

提速线路轨道不平顺谱拟合方法

房建^{1,2}, 涂祥国¹, 王宏轩¹, 雷晓燕¹, 练松良³

(1.华东交通大学 轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室,江西 南昌 330013;

2.华东交通大学 交通运输工程学院铁路环境振动与噪声教育部工程研究中心,江西 南昌 330013;

3.同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804)

摘要: 研究了中国提速线路轨道不平顺谱估计方法,提出了中国提速线路轨道不平顺谱。为提高功率谱的精度,首先利用线性插值剔除异常值、EMD 模态分解法消除趋势项并进行滤波处理。基于最大熵法和 Welch 法统计得到提速线路轨道不平顺谱,并对比分析了不同月份的轨道不平顺谱的特性,采用非线性最小二乘法拟合提出中国提速线路轨道不平顺谱表达式及拟合参数。研究表明,利用 Welch 法和最大熵法计算提速线路轨道不平顺谱,最大熵法计算得到轨道谱的分辨率和精度优于 Welch 法;对比基于非线性最小二乘法的 3 种拟合函数,nlinfit 函数能较好地拟合提速线路轨道不平顺谱。提出提速线路轨道谱拟合参数,为提速线路的养护维修、优化设计等提供参考依据。

关键词: 提速线路;最大熵法;轨道不平顺谱;拟合谱

中图分类号: U213.21 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2023)02-0082-07

0 引言

随着中国经济快速发展,客货运需求不断增加,提速线路作为中国现代化铁路网重要的组成部分,发挥着巨大的作用。随着列车运行速度不断提升,车辆-轨道系统之间的相互作用力增大,引发的振动、噪声问题日益突出。轨道不平顺是车辆-轨道相互作用的主要激励源,对列车运行安全和乘车平稳性产生直接影响^[1]。

轨道不平顺作为随里程分布的随机函数,其波长和幅值均是随机变量,轨道不平顺功率谱是描述轨道不平顺特性常用的统计函数^[2]。国外较早展开对轨道不平顺的研究,具有代表性的铁路轨道谱主要有德国的轨道低干扰谱、高干扰谱以及美国的 5、6 级轨道谱^[3]。由于各国设计标准存在差异,在轨道不平顺的谱线特征以及谱密度等方面均与中国有明显不同。

近年来,中国对普速干线线路、客运专线、高速铁路以及地铁线路的轨道谱展开研究^[4-6],建立了高速铁路轨道谱标准,但针对提速线路轨道不平顺方面的研究仍较少。现基于京广线现场实测数据,通过剔除异常值、消除趋势项、滤波以及进行平稳性判断等预处理,提高实测数据的准确性,采用现代谱方法和古典谱方法来估算轨道不平顺谱并对比了 2 种方法的差异性,分别分析了不同月份不同类型轨道谱的变化规律以及影响因素,并运用最小二乘法拟合功率谱,提出相应的轨道谱表达形式以及拟合参数。

1 轨道不平顺数据预处理

数据在测量与传输过程中由于环境干扰和人为因素的影响存在异常值,使得测试系统采集到的数据往往偏离其真实数值,在测试图中具体表现为“毛刺”和“尖峰”;同时还由于标定误差和惯性器件温度漂移等原因导致实测数据存在趋势项,有必要对数据剔除异常值,消除趋势项等预处理。

收稿日期:2023-03-01 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.20230049

基金项目:国家自然科学基金(51668019);江西省教育厅科研项目(GJJ180297)

作者简介:房建(1978—),女,副教授,研究方向为轨道结构动力学。E-mail:83615342@qq.com

房建,涂祥国,王宏轩,等.提速线路轨道不平顺谱拟合方法[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2023,36(2):82-88.

