

基于平纵线形设计指标的高速公路行车安全性评价

王其敏¹ 郭鑫² 陈江财¹ 刘豪斌¹ 任天铨¹ 骆俊晖¹

1.广西北投交通养护科技集团有限公司 广西南宁 530029

2.广西交通设计集团有限公司 广西南宁 530029

摘要: 根据高速公路平面、纵断面线形设计指标,选取直线长度、圆曲线半径、缓和曲线长度、纵坡坡度、竖曲线半径5个指标,采用模糊集值统计法建立行车安全性评价模型,并结合设计标准,确定指标分值判定标准,结果表明:圆曲线半径、纵坡坡度、竖曲线半径是对行车安全性影响较大的指标。将该模型应用于高速公路设计阶段,针对行车安全性差的路段,可通过优化平纵面线形设计指标以提高行车安全性,对提高高速公路线形设计水平和行车安全性有重大意义。

关键词: 高速公路;线形设计;集值统计;安全性评价

引言

随着经济的日益增长,长距离交通出行需求急剧增加,高速公路的建设迅猛发展,对高速公路的设计提出了更高的要求。截止到2020年底,全国公路通车里程达519.81万公里,其中高速公路16.10万公里,一级公路12.31万公里,高速公路的通车里程在高等级公路中占据相当大的比重,如何提高高速公路设计水平,保障行车安全性尤为重要。

结合高速公路线形设计的主要指标,本文选取了对行车安全性影响较大的平、纵指标建立评价指标体系,并基于集值统计法建立高速公路行车安全预评价模型,最后,将该模型应用于某山区高速公路,根据评价分值判断高速公路的在现状设计指标下的行车安全性。

一、高速公路线形设计指标选取

高速公路的线形设计包括平面、纵断面和横断面设计。其中,平面、纵断面组合设计的直接成果是高速公路的空间几何形状,影响着高速公路的线形连续性、指标均衡和行车安全性,直接关系到整个工程的建设规模和工程投资^[7]。因此,本文基于平面、纵断面设计选取指标,建立高速公路线形安全性评价指标体系。

1.平面线形指标

公路平面线形设计一般需与区域地形、环境相协调,是由直线、缓和曲线和圆曲线三种线形要素组成。

(1)直线。直线是高速公路平面线形设计的最基本要素。对于高速公路而言,在不受地形条件和其他制约因素影响下,通常平面线形设计为直线,它能保证路线的方向明确、控制点间距离最短。但是,过长和过短的直线长度均会对行车安全产生不利影响。过长的直线长

度会使行车单调,放松警惕,容易引起驾驶员的视觉疲劳,遭遇紧急情况时不能妥善处理,从而导致发生事故。过短的直线长度会使驾驶员在弯道间频繁操纵,也会引起驾驶员视线错觉,容易诱发交通事故。

(2)圆曲线。圆曲线是平面线形的重要组成要素,当受地形条件或其他制约因素影响,需要改变路线前进方向时,设置圆曲线进行过渡。

(3)缓和曲线。缓和曲线是平面线形设计的三要素之一,是设置在直线与圆曲线之间以及不同半径的两同向圆曲线之间曲率连续变化的曲线^[7]。缓和曲线的长度一般随着圆曲线半径的增大而增长,在设有超高的曲线路段,缓和曲线的长度应不小于超高过渡段的长度。

2.纵面线形指标

公路纵断面线形反映了道路的起伏特点,纵断面线形指标由纵坡和竖曲线组成。

(1)纵坡

纵坡是根据道路平面线形设计,为顺适地形条件、适应周围环境所设置的纵向坡度大小。车辆行驶在纵坡坡度较大的上坡路段时,必须采用降低速度的方式以提高爬坡能力。对于长下坡路段,由于重型车辆长时间爬坡,可能发生气阻现象,甚至导致发动机熄火。

