

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2014.08.023

基于线形指标的山岭重丘区高速公路事故预测模型

孟祥海, 侯芹忠, 史永义

(哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要: 依据我国山岭重丘区高速公路几何线形和交通事故数据, 建立了基于交通流量和几何线形指标的高速公路基本路段事故预测模型。首先, 基于几何线形条件对基本路段进行了划分, 确定了路段单元。其次, 分析并确定了理想线形条件的范围, 建立了理想线形条件下的基本事故率预测模型。再次, 应用BP神经网络与敏感性分析相结合的方法, 确定出了对事故发生有突出影响的道路纵坡、平曲线半径和直线段长度3个线形指标, 并确定了上述线形指标的事故发生率修正系数。依据基本事故率预测模型及事故率修正系数即可进行事故预测。模型验证结果表明: 该模型能够对路段单元进行事故预测, 事故总体预测值与实际值的相对误差在 $-5.85\% \sim -7.87\%$ 之间。

关键词: 交通工程; 事故预测模型; 回归分析; 高速公路; 线形指标

中图分类号: U491.31

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2014)08-0138-06

An Accident Prediction Model for Expressway in Mountainous Hilly Area Based on Alignment Indexes

MENG Xiang-hai, HOU Qin-zhong, SHI Yong-yi

(School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang 150090, China)

Abstract: According to the geometric alignment and accident data of expressway in mountainous and hilly areas in China, the accident prediction model connected with traffic volume and geometric alignment indexes for expressway segments is established. First, the express segment is divided based on geometric alignment conditions and a series of subsections are obtained. Then, the ideal alignment conditions are analysed and defined, and the accident rate prediction models with base conditions are determined. Afterwards, 3 alignment indexes which have significant impact on occurrence of accident, including longitudinal gradient, radius of horizontal curve and length of tangent, are determined by BP neural network and sensitivity analysis method, and the corresponding modification factors of the 3 alignment indexes are determined. The accident can be predicted according to the prediction model and modification factors of accident rate. The result of model validation shows that the model can be used to predict accident on expressway subsections, and the relative error between predicted value and actual value is between -5.85% and -7.87% .

Key words: traffic engineering; accident prediction model; regression analysis; expressway; alignment index

0 引言

山岭重丘区高速公路复杂的几何线形条件往往是诱导交通事故的重要原因之一^[1]。分析高速公路几何线形指标与事故率的关系^[2-4], 据此建立事故

预测模型, 对评价交通安全状况及对线形指标优化均具有重要意义。

美国联邦公路局开发的交互式道路安全设计模型(IHSDM)是目前该研究方向最成功的模型之一, 得到了国内外学者的广泛关注, 纷纷开展了该模型

收稿日期: 2013-05-06

科研项目: 广东省交通运输厅科技项目(2012-2013)

作者简介: 孟祥海(1969-), 男, 黑龙江海伦人, 教授, 博士生导师, 博士。(mengxianghai100@126.com)

在各自国家适用性的验证以及结合本国数据进行修正等研究工作^[5-7]。大量研究结果表明, 该模型中事故预测模型具有非常好的建模思想, 但由于不同国家道路线形标准差异较大, 用该模型得到的预测结果有时会出现较大偏差, 因此, 结合本国实际道路和交通条件对该模型进行修正是十分必要的^[8-10]。

本文借鉴 IHSDM (V8.0.0) 中高速公路事故预测模型的建模思想, 基于我国道路交通和事故数据, 通过引入平纵线形指标修正系数, 建立适用于我国山岭区和重丘区高速公路的事故预测模型。

1 模型结构

本文拟建的事故预测模型形式是:

$$N_i = N_{Bi} \cdot \prod_{j=1}^m \beta_j, \tag{1}$$

式中, N_i 为路段单元 i 上的预测事故率, 即年均单位里程上的总事故数 (包括有人员伤亡事故和仅财产损失事故), 单位为次 $\cdot (\text{km} \cdot \text{a})^{-1}$; N_{Bi} 为路段单元 i 上预测出的基本事故率, 即几何线形处于理想条件下仅受公路交通量影响的事故率, 单位为次 $\cdot (\text{km} \cdot \text{a})^{-1}$; β_j 为第 j 类线形指标对基本事故率的修正系数。

