

文章编号:1005-0523(2009)04-0006-07

轨面短波不平顺对轮轨力影响的研究

周永健,练松良,杨文忠

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室,上海 200092)

摘要:轨面短波不平顺是轮轨作用力的主要影响因素。通过分析实测轨面短波不平顺数据,利用仿真计算研究不同轨面不平顺、不同运行条件下的车辆动力响应,比较分析动力响应计算结果有利于了解短波不平顺对运行列车的安全性和稳定性的影响。最后的结果分析为现场轨面短波不平顺的维修养护控制值提供一定的理论依据,并建议了轨面不平顺的控制值。

关键词:轨道;轨面短波不平顺;动力仿真;动力响应

中图分类号:U213.212

文献标识码:A

轨面短波不平顺是轮轨作用力的重要因素。随着列车的高速、重载和高密度的运行,钢轨磨损加剧,影响行车的平稳性和降低了轨道部件的使用寿命,需要及时打磨修正。为了研究轨面短波不平顺对列车运行的影响,本文通过对实测轨面不平顺的分析,并采用车辆—轨道耦合动力仿真计算模型,模拟车辆在短波不平顺的轨道上运行。通过对不同轨面不平顺下仿真计算结果的分析,深入了解轨面不平顺对列车运行的影响,为现场的轨面短波不平顺的控制提供了一定的参考依据。由于轨面短波不平顺对车辆运行平稳性的影响较小,所以本论文不考虑轨面不平顺对车体垂向振动加速度的影响。

1 轨面不平顺现场测试

在上海铁路局沪昆线进行了轨面不平顺测试。所采用的仪器是德国 ELEKTRO - THERMIT 公司生产的 SEC - RC 型钢轨波磨尺,该仪器通过掌上电脑控制采集数据,利用蓝牙传输掌上电脑和波磨尺的数据,可精确测量钢轨运行表面平直度,导向面平直度。波形如图 1 所示。

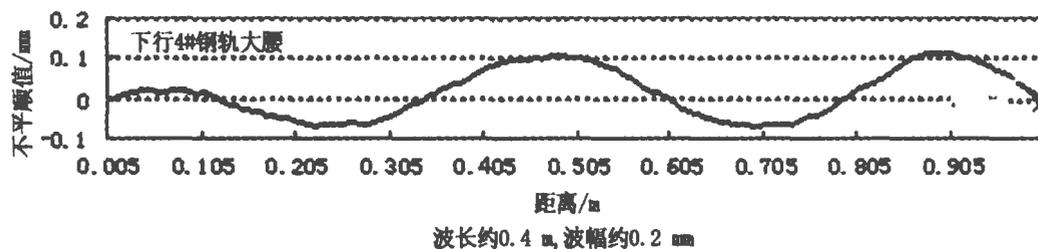


图1 实测轨面不平顺波形

国内外研究资料表明,轨面不平顺波长在1米以下至几十厘米,反映了轨道表面的粗糙程度。轨道高低不平顺一般是波长几米以上,反映的是轨道几何形位前后高低的起伏。钢轨波磨尺测量的是轨面不平顺而无法测量轨道不平顺。一般情况下,将几厘米至几十厘米的波长称为短波长。所以图1中的波形是轨面短波不平顺并不包括高低不平顺。通过对采样的轨面不平顺数据分析,接头处不平顺幅值集中在0~0.005 mm和0.3~0.4 mm,小腰处(离钢轨焊接接头1/4和3/4标准轨长位置)不平顺幅值集中在0~0.15 mm,大腰处(离钢轨焊接接头1/2标准轨长位置)不平顺幅值集中在0~0.15 mm。车辆在有轨面不平顺的轨道上运行,则会造成轮轨的荷载增大,增大了轨道结构和轨道下结构的振动,同时噪声也增大。

收稿日期:2009-05-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50878158);同济大学道路与交通工程教育部重点实验室资助项目

