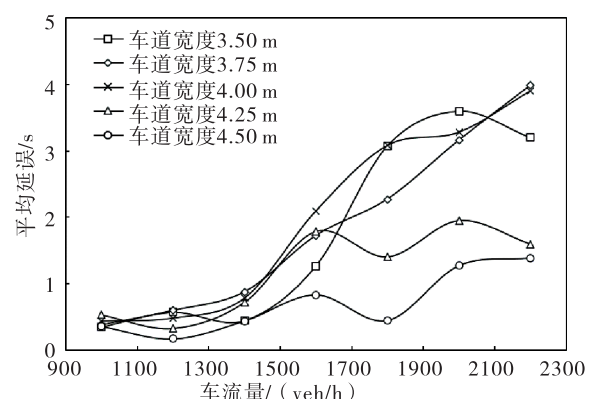
(a) 客货比 6 : 4



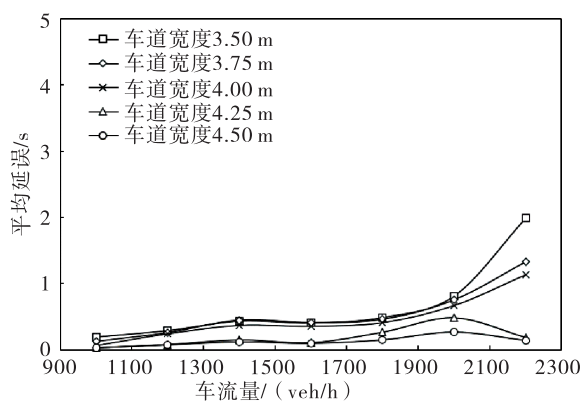
(a) 客货比 6 : 4



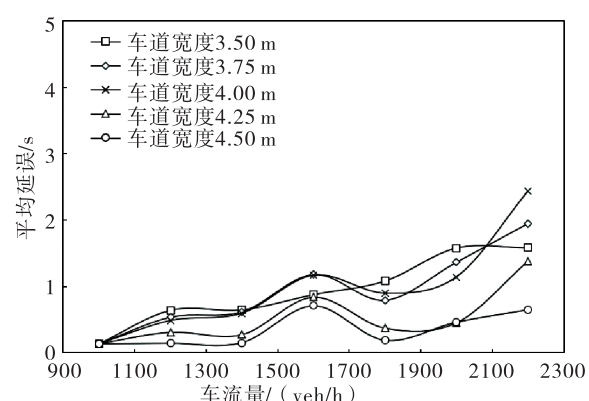
(b) 客货比 7 : 3



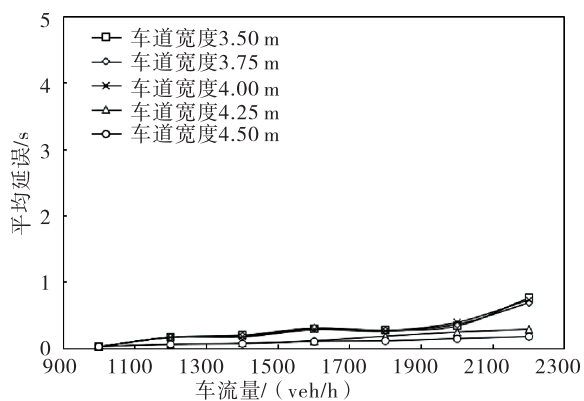
(b) 客货比 7 : 3



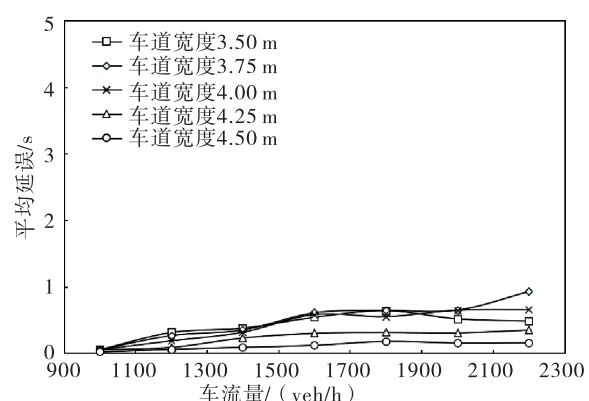
(c) 客货比 8 : 2



(c) 客货比 8 : 2



(d) 客货比 9 : 1



(d) 客货比 9 : 1

图4 $R=60\text{ m}$ 双车道匝道平均延误变化图图5 $R=50\text{ m}$ 双车道匝道平均延误变化图

当客货比为 8:2 时,不同车道宽度对应的平均延误差别不大;而当客货比为 7:3 时,车道宽度 3.5 m 的延误值明显增大,车道宽度 3.75 m 和 4 m 的延误增大幅度大体一致;当客货比为 6:4 时,各车道宽度下保持一定服务水平所能承受的车流量上限区分明显,且均有显著下降。

