

文章编号: 1001-4632 (2026) 04-0092-13

引用格式: 李国龙, 杨飞, 尹峰, 等. 高速铁路 1.5~10 m 波段轨道几何不平顺控制标准[J]. 中国铁道科学, 2026, 47(4): 92-104.

Citation: Li Guolong, Yang Fei, Yin Feng, et al. Control standards for track geometry irregularity in the 1.5-10 m wavelength band of high-speed railways[J]. China Railway Science, 2026, 47(4): 92-104.

高速铁路 1.5~10 m 波段轨道几何不平顺 控制标准

李国龙, 杨 飞, 尹 峰, 庞志强, 魏子龙, 刁洪宝, 强伟乐

(中国铁道科学研究院集团有限公司 基础设施检测研究所, 北京 100081)

摘 要: 为强化运营期高速铁路轨道几何中短波段不平顺管控, 健全平顺性全周期管理体系, 厘清轨道不平顺激励与车辆动态响应的关联, 基于行车安全提出了 1.5~10 m 波段轨道不平顺管理方法。基于实测数据统计和车辆-轨道耦合动力仿真分析, 分别给出不同速度等级下适用于 1.5~10 m 波段的轨道动态几何不平顺容许偏差管理建议值; 同时, 为便于现场开展养护维修作业, 根据弦长与波长之间的传递函数, 综合考虑轨道静、动态不平顺之间的差异, 给出基于 5 m 中点弦测法的轨道静态几何不平顺容许偏差管理建议值。结果表明: 针对不同速度级 1.5~10 m 波段高低、轨向动态不平顺的日常保持、计划维修、临时补修和限速管理建议值, 运营速度为 200~250 km·h⁻¹ 的线路, 高低动态不平顺管理建议值分别为 3, 4, 6 和 7 mm, 轨向分别为 3, 4, 5 和 6 mm, 运营速度为 250 (不含)~350 km·h⁻¹ 的线路, 高低动态不平顺管理建议值分别为 2, 3, 5 和 6 mm, 轨向分别为 2, 3, 4 和 5 mm, 运营速度为 350 (不含)~400 km·h⁻¹ 的线路, 高低动态不平顺管理建议值分别为 2, 3, 4 和 5 mm, 轨向管理建议值与运营速度为 250 (不含)~350 km·h⁻¹ 的线路相同; 针对基于 5 m 短弦的轨道静态几何不平顺作业验收、计划维修、临时补修和限速管理建议值, 运营速度为 200~250 km·h⁻¹ 的线路, 高低静态不平顺管理建议值分别为 3, 4, 6 和 7 mm, 轨向分别为 3, 4, 5 和 6 mm; 运营速度为 250 (不含)~350 km·h⁻¹ 的线路, 高低静态不平顺管理建议值分别为 2, 3, 5 和 6 mm, 轨向分别为 2, 3, 4 和 5 mm; 运营速度为 350 (不含)~400 km·h⁻¹ 的线路, 高低静态不平顺管理建议值分别为 2, 3, 4 和 5 mm, 轨向管理建议值与运营速度为 250 (不含)~350 km·h⁻¹ 的线路相同。

关键词: 高速铁路; 轨道动静态几何不平顺; 管理建议值; 车辆-轨道耦合动力学; 中点弦测法

中图分类号: U216.3

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1001-4632.2026.04.07

截至 2025 年底, 全国铁路营业里程达到 16.5 万 km, 其中高铁 5.04 万 km^[1]。轨道安全管理是实现高速行车的重要技术保障^[2], 科学合理的轨道几何管理标准是保证高速铁路高平顺性的关键。轨道不平顺是轮轨相互作用的直接激励源, 影响着行车安全性及乘坐舒适性, 不同波长不平顺对于行车性能影响差异显著^[3]。

国内外都非常重视对高速铁路轨道不平顺的管理, 并提出了不同的评价方法及标准体系。我国针

对不同速度等级的高速铁路轨道动态不平顺管理按照波长划分为 1.5~42, 1.5~70 和 1.5~120 m 区间, 并采用 10 m 中点弦测法对轨道静态不平顺进行管理^[4]。欧洲标准委员会颁布的 EN13848 系列标准按照 3~25 和 25~70 m 波段对轨道动态不平顺进行管理, 日本采用 10 和 40 m 弦长对日本新干线轨道动态不平顺进行管理, 法国采用 12.2 m 弦半峰值和 31 m 弦峰峰值对轨道高低不平顺, 同时以 10 m 弦半峰值和 33 m 弦峰峰值对轨向不平顺进行

收稿日期: 2025-11-26; 修订日期: 2026-06-13

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFB2603400)

第一作者: 李国龙 (1991—), 男, 河北石家庄人, 副研究员。E-mail: 397438497@qq.com

通讯作者: 杨 飞 (1985—), 男, 山东枣庄人, 研究员。E-mail: 13811807268@163.com

控制,德国以8.6 m偏弦和10 m偏弦管理轨道静态不平顺,同时采用50 m波长高通滤波法对轨道高低、轨向动态不平顺进行管理^[5]。10 m以下轨道不平顺对行车安全指标影响更为明显^[6-8],而我国现行管理标准中对该波段的管理并不突出,且该波段特征波长以轨道板、梁缝、道岔等为主,因此我国暂行的动、静态不平顺管理中短波段控制方面尚存在优化空间。国内外学者针对轨道不平顺控制方法开展了一系列研究,Karis等^[9-10]研究给出了车辆响应与轨道不平顺之间的关联关系;Xin等^[11-12]分析长波不平顺对车辆响应的影响,给出了敏感波长和管理幅值的确定方法;杨飞等^[13-14]分析了动静态不平顺评价差异,建立了动、静态不平顺间的映射关系;何庆等^[15]分析了车体加速度对各项不平顺的权重;赵国堂^[16]通过分析路基冻胀对轨道不平顺及无砟轨道结构影响规律,提出了不同波段路基冻胀管理标准;田新宇等^[17-18]提出了70~150 m长波不平顺管理标准。

目前,针对1.5~10 m中短波段(简称10 m波段)的轨道不平顺控制尚不完善。为此,基于多条高速铁路实测数据分析,并运用车辆-轨道耦合动力学仿真,建立了10 m波段轨道动态不平顺和基于5 m中点弦测法的轨道静态不平顺管理方法。

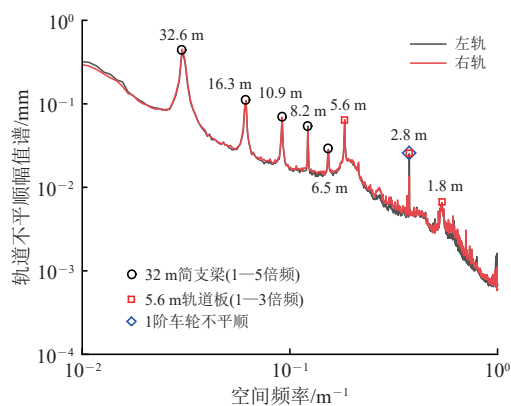
1 轨道不平顺与行车性能的关系

为探究轨道不平顺与行车性能之间的关系,基于高速综合检测列车数据,对某350 km·h⁻¹高速铁路轨道高低不平顺、轮轨垂向力、轴箱垂向加速度及车体垂向加速度进行频谱分析,结果如图1所示。

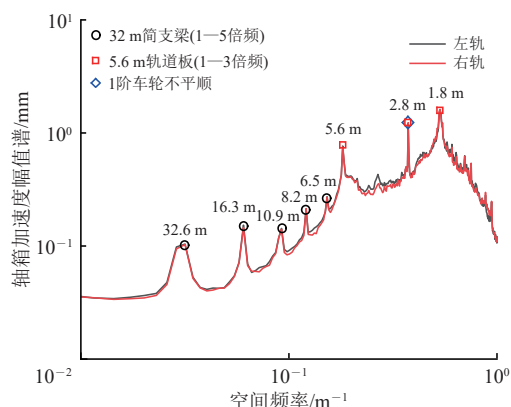
分析不同波段轨道不平顺与车辆响应间的关系,可得如下结论。

(1) 由下部基础及轨道结构变形等原因引起的周期不平顺^[17-19]与轮轨力、轴箱加速度及车体加速度周期特征存在对应关系。轨道不平顺特征波长越短,轴箱加速度及轮轨力谱峰值越大,虽然10 m以下波段周期成分幅值较小,但影响更为显著;由于车体二系悬挂系统减振作用,车体加速度响应受32 m简支梁影响更为显著,轨道板次之。

