

# 基于驾驶行为特征的高速公路施工区 限速研究

解树坤<sup>1</sup>, 潘景宜<sup>2</sup>

<sup>1</sup>山东交通学院交通与物流工程学院, 山东 济南

<sup>2</sup>齐鲁工业大学经济与管理学院, 山东 济南

收稿日期: 2024年9月6日; 录用日期: 2024年10月30日; 发布日期: 2024年11月6日

## 摘要

为保障高速公路改扩建施工区行车舒适与安全, 减少交通事故发生率, 考虑驾驶人行车舒适性, 针对驾驶人视认和决策行为特征, 构建基于驾驶人行为特征的限速模型, 提出一种高速公路改扩建施工区限速梯度判定模型, 并结合荣乌高速改扩建施工区进行仿真验证。研究表明: 不同限速类型能够应用在3 km、6 km和9 km高速公路改扩建施工区, 同梯度减速区间对应的三级限速行车舒适性大于二级限速与单一限速。

## 关键词

高速公路, 改扩建施工区, 分梯度限速, 行为特征

# Research on Speed Limit in Highway Construction Areas Based on Driving Behavior Characteristics

Shukun Xie<sup>1</sup>, Jingyi Pan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Transportation and Logistics Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan Shandong

<sup>2</sup>School of Economics and Management, Qilu University of Technology, Jinan Shandong

Received: Sep. 6<sup>th</sup>, 2024; accepted: Oct. 30<sup>th</sup>, 2024; published: Nov. 6<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

To ensure the comfort and safety of driving in the construction area of highway renovation and

文章引用: 解树坤, 潘景宜. 基于驾驶行为特征的高速公路施工区限速研究[J]. 交通技术, 2024, 13(6): 395-402.

DOI: 10.12677/ojtt.2024.136043

expansion, reduce the issuance rate of traffic accidents, and consider the driving comfort of drivers, a speed limit model based on driver's visual recognition and decision-making behavior characteristics is constructed. A speed limit gradient judgment model for the construction area of highway renovation and expansion is proposed, and simulation verification is carried out in combination with the construction area of Rongwu Expressway renovation and expansion. The research results indicate that different types of speed limits can be applied in the construction areas of 3 km, 6 km, and 9 km highways, and the driving comfort of the third level speed limit corresponding to the same gradient deceleration interval is greater than that of the second level speed limit and a single speed limit.

## Keywords

Highways, Renovation and Expansion Construction Areas, Graded Speed Limits, Behavioral Characteristics

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着我国汽车保有量的激增, 行车安全已成为交通安全领域的重点。高速公路作为我国交通网络的动脉, 事故发生率远超其他技术等级公路, 超速行为是造成交通事故的一个主要原因, 超速严重削弱车辆行驶稳定性, 显著增加了事故发生概率, 因此对高速公路行车速度精细化管理是提升运行安全的关键举措[1]。

Navon 等[2]研究车速离散型与行车安全的内在联系, 研究表明降低车速离散程度能够有效减少交通事故的发生。李海刚[3]通过分析高速公路半幅封闭施工的交通特点以及具体通行能力, 证实了合理控制施工区域内车流量对于确保行车安全起到至关重要的作用。Yang 等[4]通过回归分析, 揭露了 15%、50% 和 85% 位速度与限速值的关系。陈卫霞等[5]研究四车道高速公路超车道封闭施工时的交通运行特性, 为施工作业区的交通组织与管控提供了理论依据。周永强[6]结合车速分布特征, 为高速公路施工区交通管理提供限速方案参考。陆蓉[7]通过分析高速公路改扩建过程中路段的交通运行特征, 提出公路改扩建施工区速度应采取分级限速措施。

本文聚焦于高速公路改扩建施工区限速方案研究, 基于驾驶人的驾驶反应、决策特征, 建立基于驾驶人行为特征的限速区段长度模型, 在此基础上分析高速公路限速区段划分特点与标志牌设置, 并对荣乌高速改扩建施工区进行仿真分析, 对减少改扩建路段交通事故, 提高行车安全具有重要的意义。

