

文章编号:1005-0523(2020)04-0096-06

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2020.04.015

基于比功率的山区公路弯道小型车油耗模型研究

黄颖铭¹, 吴尉健¹, 郭建钢¹, 许耀根², 李林¹

(1. 福建农林大学交通与土木工程学院, 福建 福州 350002; 2. 集美大学航海学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 为了研究山区公路弯道处小型车的油耗特性,以福州市森林公园至鼓岭山区道路弯道上的交通流为研究对象,利用无人机拍摄车辆上下行的视频资料,通过 Tracker 采集小型车的行驶特性数据,使用 Matlab 拟合出平均行程速度、断面位置和机动车比功率(VSP)的三维关系模型;根据关系模型和小型车的瞬时平均油耗率建立弯道油耗模型,并计算不同平均行程速度值下小型车在过弯过程的油耗。结果表明:平均行程速度与油耗满足三次多项式关系,弯道油耗模型可在一定程度上对该弯道小型车的过弯油耗进行预测,对实施节能减排策略具有一定的参考作用。

关键词: 比功率;油耗;山区公路;弯道;小型车

中图分类号:U491.1

文献标志码:A

本文引用格式:黄颖铭,吴尉健,郭建钢,等.基于比功率的山区公路弯道小型车油耗模型研究[J].华东交通大学学报,2020,37(4):96-101.

Citation format: HUANG Y M, WU W J, GUO J G, et al. Research on fuel consumption calculation of small vehicles at mountain road curve based on VSP[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2020, 37(4): 96-101.

油耗模型分为宏观油耗模型和微观油耗模型,由于宏观油耗模型无法将车辆参数、车辆运行工况、道路类型等与油耗实时联系,因此微观油耗模型得到更多专家学者们的关注^[1-2],特别是基于比功率分布的油耗测算方法,如 MOVES, IVE, CMEM 等模型的研究成为当前的研究热点。机动车比功率(vehicle specific power, VSP)指的是单位质量下机动车的瞬时功率,单位为 kW/t,由 1999 年美国麻省理工学院的 Palacios 首次提出^[3]。相较于其他油耗模型, VSP 有着更容易获取的优势,对此国内外的专家学者们做出了大量的研究,如美国环保署 EPA 发布了基于 VSP 的油耗/排放预测模型 MOVES,通过将不同运行工况区间下的油耗相加,得到车辆运行过程的总油耗^[4-5];Zhao 使用跟驰模型和 VSP 模型相结合的方法来估计非饱和信号交叉口的机动车排放^[6];Chong Hwan S 等基于机动车 VSP 确定了道路负荷系数、燃油利用率与 VSP 之间的回归系数,分析了平均燃油利用率与尾气排放之间的相关性^[7];赵琦分析小型车与重型车在高速公路上 VSP 的分布特征,利用 MOVES 模型中提取的油耗率,使用小型车的 VSP 分布进行重型车油耗测算^[8];王敏通过实测西安市不同公路等级的汽车实际逐秒速度运行数据,对 MOVES 模型进行本地化的修正,测算了不同公路等级汽车的油耗^[9]。

常规路段交通流的油耗测算的相关研究已经十分成熟,但对弯道、信号控制交叉口、公交车站等特殊路段的研究较少。弯道作为一种普遍存在于山区低等级公路上的典型路段,加减速行为较直线路段更为频繁,车辆油耗水平和碳排放量普遍较高^[10-12]。而山区公路受地形限制,具有半径小,坡度大,弯道多的特点,研究山区公路弯道的油耗情况,有其特殊的现实意义。选取福州市森林公园至鼓岭道路上弯道路段的交通流作为研究对象,利用无人机实地航空摄影,分上下行利用 Tracker 软件获取车辆行驶数据,拟合出小型车 VSP、平均行程速度和断面位置的三维关系,并以此建立山区公路弯道油耗预测模型,为车辆油耗评估提供理论参考。

收稿日期:2019-11-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51608123);福建省自然科学基金项目(2017J01475,2017J01682)

作者简介:黄颖铭(1996—),男,硕士研究生,研究方向为道路交通安全工程。

通信作者:郭建钢(1962—),男,教授,博士,研究方向为道路交通安全工程。

1 研究方法

1.1 研究对象

以福州市森林公园经宦溪至鼓岭景区道路上弯道路段的交通流为研究对象,所选弯道的几何参数为该公路的典型代表,参数信息见表 1。该道路为典型的山区道路,双向两车道,设计速度为 20 km/h,根据实地调查,交通流主要为小型车辆。

