

# 高速公路改扩建作业区行车安全风险评价及临时安全防护体系研究

陈亚振<sup>1</sup>, 林玉坤<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中交第二公路勘察设计院有限公司, 湖北 武汉

<sup>2</sup>广东省高速公路有限公司开阳扩建管理处, 广东 开平

收稿日期: 2022年7月28日; 录用日期: 2022年8月8日; 发布日期: 2022年8月22日

## 摘要

针对现行规范体系不适应高速公路改扩建作业区临时交通安全防护的缺点, 系统分析高速公路改扩建作业区工程特点及交通运行特征, 构建了改扩建作业区行车安全风险指标体系, 并运用灰色聚类评价方法对改扩建作业区行车安全风险进行分析, 建立了改扩建作业区的六级风险评价体系, 并提出了临时交通安全防护体系设置建议, 为类似改扩建工程提供参考。

## 关键词

高速公路, 改扩建作业区, 灰色聚类, 安全风险评估, 临时交通安全防护体系

# Research on Traffic Safety Risk Assessment and Temporary Safety Protection System in Expressway Reconstruction and Expansion Operation Area

Yazhen Chen<sup>1</sup>, Yukun Lin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CCCC Second Expressway Consultant Co., Ltd., Wuhan Hubei

<sup>2</sup>Kaiyang Expansion Management Office of Guangdong Expressway Co., Ltd., Kaiping Guangdong

Received: Jul. 28<sup>th</sup>, 2022; accepted: Aug. 8<sup>th</sup>, 2022; published: Aug. 22<sup>nd</sup>, 2022

## Abstract

Aiming at the inadequacy of temporary traffic safety protection in the expressway reconstruction

and expansion operation area, the engineering characteristics and traffic operation characteristics of the expressway reconstruction and expansion operation area are systematically analyzed. The driving safety risk index system of the reconstruction and expansion operation area is constructed, the grey clustering evaluation method is used to analyze the driving safety risk of the reconstruction and expansion operation area, the six-level risk evaluation system is established, and the suggestions for setting temporary traffic safety protection system are put forward, which can provide a reference for similar reconstruction and expansion projects.

## Keywords

Expressway, Reconstruction and Expansion Operation Area, Grey Clustering, Safety Risk Assessment, Temporary Traffic Safety Protection System

Copyright © 2022 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

高速公路改扩建工程通常是在不中断交通条件下施工, 相对于正常运营高速公路良好的道路技术指标和安全引导和防护设施, 高速公路改扩建施工期间, 由于施工、保通及原路护栏拆除的叠加因素, 通行环境复杂而又多变, 如何针对复杂条件提供良好的防护体系, 相应的理论及设计方法远未成熟, 现行规范对高速公路改扩建作业区临时交通安全防护的指导性很弱, 导致高速公路改扩建作业区临时交通安全防护的设计往往套用《公路养护安全作业规程》(H30-2015)和《道路交通标志和标线第4部分作业区》(GB5768-2017), 所用的临时交通设施五花八门、标准不一、技术指标差异明显, 不利于改扩建工程作业区交通安全水平, 也不利于项目的实施和作业区安全管理。本文拟分析影响高速公路改扩建作业区行车安全指标, 并基于改扩建作业特点及交通流特性, 基于作业区行车安全风险分级及应对, 对高速公路改扩建作业区临时交通安全防护体系进行研究。

## 2. 作业区行车安全要素及指标构建

### 2.1. 作业区道路条件

在空间布局上, 高速公路改扩建工程的施工规模是全方位的, 在持续时间和空间上均远大于养护工程, 如: 路基路面拼宽、主线桥梁拆除与拼宽、中央分隔带改造、互通式立交改造等, 且全线各分段工程同时施工, 步骤难以取得一致, 工序安排需要交错进行, 故存在正常断面与施工断面之间的过渡区, 即车道转换区域。例如: 路基施工阶段的路侧加宽部分施工, 新建路基与原路基进行拼接, 要占用硬路肩甚至外侧车道, 所以需要封闭, 于是在施工作业区起点处正常两车道路段, 车辆需过渡到内侧车道上。此外, 改扩建作业区所处的线形条件、构造物的拆除和拼宽, 改扩建纵面抬升及平线形调整等情况千差万别, 造成改扩建防护体系的情况复杂多变, 需要综合考虑考量。临时安全防护体系的设置, 需要对改扩建作业区道路条件评估。

