

文章编号:1005-0523(2012)06-0020-06

基于主客观安全性的高速公路评价研究

周小焕¹,郭忠印¹,李志中²,王晓安²

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点试验室,上海 201804; 2. 云南省交通科学研究院,云南 昆明 650011)

摘要:根据公路线形空间几何特性,采用高速公路空间曲率指标作为客观指标,根据驾驶员 NASA-TLX 评价量表计算的主观指标,并针对道路交通安全概念的模糊性,运用聚类分析,构建了高速公路主客观安全性的方法与模型。实例表明,符合客观实际,为今后进行高速公路线形安全性评价提供参考。
关键词:高速公路;安全性评价;主客观;
中图分类号:U491.2 **文献标志码:**A

随着经济发展和社会进步,我国公路交通安全问题日益受到人们的重视。研究表明公路条件对交通事故的发生有着重要影响,公路交通事故中有 27%~30% 与公路条件相关,同时道路用户对道路环境安全性的感受也是重要因素之一,这使得公路安全性评价与改善成为中国目前公路建设与研究的一大热点。

在现有的公路安全性评价体系中,以公路线形连续性的研究为主,国外学者通过多年的研究提出了针对线形连续性的许多不同的研究模型以及定量的评定方法^[1],随着这一方面研究的日益成熟,国内也产生了较为多方面的公路线形质量评价的方式与方法,同时出台了相关的操作指南^[2]。

随着测量技术的提高,国内外学者也对道路用户主观安全性进行了相应研究,通过驾驶员的驾驶行为和生理特征,利用人体各种生物指标的测量结果来研究道路交通安全问题,但由于驾驶环境较为复杂,生理指标往往伴随着较大的随机性与离散性。此外通过专家意见法与层次分析法进行道路用户主观判断评价较为实用与准确,但由于需要相对专业的人员与程序,其应用仍受到一定的限制。而应用于主观评价的主观负荷评估技术已在海外广泛应用,但国内仍未见应用于公路安全性评价,而长期的研究表明 NASA-TLX 及 SWAT 两种量表具有较好的信度和效度^[3],同时国内学者对其在我国的适应性进行了研究,并得到了肯定的结论^[4]。

对于主客观安全性间的关系,美国的 HSM(highway safety manual)^[5]给出了这样的相互关系,见图 1,并有如下几种典型关系:

- 1) A-A':道路主观安全性降低的同时道路客客观安全性也降低。如移除交叉口照明导致夜间驾驶员安全感知降低,事故率增加。
- 2) B-B':交通网道路主观安全性降低但客客观安全性未发生改变。如通过电视节目宣传攻击性驾驶的危险性,道路用户会对攻击性驾驶员重视程度加强,从而主观安全感知降低。如果电视节目宣传

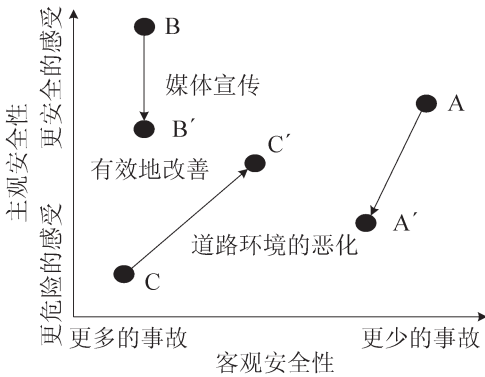


图1 HSM 中主观安全性和客观安全性相互关系
Fig.1 Relationship between the subjective and objective safety in HSM

收稿日期:2012-10-10
基金项目:交通部西部交通建设科技项目(2009318791034)
作者简介:周小焕(1985—),男,博士研究生,主要研究方向为道路交通安全工程。

并未有效减少由攻击性驾驶所引起的事故,则只表现为道路主观安全感降低而事故数不变。

3) C-C':主观安全性增大的同时客观安全性也增大。如增加左转车道等交通设施增加主观安全性,降低事故率。

而本文的目的就是提出以空间曲率为基本参数,基于道路线形特性的道路线形评价客观指标,结合采用测试过程相对简单、不易干扰测试者的NASA-TLX主观负荷评估量表体系建立道路用户主观评价指标,并尝试分析其与公路安全水平的关系,建立相应评价方式与应用。这一方式能较为准确地反映道路客观环境的安全水平,以及客观环境给道路使用者带来的主观感受,进行道路环境安全性的主客观匹配问题的检验,防止主客观安全性之间的不匹配甚至于冲突。