作者简介:周永健(1983-),男,山东临沂人,同济大学城市轨道交通与铁道工程系硕士,研究方向为轨道结构。

2 机车车辆对轨道短波不平顺动力响应的仿真计算

2.1 车辆—轨道动力学模型^[1]

在列车正常运行速度条件下(30~300 km·h⁻¹),轨面不平顺引起的振动频率远高于车辆转向架的模式频率,可认为轮对的振动与车体和转向架的运动无关,所以短波轨面不平顺引起的轮轨冲击力主要与簧下质量有关。在大多数情况下,分析轮轨之间的动力作用,建立图2所示的轮轨动力分析模型即可。根据此模型,钢轨的基本动力方程如式(1)式所示。

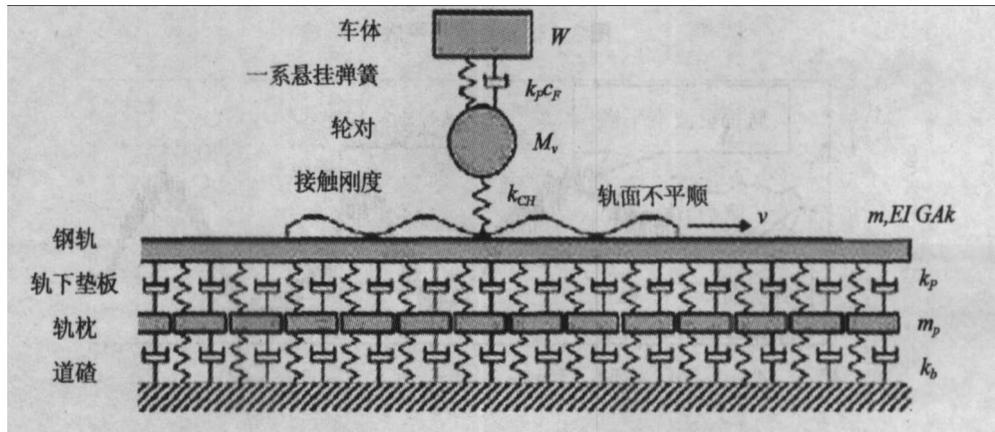


图2 轮轨动力作用的数学模型

$$EI \frac{\partial^4 z_r(x, t)}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 z_r(x, t)}{\partial t^2} + k_p z_r(x, t) = -F(t) \delta(x) \quad (1)$$

式中: EI 为钢轨弯曲刚度; ρ 为钢轨钢密度; A 为钢轨截面积; k_p 为钢轨基础刚度; $F(t)$ 为轮轨接触力, $F(t) = C_H (z_w(0, t) - z_r(x, t) + z(x, t))^{3/2}$; C_H 为 Hertz 接触刚度; $z_w(0, t)$ 为车轮位移; $z_r(x, t)$ 为钢轨位移; $z(x, t)$ 为轨面不平顺; $\delta(x) = \begin{cases} 1, & x=0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$ 。

整车运动方程如下:

$$[M_c] \{\ddot{U}_c\} + [C_c] \{\dot{U}_c\} + [K_c] \{U_c\} = \{P_c\} \quad (2)$$

式中: M_c 、 C_c 、 K_c 分别表示车辆的质量、阻尼、刚度矩阵; $\{U_c\}$ 、 $\{P_c\}$ 表示车辆系统各自由度的状态矢量和系统荷载列向量。

2.2 轨面短波不平顺仿真计算

仿真计算车型选择目前快速车辆结构参数,轮轨接触几何参数选用中等磨损的车轮踏面与中等磨损的普通 CHN60 钢轨表面的接触几何参数^[2]。由于轨面不平顺形式为谐波,所以采用目前国际上铁路通用的正弦波,其函数表达式为:

$$y = \frac{a}{2} (1 - \cos \frac{2\pi x}{l}) \quad (3)$$

式中: l 为不平顺波长; a 为不平顺幅值^[3]。

令 $l = 150 \text{ mm}$, $a = 0.2 \text{ mm}$ 轨面短波不平顺如图3所示。

对于直线轨道,一般短波不平顺只出现一个波或几个波,且相邻波幅的变化较大,但对于曲线轨道,如在下股钢轨出现波磨,则就会出现较多波,且相邻波幅的幅值基本相等。从轮轨动力作用理论可知,影响轮轨作用力的大小主要是波长和波幅大小,而相邻波的轮轨力冲击力叠加的影响要小于波长和波幅的影响。由于仿真计算仅考虑轨面不平顺,所以仅在高低不平顺上叠加短波不平顺。图4中轨面短波不平顺频率较高比较密集,叠加在实测原始高低不平顺上约有15 m。由于轨面不平顺波长波幅较小,图4轨道高低几何形位不平顺值峰变化可达3.0 mm,远大于短波不平顺的0.2 mm,其波长也远长于短波不平顺的波

长 150 mm。所以轨面不平顺只是让轨面粗糙程度增加,而对轨道高低几何形位影响较小^[4]。轨面不平顺仿真计算方案如表 1 所示。

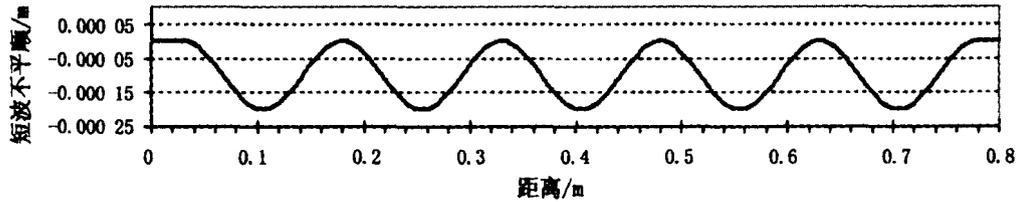


图3 轨面短波不平顺

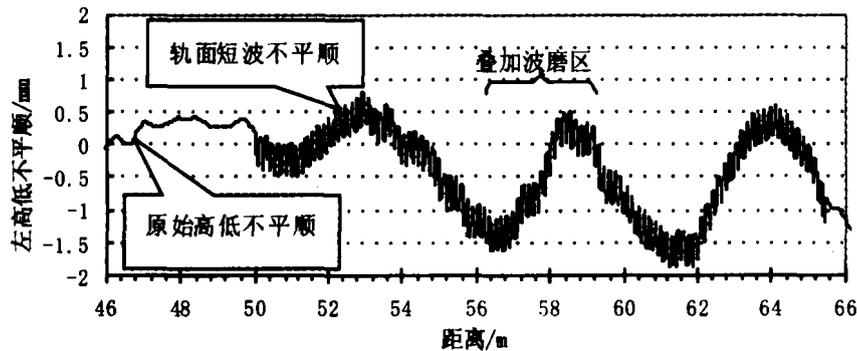


图4 叠加波磨后轨道高低不平顺图

表1 轨面短波不平顺计算方案

速度/(km·h ⁻¹)	曲线半径/m	不平顺波长/mm	波幅/mm
140,160,180,200	直线, R = 3 000	150	0.1,0.2,0.3,0.4,0.5
		250	0.15,0.3,0.45,0.6,0.75

2.3 机车车辆的动力响应评价指标^[5]

用车体水平和垂向振动加速度,脱轨系数和轮重减载率评价车辆运行的安全性和平稳性。脱轨系数取 $[Q/P] \leq 0.8$ (Q, P 为同时作用的横向力和垂直力)。当横向力作用时间 $t < 0.05$ s 时, $[Q/P] \leq 0.04/t$ 。轮重减载率取 $[\Delta P/\bar{P}] \leq 0.65$ ($\Delta P, \bar{P}$ 为轮重减载量和左右轮的平均轮重)。车辆运行平稳性评定标准为车体垂向振动加速度 $J_1 \leq 2.95$ (客车) ~ 3.63 m·s⁻² (机车), 车体横向振动加速度 $J_2 \leq 1.96$ (客车) ~ 2.45 m·s⁻² (机车)。