(2)竖曲线

竖曲线设置在公路纵坡变更处,通常可采用圆曲线或抛物线,以实现变坡点前后坡度的平滑过渡。

根据上述分析,本文选取了平面线形指标下的直线长度、圆曲线半径、缓和曲线长度和纵断面线形指标的坡度、坡长指标,建立高速公路线形设计对行车安全性影响的评价指标体系。

二、高速公路行车安全性评价模型

本文研究应用集值统计法基于高速公路线形设计指标对高速公路行车安全性进行评价,该方法能在一定程度上减少人的主观性带来的随机误差。

1. 模糊集值统计概述

对于某一个评价事物,假定指标集为 C ,评审专家集为 S ,对该评价事物的任一指标 $c(c \in C)$,评审专家 $s(s \in S)$ 给定一个模糊区间估计范围,则该评审因素 x 的某一指标值 $c_i(i = 1, 2, \dots, m)$ 的评审,对应评价范围记作 ξ_i ,若有 n 位专家,则第 $k(k = 1, 2, \dots, n)$ 个专家给出的评价区间记为 $[u_{i1}^k, u_{i2}^k]$,且 $[u_{i1}^k, u_{i2}^k] \in \xi_i$,则全部评价专家的估值区间形成一个统计序列 $[u_{i1}^1, u_{i2}^1], [u_{i1}^2, u_{i2}^2], [u_{i1}^3, u_{i2}^3], \dots, [u_{i1}^n, u_{i2}^n]$,该序列的叠加范围可表征为数轴上的样本落影函数,记为 $\bar{\chi}_{\xi_i}(u)$ ^[10-11]。

$$\bar{\chi}_{\xi_i}(u) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \chi_{[u_{i1}^k, u_{i2}^k]}(u) \quad (1)$$

其中,

$$\chi_{[u_{i1}^k, u_{i2}^k]}(u) = \begin{cases} 1, & u_{i1}^k \leq u \leq u_{i2}^k \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

因素集 x 的指标 c_i 的相对权重为:

$$\bar{u}_i = \frac{\int_{u_i}^{u_i'} u \bar{\chi}_{\xi_i}(u) du}{\int_{u_i}^{u_i'} \bar{\chi}_{\xi_i}(u) du} \quad (2)$$

式中: $u_i' = \min(u_{i1}^1, u_{i2}^1, u_{i1}^2, \dots, u_{i1}^n)$,

$u_i = \min(u_{i2}^1, u_{i2}^2, u_{i2}^3, \dots, u_{i2}^n)$

$(i = 1, 2, \dots, m)$

对(2)式的积分进行求解,得:

$$\bar{u}_i = \frac{\frac{1}{2} \sum_{k=1}^n [(u_{i2}^k)^2 - (u_{i1}^k)^2]}{\sum_{k=1}^n [u_{i2}^k - u_{i1}^k]} \quad (3)$$

$(i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, n)$

此外,考虑各专家的学历,从事行业的时间以及经历等,给每位专家定义了权重系数 $h_k(k = 1, 2, \dots, n)$,则各评价指标相对权重为:

$$u_i' = \frac{\frac{1}{2} \sum_{k=1}^n h_k \cdot [(u_{i2}^k)^2 - (u_{i1}^k)^2]}{\sum_{k=1}^n h_k \cdot [u_{i2}^k - u_{i1}^k]} \quad (4)$$

求得各指标的综合权重后,经过归一化处理,即为对应评价指标的综合权重:

$$u_i = \frac{u_i'}{\sum_{i=1}^m u_i'} \quad (5)$$

由于专家对某一评价指标的打分为一个判断区间,而非确切的数值,因此,应用集值统计模型处理模糊事物评价,可以减少随机误差对不确定性评价的影响。此外,集值统计能利用专家对指标的分值判断区间,不仅可以计算出评价指标权重 u_i ,还可以利用区间方差 $\bar{\chi}_{\xi_i}(u)$ 表征专家对评价指标的把握度,从而得到指标可靠程度。本文运用区间方差大小表征评价专家对某个评价指标的确定程度,定义为分歧度 g_i 。

$$g_i = \frac{\frac{1}{3} \sum_{k=1}^n [(u_{i2}^k - u_i')^3 - (u_{i1}^k - u_i')^3]}{\sum_{k=1}^n [u_{i2}^k - u_{i1}^k]} \quad (6)$$

