

# 高速公路上坡路段 6 轴铰接列车运行速度预测模型\*

张 驰<sup>1,2▲</sup> 胡瑞来<sup>1,2</sup> 向德龙<sup>3</sup> 张 宏<sup>1,2</sup> 张 敏<sup>1</sup>

(1. 长安大学公路学院 西安 710064;

2. 陕西省交通基础设施建设与管理数字化工程研究中心 西安 710064;

3. 四川省公路规划勘察设计研究院有限公司 成都 610041)

**摘 要:** 为确保车辆在上坡路段的行驶安全,针对高速公路 6 轴铰接列车在上坡路段运行速度预测误差大、安全运营管理难的问题,提出了面向上坡路段 6 轴铰接列车的运行速度预测模型。采用雷达测速仪和 AxleLight 路侧激光仪采集西南某山区高速公路 5 处连续上坡路段的 6 轴铰接列车的交通流数据,并对实际运行速度与现有规范预测模型进行对比分析。以纵坡坡度、纵坡长度、车辆比功率、初始运行速度 4 个参数为变量,构建上坡路段运行速度预测模型。提出了预测模型误差修正方法,并分析了模型的有效性。结果表明:现有规范运行速度模型对 6 轴铰接列车运行速度的预测平均误差率达到了 25.37%,模型误差较为显著;上坡路段 6 轴铰接列车的运行速度与坡度、坡长呈负相关,与车辆比功率呈正相关;构建的多元线性回归模型拟合优度  $R^2$  为 0.978,且满足相关检验指标;模型预测速度与实际速度差在 2~4 km/h 之间,相对误差平均值为 8.86%,其结果较规范模型降低了 16.51%;考虑交通密度因素修正后,模型预测速度与实际速度差在 1 km/h 以内,相对误差平均值为 1.08%,其结果较未经修正的预测模型降低了 7.78%,较规范模型降低了 24.29%。由此可见,该速度预测模型对长上坡路段 6 轴铰接列车运行速度预测的准确性提升明显。

**关键词:** 道路工程;6 轴铰接列车;运行速度预测模型;回归分析;纵坡路段

**中图分类号:** U491.2+55 **文献标识码:** A **doi:**10.3963/j.jssn.1674-4861.2022.04.014

## A Prediction Model for Operation Speed of Six-axis Articulated Trains in Uphill Sections of Expressways

ZHANG Chi<sup>1,2▲</sup> HU Ruilai<sup>1,2</sup> XIANG Delong<sup>3</sup> ZHANG Hong<sup>1,2</sup> ZHANG Min<sup>1</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Research Center of Digital Construction and Management for Transport Infrastructure in

Shanxi Province, Xi'an 710064, China; 3. Sichuan Highway Planning, Survey,

Design and Research Institute Ltd, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** The prediction error of operation speed of 6-axis articulated trains in uphill sections of expressways is large, and its safe operation management is challenging. An Operation Speed Prediction Model (OSPM) is proposed to address this issue. Radars and AxleLight side lasers are used to collect the traffic flow data of six-axis articulated trains at five continuous uphill sections of an expressway from Southwest China. Moreover, the actual operation speed is compared with the results from an existing standard prediction model. Then the OSPM for six-axis articulated trains in uphill sections of expressways is developed by taking the gradient and the length of the uphill, the specific power, and the initial speed of the trains as variables. Lastly, an error correction method is developed, and effectiveness of the proposed method is analyzed. The main results are shown as follows: the average rate of prediction

收稿日期:2022-06-20

\* 国家重点研发计划项目(2020YFC1512005)、四川省交通运输科技项目(2019-ZL-12、2022-ZL-04)资助

▲ 第一作者(通信作者)简介:张 驰(1981—),博士,教授,研究方向:交通安全与道路数字化研究。

E-mail: zhangchi@chd.edu.cn

error of the standard model reaches 25.37%, and the prediction error is relatively significant. The operation speed is negatively correlated to the gradient and the length of uphill, while it is positively correlated to specific power of the train. The goodness of fit of multiple linear regression model  $R^2$  is 0.978, meeting the test requirement. The difference between the predicted speed and the actual speed is in the range of 2–4 km/h, and the average relative error is 8.86%, which is 16.51% less than the standard model. Considering the influences of traffic density, the revised model can reduce the error within 1 km/h; the average relative error is 1.08%, which is 7.78% less than the original model and 24.29% less than the standard model. These results reveal that the proposed OSPM can considerably improve the accuracy of the operation speed prediction.

**Keywords:** road engineering; six-axis articulated train; operating speed prediction model; regression analysis; longitudinal slope section

## 0 引言

由于我国中西部地区复杂地形的限制,长上坡地区高速公路的线形条件和行车环境较为特殊。对于重型货车,爬坡时其运行速度折减较大,与小汽车的速度差异较大,导致小汽车行驶自由度下降、超车变道频繁。从而降低路段通行能力,导致整条道路的服务水平下降。因此合理预测长上坡路段重型货车的运行速度对于爬坡车道设置、交通安全设施设置、高危路段预测具有显著意义。

国外系统研究运行速度相关的理论模型起步较早。Donnell等<sup>[1]</sup>通过调研乡村双车道公路的货车数据,考虑了曲线半径、切线的长度等因素建立了一系列回归模型来预测水平曲线上游、中游和下游的第85百分位货车运行速度。Park等<sup>[2]</sup>通过调研大量乡村双车道公路的断面数据,研究出了运行速度与曲率半径、曲线偏角、平均日交通量等数据的关系。David等<sup>[3]</sup>发现圆曲线半径和曲率点处的坡度对重型车辆速度有显著影响,并构建了双车道农村道路水平曲线上重型车辆的速度预测模型。Maji等<sup>[4]</sup>采用逐步多元线性回归方法,建立了农村公路4车道曲线路段的轻型和重型商用车第85和第98百分位速度预测模型。林宣财等<sup>[5]</sup>通过对货车超载、大型货车占比及装载率分别对高速公路连续长大纵坡路段交通安全性影响的调查分析,发现货车功重比是交通事故多发的主要诱因。束海波等<sup>[6]</sup>分析了6轴半挂列车在高速公路不同坡度上坡路段的速度特征,并且发现半挂列车的入坡初速度对追尾事故影响较大。MacFadden等<sup>[7]</sup>首次将神经网络技术应用到双车道农村公路的运行速度预测研究中,建立了运行速度与道路几何线形的关系模型。Morris等<sup>[8]</sup>通过研究平曲线和陡坡组合对货车运行速度的影响,发现陡坡对货车运行速度的影响比客车速度更大。Svenson等<sup>[9]</sup>为量化道路曲率、表面粗糙度、坡度和货