当匝道半径为 50 m 时,各条件下的延误值较匝道半径 60 m 时均有所增大。其中客货比在 9:1 和 8:2 时,不同车道宽度之间延误水平差别较小;当客货比为 7:3 时,车道宽度 3.5 m、3.75 m、4 m 的延误增大幅度大体一致,车道宽度 4.25 m 和 4.5 m 的延误增大幅度逐级减小;当客货比为 6:4 时,各车道宽度延误均有大幅提高,且保持一定服务平时所能承受的车流量上限已无明显区分。

综上,当实际交通组成中大型货车占比较高

时,不同车道宽度的通行效率之间的差别较为显著,此时合理比选行车道宽度具有一定的技术价值。但当平面线形条件和大型货车占比更为不利时,在 3.5~4.5 m 范围选用车道宽度对通行效率已无明显提升,此时采用小半径双车道匝道是否合适需作进一步研究。

4 工程案例

4.1 项目概况

黄阁互通立交位于广州市南沙区,是连接广澳高速、黄榄快速、市南大道和虎沙大道的大型互通立交。现状黄阁互通在广澳高速一侧为 A 型单喇叭互通型式,喇叭环圈为单圆型,圆曲线半径为 60 m。其中 A 匝道为断面宽度 15.5 m 的对向双车道,具体布置见图 6。

