DOI:10.11918/201810190

城市快速路小间距路段出口预告标志优化设置

黄利华[1,2,3],赵晓华[1,2],李 洋[1,4],荣 建[1,2]

(1.北京工业大学 城市交通学院,北京 100124;2.北京市交通工程重点实验室(北京工业大学),北京 100124;
3.北京城市系统工程研究中心,北京 100035;4.北京警察学院,北京 102202)

摘 要:为解决城市快速路小间距路段出口预告标志缺失等问题,针对小间距路段出口设置了 5 种预告标志方案,开展驾驶模拟试验,提取了 9 种指标进行重复测量方差分析,最终获取了 6 种显著影响指标. 采用基于熵权法的 TOPSIS 方法,评估 5 种方案的设置效用. 结果表明:在快速路小间距路段出口减速车道起点前 1.0、0.5 km 及起点处设置 3 次预告标志时,综合设置效果最好;其次为按照中国规范(GB 5768.2—2009)设置 4 次预告,及按照日本规范设置 4 次预告. 采用 *K*-means 聚类及 LSD 对比分析,发现 1 次预告方案指路效果明显较差. 最终建议小间距路段出口前设置 3 次预告标志,条件受限时应至少进行 2 次预告.

关键词:城市快速路;小间距路段出口;预告标志;驾驶模拟;TOPSIS 方法

中图分类号:U491.5+21 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2020)03-0121-08

Optimal settings of advance guide signs of small spacing segment exits on urban expressway

HUANG Lihua[1,2,3], ZHAO Xiaohua[1,2], LI Yang[1,4], RONG Jian[1,2]

(1. College of Metropolitan Transportation, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Beijing Key Laboratory of Traffic Engineering (Beijing University of Technology), Beijing 100124, China; 3. Beijing Research Center of Urban System Engineering, Beijing 100035, China; 4. Beijing Police College, Beijing 102202, China)

Abstract: To solve the problems such as lack of advance guide signs of small spacing segment exits on urban expressway, this study proposed five kinds of advance sign setting schemes and conducted a driving simulation experiment. Nine types of evaluation indicators were extracted and analyzed by repeated ANOVA, and six indicators were selected which were significantly affected by different schemes. TOPSIS method combined with entropy weight coefficient was used to evaluate the effectiveness of the five schemes. Results showed that it had the best effect on the driving behavior when setting advance guide signs at 1 km, 0.5 km, and 0 km before the starting point of the deceleration lane. It was followed by the scheme with four advance guide signs according to China standard (GB 5768.2—2009), and the scheme with four advance guide signs according to Japan related standards. *K*-means cluster and LSD comparison analysis revealed that the effectiveness of setting one advance guide sign was poor. Since the scheme of three advance guide signs had the best effectiveness, it is recommended to be adopted. When road conditions are limited, at least two advance guide signs should be set.

Keywords: urban expressway; small spacing segment exits; advance guide signs; driving simulation; TOPSIS

城市快速路出口包含立交出口、路段出口两种类型. 实际中,快速路出入口多、标志设置空间受限,大多以立交出口预告标志作为设置重点. 此外,路段出口预告标志相关标准缺乏,加剧了预告标志的随意设置,尤其是对于小间距路段出口(出口间距小于 300 m)[1]. 当前,路段出口已成为快速路的重要部分,预告信息的不足极易诱发出口附近的驾驶安全、交通拥堵问题,完善路段出口的预告标志设置十分必要.

在国外研究中,文献[2-5]主要借助驾驶模拟试验评估高速公路指路标志的设置效用,从驾驶员的理解性、视认性及行为表现方面提出指路标志的优化设置建议. 文献[6-9]借助桌面模拟、驾驶模拟、实地测试试验手段,分析立交桥出口图形预告标志对驾驶行为的影响,为该标志的优化设计提供了科学依据. 在国内研究中,文献[10-11]针对现状问题的分析提出快速路指路标志设计设置原则. 文献[12-13]通过借鉴国外高速公路指路标志设置方法提出中国高速公路及快速路预告标志改进方法. 文

收稿日期:2018-10-30
基金项目:北京市交通行业科技项目(2016-kjc-01-002);
国家自然科学基金面上项目(61672067)
作者简介:黄利华(1990—),女,博士;
赵晓华(1971—),女,教授,博士生导师
通信作者:赵晓华,zhaoxiaohua@bjut.edu.cn

献[14-18]结合标志视认原理搭建高速公路及快速路指路标志位置优化设置模型. 文献[19]借助室内视认及现场认读试验提出基于容错理念的快速路指路标志设置方法. 相比国外,国内主要借助归纳分析、国外借鉴、视认模型等定性化研究手段开展高速公路及快速路预告标志设置研究,未能有效结合动态驾驶行为数据开展量化研究. 因此,为提升研究成果在实际应用中的适用性,中国应针对快速路小间距路段出口预告标志,采用驾驶模拟、实地测试等试验手段,基于动态驾驶行为数据开展定量优化研究.

