

潘兵宏,李翔.高速公路小客车专用单车道加速车道最小长度[J].长安大学学报(自然科学版),2021,41(5):107-117.

PAN Bing-hong,LI Xiang. Minimum length of passenger-car-only-acceleration single lane of highway[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2021, 41(5): 107-117.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2021.05.011

高速公路小客车专用单车道加速车道最小长度

潘兵宏,李翔

(长安大学公路学院,陕西西安710064)

摘要:为了填补客货分离式互通立体交叉设计上的空白,提供相关设计的理论支持,以小客车车辆行驶特征为基础,研究客货分离高速公路小客车专用单车道加速车道的最小长度。首先,在分析主线和匝道设计速度、小客车加速性能等因素对加速段长度影响以及汇入交通流车头时距特征、主线设计通行能力、车头时距最小值等对等待段长度影响的基础上,建立了小客车专用加速车道的加速段、等待段和三角渐变段长度计算模型。其次,通过分析国内外规范中合理的小客车特征速度、加速度等参数,确定小客车专用单车道加速车道最小长度计算模型中的关键指标,通过计算提出了单车道小客车专用匝道加速车道最小长度建议值。最后,分析不同纵坡坡度对小客车合流的影响,提出了上坡加速段纵坡坡度修正系数。研究表明:中国规范规定的加速车道最小长度值仅满足匝道设计速度大于或等于 50 km/h 时的长度要求,当匝道设计速度小于 50 km/h 时,规范规定值无法满足小客车安全汇流的要求,宜适当提高规范规定的最小长度;当加速车道位于上坡时,只需要对加速车道加速段的最小长度进行修正即可,不需要对整个加速车道长度进行修正;平行式加速车道较直接式加速车道三角渐变段更短,且随设计速度的提高,二者之差逐渐增大;从占地角度考虑,平行式加速车道更适用于小客车专用单车道加速车道。

关键词:交通工程;加速车道最小长度;长度建模设计;小客车专用单车道加速车道;客货分离;匝道
中图分类号:U412.33 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-8879(2021)05-0107-11

Minimum length of passenger-car-only-acceleration single lane of highway

PAN Bing-hong, LI Xiang

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to fill the gap in the design of the separation of passenger cars and trucks (SPCT) interchange, and to provide the theoretical support for the relevant design, the minimum length of passenger-car-only-acceleration single lane (POASL) on freeway was studied based on the driving characteristics of passenger cars. First of all, by analyzing effect of the design speed of main lane and ramp, acceleration performance of passenger cars on the acceleration zone, and the effect of the characteristics of time headway of inflow traffic flow, design traffic capacity of main line and minimum headway on the waiting zone, the length calculation model of acceleration zone, waiting zone and triangle gradient section were established. Secondly, by selecting the

收稿日期:2021-04-20

基金项目:河北省重点研发项目(19275601D)

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.

reasonable speed and acceleration characteristic parameters of the passenger cars in the domestic and foreign codes, the key indexes in the calculation model were determined, and the recommended minimum length of the POASL was put forward through calculation. Finally, the influence of different longitudinal slopes on the confluence of passenger cars was analyzed, and the longitudinal slope correction coefficient of the acceleration zone was proposed. The results show that the minimum length of the acceleration lane specified in Chinese code merely meets the requirements of the design speed of the ramp is greater than or equal to 50 km/h. If the design speed of ramp is less than 50 km/h, the standard value is too short to meet the requirements of safe confluence. Therefore, it is appropriate to increase the minimum length of acceleration specified in code appropriately. When an acceleration lane is located uphill, only the minimum length of the acceleration zone needs to be corrected, rather than the entire length of acceleration lane. The parallel acceleration lane is shorter than the directly-linked type acceleration lane, and the difference between them increases with the enlargement of design speed. Considering occupation, the parallel acceleration lane is more economical for POASL. 9 tabs, 8 figs, 28 refs.

Key words: traffic engineering; minimum length of acceleration lane; calculation model of length; POASL; SPCT; ramp

0 引言

高速公路互通式立体交叉区是事故高发区(以下简称“互通”),加速或减速车道的分流与合流处极易发生交通事故。根据调查显示,分流区和合流区是交通事故的高发处,容易造成汽车追尾和刮蹭^[1]。为了提高分、合流区的安全性,可对客、货车分别采取分、合流的交通组织方式,使客、货车之间做到互不干扰。然而,目前国内外针对客货分离互通变速车道相关设计指标的研究较少,缺少相应的规范或标准以指导相应工程的前期设计、施工建设以及后期运营管理。因此,有必要对客货分离互通变速车道长度展开研究。

国外对于客货分离道路的研究与实践较早,早在 20 世纪 80~90 年代, Janson 等对客货分离形式、分道标准、线形指标等方面进行了深入研究^[2-3]。唐国才在阐述客货分离概念的基础上,以高速公路为研究对象,确定了专用车道的代表车型,并重点对客车、货车专用道路几何设计指标进行了研究^[4]。单东辉等依托中国某客货混合行驶互通改建为客货分离互通的工程项目,以交通冲突理论为基础,量化得到了客货分离互通不同类型合流段的合理间距^[5]。

国内外学者针对变速车道长度展开了大量研究。如美国国家公路与运输协会(AASHTO)提出,主线和匝道的平均速度会影响加速车道的长度,且

对不同设计速度下加速车道的长度做出限制^[6]。但 AASHTO 中仅对加速车道总长度提出建议值,并未对加速车道长度计算模型进行细化。Liu 等以小客车为研究对象,同时考虑货车的影响,基于二次减速理论,将车流在互通入口范围内的减速过程大致分为 3 个部分:第一减速段、第二减速段、三角过渡段,并计算得到减速车道的长度^[7]。但其对于加速车道形式的划分未开展研究。Yang 等考虑到 AASHTO 方法不足,提出一种新型匝道加速车道的计算方法,通过实测美国加利福尼亚州 7 个样本匝道的车辆实际行驶数据,基于新提出的分段恒定加速度模型,建立了每个匝道的距离-速度曲线并拟合生成回归模型,进而确定了不同运行速度下的加速车道长度;且分别提出使用于小客车与货车推荐的加速车道长度^[8]。Keys 等研究车辆性能的提升对加、减速车道的影响,利用视频和 GPS 相结合的方法来衡量小客车性能和驾驶人特征,提出大多数驾驶人更倾向于利用现有加、减速车道的全长来完成合、分流,而不是利用车辆提升的性能^[9]。Nie 等根据周围车辆的加速度、速度情况与车辆自身的实时状态,提出了一种适用于自动驾驶车辆的横向变道控制策略,该策略综合考虑车道变换效率、车辆稳定性和车辆舒适性,得到了自动驾驶车辆的安全换道轨迹^[10]。Zhou 等根据合流区主线车道的车头时距分布,基于接受间隙理论,建立了左入加速车道车辆并入主车道的概率模型,并根据车辆不同运行速