3 仿真计算的力动力响应输出及结果分析

为了分析轨面不平顺对车辆动力响应的影 响,分别输出轮轨垂向力、轮轨横向力、减载率、脱轨系数、车体垂向振动加速度、磨损因子,并选择了 150 mm 和 250 mm 两种波长,波幅分别为 0.1 ~ 0.75 mm,求各响应最值并画图分析。

3.1 轮轨垂向力

轨面短波不平顺对轮轨动力作用产生较大的影响。当车轮经过轨面不平顺时,轮轨垂向作用力出现一个高频瞬时冲击力 P_1 和低频准静态冲击力 P_2 ,如图 5 所示。其允许值为 $P_{1\max} = 400$ kN, $P_{2\max} = 250$ kN, $[P_1 + P_2]_{\max} = 600$ kN,计算所得的 P_1, P_2 力值不超过允许值,则可认为轨道结构满足强度要求。 P_1, P_2 及限值分析如图 6 所示。

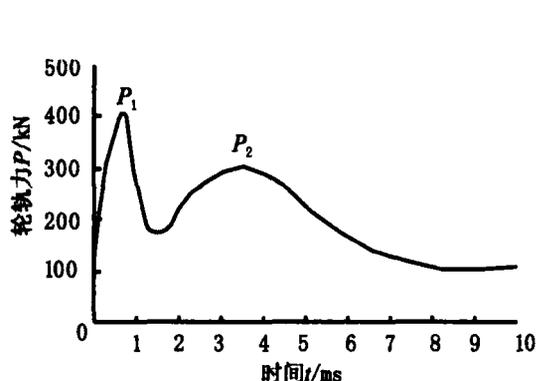


图5 脉冲扰动下的轮轨垂向作用力

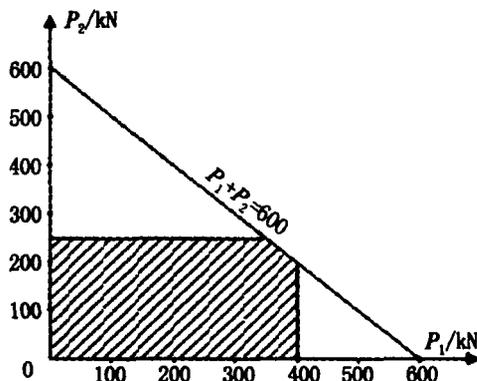


图6 轮轨冲击荷载的合理限值

图7是波磨区和非波磨区的轮轨力变化。在非波磨区,由于轨面存在原始随机不平顺,故轮载也有变化,最大值约57 kN。在波磨区,由于轨面短波不平顺的作用,轮轨垂向力变化频率和变化幅值要远大于非波磨,最大值约73 kN。所以轨面短波不平顺对轮轨垂向力影响较大。从图8可知,在轨面不平顺幅值小于0.3 mm时,轮轨垂向力随速度变化较小,且两轮的垂向力随速度变化反向,即左轨力变大,右轨力变小。当轨面不平顺幅值超过0.3 mm时,两轮轨力都随速度增大,且增大的速率较大,0.3 mm以上的轨面短波不平顺对速度的影响较为敏感。同样的轨面不平顺幅值,轨面不平顺波长250 mm时的轮轨力要稍小于波长为150 mm时的轮轨力,但两种波长的轮轨垂向力变化趋势一致。根据轨面不平顺与速度不同对轮载变化规律,认为在波长200 mm左右的轨面不平顺幅值大小控制在0.3 mm较为合适。