表 1 弯道(K17+477.003)参数信息
Tab.1 Parameter information at Curve (K17+477.003)

交点桩号	R/m	L _{s1} /m	L _y /m	L _{s2} /m	L/m	i/%
K17+477.003	28	20	17.353	20	57.352	6.01

注:R 为弯道半径,L_{s1}和 L_{s2}为缓和曲线长度,L_y为圆曲线长度,L 为弯道总长,i 为弯道坡度。

1.2 分析方法

为获取小型车自然行驶状态下的参数,采用无人机进行航空摄影,悬停高度为 60 m,获得 1 080 P 每秒 25 帧的超高清视频。为了降低同向车辆跟驰行驶和对向车辆所造成的影响,调查时段选择 8:00—12:00。

将弯道外侧的行车方向定义为上行,弯道内侧的行车方向定义为下行。根据统计学最小样本量的要求(上下行各为 61 辆),因此采集了上下行样本量各 70 辆。将视频导入 Tracker 软件,定义弯道起点为坐标原点,设置视频播放帧数为 15 帧,即 0.6 s 读取一次数据^[13-14]。利用质点跟踪功能,选取车辆的一个固定特征点进行跟踪,获取自然行驶车辆的速度、加速度和断面位置。

Jiménez-Palacios 所给出的 VSP 计算公式

$$VSP=v[a(1+\varepsilon_i)+g\times grade+C_Rg]+\frac{1}{2}\rho_a\frac{C_D A}{m}(v+v_m)^2\times v \tag{1}$$

式中:v 为瞬时速度,m/s;a 为加速度,m/s²;ε_i 为质量因子;g 为重力加速度,m/s²;grade 为道路坡度,%;C_R 为滚动阻力系数;ρ_a 为空气密度,kg/m³;C_D 为风阻系数;A 为机动车前沿面积,m²;m 为机动车总质量,kg;v_m 为机动车顶风车速,m/s。

由于小型车的各种相关参数取值范围较小,故而公式较为统一,质量因子 ε_i 取值 0.1,滚动阻力系数 C_R 取值 0.013 5,v_m 忽略为 0,小型车的 $\frac{C_D A}{m}$ 的取值为 0.000 5,经整理得小型车的 VSP 的计算

$$VSP=v[1.1a+9.81grade(\%)+0.132]+0.000\ 302v^3 \tag{2}$$

1.3 VSP 聚类分析

VSP 与车辆油耗率的分布存在着较大的离散性,为了更好地描述 VSP 与油耗之间的关系,对弯道处所得的 VSP 值进行聚类分析。经计算求得上行的 VSP 主要集中在-28~28 kW/t,下行的 VSP 主要集中在-16~20 kW/t,以 2 kW/t 的步长对不同速度区间下的 VSP 值进行划分,见表 2。

表 2 VSP 区间划分
Tab.2 VSP interval division

VSPBin	VSP 区间/(kW/t)						
1	-28~-26	8	-14~-12	15	0~2	22	14~16
2	-26~-24	9	-12~-10	16	2~4	23	16~18
3	-24~-22	10	-10~-8	17	4~6	24	18~20
4	-22~-20	11	-8~-6	18	6~8	25	20~22
5	-20~-18	12	-6~-4	19	8~10	26	22~24
6	-18~-16	13	-4~-2	20	10~12	27	24~26
7	-16~-14	14	-2~0	21	12~14	28	26~28

2 结果与分析

2.1 弯道 VSP 曲线拟合

对过弯每辆车的瞬时速度求平均,进而得到车辆过弯的平均行程速度。因 VSP 分布与平均行程速度存在一定的联系^[15],使用 Matlab 的 curve fitting 工具箱拟合平均行程速度、断面位置和 VSP 的关系,VSP 与平均行程速度的关系满足一次多项式,VSP 与断面位置的关系满足三次多项式,上下行断面位置、平均行程速度和 VSP 关系拟合三维图,见图 1。