1.1 剔除异常值

根据实测数据显示,实际的轨道不平顺正常情况下变化率较小,正常的轨道不平顺变化率一般不会超过 3‰。采用预估比较法剔除异常值,该方法核心思想是通过用前 2 个测量值来预估新的测量值,然后用预估值与实际测量值比较,若大于事先给定的允许差限值(3‰),则判定为异常值。剔除异常值如图 1 所示。

预估值

$$x^* = x_{n-1} + (x_{n-1} - x_{n-2}) \tag{1}$$

比较判别

$$|x_n - x_n^*| < w \tag{2}$$

1.2 消除趋势项

趋势项是指信号中周期大于记录长度的成分,趋势项的存在不仅使信号时频分析产生误差,甚至导致低频谱失去真实性。EMD 通过对一个信号做多次 EMD 分解,最后分解为 2 部分,一部分 c_j 包含原始信号中时间尺度最小的成分, r_n 则是周期大于信号的记录长度,也就是趋势项。利用 EMD 经验模态分解法^[7]消除趋势项,如图 2 所示。

$$s(t) = \sum_{j=1}^n c_j(t) + r_n(t) \tag{3}$$

1.3 滤波器设置

通过 GJY-H-3 轨检车收集京广线实测数据,检测里程范围为 K486~K1338,部分数据如表 1。轨检车检测波长的范围为 1~50 m,在检测过程中为排除其余波长的影响,设计带通滤波器对数据采取处理,截取 1~50 m 波长范围的轨道不平顺,提取有效的波长成分,可有效去除更高或更低频率对有效波长成分的干扰,也可降低轨道谱估计时测不准的高频和低频段成分向有效频率区段的泄漏,如图 3 所示。

1.4 平稳性判断

平稳随机过程与非平稳随机过程的谱分析计算方法是完全不同的,因此,在计算轨道谱之前需判断不平顺数据的平稳性。采用轮次法,通过将所分析的随机信号分成若干段,并求出各段的均方值,组成一个新的时间序列。检测结果如表 1 所示。

表 1 轨道不平顺检测数据

1 月份								
京广线上行-武汉桥(K1212~K1055)			京广线上行-武汉桥(K1338~K1212)			京广线下行-武汉桥(K1055~K1338)		
不平顺类型	Z 值	平稳性	不平顺类型	Z 值	平稳性	不平顺类型	Z 值	平稳性
轨距	-1.060 775	平稳	轨距	-0.654 654	平稳	轨距	-3.391 165	不平稳
轨向	0.294 884	平稳	轨向	-1.060 775	平稳	轨向	-1.060 775	平稳
高低	0.499 188	平稳	高低	1.011 423	平稳	高低	0.499 188	平稳

