文章编号:1673-0291(2026)03-0186-11 **DOI**:10.11860/j.issn.1673-0291.20250137

不同速度等级运营高铁轨道不平顺谱特征分析

李承奥[1],李再帏[1],陈 鼎[2],洪 剑[3]

(1.上海工程技术大学 城市轨道交通学院,上海 201620;2.长沙市水利水电勘测设计院有限公司,长沙 410017;
3.中国铁路上海局集团有限公司 工务部,上海 200071)

摘 要:针对不同速度下轨道谱的不平顺特征进行分析,提出一种结合轨道不平顺分位数谱和轨道质量指数(Track Quality Index,TQI)共同评判轨道质量的方法.首先,基于中国华东地区4条高铁线路的轨道不平顺实测数据,使用改进Welch方法计算不平顺功率谱密度,分析了200、250、300、350 km/h不同速度下轨道不平顺的功率谱结构特征;通过与国内外经典谱进行比较,讨论不同速度等级谱结构的差异性.其次,利用中国规范标准谱公式对4种速度的轨道不平顺数据进行拟合,讨论拟合谱参数对现行标准谱参数的适应性.最后,分析了不同单项标准差与轨道分位数谱之间的关系,通过计算各级轨道分位数谱面积,确定轨道分位数谱与TQI的关系.研究结果表明:各速度等级轨道谱变化趋势与现行规范标准谱相同,但谱参数具有一定的差异性,高低不平顺在波长10 m以上,轨向不平顺在波长22 m以上,谱线相较标准谱明显升高,谱参数也发生较大改变,说明高铁在运营多年后,标准谱参数需要进行相应修订和完善;将分位数谱划分为0~30%、30%~70%、70%~90%、90%~100% 4个区间,分别对应优秀、良好、一般、预警的轨道状态,根据线路实际情况构建合理分位数谱并结合TQI共同进行高铁轨道质量管理.

关键词:铁道工程;高速铁路;轨道不平顺;不同速度;分位数谱;轨道质量指数

中图分类号:U213.2 **文献标志码**:A

Analysis of track irregularity spectrum characteristics for high-speed railways at different speed grades

LI Cheng'ao[1], *LI Zaiwei*[1], *CHEN Ding*[2], *HONG Jian*[3]

(1.School of Urban Rail Transit, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;
2.Changsha Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Institute Co., Ltd., Changsha 410017, China;3.
Engineering Department of China Railway Shanghai Bureau Group Co., Ltd., Shanghai 200071, China)

Abstract: To address the irregularity characteristics of track spectra at different speeds, this study proposes a method for comprehensively evaluating track quality by combining the track irregularity quantile spectrum with the Track Quality Index (TQI). First, based on measured track irregularity data from four high-speed railway lines in East China, the improved Welch method is employed to calculate the power spectral density of track irregularities. The structural characteristics of the track irregu-

收稿日期:2025-09-08;**修回日期**:2025-11-24

基金项目:国家自然科学基金(52472450);上海市教育委员会科研项目(2024AI007)

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (52472450); Research Project of Shanghai Municipal Education Commission (2024AI007)

第一作者:李承奥(2001—),男,安徽淮南人,硕士生.研究方向为交通工程结构维护保障技术.**email**:76421695@qq.com.

通信作者:陈鼎,(1984—),男,湖南长沙人,高级工程师,硕士.**email**:68197193@qq.com.

引用格式:李承奥,李再帏,陈鼎,等.不同速度等级运营高铁轨道不平顺谱特征分析[J].北京交通大学学报,2026,50(3):186-196.
LI Cheng'ao, LI Zaiwei, CHEN Ding, et al.Analysis of track irregularity spectrum characteristics for high-speed railways at different speed grades[J].Journal of Beijing Jiaotong University,2026,50(3):186-196.(in Chinese)

larity power spectra at speeds of 200, 250, 300, and 350 km/h are then analyzed. By comparing these with classic domestic and international reference spectra, the structural differences across various speed grades are discussed. Second, the Chinese standard spectrum formula is used to fit the track irregularity data at the four speeds, and the adaptability of the fitted spectral parameters to the current standard spectral parameters is evaluated. Finally, the relationship between different individual standard deviations and the track quantile spectra is analyzed. By calculating the areas of the track quantile spectra at each level, the correlation between the track quantile spectra and the TQI is established. The results indicate that the variation trends of the track spectra at all speed levels are consistent with the current normative standard spectra; however, the spectral parameters exhibit certain discrepancies. Specifically, for vertical irregularities at wavelengths above 10 m and alignment irregularities at wavelengths above 22 m, the spectral lines are significantly elevated compared to the standard spectra, accompanied by substantial changes in the spectral parameters. This suggests that after years of high-speed railway operation, the standard spectral parameters require corresponding revision and refinement. The percentile spectra are divided into four intervals: 0-30%, 30%-70%, 70%-90%, and 90%-100%, corresponding to excellent, good, fair, and warning track conditions, respectively. Based on actual line conditions, reasonable quantile spectra can be constructed and combined with the TQI to facilitate the comprehensive quality management of high-speed railway tracks.

Keywords: railway engineering; high-speed railway; track irregularity; different speeds; quantile spectrum; track quality index

轨道不平顺谱通常被认为是轨道不平顺状态最有效的表达形式[1],是由海量轨检实测数据累积获得,反映了线路的随机特性和周期性成分.国内外铁路管理部门除采用峰值管理和均值管理外,还采用轨道谱等方法进行线路服役状态的补充管理[2].我国先后发布了长沙铁道学院谱[3]、中国三大干线谱[4]、中国高速铁路无砟轨道不平顺谱[5]和有砟轨道不平顺谱[6]等一系列典型的轨道谱作为铁路线路管理标准.

我国高铁轨道标准谱采用轨道最初开通时获取的数据进行轨道不平顺谱参数计算,但由于长时间的运营,线路轨道结构处于累计伤损的状态,许多学者对现行高铁轨道谱进行了相应的完善和讨论.文献[7]通过对比分析各类型不同波段无砟轨道几何状态,构建不同轨下基础轨道谱.文献[8]以大量轨检数据为基础,统计分析高速铁路不同轨下基础轨道周期不平顺特征,提出了轨道谱的周期成分表征及量化评价方法.文献[9]运用数学模型和统计方法提出了3种轨道不平顺模型,表征不同条件下轨道不平顺.文献[10]基于多项式拟合的思路,提出了0.01~120 m波段的拟合公式,表征了轨道不平顺功率谱密度的宽带波长特性.文献[11]分析了不同线路和不同轨下结构功率谱密度随时间的变化趋势.文献[12]基于多项式建立了某高铁高低不平顺谱拟合模型,并提出不同等级的轨道质量评价方法.亦有部分学者探讨了如何更好地使用轨道谱进行轨道质量管理,对我国高速铁路轨道谱进行了统计与对比分析[13-15].文献[16]建立了融合轨道谱和轨道质量质数(Track Quality Index,TQI)指标物理特性的铁路轨道不平顺时-频能量联合分析方法.文献[17]对青藏铁路的轨道不平顺谱进行分析,结合广义极值分布函数的参数估计值,提出由轨道不平顺统计平均值谱向任意百分位谱转换的方法.文献[18]基于分位数回归对轨道质量指数阈值进行了分析,给出了基于分位数的管理建议值.文献[19]通过大量谱线分析,提出了高速铁路线路平顺状态演变趋势及结构劣化规律.

