

高速公路互通立交变速车道长度及安全间距研究

文 / 漆 凌 杭州市城建设计研究院有限公司深圳分公司

摘要：为了保证高速公路互通立交行车安全，本文根据车辆汇入主线最外侧车道的概率计算加速车道长度、通过控制车辆驶入出口匝道的速度来确定减速车道长度。随后，基于车道变换理论计算了相邻互通立交之间安全间距，研究成果可为互通立交设计提供依据。

关键词：高速公路；互通立交；加速车道；减速车道；安全净距

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.23.054

引言

在高速公路建设时，需设置互通立交来实现交通转换。当车辆从匝道驶入主线或从主线驶入匝道时，会有一个加速或减速过程。此时，需在主线和匝道之间的设置变速车道（加速车道、减速车道）。如互通立交安全间距过小或变速车道长度不足，车辆会频繁分流、合流、交织，降低公路的通行能力，甚至导致交通安全事故，造成人员伤亡和经济损失。

很多设计人员在确定互通立交变速车道长度和安全间距时，盲目照搬规范，不考虑车辆实际运行状态，导致设计方案不合理。近年来，很多学者研究这一问题，比如王慧慧^[1]使用Carsim与Trucksim软件建立互通立交仿真模型，研究了出口匝道在不同变速、道长度下的交通事故率，对变速车道长度进行了优化；比如贾俊波^[2]基于车道变换理论，推导了加速车道、减速车道及互通立交安全间距的计算方法。但是，互通立交上交通量大、交通组织复杂，目前形成统一的研究成果。因此，有必要进一步研究高速公路互通立交变速车道长度及安全间距的取值。

一、互通立交变速车道长度

（一）加速车道长度

以平行式加速车道为例，车辆在加速车道先加速至与主线合流所需的速度，再以该速度匀速行驶。如主线外侧车道出现可接受间隙，车辆汇入主线。否则，车辆在加速车道末端排队等候。因此，可根据加速车道上车辆汇入主线最外侧车道的概率确定加速车道长度。

1. 车辆汇入主线概率

假设主线最外侧车道上有 b 个车头时距，车辆在加速车道上匀加速行驶，则车头时距和加速车道长度、车辆运行参数关系可用公式（1）和（2）表达^[3]。

$$b = \frac{Q}{3600} \times \frac{(\sqrt{v_0^2 + 2as} - v_0)}{a} \quad (1)$$

$$Q = 136 + 0.345q_{min} - 0.115q_{max} \quad (2)$$

式中： Q —主线最外侧车道交通量，veh/h； s —加速车道长度，m； a —车辆加速度， m/s^2 ； v_0 —加速车道起点（分流鼻端）车速， km/s ； q_{min} —单位时间内主线最小交通量，veh/h； q_{max} —单位时间内加速车道最大交通量，veh/h。

根据概率学理论，可推导出加速车道上车辆汇入主线的概率，见公式（3）。

$$P(b) = P(b-1) + (1 - P(b-1)) \times P(h \geq t_c) \quad (3)$$

式中： P —汇入概率； h —主线最外侧车道车头时距； t_c —最小车头时距， s 。

2. 加速车道长度确定

假设某高速公路加速车道的 $v_0=45km/h$ ， $t_c=7s$ ，主线最外侧车道车头时距服从Erlang分布， Q 取400~600veh/h，则加速车道长度和汇入概率的关系满足图1。