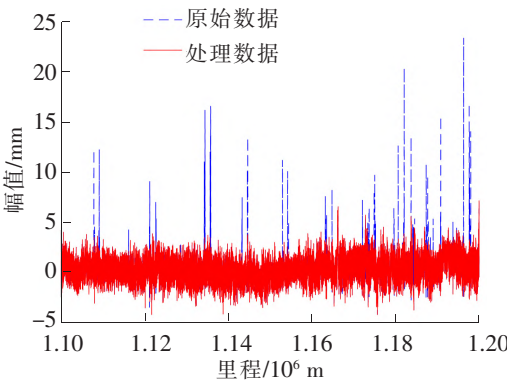


图 1 剔除异常值

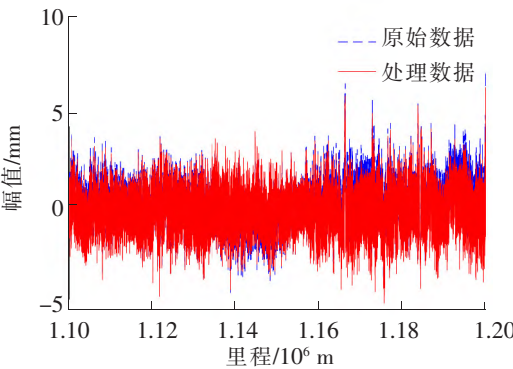


图 2 趋势项处理

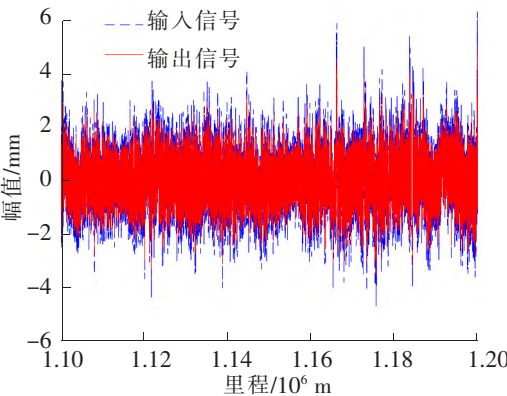


图 3 滤波器处理

续表					
2 月份					
京广线上行-武汉桥(K1338~K1055)			京广线下行-武汉桥(K1055~K1338)		
不平顺类型	Z 值	平稳性	不平顺类型	Z 值	平稳性
轨距	0.499 188	平稳	轨距	- 1.310 790	平稳
轨向	1.011 423	平稳	轨向	0.741 192	平稳
高低	1.639 542	平稳	高低	- 1.309 307	平稳

5 月份								
京广线上行-武汉桥(K1194~K1055)			京广线上行-武汉桥(K1338~K1194)			京广线下行-武汉桥(K1055~K1338)		
不平顺类型	Z 值	平稳性	不平顺类型	Z 值	平稳性	不平顺类型	Z 值	平稳性
轨距	0.353 000	平稳	轨距	1.070 257	平稳	轨距	- 1.833 346	平稳
轨向	1.309 309	平稳	轨向	4.165 802	不平稳	轨向	0.294 884	平稳
高低	0.284 000	平稳	高低	0.294 884	平稳	高低	0.568 926	平稳

2 轨道不平顺谱估算

轨道不平顺作为里程的随机函数,在特定区间测得的轨道不平顺数据视为随机过程的一个样本,对于随机样本不能用确定的函数表达式来描述,只能通过随机过程理论中统计函数来表达轨道不平顺的特征。功率谱密度函数是表述平稳随机过程的轨道不平顺最常用的统计函数^[8]。

2.1 轨道不平顺估算方法

轨道谱的估算方法主要有 2 类:古典谱估计法和现代谱估计法。分别用古典谱估计法的 Welch 法和现代谱估计法的最大熵法估算提速线路轨道不平顺谱,并分析二者的差异,如图 4 所示。

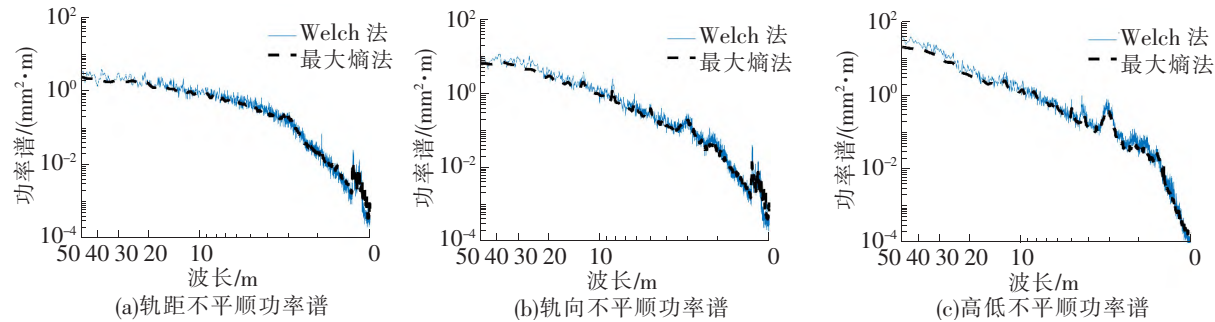


图 4 轨道不平顺功率谱

2 种方法总体趋势大体一致,图 4 中所示的波峰也基本重合,2 种方法也存在一定的区别,Welch 法是周期图法改进和完善的一种方法^[9],通过分段求平均减小数据随机性带来的方差,但同时会降低轨道谱的分辨率,而且对于短数据,无法得到高分辨率的功率谱。最大熵法则有效解决了分辨率和数据长度限制的问题^[10]。

