高速铁路钢轨焊接区不平顺的动力效应及其安全限值研究

高建敏*, 翟婉明

西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 成都 610031

* E-mail: jmgao@swjtu.edu.cn

收稿日期: 2014-03-26; 接受日期: 2014-05-09

国家重点基础研究发展计划(批准号: 2013CB036205, 2013CB036206)、国家自然科学基金(批准号: U1234209)、牵引动力国家重点实验室自主研究课题(批准号: 2014TPL_T01)和精密与特种加工教育部重点实验室研究基金(批准号: JMTZ201002)资助项目

摘要 应用车辆-轨道耦合动力学理论及其仿真分析软件 TTISIM, 研究了钢轨焊接区低塌不平顺对轮轨动力响应的影响特征, 分析了高速行车条件下典型焊接区低塌不平顺波长和幅值对轮轨动力响应的影响规律, 在此基础上, 提出了高速铁路钢轨焊接区不平顺幅值的安全限值. 分析结果表明: 钢轨焊接区不平顺会导致明显的轮轨冲击效应, 且该冲击作用由短波不平顺所控制; 高速行车条件下, 轮轨动力响应随着焊接区不平顺波长的增大而减小, 随行车速度和不平顺幅值的增大而增大, 其中, 轮重减载率指标受不平顺波长和幅值的影响更为显著, 为钢轨焊接区不平顺作用下行车安全性的首要控制指标; 高速行车条件下, 钢轨焊接区不平顺幅值的安全限值随行车速度的增大而减小, 随不平顺波长的增大而增大, 叠合形不平顺幅值的安全限值受短波不平顺(波长小于 0.2 m)波长和幅值的影响较大; 在 200~250 km/h 行车速度等级, 1 m 直尺测量矢度条件下, 余弦形低塌不平顺幅值的安全限值为 0.82 mm, 叠合形低塌不平顺在 1 m 长波幅值为其作业验收限值 0.3 mm 时, 其短波不平顺幅值的最大安全限值为 0.2 mm, 叠合形不平顺幅值总的安全限值最大为 0.5 mm; 在 250~350 km/h 行车速度等级, 1 m 直尺测量矢度条件下, 余弦形低塌不平顺幅值的安全限值为 0.62 mm, 叠合形低塌不平顺在 1 m 长波幅值为其作业验收限值 0.2 mm 时, 其短波不平顺幅值的最大安全限值为 0.14 mm, 钢轨焊接区叠合形低塌不平顺幅值总的安全限值最大为 0.34 mm. 研究结果可为高速铁路钢轨顶面焊接区不平顺的养护维修管理提供理论参考.

关键词

高速铁路
钢轨焊接区
轨道不平顺
动力影响
安全限值

1 引言

高速铁路均采用长钢轨焊接无缝线路. 与传统有缝线路相比, 钢轨通过焊接方式相连, 消除了轨缝的影响, 最大限度地保持了线路的连续性和整体性,

使接头处的轮轨动力效应得到大大改善. 但是, 受焊接材料、焊接工艺水平、养护维修等多方面因素影响, 在车轮反复碾压作用下, 钢轨焊接接头处会出现各种缺陷, 如焊接接头低塌, 造成钢轨顶面短波不平顺的出现. 钢轨顶面短波不平顺对高速行车的噪声、振

引用格式: 高建敏, 翟婉明. 高速铁路钢轨焊接区不平顺的动力效应及其安全限值研究. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 697-706
Gao J M, Zhai W M. Dynamic effect and safety limits of rail weld irregularity on high-speed railways (in Chinese). Sci Sin Tech, 2014, 44: 697-706, doi: 10.1360/N092014-00081

动和行车安全性均有重要影响。一方面, 钢轨顶面短波不平顺将引起较大的轮轨附加动荷载, 引发钢轨、车轮及其他部件的损伤、断裂, 直接影响高速行车安全性; 另一方面, 由于钢轨所受冲击振动的增大, 致使轨下基础受力增加, 进而产生不均匀变形和其他损伤或破坏, 加剧轨道几何状态的恶化。因此, 高速铁路必须加强钢轨焊接区缺陷的检测和监控, 制订合理的几何状态控制限值, 以有效减小轮轨冲击振动, 这对延长钢轨、车辆部件的使用寿命, 减少轨道的养护维修工作, 减轻噪音污染, 均有重要意义。