显然,专家意见分歧度 g_i 越小,表明评审专家对指标 c_i 的确定程度越大。

2. 评价指标综合权重的确定

根据上文分析选取的平纵线形指标,构建高速公路行车安全性评价指标层次结构,如图1所示。

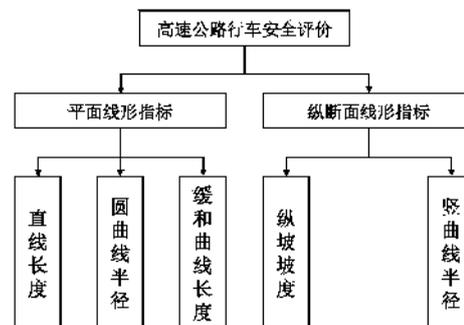


图1 高速公路行车安全性评价指标层次结构图

为保证评价结果的可靠性,邀请行业五位资深专家 $P_1、P_2、P_3、P_4、P_5$ 对各评价指标进行区间分值的判定,由于各专家在技术、经验上的不同,笔者向同行业的从业人员发放100份问卷,收回92份有效问卷,综合平均后得到各专家的权重分值为 $[0.24, 0.21, 0.20, 0.18, 0.17]$ 。

为便于专家更加准确直观地确定各个评价指标权重,设定指标判断区间为 $[0,10]$ 。区间上限表示专家对该评价指标的重要程度判定,数值越大越重要,区间长度表示专家对该指标的把握程度,长度越长,离散度越大,把握越小。

首先邀请专家对指标{平面线形指标,纵面线形指标}进行分值区间的判定,判断矩阵见表1。

表1 一级指标权值区间的判定

评价专家	专家权重	一级评价指标	
		平面线形	纵断面线形
P ₁	0.24	[6.8,7.7]	[5.2,6.0]
P ₂	0.21	[7.1,7.9]	[4.7,5.5]
P ₃	0.20	[7.3,8.0]	[4.6,5.3]
P ₄	0.18	[6.4,7.6]	[5.4,6.2]
P ₅	0.17	[7.4,8.2]	[4.4,5.3]

在确定了指标区间分值之后, 根据式(4)一式(6)求得各指标的综合权重及分歧度(表2)。

表2 各指标综合权重

评价指标	平面线形	纵断面线形
相对权重	7.386	5.273
综合权重	0.583	0.417
分歧度	0.161	0.196

根据表2计算结果表明, 在平面线形设计和纵断面线形设计之间, 专家一致认为平面线形对高速公路行车安全性影响更大, 其综合权重为0.58。根据区间方差表征的分歧度计算结果, 平面线形和纵断面线形分歧度均小于0.50, 表明指标权重赋值可靠性高, 是可信的。

计算得到一级指标下权重后, 邀请专家继续对平面线形和纵断面线形下的二级指标{直线长度、圆曲线半径、缓和曲线长度}、{纵坡坡度、竖曲线半径}进行指标分值区间的判定, 判断矩阵和权重计算结果见表3~表6。

表3 平面线形指标下二级指标权值区间的判定

评价专家	专家权重	平面线形指标		
		直线长度	圆曲线半径	缓和曲线长度
P ₁	0.24	[3.2,4.5]	[7.1,8.1]	[5.6,6.6]
P ₂	0.21	[3.6,4.7]	[7.4,8.3]	[5.3,6.2]
P ₃	0.20	[4.0,4.9]	[7.7,8.5]	[4.9,5.8]
P ₄	0.18	[4.8,5.9]	[6.9,8.0]	[5.8,6.7]
P ₅	0.17	[3.5,4.5]	[7.3,8.2]	[5.4,6.4]

表4 平面线形指标下二级指标综合权重

评价指标	直线长度	圆曲线半径	缓和曲线长度
相对权重	4.308	7.728	5.876
综合权重	0.241	0.431	0.328
分歧度	0.399	0.124	0.168

表5 纵断面线形指标下二级指标权值区间的判定

评价专家	专家权重	纵断面线形指标	
		纵坡坡度	竖曲线半径
P ₁	0.24	[5.5,6.5]	[4.6,5.7]
P ₂	0.21	[5.2,6.3]	[4.8,5.6]
P ₃	0.20	[5.8,6.7]	[4.4,5.3]
P ₄	0.18	[4.7,5.7]	[5.4,6.3]
P ₅	0.17	[5.9,6.8]	[4.2,5.2]