2.2 京广提速线路轨道不平顺功率谱特性研究

基于提速线路实测不平顺数据,利用最大熵法计算提速线路高低、轨距及轨向不平顺平均谱功率谱,如图 5 所示,1 月、2 月和 5 月轨距不平顺功率谱变化趋势基本一致;其中 1 月与 2 月的轨距不平顺功率谱在 6 m 以上波长范围内基本重合,而 3 个月的轨向不平顺功率谱在 2 m 以下波长范围差异较大。根据频率、车速、不平顺波长三者的关系,可以判定 2 m 以下波长范围的轨距不平顺激发的振动频率相对较高,收集实测数据时更易受外界干扰。在轨距不平顺波长小于 10 m 的范围内,5 月份的轨距不平顺功率谱低于其他 2 个月,轨距不平顺状态要优于 1、2 月份。可能存在维修的问题或者环境温度过低导致轨道结构刚性增大,1、2 月份轨距不平顺功率谱明显高于 5 月份。1、2 月份的轨距不平顺功率谱在 3.2 m 波长处出现尖峰,5 月份轨道平顺性较好。

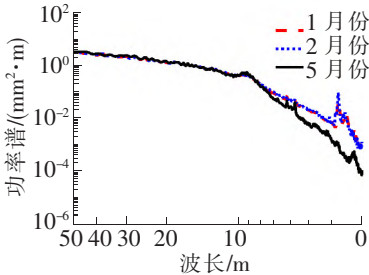


图 5 轨距不平顺平均谱

图 6 表明,各月份左、右轨轨向不平顺功率谱变化趋势基本一致。

1月、2月与5月的轨向不平顺功率谱在3 m以上波长范围内变化较小;1、2月的轨向不平顺功率谱在3.5、3.2、3.1 m处出现峰值,其中2月份的轨向功率谱峰值较大,与轨距不平顺对应。5月份时轨向不平顺功率谱趋于平稳。

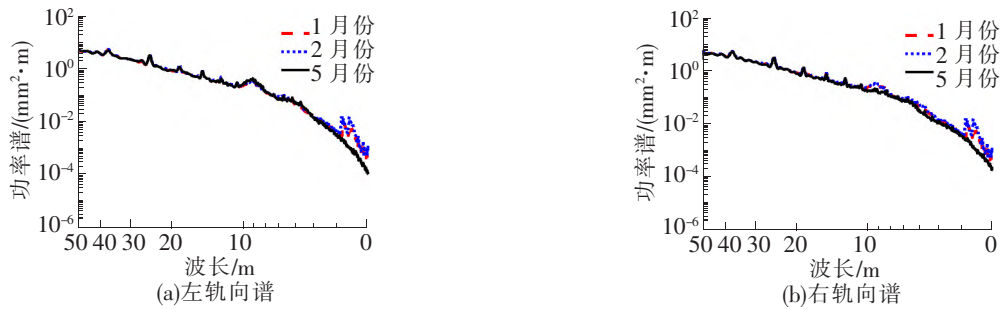


图6 提速线路轨向不平顺功率谱

图7表明,各月份左、右高低不平顺趋势一致,1、2月的高低不平顺功率谱在3.5、3.2、3.1 m处出现峰值,2月份功率谱整体均高于前两者且存在波峰,5月份对轨道养护维修后,整体平顺性较好。

