

文章编号: 1674—8247(2021)02—0073—06
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.02.013

400 km/h 高速铁路无砟轨道列车竖向设计 荷载动力学研究

姚力¹ 朱胜阳² 韦强文² 罗俊² 王开云²

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

摘要:随着高速铁路设计速度的提高,轮轨相互作用加剧,对无砟轨道结构设计也提出了更高的要求。本文基于车辆-轨道耦合动力学理论,针对400 km/h高速铁路开展了无砟轨道竖向设计荷载研究。以冲击速度与轮心轨迹两种方法描述扁疤,以短波不平顺描述焊缝,分别考察车轮扁疤和钢轨焊缝两种特殊工况,并结合其动力学计算结果,建议了竖向设计荷载动载系数取值。计算结果表明:(1)400 km/h高速铁路无砟轨道竖向设计荷载动载系数可取3.0;(2)在更高速度下,焊缝引起冲击作用力增大,且轮轨系统动态相互作用对焊缝不平顺幅值变化敏感,因此应严格控制钢轨焊缝不平顺幅值。研究成果可为400 km/h高速铁路无砟轨道设计提供理论指导。

关键词:400 km/h 高速铁路; 竖向设计荷载; 车轮扁疤; 钢轨焊缝; 车辆-轨道耦合动力学

中图分类号:U213.2; U238 **文献标志码:**A

Study on Dynamics of Vertical Design Load for Trains on Ballastless Track of 400 km/h High-speed Railway

YAO Li¹ ZHU Shengyang² WEI Qiangwen² LUO Jun² WANG Kaiyun²

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China;

2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: With the improvement of the design speed of high-speed railway, the wheel-rail interaction is intensified, which brings higher requirements for the structural design of ballastless track. Based on the vehicle-track coupling dynamics theory, the vertical design load of ballastless track is studied in this paper for the 400 km/h high-speed railway. The flat damages are described with the methods of impact speed and wheel center trajectory, and the welds are described with the method of short-wave irregularity. The two special working conditions, namely wheel flats and rail welds, are investigated respectively, and the value for the dynamic load factor of vertical design load is suggested based on the dynamics calculation results. The calculation results show that: (1) The dynamic load factor of vertical design load for ballastless track of the 400 km/h high-speed railway may be taken as 3.0. (2) At a higher speed, the impact force caused by weld increases, and the dynamic interaction of wheel-rail system is sensitive to the change of weld irregularity amplitude. Therefore, the amplitude of rail weld irregularity shall be strictly controlled. The research results may provide theoretical guidance for the ballastless track design of the 400 km/h high-speed railway.

Key words: 400 km/h high-speed railway; vertical design load; wheel flats; rail welds; vehicle-track coupling dynamics

收稿日期:2021-03-01

作者简介:姚力(1971-),男,教授级高级工程师。

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(KSNQ202059)

引文格式:姚力,朱胜阳,韦强文,等. 400 km/h 高速铁路无砟轨道列车竖向设计荷载动力学研究[J]. 高速铁路技术,2021,12(2):73-78.

YAO Li, ZHU Shengyang, WEI Qiangwen, et al. Study on Dynamics of Vertical Design Load for Trains on Ballastless Track of 400 km/h High-speed Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(2): 73-78.

截至 2020 年底,我国高速铁路运营里程已近 4 万 km,高速铁路网络逐渐完善。为推动高速铁路技术进一步发展,《交通强国建设纲要》要求强化前沿关键科技研发,加强对可能引发交通产业变革的前瞻性、颠覆性技术研究,并提出合理统筹安排 400 km/h 级高速轮轨客运列车系统等技术储备研发,包括轨道系统在内的 400 km/h 级高速铁路技术也应同步开展研究工作。无砟轨道因其具有较好的稳定性、耐久性以及维修工作量少等特点,已成为我国高速铁路的主要轨道型式。无砟轨道设计荷载是保证无砟轨道服役过程中的安全性、可靠性和耐久性的关键设计参数,它包括列车荷载、温度荷载、牵引/制动荷载及基础变形荷载等,其中列车荷载与行车速度密切相关。随着行车速度的提高,无砟轨道承受的动力作用也随之加剧。