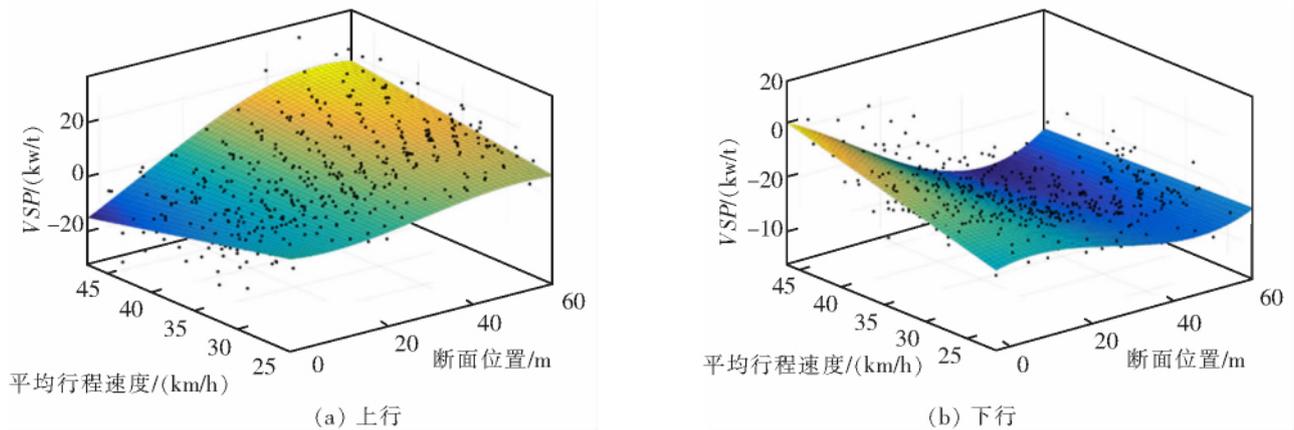


图 1 断面位置-平均行程速度-VSP 的三维拟合图

Fig.1 3D fitting diagram of section position-average travel speed-VSP

从图 1 可得,上行车辆拟合的模型

$$f(x, v) = 15.66 - 1.146x - 0.5985v + 0.02298x^2 + 0.04061xv - 0.0001556x^3 - 0.00038x^2v \quad R^2 = 0.6858 \quad (3)$$

下行车辆拟合的模型为

$$f(x, v) = -9.286 + 0.6944x + 0.4181v - 0.01984x^2 - 0.02476xv + 0.0001757x^3 + 0.0002787x^2v \quad R^2 = 0.6123 \quad (4)$$

式中: $f(x, v)$ 为 VSP 值, kW/t; x 为断面位置, m; v 为平均行程速度, km/h。

2.2 弯道油耗模型

据调查,研究路段的交通组成中本田车占比 67%,故选用本田车作为小型车的代表车型,选用试验车车辆参数见表 3。

表 3 试验车车辆参数

Tab.3 Vehicle parameters for test vehicles

车型	排量/L	综合油耗/(L/100 km)	燃油类型
本田思域(2013 款)	1.8	6.82	汽油
本田 CR-V(2013 款)	2.4	8.8	汽油

1) 平均瞬时油耗率

通过将 MINI6 智能插头与车辆 OBD 接口相接,读取 ECU 数据流,进而获得车辆瞬时油耗率;对不同 VSP 区间的车辆瞬时油耗率求平均,进而获得对应 VSP 区间的瞬时平均油耗率

$$f_{iVSP} = \frac{\sum f_{iVSP,transient}}{n} \quad (5)$$

式中: $f_{iVSP,transient}$ 为第 i 个 VSP 区间内逐秒 VSP 的瞬时油耗率, L/100 km; n 为第 i 个 VSP 区间内逐秒 VSP 的个数; f_{iVSP} 为第 i 个 VSP 区间的平均瞬时油耗率, L/100 km。

通过对两种本田车车型各比功率分区的瞬时平均油耗率求取平均,得到小型车各 VSP 区间的平均瞬时油耗率,见表 4

表 4 小型车各 VSP 区间的平均瞬时油耗率
Tab.4 Average instantaneous fuel consumption rate of small vehicles at each VSP interval

VSPbin	平均瞬时油耗 /(L/100 km)						
1	3.16	8	3.67	15	6.65	22	12.62
2	3.18	9	3.74	16	8.02	23	13.43
3	3.23	10	3.89	17	8.98	24	13.83
4	3.27	11	4.02	18	9.74	25	14.3
5	3.34	12	4.11	19	10.52	26	14.52
6	3.45	13	4.72	20	11.13	27	14.64
7	3.52	14	5.66	21	11.74	28	14.72

