

文章编号:1671-8879(2018)04-0095-07

高速公路隧道路段小客车运行速度预测模型

马 聪^{1,2}, 张生瑞¹, 王亚群³

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 云南省交通科学研究院, 云南 昆明 650011;
3. 乌鲁木齐市城市综合交通项目研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830063)

摘 要:为了提高隧道进出口位置处的安全性,对隧道路段运行速度的预测模型进行研究。在分析隧道路段短、中、特长隧道路段的运行速度连续变化特性基础上,对影响运行速度的因素进行分析,并做单因素分析;选取影响运行速度的显著因素,如曲率变化率、曲度、弯坡组合、圆曲线半径进行多元回归,建立隧道路段出入口及隧道内运行速度预测模型,并通过实车数据对所建立模型进行检验。研究结果表明:建立的高速公路隧道路段运行速度模型能够精确预测隧道各路段运行速度,预测结果与实际结果的平均残差值为 4.06 km/h,且检验残差均服从正态分布,说明该模型有效;提出的运行速度预测模型的精度较高,可以在高速公路隧道路段实际应用,为高速公路隧道路段安全审查与评价山区高速公路特殊位置速度预测提供参考。

关键词:交通工程;隧道路段;速度变化特征;运行速度预测模型;模型标定

中图分类号:U491 **文献标志码:**A

Prediction model of passenger train running speed on expressway tunnel section

MA Cong^{1,2}, ZHANG Sheng-rui¹, WANG Ya-qun³

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Yunnan Transportation Research Institute, Kunming 650011, Yunnan, China; 3. Urumqi City Comprehensive Transportation Project Research Center, Urumqi 830063, Xinjiang, China)

Abstract: To improve the safety of tunnel entrances and exits, a prediction model of the speed of a car in a tunnel section was studied. Based on analysis of the continuous change characteristics of the speed of the car in short, medium, and long tunnel sections, the factors that affected the speed were determined. A single-factor analysis was performed to select the influence speed. The significant factors, such as curvature change rate, curvature, bending slope combination, and circular curve radius were obtained using multiple regressions. The prediction model of the tunnel entrance and tunnel running speed were established, and the model was tested on real vehicle data. The results show that the speed model for the car in the highway tunnel section can accurately predict the optimum limit of speed for each section of the tunnel. The average residual value of the prediction results compared to the actual results is 4.06 km/h. The test residuals conform to a positive distribution, which indicates that the model is effective, and the speed

收稿日期:2018-02-26

基金项目:国家自然科学基金项目(50878026);中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2012TD005)

作者简介:马 聪(1981-),男,云南元阳人,彝族,云南省交通科学研究院高级工程师,长安大学工学博士研究生,

E-mail:317mc@126.com。

prediction model is thus formulated. This model can be used in highway tunnel sections to provide references for safety reviews and evaluation of speed limits or predictions for special cases for expressways in mountain areas. 7 tabs, 7 figs, 16 refs.

Key words: traffic engineering; tunnel section; change characteristics of speed; prediction model of speed; model calibration

0 引言

隧道路段一直是高速公路交通安全研究的重点,在进行施工图审查及后期评价时重点,也是广大交通工作者关心的问题。20 世纪 60 年代起,欧美等发达国家就开始进行运行速度的研究。Lamm 等认为平曲线半径是影响运行速度的重要参数^[1]。Islam 等认为平曲线不同位置对运行速度有影响,并构建了曲线起点、曲线切线点、曲线终点不同位置对运行速度的预测模型^[2]。McFadden 等通过对曲线的曲度、平曲线长度、平曲线偏角和曲线前直线上速度与运行速度的相关性分析,认为其具有显著性关系^[3]。Gibreel 等分析不同交通量条件下组合曲线段的运行情况,并建立了不同位置的运行速度预测模型^[4]。Fitzpatrick 等从理论上分析了竖曲线的曲率变化率与第 85 位运行速度的关系^[5]。