基于钢轨焊接区不平顺对轮轨系统动力性能、轮轨噪声以及养护维修工作的重要影响, 国内外学者较早关注了这一问题, 并开展了大量研究工作^[1-4]。研究工作主要集中在两个方面, 一是钢轨焊接区损伤、钢轨材质和焊接形式对损伤形成的影响以及焊接区损伤动力影响的现场调查和试验研究; 另一方面是基于轮轨动力学模型的钢轨焊接区损伤的动力影响、参数分析以及轮轨噪声的研究。通过前者的研究, 明确了钢轨焊接区损伤的基本形式和特性, 而后者的研究, 进一步了解了钢轨焊接区缺陷的力学性能和动力影响。综合分析国内外研究工作发现, 多数工作是针对钢轨焊接区疲劳损伤特性、损伤影响因素以及钢轨损伤对振动和噪声的影响开展的, 针对钢轨焊接区疲劳损伤造成的轨道不平顺的特征以及钢轨焊接区轨道不平顺安全限值的研究较少, 尤其是高速铁路。文献[4]应用车辆-轨道耦合动力理论和垂向仿真模型, 分析了提速线路钢轨焊接区不平顺的动力影响, 提出了提速线路钢轨焊接区不平顺日常维修管理标准的建议。文献[5]则以实测地铁线路钢轨焊接接头不平顺作为轮轨界面不平顺激励输入, 分析了接头不平顺引起的轮轨动力响应特征, 并分析了行车速度、不平顺波长和波深、轨下胶垫刚度以及轨道结构形式等对焊接接头不平顺激励下轮轨动力响应的规律。

随着我国高速铁路的大规模建设发展, 高铁运营对轨道平顺性提出了更高要求, 同时对高速铁路轨道维护经济合理性的要求也日渐凸显。目前, 我国新近颁布的《高速铁路有砟轨道线路维修规则》(试行)中规定^[6], 对于钢轨焊缝(接头)顶面低塌或马鞍形磨耗, 要求 1 m 直尺测量矢度条件下, 200~250 km/h 线路不大于 0.3 mm, 250(不含)~350 km/h 等级线路的不大于 0.2 mm。该管理限值为目前我国高速铁路钢

轨综合修理时的整治限度要求。动力分析显示, 在高速行车条件下, 高速动车组通过此条件的钢轨焊接区缺陷所引起的动荷效应是较小的, 对高速行车的安全性完全不构成影响。通常在进行轨道几何状态的评定和管理时, 既要评价轨道几何状态的实际状况, 亦要分析其引起的机车车辆动力响应的大小。因此, 该管理限值是否适宜, 钢轨焊接区缺陷对高速行车安全性影响的限度是多少, 焊接区不平顺型式对限值大小有何影响等, 尚不清楚, 尚需进行大量的对比研究和经受高速铁路运营实践的考验。基于此, 本文采用车辆-轨道耦合动力学理论及模型, 分析高速行车条件下钢轨焊接区低塌不平顺对轮轨动力性能的影响规律, 根据其动力效应, 研究钢轨焊接区低塌不平顺的安全控制限值, 为高速铁路钢轨顶面短波不平顺的养护维修管理提供理论参考。

2 轮轨动力学分析方法

车辆在轨道上运行是一个复杂的动力学相互作用过程, 涉及众多因素, 既有车辆方面的, 又有轨道方面的, 两者相互渗透、相互影响^[7]。轨面几何不平顺是机车车辆的激振源, 会激起车辆系统的振动, 而车辆系统的振动经过轮轨接触界面作用力向下传递, 引起轨道结构振动加剧, 进而使轨道几何状态发生变化。细致描述轨面几何不平顺激励作用下轮轨动态作用规律应充分考虑车辆系统、轨道系统及其相互作用的影响, 为此, 本文采用车辆-轨道耦合动力学理论及模型^[7], 分析典型钢轨焊接区低塌不平顺激励作用下, 轮轨系统动力响应特征和规律, 基于高速车辆动力学性能评价指标, 进行高速行车条件下钢轨焊接区低塌不平顺幅值的安全限值分析和评判。

2.1 车辆-轨道耦合动力学模型

车辆-轨道耦合动力学模型同时考虑车辆系统与轨道系统, 并通过轮轨相互作用关系实现两个子系统的耦合作用, 可分析不同轮轨激励模型作用下的车辆、轨道系统的振动响应和参数影响特征。模型由车辆模型、轨道模型和轮轨相互作用关系模型组成。其中, 车辆子模型由车体、构架、轮对、悬挂弹簧和阻尼等元件构成; 轨道模型中, 左右两股钢轨被视为连续弹性离散点支承基础上的无限长 Euler 梁, 轨枕被视为刚性体, 与钢轨以及枕下基础间通过线性弹

簧和粘性阻尼元件连接, 道床则被离散为刚性质量块, 相邻道床块间由剪切刚度和剪切阻尼元件相连, 道床与路基之间用线性弹簧和阻尼元件连接. 轮轨动态耦合关系是车辆子系统和轨道子系统之间的连接纽带, 二子系统之间的动态耦合与反馈作用均通过这一环节而实现. 轮轨空间接触几何关系通过迹线法求解, 轮轨法向力由赫兹非线性弹性接触理论确定, 轮轨切向蠕滑力则通过 Kalker 线性理论和非线性修正理论相结合的方法求解.

