

文章编号:1671-8879(2018)01-0082-07

匝道车道数变化过渡段设计指标

潘兵宏^{1,2}, 刘 斌¹, 周海宇¹, 霍永富¹, 武生权¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘 要:为了研究匝道车道数变化过渡段长度和渐变率, 参照前人研究成果分析匝道车道数变化过渡段的行车特性, 提出利用换道模型研究这 2 个设计指标的方法。首先建立满足过渡段车辆行驶特征的等速偏移余弦曲线换道模型, 并应用德国 UMRR 交通管理传感器的实测数据证明该换道模型的合理性; 然后对该模型中最大横向加速度和最大横向加速度变化率 2 个关键参数进行深入研究; 最后依据该模型, 提出基于设计速度的匝道车道数变化过渡段长度和渐变率 2 个设计指标的推荐值, 采用 CarSim 和 TruckSim 汽车动力学仿真软件分别建立了小汽车和大货车的仿真模型, 利用该模型对提出的推荐值和《公路立体交叉设计细则》(JTG/T D21—2014)(下文简称规范)推荐值进行了对比验证。研究表明: 基于等速偏移余弦曲线换道模型提出的匝道车道数变化过渡段设计指标, 能保证车辆在过渡段沿特定最优轨迹安全、舒适行驶; 规范推荐值仅能满足设计速度 40 km/h 车辆的换道行为, 此时的货车最大横向力系数为 0.142; 当设计速度在 40 km/h 以下, 横向力系数又远低于允许值, 过度段长度浪费; 当设计速度大于 40 km/h 时, 车辆的横向力系数已经超限, 速度达到 80 km/h 时, 横向力系数超限达到 315%, 车辆在这种状态下行驶不安全。鉴于此, 可以推测规范推荐值仅能满足设计速度 40 km/h 的车辆行驶, 高于和低于此速度时, 匝道车道数变化过渡段的指标存在不合理性。

关键词:交通工程; 过渡段指标; 换道模型; 过渡段; 仿真模型

中图分类号:U491.22

文献标志码:A

Design index of transition section of ramp lane number change

PAN Bing-hong^{1,2}, LIU Bin¹, ZHOU Hai-yu¹, HUO Yong-fu¹, WU Sheng-quan¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to study the length and gradual change rate of transition section of ramp lane number change, the driving characteristics of transition section of ramp lane number change were analyzed, and a way to study these two design indexes by using lane changing model was put forward according to the previous research results. Firstly, the lane changing model of constant velocity offset cosine curve satisfying the vehicle running characteristic in transition section was established, and the rationality of the model was proved by using the measured data of UMRR traffic management sensor in Germany. Then two key parameters of the maximum lateral acceleration and the maximum lateral acceleration change rate of the model were studied in depth. Finally, based on this model, the recommended values of design indexes for length and gradual

收稿日期:2017-08-27

基金项目:广东省交通科技项目(220021140079)

作者简介:潘兵宏(1974-),男,湖北黄陂人,副教授,工学博士,E-mail:409291838@qq.com。

change rate of transition section of ramp lane number change based on design speed were proposed, and simulation models of cars and large trucks were built by using CarSin and TrcukSim vehicle dynamics simulation software, respectively. The proposed values were compared with the recommended values of *guidelines for design of highway grade-separated intersections* (JTG/T D21—2014) by using this model. The results show that the proposed design index of transition section of ramp lane number change based on the established constant velocity offset cosine curve model can ensure the vehicle to travel safely and comfortably along the specific optimal trajectory in transition section. The standard recommended values can only meet the lane changing behavior of 40 km/h design speed of the vehicle, at this time, the maximum lateral force coefficient of the truck is 0.142. When the design speed is below 40 km/h, the lateral force coefficient is far below the allowable value, resulting in the waste of length of transition section. When the design speed is greater than 40 km/h, the lateral force coefficient of vehicle exceeds the limit. When the speed reaches 80 km/h, the lateral force coefficient exceeds the limit by 315%, the vehicle is not safe in this state. In view of this, it can be speculated that the standard recommended values can only satisfy the design speed of 40 km/h vehicle. When the speed is above and below 40 km/h, the index of transition section of ramp lane number change is not reasonable. 6 tabs, 7 figs, 22 refs.