1 空间曲率指标

道路线形是引导和提示车辆行驶而最终达到目的地,本文将道路线形即车辆的行驶区域看作一条三维的曲线,采用数学上评价三维曲线平顺程度的空间曲率作为道路线形计算指标。曲率是一个表示曲线弯曲程度的量,一般用 k 表示,通过微分来计算空间曲线上某点的切线方向角对弧长的转动率,表明曲线偏离直线的程度,如图2。

通常采用以下的通用曲线参数方程的曲率计算公式:

$$k(t)=\frac{\left|r'(t)\times r''(t)\right|}{\left|r'(t)\right|^3}$$

(1)

式中: $r(t)=\begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{pmatrix}$; $r'(t)=\begin{pmatrix} x'(t) \\ y'(t) \\ z'(t) \end{pmatrix}$; $r''(t)=\begin{pmatrix} x''(t) \\ y''(t) \\ z''(t) \end{pmatrix}$ 。

在整个公路路线设计中,平面线形的设计是放在首位的,而任何复杂的道路线形都是按照道路工程设计规范要求,由直线段、圆曲线段和缓和曲线段通过不同的组合形成的。在道路线形的测量坐标系中的平面坐标 (x,y) 可以用一个参数方程来进行表示:

$$r(x,y)=(F_x(l),F_y(l))$$

(2)

式中: l 为桩号(里程数),m。

任何一个曲线单元都可由该曲线单元起点的曲率半径 R_o 、终点半径 R_e 及曲线单元长度 S 确定,而通过平曲线单元起点的里程值 l_o 可以计算该曲线段上的 (x,y) 。定义计算点 p 的计算里程长 $l=l_p-l_o$,曲率 k ,偏角 β ,曲线段里程长 $S=l_e-l_o$ 。缓和曲线线形设计采用回旋曲线,是由半径 R_o 变化到半径 R_e 的过渡曲线单元,而采用以回旋曲线上任一点为坐标原点的通用坐标计算公式,其曲率为线性变化,其任意一点的曲率 $k_i=1/R_i=k_o+l(k_e-k_o)/S$ 。如图3建立临时坐标系 $x'o'y'$ 后,进行缓和曲线段的计算。

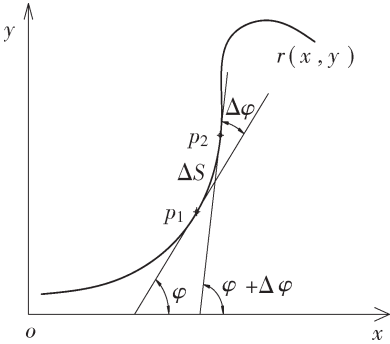


图2 平面曲线曲率示意图
Fig.2 Curvature calculation of plane curve

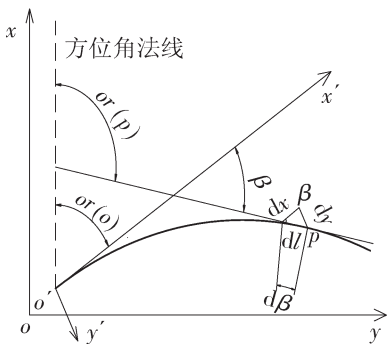


图3 平曲线坐标计算图
Fig.3 Coordinate calculation of plane curve

根据临时坐标系进行积分,得出当点 p 的计算曲线长为 l 时,该点在临时坐标系内的坐标为

$$\begin{cases} x = \int_0^l \cos \beta dl \\ y = \int_0^l \sin \beta dl \end{cases} \quad (3)$$

其中 $\beta = \int_0^l k_i dl = k_0 l + \frac{k_c - k_0}{2S} l^2$ 。而直线与圆曲线可以理解成缓和曲线的特殊形式,根据计算,缓和曲线段的计算公式适用于直线段与圆曲线段的计算。

在公路设计中,纵断面设计是其中的重要组成部分,竖曲线起着纵坡变更的过渡,保证行车平顺和有足够视距的作用。在竖曲线设计中,一般采用二次抛物线或者大半径的圆形作为竖曲线。定义点 p 的曲线长变量 $l = l_p - l_0$, 起点高程 z_0 , 坡差是该曲线变坡点前后坡度的差,在变坡点之前的是 i_1 , 过变坡点之后是 i_2 , 坡差 $\omega = i_1 - i_2$, 曲线段长 $S = l_c - l_0$ 。