随着国内外交流的不断加强,中国的交通工程学者基于中国国情逐步开始了运行速度的研究,也产生了一些实用性的研究成果。钟小明等在分析高速公路弯坡路段车辆运行速度变化特性的基础上,建立了高速公路弯坡路段运行速度预测模型^[6-8]。叶亚丽等分析了双车道二级公路小半径曲线段的特性,建立了小型车辆运行速度模型^[9]。周荣贵等结合车辆动力性能、不同纵坡坡度建立了高速公路小型车运行速度预测模型^[10]。隧道路段作为高速公路的事故黑点位置,也成为广大学者的研究热点。祝站东等研究了隧道路段的运行速度变化,得到了车速变化规律,并确定其中 6 个点作为运行速度特征点,进而利用统计回归方法,建立并验证了特征点的运行速度模型^[11]。张晋伟结合隧道位置及其运行环境,建立了公路隧道运行速度模型^[12]。方靖等从驾驶人的角度出发,研究了隧道路段的车速变化规律,建立了高速公路长大隧道特征点运行速度模型^[13-16]。

综上所述,国内外针对运行速度预测模型的研究比较全面,目前已经发展到包括平纵线形的三维回归发展,也有针对特殊路段的速度模型研究,但目前都只是开展个例研究,没有形成统一模型,这与数据量较少也有关系。为此,本文结合已有研究,在对西汉

(西安—汉中)高速公路长大隧道群路段的交通特性调研的基础上,研究复杂线形路段的速度预测模型。西汉高速公路属于山区高速公路,线形设计比较复杂,针对这一路段的研究也有一定的典型性,对于完善高速公路隧道路段的速度预测模型有一定的意义。

1 隧道路段运行速度特性分析

1.1 数据采集

本文选取西汉高速公路为研究对象。采用雷达枪、Metro Count 5600 等设备在隧道路段采集速度样本数据,采集对象为小型汽车。以实测数据作为预测模型建立的基础,速度采集点设置如图 1 所示:数据采集点 1 为进口前路段,距离隧道进口前 100 m;数据采集点 2 为隧道进口处;数据采集点 3 为隧道进口过渡段,距离进口 50 m;数据采集点 4 为隧道中间位置;数据采集点 5 为隧道出口过渡段,距离出口 50 m;数据采集点 6 为隧道出口处;数据采集点 7 为隧道出口路段,距离出口 100 m。①~⑦为数据采集点编号, $v_1 \sim v_7$ 为其对应的速度。试验设备及安装示意如图 2、图 3 所示。

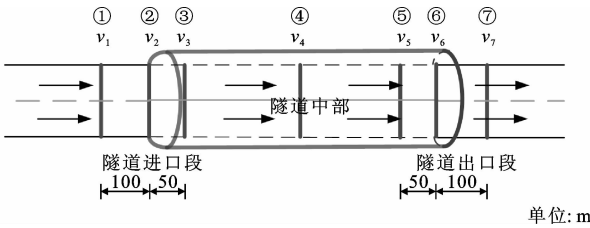


图 1 数据采集点位置

Fig. 1 Data collection points location

1.2 隧道路段连续车速变化特征

1.2.1 短隧道路段

木瓜园隧道是(西安—汉中方向,隧道长 378 m)一个短隧道,其不同位置的速度变化如图 4 所示。由图 4 可以看出,车辆在隧道入口处减速,在隧道内部一直处于加速状态,说明在隧道进口处对驾驶人的判断有一定影响,等其适应后则处于加速状态,在出口段其速度又有所波动。