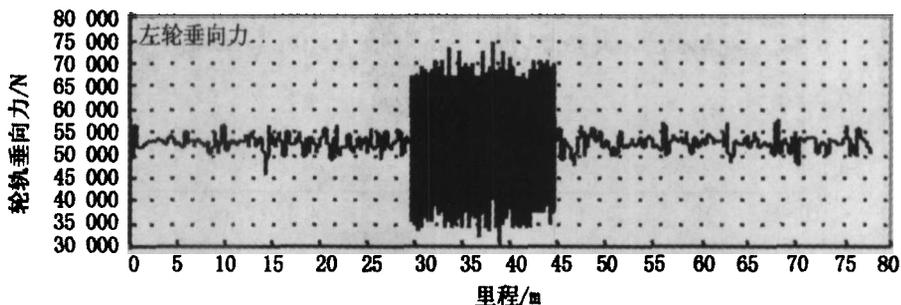


图7 左轮轨垂向力

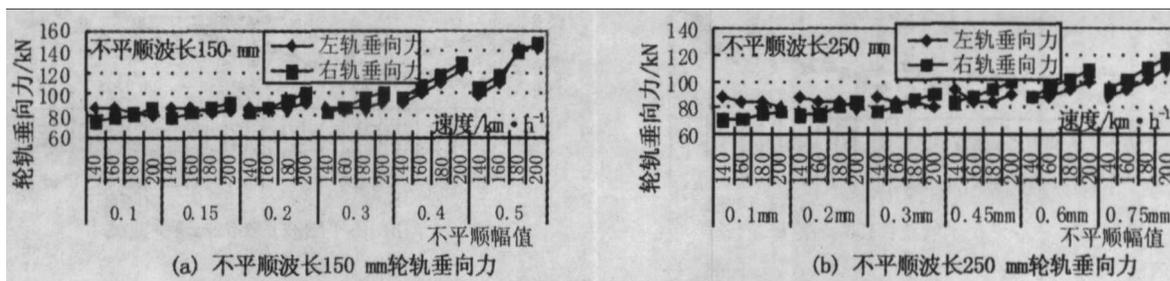


图8 轮轨垂向力最大值

3.2 轮轨横向力

从图9可知,由于轨底坡的作用,钢轨受到的向轨道内侧的轮轨横向力(负)大于向轨道外侧的横向力(正)的作用。轮轨横向力的最大值约为1 500 N,较曲线轨道的钢轨横向受力小得多。在波磨区段,轮轨横向力有明显的小幅高频波动,此频率也与轨面短波不平顺的波长相一致。所以轨面垂向短波不平顺,对横向力影响较小。

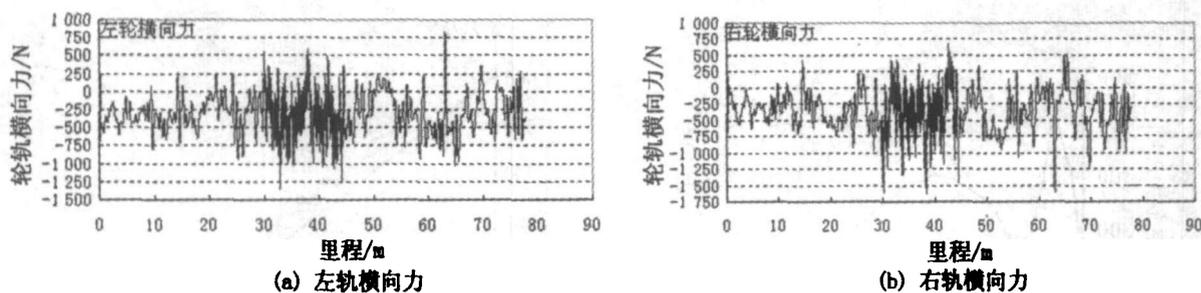


图9 左右轮轨横向力

3.3 轮重减载率

轮重减载率只与两轨的轮轨垂向作用力有关,所以可知,轮重减载率的波形与轮轨垂向力的波形基本一致。图10中在非波磨区,轮重减载率小于0.1,但在波磨区,轮重减载率较大,达0.4左右(限值为0.65),但作用频率较高。

轮重减载率如图11所示。由于轮重减载率与轮轨垂向力直接相关,其变化规律也与垂向力的变化规律相同。从图可知,轨面不平顺幅值小于0.3 mm的最大轮重减载率在0.7以下,稍大于0.65,但短波不平顺引起的轮重减载率变化频率较高,也即此最大值的作用时间较短,但如严格按照脱轨系数0.65控制,根据此计算结果,认为应把轨面短波不平顺幅值控制在0.2 mm以下。