2.2 轮轨激励模型

研究发现^[7,8], 钢轨焊接区局部低塌不平顺波形虽有所不同, 但近似可描述成两种典型波形. 一种为图 1 所示的余弦形谐波不平顺, 可用余弦函数((1)式)来描述其外形; 另一种为 1 m 的余弦波上叠加短波(波长 $\lambda=0.1\sim0.2$ m)不平顺(称之为叠合形不平顺), 如图 2 所示, 其描述函数如(2)式所示. 研究显示^[7], 图 2 所示的焊接区低塌不平顺会导致更大的轮轨冲击力效应, 并引起较大的轨道结构振动. 对于焊接区短波(波长小于 0.2 m)不平顺的动力效应尚未被充分重视, 尤其是高速铁路.

$$Z_0(t) = \frac{1}{2}a \left(1 - \cos \frac{2\pi vt}{L} \right), \quad \left(0 \leq t \leq \frac{L}{v} \right), \quad (1)$$

$$Z_0(t) = a \begin{cases} \frac{1}{2}a_1 \left(1 - \cos \frac{2\pi vt}{L} \right), & \left(0 \leq t \leq \frac{L-\lambda}{2v} \right); \\ a_1 + \frac{1}{2}a_2 \left[1 - \cos \frac{2\pi v}{\lambda} \left(t - \frac{L-\lambda}{2v} \right) \right], & \left(\frac{L-\lambda}{2v} < t \leq \frac{L+\lambda}{2v} \right); \\ \frac{1}{2}a_1 \left[1 - \cos \frac{2\pi v}{L} \left(t - \frac{L+\lambda}{2v} \right) \right], & \left(\frac{L+\lambda}{2v} < t \leq \frac{L}{v} \right). \end{cases} \quad (2)$$

(1)和(2)式中, $Z_0(t)$ 为激励位移, a 为不平顺波

图 1 余弦形谐波不平顺模型(模型一)

图 2 叠合形不平顺模型(模型二)

深, L 为不平顺波长, v 为行车速度, λ 为短波不平顺波长, a_1, a_2 分别为长波和短波不平顺幅值.

仿真分析中, 轮轨激励模型采用图 1 和 2 所示的钢轨焊接区低塌不平顺模拟模型, 通过变换不同的波长和波深组合方式, 分析高速行车条件下钢轨焊接区低塌不平顺对轮轨动力性能的影响规律.

2.3 动力学性能评价指标

钢轨顶面短波不平顺主要会激起轮轨垂向振动, 加剧车辆部件和轨道结构的破坏. 因此, 在进行高速行车条件下钢轨焊接区低塌不平顺动力效应评价及其安全限值分析时, 选取垂向轮轨动力学性能评价指标进行分析, 包括轮轨垂向力、钢轨支点反力、轮重减载率、车体垂向振动加速度和钢轨垂向振动加速度等. 根据文献资料^[6,7,9], 高速铁路垂向轮轨动力性能指标的安全性评价标准为: 轮轨垂向力为 170 kN, 轮重减载率为 0.8(动态)、车体垂向振动加速度为 0.25g.

3 钢轨焊接区不平顺引起的轮轨动力响应特征

以典型高速动车组以 300 km/h 行车速度通过焊接区不平顺时的振动响应为例, 分析焊接区低塌不平顺引起的轮轨动力响应特征. 仿真计算时, 车辆采用高速铁路典型动车 CRH2 车型, 轨道为高速铁路有砟轨道结构类型, 其主要组成部件为, 60 kg/m 钢轨, III 型混凝土轨枕, 优质碎石道砟, 道床厚 300 mm.