表6 纵断面线形指标下二级指标综合权重

评价指标	纵坡坡度	竖曲线半径
相对权重	5.895	5.141
综合权重	0.534	0.466
分歧度	0.248	0.231

根据表3~表6的计算结果, 平面线形设计和纵断面线形设计指标下的二级指标分歧度计算结果均小于0.5, 说明上述各指标的综合权重计算结果是可信的。

根据各指标综合权重的计算结果, 计算各二级指标对目标层(高速公路行车安全性评价)的综合权重, 计算结果见表7。

表7 高速公路行车安全性评价各指标综合权重

一级指标	平面设计	纵断面设计	综合权重(M _i)
二级指标	0.583	0.417	
直线长度	0.241		0.141
圆曲线半径	0.431		0.251
缓和曲线长度	0.328		0.191
纵坡坡度		0.534	0.223
竖曲线半径		0.466	0.194

根据表7综合权重计算结果, 评价指标对行车安全性的影响程度由大到小依次为: 圆曲线半径>纵坡坡度>竖曲线半径>缓和曲线长度>直线长度。

基于高速公路线形设计指标对行车安全性进行评价时, 首先根据线形设计参数, 邀请专家对各评价指标进行分值判定, 得到平均分K_i, 结合各指标的权重和平均分, 即可计算得到该高速公路行车安全性的最终评价分值, 并对高速公路的行车安全性进行判定。若高速公路行车安全性较差, 应首先对圆曲线半径和竖曲线半径进行优化。

3. 高速公路行车安全性分级

结合平面、纵断面线形设计指标的权重和指标值, 根据式(7)计算得到安全性评价分值, 即可用于评价高速公路行车的安全性。高速公路行车安全性分级表见表8。

$$S = \sum K_i \cdot u_i \quad (7)$$

表8 高速公路行车安全性评价分级

综合评价分值	(90,100]	(80,90]	(70,80]	(50,70]	≤ 50
行车安全性	十分安全	安全	基本安全	安全性差	事故多发

三、实例分析

根据本文建立的高速公路行车安全性评价模型, 选取了广西境内一条高速公路, 提取平纵线形设计指标, 并应用该模型进行行车安全性评价。

1. 工程概况

该高速公路位于广西北部区域, 沿线地形条件为典

型的山区地貌，地形起伏大。路线设计速度为100km/h，路基宽26m，双向四车道，路线全长约43km。本文选取该高速公路K30+287.841~ K39+711.248约10km路段进行行车安全性评价，该段高速公路平面线形设计指标见表9，纵断面线形设计指标见表10。

表9 广西某高速公路平面线形设计指标

交点编号	桩号	曲线要素值(m)		直线长度(m)
		圆曲线半径	缓和曲线长度	
1	2	3	4	5
JD20	K30+287.841	2000	200	1983.758
JD21	K33+131.927	1120	200	708.089
JD22	K34+592.317	1120	200	
JD23	K35+487.605	1120	200	475.581
JD24	K36+995.077	1100	200	1820.517
JD25	K39+711.248	1100	200	850.361

表10 广西某高速公路纵断面线形设计指标

序号	变坡点桩号	竖曲线参数(m)		纵坡(%)	
		凸半径	凹半径	+	-
1	K30+280	55000			
2	K33+110		36800	0.635	
3	K33+860		88000	2.500	
4	K34+570	25000		3.000	
5	K35+520		60000	1.250	
6	K37+130	40000		2.500	
7	K39+800		70000	1.000	
				2.000	

2. 指标分值判定标准

根据《公路工程技术标准》及《公路路线设计规范》^[12]，当公路设计速度为100km/h时，本文研究的高速公路平面、纵断面线形设计指标的分值判定标准见表11。其中，对于缓和曲线设计指标分值判定依据以缓和曲线长度和超高渐变段长度之差进行判定。

表11 高速公路平纵线形设计指标分值评定标准

直线长度(m)	1000~2000	600~1000	400~600	200~400	>2000或<200
评价分值	95~100	85~90	75~80	60~70	≤50
圆曲线半径(m)	>4000	2000~4000	1100~2000	700~1100	<700
评价分值	95~100	90~95	85~90	75~80	≤60
缓和曲线长度-超高渐变段长度(m)	免设超高段	>60	30~60	0~30	<0
评价分值	95~100	85~90	75~80	60~70	≤50
纵坡坡度%	0.3~1.0	1.0~2.0	2.0~3.0	3.0~4.0	>4.0
评价分值	95~100	80~85	70~75	55~65	≤55
凸型竖曲线半径(m)	>16000	12000~16000	10000~12000	8000~10000	6500~8000
评价分值	95~100	80~85	70~75	55~65	≤55
凹型竖曲线半径(m)	>10000	7000~10000	4500~7000	4000~4500	3000~4000
评价分值	95~100	80~85	70~75	55~65	≤55