建模过程由以下 5 个步骤组成: (1) 数据组织; (2) 变量选择; (3) 基本事故率预测模型的建立; (4) 基本事故率修正系数的确定; (5) 模型验证。

2 数据来源与路段单元划分

2.1 数据来源

事故和公路几何线形数据均来源于广东省京珠高速公路粤北段和粤赣高速公路, 前者为典型的山区高速公路, 后者为典型的重丘区高速公路。京珠高速公路总长 109.29 km, 双向 4 车道, 设计速度 80 km/h。粤赣高速公路总长 136.103 km, 双向 4 车道, 设计速度 100 km/h。共收集到上述 2 条高速公路上的 3 485 起事故资料 (包括有人员伤亡事故和仅财产损失事故), 其中京珠高速公路 1 796 起 (2006 年 1 月至 2009 年 6 月), 粤赣高速公路 1 689 起 (2007 年 1 月至 2012 年 7 月)。上述高速公路的几何线形指标和事故汇总见表 1。

2.2 基于几何线形的路段单元划分

由于本文拟建立的事故预测模型是针对高速公路基本路段的, 因此, 首先应剔除互通式立体交叉、服务区、收费站等处的路段及其相应的事故数据。

在此基础上, 将基本路段按行车方向划分至几何线形上不可再分的路段单元。这些路段单元的几何线形条件及其上年平均发生的事故数量就是本文后续研究的样本数据。路段划分原理见图 1。京珠高速公路粤北段共划分出 956 个路段单元 (见图 2), 粤赣高速公路共划分出 725 个路段单元 (具体路段划分情况略)。

表 1 几何线形指标和交通事故汇总表
Tab. 1 Summary of geometric alignment indexes and accidents

高速公路名称	京珠高速公路	粤赣高速公路
直线段长度 (最大值/最小值)/m	2 740/145	2 122/200
平曲线长度 (最大值/最小值)/m	2 167/210	4 164/354
平曲线最小半径/m	500	775
几何 平曲线偏角 (最大值/最小值)/(°)	100.68/8.05	70.15/7.12
线形 最大纵坡/%	5	4
坡长 (最大值/最小值)/m	2 600/155	2 000/300
竖曲线最小半径/m	8 000	10 000
竖曲线长度 (最大值/最小值)/m	1 465/190	1 129/199
交通事故 事故总数/年数	1 796/3.5	1 689/5.59
交通流量 年平均日交通量/pcu	26 538	29 057

2.3 路段单元的事故率

不论是对路段单元进行事故统计还是进行事故预测, 均采用事故率指标, 该指标定义为路段单元单位里程上的年均事故数, 即:

路段单元事故率 = $\frac{\text{路段单元年均事故数} \times 1\,000}{\text{以 m 计的路段单元事故数}}$ 。(2)

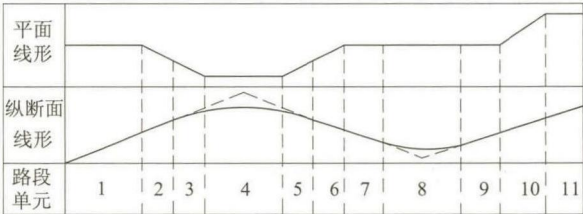


图 1 路段单元划分示意图
Fig. 1 Schematic diagram of subsection division

3 模型变量选择

3.1 变量分类

将事故预测模型中的自变量分为 2 类。

一类变量: 指与几何线形无关的变量, 此处采用路段上的年平均日交通量 $AADT$ 。

二类变量: 指几何线形指标变量, 主要包括直线段长度 LT 、平曲线半径 RHC 、平曲线长度 LHC 、平曲线偏角 α 、纵坡坡度 i 、坡长 LG 、竖曲线半径 RVC 和竖曲线长度 LVC 。

