

文章编号: 1001-4632 (2026) 04-0119-11

引用格式: 安博伦, 刘丰收, 杨光, 等. 时速 400 km 条件下钢轨焊接接头平直度及廓形偏差限值[J]. 中国铁道科学, 2026, 47(4): 119-129.

Citation: An Bolun, Liu Fengshou, Yang Guang, et al. Limit values of rail weld joint straightness and profile deviation for 400 km · h⁻¹ high-speed railway[J]. China Railway Science, 2026, 47(4): 119-129.

时速 400 km 条件下钢轨焊接接头平直度及廓形偏差限值

安博伦, 刘丰收, 杨 光, 石 彤, 杜吉康

(中国铁道科学研究院集团有限公司 金属及化学研究所, 北京 100081)

摘 要: 时速 400 km 高速铁路轮轨动力作用加剧, 钢轨焊接接头平直度和廓形偏差的控制限值尚不明确, 针对这一问题, 提出基于现场实测状态参数化建模、车辆-轨道刚柔耦合动力学仿真与现场适应性验证相结合的限值研究方法。首先, 建立新型动车组-轨道刚柔耦合动力学模型, 并基于实测数据构建钢轨焊接接头不平顺和廓形偏差参数化模型, 利用现场实测动力响应对模型进行验证; 其次, 研究钢轨焊接接头平直度对轮轨动力响应的影响规律, 提出焊接接头平直度限值; 然后, 从时域和频域角度研究钢轨廓形偏差对车辆横向振动的影响规律, 提出廓形偏差限值; 最后, 结合现场测试结果对限值的适应性进行分析。结果表明: 钢轨焊接接头平直度幅值小于 0.2 mm 时, 轮轨垂向力、轮重减载率和接触应力随列车运行速度提升的增长相对平缓, 而在超过 0.2 mm 后, 各项指标增速明显加快, 轮轨冲击作用和局部接触应力显著增大; 钢轨廓形偏差对车辆横向动力学性能的影响具有轮轨匹配依赖性, 廓形负偏差绝对值超过 0.2 mm 后, 与新车轮匹配主要是放大车体低频横向振动, 而在廓形正偏差超过 0.2 mm 后, 与磨损车轮匹配主要是增强构架横向振动; 时速 400 km 高速铁路钢轨焊接接头平直度应控制在 0~0.2 mm · m⁻¹ 以内, 钢轨廓形偏差应控制在 -0.2~+0.2 mm 范围内; 打磨后 90% 以上的焊接接头平直度和廓形偏差满足所提限值要求, 新型动车组高速运行试验中轮轨力、轮重减载率和车辆振动加速度等指标均保持较大安全裕度, 验证了所提限值的现场可行性和高速运行适应性, 为时速 400 km 高速铁路钢轨养护维修提供参考依据。

关键词: 高速铁路; 时速 400 km; 钢轨; 焊接接头不平顺; 廓形偏差

中图分类号: U213.92 **文献标识码:** A

doi: 10.3969/j.issn.1001-4632.2026.04.09

随着新型动车组成功下线试运行及成渝中线等项目的建设推进, 我国高速铁路技术创新不断取得重大突破, 正逐步迈入时速 400 km 的新阶段。在更高速度等级条件下, 动车组运行安全性、平稳性和轮轨系统服役可靠性面临更高要求。钢轨作为轮轨接触系统的关键基础部件, 其服役状态直接决定轮轨接触几何关系和激励特征, 进而影响车辆-轨道系统动力响应及动车组服役性能^[1]。对于新建时速 400 km 高速铁路而言, 钢轨服役状态主要受轨面平顺性和廓形质量控制。其中, 钢轨焊接接头平直度属于典型短波不平顺, 直接影响轮轨垂向

力、轮重减载率和车辆部件振动加速度等垂向动力学指标; 钢轨廓形偏差则通过改变轮轨接触点分布、滚动圆半径差和等效锥度, 影响动车组横向稳定性和平稳性^[2-4]。随着运行速度提升, 轮轨系统对短波不平顺和廓形偏差的敏感性进一步增强, 因此有必要针对时速 400 km 运行条件, 研究钢轨焊接接头平直度和廓形偏差对动车组动力性能的影响规律, 并提出相适应的控制限值。

针对钢轨焊接接头平直度对轮轨动力性能的影响, 安博伦等^[2] 和杨光等^[5-6] 分析了时速 400 km 条件下短波不平顺对轮轨动力响应的影响, 指出不

收稿日期: 2025-11-18; 修订日期: 2026-07-20

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFB2603400)

第一作者: 安博伦 (1994—), 男, 河南禹州人, 助理研究员。E-mail: abl2022@foxmail.com

通讯作者: 刘丰收 (1978—), 男, 陕西礼泉人, 研究员。E-mail: harve78@163.com

平顺幅值增大和速度提升均会放大轮轨垂向力、轮重减载率及车辆振动加速度。Gao等^[7]基于车辆-轨道耦合动力学模型研究了焊接接头不平顺的动力效应,发现低塌型接头不平顺将诱发明显轮轨冲击,动力响应随波长增大而减小,随速度和幅值增大而增强。An等^[8]采用三维轮轨滚动接触有限元模型进一步研究表明,焊接接头会引起轮轨接触力和轴箱振动加速度瞬态增大,并导致接头附近接触应力集中。Sun等^[9]则利用人工神经网络实现了钢轨焊接接头冲击力的快速预测。总体来看,既有研究已揭示钢轨焊接接头不平顺对高速轮轨垂向动力响应的影响规律,但针对时速400 km条件下接头平直度限值适应性的研究仍需深化。

在钢轨廓形偏差影响方面,杨光等^[10]通过现场测试和仿真分析指出,廓形偏差会改变轮轨接触点分布和等效锥度,进而诱发或加剧车体低频横向晃动;通过打磨修正轨头工作边和轨顶接触区域廓形,可改善轮轨匹配关系并降低车辆横向振动。侯茂锐等^[11-12]以构架横向振动加速度为指标,发现廓形偏差增大后,轮轨匹配状态对轨距、轨底坡等参数更加敏感,多因素耦合作用下构架横向振动加速度易接近限值。Hou等^[13]进一步指出,正、负廓形偏差分别通过提高或降低等效锥度影响车辆横向动力学性能,其中负偏差与新车轮匹配易诱发低频晃车,正偏差与磨损车轮匹配可能加剧横向振动。可见,既有研究已明确廓形偏差对动车组横向动力性能的影响机制,但其限值适应性仍主要基于既有高速铁路运营条件和CR400型动车组开展。