目前 300 ~ 350 km/h 高速铁路无砟轨道设计研究,已积累了大量成果和丰富经验,而对于 400 km/h 及以上高速铁路无砟轨道设计理论研究较少,且未有工程实践,同时我国现行 TB/T 10621 - 2014《高速铁路设计规范》^[1]也仅适用于最高速度为 350 km/h 的高速铁路。本文基于传统车辆 - 轨道耦合动力学理论,以复兴号动车组和 CRTS III 型板式无砟轨道为研究对象,通过车辆 - 轨道系统进行动力学分析,研究 400 km/h 高速铁路无砟轨道列车竖向设计荷载参数,以期为 400 km/h 高速铁路无砟轨道设计提供重要的理论支撑。

1 车辆 - 无砟轨道耦合动力学模型

列车荷载作用下高速铁路车辆 - 轨道结构动力动力学响应,是一个复杂的系统耦合振动问题,应从车辆与轨道整体系统角度进行研究。本文依据车辆 - 轨道耦合动力学理论^[2]建立了车辆 - 轨道空间耦合动力学模型,如图 1 所示。

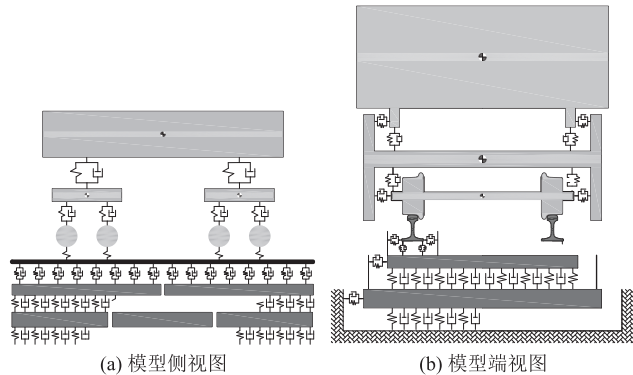


图 1 车辆 - 无砟轨道空间耦合动力学模型图

模型包含车辆子系统和轨道子系统,其中车辆子系统为具有 35 个自由度的多刚体系统,考虑车体、构架和轮对的沉浮、横移、侧滚、点头和摇头刚体运动;轨道子系统为钢轨 - 轨道板 - 路基 3 层弹簧阻尼振动模型,其中轨道板横向视为刚体运动,轨道板垂向

通过弹性地基上具有 4 边自由边界条件的弹性薄板模型进行模拟。轮轨关系作为车辆与轨道模型纽带,反映了轨道体系振动对轮轨接触几何关系与轮轨相互作用力的影响。车辆 - 轨道耦合模型的轮轨空间动态耦合关系、动力学方程与数值方法详见文献[2]。

2 列车荷载动力学分析方法

现行《高速铁路设计规范》针对设计 350 km/h 及以下的高速铁路,规定了无砟轨道列车竖向荷载参数,如表 1 所示。但对 400km/h 高速铁路是否适用需进行评估。

表 1 《高速铁路设计规范》列车荷载参数表

设计荷载参数	速度 / (km/h)	取值
竖向设计荷载 P_d	250	$2.5 \times P_j$
	≥ 300	$3.0 \times P_j$

注: P_j 为静轮载

2.1 列车竖向荷载的确定

列车荷载通常可通过以下途径获得,一是对运营线路进行动轮载实测,统计分析后取平均值加 1 ~ 3 倍均方差作为常用轮载,再考虑一定安全系数来确定设计轮载^[3];二是通过轨道谱进行动力学仿真分析,对特殊工况(如车轮扁疤和钢轨焊缝不平顺)进行动力学计算确定^[4]。而国内外均无 400 km/h 高速铁路运营线路,只能通过第二种方法来获取,线路建成后进行实测验证并予以修正。

根据文献[3]和[5],频率大于 500 Hz 的轮轨作用力始终随速度增加而增加,是影响轮轨接触应力的主要因素。而频率小于 100 Hz 的轮轨作用力几乎不受速度变化的影响,其大小基本与扣件作用力相当。对于无砟轨道设计应考虑钢轨、轨道板的应变,中低频轮轨作用力是影响其承受荷载的主要因素,因此应将扣件作用力作为轨道板的常用荷载。