1 需求分析

立交出口通常连接高等级道路或区域,路段出口位于立交桥之间,一般通达低等级道路或地点,如图 1 所示. 北京城市快速路约 383.2 km,五环内立交桥 245 座. 立交桥之间一般有 1~3 个路段出口,间距普遍在 500 m 左右,部分小至 250 m 左右. 为尽快完善快速路交通安全设施薄弱环节,应优先针对小间距路段出口开展预告标志优化研究.

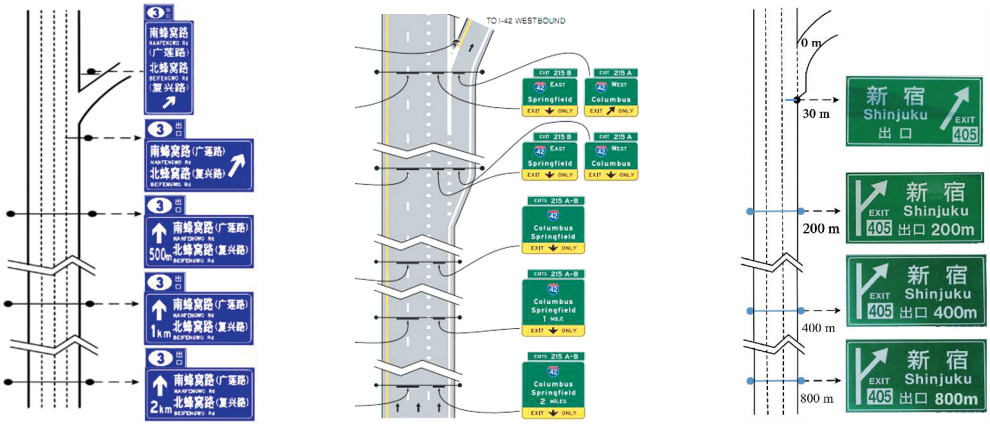
1.1 相关标准

中国现有国标、地标及指南[20-23]规范了高速公路或城市快速路出口的预告标志设置方法,以北京市为例,预告标志设置如图 2(a)所示. 实质上,中国规范主要解决高速公路出口、快速路立交出口的指引问题. 然而,两类出口与路段出口在间距、功能方面存在较大差异,现有预告方法对路段出口的适用性有待验证.

美国高等级路网发达,立交桥是城市快速路与其他道路的主要连接形式,城市快速路路段出口甚少. 文献[24]主要针对快速路立交桥预告标志进行详细规范,如图 2(b)所示. 日本与中国在道路建设体系中更为相似,城市快速路路段出口普遍存在,道路标识手册[25]明确规定其预告标志的设置方法,如图 2(c)所示. 为探究日本快速路路段出口预告方法的设置效果,本文将日本设置方法作为方案之一,与中国设置方法进行对比.

图 1 城市快速路中的立交出口、路段出口

Fig.1 Interchange exit and road exit on urban expressway



(a) 中国 (b) 美国 (c) 日本

图 2 国内外预告指路标志设置示例

Fig.2 Examples of advance guide signs in different countries

1.2 存在问题

以北京南二环的方庄出口、芳古出口,及通惠河北路的万利中心出口、西大望路出口预告标志设置为例,如图 3 所示. 4 个小间距路段出口存在预告标志设置次数、位置、形式不一致的问题,万利中心出口甚至存在预告标志缺失的现象.

(a)北京南二环小间距路段出口

(b)通惠河北路小间距路段出口

图 3　北京快速路小间距路段出口指路标志

Fig.3　Advance guide signs for small spacing segment exits on urban expressway of Beijing

当前，城市快速路主要为双向 6 车道道路，且出口密集、标志设置空间受限. 为合理分配空间资源，现状预告标志以门架式多出口组合预告为主，并配合悬挂式预告为辅. 以北京市快速路某出口 D 为例，如图 4 所示，双向 6 车道条件下最多可设 4 次预告标志.

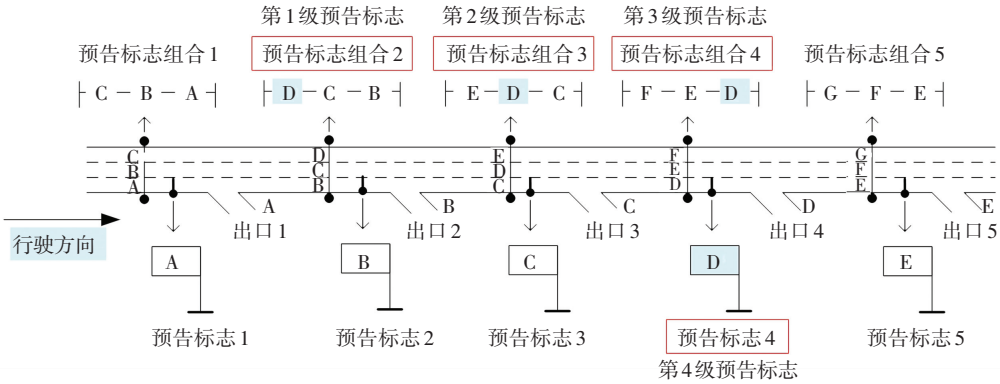


图 4　双向 6 车道条件下 D 出口预告标志

Fig.4　Advance guide sign of exit D under the condition of two-way 6 lanes

1.3　研究目标

选取北京市典型快速路小间距路段出口(间距 250 m)设计 5 种实验场景，包含 5 种预告次数，即按照中国相关规范设置预告标志 1 次、2 次、3 次、4 次及按照日本相关规范设置 4 次(日本)，设置参数见表 1. 采用驾驶模拟技术开展效用评估研究，以获取最优预告方法.