综上,现有研究已分别揭示钢轨焊接接头不平顺和钢轨廓形偏差对动车组垂向、横向动力学性能的影响机制,但相关成果多基于时速350 km及以下高速铁路和CR400型动车组,既有技术标准的适用范围也主要面向现有高速铁路运营条件。对于时速400 km高速铁路,钢轨焊接接头平直度和廓形偏差对新型动车组动力性能的影响规律仍需结合实际服役状态进一步研究。

本文根据钢轨焊接接头不平顺和廓形偏差实测数据构建参数化模型,采用车辆-轨道刚柔耦合动力学模型,分析钢轨服役参数和运行速度对轮轨动力性能和车辆服役性能的影响规律,并结合新建高速铁路钢轨预打磨后的实测结果,提出时速400 km高速铁路钢轨焊接接头平直度和廓形偏差的合理限值建议。

1 仿真计算模型及钢轨服役状态参数化模型

建立新型动车组-轨道刚柔耦合动力学模型,并基于现场实测结果构建钢轨焊接接头不平顺和廓形偏差参数化模型。同时,通过实测轮轨动力响应对模型进行验证,为后续钢轨服役状态影响规律和限值分析提供计算基础。

1.1 车辆-轨道耦合动力学模型

钢轨焊接接头不平顺波长固定为1 m,当动车组以时速400 km运行时激发频率达400 Hz以上,此高频激励下轮轨系统将产生显著弹性变形^[14-16]。为准确模拟这一动力响应特征,基于实际运行动车组参数建立车辆-轨道刚柔耦合动力学模型,如图1所示。

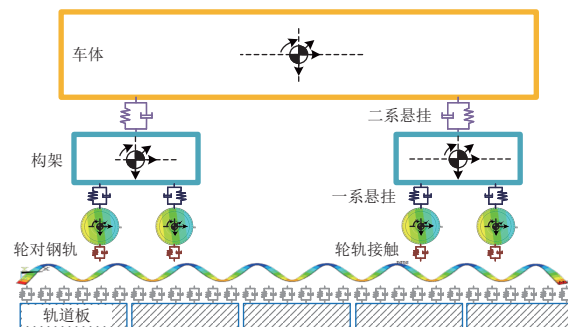


图1 车辆-轨道刚柔耦合动力学模型

模型将车体、构架和轮对视为刚体,各考虑空间6自由度,轴箱考虑点头自由度;二系和一系悬挂系统中的减振器及横向止挡采用非线性特性描述。轮对、钢轨和轨道板视为弹性体,通过有限元法构建。扣件采用弹簧-阻尼单元模拟,底座板下部基础支承作用采用面弹簧模拟。轮轨接触采用非赫兹方法计算接触斑和接触应力^[17-18],蠕滑力采用FASTSIM算法求解。基于Craig-Bampton (C-B)模态综合法,轮对、钢轨和无砟轨道有限元模型可缩减为超单元并导入多体动力学模型。其中,弹性轮对直接通过轮轨接触与弹性钢轨进行耦合,然后再通过悬挂系统和扣件单元与其他结构部件进行连接。该方法将系统自由度分解为边界自由度和内部自由度,利用约束模态和主模态实现降阶^[19]。

为研究钢轨焊接接头平直度和廓形偏差对轮轨动力性能的影响,分别对钢轨焊接接头不平顺和钢轨廓形偏差进行参数化建模并作为输入参数。焊接接头不平顺以钢轨垂向不平顺形式输入,采用接头

平直度幅值作为主要控制参数,计算车辆通过接头时的轮轨动力响应。钢轨廓形偏差则基于实测廓形偏差分布构造不同偏差量的钢轨廓形,导入模型后分别与新车轮和磨耗车轮型面匹配,计算车辆通过相应廓形钢轨时的横向动力学响应。

1.2 钢轨焊接接头不平顺

按照 TB1632.1—2014《钢轨焊接 第1部分:通用技术条件》^[20]规定的测试方法,现场采用1 m长平直度尺对钢轨焊接接头平直度进行测试,为定量分析不平顺对轮轨系统振动的影响规律,采用函数数量化描述接头处的不平顺,即

$$y = \frac{A}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{\lambda} \right) \quad (1)$$

式中: y 为钢轨垂向位移; A 为不平顺的幅值,根据现场测试结果,该幅值通常在 0~0.4 mm 范围内; x 为钢轨在列车前进方向的距离; λ 为不平顺波长,钢轨焊接接头测量长度为 1 m,故波长取 1 m。

1.3 轮轨廓形

对现场实测钢轨廓形按照 Q/CR 681—2018《高速铁路钢轨与道岔大型机械打磨验收技术规范》^[21]中规定进行对齐,结果表明钢轨廓形工作边偏差主要集中在 5°~45°的轨距角范围内,据此,采用正态分布模拟廓形偏差与角度的关系,即

$$\Delta\theta = D \exp \left[\frac{-(\theta - \theta_0)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (2)$$

式中: $\Delta\theta$ 为 θ 角度下的廓形偏差量; D 为偏差幅值, mm; θ_0 为分布中心,取 25°; σ 为控制偏差的角向分布宽度,取 15°。

沿廓形法线方向叠加偏差量,构造出 -0.8~0.8 mm 范围内钢轨不同偏差量的廓形,如图2所示。

车轮廓形选取新车轮和磨耗车轮 2 种型面。其

表1 轮轨动力响应指标验证

行车速度/(km·h ⁻¹)	轮轨垂向力			轮重减载率		
	现场实测/kN	仿真计算/kN	误差/%	现场实测	仿真计算	误差/%
350	72.93	74.42	2.0	0.14	0.14	0
375	77.01	76.16	-1.1	0.15	0.15	0

由表1可知:模型计算得到的轮轨垂向力和轮重减载率与现场实测结果吻合较好;2种速度条件下,轮轨垂向力相对误差分别为 2.0% 和 -1.1%,轮重减载率无明显偏差,表明模型能够有效表征车辆-轨道系统在钢轨不平顺激励下的动力响应。由此可认为,动力学模型具有较好的计算可靠性,可