2.2 车轮扁疤的动力学分析

2.2.1 基于传统扁疤模型的动力学分析

我国《铁路技术管理规程》^[6]规定:车轮踏面上的缺陷或剥离长度不超过 40 mm。本文采用长 40 mm 扁疤进行动力学仿真分析,开展考虑车轮扁疤影响的设计荷载研究。关于车轮扁疤引起的冲击可以进行如下计算。设车轮有扁疤,在低速运行时,如图 2(a)所

示,车轮在A点处接触钢轨,并开始绕A点旋转,只有当轮心落下的高度等于扁疤的深度时才给钢轨以冲击;而在高速运行时,如图2(b)所示,车轮离开钢轨上浮于空中,在圆弹簧的排斥力和重力的作用下落下,车轮旋转过程中在B点冲击钢轨,车轮离开钢轨时的临界速度可通过下式进行计算:

$$V_{cr} = \sqrt{R\mu} = \sqrt{R \frac{M_1 + M_2}{M_2} g} \quad (1)$$

式中: μ ——车轮向下跌落的加速度;

M_1 、 M_2 ——分别为车辆一系簧上质量和簧下质量;

g ——重力加速度;

R ——车轮半径。

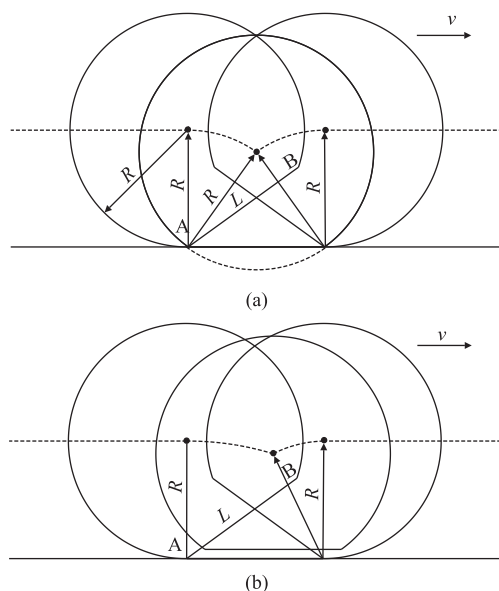


图2 扁疤车轮的运动图

车轮扁疤冲击钢轨时,其冲击速度的垂直分量 v 为:

$$Z_0(x) = \begin{cases} \frac{1}{2}\delta_1(1 - \cos 2\pi x) & 0 \leq x \leq \frac{1-\lambda}{2}, \frac{1+\lambda}{2} \leq x \leq 1 \\ \frac{1}{2}\delta_1[1 - \cos \pi(1-\lambda)] + \frac{1}{2}\delta_2\left[1 - \cos \frac{2\pi}{\lambda}\left(x - \frac{1-\lambda}{2}\right)\right] & \frac{1-\lambda}{2} \leq x \leq \frac{1+\lambda}{2} \end{cases} \quad (5)$$

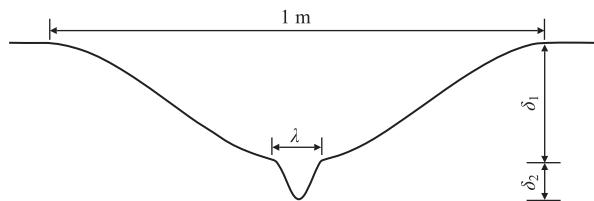


图3 钢轨焊接区短波不平顺模型图

当 $V \leq V_{cr}$ 时,

$$v = (1 + \gamma) \frac{L}{2R} V \quad (2)$$

当 $V > V_{cr}$ 时,

$$v = \frac{L}{V + \sqrt{\mu R}} \left(\mu + \gamma V \sqrt{\frac{\mu}{R}} \right) \quad (3)$$

式中: γ ——将轮对的旋转惯性质量换算为往复惯性质量时的系数;

L ——扁疤长度。

2.2.2 考虑轮对质心轨迹变化扁疤模型的力学分析

车轮在滚动通过扁疤位置时,车轮质心会发生动态轨迹变化,引发相应轮轨动态行为,因此也可采用车轮质心轨迹变化进行扁疤的动力学建模。车轮经过扁疤时,轮心的垂向位移可近似表达为^[7]:

$$Z_{ow}(x) \approx \begin{cases} x^2/(2R) & 0 \leq x \leq L/2 \\ (L-x)^2/(2R) & L/2 < x \leq L \end{cases} \quad (4)$$