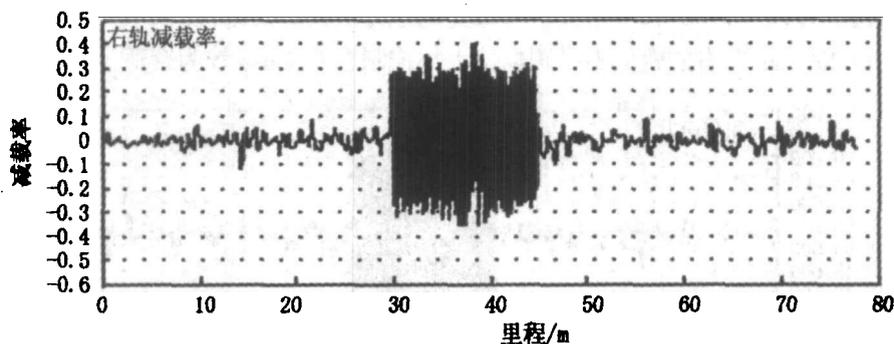


图10 轮轨减载率

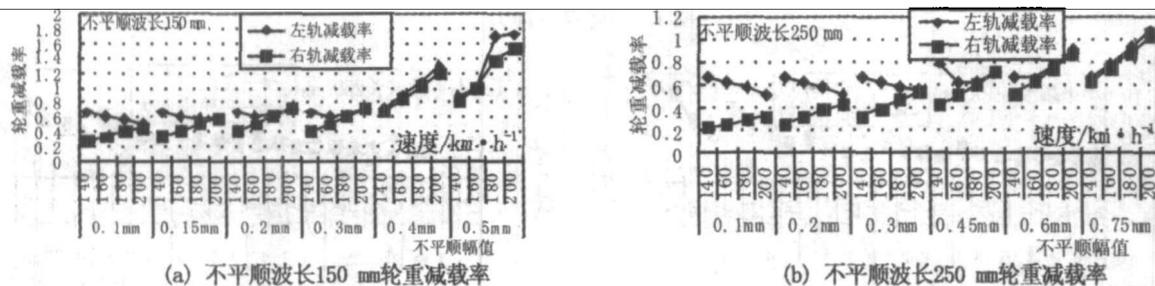


图11 轮重减载率

3.4 脱轨系数

脱轨系数如图12所示。由于波磨对轮轨横向力的影响较小,故波磨对脱轨系数的影响也较小,最大也只有0.15左右(限值为0.8)。与其他波形一样,在波磨区也有与波磨频率相一致的高频变化部分。图13脱轨系数为轮轨横向力与垂向力之比,由于轮轨横向力较小,故脱轨系数也较小,但当轨面不平顺幅值达0.5 mm,列车速度达 $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,脱轨系数突然增大,所以从脱轨系数可知,轨面短波不平顺幅值控制在0.4 mm以下即可。

