

文章编号: 1674-599X(2021)04-0108-09

## 基于 vissim 仿真的高速公路客货分道动态控制

郭丽苹, 朱晓东, 高佳宁, 罗瑞琪, 由婷婷

(中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津, 300074)

**摘要:** 针对高速公路客车货车混行相互干扰造成交通效率下降的现象, 基于客货分道划分方法, 提出高速公路客货分道动态控制的理念。以美国加利福尼亚州 i5 高速公路为例, 运用 vissim 软件建立模型, 对单向三车道、四车道和五车道在不同的交通流量和不同的客货比下进行仿真, 分析对客货分道控制的效果, 绘制客货分道动态控制系统流程图。研究结果表明: 客货分道在一定的条件下能够有效降低车辆的平均延误, 提高车辆的平均速度; 客货分道动态控制系统的有效适用范围, 单向四车道客车与货车的标准量比值为  $1/8 \sim 20$ ; 单向单车道客车与货车的标准量比值为  $1/4 \sim 20$ ; 单向五车道客车与货车的标准量比值为  $1/12 \sim 10$ 。

**关键词:** 交通工程; 客货分道; vissim 仿真; 高速公路; 控制系统

中图分类号: U491 文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.04.013

## Dynamic control of passenger-cargo lane separation of expressway based on the vissim simulation

GUO Li-ping, ZHU Xiao-dong, GAO Jia-ning, LUO Rui-qi, YOU Ting-ting

(North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300074, China)

**Abstract:** Aiming at the phenomenon that the mutual interference of mixed traffic of passenger car and truck on expressway, causing the decline of traffic efficiency, the concept of dynamic control of passenger-cargo division lane in highway was proposed based on the passenger and freight lane division method. Taking the i5 expressway in California as an example, the model was established using the vissim software. Three, four and five lanes with different passenger-cargo ratio were simulated under different traffic flow. The control effect of passenger-cargo lane separation was analyzed. And the flow chart of lane separation dynamic control system was drawn. The research results show that the separation of passenger-cargo lane can effectively reduce the average delay of vehicles, and improve the average speed of vehicles. The effective application range of dynamic control system of passenger-cargo separation can be described as, the standard quantity ratio of passenger car to truck for one-way four lane is  $1/8 \sim 20$ , the value for three lane is  $1/4 \sim 20$ , the value for five lane is  $1/12 \sim 10$ .

**Key words:** traffic engineering; passenger-cargo separation; the vissim simulation; expressway; control system

中国经济水平不断发展, 私家车、物流运输货车等车辆逐年增多, 高速公路的服务水平却不断下降。如何对正在运营的高速公路进行智能控制管理, 提高道路的运行效率, 成为了亟待研究的问题。考虑到客车和货车在行驶过程中速度的

差异及行驶过程中相互干扰的现象, 国内外许多专家提出客货分线、客货分道的控制策略。

20世纪20年代初期, 美国交通运输部开始对可变车道进行研究, 学者也逐步提出了客货分道的理念<sup>[1-2]</sup>。Mason等人<sup>[3]</sup>基于国外道路多为单向5

收稿日期: 2020-09-14

作者简介: 郭丽苹(1990—), 女, 中国市政工程华北设计研究总院有限公司工程师。

条车道的情况, 提出将道路分成3条客车专用车道和2条货车专用车道的分配方法。鲁翠娥等人<sup>[4]</sup>用元胞模型仿真了不同比例的货车对高速公路交通流的扰动影响。李冠峰等人<sup>[5]</sup>提出了高速公路客货车分道通行的概念。刘晨辉<sup>[6]</sup>论述了在不同交通量和客货比的情况下, 实施不同货车限行措施、道路通行效率和运营安全性。王新慧<sup>[7]</sup>提出了采用标志标线分隔车道和设施分隔道路的选择模型和实施条件。马捷<sup>[8]</sup>提出了适用于客货分道管理系统的评价指标体系。但客货分道的研究主要针对客货分道管理方法的对比及具体实施措施, 而不同车道数、不同交通量下的动态客货分道控制研究少见。因此, 作者拟通过vissim建立模型进行仿真, 验证客货分道控制的效果, 寻找该系统的适用范

围, 提出客货分道动态控制系统流程图。

### 1 客货分道划分方法

客货分道指采用设置标志或标线的方法来分隔客货车辆。客货分道管理方法应具有实用性和操作性。道路上的交通量和客货比不断变化, 因此, 合理的客货分道方式也实时变化。车道划分的影响因素主要包括: 车道数量、交通流量和客货比等。为满足超车等需求, 客货分道至少要单向三车道及以上, 而目前国内单向五车道以上的高速公路相对较少, 同时考虑到仿真及理论分析的普适性和简约性, 本研究对高速公路客货分道的分析分为3种情况: 单向三车道、单向四车道和单向五车道。

表1 客货分道划分表

Table 1 Division of passenger-cargo

分道类型	单向三车道客货分道			单向四车道客货分道				
	$a < 1/2$	$1/2 \leq a < 2$	$a \geq 2$	$a < 1/3$	$1/3 \leq a < 1$	$a = 1$	$1 < a < 3$	$a \geq 3$
划分形式	2M+T	B+M+T	B+2M	2M+2T	B+M+2T	2B+2T	2B+M+T	2B+2M
分道类型	单向五车道客货分道							
	$a < 1/4$	$1/4 \leq a < 2/3$	$a = 2/3$	$2/3 < a < 3/2$	$a = 3/2$	$3/2 < a < 4$	$a \geq 4$	
划分形式	2M+3T	B+M+3T	2B+3T	2B+M+2T	3B+2T	3B+M+T	2M+3B	