图 3 所示为高速动车组以 300 km/h 速度通过上述 2 种焊接区低塌不平顺时的轮轨动力响应曲线之对比. 其中, 余弦形焊接区不平顺(模型一)的波长 L 和波深 a 分别为 1.0 m 和 0.3 mm; 叠合形焊接区不平顺(模型二)的参数为: $L=1.0$ m, $\lambda=0.1$, $a_1=0.3$ mm, $a_2=0.05$ mm. 由图 3 可见, 受钢轨焊接区低塌缺陷影响, 轮轨系统产生明显的冲击振动. 当激励模型为

图3 焊接区低塌不平顺激励下的轮轨动力响应变化

(a) 轮轨垂向力; (b) 轮重减载率; (c) 钢轨垂向振动加速度; (d) 车体垂向振动加速度

图1所示的余弦形不平顺时,轮轨垂向力、轮重减载率和钢轨垂向振动加速度最大值分别为77.57 kN, 0.263g和31.59g,而当该低塌不平顺上叠加一更短波长不平顺时(图2模型),尽管短波不平顺幅值较小,但轮轨系统的振动明显增强,轮轨垂向力最大值达到了133.14 kN,轮重减载率和钢轨垂向振动加速度最大值则增大到了0.482g和567.44g,轮轨垂向力和轮重减载率增幅超过40%,而钢轨垂向振动加速度更是增大了近18倍.仿真计算发现,仅考虑轨面短波不平顺(波长0.1 m,波幅0.05 mm)激励作用时,轮轨垂向力和钢轨垂向振动加速度最大值分别为123.84 kN和545.67g,轮轨垂向力较模型一激励作用时的响应值大约46 kN,较模型二激励作用时的响应值仅小9.3 kN;钢轨振动加速度较模型一激励下的大17倍之多,仅比模型二激励作用时的响应值小3.8%左右.两种激励模型作用下,车体垂向振动加速度指标响应值均较小,最大值仅为0.002g.由此可见,钢轨焊接区不平顺会导致明显的轮轨冲击效应,对车轮和钢轨振动产生较大影响,且该冲击作用完全由短波不平顺所激发,可引起车轮瞬时增、减载,对行车安全性构成威胁,对行车舒适性几乎没有影响.

高速铁路钢轨焊接区低塌缺陷管理时,进行了速度等级的划分,其速度等级的上限分别是250和350 km/h^[6].根据此速度等级划分,图4进一步比较了250和350km/h两个速度等级上限行车速度条件下,高速车辆通过图1和2两种焊接区不平顺激励模型时的轮轨垂向力响应曲线(不平顺模型参数同上).由图4可见,随着行车速度的提高,高速车辆通过焊接区低塌不平顺时的轮轨力响应波形没有明显变化,轮轨力响应幅值有所增大,在行车速度由250增大到350 km/h时,模型一不平顺激励作用下,轮轨垂向力最大值由75.05增大到80.66 kN,增幅为7%左右,模型二不平顺激励作用下,轮轨力最大值由121.45增大到141.01 kN,增幅达14%左右.叠合形不平顺激励作用下,轮轨力响应增加更为显著.因此,高速行车条件下,更应重视钢轨焊接区短波不平顺引起的冲击振动作用.

4 不平顺参数对轮轨动力响应的影响规律

波长和波深是轨道不平顺的两个重要参数,对轮轨系统振动响应有着重要影响.采用图1和2所示

图 4 不同行车速度条件下焊接区轮轨力响应

(a) 模型一; (b) 模型二

的两种钢轨焊接区低塌不平顺模拟模型作为轮轨界面激励输入, 分析了钢轨焊接区低塌不平顺波长和波深对轮轨动力响应的影响规律.

4.1 波长的影响

图 5 所示为不同行车速度条件下余弦形焊接区不平顺(模型一)波长对轮轨动力响应指标的影响规律. 由图 5 可见, 当钢轨焊接区低塌缺陷采用单一余弦函数模拟时, 随着不平顺波长的增大, 轮轨动力响应值逐渐减小, 当不平顺波长小于 0.5 m 时, 轮轨动力响应指标变化率较大, 不平顺波长大于 0.5 m 后, 随着波长的增大, 轮轨动力响应指标变化较为平缓, 波长大于 1.2 m 后, 随着波长的进一步增大, 轮轨动力响应指标几乎没有变化; 随着行车速度的增大, 轮轨动力响应指标相应增大, 波长愈短, 行车速度的影响越明显.

