

文章编号: 1000-5862(2015)06-0631-06

# 客货分离式高速公路主线与匝道协同控制算法研究

项 昀<sup>1,2</sup> 邢 璐<sup>2</sup> 王 昊<sup>2</sup> 徐亚楠<sup>2</sup> 李 烨<sup>2</sup>

(1. 南昌航空大学土木建筑学院 江西 南昌 330063; 2. 东南大学城市智能交通江苏省重点实验室 江苏 南京 210096)

**摘要:** 为保障高速公路的高效运行, 提出适用于客货分离式高速公路主线与匝道协同控制算法. 选取被广泛应用的 ALINEA 模型作为匝道控制的基本模型, 再依据高速公路主线上下游交通流的变化进行入口匝道调节, 确保入口匝道下游主线的占有率接近期望占有率, 使高速公路主线在接近最大交通容量时充分考虑主线上游交通量对匝道调节率的影响, 从而实现主线与匝道协同控制. 利用 Vissim 软件进行仿真, 结果表明, 在运行效率方面, 采用协同控制策略的客货分离形式高速公路优于传统 ALINEA 控制策略的客货分离式高速公路, 远优于客货混行、无控制策略的高速公路.

**关键词:** ALINEA; 客货分离; 高速公路; 主线与匝道协同控制

**中图分类号:** U 491.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2015.06.16

## 0 引言

我国的道路交通承担着全国 80% 以上的客运量和 70% 以上的货运量, 高速公路因其快速便捷的特点而倍受青睐. 与此同时, 由于交通需求增长的速度远远大于道路建设的速度, 高速公路通行能力与交通需求的矛盾也逐渐加深, 甚至造成了高速公路匝道上的排队现象, 降低了高速公路的运行效率. 通过匝道控制手段, 可以减少或避免因高速公路拥挤造成的运行问题.

陈德望等详细阐述了几种典型国外先进的匝道控制算法的适用性和局限性, 提出了通过匝道控制策略实现提高高速公路瓶颈通行能力和减缓交通拥堵的目标<sup>[1-4]</sup>. M. Papageorgiou 等提出了 ALINEA 算法, 该算法通过控制匝道调节率控制进入主线的车辆数, 进而调节下游车流量<sup>[5-9]</sup>. 吴建平等对高速公路入口匝道控制策略进行研究, 认为入口匝道的控制可以提高高速公路主线的运行效率<sup>[10-13]</sup>. 李健等通过调整入口匝道计量控制周期, 提出了主线机动容量合理分配的匝道协同控制方法<sup>[14-15]</sup>.

在以往研究中, 使用入口匝道控制方法时, 较少考虑主线的控制策略. 然而主线的控制策略却对主

线交通的运行状态带来较大影响. 因此, 在确定入口匝道的控制方法时应考虑主线与入口匝道的协同控制. 此外, 由于客车与货车的混合行驶将造成彼此间的严重干扰, 既降低了高速公路的通行能力, 又易引起交通安全隐患. 因此, 现阶段, 客车与货车分离式高速公路形式已经引起了广泛的关注与研究, 即采用客货车道分断面设计, 设置物理隔离, 客货车辆分别在各自车道运行, 实现交通流的单一性. 在改善交通安全状况和提高车辆的运行效率方面已取得了良好的效果. 现有的匝道控制算法通常是基于客货混行的交通流进行研究与应用. 然而, 当应用客货分离式高速公路控制时, 并不能获得良好的实施效果.

鉴于此, 以客货分离式高速公路进行主线与匝道协同控制技术作为研究对象, 通过对高速公路入口匝道 ALINEA 模型进行改进, 获得适合客货分离条件下多车道高速公路主线与匝道的协同控制模型, 并采用 Vissim 软件进行仿真分析, 评价客货分离式高速公路协同控制效果.

## 1 基本模型

通过对比已有研究中各类匝道控制算法, 选取 ALINEA 模型作为匝道控制的基本模型, 其主要原

收稿日期: 2015-09-20

基金项目: 国家自然科学基金(51478113), 南昌市科技局对外科技合作与服务课题(2013HZCG023)和江苏省高校研究生科研创新计划(KYLX15\_0154)资助项目.

作者简介: 项 昀(1983-), 女, 江西靖安人, 讲师, 博士, 主要从事区域运输和智能交通运输系统的研究.

