

纵断面基础线形行车动力学效应对比研究

杜永平¹,王鹏²

(1.同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司,上海市 200092; 2.上海市政交通设计研究院有限公司,上海市 200030)

摘要:为提升旧路改造工程线形,通过受力分析,将线形、平整度参数作为动力学方程的主要变量,并建立“人-车-路”动力学分析模型;设计了对比线形组,一组设置缓和竖曲线,另一组则不设置,采用Newmark- β 法编制程序,对半径为7 000 m基础线形产生的动力学效应进行计算分析;采用加速度峰值、加速度均方根、振动周期和频率等振动指标,对基础线形组动力学效应进行分析,在分析振动区的形成原因、衰变规律的基础上,划分线形内的振动区和稳定区范围;增设缓和竖曲线后,车辆振动形态发生显著变化,加速度振动峰值和加速度均方根大幅降低,降至常规基础线形的5%以内,有效消除了车辆振动感知;计算分析了车辆类型、重量、悬挂系统参数对两组线形动力学效应的影响,发现增设缓和竖曲线后,振动降幅较大,对各种车辆适应性更强;计算分析线形组与不同平整度使用状态的耦合作用,发现常规基础线形在振动区的耦合作用较为明显,加速度均方根为直坡形态下的95%~161%,而增设缓和竖曲线后,耦合作用系数接近1,线形基本接近“人-车-路”系统的理想平面状态。通过以上研究,发现增加缓和竖曲线可有效提升线形行车质量,增强线形对车辆和工况环境的适应性。

关键词:道路工程;纵断面线形;动力学;车辆振动;行车舒适性

中图分类号:U412

文献标志码:A

Comparative Study on Dynamic Effect of Basic Longitudinal Section Alignment

DU Yongping¹,WANG Peng²

(1.Tongji Architectural Design (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China; 2.Shanghai Municipal Transportation Design Institute Company Limited, Shanghai 200030, China)

Abstract: To improve the alignment in the old road reconstruction project, stress analysis was carried out, and the alignment and smoothness parameters were used as the major variables in the dynamic equation. A “human-vehicle-road” dynamic analysis model was established, and alignment comparison groups were set, with only one group set with easing vertical curves. The Newmark- β method was used for programming and calculating the dynamic effects generated by the basic alignment with a radius of 7 000 m. The vibration indicators such as peak acceleration, root mean square of acceleration, vibration period, and frequency were used to analyze the dynamic effects of the basic alignment group. By analyzing the causes and decay rules of the vibration zone, the vibration zone and stable zone within the alignment were defined. The addition of easing vertical curves significantly changed the vibration mode of the vehicle, greatly reducing the peak acceleration and root mean square of acceleration to 5% within the conventional basic alignment and effectively eliminating the perception of vehicle vibration. The influence of vehicle type, vehicle weight, and suspension system parameters on the dynamic effects of the two alignment groups was analyzed. The addition of easing vertical curves greatly reduced the vibration, making the alignment more adaptable to various vehicles. The coupling effect between the alignment groups and different smoothness application states was analyzed. The coupling effect of the conventional basic alignment in the vibration zone was more significant, with the root mean square of

收稿日期:2023-09-12

基金项目:同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司挂帅类基金项目(编号:2022J-JB03)

作者简介:杜永平,男,硕士,高级工程师.E-mail:1730231978@qq.com

acceleration being 95%–161% that of the straight slope shape. After adding easing vertical curves, the coupling coefficient approached 1, and the alignment was close to the ideal plane of the “human-vehicle-road” system.

Through the above research, it is found that adding easing vertical curves can effectively improve the vehicle running quality of the alignment and enhance its adaptability to vehicles and road conditions.

Keywords: road engineering; longitudinal section alignment; dynamics; vehicle vibration; ride comfort

0 引言

2021年末中国四级及以上等级公路里程506.19万km,其中:高速公路里程16.91万km,二级及以上等级公路里程72.36万km;城市道路53.25万km,道路面积105.37亿m²。每年除正常大中修外,还有因路网结构调整而进行的改扩建工程,这些旧路改造工程每年投资很大,对社会、经济产生较大的影响。

中国采用的半刚性路面结构,路面结构残值相对较高,充分利用旧路结构,对交通、社会影响小,经济节约,在工程实施中为优先方案。通过对近30年收集中国各地项目的测量数据分析可知,旧路改造工程纵横断面主要特征为:①纵断面测量数据虽符合原设计中纵断面设计的总体趋势,但远不能达到规范中设计速度要求的纵断面设计指标。在纵断面中存在折坡、纵向局部凹陷、纵向凹凸不平、竖曲线变形等各种缺陷。这些纵向变形使车辆产生纵向位移,直接影响乘坐的舒适性^[1];②横坡均发生不同程度变化,与原设计值之间存在各种各样的偏差,横坡变大、变小,或出现反向横坡等不规则路面扭曲情况,使车辆产生侧向位移,降低道路的服务水平^[2]。为解决这些问题,遵循“线形服从地形”指导原则,在现状旧路标高条件下尽可能拟合现状路面^[3-5]。在旧路改造工程设计中,主要存在如下问题:①受《公路路线设计规范》(JTG D20—2017)最小坡长、竖曲线长度等主要设计指标的制约,为处理纵断面沉降差和道路横向扭转问题,不得不大量使用价格昂贵的面层材料进行垫衬填充,导致经济成本高昂;②为满足线形标准而增设的垫衬结构,对桥梁及其他构筑物的受力状况产生较大影响,可能引发安全、寿命等方面的重大问题;③为满足线形标准,路面局部标高抬升较大,特别是在城市道路设计中,若标高控制不当,会导致局部路段影响周边排水系统,引起沿街建筑、居民出行不便等诸多社会问题^[6]。

针对这些工程问题,采取两种解决措施:①降低

线形设计中的各种控制指标,主要有降低最小纵坡长度^[7-8],或取消最小纵坡长度而转按3s行程控制竖曲线长度^[1];②通过竖曲线线形形态来适应工程地形控制条件^[9-10]。这些措施在工程验证后,形成了上海地方设计规范《高速公路改扩建设计规范》(DG/TJ 08-2174—2015)、《公路大中修工程设计规范》(DG/TJ 08-2191—2015)和交通行业设计导则《高速公路改扩建设计细则》(JTG/TL11—2014)。这些措施不仅解决了大部分标高控制问题,同时节省近30%的工程费用,显著降低了工程造价。然而,设计中大量规范极限短竖曲线的使用,行驶舒适性影响令人关注。

目前,涉及线形与行车舒适性关系的研究,主要有3个方面:①道路线形相关研究。在竖曲线两侧增设缓和竖曲线^[11-12],即采用渐变式的方式调整离心力,降低离心力的突变冲击,提升行车舒适性,尽管竖向缓和曲线在理论研究完成后,但尚未见工程中应用情况的报告以及相关评价报告,缓和竖曲线形态等诸多问题还有待进一步研究;②线形三维设计研究^[13]。为保证车辆运行的平稳性和舒适性,线形设计时应至少保证二阶几何连续,即曲率连续,而现状纵断面线形只有2个基本线形单元,即直坡、竖曲线,必然会产生汽车振动问题^[13],对旧路改造工程线形是相对宏观和方向性指导,深入的研究还有待展开;③“人-车-路”动力学研究。起始于平整度研究^[14],汽车是一个多质点的复杂的振动系统,汽车在“理想平面”上行驶,不产生振动,如线形或平整度与“理想平面”产生偏差时,发生振动,从而影响行车舒适性。该研究通过计算,定量评价行车舒适性,为推动线形研究提供新的分析方法,但研究还处于起步阶段,在路桥过渡段^[15-16]以及个别参数研究中使用^[8],其他线形问题研究还有待展开。在这些研究成果和指导方向的基础上,初次通过力学分析将道路线形参数纳入动力学方程组,采用“人-车-路”动力学模型定量分析旧路改造工程纵断面线形动力学效