车重量对传统60 t货车运行速度的影响,建立回归模型并解释了80%的运行速度变化。李维东等<sup>[10]</sup>利用Trucksim构建了大型货物运输车辆动力学仿真模型,以大型货物运输车辆的运行速度衰减度作为控制指标,得到各设计速度道路不同纵坡路段对应的最大纵坡长度。吴艳霞等<sup>[11]</sup>量化分析了晴朗和降雨天气下行车速度与驾驶员心率和纵向坡度之间的关系,建立了晴天和雨天驾驶员的心率增长率和行车速度与道路纵向坡度之间的量化关系模型。徐婷等<sup>[12]</sup>利用Cruise软件仿真汽车的爬坡性能,从而确定汽车在2%~9%坡度上能够达到的行驶速度,由汽车在特定坡道下的平均车速和所限制的速度折减量来确定合适的坡长。董忠红等<sup>[13]</sup>在分析爬坡速度影响规律基础上,提出了坡度和坡长设计控制指标,建立了合理坡度与坡长的函数模型,可供山区公路路线设计参考。刘学<sup>[14]</sup>通过建立1+2型和1+2+5型重型车辆动力学模型来对长大纵坡路段的车辆速度特性进行研究。

综上,国内外关于运行速度的研究主要包括2个方面:①调研大量的实际运行速度与道路线型指标的关系,并运用统计学方法建立数学回归模型;②基于相关学科理论进行分析,例如,基于车辆动力学的仿真分析、模糊聚类分析等。但是构建的预测模型忽略了车辆爬坡过程中交通流的影响,未考虑纵坡坡度较大(大于4%)的工况,且主导车型以及主导车型的比功率发生较大变化,6轴铰接列车的性能也与之之前的货运主导车型性能差异较大,因此,本文结合车辆爬坡过程的运行速度特征,通过分析运行速度与比功率、坡度、坡长的关系,构建出大型货车上坡路段运行速度预测模型,该模型适用于重载交通量和纵坡坡度较大的上坡路段,采取模型预测的运行速度可以指导长上坡路段的设计与安全行车,为上坡事故多发路段的运营和爬坡车道的设置提供理论支持。

1 路段调研与数据采集

1.1 调研路段

选取西南某山区高速公路作为调研路段。路段全长 135.5 km,设计车速 80 km/h,路基宽 24.5 m。结合路段实际观测条件,运行速度具体采集地点见表 1,其地形地貌见图 1。这类单坡接近高速公路设计最大纵坡值,且在西部地区分布广泛,对大型货车的爬坡性能影响也最大,能代表当前大型货车爬坡

时遇到的不利情况。

表 1 调研路段数据表  
Tab. 1 Research section data sheet

| 起始桩号      | 终点桩号      | 平均坡度/% | 坡长/km | 备注 |
|-----------|-----------|--------|-------|----|
| K1669+700 | K1670+700 | 4.944  | 1     | 单坡 |
| K1673+400 | K1674+500 | 4.94   | 1.1   | 单坡 |
| K1663+802 | K1664+752 | 4.76   | 0.95  | 单坡 |
| K1579+404 | K1580+804 | 4.25   | 1.4   | 单坡 |
| K1591+664 | K1592+964 | 4.6    | 1.3   | 单坡 |

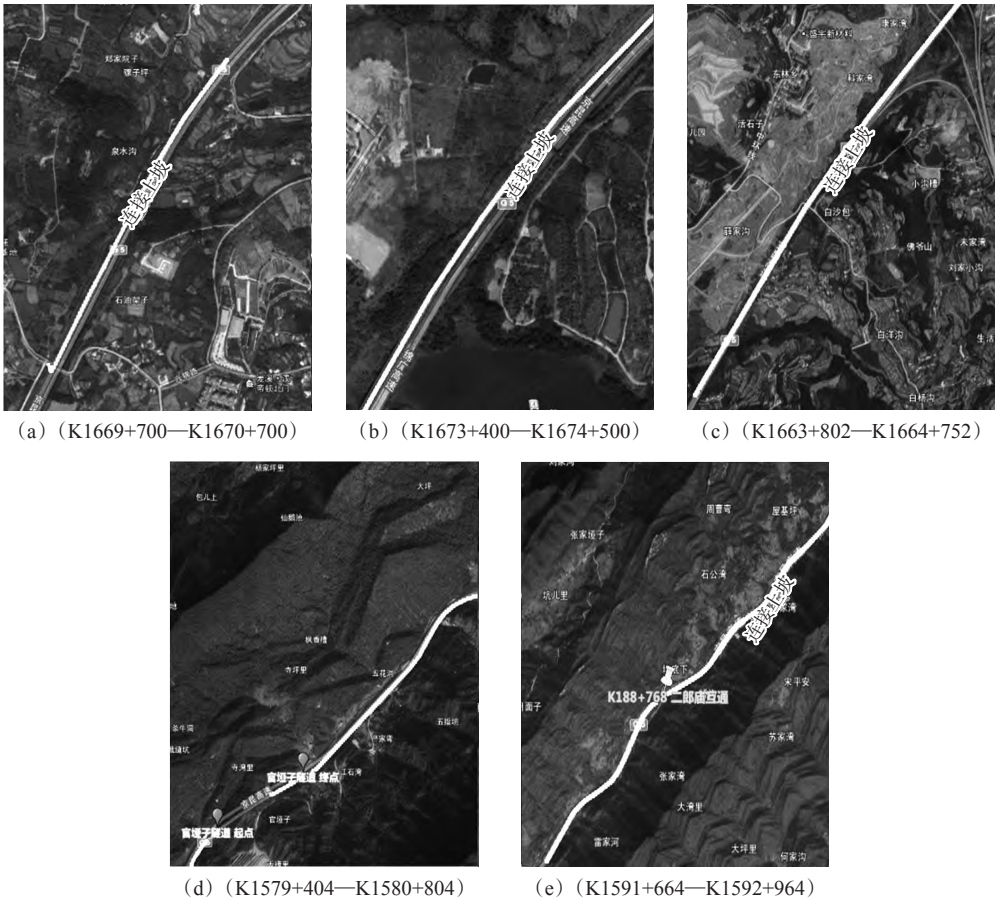


图 1 调研路段地形图  
Fig. 1 Research section topographic map

1.2 数据采集方法

调查人员于高速公路右侧护栏外,选取视距良好、位置安全、不易被驾驶员发现的位置,使用路侧激光测速仪、手持雷达测速枪、摄像机等设备分车道、车型调查车辆的运行车速、交通组成、交通量等数据,见图 2~4。