在采用二次抛物线作为竖曲线的纵断面设计上,直线段连接着二次抛物线两端构成整个变坡。如图3建立临时坐标系 $x'o'y'$ 后,进行二次抛物线形的计算。

根据抛物线函数计算得到:

$$z = z_0 + \frac{\omega}{2S} l^2 + i_0 l \quad (4)$$

根据计算,该竖曲线段的计算公式适用于直线段的计算。

本次高速公路三维线形的数学模型采用 xoy 平面的投影曲线长 t (里程,即 l) 作为唯一的参数,结合前文的计算结果,并进行参数的统一,其曲线参数式方程可以表示为

$$r(t) = \left(\int_0^t \cos(k_0 t + \frac{k_c - k_0}{2S} t^2) dt, \int_0^t \sin(k_0 t + \frac{k_c - k_0}{2S} t^2) dt, z_0 + \frac{i_c - i_0}{2S} t^2 + i_0 t \right) \quad (5)$$

式中: t 为计算点到线形单元起点距离, m ; k_0 为线形单元起点的 xoy 平面曲率, m^{-1} ; k_c 为线形单元终点的 xoy 平面曲率, m^{-1} ; S 为线形单元的 xoy 平面投影曲线长, m ; z_0 为线形单元起点的竖平面坐标值, m ; i_0 为线形单元起点的竖平面斜率; i_c 为线形单元终点的竖平面斜率。

式中的线形单元起、终点应定义为按照平纵路段线形分别进行划分的路段的起、终点。利用道路曲线方程代入,根据道路新车特性进行参数修正计算公式并经过化简和空间曲率计算后^[6],根据数据采用多参数非线性回归,结合本次研究的道路线形特点等,计算得到对应不同车辆的空间曲率指标如下:

$$\text{小客车:} \quad k_a = \frac{\sqrt{di_t^2 - 134.041|i_t|k_t^2 + k_t^2}}{(1 - 134.041|i_t|)^{3/2}} \quad (6)$$

$$\text{大货车:} \quad k_d = \frac{\sqrt{di_t^2 - 250.772|i_t|k_t^2 + k_t^2}}{(1 - 250.772|i_t|)^{3/2}} \quad (7)$$

式中: di_t 为计算点 t 外的竖曲线变坡率, m^{-1} ; i_t 为计算点 t 处的竖曲坡度; k_t 为计算点 t 处的平曲线曲率, m^{-1} 。

当计算路段的空间曲率指标 $\sum k$ 时,首先对路段内断面的空间曲率值进行参数的采集,取 $10 m$ 作为断面步长,分两种车型进行空间曲率指标的计算,并根据客货比 M 进行加权求和。计算所有断面的空间曲率值,将结果除以该路段长度 l ,得到最终的路段空间曲率指标,即

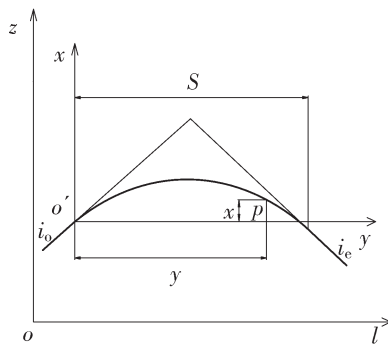


图4 竖曲线坐标计算示意图
Fig.4 Coordinate calculation of vertical curve

$$\sum k = \frac{\sum k_a \times M + \sum k_d \times (1 - M)}{l}$$

(8)

式中: $\sum k$ 为路段空间曲率指标, $\text{m}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$; k_a 为小客车空间曲率值, m^{-1} ; k_d 为小客车空间曲率值, m^{-1} ; M 为路段客货比; l 路段长度, km 。

2 NASA-TLX 负荷指标

NASA-TLX(NASA taskload index)于1988年由Hart和Staveland提出并应用于对管制员工作负荷的评估,是目前运用较为成熟的主观负荷评价测量方法^[7],它由6个评价指标构成,即脑力要求(mental demand, MD)、身体要求(physical demand, PD)、时间紧迫感(temporal demand, TD)、任务完成度(own performance, OP)、努力程度(effort, EF)和不满意度(frustration level, FR),而根据实验的不同内容,各项指标的具体内容需要调整,其具体说明参见表1。通过对6个指标的权重评价及分项打分计算得到最终的评价指标值。

实验步骤如下,首先以人工的方式向实验驾驶员进行NASA-TLX 量表中各项指标内容的详细说明,之后通过询问与交流的方式与实验者进行各项指标间的重要性比较,并进行记录。之后进行不同路段的驾驶实验,实验后以口头方式进行各项指标的评价,并休息10 min后进行重复询问,对实验结果进行核实。最终根据权重计算结果与指标评价结果进行最终的主观负荷评价指标的计算。