由于我国的轨道标准谱参数源于高铁线路刚开通时期的轨道检测数据,其能否适用于运营多年后的高铁轨道状态尚未可知.已有诸多学者进行了修正和完善,但对于如何使用轨道不平顺谱直接进行管理尚有不足,有关如何加强轨道不平顺谱的应用,与轨道质量评估建立更为密切的联系仍需要进一步讨论.对不同运营速度条件下轨道不平顺谱结构特征进行分析,讨论高速铁路轨道标准谱对既有运营高铁轨道线路的适用性.采用轨道标准谱拟合模型,利用Levenberg-Marquardt算法对不同速度等级线路进行拟合,得到相应的谱参数变化特征.分析4种速度等级轨道不平顺不同分位数谱谱下面积与TQI之间的关系,划分相应的分位数谱质量管理区

间，建议结合线路实际情况构建合理分位数谱并结合TQI共同进行轨道质量管理，为高铁运营轨道养护维修决策提供新思路.

1 样本来源与轨道标准谱

1.1 轨道不平顺数据

检测数据来源于我国华东地区2024年至2025年4条运营高铁线路实测数据，使用中国国家铁路集团有限公司高速综合检测车检测数据，主要为轨道不平顺数据，采样频率为0.25 m/点.样本数据基本情况如表1所示，其中200 km/h与250 km/h线路均为有砟轨道，300 km/h与350 km/h线路分别为Ⅰ型板式无砟轨道和Ⅱ型板式无砟轨道.

表1 不同速度线路基本情况

Tab.1 Basic parameters of railway lines at different speed grades

线路类别	运营时间/年	轨道结构形式	运营速度/(km/h)	线路长度/km
线路Ⅰ	5	有砟轨道	200	145
线路Ⅱ	8	有砟轨道	250	30
线路Ⅲ	15	Ⅰ型板式无砟轨道	300	301
线路Ⅳ	14	Ⅱ型板式无砟轨道	350	272

在轨道不平顺数据分析中，数据预处理是确保分析准确性和可靠性的关键环节.常见的预处理方法包括异常值剔除和趋势项去除.针对异常值和趋势项的去除，参考文献[20]的方法进行相关轨道不平顺检测数据的预处理，典型计算结果如图1所示.

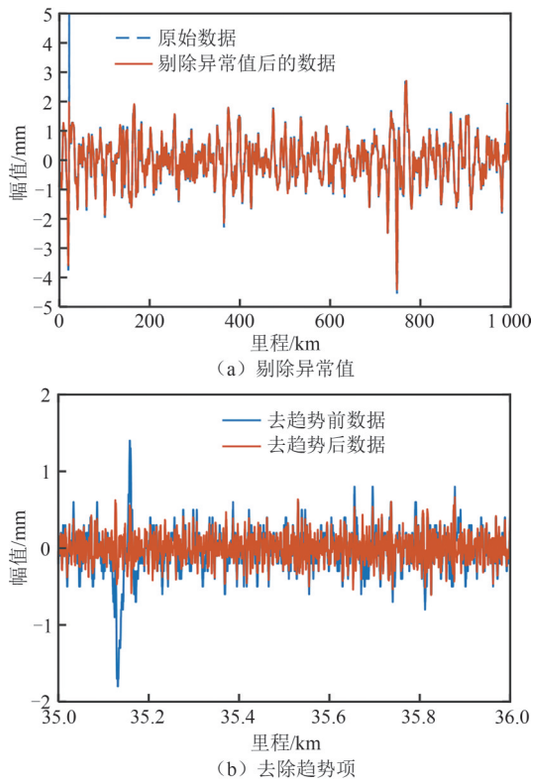


图1 数据预处理

Fig.1 Data pre-processing

1.2 国内外轨道标准谱分析

将国内外目前使用较多的美国六级谱、德国高低干扰谱、中国7参数轨道谱、中国高速铁路无砟及有砟轨道标准谱进行比较，由于高低和轨向不平顺是列车垂向及横向振动的主要激扰源，故仅给出了高低与轨向不平顺的表达式，见表2.

由表2可知：①美国六级谱是针对美国有砟普速线路制定的，不同轨道不平顺类型采用了不同公式，公式相对简洁，可通过简单的参数和频率来描述轨道不平顺的状态.②德国高低干扰谱与美国六级

表2 轨道标准谱对比

Tab.2 Comparison of standard track spectra

轨道不平顺谱	时间	速度等级	参数及有效波长范围	不平顺类型	表达式
美国六级谱	1983年	美国1～6级线路（176 km/h以下）	4个计算参数；波长范围：高低不平顺：0.06～304.8 m；轨向不平顺：0.3～304.8 m	高低	$S(\Omega)=\frac{kA_1\Omega_0^2}{\Omega^2(\Omega^2+\Omega_0^2)}$
				轨向	$S(\Omega)=\frac{kA_2\Omega_0^2}{\Omega^2(\Omega^2+\Omega_0^2)}$
德国高低干扰谱	1987年	低干扰谱250 km/h以上、高干扰谱250 km/h以下	4个计算参数；波长范围可以根据需求选择	高低	$S(\Omega)=\frac{A_0\Omega_1^2}{(\Omega^2+\Omega_2^2)(\Omega^2+\Omega_1^2)}$
				轨向	$S(\Omega)=\frac{A_1\Omega_1^2}{(\Omega^2+\Omega_2^2)(\Omega^2+\Omega_1^2)}$
中国7参数轨道谱	1999年	120 km/h以下、部分线路160 km/h	7个计算参数；波长范围为：0.002～1 m；1～30 m；30～100 m	统一表达式	$S(f)=\frac{A(f^2+Bf+C)}{f^4+Df^3+Ef^2+Ff+G}$
中国高速铁路无砟轨道标准谱	2014年	300～350 km/h	2个计算参数；波长范围为：2～100 m	标准谱统一表达式	$S(f)=\frac{A}{f^k}$
中国高速铁路有砟轨道标准谱	2016年	200～250 km/h	2个计算参数；波长范围为：2～100 m	标准谱统一表达式	$S(f)=\frac{A}{f^k}$

谱在公式表达形式上相似,但德国谱表达更为复杂,涉及多个频率参数(如Ω、Ω_1和Ω_2等),其频率参数变化范围大,这是由于德国谱适用的轨道速度等级较高,对轨道不平顺的要求也较为严格.③中国7参数轨道谱是针对中国普速有砟干线铁路来制定的,公式本质为多项式的分数形式,是对实测谱的高精度拟合,较多参数的运用主要是因为中国干线铁路线路状态差异性大,7个参数可以更好地适应各种线路工况.④中国高速铁路无砟和有砟轨道标准谱采用相同的公式.由于高速铁路轨道不平顺管理严苛,轨道平顺性状态稳定,因此轨道谱在双对数坐标中呈现出明显的分段线性特征,只使用A、k两个参数和空间频率进行表达,公式简洁,方便实际管理中使用.

综上所述,美国六级谱和德国高低干扰谱大致为一条光滑曲线,斜率相对平稳,在全频段基本保持一致或平缓渐变;中国7参数轨道谱在波长大于22 m后谱线走势平缓成平台状,避免长波影响,在短波处有一个“翘尾”,与轨道实际服役状态相一致.中国无砟/有砟轨道标准谱整体表现为折线形式,谱线特征差异主要是由设计标准和轨道结构类型的差异性所致.