当钢轨焊接区低塌缺陷采用图 2 所示的 1 m 范围内叠合短波不平顺(波长一般小于 0.2 m)的模型模拟时, 随着短波不平顺波长的变化, 不同速度条件下轮轨动力响应指标的变化规律如图 6 所示. 其中, 波长 L , 幅值 a_1 和 a_2 不变, 分别取值为 1 m, 0.3 和 0.1 mm,

图 5 余弦形谐波不平顺波长对轮轨动力响应的影响

(a) 轮轨垂向力; (b) 轮重减载率

图 6 叠合波短波不平顺波长对轮轨动力响应的影响

(a) 轮轨垂向力; (b) 轮重减载率

波长 λ 依次变化。

由图 6 可见, 叠合形不平顺激励作用下, 行车速度对轮轨动力响应指标的影响规律与余弦形不平顺的影响类似, 相同波长和幅值条件下, 行车速度愈高, 轮轨动力响应指标值愈大; 与余弦形不平顺影响规律略有不同的是, 相同行车速度条件下, 随着叠合形不平顺短波波长的增大, 轮轨动力响应指标并非单纯的线性减小, 而是在整体减小趋势上略有波动。例如, 200 km/h 行车速度条件下, 短波不平顺波长小于 0.15 m 时, 轮轨动力响应指标随波长的增大近似线性减小, 而当短波不平顺波长大于 0.15 m 后, 随着短波不平顺波长的进一步增大, 轮轨垂向力和轮重减载率均出现增大趋势。变化叠合形不平顺的其他参数, 短波不平顺波长的影响规律类似。这或许是由于构成叠合形不平顺的两个谐波共同作用造成的效应。在 200~350 km/h 行车速度域, 导致叠合形不平顺短波波长影响趋势变化的短波临界波长为 0.15~0.2 m。

4.2 波深的影响

不同行车速度条件下钢轨焊接区低塌不平顺幅值对轮轨动力响应指标的影响规律如图 7 和 8 所示。其中, 图 7 为不同行车速度条件下余弦形不平顺幅值对轮轨垂向力和轮重减载率的影响规律, 图 8 则为不同行车速度条件下焊接区叠合形不平顺幅值对上述两个指标的影响规律。分析时, 不平顺波长不变, 两种模型的波长取值分别为 1.0 和 0.1 m, 叠合形不平顺模型的长波幅值 a_1 不变, 取为 0.3 mm。

图 7 和 8 结果显示, 在余弦形谐波不平顺和叠合形焊接区不平顺激励作用下, 随着行车速度和不平顺幅值的增大, 轮轨垂向力和轮重减载率指标均呈

图 7 谐波不平顺幅值对轮轨动力响应的影响

图 8 叠合波不平顺幅值对轮轨动力响应的影响

线性规律增大, 其中, 相同仿真计算条件下, 轮重减载率指标的变化率更大, 为此两类钢轨焊接区激励模型作用下, 轮轨动力性能的首要控制指标。

为进一步分析叠合形不平顺模型中长波不平顺幅值对轮轨系统振动响应的影响规律, 图 9 比较了 1 m 长波不同幅值条件下轮轨垂向力指标时程曲线的差异。仿真计算时, 短波不平顺波长和幅值不变, 分别取值为 0.15 m 和 0.1 mm, 行车速度为 300 km/h。由图 9 可见, 叠合形不平顺模型中, 1 m 长波幅值增大时, 高频冲击力 P_1 略有增大, 低频响应力 P_2 增大明显。由于高速行车安全性主要受高频冲击力 P_1 的影响, P_2 力主要对轨下结构的振动和破坏产生影响, 因此, 高速行车条件下, 叠合形不平顺模型的动力效应主要受短波不平顺幅值和波长的影响, 1 m 长波不平顺幅值对行车安全性的影响不显著。

图 10 则给出了不同行车速度条件下叠合形不平顺模型 1 m 长波不平顺幅值对轮轨垂向力指标的影响规律。与上述计算类似, 仿真时, 短波不平顺波长和幅值不变, 分别取值为 0.1 m 和 0.1 mm。由图 10 可进一步看出, 不同行车速度条件下, 叠合形不平顺

图 9 叠合形不平顺激励下轮轨垂向力响应时程曲线

图 10 不同行车速度条件下叠合形不平顺长波幅值对轮轨垂向力响应的影响规律

模型中的长波不平顺幅值对轮轨动力响应的影响并不显著,随着长波不平顺幅值的增大,轮轨垂向力响应略有增大,但增幅较小,行车速度越高,轮轨垂向力响应越大,但其随不平顺幅值增大而增大的幅度没有明显变化.由此进一步说明,高速行车条件下,钢轨焊接区不平顺的动力影响主要受短波不平顺所控制.