应以及线形和平整度耦合动力学效应,探索提升旧路改造工程行车质量的纵断面线形。

针对旧路改造工程复杂的现状路面条件,采用直坡和竖曲线纵断面线形组合很难满足日益提升高品质通行需求,参考复杂条件下平面线形处理方式,寻找纵断面“理想线形”。这样不仅可以提升线形品质,还可以为国家降低每年的巨额工程投资。旧路改造工程纵断面线形远比新建道路复杂得多,线形种类较多。纵断面基础线形主要有两种线形组合:①纵断面常规线形的直坡-竖曲线-直坡,简称为常规基础线形;②在常规基础线形中增设缓向竖曲线,形成直坡-缓和竖曲线-竖曲线-缓和竖曲线-直坡,简称为缓和曲线基础线形。本文从工程最常见的两种纵断面基本线形展开研究,用于改造工程部分变形的竖曲线拟合,减少路面垫衬材料的使用。采用动力学对旧路工程行车舒适性影响的纵断面基本线形进行研究,鉴于动力学计算只能进行数值计算的现状条件,因此采用对比分析方法展开研究。通过线形动力学效应、车辆适应性,以及在使用周期内线形和平整度耦合作用对行车舒适性影响3个方面进行对比分析,探索合适旧路改造工程的线形。

1 “人-车-路”动力学分析模型构建及评价指标

1.1 模型假设和条件

根据汽车在道路行驶的实际情况和研究工况条件,作以下假设:

(1) 汽车匀速在直线上行驶,并不涉及汽车动力、加减速等问题。

(2) 路面不平整度较小,汽车振动不大,轮胎与路面保持接触。

(3) 汽车仅考虑悬架、轮胎的自由度,座椅自由度结合在人体模型中,其余结构均按刚性连接考虑。

(4) 悬架、轮胎、人体模型刚度均为位移的线性函数,阻尼为相对速度的线性函数。

1.2 模型建立

1.2.1 车辆模型

综合道路平纵横线形的相互影响以及成果的统一分析因素,采用三维立体汽车模型。道路服务的车辆类型较多,各种车辆振动路面激励波长不同,采用舒适性要求较高的客车为代表车型进行研究,将汽车简化成图1所示的七自由度体系,空间整车的七自由度:车体的浮沉、俯仰和侧倾自由度以及4个车轮的竖向自由度。小客车主要计算参数^[17]:车身质量 $m=1\,380\text{ kg}$,俯仰转动惯量 $I_p=2\,440\text{ kg}\cdot\text{m}^2$,侧倾转动惯量 $I_r=380\text{ kg}\cdot\text{m}^2$,前轮质量 $m_{w1}=m_{w2}=40.5\text{ kg}$,后轮质量 $m_{w3}=m_{w4}=45.4\text{ kg}$,前悬架刚度系数 $k_{b1}=k_{b2}=17\text{ kN/m}$,前悬架阻尼系数 $c_{b1}=c_{b2}=1.5\text{ (kN}\cdot\text{s)/m}$,后悬架刚度系数 $k_{b3}=k_{b4}=22\text{ kN/m}$,后悬架阻尼系数 $c_{b3}=c_{b4}=1.5\text{ (kN}\cdot\text{s)/m}$,前轮胎刚度系数 $k_{w1}=k_{w2}=192\text{ kN/m}$,前轮胎阻尼系数 $c_{w1}=c_{w2}=0\text{ (kN}\cdot\text{s)/m}$,后轮胎刚度系数 $k_{w3}=k_{w4}=192\text{ kN/m}$,后轮胎阻尼系数 $c_{w3}=c_{w4}=0$,车身质心至前轮距离 $a=1.25\text{ m}$,车身质心至后轮距离 $b=1.51\text{ m}$ 。大客车主要计算参数^[18]:

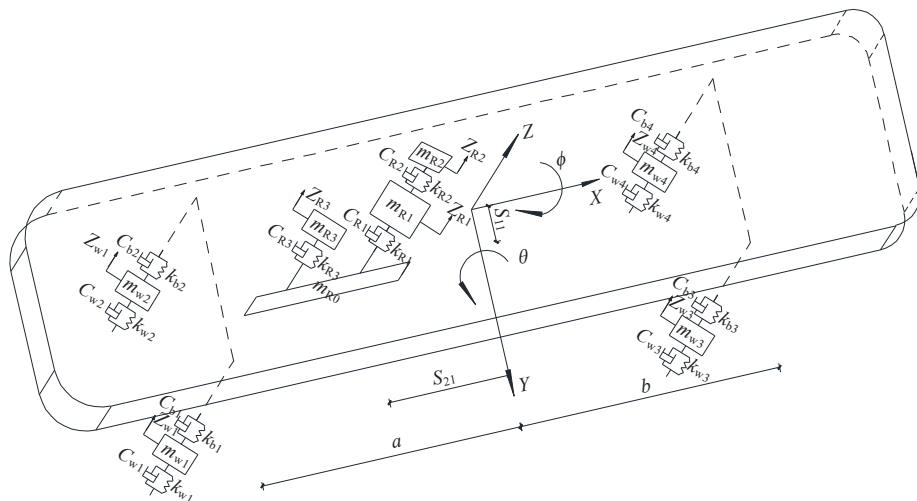


图1 “人-车”客车模型

Figure 1 “Human-vehicle” model

车身质量 $m=158\ 90\ \text{kg}$, 俯仰转动惯量 $I_p=150\ 000\ \text{kg}\cdot\text{m}^2$, 侧倾转动惯量 $I_r=13\ 000\ \text{kg}\cdot\text{m}^2$, 前轮质量 $m_{w1}=m_{w2}=373\ \text{kg}$, 后轮质量 $m_{w3}=m_{w4}=373\ \text{kg}$, 前轴刚度系数 $k_{b1}=k_{b2}=195.00\ \text{kN/m}$, 前轴阻尼系数 $c_{b1}=c_{b2}=40.000\ (\text{kN}\cdot\text{s})/\text{m}$, 后轴刚度系数 $k_{b3}=k_{b4}=608.65\ \text{kN/m}$, 后轴阻尼系数 $c_{b3}=c_{b4}=68.473\ (\text{kN}\cdot\text{s})/\text{m}$, 前轮胎刚度系数 $k_{w1}=k_{w2}=1\ 000\ \text{kN/m}$, 前轮胎阻尼系数 $c_{w1}=c_{w2}=0.15\ \text{kN}\cdot\text{s}/\text{m}$, 后轮胎刚度系数 $k_{w3}=k_{w4}=2\ 000\ \text{kN/m}$, 后轮胎阻尼系数 $c_{w3}=c_{w4}=0.30\ (\text{kN}\cdot\text{s})/\text{m}$, 车身质心至前轮距离 $a=3.61\ \text{m}$, 车身质心至后轮距离 $b=2.04\ \text{m}$ 。

1.2.2 人体模型

采用生物力学研究成果,从研究便捷、成果可验证角度提出选择条件:①模型能反映“驾乘人员坐姿、受力状态、在行驶中的位移情况”;②采用国际通用模型,人体模型参数与中国体格结构相符合;③满足计算精度条件下尽可能选择自由度少的模型,以减少计算工作量。根据这些条件进行筛选,采用三自由度模型。人体模型参数^[19]:人体模型质量分别为: $m_1=27.2\ \text{kg}$, $m_2=13.5\ \text{kg}$, $m_3=12.8\ \text{kg}$;人体模型刚性系数分别为: $k_1=46\ 774\ \text{N/m}$, $k_2=10\ 866\ \text{N/m}$, $k_3=67\ 388\ \text{N/m}$;人体模型阻尼系数分别为: $c_1=710\ (\text{N}\cdot\text{s})/\text{m}$, $c_2=1\ 487\ (\text{N}\cdot\text{s})/\text{m}$, $c_3=1\ 487\ (\text{N}\cdot\text{s})/\text{m}$ 。

1.2.3 路面模型

路面模型能反映道路线形参数变化要求,也能反映路面平整度的情况,对纵断面线形参数和平整度根据研究要求进行控制。

道路标高为:

$$z(s, x) = f_h(s, x) + \xi(s, x) \quad (1)$$

式中: s 为道路桩号; x 为距中心线横向距离; $f_h(s, x)$ 为路面内任一点高程函数; $\xi(s, x)$ 为平整度。

汽车以设计车速匀速行驶,产生垂直路面的受力是“人-车-路”产生纵向振动的重要因素,系统主要受力为路面不平整产生的力、重力、离心力、路面支承力,路面不平整引起的力可作为“人-车-路”系统内力而产生,详见动力学方程组,重力、离心力、路面支承力与纵断面线形相关性较大,受力后的变化情况如下:

(1) 重力随线形变化。根据图2,重力变化 ΔG_{ji} 根据线形变化引起的角度变化确定,见式(2):

$$\Delta G_{ji} = (\cos \varphi_i - \cos \varphi_{i-1}) m_j g \quad (2)$$

式中: φ_i, φ_{i-1} 为纵坡与地平面夹角; m_j 为4个车轮的转化质量; g 为重力加速度。

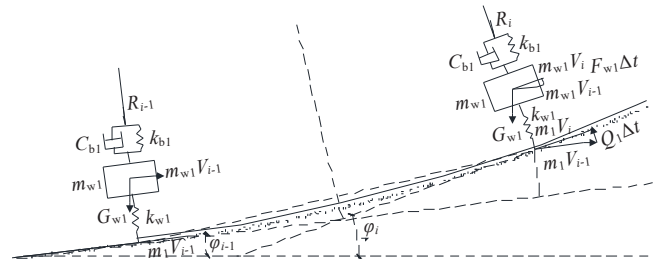


图2 模型受力分析图

Figure 2 Model stress analysis

(2) 离心力随线形变化。“人-车-路”系统在线形上运行,质量和速度是保持不变的,根据动量守恒定律,系统内各质点受力变化(图2)为:

$$F_{ji} = 2m_j v \sin [(\varphi_i - \varphi_{i-1})/2] / \Delta t \quad (3)$$

式中: F_{ji} 为“人-车-路”系统在时间 i 时各支承反力; v 为车辆运行速度; Δt 为作用点的时间。

整理式(3),令 $\varphi_i - \varphi_{i-1} = \Delta \varphi_i$,得:

$$F_{ji} = 2m_j v \sin (\Delta \varphi_i / 2) / \Delta t \quad (4)$$

因 $\Delta t, \Delta \varphi_i$ 很小,用泰勒公式展开式(4):

$$F_{ji} = 2m_j v \sin (\Delta \varphi_i / 2) / \Delta t \approx 2m_j v \frac{\Delta \varphi_i}{2 \Delta t} =$$

$$m_j v \Delta \varphi_i \frac{v}{\Delta l} = m_j v^2 \frac{\Delta \varphi_i}{\Delta l} = m_j v^2 / R \quad (5)$$

式中: R 为竖曲线半径; l 为路的长度; l 为路的长度。

由此可见,式(3)和式(5)计算结果均为离心力,但式(3)将线形参数与力学结合,便于线形动态力学分析。

(3) 路面支承力随线形变化。同理可求得路面的支承反力 Q_{ji} 。车辆在道路上行驶,4个轮胎是接触点,将“人-车”系统的质量变化为4个车轮的转化质量 m_j ,根据动量守恒定律,4个轮胎的受力 Q_{ji} 为:

$$Q_{ji} = 2m_j v \sin [(\varphi_i - \varphi_{i-1})/2] / \Delta t \quad (6)$$

车辆转化质量 m_j 用车辆和驶乘人员重量合力、俯仰转动力矩、侧倾转动力矩计算求得。

根据以上分析,4个车轮受力 P_{ji} 为:

$$P_{ji} = Q_{ji} + F_{ji} + \Delta G_{ji} \quad (7)$$

“人-车-路”系统其他质点受力 P_{ji} 为:

$$P_{ji} = F_{ji} + \Delta G_{ji} \quad (8)$$

结合受力分析(图1)和“人-车-路”模型,根据达

朗贝尔原理,对系统内单元的每个自由度建立其微分方程:

$$m_{w1}\ddot{z}_{w1} + k_{w1}(z_{w1} - z_1) + c_{w1}(\dot{z}_{w1} - \dot{z}_1) + k_{b1}(z_{w1} - z_{b1}) + c_{b1}(\dot{z}_{w1} - \dot{z}_{b1}) = P_{w1} \quad (9)$$

$$m_{w2}\ddot{z}_{w2} + k_{w2}(z_{w2} - z_2) + c_{w2}(\dot{z}_{w2} - \dot{z}_2) + k_{b2}(z_{w2} - z_{b2}) + c_{b2}(\dot{z}_{w2} - \dot{z}_{b2}) = P_{w2} \quad (10)$$

$$m_{w3}\ddot{z}_{w3} + k_{w3}(z_{w3} - z_3) + c_{w3}(\dot{z}_{w3} - \dot{z}_3) + k_{b3}(z_{w3} - z_{b3}) + c_{b3}(\dot{z}_{w3} - \dot{z}_{b3}) = P_{w3} \quad (11)$$

$$m_{w4}\ddot{z}_{w4} + k_{w4}(z_{w4} - z_4) + c_{w4}(\dot{z}_{w4} - \dot{z}_4) + k_{b4}(z_{w4} - z_{b4}) + c_{b4}(\dot{z}_{w4} - \dot{z}_{b4}) = P_{w4} \quad (12)$$

$$m\ddot{z} + c_{b1}(\dot{z}_{b1} - \dot{z}_{w1}) + k_{b1}(z_{b1} - z_{w1}) + c_{b2}(\dot{z}_{b2} - \dot{z}_{w2}) + k_{b2}(z_{b2} - z_{w2}) + c_{b3}(\dot{z}_{b3} - \dot{z}_{w3}) + k_{b3}(z_{b3} - z_{w3}) + c_{b4}(\dot{z}_{b4} - \dot{z}_{w4}) + k_{b4}(z_{b4} - z_{w4}) + k_{R1}(z_{a1} - z_{R1}) + c_{R1}(\dot{z}_{a1} - \dot{z}_{R1}) + k_{R3}(z_{a3} - z_{R3}) + c_{R3}(\dot{z}_{a3} - \dot{z}_{R3}) = P_m \quad (13)$$

$$I_P\ddot{\theta} - [c_{b1}(\dot{z}_{b1} - \dot{z}_{w1}) + k_{b1}(z_{b1} - z_{w1}) + c_{b2}(\dot{z}_{b2} - \dot{z}_{w2}) + k_{b2}(z_{b2} - z_{w2})]a + [c_{b3}(\dot{z}_{b3} - \dot{z}_{w3}) + k_{b3}(z_{b3} - z_{w3}) + c_{b4}(\dot{z}_{b4} - \dot{z}_{w4}) + k_{b4}(z_{b4} - z_{w4})]b - [k_{R1}(z_{a1} - z_{R1}) + c_{R1}(\dot{z}_{a1} - \dot{z}_{R1})]s_{21} - [k_{R3}(z_{a3} - z_{R3}) + c_{R3}(\dot{z}_{a3} - \dot{z}_{R3})]s_{23} = P_{w3}b + P_{w4}b - P_{w1}a - P_{w2}a - P_{R1}s_{21} - P_{R2}s_{22} - P_{R3}s_{23} \quad (14)$$

$$I_r\ddot{\phi} + [-c_{b1}(\dot{z}_{b1} - \dot{z}_{w1}) - k_{b1}(z_{b1} - z_{w1}) + c_{b2}(\dot{z}_{b2} - \dot{z}_{w2}) + k_{b2}(z_{b2} - z_{w2})]d + [-c_{b3}(\dot{z}_{b3} - \dot{z}_{w3}) - k_{b3}(z_{b3} - z_{w3}) + c_{b4}(\dot{z}_{b4} - \dot{z}_{w4}) + k_{b4}(z_{b4} - z_{w4})]d - [k_{R1}(z_{a1} - z_{R1}) + c_{R1}(\dot{z}_{a1} - \dot{z}_{R1})]s_{11} - [k_{R3}(z_{a3} - z_{R3}) + c_{R3}(\dot{z}_{a3} - \dot{z}_{R3})]s_{13} = -P_{w1}d + P_{w2}d - P_{w3}d + P_{w4}d - P_{R1}s_{11} - P_{R2}s_{12} - P_{R3}s_{13} \quad (15)$$

$$m_{R1}\ddot{z}_{R1} + k_{R1}(z_{R1} - z_{a1}) + k_{R2}(z_{R1} - z_{R2}) + c_{R1}(\dot{z}_{R1} - \dot{z}_{a1}) + c_{R2}(\dot{z}_{R1} - \dot{z}_{R2}) = P_{R1} \quad (16)$$

$$m_{R2}\ddot{z}_{R2} + k_{R2}(z_{R2} - z_{R1}) + c_{R2}(\dot{z}_{R2} - \dot{z}_{R1}) = P_{R2} \quad (17)$$

$$m_{R3}\ddot{z}_{R3} + k_{R3}(z_{R3} - z_{a3}) + c_{R3}(\dot{z}_{R3} - \dot{z}_{a3}) = P_{R3} \quad (18)$$