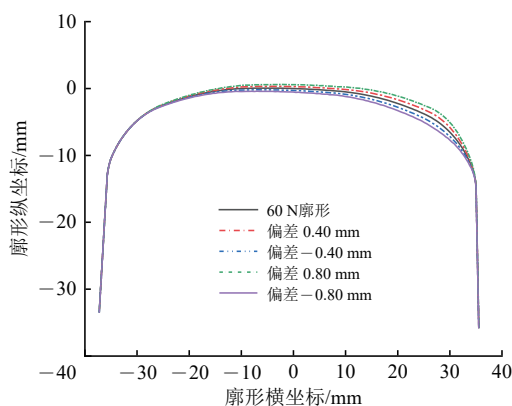


图2 钢轨偏差廓形

中,新车轮采用新型动车组的标准车轮型面,磨耗车轮采用线路跟踪测试得到的实测磨耗型面,相对于新车轮在踏面滚动圆区域存在明显凹磨特征,最大凹磨深度约为 0.9 mm,如图3所示。

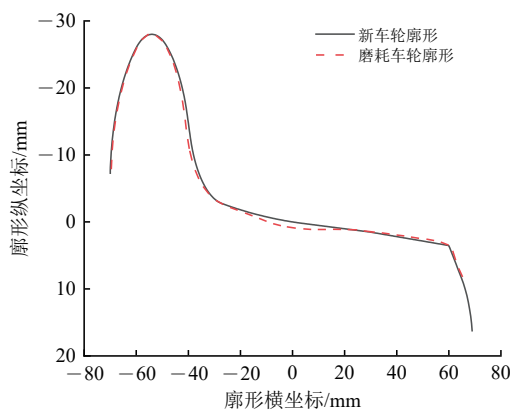


图3 新车轮和磨耗车轮型面

1.4 模型验证

为验证所建立模型在计算轮轨动力响应和车辆动力响应的可靠性,将列车以不同速度通过钢轨不平顺处的实测轮轨垂向力和轮重减载率与仿真计算结果进行对比,详见表1。

支撑后续钢轨焊接接头平直度和廓形偏差参数化分析。

2 钢轨焊接接头影响规律及限值

以轮轨垂向力、轮重减载率和轮轨接触应力为

主要评价指标,分析钢轨焊接接头平直度对高速轮轨动力响应和接触状态的影响规律。根据TB 10761—2024《高速铁路工程动态验收技术规范》^[22]及相关研究成果,轮轨垂向力安全限值为170 kN,轮重减载率的安全限值为0.8。考虑到焊接接头动力响应同时受平直度幅值和运行速度影响,进一步采用响应面分析方法,揭示多因素耦合作用下各评价指标的变化规律,并据此探讨时速400 km高速铁路钢轨焊接接头平直度的合理控制限值。

2.1 对轮轨垂向力影响

不同速度和平直度幅值条件下轮轨垂向力的响应面结果如图4所示。从图4可以看出:平直度幅值约0.2 mm处表现出较为明显的分界特征;当平直度幅值不超过0.2 mm时,轮轨垂向力随幅值和速度的增加整体变化较为平缓,说明该范围内焊接接头不平顺对轮轨冲击作用的放大效应相对有限;当平直度幅值超过0.2 mm后,轮轨垂向力对速度

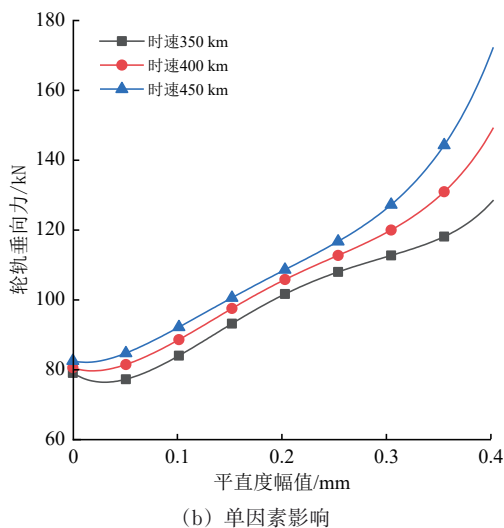
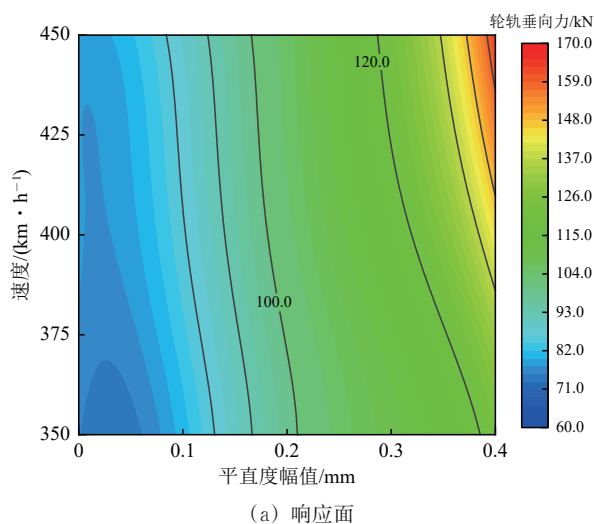


图4 钢轨焊接接头对轮轨垂向力影响

变化的敏感性明显增强,平直度幅值与运行速度之间的耦合放大效应逐渐显现。

以时速400 km工况为例,当平直度幅值由0 mm增至0.2 mm时,轮轨垂向力增幅约为34%;而当平直度幅值增至0.4 mm时,轮轨垂向力增幅进一步提高至93%。这表明,在较高运行速度条件下,焊接接头平直度幅值的增加会显著强化轮轨瞬态冲击作用,且该影响并非线性增长,而是在超过一定幅值后呈现快速放大的趋势。

2.2 对轮重减载率影响

轮重减载率反映了轮轨垂向接触状态的稳定性。不同速度和平直度幅值条件下轮重减载率的响应面及典型速度曲线如图5所示。从图5可以看出:轮重减载率随平直度幅值和运行速度增大整体呈上升趋势,且在较大平直度幅值下对速度变化更为敏感。