注: 上表中B代表客车车道; M代表货车车道; T代表货车车道

#### 1.1 单向三车道

客货分道应先将不同车型折算成标准小客车, 然后将客车标准量  $N_{客}$  比货车标准量  $N_{货}$ , 即  $N_{客}/N_{货}$ , 将其定义为  $a$ 。在考虑车道划分多个影响因素的基础上, 单向三车道客货分道可划分为3种形式见表1。

当  $a < 1/2$  时, 理论上应采用1条混行车道+2条货车车道 (M+2T) 的划分形式, 鉴于小客车有换道超车需求, 可采用2条混行车道+1条货车车道 (2M+T) 的划分形式。当  $1/2 \leq a < 2$  时, 可采用1条客车车道+1条混行车道+1条货车车道 (B+M+T) 的划分形式。当  $a \geq 2$  时, 应采用2条客车车道+1条混行车道 (2B+M) 的划分形式, 鉴于货车有换道超车需求, 可采用1条客车车道+1条混行车道+1条货车车道 (B+M+T) 的划分形式。以2条混行车道+1条货车车道 (2M+T) 的划分形式

为例, 绘制划分形式图, 如图1所示。



图1 2M+T划分形式

Fig. 1 The 2M+T division form

#### 1.2 单向四车道

单向四车道客货分道可划分为5种形式见表1。

#### 1.3 单向五车道

单向五车道客货分道可划分为7种形式见表1。

### 2 仿真模型建立与参数设定

采用vissim软件, 分别对单向三车道、四车道

和五车道建立仿真模型分析客货分道的效果,并寻找该系统的适用界限<sup>[9]</sup>,以单向四车道为例,建立仿真模型和仿真参数的设定。

### 2.1 道路条件

以美国加利福尼亚州 i5 高速公路为例进行建模,该道路主线为双向八车道,车道宽度为 3.66 m,设计速度为 112.65 km/h。仿真选取单向车流分析,路网为单向四车道,在进行三车道和五车道仿真时,分别通过关闭 1 条车道和增加 1 个车道的方式构建路网。

### 2.2 交通量的选取

不同交通量对道路车辆通行的影响很大,从道路服务水平角度出发,选取合适的客货分道控制区间。

根据美国交通运输委员会的《HCM》手册,服务水平分为六级。A、B 级服务水平为自由运行或自由交通流,相互间不会产生干扰,因此,不考虑加入人为的控制。E 级服务水平为流率达到通行能力下的运行状况,车辆运行状况极不稳定,F 级服务水平指拥堵车流。因这 2 个服务水平下驾驶自由度受到极大限制,人为控制很难起到正面效应,因此同样不考虑加入人为控制。C 级服务水平为平均行程车速接近自由流速度,驾驶自由度明显受到限制。D 级服务水平为自由度已受到较严重限制。为降低车辆间的相互干扰,降低行车延误,提高平均车行速度,考虑采用该客货分道系统进行车流控制,即自由流速度为 110 km/h,交通量在 1 210~2 135 pcu/(h·ln) 之间的情况下,进行客货分道动态控制。

### 2.3 交通流组合形式

为评估客货分道控制效果,寻找适用的大小界限,选取 1 440、1 670、1 900 pcu/(h·ln) 3 种交通流状态,并分为以多种  $a$  值的交通流组合进行分析,因单向四车道的判断决策点分别为  $a=1/3$ 、1、3,因此,以  $a=1/4$ 、 $2/3$ 、2、4 为例,不同比例不同交通流量下的车辆组合形式见表 2。

仿真中,选取货车当量系数为 1.5,即:表 4 中货车的数量,在仿真车流量数据输入时,应采用除以 1.5 以后的数据。车道断面交通量应将客车数加上处理后的货车数,用得到的和乘以车道数。以车流量 1 440 pcu/(h·ln), $a=1/4$ ,货车交通量为  $1152/1.5=768$  辆。断面车流量为  $(288+768) \times 4=4 224$  辆/h。

在仿真参数设置中,客车数比处理后的货车数设置为相对车流比例,断面车流量即为车辆输入数据。

表 2 不同交通量及客货比的车辆组合形式

Table 2 Vehicle combinations with different traffic volume and passenger freight ratio

$a$	车流量/pcu(h·ln) <sup>-1</sup>					
	1 440		1 670		1 900	
	客车	货车	客车	货车	客车	货车
1/4	288	1 152	334	1 336	380	1 520
2/3	576	864	668	1 002	760	1 140
2	960	480	1 113	557	1 267	633
4	1 152	288	1 336	334	1 520	380

### 2.4 车型设置

小汽车长度 3.75~4.76 m,宽度 1.85~2.07 m;货车长度 10.22 m,宽度 2.50 m。

### 2.5 车速设置

小汽车 88~130 km/h;货车 75~110 km/h。

### 2.6 仿真参数

为使仿真数据在车流平稳状态下输出,数据采集从 3 600 s 开始,采集时间间隔为 3 600 s。仿真时间根据不同的交通流组数,设置为:(交通流组数+1)×3 600 s。