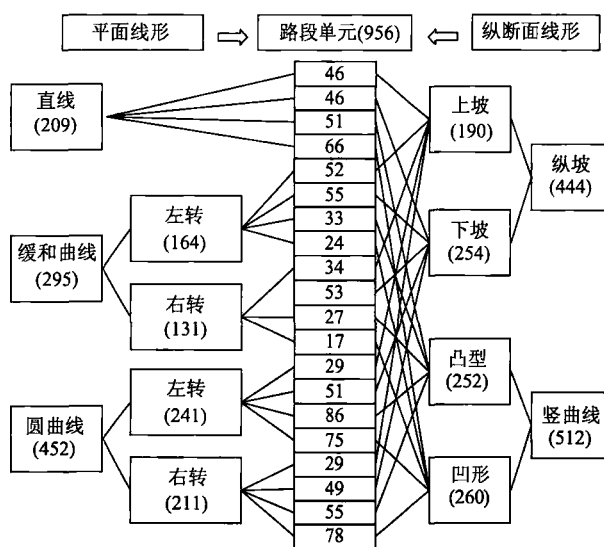


图2 京珠高速公路路段单元划分结果

Fig. 2 Result of subsection division of Beijing—Zhuhai expressway

由于交通量是产生交通事故的基本条件，因此，年平均日交通量直接作为模型的自变量，无需进行变量选择。对于二类变量，应根据其对事故发生的作用程度进行变量选择。

3.2 基于BP神经网络的变量选择

开发BP神经网络的主要目的是对二类变量进行选择。神经网络结构如图3所示，是一个3层网络，输入为上述8个二类变量，输出为路段单元事故率。训练样本中，京珠高速公路956个路段单元，粤赣高速公路725个路段单元。

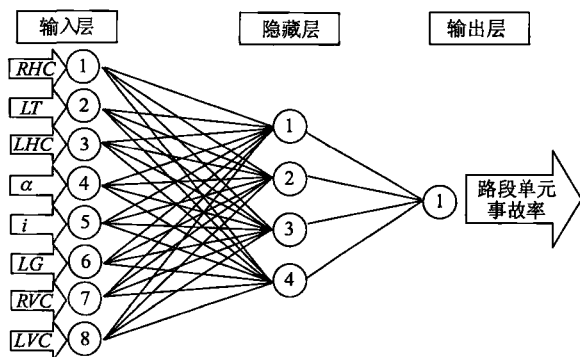


图3 BP神经网络结构

Fig. 3 Structure of BP neural network

经BP神经网络训练后，可得到各几何线形指标（即二类变量）与路段单元事故率的内在关系。在此基础上，可开展敏感性分析工作，用于确定各二类变量对事故的影响程度。

由神经网络和敏感性分析得到的各二类变量对事故的平均影响值MIV见表2，选择其中数值大于1的

变量作为显著变量（即突出影响变量），结果见表3。

表2 各变量对路段单元事故发生的平均影响值

Tab. 2 MIV of each variable to accident occurrence of subsection

MIV	LT	RHC	LHC	α	i	LG	RVC	LVC
山岭区	2.69	5.21	0.26	0.17	9.83	0.39	0.07	0.11
重丘区	2.52	4.74	0.19	0.20	9.11	0.28	0.07	0.10

表3 变量选择结果

Tab. 3 Result of variable selection

变量类型	变量	作用
一类变量	年平均日交通量 AADT	基本事故率预测时的自变量
二类变量	纵坡坡度 i	确定基本事故率修正系数时的指标变量
	平曲线半径 RHC	
	直线段长度 LT	

4 路段单元基本事故率预测模型

4.1 理想线形条件的界定

理想线形条件是指平面线形上平曲线大而缓和或直线段长度适中，而纵断面线形上纵坡和缓的几何线形。在理想的线形条件下，可认为交通事故的发生与线形指标无关，仅取决于交通量的大小。

为量化理想线形条件具体线形指标的取值范围，需分析平曲线半径、直线段长度和道路纵坡等线形指标与路段单元事故率的关系，具体统计分析结果见图4。

由统计结果可知，（1）不论是山岭区还是重丘区的高速公路，当平曲线半径大于4 000 m时，路段单元事故率均处于较低水平且较平稳；（2）山岭区和重丘区高速公路事故率的最低直线段长度分别为1.00 km和0.96 km；（3）山岭区高速公路在上坡坡度为1.2%时事故率最小，而重丘区在上坡坡度为0.3%时事故率最小；（4）山岭区高速公路比重丘区高速公路具有更高的行车危险，其事故率约为重丘区的2.1倍（山岭区高速公路为4.70次/（km·a），重丘区高速公路为2.22次/（km·a））。

