

文章编号:1005-0523(2015)05-0027-08

国省干线公路出入口管理系统性安全评价

卢为杰,陆 键,陆林军,蒋愚明

(上海交通大学交通研究中心,船舶海洋与建筑工程学院,上海 200240)

摘要:干线公路出入口安全影响因素众多,除去人为、天气等偶发性因素,道路条件对交通安全的影响非常重要。基于国道 G205 江苏段出入口安全评价项目的长期调研,对出入口安全影响因素进行潜聚类分析筛选出关键指标,建立干线公路出入口安全宏观-中观-微观评价指标体系。在此基础上利用 G205 江苏段 2008 年到 2011 年交通事故统计数据构建结构平衡方程 (SEM)模型。SEM 模型内因和外因之间通过安全性指数 (SPI)进行关联,统计验证显示安全评价模型的优度拟合值 (CFI)达到 0.967。干线公路出入口安全 SEM 建模能较好揭示各层次变量对出入口安全的影响,对于把握出入口管理重点,提出合理的改善策略具有显著社会经济价值,也为出入口安全研究提供了一个新视角。

关键词:干线公路;出入口安全评价;影响因素;聚类分析;SEM 建模

中图分类号:U491.31

文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2015.05.006

建设安全和高效的干线公路出入口服务水平是交通研究者追求的共同目标,统计分析得到发生在国省干线公路出入口的交通事故占道路交通事故总数的 47%,其中又有 52%的事故是具有致命损伤事故,远高于一般公路 19%的事故死亡率^[1]。干线公路出入口安全性评价是衡量道路安全运行状况的基础,国内外在交叉口交通安全评价方法可以归结为两大类:一类是基于交通事故的评价方法,另一类是交叉口安全综合评价法。基于交通事故安全的研究集中在事故率^[2-3]、事故严重程度^[4-6]以及事故成因^[7]分析。交通事故评价方法是一种直接的评价手段,是评价出入口安全水平的重要参考。由于道路交通事故的偶发性影响该评价法的准确性,且由于事故发生在公路验收通车之后,未能发挥在道路前期的出入口安全设计阶段应有的评价作用。交叉口安全综合评价法则从影响出入口安全的因素出发对安全水平进行客观评价,该方法是一种间接的安全评估方法,不依赖道路事故数据,因具有较高准确性和时效性得到广泛应用。出入口安全影响因素众多,陆键等^[8]通过不同类型交叉口内在冲突点的数目、交通流量状况、交叉口几何特征、交通安全设施状况等主次因素评价交叉口的安全,构建了基于车辆冲突点潜在危险度的出入口安全模型。王雪松等^[9]认为在建立道路出入口安全评价时需要考虑出入口之间的空间相关性,空间相关性由出入口间距决定,随着间隔的增加,彼此的关联系数降低。郭忠印等^[10]分析了不同地域环境下影响出入口安全的因素,指出干线公路在出入口位置的线型设计和车速限制是保障出入口安全的重要手段。针对不同的地域环境和几何线形特征,可以考虑采取可变限速的交通管理方式。刘兆惠等^[11]运用灰色定权聚类-层次分析法相融合的综合方法进行道路安全评价,包含了“安全设施、道路线形、路面状况、沿线交通环境”4 个评价目标,在评价指标权重获取上,采用专家打分法等主观评价方法获得。

现有的出入口安全综合评价方法多基于交叉口层面,未能满足全面系统地评价干线公路出入口安全水

收稿日期:2014-12-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51078232/E0807);上海交通大学海洋工程国家实验室项目(GKZD010027)

作者简介:卢为杰(1985—),男,博士研究生,研究方向为交通安全和设计;陆键(1957—),男,教授,博士生导师,教育部“长江学者”特聘教授,中央“千人计划”入选教授,研究方向为交通安全和设计等。

平的需求。本研究充分利用“G205 国道江苏段出入口安全评价”项目长期调研获得基础数据,利用潜聚类方法进行出入口安全影响因素类别划分,划分为 3 个层次,分别为宏观-中观-微观层面。结构方程模型(SEM)在道路安全领域应用逐渐增多^[12-13],为量化干线公路出入口安全影响因素之间的内在关联,首次将结构方程模型(SEM)应用到干线公路的出入口安全的评价上。SEM 融合了多变量统计分析技术如因素分析、回归分析等方法,与传统的回归分析方法相比,SEM 模型可同时处理多个变量的因子结构和因子关系并且容许自变量和因变量含测量误差。利用 SEM 方法分析影响出入口安全的内生变量和外生变量之间关系,建模得到量化的出入口安全指数和评价指标权重,能较好地克服专家打分法客观性不足的问题,为道路安全的研究提供了新的视角和经济手段。

