

文章编号:1671-1637(2016)01-0123-10

IHSDM 高速公路事故预测模型

孟祥海,侯芹忠,史永义,荆林朋,郑 来

(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:应用交互式道路安全设计模型(IHSDM)对11类高速公路进行事故预测,并对比了预测事故数与实际事故数,给出了基本事故预测模型与线形指标修正系数,构建了一组IHSDM事故预测改进模型,分析了线形指标的敏感性与线形指标的变化对预测事故率的影响,并计算了各类高速公路线形指标的安全取值范围。分析结果表明:采用IHSDM预测的高速公路事故数小于实际事故数,最小误差为13%,最大误差为52%;改进模型事故总数预测值与实际值的相对误差小于10%,具体路段上的皮尔逊相关系数不小于0.60,均方根误差小于0.30,平均相对误差小于30%;事故率对各线形指标敏感性由高到低依次为直线段长度、纵坡坡度、平曲线偏角、平曲线半径、竖曲线半径。可见,与IHSDM相比,改进模型具有更高的精度和更好的适用性。

关键词:交通安全;高速公路;交互式道路安全设计模型;事故预测模型;敏感性分析

中图分类号:U491.31

文献标志码:A

IHSDM freeway accident prediction models

MENG Xiang-hai, HOU Qin-zhong, SHI Yong-yi, JING Lin-peng, ZHENG Lai

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

Abstract: IHSDM (interactive highway safety design model) was used to predict accidents of 11 types of freeways, and the predicted accident numbers were compared with the actual accident numbers. The basic accident prediction models and the modification coefficients of alignment indexes were obtained, a set of IHSDM accident prediction improved models were built to carry out the sensitivity analysis of alignment indexes, the effects of alignment indexes on the predicted accident rates were explained, and the safe value ranges of alignment indexes for freeways were obtained. Analysis result shows that the accident numbers predicted by IHSDM are lower than the actual accident number, the least error is 13%, and the maximum error is 52%. The relative error between total accident number predicted by the improved model and the actual value is less than 10%. At specific road sections, Pearson's correlation coefficients are 0.60 at least, the root mean square errors are less than 0.30, and the mean relative errors are less than 30%. The sensitivities of accident rates to alignment indexes from high to low are straight line length, longitudinal slope, horizontal curve angle, horizontal curve radius and vertical curve radius. Obviously, compared with IHSDM, the improved model has higher accuracy and better applicability. 14 tabs, 6 figs, 20 refs.

Key words: traffic safety; freeway; IHSDM; accident prediction model; sensitivity analysis

收稿日期:2015-09-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51329801)

作者简介:孟祥海(1969-),男,黑龙江海伦人,哈尔滨工业大学教授,工学博士,从事道路交通安全与交通规划研究。

Author resume: MENG Xiang-hai(1969-), male, professor, PhD, +86-451-86282116, mengxianghai100@126.com.

0 引 言

高速公路几何线形与交通事故关系密切^[1-4],通过分析线形指标与事故的关系,掌握事故发生的规律,进而对高速公路进行安全评价^[5-8],而且基于线形指标建立事故预测模型成为近年来的研究热点。Anastasopoulos 等应用随机参数计数方法建立了车辆事故频率模型^[9];Sawalha 等对事故预测模型的可转移性进行了研究^[10];Malyshkina 等对零状态 Markov 切换计数数据模型进行了研究^[11];杨宏志等利用随机试验和数学均值化原理建立了高速公路单车事故模型^[12]。

美国联邦公路局基于交通安全与线形指标开发了交互式道路安全设计模型(IHSDM),用于评价道路安全性。IHSDM 事故预测模型由于结构简单与建模思想可靠,得到了国内外学者的积极研究与应用。韩皓等应用 IHSDM 对双车道公路运行速度协调性进行了评价^[13],给出了相关指标;秦勤等应用该模型对山区双车道公路事故进行了研究^[14],并应用于安全性评价中。然而,由于各国道路交通环境存在较大差异,IHSDM 高速公路事故预测模型的适用性也引起广泛关注。各国学者纷纷开展了该模型在各自国家的适用性验证工作,并结合各自国家事故、交通量与道路线形设计要素等数据对该模型进行了重新标定或改进。Juan 等针对双车道乡村公路建立了基于速度降低的事故预测模型^[15];Aurelio 等对双车道乡村公路事故预测模型的适用性进行了评价^[16];La Torre 等对高速公路安全性模型的可转移性进行了研究^[17]。

上述研究丰富和发展了 IHSDM 高速公路事故预测模型,但是该模型在中国的适用性还有待进一步研究。基于此,本文利用大量历史事故与高速公路线形数据,研究了 IHSDM 高速公路事故预测模型在中国的适用性,并对其进行改进以提高事故预测精度,根据改进后的模型确定高速公路线形指标的安全取值范围。

1 事故预测模型

IHSDM 高速公路事故预测模型主要包括两部分,基本事故预测模型与线形指标修正系数,相关公式为

$$N_2 = N_1 \prod_{j=1}^J \beta_j \quad (1)$$

式中: N_1 为路段年均预测的基本事故率,即几何线形处于理想条件下仅受交通量影响的事故率; N_2 为路段年均预测事故率; J 为线形指标总数; β_j 为第 j 类线形指标对基本事故率的修正系数。

线形指标是与高速公路横断面相关的指标,如车道宽度、路肩宽度、中间带宽度、中间带护栏位置与路侧护栏位置等。依据预测事故率与路段长度可得到路段的预测事故数与高速公路全线事故总数。