度和合并概率计算得到左入加速车道长度^[11]。

中国学者对加速车道指标研究较为深入。张驰等基于8条样本匝道的实测数据,将小客车速度作为分析样本,利用SPSS软件回归分析,建立了小客车在高速公路互通立交单车道入口处合流点及加速车道终点处运行速度预测模型,且回归模型通过了显著性检验^[12]。赵春等提出了在不同主线车流量下,车辆汇流驶入主线的概率模型;并基于不同主路和匝道设计速度、服务交通量,得到加速车道长度^[13]。但对于加速车道汇入主线的形式,其只是简单地延用日本规范提出的计算模型。智永锋等基于可接受间隙及最小车头时距理论,分析了合流区的通行特征与通行能力,并提出了入口匝道交通流控制模型^[14]。但其未详细阐述加速车道的计算方法,也没有分析速度、加速度参数的取值。孔令臣以多车道高速公路加减速车道为研究对象,结合小客车与大货车的加速性能,给出多车道高速公路变速车道长度的推荐值^[15]。但其研究的交通流仍为客货混行交通流,且可插入间隙相关参数取值也采用美国、日本规范的取值。李文权等以城市快速路平行式加速车道为研究对象,结合运动学模型和可接受间隙理论,提出了一种基于期望初始速度和期望主线交通水平的加速车道长度计算方法^[16]。但其研究将合流过程过度简化,不适用于高速公路加速车道的计算。《公路路线设计规范》(JTGD20—2007)^[17](下文简称《规范》)和《公路立体交叉设计细则》(JTGTD21—2014)^[18](下文简称《细则》)虽规范了加速车道设计指标,但其研究的代表车流仍为客货混行交通流。按照《规范》要求,互通加速车道长度仅根据主线设计速度来确定,并未考虑匝道设计速度的影响。这仅适用于车流量不大、主线设计速度与匝道设计速度相差不大的情况;但若匝道设计速度过低而主线设计速度过大,采用现有加速车道最小长度可能不满足入口车辆加速的需求,增加了车辆驶入主线而引起事故的风险。

综上,当下高速公路加速车道的计算模型,均是对客货混行的互通加速车道长度的研究,缺乏针对小客车专用加速车道长度的相关研究。鉴于目前客货分离高速公路建设需求、客货分离互通的发展趋势,以及当前规范相关规定与专供小客车行驶的加速车道车型特点不相适应的现状,本文将针对现有加速车道长度设计方法存在的不足,借鉴国内外已有相关成果,基于现有的标准规范以及设计方法理

论,提出适用于高速公路小客车专用单车道的加速车道最小长度计算方法。一方面,借鉴车辆动力学理论、可插入间隙理论,建立加速车道计算模型;另一方面,根据国内外规范的取值以及实测数据分析,确定适用于小客车车型特点的参数取值。通过计算得到高速公路小客车专用单车道的加速车道最小长度指标,并对比现有规范的取值,为中国客货分离(SPCT)高速公路互通的小客车专用加速车道的设计提供参考。

1 小客车专用加速车道形式及影响因素分析

1.1 加速车道形式

加速车道的作用是为了使车辆提升速度,帮助从匝道驶来的车辆顺利并入主线道路。加速车道可设置为直接式、平行式2种类型。《细则》中规定:单车道加速车道宜采用平行式;当流入和直行交通量小,且加速车道全长利用率较小时,单车道加速车道可采用直接式。由于单车道直接式加速车道受限较多,一般不被采用,因此,平行式加速车道为本文研究重点。

1.1.1 平行式加速车道

平行式加速车道一般设置在主线车道的外面,且其车道范围的平纵线形指标实际上和主线相平行,如图1所示。在行驶过程中,车辆换道的情况至少会存在一次,并且会出现S形的行驶线路。在加速汇流的过程中,平行式加速车道的设置能够帮助驾驶人准确获取主线车流量、车头时距的情况,同时给驾驶人提供较为富余的空间选择汇入主线的时机,从而大大提高了车辆汇入主线的安全性。

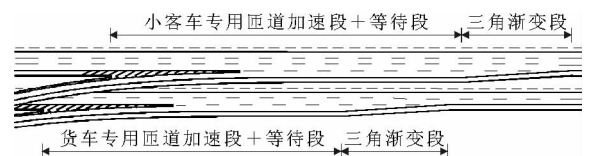


图1 客货分离互通平行式加速车道

Fig. 1 Parallel acceleration lane of SPCT interchange

1.1.2 直接式加速车道

《细则》中规定,当单车道加速车道的流入和直行车流量小且加速车道全长利用率极小时,也可采用直接式加速车道,其设置在主线的外侧位置,通过调整渐变角度以达到车辆汇入主线的目的,如图2所示。若主线的车流量很小,则驾驶人可以直接在车头时距间隙很大的时候汇入到主线。这种操作方

