

文章编号: 1674—8247(2021)02—0017—06
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.02.003

基于运动病诱发率的 400 km/h 高速铁路线路 参数适应性分析

时 瑾¹ 徐 平² 刘星宇¹

(1. 北京交通大学, 北京 100044; 2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘 要:针对 400 km/h 高速铁路线路设计需求,本文以高速铁路车线动力学方法为基础,引入运动病诱发率 (Motion Sickness Incidence, 简称 *MSI*) 作为舒适性评价指标,参考运动病诱发率预测模型,提出适用于线性分析的运动病诱发率预测方法,并对某高速铁路线路设计参数与速度匹配适应性进行了分析研究。结果表明: (1) *MSI* 能很好地反应乘客在运动环境中的舒适性; (2) 线路里程和曲线段数相同时, *MSI* 随曲线半径的增大而减小; *MSI* 相同时, 大半径曲线能相对延长线路里程, 增加曲线段数; (3) *MSI* 曲线斜率能反映单个曲线对乘客舒适性的影响规律; (4) 12 000 m 曲线半径及其匹配的超高、缓和曲线长度等与 400 km/h 行车速度的适应性良好, 且可进一步提速至 450 km/h 乃至更高速度。

关键词:时速 400 km/h 高速铁路; 运动病诱发率; 预测分析模型; 线路设计参数; 适应性

中图分类号: U212.33+2.1

文献标志码: A

17

Adaptability Analysis of 400 km/h High-speed Railway Line Parameters Based on Motion Sickness Incidence

SHI Jin¹ XU Ping² LIU Xingyu¹

(1. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: Based on the design requirements of 400 km/h high-speed railway projects in China, we introduced motion sickness incidence (*MSI*) as the comfort evaluation indicator with the vehicle-track dynamic method of high-speed railway, proposed an *MSI* prediction method applicable to linear analysis by referring to the *MSI* prediction model, and analyzed the design parameters and speed matching adaptability of a certain high-speed railway. The results show that: (1) *MSI* can properly reflect the comfort of passengers in the motion environment. (2) Given the same line length and number of curve segments, *MSI* decreases as the curve radius increases; when *MSI* is the same, and for the curve with a larger radius, the line length can be relatively extended and the number of curve segments can be increased. (3) The slope of the *MSI* curve can reflect the rule that how a single curve affects the passenger comfort. (4) The 12 000 m curve radius and the length of the superelevation and transition curves matching the radius have good adaptability with the 400km/h speed, which can be further raised to 450 km/h or even higher.

Key words: 400 km/h high-speed railway; motion sickness incidence; prediction analysis model; line design

收稿日期: 2021-03-01

作者简介: 时瑾 (1980-), 男, 教授, 博士生导师。

基金项目: 中铁二院工程集团有限责任公司科技发展计划项目 (KSNQ202051)

引文格式: 时瑾, 徐平, 刘星宇. 基于运动病诱发率的 400 km/h 高速铁路线路参数适应性分析[J]. 高速铁路技术, 2021, 12(2): 17-22.

SHI Jin, XU Ping, LIU Xingyu. Adaptability Analysis of 400 km/h High-speed Railway Line Parameters Based on Motion Sickness Incidence[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(2): 17-22.

parameters; adaptability

舒适性是人的主观感受,它受多种因素的影响。在振动环境中,不同频段的振动对乘客舒适性影响各不相同^[1-3]。运动病是因机体暴露在运动环境中,受不适宜的运动环境刺激而引发头晕、上腹部不适、恶心、呕吐、出冷汗、面色苍白等症状,最早由 Irwin 提出^[4]。评价运动病的经典指标是运动病诱发率^[5],它描述了在确定时间内经过运动而出现临床症状的人群所占的百分比。