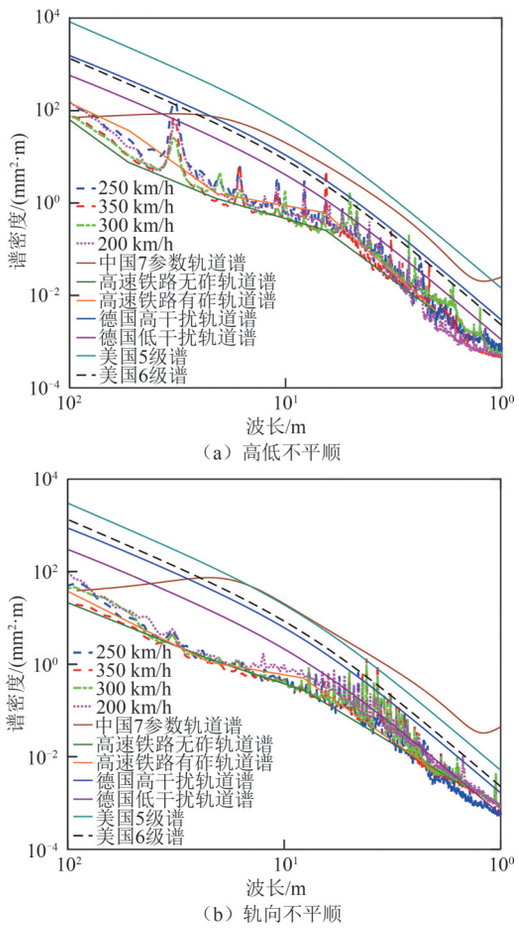
2　不同速度条件下轨道谱分析

采用改进Welch方法对预处理后的高低不平顺和轨向不平顺轨检数据进行功率谱密度估计,选取汉宁窗作为窗函数,由于高速综合检测车测量轨道不平顺波长范围为1.5～120 m,故功率谱波长分析也在此范围内讨论,采样频率4点/m,计算快速傅里叶变换的数据长度为4 096,样本重叠率2 048.

2.1　轨道谱结构特征分析

使用分析数据的时间范围为2024年至2025年,采用不同速度等级动检数据计算其轨道不平顺功率谱,并与相关轨道标准谱进行对比,同时给出了高低与轨向不平顺的典型样本计算结果,如图2所示.

由图2可知:①高低不平顺谱的各个谱线之间较为接近,全谱线明显低于美国六级谱和德国高低干扰谱,有砟轨道谱线要略高于无砟轨道谱线,这是由无砟轨道结构整体刚度大、结构累计变形小的特点所决定的;300 km/h和350 km/h工况下,在谱线走势上与标准谱基本一致,但斜率变化较为平缓.在波长20～120 m谱线要略高于标准谱,波长6.5～20 m区间内高低不平顺状态基本一致,接近无砟轨道标准谱.在波长1.5～6.5 m范围内逐渐偏移无砟轨道标准谱,处于有砟轨道标准谱附近,由此可知现阶段对于轨道不平顺依然有着较高的要求.谱线斜率发生的改变和在波长较短范围内谱线状态与标准



（a）高低不平顺

（b）轨向不平顺

图 2　不同速度不平顺功率谱对比

Fig.2　Comparison of track irregularity power spectral densities at different speeds

谱有着较大的差别,可能是由于这两条线路在近几年刚经过轨道精调,轨道处于较优的状态.200 km/h和250 km/h工况下,250 km/h线路功率谱与标准谱走势一致,200 km/h线路在54 m波长处的走势变化不同于标准谱先增长后下降的趋势,而是持续下降.波长20.9 m处斜率变化明显变小,整体谱线较为平缓.波长1.5～6.5 m与标准谱相比并无明显变化.波长32～120 m区间的谱线低于有砟轨道标准谱,位于有砟轨道标准谱和无砟轨道标准谱之间.波长6.5～32 m范围内基本与有砟轨道标准谱一致,波长在1.5～6.5 m范围内处于有砟轨道标准谱和德国低干扰谱之间,高低轨道谱多处存在谱峰,波长20 m和33 m及其2～7倍频主要由基础结构周期性不平顺引起的.②轨向不平顺在350 km/h工况下,在全波长范围内与无砟轨道标准谱幅值及趋势一致,在波长22～120 m谱线和斜率明显高于标准谱,走势更加陡峭.波长1.5～22 m谱线略低于标准谱,走势与标准谱一致.250 km/h和200 km/h功率谱谱线在波长22～120 m范围内明显高于有砟轨道标准谱,走势更为陡

峭.其中200 km/h在波长6.5～22 m范围内斜率明显增加,下降得更快,谱线低于有砟轨道标准谱.

以300 km/h工况为例,其开通时间为2010年,使用该条线路2016年、2021年、2025年的轨检数据计算功率谱进行对比,如图3所示,分析运营初期、运营中期、现阶段谱线变化情况.由图3可知,高低不平顺谱在2016年的谱线在波长5.4 m以上要明显高于2021年和2025年的谱线,轨向不平顺与高低不平顺一致.同时,高低不平顺谱和轨向不平顺谱的走势没有太大变化,周期性成分一致.由文献[11]可知,该线路在2018年谱线高度达到最大值,随后谱线高度逐步降低、谱峰值减小,最终趋于稳定.这可能是由于该条线路2023年开始进行了一次较大规模的轨道精调,线路质量处于一个较优的状态.

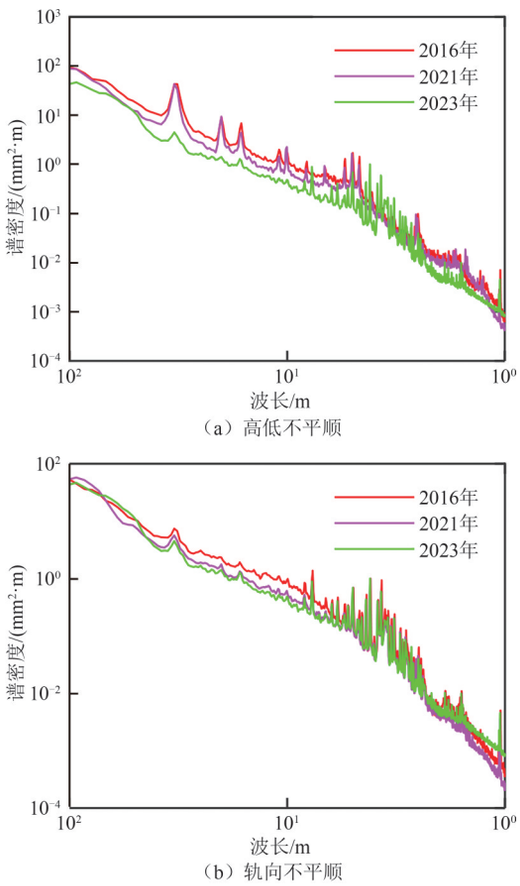


图3 多年功率谱对比

Fig.3 Comparison of track irregularity power spectral densities over multiple years

2.2 不同速度高速铁路功率谱拟合

使用高低不平顺和轨向不平顺动检数据样本源,参照中国高速铁路无砟和有砟轨道标准谱中相关谱拟合计算方法,对所分析4种工况下的轨道谱参数进行计算.