3. 高速公路行车安全性评价

根据线形设计指标分值评定标准，对高速公路K30+287.841~ K39+711.248段平面6个单元和纵断面7个

单元进行分值判定，再计算平面、纵断面安全分级分数平均值，最后以平面分级分数、纵断面分级分数加权平均值作为该路段的行车安全性评价分值。

表12 广西某高速公路平面线形指标分值判定

交点编号	桩号	圆曲线半径	缓和曲线长度	直线长度
JD20	K30+287.841	90	85	95
JD21	K33+131.927	86	86	86
JD22	K34+592.317	86	86	45
JD23	K35+487.605	86	86	75
JD24	K36+995.077	85	88	96
JD25	K39+711.248	85	88	86
平均值		86.3	86.5	80.5

根据式(7)和表7~表12，可计算得该高速公路段落单元平面设计指标下行车安全性评价分值 $S = 0.251 \times 86.3$

$$+ 0.191 \times 86.5 + 0.141 \times 80.5 = 49.54。$$

表13 广西某高速公路纵断面线形指标分值判定

序号	变坡点桩号	竖曲线参数	纵坡 (%)
1	K30+280	100	86
2	K33+110	100	72
3	K33+860	100	62
4	K34+570	100	82
5	K35+520	100	72
6	K37+130	100	96
7	K39+800	100	81
平均值		100	78.7

根据式(7)和表7~表12, 可计算得该高速公路段落单元纵断面设计指标下行车安全性评价分值 $S = 0.223 \times 78.7 + 0.194 \times 100 = 36.95$ 。

根据上述分别计算得到的该高速公路平面和纵断面下行车安全性评价分值, 可计算得该高速公路行车安全性综合评价分值 $S = 49.54 + 36.95 = 86.49$ 。根据表7的安全性分级, 该段高速公路行车安全性评价结果为安全, 表明平纵线形组合好。

四、结语

高速公路平纵线形设计指标对于高速公路的行车安全性具有较大影响, 因此, 选取这些指标建立评价指标体系, 具有较大的说服力。应用集值统计法确定指标权重, 能减少人的主观因素带来的随机误差, 各指标的权重更可靠, 评价结果更接近实际。建立高速公路行车安全性评价模型, 能在设计阶段评价高速公路的行车安全性, 对于安全性较差的路段可通过优化平纵线形设计指标来提高安全性, 对提高高速公路的设计水平和行车安全性具有重要意义。

参考文献:

[1] JTG B01—2014, 公路工程技术标准[S].

[2] 中华人民共和国交通运输部. 2019年交通运输行业发展统计公报[EB/OL].

[3] 陈玲玲, 李凤, 杨家其, 汪健. 多因素影响下高速公路突发事件安全预警模型[J]. 中国安全科学学报, 2018(1): 50-55.

[4] 吴焱, 钱振邦, 王建军, 邓亚娟, 卢杨. 高速公路交通安全风险评价与敏感性分析[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2014(4): 134-141.

[5] 李波. 基于可拓理论的高速公路线形安全评价研究[J]. 公路, 2017(6): 181-185.

[6] 孟祥海, 李昕, 郑来. 基于事故数据与安全服务水平的高速公路路段安全性评价方法[J]. 交通运输工程学报, 2014(6): 83-91.

[7] 刘海强. 山区高速公路平纵线形组合设计合理性研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.

[8] 同鑫. 山区高速公路平纵组合安全性评价研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.

[9] 庞林猛. 山区高速公路线形对行车安全的影响评价研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.

[10] 罗晓芳. 基于集值统计的模糊综合评判及其应用[J]. 数学的实践与认识, 2005(9): 42-47.

[11] 汪培庄. 模糊集与模糊集落影[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1985.

[12] JTG D20—2017, 公路路线设计规范[S].

作者简介: 王其敏(1974—), 高级工程师, 硕士研究生, 主要从事公路建设、养护及交通安全研究。