式,降低了驾驶操作负荷,而且对其他车辆的行驶没有太大的阻碍。若车流量很大,那么位于匝道上的车辆可在加速段及辅助车道继续行驶,找到合适时机汇入主线。

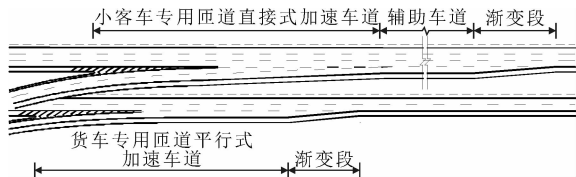


图2 客货分离互通直接式加速车道

Fig. 2 Directly-linked acceleration lane of SPCT interchange

1.2 加速车道长度影响因素分析

影响客货分离互通小客车专用加速车道长度的主要因素是汇流区相邻车道交通量及车头时距、合流鼻附近主线和匝道上车辆运行速度、小客车的加速性能等。

1.2.1 汇流区相邻主线车道车流量、车头时距

研究可知^[19],在与匝道邻近的主线最外侧车道,车头时距服从爱尔朗分布,与此同时,爱尔朗分布的阶数也会随着车流量的增加而增加。当主线最外侧车道的车流量低于 250 veh/h 时,车头时距服从 1 阶爱尔朗分布;若在 250~500 veh/h 范围内,爱尔朗分布阶数为 2 阶;若超过 500 veh/h,则车头时距服从 3 阶爱尔朗分布。

因此,当合流区主线位置上的车流量很少时,车头时距较大,在这种状态下车辆完成合流的几率很高。反之,若车流量很大就会导致车头时距减小,能够支持车辆汇入车道的长度就会缩短,车与车之间的干扰也会增加,加速车道长度就需要延长。

1.2.2 匝道车辆运行速度及加速性能

根据立交设计要求,汇入主线之前,合流车辆需要加速,使运行速度达到主线设计速度的 50%~70%。车辆的运行速度、加速性能会影响加速车道的长度,即车辆加速性能越好,则在合流鼻处运行速度越高,车辆加速至主线设计速度所需时间越少,加速车道就越短。

2 计算方法

2.1 长度计算模型

若主线车流量很少,车辆进入主线的安全性会提升。反之,当主线车流量增加,车辆汇入难度也不断提高。若匝道上的车辆加速到能够进入主线的速度时,受主线车流量较大的影响,导致车辆被迫减

速,最终导致汇流延误^[20]。因此,驾驶人应该实时掌握主线车流量情况,等到可汇入间隙出现时,才能安全汇入主线。

因此,加速车道长度一般应由车辆加速段长度 L_1 、等待段长度 L_2 及三角渐变段长度 L_3 组成,如图 3 所示。其中,加速段是供小客车加速至安全汇流速度所需的最小长度;等待段为车辆寻找主线安全合流间隙时所行进的路程;而设置三角渐变段,其目的是为行驶到等待段末端的车辆横移进入主线提供空间。

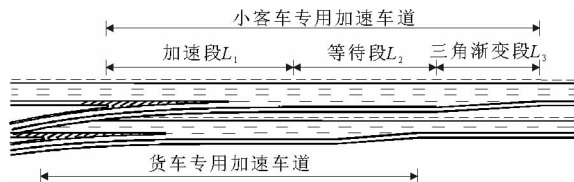


图3 客货分离互通加速车道构成部分

Fig. 3 Components of acceleration lane of SPCT interchange

2.1.1 加速段长度 L_1

根据上述分析可知,计算加速段长度需先确定车辆在加速车道上行驶的加速度。小客车在行驶过程中,受到道路滚动产生的摩擦力、车辆自身重力、风力阻力、道路纵坡坡度等多种因素的影响,如图 4 所示,各因素在 XOY 坐标系中产生的分项加速度共同构成车辆的合成加速度。

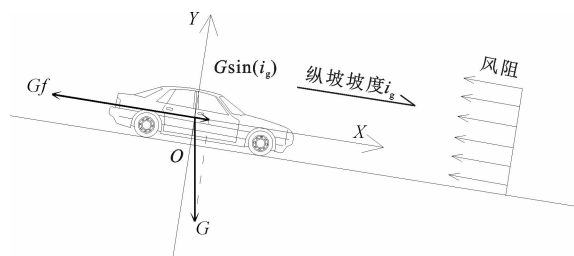


图4 加速车道上小客车受力分析

Fig. 4 Force analysis of passenger car in acceleration lane

风阻力的大小受车辆迎风面积、车辆与风之间相对速度、空气阻力系数等因素的影响。考虑风阻力的区域差异性较大,且计算风阻力的复杂性较高,为简化计算模型,本文不考虑风对车辆加速行驶的影响。车辆加速度为

$$a_{ac} = a_j - \frac{Gf \pm G\sin(i_g)}{m} \approx a_j - g(f \pm i_g) \quad (1)$$

式中: a_{ac} 为小客车在加速车道中的加速度(m/s^2); f 为路面滚动摩阻力系数(取 0.01~0.02); G 、 m 分别为车辆重力(N)、质量(kg); i_g 为道路纵坡坡度(%) ; g 为重力加速度($9.8 m/s^2$); a_j 为小客车的发

动机额定加速度(m/s²)。

当加速车道纵坡坡度一定时,车辆从合流鼻端运行速度加速至安全汇流所需运行速度,这一过程所行驶的距离计算如下

$$L_1 = \frac{v_h^2 - v_c^2}{2(a_j + g(f \pm i_g))} \quad (2)$$

式中: v_h 、 v_c 分别为小客车安全汇流所需运行速度(km/h)、合流鼻端小客车运行速度(km/h),运行速度参数取值见第 2.2 节。

2.1.2 等待段长度 L_2

在主线最外侧车道上,小客车的车头时距服从 N 阶爱尔朗分布^[19],而且大部分处于专用匝道的的小客车会选择在加速车道的中间位置并入主线;换言之,距合流鼻端 60~180 m 区间内,驾驶人选择合流的可能性较高^[21]。在设计服务水平下,合流区大部分位置(50~200 m 内)均遵照 3 阶爱尔朗的分布^[22],具体概率密度函数 $f(\cdot)$ 如下

$$f(t) = 13.5\lambda^3(t - \tau)e^{-3\lambda(t - \tau)} \quad (3)$$

式中: t 为车辆由加速车道汇入主线的横移时间,取 3~4 s^[23]; λ 为主线最外侧车道单位时间内车辆的平均达到率,本文中 $\lambda = Q/3\ 600$ (veh/s), Q 为设计服务水平下主线单车道的最大服务交通量,具体取值见表 1; τ 为汇流车道车头时距最小值(s)。