式中: x ——车轮表面周向坐标;

L ——扁疤长度。

扁疤深度 d 与扁疤长度 L 的关系为 $d = L^2/(8R)$ 。

在车辆-轨道耦合系统中,考虑以上轨迹变化对轮轨相对位移的影响,模拟特定扁疤尺寸引发的轮轨系统动态接触行为。

2.2.3 焊缝不平顺的动力学分析

日本新干线的调查统计^[8]表明,长钢轨焊接区普遍存在不平顺(如图3所示),其特点是在长1 m的余弦波上叠加波长0.1~0.2 m的短波不平顺。对于高速铁路,焊接接头钢轨顶面平直度要求值为0.2 mm/m^[9]。本文钢轨焊缝不平顺动力学研究中按不利情况考虑,取 $\lambda = 0.1$ m、 $\delta_1 = 0.1$ mm、 $\delta_2 = 0.1$ mm。则 $Z_0(x)$ 为:

3 动力学仿真计算结果

3.1 传统扁疤模型计算结果

由式(1)可计算得车轮扁疤冲击的临界速度为21.16 km/h。不同行车速度下的扁疤冲击速度、仿真最大幅值及其动载系数如表2所示。由表2可以看出,40 mm 车轮扁疤引起的最大冲击速度即为临界速度对应的冲击速度,随着车速的增加,扁疤冲击速度逐

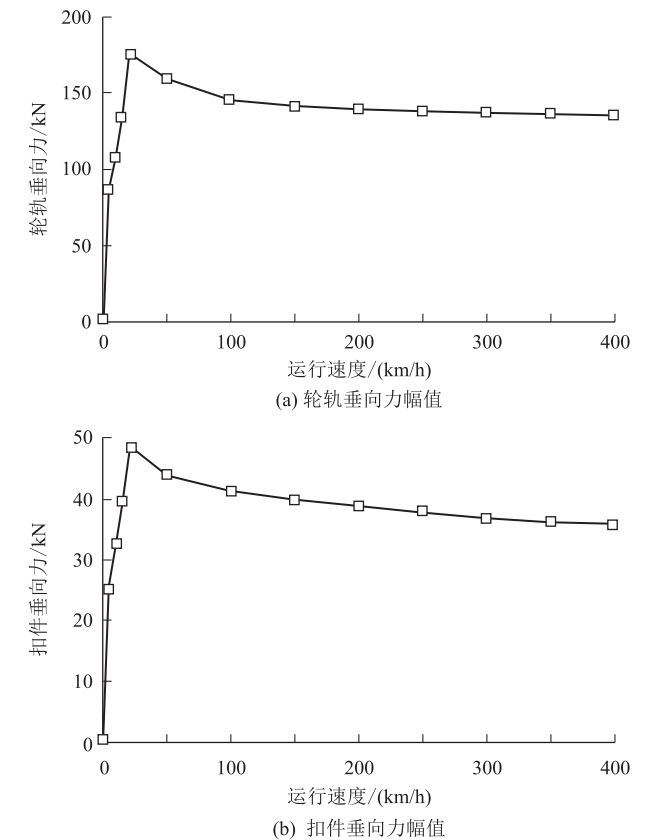


图4 不同速度下响应幅值变化图

渐下降,且逐步趋于稳定。

表2 传统扁疤模型计算结果表

运行速度 /(km/h)	扁疤冲击速度 /(m/s)	轮轨垂向冲击力 (kN)/动载系数	扣件垂向冲击力 (kN)/动载系数
0	0	0/0	0/0
5	0.090 6	86.59/1.48	25.30/1.27
10	0.181 2	107.97/1.84	32.73/1.64
15	0.271 7	134.24/2.29	39.51/1.98
21.16	0.383 3	175.84/3.00	48.65/2.43
50	0.327 6	159.61/2.73	44.11/2.21
100	0.296 7	145.40/2.48	41.29/2.06
150	0.283 9	141.65/2.42	39.90/1.99
200	0.276 9	139.55/2.38	38.87/1.94
250	0.272 5	138.28/2.36	37.86/1.89
300	0.269 4	137.40/2.35	36.93/1.84
350	0.267 2	136.78/2.34	36.28/1.81
400	0.265 5	136.32/2.33	35.84/1.79

