

文章编号: 1002-0268 (2004) 08-0103-05

考虑服务交通量的加速车道长度设置方法

赵春¹, 邓卫¹, 周荣贵², 王炜¹

(1. 东南大学交通学院, 江苏 南京 210096; 2. 交通部公路科学研究所, 北京 100088)

摘要: 高速公路加速车道的设置长度不仅取决于主路及匝道的的设计速度, 还与主路及匝道的交通量有关。本文给出了不同主路服务交通量下的匝道通行能力, 建立了在主路不同交通负荷下的匝道车辆可直接汇入的概率计算模型。最后给出了在一定的匝道车辆汇入概率和主路服务交通量下的加速车道长度设置方法, 以及不同主路、匝道设计速度和服务交通量下的加速车道长度的推荐值。

关键词: 高速公路; 匝道; 加速车道; 服务交通量; 汇入概率

中图分类号: U491 113

文献标识码: A

The Length Design Method for Acceleration Lane Taking into Account of Traffic

ZHAO Chun¹, DENG Wei¹, ZHOU Rong-gui², WANG Wei¹

(1. Transportation College, Southeast University, Jiangsu Nanjing 210096 China;

(2. Highway Research Institute, Ministry of Communications, Beijing 100088, China)

Abstract: The length design of the acceleration lane depends on not only traffic speed but also traffic volume of the main line and ramp of expressway interchanges. The ramp capacity under different traffic flow of the main line is presented, and the merging probability model of the vehicle on the ramp under different flow volume of the main line. The length design method of the acceleration lane is presented, taking into account of certain merging probability of the vehicle on the ramp and the traffic flow of the main line. The values of the length of the acceleration lane are then put forward.

Key words: Expressway; Ramp; Acceleration lane; Service flow; Merging probability

高速公路加速车道是互通立体交叉的重要组成部分, 是车辆进入高速公路主路的必需通道, 其作用是给进入高速公路的车辆提供一个安全而舒适的进入机会, 实现主路车速与匝道车速之间的平稳过渡, 维持立交的服务水平与主路一致。

我国高速公路从上世纪 90 年代开始大规模发展, 但在加速车道的研究方面还不够充分。近年来, 很多高校和科研机构陆续进行了一些这方面的研究, 但一般集中在理论研究方面, 缺少实测数据对各类模型的标定与验证, 也没有精确的量化计算加速车道的设置长度, 因此与实际应用仍有一段距离。

在现行的设计标准中, 加速车道长度设计主要考虑主路及匝道的平均行驶速度^[1]; 或者考虑匝道车辆与主路合流速度及匝道的计算行车速度^[2], 这两种方法有一定差异, 但其共同点是速度为加速车道长度设计的惟一依据。在我国高速公路建设初期交通量很小的情况下, 这两种方法得出的加速长度是可以满足行车要求的。但随着高速公路交通量的日益增大, 单纯考虑车速而设计的加速车道长度已难以满足高速公路行车舒适、安全、快速的要求, 为此, 交通部拟对现行《公路路线设计规范》(JTJ001-94) 中的加减速车道长度设计部分做出合理改进。

收稿日期: 2003-11-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50078015); 交通部科研资助项目

