

隧道群路段运行速度特性分析

赵跃峰^{1,2}, 张生瑞², 魏 华²

(1. 长安大学 杂志社, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘 要:以西安—汉中高速公路某隧道群路段的实测速度数据为基础,利用分车型的自由流速度累积曲线分析得出各观测点的运行速度,分析了隧道群路段运行速度的变化规律,重点分析了隧道长度、隧道不同位置及平纵线形变化对运行速度的影响。研究表明:不论大型车还是小型车,为了适应隧道内行车环境,在进入隧道时有约 50 m 的减速过程,减速最大幅度大型车为 4 km/h,小型车为 9 km/h;隧道出口处速度高于入口处的速度,短隧道对隧道出入口的运行速度影响较大,隧道连接段的长度对运行速度也有明显影响,连接段长度对运行速度的影响比较大;平纵线形组合路段运行速度变化幅度大,小型车达到 26 km/h,大型车为 7 km/h;根据隧道群路段运行速度特性,可以有针对性的设置诱导标志,对交通流进行引导,以弥补隧道群线形设计的不足。

关键词:交通工程;隧道群路段;运行速度;变化规律

中图分类号:U491 **文献标志码:**A

Operating speed characteristics of tunnel group section

ZHAO Yue-feng^{1,2}, ZHANG Sheng-rui², WEI hua²

(1. Magazine Company, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: On the basis of collected speed data, taking an expressway tunnel group section from Xi'an to Hanzhong as an example, the operating speed of each observation point was obtained from the free flow speed cumulative curve. The change of the operating speed was analyzed at different tunnel sections and the factors which influenced the operating speed, such as tunnel length, different positions in the tunnel and horizontal and vertical alignment were analyzed. The results show that regardless of larger vehicle or car, before entering the tunnel, the deceleration distance is approximately 50 m, the maximum range of large vehicle is 4 km/h and the car is 9 km/h. The operating speed at the tunnel exit is higher than that at entrance. The operating speed is more influenced by short tunnels, as well as by the tunnel connection section length. The change of the operating speed at the section of horizontal and vertical alignment combination is relatively large, the car is 26 km/h and the large vehicle 7 km/h. Induction signs should be set for traffic flow guidance to make up for the deficiency in the linear design of tunnel group section according to its operating speed characteristics. 3 tabs, 7 figs, 8 refs.

Key words: traffic engineering; expressway tunnel group section; operating speed; change law

0 引言

高速公路隧道是多山地区修建高速公路的特殊构造物,随着山区高速公路的建设,中国高速公路隧道的数量和里程日渐增多,在有些地区已经形成了隧道群(连续的几个相邻或毗邻隧道出现)。由于隧道的长管形状空间及其封闭性,其洞内会出现空气污染严重、洞内外亮度差异悬殊、环境照度低、噪声污染大、交通空间受限和火灾难于预防等一系列问题,已经成为高速公路运输网络的瓶颈路段;其运营水平的高低、管理的好坏,直接制约着整个高速公路能否安全畅通,影响着高速公路的服务水平的高低。同时,隧道群路段内隧道数量较多,隧道之间距离较短,使道路使用者在较短时间内进出隧道的频率增加,与高速公路其他路段相比,其在交通组成、线形特点、驾驶行为与环境协调等方面都具有自身的特性。目前,诸多学者对于高速公路、双车道公路的运行速度研究较多,但多集中在整个区段运行速度的分析^[1-3];针对隧道群路段的交通流特性的研究也是近几年才开展的,且主要集中在对单个长大隧道的交通流特性的分析,而对于运行速度的分析较少,把连续几个相邻隧道(隧道群)联合起来考虑则更为少见^[4-8]。为此,本文通过实地调查,分析隧道群路段的速度数据,得出隧道群路段车辆的运行速度的规律,以期高速公路隧道群的安全保障设施设置提供依据。

1 隧道群路段的特性

1.1 道路特性

隧道是高速公路由于受到地形条件以及构造等的限制而修建的,为密闭式结构,形成封闭的管状空间,对于驾驶人来说行车环境比较单调;而长短隧道相连,形成了隧道群,加上复杂的道路线形,其行车环境更为复杂,对车辆的速度影响比较大。