5 钢轨焊接区不平顺幅值的安全限值分析

轨道几何不平顺的安全管理通常分为安全限值管理和临时补修管理,安全限值管理可作为评判行车安全事故的重要依据,临时补修管理作为有可能危及行车安全的一种急需整修的轨道病害状态的评判.在轨道几何状态安全管理基础上,经综合考虑工务的养护维修能力和经验、维修周期以及线路运营状况等制订出轨道的日常保养和作业验收管理值.目前,各国针对钢轨焊接区不平顺的管理只有作业验收管理值和日常保养(计划维修)管理值.诸如,法国、德国和日本等国家均对高速铁路钢轨焊接区缺陷的作业验收或计划维修管理值进行了规定^[10],法国高速铁路根据钢轨焊接方式的不同,给出了钢轨焊接区顶面短波不平顺的作业验收限值,其大小为 0.2~0.5 mm/1 m;德国高速铁路规定,线路大修后,钢轨焊接区缺陷的验收标准为 0.2~0.3 mm/1 m;日本新干线高速铁路轨面凹凸不平顺的作业验收目标值为 0.3 mm/1 m,计划维修目标值为 0.5 mm/1 m.如前所述,我国对高速铁路钢轨焊接区低塌不平顺的管理限度为 200~250 km/h 速度等级下为 0.3 mm/1 m,250(不含)~350 km/h 速度等级下为 0.2 mm/1 m,该管理限度也仅仅是作业验收管理值,与行车安全限值

尚有一定的差距,且该管理限值制订中,未考虑 1 m 谐波上短波不平顺的影响.高速行车条件下,钢轨焊接区低塌不平顺达到何种程度,必须采取必要的限速等措施,以保证高速行车的安全性? 1 m 谐波上叠加更短波长的不平顺时,高速铁路钢轨焊接区低塌不平顺幅值的安全限值为多少? 都是需要探明的问题.

因此,在上节分析基础上,根据钢轨焊接区不平顺对轮轨动力响应的影响特征以及高速铁路轮轨动力性能指标安全控制限值,进行了高速行车条件下不同类型钢轨焊接区低塌不平顺幅值的安全限值分析,明确了可能影响高速行车安全性的钢轨焊接区低塌不平顺的幅值限度.

图 11 所示为不同行车速度条件下余弦形钢轨焊接区低塌不平顺的幅值安全限值曲线.由图 11 可见,余弦形钢轨焊接区低塌不平顺激励作用下,当轮轨动力性能指标(轮轨垂向力和轮重减载率)达到其高速行车安全限值时,获得的余弦形钢轨焊接区不平顺幅值的安全限值随行车速度的增大而减小,随余弦形不平顺波长的增大而增大,波长越长,不同速度等级的余弦形不平顺幅值的安全限值范围越宽.在 200~250 km/h 速度等级,1.0 m 波长的余弦形不平顺幅值的安全限值为 0.82 mm;在 250~350 km/h 速度等级,1.0 m 波长的余弦形不平顺幅值的安全限值为 0.62 mm.由仿真计算结果和我国高速铁路钢轨焊接区低塌病害的维修管理限度对比可见,我国高速铁路钢轨焊接区 1 m 直尺测量矢度下的钢轨顶面低塌缺陷的整治限度是较为严格的,该管理限度为高速铁路钢轨焊接区低塌不平顺的作业验收管理限度,考虑了充分的行车安全储备,在高速铁路钢轨焊接区低塌不平顺幅值达到《高速铁路有砟轨道线路维修

图 11 焊接区余弦形谐波不平顺幅值安全限值曲线

规则》(试行)规定的整治限度时, 高速行车安全性尚未受到影响, 若以保障高速行车安全性为前提, 轨道养护维修工作尚有充裕的作业时间。

当 1 m 测量矢度条件下钢轨焊接区低塌不平顺达到其作业验收管理限度时, 若在之上再叠加短波不平顺(波长小于 0.2 m), 则不同速度等级下不同波长的短波不平顺幅值的安全限值曲线如图 12 和 13 所示。其中, 图 12 为 200~250 km/h 速度等级下钢轨焊接区叠合形低塌不平顺短波幅值的安全限值曲线, 1 m 长波的幅值取值为 0.3 mm; 图 13 所示为 250~350 km/h 速度等级下钢轨焊接区叠合形低塌不平顺短波幅值的安全限值曲线, 1 m 长波的幅值取值为 0.2 mm。

由图 12 和 13 可见, 与余弦形低塌不平顺类似, 不同行车速度条件下, 叠合形不平顺的短波不平顺幅值的安全限值随车速的增大而减小, 随短波不平顺波长的增大而增大。例如, 在 200~250 km/h 速度等级, 当 1 m 波不平顺幅值为 0.3 mm 时, 波长为 0.2 m 的短波不平顺幅值的安全限值为 0.2 mm 左右; 在 250~350 km/h 速度等级, 当 1 m 谐波不平顺幅值为