轨道周期性不平顺在轨道不平顺谱上存在谱峰,需要剔除;对消峰后的轨道谱进行拟合,表征随机性轨道不平顺.通过计算功率谱密度并对其进行对数转换,使用多项式拟合对数据进行基线去除.基线去除后,采用了峰值检测方法,利用局部最大值检测算法识别谱峰.为进一步提高识别准确性,避免误检,对基线去除后的对数功率谱密度数据进行负值平滑处理,使用高斯平滑算法去除数据中的不规则波动.随后,结合谷值检测方法,精确识别谱峰的左右边界.在使用Welch法进行轨道谱计算的过程中,数据点分布是不均匀的.当剔除谱峰后,数据会存在间断,导致谱线出现空白.对剔除谱峰后的数据使用分段3次Hermite插值进行平滑填补.最后对处理完的不平顺谱采用非线性最小二乘优化方法进行幂函数分段拟合,谱峰去除效果见图4.

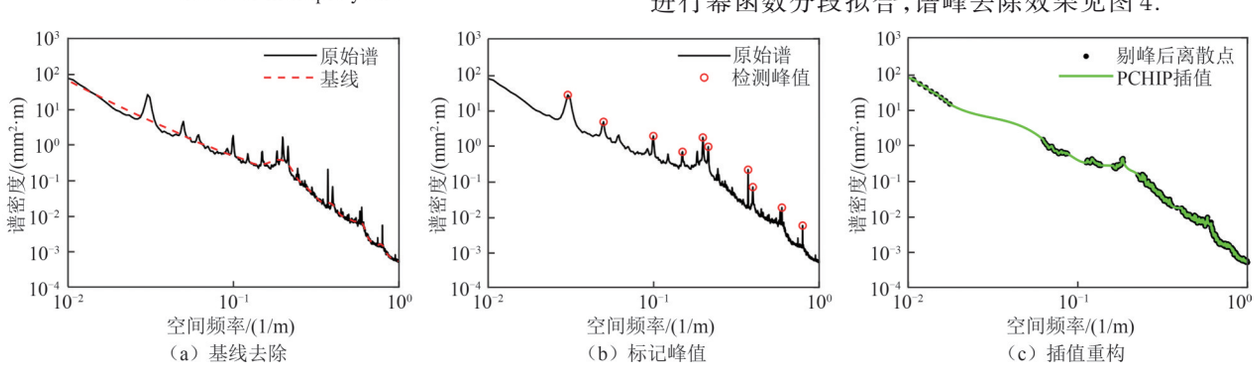
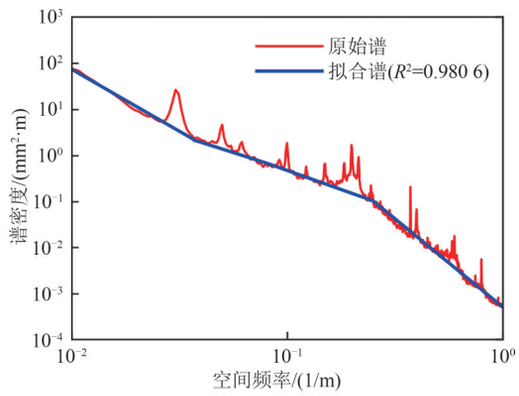


图4 峰值处理

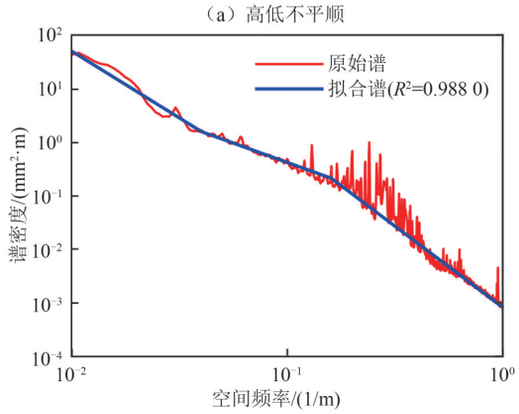
Fig.4 Peak processing

使用该谱峰去除标准,将全年各月的多组轨检数据进行功率谱计算,取样本的平均谱进行轨道不平顺谱拟合分析,得到图5的拟合计算结果.由图5可知,高低、轨向谱的拟合优度R^2均在0.98以上,说明高低使用四段幂函数拟合,轨向采用三段幂函数拟合可满足现阶段不同工况下轨道不平顺的拟合需求.拟合结果分段点空间频率选用无砟(有砟)轨道标准谱相对应频率,各段不平顺谱拟合参数结果及波长范围见表3及表4.

中国高速铁路无砟和有砟轨道标准谱公式主要



（a）高低不平顺



（b）轨向不平顺

图 5　不平顺轨道谱拟合结果

Fig.5　Fitting results of track irregularity spectra

受 A 和 k 两个参数影响,其中 k 作为谱的幂指数可以看作为谱的斜率,A 影响谱线的高度.各工况轨道谱拟合结果对比见图 6.由图 6 可知:①高低不平顺中,350 km/h 工况下第 1 段参数均改变 17%,第 2 段参数改变了 38%;参数 A 相差了 15 倍,导致谱线的陡峭程度和高度发生显著变化,第 3、4 段的参数变化较小,其中参数 A 相差 7%～10%,k 仅变化 3%,谱线高度和斜率相较轨道标准谱基本不变.300 km/h 工况下,在全波长范围内参数 k 值发生了 12%～20% 的变动,参数 A 相差 10 倍以内.250 km/h 工况下,第 1、2 段参数 k 改变了 24%～30%,第 3、4 段参数 k 改变了 5%～10%;第 1、2 段参数 A 相差较大,可以明显看出该波长范围内谱线要明显偏移标准谱,其他波段范围内参数 A 相差在 4 倍以内.200 km/h 工况下,第 1 段参数 k 值变化过大,在此范围内走势与标准谱不同;第 2 段改变了 32%,第 3、4 段参数 k 变化范围在 10%～14%,参数 A 相差范围在 4 倍以内.②轨向不平顺:350 km/h 工况下,参数 k 值分别改变了 4%、15%、2%,参数 A 值变化在 2 倍以内.300 km/h 工况下,第 1 段参数 k 值变化了 33%,第 2、3 段改变了 3.5%～4%;参数 A 值与参数 k 值变化趋势相似,第 1 段相差 8 倍,第 2、3 段变化了 10%～20%.250 km/h 工况下,参数 k 值分别改变了 7%、20%、5%;参数 A 值在第 1 段改变 4%,第 2、第 3 段均变化 80%～90%.200 km/h 工况下,参数 k 值在第 1 段变化 16%,参数 A 值相差 60%;第 2 段参数 k 值变化较大,变化了 88%,参数 A 值相差约 10 倍,第 3 段参数 k 值变化了 11%,A 值变化了 2%.