综上所述，界定的理想线形条件为：

道路纵坡 $i \in [1\%, 2\%]$ （山岭区高速公路）或 $i \in [-1\%, 1\%]$ （重丘区高速公路）；

平曲线半径 $RHC \geq 4\,000\text{m}$ ；

直线段长度 $LT \in [0.5\text{ km}, 1.5\text{ km}]$ 。

4.2 基本事故率预测模型

该模型为在理想线形条件下路段单元事故率 N_B 与路段单元年平均日交通量 AADT 的关系模型。理想线形条件下事故率与年平均日交通量的关系见图5，模型标定结果为：

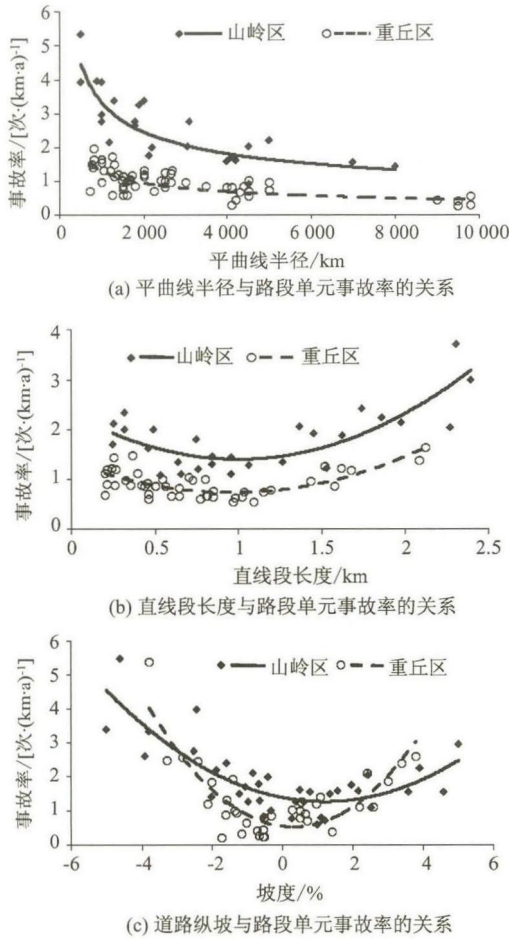


图4 线形指标与事故率的关系

Fig. 4 Relation between each alignment index and accident rate

山岭区 $N_B = 9.35 \times 10^{-7} AADT^{1.487}$, $R^2 = 0.649$, (3)

重丘区 $N_B = 4.18 \times 10^{-7} AADT^{1.502}$, $R^2 = 0.655$, (4)

式中 R 为相关系数。

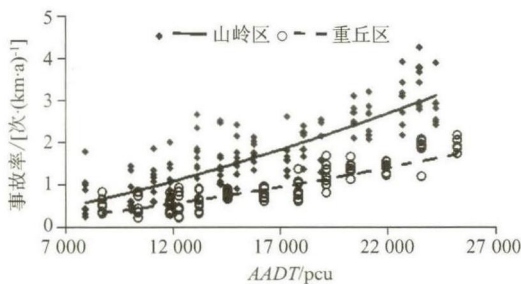


图5 路段单元事故率与AADT的关系

Fig. 5 Relation between accident rate of subsection and AADT

5 基本事故率的修正系数

在确定了理想线形条件下路段的基本预测事故率后, 需要结合具体路段的实际线形条件对预测事

故率进行修正。由自变量选择结果可知, 需要对道路纵坡、平曲线半径和直线段长度进行修正, 即需要确定3个修正系数: 道路纵坡修正系数 β_i 、平曲线半径修正系数 β_{RHC} 和直线段长度修正系数 β_{LT} 。

5.1 修正系数确定方法

修正系数确定方法如下:

(1) 选取半径大于4 000 m的平曲线路段或长度介于0.5~1.5 km之间的直线路段作为确定道路纵坡修正系数的样本路段(可保证纵坡修正不受平面线形的影响), 计算实际事故率 N_i 和基本预测事故率 N_{Bi} 。

(2) 选择半径小于4 000 m的平曲线路段作为确定平曲线半径修正系数的样本路段, 计算实际事故率 N_{RHC} 和基本预测事故率 N_{BRHC} 。

(3) 选择长度小于0.5 km或大于1.5 km的直线路段作为确定直线段长度修正系数的样本路段, 计算实际事故率 N_{LT} 和基本预测事故率 N_{BLT} 。