因在于: (i) ALINEA 控制模型的算法形式简洁, 逻辑清晰, 易于理解; (ii) ALINEA 控制模型的研究比较成熟, 已经在阿姆斯特丹、巴黎等地区应用, 应用结果表明该模型在提高高速公路运行效率、降低事故发生率上有着良好的效果; (iii) 应用 ALINEA 模型所需的设备较少, 投入小, 维护方便。

ALINEA 模型认为匝道调节率仅仅取决于高速公路主线下游的理论通行能力和实际交通量以及上一个控制周期通过入口匝道停车线的车辆数。具体而言, 入口匝道在这一时段的调节率等于其上一时段入口匝道停车线通过的车辆数及主线下游期望占有率和实际占有率差的倍数。将高速公路主线下游的理论通行能力用期望占有率  $O_c$  表示, 主线下游的实际交通量用实际占有率  $O_{out}$  表示, 而通过匝道停车线的车辆数则表示为  $r(k-1)$ 。

ALINEA 的计算模型如下:

$$r(k) = r(k-1) - k_r(O_c - O_{out}(k-1)), \quad (1)$$

其中  $r(k)$  为第  $k$  个控制周期计算的匝道调节率, 单位时间内放的车辆数;  $r(k-1)$  为第  $k-1$  个控制周期内

匝道上实际通过匝道停车线的车辆数;  $k_r$  为可调整变量, 调整反馈控制中固定的外部扰动;  $O_c$  为匝道下游主线的期望占有率;  $O_{out}(k-1)$  为第  $k-1$  个控制周期中, 主线下游的实测占有率。

信号周期中的绿灯时间定义为:

$$g(k) = r(k)C/r_{sat}, \quad (2)$$

其中  $g(k)$  为第  $k$  个控制周期的绿灯时间(s);  $r_{sat}$  为入口匝道的理论通行能力(pcu/h);  $C$  为入口匝道控制方案的周期时长(s)。

根据实践经验, 该控制方法的控制周期一般取值为 1 min, 由此可得入口匝道控制方法的周期和绿信比。

将检测器获取的实时数据输入 ALINEA 模型, 再根据(2)式计算绿灯时间, 通过控制器对信号控制方案进行设置从而调节匝道。高速公路入口匝道控制系统由控制器、检测器、信号灯、匝道控制标志、路面标记、入口匝道、高速公路主线等组成。如图 1 所示。

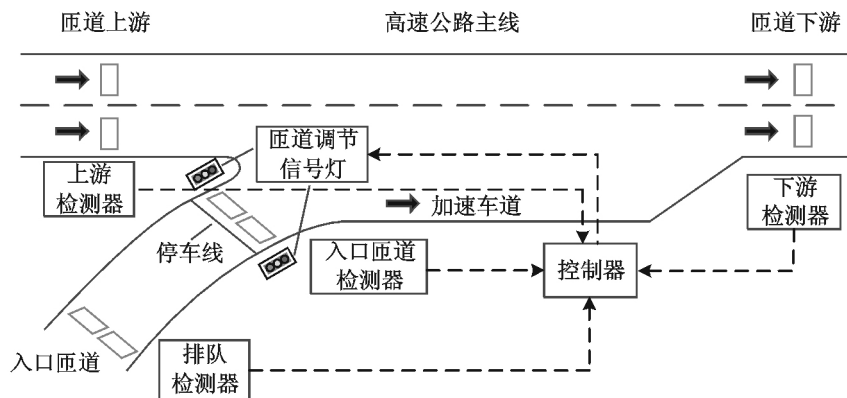


图1 入口匝道系统组成图

## 2 基于 ALINEA 模型的客货分离式高速公路主线与匝道协同控制算法

### 2.1 基本原理

匝道与主线协同控制算法是指将主线的控制策略与匝道的控制策略相结合, 使最终控制策略充分考虑了主线与匝道的交通状况, 从而实现主线与匝道的控制方案均取得较为理想的实施效果。