1.3 数据处理

1) 数据采集量分析。由于交通流特性中的速度、交通量等都有很强的随机性,所以为了保证这些参数的精确度,在调查中需要保证一定的数据量。对于各个断面数据量的确定可以根据式(1)计算。



图 2 实测仪器图  
Fig. 2 Research instrument diagram

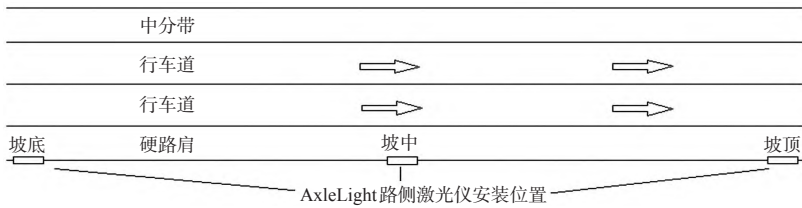


图3 仪器安装位置图

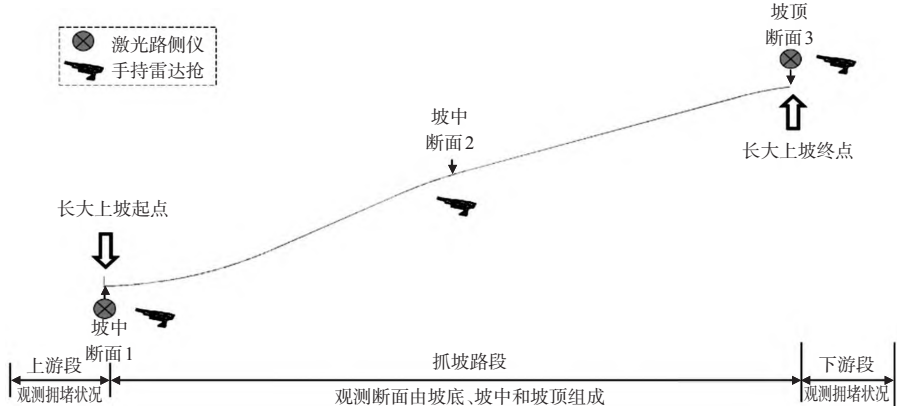


图4 调研路段观测断面示例

$$n \geq \left(\frac{SK}{E}\right)^2 \tag{1}$$

式中： $n$  为最小数据量； $S$  为样本标准差，长大上坡速度离散性较大，预取 10~30 km/h； $K$  为常数，当置信度为 95% 时，取  $K=1.96$ ； $E$  为允许误差值，假设速度允许的误差为 2~5 km/h。

取置信度为 95%，爬坡长大上坡路段车辆间的相互影响较大，不同车型的速度离散性较强，取标准差为 15 km/h；允许误差绝对值为 3 km/h。通过计算可得所需数据量为 96。考虑到实测数据的筛选和非正常驾驶的数据，调查断面各种车型共需实测数据为：120×3=360(辆)，在保证车速观测值精度的前提

下，每个调查点的观测样本量可进行适当调整。

2) 运行速度统计学分析。在车辆跟驰状态下，影响车辆运行速度的因素较为复杂。本文考虑自由流情况下的运行速度特征，根据方靖等<sup>[15]</sup>的研究表明，当车头时距大约为 9 s 时，前后车速度差平均值与速度波动性均达到 1 个较为稳定的数值，因此认为，当车头时距大于 9 s 时，车辆的运行速度属于自由流，因此剔除车头时距小于 9 s 的数据，剩余的车辆均为自由流状态。

根据调整后的数据调研结果，共分析 3 处采集点的坡底、坡顶运行速度分布检验，采用  $\chi^2$  检验法，以 K1669+700—K1670+700 坡底处为例，说明调查速度的分布检验的计算过程，见表 2。

表 2 K1669+700—K1670+700 处坡底速度分布检验  
Tab. 2 Distribution of velocity distribution at K1669+700—K1670+700

| 样本 M 分组   | 实际频数 $m_i$ | 分布概率 $\phi_1$ | 分布概率 $\phi_2$ | 理论概率 $p_i = \phi_1 - \phi_2$ | 理论频数 $np_i$ | $\chi^2$ |
|-----------|------------|---------------|---------------|------------------------------|-------------|----------|
| [50.55]   | 7          | 0.031 0       | 0.009 0       | 0.022 0                      | 5.477 3     | 0.423 3  |
| [55.60]   | 8          | 0.085 8       | 0.031 0       | 0.054 8                      | 13.653 0    | 2.340 6  |
| [60.65]   | 35         | 0.192 8       | 0.085 8       | 0.107 0                      | 26.649 8    | 2.616 4  |
| [65.70]   | 47         | 0.356 5       | 0.192 8       | 0.163 6                      | 40.738 3    | 0.962 5  |
| [70.75]   | 56         | 0.552 3       | 0.356 5       | 0.195 9                      | 48.772 8    | 1.070 9  |
| [75.80]   | 41         | 0.736 0       | 0.552 3       | 0.183 7                      | 45.732 9    | 0.489 8  |
| [80.85]   | 26         | 0.870 9       | 0.736 0       | 0.134 9                      | 33.585 5    | 1.713 2  |
| [85.90]   | 15         | 0.948 5       | 0.870 9       | 0.077 6                      | 19.316 6    | 0.964 6  |
| [90.95]   | 8          | 0.983 4       | 0.948 5       | 0.034 9                      | 8.700 3     | 0.056 4  |
| [95.100]  | 7          | 0.995 7       | 0.983 4       | 0.012 3                      | 3.068 5     | 5.037 4  |
| [100.105] | 1          | 0.999 1       | 0.995 7       | 0.003 4                      | 0.847 3     | 0.027 5  |
| [105.110] | 1          | 0.999 9       | 0.999 1       | 0.000 7                      | 0.183 2     | 3.643 0  |
|           |            |               |               |                              | 总计          | 19.345 6 |

在  $\chi^2$  检验中当  $\chi^2 < \chi_{0.05}^2$  则可以认为假设成立, 计算可得  $\chi_{0.05}^2 = (12 - 2 - 1) = 21.026 > \chi^2 = 19.3456$ , 则该组数据服从正态分布, 可以反映测试路段车辆