0.2 mm 时, 波长为 0.2 m 的短波不平顺幅值的安全限值仅为 0.14 mm 左右, 若短波不平顺的幅值小于该值, 则高速行车的安全性可以得到保障, 若短波不平顺的幅值超过该值, 且行车速度较高, 则高速行车将存在安全隐患。

表 1 进一步给出了不同速度等级和不同短波波长条件下, 当 1 m 波幅值取值为高速铁路钢轨焊接区低塌缺陷作业验收限值时的叠合形不平顺短波幅值的安全限值。由表 1 可以看出, 随着短波不平顺波长的增大, 其幅值的安全限值明显增大; 相同短波不平顺波长条件下, 行车速度等级越高, 叠合形不平顺短波幅值的安全限值越小。在 200~250 km/h 行车速度等级, 当 1 m 长波幅值为其作业验收限值(0.3 mm)时, 若其上再叠加一短波不平顺, 即使短波不平顺波长达到 0.2 m, 若短波的幅值超过 0.2 mm, 高速行车的安全性就将受到威胁, 这时, 钢轨焊接区低塌不平顺幅值的总限值为 0.5 mm, 比相同速度等级条件下余弦形低塌不平顺幅值的安全限值小得多。若短波不平顺的波长更短, 则叠合形不平顺幅值的安全限值更小。在 250~350 km/h 速度等级, 当 1 m 长波幅值为其作业验收限值 0.2 mm 时, 若其上叠加短波不平顺, 则轮轨动力性能指标达到高速行车安全性评价标准时, 短波不平顺幅值的安全限值最大为 0.14 mm, 叠合形不平顺总幅值的安全限值为 0.34 mm, 短波不平顺波长越短, 叠合形不平顺幅值的安全限值越小。由此可见, 叠合形不平顺幅值的安全限值受短波不平顺波长和幅值的影响较大, 即使 1 m 波长不平顺的幅值仅达到其作业验收限值, 但若其上叠加的短波不平顺的幅值稍大, 则高速行车的安全性就可能受到影响。因此, 高速铁路应加强钢轨顶面短波不平顺的检测和管理, 尤其是叠合形不平顺, 需根据其波形特征及其动力效应, 结合现场检测和养护维修资料等, 制订出经济合理的管理限值。

6 结论

应用车辆-轨道耦合动力学理论, 从理论上研

表 1 不同速度等级叠合形不平顺短波幅值的安全限值 (mm)

速度等级 (km/h)	短波长 0.1 m	短波长 0.15 m	短波长 0.2 m
200~250	0.09	0.14	0.20
250~350	0.068	0.09	0.14

图 12 200~250 km/h 速度等级叠合形不平顺短波幅值的安全限值曲线

图 13 250~350 km/h 速度等级叠合形不平顺短波幅值的安全限值曲线

究了钢轨焊接区低塌不平顺对高速车辆动力学性能指标的影响特征, 分析了焊接区不平顺波长和波深对轮轨动力响应的影响规律, 在此基础上, 提出了高速行车条件下不同类型焊接区低塌不平顺幅值的安全限值. 主要结论如下.

1) 钢轨焊接区低塌不平顺会导致明显的轮轨冲击效应, 且该冲击作用由短波不平顺所控制, 行车速度越高, 短波不平顺的动力影响越明显.

2) 钢轨焊接区低塌不平顺的波长和波深对轮轨动力响应大小有明显影响. 高速行车条件下, 焊接区不平顺波长越长, 轮轨动力响应值越小; 行车速度和不平顺幅值越大, 轮轨动力响应值越大; 相同仿真计算条件下, 轮重减载率指标的变化率更大, 为钢轨焊接区低塌不平顺作用下行车安全性的首要控制指标.

3) 高速行车条件下, 钢轨焊接区低塌不平顺幅值的安全限值随行车速度的增大而减小, 随不平顺

波长的增大而增大. 叠合形不平顺幅值的安全限值受其短波不平顺波长和幅值的影响较大, 即使 1 m 波长的不平顺的幅值仅达到其作业验收限值, 但若其上叠加的短波不平顺(波长小于 0.2 m)的幅值稍大, 高速行车的安全性就可能受到影响.