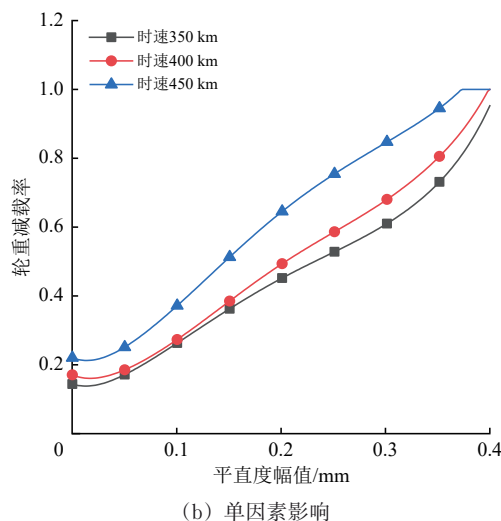
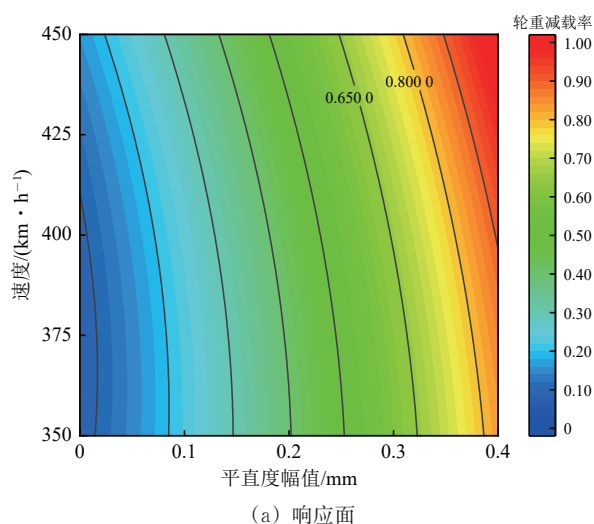


图5 钢轨焊接接头对轮重减载率影响

在时速350 km条件下,平直度幅值由0 mm增

至0.2和0.4 mm时,轮重减载率分别由0.14增至0.45和0.96;在时速400 km条件下,轮重减载率由0.17增至0.49,并在0.4 mm幅值下达到1.00,表明轮轨接触已出现完全减载现象。由此可见,当平直度幅值控制在0.2 mm以内时,轮重减载率虽有所增加,但仍低于0.8安全限值;当平直度幅值进一步增大至0.3 mm时,轮重减载率已达到或超过限值,存在轮轨分离的可能性。

从响应面变化特征看,平直度幅值超过0.2 mm后,轮重减载率增幅有所加快,说明较大焊接接头不平顺会显著放大轮轨垂向卸载效应,并提高高速运行条件下的轮轨接触失稳风险。

2.3 对轮轨接触应力影响

除动力响应外,焊接接头不平顺还会改变轮轨局部接触状态,导致瞬时接触应力升高。较高的接触应力会加速轮轨表面塑性应变累积,并可能促进焊接接头附近波磨、剥离或接触疲劳伤损的发展。时速400 km条件下不同平直度幅值对应的轮轨接触应力分布如图6所示。

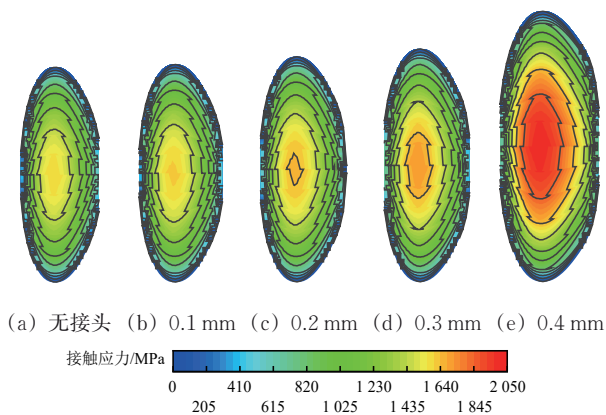


图6 平直度幅值对接触应力影响

从图6可以看出:最大接触应力随平直度幅值增大呈现非线性增长特征;无焊接接头不平顺时,接触斑中心最大应力为1 597 MPa;当平直度幅值为0.2 mm时,最大接触应力增至1 640 MPa,增幅约为2.7%;当平直度幅值增至0.4 mm时,最大接触应力进一步升高至2 050 MPa,增幅达到约28%。由此可见,小幅值不平顺对接触应力的影响相对有限,而较大幅值不平顺会显著提高轮轨局部接触应力水平,增加材料表层损伤风险。

为进一步分析速度和平直度幅值的耦合影响,构造最大轮轨接触应力关于平直度幅值和运行速度的响应面,并提取了时速350, 400, 和450 km条件下最大接触应力随平直度幅值变化的曲线,如图7

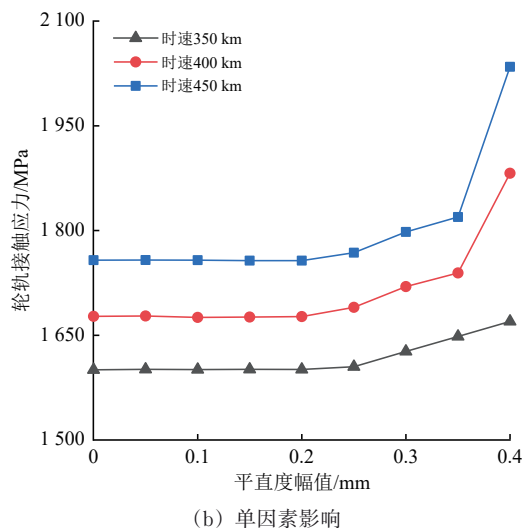
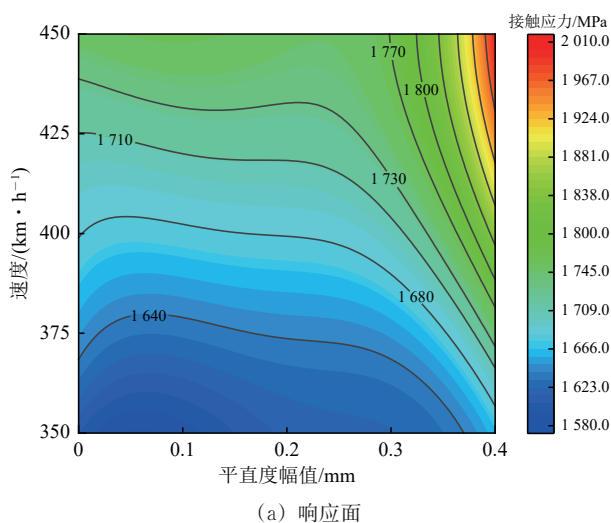