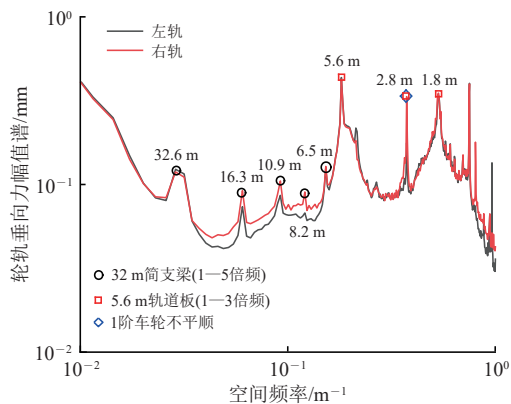
(2) 轨道不平顺随波长降低谱峰值呈降低趋势,而轮轨力和轴箱加速度响应在10 m以下短波区段幅值最大;虽10~42 m波段轨道不平顺幅值相对较大,但对轮轨力等安全性指标影响较小,对



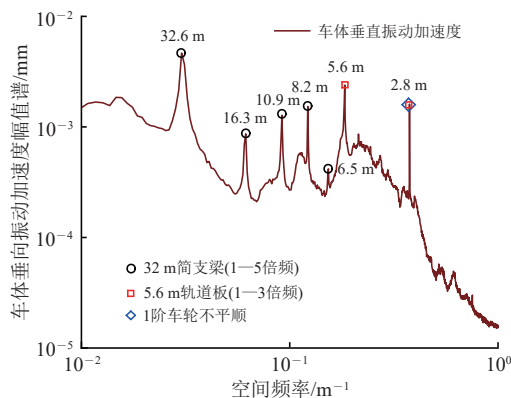
(a) 轨道谱



(b) 轴箱加速度谱



(c) 轮轨力谱



(d) 车体加速度谱

图1 轨道不平顺及车辆响功率谱

车体加速度影响较大。

现阶段1.5~42 m波段(简称42 m波段)轨道不平顺管理标准在评价轨道板上拱病害产生的不平时,可能会存在控制标准过紧或过松的问题,需建立基于行车性能的中短波段轨道不平顺管理标准。结合上述规律分析,10 m波段不平顺不仅可以包含轨道板变形引起的周期性成分,也能涵盖轮轨力和轴箱加速度较为敏感的波段,相较于42 m波段更能精确地控制对行车安全性较为敏感的轨道动态不平顺。因此,建议采用10 m波段轨道不平顺作为控制标准

对某段高速有砟轨道线路不平顺及轮轨力幅值谱进行计算,结果如图2所示。发现其规律同无砟轨道一致,亦建议采用10 m波段轨道不平顺作为控制标准。

田新宇等^[17]亦提出采用5 m中点弦测法可以较好地识别出轨道板结构病害,图3给出了某高速铁路无砟轨道简支梁桥区段高低动态不平顺和车体垂向振动加速度曲线,从图3可知,高低不平顺和

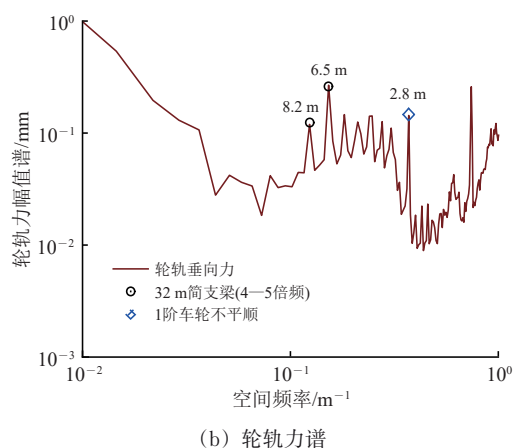


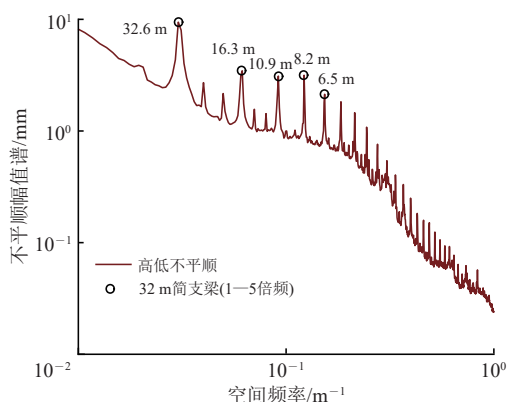
图2 有砟轨道不平顺与轮轨力之间关系

车体垂向振动加速度中均能反映简支梁桥徐变和轨道板结构病害引起的波长32和5.6 m的周期性不平顺成分,10 m波段高低不平顺能够更有针对性地识别出轨道板结构病害。

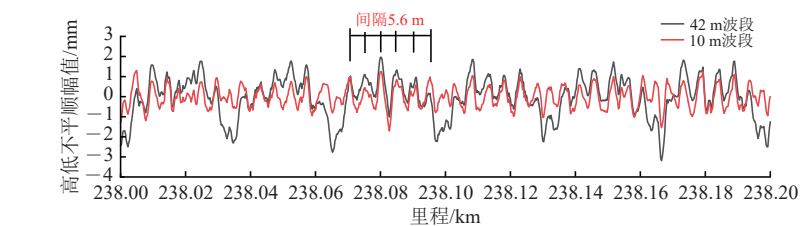
2 高速铁路10 m波段轨道动态不平顺管理标准

2.1 10和42 m波段动态不平顺幅值关系

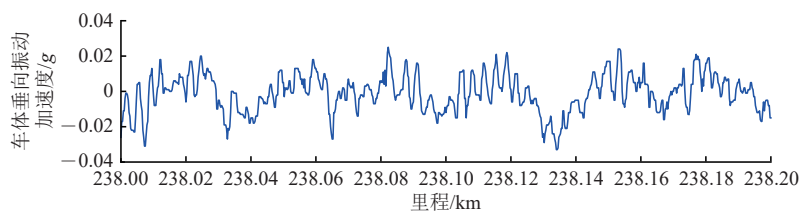
为分析10和42 m波段不平顺幅值关系,选取多条运营速度250~350 km·h⁻¹高速铁路线路的42 m波段高低、轨向动态不平顺,通过高通滤波获取10 m波段高低、轨向动态不平顺曲线^[12]。图4给出了线路A和B的10和42 m波段轨道不平顺幅值的相关关系,同时在95%置信度条件下拟合线路A的10和42 m波段不平顺幅值间的关系式。



(a) 有砟轨道谱



(a) 轨道高低不平顺



(b) 车体垂向振动加速度

图3 轨道高低不平顺及车体垂向振动加速度

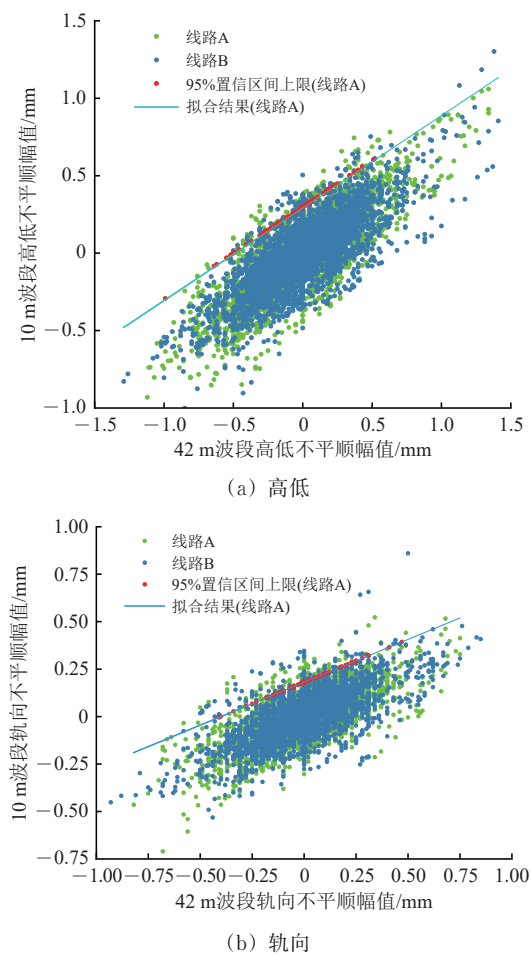


图 4 10 和 42 m 波段轨道不平顺之间相关关系

选取多条不同速度等级高铁线路（线路 A—线路 F），采用式（1）拟合得到不同线路 10 和 42 m 波段高低、轨向不平顺间的相关关系，拟合参数见表 1。由于目前 400 km·h⁻¹ 线路实测轨道不平顺数据偏少，因此其相关关系参照 350 km·h⁻¹ 速度制定。