作者简介: 赵春 (1972-), 男, 辽宁大连人, 东南大学博士研究生, 主要研究方向为交通运输规划与管理。

高速公路的合流区包括匝道、加速车道、与之相联系的主路部分。图1为双向四车道高速公路合流区示意图。

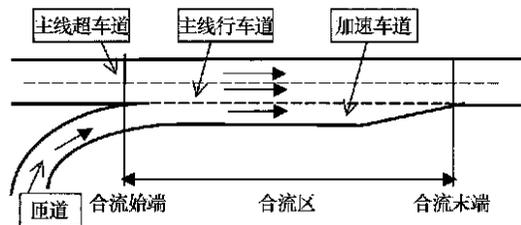


图1 高速公路合流区示意图

高速公路合流区通行能力不同于一般路段通行能力的特性。主路交通量和匝道交通量对于合流区的运行特征均有显著影响。

在实际的车流运行状况中，加速车道不仅用来完成车速的变换，而且更是用来使车辆迅速、安全地汇入高速公路。匝道车辆在加到一定的车速后，决定它能否及时汇入高速公路的因素，不是车速，而是高速公路最外侧车道是否有足够的间隙，使它能够顺利汇入。而决定高速公路外侧车道是否有足够插入间隙的最直接因素就是主路行车道交通量的大小。如果高速公路的交通量很大，外侧车道没有间隙，则车辆只有一边行驶，一边继续寻找插入机会。所以，在计算加速车道长度时不仅要考虑设计速度，还要考虑服务交通量的大小。不同的服务交通量需要的加速车道长度是不同的。

在设置加速车道长度时，我们首先可以知道高速公路主路及匝道的设计速度，由此相应的基本通行能力也可以确定，然后按照主路基本路段及立交合流区要求的服务水平，根据道路情况和交通情况得出合适的服务交通量。最后根据主路和匝道的速度、服务交通量得出合适的加速车道长度。

1 服务交通量的确定

1.1 基本通行能力的确定

公路通行能力是指公路能够疏导交通流的能力。通过对通行能力的分析，可以对交通流运行参数和服务水平指标进行估算和评价，针对高速公路中存在的问题提出改进方案或措施。表1是高速公路基本路段的基本通行能力指标^[3]。

1.2 服务水平及主路相应服务交通量的确定

由交通部公路科学研究所编制的最新《公路通行能力研究报告》中把公路的服务水平分为四级^[3]，在研究高速公路的加速车道设计长度时，主要考虑二级、三级服务水平，即主路和匝道保证二级服务水

表1 高速公路基本路段基本通行能力指标

| 设计速度 /km·h ⁻¹ | 通行能力 /pcu·(h·lane) ⁻¹ | 临界密度 /pcu·km ⁻¹ | 临界速度 /km·h ⁻¹ |
|-----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| 120 | 2200 | 37 | 60 |
| 100 | 2200 | 44 | 50 |
| 80 | 2000 | 50 | 40 |
| 60 | 1800 | 45 | 40 |

平，合流区达到三级服务水平。主路和匝道的服务水平及相应服务交通量如表2。

表2 三个等级服务水平下，高速公路主路的最大服务交通量

| 设计车速 /km·h ⁻¹ | V/C | | | 相应的最大服务交通量 /pcu·(h·lane) ⁻¹ | | |
|-----------------------------|------|------|------|---|------|------|
| | 一级 | 二级 | 三级 | 一级 | 二级 | 三级 |
| 120 | 0.34 | 0.74 | 0.90 | 750 | 1600 | 2000 |
| 100 | 0.30 | 0.64 | 0.82 | 650 | 1400 | 1800 |
| 80 | 0.25 | 0.58 | 0.75 | 500 | 1150 | 1500 |
| 60 | 0.22 | 0.50 | 0.67 | 400 | 900 | 1200 |

一级服务水平的最大服务交通量即为二级服务水平的低限，二级服务水平的最大服务交通量即为三级服务水平的低限。由此主路设计速度120km/h，二级服务水平所对应的服务交通量为750~1600pcu/h/lane，三级服务水平对应的则为1600~2000pcu/h/lane。此时的交通量是标准小客车交通量。

1.3 匝道服务交通量的确定

在前面所述的基本通行能力、实际通行能力和服务水平确定之后，我们就可以基本确定计算加速车道长度所需的服务交通量。为保证主路路段二级服务水平，合流区三级服务水平，则不但要求主路上游和匝道交通量分别达到二级服务水平，还要求二者之和在三级服务水平以上。不同设计速度的高速公路匝道基本通行能力如表3。

表3 匝道基本通行能力^[3]

| 设计速度/km·h ⁻¹ | 20 | 30 | 40 | 45 | 60~80 |
|-----------------------------------|------|------|------|------|-------|
| 基本通行能力/pcu·(h·lane) ⁻¹ | 1041 | 1166 | 1194 | 1188 | 1190 |