1.2 环境特性

1.2.1 通风因素

对于隧道群路段,上游隧道交通量及其特性将为下游隧道交通量预测创造条件,故对下游公路隧道通风控制有较大影响。除上游隧道交通量及其特性外,上游隧道出口污染物的排放对下游隧道的影响也必须被预知,从而保证下游隧道通风的准确性、合理性。因此,隧道群中各隧道通风的最大区别在于是否考虑上游公路隧道出口污染物对下游公路隧道入口空气的影响。

1.2.2 照明因素

对于隧道群路段,照明设计方法主要根据连接

段的长度不同而定。如果连接的长度相对较远,照明设计是独立进行,其控制方法就是单体隧道照明的控制方法;对于连接的长度较近的隧道,相邻隧道照明之间有明显的相关关系,是“明适应”、“暗适应”相互交替的过程,会给驾驶人心理和生理带来极大的影响,因此,照明的联动性也是影响隧道群路段交通特性的主要因素。

1.2.3 交通安全因素

从交通安全因素考虑,高速公路隧道出入口处亮度的急剧变化,容易诱发视觉障碍,影响驾驶人对出入口处交通标志的准确认知。据相关研究,在限速为 60 km/h 和 80 km/h 的隧道,洞外交通标志距公路隧道出口的安全距离分别为 120 m 和 140 m。驾驶人从上游隧道出口驶出,应能看到下游隧道进口的障碍物,按此考虑应保持一个停车视距,这样才能保证行车的安全。

2 运行速度调查

2.1 试验路段

西汉(西安—汉中)高速公路是中国第一条穿越秦岭山脉的高速公路,桥隧多,被誉为“入川第一路”。西汉高速公路全线设计速度为 60~80 km/h,采用双向四车道,有桥梁 458 座(单幅),隧道 137 座(单洞),隧道占路线总里程的比例超过 20%。为了研究隧道群路段的速度特性,选取西汉高速公路的典型隧道群路段进行数据采集,其中,朱雀隧道长 225 m,秦岭 1[#]隧道长 6 102 m,秦岭 2[#]隧道长 6 125 m,秦岭 3[#]隧道长 4 683 m。选取的观测点位置见下页表 1(数据采集方向为汉中→西安)。

2.2 试验仪器

考虑到隧道路段的特殊性,并能准确采集隧道出入口及隧道中的速度变化数据,本文采用的主要仪器为雷达测速仪(下页图 1)、Metro Count 5600 检测器。

2.2.1 雷达测速仪

雷达测速仪测速的基本原理是多普勒效应,其测速方法简单,只需将雷达测速仪瞄准被测车辆,即可读出该车辆的瞬时速度。技术要点为:在测速过程中,使雷达装置发射处的无线电波的方向接近车辆运行方向,即雷达测速仪应尽量与被测车的运行方向平行。

2.2.2 Metro Count 5600 检测器

Metro Count 5600 检测器的基本原理是采用橡胶气压传感技术。当车辆垂直通过气压管位置时,

表 1 试验路段速度测试点
Tab.1 Velocity tests point of test section

序号	桩号	位置	序号	桩号	位置
1	K76+443	秦岭 3# 隧道入口前 100 m 处	19	K65+435	秦岭 2# 隧道出口
2	K76+343	秦岭 3# 隧道入口	20	K65+335	秦岭 2# 隧道出口后 100 m 处
3	K76+287	秦岭 3# 隧道圆曲线起点	21	K65+131	秦岭 1#、2# 隧道连接段中点
4	K75+932	秦岭 3# 隧道圆曲线中点	22	K64+927	秦岭 1# 隧道入口前 100 m 处
5	K75+582	秦岭 3# 隧道圆曲线终点	23	K64+827	秦岭 1# 隧道入口
6	K73+760	秦岭 3# 隧道直线段	24	K64+727	距离隧道入口 100 m 处
7	K71+760	秦岭 3# 隧道出口前 100 m	25	K63+178	直线段
8	K71+660	秦岭 3# 隧道出口	26	K61+678	圆曲线终点,直线起点
9	K71+641	纵坡变坡点	27	K60+454	圆曲线段中间点
10	K71+560	秦岭 2# 隧道入口	28	K58+954	直线段终点,圆曲线段起点
11	K71+460	秦岭 2# 隧道入口前 100 m 处	29	K58+825	距离隧道出口前 100 m 处
12	K70+741	秦岭 2# 隧道直线段	30	K58+725	秦岭 1# 隧道出口
13	K70+241	秦岭 2# 隧道纵坡变坡点	31	K58+645	朱雀隧道、秦岭 1# 隧道连接段中点
14	K68+760	秦岭 2# 隧道直线段中间	32	K58+565	朱雀隧道入口
15	K66+760	秦岭 2# 隧道缓和曲线起点	33	K58+440	朱雀隧道中间点
16	K66+183	秦岭 2# 隧道缓和曲线终点	34	K58+340	朱雀隧道出口
17	K65+641	纵坡变坡点	35	K58+240	朱雀隧道出口后 100 m
18	K65+535	秦岭 2# 隧道出口前 100 m 处			