最小车头时距应满足同向行驶相邻两车的紧急制动最小安全距离^[24],即

$$\tau = t_1 + t_2 + 3.6L/V \quad (4)$$

式中: t_1 为驾驶人反应时间,取 1.0 s; t_2 为协调制动时间,取 0.4 s; L 为车长,小客车取 6 m; V 为车辆行驶速度,取主线设计速度。

则合流区车头时距 $h \geq t$ 的概率 $P(\cdot)$ 如下

$$P(h \geq t) = [4.5\lambda^2(t - \tau)^2 + 3\lambda(t - \tau) + 1]e^{-3\lambda(t - \tau)} \quad (5)$$

变换车道的车辆在等到 1 个可插入间隙前,必然拒绝了 j 个不可插入间隙,则拒绝不可插入间隙的平均个数 \bar{n} 为

$$\bar{n} = \frac{1 - P(h \geq t_c)}{P(h \geq t_c)} \quad (6)$$

式中: t_c 为临界最小可插入间隙值,一般取值为 3.0~4.0 s^[25],具体取值见表 1。

其中,每个拒绝汇入间隙的平均时长 \bar{H} 为

$$\bar{H} = \frac{\int_{\tau}^{t_c} t f(t) dt}{1 - P(h \geq t_c)} \quad (7)$$

综合上述计算的每个拒绝汇入间隙的平均时长

及平均个数,能够得到平均等待时长 t_w ,具体计算如下

$$t_w = \bar{H}\bar{n} = [2(1 + \lambda\tau) - (9\lambda^3 t_c^3 + 9(1 - 2\lambda\tau)\lambda^2 t_c^2 + 3(3\lambda^2 t_c^2 - 4\lambda\tau + 2)\lambda t_c + 3\lambda^2 t_c^2 - 4\lambda\tau + 2)e^{-3\lambda(t_c - \tau)}] / [2\lambda(4.5\lambda^2(t_c - \tau)^2 + 3\lambda(t_c - \tau) + 1)e^{-3\lambda(t_c - \tau)}] \quad (8)$$

项乔君等通过对汽车紧急制动过程进行全面分析和研究后提出,汽车紧急制动的主要阶段包括反应阶段、协调制动阶段、持续制动阶段;并确定了制动期间各个阶段的速度、减速度及停车距离,在满足同向行驶的两车不相撞的安全距离前提下,提出行车间距与时距计算模型,同时明确在紧急制动过程中为保证汽车安全行驶应保持的最小车头时距,如式(4)所示^[24]。

表 1 等待段相关参数取值

Tab. 1 Values of relevant parameters of waiting zone

主线设计速度/(km·h ⁻¹)	120	100	80
车头时距最小值/s	1.580	1.616	1.670
可插入间隙/s	3.50	3.75	4.00
平均到达率/(veh·s ⁻¹)	0.458	0.444	0.417
每车道最大服务车流量/(veh·h ⁻¹)	1 650	1 600	1 500

因此,在交通流等待汇入时,以安全汇流行驶速度 v_h 为平均速度行驶情况下,得到等待段长度 L_2 ,计算如下

$$L_2 = \frac{v_h}{3.6} t_w \quad (9)$$

2.1.3 三角渐变段长度 L_3

根据研究可知^[26],在互通合流区域内,加速车道长度需满足小客车正常换道 1 次的行车轨迹,同时将车辆完成换道行驶的距离作为加速车道三角渐变段总长度。当前,国内外有关变速车道三角渐变段长度计算主要以 AASHTO 规定为依据。

本文根据 AASHTO,最终确定满足车辆横移 1 个车道宽度所需的行驶距离为平行式加速车道三角渐变段的长度,即

$$L_3 = \frac{v_h t}{3.6} \quad (10)$$

2.1.4 小客车专用单车道加速车道最小长度计算模型

基于各部分长度计算模型,本文小客车专用单车道加速车道长度 L_c 采用下式计算

$$L_c = L_1 + L_2 + L_3 = \frac{v_h^2 - v_c^2}{2(a_j + g(f \pm i_g))} + \frac{v_h t_w}{3.6} + \frac{v_h t}{3.6} \quad (11)$$

根据式(11)可知,客货分离互通小客车专用加速车道长度,是通过安全汇流运行速度、加速度以及合流鼻端运行速度等参数获得的。由于 a_j 仅取决于小客车发动机性能, f 仅取决于路面材质,因此当道路纵坡坡度为定值时,加速车道长度仅受 v_h 、 v_c 的影响。安全汇流运行速度、合流鼻端运行速度对加速车道长度的敏感性如图5所示。其中, a_j 根据日本规范方法^[23]取在设计速度平均值为50 km/h下的加速度 0.47 m/s^2 , f 取 0.01 , g 取 9.8 m/s^2 ;假定纵坡坡度为平坡, t_w 与 t 均取一定值(4 s),安全汇流速度取决于主线设计速度,取 $60\sim 80 \text{ km/h}$,合流鼻端运行速度取决于匝道设计速度,取 $30\sim 80 \text{ km/h}$ 。由图5可知, v_h 越大, v_c 越小,即合流鼻运行速度与安全汇流所需运行速度差值越大时,在加速度一定的情况下,小客车所需加速时间越长,加速车道长度取值就越高。由于速度参数对加速车道长度影响较为明显,需对其取值进行论证分析。

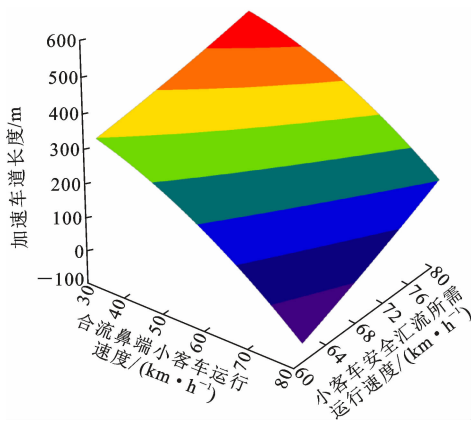


图5 v_h 与 v_c 对加速车道长度 L_c 的影响

Fig. 5 Impact of v_h and v_c on L_c

2.2 小客车特征参数确定

2.2.1 小客车合流鼻端运行速度 v_c

根据《日本高速公路设计要领》与中国《细则》相关内容可知,客货混行互通合流鼻端运行速度即匝道设计速度^[23],对AASHTO相关内容进行分析时发现,合流鼻端运行速度为匝道设计速度的 $85\%\sim 95\%$ 。综合国内外对车辆安全性、连续性以及舒适性的研究,本文将匝道设计速度 $80\%\sim 100\%$ 作为小客车专用匝道加速车道合流鼻端运行速度。若小客车专用匝道设计速度处于较低水平,此时取高限;若匝道设计速度较高,则取低限,具体数据详见表2。