基于 ALINEA 模型进行改进研究, 充分考虑主线上游的交通流, 并动态调节交通流, 获取主线与匝

道协同控制算法。基本原理为: 当入口匝道下游主线的占有率超过期望的占有率, 入口匝道调节率在前一时刻的调节率基础上少量下降, 此时, 通过减少原信号配时方案中的绿灯时间来实现; 反之, 入口匝道下游主线的占有率较之期望的占有率小, 入口匝道调节率在前一时刻的调节率基础上有所上升, 则可通过增加原信号配时方案中的绿灯时间来实现; 当交通需求较低时, 信号灯可保持常绿。因此, 可以依据高速公路主线上下游交通流的变化调节入口匝道, 同时确保入口匝道下游主线的占有率接近期望占有率, 使高速公路主线运行在接近最大容量时考虑主线上游交通量对匝道调节率的影响。

## 2.2 控制策略

首先在匝道主线上游、下游以及匝道入口安装检测器装置检测,用于获取交通流数据。

通过检测器获得主线下游所选择服务水平下的最大车流密度  $O_c$ 、第  $k-1$  控制周期内主线下游到达车流密度  $O_{out}(k-1)$ ,将前者与后者相减,得出第

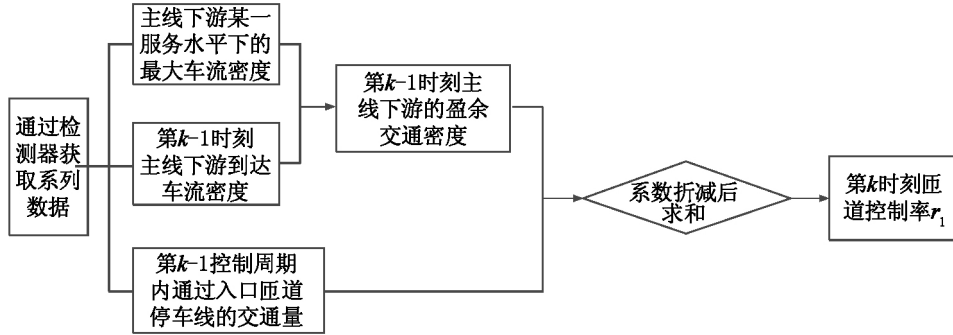


图2 基于服务水平的第  $k$  个控制周期计算的匝道调节率策略图

将所获得的第  $k-1$  时刻主线上游到达车流密度  $O_{in}(k-1)$  和第  $k-1$  时刻下游到达车流密度  $O_{out}(k-1)$  数值相减,可计算出入口匝道可允许进入的理论车辆数  $O_{theory}(k)$ ;同时,根据检测器可获得第  $k-1$  控制周期内通过入口匝道停车线的交通量

$k-1$  控制周期内主线下游的盈余车流密度  $O_{surplus}(k-1)$ ;同时,根据检测器可获得第  $k-1$  控制周期内通过入口匝道停车线的交通量  $r(k-1)$ 。再将  $O_{surplus}(k-1)$  进行相应折减后,与  $r(k-1)$  相加,计算出第  $k$  时刻匝道调节率  $r_1$ 。流程如图2所示。

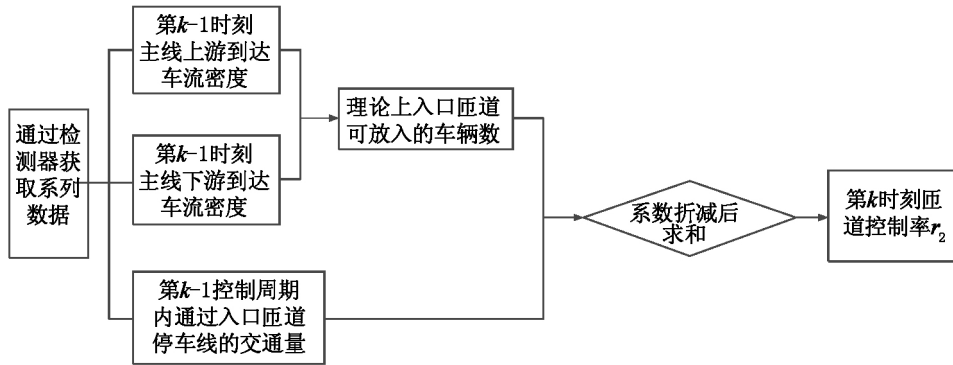


图3 基于上下游占有率的第  $k$  个控制周期计算的匝道调节率策略图

$r(k-1)$ 。将  $O_{theory}(k)$  进行折减后,与  $r(k-1)$  相加,计算出第  $k$  时刻匝道调节率  $r_2$ 。流程如图3所示。综合考虑  $r_1$ 、 $r_2$ ,乘以相应的折减系数,从而获取最终的匝道调节率  $r$ 。