Key words: traffic engineering; index section of transition; lane changing model; transition section; simulation model

0 引言

互通式立交作为道路设计的一个重要节点,其设计指标的合理性,直接关系道路交通安全。互通式立交中单出入口的双车道匝道存在车道数变化的过渡段,过渡指标的合理与否既影响行车安全,也影响工程造价。国内外针对立交的研究主要以几何线形设计为主,对于在匝道与主线的衔接处理、交通流线处理是当下研究的重点^[1],而对车道数变化过渡段指标的研究较少。日本《高速公路设计要领》规定:当路面宽度发生变化时,过渡时要避免出现折角,其渐变率应小于 $1/30$ ^[2]。美国伊利诺伊州在《道路设计与环境手册》中规定:当车道数增加或减少时,为保证车辆在车道变化处能安全平稳地过渡行驶,需以一定的渐变率完成过渡,渐变率取值与道路设计速度有关,为 $1/65 \sim 1/50$ ^[3];美国伊利诺伊州《道路设计与环境手册》中对施工区过渡段和不同类型平交口拓宽过渡段长度均做出了详细规定^[4]。金珊珊通过对路面宽度变化处车辆行驶轨迹的分析,论证了利用换道模型分析计算宽度过渡指标的合理性,用圆形换道模型与缓和曲线换道模型计算了不同超高和设计速度下的宽度渐变率,但其使用的模型曲率变化不连续,也没考虑换道时乘客的感受,与实际情况存在一定差距^[3]。张婉鸣通过利用

反向圆形运行轨迹研究了城市交叉口设计时车道数变化过渡段长度,为平交口过渡段指标的取值建立了依据,但其选用的圆形换道模型存在缺陷,仍需完善^[5]。中国规范对此处的规定都相当模糊,《公路工程技术标准》(JTG B01—2014)^[6]和《公路路线设计规范》(JTG D20—2006)^[7]仅从避免线形出现折角规定了主线路面加宽的渐变率,对匝道车道数变化过渡段指标则没有明确规定。《公路立体交叉设计细则》(JTGT D21—2014)(下文简称规范)^[8]中不同设计速度下匝道车道数过渡段长度均采用同一个值(单车道减速车道增加一个车道的过渡段,长度不小于 70 m;双车道减少一个车道的过渡段,长度不小于 60 m),不同匝道设计速度时过渡段设计指标可能不同。不同设计速度条件下,车辆换道需要的距离一般不同,因而过渡段的长度也可能不同于规范。为此,本文采用理论建模分析,结合动力学仿真验证的方法,对匝道车道数变化过渡段的设计指标进行深入研究。

1 基于换道理论的过渡段指标计算模型

通过分析国内外关于宽度变化设计指标的研究成果,结合车道数变化处的车辆行驶特性,一般采用换道模型来计算车道数变化过渡段指标。国外对车

辆换道模型研究较多,大多数模型是以 Cippis 模型为框架分别建立各种适用于公路和城市道路环境的换道模型^[9-12],李珣等为提高道路利用率建立了车路协同换道规则,增加了换道过程中对环境等因素的考虑^[13]。目前,国内外常用的换道模型有以下 4 种:第 1 种是等速偏移模型^[14],该模型存在起、终点处曲率不连续,且换道过程中曲率不变,实际行车中不可能实现的缺点;第 2 种是圆直模型^[15],该模型存在曲率变化不连续,且起、终点曲率不为 0 的问题;第 3 种是缓和曲线模型^[11],该模型认为换道轨迹由两段两端曲率为 0 的缓和曲线组成,因此该模型存在轨迹中点处曲率反向突变的问题;第 4 种是余弦曲线模型^[11],该模型曲率变化均匀,线形连续,是目前常用的换道模型,但其存在曲率最大值出现在换道的起、终点处,与实际行车特点不符的缺点。根据杨建国等的研究成果可知,实际换道过程中应满足 2 条基本原则:换道过程中,行车轨迹的曲率应连续变化,不会发生突变;换道轨迹起、终点的曲率最小为 0^[16]。因此上述 4 种模型均存在不足,不宜直接使用。