表 1　5 条实验场景预告标志的设置参数

Tab. 1　Setting parameters of advance guide signs in five simulation scenarios

预告次数	预告标志位置
1 次	减速车道起点
2 次	0.5 km、减速车道起点
3 次	1.0、0.5 km、减速车道起点
4 次	2.0、1.0、0.5 km、减速车道起点
4 次(日本)	0.8、0.4、0.2 km、减速车道起点

2　试验设计

2.1　被试者招募

招募被试者 28 名，其中男女比例 3∶1，非职业、代驾司机比例 5∶9. 被试者年龄分布在 20~55 岁(平均年龄数为 33.18，年龄数标准差为 8.78)，驾龄分布在2~23 a(平均驾龄数为 8.72，驾龄数标准差为 5.84).

2.2　试验仪器

基于驾驶模拟舱系统，实时、动态采集车辆行驶状态数据(如行驶速度、加减速度等)、操控行为数据(如刹车、油门等)，采样频率为 30 Hz.

2.3　试验场景

5 条实验场景中所含测试道路相同，道路组成如图 5 所示.

A—*B* 为 0.5 km 的试验起始路段(双向 4 车道，

限速 60 km/h);*B*—*C* 为 1 km 的试验过渡路段(双向 2 车道,限速 30 km/h);*C*—*G* 为 2.25 km 的城市快速路路段(双向 6 车道,限速 80 km/h),*D*、*E*、*F*、*G* 为 4 个出口位置. *C*—*D*、*D*—*E* 间距分别为 1.0、0.75 km;*E*—*F*、*F*—*G* 间距均为 0.25 km,*G*′ 为目的出口 *G* 减速车道渐变段起点.

5 条试验道路中,对实验目的出口 G 分别按照北京市现行规范进行 1、2、3、4 次预告,及日本现状进行 4 次预告;非目的出口按照北京规范设置 4 次预告(见图 4). 以目的出口 G 按照北京规范设置 4 次预告为例(非目的出口指路标志省略),如图 5 所示. 每条场景道路长约 4 km,驾驶时间约 5 min.

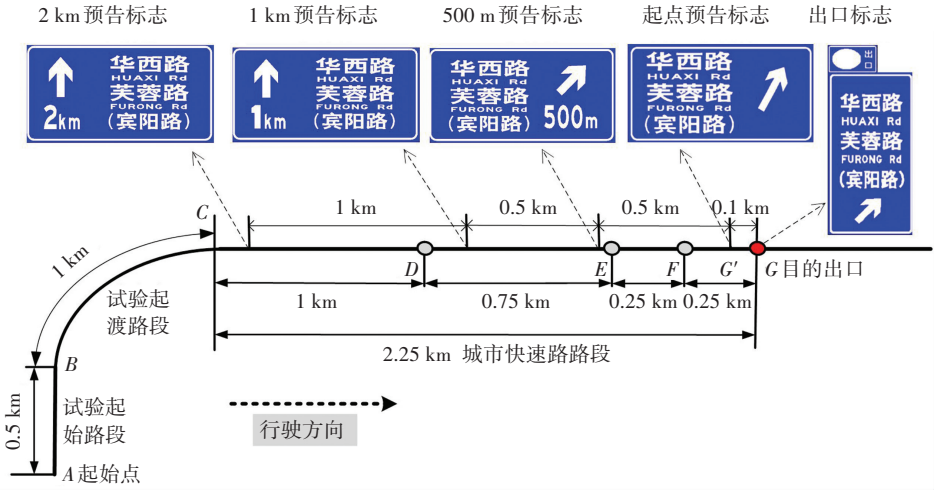


图 5 试验道路及 4 次预告标志设置示例

Fig.5 Experimental road and an example with installation of four advance guide signs

2.4 试验过程

每位被试者随机驾驶 5 个试验场景,试验步骤如下:1)练习驾驶. 被试者在非试验场景中驾驶 5 min,以适应模拟车辆及周围环境. 2)告知任务. 告知被试者试验注意事项,如车辆限速、事故处理等;并告知去往目的地,要求按照日常驾驶习惯完成驾驶任务. 3)正式驾驶. 被试者开始驾驶,模拟系统采集试验数据. 4)结束任务. 驾驶结束后,工作人员提问并记录被试者寻找此次目的地的难易程度. 随后被试者休息 5~10 min,之后重复第 2 步,驾驶新的试验场景. 5)问卷填写. 被试者将 5 个场景全部完成后,填写驾后主观问卷.