图7 钢轨焊接接头不平顺对接触应力影响

所示。

从图7可以看出:随着运行速度由时速350 km提高至时速450 km,最大接触应力曲线的拐点均位于0.2~0.3 mm区间,且随速度升高呈现略微左移的趋势;当平直度幅值超过0.3 mm后,最大接触应力增长速率明显提高,说明高速条件下较大幅值接头不平顺更容易诱发轮轨接触应力集中。

2.4 焊接接头平直度限值

综合轮轨垂向力、轮重减载率和轮轨接触应力分析结果可知,平直度幅值0.2 mm可作为钢轨焊接接头动力响应变化的重要控制阈值。当平直度幅值控制在0.2 mm以内时,各项动力学指标及接触应力的增长幅度相对较小,且对速度提升的敏感性较低;当平直度幅值超过该范围后,轮轨垂向力、轮重减载率和接触应力均呈现加速增长趋势,轮轨冲击作用和局部接触损伤风险显著增加。

考虑到实际线路中焊接接头状态还会受到短波不平顺、轨道结构状态、基础刚度以及运营维护质量等因素共同影响,平直度限值的确定应保留一定安全裕度。基于上述计算结果,建议时速400 km高速铁路钢轨焊接接头平直度幅值控制在0~0.2 mm以内,以降低接头区域轮轨冲击作用,保障高速运行条件下轮轨系统动力性能和钢轨服役耐久性。

3 钢轨廓形偏差影响规律及限值

钢轨廓形偏差会改变轮轨接触点分布、滚动圆半径差和等效锥度,进而影响车辆横向动力学性能。实际运营中,钢轨打磨不足或过量均可能导致廓形偏差,使轮轨匹配关系偏离合理状态,并诱发动车组异常横向振动。既有研究表明,不同轮轨匹配关系下钢轨廓形偏差的动力学影响具有差异性:负偏差廓形与新车轮匹配时,等效锥度偏低,主要影响车体低频横向响应;正偏差廓形与磨耗车轮匹配时,等效锥度增大,轮轨横向相互作用增强,对构架横向振动的影响更为显著。因此,分别针对“新车轮-负偏差廓形”和“磨耗车轮-正偏差廓形”2类典型工况,重点分析其对车体横向加速度和构架横向加速度的影响规律。

为表征钢轨廓形偏差对车辆横向动力学性能的影响,选取车体横向振动加速度和构架横向振动加速度作为主要评价指标。根据GB 5599—2019《机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范》^[23],构架横向振动加速度限值为 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$;同时,车体横向振动加速度不宜超过 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,以保证高速运行条件下的乘坐舒适性。考虑到廓形偏差对横向振动的影响同时受轮轨匹配状态、运行速度和偏差幅值控制,采用频域与时域相结合的方法开展分析:频域分析用于识别不同廓形偏差条件下的主要振动频段及响应幅值变化,时域分析则通过响应面方法揭示偏差幅值与速度对横向振动加速度的耦合影响。在此基础上,进一步提出时速400 km高速铁路钢轨廓形偏差的合理控制范围。

3.1 时域分析

为分析钢轨廓形偏差幅值与运行速度的耦合影响,分别建立新车轮-负偏差廓形匹配下车体横向振动加速度响应面和磨耗车轮-正偏差廓形匹配下车体横向振动加速度响应面。

新车轮与负偏差廓形匹配时,负偏差会降低轮

轨等效锥度,削弱轮对横向运动恢复能力,使车体低频横向振动响应更易被激发。新车轮-负偏差廓形匹配下车体横向振动加速度响应面如图8所示。从图8可以看出:车体横向加速度随负偏差幅值和运行速度增大而升高,并在时速400 km及以上速度条件下表现出更强敏感性;当负偏差控制在-0.2 mm以内时,车体横向振动加速度整体处于较低的稳定水平;当负偏差进一步增大时,车体横向振动加速度增幅明显加快,并在偏差达到约-0.4 mm后超过或接近 $1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。说明-0.2 mm附近可视为车体横向响应由平缓增长向敏感增长转变的控制边界,而-0.4 mm附近则已进入横向平稳性风险区间。

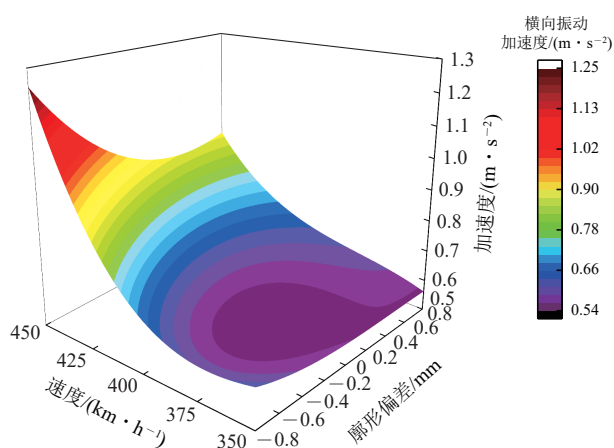


图8 新车轮与偏差廓形匹配下车体横向振动加速度

磨耗车轮与正偏差廓形匹配时,正偏差会提高轮轨等效锥度,增强轮轨横向相互作用,其影响主要表现为构架横向振动增大。磨耗车轮-正偏差廓形匹配下构架横向振动加速度响应面如图9所示。从图9可以看出:构架横向振动加速度随正偏差幅值增加而升高,并随速度提升表现出明显放大效

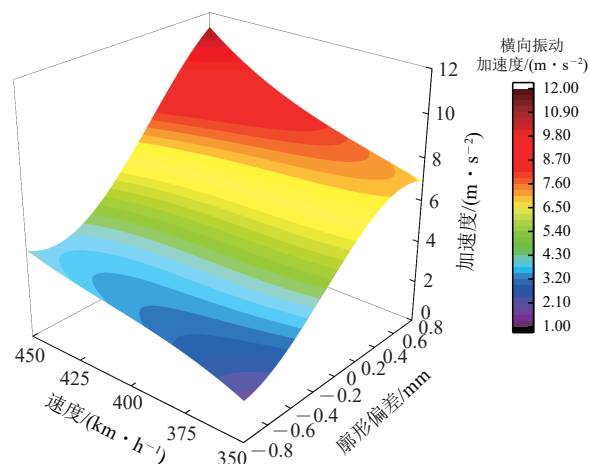


图9 磨耗车轮与偏差廓形匹配下构架横向振动加速度

应；当正偏差由0 mm增至0.8 mm时，时速350、400和450 km条件下构架横向振动加速度增幅分别约为32%，58%和114%；在时速400 km及以上条件下，正偏差超过约0.3 mm后，构架横向振动加速度可能达到 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 限值，表明磨耗车轮-正偏差廓形匹配下的构架横向振动风险显著增加。