## 2. 基于驾驶人行为特征的限速区段长度模型

驾驶过程中, 驾驶人面临着错综复杂的行车环境及各种交通信号和指示, 驾驶人需及时捕捉视觉信息并做出适当的肢体反应, 注意力分散或者感知滞后会导致驾驶人错过限速标志。为保障驾驶人有效获取减速信息, 顺利减速并确保行车安全与车辆稳定行驶, 驾驶人在经过限速至稳定行驶需要经过视识别阶段、反应决策阶段和稳定行驶距离。

### 2.1. 驾驶人视认距离

驾驶人抵达特定路段辨识出前方的路侧标志至标志的直线距离, 定义为视认距离。视认距离由两部

分构成: 读取距离与识别距离。读取距离指的是在司机解读标志信息期间, 车辆行驶的距离。识别距离是指从司机辨识出限速信息后, 到车辆与限速标志之间剩余的距离。视认距离由如下公式计算:

其中,  $V_{sr}$  为驾驶人读取限速标识时的行驶速度(km/h),  $t_1$  为解读识别限速标志牌上内容所需的时间(s)。

## 2.2. 驾驶人决策反应距离

驾驶员读取并识别完限速标志后, 需观察车速表, 周围行车环境和交通状况, 并基于当前状况, 进行下一步驾驶决策。从驾驶人做出决策到实际作用并操控车辆, 存在一定的操作反应时间, 将这段时间内的车辆行驶距离定义为决策反应距离, 由如下公式计算:

$$L_{jc} = \frac{V_{jc}}{3.6} \cdot t_2$$

其中,  $V_{jc}$  为决策反应时的车速(km/h),  $t_2$  为决策反应时间(s)。

## 2.3. 驾驶人稳定行驶距离

为确保驾驶人行车舒适性, 并确保行车安全, 当驾驶人到达新的限速区间时, 需要观察周围行车环境、道路条件与交通状况, 在确认环境安全后, 驾驶人应平缓调整车速至新的限速标准, 避免急加速或急减速带来的不适感和安全隐患。这一过程中, 驾驶人需要预留充足的距离来完成观察、判断和稳定行车状态, 从而实现安全、舒适地融入新的行车环境。稳定行驶距离由如下公式计算:

$$L_{wd} = \frac{V_{wd}}{3.6} \cdot t_3$$

其中,  $V_{wd}$  为稳定驾驶车速(km/h),  $t_3$  为车辆稳定行驶时间。

## 3. 高速公路改扩建施工全部限速模型

高速公路施工区分为上游工作区、作业区与下游作业区, 限速实行场景为高速公路上游工作区, 分为警告区、上游过渡区与缓冲区作业区。车辆以限速值进入高速公路施工区前, 需依次经过警告区、上游过渡区与缓冲区, 鉴于行车环境的显著变化, 为确保行车安全, 驾驶人员需在哪些区段采取有效的减速行动。其中, 警告区和上游过渡区是执行减速措施的关键区域, 定义为限速区。

自限速标志起点位置开始到解除限速标志或设置不同限速值的限速标志为止的区间段称为限速区。为了确保车辆在限速区后能够安全、平稳地行驶, 驾驶人员在通过限速区后, 需保持一段稳定的行驶距离, 并预留出对下一限速区标志的识别时间与决策反应时间, 这一连贯的距离被定义为限速过渡段。限速区与限速过渡段划分由图 1 所示:

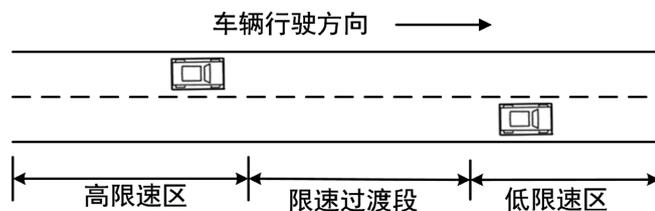


Figure 1. Speed limit zone division

图 1. 限速区域划分

### 3.1. 限速约束条件

作业区限速值的调整与确定应该在初始限速值的基础上, 综合考虑多种影响因素。依据《公路限速标志设计规范》, 对限速值的校准应遵循以下几个约束条件:

- (1) 最高限速限制: 确保限速值不超过 120 km/h;
- (2) 限速层级限制: 施工区保证最优限速层级, 采用梯度减速, 且限速层级数不超过 3 级;
- (3) 运行速度协调性限制: 考虑驾驶员的驾驶特性, 限速值需设定为 10 km/h 的整数倍, 且相邻路段的限速值不得超过 20 km/h。

### 3.2. 限速区段划分

基于限速层级限制约束, 分梯度限速方案为二级限速与三级限速。其中, 二级限速表示车辆进入缓冲作业区前, 需经过两个限速层级及其对应的限速过渡段, 三级限速车辆进入缓冲作业区前, 需要经过三个限速层级及其对应的限速过渡段。为判定二级限速与三级限速方案的适用场景, 并求解其对应的最短限速距离, 用  $L_{en}$  表示限速区与限速过渡段的长度。  $L_{en奇}$  (奇 = 1, 3, 5...) 为车辆经过限速点减速到下一梯度速度的距离,  $L_{en偶}$  (偶 = 2, 4, 6...) 为车速降到该梯度限速值后稳定驾驶距离以及发现下一个限速牌的视认反应距离。

$L_3$  为三级限速最短距离,  $L_2$  为二级限速最短距离,  $S_1$  为第一个限速牌前置距离,  $L_3$  与  $L_2$  可由以下公式求得:

$$L_3 = S_1 + Len_1 + Len_2 + Len_3 + Len_4 + Len_5$$

$$L_2 = S_1 + Len_1 + Len_2 + Len_3$$

具体限速场景由图 2 可见:

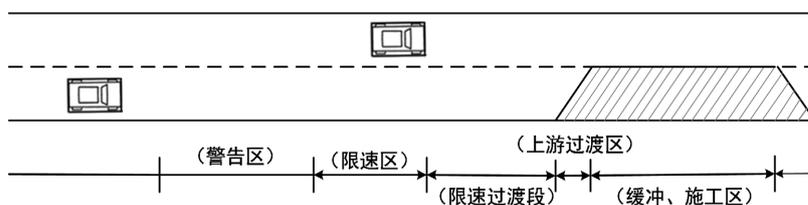


Figure 2. Speed limit scenario  
图 2. 限速场景

施工区速度大于 60 km/h 时, 改扩建施工封闭车道时上游过渡区长度计算公式[8]如下:

$$L_{\perp} = 0.625vw$$

式中,  $L_{\perp}$  为上游过渡区长度,  $v$  为改扩建施工路段限速值(km/h),  $w$  为车辆合流至其他车道时, 车辆垂直方向的移动距离(m)。

### 3.3. 限速牌设置

高速公路作业区的限速牌设置旨在为司机清晰提示控制区域内的道路状况和交通管理措施, 降低交通冲突, 增强行车安全性, 进而确保司机能平稳安全地通过。限速标志位置设置的合理性关系到驾驶人以及施工人员的安全, 距离施工区太远驾驶人容易遗忘前一标志内容而加速, 产生安全隐患。

限速牌设置在警告区和上游过渡区, 限速点设置在相邻两限速区域之间。遵循《道路交通标志和标线》(GB5768-2017)与《公路交通安全设施设计细则》(JTG/TD81-2017)中关于设计速度对应的前置与视认

距离标准, 在设计速度为 120 km/h 的路段, 对应标志牌前置 280 m。进入限速段落时, 为确保限速措施有效, 标志牌应精确设置于限速区的起始点, 与减速点位置一致。

## 4. 实例验证

为验证模型准确性, 讨论梯度限速适用场景, 以荣乌高速改扩建施工区为例设置仿真场景。荣乌高速改扩建施工区主要划分为 3 km、6 km 与 9 km 施工区, 选取长度为 9.1 km 的八角枢纽—机场互通施工区, 以双向四车道高速公路半幅封闭单车道借道通行方案(蓬莱方向封闭施工)为例进行验证。