针对上述模型的不足,综合等速偏移换道模型和余弦曲线换道模型的优点,本文提出等速偏移余

弦曲线换道模型。其初始数学函数式为 $y = ax + b\cos(cx + d)$,其中一次函数部分表示车辆换道时的横移过程,余弦函数部分表示车辆换道过程中的曲率不间断变化与曲率连续的过程,通过轨迹的边界条件和特征参数可以求出 a, b, c, d 值,可得该模型具体表达式为

$$y = \frac{Wx}{S} - \frac{W}{2\pi} \cos\left[\frac{\pi}{S/2}\left(x - \frac{S}{4}\right)\right] \quad x \in [0, S] \quad (1)$$

式中: y 为车辆换道时车辆横移的距离(m); W 为两相邻车道中线的距离,即车辆换道横移最大距离(m); S 为车辆完成换道所需的纵向距离(m); x 为车辆在 t 时刻行驶的距离(m),即 $dx = vdt$, v 为换道车速(m/s)。

实际行车时,一般驾驶人会连续均匀打方向,确保车辆行驶安全稳定换道,因此车辆轨迹线的曲率是连续变化的。等速偏移余弦曲线换道模型符合车辆轨迹曲率连续变化的特点,该模型的特点如下:曲线上各点的曲率连续变化,无曲率突变点,与大多数驾驶人操作车辆的行为吻合;此模型起、终点曲率为 0,与实际换道的情况相符。一些学者的研究结果认为,换道过程分为 4 个阶段:即扭角阶段、靠拢阶段、收角阶段和调整阶段^[17],其具体换道轨迹见图 1。

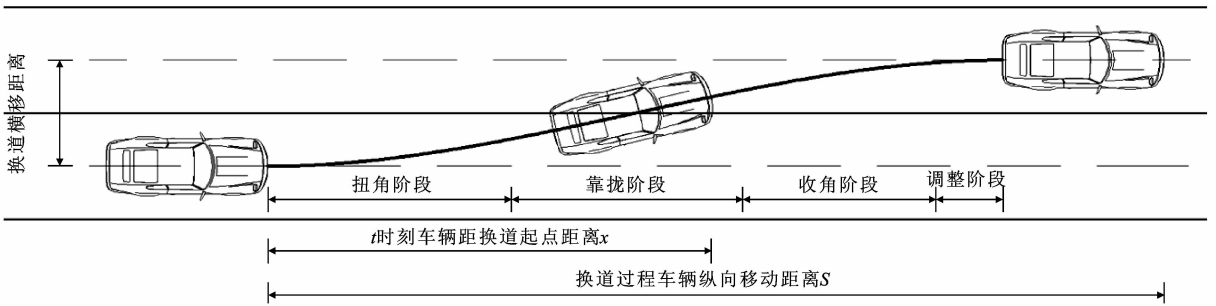


图 1 等速偏移余弦曲线换道模型运行轨迹

Fig. 1 Track of lane changing model of constant velocity offset cosine curve

将式(1)对 t 求导,得

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = W \frac{v}{S} \left\{ 1 + \sin\left[\frac{\pi}{S/2}\left(x - \frac{S}{4}\right)\right] \right\} \\ \frac{d^2y}{dt^2} = 2\pi W \left(\frac{v}{S}\right)^2 \cos\left[\frac{\pi}{S/2}\left(x - \frac{S}{4}\right)\right] \\ \frac{d^3y}{dt^3} = -(2\pi)^2 W \left(\frac{v}{S}\right)^3 \sin\left[\frac{\pi}{S/2}\left(x - \frac{S}{4}\right)\right] \end{cases} \quad (2)$$

车辆行驶过程中要保持安全稳定运行必须保证在任意 t 时刻满足式(3)和式(4),即

$$\frac{d^2y}{dt^2} \leq 2\pi W \left(\frac{v}{S}\right)^2 \leq a_{\max} \quad (3)$$

$$\frac{d^3y}{dt^3} \leq (2\pi)^2 W \left(\frac{v}{S}\right)^3 \leq \alpha_{\max} \quad (4)$$

式中: a_{\max} 为最大允许横向加速度(m/s^2); α_{\max} 为最大允许横向加速度变化率(m/s^3)。

求解式(3)和式(4),得到过渡段长度 S 需满足

$$S \geq \max\left(\sqrt{\frac{2\pi W}{a_{\max}}} v, \sqrt[3]{\frac{(2\pi)^2 W}{\alpha_{\max}}} v\right) \quad (5)$$