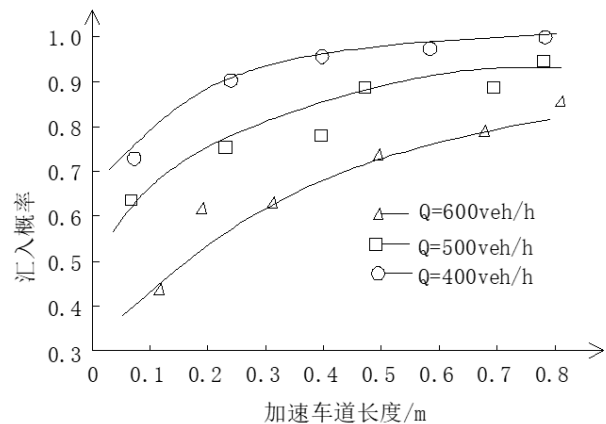


图1 加速车道长度和汇入概率关系

由图1可知：当主线最外侧车道交通量相同时，加速车道越长，加速车道车辆汇入主线的概率越高。在同一加速车道长度下，主线最外侧车道交通量越大，加速车道汇入主线的概率越低。由于图形具有波动大，可利用光滑曲线对图形进行拟合，以预测任意加速车道长度下的汇入概率，为加速车道设计提供依据。

（二）减速车道长度

在山岭地区，互通立交布置受地形限制，多采用平行式减速车道，以保证驾驶员视距。在平原地区，互通立交视距容易满足，多采用直线式减速车道。无论哪种减速车道，都要控制最小长度。否则，车辆驶入出口匝道后速度过快，不利于行车安全。

以直接式减速车道为例，可划分为渐变段、减速段两部分，长度可用公式（4）表达。

$$L = L_1 + L_2 \quad (4)$$

式中：L—减速车道长度，m；L₁—渐变段长度，m；L₂—减速段长度，m。

一般情况下，车辆是由主线经渐变段进入减速车道，故L₁可结合主线设计速度、渐变率确定，具体可参考表1。

表1 渐变段长度参考值

设计速度 (km/h)	渐变率	渐变段长度 (m)
80	1/20	80
100	1/22.5	90
120	1/25	100

车辆经渐变段后，需经过两次减速进入出口匝道，其中第1次减速为发动机减速，第2次减速为制动减速。根据运动学理论，L₂可用公式(5)计算。

$$L_2 = \frac{V_0 t}{3.6} - \frac{a_1 t^2}{2.0} + \frac{V_1^2 - V_2^2}{25.92 a_2} \quad (5)$$

式中：V₀—设计速度，km/h；t—发动机制动时间，取3s；a₁—发动机减速度，m/s²；V₁—发动机减速后速度，km/h；V₂—出口匝道设计速度，km/h；a₂—制动器减速度，m/s²。

根据上述方法，计算了减速车道在不同设计速度下的长度，并与规范值进行对比，见表2。

表2 减速车道长度

设计速度 (km/h)	出口匝道设计速度 (km/h)	减速车道长度	
		计算值	规范值
80	40	163	145
80	50	151	145
80	60	141	145
100	40	200	125
100	50	188	125
100	60	174	125
120	40	236	110
120	50	224	110
120	60	209	110

由图2可知：当主线设计速度相同时，出口匝道设计速度越低，对减速车道长度的要求越高。如出口匝道设计速度相同，主线设计速度越高，减速车道越长。同时，减速车道长度的计算值均大于规范值，主要原因在于：直接式减速车道与主线分离时的线形变化缓慢，驾驶员在进入减速车道后会以主线速度行驶一段距离后再减速。

另外，在主线纵坡较大的路段，车辆重力势能和动能之间会相互转换，影响车辆速度及减速车道长度。因此，可根据纵坡*i*对减速车道长度进行修正。如2 < *i* ≤ 3，修正系数取1.1；如3 < *i* ≤ 4，修正系数取1.2；如*i* > 4，修正系数取1.3^[4]。

二、互通立交安全净距分析

一般情况下，互通立交安全净距是指前一立交加速车道渐变段终点与后一立交减速车道渐变段起点的距离^[5]。如果互通立交的安全净距过小，加速或减速车道的车辆会对高速公路主线交通流产生较大干扰，甚至造成交通流紊乱，安全隐患大。因此，在高速公路设计时，需控制互通立交最小净距。