轮轨垂向力幅值和扣件垂向力幅值随速度增加的变化曲线如图4所示。由图4可以看出,车轮扁疤引起的最大轮轨垂向冲击作用力为175.84 kN,为静轮重(58.56 kN)的3.0倍;最大垂向扣件力为48.65 kN,约为静载时扣件垂向力(20 kN)的2.43倍。随着车速的增加,轮轨垂向冲击力和扣件垂向力逐渐下降,且逐步趋于稳定。

3.2 轮对质心轨迹变化扁疤模型计算结果

将扁疤长度值40 mm代入式(4)计算车轮轮心轨迹,在动力学模型中以轮心轨迹变化进行扁疤冲击的动力学分析。不同车速下,扁疤冲击引起的轮轨垂向力幅值和扣件垂向力幅值如图5所示。由图5可以看出,随着速度增大,轮轨垂向力与扣件垂向力幅值均先增大后减小,两者最大幅值位于100~150 km/h的速度区间内。

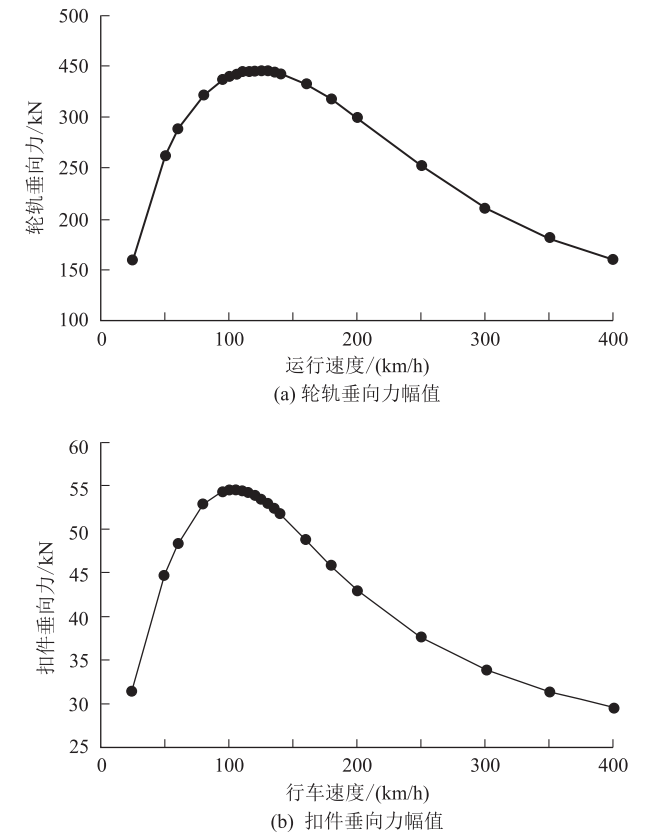


图5 不同速度下响应幅值变化

不同速度下响应幅值以及动载系数如表3所示。由表3可以看出,速度125 km/h对应的轮轨垂向力幅值最大,为345.21 kN,动载系数为5.895;速度105 km/h对应的扣件垂向力幅值最大,为54.45 kN,动载系数为2.723。400 km/h时,轮轨垂向力和扣件垂向力的幅值分别为160.65 kN与29.61 kN,明显小于两者在100~150 km/h区间内的最大幅值。

3.3 钢轨焊缝不平顺计算结果

400 km/h车辆通过钢轨焊缝不平顺仿真结果如图6所示。从图6可以看出,钢轨焊缝不平顺引起的轮轨作用力最大值为200.63 kN,约为静轮重的3.43倍;扣件垂向力最大值为39.69 kN,约为静载作用扣件力的1.965倍。

表3 考虑轮心轨迹变化扁疤模型计算结果表

车辆运行速度 /(km/h)	轮轨垂向力 (kN)/动载系数	扣件垂向力 (kN)/动载系数
95	336.25/5.74	54.24/2.712
100	339.49/5.79	54.42/2.721
105	341.27/5.82	54.45/2.723
110	343.83/5.87	54.31/2.716
115	344.24/5.88	54.16/2.708
120	344.77/5.887	53.84/2.692
125	345.21/5.895	53.37/2.669
130	344.99/5.891	52.92/2.646
135	343.95/5.87	52.34/2.617
200	298.76/5.10	43.02/2.151
250	251.91/4.30	37.65/1.883
300	210.72/3.60	34.01/1.701
350	181.01/3.09	31.41/1.571
400	160.65/2.74	29.61/1.480