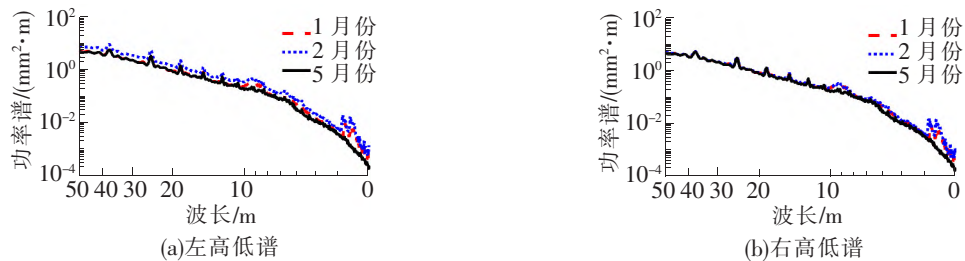


图7 提速线路高低不平顺功率谱

3 提速线路轨道不平顺谱拟合

在对轨道不平顺谱进行拟合时,需根据提速线路轨道不平顺功率谱的分布规律及特点,借鉴参考已有国内外的轨道谱拟合模型,进一步建立适应中国提速线路轨道不平顺谱的拟合模型。在轨道谱分析中,选用的模型常常都是非线性的。因此,宜用非线性最小二乘优化算法对轨道不平顺谱拟合^[11]。采用3种最小二乘法原理的函数,分别是lsqnonlin函数、lsqcurvefit函数和nlinfit函数,拟合模型采用中国铁道科学研究院提出的7参数轨道谱函数

$$S(f) = \frac{A(f^2 + Bf + C)}{f^4 + Df^3 + Ef^2 + Ff + G} \quad (4)$$

式中, f 为空间频率; $S(f)$ 为轨道不平顺功率谱; $A \sim G$ 分别为7参数拟合公式的特征系数。

图8是3种拟合函数对轨道不平顺功率谱的拟合图样,lsqnonlin、lsqcurvefit拟合函数拟合存在较大的误差,相比之下nlinfit函数拟合最佳,误差值基本上低于100%,可以较好地拟合轨道不平顺功率谱。

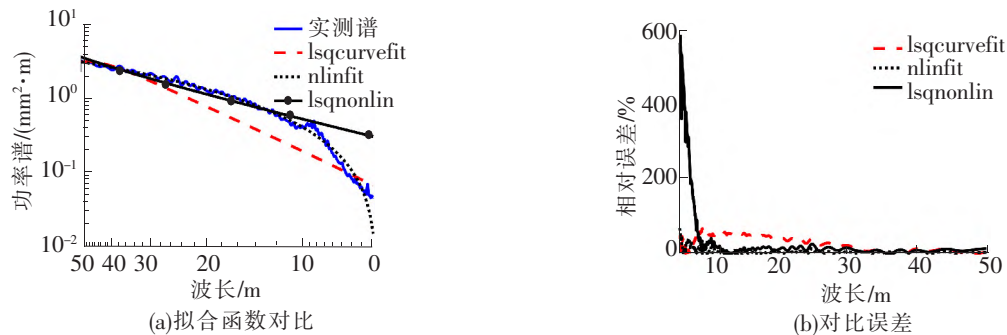


图8 拟合对比及误差

在线路质量评估和动力学仿真研究中往往关注的是功率谱的总体趋势,为更好地表征 K1055~K1338 区段的轨道不平顺特性,对该区段轨距、左、右轨向及高、低功率平均谱进行拟合。图 9~图 11 为实测谱和拟合谱的对比及拟合误差,表 2 为京广提速线路不同类型不平顺拟合参数表。图 9 是轨距谱拟合,轨距拟合谱在波长 10 m 以上拟合效果好,误差基本 20% 以下,10 m 以下误差值最高达到 70%。图 10、图 11 分别是高低谱拟合谱及轨向谱拟合,实测谱存在的部分周期成分没有较好的表征,在图中表现为较大的拟合误差。基于 7 参数模型拟合提速线路轨道不平顺谱,采用最小二乘法原理拟合实测谱,提取各轨道不平顺拟合特征参数,可以较好地拟合提速线路轨道谱,方便工程应用。