2 数据收集与处理

2.1 数据来源

数据来源为辽宁省与广东省境内的 8 条高速公路。为全面分析 IHSDM 高速公路事故预测模型在中国各类高速公路上的适用性,依据高速公路车道数、设计速度与地形条件对 8 条高速公路进行分类,共得到 11 种类型的高速公路(表 1)。

表 1 高速公路类型

Tab. 1 Freeway types

高速公路类型	代表高速公路与路段	地形条件	设计速度/(km·h ⁻¹)	车道数
1	开阳高速公路,K0~K125	平原区	120	4
2	沈康高速公路,K0~K77	平原区	100	4
3	铁阜高速公路,K294~K409	丘陵区	120	4
4	粤赣高速公路,K0~K136	丘陵区	100	4
5	沈丹高速公路,K122~K134	丘陵区	80	4
6	沈丹高速公路,K42~K108	山岭区	100	4
7	京珠高速粤北段,K13~K93	山岭区	80	4
8	沈山高速公路,K467~K662	平原区	120	6
9	沈山高速公路,K301~K467	丘陵区	120	6
10	沈大高速公路,K0~K176	平原区	120	8
11	沈大高速公路,K223~K348	丘陵区	120	8

2.2 路段划分

收集到以上 11 类高速公路的几何线形指标数据,包括平面线形、车道宽度、中央分隔带宽度与路肩宽度等,高速公路车道宽度均为 3.75 m,土路肩宽度均为 0.75 m,路拱横坡坡度均为 2%。

依据高速公路平纵线形指标,将高速公路划分成几何线形上不可再分的路段作为研究的样本单元。路段划分结果见图 1,各种类型高速公路几何

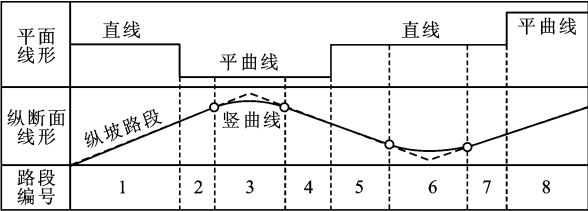


图 1 路段划分结果
Fig. 1 Section division result

线形指标见表 2。

表 2 线形指标
Tab. 2 Alignment indexes

高速公路 类型	最大平曲线 半径/m	最小平曲线 半径/m	中央分隔带 宽度/m	路缘带 宽度/m	硬路肩 宽度/m	路段 数
1	8 000	2 300	3.00	0.75	3.50	481
2	6 000	1 400	2.00	0.75	3.00	286
3	9 800	3 000	3.00	0.75	3.50	409
4	7 500	750	2.00	0.50	3.00	548
5	6 000	600	2.00	0.50	2.50	52
6	6 000	800	1.50	0.75	2.75	207
7	4 000	500	2.00	0.50	2.50	350
8	8 000	5 500	3.00	0.75	3.00	818
9	8 000	3 000	3.00	0.75	3.00	564
10	25 000	1 000	3.00	0.75	3.00	555
11	20 000	650	3.00	0.75	3.00	479

2.3 交通事故数据

收集到上述 11 类高速公路上的事故原始记录,包括事故发生的时间、地点(桩号)、原因与赔偿情况等。剔除与几何线形无关的事故,如违章停车、爆胎与车辆机械原因等发生的事故,经筛选共得到 20 030 起交通事故数据(表 3)。

表 3 交通事故数据

Tab. 3 Data of traffic accidents

高速公路类型	事故总数/起	时间
1	1 634	2008 年 1 月至 2012 年 7 月
2	248	2009 年 1 月至 2012 年 12 月
3	1 164	2009 年 1 月至 2012 年 12 月
4	1 689	2007 年 1 月至 2012 年 7 月
5	217	2006 年 1 月至 2012 年 12 月
6	868	2006 年 1 月至 2012 年 12 月
7	998	2006 年 1 月至 2009 年 6 月
8	2 240	2006 年 1 月至 2009 年 6 月
9	2 328	2010 年 1 月至 2012 年 12 月
10	5 627	2006 年 1 月至 2012 年 12 月
11	3 017	2006 年 1 月至 2012 年 12 月

2.4 交通量数据

从高速公路流量观测站获得了 2006 年至 2013 年高速公路各区段的交通量数据。各类高速公路事故发生年份内各路段加权的年平均日交通量见表 4。

表 4 交通量

Tab. 4 Traffic volumes

高速公路 类型	路段数	各路段交通量范围/ (veh · d ⁻¹)	各路段加权平均交 通量/(veh · d ⁻¹)
1	14	16 979~23 893	20 969
2	4	2 809~3 821	3 227
3	5	13 720~18 276	17 630
4	12	11 430~19 540	14 171
5	2	6 694~7 939	7 840
6	4	7 870~8 702	8 261
7	10	9 791~13 883	11 842
8	10	13 864~26 524	18 874
9	5	24 439~27 919	25 866
10	18	19 833~25 425	23 175
11	6	25 044~47 621	33 072

3 模型适用性分析

3.1 事故总数预测结果分析

各类高速公路上实际发生的及由 IHSDM 预测的年均事故总数见表 5。分析实际事故数与预测事故数的相对误差可知:采用 IHSDM 预测的事故总数均少于实际发生的事故总数,即预测结果偏小;只有在设计速度为 120 km · h⁻¹ 的四车道高速公路上(类型 1、3),事故预测值与实际值的相对误

表 5 实际事故数与 IHSDM 预测事故数的对比

Tab. 5 Comparison of actual accidents number and
predicted accidents number by IHSDM