### 2.2. 作业区时长[1]

与常规养护工程相比, 高速公路改扩建作业区施工规模和影响区域和程度都是全方位的, 改扩建作

业区从总体上属于长期改扩建作业区, 但其中又包括部分相对中短期的改扩建作业, 比如: 上跨天桥中墩施工、旧桥梁板的拆除与新建等工程, 均在较长的时间内影响交通运行。现行规范体系的《公路养护安全作业规程》以及《道路交通标志和标线第 4 部分作业区》, 均将作业区大于 24 h 的定位为长期作业区[2], 将短期作业区[2]作业时间定为 4 h~24 h 之间, 为更好地把握高速公路改扩建作业区特点, 作业区时长的界定需根据改扩建作业特点重新定义, 改扩建作业区临时防护需充分考虑改扩建作业周期。

### 2.3. 改扩建作业区交通组织

高速公路改扩建作业区又一特点就是交通组织, 由于路段交通组织及交通转换复杂, 从另一层面也决定了改扩建作业区临时交通安全防护体系的复杂性。改扩建作业区路段交通组织保通车道的断面布置影响极为重要。比如一般路段保通车道数、临时侧向余宽和保通车道宽度的布置, 交通转换段, 均深刻影响着高速公路改扩建作业区安全防护方案。

#### 1) 交通量状况

交通量也是临时交通安全防护体系需要重点考虑的因素之一, 比如: 改扩建作业区交通量的大小、流量流向、大型车比例等会影响交通安全。由于改扩建作业区属于长期作业, 相对于养护作业的临时性或不确定性, 司机对改扩建作业区的环境条件已经较为熟悉, 客观上也导致改扩建作业区运行速度普遍较高。

#### 2) 改扩建作业区主动引导体系

主动引体系的对高速公路改扩建作业区安全防护体系也极为重要, 由于改扩建作业区在实践、空间上的不确定性, 完善的主动引导可以给道路使用者提供足够的信息, 如施工区段的长度及时间、施工部位、车辆操作建议, 将大大提升改扩建作业区的安全性。

本文将技术指标分类提取并明确化, 提炼出高速公路改扩建作业区行车安全风险及临时安全防护的技术指标体系, 如表 1 所示。

**Table 1.** Influencing traffic safety risk index group in the reconstruction and expansion operation area

**表 1.** 影响改扩建作业区行车安全风险指标群

交通量状况	道路条件	作业区条件	交通组织
年平均日交通量	圆曲线	作业区长度	保通车道数
行车速度	纵坡	作业区位置	保通断面布置
大型车比例	坡高	作业区施工时长	作业区限速
高峰小时交通量	路侧净区内障碍物	施工时间、方法	交通引导设施

鉴于改扩建作业区安全指标体系十分庞杂, 且各个指标间存在连带性和叠加性[3], 且影响因素之间经常耦合[4], 本文结合改扩建设计经验, 从对改扩建作业区重要指标精炼并分析, 初步筛选平曲线、纵坡、高峰小时交通量、作业区布置形式、施工时长、边坡高度等关键性变量指标深入分析。

### 3. 指标变量及权重

#### 1) 圆曲线变量 $X_1$

$X_1$  为集计变量, 标识评价路段平均百米长度的偏角值, 按下式计算。

$$X_1 = \sum(WH_i \times DEG_i)$$

式中:  $l_i$ ——评价路段中第  $i$  个圆曲线的长度;

$L$ ——评价路段的长度;

$R_i$ ——第  $i$  个圆曲线半径;

$WH_i$ ——第  $i$  个圆曲线位于评价路段内的比重,  $WH = l_i/L$ ;

$DEG_i$ ——圆曲线  $i$  每百米长度的曲线偏角,  $DEG = 18000/\pi/R$ 。

2) 纵坡变量  $X_2$

$X_2$  为集计变量, 表示评价路段加权平均纵坡值, 按下式计算。

$$X_2 = \frac{\sum(G_i \times l_i)}{L}$$

式中:  $G$ ——评价路段中的坡段纵坡值;

$l_i$ ——坡段长度;

$L$ ——评价路段的总长度。

3) 小时交通量变量  $X_3$

小时交通量  $X_3$  为按各类车型的换算系数换算成标准当量小型车的交通量。

4) 大型车比重变量  $X_4$

大型车比重按下式计算。

$$X_4 = \frac{\sum Truck_i}{ADT} \times 100\%$$

式中:  $Truck_i$ —— $i$  类货车的众型车当量数;