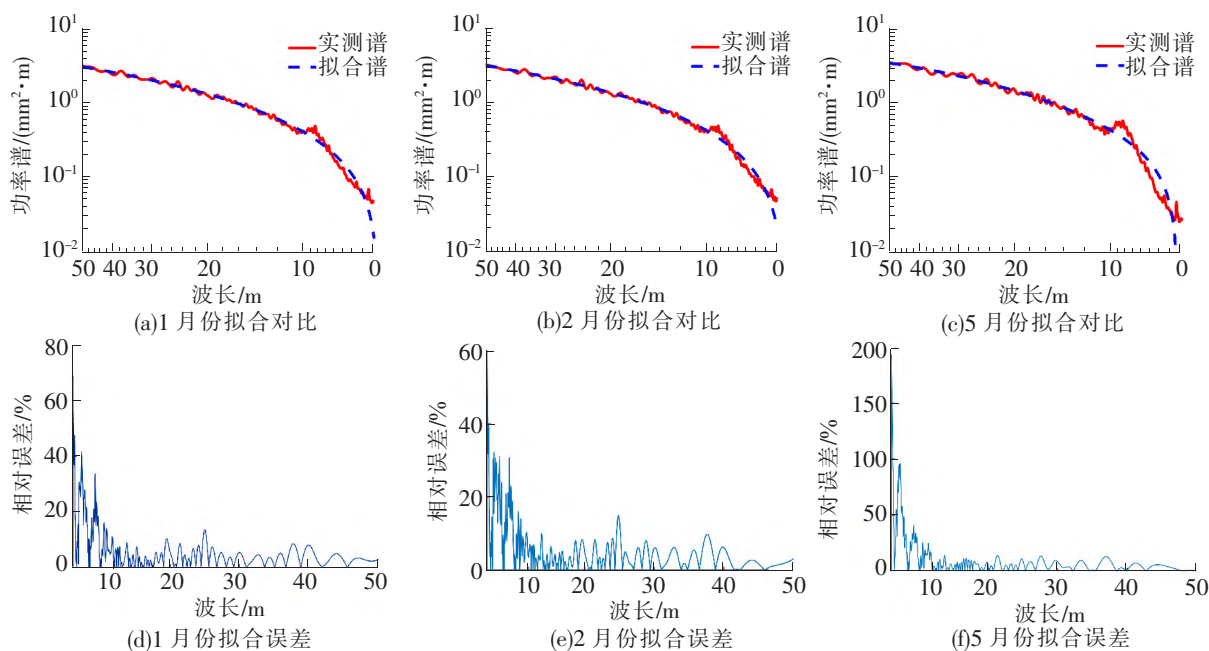


图 9 轨距谱拟合

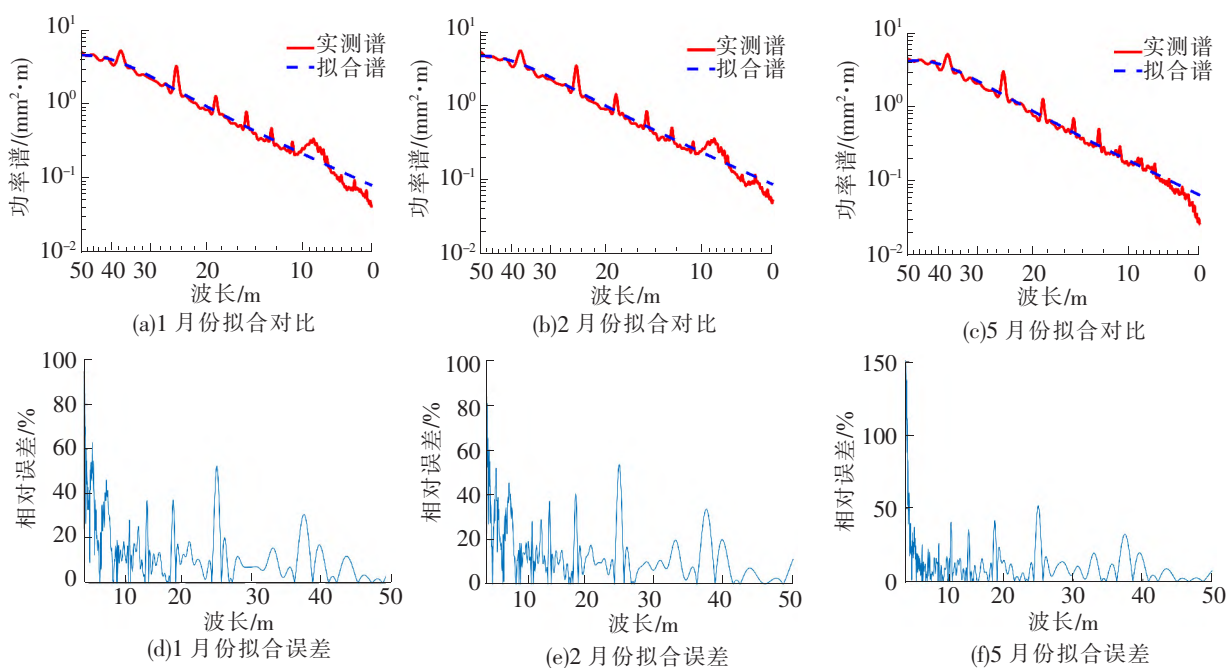


图 10 高低谱拟合

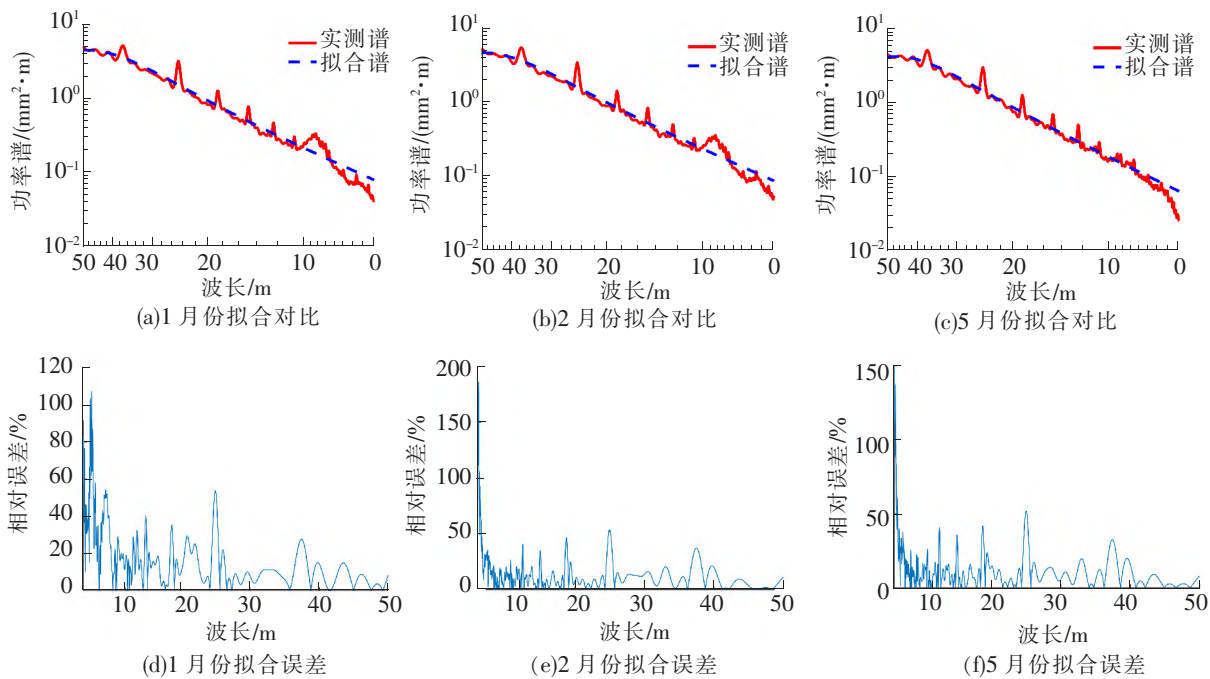


图 11 轨向谱拟合

表 2 京广提速线路高低、轨向、水平不平顺统计谱拟合公式参数表

待定系数	A	B	C	D	E	F	G
轨距	2.806 98	- 26.276 60	82.237 100	- 0.171 23	0.014 016	- 0.000 191	6.230 31
轨向	0.032 15	- 0.290 05	0.064 743	- 0.327 40	0.037 311	- 0.008 804	0.008 69
高低	0.000 32	- 0.290 05	0.064 743	- 0.327 40	0.037 311	- 0.000 880	8.690 92

4 结论

结合提速线路实测数据,为提高轨道谱精度对数据进行剔除异常值、消除趋势项、滤波器设计以及平稳性检验等数据预处理。对比了 Welch 法和最大熵法估计不平顺功率谱的差异,以及采用最小二乘法拟合了轨道谱,提出提速线路轨道谱的表达形式和拟合参数,并验证了方法的合理性与实用性。结果如下:

- (1)为了方便功率谱的计算以及功率谱拟合,在剔除异常值和消除趋势项的基础上,设置 1~50 m 带通滤波器对数据进行滤波处理,可有效地去除其他波长成分的影响,提高轨道不平顺谱的准确性。
- (2)分别采用 Welch 法和最大熵法估计提速线路轨道不平顺功率谱。经对比分析,2 种方法的趋势和周期性成分基本一致,最大熵法分辨率优于 Welch 法。
- (3)采用最小二乘法拟合提速线路轨道谱,对比分析 3 种拟合函数,nlinfit 函数拟合效果最佳,并提取了不同类型轨道谱拟合特征参数,能够较好地拟合提速线路轨道不平顺谱,方便工程应用。

参 考 文 献

[1]杨宏印,陈志军,彭旭民.基于子区间的车-线-桥振动不平顺影响分析[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2016,29(2):6-11.

[2]徐磊,陈宪麦,张晴,等.基于不平顺谱的轨道不平顺状态评价与识别探讨[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2012,25(3):62-67.

[3]宁迎智.国内外高速铁路轨道不平顺谱对比与思考[J].铁道技术监督,2016,44(4):11-15.

[4]房建,雷晓燕,练松良.客运专线有砟轨道不平顺谱特性实测研究[J].铁道科学与工程学报,2015,12(6):1263-1267.