3 指 标

研究表明快速路出口前 500 m 是驾驶人的关键运行区域. 定义出口前 500 m 为关键影响范围,以查看不同预告标志方案对驾驶人在关键区域(*O*—*G*)的影响,如图 6 所示.

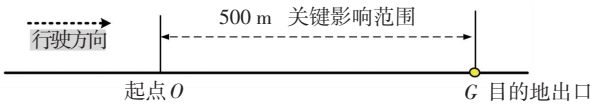


图 6 关键影响范围

Fig.6 Definition of key influence area

基于驾驶人认知过程,从主观感受、操控行为、运行状态 3 个层面,获取关键影响范围内的 9 种指标数据,建立影响指标体系,分析预告标志的影响规律,支撑 5 种预告方案的效用评估.

1)主观感受. 目的地难易程度打分:驾驶员对寻找目的地难易程度的主观打分. 0 代表非常难,10 代表非常容易.

2)操控行为. GP_{power}:驾驶员踩油门的功效和[26],关键影响范围内值越小表明驶出出口安全性越高,$GP_{power}=\sum(A\Delta t)$,其中 A 为踩油门的深度,A 取值为 0~1,0 代表未踩油门,1 代表踩油门最大深度,Δt 为采集数据间隔时间. 换车道次数:有效的预告标志能够引导驾驶人及时换车道,关键影响范围内换车道次数越少越好.

3)运行状态. 速度:车辆行驶快慢情况,越接近运行速度行驶状态越好. 速度标准差:车辆行驶速度波动或行驶平稳情况[27],波动越小越好. 加速度:车辆加减速情况,与运行状态有关,行驶越顺畅越好. 加速度标准差:加速度波动情况,表征行驶舒适程度,越小越好. 行驶时间:车辆运行时长,代表行驶效率,越短越好. 正确驶出比例:正确驶出目的出口的人员比例,表征标志引导效果,越高越好.

4 预告次数对驾驶行为的影响

采用重复测量方差分析,分析 5 种预告方案对驾驶行为的影响,发现不同预告次数对驾驶员主观感受、操控行为、车辆运行状态方面的影响不同.

1)主观感受. 目的地难易程度打分:预告次数对

驾驶员寻找目的地难易感受存在显著性影响（$F_{(4,108)}$ = 7.03；Sig=0.001）；随着预告次数增加，分值增高，表明驾驶员认为预告标志增多有助于寻找目的地，如图 7 所示.

2）操控行为.GP_{power}：预告次数对油门功效存在显著性影响（$F_{(4,108)}$ = 5.67；Sig = 0.00）；随着预告次数增加而降低，设置 4 次预告时反而有小幅增加，如图 8（a）所示. 换车道次数：预告次数对换车道次数存在显著性影响（$F_{(4,108)}$ = 10.22；Sig = 0.00）；随着预告次数增加而降低，设置 3 次预告时达到最小；设置 4 次、4 次（日本）预告时反而有增多趋势，如图 8（b）所示.

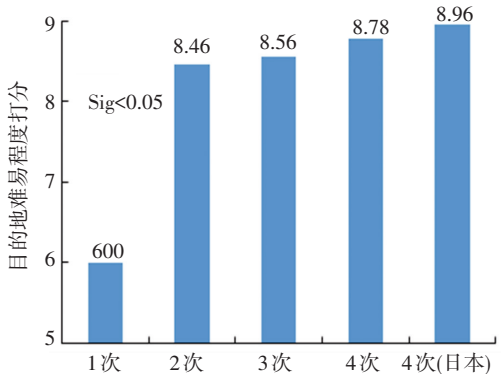
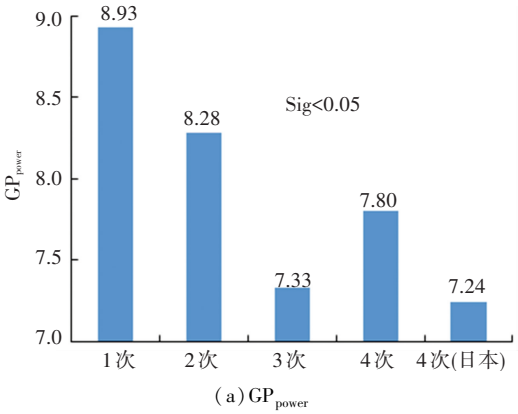