$ADT$ ——日均交通量的小客车当量数。

5) 作业区施工时长变量  $X_5$

$X_5$  在通常是指一个地点设置作业区, 实施作业以及拆除作业区的时间总和。

6) 作业区长度变量  $X_6$

$X_6$  通常是指警告区、上游过渡段、缓冲段、施工区、下游过渡段的总和。

7) 封闭车道宽度  $X_7$

常见封闭宽度有: 移动式施工、占用硬路肩作业、封闭内侧车道作业、封闭硬路肩及外侧车道作业、封闭单幅车道作业。

8) 路侧净区宽度满足率  $X_8$

路侧净区宽度满足率按下式计算。

$$X_8 = \frac{CZ}{W} \times 100\%$$

式中:  $CZ$ ——评价路段的实际路侧净区宽度;

$\pi = \alpha W$ ,  $\alpha$ ——折减系数, 取值在 0.6~0.8 之间;

$W$ ——依据评价路段的边坡比率、交通量和设计速度, 参考美国《路侧设计指南》[5]关于路侧净区设置之规定, 得到建议净区宽度的下限值。

如果有断面运行速度调查值  $V_{85}$ , 则以其代替设计速度查表确定路侧净区宽度。路侧净区满足率变量在带入模型中时, 需要作如下转化: 令  $X_7^* = 1 - X_7$ ,  $X_7 = X_7^*$ 。

9) 作业区限速变量  $X_9$

作业区限速指改扩建作业区一般路段及交通转换段实际限速方案。

10) 作业区诱导设施变量  $X_{10}$

作业区诱导设施变量指设置的临时标志、标线、诱导设施等。

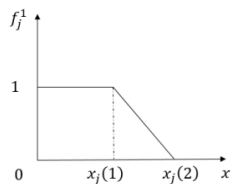
评价指标体系中的权重可结合专家经验及层次分析法得到, 具体见表 2。

**Table 2.** Weight table of evaluation index variables of safety risk level in operation area  
**表 2.** 作业区安全风险等级评估指标变量权重表

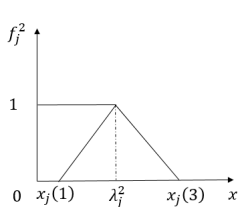
X <sub>j</sub>	层次但排序				层次总排序
	道路状况	交通量状况	作业区性质	交通组织方案	
	0.1982	0.1039	0.2837	0.4142	
圆曲线变量 X1	0.5				0.0889
纵坡变量 X2	0.5				0.0889
小时交通量 X3		0.2857			0.0297
大型车比重 X4		0.7143			0.0742
作业区施工时长 X5			0.3292		0.0997
施工长度 X6			0.2171		0.0825
封闭车道宽度 X7			0.4537		0.1543
路侧净区宽度 X8				0.4023	0.1671
作业区限速 X9				0.2299	0.0721
作业区诱导设施 X10				0.3678	0.1426
Σ	1	1	1	1	1

#### 4. 灰类函数白化函数的构造

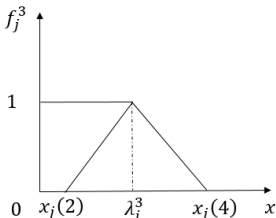
1) 对于路侧安全等级为 1 级的情况, 用下限白化权函数

$$f_j^1(x) = \begin{cases} 0 & x > A_2 \\ \frac{A_2 - x}{A_2 - A_1} & x \in [A_1, A_2] \\ 1 & x < A_1 \end{cases}$$


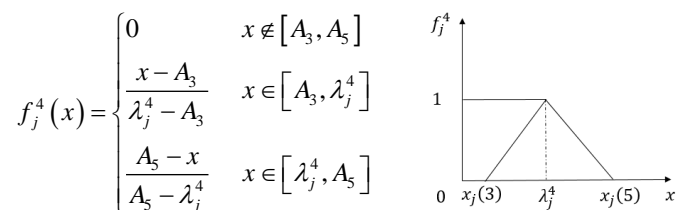
2) 对于路侧安全等级为 2 级的情况, 用适中测度的白化权函数

$$f_j^2(x) = \begin{cases} 0 & x \notin [A_1, A_3] \\ \frac{x - A_1}{\lambda_j^2 - A_1} & x \in [A_1, \lambda_j^2] \\ \frac{A_3 - x}{A_3 - \lambda_j^2} & x \in [\lambda_j^2, A_3] \end{cases}$$