1 研究方法

1.1 模糊聚类分析方法

在出入口安全影响因素分析中,各种因素对安全的影响程度彼此界限并不明显,具有一定的模糊性;因此运用模糊数学处理这类样本是合理的。以出入口安全影响因子层面作为论域,根据问卷调查结果,在每个影响因素中,选择“重要程度”各等级的问卷数分别累加,得到每个影响因素各等级重要程度的原始评分矩阵。聚类分析 K-mean^[14]算法基本思路为:假设共有 N 个数据点需要分为 K 个类别,K-means 标法使 n 个向量 $x_i (i=1,2,\dots,n)$ 的簇内方差和达到最小,其目标函数为: $J(u,v)=\sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c u_{ik} ||x_k-v_i||$, 其中 $\sum_{i=1}^c u_{ik}=1, u_{ik} \in \{0,1\}$ 。

1.2 结构方程理论

结构方程模型中有两个基本的模型:测量模型与结构模型^[15]。测量模型主要由两部分构成,分别为外生变量(公式 1)和内生变量(公式 2),对于潜变量间(出入口交通安全性与出入口设计安全性)的关系,可以写成以下方程结构(公式 3)。模型表达式如下:

$$x=A_x\xi+\delta; \quad (1)$$

$$y=A_y\eta+\varepsilon; \quad (2)$$

$$\eta=B\eta+\Gamma^{-1}\xi+\zeta。 \quad (3)$$

式中: x 为外生指标组成的向量; y 为内生指标组成的向量; A_x 为外生指标与外生潜变量的关系矩阵; A_y 为内生指标与内生潜变量的关系矩阵; δ, ε 为指标误差项; η 为内生潜变量; ξ 为外生潜变量; B 为内生潜变量的关系; Γ^{-1} 为外生潜变量对内生潜变量的影响; ζ 为方程残差项。

2 评价指标体系与建模

2.1 安全评价层次分析

在聚类分析中,增加集群的数量会降低 BIC(贝叶斯信息准则)、AIC(赤池信息准则)及 CAIC(一致赤池信息准则)的值,在统计上具有更高拟合性,但更高的集群数量也暗含更高的复杂度,导致集群结构不明显。当层级为 3 时结构的熵值达到 0.942,兼顾了拟合性和结构层级要求,因此我们选用 3 层结构分别定义为宏观,中观,微观方面。为分析各种影响因素对出入口安全的重要程度,以典型干线公路 G205 江苏段出入口特征为研究对象进行影响因素主从排序和重要程度评价。在道路沿线路政管理部门人员进行的问卷调查表中,每个影响因素的重要程度设计了“不重要、重要、很重要”3 个等级。经过综合评定,指标“不重要”的权重为 0.167,“重要”的权重为 0.333,“很重要”权重为 0.5。将评分加权平均,得到标准评分矩阵。利用 SPSS 统计软件进行聚类分析,得到 3 个层次的聚类,通过冰柱图展现,以微观分类从冰柱图(图 1)分析为例,当分成 3 类时,其聚类过程可以描述为:2 和 7 聚为一类,再与 6 聚为一类,再依次与 3,4,5 聚类,其中第 4 因素的相关性最低,在评价体系建立时考虑去除,最后建立的指标体系见表 1。