### 2.7 评估指标

评估指标选用车路网性能中平均延误、平均速度对客货分道效果进行分析。

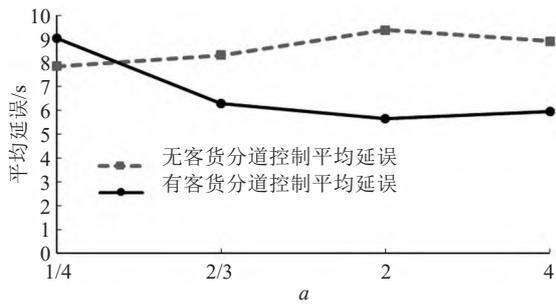
## 3 仿真结果评估

以单向四车道为例,阐述仿真的方法、思路、分析和结果,最后简要介绍单向三车道和单向五车道的仿真结果。

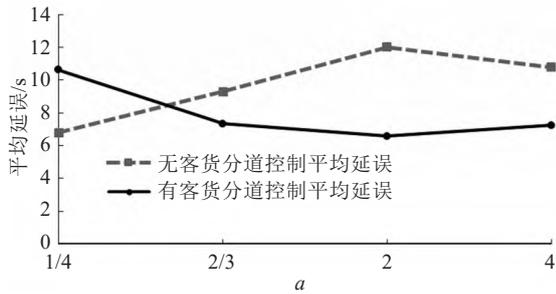
### 3.1 四车道客货分道仿真效果评估

单向四车道时,仿真结果如图 2~3 所示。

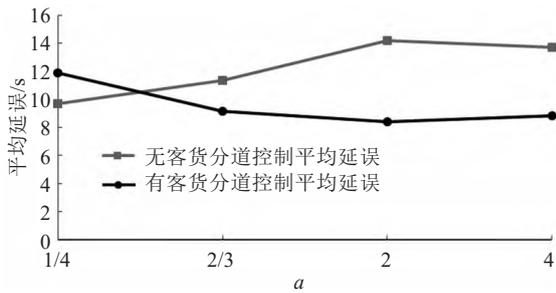
从图 2~3 中可以看出,在单向四车道,当  $a=2/3$ 、2、4 时,客货分道控制在 3 种交通流状态下,均取得了正面效应,降低了平均延误,提高了平均速度,增大了道路通行能力,提高了驾驶员的舒适度。但  $a=1/4$  时,客货分道控制未取得正面效应,不但没有使交通效率提高,反而造成了延误增加,平均速度降低。



(a)交通量为1 440 pcu/(h·ln)



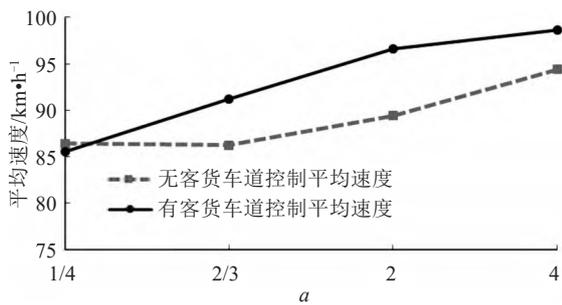
(b)交通量为1 670 pcu/(h·ln)



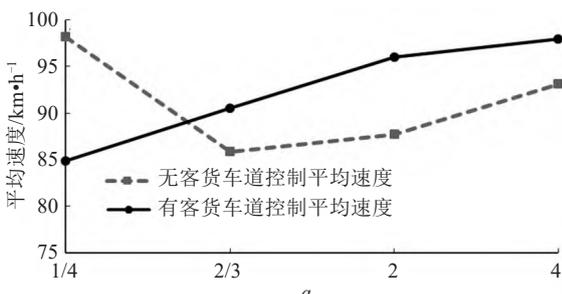
(c)交通量为1 990 pcu/(h·ln)

图2 四车道有无客货分道平均延误对比

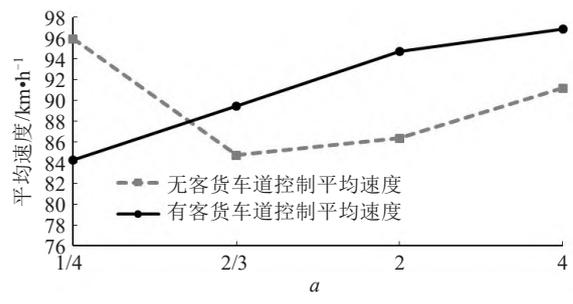
Fig. 2 Comparison of average delay of four lanes without passenger and freight separation



(a)交通量为1 440 pcu/(h·ln)



(b)交通量为1 670 pcu/(h·ln)



(c)交通量为1 990 pcu/(h·ln)

图3 四车道有无客货分道平均速度对比

Fig. 3 Comparison of average speed of four lanes with or without passenger and freight separation

表3 客货分道控制下交通量为1 670 pcu/(h·ln)的仿真结果

Table 3 Analysis of simulation results of passenger and freight lane separation with the traffic volume of the 1 670 pcu/(h·ln)

工 况	无客货分道控制		有客货分道控制		延 误 降 低 率/%	速 度 提 高 率/%
	平均 延 误/s	平均 速 度/ km·h <sup>-1</sup>	平均 延 误/s	平均 速 度/ km·h <sup>-1</sup>		
1/4	6.78	98.16	10.62	84.90	-56.64	-13.51
2/3	9.28	85.85	7.34	90.55	20.91	5.47
2	12.02	87.71	6.58	96.04	45.26	9.50
4	10.79	93.12	7.23	97.92	32.99	5.15

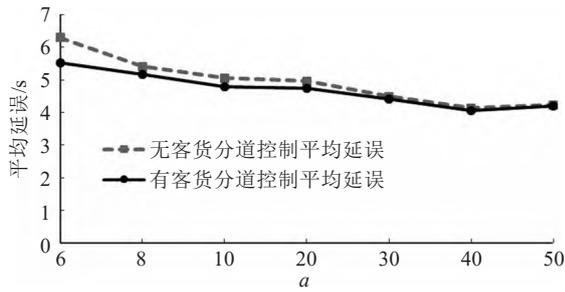
注: 因本研究仿真过程数据量较大, 所以仅以1 670 pcu/(h·ln)的仿真结果为例, 其余均以图形式展示