高速公路 类型	实际事故数/ (起 · 年 ⁻¹)	IHSDM 预测事故数/ (起 · 年 ⁻¹)	相对误差/ %
1	363	317	-13
2	62	42	-32
3	291	246	-15
4	307	203	-34
5	31	15	-52
6	124	81	-35
7	285	148	-48
8	640	450	-30
9	776	511	-34
10	804	459	-43
11	431	268	-38

差不大于 15%，事故预测模型体现出一定的可用性；预测精度最差的是设计速度为 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的四车道高速公路（类型 5、7），相对误差在 50% 左右，其中类型 5 高速公路可能是由于里程较短，相对误差超过 50%。

3.2 路段事故数预测结果分析

为进一步考察 IHSDM 在高速公路具体路段上的预测精度，本文引入皮尔逊相关系数 r 、均方根误差 δ 与平均相对误差 ϵ 三个指标。 r 反映预测值与实际值的相关程度，取值范围为 $[-1, 1]$ ； δ 表征预测值与实际值的偏差大小； ϵ 表示预测值偏离实际值的程度。3 个指标的计算公式分别为

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - m)(A_i - a)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (M_i - m)^2 (A_i - a)^2}} \quad (2)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_i - M_i)^2}{n}} \quad (3)$$

$$\epsilon = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|A_i - M_i|}{M_i} \quad (4)$$

式中： M_i 、 A_i 分别为路段 i 上实际事故数与预测事故数； m 、 a 分别为各路段实际事故数与预测事故数的平均值； n 为路段总数。

依据各类高速公路路段上的实际事故数与 IHSDM 预测得到的事故数，3 个评价指标的计算结果见表 6。分析可知：IHSDM 预测模型在具体路段上预测值与实际值的相关性较弱， r 最大值仅为 0.41；均方根误差较大，最大为 0.75；路段相对误差较之事故总数的相对误差进一步加大，均在 35% 以

表 6 评价指标计算结果

Tab. 6 Calculation result of evaluation indexes

高速公路类型	m /起	a /起	r	δ	ϵ /%
1	0.75	0.64	0.26	0.45	41
2	0.22	0.14	0.17	0.16	64
3	0.71	0.60	0.25	0.41	42
4	0.56	0.48	0.12	0.47	70
5	0.60	0.18	0.17	0.56	75
6	0.60	0.39	0.15	0.30	75
7	0.81	0.43	0.11	0.59	88
8	0.78	0.45	0.35	0.33	40
9	1.38	1.11	0.41	0.56	36
10	1.45	1.03	0.31	0.75	41
11	0.90	0.58	0.35	0.50	44

上，最大为 88%。综合上述 3 个指标值可知，IHSDM 模型在具体路段上的事故预测精度仍较低，体现出更大的不适用性。

4 模型的改进

4.1 模型改进方向

由于 IHSDM 事故预测模型的自变量主要是交通量、横断面型式和平曲线半径，这与中国高速公路的建设条件和交通环境有一定的区别。在中国，设计速度、纵坡坡度与平曲线偏角等也是影响交通事故发生的重要因素，而中国公路横断面型式与车道数比较固定，导致 IHSDM 预测模型中修正系数为一固定值，使 IHSDM 预测模型在具体路段上事故预测值与实际值相关性较弱，反映不出事故与线形的关系，因此，改进 IHSDM 预测模型时引入速度以及对交通事故有显著影响的线形指标，依据已掌握的数据，将上述 11 种类型的高速公路按照车道数与设计速度重新划分为 5 类，不再考虑地形条件，并对这 5 类高速公路建立改进的 IHSDM 事故预测模型，改进模型类型见表 7。

表 7 改进模型

Tab. 7 Improved models

模型	车道数	设计速度/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	建模数据 来源	样本单元 总数
1	4	80	类型 5、7	402
2	4	100	类型 2、4、6	1 041
3	4	120	类型 1、3	890
4	6	120	类型 8、9	1 382
5	8	120	类型 10、11	1 034

将同类高速公路的样本单元进行合并，取出其中一半样本量，如建立模型 1 时分别取类型 5 和类型 7 高速公路样本总数的一半，来建立 IHSDM 事故预测改进模型，剩余样本用于模型的验证。建模过程为：分析事故率与平纵线形指标的关系，界定理想线形条件；在理想线形条件下构建基本事故预测模型；引入实际线形条件，确定基本事故预测模型的线形指标修正系数。

4.2 理想线形条件界定

理想的线形条件是指事故率最低或相对最低时各平纵线形指标的取值范围。各平纵线形指标与事故率的关系见图 2。

统计结果表明：设计速度为 $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的高速公路，事故率受平竖曲线半径、平曲线偏角与纵坡坡度影响不大，且均处于较低水平；设计速度为 80、