1.2.2 中隧道路段

由于西汉高速公路上中短隧道比较少,本文选



图 2 Metro Count 5600 产品示意
Fig. 2 Metro Count 5600 product schematic

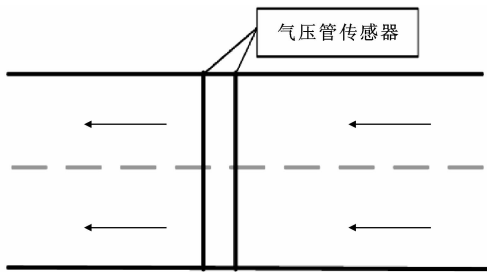


图 3 气压管安装示意
Fig. 3 Schematic of pressure pipe installation

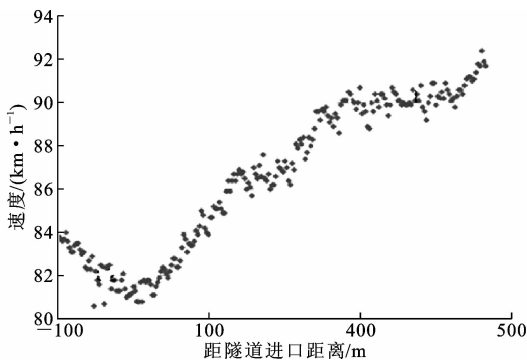


图 4 短隧道路段车速变化
Fig. 4 Speed change of short tunnel section

择龙王坪隧道进行分析。该隧道的线性比较好,入口在一条直线上,入口前和入口后都是直线路段,但隧道内有一个弯道,这对隧道内的视距有一定影响,其不同位置的车速变化如图 5 所示。从图 5 可以看出,曲线对行车有一定干扰,进入隧道由于受弯道的影响驾驶人有减速的趋势,在出口段线形良好后则一直加速驶出隧道。

1.2.3 特长隧道路段

图 6 为秦岭 1 号隧道不同位置的车速变化。秦岭 3 号隧道到秦岭 1 号隧道,是 3 条特长隧道,处于连续下坡路段(往西安方向),隧道连接段长度较小,3 号隧道和 2 号隧道连接段 190.5 m,2 号隧道与 1 号隧道连接段 585.5 m。平曲线线形变化:首先秦

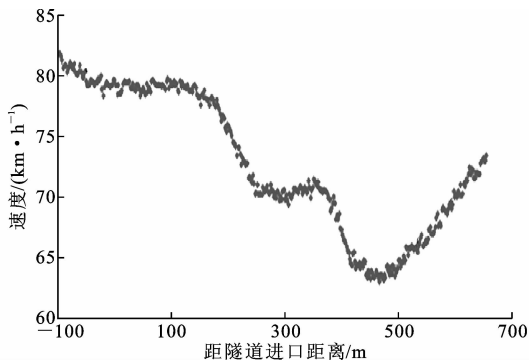


图 5 中隧道路段车速变化
Fig. 5 Speed change of middle tunnel section

岭 3 号隧道入口在 3 000 m 半径的圆曲线上,之后是长直线至出口;进入 2 号隧道 800 m 后接半径为 6 300 m 的圆曲线,秦岭 1 号出口是一个曲线长为 500 m、半径为 3 200 m 的大半径圆曲线。秦岭 3 号隧道至 1 号隧道平面线形变化较少、平曲线也都是大半径的圆曲线,平曲线线形条件较好。从图 6 可以看出,车辆在进入隧道初期一直处于加速状态(处于连续下坡路段),在隧道中段一直处于加速与减速循环交替状态。对于速度的影响主要是由坡度和坡长引起的,由于隧道中有限速监控,所以车辆速度超过 80 km/h 后,驾驶人会自动减速,同时由于道路线形的原因,减到一定速度又会加速,车辆一直围绕着一速度上下波动。

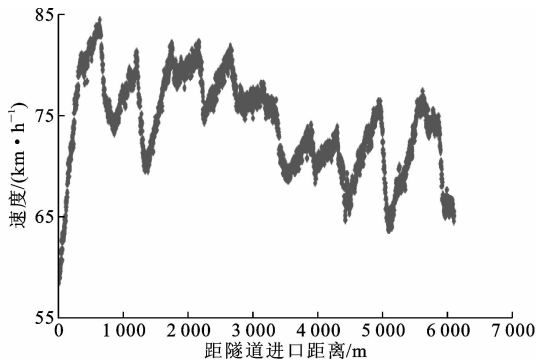


图 6 特长隧道车辆速度变化
Fig. 6 Speed change of extra long tunnel section

2 隧道路段运行速度影响因素分析

根据相关文献分析^[14-16]可知,影响隧道路段运行速度的影响因素主要有纵坡、曲率变化率、曲度、弯坡组合、圆曲线半径等。本文根据检测到的隧道路段小型车(剔除大型车的数据)的速度变化特征,对该路段的线形特征进行整理,分析其相关性,为进一步建模提供帮助。首先针对涝峪口—秦岭 3 号隧道间运行速度与相关因素之间的散点图,从其变化