表 3　不同速度高速铁路高低不平顺拟合公式系数对比

Tab.3　Comparison of fitting formula coefficients for vertical irregularity of high-speed railways at different speeds

速度等级/(km/h)	第 1 段(53.5～100 m)		第 2 段(21～53.5 m)		第 3 段(6.5～21 m)		第 4 段(2～6.5 m)	
	$A\times10^{-4}$	k	$A\times10^{-4}$	k	$A\times10^{-4}$	k	$A\times10^{-4}$	k
350	1.66	2.813 2	3.027 2	2.662 3	178.89	1.324 4	4.212 3	3.323 4
300	1.572 7	2.839 4	22.164	2.174 5	85.309	1.732 5	10.122	2.869 1
250	32.962	2.260 7	8.258 7	2.606 6	249.24	1.485 3	2.448 5	3.950 4
200	0.403 55	3.283 9	17.707	2.338 8	299.41	1.408 2	0.738 44	4.610 2

表 4　不同速度高速铁路轨向不平顺拟合公式系数对比

Tab.4　Comparison of fitting formula coefficients for alignment irregularity of high-speed railways at different speeds

速度等级/(km/h)	第 1 段(22.2～100 m)		第 2 段(8～22.2 m)		第 3 段(2～8 m)	
	$A\times10^{-4}$	k	$A\times10^{-4}$	k	$A\times10^{-4}$	k
350	295.03	1.934 7	207.47	1.305 7	10.166	2.747 7
300	5.369 6	2.485 4	86.433	1.589 4	8.407 4	2.703 6
250	1.731 7	2.859	1 684.9	0.640 4	9.481 2	3.117 1
200	0.719 02	3.095 4	0.987 33	1.508 2	5.052 6	2.929 4

综上所述,各速度等级轨道谱变化趋势与现行规范标准谱基本一致,结合谱线和参数对比分析,有砟轨道运行多年后高低不平顺主要变化在波长 8～53 m,谱线升高,走势平缓,相对应的第 1、2 段参数发生了较大变化.轨向不平顺主要变化在波长 22～120 m,谱线升高,走势更加陡峭.200 km/h 工况在波长 1.5～22 m 谱线明显下降.无砟轨道高低不平顺在波长 21～120 m 谱线升高,在波长 53 m 处斜率变化较小,没有明显转折;轨向不平顺 300 km/h 工况在波长 22～120 m 谱线升高,接近有砟标准谱,350 km/h 工况下运营多年后轨向不平顺几乎没有变化.由此可知,参数 k 值变化范围在 10% 以内,参

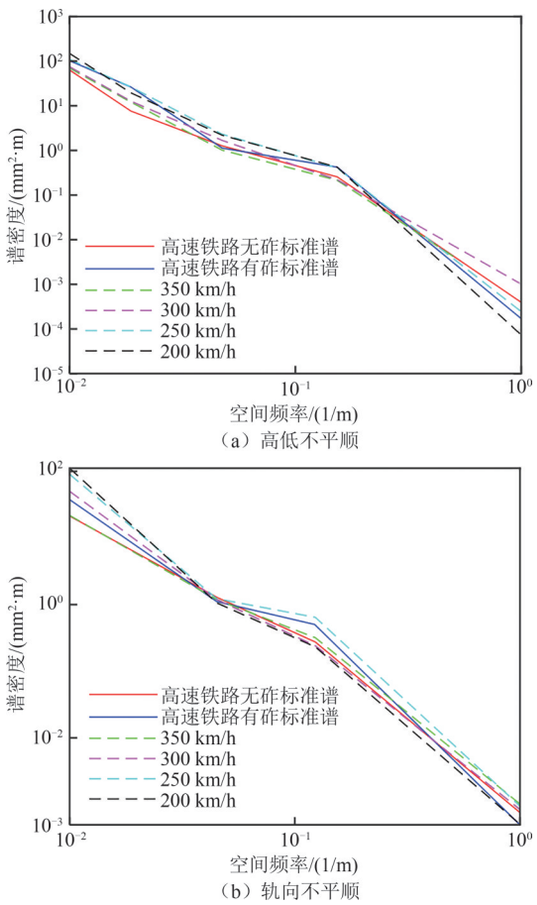


图 6 各工况轨道谱拟合结果对比

Fig.6 Comparison of track spectrum fitting results under various operating conditions

数 A 值变化幅度在 4 倍以内，标准谱在相应波段中仍有较好的适用性，建议对参数值变化较大的波段，对标准谱进行相应的修正和完善.

3 轨道不平顺分位数谱建立

3.1 分位数谱与 TQI 指标的联系

高速铁路轨道不平顺谱通常服从自由度为 2 的 χ^2 分布，并可以通过计算平均谱和分位数谱进行表示[21]. 分位数是指将一个随机变量的概率分布范围分为几个等份的数值点. 不平顺谱通过百分位能算出不同谱线的出现概率，而轨道不平顺多组样本数据可以看成一个累积分布的结果，通过分位数谱可以从概率分布的角度得到一条线路全线多次动检样本轨道不平顺谱的典型表示. 为了讨论如何使用轨道功率谱进行线路质量管理，利用某高铁线路上下行多组数据样本，鉴于线路长度有所差别，将 Welch 法求解的段数（每段 4 096 个点，长度为 1 024 m）控制在同一水平线上，参考文献[22]中的四分位数法，得到 1%、25%、50%、75%、99%. 其中 1% 和 99% 可以看作上下包络谱线，分位数谱如图 7 所示.

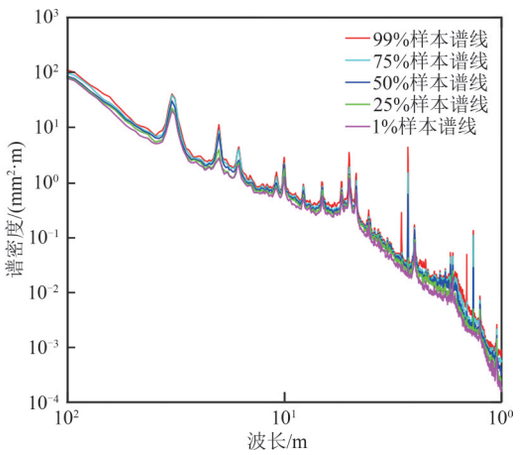


图 7 分位数谱

Fig.7 Quantile spectrum

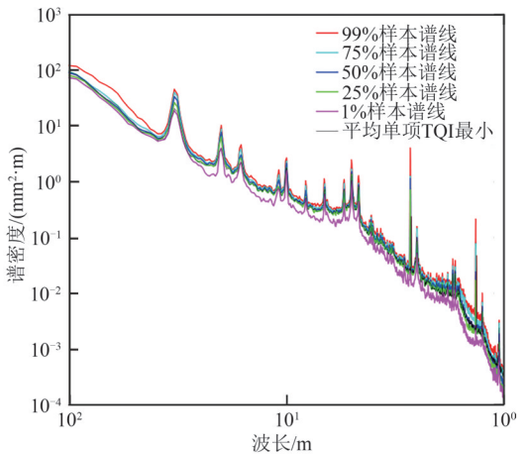
由于 TQI 是以 200 m 为区段，运用标准差的方法评估轨道质量. 因此，以工况 300 km/h 为例，通过四分位法建立该工况分位数谱，并计算出其多组数据样本的全线平均单项 TQI. 分位数谱可以反映一条线路在多次动检中的不平顺谱典型表示. 使用这条线路中多次动检数据中平均单项 TQI 最大和最小的样本不平顺功率谱和分位数谱进行对比，观察所使用样本中轨道质量最优和最差的谱线在分位数谱中的表现情况.