针对运动病,Reason^[6]首先提出了感知冲突理论,随后 Bos 和 Bles^[7]等人通过感知冲突理论建立了针对垂向运动的预测分析模型。Claudio Braccesi 和 Filippo Cianetti 等人在 Bos 和 Bles 模型的基础上,提出了针对纵、横、垂三个方向加速度的 UNIPG 预测分析模型,随后以 P_{CT} 代替加速度作为信号输入建立了 UNIPG_{PCT} 模型,并与实际测试结果进行了对比^[5]。值得指出的是,在目前轨道交通领域的舒适性研究中,还较少研究列车运行引起的运动病问题,更高速度的高速铁路追求高平顺性,线路平纵断面引起的舒适性问题将更加显著,从运动病诱发率角度评估线路设计方案显得十分必要。

本文基于 UNIPG_{PCT} 模型建立适应于高速铁路的运动病诱发率预测分析模型,以某新建高速铁路区段线路方案为研究背景,分析线路参数对乘客运动病诱发率的影响规律,进而评价 400 km/h 及以上高速铁路线路参数与速度的适应性。

1 运动病诱发率预测分析模型

1.1 缓和曲线舒适性评价指标 P_{CT}

缓和曲线舒适性可采用英国铁路标准 BS EN 12299:2009^[8]所定义的 P_{CT} 指标进行评价,该方法同时考虑了车辆稳态时的横向加速度、横向冲击和侧滚角速度^[9-10]。

对于站姿乘客, P_{CT} 定义为:

$$P_{CT} = \max(28.54\ddot{y} + 20.69\ddot{\dot{y}} - 11.1, 0) + 0.185(\dot{\vartheta})^{2.283} \quad (1)$$

对于坐姿乘客, P_{CT} 定义为:

$$P_{CT} = \max(8.97\ddot{y} + 9.68\ddot{\dot{y}} - 5.9, 0) + 0.120(\dot{\vartheta})^{1.626} \quad (2)$$

式中: P_{CT} ——缓和曲线舒适性指标(%),该值越大,舒适性越低;

\ddot{y} ——车体横向加速度的最大绝对值(m/s^2),取

列车进入缓和曲线到出缓和曲线 1.6 s 时间段内的最大绝对值;

$\ddot{\dot{y}}$ ——车体横向冲击的最大绝对值(m/s^3),取列车进入缓和曲线前 1.0 s 到列车通过缓和曲线时间段内的最大绝对值;

$\dot{\vartheta}$ ——车体侧滚角速度的最大绝对值($^\circ/s$),取列车进入缓和曲线到离开缓和曲线时间段内的最大绝对值。

式(1)、式(2)适用于驶入缓和曲线及反向缓和曲线,而不适用于驶出缓和曲线。为了更好地反应乘客舒适度规律,本文研究只针对站姿乘客。 P_{CT} 计算步骤包括:(1)提取出测量曲线段的车体横向加速度和侧滚角速度;(2)对提取出的车体横向加速度和车体侧滚角速度进行低通滤波、滑动窗处理,并计算出每个缓和曲线段车体横向冲击的最大绝对值、车体横向加速度最大绝对值及车体侧滚角速度最大绝对值;(3)计算缓和曲线舒适性指标 P_{CT} 。

1.2 UNIPG_{PCT} 模型

UNIPG_{PCT} 模型的理论依据是 Reason 和 Brand 提出的感知冲突理论,该理论的中心观点是人体中枢神经系统的期望值与视觉、前庭觉、本体感觉的接收值之间存在差异而导致了运动病。运动病诱发率预测模型最初是以各个方向加速度作为输入信号,并用一个拉普拉斯形式的一阶低通滤波器进行滤波以得到乘客接收到的感知值 V_p ,该滤波器主要用于模拟人体的本体感觉系统 W_{ps} ,其表达式为:

$$W_{ps} = \frac{1}{\tau_x s + 1} \quad (3)$$

同时,利用一个闭环回路模拟中枢神经系统,该闭环回路由一个积分器和一阶低通滤波器 W_{ps} 组成。积分器的作用是当感知冲突为 0 时,保持期望感知值不变。闭环回路的输入信号为接收值 V_p 乘以一个增益因子 k_i ,经过积分器和一阶低通滤波器后,得到乘客期望的感知值 V_a 。当接收值与期望值不等时,就形成了感知冲突 d 。 d 是一个矢量,应取模转换为标量,并使其形成时间序列函数 $c(t)$ 。