趋势分析二者之间的相关性,并进行拟合,拟合公式如表 1 所示。

表 1 运行速度与相关因素之间拟合公式

Tab. 1 Fitting formula between line velocity and related factors

影响因素	拟合公式	判定系数	说明
纵坡坡度	无	无	纵坡坡度较单一,对速度的影响也较小,没有相关性
曲率变化率	$v=-0.1067C_{CRs}+79.646$	0.7668	相关性明显
曲度	线性描述, $v=-2.2686D+78.68$;非线性(对数)描述, $v=-5.434\ln(D)+74.656$	0.7768, 0.8375	相关性明显
弯坡组合变量	$v=-1.4393C_{BS}+80.264$	0.6039	相关性明显
圆曲线半径	$v=5.232\ln(R)+36.007$	0.8013	相关性明显

由表 1 可以看出:由于该路段主要是上坡路段,纵坡坡度比较单一,对速度的影响也比较小,因此本文在建模时不考虑纵坡坡度的影响;曲率变化率 C_{CRs} 与速度相关性较大,从单因素分析来看,曲率变化率对速度影响也较大;速度随着曲度 D 的增加呈逐渐降低,说明曲度影响驾驶人的判断,对速度也有一定影响,可以用线性和非线性分别拟合表达,其判定系数分别为 0.776 8 和 0.837 5;弯坡组合变量 C_{BS} 与速度关系较显著,随着弯坡组合变量的增大,速度呈下降趋势;复杂路段对速度的影响较大,采用线性拟合判定系数为 0.603 9,判定系数略低,这可能与该路段的线形组合比较复杂有关;圆曲线半径与速度的变化呈对数关系,模型的判定系数为 0.801 3,其相关性较好。

2.1 隧道路段通用模型建立

2.1.1 因子共线性诊断

通过前文分析可知,隧道入口处速度、纵坡坡度、曲率变化率、曲度、弯坡组合对隧道的运行速度的影响均较大。为了保证建立模型的客观性,对各影响因子之间的相关性进行分析,以达到每个因子变量都能很好的体现其特性,剔除无相关的因子,采用 SPSS 对自变量进行共线性诊断,得到因变量与自变量的相关系数矩阵,见表 2。从表 2 可以看出,曲度和半径线性相关,因此应该剔除一个,根据其特征和前文的相关性分析,最后选择曲度建立回归模型。

2.1.2 建立回归模型

在隧道群路段,从单因素分析中可以看出(表

表 2 因子相关系数矩阵

Tab. 2 Correlation coefficients matrix of factors

影响因素	隧道入口处速度	曲率变化率	曲度	弯坡组合变量	圆曲线半径
隧道入口处速度	1.000	-0.900	-0.900	-0.870	0.890
曲率变化率	-0.900	1.000	0.082	0.086	-0.085
曲度	-0.900	0.082	1.000	0.089	-0.680
弯坡组合	-0.870	0.086	0.089	1.000	-0.075
圆曲线半径	0.890	-0.085	-0.680	-0.075	1.000

1),各影响因素与运行速度之间影响显著。因此,预测模型采用线性分析,建立隧道不同位置的预测模型如下

$$v_1=V_{FFS}+v_l+f(C_{CRs},C_{BS},D)$$

(1)

$$v_2=v_1+v_l+f(C_{CRs},C_{BS},D)$$

(2)

$$v_3=v_2+v_l+f(C_{CRs},C_{BS},D)$$

(3)

$$v_4=v_3+f(C_{CRs},C_{BS},D)$$

(4)

$$v_5=v_4+v_l+f(C_{CRs},C_{BS},D)$$

(5)

$$f(C_{CRs},C_{BS},D)=\left. \begin{matrix} b_0+b_1C_{CRs}+b_2C_{BS}+b_3D \\ b_0+b_1C_{CRs}+C_{BS}^{b_2}+b_3D \end{matrix} \right\}$$