(一) 安全净距计算模型

通常，可基于车辆的“车道变换行为”来确定互通立交安全净距。以图2的双向4车道高速公路为例，立交车辆和主线车辆的交织状态如下：第一，立交车辆刚驶入主线车道1时，驾驶员发现出口标志，不需要车道变换。同时，主线车道2并行车辆的驾驶员也看到出口标志，需变道至主线车道1、并安全行驶至减速车道。因此，可将互通立交安全净距D分为四部分(D=L₁+L₂+L₃+L₄)：驾驶员对交通标志反应距离L₁，等待可插入间隙行驶距离L₂，车辆变换车道距离L₃，确认距离(车道变化结束点到出口匝道减速车道起点的距离)L₄，如图3所示。

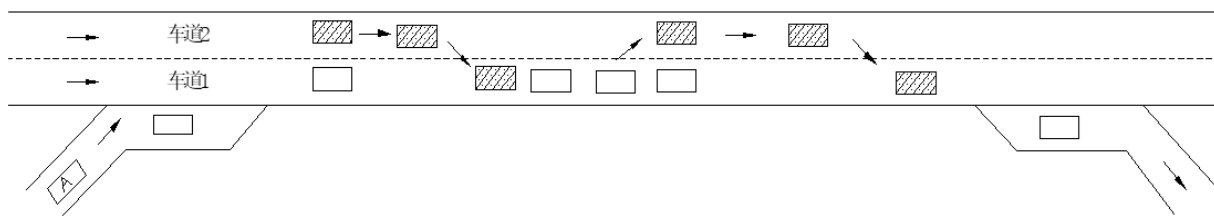


图2 相邻互通立交车道变换行为示意

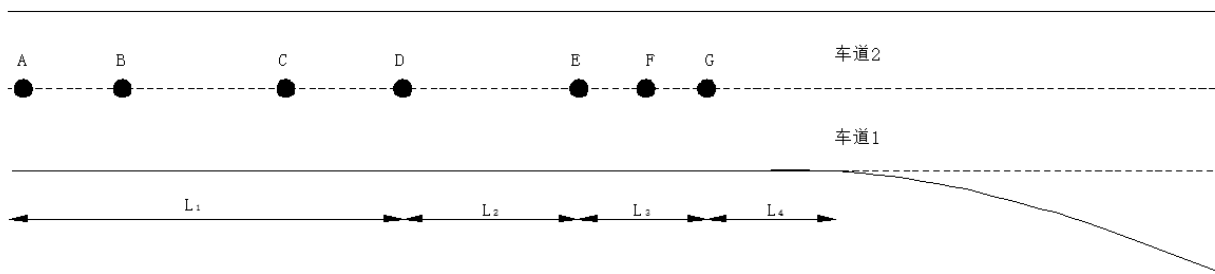


图3 互通立交安全净距计算模型示意

1. 交通标志反应距离

通常，驾驶员从发现交通标志到作出驾驶操作会经历3个阶段：辨认（A点~B点）、读取（B点~C点）、决策（C点~D点）。结合相关试验数据，公路上行车速度越快，驾驶员对交通标志的反应距离越短，见表3^[6]。

表3 交通标志反应距离参考值

设计速度 (km/h)	80	100	120
L ₁ (m)	374	326	269

2. 等待可插入间隙距离

假设车辆以车速V_D（取主线设计速度的0.76倍）等待可插间隙^[7]，达到平均等待时间后，车流中出现可插入间隙。随后，调整车辆状态，为变化车道作准备。在此期间，车辆行驶距离可按公式（6）~（7）计算。

$$L_2 = \frac{V_0}{3.6} t_w + \frac{V_0}{3.6} \times \frac{V_D}{V_0 - V_D} t_w = 1.157 V_0 t_w \quad (6)$$

$$t_w = \frac{(\lambda_1 \tau + 1) e^{\lambda_1(t_c - \tau)} - \lambda_1 t_c - 1}{\lambda_1 e^{\lambda_1(t_c - \tau)}} \times (1 - e^{-\lambda_1(t_c - \tau)}) \quad (7)$$