由于运动病诱发率 MSI 与感知冲突 d 存在非线性关系,且渐进趋近最大值,因此需要一个计权函数和一个累积函数以满足 MSI 的上述特点。在模型中,选定 Hill 函数作为计权函数,其表达式为:

$$h(t) = \frac{(c/b)^n}{1 + (c/b)^n} \quad (4)$$

从式(4)中可以看出,无论 $c(t)$ 取值多大,加权后其值都在0~1之间,该值可作为运动病的时域评价指标,称为“瞬时干扰”。

瞬时干扰随时间累积就得到了运动病的严重程度,但其不会无限累积,呕吐被视为运动病症状的最终表现,因此运动病诱发率 MSI 不能超过100%。运动病诱发率的最大值是渐进趋近达到,且随着干扰的停止,运动病诱发率也会随时间减低,最终回归为0。基于以上两个特点,在模型中,选了一个二阶滤波器作为累积函数,由此得到 MSI 的计算公式为:

$$MSI = \frac{P}{(\mu s + 1)^2} h(t) \quad (5)$$

式中: P ——在给定环境条件下晕车人群所占的最大百分比。

加速度本身不具备可探测性,因而以三个主方向加速度作为输入信号计算运动病诱发率时,不能追踪列车所处的位置。且无法考虑侧滚运动这一引起运动病的主要因素。而以 P_{CT} 作为缓和曲线上的舒适性评价指标,不但能追踪到车体所处的位置,还可考虑铁路车辆的横向振动和侧滚运动等典型运动。

从 P_{CT} 的计算方法可以看出, P_{CT} 是与缓和曲线段有关的离散点而不是连续的时间函数,因此,为将 P_{CT} 作为 $UNIPG_{PCT}$ 模型输入信号,需将 P_{CT} 转换为一系列时间脉冲,其具体做法为:计算出每个曲线部分的 P_{CT} 值,以该值作为每段曲线的矩形脉冲峰值,每个矩形脉冲持续一定时间 Δt ,这样就形成了时间序列脉冲信号。

为简化模型计算,Claudio Braccesi 和 Filippo Cianetti 等人将原始模型中的闭环回路用 ISO2631^[11]中所定义的垂向计权曲线替代。ISO2631 中的计权曲线都是通过 ISO8041^[12]中所定义的传递函数得到,这些传递函数包括:

(1) 带通滤波器传递函数

带通滤波器包含高通和低通二阶巴特沃斯滤波器特点,因而其传递函数包含高通和低通。

高通传递函数表达式为:

$$H_h(s) = \frac{1}{1 + \frac{\omega_1}{Q_1 s} + \left(\frac{\omega_1}{s}\right)^2} \quad (6)$$

低通传递函数表达式为:

$$H_l(s) = \frac{1}{1 + \frac{s}{Q_2 \omega_2} + \left(\frac{s}{\omega_2}\right)^2} \quad (7)$$

(2) 加速度-速度($a-v$)转换滤波器传递函数

加速度-速度转换滤波器在低频时与加速度成比例,在高频时与速度成比例,其传递函数表达式为:

$$H_1(s) = \frac{\left(1 + \frac{s}{\omega_3}\right)K}{1 + \frac{s}{Q_4 \omega_4} + \left(\frac{s}{\omega_4}\right)^2} \quad (8)$$