### 4.1. 仿真场景设置

利用 VISSIM 仿真软件进行仿真模拟, 场景设置为八角枢纽—机场互通(9.1 km)施工区, 以双向四车道高速公路半幅封闭单车道借道通行方案(蓬莱方向封闭施工)为例, 设置设计速度为 120 km/h, 单车道宽度为 3.75 m, 车流构成以小型车为主, 小型车与其他车辆比例为 9:1, 车辆减速度为 1.5 m/s<sup>2</sup>。

高速公路施工区段参照规范中推荐值设置, 警告区长度为 1600 m, 缓冲、工作区长度因施工路段选取长度不同而异, 分别对应着 750 m、2000 m 和 4000 m, 场景路段对应作业区长度为 4000 m。

半幅封闭单车道借道通行的施工场景下, 单一限速最大通行能力在 1500 辆/h 左右, 仿真设置通行能力 1500 辆/h, 仿真时长设置为 2 h。每隔 200 m 设置一个检测器, 检测区间平均速度, 为降低仿真随机性, 取 6 次仿真数据平均值。限速方案由表 1 所示:

Table 1. Speed limit plan

表 1. 限速方案

限速差(km/h)	大于等 60	50	40	30	20	小于 20
限速范围(km/h)	120~60	120~70	120~80	120~90	120~100	120~110
单一限速	-	-	-	-	120~100	120~110
二级限速(km/h)	-	-	120~100~80	120~100~90	120~110~100	-
三级限速(km/h)	120~100~80~60	120~100~80~70	120~100~90~80	-	-	-

为深入研究单一限速与分梯度限速模型的不同场景下的适用性和优劣性, 选取限速差为 40 km/h 与 20 km/h 的场景进行仿真实验, 其中, 限速差为 40 km/h 的仿真场景用于对比分析二级限速与三级限速; 限速差为 20 km/h 的场景用于对比单一限速与二级限速。

### 4.2. 速度一致性检验

高速公路施工区会使交通流的稳定性受到干扰, 从而导致车速分布不均, 离散性增加。众多国内外学者: 速度的离散性与行车安全紧密联系, 速度标准差大的地点交通运行的安全性越差, 速度标准差系数与事故率存在较强的正相关性。为了评价高速公路施工区道路断面交通运行的安全性与驾驶人行车舒适性, 通过速度标准差系数 C 作为判断限速方案优劣程度的评价指标。

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{v}}$$

其中,  $\sigma$  为高速公路施工区道路断面的速度标准差;  $\bar{v}$  为高速公路施工区道路区间车辆的平均速度。

### 4.3. 结果分析

#### (1) 梯度限速适用场景

计算单一限速、二级限速与三级限速最短距离由表 2 可见:

**Table 2.** The speed limit scheme corresponds to the shortest distance

**表 2.** 限速方案对应最短距离

限速类型	限速方案(km/h)	最短距离
单一限速	120~100	980
	120~100~80	1089
二级限速	120~100~90	1340
	120~110~90	1398
	120~110~100	991
	120~100~80~60	1721
三级限速	120~100~80~70	1697
	120~100~90~80	1502

由表 2 可知, 限速梯度为 120~100~80~60 的三级限速所对应最短距离最长, 为 1721 m, 对比所设置的警告区与上游过渡区长度, 结果表明单层级限速与分梯度限速均小于限速层区最短长度, 因此, 单一限速与分梯度限速在 3 km、6 km 与 9 km 高速公路改扩建施工场景均适用。

#### (2) 速度一致性检验

通过仿真得到不同类型限速的平均速度变化表, 其中检测器编号数值表示车辆进入警告区后依次经过的检测器编号。平均速度变化由表 3 所示:

**Table 3.** Average speed change table

**表 3.** 平均速度变化表

限速类型	检测器编号	相邻检测器间平均速度(km/h)
单一限速	1	118
	2	117
	3	116
	4	115
	5	97
	6	96
	7	96
	8	95
	9	95
20 km/h 限速差 对应二级限速	1	118
	2	117
	3	116
	4	109
	5	103
	6	98
	7	99
	8	97
	9	95