由表3可知, 单向四车道, 当交通量为1 670 pcu/(h·ln),  $a=2/3$ 、2、4时, 采用客货分道控制, 降低了平均延误, 提高了平均速度, 增大了道路通行能力。当 $a=2$ 时, 效果最为显著, 延误降低率达到了45.26%, 速度提高率达到了9.50%。但 $a=1/4$ 时, 延误增加了56.64%, 速度降低了13.51%。表明: 当 $a$ 值很小或很大时, 可能存在客货分道效果较差的情况, 为分析产生该情况的具体 $a$ 值, 进行了客货分道适用范围大小界限仿真。

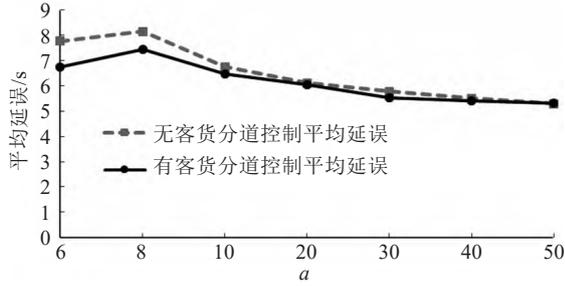
### 3.2 四车道客货分道大界限仿真结果评估

为分析四车道客货分道的大界限, 选取 $a=6$ 、8、10、20、30、40、50进行仿真, 仿真结果如图4~5所示。

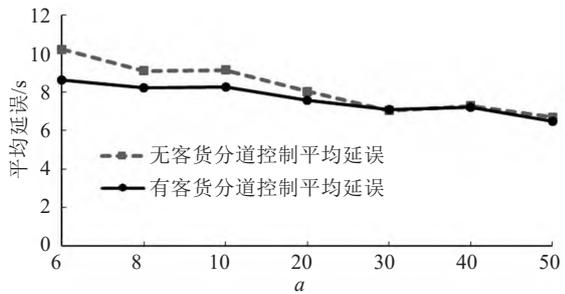
从图4~5中可以看出, 单向四车道, 当 $a=6$ 、8、10、20时, 客货分道控制在3种交通流状态下, 均取得了正面效应。但当交通量为1 670 pcu/(h·ln)、 $a=50$ , 以及交通量为1 990 pcu/(h·ln)、 $a=30$ 时, 客货分道控制产生了负面效应。因此, 为避免客货分道控制带来不必要的负面效应, 单向四车道在 $a>20$ 时, 不宜对交通流进行客货分道控制。



(a)交通量为1440 pcu(h·ln)



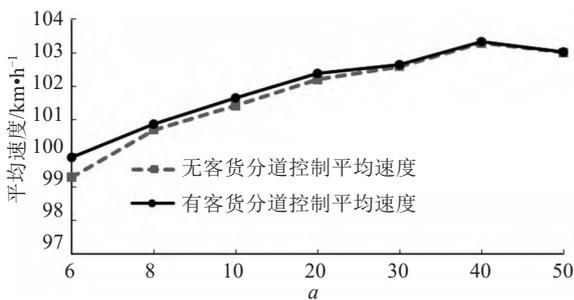
(b)交通量为1670 pcu(h·ln)



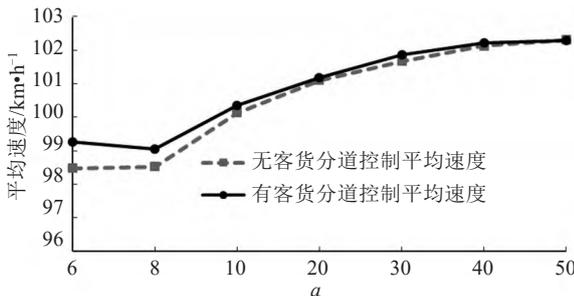
(c)交通量为1990 pcu(h·ln)

图4 四车道大界限仿真平均延误对比

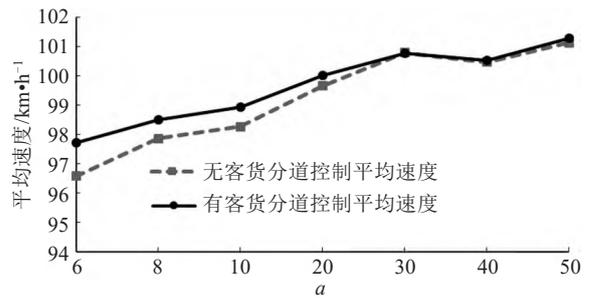
Fig. 4 Comparison chart of average delay of four lane of large boundary simulation



(a)交通量为1440 pcu(h·ln)



(b)交通量为1670 pcu(h·ln)



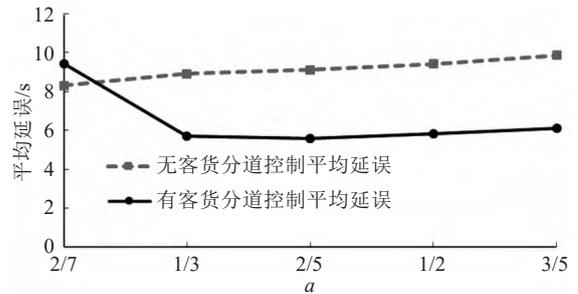
(c)交通量为1990 pcu(h·ln)

图5 四车道大界限仿真平均速度对比

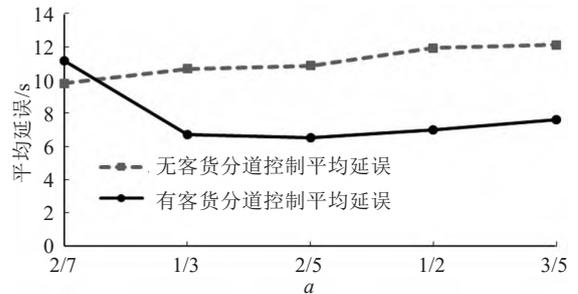
Fig. 5 Comparison chart of average speed of four lane of large boundary simulation