(6)

式中: V_{FFS} 为自由流车速(km/h); v_l 为速度调节值; $b_0、b_1、b_2、b_3$ 为待定系数。

3 实例验证

3.1 实例基本信息

本文选取西汉高速公路涝峪口—秦岭 3 号隧道的隧道路段进行模型参数标定。西安鄠邑涝峪口(K33+050)—秦岭 3 号隧道出口(K76+650),路线长 43.60 km,秦岭 1 号隧道进口八里坪(K58+650)—秦岭 3 号隧道出口正河(K76+650)为穿越秦岭的特长隧道群路段,路线长 18 km,设计车速 80 km/h^[14]。

3.2 运行车速预测

3.2.1 样本数据

对西汉高速公路调查的数据整理,得到样本数据见表 3。本次模型校验主要说明模型的有效性,因此,本文仅对隧道入口位置的速度进行预测。选取位置 1 处的速度进行预测,其他位置以此类推,具体参数如表 3 所示。

3.2.2 模型参数标定

本文借助 MATLAB 软件,实现数据的回归、参数检验、模型检验。在参数标定中,根据本文模型,剔除不相关数据,最后选取表 3 中 1~20 行数据进行模型的参数标定,并采用 5~25 行数据进行模型的检验。

表 3 隧道进口处各因子数据
Tab. 3 Each factor data at entrance of tunnel

序号	隧道进口 桩号	隧道进口前 100 m 处车速 $v_1/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	隧道进口前 100 m 曲率变化率 $C_{\text{CRs}}/((^\circ)\cdot\text{km}^{-1})$	隧道进口曲率 变化率 $C_{\text{CRs}}/$ $((^\circ)\cdot\text{km}^{-1})$	弯坡组合 变量 $C_{\text{BS}}/$ $(\%\cdot\text{km}^{-1})$	曲度 D	纵坡 $G/\%$	圆曲线 半径 r/m
1	K037+010.0	81.70	137.85	155.28	3.94	1.09	2.80	300.00
2	K044+397.0	93.60	38.20	0.00	3.68	0.29	3.81	225.00
3	K045+039.0	81.69	126.99	117.54	8.24	5.14	2.90	6 000.00
4	K045+293.5	83.39	136.15	127.80	9.33	5.83	1.65	149.33
5	K046+003.5	73.15	121.76	152.62	16.93	7.77	2.53	600.00
6	K046+841.0	94.91	103.08	0.00	4.83	0.29	2.53	6 000.00
7	K048+074.5	69.52	154.92	186.48	11.05	11.71	4.00	1 300.00
8	K049+250.5	75.00	45.43	73.36	4.22	2.91	2.02	6 000.00
9	K049+470.0	89.41	77.86	0.00	4.22	0.29	2.02	400.00
10	K049+960.0	85.50	50.07	43.97	3.08	1.34	2.72	600.00
11	K050+595.0	90.25	16.37	0.00	0.20	0.29	2.58	600.00
12	K050+950.0	73.26	94.79	113.97	5.05	4.37	2.58	600.00
13	K051+589.0	90.25	0.00	69.75	4.53	2.91	4.50	6 000.00
14	K051+753.0	81.00	69.75	69.75	4.30	2.91	2.90	2 000.00
15	K052+009.5	76.00	0.00	67.25	4.30	2.91	3.00	380.00
16	K052+345.0	72.40	67.25	0.00	7.50	0.29	3.00	6 000.00
17	K052+641.0	87.82	0.00	28.65	1.45	0.87	4.50	600.00
18	K053+739.0	73.64	77.23	115.71	7.89	4.60	2.80	340.00
19	K053+926.0	88.74	115.71	0.00	5.00	0.29	3.00	350.00
20	K054+353.0	75.63	64.69	71.13	7.50	2.91	3.80	1 600.00
21	K054+729.0	74.33	84.26	120.37	8.24	5.14	4.60	6 000.00
22	K056+674.5	74.32	128.74	161.03	8.57	4.99	4.60	3 300.00
23	K058+339.5	90.74	20.93	26.65	2.38	1.09	2.80	300.00
24	K058+725.0	84.30	26.94	0.00	7.67	0.29	3.81	225.00
25	k065+434.5	90.25	17.36	20.46	1.39	0.53	2.90	6 000.00