式中: z_{ji} 为“人-车-路”系统表示*j*部位的*i*部分位移。

1.3 评价指标

ISO 确定人体影响频率范围 0.5~80.0 Hz,且各个频率对人体影响较差较大,频域加权函数为:

$$w(f) = \begin{cases} 0.5 & 0.5 < f \leq 2.0 \\ \frac{f}{4} & 2.0 < f \leq 4.0 \\ 1 & 4.0 < f \leq 12.5 \\ \frac{12.5}{f} & 12.5 < f \leq 80.0 \end{cases} \quad (19)$$

参考路桥过渡段的研究过程,最早研究采用了最大瞬态振动进行分析^[15],而在后期的研究中,设计参数确定^[16]、测试验证^[20]均采用加权加速度均方根作为评价标准。这是因为纵断面线形参数变化较多,且其受力变化和冲击影响相较于路桥过渡段更小、更频繁,因此采用加权加速度均方根进行评价相对更合理。

加权加速度均方根来评价感知、振动舒适性的相关研究成果已经得到了验证^[20-21]。不同国家对于汽车振动感知的标准存在一些差异^[21],经过比较,选择要求较高且体系完整的标准作为评价标准,具体见表1。而对于振动舒适性的标准,采用ISO标准,具体见表2。

为了全面对比分析线形要素引起振动的总体情况和特征结构,同时采用驾乘人员加速度振动峰值、振动

周期和频率、加速度均方根等多指标进行对比分析。

表1 振动感知评价标准

Table 1 Evaluation standard of vibration perception

加权加速度均方根/(m·s ⁻²)	感知情况	加权加速度均方根/(m·s ⁻²)	感知情况
<0.015	无法感知	0.020~0.080	容易感知
0.015	感知阈值	0.080~0.315	强烈感知
0.015~0.020	勉强感知	>0.315	极端感知

表2 舒适性评价标准

Table 2 Evaluation standard of comfort

加权加速度均方根/(m·s ⁻²)	人体的舒适程度	加权加速度均方根/(m·s ⁻²)	人体的舒适程度
<0.315	保持舒适	0.800~1.600	不舒适
0.315~0.630	稍有不舒服	1.250~2.500	非常不舒服
0.500~1.000	有些不舒服	>2.000	特别不舒服

2 纵断面基础线形引起动力学效应对比分析

将两组纵断面基本线形参数分别代入路面模型中,暂不计入平整度,采用 Newmark-β 法编制 matlab 程序求解振动微分方程,迭代计算误差按 1% 控制。

2.1 常规基础线形动力学效应

在设计规范内选择常用参数,车速取 120 km/h,竖曲线半径为 7 000 m, $i_1 = (-2\%, 2\%)$,道路横坡 2.0%,竖曲线函数见式(20),计算结果见表3、图3。

$$\begin{cases}
 f_h(s, x) = 10 - x \times 0.02 - s \times 0.02 & s < 20 \\
 f_h(s, x) = 10 - x \times 0.02 - \\
 s \times 0.02 + \frac{(s-20)^2}{2 \times 7\,000} & 20 \leq s < 300 \\
 f_h(s, x) = 9.6 - x \times 0.02 + \\
 0.02 \times (s - 300) & 300 \leq s
 \end{cases}
 \quad (20)$$

分析计算成果,可得出以下结论:

(1) 振动起因分析:通过时间和桩号的对应关系

(图3和表3)进行分析,当车辆从一种受力均衡状态转换到另一种受力均衡状态时,由于受力的变化,会引起车辆振动,形成2.7 s较强烈的车辆振动区域。当车辆前轮从一种线形(直坡或竖曲线)进入另一种线形(竖曲线或直坡)时,会产生振动。当车辆完全进入新的线形后,振动达到峰值,此时的主要作用力为离心力的施加或释放。峰值方向与作用力方向相同,而最大峰值则取决于车速、线形参数和车辆系统参数,与竖曲线离心加速度相关性较强。

表3 小汽车以120 km/h驶入(出)7 000 m半径凹曲线常规基础线形振动区数据

Table 3 Data for car driving at 120 km/h entering and exiting vibration zone with conventional basic alignment in concave curve with a radius of 7 000 m

项目	第一周期		第二周期		第三周期		第四周期	
	时间坐标/ (0.01 s)	加速度峰值/ (m·s ⁻²)	时间坐标/ (0.01 s)	加速度峰值/ (m·s ⁻²)	时间坐标/ (0.01 s)	加速度峰值/ (m·s ⁻²)	时间坐标/ (0.01 s)	加速度峰值/ (m·s ⁻²)
起点	52		122		218		322	
负最大	62	-0.163 3	141	-0.036 4	238	-0.005 4	344	-0.000 8
车辆驶近零	74		169		269		374	
入圆曲正最大	94	0.080 0	189	0.014 7	290	0.001 9	396	0.000 4
线近零	122		218		322		424	
周期/s	0.70		0.96		1.04		1.02	
频率/Hz	1.43		1.04		0.96		0.98	
起点	892		962		1 057		1 163	
正最大	902	0.163 3	981	0.036 4	1 078	0.005 4	1 184	0.000 8
车辆驶近零	914		1 009		1 109		1 215	
出圆曲负最大	937	-0.078 3	1 029	-0.014 7	1 130	-0.001 9	1 236	-0.000 4
线近零	962		1 057		1 163		1 265	
周期/s	0.71		0.95		1.06		1.02	
频率/Hz	1.43		1.05		0.94		0.98	

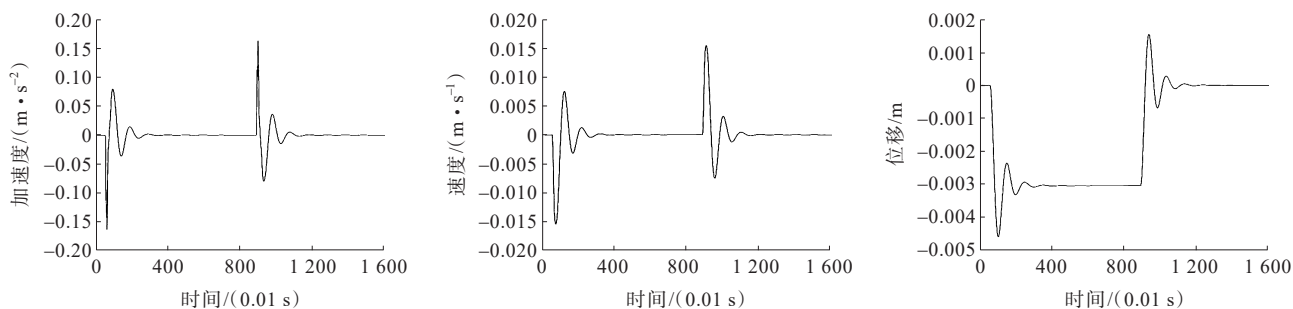


图3 7 000 m半径凹曲线常规基础线形条件下驶乘人员加速度、速度、位移随时间变化图

Figure 3 Variation of acceleration, velocity, and displacement of passengers under conventional basic alignment in concave curve with a radius of 7 000 m with time

(2) 振动特征:在每个振动周期内,正负峰值之比小于0.5,且振动峰值的衰减速度较快。每个周期的峰值均衰减至上一周期峰值的0.2以下,第三周期的最小峰值只有第一周期最大峰值的1.16%。在振

动区内,加速度的均方根分别为:第一周期为 $6.716 \times 10^{-2} \text{ m/s}^2$,第二周期为 $1.912 \times 10^{-2} \text{ m/s}^2$,第三周期为 $2.757 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$,第四周期为 $4.423 \times 10^{-4} \text{ m/s}^2$ 。第三周期均方根是第一周期的4.1%,而第四周期只有

第一周期的0.66%;振动周期和频率向车辆的自振特征过渡。综合考虑加速度峰值、均方根、周期以及频率,将振动前三个周期定义为有效振动区。在有效振动区以外,振动很小,对行车舒适性的影响也很小,称为稳定区。