(3) 上阶滤波器传递函数

$$H_s(s) = \frac{1 + \frac{s}{Q_5 \omega_5} + \left(\frac{s}{\omega_5}\right)^2}{1 + \frac{s}{Q_6 \omega_6} + \left(\frac{s}{\omega_6}\right)^2} \left(\frac{\omega_5}{\omega_6}\right) \quad (9)$$

计权曲线为这些传递函数的组合,即:

$$H(s) = H_h(s) \times H_l(s) \times H_1(s) \times H_s(s) \quad (10)$$

ISO2631 中,针对运动病评价的垂向计权曲线 W_f 如图1所示。

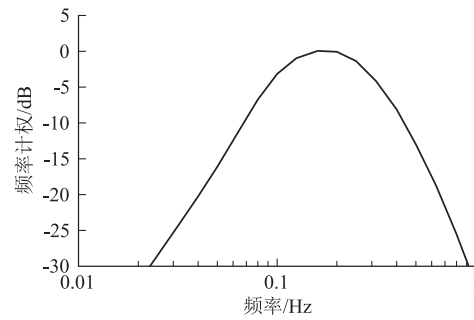


图1 ISO2631 垂向计权曲线图

$UNIPG_{PCT}$ 模型以 P_{CT} 脉冲作为输入信号,经过垂向计权曲线滤波后,形成感知冲突 $c(t)$,最终经Hill函数转化为瞬时干扰,并被累积函数逐步累积成 MSI , $UNIPG_{PCT}$ 模型如图2所示。

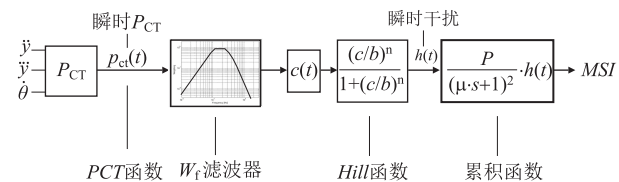


图2 $UNIPG_{PCT}$ 模型示意图

1.3 $UNIPG_{PCT}$ 模型验证

Claudio Braccesi 和 Filippo Cianetti 等人利用已有文献进行了实验数值对比,并参照线路测试所得数据,证明了 $UNIPG_{PCT}$ 模型的合理性。为验证本文所建模型的正确性,将参考 O'Hanlon、McCauley^[13]等人的实验,并将仿真计算结果与其进行对比。 P_{CT} 脉冲持续时间 Δt 对运动病诱发率计算结果有一定影响,本文取 Δt 为0.5 s。

由于 O'Hanlon、McCauley 等人的实验都基于正弦运动,忽略了侧滚运动,因此横向加速度、横向冲击分

别按式(11)、式(12)计算。

$$\ddot{x} = A \times \sin(2\pi \times f \times t) \tag{11}$$

$$\dot{x} = 2\pi \times f \times A \cos(2\pi \times f \times t) \tag{12}$$

因此,按照式(1)计算站姿乘客的 P_{CT} ,且认为加速度从0变为正或者负的瞬间即为进入缓和曲线,得出的 P_{CT} 脉冲如图3所示。

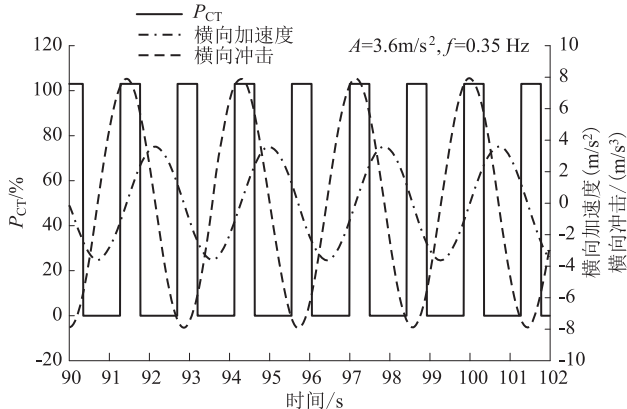


图3 P_{CT} 脉冲与横向加速度及横向冲击关系图

O'Hanlon 和 McCauley 通过试验研究了垂向正弦曲线运动对运动病诱发率的影响,加速度峰值分别为 0.333 g、0.222 g 和 0.111 g,频率为 0.25 Hz,乘客暴露在运动中 2 h,在不同时段测得乘客运动病诱发率如图4所示,本文所建 UNIPG_{PCT}模型计算结果如图5所示。