图 1 雷达测速仪

Fig.1 Radar speed meter

通过气压的反应而判断行驶距离,继而算出速度,仪器及安装方法如图 2 所示。注意事项为:应避免在弯道、陡坡等位置处安装仪器;应选择视野良好、安全合适的位置,避免树木等障碍物的遮挡;气压管传感器最多只能检测 2 个车道,因此,在对隧道群路段速度测试时主要在隧道的出入口使用。

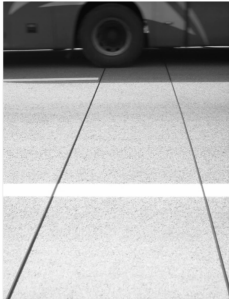
3 自由流速度累积分布

3.1 车型划分

Metro Count 5600 检测器将车辆类型划分为 12 种车型;而雷达测速仪本身不具有划分车辆类型的功能。值得说明的是,Metro Count 检测器划分的车型不便于雷达测速仪调查人员掌握,不利于本次研究工作。由于本次研究的隧道群路段的速度特性,地形条件复杂,车辆类型划分应充分考虑纵坡、坡长、曲线半径等路线指标的影响。因此,参照本次



(a) 仪器



(b) 安装方法

图 2 Metro Count 5600 检测器及安装

Fig.2 Metro Count 5600 traffic flow executive

调研的实际情况,结合 Metro Count 5600 中车辆类型划分方式,基于功率质量比和车辆的外廓尺寸,可采用聚类分析法,将车辆类型划分为 2 大类:小型车和大型车。具体车型分类见表 2。

表 2 车型分类

Tab.2 Classification of vehicles

车型	车型划分
小型车	微型车(包括微型面包车)、小客车、小货车、轻型货车、中型货车等
大型车	大型客车、大型货车、集装箱运输车、拖挂车等

3.2 自由流速度累积分布

为保证自由流,考虑隧道群路段的交通流特性,选择车头时距大于 5 s 的车辆作为分析样本,车型划分根据表 1。采用 SPSS 统计分析软件,对各观测

点的数据进行处理分析(数据采集时间为 2009 年 4 月,方向为汉中→西安,是下坡路段),得到各观测点分车型的自由流速度,并对各观测点的自由流速度数据进行累积统计,得出各点的速度累积分布曲线。由于篇幅限制,本文给出部分典型观测点速度的累计分布,如图 3 所示。

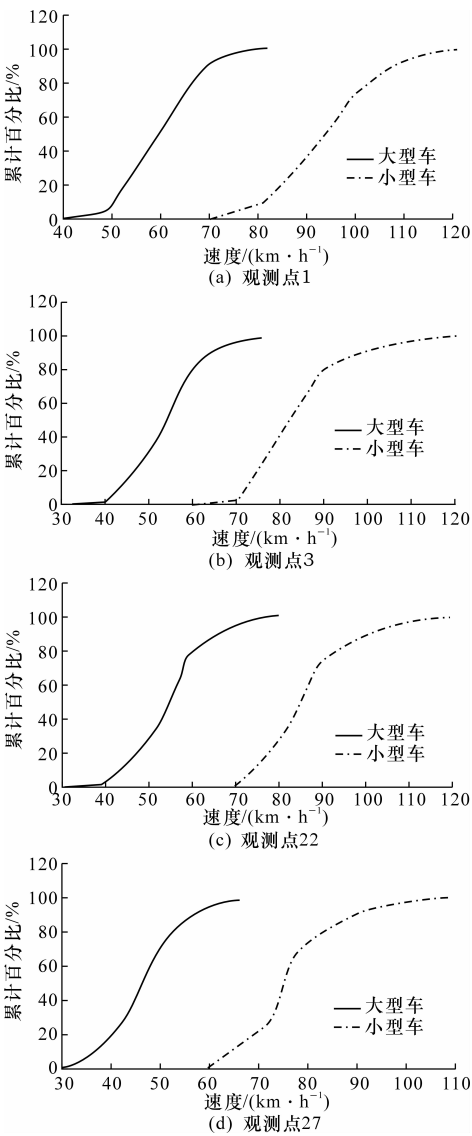


图 3 典型观测点的自由流速度累积分布
Fig. 3 Accumulated distributions
of operating speeds

从图 3 可以看出速度的分布状态,在 80%~90%区间内速度累积曲线趋于平缓,因此,取第 85% 压位车速,即运行速度进行分析。从各观测点的速度累积分布得出的运行速度见表 3。