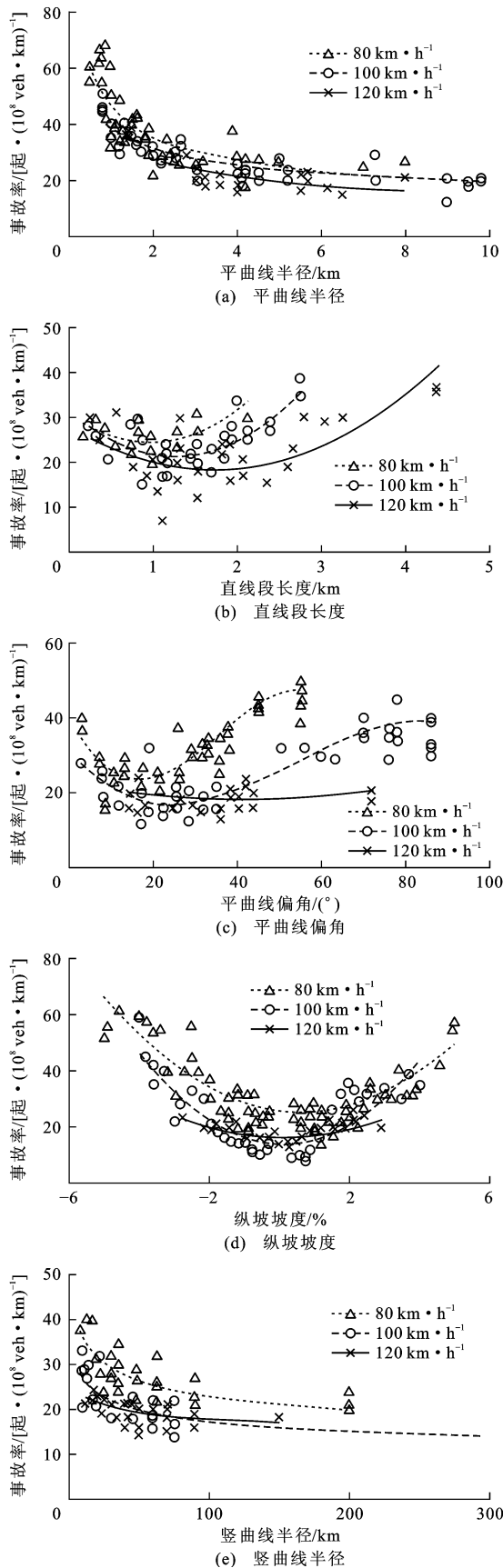


图 2 线形指标与事故率的关系

Fig. 2 Relations between alignment indexes and accident rate

100 km·h⁻¹ 的高速公路,当平曲线半径大于 4 km 或竖曲线半径大于 50 km 时,事故率趋于稳定;当纵坡坡度分别为 0.8% 和 0.3%,平曲线偏角分别为 17° 和 23° 时,事故率较低;设计速度为 80、100、120 km·h⁻¹,直线段长度分别为 0.9、1.2、1.5 km 时,事故率较低。由此确定出理想的线形条件,线形指标取值范围见表 8。

表 8 线形指标取值范围

Tab. 8 Ranges of alignment indexes

线形指标	设计速度/(km·h ⁻¹)		
	80	100	120
平曲线半径 x_1 /km	$x_1 > 4$	$x_1 > 4$	
直线段长度 x_2 /km	$0.5 < x_2 < 1.5$	$0.5 < x_2 < 1.5$	$1.0 < x_2 < 2.0$
平曲线偏角 x_3 /°	$10 < x_3 < 25$	$15 < x_3 < 30$	
纵坡坡度 x_4 /%	$0 < x_4 < 2$	$-1 < x_4 < 1$	
竖曲线半径 x_5 /km	$x_5 > 50$	$x_5 > 50$	

4.3 基本事故预测模型构建

选择处于理想线形条件的路段,所得事故率与交通量的关系见图 3。分析事故率与交通量 x_0 的关系(图 3),可标定出车道数为 4 时的基本事故预测模型,设计速度分别为 80、100、120 km·h⁻¹ 时,事故率分别为

$$B_1 = 10^{-6} x_0^{1.401} \quad (5)$$

$$B_2 = 2.08 \times 10^{-7} x_0^{1.521} \quad (6)$$

$$B_3 = 2.20 \times 10^{-9} x_0^2 - 3.75 \times 10^{-5} x_0 + 0.96 \quad (7)$$

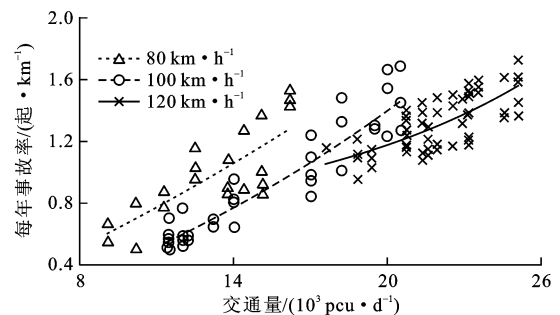


图 3 交通量与事故率的关系

Fig. 3 Relations between traffic volumes and accident rates

4.4 线形指标修正系数确定

由界定的理想线形条件可知,对于设计速度为 120 km·h⁻¹ 的高速公路,仅需确定直线段长度修正系数 β_2 ,而对于设计速度为 80、100 km·h⁻¹ 的高速公路还需确定平曲线半径修正系数 β_1 、平曲线偏角修正系数 β_3 、纵坡坡度修正系数 β_4 与竖曲线半径修正系数 β_5 。线形指标修正系数的确定方法为:选取偏角、纵坡坡度与竖曲线半径处于理想条件的曲线路段作为确定 β_1 的样本路段,选取纵坡坡度与竖曲线

半径处于理想条件的直线路段作为确定 β_2 的样本路段,选取纵坡坡度及竖曲线半径处于理想条件的曲线路段作为确定 β_3 的样本路段,分别选取所有纵坡路段与所有竖曲线路段作为确定 β_4 和 β_5 的样本路段;分别计算各样本路段上的实际事故率 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 和基本事故率 D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 、 D_5 ;基于事故率计算的各线形指标的修正系数分别为