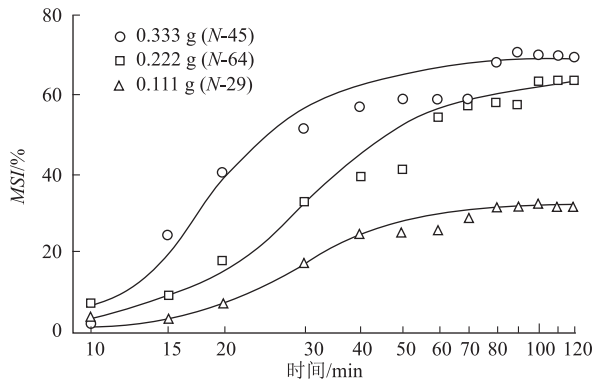


图4 O'Hanlon 和 McCauley 试验结果图

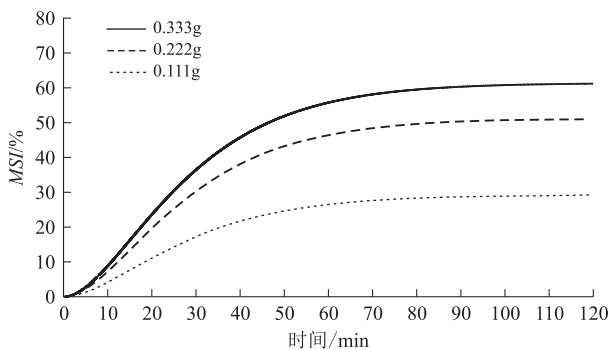


图5 MSIPA 模型计算结果图

与 O'Hanlon 和 McCauley 等人的实验结果以及 Claudio Braccesi 和 Filippo Cianetti 等人的预测模型计算结果的对比,验证了本文所建 UNIPG_{PCT}模型的正确性与合理性。

2 线路参数适应性分析

2.1 线路方案概况

以我国某新建高速铁路区段线路方案为背景进行研究。该段方案线路全长 56.033 km,平纵断面如图6所示,共有 7 段曲线,22 个坡段,其中包含 6 个半径 12 000 m 的曲线和 1 个半径 10 500 m 的曲线,最短夹直线长度为 417 m,坡段起伏较小,最大坡度 11‰,最大坡度代数差 17.4‰。该段线路设计行车速度 350 km/h,并预留提速条件,为反映线路实际情况,考虑轨道不平顺。轨道不平顺由我国高速铁路无砟轨道不平顺谱转换得到^[14]。

2.2 线路参数与速度匹配分析

对线路方案分别以 350 km/h、400 km/h 和 450 km/h 速度进行动力学仿真,提取车体横向加速度、横向冲击及侧滚角速度,如图7所示。

从图7中可以看出,随着列车速度的提高,车体横向加速度明显增大,当曲线半径为 12 000 m 时,车体横向加速度最大值从 0.136 m/s² 增大到 0.54 m/s²;当曲线半径为 10 500 m 时,车体横向加速度最大值从 0.139 m/s² 增大到 0.876 m/s²;车体横向冲击和车体