图 7　预告方案对主观感受指标的影响

Fig.7　Influence of five schemes on subjective feeling indicators



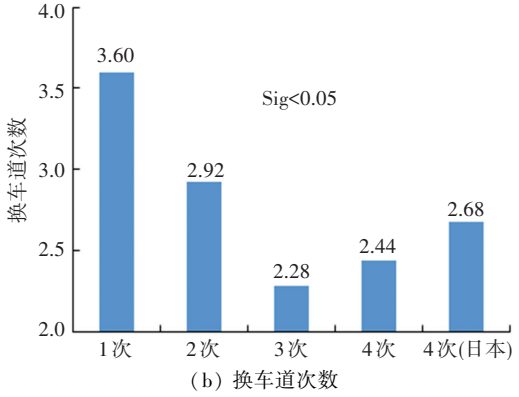


图 8　预告方案对操控行为指标的影响

Fig.8　Influence of five schemes on maneuvering behavior indicators

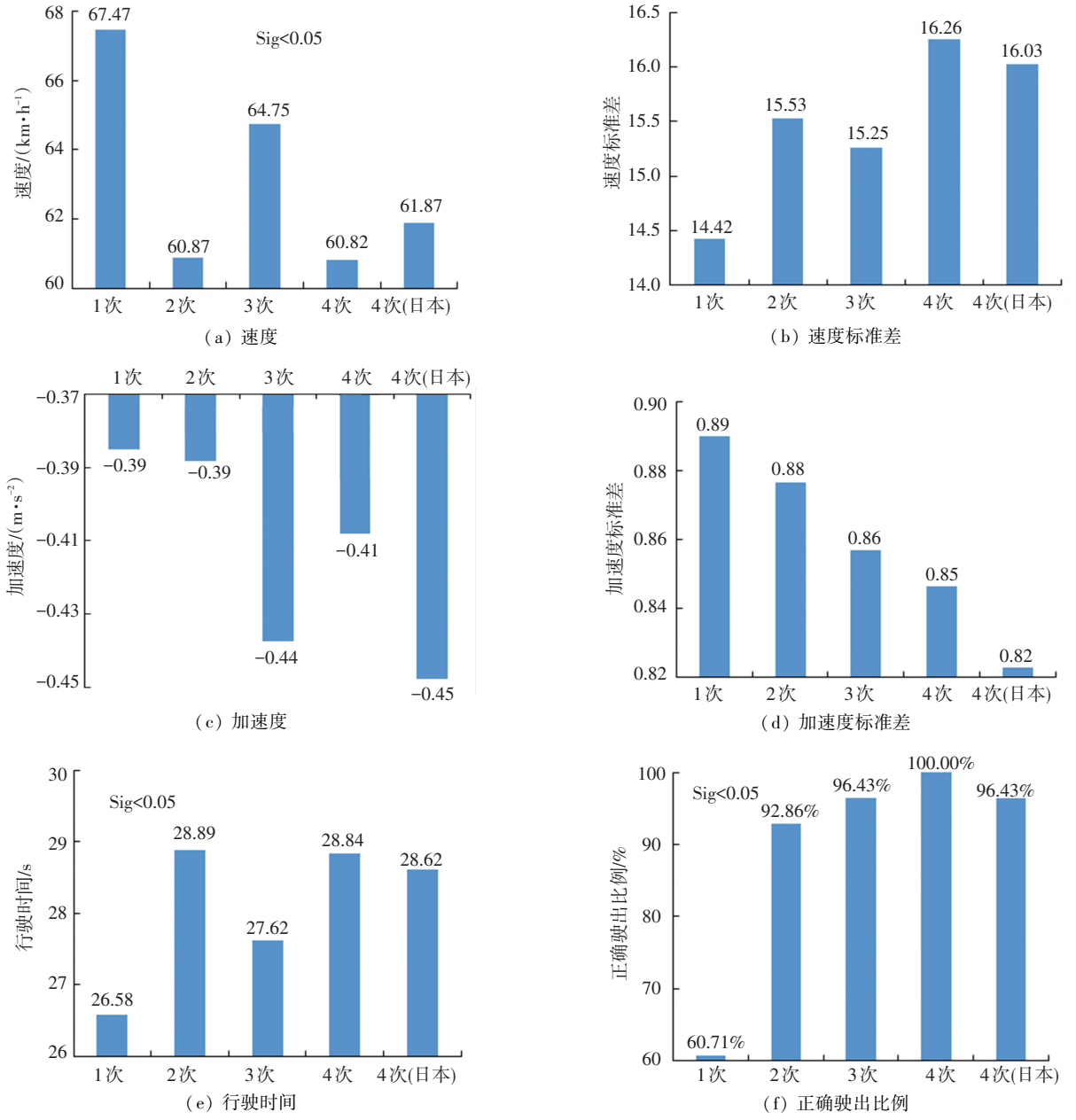
3）运行状态.速度：预告次数对行驶速度存在显著影响（$F_{(4,108)}$ = 3.14；Sig=0.04）；随着预告次数增加有降低趋势；设置 3 次预告时，速度反而增加，如图 9（a）所示. 速度标准差：预告次数对速度标准差无显著影响（$F_{(4,108)}$ = 0.86；Sig=0.51）；随着预告次数增加有上升趋势；设置 3 次预告时，速度波动反而减小，如图 9（b）所示. 加速度：预告次数对加速度无显著影响（$F_{(4,108)}$ = 1.46；Sig=0.25）；随着预告次数增加而降低，设置 3 次预告时降幅更为明显，如图 9（c）所示. 加速度标准差：预告次数对加速度标准差无显著影响（$F_{(4,108)}$ = 0.35；Sig=0.84）；但随着预告次数增加而逐渐降低，如图 9（d）所示. 行驶时间：预告次数对行驶时间存在显著影响（$F_{(4,108)}$ = 3.58；Sig=0.02）；设置 1、3 次预告时行驶时间较短，如图 9（e）所示. 正确驶出比例：预告次数对正确驶出目的出口比例存在显著影响（$F_{(4,108)}$ = 4.13；Sig = 0.011）；随着预告次数增加而增加，1 次预告时明显较低，如图 9（f）所示.