$$\beta_1 = C_1/D_1 \quad (8)$$

$$\beta_2 = C_2/D_2 \quad (9)$$

$$\beta_3 = C_3/D_3\beta_1 \quad (10)$$

$$\beta_4 = \beta_1\beta_2\beta_3C_4/D_4 \quad (11)$$

$$\beta_5 = C_5/D_5\beta_1\beta_2\beta_3 \quad (12)$$

各线形指标修正系数与线形指标的关系见图 4,所得 5 个改进模型的参数汇总见表 9。

表 9 改进模型的参数

Tab. 9 Parameters of improved models

模型	车道数	设计速度/km·h ⁻¹	参数表达式	决定系数
1	4	80	$N_2 = N_1\beta_1\beta_2\beta_3\beta_4\beta_5$	
			$N_1 = 10^{-6}x_0^{1.401}$	0.65
			$\beta_1 = 0.91x_1^{-1.044} + 1$	0.62
			$\beta_2 = 0.255x_2^2 - 0.591x_2 + 1.41$	0.65
			$\beta_3 = 3 \times 10^{-4}x_3^2 - 0.012x_3 + 1.15$	0.70
			$\beta_4 = 0.069x_4^2 - 0.078x_4 + 1.212$	0.71
			$\beta_5 = 0.51x_5^{-0.47} + 1$	0.57
2	4	100	$N_2 = N_1\beta_1\beta_2\beta_3\beta_4\beta_5$	
			$N_1 = 2.08 \times 10^{-7}x_0^{1.521}$	0.66
			$\beta_1 = 0.55x_1^{-1.51} + 1$	0.73
			$\beta_2 = 0.375x_2^2 - 0.760x_2 + 1.51$	0.62
			$\beta_3 = 2 \times 10^{-4}x_3^2 - 0.01x_3 + 1.16$	0.72
			$\beta_4 = 0.124x_4^2 - 0.017x_4 + 1.01$	0.68
			$\beta_5 = 0.61x_5^{-0.44} + 1$	0.71
3	4	120	$N_2 = N_1\beta_2$	
			$N_1 = 2.20 \times 10^{-9}x_0^2 - 3.75 \times 10^{-5}x_0 + 0.96$	0.85
			$\beta_2 = 0.239x_2^2 - 0.687x_2 + 1.86$	0.60
4	6	120	$N_2 = N_1\beta_2$	
			$N_1 = 1.70 \times 10^{-9}x_0^2 - 2.54 \times 10^{-5}x_0 + 0.66$	0.77
			$\beta_2 = 0.301x_2^2 - 0.754x_2 + 1.62$	0.62
5	8	120	$N_2 = N_1\beta_2$	
			$N_1 = 2.00 \times 10^{-9}x_0^2 - 2.88 \times 10^{-5}x_0 + 0.88$	0.75
			$\beta_2 = 0.206x_2^2 - 0.506x_2 + 1.40$	0.64

在实际运用中,依据高速公路车道数与设计速度选择相应的预测模型,依据路段上交通量与线形条件计算预测事故率,再结合路段长度即可得到全线事故总数。

4.5 IHSDM 事故预测改进模型验证

利用 IHSDM 改进模型对剩余的样本单元进行事故总数预测,并与 IHSDM 模型预测值进行对比,结果见表 10。由统计结果可知,IHSDM 改进模型事故总数预测值与实际值的相对误差均在 10%以内,较之未改进的 IHSDM 预测模型在预测精度上

有了较大提高。

表 10 事故总数预测值对比

Tab. 10 Comparison of predicted total accidents numbers

模型	实际值	IHSDM 预测模型		IHSDM 改进模型	
		预测值	相对误差/%	预测值	相对误差/%
1	164	84	-49	178	8.6
2	255	168	-34	241	-5.4
3	314	267	-15	293	-6.5
4	702	477	-32	638	-9.1
5	611	360	-41	648	6.1