$$y=kx+b \tag{1}$$

表 1 10 和 42 m 波段不平顺拟合公式参数取值

不平顺类型	速度等级/(km·h ⁻¹)	线路	k	b/mm
高低	250(有砟)	线路 A	0.345	0.543
		线路 B	0.311	0.589
		线路 C	0.316	0.696
		线路 D	0.447	0.597
	350(无砟)	线路 E	0.526	0.308
		线路 F	0.361	0.501
轨向	250(有砟)	线路 A	0.523	0.520
		线路 B	0.424	0.514
		线路 C	0.175	0.374
		线路 D	0.390	0.545
	350(无砟)	线路 E	0.507	0.259
		线路 F	0.420	0.418

式中： k 为拟合关系式斜率； b 为拟合关系式截距，mm； x 和 y 分别为 42 和 10 m 波段的不平顺幅值，mm。

我国对轨道平顺性的控制较为严格，选取最大斜率，列出 250 和 350 km·h⁻¹ 速度等级线路 10 和 42 m 波段的高低和轨向动态不平顺关系式，分别为

$$y_{\text{高低}}=\begin{cases} 0.447x_{\text{高低}}+0.597 & 200\leqslant v\leqslant 250 \\ 0.526x_{\text{高低}}+0.308 & 250<v\leqslant 350 \end{cases} \tag{2}$$

$$y_{\text{轨向}}=\begin{cases} 0.523x_{\text{轨向}}+0.520 & 200\leqslant v\leqslant 250 \\ 0.507x_{\text{轨向}}+0.529 & 250<v\leqslant 350 \end{cases} \tag{3}$$

式中： $y_{\text{高低}}$ 和 $y_{\text{轨向}}$ 分别为 10 m 波段高低、轨向不平顺幅值，mm； $x_{\text{高低}}$ 和 $x_{\text{轨向}}$ 分别为 42 m 波段高低、轨向不平顺幅值，mm； v 为车速，km·h⁻¹。

2.2 10 m 波段轨道动态不平顺幅值分布

为获取 10 m 波段轨道不平顺幅值分布情况，选取多条运营速度分别为 250，350 和 400 km·h⁻¹ 的线路（线路 A—线路 I），统计 10 m 波段高低、轨向幅值最大值及发生位置，同时给出幅值对应 95% 的累积分布值，详见表 2。

表 2 10 m 波段轨道动态不平顺峰值统计 mm

速度等级/ (km·h ⁻¹)	线路 名称	高低 不平顺 峰值	轨向 不平顺 峰值	95% 累积分位值	
				高低 不平顺	轨向 不平顺
250	线路 A	2.94	2.10	1.50	1.50
	线路 B	3.73	2.00	1.50	1.50
	线路 C	4.89	1.20	1.00	1.00
	线路 D	2.83	2.20	2.00	1.50
350	线路 E	3.16	1.10	1.00	1.00
	线路 F	2.96	1.60	1.00	1.00
	线路 G	3.00	1.40	1.00	1.00
	线路 H	2.20	1.50	1.00	1.00
400	线路 I	2.53	1.10	1.00	1.00

同时绘制了线路 A 和线路 B 轨道动态高低、轨向不平顺累积分布曲线，如图 5 所示。

由表 2 和图 5 可知：不同速度级线路的 10 m 波段高低、轨向不平顺峰值多位于道岔区域，道岔区域存在轨距加宽情况，因此表 2 中未包含道岔区段的轨向不平顺分布情况；250 km·h⁻¹ 线路的 10 m 波段高低、轨向不平顺峰值最大值分别在 5.0 和 4.5 mm 以下，对应 95% 的累积分布值分别在 2.0 和 1.5 mm 以下；350 km·h⁻¹ 线路 10 m 波段高低、轨向不平顺峰值最大值分别在 4.0 和 4.5 mm 以下，对应 95% 的累积分布值均在 1.0 mm 以下；400 km·h⁻¹ 线路 10 m 波段高低、轨向不平顺峰值最大值分别在 4.0 和 4.5 mm 以下，对应 95% 的累积分

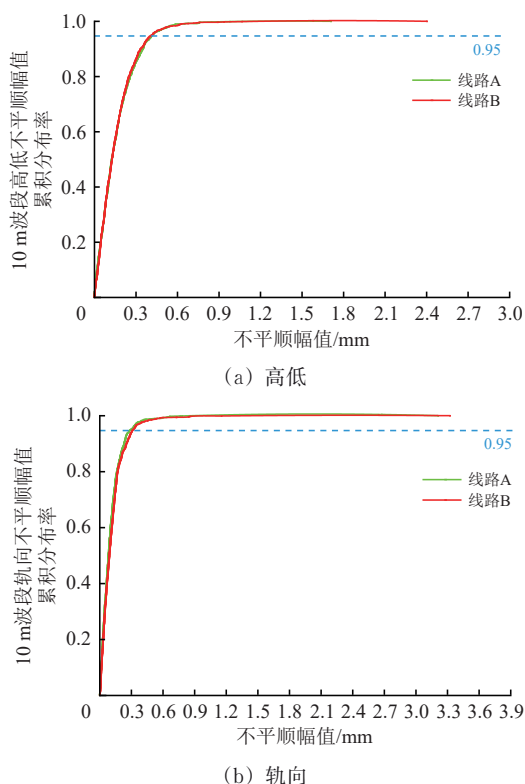


图5 10 m 波段轨道动态不平顺峰值累积分布曲线

布值均在1.0 mm 以下。

2.3 管理标准

根据高速铁路线路维修规则^[4]，结合对实测数据的统计分析和仿真计算，确定10 m波段的轨道高低、轨向动态几何不平顺容许偏差管理值。具体步骤如下。首先，基于2.1节中10 m波段和42 m波段幅值关系，参照现有42 m波段高低、轨向动态不平顺容许偏差管理限值，初步确定10 m波段不平顺管理限值。其次，基于2.2节中10 m波段轨道高低、轨向动态不平顺的统计累积分布值，确定Ⅰ级日常保持限值。然后，通过车辆-轨道耦合动力仿真，依据安全指标限值^[23-24]确定10 m波段轨道动态不平顺Ⅳ级限速限值。最后，在此基础上确定Ⅱ级计划维修、Ⅲ级临时补修对应的不平顺管理值。

2.3.1 车辆-轨道耦合动力学模型

1) 车辆模型

依据高速动车组结构参数，选取CR400AF型号动车组，车辆采用具有二系悬挂体系的多刚体模型^[20]，车辆模型如图6所示，图中参数详见表3。表3中 $i=1, 2, 3, 4$ ，代表轮对顺序，按行车方向从前往后依次排列。考虑车体、前后构架及轮对的沉浮、横移、侧滚、点头、摇头，共35个自由度。