4 隧道路段运行速度特性分析

4.1 各隧道运行速度变化特征

从表 3 可以看出,隧道群路段小型车的速度介

表 3 各观测点运行速度统计
Tab. 3 Statistics of operating speeds km/h

观测点	1	2	3	4	5	6	7	8	9
小型车	67.88	62.45	53.34	56.18	57.96	56.29	52.69	60.13	84.74
大型车	107.08	90.16	80.12	82.37	86.36	84.37	80.01	96.24	56.12
观测点	10	11	12	13	14	15	16	17	18
小型车	100.45	104.31	96.50	78.54	80.68	85.46	93.28	96.07	99.78
大型车	62.58	67.51	62.17	51.79	52.69	58.47	59.17	60.74	61.58
观测点	19	20	21	22	23	24	25	26	27
小型车	103.46	105.95	67.81	89.97	85.47	91.12	87.69	90.63	95.13
大型车	65.78	67.3	106.12	60.36	57.46	62.43	60.02	63.43	65.23
观测点	28	29	30	31	32	33	34	35	
小型车	87.50	97.85	93.58	91.12	90.03	89.69	92.10	94.78	
大型车	58.69	64.51	60.56	62.43	61.56	60.64	62.69	65.35	

于 85~110 km/h 之间,大型车在 50~70 km/h 之间,说明小型车均超过了该路段的设计速度的上限值 80 km/h,而大型车有相当一部分都没有达到下限值 60 km/h,这与西汉高速公路的本身道路特性有关,也与车辆的性能有关系。为了进一步分析隧道群路段隧道对运行速度特性的影响,本文将不同隧道观测点分开,并对其运行速度特性进行分析,速度变化特征如图 4 及下页图 5~图 7 所示。

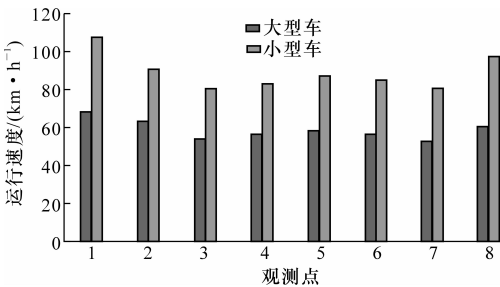


图 4 秦岭 3# 隧道运行速度变化特征
Fig. 4 Operating speeds change of Qinling 3# tunnel

秦岭 3# 隧道在一个大的圆曲线上,其速度变化特性如图 4 所示。从图 4 可以看出,隧道中运行速度的变化基本呈马鞍形形状,有 2 个点速度比较低,分别为观测点 3 和观测点 7,对其周围环境进行分析,不难发现,观测点 3 是圆曲线开始位置,适应曲线的过程有一次减速,而后速度就提高了,一直保持提速状态;到出口位置速度有一次下降,出口位置的照明要好于隧道中,而驾驶人由于在隧道中行驶时间长,到出口后有一个适应过程。在从秦岭 3# 隧道,入口前开始汽车开始减速,减速幅度小型车为 17 km/h,大型车为 14 km/h;出口处的运行速度高于入口处。

从秦岭 3# 隧道出来,是秦岭 3# 隧道与秦岭 2# 隧道的连接段,该段距离比较短,是 190.5 m,车辆出 3# 隧道即进入 2# 隧道,视觉特征变化较大。该