运行的真实情况。对其余 4 处采集点进行上述速度分布检验可得  $\chi^2$  检验结果见表 3。

由表 3 的  $\chi^2$  检验结果可见: 上述各路段的坡底、

表 3  $\chi^2$  检验结果汇总表  
Tab. 3 Summary of  $\chi^2$  test results

| 起止桩号                | 观测位置 | $\chi^2$ 检验结果                                           |
|---------------------|------|---------------------------------------------------------|
| K1669+700—K1670+700 | 坡底   | $\chi^2 = 19.3456 < \chi_{0.05}^2(14 - 2 - 1) = 21.026$ |
|                     | 坡中   | $\chi^2 = 20.3874 < \chi_{0.05}^2(15 - 2 - 1) = 22.362$ |
|                     | 坡顶   | $\chi^2 = 18.2411 < \chi_{0.05}^2(17 - 2 - 1) = 24.996$ |
| K1673+400—K1674+500 | 坡底   | $\chi^2 = 18.2432 < \chi_{0.05}^2(16 - 2 - 1) = 23.685$ |
|                     | 坡中   | $\chi^2 = 18.9634 < \chi_{0.05}^2(14 - 2 - 1) = 21.026$ |
|                     | 坡顶   | $\chi^2 = 17.0358 < \chi_{0.05}^2(15 - 2 - 1) = 22.362$ |
| K1663+802—K1664+752 | 坡底   | $\chi^2 = 20.0654 < \chi_{0.05}^2(14 - 2 - 1) = 21.026$ |
|                     | 坡中   | $\chi^2 = 19.9061 < \chi_{0.05}^2(15 - 2 - 1) = 22.362$ |
|                     | 坡顶   | $\chi^2 = 17.5654 < \chi_{0.05}^2(13 - 2 - 1) = 19.675$ |
| K1579+404—K1580+804 | 坡底   | $\chi^2 = 19.6852 < \chi_{0.05}^2(14 - 2 - 1) = 21.026$ |
|                     | 坡中   | $\chi^2 = 20.0360 < \chi_{0.05}^2(15 - 2 - 1) = 22.362$ |
|                     | 坡顶   | $\chi^2 = 19.9465 < \chi_{0.05}^2(14 - 2 - 1) = 21.026$ |
| K1591+664—K1592+964 | 坡底   | $\chi^2 = 18.7924 < \chi_{0.05}^2(13 - 2 - 1) = 19.675$ |
|                     | 坡中   | $\chi^2 = 19.5658 < \chi_{0.05}^2(16 - 2 - 1) = 23.685$ |
|                     | 坡顶   | $\chi^2 = 20.3648 < \chi_{0.05}^2(14 - 2 - 1) = 21.026$ |

坡中和坡顶的运行速度分布均满足检验要求, 数据均服从正态分布, 可以反映测试路段车辆运行的真实情况。

## 2 规范模型适用性分析

### 2.1 规范模型预测速度模型理论

现有 JTG/T B05—2015《公路项目安全性评价规范》中, (以下简称《规范》) 纵坡路段折减模型见表 4。

表 4 纵坡运行速度折算模型

Tab. 4 Longitudinal slope running speed conversion model

| 上坡坡度            | 运行速度调整值           |                    |
|-----------------|-------------------|--------------------|
|                 | 小型车               | 大型车                |
| 3% 坡度 $\leq$ 4% | 每 100 m 降低 5 km/h | 每 100 m 降低 10 km/h |
| 坡度 $>$ 4%       | 每 100 m 降低 8 km/h | 每 100 m 降低 20 km/h |

现有《规范》的理论模型<sup>[16]</sup>, 主要基于汽车行驶的动力学和运动学理论, 车辆在坡道上受到牵引力和各种阻力的共同作用, 其中阻力包括空气阻力、滚动阻力、坡度阻力和惯性阻力, 在达到平衡速度前, 汽车的行驶过程可以简化为匀减速运动, 基于此构造出比功率  $P$  与运行速度 (坡顶  $V_2$ , 坡底速度  $V_1$ )、坡长  $L$ 、坡度  $i$  的函数关系为

$$P = g \left( \frac{V_2 + V_1}{2} \right) \left[ \frac{1 + \sigma}{g} \left( \frac{V_2^2 - V_1^2}{2L} \right) + f + i + \frac{13KA(V_2 + V_1)^2}{G} \right] \quad (2)$$

式中:  $V_1$  为各车型坡底的行车速度, km/h;  $V_2$  为各车型坡顶的行车速度, km/h;  $L$  为坡长, m;  $K$  为车辆风

阻系数;  $\sigma$  为车辆的惯性阻力系数;  $A$  为迎风面积,  $m^2$ ;  $f$  为滚动摩擦系数;  $i$  为纵坡坡度, %;  $g$  为重力加速度,  $9.21 \text{ m/s}^2$ ;  $G$  为车辆空载质量加实际装载质量, kg;  $P$  为比功率, W/kg。

### 2.2 规范模型预测速度与实测速度对比分析

根据《规范》中纵坡路段大型车预测模型, 得到测试路段各类车型的预测运行速度, 并与实测数据进行对比, 各车型对应的预测误差见表 5。

通过实测值与预测值的对比可以发现, 随着车辆轴数的增加以及车辆动力性能的下降, 规范预测模型的误差也越来越大。特别是对于 6 轴半挂铰接列车, 其满载达到 49 t, 远大于规范预测模型的主导车型的车重 15 t。爬坡能力明显低于之前的货运主导车型, 从而导致上坡路段的运行速度降低, 加大了大小车之间的速差。根据近年来的相关调查<sup>[17]</sup>, 中国公路货运主要车型为 2 轴货车、6 轴半挂列车、3 轴与 4 轴单车, 其中 2 轴货车与 6 轴半挂列车的交通量比例合计约 85%, 同时 5 轴与 6 轴半挂式铰接列车在高速公路货车车数的占比也逐年增加, 从 2009 年的 37.33% 增加到 2016 年的 44.37%。货车分布情况见图 5, 可见大型半挂列车已经成为中国公路货运的重要车型。

《规范》中的预测模型未明确大型车低于 3% 的速度折减, 通过郭腾峰等<sup>[18]</sup>的研究发现 6 轴半挂列车在 3% 纵坡下的平衡速度为 42.29 km/h, 在 2% 纵坡下的平衡速度为 55.25 km/h, 因此以 3% 为限对于半挂式列车的运行速度预测显得不合理; 另外现有规范

表 5 运行速度误差对比  
Tab. 5 Comparison of operating speed errors

| 路段      | 运行速度/(km/h) |       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------|-------------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|         | 小车          |       |       | 中型车  |       |       | 大型车   |       |       | 特大型车  |       |       |
|         | 实测值         | 预测值   | 误差率/% | 实测值  | 预测值   | 误差率/% | 实测值   | 预测值   | 误差率/% | 实测值   | 预测值   | 误差率/% |
| 1       | 91.7        | 85.49 | 6.77  | 69   | 60.32 | 12.58 | 53.2  | 74.02 | 39.14 | 50.7  | 59.92 | 18.19 |
| 2       | 90.8        | 84    | 7.49  | 68.3 | 65.78 | 3.69  | 51.3  | 60.28 | 17.50 | 41    | 61.88 | 50.93 |
| 3       | 98          | 102   | 4.08  | 64.7 | 59    | 8.81  | 58.5  | 66    | 12.82 | 66.7  | 61    | 8.55  |
| 4       | 104         | 110   | 5.77  | 73.3 | 80    | 9.14  | 69.1  | 80    | 15.77 | 64.6  | 80    | 23.84 |
| 平均误差率/% | 6.03        |       |       | 8.55 |       |       | 21.31 |       |       | 25.37 |       |       |