(3) 振动效果评价:在振动区内,加权加速度的均方根为0.018 m/s²,超过了感知阈值,达到了勉强感知的程度。

(4) 从道路专业角度分析:有效振动区域的时间接近3 s,这与竖曲线长度小长度按3 s行程进行控制的要求相符合。基于车辆振动的特点,增加竖曲线

的长度相当于增加了稳定区的长度,这样可以有效降低线形对车辆的整体振动影响,从而提升线形的服务水平;在《公路路线设计规范》(JTG D20—2017)和《城市道路路线设计规范》(CJJ 193—2012)得到了验证,这两个规范均将竖曲线的控制长度增加到了原来长度的2倍以上。这也从侧面验证了计算结果的合理性。

2.2 缓和竖曲线基本线形动力学效应

在2.1节常规基础线形上增加二段长为102 m缓和竖曲线,其他参数基本不变,竖曲线函数见式(21),计算结果见图4和表4。

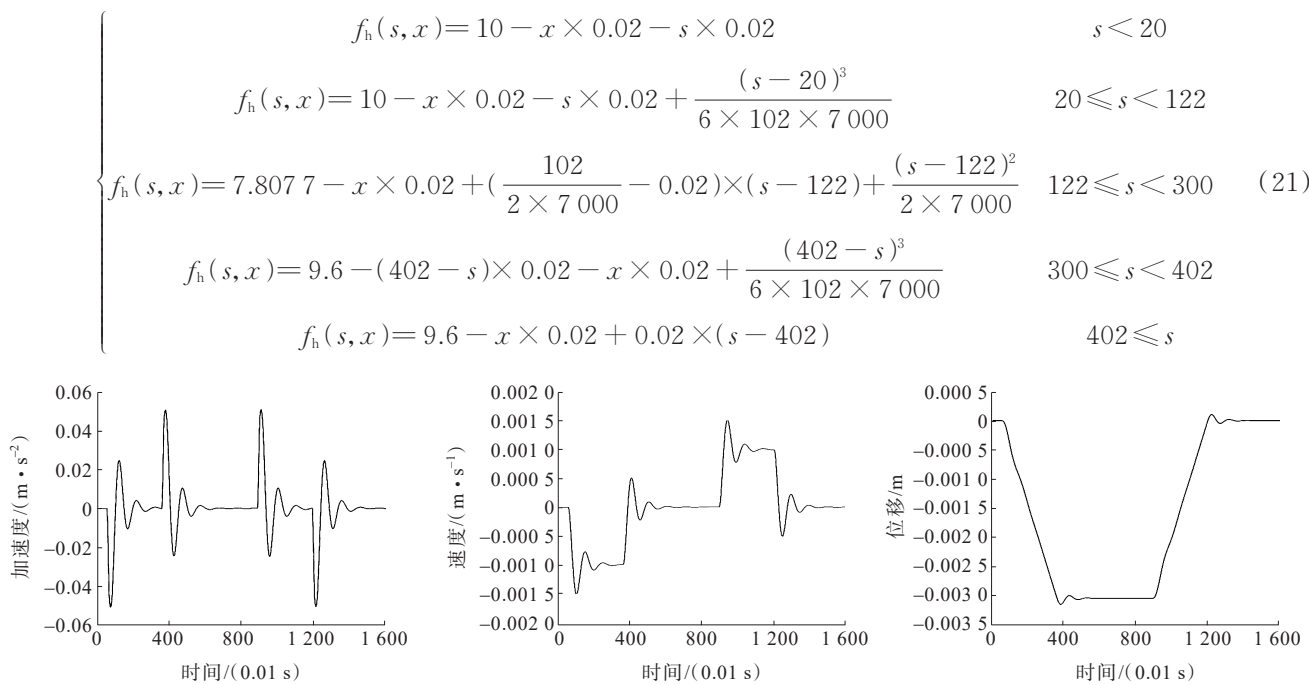


图4 7 000 m半径缓和凹曲线基本线形条件下驶乘人员加速度、速度、位移随时间变化图
Figure 4 Acceleration, velocity and displacement of passengers under 7 000 m radius gradual and concave curve conditions over time

表4 小汽车以120 km/h驶入(出)7 000 m半径缓和凹曲线基本线形振动区数据
Table 4 Data for car driving at 120 km/h entering and exiting vibration zone with basic alignment in easing concave curve with a radius of 7 000 m

项目	第一周期		第二周期		第三周期	
	时间坐标/ (0.01 s)	加速度峰值/ (m·s ⁻²)	时间坐标/ (0.01 s)	加速度峰值/ (m·s ⁻²)	时间坐标/ (0.01 s)	加速度峰值/ (m·s ⁻²)
车辆驶入缓和曲线	起点	54	150		248	
	负最大	74	169	-0.001 050	269	-0.000 149
	近零	102	198		300	
	正最大	122	218	0.000 403	322	0.000 059
	近零	150	248		352	
	周期/s	0.96	0.98		1.04	
	频率/Hz	1.04	1.02		0.96	

续表 4

项目		第一周期		第二周期		第三周期	
		时间坐标/	加速度峰值/	时间坐标/	加速度峰值/	时间坐标/	加速度峰值/
		(0.01 s)	(m·s ⁻²)	(0.01 s)	(m·s ⁻²)	(0.01 s)	(m·s ⁻²)
车辆驶入圆曲线	起点	362		455		554	
	正最大	380	0.005 036	475	0.001 04	575	0.000 148
	近零	408		504		606	
	负最大	428	-0.002 450	524	-0.000 40	629	-0.000 059
	近零	455		554		658	
	周期/s	0.93		0.99		1.04	
	频率/Hz	1.08		1.01		0.96	
车辆驶出圆曲线	起点	894		989		1 088	
	正最大	914	0.005 061	1 009	0.001 045	1 109	0.000 149
	近零	942		1 038		1 140	
	负最大	962	-0.002 460	1 058	-0.000 400	1 162	-0.000 059
	近零	989		1 088		1 193	
	周期/s	0.95		0.99		1.05	
	频率/Hz	1.05		1.01		0.95	
车辆驶出缓和曲线	起点	1 201		1 295		1 394	
	负最大	1 220	-0.005 030	1 315	-0.001 040	1 414	-0.000 147
	近零	1 248		1 344		1 446	
	正最大	1 268	0.002 446	1 364	0.000 401	1 468	0.000 059
	近零	1 295		1 394		1 499	
	周期/s	0.94		0.99		1.05	
	频率/Hz	1.06		1.01		0.95	

分析计算成果,可得出如下结果:

(1) 振动分析。从时间和桩号的对应关系(图 4 和表 4)来看,车辆从一种线形转换到另一种线形时,会形成车辆振动区域。加设缓和曲线后,离心力变化由突变改变为相对均匀的变化,计算点的受力变化很小,并在汽车中轮胎、悬挂等弹性和阻尼系统的综合作用下,加速度、速度、位移的时滞现象和惯性作用明显,且在线形变化处均发生小幅度的车辆振动,详见图 4 和表 4。

(2) 振动特征。每个振动周期内,振动正负峰值之比小于 0.5,且振动峰值的衰减速度较快。每个周期的峰值衰减至上一周期峰值的 0.2 以下,第三周期最小峰值仅为第一周期最大峰值的 1.17%。在振动区内,加速度的均方根值分别为:第一周期为 $2.774 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$,第二周期为 $5.465 \times 10^{-4} \text{ m/s}^2$,第三周期为 $7.874 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,第三周期为第一周期的 2.8%。振动周期和频率向车辆自振特征过渡。根据振动结构特征,将前三个周期定义为有效振动区,其余称为稳定区。

(3) 增加缓和竖曲线后的变化特征。振动区由 2

个增加至 4 个,这表明车辆进出不同的线形均产生振动区。由于惯性和时滞作用的影响,车辆振动形态和峰值方向发生较大变化,每个振动区时间均接近 3 s;每个线形均有稳定区。

(4) 振动效果评价:在振动区域内,加权加速度均方根为 $0.000 81 \text{ m/s}^2$,小于感知阈值,说明提升了线形行车质量。

2.3 两种纵断面基本线形动力学效应对比分析

竖曲线中增设缓和曲线后,车辆振动特征结构产生明显变化,主要有以下方面:从运动形态看相差很大,对比驶乘人员加速度、速度、位移 3 个图形,虽然振动波由 2 个增加至 4 个,但振动峰值降到 3%,小于常规基础线形第 3 个峰值,位移变平滑,这表明车辆振动大幅降低。虽然在加入缓和竖曲线后振动特征结构发生变化,但两个线形的振动也有相同特征:产生振动位置接近,振动周期、频率变化较小,衰变特征相差不大,稳定状态下位移相同。根据以上车辆振动的特征比较,表明增加缓和竖曲线有效减缓了车辆振动,提升了线形质量。