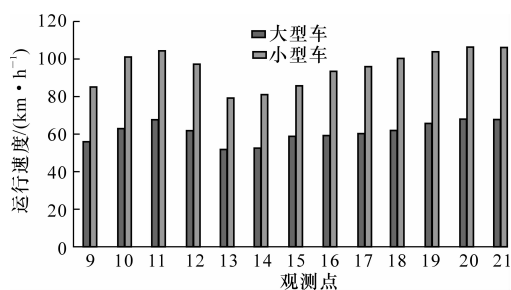


图 5 秦岭 2# 隧道运行速度变化特征

Fig. 5 Operating speeds change of Qinling 2# tunnel

处线形属于凹形竖曲线,先下坡后上坡;同时秦岭 2# 隧道入口段是一段平纵线形共同影响的路段,圆曲线全长 1 150 m,半径为 2 800 m,变坡点为 K65+641 的竖曲线长度为 476 m,半径为 140 000 m,为凸形竖曲线。因此,该段运行速度变化比较明显,运行速度变化幅度大,小型车达到 26 km/h,而大型车为 7 km/h,如图 5 所示。从图 5 可以看出,大型车和小型车曲线段平均运行速度整体偏低,特别是进入竖曲线段之后,变坡点运行速度大型车为 51.79 km/h,小型车为 78.54 km/h,均低于该高速公路设计车速。这主要是,在该路上不仅有隧道的影响,驾驶人还要不断适应平曲线形式及超高的变化,同样该段竖曲线的设置对其造成视野上的冲击,从运行速度的变化也可以看出受竖曲线变化的影响明显高于圆曲线变化的影响。观测点 13(变坡点)处竖曲线长度 566 m,前坡坡度为-0.63%,后坡坡度为 2.2%,为凸形类型,平面线形为直线段;观测点 9(变坡点)处竖曲线长度 415 m,前坡坡度为 2.14%,后坡坡度为-0.63%,为凹形类型,平面线形亦为直线段,该处位于 3# 隧道出口段及 2# 隧道入口段。在这一段上的运行速度一直处于增大趋势,主要是坡度的影响,但是从图 5 中能够看到,在出口位置,无论大型车还是小型车,其运行速度都有一个下降的过程,主要表现在增加量变少了,说明出口光线的变化对运行速度的影响与 3# 隧道是一致的。

秦岭 1# 也是一个长隧道,在进入秦岭 1# 隧道后,有一段 2.7 km 的圆曲线。该隧道段运行速度的变化如图 6 所示。在从连接段(观测点 5)开始,汽车有一个减速过程,一直到隧道入口后 100 m,减速幅度小型车达到 10 km/h,大型车约为 8 km/h,说明驾驶人受“暗适应”的影响较大,当驾驶人适应隧道内的照明后,车速也有提高趋势。然而从图中可以看出,不管是大型车还是小型车,同前面 2 个隧道,运行速度呈马鞍形变化,且比较明显。在隧道中间有 2 个点运行速度比较低,分别是观测点 25 和 29。环境与 3# 隧道类似。在秦岭 1# 隧道内圆曲线

段,由于圆曲线半径大,且曲线较长,汽车在圆曲线段行驶速度一直处于增长状态;在秦岭 1# 隧道直线段,汽车基本保持匀速行驶,但是由于受到长大上坡的影响,速度总体趋势处于下降状态。

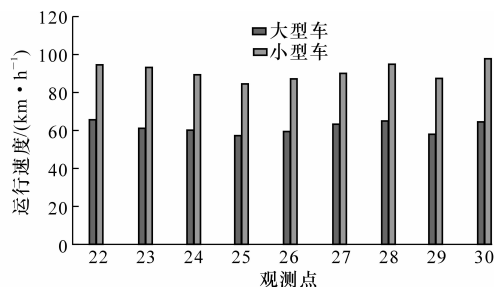


图 6 秦岭 1# 隧道运行速度变化特征

Fig. 6 Operating speeds change of Qinling 1# tunnel

图 7 是朱雀隧道各观测点的运行速度变化特征。朱雀隧道是一个短隧道,该隧道段车辆速度的变化不大,不论是大型车还是小型车,变化幅度为 4 km/h。从图 7 可以看出,大型车的运行速度均大于 60 km/h,最大值是在出口位置,达到 65 km/h;小型车的运行速度在 90~95 km/h,出口处的速度最大。大型车和小型车运行速度变化规律基本相同,说明受隧道的影响主要是对驾驶人的影响。在短隧道中,“暗适应”比较容易适应,对驾驶人的影响较小,能够快速恢复原有状态,总体上隧道内的运行速度大于隧道进口处,而最大值出现在出口处。从这几个隧道的运行速度变化可以看出,在长隧道的出口位置,运行速度均有一次下降过程,说明长隧道比短隧道对驾驶人的视线影响较大,出口位置的光线好于隧道中,而驾驶人由于在隧道中行驶时间长,到达出口有一个适应过程。