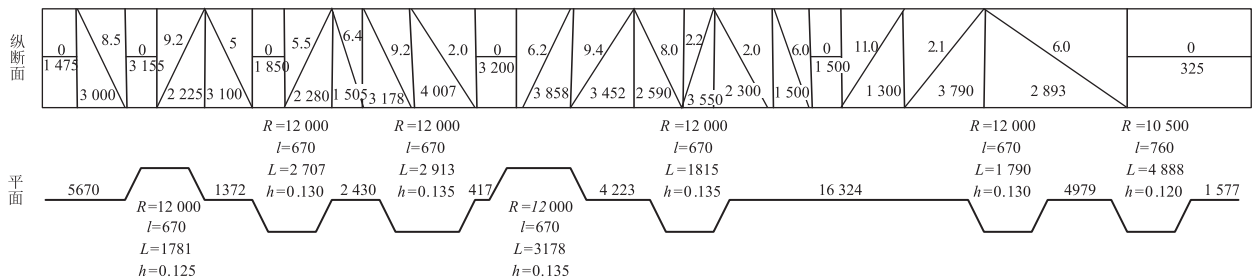
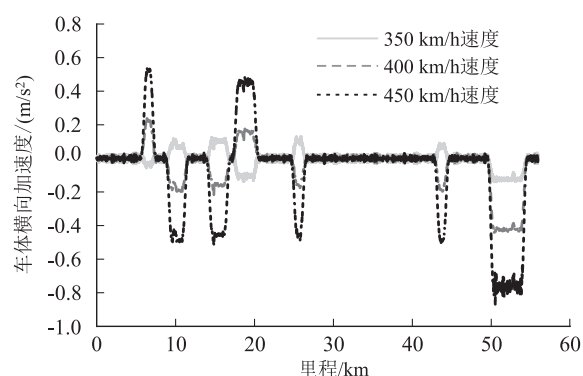
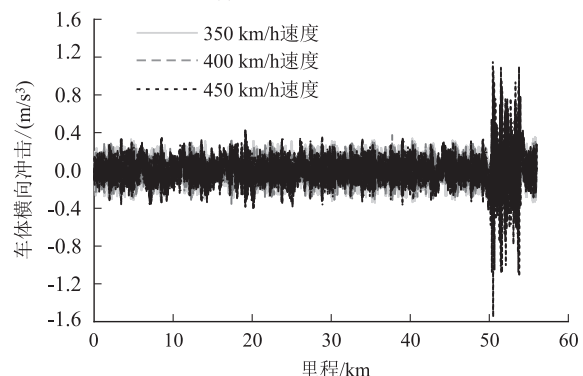


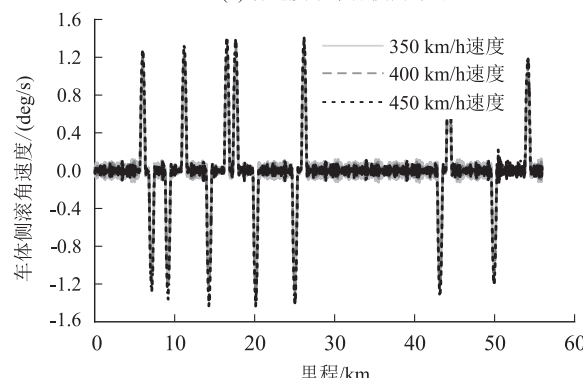
图6 某高速铁路区段平纵断面示意图



(a)各速度下车体横向加速度



(b)各速度下车体横向冲击



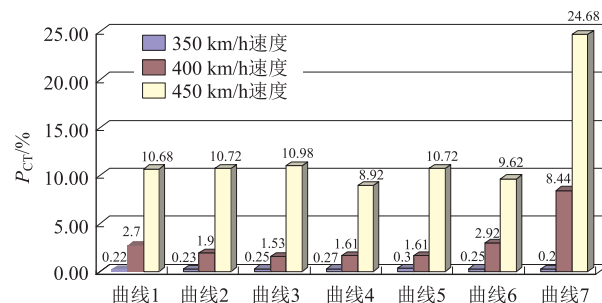
(c)各速度下车体侧滚角速度

图7 各速度 P_{CT} 参数运行仿真结果图

侧滚角速度随速度变化不明显,但当列车速度提高到450 km/h,曲线半径为10 500 m时,车体横向冲击较列车速度为350 km/h和400 km/h时明显增大,最大值能达到 1.55 m/s^3 。