(4) 计算道路纵坡修正系数 β_i , 公式如下:

$$\beta_i = \frac{N_i}{N_{Bi}}. \quad (5)$$

(5) 分别计算平曲线半径修正系数 β_{RHC} 和直线段长度修正系数 β_{LT} , 公式如下:

$$\beta_{RHC} = \frac{N_i}{N_{BRHC} \times \beta_i}, \quad (6)$$

$$\beta_{LT} = \frac{N_i}{N_{BLT} \times \beta_i}. \quad (7)$$

5.2 修正系数确定结果

道路纵坡修正系数与坡度的关系见图6(a), 确定的道路纵坡修正系数见式(8)和式(11)。平曲线半径修正系数对半径的变化十分敏感, 宜采用 $\beta_{RHCi} - 1$ 作为因变量来分析该变量与平曲线半径的关系(见图6(b)), 确定的平曲线半径修正系数见式(9)和式(12)。直线段长度修正系数与直线段长度的关系见图6(c), 确定的直线段长度修正系数见式(10)和式(13)。

山岭区:

$$\beta_i = 0.11i^2 - 0.19i + 1.075, R^2 = 0.769, \quad (8)$$

$$\beta_{RHC} = 142.1RHC^{-0.91} + 1, R^2 = 0.685, \quad (9)$$

$$\beta_{LT} = 0.272LT^2 - 0.667LT + 1.415, R^2 = 0.788, \quad (10)$$

重丘区:

$$\beta_i = 0.157i^2 - 0.226i + 1.082, R^2 = 0.792, \quad (11)$$

$$\beta_{RHC} = 18755RHC^{-1.51} + 1, R^2 = 0.718, \quad (12)$$

$$\beta_{LT} = 0.073LT^2 - 0.202LT + 1.171, R^2 = 0.706, \quad (13)$$

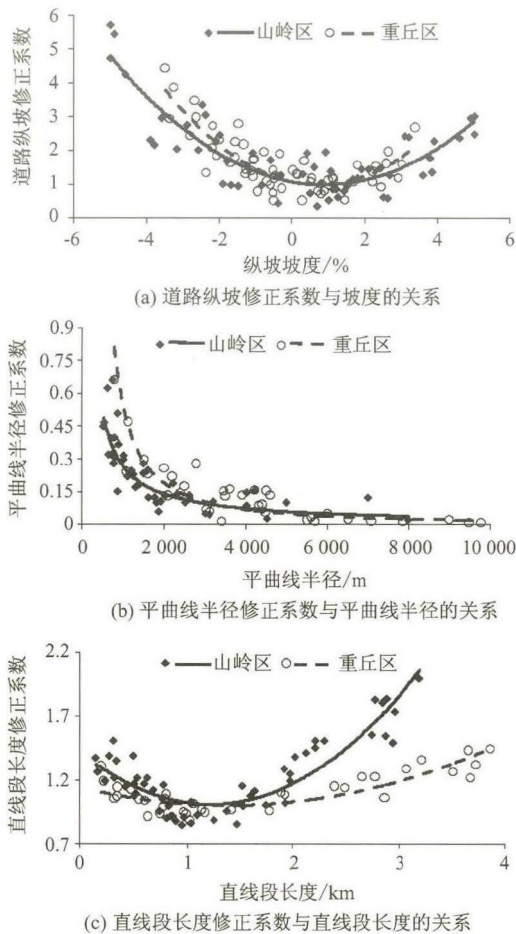


图6 线形指标与修正系数的关系

Fig. 6 Relation between each alignment index and modification factor

式中 R 为相关系数。

6 模型验证

分别应用本文建立的模型和 IHSDM 模型对京珠高速公路和粤赣高速公路进行事故预测, 并与实际发生的事故进行对比, 用以验证模型的精度, 模型验证结果见表4、表5和图7。

表4 事故总体预测与检验结果

Tab. 4 Prediction and inspection result of accidents on the whole road

高速公路		京珠高速 公路	粤赣高速 公路
本文模型	实际值/[次·(km·a) ⁻¹]	4.70	2.23
	预测值/[次·(km·a) ⁻¹]	4.33	2.10
	相对误差/%	-7.87	-5.83
IHSDM 模型	预测值/[次·(km·a) ⁻¹]	1.74	1.79
	相对误差/%	-62.98	-19.7

对比分析实际值与预测值、本文模型预测值与 IHSDM 模型预测值可知:

表5 粤赣高速公路部分路段单元事故预测结果

Tab. 5 Prediction result of accidents on part of subsections of expressway in Guangdong and Jiangxi

路段单元	实际值	IHSDM 模型		本文所建模型	
		预测值/ [次· (km·a) ⁻¹]	相对误 差/%	预测值/ [次· (km·a) ⁻¹]	相对误 差/%
K98+726~K99+226	0.72	1.62	126	0.53	-27
K99+226~K99+826	0.60	1.62	171	0.73	23
K99+826~K100+406	0.62	1.62	163	0.35	-43
K100+406~K100+626	0.82	1.62	98	0.74	-10
K100+626~K101+226	0.60	1.62	171	0.68	14
K101+226~K101+501	1.96	1.62	-17	2.05	5
K101+501~K101+976	1.89	1.62	-14	2.15	14
K101+976~K102+376	0.45	1.62	262	0.70	56
K102+376~K103+026	0.83	1.62	96	1.03	24
K103+026~K103+233	0.00	1.62	—	0.79	—
K103+233~K103+555	0.00	1.62	—	0.81	—
K103+555~K104+026	0.76	1.62	112	0.78	3
K104+026~K104+410	0.47	1.62	248	0.69	49
K104+410~K104+870	0.77	1.62	111	0.70	-8
K104+870~K105+176	0.59	1.62	176	0.70	19
K105+176~K105+654	0.75	1.62	116	1.03	38
K105+654~K105+976	1.12	1.62	45	0.93	-17
K105+976~K106+197	1.62	1.62	0	1.30	-20
K106+197~K106+776	1.55	1.62	5	1.57	1
K106+776~K107+349	1.25	1.62	30	1.47	18
K107+349~K107+826	1.13	1.62	44	1.19	5
K107+826~K108+076	0.72	1.62	126	0.55	-23
K108+076~K108+166	0.00	1.62	—	0.56	—
K108+166~K108+626	0.78	1.62	108	0.68	-13
K108+626~K109+126	1.08	1.62	51	1.06	-2
K109+126~K109+394	0.67	1.62	143	0.82	24
K109+394~K109+826	0.75	1.62	116	0.75	0
K109+826~K110+357	1.01	1.62	60	1.05	4
K110+357~K110+503	1.23	1.62	32	0.98	-20
K110+503~K110+726	0.57	1.62	185	0.61	7

(1) 无论是从全线还是到具体路段单元, 本文建立的事故预测模型均具有较高的精度。就全线事故总量而言, 预测的相对误差在 -5.83% ~ -7.87% 之间。

(2) 目前 IHSDM 尚不能预测具体路段单元的事故发生情况 (见图7)。另外, 由于其模型标定时采用的样本数据估计取自西方国家, 因此其预测结果误差较大, 尤其是在山区高速公路上, 全线事故总量预测结果的误差达到了 -62.98%。

(3) 本文依据我国山岭区和重丘区高速公路建立的事故预测模型能够较好地反映我国山岭重丘区高速公路的交通环境, 具有一定的适用性。

7 结论和有待进一步研究的问题

主要研究结论: (1) 本文建立的基于平纵线形

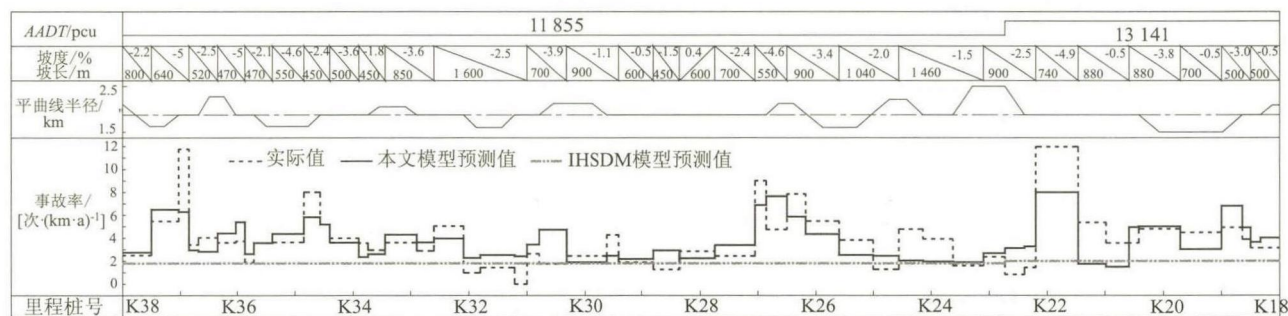


图7 京珠高速公路部分路段单元事故预测结果

Fig.7 Predicting result of accidents on part of subsections of Beijing - Zhuhai expressway