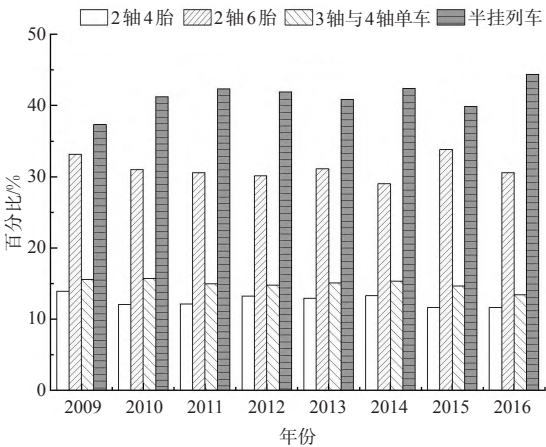


图 5 高速公路货车车辆比重变化图

Fig. 5 Change in the proportion of trucks in highway  
预测模型将 3%以上坡度均按照同一标准进行折减,未细分具体坡度对运行速度的影响。

3 上坡路段运行速度模型构建

3.1 速度误差原因分析

根据实测值与预测值对比结果可知,规范预测方法预测上坡的 6 轴半挂铰接列车运行速度偏差较大,白格韬<sup>[19]</sup>的研究表明:车辆运行速度并不仅仅受道路平纵线形影响,而是人-车-路-环境综合影响,影响因素主要有以下几个方面。

1) 交通密度因素。根据交通流理论<sup>[20]</sup>,交通密度较小时,密度对速度的影响呈指数关系;交通密度适中时,密度对速度的影响呈线性关系;交通密度较大时,密度对速度的影响呈对数关系。上坡路段行驶的车辆处于不同的交通密度状态之下,密度对速度的影响也不相同。规范运行速度预测模型未考虑到交通密度对速度的影响,故预测结果与实测偏差较大。

2) 道路因素。受上坡路段坡度及坡长的影响,货车在爬坡时,随着坡度和坡长的增大,车辆的爬坡性能越来越差,相应的速度也会变的越来越低。相同比功率下,车辆爬坡速度会随着坡度的增大而降低。同时车辆爬坡过程要保持较大的输出功率,发动机负荷较大,对于车辆速度影响也较大,特别是大型车。

3) 车辆因素。货车上坡时一般会采用低档位,受档位影响,速度存在上限。现有运行速度模型采用平衡速度作为其运行速度预测的上限值,但平衡速度与实际档位上限速度相比具有差异性,整体高于实际档位上限速度。同时由于不同的 6 轴半挂铰接列车的车辆的风阻系数和惯性阻力系数不同,对于车辆速度预测也会产生影响。

3.2 回归模型变量分析与理论依据

道路交爱系统由人、车、路、环境这 4 个部分组成,车辆运行速度也受这 4 种因素综合影响,在长上坡纵坡路段,其平曲线半径较大,对运行速度的影响较小,其纵断面线形主要包括坡度、坡长、竖曲线组成,坡度越大、纵坡越长时,车辆上坡需要克服的阻力也就越大,车辆动力性能下降也越大,并且大型车的动力性能明显低于小型车,导致大型车与小型车的运行速度在上坡路段的差异较大。竖曲线主要是让变坡点的坡度进行连续过渡,对行车舒适性和安全性有利,但是当竖曲线半径较大时,其对运行速度的影响很小<sup>[21]</sup>。车辆上坡过程中,由于车辆外观存在差异,车辆的风阻系数和惯性阻力系数不同,考虑风阻系数和惯性阻力系数对于运行速度的影响很小,同时车辆的风阻系数和惯性阻力系数也难以测量,如果考虑相关因素,会增加模型复杂程度,同时降低模型适用性和简易性。因此,选取纵坡坡度、纵坡长度、车辆比功率,以及初始运行速度 4 个参数构建纵坡路段运行速度预测模型。

本文应用以相关性分析为核心的多元线性回归分析方法,构建高速公路上坡路段 6 轴半挂铰接列车的运行速度预测模型,其满足以下基本形式。

$$y=a_0+a_1x_1+a_2x_2+\cdots+a_nx_n+\varepsilon \tag{3}$$

式中:  $a_0, a_1, \cdots, a_n$  为模型标定参数,参数值的大小决定着因变量与自变量之间的线性关系模型;  $\varepsilon$  为残差项,且  $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$ 。

对调研数据进行回归计算,从而确定模型标定参数取值,最终求得因变量与自变量之间的线性关系模型。后续通过统计学原理进行检验,增加模型可靠性。

### 3.3 回归模型建立

以自由流状态下 6 轴半挂铰接列车为研究对象,利用雷达测速枪实时记录获得 4 个上坡路段坡底坡顶 6 轴半挂铰接列车的实时运行速度,提取道路纵坡  $i$ 、坡长  $L$ 、坡底实时速度  $V_1$ 、坡顶实时速度  $V_2$ ,并利用所测数据构建模型。

1) 残差独立性检验。以  $V_1$ ,  $i$ ,  $L$ ,  $P$  为自变

表 6 共线性诊断分析

Tab. 6 Collinear diagnostic analysis

| 模型 | 维数 | 特征值   | 条件索引   | 方差比例 |       |      |      |      |
|----|----|-------|--------|------|-------|------|------|------|
|    |    |       |        | (常量) | $V_1$ | $L$  | $P$  | $i$  |
| 1  | 1  | 4.851 | 1      | 0    | 0     | 0    | 0    | 0    |
|    | 2  | 0.136 | 5.972  | 0    | 0.03  | 0.01 | 0    | 0    |
|    | 3  | 0.008 | 25.314 | 0.01 | 0.18  | 0.01 | 0.86 | 0    |
|    | 4  | 0.005 | 31.053 | 0.01 | 0.76  | 0.04 | 0.02 | 0.21 |
|    | 5  | 0.001 | 94.957 | 0.98 | 0.04  | 0.93 | 0.12 | 0.79 |