3.3 四车道客货分道小界限仿真结果

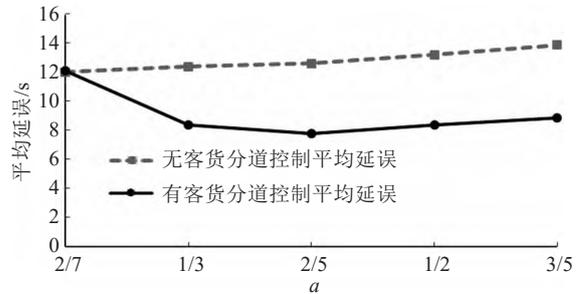
为分析四车道客货分道的大界限，选取 $a=2/7$ 、 $1/3$ 、 $2/5$ 、 $1/2$ 、 $3/5$ 时进行仿真，仿真结果如图6~7所示。



(a)交通量为1440 pcu(h·ln)



(b)交通量为1670 pcu(h·ln)



(c)交通量为1990 pcu(h·ln)

图6 四车道小界限仿真平均延误对比

Fig. 6 Comparison of average delay of four lane of small boundary simulation

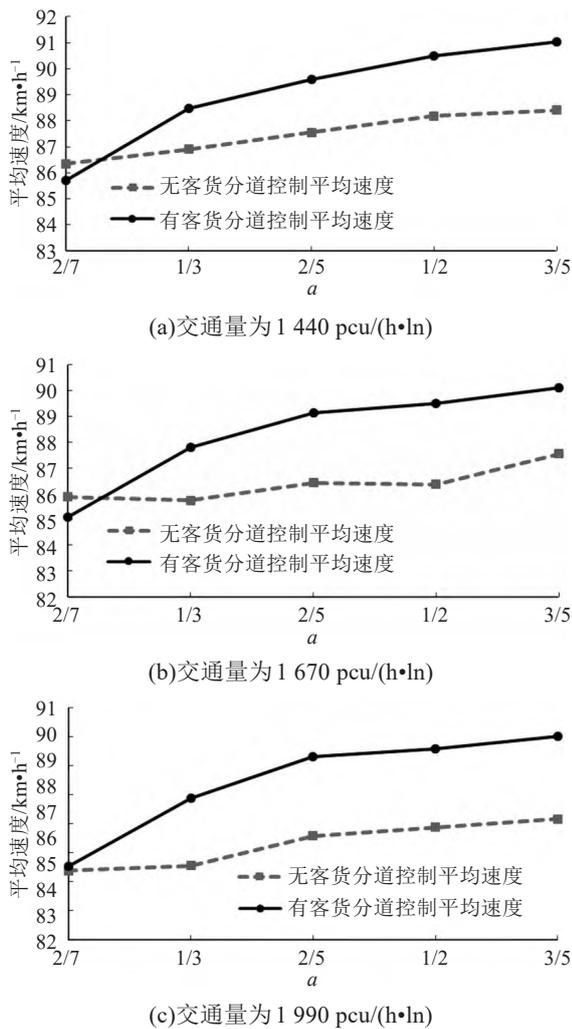


图7 四车道小界限仿真平均速度对比

Fig. 7 Comparison chart of average speed of four lane of small boundary simulation

从图6~7中可以看出,在单向四车道,当 $a=1/3$ 、 $2/5$ 、 $1/2$ 、 $3/5$ 时,客货分道控制在3种交通流状态下,均取得了正面效应,但当 $a=2/7$ 时,客货分道控制产生了负面效应。因此,当 $a < 1/3$ ,控制策略为2条混行车道+2条货车车道(2M+2T)时,不宜对交通流进行客货分道控制。但当 $a=1/3$ 时,采用1条客车车道+1条混行车道+2条货车车道(B+M+2T)客货分道控制策略,产生了很好的正面效应,延误降低率、速度提高率均较高。当 $a < 1/3$ 时,采用1条客车车道+1条混行车道+2条客车车道(B+M+2T)客货分道控制策略,会在一定比例范围内同样产生正面效应,因此,对该情况进行进一步的仿真分析。

### 3.4 四车道 $a < 1/3$ 和B+M+2T的仿真结果

为验证四车道  $a < 1/3$  在1条客车车道+1条混行车道+2条货车车道(B+M+2T)策略下的客货分道仿真效果,选取 $a=1/15$ 、 $1/12$ 、 $1/10$ 、 $1/8$ 、 $1/6$ 、 $1/4$ 的6组数据进行仿真,仿真结果如图8~9所示。

从图8~9中可以看出,在1条客车车道+1条混行车道+2条货车车道(B+M+2T)控制策略下,当 $a=1/8$ 、 $1/6$ 、 $1/4$ 时,客货分道控制在3种交通流状态下,均取得了正面效应。但在3种交通流状态下,当 $a=1/15$ 、 $1/12$ 且交通量为1 990 pcu/(h·ln)、 $a=1/10$ 时,客货分道控制均产生了负面效应。因此,为避免客货分道控制带来不必要的负面效应,在四车道B+M+2T控制策略下, $a < 1/8$ 时,不宜对交通流进行客货分道控制。