由于近年广澳高速广珠北段车流量日益增长,

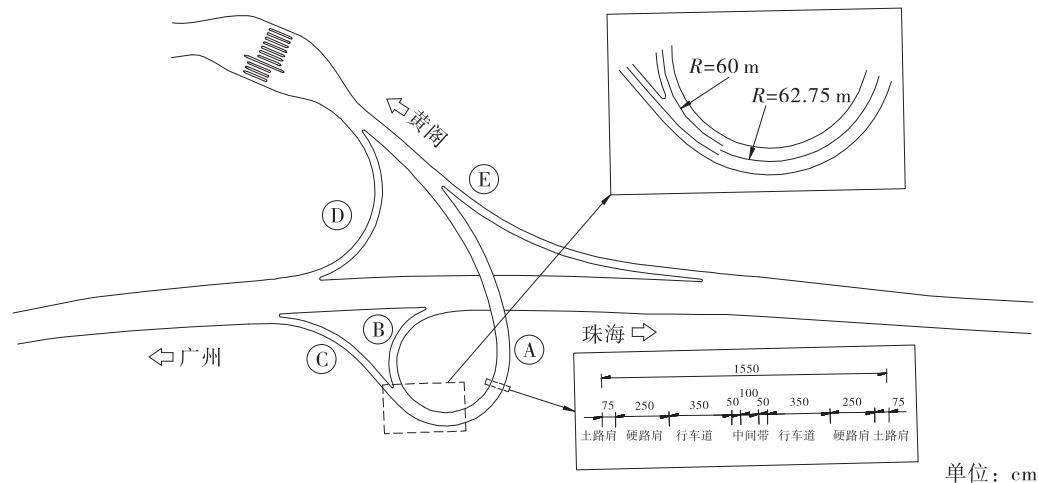


图6 黄阁互通立交平面布置图

且受到周边路网南沙大桥建成通车及虎门大桥限货的影响,黄阁互通立交经常出现严重交通拥堵,其中广州往黄阁方向出口车流因现状 A 匝道平纵指标较低(转弯半径小、纵坡达到 3.8%),重型货车爬坡困难,导致出口车流倒灌至主线,产生严重安全隐患。因此,拟对黄阁互通立交进行改造以解决拥堵问题。其中针对拥堵情况较严重的 A 匝道,考虑到该匝道外侧为主交通流向(广州往黄阁方向)且交通量较大(19 573 pcu/d),拟将匝道外侧由单车道改造为双车道,由于 A 匝道中心线位处圆曲线半径仅为 62.75 m,因此需对匝道外侧路面宽度进行计算。

4.2 改造加宽方案

交通量调查表明,进出黄阁互通的交通组成中货车占比约 40%,其中大型货车占比合计

25.43%,故大型货车并排行驶的概率很高,因此,A 匝道选取的通行条件应确保两列铰接列车能慢速并行通过,将表 3 中各参数值代入式(6)~(8)中,计算得 $W_n = 8.9$ m,即加宽后的 A 匝道外侧路面宽度(行车道+硬路肩)需大于 8.9 m。该计算默认车辆在一般通行条件下会占用硬路肩以完成并排行驶,基于小半径圆曲线上驾驶员的驾驶习惯,若考虑不占用两侧硬路肩宽度,仅将硬路肩留作侧向净宽用,则行车道所需最小宽度为 $W_n - 2a_2 = 8.4$ m。

表3 路面所需宽度计算参数取值表

参数	L_1/m	L_2/m	B/m	R_{d1}/m	R_{d2}/m	$V/(km/h)$	R/m	a_2/m
取值	4.8	11	2.55	67.25	63.5	40	60	0.25

故选定 A 匝道外侧路面宽度为 0.5 m 路缘带

+4.25 m 行车道 +4.25 m 行车道 +1 m 硬路肩 = 10 m > 8.9 m, 即在 3.5 m 标准车道基础上各加宽 0.75 m, 此时行车道宽度 8.5 m > 8.4 m。改造前后的 A 匝道断面见图 7。

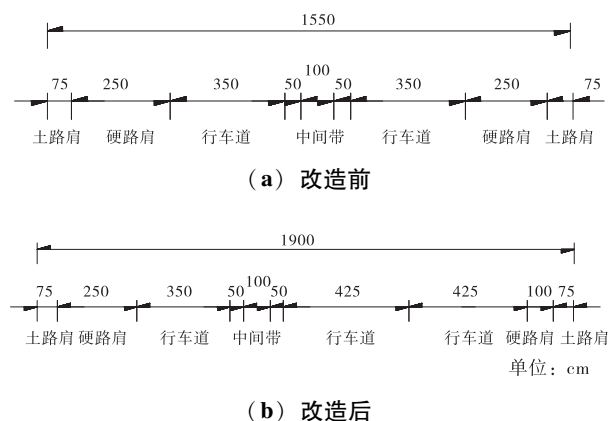


图7 黄阁互通 A 匝道断面宽度图

4.3 改造方案仿真评价

根据黄阁互通实际情况,使用 Vissim 软件构建立交模型对改造方案进行仿真评价。模型几何条件与立交现状平纵保持一致,依据交通量调查及预测情况,输入车辆类型组成和车流量,A 匝道外侧双车道设置为允许变换车道和不允许变换车道两种条件,对比立交出口段在 A 匝道外侧行车道宽度分别为 3.5 m、3.75 m、4 m、4.25 m、4.5 m 时的平均延误情况,仿真结果见图 8。