上述结果表明，廓形偏差对车辆横向动力学性能的影响具有明显的轮轨匹配依赖性。新车轮-负偏差匹配主要受车体横向振动加速度控制，磨耗车轮-正偏差匹配主要受构架横向振动加速度控制；同时，时速400 km及以上速度条件下车辆横向响应对廓形偏差更为敏感，需对正、负偏差分别进行限值控制。

3.2 频域分析

为进一步解释不同时域响应差异，对典型工况下车体和构架横向振动加速度进行频域分析。

廓形负偏差对车体横向振动加速度的影响曲线如图10所示。从图10可以看出：新车轮-负偏差廓形匹配下，车体横向振动加速度的主导频率主要集中在1.4~1.8 Hz范围内。时速400 km条件下，60 N廓形对应的主频约为1.6 Hz，幅值约为 $0.07 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ；-0.6 mm负偏差廓形对应的主频约为1.55 Hz，幅值增至 $0.11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。时速提高至450 km后，60 N廓形主频约为1.60 Hz，幅值约为 $0.10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ；-0.6 mm负偏差廓形主频约为1.70 Hz，幅值进一步增至 $0.18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。由此可见，负偏差廓形没有改变车体横向振动的低频属性，但会显著提高1.4~1.8 Hz低频响应幅值，且速度提升会进一步放大该影响。

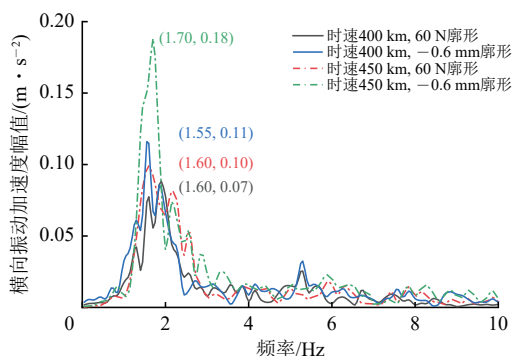


图10 廓形负偏差对车体横向振动加速度影响

廓形正偏差对构架横向振动加速度的影响曲线如图11所示。从图11可以看出：磨耗车轮-正偏差廓形匹配下，构架横向振动加速度主要在约6 Hz频率和14~16 Hz频段出现明显响应；时速400 km

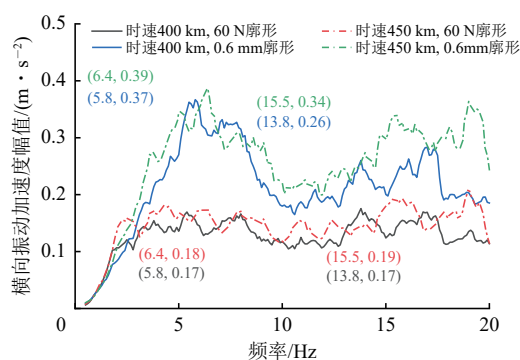


图11 廓形正偏差对构架横向振动加速度影响

条件下，60 N廓形在5.8和13.8 Hz频率处的幅值均约为 $0.17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ；0.6 mm正偏差廓形对应峰值分别增至0.37和 $0.26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ；时速提高至450 km后，60 N廓形在6.4和15.5 Hz频率处的幅值分别约为0.18和 $0.19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ；0.6 mm正偏差廓形对应峰值进一步增至0.39和 $0.34 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。说明正偏差廓形会显著放大构架在特征频段内的横向振动，其中6 Hz频段增幅尤为突出，14~16 Hz频段在高速条件下也表现出明显增强。

综合图10和图11可知：负偏差廓形与新车轮匹配时，主要放大车体在1.4~1.8 Hz低频段的横向振动；正偏差廓形与磨耗车轮匹配时，则主要增强构架约6 Hz频率和14~16 Hz频段的横向振动。频域结果表明，不同廓形偏差类型对应的敏感部位和主导频率不同，从振动成分角度解释了时域分析中“负偏差以车体横向振动加速度控制、正偏差以构架横向振动加速度控制”的差异，也进一步支撑钢轨廓形偏差控制在 $\pm 0.2 \text{ mm}$ 以内的合理性。

3.3 廓形偏差限值

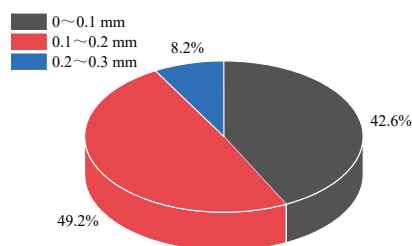
综合时域和频域分析结果可知，钢轨廓形偏差对车辆横向动力学性能的影响具有明显的方向性和轮轨匹配依赖性。新车轮与负偏差廓形匹配时，车体横向振动加速度对负偏差更为敏感；磨耗车轮与正偏差廓形匹配时，构架横向振动加速度对正偏差更为敏感。计算结果表明，在时速400 km及以上条件下，当负偏差增大至约-0.4 mm时，车体横向振动加速度可能超过或接近 $1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ；当正偏差超过约0.3 mm时，构架横向振动加速度可能达到 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 限值。

考虑到实际运营过程中车辆横向动力响应还会受到线路不平顺、曲线线形、轨距和轨底坡状态的影响，加之打磨精度、轮轨磨耗等因素会对轮轨廓形匹配性能产生影响，钢轨廓形偏差限值应适当收

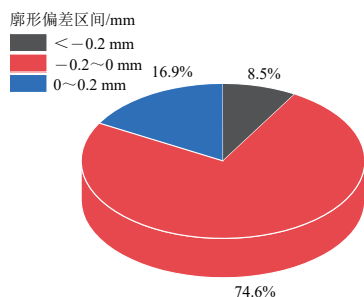
紧,保留一定安全裕度。因此,建议时速400 km高速铁路钢轨廓形偏差控制在 $-0.2\sim 0.2$ mm范围内,以兼顾新车轮和磨耗车轮两类典型匹配状态,保障高速运行条件下车辆横向动力学性能和轮轨匹配稳定性。