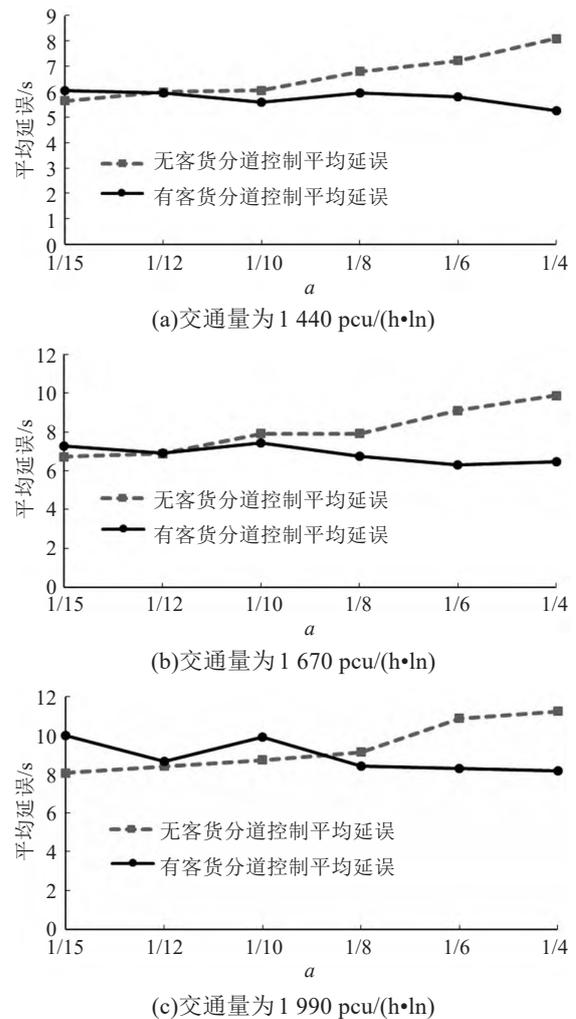


图8 四车道  $a < 1/3$  在B+M+2T策略下仿真平均延误对比

Fig. 8 Comparison of simulation average delay of four lane with  $a < 1/3$  under B+M+2T strategy

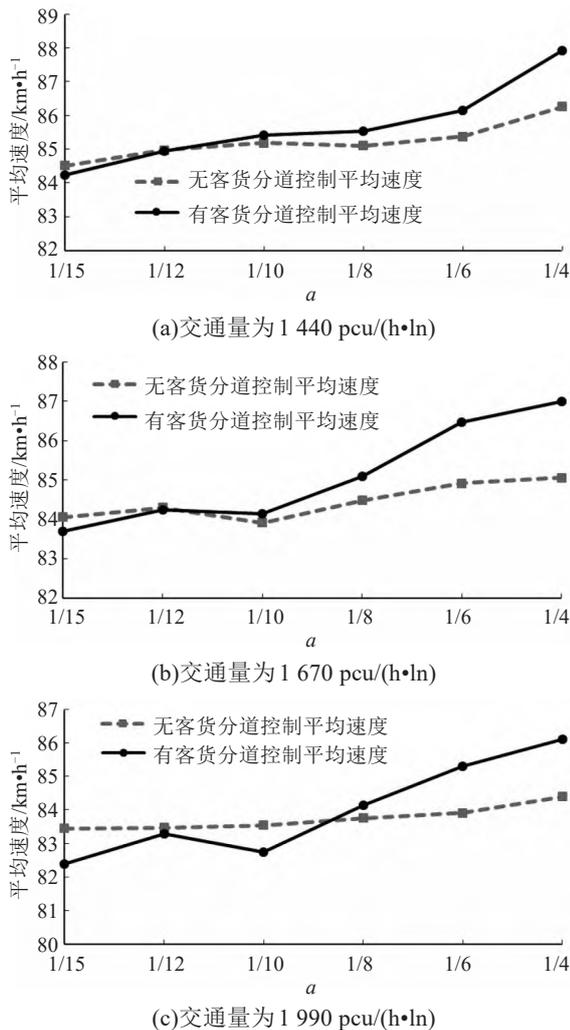


图9 四车道  $a < 1/3$  在 B+M+2T 策略下仿真平均速度对比  
Fig. 9 Comparison of simulated average speed of four lane with  $a < 1/3$  under B+M+2T strategy

### 3.5 三车道客货分道界限仿真

运用四车道客货分道控制的仿真与分析方法, 得到三车道的仿真界限分析结果为:

1) 三车道客货分道大界限的仿真结果: 在单向三车道下, 当  $a$  为 6、8、10、20 时, 客货分道控制在 3 种交通流状态下, 均取得了正面效应。但当交通量为 1 440 pcu/(h·ln),  $a$  为 30、40 时, 客货分道控制产生了负面效应。因此, 为避免客货分道控制带来不必要的负面效应, 单向三车道在  $a > 20$  时, 不宜对交通流进行客货分道控制。

2) 三车道客货分道小界限的仿真结果: 当  $a < 1/2$  时, 在控制策略为 2 条混行车道+1 条货车车道 (2M+T) 下, 客货分道控制均产生了负面效应, 因此, 摒弃该控制策略; 当  $a < 1/2$  时, 控制

策略为 B+M+T, 在 3 种交通流状态下,  $a=1/4$ 、 $2/7$ 、 $1/3$ 、 $2/5$ 、 $1/2$  时, 客货分道控制均取得了正面效应。但在 3 种交通流状态下,  $a=1/8$  且交通量为 1 990 pcu/(h·ln) 或  $a=1/6$  时, 客货分道控制均产生了负面效应。因此, 为避免客货分道控制带来不必要的负面影响, 单向三车道在  $a < 1/4$  时, 不宜对交通流进行客货分道控制。

### 3.6 五车道客货分道界限仿真

运用四车道客货分道控制的仿真模型与分析方法, 得到五车道的仿真界限结果为:

1) 五车道客货分道大界限仿真的仿真结果: 在单向五车道下, 当  $a=6$ 、8、10 时, 客货分道控制在 3 种交通流状态下, 均取得了正面效应。但当交通量为 1 440 pcu/(h·ln),  $a=40$  时; 当交通量为 1 670 pcu/(h·ln),  $a=20$ 、30 时; 当交通量为 1 990 pcu/(h·ln),  $a=30$  时, 客货分道控制产生了负面效应。因此, 为避免客货分道控制带来不必要的负面效应, 单向五车道在  $a > 10$  时, 不宜对交通流进行客货分道控制。