3) 回归系数分析。回归系数分析见表 7,可得上坡路段 6 轴半挂铰接列车运行速度模型为

$$V_2 = 75.814 - 0.029V_1 - 11.411L + 8.297P - 18.9i \quad (4)$$

式中:  $V_2$  为坡顶运行速度, km/h;  $V_1$  为坡底运行速

量,以  $V_2$  为因变量,建立上坡路段 6 轴半挂铰接列车运行速度模型,模型调整拟合优度  $R^2 = 0.978 > 0.5$ ,回归结果与原数据拟合程度较好,残差独立性检验值为 1.974 $\approx$ 2,表明回归相邻 2 个点残差相互独立。

2) 因变量共线性诊断分析。共线性诊断分析见表 6,由表 6 可见:条件索引值均在 (0,100),表明自变量间无复共线性。

度, km/h;  $L$  为纵坡坡长, km;  $P$  为比功率, W/kg;  $i$  为纵坡坡度, %。

回归参数的置信度水平小于 0.05,置信度达到 95%。

4) 自变量参数间线形关系检验。根据上坡路

表 7 回归系数分析

Tab. 7 Analysis of regression coefficients

| 模型参数  | 非标准化系数  |       | 标准系数   | T 检验    | Sig. | B 的 95% 置信区间 |         | 相关性    |        |        | 共线性统计量 |        |
|-------|---------|-------|--------|---------|------|--------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
|       | B       | 标准误差  |        |         |      | 下限           | 上限      | 零阶相关   | 偏相关    | 部分相关   | 容差     | VIF    |
| $C$   | 75.814  | 4.293 |        | 17.659  | 0    | 67.318       | 84.31   |        |        |        |        |        |
| $V_1$ | -0.029  | 0.019 | -0.057 | -1.567  | 0.12 | -0.066       | 0.008   | -0.676 | -0.138 | -0.021 | 0.131  | 7.627  |
| $L$   | -11.411 | 1.897 | -0.296 | -6.015  | 0    | -15.166      | -7.657  | 0.788  | -0.472 | -0.079 | 0.071  | 14.047 |
| $P$   | 8.297   | 0.195 | 0.868  | 42.463  | 0    | 7.91         | 8.684   | -0.132 | 0.967  | 0.558  | 0.414  | 2.416  |
| $i$   | -18.9   | 0.603 | -1.628 | -31.322 | 0    | -20.094      | -17.706 | -0.791 | -0.941 | -0.412 | 0.064  | 15.629 |

段 6 轴半挂铰接列车运行速度模型

$$V_2 = 75.814 - 0.029V_1 - 11.411L + 8.297P - 18.9i \quad (R^2 = 0.978) \quad (5)$$

由式(5)可求得高速公路 6 轴半挂铰接列车上坡路段的速度预测值,转化成均值为 0,方差为 1 的标准正态分布预测值,再绘制出标准化残差-预测值散点图。根据散点可知:各点分布无规律,但均匀分布在纵坐标为 0 的直线上下,说明  $V_2$  与  $L$ ,  $i$ ,  $P$ ,  $V_1$  间成线形关系。综上所述,本文所提出的 6 轴半挂铰接列车运行速度模型满足相关检验指标,适用于坡率较大的上坡路段。

## 4 实例验证与模型修正

为衡量模型是否异常以及精度是否满足要求,从实测调研数据中选取另外 2 段道路的运行速度数据对模型进行检验,本次检验采用相对误差平均值这个指标,见式(6)。

$$\bar{\Delta} = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - v_i|}{n} \times 100 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

式中:  $y_i$  为第  $i$  个样本预测值;  $v_i$  为第  $i$  个样本实测值,  $n$  为样本量。

由式(6)可计算得到新建模型的相对误差平均值,见表 8。

由表 8 可见:新建的上坡路段 6 轴半挂铰接列车运行速度预测模型的相对误差平均值分别为 8.50%, 9.23%, 均小于 10%,预测速度与实际速度相差在 2~4 km/h 范围以内,与实际运行速度趋势一致,相对误差总平均值为 8.86%,相比于规范模型降低了 16.51%,模型有效性提升,但误差仍然大于 5%。

根据前文分析,交通密度因素对于 6 轴半挂铰接列车影响较大,结合上述速度误差原因分析,可从交通密度方面进行修正。新建运行速度预测模型可以简化为式(7)。

$$V_2 = f(V_1, P, i, L) \quad (7)$$

基于研究路段平均流量、最大交通量及区间平均车速,求得交通密度值及最佳交通密度值。本路段采集的数据均属于自由流状态下,根据交通流理论选择 Edie 速度-密度模型<sup>[22]</sup>进行修正,见式(8)。

表 8 新建模型与实测数据对比分析  
Tab. 8 Comparative analysis of new model and measured data

| 路段特点            | 样本值 | 坡底速度/<br>(km/h) | 坡顶速度实测值/<br>(km/h) | 预测值/<br>(km/h) | 相对误差/% | 相对误差<br>平均值/% | 相对误差<br>总平均值/% |
|-----------------|-----|-----------------|--------------------|----------------|--------|---------------|----------------|
| $i=4.25, L=1.4$ | 64  | 78              | 46                 | 50.02          | 8.74   | 8.50          | 8.86           |
|                 |     | 80              | 46                 | 49.89          | 8.45   |               |                |
|                 |     | ⋮               | ⋮                  | ⋮              | ⋮      |               |                |
|                 |     | 78              | 48                 | 51.99          | 8.31   |               |                |
| $i=4.6, L=1.3$  | 78  | 79              | 42                 | 46.21          | 10.02  | 9.23          |                |
|                 |     | 76              | 43                 | 47.22          | 9.81   |               |                |
|                 |     | ⋮               | ⋮                  | ⋮              | ⋮      |               |                |
|                 |     | 81              | 48                 | 51.76          | 7.83   |               |                |

$$V'_2 = V_f e^{-\frac{k}{k_m}} \tag{8}$$

式中： $k$  为平均交通密度,veh/km;  $k_m$  为最佳密度,veh/km;  $V'_2$  为修正后的速度,km/h;  $V_f$  为畅行速度,km/h。

将预测模型速度作为Edie 速度-密度模型中的畅行速度,结合路段实际交通密度值及最佳交通密度值得到修正模型。

交通密度<sup>[23]</sup>可根据式(9)得到。

$$k = \frac{Q}{V_s} \tag{9}$$

式中： $k$  为平均交通密度,veh/km;  $Q$  为平均流量,veh/h;  $V_s$  为区间平均车速,km/h。

区间平均车速可由式(10)得到。

$$V_s = V_t - \frac{\sigma_t^2}{V_t} \tag{10}$$

式中： $V_t$  为时间平均车速,km/h;  $\sigma_t$  为时间平均车速观测值的标准差。

由此可得各路段区间平均车速,见表9。

表 9 各路段平均车速值  
Tab. 9 Average speed of each section

| 路段特点            | 时间平均车速/<br>(km/h) | 时间平均车速<br>标准差 | 区间平均车速/<br>(km/h) |
|-----------------|-------------------|---------------|-------------------|
| $i=4.25, L=1.4$ | 63.77             | 6.76          | 63.05             |
| $i=4.6, L=1.3$  | 61.86             | 5.98          | 61.28             |