2) 弯道油耗

将平均行程速度反代入上下行的三维关系模型,使用 Mathematica 计算得到不同 VSP 区间对应的断面长度,断面长度与对应 VSP 区间的瞬时平均油耗率相乘,求得对应 VSP 区间的油耗;累加各 VSP 区间油耗,进而得到弯道油耗^[6]

$$W_j = \sum f_{VSP} \cdot L_{ij} \quad (6)$$

式中: L_{ij} 为平均行程速度 j 时,第 i 个 VSP 区间所对应的弯道断面长度, m; W_j 为平均行程速度 j 时的油耗, ml。

2.3 油耗精度检验

选择小型车雷克萨斯 IS250 作为精度检验车,检验车车辆参数见表 5。

表 5 检验车车辆参数
Tab.5 Inspection vehicle parameters

配置	参数	配置	参数
发动机	2.5L V6 141 马力	整备质量	1 605 kg
变速箱	6 档手自一体	最高车速	225 km/h
排量	2.5 L	最大功率	153 kW
综合油耗	9 L/100 km	燃油类型	汽油

选取上行平均行程速度 27.4, 33.6, 41.7 km/h, 下行平均行程速度 23.2, 32.3, 43.5 km/h, 进行模型验证, 见表 6。

表 6 上下行车辆油耗精度检验
Tab.6 Fuel consumption accuracy test of up and down bound vehicles

参数	上行			下行		
车速/(km/h)	27.4	33.6	41.7	26.2	32.3	43.5
预测值/mL	4.88	5.07	5.39	2.95	3.09	3.29
实际值/mL	5.3	5.5	5.9	3.3	3.4	3.6
相对误差/%	7.92	9.46	10.17	10.61	9.12	8.61
平均误差/%	9.18			9.45		

由表6可知,平均相对误差均在10%以内,上行随着平均行程速度的增加,相对误差也相应增大;下行则随着平均行程速度的增加,相对误差相应减小。通过与其他油耗模型进行对比^[17-19],该误差在可接受的范围内,能在一定程度上对小型车过弯时的油耗进行预测。

2.4 平均行程速度分析

调查路段小型车平均行程速度大都集中在25~45 km/h,以1 km/h的单位间隔进行划分,利用 Mathematica 计算不同平均行程速度值上下行的油耗,见图2。

拟合上下行不同平均行程速度和油耗的关系式,见公式(7)和公式(8)

$$\text{上行: } y = -0.0001x^3 + 0.0146x^2 - 0.4852x + 10.005 \quad 25 \leq x \leq 45 \quad (7)$$

$$\text{下行: } y = 0.00001x^3 - 0.0018x^2 + 0.0906x + 1.5592 \quad 25 \leq x \leq 45 \quad (8)$$

式中: y 为油耗值,mL; x 为平均行程速度,km/h。

从式(7),式(8)和图2可得,上行由于爬坡,上行油耗远大于下行油耗,当平均行程速度大于28 km/h时,油耗明显增加,平均行程速度为42 km/h时,油耗增加减缓;下行则由于车辆下坡,驾驶员常带档滑行或轻踩油门,油耗较少,但总体趋势随着平均行程速度的增加而增加。

综上所述,随着平均行程速度的增加,上下行的油耗都随之相应增加,满足三次多项式模型。从能源消耗上考虑,建议该弯道的经济速度取28 km/h。

3 结论

通过拟合该弯道断面位置、平均行程速度和VSP的三维关系,建立弯道油耗模型,计算不同行程速度下车辆的过弯油耗,可得到以下结论:

- 1) 实际值与预测值的平均相对误差均在10%以内,在可接受的范围内,该模型在一定程度上可以用来预测小型车上下行的过弯油耗。
- 2) 根据弯道断面位置、平均行程速度和VSP的三维关系,计算得出不同平均行程速度下的油耗值,平均行程速度和油耗满足三次多项式关系模型。
- 3) 随着平均行程速度的增加,上下行的油耗随之相应增加,从能源消耗上考虑,建议该弯道的经济车速取28 km/h。

参考文献:

- [1] KANARACHOS S, MATHEW J, FITZPATRICK M E. Instantaneous vehicle fuel consumption estimation using smartphones and recurrent neural networks[J]. Expert Systems With Applications, 2019, 120: 436-447.
- [2] 张金辉, 李克强, 徐彪, 等. 基于最小二乘法的车辆瞬态燃油消耗估计[J]. 汽车工程, 2018(10): 1151-1157.
- [3] PALACIOS J. Understanding and quantifying motor vehicle emissions with vehicle specific power and TILDAS remotesensing[D]. Cambridge; Massachusetts Institute of Technology, 1999.
- [4] U. S. Environment Protection Agency. Using MOVES2014 in project-level Carbon Monoxide Analyses[R]. Washington: Transportation and Climate Division Office of Transportation and Air Quality, 2015.
- [5] U. S. Environment Protection Agency. MOVES 2014a User Guide [R]. Washington: Assessment and Standards Division Office of Transportation and Air Quality, 2015.