2) 五车道客货分道小界限仿真的仿真结果: 当  $a < 1/4$  时, 控制策略为 2 条混行车道+3 条货车车道 (2M+3T), 客货分道控制均产生了负面效应, 平均延误增加, 平均速度降低, 因此摒弃该控制策略。当  $a < 1/2$  时, 控制策略为 1 条客车车道+1 条混行车道+3 条货车车道 (B+M+3T), 在 3 种交通流状态下,  $a=1/12$ 、 $1/10$ 、 $1/8$ 、 $1/6$ 、 $1/4$  时, 客货分道控制均取得了正面效应。但在交通量为 1 440 pcu/(h·ln) 和 1 990 pcu/(h·ln),  $a=1/15$  时, 客货分道控制产生了负面效应。因此, 为避免客货分道控制带来不必要的负面影响, 单向五车道在  $a < 1/12$  时, 不宜对交通流进行客货分道控制。

## 4 动态客货分道流程

根据本试验的仿真结果, 考虑客货分道系统可根据实时交通量变化进行动态控制, 绘制流程图。

### 4.1 主流程

客货分道控制主流程如图10所示。首先判断是否发生交通事故,若发生交通事故,则中断流程,并打印“发生交通事故,不宜启动客货分道控制流程”。若未发生交通事故,从检测器读取交通状态数据,判断服务水平。当服务水平在2~4级服务水平之间,即交通量在1 210~2 135 pcu/(h·ln)之间时,根据道路条件,判断车道数,进入相应客货分道控制子流程,选定控制方案,否则打印“未包含适合该道路形式的控制子流程”,若工程需要,可增设子流程。当方案执行到预设时间5 min,流程循环至最初判断交通事故的步骤。

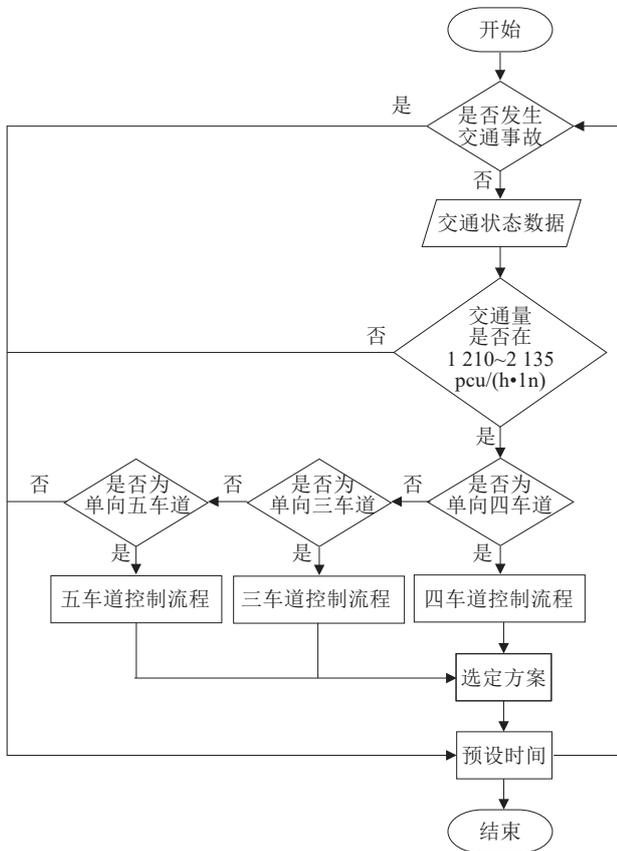


图10 客货分道控制主流程

Fig. 10 Main flow chart of passenger cargo lane control

### 4.2 单向四车道子流程

当道路为单向四车道时,选择进入单向四车道客货分道子程序。

单向四车道客货分道控制子流程如图11所示。通过获取道路检测器的交通流数据,将货车交通量转换成标准小汽车交通量,判断 $a$ 的比值所在区间,当 $1/8 \leq a < 1$ 时,采用1条客车车道+1条混行

车道+2条货车车道(B+M+2T)的划分形式。当 $a=1$ 时,采用2条客车车道+2条货车车道(2B+2T)的形式。当 $1 < a < 3$ 时,采用2条客车车道+1条混行车道+1条货车车道(2B+M+T)的划分形式。当 $3 \leq a \leq 20$ 时,采用3条客车车道+1条混行车道(3B+M)的划分形式,输出选定客货分道方案。

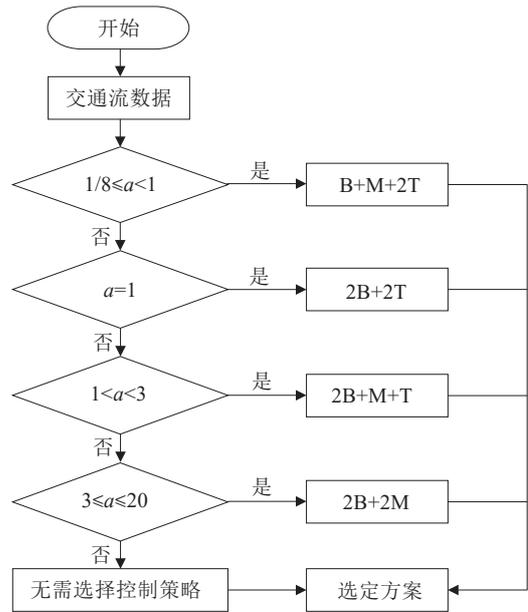


图11 单向四车道客货分道控制子流程

Fig. 11 Sub flow chart of one-way four lane passenger and freight lane separation control