则匝车道数变化过渡段宽度变化的最大渐变率 K_{\max} 应满足

$$K_{\max} = W / \max\left(\sqrt{\frac{2\pi W}{a_{\max}}} v, \sqrt[3]{\frac{(2\pi)^2 W}{\alpha_{\max}}} v\right) \quad (6)$$

2 过渡段渐变指标值的确定

2.1 模型中关键参数取值

为了方便研究,需做出如下假设:①因车辆换道

距离和时间较短,可认为换道过程中运行速度基本不变,从安全角度考虑,可取匝道设计速度;②车辆换道过程中无其他因素干扰,即自由换道。

由式(5)可知,在设计速度一定的条件下,影响换道过渡段长度的参数有 3 个,分别是换道横移最大距离、最大允许横向加速度和最大允许横向加速度变化率。

(1)换道时车辆横移最大距离取值

如图 1 所示,换道时车辆横移最大距离 W 等于当前车道与目标车道各半宽之和,中国关于匝道车道宽度的规定仅与设计速度有关,规范中规定了不同设计速度下的匝道车道宽度取值,见表 1。

表 1 匝道车道宽度
Tab. 1 Widths of ramp

设计速度/(km·h ⁻¹)	80	70	60	50	40	35	30
车道宽度/m	3.75	3.75	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50

(2)换道过程中横向加速度取值

车辆在换道时产生离心力,其计算为

$$F=\frac{Gv^2}{gR}=\frac{Ga}{g}\tag{7}$$

式中: F 为横向力(N); a 为汽车运行过程中的横向加速度(m/s^2); g 为重力加速度; R 为曲线曲率半径; G 为汽车所受重力(N)。

一般情况下,匝道路面是单向坡,当车辆向左换道驶离原车道时会出现反向超高 i_h ,其受力情况如图 2 所示,重力的水平分力将增大离心力的作用。图 2 中: β 为路面倾角; f 为路面摩擦力; N_1 、 N_2 为路面的支撑力。

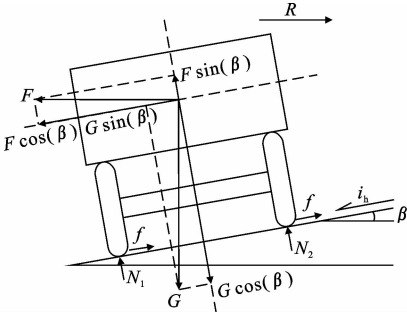


图 2 曲线上汽车受力分析

Fig. 2 Force analysis of car at the curve

因为路面超高 i_h 很小,则有 $\sin(\beta)\approx\tan(\beta)\approx i_h$, $\cos(\beta)\approx 1$,所以车辆的横向力 X 满足

$$X=\begin{cases} G\left(\frac{a}{g}-i_h\right) & \text{正常超高} \\ G\left(\frac{a}{g}+i_h\right) & \text{反向超高} \end{cases}\tag{8}$$

设横向力系数 $\mu=\frac{X}{G}$,参照标准中规定, μ 的取值见表 2。

表 2 不同设计速度下横向力系数取值

Tab. 2 Lateral force coefficients under different design speeds

设计速度/(km·h ⁻¹)	80	70	60	50	40	35	30
横向力系数	0.13	0.14	0.15	0.15	0.15	0.155	0.16

由式(8)可知,车辆行驶在反向超高路面上时,横向加速度 a 取最大值,取值如表 3。

表 3 最大横向加速度 a_{\max} 取值

Tab. 3 Values of maximum lateral acceleration a_{\max}

设计速度/(km·h ⁻¹)	80	70	60	50	40	35	30
不同超高(%)	2	1.078	1.176	1.274	1.274	1.323	1.372
下的 $a_{\max}/$	3	0.980	1.078	1.176	1.176	1.225	1.274
($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	4	0.882	0.980	1.078	1.078	1.127	1.176