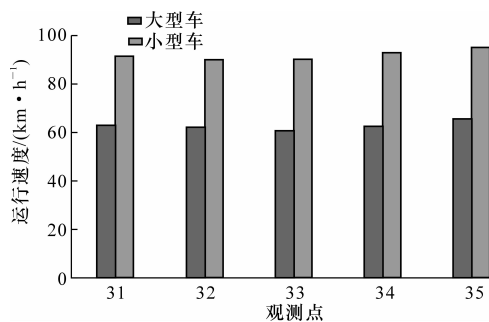


图 7 朱雀隧道运行速度变化特征

Fig. 7 Operating speeds change of Zhuque tunnel

4.2 运行速度连续变化特征

4.2.1 连续速度变化趋势

在隧道群路段小型车的速度波动大于大型车,这主要是由车辆的性能决定的。车辆在隧道中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坡度和坡长。在持续一段下坡路段后,车辆速

度达到设计车速 80 km/h 后,驾驶人会自动减速,直到驾驶人认为的安全速度;保持一段时间之后又会随着下坡加速、驾驶人控制车速呈减速状态的循环过程。车速在隧道中保持一较低水平范围波动,在出口处有一明显加速过程。

汽车在隧道群直线段行驶时,由于没有受到明显的隧道照明因素的影响,行驶速度比较稳定,没有明显的变化趋势;在隧道内长直线段行驶时,由于受到纵坡、隧道照明因素以及隧道间距的影响,总体呈现下降的趋势,且下降幅度比较明显。

4.2.2 连续速度变化特征分析

从隧道进口前 100 m 处到出口外 100 m 整个区段内,车速变化有以下特征:①对于长度小于 1 000 m 的中隧道与短隧道,由隧道进口前 100 m 到进口一直在减速,减速幅度在 4 km/h 左右,然后由进口直到出口外 100 m,车辆一直处于缓慢加速状态;②对于长隧道和特长隧道,平面线形一般变化不大,对速度的影响因素是纵断面线形,由于通风需要,隧道的竖曲线都设置成单坡,坡长一般较长。下坡路段,速度变化受驾驶人对速度的感知程度,驾驶人需要把速度控制在安全速度范围内;上坡路段,大型车爬坡时,排放大量尾气,隧道内行车环境的改变会促使小型车车辆加速离开隧道。

车辆在隧道进口处有一个减速过程,距离约为 50 m,减速最大幅度大型车为 4 km/h,小型车为 9 km/h,而在隧道出口处速度明显加快。其主要原因是:当车辆驶入隧道时,由于驾驶人受到“暗适应”的影响,引起视觉震荡,使车速发生变化;当车辆在隧道行驶时,随着驾驶人对隧道内环境的适应,车辆的速度有所提高,但提高幅度不是很大;当车辆即将驶出隧道时,由于驾驶人急于驶出隧道,车辆速度有了明显提高。

4.3 线形对速度的影响

(1)平曲线。在隧道内圆曲线段行驶时,受圆曲线半径影响较大,速度总体是有上升的趋势。在朱雀隧道段,车速降低主要是因为隧道入口前后,驾驶人必须降低车速来适应隧道环境,相比后面 2 个隧道的降低幅度,明显较小;在秦岭 1[#]隧道入口后的一段大半径平曲线上,行驶速度总体是较高的,排除纵坡因素的影响,可以看出圆曲线上的运行速度总体是持续上升的。对比这 2 种半径的圆曲线的行驶速度变化可知,小半径的圆曲线对小客车行驶速度的影响较大,大半径的圆曲线不仅能提高行车的舒适性,同样也保证了行车的安全性。

(2)竖曲线。汽车受竖曲线变化的影响较大,变坡点在隧道内时,车辆行驶速度在变坡点前后呈现

不同的升降趋势;在驶入变坡点之前,由于是持续上坡段,速度先小幅度的上升,然后开始减速,在经过变坡点之后,行驶在下坡路段,汽车必须经历一个适应过程,降低车速来调节心理,调节好之后,车辆就保持加速行驶;变坡点设置在隧道群的连接段,由于是凹形竖曲线,先下坡后上坡,排除照明因素及间距因素的影响,可以看出,车辆是一个先减速后加速的过程,且速度变化比较均匀。由此可知,无论是凸形竖曲线还是凹形竖曲线,车速变化规律是一致的,都是经历先减速后加速的过程。