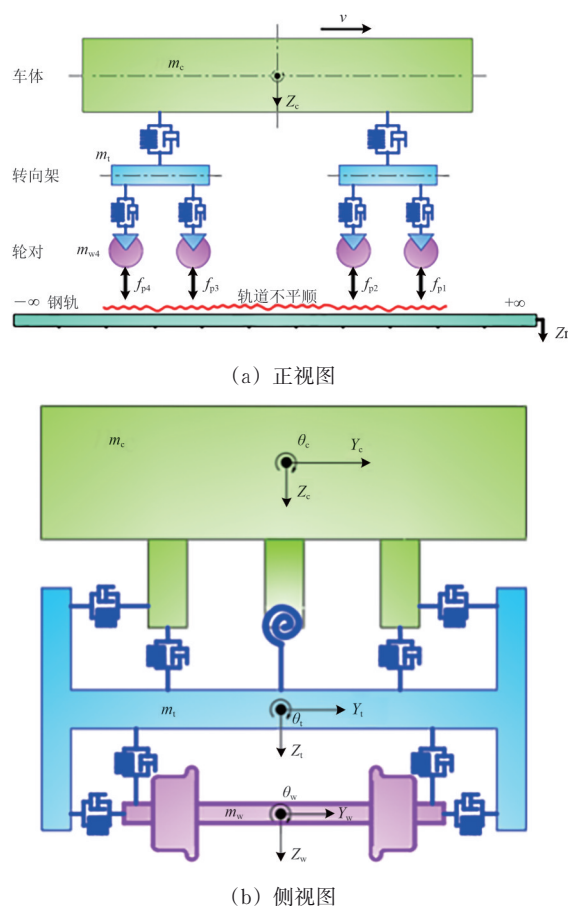


图6 车辆动力模型

表3 车辆模型中各变量的物理意义

变量	符号
车体质量	m_c
车体竖向位移	Z_c
车体横向位移	Y_c
轮对竖向位移	Y_w
第 <i>i</i> 个轮对的轮轨垂向力	f_{pi}
构架质量	m_t
构架竖向位移	Z_t
构架横向位移	Y_t
构架侧滚运动	θ_t
轮对总质量	m_w
第 <i>i</i> 个轮对质量	m_{wi}
轮对竖向位移	Z_w
轮对横向位移	Y_w
轮对侧滚运动	θ_w

2) 轨道模型

为更好地表现钢轨局部振动，采用有限元法分别建立钢轨与轨道结构模型。钢轨视为连续弹性离散点支承的Euler梁模型，以梁单元模拟。分别建立有砟和无砟轨道结构模型：有砟轨道自上而下包括钢轨、扣件、轨枕和道床，轨枕采用梁单元模

拟，道床采用三向弹簧-阻尼单元模拟；以 CRTSⅢ板式无砟轨道^[21]为例，自上而下包括钢轨、扣件、轨道板、自密实混凝土、隔离层和底座板，轨道板和底座板采用板单元模拟，轨道板与底座板之间连接横向采用固定约束，垂向采用弹性连接模拟自密实混凝土特性，采用弹簧-阻尼单元模拟扣件对钢轨约束。有砟轨道和无砟轨道扣件及有砟道床阻尼和刚度参数见表 4^[21-22]。以强迫振动理论^[22]

表 4 有砟轨道扣件和有砟道床静刚度和阻尼参数

项目	静刚度/(10 ³ kN·m ⁻¹)		阻尼/(kN·s·m ⁻¹)	
	垂向	横向	垂向	横向
有砟轨道扣件	66	80	75	60
无砟轨道扣件	25	20	75	60
有砟道床	120	78	60	80

处理钢轨系统和轨道板之间的相互作用，轨道模型如图 7 所示。

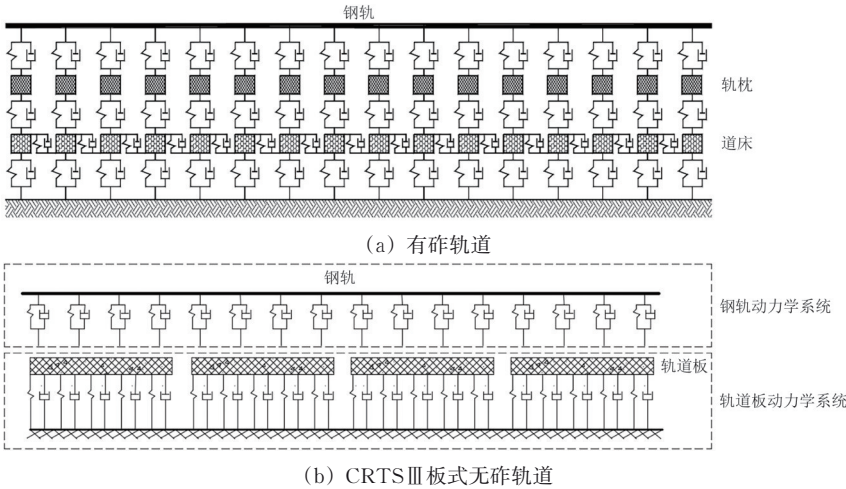


图 7 轨道结构动力学模型

3) 轮轨相互作用

轮轨法向作用采用 Hertz 非线性弹性接触理论，轮轨蠕滑力首先采用 Kalker 线性蠕滑理论求解轮轨间的纵向、横向和自旋蠕滑力，然后利用 Shen-Hedrick-Elkins 理论对轮轨间纵向和横向蠕滑力进行非线性修正^[20]。采用 Newmark-β 法对运动方程进行迭代求解，参数取值为 β=0.5，α=0.25，时间步长为 10⁻⁴ s。

4) 模型验证

选取某高速线路直线区段截止波长 42 m 的高低、轨向实测轨道不平顺作为轮轨激励输入动力仿真程序，同时考虑纵断面的影响，进行动力仿真计算，车速依据实测数据采用变速形式，速度值在 298 km·h⁻¹ 上下波动，实测轨道不平顺如图 8 所示。

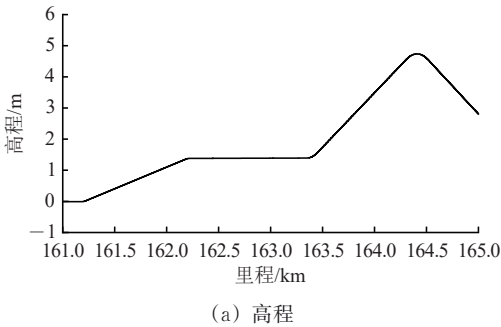
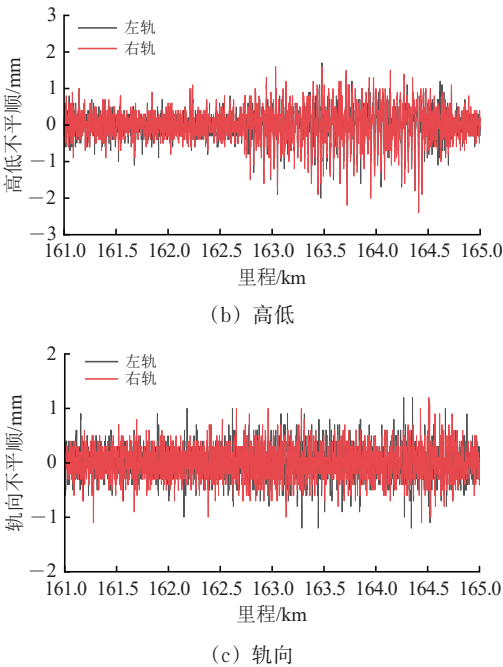


图 8 实测轨道不平顺

将车体垂向加速度和轮轨垂向力的计算结果与实测值进行对比，如图 9 和图 10 所示。仿真结果与实测结果吻合较好，表明建立的车辆-轨道耦合动力计算模型可靠。

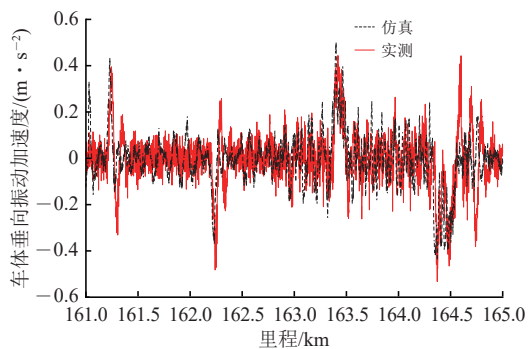
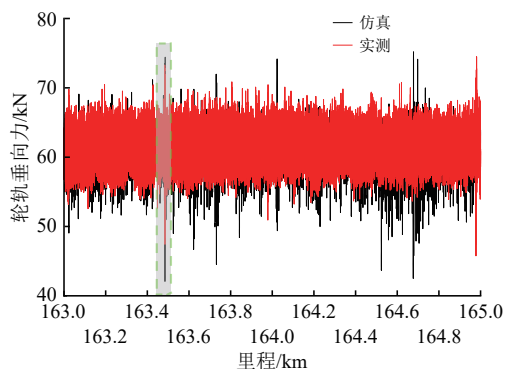
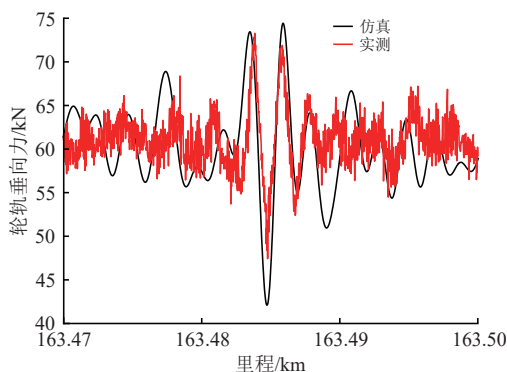