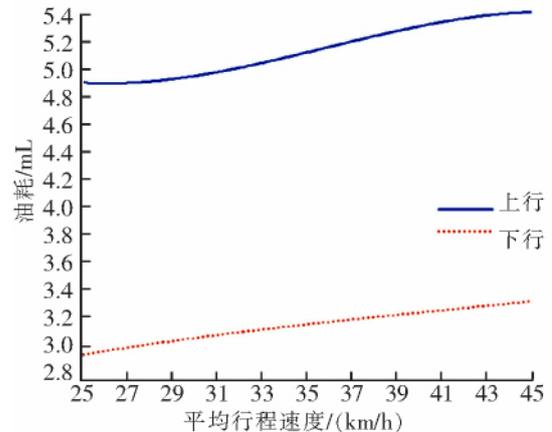


图2 不同平均行程速度下的油耗值
Fig.2 Fuel consumption at different average travel speed

- [6] ZHAO H, HE R, JIA X. Estimation and analysis of vehicle exhaust emissions at signalized intersections using a car-following model[J]. Sustainability, 2019, 11(14):3992.
- [7] CHONG H S, PARK Y, KWON S, et al. Analysis of real driving gaseous emissions from light-duty diesel vehicles[J]. Transportation Research: Part D, 2018, 65:485-499.
- [8] 赵琦,于雷,宋国华. 轻型车与重型车高速公路比功率分布特征研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15(3):196-203.
- [9] 王敏. 不同公路等级的汽车油耗和排放评估研究[D]. 西安:长安大学, 2017.
- [10] LUQUE R, CASTRO M. Highway geometric design consistency: speed models and local or global assessment[J]. International Journal of Civil Engineering, 2016, 14(6):1-9.
- [11] NAVIN F. Some factors in the design of rural highway curves[C]//94th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington D.C.: Transportation Research Board, 2015:1-14.
- [12] 张志清,李晨,贺成林. 双车道公路小半径曲线段行车速度与行车轨迹关系研究[J]. 道路交通与安全, 2016(5):22-26.
- [13] 张翀,陈金山,郭建钢,等. 山区小城市机非混行道路行程时间修正模型研究[J]. 华东交通大学学报, 2018, 35(2):66-72.
- [14] 许耀根,郭建钢,李林,等. 基于行驶区间的快速路入口小型车 VSP 分布特征分析[J]. 井冈山大学学报(自然科学版), 2018(3):68-73.
- [15] 宋国华,于雷. 城市快速路上机动车比功率分布特性与模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2010, 10(6):133-140.
- [16] 许立峰. 基于 VSP 的山区高速公路能耗测算系统[D]. 西安:长安大学, 2017.
- [17] 庞然,简晓春,孟雄,等. 基于典型山地城市的轻型车比功率综合油耗模型[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(6):156-161.
- [18] 冯红晶. 基于 VSP 的山区高速公路商用车油耗计算模型研究[D]. 西安:长安大学, 2016.
- [19] 许耀根. 快速路入口匝道宏观车流 VSP 与油耗特性分析[D]. 福州:福建农林大学, 2019.

Research on Fuel Consumption Calculation of Small Vehicles at Mountain Road Curve Based on VSP

Huang Yingming¹, Wu Weijian¹, Guo Jiangang¹, Xu Yaogen², Li Lin¹

(1. College of Transportation and Civil Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;

2. Institute of Navigation, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to study the fuel consumption characteristics of small vehicles at the mountain road curve, the traffic flow on the road curve from Fuzhou Forest Park to Guling mountain area is taken as the research object. The video data of vehicle up and down were taken by UAV, and the driving characteristic data of small vehicles were collected by tracker; the three-dimensional relationship of average travel speed, section position and vehicle specific power (VSP) were fitted by MATLAB; according to the relationship model and the instantaneous average fuel consumption rate of small cars, a curve fuel consumption model was established, and the fuel consumption of small cars in the process of turning was calculated under different average travel speed values. The results show that the relationship between the average travel speed and the fuel consumption satisfies the cubic polynomial. The curve fuel consumption model can predict the fuel consumption of the small car in the curve to a certain extent, which has a certain reference value for the implementation of energy saving and emission reduction strategies.

Key words: specific power; fuel consumption; mountain roads; curves; light vehicles