由表3可以看出，设计速度在40km/h以下时，匝道基本通行能力随速度提高而增大；而在45km/h时，匝道基本通行能力稍有减少，为1188pcu/h/lane。这是因为基本通行能力是由最小车头时距算得的，当设计速度在45km/h以上时，最小车头时距基本稳定在3s左右，所以当匝道设计速度为60~80km/h时，匝道基本通行能力取1190pcu/h/lane^[3]。

根据匝道车流量的饱和度指标^[3]确定的匝道服务水平等级可知，二级服务水平下，匝道的饱和度取值

范围是 0.20~0.50, 匝道的服务交通量为基本通行能力与饱和度的乘积, 即 208~595pcu/h/lane。

在实际的交通运行中, 匝道交通量和主路行车道交通量有着密切关系的, 匝道服务交通量可由主路行车道的交通量推算。

高速公路合流区匝道的车辆运行特征有着类似与无控交叉口中次要道路车辆运行的特点。其共同点表现为: (1) 主路车辆享有优先通行权, 不受次要道路(匝道)车辆影响; (2) 次要道路(匝道)车辆需等待主路车流中存在可插入间隙(可汇入间隙), 方能驶入。不同点表现为: (1) 无控交叉口中次要道路车辆一般需停车等待, 合流区的匝道车辆一般在加速车道上以一定的速度边行驶边等待; (2) 无控交叉口中次要道路车辆一般要穿越两个不同方向的车流, 匝道车辆在汇入主路时只需横移一个车道的距离。(3) 无控交叉口中次要道路车辆穿越主路时, 与主路车辆呈垂直方向, 存在冲突点; 匝道车辆在汇入主路时, 与主路行车道车辆夹角很小, 存在合流点而无冲突点。

匝道交通量的计算可借鉴无控交叉口中次要道路交通量的计算方法^[4,5], 但具体参数有着不同的意义。下面是匝道交通量在主路行车道车辆车头时距符合 r 阶 Erlang 分布时的计算公式

$$Q_r = Q_1 \sum_{i=0}^{r-1} \frac{(-1)^i}{i!} \left| \frac{\exp(-Q_1 r t_0 x / \beta 600)}{1 - \exp(-Q_1 r x / \beta 600)} \right|_{x=1}^{(i)} \quad (1)$$

式中, Q_r 为匝道交通量; Q_1 为主路行车道交通量; t_0 为可汇入间隙, 即一辆匝道车辆汇入主路行车道的最小车头时距, 对于标准小客车 $t_0=4s$; t 为排队驶入的匝道车辆连续通过合流点时的最小车头时距, 即匝道车辆的临界间隙, 对于标准小客车 $t=3.5s$ ^[9]。

当 $r=1$ 时公式简化为主路车辆车头时距符合负指数分布时的匝道交通量计算公式。

根据式 (1) 可得出匝道服务交通量在主路行车道不同交通量下的大小, 如图 2 所示。其中 Erlang 分布阶数 r 取 2, $t_0=4s$, $t=3.5s$ 。

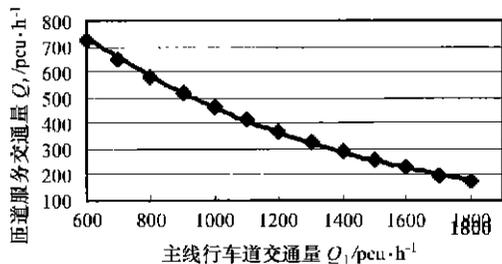


图 2 匝道服务交通量在主路行车道不同交通负荷下的大小

2 匝道车辆汇入主路行车道的基本理论和概率分布

2.1 匝道车辆在加速车道上的最小行驶距离模型

在不考虑交通量影响时, 匝道车辆在加速车道上的行驶距离可以由式 (2) 计算

$$S_0 = \frac{U^2 - u^2}{26a} \quad (2)$$

式中, S_0 为行驶距离, m; a 为加速度, $a=0.8 \sim 1.2m/s^2$; U 为匝道车辆成功汇入主路的合流车速, km/h; u 为匝道车辆达到合流区鼻端位置的速度, km/h。