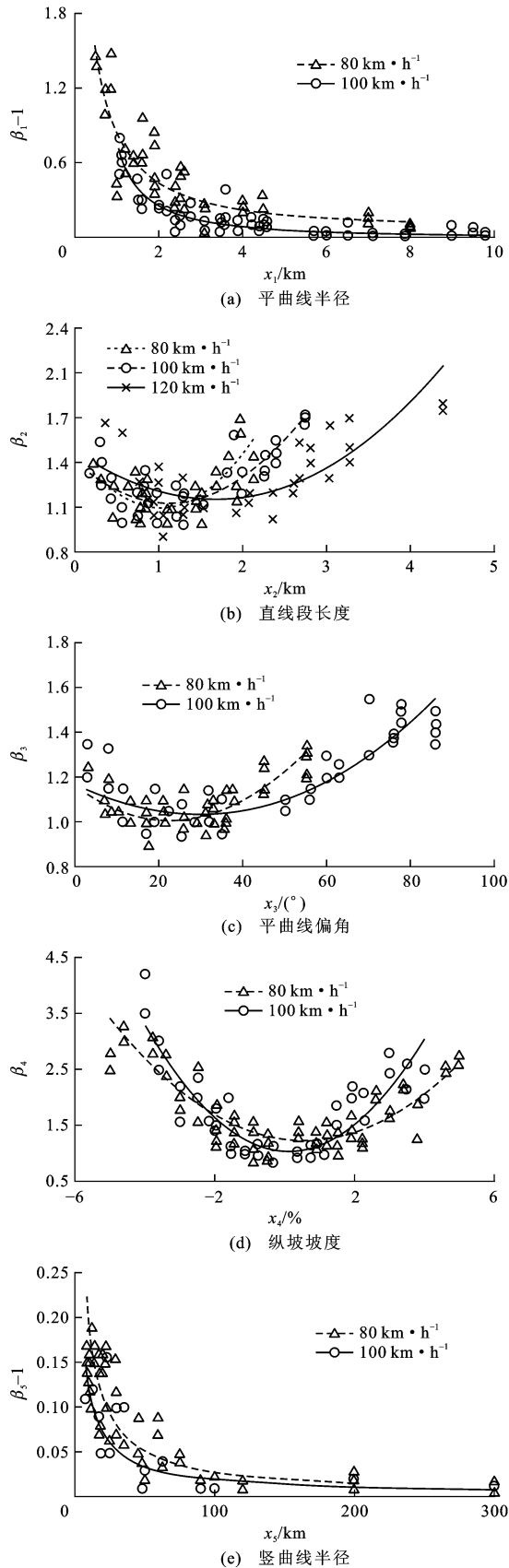


图 4 修正系数与线形指标的关系

Fig. 4 Relations between modification coefficients and alignment indexes

为了进一步分析改进模型在具体路段上的事故预测精度,依据高速公路路段上的实际事故数和改进模型预测得到的事故数,其中类型 6 高速公路 K55~K65 段的事故预测结果见图 5,皮尔逊相关系数、均方根误差与平均相对误差 3 个评价指标的计算结果见表 11。分析可知:改进模型在具体路段上预测值与实际值相关性较强, r 值均在 0.60 以上;均方根误差较未改进的 IHSDM 预测模型有较大改善;路段上平均相对误差均在 30% 以内。综合上述 3 个指标可知,改进模型在具体路段上的事故预测仍有较高的精度。

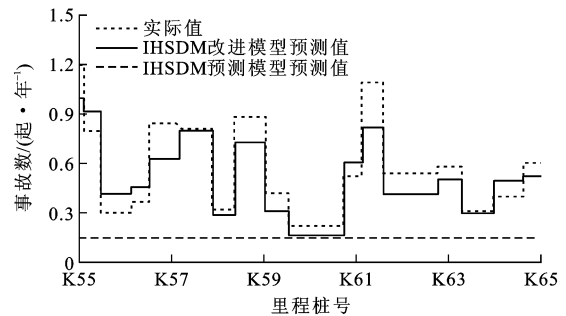


图 5 类型 6 高速公路事故预测结果

Fig. 5 Accident prediction result of type 6 freeway

表 11 改进模型的评价指标

Tab. 11 Evaluation indexes of improved models

模型	$m/\text{起}$	$a/\text{起}$	r	δ	$\epsilon/\%$
1	0.70	0.66	0.60	0.16	28
2	0.45	0.42	0.67	0.10	19
3	0.48	0.53	0.66	0.14	23
4	1.06	1.15	0.61	0.19	26
5	1.18	1.25	0.64	0.28	24

5 基于敏感性分析的线形指标取值

5.1 敏感性分析

敏感性分析是分析各线形指标的变化对预测事故率的影响程度。在进行敏感性试验时,高速公路共有平曲线-纵坡路段、平曲线-竖曲线路段、直线-纵坡路段和直线-竖曲线路段 4 种路段形式。对任一指标做敏感性分析时,将该指标按一定步幅从最小值增至最大值,其他指标取各路段均值。如对模型 1 的平曲线半径 x_1 做敏感性分析时, x_1 每次增加 0.5 km,从 0.5 km 增加至 8.0 km, x_0 、 x_2 、 x_3 、 x_4 和 x_5 分别取均值为 11 320 pcu·d⁻¹、1.387 km、30°、2.3% 和 68 km,计算不同 x_1 下的预测事故率。模型 1 预测事故率与线形指标的关系见图 6。

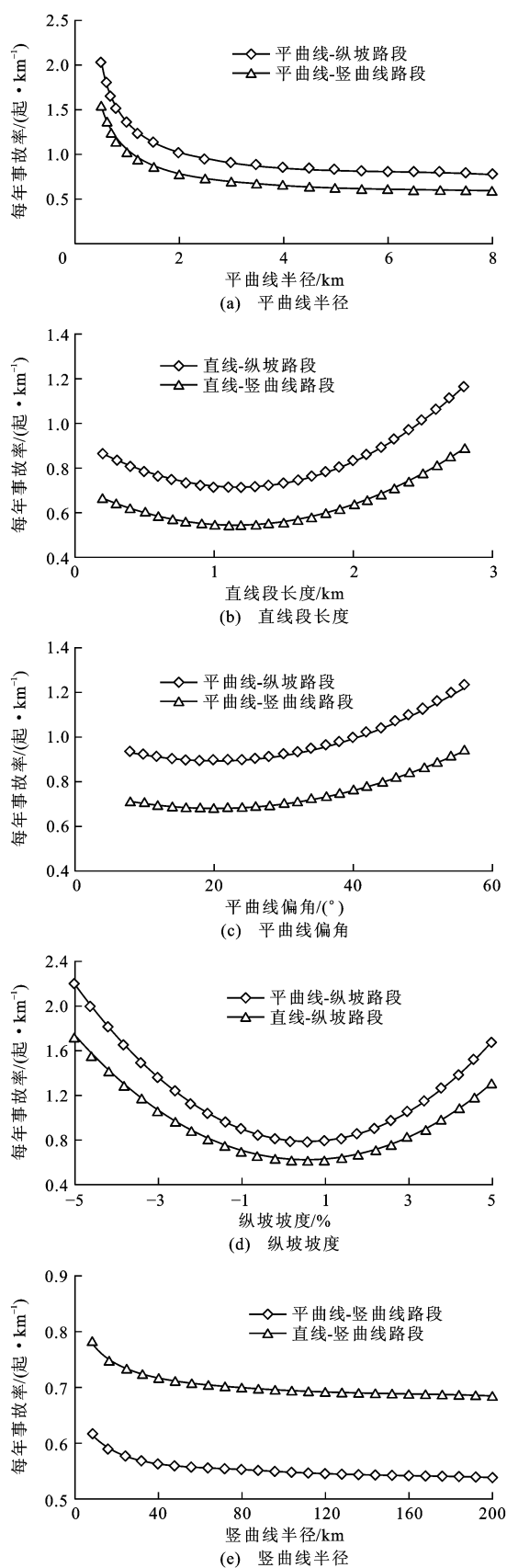


图 6 模型 1 预测事故率与线形指标的关系

Fig. 6 Relations between predicted accident rates and alignment indexes of model 1