### 4.3 单向三车道子流程

当道路为单向三车道时,选择进入单向三车道客货分道子程序。控制子流程如图12所示。

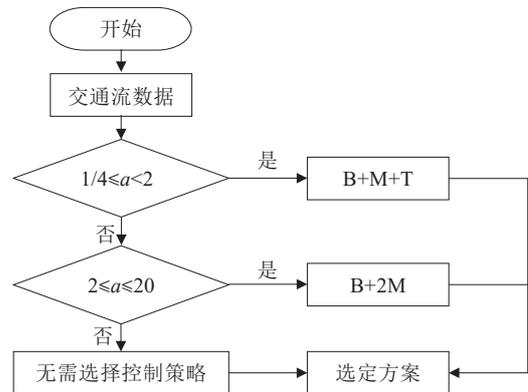


图12 单向三车道客货分道控制子流程

Fig. 12 Sub flow chart of one-way three lane passenger-cargo lane separation control

### 4.4 单向五车道子流程

当道路为单向五车道时,选择进入单向五车道客货分道子程序。控制子流程如图13所示。

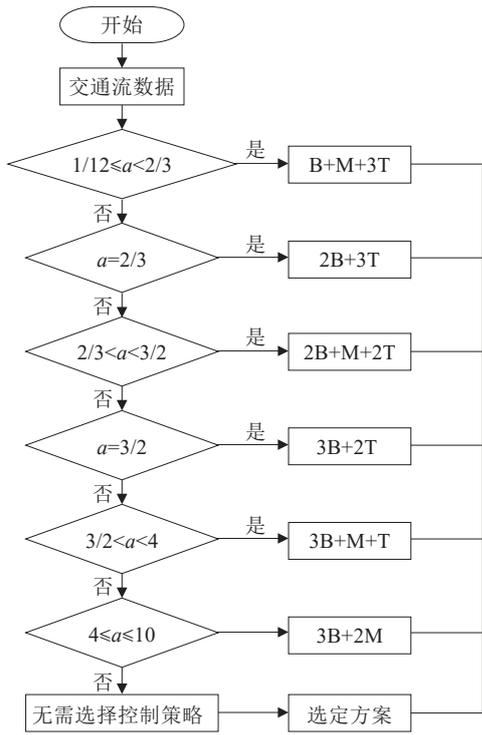


图13 单向五车道客货分道控制子流程

Fig. 13 Sub flow chart of one-way five lane passenger-cargo lane separation control

### 5 结论

论基于 vissim 软件仿真，依托美国加利福尼亚州 i5 高速公路数据建模仿真，得到结论为：

- 1) 在一定条件下，客货分道可降低车辆平均延误，提高车辆平均速度，提高道路通行效率。
- 2) 仿真道路客货分道控制系统适用范围：单向四车道， $1/8 \leq a \leq 20$ ；单向三车道， $1/4 \leq a \leq 20$ ；单向五车道， $1/12 \leq a \leq 10$ 。
- 3) 在后续工作中，可根据不同道路及交通流的情况，完善该客货分道动态控制系统的适用界限分析。
- 4) 对该系统软件开发的相关内容进一步研究，并对流程中的关键节点，如交通事故判断和交通流数据分析方法进行细化研究。

#### 参考文献(References):

[1] Wolshon B. Sign of reversible roadway entry and termination points: comparative review of the state of practice[C]. Washington, D. C: Transportation Research Board 84th Meeting, 2005.

[2] 谢祥椿. 基于效益的公路通道客货分线规划研究[D]. 西安: 长安大学, 2014. (XIE Xiang-chun. Study separating trucks line from passenger vehicles of highway corridor base on benefits[D]. Xi'an: Changan University, 2014. (in Chinese))

[3] Mason J M, Middleton D R, Petersen H C. Operational and geometric evaluation of exclusive truck lanes: research report 331-3F[R]. Texas Transportation Institute, College Station, TX, 2002.

[4] 鲁翠娥, 李晔. 用元胞自动机模型分析货运车辆对高速公路交通安全的影响[J]. 交通与计算机, 2007, 25(1): 17-21. (LU Cui-e, LI Ye. Analyzing the impact of freight vehicles on freeway transportation safety through cellular automaton model[J]. Computer and Communications, 2007, 25(1): 17-21.(in Chinese))

[5] 李冠峰, 姚新胜, 高献坤, 等. 高速公路客货车混行问题与分道行驶的优势分析[J]. 交通运输工程与信息学报, 2009, 7(3): 1-5, 16. (LI Guan-feng, YAO Xin-sheng, GAO Xian-kun, et al. Analysis on the problems of mixed traffic and the advantages of passenger and freight vehicles' separating on freeway[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2009, 7(3): 1-5, 16.(in Chinese))

[6] 刘晨辉. 基于货车交通影响的高速公路车道限制研究[D]. 济南: 山东大学, 2012. (LIU Chen-hui. Freeway lane restriction research based on truck traffic impact[D]. Jinan: Shandong University, 2012. (in Chinese))

[7] 王新慧. 客货车干扰特性及客货分离道路实施条件研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014. (WANG Xin-hui. The interference characteristics of buses with trucks and the conditions for implementation of separated road[D]. Changchun: Jilin University, 2014. (in Chinese))

[8] 马捷. 高速公路客货分离改造的方案选择和评价体系研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015. (MA Jie. A study of selection and evaluation system for separating trucks from passenger vehicles on freeway[D]. Changchun: Jilin University, 2015. (in Chinese))

[9] 李晓虎, 范炜, 袁浩, 等. 车速限制下高速公路临时路肩使用条件研究[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(3): 67-73. (LI Xiao-hu, FAN Wei, YUAN Hao, et al. Research on temporary applicable conditions of expressway shoulder under speed limit[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(3): 67-73.(in Chinese))