不同样本功率谱与高低分位数谱对比见图 8. 由图 8 可知：高低不平顺中平均单项 TQI 最小的功率谱谱线大部分处于 50% 和 25% 分位数谱之间，说明 TQI 最小的谱线状态在整个高低不平顺统计样本全波长范围内不处于最优状态，在一些周期性成分例如 6.5 m、5.43 m、4.6 m 的谱峰高于 75% 分位数谱时，需要加强这些周期性成分轨下结构的监管与养护维修；平均单项 TQI 最大的功率谱线在大部分波长范围内围绕在 75% 分位数谱上下浮动，在波长 20.7 m、6.5 m 的周期性成分处于 50% 分位数谱以下，同时波长 3 m 以下的成分接近 25% 分位数谱，表明该段轨道质量相对较好.

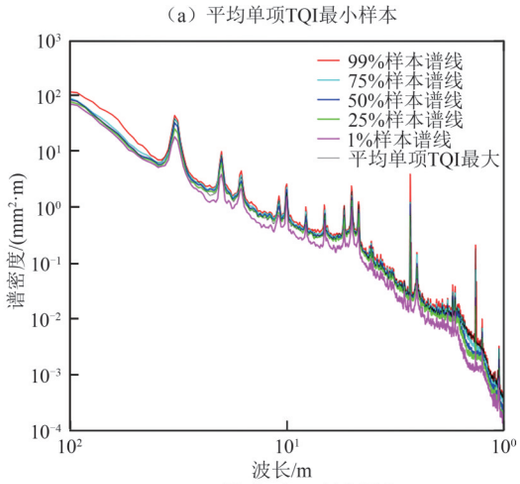
不同样本功率谱与轨向分位数谱对比见图 9. 由图 9 可知，轨向不平顺中平均单项 TQI 最小的功率谱谱线接近 25% 分位数谱，而平均单项 TQI 最大的线路功率谱谱线大多高于 75% 分位数谱. 由图 8 和图 9 可知，分位数谱可以从统计学角度反映整条线路当前的轨道状态. 幅值评判的方法可能会受到最大值和最小值的影响，结合分位数谱共同评判可以在一定程度上减小此类幅值误差.

3.2 不同速度等级线路分位数谱与 TQI 关系

由于 TQI 较难反映均值的变化，例如一定区段



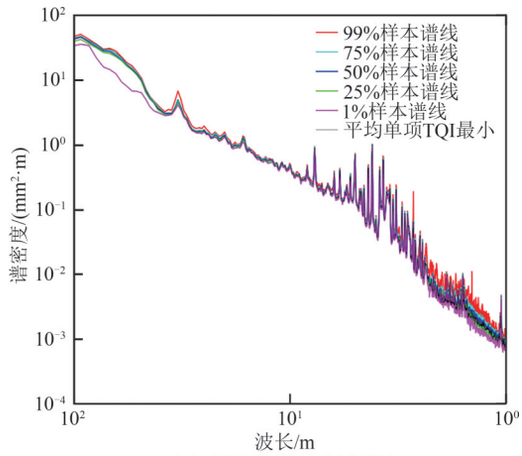
（a）平均单项TQI最小样本



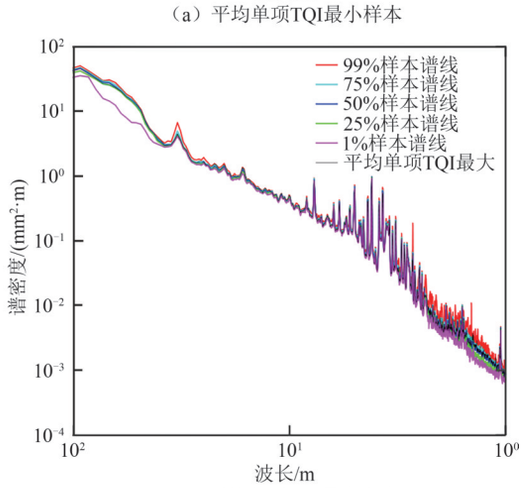
（b）平均单项TQI最大样本

图 8　不同样本功率谱与高低分位数谱对比

Fig.8　Comparison of power spectra of different samples with the vertical quantile spectrum



（a）平均单项TQI最小样本



（b）平均单项TQI最大样本

图 9　不同样本功率谱与轨向分位数谱对比

Fig.9　Comparison of power spectra of different samples with the alignment quantile spectrum

内数据其均值非常高,即整体水平都很差,但从标准差来看却不大.而轨道不平顺谱下面积的积分值在数值上等于对应几何参数(如高低、轨向)单项 TQI 标准差的平方.讨论如何使用分位数谱与 TQI 之间的关系,共同进行轨道质量管理,在一定程度上将减少仅从幅值角度评判而产生的误判.将不同速度等级线路先通过 Welch 方法计算整条线路的功率谱,并以全年上下行多组全线动检数据为统计样本,使用分位数方法以 10% 为间隔构建高低不平顺分位数谱,并计算各级高低不平顺分位数谱的谱下面积并划分为 10 个分位区间.同时计算整条线路各组动检数据的高低不平顺单项平均 TQI,统计其在分位区间的分布情况.

各速度高低分位数谱与 TQI 比较见图 10.由图 10 可知,高低不平顺各级分位数谱的分位区间的谱下面积相差不大:300 km/h 工况下 3 组单项 TQI 在 10% 分位区间以下,其他均约在 50% 分位区间;350 km/h 工况下 8 组标准差在 30% 分位区间以下,2 组在 70%～90% 之间;200 km/h 工况下分布较为平均,各级分位区间均有分布;250 km/h 工况下大部分样本在 50% 分位区间以下.

各速度轨向分位数与 TQI 比较见图 11.由图 11 可知,与高低不平顺相似,多组数据的轨向不平顺单项 TQI 都位于 50% 分位区间以下,300 km/h 和 350 km/h 工况下分位区间值出现了相差较大的情况,这可能是个别轨向不平顺数据的特定波长下谱线较高导致的,300 km/h 工况下大部分位于 10%～30% 分位区间,只有一个位于 80% 分位区间以上,350 km/h 工况下都分布于 50% 分位区间以下,200 km/h 工况下分布于 20%～70% 区间,分布较为平均;250 km/h 工况下都分布约在 30% 分位区间.

按照我国 TQI 管理标准[23],200～250 km/h 高低不平顺管理标准为 1.4,轨向不平顺管理标准为 1,300～350 km/h 高低不平顺管理标准为 0.8,轨向不平顺管理标准为 0.7.由图 10 和图 11 可知,所选 4 条线路单项几何标准差管理指标大多处于线路质