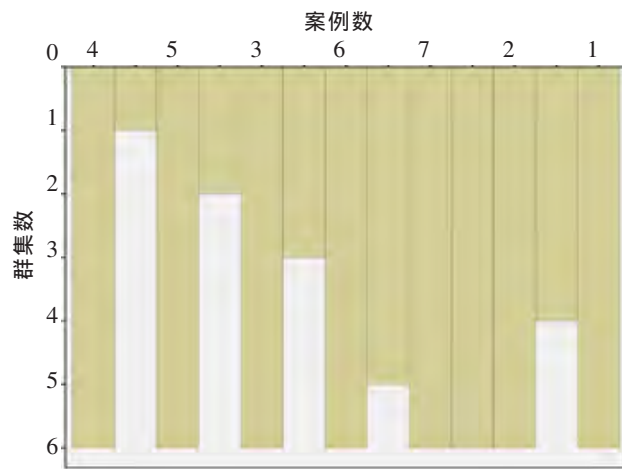


图 1 微观分类结果冰柱图

Fig.1 Icicle of microscopic ciassification results

表 1 道路影响因素聚类分析结果

Tab.1 Clustering analysis result of highway influencing factors

类别	因素	总分	聚类结果	
			层次	影响程度
宏观因素	(4) 道路环境	0.43	第 1 层次	很强
	(2) 接入道路技术等级连续性分析	0.42	第 2 层次	强
	(3) 接入土地利用类型	0.39	第 3 层次	一般
	(1) 接入道路功能等级连续性	0.36		
中观因素	(5) 接入密度	0.45	第 1 层次	很强
	(2) 道路功能区接入	0.44	第 2 层次	强
	(1) 接入道路类型	0.41	第 3 层次	一般
	(4) 接入间距	0.40		
微观因素	(5) 交叉口渠化设计	0.46	第 1 层次	很强
	(6) 信号控制	0.44	第 2 层次	强
	(7) 标志标线设计	0.43	第 3 层次	一般
	(2) 出入口视距	0.43		
	(3) 冲突点数	0.42	第 4 层次	较弱

2.2 道路事故数据处理

依托江苏省干线公路安全保障技术项目,统计分析了 G205 江苏段(2007—2011 年)出入口发生的事故类型及成因,包含事故发生的道路环境、事故的严重程度、接入道路等级、事故路段出入口间距、土地利用等信息,还包含出入口冲突点数、交叉口渠化、交叉口标志标线等内容。将发生在出入口上下游 30 m 范围的事故都纳入统计范围,利用获取的事故类型作为相关性分析的依据。按照表 2 和表 3 对事故出入口因素及安全表现进行量化。

表 2 外生变量定义
Tab.2 Exogenous variable definition

	外显变量	描述
宏观影响因素变量	X_1 道路环境	沿线农村区段 $X_1=1$ 沿线集镇 $X_1=2$ 途径城市 $X_1=3$
	X_2 接入道路技术等级连续性	1 级比例 $X_2=1$ 2 级比例 $X_2=2$ 3 级比例 $X_2=3$ 4 级比例 $X_2=4$
	X_3 土地利用(建筑环境)	农田 $X_3=1$ 工厂 $X_3=2$ 住宅 $X_3=3$ 学校机关单位 $X_3=4$ 停车场、加油站等附属设施 $X_3=5$
	X_4 接入道路功能等级	高速公路(匝道接入) $X_4=1$ 国省干道 $X_4=2$ 县乡道路 $X_4=3$ 村道接入 $X_4=4$
中观影响因素变量	X_5 接入密度	1~3 条/km $X_5=1$ 3~5 条/km $X_5=2$ 大于 5 条/km $X_5=3$
	X_6 功能区接入	功能区内接入 $X_6=1$ 功能区正常 $X_6=2$
	X_7 接入类型	高架 $X_7=0$ 十字 $X_7=1$ T 型 $X_7=2$ Y 型 $X_7=3$ 中分带开口 $X_7=4$ 异形(X 型开口) $X_7=5$
	X_8 接入间距	大于 800 m $X_8=0$, 500~800 m $X_8=1$ 小于 500 m $X_8=2$
微观影响因素变量	X_9 交叉口渠化设计	专用左转设计 $X_9=0$ 无专用左转车道 $X_9=1$
	X_{10} 信号交叉口安全影响	交叉口设置信号灯 $X_{10}=0$ 满足要求而未设置 $X_{10}=1$
	X_{11} 标志标线设计	停车让行、减速让行标志 $X_{11}=0$ 无标志标线 $X_{11}=1$
	X_{12} 出入口视距	视距良好 $X_{12}=0$ 植物建筑遮挡 $X_{12}=1$
	X_{13} 交叉口冲突点数	0~10 $X_{13}=1$ 10~20 $X_{13}=2$ 20~30 $X_{13}=3$, 30~40 $X_{13}=4$