图 6 中事故率与线形指标的关系亦符合经典交通安全理论,即随着平、竖曲线半径的增大,事故率逐渐降低并趋于稳定,过长或过短的直线段对行车安全均不利,平曲线偏角过小或过大均导致较高的行车危险性,无论是上坡还是下坡路段事故率均随坡度增大而增大。

采用相对敏感度指标^[18-20]进一步对各线形指标的敏感性进行横向对比,其为预测事故率变化率与线形指标变化率的比值,即

$$S_i = \frac{\Delta E_i / E_i}{\Delta x_i / x_i} \quad (13)$$

式中: S_i 为线形指标 x_i 对应的相对敏感度; E_i 为敏感性试验中 x_i 对应的预测事故率; Δx_i 为 x_i 的增加量; ΔE_i 为 x_i 增加 Δx_i 后对应预测事故率的增加量。

由于各线形指标对预测事故率的影响是非线性的,因此, S_i 并非固定值。以模型 1 为例,计算所得的各线形指标的相对敏感度范围为: $-0.67 \leq S_1 \leq -0.10$ 、 $-0.15 \leq S_2 \leq 1.33$ 、 $-0.05 \leq S_3 \leq 0.81$ 、 $0.01 \leq S_4 \leq 1.19$ 、 $-0.07 \leq S_5 \leq -0.02$ 。基于最大敏感度即 S_i 的绝对值,事故率对各线形指标敏感性由高到低依次为直线段长度、纵坡坡度、平曲线偏角、平曲线半径、竖曲线半径。

5.2 线形指标安全取值范围

相对敏感度 S_i 由高到低可分为 4 个等级^[18-19],各级别划分标准及意义见表 12。

根据敏感性分析及相对敏感度计算结果,事故率最低时对应的线形指标相对敏感度亦较低,且随着线形指标偏离最安全值程度的增大,相对敏感度呈增大趋势,即道路安全状况恶化速度越来越快。从安全角度进行高速公路线形设计时,建议线形指标取值满足相对敏感度位于Ⅲ级和Ⅳ级相对敏感度范围的条件,以使线形指标的变化不会对交通安全产生过快和较大的负面影响。

计算得到的模型 1 中各级相对敏感度下线形指标的取值范围见表 13。同理可根据另外 4 种模型计算各类型高速公路的线形指标取值范围,对于设计速度为 $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的高速公路,事故率与 x_1 、 x_3 、 x_4 、 x_5 这 4 项指标相关性较弱,故仅需给出直线段长度 x_2 的安全取值范围,各类高速公路Ⅲ级及以下相对敏感度对应的线形指标取值范围见表 14,即本文推荐的高速公路线形指标安全取值范围。

6 结 语

(1) 采用 IHSDM 预测的高速公路事故数低于

表 12 相对敏感度分级标准
Tab. 12 Grading standards of relative sensitivity

级别	相对敏感度	意义	线形指标
I 级	$ S_i > 1.0$	x_i 为高敏感参数,其变化会显著影响事故率	x_2 与 x_4
II 级	$0.2 < S_i \leq 1.0$	x_i 为敏感参数,其变化会导致事故率较大幅度变化	x_1 与 x_3
III 级	$0.05 < S_i \leq 0.2$	x_i 为中等敏感参数,其变化会对事故率有一定影响	x_5
IV 级	$ S_i \leq 0.05$	x_i 为不敏感参数,其变化对事故率影响较小	

表 13 模型 1 中线形指标取值范围
Tab. 13 Alignment index ranges of model 1

线形指标	I 级	II 级	III 级	IV 级
x_1/km		(0.50, 3.52]	(3.52, 8.00)	
x_2/km	> 2.35	(1.45, 2.35], [0.20, 0.45)	(1.24, 1.45], [0.45, 1.06)	[1.06, 1.24]
$x_3/(\text{^\circ})$		(31, 54]	(23, 31]	[8, 23]
$x_4/\%$	$[-5.0, -4.3), (4.2, 5.0]$	$[-4.3, -1.2), (1.6, 4.2]$	$[-1.2, -0.4), (0.9, 1.6]$	$[-0.4, 0.9]$
x_5/km			[8.00, 8.02)	≥ 8.02

表 14 线形指标安全取值范围
Tab. 14 Safe ranges of alignment indexes

车道数	设计速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	平曲线半径/km	直线段长度/km	平曲线偏角/(^\circ)	纵坡坡度/%	竖曲线半径/km
4	80	≥ 3.52	[0.45, 1.45]	(8, 31]	$[-1.2, 1.6]$	≥ 8.02
4	100	≥ 2.38	[0.53, 1.24]	(8, 38]	$[-0.9, 0.9]$	≥ 8.00
4	120		[0.55, 1.75]			
6	120		[0.47, 1.52]			
8	120		[0.46, 1.57]			

中国高速公路上实际发生的事故数,最少低 13%,最多低 52%。对设计速度为 $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的四车道高速公路, IHSDM 体现出一定的适用性;对设计速度为 $80, 100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的四车道高速公路以及设计速度为 $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的六车道和八车道高速公路, IHSDM 预测误差较大。在高速公路具体路段上, IHSDM 预测精度较低,体现出一定的不适用性。