本次实验根据公路线形的类型特点及主要事故风险类型,将某高速公路分为20个实验路段,每个实验路段保证长度1 km以上。选取10名驾龄5年以上,年龄30~42岁之间的男性货车驾驶员,采用满载大货车进行实验。根据每个路段的评价结果进行相关性分析,剔除异常数据后进行平均值计算,得到20个路段的NASA-TLX 负荷评价结果。

3 主客观综合指标

首先对空间曲率与NASA-TLX 评价、事故率统计的相关性进行分析,表2为20个路段的事故率 I (起/百万车公里)、空间曲率和 $\sum k$ ($\text{m}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$)及NASA-TLX 评价值 T 数据,而表3为该组路段事故率及主客观指标相关性检验结果。

表2 各路段事故率及主客观指标

Tab.2 The accident rates and the subjective and objective indexes of road sections

路段编号	事故率/(起/百万车公里)	空间曲率和 $\sum k$ /($\text{m}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$)	NASA-TLX
1	0.091	0.070 4	86
2	0.181	0.113 5	84
3	0.181	0.153 7	90
⋮	⋮	⋮	⋮
18	0.181	0.129 4	100
19	0.19	0.037 0	98
20	0.263	0.094 7	94

表3 事故率及主客观指标相关性检验

Tab.3 The accident rate and the correlation between subjective and objective indexes

参数		事故率/(起/百万公里) 空间曲率和指标/(m ⁻¹ ·km ⁻¹)		NASA-TLX
事故率	Pearson 相关性	1	0.797**	0.853
	显著性(双侧)		0	0
空间曲率	Pearson 相关性	0.797	1	0.617
	显著性(双侧)	0		0.004
NASA-TLX	Pearson 相关性	0.853	0.617	1
	显著性(双侧)	0	0.004	

可以看到事故率与空间曲率指标、NASA-TLX 指标间有较强的相关性,两类指标均可以作为对道路安全性水平有效、可靠的并且敏感的指标。空间曲率指标主要从道路线形出发,考虑道路环境对车辆行驶的影响,而 NASA-TLX 则从道路用户主观出发,对道路服务水平作主观性感受评价,以驾驶负荷的形式计算。两种指标从不同角度对道路运行安全水平进行评价,并与统计事故率表现出较高的相关性,因此可以结合两种指标对事故率进行分析,通过不同形式的回归分析,得到指数形式的线形回归结果:

$$I=e^{2.881\Sigma k+0.054T-7.039}$$

(9)

式中: I 为路段统计事故率,起/百万车公里; Σk 为单位路段空间曲率和, m⁻¹·km⁻¹; T 为 NASA-TLX 指数平均值。该回归模型的相关检验结果如表 4。

表4 相关系数

Tab.4 The correlation coefficient

回归系数 R	回归系数 R 方	调整 R 方	标准估计的误差
0.891	0.795	0.771	0.286 39

4 运用

对云南较为典型的山区高速公路进行安全评价,采用整合主客观综合评价指标,并利用云理论进行各安全水平的最终评定。在道路安全评价中,将道路交通安全水平分为优、良、中、差 4 个安全水平,由此产生 4 个水平概念^[8],各概念描述见表 5。

利用杨宇等^[9]采用 K-均值聚类法对国内高速公路事故率进行安全性云数字特征的计算分析结果,进行隶属云函数的计算,结果如表 6。

表5 道路安全水平概念描述

Tab.5 The concept description of road safety level

道路安全水平	定性描述
优	很好,维持现有水平即可
良	较好,现有基础上可考虑采取一定措施
中	一般,需采取措施进一步提高
差	较差,急需采取措施

表6 道路安全水平等级聚类中心值

Tab.6 The cluster center value of road safety level

道路安全水平等级	优	良	中	差
聚类中心值/(起/百万车公里)	0.26	0.76	1.45	2.33

以某路段(长 1 km)为例,应用主客观综合指标对某路段进行评价,首先进行该路段的空间曲率及 NASA-TLX 指标的计算,采用 5 名驾驶员进行 NASA-TLX 测试,进行不同预测值在不同等级水平下的平均隶属度计算,计算结果见表 7。