本路段 2013—2018 年的年平均日交通量为 12 863 veh/d,货车占比为 28.94%。本路段属于交通特管区,货车只在专用车道行驶,故交通密度只考虑货车因素。

根据交通流理论,路段最大交通量可根据实际通行能力确定。实际通行能力可由基本通行能力修正得到,具体见式(11)。

$$C_2 = C_1 f_i f_p f_{HV} \tag{11}$$

式中： $C_2$  为实际通行能力,pcu/h;  $C_1$  为基本通行能力,pcu/h;  $f_i$  为路侧干扰修正系数;  $f_p$  为驾驶人特征修正系数,  $f_{HV}$  为交通组成修正系数,其值与货车

交通量比率有关,见式(12)。

$$f_{HV} = \frac{1}{1 + \sum P_T (E_T - 1)} \tag{12}$$

式中： $P_T$  为货车交通量占总交通量的百分比;  $E_T$  为车辆折算系数。

各参数取值及计算的实际通行能力结果见表10。

表 10 通行能力计算表  
Tab. 10 Capacity calculation table

| 交通流参数                | 计算结果   |
|----------------------|--------|
| $f_f$                | 1.0    |
| $f_p$                | 1.0    |
| $P_T/\%$             | 28.94  |
| $E_T$                | 5.0    |
| $f_{HV}$             | 0.4635 |
| $C_1/(\text{pcu/h})$ | 2000   |
| $C_2/(\text{pcu/h})$ | 927    |

由以上论述可得到各路段货车实际交通量及交通密度,见表11。

表 11 各路段交通密度  
Tab. 11 Traffic density of each section

| 路段特点            | 实际<br>交通量/<br>(pcu/h) | 区间平均<br>车速/<br>(km/h) | 交通<br>密度 $K$ /<br>(veh/km) | 最佳<br>密度 $K_m$ /<br>(veh/km) |
|-----------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|------------------------------|
| $i=4.25, L=1.4$ | 64                    | 63.05                 | 1.02                       | 14.70                        |
| $i=4.6, L=1.3$  | 78                    | 61.28                 | 1.27                       | 15.13                        |

用Edie 速度-密度模型对新建预测模型进行修正,修正后的模型为

$$V'_2 = f(V_1, P, i, L) e^{-\frac{k}{k_m}} \tag{13}$$

按式(13)对预测模型进行修正并计算相对误差,结果见表12。

由表12可见:修正后的模型预测速度的相对误差平均值分别为 1.19%,0.98%,均小于 5%,预测速度与实际速度相差在 0~1 km/h 范围以内,与实际半挂式列车运行速度基本一致,相对误差总平均值为 1.08%,相比于未修正模型降低了 7.78%,相比于规范模型降低了 24.29%,修正后的模型有效性明显

表 12 修正模型相对误差  
Tab. 12 Correcting the relative error of the model

| 路段特点            | 样本值 | 坡底速度/<br>(km/h) | 坡顶速度实测<br>值/(km/h) | 预测值/<br>(km/h) | 修正后模型预<br>测值/(km/h) | 修正后相对<br>误差/% | 相对误差<br>平均值/% | 相对误差<br>总平均值/% |
|-----------------|-----|-----------------|--------------------|----------------|---------------------|---------------|---------------|----------------|
| $i=4.25, L=1.4$ | 64  | 78              | 46                 | 50.02          | 46.67               | 1.45          | 1.19          | 1.08           |
|                 |     | 80              | 46                 | 49.89          | 46.55               | 1.19          |               |                |
|                 |     | ⋮               | ⋮                  | ⋮              | ⋮                   | ⋮             |               |                |
|                 |     | 78              | 48                 | 51.99          | 48.50               | 1.05          |               |                |
|                 |     | 79              | 42                 | 46.21          | 42.49               | 1.17          |               |                |
| $i=4.6, L=1.3$  | 78  | 76              | 43                 | 47.22          | 43.12               | 0.97          | 0.98          |                |
|                 |     | ⋮               | ⋮                  | ⋮              | ⋮                   | ⋮             |               |                |
|                 |     | 81              | 48                 | 51.76          | 47.59               | 0.85          |               |                |

提升。修正后的模型预测结果存在很小误差,这是由于模型回归拟合时未考虑平面线形、驾驶人、行车阻力、天气等影响因素;笔者认为在实际工程应用中,模型产生的误差情况在可接受范围内,模型可靠性良好,能够准确有效地预测上坡路段6轴半挂铰接列车的运行速度,支持相关研究和安评管理工作。

5 结束语

1) 选取西南某山区高速公路5处上坡路段,使用雷达测试仪与路测激光仪采集了测试路段上各车型坡底、坡中、坡顶的运行速度,采集数据满足统计学检验要求,对比各车型的实际运行速度与规范模型预测速度,得出小型车的规范预测模型与实地调研数据差异较小,平均误差率仅为6.3%;但是特大型车的规范模型预测速度与实际运行情况差异较大,平均误差率达到了25.37%,且其已成为现阶段我国公路货运的主导车型,因此以6轴半挂铰接列车作为本文研究车型。

2) 以自由流状态下6轴半挂铰接列车为研究对象,以纵坡坡度、纵坡长度、车辆比功率、车辆初始运行速度建立了高速公路上坡路段6轴半挂铰接列车运行速度预测模型,结果表明:上坡路段特大型车时的运行速度与坡度、坡长呈负相关,与车辆比功率呈正相关,预测模型满足回归模型的检验要求,但误差大于5%。

3) 通过速度误差分析,未考虑交通密度是导致回归模型误差较大的主要因素。在新建模型的基础上,根据交通流理论引入Edie速度-密度模型,考虑实际交通密度和最佳交通密度对模型进行修正,修正后的模型相对误差相比未修正模型降低了7.78%,只有1.08%,模型精度更高,有效性明显提升,具有较强适用性。

该模型是基于自由流状态下大型货车的实测数

据建立的,充分考虑到货车爬坡能力,对于爬坡车道的设置提供了一定的理论支持,研究结果可进一步对安评规范中运行速度相关规定进行补充说明,为高速公路安全性评价及设计提供理论支撑与参考。本文仍存在一些不足,未来可以从以下方面进行分析:①本文只考虑了6轴半挂铰接列车这种车型,未来可以考虑3轴、4轴等车型,研究不同车型条件下上坡路段的运行速度预测模型;②目前模型考虑了纵坡坡度、纵坡长度、车辆比功率、车辆初始运行速度和交通密度,未来可以考虑平面线形、复杂天气条件等因素,分析其对运行速度的影响;③此模型是基于高速公路上坡路段实际情况建立的,对于其他等级的道路,需要重新考虑主要影响因素进行建模。

参考文献  
References

[1] DONNELL E, NI Y, ADOLINI M, et al. Speed prediction models for trucks on two-lane rural highways[J]. Transportation Research Record. 2001, 1751(1):44-55.