图9 仿真与实测车体垂向加速度对比



(a) 轮轨垂向力



(b) 轮轨垂向力(局部放大)

图10 仿真与实测轮轨垂向力对比

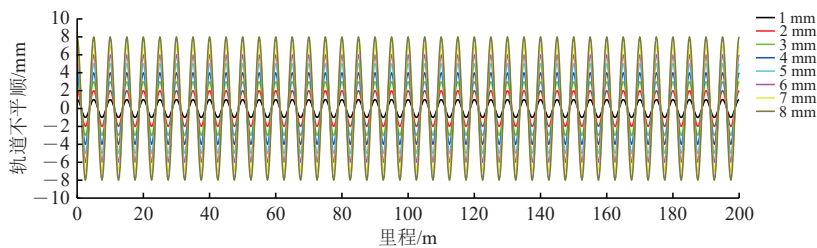


图11 轨道不平顺

不同运行速度下高低不平顺对列车振动响应的影响如图12所示。由图12可知：高低不平顺对轮轨垂向力和轮重减载率的影响较轮轨横向力和脱轨系数更为显著；随着车速和幅值增大，轮轨垂向

2.3.2 10 m波段轨道不平顺

根据2.1节给出的不同速度等级线路10和42 m波段不平顺间相关关系，参照现有42 m波段高低、轨向动态不平顺容许偏差管理限值，初步给出10 m波段高低、轨向不平顺容许偏差管理建议值，详见表5。

表5 10 m波段轨道动态质量容许偏差管理建议值 mm

速度等级/ (km·h ⁻¹)	不平顺 类型	日常保持 (Ⅰ级)	计划维修 (Ⅱ级)	临时补修 (Ⅲ级)	限速 (Ⅳ级)
200~250	高低	2.8	4.2	5.5	6.9
	轨向	3.1	4.2	4.7	5.8
250~350	高低	2.4	3.5	4.5	5.6
	轨向	2.6	3.1	3.6	4.1

根据2.2节高低、轨向动态不平顺幅值分布可知，250和350 km·h⁻¹速度级下10 m波段高低不平顺95%累积分布值分别为2.0和1.0 mm，轨向分别为1.5和1.0 mm，考虑到检测装备检测精度和现场可操作性，确定400 km·h⁻¹条件下的日常保持管理限值与350 km·h⁻¹保持一致。200~250和250（不含）~400 km·h⁻¹速度级下，高低不平顺的Ⅰ级日常保持标准分别为3.0和2.0 mm，轨向不平顺的Ⅰ级日常保持标准分别为3.0和2.0 mm。

10 m波段轨道动态不平顺的控制主要涉及高低不平顺和轨向不平顺2个项目。根据无砟轨道结构和大跨度桥梁梁端区域的变形特征，选取波长5 m、幅值为1~9 mm的连续正弦波模拟高低、轨向不平顺，如图11所示。并根据车辆-轨道耦合动力仿真及偏安全考虑，分析正弦波形式的轨道不平顺对行车性能的影响。

力、轮重减载率和车体垂向振动加速度均呈增大趋势；当轮重减载率达到限值0.8时，300，350和400 km·h⁻¹速度对应高低不平顺幅值分别为7.9，5.8和4.8 mm，对应幅值下的轮轨垂向力均不超

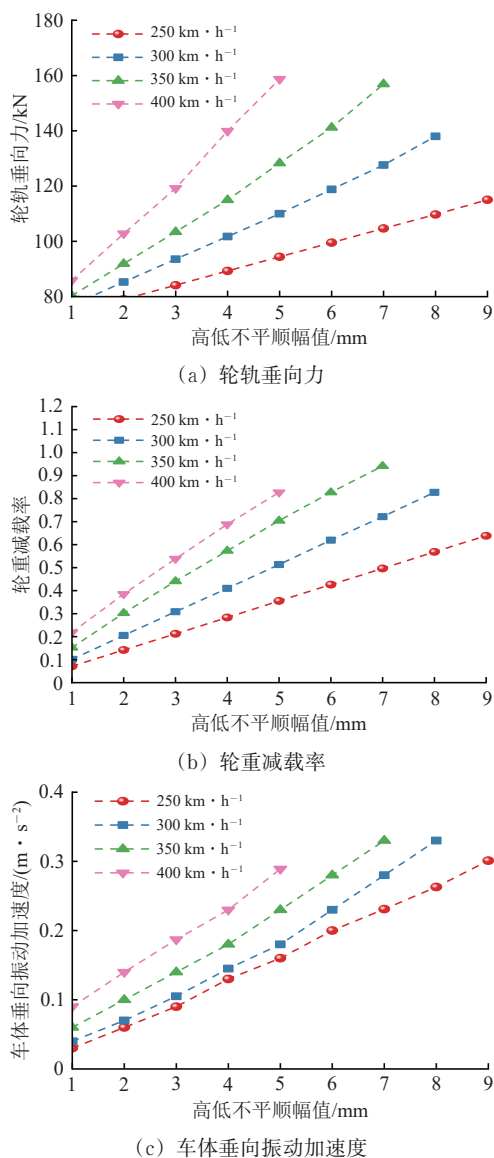


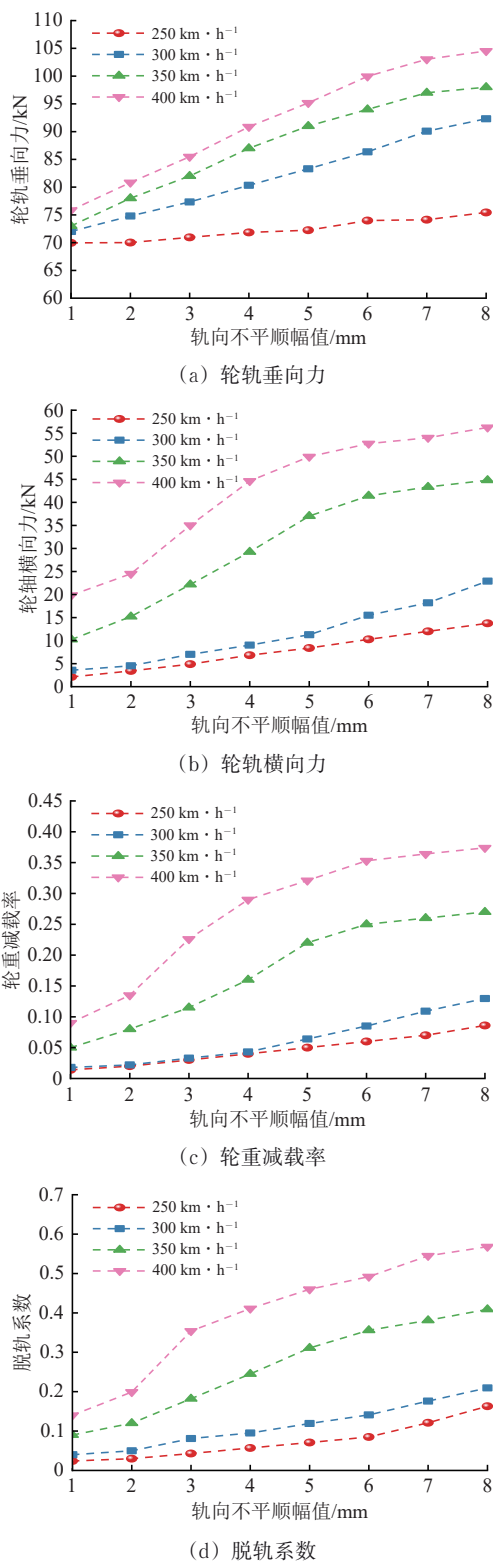
图12 不同运行速度下高低不平顺幅值对列车振动响应影响

170 kN; 当速度为 $250 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 不平顺幅值为 9 mm 时, 轮重减载率为 0.63, 轮轨垂向力为 115.03 kN, 上述幅值下, 车体垂向振动加速度均不超日常保持 (I 级) $1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