(3)换道过程中最大横向加速度变化率取值

横向加速度变化率对行车舒适性影响很大,且在车辆类型、行车环境和超高等因素的影响下,其变化率对行车舒适性的影响有差别。不同国家、不同行业也不同。铁路上一般采用 $0.16\sim 0.3\text{ m/s}^3$ 。公路上因车辆行驶更灵活,可采用较大数值,美国高速公路一般采用 0.61 m/s^3 ,考虑超高的影响,修正后采用 0.305 m/s^3 ;德国在《乡村地区公路标准》中提出采用 0.5 m/s^3 ;英国采用 0.3 m/s^3 ^[18-19];日本在《日本高速公路设计要领》中规定为 $0.5\sim 0.75\text{ m/s}^3$ 。中国高速公路参照日本的规定一般取 $0.5\sim 0.6\text{ m/s}^3$,此外,余守宪等认为人体能承受的最大横向加速度变化率为 $0.4\sim 1.0\text{ m/s}^3$ ^[20],目前国外一些交通系统的最大加速度变化率控制在 $0.7\sim 1.3\text{ m/s}^3$,如日本神户的港口线路取 1.0 m/s^3 ,法国里尔的轻轨铁路取 0.7 m/s^3 ,英国伯明翰的磁悬浮铁路取 1.3 m/s^3 。日本学者认为最大加速度变化率的限值与加速度大小有关系,当加速度在 1.1 m/s^2 以下时,最大加速度变化率取 1.0 m/s^3 时大部分乘客感觉都能接受,当加速度在 1.2 m/s^2 时,最大加速度变化率取 1.0 m/s^3 时有 10% 的乘客感觉不舒适^[21]。根据表 3 可知,车辆运行的最大加速度均在 1.2 m/s^2 左右,因此最大横向加速度变化率取 1.0 m/s^3 时,能满足 90% 的乘客舒适性要求。据此,本文计算的最大横向加速度变化率取 1.0 m/s^3 。

2.2 过渡段渐变指标计算

匝道车道数变化过渡段指标计算时采用等速偏移余弦曲线换道模型,计算时需确定车道宽度、设计速度、最大横向加速度、最大横向加速度变化率 4 个参数。其中,车道宽度和设计速度属于匝道设计的

基本参数;最大横向加速度取值影响行车安全性和舒适性,其大小受反向超高横坡和横向力系数的影响;最大横向加速度变化率取值影响乘客乘车的舒适性和行车安全性,因此在确定过渡段指标时,要合理选取最大横向加速度和最大横向加速度变化率的大小。由最大横向加速度和最大横向加速度变化率控制计算的过渡段长度。

不同设计速度条件下,最大横向加速度和最大横向加速度变化率与过渡段长度的关系见图 3。

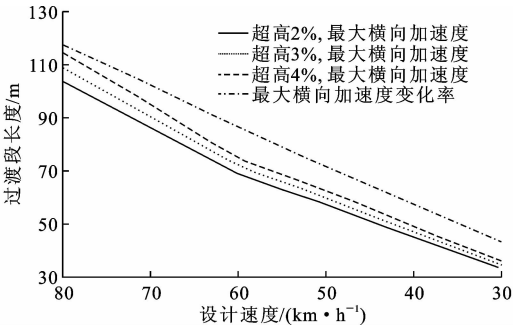


图 3 基于最大横向加速度和最大横向加速度变化率的过渡段长度计算值

Fig. 3 Transition lengths based on maximum lateral acceleration and maximum lateral acceleration change rate

由图 3 可知:考虑最大横向加速度的过渡段长度计算时,反向超高越大,所需要的过渡段长度越长;设计速度越大,所需的过渡段长度越长。因为设计速度越大,横向力系数越小,反向超高越大,对汽车行驶越不利,因而,最大横向加速度取值越小,计算的过渡段长度越长。基于最大横向加速变化率的过渡段长度与设计速度呈正相关,其原因是最大横向加速度变化率主要影响乘客的舒适性。本文最大横向加速度变化率均取 1.0 m/s^3 ,且只考虑设计速度对过渡段长度的影响。同时还可以看出,基于最大横向加速度变化率计算的过渡段长度均大于基于最大横向加速度计算的过渡段长度。因此,取最大横向加速度变化率计算的过渡段长度能保证车辆安全舒适运行,据此得出不同设计速度下匝道车道数变化的过渡段长度和渐变率推荐值,见表 4。

表 4 过渡段长度和渐变率推荐值

设计速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	80	70	60	50	40	35	30
过渡段长度/m	120	105	90	75	60	55	45
渐变率 K	1/32	1/28	1/25	1/21	1/17	1/15	1/13