指标的山岭重丘区事故预测模型具有较高的预测精度,能较好地反映我国山岭重丘区高速公路的实际交通安全状态;(2)基于IHSDM预测的事故率明显偏低,尤其是对于山岭区高速公路更是如此,因此,在我国山岭区高速公路事故预测中应慎重使用。

次要研究结论:(1)无论是山岭区还是重丘区高速公路,当平曲线半径大于4 000 m时,事故率均较低;(2)山岭区和重丘区高速公路事故率最低的直线段长度分别为1.00 km和0.96 km;(3)山岭区高速公路在上坡坡度为1.2%、重丘区高速公路在上坡坡度为0.3%时事故率最低;(4)山岭区高速公路比重丘区高速公路具有更高的行车危险,其事故率约为重丘区高速公路的2.1倍。

有待进一步研究的问题:本文建立的事故预测模型主要考虑了交通量、平纵线形指标对事故发生的影响,因此,预测结果均低于实际事故发生数量。为此,在进一步研究中,应补充考虑横断面线形和路侧条件对事故发生的影响,从而提高模型预测精度和可用性。

参考文献:

References:

- [1] 孟祥海,关志强,郑来. 基于几何线形指标的山区高速公路安全性评价[J]. 中国公路学报, 2011, 24 (2): 103-108.
MENG Xiang-hai, GUAN Zhi-qiang, ZHEGN Lai. Safety Evaluation of Mountains Expressway Based on Geometric Alignment Indexes [J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24 (2): 103-108.
- [2] FU Rui, GUO Ying-shi, YUAN Wei, et al. The Correlation between Gradients of Descending Roads and Accident Rates [J]. Safety Science, 2011, 49 (3): 416-423.
- [3] CARSTEN O M J, TATE F N. Intelligent Speed Adaptation: Accident Savings and Cost-benefit Analysis [J]. Accident Analysis and Prevention, 2005, 37 (3): 407-416.
- [4] GEEDIPALLY S R, LORD D, DHAVALA S S. The Negative Binomial-lindley Generalized Linear Model: Characteristics and Application Using Crash Data [J]. Accident Analysis and Prevention, 2012, 45: 258-265.
- [5] 黄进,方守恩. 平曲线路段事故数目与线形元素的关系[J]. 公路, 2002 (12): 76-79.
HUANG Jin, FANG Shou-en. Relationship between Accident Number and Alignment Elements of Horizontal Curve Sections [J]. Highway, 2002 (12): 76-79.
- [6] 秦勤,唐琤琤,彭道月. 山区双车道公路事故预测模型研究及在安全性评价中的应用[J]. 公路交通科技, 2009, 26 (10): 139-143.
QIN Qin, TANG Cheng-cheng, PENG Dao-yue. Study on Prediction Model of Traffic Accident on Two-lane Highways in Mountainous Area and Its Application in Safety Assessment [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26 (10): 139-143.
- [7] CHUO K, SAITO M. Applicability of FHWA Crash Prediction Module of IHSDM to the Selection of Candidate Locations for Safety Audits of Two-lane Rural Highways [J]. Transportation Research Record, 2009, 2137: 20-28.
- [8] Dominguez-Lira C A, Castro M, Pardillo-Mayora J M, et al. Adaptation and Calibration of IHSDM for Highway Projects Safety Evaluation in Spain [C] // 4th International Symposium on Highway Geometric Design, Valencia, Spain: [s. n.], 2010.
- [9] MARCHIONNA A, PERCO P, TAVERNAR M C. Transferability of Accident Prediction Models for Urban Intersections [C] // Proceedings of the 17th National SIIV Congress, Enna, Italy: [s. n.], 2008.
- [10] MARCHIONNA A, PERCO P, FALCONETTI N. Evaluation of the Applicability of IHSDM Crash Prediction Module on Italian Two-lane Rural Roads [J]. Procedia - Social and Behavioral Science, 2012, 53: 933-942.