4 限值适应性分析

为验证时速400 km高速铁路钢轨焊接接头平直度限值和廓形偏差限值的现场适用性,选取某高速铁路开展打磨后钢轨服役状态测试,并结合高速运行试验结果进行限值适应性分析。线路钢轨打磨目标廓形为60 N廓形,测试内容包括钢轨焊接接头平直度和钢轨廓形偏差,统计结果如图12所示。



(a) 不同接头平直度幅值占比



(b) 不同廓形偏差区间占比

图12 钢轨焊接接头平直度幅值和廓形偏差统计

从图12可以看出以下结论。

(1) 现场实测的61个接头平直度中,56个幅值位于限值 $0\sim 0.2$ mm以内,占比约92%。具体来看,平直度幅值在 $0\sim 0.1$ mm范围内的接头占比约43%, $0.1\sim 0.2$ mm范围内的接头占比约49%;实测最大幅值为0.29 mm,最小幅值为0.05 mm。由此可见,在现有预打磨设备和工艺条件下,焊接接头平直度能够满足上文建议的 $0\sim 0.2$ mm $\cdot$ m⁻¹限值要求。

(2) 现场实测的71个钢轨廓形中,65个实测廓形的偏差量位于限值 $-0.2\sim 0.2$ mm范围内,占比约92%。实测廓形总体以负偏差为主,负偏差占比约85%,说明打磨后轨头局部区域存在一定

过打磨倾向;正偏差占比较小,且偏差量均位于0.2 mm以内。这表明在按60 N廓形进行打磨的条件下,当前打磨工艺总体能够将钢轨廓形偏差控制在上文建议限值范围内。

在运行试验期间,动车组通过该线路时最高时速达453 km。试验过程中,轮重减载率、轮轨垂向力和车辆振动加速度等指标均处于正常状态,且相对于评价限值仍保留较大安全裕度,未出现由钢轨焊接接头平直度或廓形偏差引起的异常动力响应。结合现场实测统计结果可知,在现有打磨设备和技术方案条件下,高速铁路钢轨焊接接头平直度和廓形偏差能够满足上文所提限值要求。同时,在平直度和廓形偏差满足限值条件下,动车组在时速高于400 km的试验速度下仍具有良好的运行安全性和平稳性,说明提出的接头平直度和廓形偏差限值具有较好的工程适应性。

5 结论

(1) 钢轨焊接接头平直度幅值增大将显著放大轮轨垂向冲击响应,且速度提升会进一步增强其影响。当平直度幅值超过0.2 mm后,轮轨垂向力、轮重减载率和最大接触应力均呈现加速增长趋势,轮轨接触稳定性和局部接触状态明显恶化。综合动力学响应和接触应力结果,建议时速400 km高速铁路钢轨焊接接头平直度控制在 $0\sim 0.2$ mm $\cdot$ m⁻¹以内。

(2) 钢轨廓形偏差对车辆横向动力学性能的影响具有明显轮轨匹配依赖性。新车轮与负偏差廓形匹配时,车体在1.4~1.8 Hz低频段的横向振动显著增强,且负偏差超过 -0.2 mm后车体横向振动加速度增幅加快;磨耗车轮与正偏差廓形匹配时,构架在6 Hz左右和14~16 Hz频段横向振动增强,且正偏差超过0.2 mm后构架横向振动加速度对速度提升更加敏感。基于上述规律,建议时速400 km高速铁路钢轨廓形偏差控制在 $-0.2\sim 0.2$ mm范围内,以兼顾车体横向振动平稳性和构架振动安全性。

(3) 现场适应性分析表明,某新建高速铁路预打磨后90%以上的钢轨焊接接头平直度和廓形偏差满足本文建议限值要求;新型动车组以时速453 km通过该线路时,轮重减载率、轮轨垂向力和车辆振动加速度等指标仍保留较大安全裕度。因此,

提出的钢轨焊接接头平直度和廓形偏差限值具有较好的现场可实现性和高速运行适应性, 可为时速400 km高速铁路钢轨养护维修提供参考。

参 考 文 献

- [1] 王同军,江成.400 km/h高速铁路线路基础设施关键技术研究[J].中国铁路,2025(6):1-9.
Wang Tongjun, Jiang Cheng. Research on key technologies for 400 km/h HSR line infrastructure[J]. China Railway, 2025(6): 1-9.
- [2] 安博伦,杨光,李英奇,等.时速400 km高速铁路钢轨不平顺合理限值[J].铁道建筑,2023,63(5):17-20.
An Bolun, Yang Guang, Li Yingqi, et al. Reasonable limit for rail irregularities in high-speed railway with speed of 400 km/h[J]. Railway Engineering, 2023, 63(5): 17-20.
- [3] 徐晓迪,肖炳环,刘金朝,等.高速铁路钢轨接头动态响应特性研究[J].中国铁路,2021(1):46-53.
Xu Xiaodi, Xiao Binghuan, Liu Jinzhao, et al. Research on the dynamic response characteristics of rail joints of high-speed railway[J]. China Railway, 2021(1): 46-53.
- [4] 俞喆,杨光,王有能,等.钢轨廓形对动车组车体低频横向晃动影响研究[J].铁道工程学报,2020,37(7):23-28.
Yu Zhe, Yang Guang, Wang Youneng, et al. Research on the influence of rail profile on low frequency lateral sway of EMUs[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(7): 23-28.
- [5] 杨光,刘丰收,张银花,等.400 km·h⁻¹速度条件下高速铁路钢轨适应性研究[J].中国铁道科学,2025,46(4):1-11.
Yang Guang, Liu Fengshou, Zhang Yinhua, et al. Research on adaptability of high-speed railway rails under 400 km·h⁻¹ conditions[J]. China Railway Science, 2025, 46(4): 1-11.
- [6] 杨光,王峰,安博伦,等.400 km/h高速铁路钢轨轨面平顺性控制技术[J].中国铁路,2025(6):42-50.
Yang Guang, Wang Feng, An Bolun, et al. Control technology of rail surface regularity for 400 km/h HSR[J]. China Railway, 2025(6): 42-50.
- [7] Gao Jiamin, Zhai Wanming, Guo Yi. Wheel-rail dynamic interaction due to rail weld irregularity in high-speed railways[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2018, 232(1): 249-261.
- [8] An Boyang, Wang Ping, Xiao Jingmang, et al. Dynamic response of wheel-rail interaction at rail weld in high-speed railway[J]. Shock and Vibration, 2017, 2017(1): 5634726.
- [9] Sun Linlin, Cui Shukun, Yan Ziquan, et al. A novel model for describing rail weld irregularities and predicting wheel-rail forces using a machine learning approach[J]. Computer Modeling in Engineering & Sciences, 2025, 142(1): 555-577.
- [10] 杨光,李晨光,成棣,等.动车组异常振动区段钢轨打磨整治策略及应用效果[J].高速铁路新材料,2023,2(3):60-65.
Yang Guang, Li Chenguang, Cheng Di, et al. Strategies and application effects of rail grinding in the abnormal vibration of EMU[J]. Advanced Materials of High Speed Railway, 2023, 2(3): 60-65.
- [11] 侯茂锐.基于多因素耦合作用的高速铁路钢轨廓形偏差限值研究[J].中国铁道科学,2023,44(6):125-135.
Hou Maorui. Research on limit value of rail profile deviation of high-speed railway based on multi-factor coupling effect[J]. China Railway Science, 2023, 44(6): 125-135.
- [12] 侯茂锐,杨光,陈秉智,等.高速动车组服役性能与钢轨廓形匹配适应性研究[J].铁道学报,2023,45(5):29-39.
Hou Maorui, Yang Guang, Chen Bingzhi, et al. Study on adaptability between service performance of high-speed EMU and rail profile matching[J]. Journal of the China Railway Society, 2023, 45(5): 29-39.
- [13] Hou Maorui, Yang G, Chen Bingzhi, et al. Investigating the effect of rail profile deviation on hunting instability of high-speed railway vehicle under multi-parameter coupling[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2024, 238(2): 152-163.
- [14] An Bolun, Wang Pu, Liu Fengshou, et al. Identification methods for modal parameters of track structures and their application status and prospects[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2025, 25(9): 2530001.
- [15] Ma Chaozhi, Gao Liang, Wang Pu, et al. Vibration characteristics of ballastless track and its effect on wheel-rail broadband dynamic interaction[J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2025, 26(6): 585-604.