2.2.2 小客车安全汇流所需运行速度 v_h

为了保证安全合流,需考虑合流车辆与主线车

表2 小客车专用加速车道合流鼻端运行速度 v_c

Tab. 2 Operation speeds of vehicle in merging

匝道设计速度	gore nose of POASL					
	30	40	50	60	70	80
合流鼻端运行速度	30	40	50	60	65	70

辆的速度一致性。若2种车流运行速度差过大,在一定程度上会影响安全性。在车辆实际驾驶过程中,合流过程的主观性较大,即驾驶人认为当前车速及时机均满足汇入条件,则会将车辆驶入主线,所以车辆的驾驶舒适性、安全性以及运行速度协调性是影响车辆合流速度的主要因素。

小客车合流应该实现的安全运行速度即 v_h 。日本利用实测数据及相关研究提出,安全合流速度集中在 $60\sim 70 \text{ km/h}$;当前中国有关合流速度的取值亦参考日本规范;而AASHTO对安全汇流速度的要求较高,如表3所示。由相关研究^[27]可知,在互通加速车道中段车辆运行速度最高可实现 $60\sim 75 \text{ km/h}$,且在加速车道终点,运行速度可达 80 km/h 。为了提升互通合流区安全性,参考国内外有关安全汇流速度相关规定,同时衡量样本互通小客车交通流运行速度的分布,最终确定小客车专用加速车道安全汇流速度,见表3。

表3 小客车专用单车道加速车道安全汇流速度 v_h

Tab. 3 Safe merging speeds of POASL

主线设计速度	120	100	80
日本安全汇流速度	70	65	63
美国安全汇流速度	88	77	63
本文小客车安全汇流速度	80	70	65

2.2.3 小客车加速度 a_j

小客车的加速度参考日本基于平坦地区行驶加速度的计算方法,如式(12)所示

$$a_j = \frac{dv}{dt} = \frac{g}{1+\epsilon} \left(\frac{125\eta B_{HP}}{6mgv} - \mu - \frac{3.6RA}{m} v^2 \right) \quad (12)$$

式中: η 为机械效率; μ 为滚动摩擦因数; A 为汽车的正面投影面积(m^2); B_{HP} 为有效输出功率(kW); ϵ 为加速阻力比; R 为空气阻力系数($\text{kg}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$); v 为合流鼻端运行速度与安全汇流速度的平均值(km/h)。

因此,本文中 $\epsilon=0.05$, $\eta=0.9$, $m=14\ 000 \text{ kg}$, $\mu=0.01$, $R=0.03 \text{ kg}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$, $A=6.2 \text{ m}^2$, B_{HP}/m 的数值为 0.975 m/s ,最终得到加速度、平均行驶速度的关系式

$$a_j = \frac{29.484}{v} - 0.0933 - 0.00000957v^2 \quad (13)$$

根据合流鼻端运行速度与安全汇流速度的平均值,完成车辆加速度的计算,结果见表4。

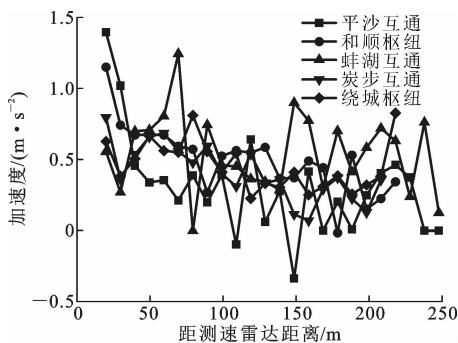
表4 小客车计算加速度

Tab. 4 Calculated acceleration of passenger cars

速度平均值/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	75	70	65	60	55	50	45
计算加速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	0.25	0.28	0.32	0.36	0.41	0.47	0.54

由于日本规范制定的时间过于久远,因此,需考虑目前汽车实际的加速性能以确定小客车在加速车道上的加速度。根据汽车性能专业评测中心提供的数据^[28],小型车百公里加速时间大部分介于5~16 s,即加速度介于 $1.73 \sim 5.55 \text{ m/s}^2$ 。对比表4中数据,显然日本规范的加速度过小,已不适应当前实际车辆的加速性能;但小客车在加速车道中行驶时,亦不会最大限度的踩踏油门以获取最大加速度。因此,需分析实测加速车道的车辆加速度。

倪旭采用UMRR链式开普勒雷达测速仪来获取样本立交上车辆的速度、加速度等试验数据,在和顺枢纽互通等5个样本互通上架设测速仪,以距测速仪每20 m间隔为1个测速断面,记录小客车加速度变化趋势^[27],如图6所示。

图6 样本互通加速车道的小客车加速度变化趋势^[27]Fig. 6 Variation tendencies of acceleration of passenger cars of acceleration lane in samples interchange^[27]

可见,在加速车道上行驶的加速度会随着车辆与雷达距离的增加趋于稳定。除个别情况外,车辆加速度的范围基本上是在 $0 \sim 1.5 \text{ m/s}^2$ 之间,并且减速的情况相对较少。除此之外,加速车道前半部分的交通流引起的加速度波动幅度都要比后半部分大。

沿用日本规范的加速度指标已经不能符合实际的情况,本文考虑了当前小客车加速性能的提高,基于实测加速度数据,并衡量驾驶人能够保持高速驾驶的期望,在选用小客车加速度时应适当提高计算加速度及其范围,见表5。