[2] PARK Y J, SACCOMANNO F F. Evaluating speed consistency between successive elements of a two-lane rural highway[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice. 2006, 40(1):375-385.

[3] DAVID L C, BRAYAN G H, ANA M P Z, et al. Speed prediction models for trucks on horizontal curves of two-lane rural roads[J]. Transportation Research Record. 2018, 2672(17):72-82.

[4] MAJI A, SIL G, TYAGI A. 85<sup>th</sup> and 98<sup>th</sup> percentile speed prediction models of car, light, and heavy commercial vehicles for four-lane divided rural highways[J]. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems. 2018, 144(5):1-8.

[5] 林宣财,张旭丰,王佐,等. 大型货车功重比对高速公路连续下坡路段交通安全性的影响[J]. 公路交通科技, 2021, 38(9):98-104.

- LIN X C, ZAHNG X F, WANG Z, et al. Influence of power-weight ratio of large truck on traffic safety of continuous downhill section of expressway[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38 (9) : 98-104. (inChinese)
- [6] 束海波, 邵毅明. 高速公路上坡路段半挂汽车列车行驶速度特性试验研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2019, 38(9):128-132.  
SHU H B, SHAO Y M. Experimental study on operating speed characteristics of tractor-semitrailer on expressway uphill section[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science), 2019, 38(9) : 128-132. (inChinese)
- [7] MCFADDEN J, YANG W T, DURRANS S. Application of artificial neural networks to predict speeds on two-lanerural highways[J]. Transportation Research Record. 2001, 1751(1):9-17.
- [8] MORRIS C M, DONNELL E T. Passenger car and truck operating speed models on multilane highways with combinations of horizontal curves and steep grades[J]. Journal of Transportation Engineering, 2014, 140(11), 401-405.
- [9] SVENSON G, FJELD D. The impact of road geometry, surface roughness and truck weight on operating speed of logging trucks[J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 2017 (32):515-527.
- [10] 李维东, 乔建刚, 郭蕊. 基于TruckSim的大型货物运输车辆安全运行纵坡最大长度研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(8): 179-185.  
LI W D, QIAO J G, GUO R. Research on maximum length of highway longitudinal slope for safe operation of large cargo transportation vehicles based on truckSim[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(8): 179-185. (in Chinese)
- [11] 吴艳霞, 刘 剑, 黄帅等. 雨天高速公路纵坡对驾驶员心率及行车速度影响[J]. 交通信息与安全, 2021, 39(4):35-42.  
WUY X, LIU J, HUANG S, et al. Influences of longitudinal slopes of highways on drivers' heart rate and driving speeds on rainy days[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2021, 39(4): 35-42. (in Chinese)
- [12] 徐 婷, 李 敏, 杨新新, 等. 重载车爬坡下的公路临界坡长确定[J]. 交通信息与安全, 2016, 34(3): 88-95.  
XU T, LI M, YANG X X, et al. The critical length of slopes on highways for heavy-duty vehicles[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2016, 34(3): 88-95. (in Chinese)
- [13] 董忠红, 倪凤英, 柳帅蒙, 等. 长大纵坡路段重型车辆爬坡速度[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2014, 34(3): 23-27.  
DONG Z H, NI F Y, LIU S M, et al. Heavy truck climbing speed on long and steep longitudinal slope section[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition). 2014, 34(3): 23-27. (in Chinese)
- [14] 刘 学. 长大纵坡路段重型车辆荷载特性研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.  
LIU X. Study on the loading performance of long and steep longitudinal slope sections under heavy truck[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. (in Chinese)
- [15] 方 靖, 荣 建, 祝站东. 自由流状态的判别标准研究[J]. 中国公路学报, 2010, 23(增刊1):65-68.  
FANG J, RONG J, ZHU Z D. Research on discrimination criterion of free flow state[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(S1): 65-68. (in Chinese)
- [16] 中华人民共和国交通运输部. 公路项目安全性评价规范: JTG/T B05-2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.  
Ministry of Transport, People's Republic of China. Highway project safety evaluation specification: JTG/T B05-2015[S]. Beijing: China Communications Press, 2015. (inChinese)
- [17] 长安大学. 2016 中国高速公路运输量统计调查分析报告[M]. 北京: 人民交通出版社, 2017.  
Chang'an University. Statistical investigation and analysis report of China's highway transportation volume in 2016[M]. Beijing: China Communications Press, 2017. (inChinese)
- [18] 郭腾峰, 张志伟, 刘 冰, 等. 适应6轴铰接列车动力性的高速公路最大纵坡坡度和坡长[J]. 交通运输工程学报, 2018, 18(3):34-43.  
GUO T F, ZHANG Z W, LIU B, et al. Maximum grade and length of longitudinal slope adapted to dynamic performance of six-axis articulate[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18 (3): 34-43. (in Chinese)
- [19] 白铭韬. 基于线形条件的高速公路运行速度预测及控制研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.  
BAI Y T. Research on expressway speed prediction and control based on linear conditions[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013. (in Chinese)
- [20] 李 力, 姜 锐, 贾斌, 等. 现代交通流理论与应用: 高速公路交通流. 卷 I [M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.  
LI L, JIANG R, JIA B, et al. Modern traffic flow theory and application: Highway traffic flow. volume I[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011. (in Chinese)
- [21] 汪双杰, 周荣贵, 孙小端. 公路运行速度设计理论与方法[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.  
WANG S J, ZHOU R G, SUN X D. Theory and method of highway operation speed design[M]. Beijing: People's Communications Press, 2010. (in Chinese)
- [22] 刘灿齐, 陈 军. 基于Edie模型的路阻函数关系推导及其拟合分析研究[J]. 交通标准化, 2012(4): 33-36.  
LIU C Q, CHEN J. A deduction of impedance function based on edie model and its fitting analysis[J]. Communications Standardization, 2012(4): 33-36. (in Chinese)
- [23] 李希瑞. 基于收费数据的高速公路交通流特性分析及通行能力研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020.  
LI X R. Analysis of expressway traffic flow characteristics and capacity research based on toll data[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2020. (in Chinese)