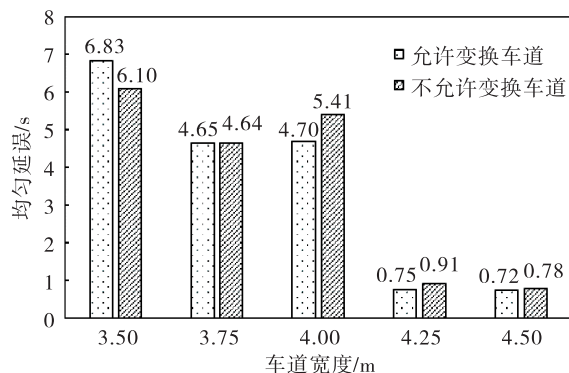


图8 黄阁互通立交出口段仿真结果

结果表明,在黄阁互通立交预测交通条件下,当 A 匝道外侧每个行车道加宽至 4.25 m 时,通行效率显著提升,进一步加宽至 4.5 m 时,提升效果已出现边际效应,该仿真结果与前述理论计算一致。从平均延误值来看,A 匝道外侧是否设白实线限制变换车道对通行效率影响不大,但从仿真模拟实时动态运行情况来看,设置白实线可减少因行驶车辆变换车道导致后车突然制动的情况,从而降低安全事故的概率。

从该案例可见,在进行双车道匝道断面宽度设计时,应根据实际交通组成、圆曲线半径以及车辆实际运行情况合理确定路面加宽值,同时可利用仿真手段对加宽方案进行效果评价。

5 结论

(1) 本文对比了不同规范在加宽计算过程中考虑曲线行驶轨迹掠过宽度、驾驶过程中的摆幅、安全因素等差异,总结出单向双车道匝道的加宽计算方法,该方法可应用于实际工程案例。

(2) 分析表明,路面所需宽度随圆曲线半径增大而减小,随设计速度增大而增大。一般通行条件下,设计速度 30 km/h、35 km/h、40 km/h 对应的不设置加宽的最小半径分别为 58 m、59 m、61 m。由于立交细则未考虑车辆前悬,本文同时对单向双车道 II 型匝道加宽值进行了修正。

(3) 仿真结果表明,当大型货车占比较高时,匝道半径 60 m 时各车道宽度下保持一定服务水平所能承受的车流量上限区分明显,此时进行车道宽度比选具有技术价值,匝道半径为 50 m 时,各车道宽度下通行效率均较低,此时所能承受的车流量上限已无明显区分。

参考文献:

- [1] 许金良. 道路勘测设计[M]. 北京:人民交通出版社,2016:109.
- [2] 中华人民共和国交通部. 公路路线设计规范:JTG D20—2017[S]. 北京:人民交通出版社,2017:69.
- [3] 中华人民共和国交通部. 公路立体交叉设计细则:JTG/T D21—2014[S]. 北京:人民交通出版社,2014:62.
- [4] 日本道路协会. 道路构造令的解说与应用[M]. 东京:日本东京丸善株式会社出版社,2004:254-256.
- [5] AASHTO. A Policy on Geometric Design of Freeway and Stress[S]. Washington, D. C.:AASHTO,2011:216-218.
- [6] 吴明先,周永涛,李星,等. 匝道横断面宽度及加宽位置研究[J]. 公路交通科技,2021,38(09):114-122,140.
- [7] 李大维. 匝道圆曲线路段路面加宽值的计算研究[J]. 交通世界,2020(21):32-33,51.
- [8] 王晓飞,丁振中,刘永,等. 基于 Vissim 建模的高速公路作业区混合车辆上游过渡区空间安全性研究[J]. 公路交通科技,2022,39(12):163-170.
- [9] 张宇,吴忠广,田万利,等. 基于 VISSIM 仿真的高速公路改扩建工作区布设分析[J]. 中外公路,2021,41(03):1671-2579.
- [10] 刘子剑. 互通式立体交叉设计原理与应用[M]. 北京:人民交通出版社,2015:275.