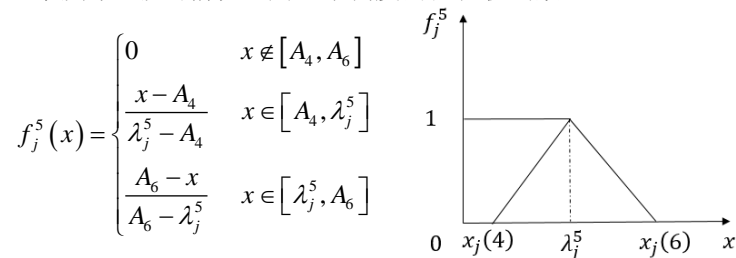
3) 对于路侧安全等级为 3 级的情况, 用适中测度的白化权函数

$$f_j^3(x) = \begin{cases} 0 & x \notin [A_2, A_4] \\ \frac{x - A_2}{\lambda_j^3 - A_2} & x \in [A_2, \lambda_j^3] \\ \frac{A_4 - x}{A_4 - \lambda_j^3} & x \in [\lambda_j^3, A_4] \end{cases}$$


4) 对于路侧安全等级为 4 级的情况, 用适中测度的白化权函数



5) 对于路侧安全等级为 5 级的情况, 用适中测度的白化权函数



6) 对于路侧安全等级为 6 级的情况, 用下限白化权函数

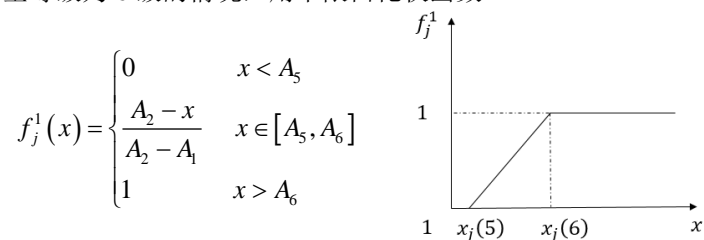


表 3 给出了建立白化权函数时每个函数转折点的值, 确定了白化权函数的形式和转折点数值后, 白化权函数的数值表达式也随之确定, 便可用于灰色聚类评估具体的计算过程中。

Table 3. Rank value of the indicator system variable

表 3. 指标体系变量的等级值

变量	A1	A2	A3	A4	A5	A6
圆曲线变量 X1	15	25	40	60	80	100
纵坡变量 X2	1	2	3	5	6	7
小时交通量 X3	500	900	1300	1600	1900	2200
大型车比重 X4	0.2	0.3	0.4	0.6	0.7	0.8
作业区施工时长 X5	0	0.5	4	8	24	240
施工长度 X6	0	0.2	1	2	4	8
封闭车道宽度 X7	0	2	3	3.75	6.75	10.5
路侧净区宽度 X8	0.1	0.2	0.35	0.5	0.65	10.5
作业区限速 X9	0.25	0.33	0.5	0.67	1	2
作业区诱导设施 X10	1	2	3	5	7	10

### 5. 典型高速公路改扩建作业区行车安全风险评价

在相对理想的道路、交通条件下, 如大半径圆曲线, 低纵坡, 低交通量对典型工况的作业区安全风险等级进行分析, 评价方法应用流程, 路侧安全等级评估可按如下步骤进行:

- ①收集线形、交通量、事故和路侧特征数据。

- ②将被评价路段划分成  $n$  个评价路段单元。
  - ③计算第  $i$  个评价路段单元的变量值  $X_i, j = 1, 2, \dots, 10$ 。
  - ④计算第  $i$  个评价路段单元的 4 个级别白化权函数值  $f_j^k(X_{ij}), k = 1, 2, 3, \dots, 5, 6$ 。
  - ⑤计算第  $i$  个评价路段单元的灰色聚类系数  $\sigma_i^k, \sigma_i^k = \sum f_j^k(X_{ij}) * \eta_j$ 。
  - ⑥确定第  $i$  个评价路段单元的路侧安全等级, 若  $\sigma_i^k = \max\{\sigma_i^k\}$ , 则路段  $i$  的路侧安全等级为  $k^*$ 。
  - ⑦重复步骤③~⑥, 直至确定所有待评价路段单元的改扩建作业区安全风险等级。
- 1) 封闭内侧车道短期施工, 见表 4。