2.3 SEM 建模

利用 G205 事故安全分析报告获得出入口事故的道路发生统计资料,进一步获得的统计向量 $(X_1, X_2, \dots, X_{13}, Y_1, Y_2, Y_3)$ 形成原始数据矩阵。构造结构方程模型并将得到的变量方差矩阵与结构模型输入AMOS 结构方程模型软件,得到图 2 所示的路径关系图,路径图中 $a_1, a_2, \dots, a_{13}$ 为显性变量。基于 SEM 分析结果得到出入口模型测量公式见表 4。

表 3 内生模型变量描述

Tab.3 Endogenous variable model description

内生变量	描述
Y_1 受伤总人数	一起事故平均受伤人数
Y_2 死亡总人数	一起事故平均死亡人数、 严重等级 0(轻微事故)
Y_3 事故严重性	严重等级 1(一般事故)
	严重等级 2(重大事故)
	严重等级 3(特重大事故)

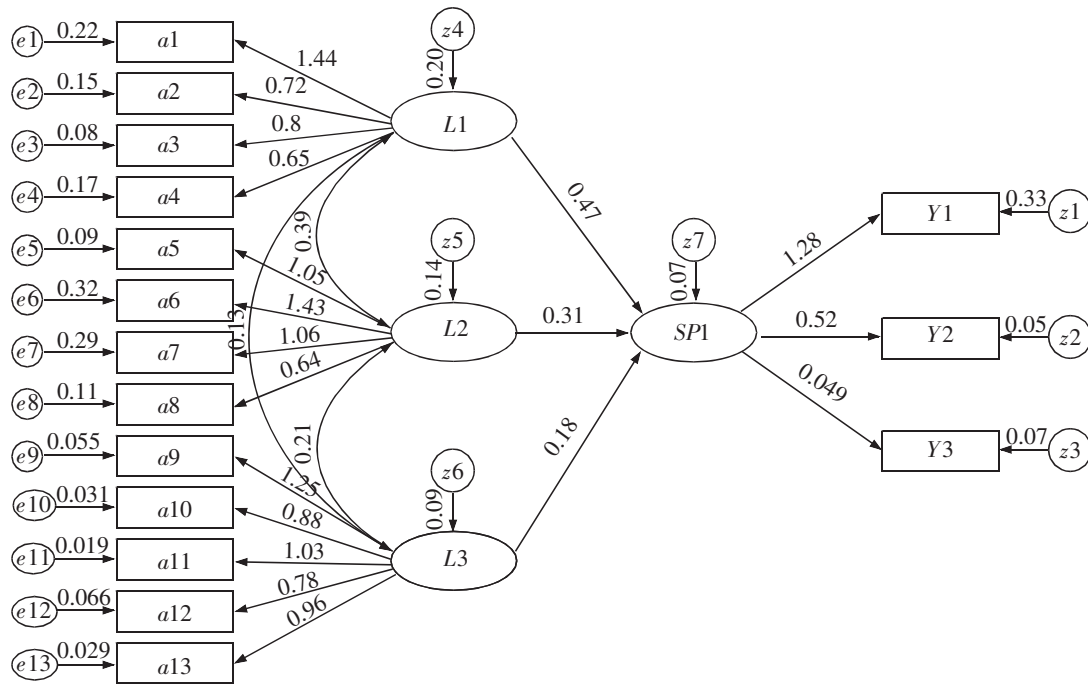


图 2 宏观-中观-微观变量与道路安全事故的影响结构模型

Fig.2 Roacl safety structure equation modeling based on SEM luodel

3 模型的统计学验证和现实解释

3.1 统计学验证分析

SEM 作为验证性分析的一种方法,在参数估计后必须对模型的合理性进行评价以评价模型的拟合效果。Marsh 等将模型检验拟合指数分为 3 大类:绝对指数、相对指数和简约指数^[12]。模型的拟合程度通常会考虑绝对指数 χ^2 统计量,但对于本例中样本量较大($N=3245$),卡方拟合容易拒绝拟合较好的模型函数,采用相对指数参数来表征拟合度。表 5 为 SEM 模型拟合优度指数输出结果,拟合优度(CFI)结果显示,“卡方 χ^2 /自由度”的统计值在 3 周围,是一个可以接受的统计结果;比较拟合指数(CFI)=0.967,大于 0.9 接近 1,说明 SEM 模型可很好地拟合变量的相关性,也就是说建立的评价体系能较好拟合道路实际安全状况。渐进残差均和平方根 RMSEA=0.046<0.08,90%的置信区间在 0.052:0.054,全部置信区间在位于临界值 0.05 左右,显示该模型在统计学上是重要的且拟合性好,模型可被接受。