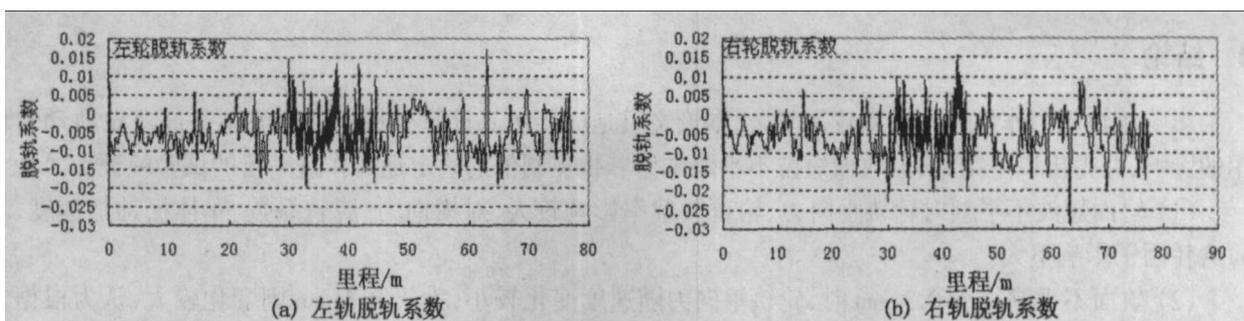


图12 脱轨系数

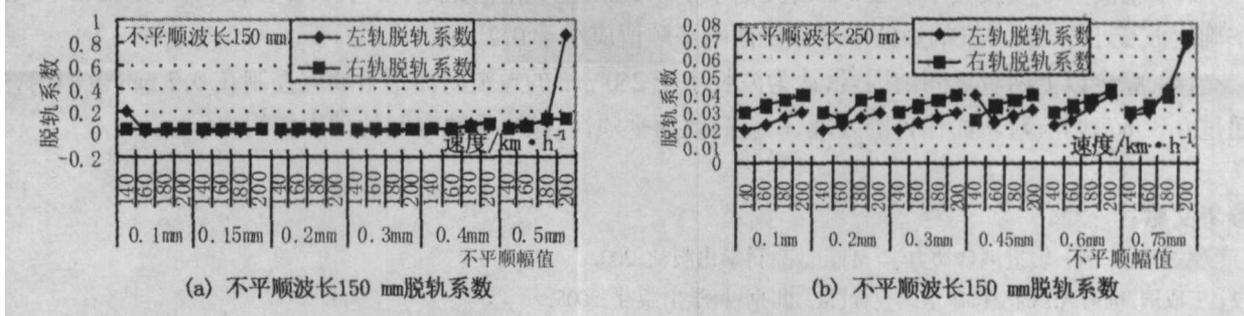


图13 轮轨脱轨系数

3.5 钢轨磨耗因子

轨面磨耗因子如图14所示。从图可知,随着速度的提高,磨耗因子增大,但与轨面不平顺幅值的关系不大,只是波长150mm,波幅值0.5mm,列车速度160km·h⁻¹以上时,磨耗因子突然增大。钢轨磨耗因子与轨面切向力(轮轨蠕滑力)密切相关,而轨面切向力增大,轮轨横向力也增大,轨面磨耗因子也相应增大。

钢轨表面磨耗因子的大小反映了钢轨表面磨耗速率的大小。从图7和图14可知,钢轨磨耗因子与轮轨垂向力大小变化关系不明显。从图7和图12可以看出,在63m处,钢轨横向力有一峰值,磨耗因子也有一峰值,可见两者有较大相关性,在波磨区,时程曲线有明显波动现象。