## 2.3 模型推导

根据(1)式,可列出  $k$  时刻的匝道调节率  $r_1$ 、 $r_2$  的计算模型:

$$r_1(k) = r(k-1) + k_r(O_c - O_{out}(k-1)), \quad (3)$$

$$r_2(k) = r(k-1) + k'_r(O_{in}(k-1) - O_{out}(k-1)), \quad (4)$$

按照上述主线与匝道协同控制算法的基本原理、控制策略可推导出最终匝道调节率  $r$  的计算模型:

$$r(k) = \mu r_1(k) - (1-\mu) r_2(k), \quad (5)$$

再将(3)式和(4)式代入(5)式,合并整理后的最终匝道调节率  $r$  的计算模型为

$$r(k) = r(k-1) + \alpha_1(O_{out}/O_{in} - 1) + \alpha_2(O_c - O_{out}), \quad (6)$$

其中  $r_1(k-1)$  为基于服务水平的第  $k$  个控制周期计算的匝道调节率;  $r_2(k-1)$  为基于上下游占有率的第  $k$  个控制周期计算的匝道调节率;  $\mu$  为折算系数,取值范围为  $[0, 1]$ ;  $k'_r$  为可调整变量,调整反馈控制中固定的外部扰动,取值为 70;  $O_c$  为匝道主线下游相对于某一服务水平的占有率;  $O_{in}$  为匝道主线上游的实际占有率;  $O_{out}$  为匝道主线下游的实际占有率;  $\alpha_1$  为根据上下游交通流量确定的占有率折算系数,取值范围为  $[0, 700]$ ;  $\alpha_2$  为根据服务水平与下游交通量确定的占有率折算系数,取值范围为  $[0, 70]$ 。

利用匝道主线上游、下游以及匝道上的检测器

装置检测得到的交通流数据,基于 ALINEA 模型的协同控制算法数学模型和控制策略,可确定匝道调节率,进而获得匝道协同控制的信号配时方案。

### 3 仿真分析

对沈阳至山海关高速公路,约 361 km,现为双向六车道,将客货混行,无智能控制策略,由于原有道路已经无法满足日益增长的交通需求,现拟对道路制定改扩建工程方案,采用客货分离式高速公路。下面分别就采用客货分离式高速公路无控制、ALINEA 模型控制、基于 ALNEA 模型主线与匝道协同控制 3 种不同形式进行仿真分析。

#### 3.1 仿真环境概述

仿真分析时运用 Vissim 软件进行,利用其自带的 COM 接口拓展功能,通过 VB 语言,将控制模型写进程序嵌入 Vissim 中进行仿真。

仿真路段取自沈山高速公路路段总长为 1 500 m,为双向六车道,道路宽度为 3.5 m,在客货分离的

状态下,客车和货车比例分别为 1,客车的期望速度为 100 km/h,货车的期望速度为 70 km/h,仿真时间为 3 600 s,3 600 s 后自动结束仿真。由于匝道控制的目的是为了提高高速公路运行效率,因此选择延误作为主要评价指标,而停车次数为辅助指标。仿真时所采用的数据来自于由东南大学交通学院及辽宁省交通规划设计院针对沈山高速公路改扩建项目于 2015 年编制的《基于综合运输体系的高速公路主通道交通量分析与预测研究》。

此外,分别根据沈山高速公路研究路段上下游的实际交通量与所选择的服务水平确定占有率折算系数  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 。通过大量仿真结果发现,在基于 ALNEA 模型主线与匝道协调控制模型中,当  $\alpha_1 = 50$ ,  $\alpha_2 = 40$  时,货车车道可获得最佳控制效果;当  $\alpha_1 = 20$ ,  $\alpha_2 = 30$  时,则客车车道可获得最佳控制效果。