4) 在 200~250 km/h 行车速度等级, 1 m 直尺测量矢度条件下, 余弦形低塌不平顺幅值的安全限值为 0.82 mm; 叠合形低塌不平顺在 1 m 长波幅值为其作业验收限值 0.3 mm 时, 其短波不平顺幅值的安全限值最大为 0.2 mm, 钢轨焊接区叠合形低塌不平顺幅值总的安全限值最大为 0.5 mm.

5) 在 250~350 km/h 行车速度等级, 1 m 直尺测量矢度条件下, 余弦形低塌不平顺幅值的安全限值为 0.62 mm; 叠合形低塌不平顺在 1 m 长波幅值为其作业验收限值 0.2 mm 时, 其短波不平顺幅值的安全限值最大为 0.14 mm, 钢轨焊接区叠合形低塌不平顺幅值总的安全限值最大为 0.34 mm.

参考文献

- 1 Jenkins H H. The effect of track and vehicle parameters on wheel/rail vertical dynamic forces. *Railway Eng J*, 1974, 3: 2-16
- 2 Abe N, Fukui Y, Nagafuji T, et al. Maintenance of rail welded part by grinding its irregularities for elongation of rail service life. *RTRI Report*, 1994, 8: 17-22
- 3 Steenbergen, Michael J M M. Quantification of dynamic wheel-rail contact forces at short rail irregularities and application to measured rail welds. *J Sound Vib*, 2008, 312: 606-629
- 4 Zhai W M, Cai C B, Wang Q C, et al. Dynamic effects of vehicles on tracks in the case of raising train speeds. *P I Mech Eng F-J Rai*, 2001, 215: 125-135
- 5 翟婉明, 涂贵军, 高建敏. 地铁线路钢轨焊接区轮轨动力学问题. *振动、测试与诊断*, 2012, 32: 1-8
- 6 中华人民共和国铁道部. 高速铁路有砟轨道线路维修规则(试行). 北京: 中国铁道出版社, 2013. 33
- 7 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学. 第 3 版. 北京: 科学出版社, 2007. 38-83, 217-218
- 8 罗林, 张格明, 吴旺青, 等. 轮轨系统轨道平顺状态的控制. 北京: 中国铁道出版社, 2006. 21-26
- 9 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 高速动车组整车试验规范(送审稿). 2008. 14-15
- 10 吴旺青. 秦沈客运专线轨道不平顺管理标准建议值的研究. 中国铁道科学研究院研究报告, 2000, 12-15

Dynamic effect and safety limits of rail weld irregularity on high-speed railways

GAO JianMin & ZHAI WanMing

State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China

By means of the vehicle-track coupled dynamics theory and the corresponding simulation software TTISIM, the effect of track concave irregularity located in rail weld zone on the dynamic responses of vehicle and track coupled system was investigated. The influence of the wavelength and amplitude of typical rail concave irregularity on wheel/rail dynamic responses was analyzed under high-speed operation. On this basis, the safety limits of rail concave irregularity were discussed. The results show that the rail concave irregularity will lead to obvious wheel/rail impact effect which is controlled by the shorter wavelength irregularity. Under high-speed operation, the wheel/rail dynamic responses decrease with the increase of irregularity wavelength, and grow gradually with the increase of running speed and irregularity amplitude. The wheelset decreasing ratio, which is the most affected dynamic index, becomes the controlling index for running safety under the excitation of rail weld irregularity. The safety limits of rail weld irregularity decrease with the increase of running speed and rise with the increase of irregularity wavelength. For the overlapping shape weld irregularity, the safety limit is affected greatly by its short wavelength irregularity(wavelength is less than 0.2 m). At 200~250 km/h speed class and under 1m measurement scope, the safety limit of the cosine shape irregularity in rail weld zone is 0.82 mm, the maximum limit for the short wavelength irregularity of overlapping shape weld irregularity is 0.2 mm when the amplitude of the 1 m wave is 0.3 mm(the acceptance tolerance of 1 m wave), the maximum safety limit of the overlapping shape weld irregularity is 0.5 mm. At 250~350 km/h speed class, and under 1m measurement scope, the safety limit of the cosine shape irregularity in rail weld zone is 0.62 mm, the maximum limit for the short wavelength irregularity of overlapping shape irregularity is 0.14 mm when the amplitude of the 1 m wave is 0.2 mm(the acceptance tolerance of 1 m wave), the maximum safety limit of the overlapping shape weld irregularity is 0.34 mm. The research results can provide theoretical references for the maintenance management of rail weld irregularities on high-speed railways.

high-speed railway, rail weld zone, track irregularity, dynamic effect, safety limit

doi: 10.1360/N092014-00081