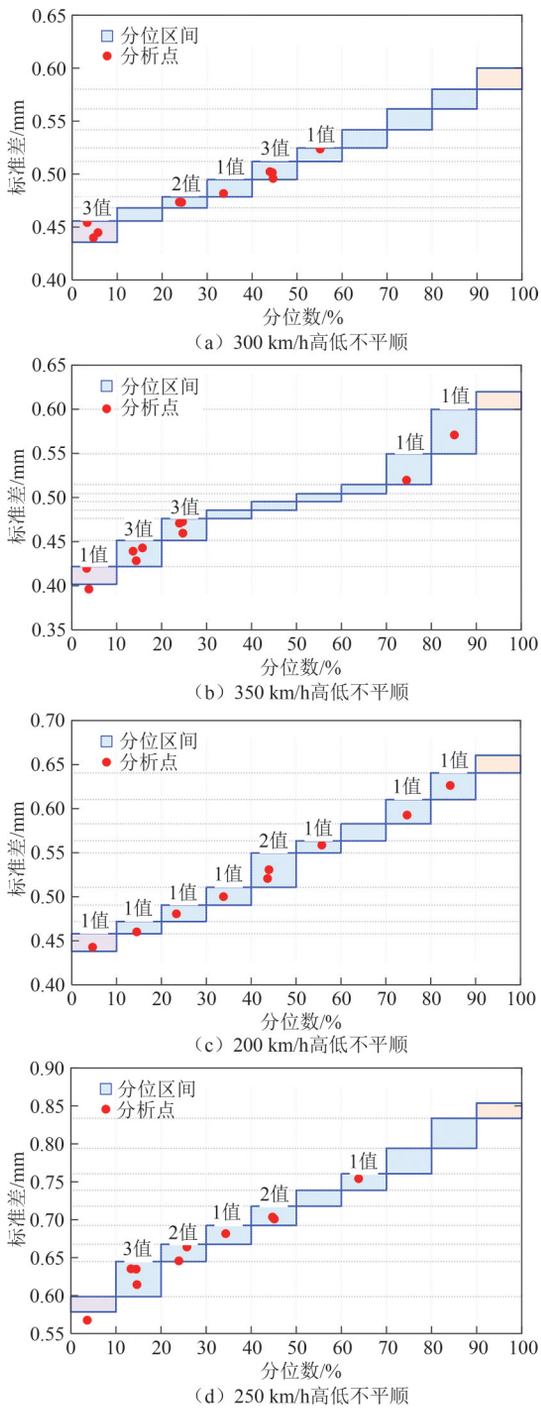


图 10 各速度高低分位数谱与 TQI 比较

Fig.10 Comparison of vertical quantile spectra with the TQI at different speeds

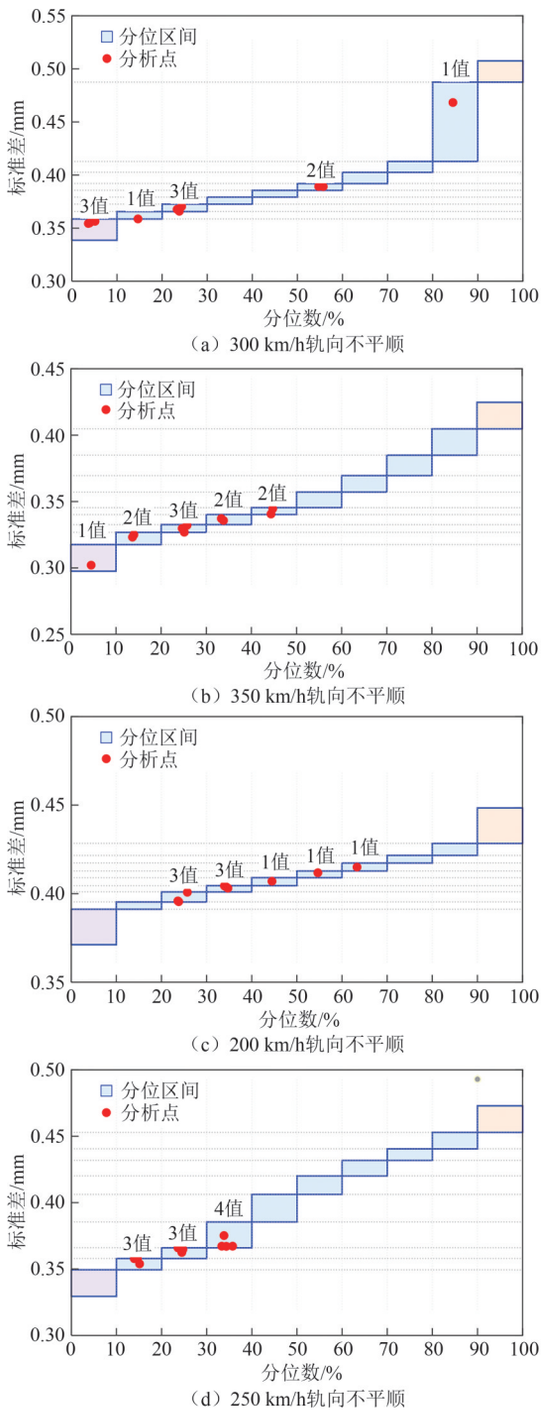


图 11 各速度轨向分位数谱与 TQI 比较

Fig.11 Comparison of alignment quantile spectra with the TQI at different speeds

量较优的状态，以 350 km/h 高低不平顺为例，其处于分位数谱较高区间的数据组，出现了个别区段单点不平顺超限情况．由此可知，分位数谱可以反映线路质量的整体水平，但很难定位到局部区段．

综上，高低和轨向不平顺各级分位区间所对应标准差之间差距较小，轨道质量较为接近．单项 TQI 值大部分与 0～30% 分位区间计算所得相一致，该分位区间为统计样本中的普遍分布，并且此区间范围内轨道质量在统计样本中处于优秀状态；30%～70% 分位区间有少量样本分布，此范围内轨道质量处于样本良好水平；70%～90% 只存在个别样本，此时轨道质量在统计样本中较差，需要重点关注；文献[24]认为 90% 分位谱可以近似代表最差线路的整体轨道平顺状态，而 30% 分位谱可以近似代表最优线路的整体轨道平顺状态．90% 以上区间在统计样本中没有分布，在此区间线路可能出现了较

多的单点不平顺超限情况和一些局部问题,可以将90%～100%区间定义为预警区间.如果样本在此区间,可以结合TQI峰值管理和均值管理共同制定养护维修计划.

4　结论

1)通过对4种工况功率谱的计算对比可知,既有轨道谱与标准谱之间存在一定差别,在具体线路运用时应结合具体数据构建相应轨道谱,直接采用标准谱会产生一定偏差.

2)通过拟合对比分析得到了4种工况下轨道拟合谱与标准谱参数的变化情况,各速度等级轨道谱高低不平顺在波长10 m以上,轨向不平顺在波长22 m以上,谱线升高,谱参数发生了较大改变.同时发现谱参数k值变化范围在10%以内,参数A值变化在4倍以内,标准谱在相应波段中仍有较好的适用性,建议对参数值变化较大的波段,对标准谱进行相应的修正和完善.

3)通过分位数谱分析,证明了分位数谱与TQI之间的密切关系,且与多组线路的轨道质量状态相匹配;将分位数谱划分为0～30%、30%～70%、70%～90%、90%～100%4个区间,分别对应优秀、良好、一般、预警的轨道状态.建议结合线路实际情况构建合理分位数谱并结合TQI共同进行轨道质量管理.

参考文献(References):

[1] 李再帏,刘晓舟,施洁,等.铁路轨道平顺性状态评估及预测研究进展[J].振动与冲击,2025,44(8):49－63.
LI Zaiwei, LIU Xiaozhou, SHI Jie, et al. Recent research progress on assessment and prediction of railway track geometric condition[J]. Journal of Vibration and Shock, 2025, 44(8): 49－63.(in Chinese)

[2] SOLEIMANMEIGOUNI I, AHMADI A, KUMAR U. Track geometry degradation and maintenance modelling: A review[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2018, 232(1): 73－102.