表7 某路段预测事故率及安全等级隶属度

Tab.7 The subjective and objective indexes and predicted accident rate of a road section						
空间曲率指标 $\sum k/(m^{-1}\cdot km^{-1})$	NASA-TLX 指标 T	预测事故率 $I/$ (起/百万车公里)	安全等级隶属度			
			优	良	中	差
0.183 7	90	0.176	1	0	0	0
	94	0.158	1	0	0	0
	108	0.074	1	0	0	0
	98	0.271	0.92	0.08	0	0
	93	0.207	1	0	0	0

评价结果可以用于进行路段对应不同的安全等级隶属度的计算,并且用于分析未来公路的安全性特性,判断路段是否需要在主观/客观方面进行安全性的提升。对于本路段,其安全等级较高,隶属于等级优的隶属度超过0.96,目前尚不需要进行改善。而当预测结果较不理想时,则应从主观指标与客观指标独立进行分析与比较,最终得到是否需要进行道路线形环境的调整(公路客观指标)还是道路相关交通设施方面的调整(公路主观指标)的决策。

6 总结

从公路安全性的客观方面与主观方面出发,选取了较为代表性的道路线形空间曲率和TLX 负荷评估,利用两个指标与事故率的潜在关系进行分析,通过评价模型的实例分析,可以看到该方法较以往的评价方法具有以下特点:

- 1) 评价方法具有推广性,可以进一步应用到多类评价指标的组合。
- 2) 评价结果更具分析价值,采用主观与客观的双重比较可以对道路环境的安全性情况有更为客观的描述,分析其工程设施改善的必要性。随着研究的深入,该概念与方法在道路安全评价领域将会有广阔的应用前景。

参考文献:

[1] HAYWARD J, LAMM R, LYNG A. Survey of current geometric and pavement design practices in europe[M]. Washington: International Road Federation, 1985:174-186.

[2] 中华人民共和国交通部. JTG B05-2004 公路项目安全性评价指南[S], 广州:广州出版社, 2004.

[3] SUSAN G H, HELENE P I. Comparison of four subjective workload rating scales[J]. Hum Factors, 1992, 34(4):429-439.

[4] 肖元梅, 王治明, 王绵珍, 等. 主观负荷评估技术和NASA任务负荷指数量表的信度与效度评价[J]. 中华劳动卫生职业病杂志, 2005, 23(3):178-181.

[5] LANY L, SUSAN MARTINOVICH. Highway safety manual[M]. Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2010:33-35.

[6] 林声, 郭忠印, 周小焕, 等. 公路线形空间几何特性模型及其应用[J]. 中国公路学报, 2010, 23(S2):102-108.

[7] 孙向红, 杨帆. 车辆驾驶心理负荷测量工具的测评与发展:一个现场研究的尝试[J]. 人类工效学, 2008, 14(3):27-31.

[8] 查伟雄, 李敏, 付印平. 高速公路交通事故类平均系统聚类法实证分析[J]. 华东交通大学学报, 2010, 27(6):113-118.

[9] 杨宇, 周小焕, 宋淑丽. 云理论在高速公路安全评价中的应用[J]. 交通信息与安全, 2011, 29(2):92-99.

(下转第 29 页)

[14] 蔡华. 几类非连通图的优美性[D]. 吉林: 吉林大学, 2007: 4.
[15] 张家娟, 郭珠霞, 周向前, 等. 优美图的一些性质[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(13): 197-201.

Researches on the Gracefulness of Unconnected Graph $C_{2n+1} \cup G_{n-1}$

Wu Yuesheng, Wang Guangfu, Xu baogen

(School of Basic Science, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The present paper proves if $n \geq 2$ then unconnected graph $C_{2n+1} \cup G_{n-1}$ is a graceful graph, where C_{2n+1} is $(2n+1)$ -vertex cycle; and G_{n-1} is a graceful graph with $n-1$ edges.

Key words: graceful graph; unconnected graph; cycle

(上接第 25 页)

An Evaluation Study on Expressways Based on Subjective and Objective Safety

Zhou Xiaohuan¹, Guo Zhongyin¹, Li Zhizhong², Wang Xiaolan²

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China;
2. Yunnan Communications Science Research Institute, Kunming 650011, China)

Abstract: According to the road alignment spacial geometric properties, this paper firstly adopts spatial curvature of expressways as objective index, and integrates the NASA-TLX scale of drivers as subjective index. Then the model of the subjective and objective safety is constructed according to the fuzziness of road safety and with the application of clustering method. The case study shows that the model corresponds with the reality, which can be applied to the expressway linear evaluation for future reference.

Key words: expressway; road safety evaluation; subjectivity and objectivity