综上所述，获取了不同预告次数显著影响的 6 种指标（Sig<0.05）. 结合 6 种指标定义及具体数值（见图 7~9），对 5 种方案在每类显著指标下的表现由优到劣排序（排序值为 1~5）见表 2. 发现每种指标下 5 种预告次数的优劣排序不同，难以确定最优方案.

表 2　5 种预告次数在 6 种显著指标下的优劣排序

Tab.2　Ranking of five schemes under six significant indicators

预告次数	6 种显著指标排序值					
	目的地难易程度打分	GP_{power}	换车道次数	速度	行驶时间	正确驶出比例
1 次	5	5	5	1	1	4
2 次	4	4	4	4	5	3
3 次	3	2	1	2	2	2
4 次	2	3	2	5	4	1
4 次（日本）	1	1	3	3	3	2



(a) 速度　(b) 速度标准差　(c) 加速度　(d) 加速度标准差　(e) 行驶时间　(f) 正确驶出比例

图 9　预告方案对运行状态指标的影响

Fig.9　Influence of five schemes on operating status indicators

5　预告次数设置效用综合评价

6 种指标权重不明确,难以实现对 5 种方案的精准评估. 因此,考虑采用客观的熵权法进行指标赋权,并结合 TOPSIS 方法有效解决本研究多目标决策分析的问题[28],实现 5 种方案设置效用的综合评价. 具体计算过程如下:

1)建立多目标决策矩阵.基于 5 种方案的 6 种显著性指标,建立多目标决策矩阵, $\boldsymbol{X}=(X)_{mn}(m=5,n=6)$. 并将决策矩阵 $\boldsymbol{X}$ 进行同趋化、标准化处理分别获得矩阵 $X_{IJ}^{\#}$、X_{ij}^{*},$X_{ij}^{*}=\dfrac{X_{IJ}^{\#}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(X_{ij}^{\#})^2}}$.

2)获得指标权重.针对 X_{ij}^{*},采用熵权赋值法,获取 6 种指标权重 $W_i=$(0.169 3　0.163 5　0.170 6　0.161 3　0.161 8　0.173 5),对指标权重排序发现,正确驶出比例、换车道次数、目的地难易程度打分对预告方案效用评估有较大影响.

3)计算欧氏距离.利用权重 W_i 与标准化矩阵 X_{ij}^{*},构造规范化加权矩阵 U_{ij},获取正理想解 $U_j^{+}=\max\{U_{ij}\}$;负理想解 $U_j^{-}=\min\{\boldsymbol{U}_{ij}\}$,$j=1,2,\cdots,m$. $\boldsymbol{U}^{+}=$(0.08　0.08　0.09　0.08　0.08　0.09);$\boldsymbol{U}^{-}=$(0.06　0.06　0.06　0.07　0.07　0.05). 最终,计算单元与正负理想解的距离:正理想解 $D_i^{+}=\sqrt{\sum_{j=1}^{n}(u_{ij}-U_j^{+})^2}$,负理想解 $D_i^{-}=\sqrt{\sum_{j=1}^{n}(u_{ij}-U_j^{-})^2}$. 获得评价方案与最优及最劣

解的欧氏距离：D_i^+ = (0.055　0.024　0.008　0.009　0.012)，D_i^- = (0.006　0.038　0.051　0.052　0.048).

4)确定综合评分.计算各评价方案与最优解的相对接近度 $C_i^* = \dfrac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}$，$0 \leqslant C_i^* \leqslant 1$，$C_i^*$ 越接近于 1，表明方案综合评定越优，反之则越差. C_i^* = (0.11　0.61　0.86　0.85　0.80).

综合得分由高到底依次为 3 次、4 次、4 次(日本)、2 次及 1 次，如图 10 所示. 按照日本规范设置 4 次预告时，效果不及中国 3、4 次预告，可能与其首次预告位置较近、预告间距较小有关.