表5 本文小客车加速度

Tab. 5 Acceleration of passenger cars in this paper

匝道设计速度/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	30	40	50	60	70	80
本文小客车加速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	0.90	0.85	0.80	0.70	0.60	0.50

3 小客车专用匝道单车道加速车道最小长度指标

3.1 单车道加速车道长度

3.1.1 加速段长度

根据加速段长度的计算模型(式(2))、典型参数分析,可得加速段长度变化规律,如图7所示。

从图7可以看出,加速段长度和匝道设计速度之间呈现负相关性,即匝道设计速度增加,则加速段长度减少。这是因为匝道与主线速度差越大,车辆加速到汇流速度的时间越久,所需加速车道长度则越长。而且长度也会受到匝道纵坡坡度的正、负影响,按照坡度从正到负的顺序变化,加速车道长度会呈现递减的规律。

3.1.2 等待段长度

根据等待段长度的计算模型(式(9)),由小客车安全汇流速度以及平均等待时间可计算得到小客车专用单车道加速车道等待段长度,见表6(长度取5的倍数)。由表6可以看出,随着主线设计速度 V_d 的提高,安全汇流速度越高,平均等待时间越长,所需等待段长度越长。

表6 小客车专用单车道加速车道等待段和三角渐变段长度

Tab. 6 Lengths of waiting zone and triangular gradient section in POASL

主线设计速度/ $(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$		120	100	80
等待段	安全汇流速度/ $(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	80	70	65
	平均等待时间/s	4.05	4.01	3.94
	等待段长度/m	90	80	70
三角渐变段	安全汇流速度/ $(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	80	70	65
	1次换道横移时间/s	3.8	3.6	3.3
	三角渐变段长度/m	85	70	60

3.1.3 三角渐变段长度

根据三角渐变段长度的计算模型(式(10)),由小客车安全汇流速度以及小客车进行1次换道所需时间可计算得到小客车专用单车道加速车道三角渐变段长度,见表6(长度取5的倍数)。可以看出,随着主线设计速度的提高,安全汇流速度越高,小客车进行1次换道所需时间越长,则三角渐变段长度越长。

3.1.4 小客车专用单车道加速车道总长度

当纵坡坡度为零时,加速段长度值、等待段长度

值、三角渐变段长度值之和为加速车道长度的标准长度值,最终结果如表7所示。《规范》规定的单车

道加速车道最小长度见表8。对比表7、表8能够看出:

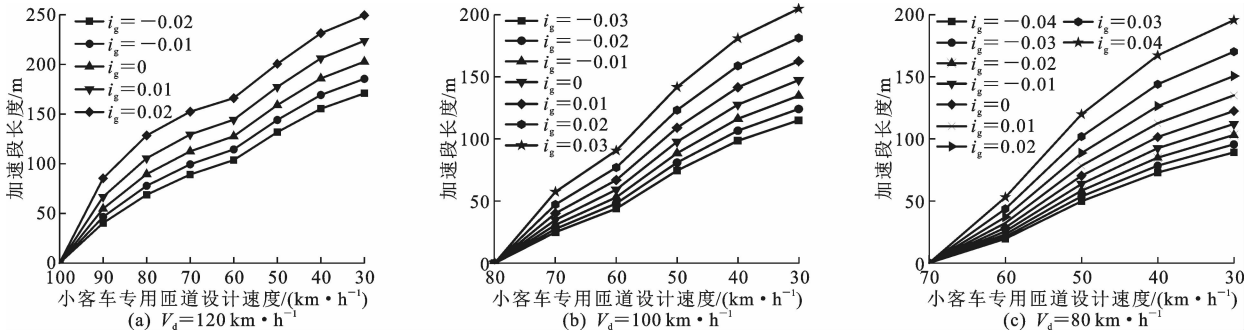


图7 小客车专用单车道加速车道加速段长度变化趋势

Fig.7 Variation tendencies of length of acceleration zone in POASL

表7 单车道小客车专用加速车道指标建议值

Tab.7 Recommended values of index of POASL

匝道设计速度/(km·h ⁻¹)	不同主线设计速度(km·h ⁻¹)下的指标												
	120				100				80				
	加速段+等待段/m	平行式渐变段/m	直接式渐变率	直接式渐变段/m	加速段+等待段/m	平行式渐变段/m	直接式渐变率	直接式渐变段/m	加速段+等待段/m	平行式渐变段/m	直接式渐变率	直接式渐变段/m	
80	180	85	1/38	160	80	70	1/17	70	195	60			
70	200		1/43	180	115		1/25	105			70	1/15	65
60	220		1/47	190	140		1/30	120			100	1/21	85
50	250		1/53	210	180		1/38	155			140	1/30	120
40	275		1/59	235	210		1/45	180			170	1/36	145
30	295		1/63	250	230		1/49	195			195	1/42	165

注:平行式加速车道为本文重点研究对象,且在工程设计中,直接式单车道加速车道几乎不被采用,因此将直接式渐变率计算过程省略。

表8 《规范》规定加速车道设计指标建议值^[17]

Tab.8 Recommended values of acceleration lane index in specified^[17]

匝道设计速度/(km·h ⁻¹)	不同主线设计速度(km·h ⁻¹)下的指标											
	120				100				80			
	加速段+等待段/m	平行式渐变段/m	直接式渐变率	直接式渐变段/m	加速段+等待段/m	平行式渐变段/m	直接式渐变率	直接式渐变段/m	加速段+等待段/m	平行式渐变段/m	直接式渐变率	直接式渐变段/m
未规定	230	90	1/45	180	200	80	1/40	160	180	70	1/40	160

①当匝道的设计速度为50 km/h时,所需加速车道最小长度与《规范》中的数值大致相同,说明《规范》规定值适应的匝道设计速度是50 km/h左右;当匝道设计速度小于50 km/h时,若采用《规范》规定值作为小客车专用单车道加速车道的最小长度,则长度不足,容易引发合流区强制合流的现象,增加合流区的事故风险。

②若采用直接式单车道加速车道,与平行式单车道加速车道相比,需设置更长的三角渐变段,使得占地面积显著增加。因此,小客车专用单车道加速车道推荐采用平行式加速车道。

③《规范》在确定匝道加速车道最小长度时仅针

对客货混行交通流,并未考虑不同匝道设计速度的影响。本文结合小客车运行特征,对匝道设计速度进行细分,将加速车道最小长度值调整,适应小客车专用匝道的设计要求,使其设计更为灵活、合理。