#### 3.2 仿真结果比较

在 ALINEA 控制策略下,客货混行与客货分离 2 种情况下的指标对比如表 1 所示。

表 1 客货混行和客货分离( ALINEA 控制策略) 方案的交通运行效率对比表

形式		主线延误/s	匝道延误/s	停车次数/次
客货混行( 无控制)		5.39	50.39	5.83
客货分离( ALINEA)	客车	2.64	41.49	2.34
	货车	3.20	103.62	9.34
客货分离( 匝道与主线协同控制策略)	客车	2.11	30.96	2.45
	货车	2.76	92.17	7.26

根据表 1 和图 4 可看出,在采用 ALINEA 控制策略的客货分离式高速公路的主线延误远低于客货混行无控制情况下的主线延误;而对于匝道延误和停车次数,前者客车的延误小于后者,但前者货车的延误却远大于后者及前者客车。客货分离形式中货车延误很大的原因主要在于客货分离形式中货车入

口匝道交通量过大。在主线与匝道协同控制策略下,客货分离形式的主线延误大幅度降低,明显小于其他 2 种形式;客车的匝道延误和停车次数有显著改善,但货车的匝道延误和停车次数较之客货混行无控制状态有所增加,同时比采用 ALINEA 控制策略的客货分离形式有所下降。

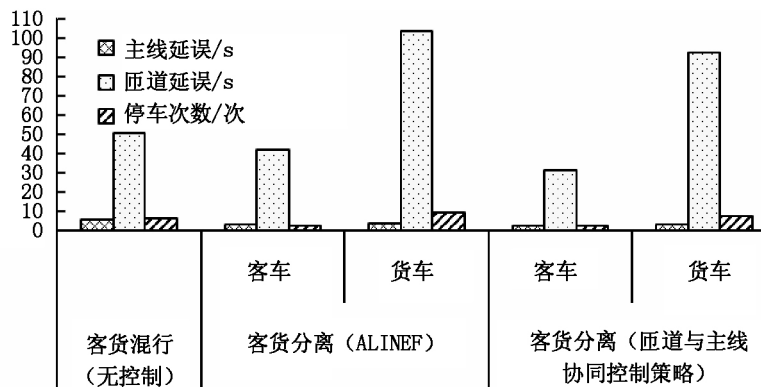


图 4 客货混行和客货分离( ALINEA 控制策略) 方案的交通运行效率对比图

分别将采用 ALINEA 控制策略的客货分离形式、基于改进的 ALINEA 模型的主线与匝道协同控制策略较之客货混行无控制状态的运行效率变化情况如表 2 所示. 由表 2 可知基于改进 ALINEA 模型

的主线与匝道协同控制策略的运行效率总体上比客货混行无控制状态有非常突出的改善,比采用 ALINEA 控制策略的客货分离形式也有显著提高.

表 2 有控制策略相较无控制策略的运行效率对比表 %

形式		主线延误 变化率	匝道延误 变化率	停车次数 变化率
ALINEA 模型控制策略	客车	-51.02	-17.66	-59.86
	货车	-40.63	105.64	60.21
基于 ALINEA 模型的主 线与匝道协同控制策略	客车	-60.85	-38.56	-57.98
	货车	-48.79	82.91	24.53

注: 负值表示降低率, 正值表示增加率.

4 结 语

通过对 ALINEA 模型进行改进,研究并推导了客货分离式高速公路主线与匝道协同控制算法,此算法将主线的控制策略与匝道的控制策略相结合,充分考虑主线上游的交通流,并动态调节交通流,使主线与匝道实现协同控制,从而提高高速公路的总体运行效率.

对实例进行仿真分析,结果表明基于改进 ALINEA 模型的客货分离式高速公路主线与匝道协同控制中主线延误、客车的匝道延误、客车的停车次数比客货混行无控制状态下有了极为显著的降低,货车的匝道延误和货车的停车次数则有所增加. 对于高速公路来说,主线延误降低的优先性是高于匝道延误的,因此,从总体上看,采用协同控制策略,可以较大程度提高车辆运行效率. 同时,协同控制策略与传统的 ALNEA 控制策略相比,主线延误、匝道延误、停车次数均有明显改善. 因此,通过建设基于 ALNEA 模型的客货分离式高速公路主线与匝道协同控制策略可以缓解我国货车需求不断攀升给高速公路带来的压力,并可以有效消除货车与客车在同一路段断面通行时产生的矛盾与冲突,为客货干扰问题的解决、高速公路运行效率的提高提供了新方法,且有广阔的应用前景.