表 4 干线公路出入口安全模型测量方程安全事故的影响结构模型
Tab.4 Arterial access safety measurement equations

	方程	误差	R^2 值
结构模型	出入口安全性指数 (SPI)=0.48 L_1 +0.32 L_2 +0.18 L_3	0.020	0.005
外生测试模型	道路环境=1.44 L_1	0.220	0.028
	技术等级连续性=0.72 L_1	0.150	0.055
	土地利用=0.80 L_1	0.080	0.031
	功能等级连续性=0.65 L_1	0.170	0.090
	接入密度=1.05 L_2	0.090	0.019
	接入间距=1.43 L_2	0.320	0.055
	出入口功能区接入=1.06 L_2	0.290	0.550
	接入道路类型=0.64 L_2	0.110	0.260
	出入口渠化设计=1.26 L_3	0.055	0.370
	信号控制=0.88 L_3	0.031	0.290
	出入口视距=1.03 L_3	0.019	0.110
	标志标线设计=0.78 L_3	0.066	0.176
	冲突点数=0.96 L_3	0.029	0.150

表 5 SEM 模型拟合优度指数输出结果
Tab.5 GFI output of SEM

拟合指标	指标值
卡方检验 χ^2	313.82
比较拟合指数(CFI)	0.967
简洁度指标(PGFI)	0.623
卡方/自由度(AGFI)	3.048
均方根残差(RMSEA)	0.046

3.2 SEM 现实解释

通过 SEM 建模,得到干线公路出入口安全水平与各变量的量化关系(见图 2),干线公路出入口的安全性指数 SPI 值越高,道路安全性降低。研究结果验证了推荐的安全评价体系的合理性,显示公路出入口的安全性以较低的事故严重程度即每一起冲突事故中更少的伤害、死亡和损毁车辆为特征。SEM 模型路径系数标准化后可以得到宏观-中观-微观影响因素分别对出入口安全性指数的影响权重。宏观影响因素对安全性指数的贡献程度或是对安全性指数的综合作用均达到 0.47,中观影响因素对安全性指数的贡献程度达到 0.31,微观影响因素对安全性指数的贡献程度达到 0.18,因而通过增强宏观水平的出入口管理对于减少与出

入口相关的事故率,提高公路出入口安全水平具有显著社会经济价值。

进而分析 SEM 模型各个层面的现实意义,从宏观影响因子来说,在整个公式的正值系数表明,增加任何变量会对安全产生不利影响。道路环境因素中集镇区域是事故安全多发地段,该道路环境对主路交通干扰较大。土地利用形式中如学校、居民区等对安全影响较为显著。低等级道路如村道乡道的大量接入导致干线公路事故率居高不下,需要从合理的交通流导入控制和设计减少事故发生。中观影响因子说明合理的接入密度是出入口安全的重要保障,对于交叉口功能区设置的出入口应与等级交叉口保持合理距离。微观影响因子中的变量增加也会对安全产生不利影响,微观层次路径系数能很好解释现有的研究结果,例如许多研究已经发现改善出入口的视距和渠化设计能有效降低车辆在出入口的冲突,此外改造异形交叉口如(Y型,X型等交叉口)也是减少恶性冲突点的重要方法。

4 结论与展望

分析了影响出入口安全的诸多因素,对这些因素进行系统的整理形成安全评价的方法是非常有意义的。根据聚类分析方法,对变量进行筛选,剔除影响因素较小的变量,建立包含 13 个出入口安全变量因素的宏观-中观-微观 3 层评价体系并将该方法应用到出入口安全的分析中。G205 江苏段 2008 年到 2011 年 3 495 个出入口的安全事故统计提供了最佳样本。采用 SPSS 进行变量聚类分析,SEM 模型的求解则采用 AMOS 软件。SEM 优度拟合结果显示该方法具有较好的拟合性,变量的残差值较小,显示建立的评价体系和选择的评价指标能较好地解释出入口安全影响因素与道路安全事故的关系。