3 计算结果分析

3.1 换道轨迹验证

为了进一步验证等速偏移余弦曲线换道模型的

合理性,本文利用德国 SMS 公司的 UMRR 交通管理传感器采集了高速公路车辆运行数据,该仪器能够发射雷达波,通过波的多普勒效应记录车辆长度和车辆在不同时刻的坐标和速度。UMRR 交通管理传感器的安装方法见图 4,最后反馈的数据包含以下内容:

MS,表示雷达数据返回的时间间隔。

ID,雷达可自动为每辆车固定一个 ID 值,作为车辆的唯一识别标识。

X,表示测试车辆距离雷达的 X 方向距离。

Y,表示测试车辆距离雷达的 Y 方向距离。

V_x ,表示测试车辆 X 方向的速度。

V_y ,表示测试车辆 Y 方向的速度。

先通过 ID 识别出车辆,再以 MS 对每辆车的坐标进行排序,然后通过 V_x 对不同速度车辆进行分类,最后通过 Y 坐标识别不同 V_x 范围内换道的车辆 ID,然后对同一速度范围的车辆坐标展点后拟合,并绘制拟合的 XY 坐标轨迹。本文仅展示 V_x 处于 $[55\text{ km/h}, 65\text{ km/h}]$ 范围内拟合的换道车辆的 XY 坐标轨迹,见图 5。

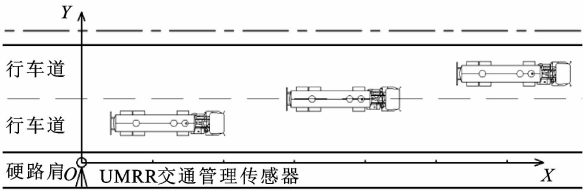


图 4 UMRR 交通管理传感器的安装

Fig. 4 Installation of UMRR traffic management sensor

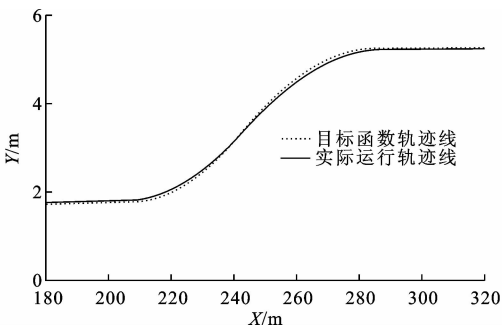


图 5 55~65 km/h 车辆拟合 XY 坐标轨迹

ig. 5 Fitting vehicle coordinate trajectory between 55 to 65 km/h

从图 5 可知:实际运行速度 55~65 km/h 范围内车辆的运行轨迹与本文计算值的最大偏差出现在纵向距离 225、270 m 处,这 2 个点分别位于换道的扭角和收角阶段中部,即车道换道段约 1/4 和 3/4 的位置处,偏差为 0.07 m,根据郭孔辉提出的综合方差评价法的轨迹偏差标准阈值为 $0.3\text{ m}^{[22]}$,可以认

为,实际行驶轨迹线与目标轨迹线基本重合,采用等速偏移余弦曲线换道模型符合实际车辆换道情况;速度 55~65 km/h 范围内车辆换道过程位于 200~285 m,换道长度大约 85 m,证明了本文方法在设计速度 60 km/h 时的推荐过渡段长度是合理的。

3.2 计算结果仿真分析

为验证计算结果的合理性和安全性,本文采用 CarSim 和 TruckSim 车辆动力学仿真软件对小汽车和大货车在匝道车道数变化处的横向力系数进行仿真验证,仿真评价结果采用纵向距离-侧向力系数曲线进行评价。仿真结果发现,小汽车的横向力系数均小于大货车,因此本文中仅列出大货车在不同设计速度时的横向力系数变化情况。仿真大货车簧载质量为 4 500 kg,重心高 1.17 m,额定功率为 225 kW。

图 6 和图 7 为采用 TruckSim 软件仿真模拟大货车在 7 组不同设计速度下,使用本文推荐距离和规范推荐的过渡段指标,建模后换道运行的横向力系数变化曲线,其峰值如表 6 所示。