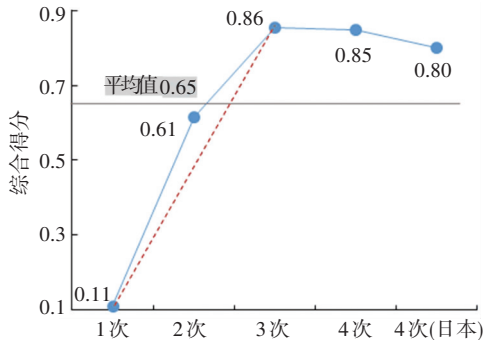


图 10　5 种预告方案综合得分

Fig.10　Evaluation result of five schemes

为体现各个方案的差异，采用依据肘部法则的 *K*-means 聚类对 5 种方案进行二分类：一类为预告 1 次，另一类为预告 2 次、3 次、4 次及 4 次(日本). 并开展各指标 LSD 两两对比，验证聚类结果的合理性，发现 1 次预告同其他 4 种方案均存在显著差异. 表明设置 1 次预告时对驾驶人的指路效果明显较差. 考虑预告标志对驾驶人的综合影响，建议工程应用中优先按照中国规范设置 3 次预告标志；条件受限时，应至少进行 2 次预告.

6　结　论

1)目的地难易程度打分、驾驶员踩油门的功效和、换车道次数、速度、行驶时间、正确驶出比例均受到预告次数的显著影响(Sig<0.05)，随预告次数不同呈现不同的变化.

2)在减速车道起点前 1.0、0.5 km 及起点处设置 3 次预告标志时，综合设置效果最好；其次为按照中国规范设置 4 次预告，及按照日本规范设置 4 次预告.

3)按照中国规范设置 1 次预告标志，设置效果较差；道路条件受限时，建议至少进行 2 次预告.

4)相比实地测试，驾驶模拟试验行为数据具有相对有效性，研究结果具有一定的合理性，能够有效解决路段出口预告信息缺失等问题. 当前实地测试实验已广泛应用于驾驶人认知领域，后期将开展实地测试以验证优化方案的设置效果. 并针对多出口预告标志设置空间受限、信息干扰等问题进行深入研究.

参考文献

[1] 王东炜，李辉，李岩，等. 城市道路网络路段状态相关性与道路间距分析[J]. 交通运输工程学报，2017，17(1)：101
WANG Dongwei，LI Hui，LI Yan，et al. Analysis of section state correlation and road distance in urban road network[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering，2017，17(1)：101. DOI：10.3969/j.issn.1671-1637.2017.01.012

[2] DUTTA A，CARPENTER R，NOYCE D，et al. Drivers' understanding of overhead freeway exit guide signs：evaluation of alternatives with an advanced fixed-base driving simulator[J]. Transportation Research Record：Journal of the Transportation Research Board，2002(1803)：102

[3] QIAO Fengxiang，LIU Xiaoyue，YU Lei. Using driving simulator for advance placement of guide sign design for exits along highways [C]//Proceedings of the Driving Simulator Conference 2007 North America. Iowa City：DSC，2007：12

[4] MEEKER D T，PIETRUCHA M T，GARVEY P M. Proportion-based format system for freeway and expressway guide signs[J]. Journal of Transportation Engineering，2010，136(3)：267. DOI：10.1061/(ASCE)0733-947X(2010)136:3(267)

[5] KABER D，PANKOK C，CORBETT B，et al. Driver behavior in use of guide and logo signs under distraction and complex roadway conditions[J]. Applied Ergonomics，2015，47：99. DOI：10.1016/j.apergo.2014.09.005

[6] MAST T M，KOLSRUD G S. Diagrammatic guide signs for use on controlled access highways[R]. Washington DC：Offices of Research and Development，Federal Highway Administration，1972

[7] ZWAHLEN H，RUSS A，ROTH J，et al. Effectiveness of ground-mounted diagrammatic advance guide signs for freeway entrance ramps[J]. Transportation Research Record：Journal of the Transportation Research Board，2003(1843)：70

[8] CHRYSLER S T，WILLIAMS A A，FUNKHOUSER D S，et al. Driver comprehension of diagrammatic freeway guide signs[R]. Austin，TX：Texas Transportation Institute，Federal Highway Administration，2007

[9] FITZPATRICK K，CHRYSLER S T，NELSON A A，et al. Driving simulator study of signing for complex interchanges[C]//Proceedings of Transportation Research Board 92nd Annual Meeting. Washington DC：Transportation Research Board，2013：1

[10] 舒文军. 城市快速路的标志牌设置[J]. 中外公路，2004，24(4)：184.
SHU Wenjun. Design of road sings in urban expressway[J]. Journal of China & Foreign Highway，2004，24(4)：184. DOI：10.3969/j.issn.1671-2579.2004.04.060

[11] 吴海刚.绕城高速公路指路标志信息设计方法探讨[J].公路，2007(7)：98
WU Haigang. Discussion on information design method of ring highway signs[J]. Highway，2007(7)：98. DOI:10.3969/j.issn.0451-0712.2007.07.023

[12]王永清，丁明. 城市快速路指路引导标志的设置研究[J]. 交通标准化，2010(21)：142

WANG Yongqing, DING Ming. Setting guide signs in urban expressway[J]. Journal of Traffic Standardization, 2010(21): 142. DOI: 10.3869/j.issn.1002-4786.2010.11.048