(2)给出了基本事故预测模型与线形指标修正系数,构建了一组 IHSDM 事故预测改进模型,改进模型事故总数预测值与实际值的相对误差均在 10%以内,改进模型在具体路段上预测值与实际值相关性较强,皮尔逊相关系数均在 0.60 以上,均方根误差均在 0.30 以内,平均相对误差均在 30%以内。改进模型具有更高的精度和更好的适用性。

(3)利用改进的事故预测模型对线形指标进行敏感性分析,揭示了线形指标的变化对预测事故率的影响,给出了各线形指标的相对敏感度,事故率对各线形指标敏感性由高到低依次为直线段长度、纵坡坡度、平曲线偏角、平曲线半径与竖曲线

半径;基于不同的相对敏感度级别,从安全角度给出了各类高速公路线形指标的安全取值范围。

参考文献:
References:

[1] 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.

[2] WANG C, QUDDUS M A, ISON S G. Predicting accident frequency at their severity levels and its application in site ranking using a two-stage mixed multivariate model [J]. Accident Analysis and Prevention, 2011, 43(6): 1979-1990.

[3] 陈 斌,袁 伟,付 锐,等.连续长大下坡路段交通事故特征分析[J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(4): 75-78, 84. CHEN Bin, YUAN Wei, FU Rui, et al. Analysis of traffic accident characteristic on continuous long downgrade section[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(4): 75-78, 84. (in Chinese)

[4] 李铁洪,吴华金.长直线接小半径曲线公路交通事故成因及预防对策[J]. 中国公路学报, 2007, 20(1): 35-40. LI Tie-hong, WU Hua-jin. Causes and countermeasures of highway traffic accidents in long straight line combined with sharp curve[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(1): 35-40. (in Chinese)

- [5] 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, ZHENG Lai. Safety evaluation of mountainous expressway based on geometric alignment indexes[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(2): 103-108. (in Chinese)
- [6] 刘建蓓,郭忠印,胡江碧,等. 公路路线设计安全性评价方法与标准[J]. 中国公路学报, 2010, 23(增): 28-35.
LIU Jian-bei, GUO Zhong-yin, HU Jiang-bi, et al. Safety evaluation method and standard of highway alignment design[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(S): 28-35. (in Chinese)
- [7] 杨宏志,胡庆谊,许金良. 高速公路长大下坡路段安全设计与评价方法[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(3): 10-16, 40.
YANG Hong-zhi, HU Qing-yi, XU Jin-liang. Safety design and evaluation method of long-steep downgrade sections for expressway[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(3): 10-16, 40. (in Chinese)
- [8] 张长生,马荣国. 山区高速公路交通事故分析及多发路段鉴别[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2010, 30(6): 76-80.
ZHANG Chang-sheng, MA Rong-guo. Identifying method of traffic accident black spots on mountain freeway[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(6): 76-80. (in Chinese)
- [9] ANASTASOPOULOS P C, MANNERING F L. A note on modeling vehicle accident frequencies with random-parameters count models[J]. Accident Analysis and Prevention, 2009, 41(1): 153-159.
- [10] SAWALHA Z, SAYED T. Transferability of accident prediction models[J]. Safety Science, 2006, 44(3): 209-219.
- [11] MALYSHKINA N V, MANNERING F L. Zero-state Markov switching count-data models: An empirical assessment[J]. Accident Analysis and Prevention, 2010, 42(1): 122-130.
- [12] 杨宏志,叶亚丽,许金良,等. 高速公路单车事故建模方法[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(1): 89-94.
YANG Hong-zhi, YE Ya-li, XU Jin-liang, et al. Single-vehicle accident modelling method on freeway[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(1): 89-94. (in Chinese)
- [13] 韩 皓,白丽霞,牛增良,等. 双车道公路运行速度协调性评价相关指标取值[J]. 长沙理工大学学报:自然科学版, 2013, 10(3): 26-31.
HAN Hao, BAI Li-xia, NIU Zeng-liang, et al. Operating speed coordination analysis for two-lane highway[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology: Natural Science, 2013, 10(3): 26-31. (in Chinese)
- [14] 秦 勤,唐琰琰,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. (in Chinese)
- [15] JUANDO, LAURA G. Accidents prediction model based on speed reduction on Spanish two-lane rural highways[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2012, 53: 1011-1019.
- [16] AURELIO M, PAOLO P, NICOLA F. Evaluation of the applicability of IHSDMcrash prediction module on Italian two-lane rural roads[J]. Procedia—Social and Behavioral Sciences, 2012, 53: 933-942.
- [17] LA TORRE F L, DOMENICHINI L, CORSI F, et al. Transferability of the highway safety manual freeway model to the Italian motorway network[J]. Transportation Research Record, 2014(2435): 61-71.
- [18] LENHART T, ECKHARDT K, FOHRER N, et al. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2002, 27(9/10): 645-654.
- [19] 黄金良,杜鹏飞,何万谦,等. 城市降雨径流模型的参数局部灵敏度分析[J]. 中国环境科学, 2007, 27(4): 549-553.
HUANG Jin-liang, DU Peng-fei, HE Wan-qian, et al. Local sensitivity analysis for urban rainfall runoff modelling[J]. China Environmental Science, 2007, 27(4): 549-553. (in Chinese)
- [20] 杨 明,苏 标. 循环经济模式下的连续型交通网络设计模型与灵敏度分析[J]. 公路交通科技, 2013, 30(4): 94-100.
YANG Ming, SU Biao. A model of continuous transportation network design based on cyclic economy and sensitivity analysis[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30(4): 94-100. (in Chinese)