通过车体横向加速度、车体横向冲击以及车体侧滚角速度计算得到各列车速度条件下各个曲线的 P_{CT} 值,如图8所示。

从图8可以看出:(1)当曲线半径为12 000 m时,350 km/h速度下的 P_{CT} 值为0.3%,400 km/h速度下的 P_{CT} 值为2.9%,450 km/h速度下的 P_{CT} 值为10.5%,由此可见, P_{CT} 值也随着列车速度的提高而增大;(2)曲线半径为10 500 m的曲线 P_{CT} 值明显高于其他曲线;(3)就单个曲线而言,相同的线路条件下,列

图8 各速度条件下单个曲线对应的 P_{CT} 值图

车速度越高,乘客舒适性越差。

利用 $UNIPG_{PCT}$ 模型计算该线路条件下不同列车速度时乘客的运动病诱发率,如图9所示。

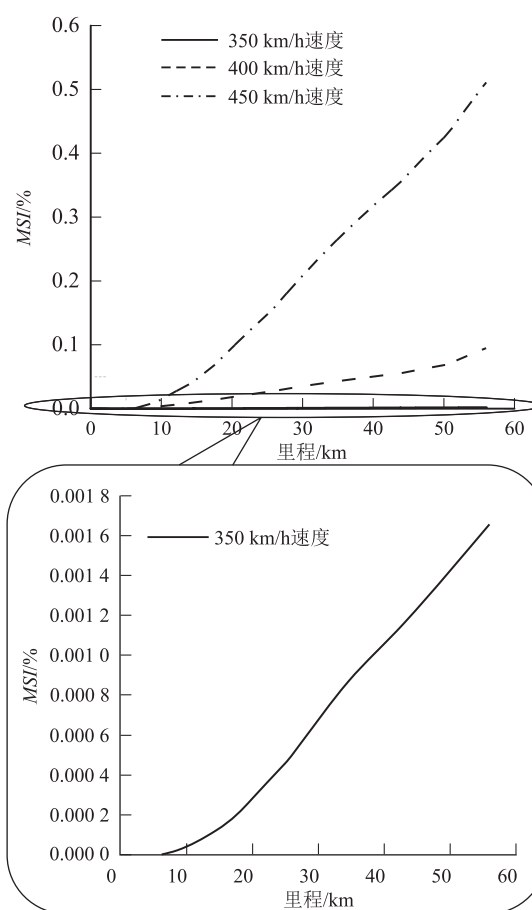


图9 各速度条件下线路方案 MSI

从图9可以看出,各速度条件下, MSI 都随线路里程而增大,表明在车辆运行期间内,乘客的 MSI 都不会下降。在该区段线路范围内,车辆以350 km/h速度运行时,乘客的 MSI 最大值为0.002%;车辆以400 km/h速度运行时,乘客的 MSI 最大值为0.093%;车辆以450 km/h速度运行时,乘客的 MSI 最大值为0.511%。从各速度条件下的 MSI 曲线可以看出, MSI 曲线斜率反映了各个曲线对 MSI 的影响规律,

10 500 m曲线半径对乘客舒适性的影响较大,且速度越高,影响越大。

基于以上分析可知,区段进站端前,曲线线路条件对350 km/h行车速度较为富余,可提速至至450 km/h乃至更高速度,该段线路参数与400 km/h速度适应性良好,表明12 000 m曲线半径及其匹配的超高、缓和曲线长度等均能很好地适应400 km/h乃至更高的行车速度,10 500 m曲线半径可适应400 km/h的行车速度,但不适合提速至450 km/h。

3 结论

本文以400 km/h高速铁路设计为背景,建立运动病诱发率预测分析模型,研究线路参数对乘客运动病诱发率的影响规律,进而评价分析线路参数与速度的适应性,得到如下结论:

(1) 现行对于乘客舒适性的评价指标大多基于瞬时响应,而 MSI 考虑时间累积的影响,可真实反映车辆运行过程中乘客的乘坐舒适性,具有重要科学意义。

(2) 线路里程和曲线段数相同时, MSI 随曲线半径的增大而减小; MSI 相同时,大半径曲线能相对延长线路里程,增加曲线段数。

(3) 根据建立的运动病诱发率预测分析模型, MSI 曲线斜率能反映单个曲线对乘客舒适性的影响规律。

(4) 以 MSI 作为舒适性评价指标,对某高速铁路区段线路参数与速度匹配适应性进行了分析,结果表明:12 000 m曲线半径及其匹配的超高、缓和曲线长度等与400 km/h行车速度的适应性良好,且可进一步提速至450 km/h乃至更高的速度。

参考文献:

- [1] 龙许友,时瑾,王英杰,等. 高速铁路线路线形动力仿真及乘坐舒适度评价[J]. 铁道科学与工程学报, 2012, 9(3): 26-33.
LONG Xuyou, SHI Jin, WANG Yingjie, et al. Dynamic Simulation and Ride Comfort Evaluation of Track Alignment for High Speed Railway[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2012, 9(3): 26-33.
- [2] 王开云,翟婉明,刘建新,等. 线路不平顺波长对提速列车横向

舒适性影响[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(1): 1-5.

WANG Kaiyun, ZHAI Wanming, LIU Jianxin, et al. Effect of Rail Irregularity Wavelength on Lateral Runningcomfort of Speed-Raised Train[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(1): 1-5.

- [3] 龙许友,时瑾,方文珊. 高速铁路纵断面设置对乘坐舒适性影响评价[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(4): 48-53.
LONG Xuyou, SHI Jin, FANG Wenshan. Evaluation of Ride Comfort Caused by Track Vertical Alignment of Highspeed Railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 32(4): 48-53.
- [4] MONEY K E. Motion Sickness[J]. Physiological Reviews, 1970, 50(1): 1-39.
- [5] BRACCESI C, CIANETTI F, SCALETTA R. The Use of the PCT Index in Railway Motion Sickness Incidence Evaluation[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2015, 229(4): 428-445.
- [6] Reason J T, Brand J J. Motion Sickness[M]. London: Academic Press, 1975.
- [7] BOS J E, BLES W. Modelling Motion Sickness and Subjective Vertical Mismatch Detailed for Vertical Motions[J]. Brain Research Bulletin, 1998, 47(5): 537-542.
- [8] EN 12299 Railway Applications-ride Comfort for Passengers-measurements and Evaluation[S].
- [9] Kufver B. Optimisation of Horizontal Alignments for Railways. Procedures Involving Evaluation of Dynamic Vehicle Response[J]. TRITA-FKT, 2000.
- [10] Kufver B, Andersson E. Optimisation of Length of Transition Curves with Vehicle Reaction Taken into Consideration[J]. Transactions on the Built Environment, 1998.
- [11] ISO 2631-1:1997 Mechanical Vibration and Shock-evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibrations-Part 1: General Requirements[S].
- [12] ISO 8041:2005 Human Response to Vibration-measuring Instrumentation[S].
- [13] O'HANLON J F, MCCAULEY M E. Motion Sickness Incidence as a Function of the Frequency and Acceleration of Vertical Sinusoidal Motion[J]. Aerospace Medicine, 1974, 45(4): 366-369.
- [14] 康熊,刘秀波,李红艳,等. 高速铁路无砟轨道不平顺谱[J]. 中国科学: 技术科学, 2014, 44(7): 687-696.
KANG Xiong, LIU Xiubo, LI Hongyan, et al. PSD of Ballastless Track Irregularities of High-speed Railway[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2014, 44(7): 687-696.