[13]陈明磊, 吴湛坤. 美国高速公路简图指路标志设计研究[J]. 中外公路, 2012(2): 268
CHEN Minglei, WU Zhankun. Diagrammatic freeway guide sign design in America[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2012(2): 268. DOI:10.3969/j.issn.1671-2579.2012.02.066

[14]李爱增, 李文权, 王炜. 城市快速路出口标志位置设置研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2006, 6(5): 36
LI Aizeng, LI Wenquan, WANG Wei. Research on position of traffic sign on urban expressway off-ramp[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2006, 6(5): 36. DOI:10.3969/j.issn.1009-6744.2006.05.006

[15]郭唐仪, 胡启洲, 姚丁元. 高速出口预告指路标志设置距离及其安全性能比较[J]. 公路交通科技, 2011, 28(12): 106
GUO Tangyi, HU Qizhou, YAO Dingyuan. Comparison of placement distances of advance guide sign of freeway exit and their safety performances[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(12): 106. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2011.12.018

[16]刘伟铭,邓如丰,张阳,等.高速出口前置指路标志的安全距离设置模型[J].华南理工大学学报(自然科学版), 2013, 41(2):37
LIU Weiming, DENG Rufeng, ZHANG Yang, et al. Setting model of safe distance of advance guide signs at highway exits[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2013, 41(2):37. DOI:10.3969/j.issn.1000-565X.2013.02.007

[17]崔洪军. 高速公路出口前置指示标志安全距离计算模型[J].公路交通科技, 2016, 33(4): 120
CUI Hongjun. A model for calculating advance guide sign's reasonable setting location at expressway exit[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33(4): 120. DOI:10.3969/j.issn.1002-0268.2016.04.019

[18]王建强, 祖永昶, 卢健. 城市快速路出口预告标志设置方法研究[J]. 中国人民公安大学学报(自然科学版), 2017, 23(1): 60
WANG Jianqiang, ZU Yongchang, LU Jian. Research on design method of exit guide signs in urban expressway[J]. Journal of People's Public Security University of China (Science and Technology), 2017, 23(1): 60

[19]李雪. 基于容错理念的快速路指路标志设置方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011
LI Xue. Research on setting method of traffic guide signs on expressway based on fault-tolerant concept[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011

[20]道路交通管理设施设置规范 第1部分:道路交通标志:DB 11/T 493.1—2007[S]. 北京:北京市质量技术监督局, 2007
Installation specification for road traffic management facilities Part 1: road traffic signs: DB 11/T 493.1—2007[S]. Beijing: Beijing Municipal Administration of Quality and Technology Supervision, 2007

[21]道路交通标志和标线 第2部分:道路交通标志:GB 5768.2—2009[S]. 北京:中国标准出版社, 2009
Road traffic signs and markings Part 2: road traffic signs: GB 5768.2—2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009

[22]城市道路交通标志和标线设置规范:GB 51038—2015[S]. 北京:中国计划出版社, 2015
Code for layout of urban road traffic signs and markings: GB 51038—2015[S]. Beijing: China Planning Press, 2015

[23]城市快速路指路标志设置指南:BJJT/J 111—2016[S]. 北京:北京交通标准化技术文件出版社, 2016
Guidelines for layout of urban expressway direction signs: BJJT/J 111—2016[S]. Beijing: Technical Document Press of Beijing Traffic Standards, 2016

[24]FHWA. Manual on uniform traffic control devices for streets and highways[R]. Washington DC: U.S. Department of Transportation, 2009

[25]全国道路标识、标示业协会.道路标识手册[M]. 东京:日本建设省道路局,警察厅交通局,2004:126
全国道路標識、標示業協会.道路標識ハンドブック[M]. 東京:日本は省道局、警察庁交通局を建設します,2004:126

[26]赵晓华.城市快速路指路标志系统效用评估及优化设置方法研究(2016-kjc-01-002)[R]. 北京:北京市交通委员会,2016
ZHAO Xiaohua. Research on effectiveness evaluation and optimization method of installation of interchange exit guide signs in urban expressway (2016-kjc-01-002)[R]. Beijing: Beijing Municipal Commission of Transport, 2016

[27]裴玉龙, 程国柱.高速公路车速离散性与交通事故的关系及车速管理研究[J]. 中国公路学报, 2004, 17(1):74
PEI Yulong, CHENG Guozhu. Research on the relationship between discrete character of speed and traffic accident and speed management of freeway[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(1): 74. DOI:10.19721/j.cnki.1001-7372.2004.01.019

[28]董晓旭,何安瑞,孙文权,等.应用熵权-TOPSIS法的加热炉炉温在线设定模型[J].哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(7):119
DONG Xiaoxu, HE Anrui, SUN Wenquan, et al. On-line temperature setup model of reheating furnace based on entropy weight-TOPSIS method[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(7):119. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201602050

(编辑 魏希柱)