随着车速和不平顺幅值变化, 正弦波形式的轨向不平顺对轮轨垂向力、轮轨横向力、轮重减载率与脱轨系数均有一定影响, 如图 13 所示。由图 13 可知: 列车动力响应随着不平顺幅值增大和速度提高呈增长趋势, 轨向幅值较小的情况下轮轨横向力主要由轮轨蠕滑力提供, 当幅值大于 3 mm 时, 随着速度提高, 轮轨法向力在横向的分量增长迅速, 使得轮轴横向力和车体横向振动加速度增长较快, 在垂向产生的分力呈非线性增长趋势。400 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 速度下, 当不平顺幅值为 6 mm 时, 轮轴横向力达

到 52.75 kN, 刚好超过 52.49 kN 的限值。其余计算结果均不超过标准规定限值。

通过对实测数据统计和仿真计算结果的对比, 并综合考虑现场轨道不平顺实际情况, 给出不同速度等级下 10 m 波段轨道高低、轨向动态不平顺容许偏差管理建议值, 详见表 6。



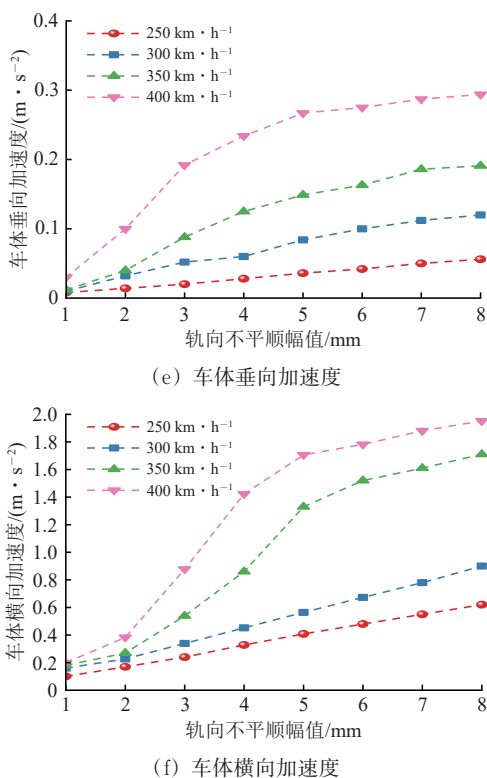


图13 不同运行速度下轨向不平顺幅值对列车振动响应影响

表6 10 m波段轨道动态几何不平顺容许偏差管理建议值

		mm			
速度等级/ (km · h ⁻¹)	不平顺 类型	日常保持 (Ⅰ级)	计划维修 (Ⅱ级)	临时补修 (Ⅲ级)	限速 (Ⅳ级)
200~250	高低	3	4	6	7
	轨向	3	4	5	6
250 (不含)~ 350	高低	2	3	5	6
	轨向	2	3	4	5
350 (不含)~ 400	高低	2	3	4	5
	轨向	2	3	4	5

3 基于5 m弦测法的高速铁路轨道静态不平顺管理标准

首先,构建5 m弦测值与10 m波段轨道动态不平顺的关系,参照10 m波段轨道动态不平顺管理标准,兼顾轨道动、静态不平顺之间的差异,并借鉴轨道静态不平顺10 m弦标准^[4],进一步提出基于5 m中点弦测法的轨道高低、轨向静态不平顺容许偏差管理标准建议值。

3.1 5 m弦测值与10 m波段轨道不平顺关系

3.1.1 中点弦测法

弦测法以固定弦长 $2L$ 为测量基准,采用等间

隔采样,得到各个采样点弦测值^[14]。以3点弦测为例(图14),假设轨道共有 N 个采样点,第 t 个采样点的真实不平顺为 h_t ,弦测系统测量值为 y_t ,采样点前后 $1/2$ 弦长处的真实不平顺分别为 $h_{t,-L}$ 和 $h_{t,+L}$,则 y_t 计算表达式为

$$y_t = h_t - \frac{1}{2}(h_{t,-L} + h_{t,+L}) \quad (4)$$

式中: y_t 为第 t 点处轨道不平顺在弦测长度为 $2L$ 的弦测值; h_t , $h_{t,-L}$, $h_{t,+L}$ 分别为采样点 t 及前后 $1/2$ 弦长处的真实不平顺。

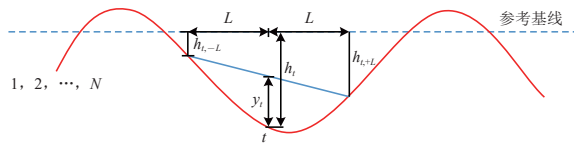


图14 中点弦测法

采用中点弦测法计算轨道不平顺,弦测值结果与测弦长度 $2L$ 有关。对式(4)作傅里叶变换,得到弦测法传递函数 $H(\omega)$ 的表达式为

$$H(\omega) = 1 - \frac{(e^{-j\omega p} + e^{j\omega p})}{2} = 1 - \cos(\omega p) \quad (5)$$

其中,

$$\omega = 2\pi\lambda^{-1}$$

式中: j 为虚数单位; ω 为空间角频率, $\text{rad} \cdot \text{m}^{-1}$; λ 为轨道不平顺波长, m ; p 为测弦长度, m 。

由式(5)可知,弦测法传递函数受测弦长度 p 和轨道不平顺波长 λ 影响。图15给出了不同波长轨道不平顺在3~10 m测弦下的幅值增益,5 m测弦长度对应有效测量波长范围为3.33~10 m。

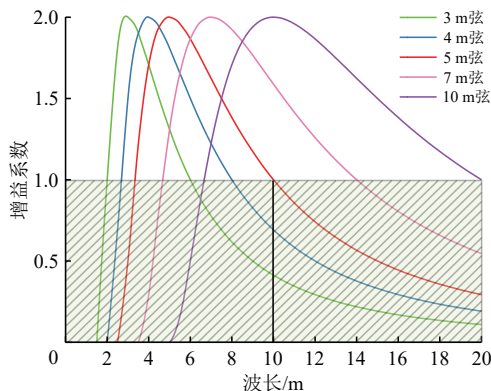


图15 不同波长轨道不平顺与不同弦长间的增益系数

图16给出了图3高低不平顺的5和10 m中点弦测值。由图16可知,5 m弦较10 m弦在识别轨道板上拱变形方面效果更优,同时与10 m波段不平顺趋势一致,且对幅值有放大效应,可以更好地

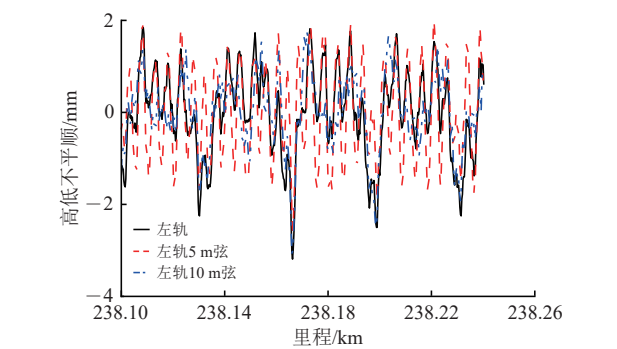


图 16 高低不平顺及弦测值

发现病害。

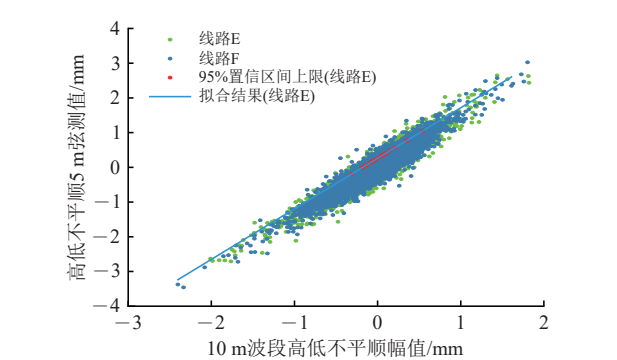
3.1.2 相关关系

计算 2.2 节中运营速度达 250, 350 和 400 km · h⁻¹ 线路的 10 m 波段不平顺和 5 m 弦测值, 按式 (1) 计算不同线路轨道不平顺 5 m 弦测值和 10 m 波段高低、轨向不平顺相关关系, 拟合参数详见表 7。