3.2 上坡加速段纵坡修正

由图7可以看出,若纵坡坡度的数值为负数,其加速车道长度较纵坡坡度为正数时更短。这是因为车辆处于下坡状态时,总加速度方向与汽车行进方向一致,即坡度有利于小客车快速加速至主线的安全汇流速度;同时,加速时间的缩短也意味着车辆获得更长的等待汇入的空间,大大提高了汇流的安全性。因此,确定纵坡坡度修正系数时仅需考虑上坡

对加速的不利影响。当主线合流区为上坡路段时,重力对车辆产生一个与车辆行驶方向相反的分力,对车辆加速不利。因此,当主线合流区的纵坡坡度较大时,加速车道长度应乘以相应的修正系数,以增长加速车道的长度,提供更大的加速空间,抵消重力作用的不利影响。

本文上坡加速段长度修正系数是以 1% 为单位

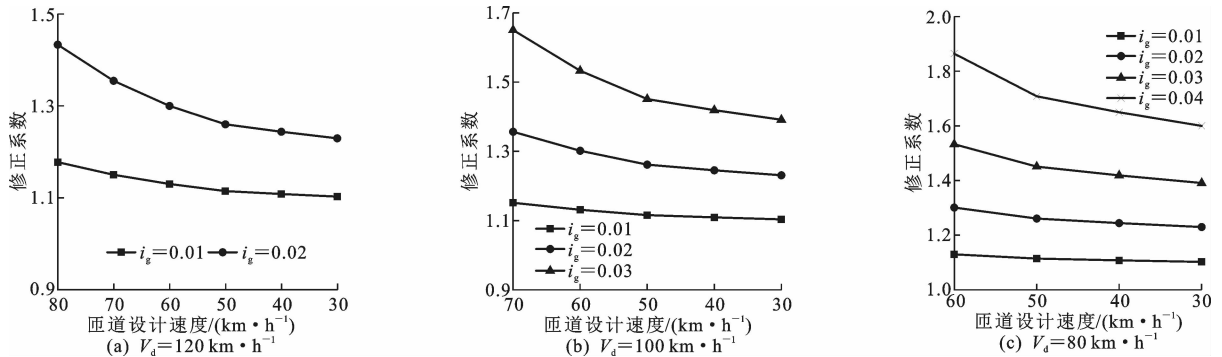


图 8 小客车专用单车道加速车道上坡加速段修正系数变化趋势

Fig. 8 Variation tendencies of correction factors of uphill acceleration zone in POASL

表 9 上坡加速段加速车道长度修正系数

Tab. 9 Correction factors of acceleration lane length in uphill acceleration zone

纵坡坡度/%	不同主线设计速度(km·h ⁻¹)下的修正系数					
	120		100		80	
	计算值	推荐值	计算值	推荐值	计算值	推荐值
[4,3)					(1.10, 1.13)	1.73
[3,2)			(1.39, 1.65)	1.52	(1.39, 1.53)	1.46
[2,1)	(1.23, 1.43)	1.33	(1.23, 1.36)	1.30	(1.23, 1.30)	1.27
[1,0)	(1.10, 1.18)	1.14	(1.10, 1.15)	1.13	(1.10, 1.13)	1.12

4 结 语

(1) 本文主要使用了数理统计、汽车动力学等领域的知识理论,对客货分离互通小客车专用单车道加速车道最小长度指标进行了研究。基于小客车在加速车道上的行驶特性,分别建立了加速车道 3 个组成部分:加速段、等待段及三角渐变段的长度计算模型。综合美国、日本、中国标准,并且基于计算模型中关键参数,确定了小客车专用加速车道最小长度指标。

(2) 由于车辆运行特征参数较客货混行情况有明显不同,本文针对不同匝道设计速度进行研究,提

纵坡间隔,计算不同纵坡坡度下的加速段长度与坡度为 0 时加速段长度的比值,如图 8 所示。由于在小客车的加速车道中设置等待段,可以有效降低匝道纵坡坡度对加速段长度的影响;而且同一主线设计速度下,纵坡坡度修正系数变化幅度随坡度降低逐渐趋于稳定,因此,可取同一纵坡区间内修正系数的中值作为上坡加速段长度修正系数推荐值,见表 9。

出的设计指标较《细则》中相应指标有明显差异,具体表现为:随着匝道设计速度的降低,需要的加速段长度、等待段长度不断增加,同时平行式渐变段长度保持不变。除此之外,本文研究结果验证了单车道加速车道采用平行式的合理性,同时考虑不同纵坡坡度对加速车道长度的影响,提出了上坡加速段纵坡坡度修正系数,可适应目前客货分离的高速公路建设新模式的需要。

(3) 本文引入汇流车道车头时距最小值计算公式,并对可插入间隙值进行细化,确保计算结果的精确性,并考虑设计速度对纵坡路段的修正系数的影响,使计算结果更为合理。

(4) 受限于研究条件和篇幅,下一步需要研究合流区小客车交通流特征断面运行速度、加速度的实际分布情况;进一步分析论证对客货分离互通小客车专用加速车道设计指标的适应性。

参考文献:

References:

[1] 尹 露. 高速公路变速车道几何设计参数及安全保障措施研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2017.
 YIN Lu, Study on the geometric parameters for the speed-change lane of the expressway and safeguard measures [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017.