(3)平纵线形组合。在平纵线形组合路段,汽车行驶受多方面因素的影响,包括有隧道群连接段、圆曲线、竖曲线、横坡超高以及照明因素的影响,结合对平曲线和纵曲线的分析可以看出,圆曲线段车速轨迹是上升的趋势,纵曲线是先下降后上升的趋势。综合考虑各种因素可以看出,在平纵线形组合条件的影响下,车辆先经历小幅度的减速,然后是小幅度的加速过程,总体速度变化不大,没有很明显的升降趋势。

5 结 语

(1)根据西汉高速公路秦岭隧道群路段的实测速度数据,对运行速度(85%位速度)的变化规律进行了分析,发现车辆进入隧道,开始有一个减速过程,大约需要 50 m,驾驶人便适应了隧道内行车环境;而在隧道出口路段,驾驶人期望加速离开隧道,所以,出口处速度高于入口处的速度。

(2)平、纵、横以及平纵组合线形要素对隧道群路段车辆的速度影响比较大,尤其是平纵线型组合复杂的路段,速度变化较大,小型车达到 26 km/h,而大型车也有 7 km/h 的变化幅度。

(3)通过对隧道群路段速度特性分析,可以根据速度的变化特征,针对性的设置诱导标志,给交通流合理的引导,以弥补隧道群线形设计的不足。

参考文献:

References:

- [1] 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 speed prediction models for passenger cars on combined sharp horizontal and vital curves of expressways[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(12): 84-88. (in Chinese)

- [J]. 内燃机学报, 2002, 20(1): 67-70.

CHAI Bao-ming, WU Bing-sheng, WANG Zu-na. The fuzzy evaluation of rational total system used in industrial machinery[J]. Transactions of CSICE, 2002, 20(1): 67-70. (in Chinese)

[4] 徐方大, 吕国培, 宋正亚, 等. 柴油机速度及扭矩特性的探讨[J]. 江苏理工大学学报: 自然科学版, 1999, 20(4): 45-48.

XU Fang-da, LV Guo-pei, SONG Zheng-ya, et al. Discussion the speed and torque characteristics of diesel engine[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology: Natural Science Edition, 1999, 20(4): 45-48. (in Chinese)

[5] 杨士敏. 动态工况对柴油机工作的影响及其扭矩测量[J]. 柴油机, 1995, 16(2): 20-23.

YANG Shi-min. Effect of dynamic conditions on diesel engine and torque measurement[J]. Diesel Engine, 1995, 16(2): 20-23. (in Chinese)

[6] 秦四成, 杨永海, 南基信, 等. 履带推土机动态性能研究[J]. 吉林工业大学学报, 1997, 27(2): 13-17.

QIN Si-cheng, YANG Yong-hai, NAN Ji-xin, et al. Research of crawler bulldozer dynamic performance [J]. Journal of Jilin University of Technology, 1997, 27(2): 13-17. (in Chinese)

[7] 宫春峰, 刁增祥, 彭 莫. 内燃机的动力特性[J]. 内燃机学报, 2000, 18(4): 439-442.

GONG Chun-feng, DIAO Zeng-xiang, PENG Mo. Dynamic characteristic of internal combustion engine[J]. Transactions of CSICE, 2000, 18(4): 439-442. (in Chinese)

[8] 姚怀新. 工程机械发动机理论与性能[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.

YAO Huai-xin. Theory and performance of construction machinery engine[M]. Beijing: China Communication Press, 2007. (in Chinese)

[9] 刘春玲. 发动机负荷特性曲线研究[D]. 长春: 吉林大学, 2004.

LIU Chun-ling. The study of load characteristics curve of engine [D]. Changchun: Jilin University, 2004. (in Chinese)

[10] Kawamura Y, Nagayama M, Ujihira M. The detection of a misfiring cylinder of diesel engines in excavation machinery using ALM analysis[J]. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 2007, 21(2): 97-110.

[11] Wu K, Zhang Q, Hansen A, et al. Power machinery-a multiple locally-linearized diesel engine model [J]. Transactions of the ASABE-American Society of Agricultural Biological Engineers, 2002, 45(2): 273-280.

neering, 2008, 8(2): 122-126. (in Chinese)

[6] 张生瑞, 赵友功, 王超深. 基于速度控制的高速公路隧道交通安全策略[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2009, 29(6): 74-76.