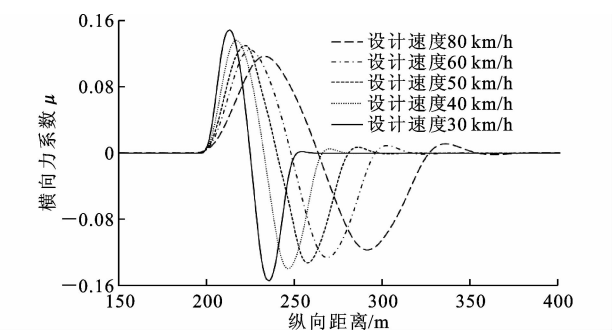


图 6 本文推荐的纵向距离-横向力系数曲线
Fig. 6 Longitudinal distance-lateral force coefficient curves recommended in this paper

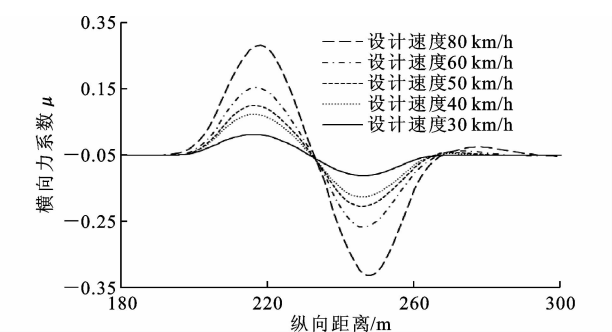


图 7 规范推荐的纵向距离-横向力系数曲线
Fig. 7 Longitudinal distance-lateral force coefficient curves recommended in standard

由表 6 可知:使用本文推荐的过渡段长度指标,仿真得到的大货车最大横向力系数均小于规范的要求,见表 2;采用本文推荐的指标能满足车辆安全舒适行驶的要求。同时从图 6 可以看出:大货车横向

力系数峰值出现在扭角和收角阶段,这是因为车辆在这 2 个阶段的方向角急剧变化,导致横向力系数急剧变化,出现了峰值;峰值随速度减小而增大,这是因为速度越小,过渡段长度越短,导致横向力系数峰值越大。此外,车辆换道时横向力系数变化基本呈余弦曲线,在调整阶段横向力系数有波动,且速度越高横向力系数的波动越大。这是因为在调整阶段,车辆驶入目标车道后会尽量贴合目标车道中线而出现波动,且速度越高,车辆操控难度越高,横向力系数变化越大。

表 6 基于 TruckSim 仿真大货车的最大横向力系数 μ
Tab. 6 Maximum lateral force coefficient μ of truck based on TruckSim simulation

设计速度/(km·h ⁻¹)	80	60	50	40	30
本文推荐指标计算的横向力系数 μ	0.117	0.124	0.130	0.136	0.149
规范推荐指标计算的横向力系数 μ	0.409	0.245	0.175	0.142	0.071

通过对比规范推荐的距离下,仿真大货车横向力系数曲线见图 7,其峰值见表 6。发现规范推荐的渐变段长度仅能满足设计速度 40 km/h 的车辆换道行为,此时大货车最大横向力系数为 0.142;当设计速度小于 40 km/h 时,横向力系数又远低于允许值,造成了过渡段长度浪费的现象;当设计速度大于 40 km/h 时,由表 2 可知,车辆的横向力系数已经超限,速度达到 80 km/h 时,横向力系数超限达到 315%,车辆在这种状态下行驶不安全。鉴于此,可以推测规范推荐值是设计速度 40 km/h 时的值,高于和低于此速度时匝道车道数变化过渡段的指标存在不合理性。

4 结 语

(1)通过分析匝道车道数变化处车辆行驶的特性发现,车辆换道过程中一般都遵循车辆换道轨迹,为此建立了等速偏移余弦曲线换道模型,并采用 UMRR 交通管理传感器采集的大货车换道数据验证该模型的合理性,结果表明,本文提出的换道轨迹符合车辆实际换道运行轨迹,偏差不超过 30 cm。

(2)对模型中最大横向加速度和最大横向加速度变化率 2 个关键参数进行深入研究,最后基于该换道模型,提出了匝道车道数变化过渡段长度和渐变率这 2 个设计指标的推荐值,采用 CarSim 和 TruckSim 汽车动力学仿真软件对过渡段长度和渐变率这 2 个设计指标的推荐值进行仿真验证。仿真结果表明,在匝

道车道数变化过渡段采用本文推荐值能很好地保证车辆沿特定最优的轨迹安全舒适地运行。

(3)利用等速偏移余弦曲线换道模型研究匝道车道数变化过渡段设计指标的方法合理,提出的过渡段长度和渐变率指标可为匝道车道数变化过渡段的合理设计和安全性评价提供参考和支持。