[3] 长沙铁道学院随机振动研究室.关于机车车辆/轨道系统随机激励函数的研究[J].长沙铁道学院学报,1985(2):1－36.
Research Group on Random Vibration of Changsha Railway Institute etc. Research on random excitation functions fo rolling stock/track system[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 1985(2): 1－36.(in Chinese)

[4] 罗林,魏世斌.我国干线轨道不平顺功率谱的研究[R].北京:铁道部科学研究院研究,1999.
LUO Lin, WEI Shibin. The track irregularity power spectrum research of the main railway lines in China[R].Beijing: China Academy of Railway Sciences, 1999.(in Chinese)

[5] 国家铁路局.高速铁路无砟轨道不平顺谱:TB/T 3352—2014[S].北京:中国铁道出版社,2015.
National Railway Administration of the People's Republic of China.PSD of ballastless track irregularities of high-speed railway: TB/T 3352—2014[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2015.(in Chinese)

[6] 中国铁路总公司.高速铁路有砟轨道不平顺谱:Q/CR 508-2016[S].北京:中国铁道出版社,2016.
China Railway. Corporation uneven spectrum of ballasted tracks on high-speed railways: Q/CR 508-2016[S].Beijing: China Railway Publishing House, 2016.(in Chinese)

[7] 刁洪宝,欧燕强,支洋,等.高速铁路不同轨下基础无砟轨道不平顺谱的构建及对比分析[J].中南大学学报(自然科学版),2024,55(7):2840－2855.
DIAO Hongbao, OU Yanqiang, ZHI Yang, et al. Construction and comparative analysis of ballastless track irregularity spectrum with different substructures of high-speed railway[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2024, 55(7): 2840－2855.(in Chinese)

[8] 杨飞,孙宪夫,尤明熙,等.考虑周期性不平顺的高速铁路各型无砟轨道谱拟合与反演方法[J].铁道学报,2023,45(9):114－122.
YANG Fei, SUN Xianfu, YOU Mingxi, et al. Track spectrum fitting and inversion method of various types of high-speed railway ballastless track considering periodic irregularity[J]. Journal of the China Railway Society, 2023, 45(9): 114－122.(in Chinese)

[9] XIN L F, XU L, ZHANG J X, et al. Research on characterization methods for track irregularities[J]. Railway Engineering Science, 2026, 34(1): 25－39.

[10] 陈宪麦,董春敏,魏子龙,等.高速铁路0.01～120 m波段轨道不平顺功率谱密度函数的构建[J].中南大学学报(自然科学版),2023,54(6):2111－2121.
CHEN Xianmai, DONG Chunmin, WEI Zilong, et al. Development on power spectral density function of track irregularity of 0.01～120 m waveband of high-speed railway[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(6): 2111－2121.(in Chinese)

[11] 魏剑梅.高速铁路轨道不平顺特征研究[D].北京:中国铁道科学研究院,2024.
WEI Jianmei. Characteristics of track irregularities in high-speed railway[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2024.(in Chinese)

[12] 高望翰,郝晓莉,张煜,等.基于多项式拟合的高速铁路

高低轨道不平顺功率谱分析[J]. 北京交通大学学报, 2020, 44(2): 27－35.
GAO Wanghan, HAO Xiaoli, ZHANG Yu, et al. Analysis of high-speed rail track longitudinal irregularity power spectrum based on polynomial fitting[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2020, 44(2): 27－35. (in Chinese)

[13] 高建敏. 高速铁路无砟轨道不平顺谱的比较分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(4): 715－723.
GAO Jianmin. Comparative analysis of power spectrum density of ballastless track irregularities of Chinese high-speed railway[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2015, 12(4): 715－723. (in Chinese)

[14] 陈宪麦, 彭良坤, 孙宪夫, 等. 高速铁路0.01～1 m波段高低轨道不平顺特性分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21(3): 891－900.
CHEN Xianmai, PENG Liangkun, SUN Xianfu, et al. Investigation on 0.01-1 m wavelength longitudinal level irregularity of high speed railway[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21(3): 891－900. (in Chinese)

[15] 余翠英, 向俊, 陈涛, 等. 高速铁路无砟轨道谱统计分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(9): 1659－1666.
YU Cuiying, XIANG Jun, CHEN Tao, et al. Statistical analysis on ballastless track spectrum of high-speed railway[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(9): 1659－1666. (in Chinese)

[16] 徐磊, 翟婉明. 铁路轨道不平顺的时-频能量联合分析方法[J]. 铁道学报, 2017, 39(4): 9－16.
XU Lei, ZHAI Wanming. Time-frequency energy joint analysis method for railway track irregularity[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(4): 9－16. (in Chinese)

[17] 陈宪麦, 徐磊, 王卫东, 等. 青藏铁路轨道不平顺谱研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(9): 1686－1695.
CHEN Xianmai, XU Lei, WANG Weidong, et al. Research on track irregularity power spectrum density of Qinghai-Tibet railway[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(9): 1686－1695. (in Chinese)

[18] 何庆, 汪健辉, 李晨钟, 等. 基于分位数回归的轨道质量指数阈值合理性数据分析[J]. 铁道学报, 2023, 45(7): 99－105.
HE Qing, WANG Jianhui, LI Chenzhong, et al. Data analysis of rationality of threshold of track quality index based on quantile regression[J]. Journal of the China Railway Society, 2023, 45(7): 99－105. (in Chinese)

[19] 刁洪宝, 赵钢, 杨飞, 等. 基于轨道谱量化指标的高速铁路轨道状态演变趋势分析[J]. 中国科学: 技术科学, 2025, 55(2): 359－368.
DIAO Hongbao, ZHAO Gang, YANG Fei, et al. Evolution trend analysis of high-speed railway track state based on track spectrum quantitative indexes[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2025, 55(2): 359－368. (in Chinese)

[20] 刁洪宝. 融合周期成分的高速铁路无砟轨道谱特征及演变趋势研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2024.
Diao Hongbao. Research on characteristics and evolution trends of ballastless track spectrum for high-speed railways with periodic components [D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2024. (in Chinese)

[21] 康熊, 刘秀波, 李红艳, 等. 高速铁路无砟轨道不平顺谱[J]. 中国科学(技术科学), 2014, 44(7): 687－696.
KANG Xiong, LIU Xiubo, LI Hongyan, et al. PSD of ballastless track irregularities of high-speed railway[J]. SCIENTIA SINICA Technologica, 2014, 44(7): 687－696. (in Chinese)

[22] 马蒙, 张厚贵, 陈棋, 等. 钢轨表面短波不平顺对地铁振动源强影响[J]. 中国铁道科学, 2021, 42(3): 21－28.
MA Meng, ZHANG Hougui, CHEN Qi, et al. Effect of rail surface shortwave irregularity on metro train induced vibration source intensity[J]. China Railway Science, 2021, 42(3): 21－28. (in Chinese)

[23] 国家铁路局. 轨道检测—轨道几何状态动态检测: TB/T 3355—2023[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2023.
National Railway Administration of the People's Republic of China. Track inspection—track geometry dynamic inspection: TB/T 3355—2023[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2023. (in Chinese)

[24] 马帅, 刘秀波, 杨飞, 等. 高速铁路无砟轨道不平顺谱研究[J]. 铁道学报, 2025, 47(9): 129－136.
MA Shuai, LIU Xiubo, YANG Fei, et al. Research on irregularity spectra of ballastless tracks for high-speed railways [J]. Journal of the China Railway Society, 2025, 47(9): 129－136. (in Chinese)