ZHANG Sheng-rui, ZHAO You-gong, WANG Chao-shen. Freeway tunnel traffic safety strategy based on vehicle speed[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(6): 74-76. (in Chinese)

[7] 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): 90-93.

FANG Jing, WANG Shuang-jie, ZHU Zhan-dong, et al. Operating speed models for trucks at expressway tunnel sections[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(3): 90-93. (in Chinese)

[8] 杜志刚, 潘晓东, 杨 轸, 等. 高速公路隧道进出口视觉震荡与行车安全研究[J]. 中国公路学报, 2007, 20(5): 101-105.

DU Zhi-gang, PAN Xiao-dong, YANG Zhen, et al. Research on visual turbulence and driving safety of freeway tunnel entrance and exit[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(5): 101-105. (in Chinese)

[J]. 内燃机学报, 2002, 20(1): 67-70.

CHAI Bao-ming, WU Bing-sheng, WANG Zu-na. The fuzzy evaluation of rational total system used in industrial machinery[J]. Transactions of CSICE, 2002, 20(1): 67-70. (in Chinese)

[4] 徐方大, 吕国培, 宋正亚, 等. 柴油机速度及扭矩特性的探讨[J]. 江苏理工大学学报: 自然科学版, 1999, 20(4): 45-48.

XU Fang-da, LV Guo-pei, SONG Zheng-ya, et al. Discussion the speed and torque characteristics of diesel engine[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology: Natural Science Edition, 1999, 20(4): 45-48. (in Chinese)

[5] 杨士敏. 动态工况对柴油机工作的影响及其扭矩测量[J]. 柴油机, 1995, 16(2): 20-23.

YANG Shi-min. Effect of dynamic conditions on diesel engine and torque measurement[J]. Diesel Engine, 1995, 16(2): 20-23. (in Chinese)

[6] 秦四成, 杨永海, 南基信, 等. 履带推土机动态性能研究[J]. 吉林工业大学学报, 1997, 27(2): 13-17.

QIN Si-cheng, YANG Yong-hai, NAN Ji-xin, et al. Research of crawler bulldozer dynamic performance [J]. Journal of Jilin University of Technology, 1997, 27(2): 13-17. (in Chinese)

[7] 宫春峰, 刁增祥, 彭 莫. 内燃机的动力特性[J]. 内燃机学报, 2000, 18(4): 439-442.

GONG Chun-feng, DIAO Zeng-xiang, PENG Mo. Dynamic characteristic of internal combustion engine[J]. Transactions of CSICE, 2000, 18(4): 439-442. (in Chinese)

[8] 姚怀新. 工程机械发动机理论与性能[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.

YAO Huai-xin. Theory and performance of construction machinery engine[M]. Beijing: China Communication Press, 2007. (in Chinese)

[9] 刘春玲. 发动机负荷特性曲线研究[D]. 长春: 吉林大学, 2004.

LIU Chun-ling. The study of load characteristics curve of engine [D]. Changchun: Jilin University, 2004. (in Chinese)

[10] Kawamura Y, Nagayama M, Ujihira M. The detection of a misfiring cylinder of diesel engines in excavation machinery using ALM analysis[J]. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 2007, 21(2): 97-110.

[11] Wu K, Zhang Q, Hansen A, et al. Power machinery-a multiple locally-linearized diesel engine model [J]. Transactions of the ASABE-American Society of Agricultural Biological Engineers, 2002, 45(2): 273-280.

neering, 2008, 8(2): 122-126. (in Chinese)

[6] 张生瑞, 赵友功, 王超深. 基于速度控制的高速公路隧道交通安全策略[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2009, 29(6): 74-76.

ZHANG Sheng-rui, ZHAO You-gong, WANG Chao-shen. Freeway tunnel traffic safety strategy based on vehicle speed[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(6): 74-76. (in Chinese)

[7] 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): 90-93.

FANG Jing, WANG Shuang-jie, ZHU Zhan-dong, et al. Operating speed models for trucks at expressway tunnel sections[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(3): 90-93. (in Chinese)

[8] 杜志刚, 潘晓东, 杨 轸, 等. 高速公路隧道进出口视觉震荡与行车安全研究[J]. 中国公路学报, 2007, 20(5): 101-105.

DU Zhi-gang, PAN Xiao-dong, YANG Zhen, et al. Research on visual turbulence and driving safety of freeway tunnel entrance and exit[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(5): 101-105. (in Chinese)