**Table 4.** Summary table of safety risk level assessment in operation area  
**表 4.** 作业区安全风险等级评估汇总表

序号	指标变量	权重	取值	f1	f1*η	f2	f2*η	f3	f3*η	f4	f4*η	f5	f5*η	f6	f6*η
1	X1	0.079	1	0.889	0.070	0.222	0.018								
2	X2	0.079	1.5	0.5	0.04	0.5	0.040								
3	X3	0.044	1000			0.75	0.033	0.286	0.013						
4	X4	0.070	0.35			0.5	0.035	0.333	0.023						
5	X5	0.120	5			0.8	0.096	0.500	0.060						
6	X6	0.093	0.5			1	0.093	0.333	0.031						
7	X7	0.154	3			0.4	0.062	0.364	0.056						
8	X8	0.167	0.25				0	0.667	0.111	0.333	0.056				
9	X9	0.072	0.2	1	0.072										
10	X10	0.123	0.5		0.123										
求和		1	—	—	0.304	—	0.375	—	0.294	—	0.056	—	0		0

$\sigma_i^k = \max\{\sigma_i^k\} = \max\{0.3043, 0.3748, 0.2941, 0.0557, 0, 0\} = 0.3748$ , 可知该路段路侧安全等级为 2 级。  
 2) 封闭内侧车道长期施工, 见表 5。

**Table 5.** Summary table of safety risk level assessment in operation area  
**表 5.** 作业区安全风险等级评估汇总表

序号	指标变量	权重	取值	f1	f1*η	f2	f2*η	f3	f3*η	f4	f4*η	f5	f5*η	f6	f6*η
1	X1	0.079	1	0.889	0.07	0.222	0.018								
2	X2	0.079	1.5	0.5	0.040	0.5	0.040								
3	X3	0.044	1000			0.75	0.033	0.286	0.013						
4	X4	0.070	0.35			0.5	0.035	0.333	0.023						
5	X5	0.120	18				0.000	0.600	0.072	0.086	0.01				
6	X6	0.093	0.5			1	0.093	0.333	0.031						
7	X7	0.154	3			0.4	0.062	0.364	0.056						
8	X8	0.167	0.4					0.667	0.111	0.333	0.056				
9	X9	0.072	0.2	1	0.072										
10	X10	0.123	0.5	1	0.123										
求和		1	—	—	0.304	—	0.279	—	0.306	—	0.066	—			

$\sigma_i^k = \max \{\sigma_i^k\} = \max \{0.3043, 0.2791, 0.3060, 0.0660, 0, 0\} = 0.3060$ ，可知该路段路侧安全等级为 3 级。  
3) 交通转换路段，见表 6。

**Table 6.** Summary table of safety risk level assessment in operation area  
**表 6.** 作业区安全风险等级评估汇总表

序号	指标变量	权重	取值	f1	f1*η	f2	f2*η	f3	f3*η	f4	f4*η	f5	f5*η	f6	f6*η
1	X1	0.079	5							0.915	0.072				
2	X2	0.079	1.5	0.5	0.04	0.5	0.040								
3	X3	0.044	1000			0.75	0.033	0.286	0.013						
4	X4	0.070	0.35			0.5	0.035	0.333	0.023						
5	X5	0.120	864											1	0.12
6	X6	0.093	0.25			0.5	0.046	0.056	0.005						
7	X7	0.154	9							0.444	0.069	0.444	0.069		
8	X8	0.167	0.55							0.667	0.111	0.333	0.056		
9	X9	0.072	0.2	1	0.072										
10	X10	0.123	0.5	1	0.123										
求和		1	—	—	0.234	—	0.154	—	0.041	—	0.252	—	0.124	—	0.12

$\sigma_i^k = \max \{\sigma_i^k\} = \max \{0.2342, 0.1536, 0.0410, 0.2522, 0.1243, 0.1197\} = 0.2522$ ，可知该路段路侧安全等级为 4 级。

4) 单幅双向通行路段，见表 7。

**Table 7.** Summary table of safety risk level assessment in operation area  
**表 7.** 作业区安全风险等级评估汇总表

序号	指标变量	权重	取值	f1	f1*η	f2	f2*η	f3	f3*η	f4	f4*η	f5	f5*η	f6	f6*η
1	X1	0.079	1	0.889	0.070	0.222	0.018								
2	X2	0.079	1.5	0.5	0.040	0.5	0.040								
3	X3	0.044	1000			0.75	0.033	0.286	0.013						
4	X4	0.070	0.35			0.75	0.053	0.286	0.020						
5	X5	0.120												1	0.120
6	X6	0.093	5									1	0.093		
7	X7	0.154	11									0.963	0.149	0.827	0.128
8	X8	0.167	0.7									0.667	0.111	0.607	0.101
9	X9	0.072	0.2	1	0.072										
10	X10	0.123	0.5	1	0.123										
求和		1	—	—	0.304	—	0.142	—	0.033	—	0	—	0.353	—	0.349