5 参考文献

[1] 陈德望,李灵犀,刘小明,等. 城市高速道路交通控制方法研究的回顾与展望[J]. 信息与控制,2002,31(4): 341-345,362.

[2] Zhang L,Levinson D. Ramp metering and freeway bottleneck capacity [J]. Transportation Research Part A,2010,44: 218-235.

[3] WinyoopaditSarintorn. Development and Comparative Evaluation of Ramp Metering Algorithms Using Microscopic Traffic Simulation [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology,2007,7(5): 51-62.

[4] Shen W,Zhang H M. Pareto-improving ramp metering strategies for reducing congestion in the morning commute [J]. Transportation Research Part A,2010,44: 676-696.

[5] Papageorgiou M,Kotsialos A. Freeway ramp metering: an overview [C]//Intelligent Transportation Systems,2000,Proceedings,2000 IEEE,IEEE,2000: 228-239.

[6] Papageorgiou M,Hadj-Salem H,Middelham F. ALINEA local ramp metering: Summary of field results [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board,1997,1603(1): 90-98.

[7] 陆克丽霞,杜豫川,孙立军. 基于 ALINEA 算法的上海快速路入口匝道控制方法 [J]. 同济大学学报: 自然科学版,2009,2(2): 206-208.

[8] Wang Y,Perrine K A,Lao Y. Developing an area-wide system for coordinated ramp meter control [R]. University of Washington,Transportation Northwest (TransNow),2008.

[9] Caglar Demiral,Hilmi Berk Clikoglu. Application of ALINEA ramp control algorithm to freeway traffic flow on approaches to Bosphorus strait crossing bridges [J]. ProcediaSocial and Behavioral Sciences,2011(20): 364-371.

[10] 吴建平. 南安普敦市高速公路入口控制方案案例研究 [J]. 交通运输系统工程与信息,2003,3(1): 6-15.

[11] 姜紫峰,荆便顺. 高速公路入口匝道控制的仿真研究 [J]. 中国公路学报,1997,10(2): 83-89.

[12] 谭满春,徐建闽. 高速公路入口匝道的模糊逻辑控制

- [J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 1999, 27(8): 5-466-470.
8. [15] Papamichail I, Kotsialos A, Mergonis I, et al. Coordinated ramp metering for freeway networks: A model predictive hierarchical control approach [J]. Transportation Research Part C, 2010, 18: 311-331.
- [13] 张泉雄. 高速公路入口匝道控制算法的仿真评价与优化 [D]. 长春: 吉林大学, 2005.
- [14] 李健, 贾元华, 敖谷昌. 主线机动容量合理分配的匝道协同控制 [J]. 深圳大学学报: 理工版, 2012, 29(5):

## Coordinated Control of Freeway Mainline and Ramp under Separating Truck from Passenger Vehicles Condition

XIANG Yun<sup>1,2</sup>, XING Lu<sup>2</sup>, WANG Hao<sup>2</sup>, XU Yanan<sup>2</sup>, Li Ye<sup>2</sup>

(1. School of civil engineering and architecture, Nanchang Hangkong University, Nanchang Jiangxi 330063, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Urban ITS, Southeast University, Nanjing Jiangxi 210096, China)

**Abstract:** To enhance the efficiency of freeway under separating truck from passenger vehicles condition, a coordinated control of freeway mainline and ramp based on modified ALINEA model was proposed. Firstly, the ALINEA model was chosen as the basic model of ramp control, the entrance of ramp was regulated on the basis of the change of the upstream and downstream traffic flow in the main line of the highway, ensuring that the occupancy rate of the downstream main line was close to expected occupancy. Meanwhile, when the main line of the highway was close to the maximum capacity, the impact of the upstream main line traffic flow on the ramp regulating rate must be noticed. Using the Vissim software simulation, the study showed that, in terms of operating efficiency, the separation of truck and car with cooperative control strategy outperformed the separation of truck and car using the classical ALINEA control strategy, far superior to truck and car mixed control scheme.

**Key words:** ALINEA; separating truck from passenger vehicles; highway; coordinated control of free way mainline and ramp

(责任编辑: 冉小晓)