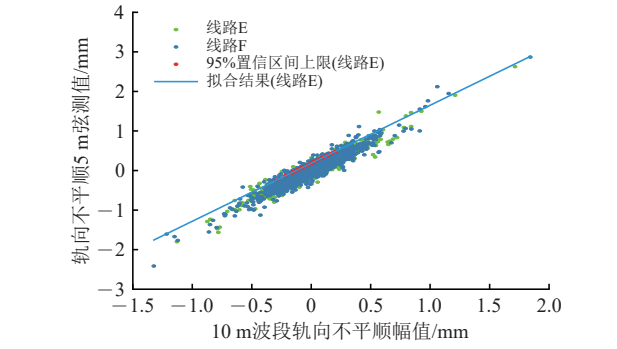
表 7 高低、轨向不平顺拟合参数

不平顺类型	速度等级/(km · h ⁻¹)	线路	<i>k</i>	<i>b</i>
高低	250	线路 A	1.540	0.277
		线路 B	1.550	0.233
		线路 C	1.510	0.225
		线路 D	1.600	0.265
	350	线路 E	1.476	0.196
		线路 F	1.467	0.182
		线路 G	1.490	0.167
		线路 H	1.542	0.231
	400	线路 I	1.401	0.204
		线路 A	1.492	0.259
轨向	250	线路 B	1.511	0.240
		线路 C	1.485	0.217
		线路 D	1.497	0.255
		线路 E	1.469	0.214
	350	线路 F	1.413	0.170
		线路 G	1.477	0.160
		线路 H	1.473	0.164
		线路 I	1.467	0.224
	400	线路 I	1.467	0.224
		线路 I	1.467	0.224

图 17 给出了线路 E 和 F 2 组 350 km · h⁻¹ 高铁轨道不平顺 5 m 弦测值和 10 m 波段不平顺的相关关系, 同时在 95% 置信度条件下拟合线路 E 不平



(a) 高低



(b) 轨向

图 17 5 m 弦测值和 10 m 波段不平顺相关关系

顺中 5 m 弦测值与 10 m 波段幅值间的关系式。偏安全考虑, 在式 (6) 和式 (7) 中分别给出了设计速度为 250 和 350 km · h⁻¹ 线路的 5 m 弦测值与 10 m 波段不平顺幅值间的相关关系式, 由于运营速度达 400 km · h⁻¹ 线路轨道实测不平顺偏少, 因此该速度级下线路 5 m 弦测值与 10 m 波段轨道不平顺幅值间的相关关系参考线路 E—线路 I 的统计结果。

$$w_{\text{高低}} = \begin{cases} 1.510u_{\text{高低}} + 0.225 & 200 \leq v \leq 250 \\ 1.467u_{\text{高低}} + 0.167 & 250 < v \leq 350 \end{cases} \quad (6)$$

$$w_{\text{轨向}} = \begin{cases} 1.485u_{\text{轨向}} + 0.217 & 200 \leq v \leq 250 \\ 1.413u_{\text{轨向}} + 0.160 & 250 < v \leq 350 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $w_{\text{高低}}$ 和 $w_{\text{轨向}}$ 分别为高低、轨向不平顺 5 m 弦测幅值, mm; $u_{\text{高低}}$ 和 $u_{\text{轨向}}$ 分别为 10 m 波段高低、轨向不平顺幅值, mm。

3.2 管理标准

根据 5 m 弦测值与 10 m 波段高低、轨向不平顺幅值间的关联关系, 同时综合考虑轨道动、静态不平顺之间的差异, 并借鉴现行轨道静态不平顺 10 m 弦管理标准^[4], 给出了不同速度级下基于 5 m 短弦的轨道静态几何不平顺容许偏差管理建议值, 该建议值与 10 m 波段轨道动态不平顺容许偏差管理建议值一致, 详见表 8。

表8 5 m弦轨道静态几何不平顺容许偏差管理建议值

速度等级/(km·h ⁻¹)	不平顺项目	作业验收	计划维修	临时补修	mm
					限速
200~250	高低	3	4	6	7
	轨向	3	4	5	6
250(不含)~350	高低	2	3	5	6
	轨向	2	3	4	5
350(不含)~400	高低	2	3	4	5
	轨向	2	3	4	5

4 结 论

本文基于实测轨道不平顺数据统计分析与车辆-轨道动力耦合仿真,给出了中短波段轨道动、静态不平顺容许偏差管理建议值。主要结论如下。

(1) 轨道不平顺波长越短,对轮轨力和轴箱加速度的影响越大,尤其当波长小于10 m时,对轮轨力的影响更为明显,由此提出了1.5~10 m波段轨道动态不平顺和5 m弦测值的轨道静态不平顺控制指标。

(2) 通过对实测数据统计分析和仿真计算,给出了不同速度级1.5~10 m波段高低、轨向动态

不平顺的日常保持、计划维修、临时补修和限速管理建议值,即运营速度为200~250 km·h⁻¹的线路,高低动态不平顺管理建议值分别为3,4,6和7 mm,轨向分别为3,4,5和6 mm,运营速度为250(不含)~350 km·h⁻¹的线路,高低动态不平顺管理建议值分别为2,3,5和6 mm,轨向分别为2,3,4和5 mm,运营速度为350(不含)~400 km·h⁻¹的线路,高低动态不平顺管理建议值分别为2,3,4和5 mm,轨向管理建议值同运营速度为250(不含)~350 km·h⁻¹的线路。

(3) 考虑静、动态不平顺间的差异,提出了基于5 m短弦的轨道静态几何不平顺作业验收、计划维修、临时补修和限速管理建议值,即运营速度为200~250 km·h⁻¹的线路,高低静态不平顺管理建议值分别为3,4,6和7 mm,轨向分别为3,4,5和6 mm,运营速度为250(不含)~350 km·h⁻¹的线路,高低静态不平顺管理建议值分别为2,3,5和6 mm,轨向分别为2,3,4和5 mm,运营速度为350(不含)~400 km·h⁻¹的线路,高低静态不平顺管理建议值分别为2,3,4和5 mm,轨向管理建议值同运营速度为250(不含)~350 km·h⁻¹的线路。

参 考 文 献

- [1] 中国国家铁路集团有限公司. 中国国家铁路集团有限公司工作会议在京召开[EB/OL]. (2026-01-04)[2026-06-13]. https://mp.weixin.qq.com/s/_now4s5wDiRMZOy1ti65zw.
China State Railway Group Co., Ltd. The work conference of China State Railway Group Co., Ltd. held in Beijing[EB/OL]. (2026-01-04)[2026-06-13]. https://mp.weixin.qq.com/s/_now4s5wDiRMZOy1ti65zw.
- [2] 许玉德,曾学贵. 高速铁路轨道的安全管理[J]. 中国安全科学学报, 2003, 13(1): 42-44.
Xu Yude, Zeng Xuegui. Safety management of express railway track[J]. China Safety Science Journal, 2003, 13(1): 42-44.
- [3] Zhang Jinfeng, Zhu Dengyuan, Huo Fei. Dynamic performance analysis of train-track-bridge interactions considering full probability of track random irregularities[J]. Archive of Applied Mechanics, 2025, 95(4): 95.
- [4] TG/GW 115—2023 高速铁路线路维修规则[S].
TG/GW 115—2023 High-speed railway track maintenance regulations[S].
- [5] 田国英,高建敏,翟婉明. 高速铁路轨道不平顺管理标准的对比分析[J]. 铁道学报, 2015, 37(3): 64-71.
Tian Guoying, Gao Jianmin, Zhai Wanming. Comparative analysis of track irregularity management standards for high-speed railways[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(3): 64-71.
- [6] 牛留斌,刘金朝. 基于高频轮轨接触模型的轨道短波不平顺敏感波长特性分析[J]. 机械工程学报, 2019, 55(8): 173-182.
Niu Liubin, Liu Jinzhao. Study on sensitive wavelength characteristics of track short wave irregularity based on high-frequency wheel/rail contact model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(8): 173-182.
- [7] 陈亮,孙加林,李浩,等. 400 km·h⁻¹高速铁路车辆振动响应频域特性及与轨道不平顺波长的关系[J]. 中国铁道科学, 2025, 46(1): 157-166.
Chen Liang, Sun Jialin, Li Hao, et al. Frequency domain characteristics of vehicle vibration responses of high-speed railway