注:数据计算时,将直线路段假设为半径 $r=6\,000\text{ m}$ 的大半径圆曲线。

(1)参数标定
根据表中的数据对模型参数进行标定,形式为
$$v_1=87.610\,2+0.024\,7C_{\text{CRs}}-0.643\,2C_{\text{BS}}-1.2789D\quad R^2=0.438\,3\quad (7)$$

根据数据对回归系数进行分析,其区间估计如表 4 所示, v_0 为常数项。

表 4 回归系数的区间估计

Tab. 4 Interval estimation of regression coefficients		
参数	下限	上限
v_0	81.244 3	93.976 1
b_1	-0.057 6	0.107 0
b_2	-2.079 0	0.792 6
b_3	-2.890 9	0.333 2

(2)STATS 统计量检验
将回归模型的统计量进行检验,STATS 值的结果为[0.638 3 4.161 1 0.023 4 41.578 9]对应的

$R^2=0.638\,3$, F 值为 4.161 1, p 值为 $0.023\,4<0.05$,所以本文模型可用。

(3)残差检验
将参数代入初次拟合的模型中,对隧道入口处的速度进行计算,并计算其残差,发现第 16 组数据残差值偏离较大。为了使模型的精度更好,剔除第 16 组数据,重新对模型进行回归得到
$$v_1=87.531\,3+0.015\,9C_{\text{CRs}}+0.010\,6C_{\text{BS}}-2.061\,1D\quad R^2=0.557\,2\quad (8)$$

剔除异常值后回归系数的区间估计如表 5 所示。

STATS 检验结果为 [0.557 2 6.292 4 0.005 6 32.144 6], $R^2=557\,2$, F 值为 6.292 4, p 值为 $0.005\,6<0.05$,所以模型可用。根据新的模型,结合数据计算残差值及残差置信区间,如表 6 所示。从表 6 可以看出,模型拟合后的残差值均在残

表 5 剔除异常值后回归系数的区间估计
Tab. 5 Interval estimation of regression coefficients
after eliminating abnormal values

参数	下限	上限
w_0	81.903 1	93.159 4
b_1	-0.057 3	0.089 1
b_2	-1.386 6	1.407 8
b_3	-3.648 2	-0.473 9

表 6 残差值及残差置信区间
Tab. 6 Residual error values and residual error
confidence interval

序号	实测值	预测值	残差值	置信区间	
				下限值	上限值
1	81.70	87.51	-5.814 3	-15.725 0	4.096 8
2	93.60	87.58	6.021 2	-5.203 7	17.246 0
3	81.69	80.11	1.580 0	-8.004 7	13.237 0
4	83.39	77.79	5.615 1	-5.529 6	16.760 0
5	73.15	73.63	-0.478 57	-7.093 7	6.136 6
6	94.91	89.32	5.590 0	-3.453 1	16.412 0
7	69.52	66.21	3.310 0	-2.225 1	10.911 0
8	75.00	82.29	-7.299 3	-18.522 0	3.923 5
9	89.41	88.22	1.196 0	-10.465 0	12.857 0
10	85.50	85.59	-0.096 74	-12.086 0	11.893 0
11	90.25	87.20	3.054 5	-8.065 4	14.174 0
12	73.26	80.08	-6.822 3	-17.826 0	4.181 5
13	90.25	81.57	8.680 0	-1.193 3	17.952 0
14	80.99	81.76	-1.686 1	-13.693 0	10.321 0
15	76.00	81.57	-5.579 1	-16.171 0	5.012 9
17	87.82	85.75	2.066 5	-9.142 8	13.276 0
18	73.64	79.36	-5.719 7	-17.269 0	5.829 7
19	88.74	88.83	-0.083 0	-11.054 0	10.888 0
20	75.63	82.63	-7.009 7	-18.082 0	4.062 3