此段距离是匝道车辆在加速车道上必须实现加速过程的最小运行距离。计算加速车道长度时, 合流区鼻端位置速度 u 可取匝道设计行车速度。合流车速 U 指的是加速车道上车辆汇入高速公路主线行车道时, 汇入车辆保持的一般车速。由于驾驶员的差别、车辆动力性能的差异, 汇入车辆采用的合流速度也不相同。根据调查, 汇入车辆的合流速度小于高速公路主路行车速度, 两者速度差过大不利于匝道车辆安全汇入主路行车道。欧共体和丹麦对西班牙、荷兰、德国和丹麦 4 个国家的高速公路入口进行实测观察得到的速度差为 20km/h^[7]。基于设计的安全性和经济型考虑, 合流车速 U 的计算如下式

$$U = V_1 - 15 \quad (3)$$

式中, V_1 为高速公路主路设计速度, km/h。

2.2 匝道车辆汇入主路行车道的概率

合流区路段是入口匝道车辆和主路行车道车辆交错汇集、争夺主路行车道通行权的地方。在匝道车辆不能直接汇入主路行车道时, 匝道车辆上的司机必须在加速车道上边行驶边观察合流区主路行车道车流中车辆间的间隙 (gap)。当主路行车道提供的间隙大于可插入的临界间隙 (t_0) 时, 才能汇入; 当合流区主路行车道提供的间隙大于匝道车辆的临界间隙 (t) 和其后面车辆的随车时距 (t_f) 之和时, 匝道第二辆车可以跟随前面车辆结队汇入同一主路行车道间隙。这就是匝道车辆利用可接受间隙汇入主路行车道交通流的基本理论。由此, 匝道车流能否顺利汇入主要取决于主路行车道车流车头时距服从的分布规律、匝道车辆临界间隙、随车时距大小及其分布。

一车道匝道主路单向两车道合流区见图 3 所示。其加速车道长为 L , 在匝道入口处令 $x=0$ (即当主路行车道交通量很小时, 匝道车辆可直接汇入主路的地方), 加速车道末端为 $x=L$, 在加速车道的其它位置 $0 \leq x \leq L$, 匝道车辆于 x 处可以汇入主路行车道的

临界间隙为 $t(x)$, 随车时距为 $t_f(x)$ 。

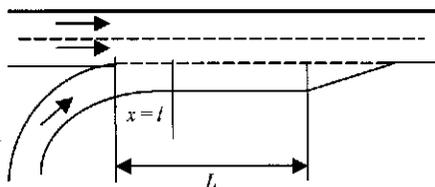


图3 合流区加速车道合流点位置示意图

则当主路行车道车辆的车头时距符合二阶 Erlang 分布时, 主路行车道车流在 x 处可以使匝道车辆连续汇入 n 辆的概率为

$$P[h > t(x) + (n-1)t_f(x)] = e^{-\frac{Q_1}{1800}[t(x) + (n-1)t_f(x)]} \left\{ 1 + \frac{Q_1}{1800}[t(x) + (n-1)t_f(x)] \right\} \quad (4)$$

2.3 匝道车辆在加速车道上不同位置的汇入概率模型

式(2)给出了主路交通量很小, 并且不影响匝道车辆汇入情况下的加速车道所需最小长度。现在研究在给定主路行车道交通量, 匝道车辆到达合流端时主路暂无可汇入间隙, 车辆在加速车道上一边加速一边等候主路车流出现可汇入间隙时的情况, 并建立这种情况下匝道车辆在加速车道不同位置汇入主路的概率模型。