(4)本文研究假定匝道车道数变化过渡段车辆的运行速度不变,今后仍需要结合实例对换道过程中的速度变化进行深入研究。

参考文献:

References:

- [1] 《中国公路学报》编辑部. 中国交通工程学术研究综述·2016[J]. 中国公路学报, 2016, 29(6): 1-161.
Editorial Department of *China Journal of Highway and Transport*. A review of academic research on traffic engineering in China · 2016[J]. *Chinese Journal of Highway Science*, 2016, 29(6): 1-161.
- [2] 日本道路公团. 日本高速公路设计要领[M]. 交通部工程管理局译. 西安: 陕西旅游出版社, 1991.
Japan Highway Public Corporation. The design method of Japanese expressway[M]. Translated by Department of Engineering Management of Ministry of Transport. Xi'an: Shaanxi Tourism Press, 1991.
- [3] 金珊珊. 公路横断面宽度过渡段技术指标研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.
JIN Shan-shan. Study on technical indexes of cross section width of highway[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.
- [4] Federal Highway Administration. Manual on uniform traffic control devices for streets and highways[R]. Washington DC: U.S. Department of Transportation, 2003.
- [5] 张婉鸣. 城市道路交叉口交通组织优化设计研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
ZHANG Wan-ming. Study on design of urban road intersections[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [6] JTG B01—2014, 公路工程技术标准[S].
JTG B01—2014, Technical standard for highway engineering[S].
- [7] JTG D20—2006, 公路路线设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
JTG D20—2006, Design specification for highway alignment[S].
- [8] JTG/T D21—2014, 公路立体交叉设计细则[S].
JTG/T D21—2014, Guidelines for design of highway grade-separated intersections[S].
- [9] 张发, 宣慧玉, 赵巧霞. 基于有限状态自动机的车道变换模型[J]. 中国公路学报, 2008, 21(3): 97-100, 111.
ZHANG Fa, XUAN Hui-yu, ZHAO Qiao-xia. Lane changing model based on finite state automata[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2008, 21(3): 97-100, 111.
- [10] MEHMOOD A. Integrated simulation model for driver behaviour using system dynamics[D]. Waterloo: University of Waterloo, 2004.
- [11] HIDAS P. Modelling lane changing and merging in microscopic traffic simulation[J]. *Transportation Research Part C*, 2002, 10(5): 351-371.
- [12] YANG Q, KOUTSOPOULOS H N. A microscopic traffic simulator for evaluation of dynamic traffic management systems[J]. *Transportation Research Part C*, 1996, 4(3): 113-129.
- [13] 李珣, 曲仕茹, 夏余. 车路协同环境下多车道车辆的协同换道规则[J]. 中国公路学报, 2014, 27(8): 97-104.
LI Xun, QU Shi-ru, XIA Yu. Cooperative lane-changing rules on multilane under condition of cooperative vehicle and infrastructure system[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2014, 27(8): 97-104.
- [14] 李玮, 高德芝, 段建民. 智能车辆自由换道模型研究[J]. 公路交通科技, 2010, 27(2): 119-123.
LI Wei, GAO De-zhi, DUAN Jian-min. Research on lane change model for intelligent vehicles[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2010, 27(2): 119-123.
- [15] 裴玉龙, 张银. 基于低车速的自由式车道变换期望运行轨迹构建[C]//中国城市交通规划学会. 中国城市交通规划 2006 年年会. 北京: 中国城市交通规划学会, 2006: 720-730.
PEI Yu-long, ZHANG Yin. Low-speed based on white-type lane change expectation trajectory[C]//China Institute of Urban Transportation Planning. Proceedings of the Annual Meeting 2006 of China Institute of Urban Transportation Planning. Beijing: China Institute of Urban Transportation Planning, 2006: 720-730.
- [16] 杨建国, 王金梅, 李庆丰, 等. 微观仿真中车辆换道的行为分析和建模[J]. 公路交通科技, 2004, 21(11): 93-97.
YANG Jian-guo, WANG Jin-mei, LI Qing-feng, et al. Behavior analysis and modeling of lane change in traffic micro simulation[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2004, 21(11): 93-97.