- [16] 马超智,赵闻强,周鹏,等.时速400 km级无砟轨道轮轨耦合共振及影响因素研究[J].铁道科学与工程学报,2025,22(4):1407-1419.
Ma Chaozhi, Zhao Wenqiang, Zhou Peng, et al. Research on wheel-rail coupled resonance and influencing factors of 400 km/h ballastless track[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2025, 22(4): 1407-1419.
- [17] Wang Pu, An Bolun, Ma Junqi, et al. Theoretical and experimental research on the influence and optimization method of the 60N profile in turnout[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2024, 24(13): 2450147.
- [18] Ayasse J, Chollet H. Determination of the wheel rail contact patch in semi-hertzian conditions[J]. Vehicle System Dynamics, 2005, 43(3): 161-172.
- [19] 安博伦.高速铁路无砟轨道结构模态参数识别方法及应用研究[D].北京:北京交通大学,2022.
An Bolun. Study on modal parameter identification method and application of high-speed railway ballastless track[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.
- [20] TB 1632.1—2014 钢轨焊接 第1部分:通用技术条件[S].
TB 1632.1—2014 Welding of rails part 1: general specification[S].
- [21] Q/CR 681—2018 高速铁路钢轨与道岔大型机械打磨验收技术规范[S].
Q/CR 681—2018 Technical specification for acceptance examination on high production grinding of high-speed rails and turnouts[S].
- [22] TB 10671—2024 高速铁路工程动态验收技术规范[S].
TB 10671—2024 Code for dynamic acceptance of high-speed railway[S].
- [23] GB/T 5599—2019 机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范[S].
GB/T 5599—2019 Specification for dynamic performance assessment and testing verification of rolling stock[S].

Limit values of rail weld joint straightness and profile deviation for 400 km · h⁻¹ high-speed railway

An Bolun, Liu Fengshou, Yang Guang, Shi Tong, Du Jikang

(Metals and Chemistry Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China)

Abstract: The wheel-rail dynamic interaction is intensified on 400 km · h⁻¹ high-speed railways, while the control limits for rail weld straightness and rail profile deviation remain unspecified. Accordingly, a method for determining such limits is proposed, combining parametric modeling of field-measured conditions, rigid-flexible coupled vehicle-track dynamics simulation and field adaptability verification: first, a rigid-flexible coupled dynamics model of a new-type EMU and the track is established, parametric models of rail weld irregularity and rail profile deviation are constructed from measured data, and the model is validated against field-measured dynamic responses; second, the influence of rail weld straightness on the wheel-rail dynamic response is investigated and a limit for weld straightness is proposed; then, the influence of rail profile deviation on the lateral vibration of the vehicle is investigated in both the time and frequency domains and a limit for profile deviation is proposed; finally, the adaptability of the proposed limits is analyzed with reference to field test results. The results show that when the weld straightness amplitude is less than 0.2 mm, the wheel-rail vertical force, wheel unloading rate and contact stress increase relatively gently with rising speed, whereas beyond 0.2 mm the growth rates of these indices accelerate markedly and both the wheel-rail impact and the local contact stress increase significantly; the influence of profile deviation on the lateral dynamic performance of the vehicle depends on the wheel-rail matching condition, in that a negative deviation with a magnitude exceeding 0.2 mm mainly amplifies the low-frequency lateral vibration of the carbody when matched with new wheels, whereas a

positive deviation exceeding 0.2 mm mainly intensifies the lateral vibration of the bogie frame when matched with worn wheels; it is therefore recommended that, for 400 km · h⁻¹ high-speed railways, the rail weld straightness be controlled within 0 to 0.2 mm · m⁻¹ and the rail profile deviation within -0.2 to +0.2 mm; field tests show that after grinding more than 90% of the welds and rail profiles satisfy the proposed limits, and that the wheel-rail force, wheel unloading rate and vehicle vibration acceleration measured during the high-speed running tests of the new-type EMU all retain a substantial safety margin, which verifies the field feasibility and high-speed adaptability of the proposed limits and provides a basis for rail maintenance on 400 km · h⁻¹ high-speed railways.

Key words: High-speed railway; 400 km · h⁻¹; Rail; Weld joint irregularity; Profile deviation

(责任编辑 张 琪)