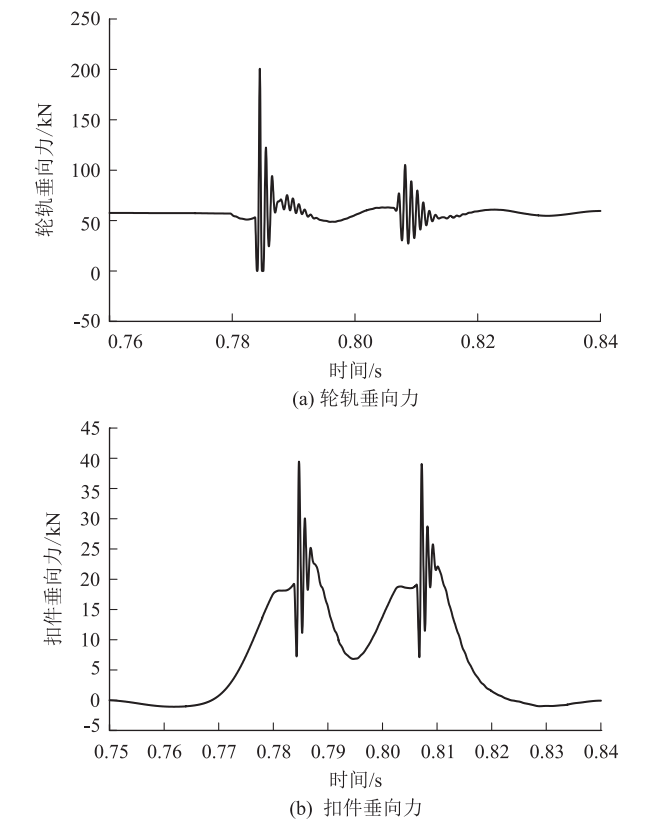


图6 焊缝短波不平顺引起的动力学响应图

对比不同时速条件下,焊缝不平顺引起的轮轨作用力和扣件力响应结果,如表4、表5所示。由表4、表5可知,随着车速从300 km/h增大到400 km/h,轮轨垂向力动载系数由2.83逐渐增大至3.43;而焊缝不平顺引起扣件力变化较小,400 km/h下最大扣件力为39.69 kN,对应动载系数为1.965。400 km/h条件下,不同焊缝幅值 $\delta_1+\delta_2$ 对应轮轨力的动载系数如图7所示,其中 $\delta_1、\delta_2$ 按相等幅值考虑。结果表明焊缝幅

值减小有利于降低焊缝冲击作用力大小。随着速度的增加,焊缝引起的冲击影响变得更为突出,为避免其对行车状态与轨道结构产生不良影响,应严格控制焊接接头的短波不平顺幅值。

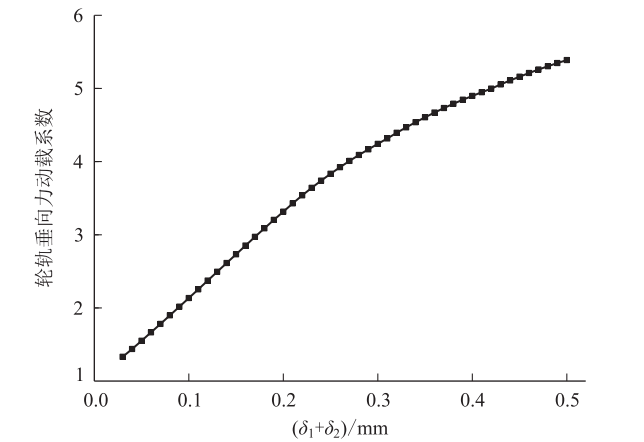


图7 焊缝幅值对轮轨垂向力动载系数影响图

表4 不同速度下轮轨垂向力最大值及动载系数表

速度 /(km/h)	静轮重 /kN	焊缝不平顺作用 /kN	动载系数
300	58.56	165.50	2.83
350		187.89	3.21
400		200.63	3.43