续表

	1	118
	2	117
	3	116
	4	108
40 km/h 限速差 对应二级限速	5	99
	6	95
	7	89
	8	86
	9	76
	1	116
	2	101
	3	98
	4	96
40 km/h 限速差 对应三级限速	5	93
	6	90
	7	87
	8	82
	9	78

经计算得到的速度一致性指标由表 4 所示:

**Table 4.** Standard deviation of speed

**表 4.** 速度标准差

限速场景	速度标准差系数
单一限速	0.104
20 km/h 限速差对应二级限速	0.088
40 km/h 限速差对应二级限速	0.151
40 km/h 限速差对应三级限速	0.121

由表 4 所示, 当减速梯度同为 20 km/h 时, 二级限速的标准差系数小于单一限速, 行驶安全性更高, 驾驶人因车速降低所导致的心理和生理承受压力较小, 行车更舒适。当减速梯度同为 40 km/h 时, 三级限速的标准差小于二级限速, 驾驶人心理与生理压力较小, 行车更为舒适平和。

## 5. 结语

本文基于驾驶人行为特征对限速区段长度的影响, 构建驾驶人行为特征的限速区段长度模型, 并分析了限速区段的划分特点与标志牌设置, 最终通过对荣乌高速改扩建施工区的仿真分析, 得到不同梯度限速适应的限速场景、速度变化趋势和速度标准差。符合限速约束条件下, 不同梯度限速的最小要求距离, 均小于最低施工区施工长度, 因此梯度限速在所有高速公路改扩建施工区均适用。而且, 相较于单一梯度限速, 梯度限速的速度标准差更小, 梯度限速能有效提高驾驶人行车舒适度, 保障行车安全。

然而, 本研究存在一定的局限性, 实例分析验证了模型的有效性, 限速牌的设置没有考虑人眼感知标志牌所产生的位置偏移问题, 模型求解算法有待进一步改进; 本模型驾驶人反应时间均采用国际标准

化数值, 没有针对特定驾驶人群体调研, 未来可结合限速牌视觉偏移与驾驶人反应时间进一步改进, 探究高速公路改扩建施工区限速优化方法。

## 基金项目

济南市“新高校 20 条”资助项目: 基于车路云协同感知的交通系统智能化控制关键技术研究(202333040); 2021 年度山东省自然科学基金项目/智能网联车辆混行环境下的城市交通泛控制研究(ZR2021MF019); 山东省科学技术厅(新一代信息技术), 智慧隧道一体化安全监管平台关键技术研究及应用(2022TSGC2096); 山东省工业和信息化厅(新一代信息技术项目)数据驱动的城市快速路交通一体化诱导与协同控制(202250101842)。

## 参考文献

- [1] 徐进, 丁瑞, 李诗佳, 等. 山区高速公路车辆速度特性与区间限速方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2022, 52(2): 352-361.
- [2] Navon, D., Kasten, R., Pomerants, A., *et al.* (2019) A Novel Cost/Benefit Approach for Reducing Frequency of Deviant Driving Speeds in Expressways. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, **62**, 855-869. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2019.03.009>
- [3] 李海刚. 高速公路半幅封闭施工作业区的通行能力分析[J]. 交通世界, 2016(2): 12-13+15.
- [4] Yang, J., Xu, J.L., Gao, C., *et al.* (2019) Modeling of the Relationship between Speed Limit and Characteristic Speed of Expressway Traffic Flow. *Sustainability*, **11**, 4621. <https://doi.org/10.3390/su11174621>
- [5] 陈卫霞, 郑俞, 孟祥海, 等. 双向四车道高速公路超车车道封闭施工作业区交通运行特性研究[J]. 公路, 2022, 67(6): 229-237.
- [6] 周永强. 高速公路施工作业区车速分布特征及限速研究[J]. 技术与市场, 2023, 30(11): 41-44.
- [7] 陆蓉. 高速公路改扩建施工区限速研究[J]. 四川建筑, 2020, 40(5): 123-124+127.
- [8] 魏连雨, 魏凯. 城市道路占路施工上游过渡区长度设置研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2015, 11(3): 71-73.