3 车辆性能对行车动力学效应的影响分析

道路上行驶的车型品种较多,参数变化较大,参考汽车系统的相关研究成果,重点研究车辆类型、重量、悬挂系统参数对动力学效应的影响。

3.1 车辆类型对行车动力学效应的影响

选择行车舒适性要求较高的小汽车和大客车作为研究对象,根据设计车速,在设计规范内选择最小竖曲线半径,对车辆振动计算见表5,加设缓和曲线后,小汽车条件下加速度峰值只有常规基础线形的1.52%~3.08%,大客车则为1.01%~1.98%;而加速度均方根对比为:加缓和曲线后小汽车只有常规基础线形的1.65%~3.23%,大客车为1.11%~2.32%,车辆振动大幅下降。

3.2 车辆性能参数对行车动力学效应的影响

在常规基础线形条件下,振动峰值、加速度均方

根是随着车辆重量的增加而增大(表6),这显然与桥梁接坡计算结论相反。从动力学角度分析,车辆质量增加,引起车辆振动的起因是离心力的增加,车辆内部的刚度系数和阻尼系数不变,则振动产生的加速度、速度、变形均增加;而桥梁接坡计算采用平整度、路面变形变化产生的结果。根据微分方程组公式,质量越大,则相同弹性条件下,加速度越小。综上所述,表4的计算结论是正确的。

增加缓和竖曲线后,振动峰值和加速度均方根均有大幅降低,见表6。振动峰值与加速度均方根之比定义为有效振幅,缓和竖曲线基本线形和常规基础线形的有效振幅差值与常规线形的有效振幅之比定义为有效降幅,从表6中可知,增设缓和曲线后,可有效降低振动幅度,并随着车辆质量的增加,有效降幅随之增加。

在两种基础线形条件下,振动峰值和加速度均方根是随着车辆前悬架系统刚度和阻尼系数的增加

表5 车型、车速、曲线参数因素对行车动力学效应的影响分析
Table 5 Influence of vehicle type, velocity and curve parameter factors on dynamic effect

车速/ (km·h ⁻¹)	曲线类型	半径/ m	离心加速度/ (m·s ⁻²)	加速度最大峰值/(m·s ⁻²)		加速度均方根/(m·s ⁻²)	
				小汽车	大客车	小汽车	大客车
120	常规基础线形	4 000	0.277 78	0.285 80	0.430 66	0.063 38	0.135 21
	缓和竖曲线基础线形			0.006 45	0.008 53	0.002 05	0.002 33
	有无缓和曲线对比			0.022 60	0.019 80	0.032 30	0.017 30
100	常规基础线形	3 000	0.257 20	0.291 97	0.344 19	0.062 38	0.122 77
	缓和竖曲线基础线形			0.005 12	0.006 74	0.001 61	0.001 92
	有无缓和曲线对比			0.017 60	0.019 60	0.025 80	0.015 70
80	常规基础线形	2 000	0.246 91	0.285 09	0.360 64	0.064 66	0.113 28
	缓和竖曲线基础线形			0.004 61	0.005 16	0.001 44	0.001 59
	有无缓和曲线对比			0.016 20	0.014 30	0.022 20	0.014 00
60	常规基础线形	1 500	0.185 19	0.195 63	0.290 74	0.053 37	0.081 99
	缓和竖曲线基础线形			0.002 97	0.002 94	0.000 88	0.000 91
	有无缓和曲线对比			0.015 20	0.010 10	0.016 50	0.011 10
40	常规基础线形	700	0.176 37	0.187 66	0.216 40	0.058 94	0.064 21
	缓和竖曲线基础线形			0.004 80	0.003 23	0.001 41	0.001 13
	有无缓和曲线对比			0.025 60	0.014 90	0.024 00	0.017 60
30	常规基础线形	400	0.173 61	0.205 72	0.178 74	0.063 33	0.057 46
	缓和竖曲线基础线形			0.006 34	0.003 54	0.001 99	0.001 33
	有无缓和曲线对比			0.030 80	0.019 80	0.031 40	0.023 20
20	常规基础线形	300	0.102 88	0.129 94	0.110 88	0.040 07	0.032 02
	缓和竖曲线基础线形			0.002 84	0.001 64	0.001 00	0.000 62
	有无缓和曲线对比			0.021 90	0.014 80	0.024 90	0.019 50

表 6 车辆质量变化对行车动力学效应的影响分析
Table 6 Influence of vehicle mass variation on dynamic effect

质量/ kg	常规基础线形			缓和竖曲线基础线形			有效 降幅
	振动峰值/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	加速度均方根/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	有效振幅	振动峰值/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	加速度均方根/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	有效振幅	
1 242	0.276 70	0.062 85	0.227 14	0.006 19	0.001 92	0.310 72	0.37
1 380	0.285 84	0.063 38	0.221 72	0.006 45	0.002 05	0.317 57	0.43
1 518	0.294 75	0.063 59	0.215 75	0.006 67	0.002 16	0.324 42	0.50
1 656	0.303 49	0.064 02	0.210 96	0.006 88	0.002 27	0.330 63	0.57
1 794	0.313 51	0.064 43	0.205 52	0.007 07	0.002 38	0.336 48	0.64
1 932	0.323 47	0.065 00	0.200 93	0.007 28	0.002 48	0.340 79	0.70

而降低。加设缓和竖曲线后,车辆振动峰值和加速度均方根均有大幅降低。增设缓和曲线可有效降低振动幅度,且有效降幅随车辆前悬架系统刚度的增加而增加;而前悬架阻尼系数变化对有效降幅影响基本维持不变。具体见表 7、8。

车辆后悬架系统刚度和阻尼对车辆振动的影响相对复杂。在常规基础线形条件下,振动峰值随着后悬架系统刚度系数增加而增大,而加速度均方根均是先增后减,存在最大值。同时,振动峰值随着阻尼系数的增加而增加,但加速度均方根则随着阻尼系数的增加而减小。在缓和竖曲线基本线形状态下,车辆振动降幅很大,车辆振动峰值只有常规竖曲线的 2.14%~2.26%,加速度均方根只有常规竖曲线

的 3.09%~3.23%,两者均大幅降低;振动峰值、加速度均方根随着后悬架系统刚度系数和阻尼系数的增加而减小;有效降幅随着车辆后悬架系统刚度的增加而减少,而后悬架阻尼系数的变化对有效降幅的影响基本维持不变。具体见表 9、10。

4 使用状态下基础线形行车动力效应的对比分析

旧路改造工程投入使用后,道路线形与道路平整度的耦合作用将直接影响道路的服务性能。平整度选取范围为 1.65~5.28,为了保证准确,采用功率谱进行模拟,并进行方差验算,然后反算出平整度^[20],计算平整度情况见图 5。由于车线动力学效应

表 7 车辆前悬架刚度对行车动力学效应的影响分析
Table 7 Influence of vehicle front suspension stiffness on dynamic effect

前悬架刚度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	常规基础线形			缓和竖曲线基础线形			有效 降幅
	振动峰值/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	振动区域均方根/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	有效振幅	振动峰值/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	振动区域均方根/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	有效振幅	
10	0.307 08	0.063 68	0.207 39	0.007 65	0.002 14	0.279 74	0.35
17	0.285 84	0.063 38	0.221 72	0.006 45	0.002 05	0.317 57	0.43
24	0.266 45	0.060 17	0.225 83	0.005 67	0.001 88	0.330 87	0.47
31	0.249 28	0.055 21	0.221 49	0.005 11	0.001 66	0.323 80	0.46
38	0.234 10	0.050 41	0.215 32	0.004 68	0.001 49	0.318 97	0.48

表 8 车辆前悬架阻尼对行车动力学效应的影响分析
Table 8 Influence of vehicle front suspension damping on dynamic effect

前悬架阻尼/ [($\text{kN} \cdot \text{s}$) $\cdot \text{m}^{-1}$]	常规基础线形			缓和竖曲线基础线形			有效 降幅
	振动峰值/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	振动区域均方根/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	有效振幅	振动峰值/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	振动区域均方根/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	有效振幅	
1.5	0.285 84	0.063 38	0.221 72	0.006 45	0.002 05	0.317 57	0.43
1.7	0.281 57	0.060 31	0.214 20	0.006 23	0.001 93	0.310 29	0.45
1.9	0.277 17	0.057 67	0.208 08	0.006 04	0.001 83	0.302 22	0.45
2.2	0.270 46	0.054 32	0.200 84	0.005 78	0.001 68	0.290 02	0.44