表5 不同速度下扣件垂向力最大值及动载系数表

运行速度 /(km/h)	仅轮载无不平顺作用/kN	有焊缝不平顺作用/kN	动载系数
300	20.07	38.04	1.895
350	20.13	39.44	1.959
400	20.19	39.69	1.965

综上所述,在400 km/h的运行条件下,速度冲击和轮心轨迹描述的扁疤模型计算得到的轮轨力动载系数分别为3.0、5.895,扣件力动载系数分别为2.43、2.73。焊缝不平顺仿真计算得到轮轨力与扣件力动载系数分别为3.43、1.965。

在实际中,轮轨力包含幅值较大的高频冲击力成分,其在向轨道下部结构传递过程中会快速衰减,对轨道板等下部结构影响较小;而频率相对较低的扣件作用力受速度变化的影响也相对较小,可将其视为轨道板的常用荷载。因此,本文在分析无砟轨道设计荷载时,以扣件作用力为主要依据。结合扁疤与焊缝分析的较不利情况(即扣件作用力动载系数为2.73),建议无砟轨道结构竖向设计荷载动载系数取3.0,可继续沿用现行TB/T 10621-2014《高速铁路设计规范》中竖向动载系数取值。

对于列车竖向荷载,车轮扁疤引起的轮轨垂向作

用在超过临界速度后随着速度增加逐渐降低,钢轨焊缝不平顺引起的轮轨垂向作用随行车速度增加而增加,轮轨动态作用对焊缝幅值敏感。因此,控制钢轨焊缝不平顺幅值可有效降低轮轨垂向动力作用。

4 结论

本文基于传统车辆-轨道耦合动力学理论,开展了400 km/h 行车条件下无砟轨道设计列车竖向设计荷载研究,主要研究结论如下:

(1)在动力学模型中,以冲击速度与轮心轨迹两种方法描述扁疤,以短波不平顺描述焊缝,按扣件垂向力计算结果作为分析竖向设计荷载主要依据,建议400 km/h 高速铁路无砟轨道竖向设计荷载的动载系数取3.0。

(2)钢轨焊缝不平顺引起的轮轨垂向作用力随行车速度增加而快速增加,轮轨系统动态相互作用对焊缝不平顺幅值变化敏感,因此应严格控制控制钢轨焊缝不平顺幅值。

参考文献:

- [1] TB/T 10621-2014 高速铁路设计规范[S].
TB/T 10621-2014 Code for Design of High Speed Railway[S].
- [2] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
ZHAI Wanming. Vehicle-Track Coupled Dynamics[M]. Beijing: Science Publishing House, 2014.
- [3] 刘学毅, 赵坪锐, 杨荣山. 客运专线无砟轨道设计理论与方法[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2010.
- LIU Xueyi, ZHAO Pingrui, YANG Rongshan. Design Theory and Approach of Ballastless Track for Passenger Dedicated Line[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2010.
- [4] 蔡成标, 徐鹏. 高速铁路无砟轨道关键设计参数动力学研究[J]. 西南交通大学学报, 2010, 45(4): 493-497.
CAI Chengbiao, XU Peng. Dynamic Analysis of Key Design Parameters for Ballastless Track of High-speed Railway[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2010, 45(4): 493-497.
- [5] 王平, 陈嵘, 井国庆. 现代铁路轨道[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2014.
WANG Ping, CHEN Rong, JING Guoqing. Modern Railway Track[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2014.
- [6] 中国铁路总公司. 铁路技术管理规程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2014.
China Railway. Regulations on Railway Technical Management[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2014.
- [7] 凌亮, 曹亚博, 肖新标, 等. 车轮擦伤对高速轮轨接触行为的影响[J]. 铁道学报, 2015, 37(7): 32-39.
LING Liang, CAO Yabo, XIAO Xinbiao, et al. Effect of Wheel Flats on the High-speed Wheel-rail Contact Behavior[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(7): 32-39.
- [8] 蔡成标. 无砟轨道设计理论与方法研究分报告之五——无砟轨道动力学理论与设计评估方法研究[R]. 成都: 西南交通大学, 2007.
CAI Chengbiao. Ballastless Track Design Theory and Method Research Sub-report No. 5——Research on Ballastless Track Dynamic Theory and Design Evaluation Method[R]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.
- [9] TB/T 1632-2014 钢轨焊接[S].
TB/T 1632-2014 Welding of Rails[S].