主路行车道在合流区 $x=l$ 处出现可汇入间隙的概率是随机的, 合流区的大部分位置(50~200m内)符合2阶 Erlang 分布^[6]。匝道车辆在此处能否遇到主路行车道的可汇入间隙取决于其在此等候的时间。而时间是连续变化的, 匝道车辆在 $x=l$ 处能否遇到主路行车道的可汇入间隙的概率分布函数为匝道车辆在此等候时间的几何分布。令匝道车辆在加速车道上从 $x=0$ 开始到 $x=l(0 < l < L)$ 止车辆合流成功的概率为 $P(l)$ 。下面求汇入概率 $P(l)$ 与匝道车辆行驶距离 l 的关系式。

设匝道车辆在 $x=l+\Delta l$ (其中 $\Delta l \rightarrow 0$) 处成功汇入的概率为 $P(l+\Delta l)$, 则

$$P(l+\Delta l) = P(l) + [1 - P(l)] \Delta t e^{-\frac{Q_1}{1800}t(l)} \left[1 + \frac{Q_1}{1800}t(l) \right] \quad (5)$$

其中, Δt 为匝道车辆在 Δl 的行驶时间, 由于 Δl 非常短(趋向于0), 从而匝道车辆在 Δl 内的可接受间隙为其在 l 处的可接受间隙 $t(l)$ 。在 Δl 内保持其在位置 l 处的行驶速度 $u(l)$, 则

$$\Delta t = \frac{\Delta l}{u(l)} \quad (6)$$

在 Δt 这段极小时间内, 可以认为匝道车辆在加速车道上 Δl 内保持合流速度 U , 于是式(5)可以转化为

$$\frac{P(l+\Delta l) - P(l)}{\Delta l} = \frac{e^{-\frac{Q_1}{1800}t(l)} \left[1 + \frac{Q_1}{1800}t(l) \right] - P(l)}{U} + \frac{e^{-\frac{Q_1}{1800}t(l)} \left[1 + \frac{Q_1}{1800}t(l) \right] - P(l)}{U} \quad (7)$$

$$\text{令 } \frac{Q_r(l)}{3600} = \frac{1}{U} e^{-\frac{Q_1}{1800}t(l)} \left[1 + \frac{Q_1}{1800}t(l) \right] \quad (8)$$

通过对式(7)两边求 $\Delta l \rightarrow 0$ 的极限, 可以得到如下微分方程

$$P'(l) = -\frac{Q_r(l)}{3600}P(l) + \frac{Q_r(l)}{3600} \quad (9)$$

对于式(7), 如果 Q_1 和 $t(l)$ 均取合流区主路行车道交通量及匝道车辆临界间隙的均值, 并且令 $Q_r = \bar{Q}_r(l)$, 则微分方程(9)有通解

$$P(l) = Ce^{-\frac{Q_r l}{3600}} + 1 \quad (10)$$

由方程(10)的连续性及其 $x=l$ 位置点的定义, 当 $x=l=0$ 时 $P(l)=0$, 对方程(10)两端取 $x=l=0$ 处的左极限, 可以得到 $C=-1$ 。于是

$$P(l) = 1 - e^{-\frac{Q_r l}{3600}} \quad (11)$$

由于主路车流可汇入间隙的分布是一个随机分布, 在相同的主路、匝道交通负荷下, 匝道车辆在加速车道的行驶距离不一定相同。若 $p=P(l)$ 表示经过调查得到的匝道车辆于 l 处汇入的概率, 由式(11)可以得到匝道车辆在等待主路可汇入间隙的行驶距离为

$$l = -\frac{3600}{Q_r} \ln(1-p) \quad (12)$$

这样, 匝道车辆在加速车道上所需的行驶距离为式(2)与式(12)之和。即加速车道长度由车辆本身加速行驶所需的最小长度和匝道车辆汇入主路行车道所需长度两部分组成

$$S = \frac{U^2 - u^2}{26a} - \frac{3600}{Q_r} \ln(1-p) \quad (13)$$

3 考虑服务交通量的加速车道长度计算

设主路车道平均车速为 U , 匝道车辆达到合流区鼻端相应位置的初速度为 u , 加速度 a , p 表示匝道车辆可直接汇入主路的概率, Q_r 为匝道的服务交通量, 则考虑了主路服务交通量的加速车道长度可由式(13)、(1)、(3)联立求解, 如式(14)所示。

$$\begin{cases} S = \frac{U^2 - u^2}{26a} - \frac{3600}{Q} \ln(1-p) \\ Q = Q_1 \sum_{i=0}^{r-1} \frac{(-1)^i}{i!} \left| \frac{\exp(-Q_1 r t_0 x / \beta 600)}{1 - \exp(-Q_1 r t_0 x / \beta 600)} \right|_{x=1}^{(i)} \\ U = V_1 - 15 \end{cases} \quad (14)$$