- at $400 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ and its relationship with track irregularity wavelength[J]. China Railway Science, 2025, 46(1): 157-166.
- [8] 牛留斌. 高速铁路轮轨垂向力与轨道高低不平顺关联特性[J]. 中国铁道科学, 2021, 42(5): 50-60.
Niu Liubin. Correlation characteristics between vertical wheel/rail vertical force and track profile irregularity in high-speed railway[J]. China Railway Science, 2021, 42(5): 50-60.
- [9] Karis T, Berg M, Stichel S. Analysing the correlation between vehicle responses and track irregularities using dynamic simulations and measurements[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2020, 234(2): 170-182.
- [10] Karis T, Berg M, Stichel S, et al. Correlation of track irregularities and vehicle responses based on measured data[J]. Vehicle System Dynamics, 2018, 56(6): 967-981.
- [11] Xin Tao, Wang Pengsong, Ding Yu. Effect of long-wavelength track irregularities on vehicle dynamic responses[J]. Shock and Vibration, 2019, 2019(1): 4178065.
- [12] Xin Lifeng, Xu Lei, Zhang Jiaxin, et al. Research on characterization methods for track irregularities[J]. Railway Engineering Science, 2026, 34: 25-39.
- [13] 杨飞, 孙宪夫, 谭社会, 等. 动静态轨道不平顺评价差异及动态弦测法特性[J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(6): 1239-1249.
Yang Fei, Sun Xianfu, Tan Shehui, et al. Evaluation difference of dynamic and static track irregularity and characteristics of dynamic chord measurement method[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2022, 57(6): 1239-1249.
- [14] 杨飞, 刘丙强, 谭社会, 等. 高速铁路轨道静态几何不平顺弦测评价标准体系研究[J]. 铁道建筑, 2021, 61(6): 107-111, 120.
Yang Fei, Liu Bingqiang, Tan Shehui, et al. Research on evaluation standard system of chord measurement for track static geometric irregularity of high-speed railway[J]. Railway Engineering, 2021, 61(6): 107-111, 120.
- [15] 何庆, 汪健辉, 李晨钟, 等. 关联车体响应的轨道不平顺各项指标相对权重分析[J]. 北京交通大学学报, 2022, 46(3): 80-87.
He Qing, Wang Jianhui, Li Chenzhong, et al. Relative weights analysis of track irregularity indexes associated with vehicle body response[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2022, 46(3): 80-87.
- [16] 赵国堂. 严寒地区高速铁路无砟轨道路基冻胀管理标准的研究[J]. 铁道学报, 2016, 38(3): 1-8.
Zhao Guotang. Study on management standard of frost heaving of ballastless track subgrade on high-speed railway in severe cold regions[J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(3): 1-8.
- [17] 田新宇, 高亮, 杨飞, 等. 基于动态短弦的无砟轨道板周期性不平顺管理标准[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(6): 30-38.
Tian Xinyu, Gao Liang, Yang Fei, et al. Management standard for cyclic irregularity of ballastless track slab based on dynamic short chord[J]. China Railway Science, 2020, 41(6): 30-38.
- [18] 田新宇, 高亮, 杨飞, 等. 无砟轨道长波高低不平顺管理标准的研究[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(3): 26-30, 68.
Tian Xinyu, Gao Liang, Yang Fei, et al. Research on the long-wave longitudinal level irregularity standards of ballastless track[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(3): 26-30, 68.
- [19] Lei Simian, Ge Yaojun, Li Qi. Effect and its mechanism of spatial coherence of track irregularity on dynamic responses of railway vehicles[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 145: 106957.
- [20] 高芒芒, 李国龙, 杨飞, 等. 基于强迫振动的列车-轨道-轨下结构垂向耦合动力分析方法及工程应用[J]. 中国铁道科学, 2021, 42(2): 50-58.
Gao Mangmang, Li Guolong, Yang Fei, et al. Vertical coupling dynamic analysis method and engineering application of vehicle-track-substructure based on forced vibration[J]. China Railway Science, 2021, 42(2): 50-58.
- [21] 孙璐, 段雨芬, 杨薪. 高速铁路CRTS III型板式无砟轨道结构受力特性研究[J]. 铁道工程学报, 2013, 30(11): 32-39.
Sun Lu, Duan Yufen, Yang Xin. Static response analysis of CRTS III ballastless track structure[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2013, 30(11): 32-39.
- [22] 李国龙. 高速铁路车辆-轨道垂向耦合相互作用优化研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2018.
LI Guolong. Optimization research on vertical coupled interaction between vehicles and tracks of high-speed railways[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2018.
- [23] TB 10761—2013 高速铁路工程动态验收技术规范[S].
TB 10761—2013 Technical regulations for dynamic acceptance of high-speed railways construction[S].
- [24] EN 13848-5: 2017 Railway Applications—Track Geometry Quality—Part 5: Geometric Quality Levels—Plain Line, Witches and Crossings[S].

Control standards for track geometry irregularity in the 1.5–10 m wavelength band of high-speed railways

Li Guolong, Yang Fei, Yin Feng, Pang Zhiqiang, Wei Zilong,
Diao Hongbao, Qiang Weile

(Infrastructure Inspection Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China)

Abstract: To strengthen the control of track geometry irregularity in the intermediate wavelength band during the operation period of high-speed railway, improve the full-cycle management system for track smoothness, and clarify the coupling relationship between track irregularity excitation and vehicle dynamic response, a management method for track irregularity within the 1.5–10 m band is proposed based on running safety. Based on statistical analysis of field measurements and vehicle-track coupling dynamic simulation, the recommended management values for allowable deviation of track dynamic geometric irregularity in the 1.5–10 m range are provided for different speed levels. Additionally, to facilitate on-site maintenance and repair work, considering the transfer functions between chord lengths and wavelengths as well as the difference between static and dynamic track irregularity, recommended allowable deviation values for track static geometric irregularity using the 5 m mid-chord measurement method are also presented. The results show that: for railway lines operating at 200–250 km · h⁻¹, the recommended values for dynamic longitudinal level irregularity are 3, 4, 6 and 7 mm, respectively, and for alignment are 3, 4, 5 and 6 mm; for railway lines operating at 250 (exclusive)–350 km · h⁻¹, the values are 2, 3, 5 and 6 mm for longitudinal level and 2, 3, 4 and 5 mm for alignment; for railway lines operating at 350 (exclusive)–400 km · h⁻¹, the values are 2, 3, 4, and 5 mm for longitudinal level, with alignment values matching those for 250 (exclusive)–350 km · h⁻¹ railway lines. For static geometric track irregularities measured using the 5 m short chord method, the recommended values for routine maintenance, scheduled maintenance, temporary repairs, and speed restriction management are: for 200–250 km · h⁻¹ railway lines, 3, 4, 6 and 7 mm for static longitudinal level irregularity and 3, 4, 5, and 6 mm for alignment; for 250 (exclusive)–350 km · h⁻¹ railway lines, 2, 3, 5 and 6 mm for longitudinal level and 2, 3, 4 and 5 mm for alignment; for 350 (exclusive)–400 km · h⁻¹ railway lines, 2, 3, 4 and 5 mm for longitudinal level, with alignment values identical to those for 250 (exclusive)–350 km · h⁻¹ railway lines.

Key words: High-speed railway; Static and dynamic track geometric irregularity; Management recommendation value; Vehicle-track coupling dynamic simulation analysis; Mid-point chord measurement method

(责任编辑 王蕴嘉)