表 9 车辆后悬架刚度对行车动力学效应的影响分析
Table 9 Influence of vehicle rear suspension stiffness on dynamic effect

后悬架刚度/ (kN·m ⁻¹)	常规基础线形			缓和竖曲线基础线形			有效 降幅
	振动峰值/ (m·s ⁻²)	振动区域均方根/ (m·s ⁻²)	有效振幅	振动峰值/ (m·s ⁻²)	振动区域均方根/ (m·s ⁻²)	有效振幅	
22	0.285 84	0.063 38	0.221 72	0.006 45	0.002 05	0.317 57	0.43
32	0.288 72	0.064 41	0.223 08	0.006 43	0.002 01	0.312 12	0.40
42	0.291 32	0.064 42	0.221 12	0.006 42	0.001 92	0.299 10	0.35
52	0.293 67	0.064 31	0.218 98	0.006 40	0.001 91	0.297 66	0.36
62	0.295 81	0.064 28	0.217 30	0.006 39	0.001 82	0.285 40	0.31

表 10 车辆后悬架阻尼对行车动力学效应的影响分析
Table 10 Influence of vehicle rear suspension damping on dynamic effect

后悬架阻尼/ [(kN·s)·m ⁻¹]	常规基础线形			缓和竖曲线基础线形			有效 降幅
	振动峰值/ (m·s ⁻²)	振动区域均方根/ (m·s ⁻²)	有效振幅	振动峰值/ (m·s ⁻²)	振动区域均方根/ (m·s ⁻²)	有效振幅	
1.1	0.284 393	0.065 432	0.230 077	0.006 497	0.002 096	0.322 611	0.40
1.5	0.285 838	0.063 375	0.221 718	0.006 448	0.002 048	0.317 567	0.43
1.7	0.286 507	0.062 633	0.218 610	0.006 424	0.002 021	0.314 630	0.44
1.9	0.287 143	0.062 019	0.215 986	0.006 400	0.001 995	0.311 721	0.44
2.2	0.288 036	0.061 277	0.212 741	0.006 365	0.001 962	0.308 168	0.45

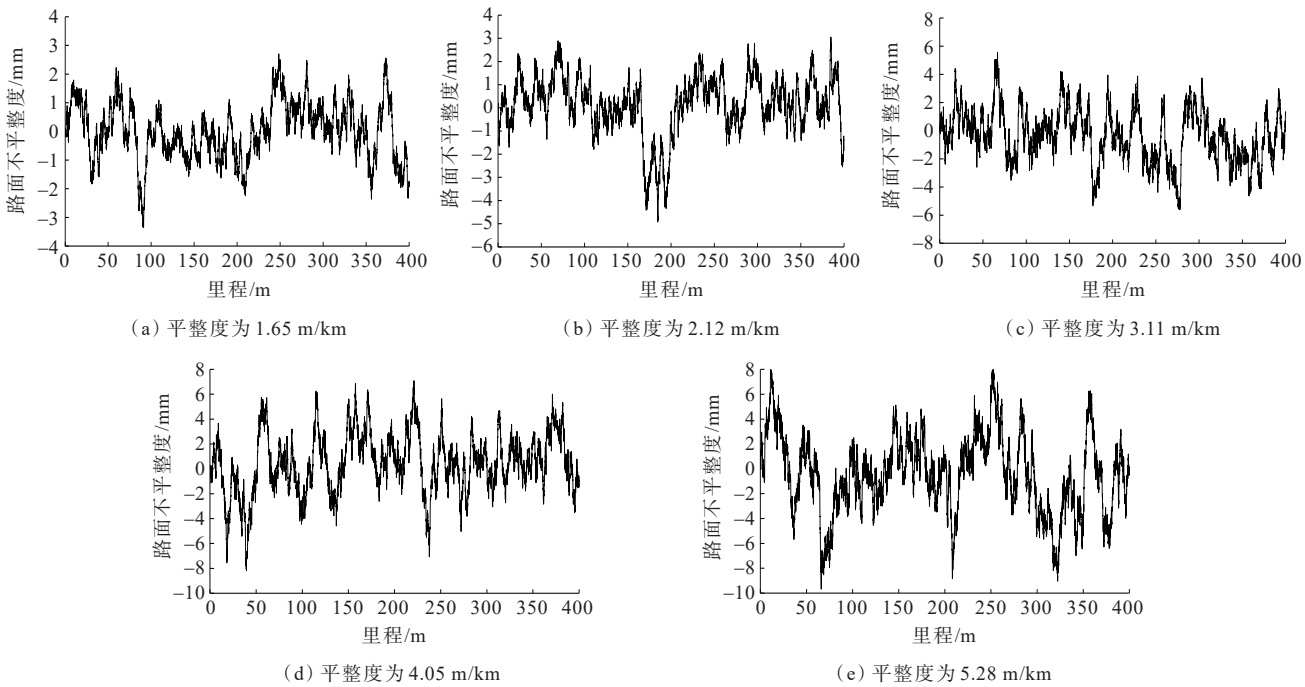


图 5 模拟路面平整度

Figure 5 Simulated road surface smoothness

的特殊性,只能采用个例计算进行比较,竖曲线半径保持为 7 000 m 进行对比分析研究。根据两组纵断面数据的动力学效应特征分别划分为:直坡稳定区、驶入和驶出竖曲线振动区、竖曲线稳定区,以及直坡稳定区、缓和曲线振动区、缓和曲线稳定区、竖曲线振动区、竖曲线稳定区。由于这些划分区域的受力特点各不相

同,为了区分耦合平整度后的效果差异,将分别独立计算。从考察旧路改造工程使用全过程角度出发,将平整度按新建到接近养护标准要求分为 5 档。由于道路平整度的随机性,在采用生成道路平整度文件后固定平整度参数,并注意到各划分区域位置的变化,进行有无竖曲线条件下加速度对比计算,结果见表 11、12。

表 11 常规基础线形与道路平整度耦合效应计算对比分析

Table 11 Comparative analysis of coupling effect calculation between conventional basic alignment and road smoothness

平整度	线形形态	加速度/(m·s ⁻²)				
		直坡稳定区	驶入竖曲线振动区	竖曲线稳定区	驶出竖曲线振动区	直坡稳定区
1.65	直坡	0.046 4	0.088 4	0.092 8	0.072 7	0.083 1
	直圆	0.046 4	0.111 6	0.097 8	0.116 7	0.082 8
	直圆/直坡	1.00	1.26	1.05	1.61	1.00
2.12	直坡	0.112 6	0.080 0	0.097 8	0.112 0	0.096 1
	直圆	0.112 6	0.128 6	0.099 8	0.116 9	0.096 3
	直圆/直坡	1.00	1.61	1.02	1.04	1.00
3.11	直坡	0.115 7	0.181 1	0.292 0	0.157 0	0.214 0
	直圆	0.115 7	0.212 4	0.294 3	0.155 6	0.213 6
	直圆/直坡	1.00	1.17	1.01	0.99	1.00
4.05	直坡	0.140 4	0.245 3	0.208 2	0.252 9	0.246 2
	直圆	0.140 4	0.268 6	0.208 1	0.298 3	0.246 1
	直圆/直坡	1.00	1.10	1.00	1.18	1.00
5.29	直坡	0.218 1	0.269 7	0.281 5	0.236 1	0.257 4
	直圆	0.218 0	0.256 8	0.280 1	0.262 8	0.257 3
	直圆/直坡	1.00	0.95	1.00	1.11	1.00

表 12 缓和竖曲线基本线形与道路平整度耦合效应计算对比分析

Table 12 Comparative analysis of coupling effect calculation between basic alignment of easing vertical curves and road smoothness