式中：V₀—设计速度，km/h；t_w—平均等候时间，s；λ₁—车辆平均到达率，取0.411辆/s；τ—车头时距最小值，取1.2s；t_c—车辆临界间隙，取4.0s。

3. 换道距离

当驾驶员感知可换道信号后，需调整好车辆状态，

并横移变道至外侧车道。在此期间，车辆行驶距离可按公式（8）计算。需注意，高速公路上车流量大，交通组成复杂，驾驶员年龄差异大等，反应时间可适当取大值（4.0s）。

$$L_3 = \frac{V_0}{3.6} (t_1 + t_2) \quad (8)$$

式中：V₀—设计速度，km/h；t₁—反应时间，s；t₂—横移变道操作时间，取3s。

4. 确认距离

当车辆变道至外侧车道后，要保持自由流状态，从而更安全地判断并驶入出口匝道。因此，确认距离可称为安全距离，可取100m。对于双向6车道或双向8车道高速公路，互通立交安全净距计算理论与双向4车道基本相同，主要区别在于：车道等待可插入间隙距离和换道距离不同。在双向6车道高速公路，车辆需2次等待、换道，互通立交安全净距D=L₁+2(L₂+L₃)+L₄；在双向8车道高速公路，车辆需3次等待、换道，互通立交安全净距D=L₁+3(L₂+L₃)+L₄。

（二）安全净距计算结果

假设高速公路设计速度为80~120km/h，计算了其在不同车道数下的互通立交最小净距，见表1。需注意，为了便于高速公路线形控制，设计时可将安全距离取整。

表4 高速公路互通立交净距计算结果

设计标准	设计速度(km/h)	L ₁ (m)	L ₂ (m)	L ₃ (m)	L ₄ (m)	安全净距计算值 (m)	安全净距建议值 (m)
双向4车道	80	374	100.9	155.5	100	730.4	735
	100	326	126.1	194.4	100	746.5	750
	120	369	151.3	233.3	100	853.6	855
双向6车道	80	374	100.9	155.5	100	986.8	990
	100	326	126.1	194.4	100	1067.0	1070
	120	369	151.3	233.3	100	1238.2	1240
双向8车道	80	374	100.9	155.5	100	1243.2	1245
	100	326	126.1	194.4	100	1387.5	1390
	120	369	151.3	233.3	100	1622.2	1625

结语

本文主要研究了高速公路互通立交的变速车道长度、安全净距的计算方法，得到以下结论：

1. 加速车道可根据车辆汇入主线最外侧车道的概率确定。加速车道越长，加速车道车辆汇入主线的概率越高。
2. 直接式减速车道长度可分为渐变段、减速段两部分计算，其中减速段要考虑发动机减速和制动减速。
3. 相邻互通立交可基于“车道变换行为”确定安全间距，主要考虑交通标志反应距离、等待可插入间隙行驶距离，车辆变换车道距离，确认距离。
4. 高速公路设计车道数越多，车辆等待、换道次数越多，对互通立交安全净距的要求越高。

参考文献

[1] 王慧慧. 高速公路出口匝道行车安全仿真研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2023.
 [2] 贾俊波. 高速公路变速车道长度及立交最小净距研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2017.

[3] 王兵, 任强. 高速公路市政化改造立交出入口变速车道长度研究[J]. 公路, 2025, (03): 280-287.

[4] 白云鹏. 高速公路互通立交线形设计关键技术参数研究[J]. 交通世界, 2023, (12): 78-80.

[5] 路畅. 基于人因的山区高速公路隧道出口与互通立交安全净距研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.

[6] 曹晓萌. 互通式立交最小安全净距和变速车道研究[J]. 工程技术研究, 2024, 9(17): 22-24.

[7] 白志军, 陈慧, 张绍理. 高速公路互通立交出入口位置行车安全性分析[J]. 中外公路, 2015, 35(05): 334-337.

作者简介: 漆凌(1994-07), 男, 汉族, 广东深圳人, 本科, 路桥工程师, 从事路桥设计工作。