[2] JANSON B N, RATHI A. Feasibility of exclusive fa-

- ilities for cars and trucks[R]. Oak Ridge; Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 1990.
- [3] MASON J M, MIDDLETON D R, PETERSEN H C. Operational and geometric evaluation of exclusive truck lanes (Final report)[R]. New York; TRB, 1986.
- [4] 唐国才. 高速公路客货分线关键技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.
- TANG Guo-cai. Research on the key technology of highway separated line between passenger and freight transportation[D]. Xi'an; Chang'an University, 2015.
- [5] 单东辉, 李国春, 靳媛媛, 等. 基于交通冲突的客货分离式高速公路互通立交合流间距研究[J]. 公路, 2017, 62(1): 152-158.
- SHAN Dong-hui, LI Guo-chun, JIN Yuan-yuan, et al. Study of interchange confluence length for passenger and cargo separation expressway based on traffic conflict technique[J]. Highway, 2017, 62(1): 152-158.
- [6] AASHTO. A policy on geometric design of highways and streets[M]. Washington DC: AASHTO, 2013.
- [7] LIU B M, KONG L Z. Model of deceleration lane length calculation based on quadratic deceleration [C]//ASCE. Access Management Theories and Practices. Reston: ASCE, 2014: 180-189.
- [8] YANG G, TIAN Z, XU H, et al. Recommendations for acceleration lane length for metered on-ramps [J]. Transportation Research Record, 2016(2588): 1-11.
- [9] KEYS J, AYERS R. The effects of improved vehicle technology on the design of acceleration and deceleration lanes at freeway entry and exit ramps [C]//ARRB. Proceedings of the 25th Australian Road Research Board Conference (ARRB 2012). Perth; ARRB Group Ltd, 2012: 1-13.
- [10] NIE Z G, LI Z L, WANG W Q, et al. Gain-scheduling control of dynamic lateral lane change for automated and connected vehicles based on the multipoint preview[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2020, 14(10): 1338-1349.
- [11] ZHOU J, FANG J, ZHOU R. Study on the safety length of acceleration and deceleration lane of left-side ramp on freeway[C]//RS4C. 16th International Conference Road Safety on Four Continents (RS4C 2013). Linköping; RS4C, 2013: 1-10.
- [12] 张 驰, 宫权利, 马向南, 等. 互通立交单车道入口小客车运行速度模型[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2018, 38(4): 71-79.
- ZHANG Chi, GONG Quan-li, MA Xiang-nan, et al. Operating speed model of passenger car at single-lane entrance of interchange[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2018, 38(4): 71-79.
- [13] 赵 春, 邓 卫, 周荣贵, 等. 考虑服务交通量的加速车道长度设置方法[J]. 公路交通科技, 2004, 21(8): 103-107.
- ZHAO Chun, DENG Wei, ZHOU Rong-gui, et al. The length design method for acceleration lane taking into account of traffic[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(8): 103-107.
- [14] 智永锋, 张 骏, 史忠科. 高速公路加速车道长度设计与车辆汇入模型研究[J]. 中国公路学报, 2009, 22(2): 93-97, 115.
- ZHI Yong-feng, ZHANG Jun, SHI Zhong-ke. Research on design of expressway acceleration lane length and merging model of vehicle[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(2): 93-97, 115.
- [15] 孔令臣. 多车道高速公路互通式立交加减速车道长度及最小净距研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
- KONG Ling-chen. Research on the length of speed-change lane and minimum net distance between interchanges on multi-lane expressway[D]. Xi'an; Chang'an University, 2012.
- [16] 李文权, 邵孜科, 王世恒, 等. 城市快速路平行式加速车道长度计算方法[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(4): 113-121.
- LI Wen-quan, SHAO Zi-ke, WANG Shi-heng, et al. Calculation method of parallel-type acceleration lane length of urban expressway[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 17(4): 113-121.
- [17] JTG D20—2017, 公路路线设计规范[S].
- JTG D20—2017, Design specification for highway alignment[S].
- [18] 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].
- [19] 李文权, 王 炜, 周荣贵. 高速公路合流区1车道车头时距分布特征[J]. 公路交通科技, 2003, 20(1): 114-117.
- LI Wen-quan, WANG Wei, ZHOU Rong-gui. Headway characteristics of lane 1 on expressway merge area[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2003, 20(1): 114-117.
- [20] 徐秋实, 任福田, 孙小端, 等. 高速公路互通式立交加速车道长度的研究[J]. 北京工业大学学报, 2007, 33(3): 298-301.

- XU Qiu-shi, REN Fu-tian, SUN Xiao-duan, et al. Research on the length of acceleration lane at freeway interchange[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2007, 33(3): 298-301.
- [21] 李文权, 王 炜, 李铁柱, 等. 高速公路加速车道上车辆的汇入特征分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2002, 32(2): 252-255.
- LI Wen-quan, WANG Wei, LI Tie-zhu, et al. Characteristics analyses of merges on freeway acceleration lane[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2002, 32(2): 252-255.
- [22] WANG H, ZHONG X, SHEN G. Analysis and experimental study on the maglev vehicle-guideway interaction based on the full-state feedback theory[J]. Journal of Vibration and Control, 2015, 12(2): 51.
- [23] 日本道路公团. 日本高速公路设计要领[M]. 西安: 陕西旅游出版社, 1991.
- Japan Highway Public Corporation. Essentials of expressway design in Japan[M]. Xi'an: Shaanxi Tourism Press, 1991.
- [24] 项乔君, 王 炜, 李 伟. 汽车最小行车时距计算模型的研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 1998, 28(3): 81-84.
- XIANG Qiao-jun, WANG Wei, LI Wei. A study on the vehicle minimum time headway [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 1998, 28(3): 81-84.
- [25] 刘志玮. 高速公路合流区交通模拟与评价研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2004.
- LIU Zhi-wei. Study on traffic simulation and evaluation of expressway confluence area[D]. Xi'an: North Western Polytechnical University, 2004.
- [26] 刘 斌. 基于乘客感受的互通式立交范围内路面宽度过渡段关键技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- LIU Bin. Research on the index of width transition section in interchange based on passenger feeling[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [27] 倪 旭. 客货分离高速公路互通式立交变速车道设计指标研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- NI Xu. Study on design indexes of the speed change lanes of interchange on expressway with separation between passenger cars and trucks [D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.
- [28] 汽车之家. 百公里加速排行榜[EB/OL]. (2019-03-10)[2021-06-18]. <https://www.autohome.com.cn/channel2/bestauto/list.aspx?type=1&levelId=2>. HOME of vehicle. 100 km acceleration ranking[EB/OL]. (2019-03-10)[2021-06-18]. <https://www.autohome.com.cn/channel2/bestauto/list.aspx?type=1&levelId=2>.