平整度	线形形态	加速度/(m·s ⁻²)				
		直坡稳定区	缓和曲线振动区	缓和曲线稳定区	竖曲线振动区	竖曲线稳定区
1.65	直缓圆	0.049 6	0.093 5	0.106 0	0.078 3	0.076 8
	直坡	0.049 6	0.092 7	0.106 1	0.077 6	0.076 8
	直缓圆/直坡	1.00	1.01	1.00	1.01	1.00
2.12	直缓圆	0.088 7	0.085 9	0.144 8	0.10 76	0.085 0
	直坡	0.088 7	0.086 0	0.144 8	0.107 3	0.085 0
	直缓圆/直坡	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
3.11	直缓圆	0.107 8	0.212 3	0.121 0	0.170 1	0.220 8
	直坡	0.107 8	0.212 3	0.121 0	0.169 8	0.220 8
	直缓圆/直坡	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
4.05	直缓圆	0.141 8	0.248 6	0.305 8	0.222 2	0.284 2
	直坡	0.141 8	0.249 0	0.305 8	0.223 6	0.284 2
	直缓圆/直坡	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00
5.29	直缓圆	0.216 7	0.276 4	0.239 6	0.254 8	0.257 9
	直坡	0.216 7	0.275 5	0.239 5	0.255 1	0.257 9
	直缓圆/直坡	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

从常规基础线形计算结果中可以看出:在直坡段稳定区内,加速度均方根之比为1.00,计算结果稳定,从侧面表明计算符合要求;在竖曲线稳定区,加速度均方根之比为1.00~1.05,耦合作用很小,可以忽略不计。然而,在驶入与驶出竖曲线振动区内,线形与平整度耦合作用明显,加速度均方根之比为0.95~1.61。分析耦合过程,主要有两个受力:①因道路不平整度产生的弹性作用力;②在曲线道路上产生的离心力。由于这两个力的作用方向存在差异,因此将产生不同的耦合效果。受制于平整度的随机性,产生的耦合作用效果很难有稳定的规律。这表明线形对行车动力学效应的综合影响远较线形本身产生的影响大。

从缓和竖曲线基本线形计算结果中可以看出:不论缓和曲线、竖曲线振动区,还是直坡、缓和曲线、竖曲线稳定区,加速度均方根之比为0.99~1.01,均接近1.00,线形与平整度耦合作用可以忽略不计,表明基本消除了线形对行车舒适性的影响,接近“人-车-路”系统要求的理想平面状态。

5 结论

(1) 常规纵断面线形变化引起车辆振动,并在线形变化点形成约3 s振动区,这是影响行驶质量的主要原因。在工程设计中,应尽量减少不必要的纵断面线形变化,尽可能增加竖曲线长度。

(2) 增设缓和竖曲线后,车辆振动结构发生了变化,加速度振动峰值和均方根均有很大的降幅,基本消除线形与平整度耦合效应,增强了道路对常用车辆的适用性,有效提升了道路线形的服务水平。缓和竖曲线基本线形适用于改造工程部分变形的竖曲线拟合,能有效减少路面垫衬材料的使用。

(3) 从缓和竖曲线基本线形加速度图可知,3次抛物线与直线、竖曲线衔接处存在受力突变。因此,需要优化缓向竖曲线类型,并探索各设计车速下缓和竖曲线的最小控制长度。

参考文献:

References:

[1] 姜正晖,陈仁朋,陈海君,等.公路路基不均匀沉降下的车辆振动分析和路基沉降评价[J].公路交通科技(应用技术

术版),2017,13(5):78-81.

JIANG Zhenghui, CHEN Renpeng, CHEN Haijun, et al. Vehicle vibration analysis and subgrade settlement evaluation under uneven settlement of highway subgrade [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 13(5): 78-81.

[2] 王杰,贺亚军.特殊地形条件下某枢纽互通方案研究[J].中外公路,2023,43(4):303-307.

WANG Jie, HE Yajun. Research on a hub interchange scheme under special terrain conditions [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(4): 303-307.

[3] 付文群,马泽欣,黎康.考虑道路线形拟合的高速公路改扩建加铺设计研究[J].公路,2021,66(10):97-103.

FU Wenqun, MA Zexin, LI Kang. Research on overlay design of expressway reconstruction and extension considering road alignment fitting [J]. Highway, 2021, 66(10): 97-103.

[4] 李开正.纵断面拟合设计在高速公路加铺改造工程中的应用[J].交通科技,2009(3):67-69.

LI Kaizheng. Application of fitting design of vertical cross section to highway repaving improvement project [J]. Transportation Science & Technology, 2009(3): 67-69.

[5] 袁胜强,朱银乐.既有高速公路纵断面线形的拟合技术[J].城市道桥与防洪,2009(6):7-9,11.

YUAN Shengqiang, ZHU Yinle. Fitting technology of existing expressway longitudinal section alignment [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2009(6): 7-9, 11.

[6] 胡昌亮,刘冉,王贵山.不设超高圆曲线路段道路几何设计探讨[J].中外公路,2021,41(5):1-5.

HU Changliang, LIU Ran, WANG Guishan. Discussion on road geometric design in circular curve section without superelevation [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(5): 1-5.

[7] 袁胜强,徐健,朱银乐.拓建高速公路纵断面设计的两个重要技术问题[J].上海公路,2010(1):1-2,21,14.

YUAN Shengqiang, XU Jian, ZHU Yinle. Two key points on profile design of widening highway project [J]. Shanghai Highways, 2010(1): 1-2, 21, 14.

[8] 王鹏,孔庆伟,杜永平.基于舒适性指标的道路纵断面设计指标研究[J].上海公路,2013(2):5-8,29,12.

WANG Peng, KONG Qingwei, DU Yongping. Study of road longitudinal alignment design index based on comfortability index [J]. Shanghai Highways, 2013(2): 5-8, 29, 12.

- [9] EASA S M, HASSAN Y. Design requirements of equal-arc unsymmetrical vertical curves[J]. *Journal of Transportation Engineering*, 1998, 124(5): 404-410.
- [10] EASA S. Length requirements for single-arc asymmetrical sag vertical curve for highways[J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2010, 37(6): 834-841.
- [11] EASA S M, HASSAN Y. Development of transitioned vertical curve I properties[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2000, 34(6): 481-496.
- [12] EASA S M, HASSAN Y. Development of transitioned vertical curve II sight distance[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2000, 34(7): 565-584.
- [13] 葛婷, 符锌砂, 李海峰, 等. 公路空间几何特性对汽车运动影响[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(12): 1867-1872.
- GE Ting, FU Xinsha, LI Haifeng, et al. Influence of spatial geometric properties of highway alignments on vehicle kinematics[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2016, 44(12): 1867-1872.
- [14] 周晓青, 孙立军, 颜利. 路面平整度评价发展及趋势[J]. *公路交通科技*, 2005, 22(10): 18-22.
- ZHOU Xiaoqing, SUN Lijun, YAN Li. Research progress and trend of pavement roughness indices[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2005, 22(10): 18-22.
- [15] 张洪亮, 胡长顺. 基于五自由度车辆模型的桥头搭板容许纵坡变化值研究[J]. *土木工程学报*, 2005, 38(6): 125-131.
- ZHANG Hongliang, HU Changshun. A study on the allowable differential slope of the approach slab with five-degree-freedom vehicle model[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2005, 38(6): 125-131.
- [16] 刘国杰, 陶向华, 黄晓明. 基于人车路相互作用的路桥接合处差异沉降控制标准[J]. *公路交通科技*, 2008, 25(6): 44-49.
- LIU Guojie, TAO Xianghua, HUANG Xiaoming. Differential settlement control criteria of bridge-approach junction based on people-vehicle-road interaction[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2008, 25(6): 44-49.
- [17] 喻凡. 车辆动力学及其控制[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- YU Fan. *Vehicle dynamics and control*[M]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [18] SEKULIĆ D, DEDOVIĆ V, RUSOV S, et al. Analysis of vibration effects on the comfort of intercity bus users by oscillatory model with ten degrees of freedom[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2013, 37(18/19): 8629-8644.
- [19] 侯之超, 高江华, 何乐. 坐姿人体垂向振动特性及其三自由度模型参数[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2011, 32(9): 1223-1227.
- HOU Zhichao, GAO Jianghua, HE Le. Vertical vibration characteristics of seated human bodies and the parameters of a biodynamic model with three degrees of freedom[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2011, 32(9): 1223-1227.
- [20] 郑木莲, 孟建党, 张世铎, 等. 路桥过渡段上车内人体舒适性评价方法[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2012, 32(2): 1-6.
- ZHENG Mulian, MENG Jiandang, ZHANG Shiduo, et al. Evaluation method of human comfort in vehicle at transition section between bridge abutment and embankment[J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2012, 32(2): 1-6.