基于 SEM 建模可以较好地应用于干线公路出入口管理实践,得出的结论可以用于指导干线公路出入口管理的重点层次,各个影响因素的权重值有助于分析安全措施的优先顺序,对于指导出入口规划建设及改造有社会经济价值。未来出入口安全评价体系研究将更多研究基于整个路网的安全性评价,尽管建立起更加普遍适用的安全评价方法有难度,但是本文所建立的评价体系和建模机理为道路安全研究提供了新的分析视角。

参考文献:

- [1] 交通运输部综合规划司.《2014 年交通运输行业发展统计公报》[EB/OL].[2015-06-18]. <http://www.moc.gov.cn/zfxxgk/bnssj/zhghs/201504/t20150430-1810598.html>.
- [2] XIE K, WANG X. Corridor-level signalized intersection safety analysis in Shanghai, China using Bayesian hierarchical models[J]. Accident Analysis and Prevention, 2013(50):25-33.
- [3] DISSANAYAKE S, LU J J. Factors influential in making an injury severity difference to older drivers involved in fixed object-passenger car crashes[J]. Accident Analysis and Prevention, 2002(34):609-618.
- [4] WANG Z. Exploring the impact of access designs on crash injury severity on multilane highways [J]. Traffic Injury Prevention, 2014(15):102-109.
- [5] WU K, DONNELL E, HIMES S, et al. Exploring the association between traffic safety and geometric design consistency based on vehicle speed metrics [J]. Journal of Transport Engineering, 2013, 139(7):738-748.
- [6] XIE Y, ZHANG Y, LIANG F. Crash injury severity analysis using a bayesian ordered probit models [J]. Journal of Transport Engineering, 2009, 26(2):216-237.
- [7] VERSTER J C, ROTH T. Standard operation procedures for conducting the on-the-road driving test and measurement of the standard deviation of lateral position (SDLP) [J]. International Journal of General Medicine, 2011, 18(4):359-371.
- [8] 陆键, 张国强. 公路平面交叉口交通安全设计理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009:54-65.

- [9] 王雪松.考虑空间相关性的信控交叉口安全分析[J]. 同济大学学报:自然科学版,2012,40(12):1814-1820.
- [10] 熊鑫,郭忠印.山区高速公路立交出口匝道区域可变限速研究[J]. 华东交通大学学报,2014,31(2):20-25.
- [11] 刘兆惠.高等级公路交通安全综合评价及多元事故预测模型研究[D]. 吉林:吉林大学,2007:132-142.
- [12] GOLOB T F. Structural Equation Modeling for Travel Behavior Research [J].Transportation Research Part B:Methodological, 2003,37(1):1-25.
- [13] JUSTIN P SCHORR,SAMER H HAMDAR. Safety propensity index for signalized and unsignalized intersections: Exploration and assessment [J].Accident Analysis and Prevention,2014(25):93-105.
- [14] 高新波. 模糊聚类分析及其应用[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2004:118-136.
- [15] 侯杰泰,温忠麟. 结构方程模型及其应用[M]. 北京:教育科学出版社,2004:223-265.

Highway Access Safety Evaluation from Macro-Medium-Micro Point of View

Lu Weijie, Lu Jian, Lu Linjun, Jiang Yu Ming

(Transportation Research Center, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: There are numerous factors affecting highway access safety, among which the factor of access safety propensity is quite important in addition to the accidental reasons of human and weather. Through the long-term researches into the safety evaluation projects of national highway G205 at Jiangsu section, by way of latent clustering analysis to screen out key indicators, this paper firstly tries to establish the macro-medium-micro evaluation index system for highway access safety. Then it sets up the structural equation model (SEM) of highway access safety based on the traffic accident data of national highway G205 at Jiangsu section from 2008 to 2011. Internal and external factors of SEM model are connected through the security index (SPI). Statistical validation finds out that fitting value (CFI) of the safety evaluation model reaches 0.967. The proposed SEM modeling shows effects of variables at all levels on arterial access safety and promotes the focus of entrance management, which provides significant social and economic value for the reasonable improvement strategies and new perspectives on access safety.

Key words: highway; access safety evaluation; influencing factor; clustering analysis; structural equation model (SEM)

(责任编辑 刘棉玲)