$\sigma_i^k = \max \{\sigma_i^k\} = \max \{0.3043, 0.1424, 0.0325, 0, 0.3526, 0.3486\} = 0.3525$ ，可知该路段路侧安全等级为 5 级。

5) 当路段交通组织较小，作业区施工时长为短时，易知其路侧安全等级为 1 级。当施工路段为桥



梁, 路侧为水源、公跨铁, 高边坡、保护区域等, 易知路侧安全等级为 6 级。

## 6. 高速公路改扩建作业区行车安全风险等级及应对

在控制论中, 用深浅不同的颜色表示明确程度不同的信息, 可以定义白色系统是信息完全明确的系统, 信息未知的系统为黑色系统, 而对于部分信息明确、其它信息不明确的系统称其为灰色系统。高速公路改扩建作业区交通安全信息变量多、因素复杂, 可以通过对少量已知信息进行筛选、加工、延伸和扩展, 运用灰色聚类评价方法, 对高速公路改扩建作业区交通安全进行宏观和微观评价, 达到定量评价作业区行车安全风险的目的, 并根据风险评价结论, 相应的设置分级防护设施, 详见表 8, 可大幅提升高速公路改扩建作业区交通安全水平。

**Table 8.** Suggestions on setting temporary safety protection classification based on driving safety risk level in operation area  
**表 8.** 基于作业区行车安全风险等级的临时安全防护分级设置建议

作业区 风险等级	作业区布设形式	作业区限 速(km/h)	隔离防护类型	设置建议
1	封闭硬路肩、外侧行车道、内侧超车道的路基段临时作业区	80 60	渠化设施	交通锥
2	封闭超车道、封闭外侧车道、封闭硬路肩、临时交通转换段的路基段临时、短期、中期作业区	80 60	渠化设施	加密交通锥或连续布设塑料隔离墩
3	封闭超车道、封闭外侧车道、封闭硬路肩的路基段中期、长期作业区	80 60 40	渠化设施	连续且互锁的塑料隔离墩或混凝土隔离墩
4	交通转换段的长期作业区	60 40	临时护栏	二(B)级
5	长期单幅双向通行路段等、路侧高边坡高落差路基段长期作业区	80 60	临时护栏	二(B)级、三(A 级)
6	长大纵坡路段拼宽、平纵线位调整路段、桥梁拼宽、跨越铁路的作业区	80 /60 40	临时护栏	四(SB)级/三(A 级)

## 7. 小结

本文根据高速公路改扩建工程施工特性、作业区交通流特性, 基于灰色聚类理论建立了作业区行车安全风险评价体系, 并根据风险等级提出了分级临时交通隔离防护设施的设置标准, 形成临时交通安全防护设施体系。该体系为现行高速公路改扩建临时交通安全防护设计提供了系统性的设计思路与方法, 避免了隔离防护设施标准的盲目套用, 强化了设计的针对性, 可为类似改扩建工程作业区防护设计提供参考。交通安全因素是个复杂的过程, 涉及到人-车-路等多方面, 评价方法尚有诸多因素未考虑, 如标志标线、视线诱导设施、气候环境等, 因此, 在进行作业区安全评价时, 可根据实际情况, 对评价结果和防护类型进行适当调整。

## 基金项目

广东省高速公路有限公司重点科技项目。

## 参考文献

- [1] 程家富. 高速公路改扩建工程交通安全隐患及预防措施研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2012, 29(6): 59-62.
- [2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB5768.4-2017. 道路交通标志和标

线第 4 部分作业区[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.

- [3] 王松根. JTG H30-2015. 公路养护安全作业规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [4] 戴坤阳, 苏建安, 毛红日. 多因素耦合作用影响的高速公路改扩建工程施工安全评价研究[J]. 项目管理技术, 2018, 16(2): 82-86.
- [5] Akintoye, A.S. and Macleod, M.J. (1997) Risk Analysis and Management in Construction. *International Journal of Project Management*, **15**, 31-38. [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(96\)00035-X](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(96)00035-X)