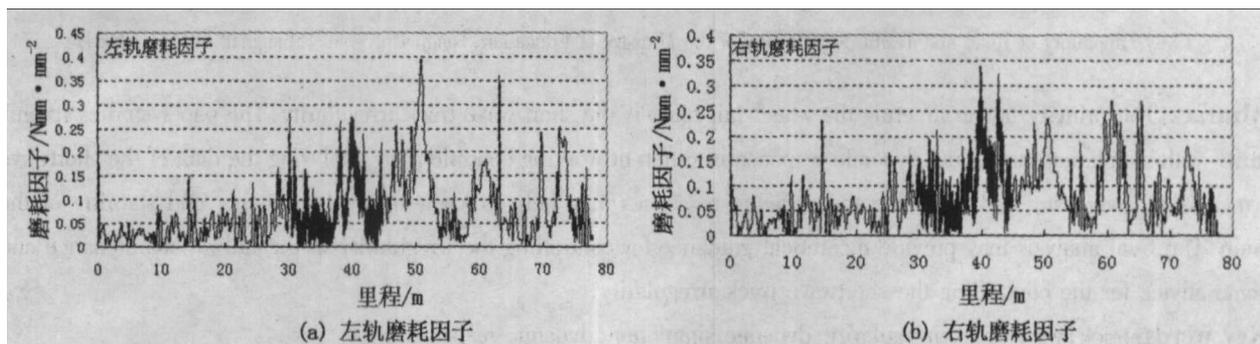


图14 钢轨磨耗因子

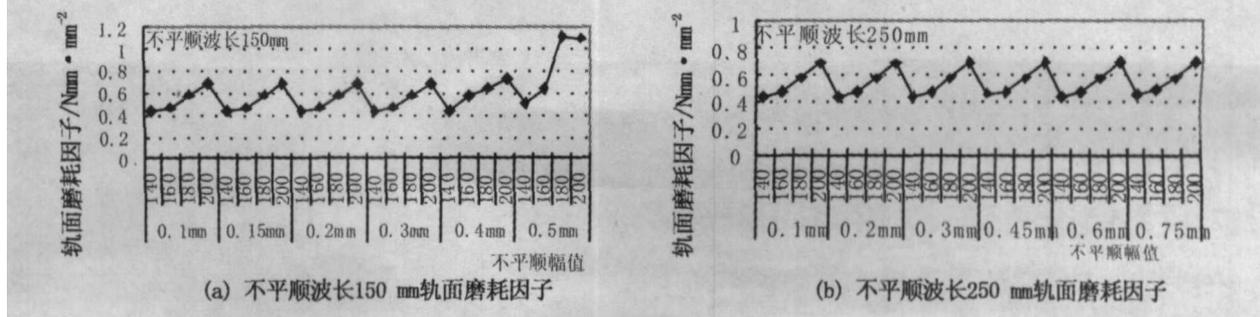


图15 轨面磨耗因子

4 结论

影响轮轨动力作用大小因素较为复杂,本论文只是应用仿真计算分析轨面短波不平面对轮轨动力作用的影响,并得出以下结论,但轨面短波不平顺维修养护控制值的确定还需作进一步的试验验证。

(1) 轨面短波不平顺对轮轨垂向力、轮重减载率影响较大,对横向力、脱轨系数、车体振动加速度、轨面磨损因子影响不大。

(2) 轨面不平顺小于 0.3 mm 时,轮轨垂向力随速度变化较小,大于 0.3 mm 则变化较大,认为根据轮轨垂向力确定波长小于 250 mm 的轨道不平顺波幅值应小于 0.3 mm。

(3) 轨面不平顺波长小于 250 mm,波幅小于 0.2 mm 时,轮重减载率小于 0.65,所以认为根据轮重减载率确定波长小于 250 mm 的短波不平顺轨面不平顺值应小于 0.2 mm。

(4) 综合以上两者之间的因素,认为波长小于 250 mm 的短波轨面不平顺应控制在 0.2 mm 范围内,如超过 0.3 mm,则应对轨面作打磨处理,以提高轨面平顺性,减小轮轨之间的动力作用。

参考文献:

- [1] 翟婉明. 车辆—轨道耦合动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [2] 王成国. MSC ADAMS/Rail 基础教程[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [3] 练松良. 轨道动力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2003.
- [4] 练松良. 轨道工程[M]. 上海: 同济大学出版社, 2006.
- [5] 芦睿泉, 练松良. 轨道复合不平顺对提速列车运行影响的研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2005, 2(5): 17-22.

Research of the Impact of Short Wave Track Irregularity on the Wheel-rail Force

ZHOU Yong-jian, LIAN Song-liang, YANG Wen-zhong

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The primary factor affecting the wheel-rail force is the short wave track irregularity. The paper studies irregularity with simulation model and dynamic response in different working conditions by analyzing the data of the shortwave irregularity. Comparing and analyzing the dynamic responses may help to know more about safety and stability of the train. The final analysis may provide theoretical guidance for controlling the irregularity in the railway maintenance and some advice for the controlling the shortwave track irregularity.

Key words: track; wave track irregularity; dynamic simulation; dynamic response

(责任编辑:刘棉玲)