差置信区间内。

(4)模型精度检验

用第 5~25 组数据代入式(8)中,计算预测值和残差值,并进行模型精度检验,如表 7 所示。由于第 16 组数据在预测模型时偏离较大,为保证预测模型精度,已经剔除。

残差值 0 值的附近分布,并不呈现一定的规律性,所以满足残差。残差的独立性按 Durbin-Watson 检验法检验,计算残差的 Durbin-Watson 检验统计量 $d=2.51>2.0$,为负序列相关。

将残差的数据进行拟合得到图 7,对图 7 数据趋势进行分析,发现该模型的残差服从正态分布。

从表 7 还可知,本文模型预测的运行速度与实际运行速度的平均残差值为 4.06 km/h。检验残差的分布服从正态分布,说明本文建立的模型有效。

表 7 隧道进口入口处运行速度比较
Tab. 7 Comparisons of running speed at
entrance of tunnel

			km/h
序号	实际观测值	预测值	残差
5	73.15	73.63	0.48
6	95.60	88.62	-6.98
7	70.30	65.99	-4.31
8	75.00	82.29	7.29
9	89.41	88.22	-1.19
10	85.50	85.59	0.09
11	90.25	87.20	-3.05
12	73.26	80.08	6.82
13	90.25	81.57	-8.68
14	81.00	82.68	1.68
15	76.00	81.57	5.57
17	87.82	85.75	-2.07
18	73.64	79.36	5.72
19	88.74	88.83	0.09
20	75.63	82.63	7.00
21	74.33	78.36	4.03
22	74.32	79.38	5.06
23	90.74	85.64	-5.10
24	84.30	87.44	3.14
25	90.25	86.73	-3.52

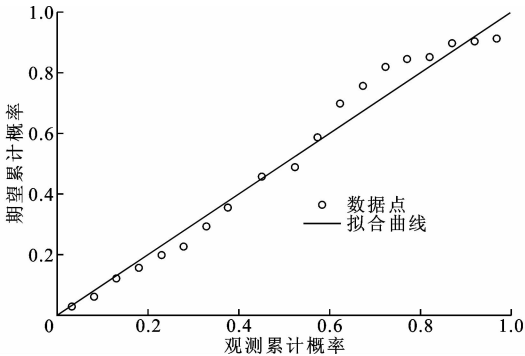


图 7 残差正态概率
Fig. 7 Normal probability of residual error

4 结 语

(1)在采集的小型车速度数据的基础上,选取了曲率变化率、弯坡组合和曲度为自变量,建立了多元统计回归的隧道路段运行速度模型,并采用实测数据标定模型参数,并对模型参数进行了分析,最后对模型进行实证性验证。

(2)建立的高速公路隧道路段运行速度模型能够精确预测运行速度,预测结果与实际结果对比发现,二者的平均残差值为 4.06 km/h,且检验残差值服从正态分布,表明本文建立的模型有效;该模型可

用于高速公路隧道路段安全性审查与评价,预测山区高速公路特殊位置的车速。

(3)本文模型未考虑大型车混入率对小型车速度的影响,且由于隧道中车辆速度调查较困难,样本量也有限;随着调查手段的更新,以后可将大型车混入率及驾驶人的主观影响作为一个速度影响参数。

参考文献:

References:

- [1] LAMM R, CHOUEIRI E M, HAYWARD J C, et al. Possible design procedure to promote design consistency in highway geometric design on two-lane rural road [J]. Transportation Research Record, 1988 (1195): 111-122.
- [2] ISLAM M, SENEVIRATNE P. Evaluation of design consistency of two-lane rural highways[J]. ITE journal, 1994, 64(2): 28-31.
- [3] MCFADDEN J, ELEFTERIADOU L. Evaluating horizontal alignment design consistency of two-lane rural highways: Development of new procedure[J]. Transportation Research Record, 2000(1737): 9-17.
- [4] GIBREEL G M, EASA S M, EL-DIMEERY I A. Prediction of operating speed on three-dimensional highway alignments[J]. Journal of Transportation Engineering, 2001, 127(1): 21-30.
- [5] FITZPATRICK K, ELEFTERIADOU D, HARWOOD D, et al. Speed prediction for two lane rural highways [R]. Mclean: Federal Highway Administration, 1999.
- [6] 钟小明, 荣建, 刘小明, 等. 高速公路弯坡路段小客车自由流运行速度模型研究[J]. 公路交通科技, 2004, 21(12): 84-88.
ZHONG Xiao-ming, RONG Jian, LIU Xiao-ming, et al. Research on free-running speed model of passenger cars on curved slope section of expressway[J]. Journal of Highway and Transportation, 2004, 21(12): 84-88.
- [7] 钟小明, 元海英, 荣建, 等. 用于路线设计的小客车速度模型研究[J]. 北京工业大学学报, 2005, 31(2): 155-160.
ZHONG Xiao-ming, YUAN Hai-ying, RONG Jian, et al. Research on speed model of passenger cars for route design [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2005, 31(2): 155-160.
- [8] 钟小明. 平曲线半径及纵坡对高速公路自由流运行速度的影响[D]. 北京: 北京工业大学, 2003.
ZHONG Xiao-ming. The influence of the radius of the flat curve and the longitudinal slope on the free-flow speed of the expressway[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2003.
- [9] 叶亚丽, 许金良, 杨宏志, 等. 双车道二级公路小半径曲线段“运行速度-半径”模型研究[J]. 公路, 2009 (4): 104-108.
YE Ya-li, XU Jin-liang, YANG Hong-zhi, et al. Research on “running speed-radius” model of small radius curve section of two-lane secondary road[J]. Highway, 2009(4): 104-108.
- [10] 周荣贵, 孙家凤, 吴万阳, 等. 高速公路纵坡坡度与运行速度的关系[J]. 公路交通科技, 2003, 20(4): 34-37.
ZHOU Rong-gui, SUN Jia-geng, WU Wan-yang, et al. Relationship between grade slope and running speed of expressway [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2003, 20(4): 34-37.
- [11] 祝站东, 荣建, 周伟. 高速公路隧道路段小客车运行速度模型研究[J]. 公路交通科技, 2010, 27(7): 123-127.
ZHU Zhan-dong, RONG Jian, ZHOU Wei. Study on the model of passenger car running speed in expressway tunnel section [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(7): 123-127.
- [12] 张晋伟. 高速公路隧道及互通区运行车速模型研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2009.
ZHANG Jin-wei. Research on speed model of expressway tunnel and interchange area [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2009.
- [13] 方靖, 汪双杰, 祝站东, 等. 高速公路隧道路段大型车运行速度模型[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(3): 90-94.
FANG Jing, WANG Shuang-jie, ZHU Zhan-dong, et al. A model of large vehicle running speed in expressway tunnel section [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(3): 90-94.
- [14] 王亚群. 高速公路隧道小客车运行速度预测模型研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
WANG Ya-qun. Study of operating speed prediction model for passenger cars in tunnel of expressway[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [15] 赵跃峰, 张生瑞, 魏华. 隧道群路段运行速度特性分析[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2012, 32(6): 67-72, 110.
ZHAO Yue-feng, ZHANG Sheng-rui, WEI hua. Operating speed characteristics of tunnel group section[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2012, 32(6): 67-72, 110.
- [16] 张驰. 考虑空间视野的高速公路运行速度预测模型与应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.
ZHANG Chi. Study on the operating speed prediction model and application of freeway based on spatial vision[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.