当加速度 a 取 1, 汇入概率 p 取 0.95, 即 95% 的匝道车辆可以顺利汇入主路行车道, 主路设计车速为 120 km/h, 匝道设计车速分别为 80、60、40、30 km/h 和 0 km/h 时的行驶距离(所需的加速车道长度)与服务交通量的关系如图 4。

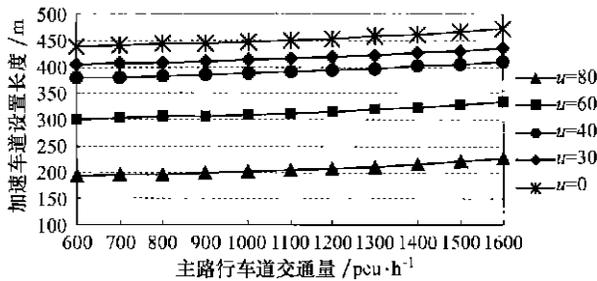


图 4 加速车道上行驶距离与服务交通量的关系曲线

如前所述, 对于主路设计速度为 120 km/h 的高速公路, 二级服务水平所对应的服务交通量为 750 ~ 1600 pcu/h/lane。在此考虑高速公路上车辆较多而满足二级服务水平状况下加速车道的设置长度, 即主路行车道服务交通量在 1200 ~ 1500 pcu/h 左右时加速车道应该达到的长度, 则当匝道速度分别是 80、60、40 km/h 和 30 km/h 时对应的加速车道长度分别是 220、330、400、430 m; 匝道速度为 0 km/h (即 $u=0$), 是指车辆从服务区或收费站直接进入高速公路主路行车道时的情况, 此时要求的加速车道长度为 465 m。

同样, 由式 (14) 可以依次算出主路设计车速为 100、80 km/h 和 60 km/h 对应不同匝道设计车速时在不同主路服务交通量下的加速车道设置长度。最终推荐加速车道长度汇总如表 4。

表 4 高速公路加速车道长度设置表 m

| 匝道设计车速 / km·h ⁻¹ | 主路设计车速 / km·h ⁻¹ | | | |
|-----------------------------|-----------------------------|-----|-----|-----|
| | 120 | 100 | 80 | 60 |
| | 渐变段长度 / m | | | |
| | 95 | 85 | 70 | 55 |
| 80 | 220 | 65 | | |
| 60 | 330 | 170 | 50 | |
| 40 | 400 | 250 | 130 | 35 |
| 30 | 430 | 280 | 155 | 60 |
| 0 | 465 | 310 | 190 | 100 |

参考文献:

- [1] 高速公路丛书编委会. 高速公路立交工程 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2001
- [2] 吴国雄, 李方. 互通式立体交叉设计范例 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2002
- [3] 交通部公路科学研究所, 交通部规划研究院, 东南大学等. 公路通行能力研究报告 [R]. 2000.
- [4] 王伟, 过秀成, 等. 交通工程学 [M]. 南京: 东南大学出版社, 2000.
- [5] 常玉林, 王伟, 等. 主车流服从 Erlang 分布下支路通行能力研究 [J]. 南京: 东南大学学报, 1998, 28 (3): 98-102
- [6] 李铁柱, 李文权, 周荣贵, 等. 高速公路加减速车道合流分流特征分析 [J]. 公路交通科技, 2001, 18 (4): 89-91
- [7] 赵春. 高速公路合流区交通模拟与评价研究 [D]. 南京: 东南大学硕士学位论文, 2002