[5]李再玮,练松良.武广高速铁路轨道不平顺谱特征分析[J].郑州大学学报(工学版),2013,34(5):52-55.

[6]何越磊,李再玮,盛春玲,等.不同地铁线路条件下轨道谱的特性分析[J].铁道工程学报,2014,31(7):99-104.

- [7]罗远兴,李志红,梁兴,等.基于 EMD-LS 的非平稳时间序列多重分形去趋势波动分析方法[J].电子学报,2021,49(12): 2323-2329.
- [8]李建斌,练松良.关于轨道谱面积与 TQI 指标关系的研究[J].石家庄铁道学院学报(自然科学版),2008,21(4):9-12.
- [9]刘宝洲.周期图法功率谱估计及其改进算法的研究[J].电子测量技术,2020,43(5):76-79.
- [10]金锋,肖宏,崔旭浩.基于 Burg 法的城市轨道交通快速线路轨道不平顺谱研究[J].铁道学报,2020,42(4):99-106.
- [11]莫小琴.基于最小二乘法的线性与非线性拟合[J].无线互联科技,2019,16(4):128-129.

Study on Track Irregularity Spectrum Characteristics of Speed-up Lines

Fang Jian^{1, 2}, Tu Xiangguo¹, Wang Hongxuan¹, Lei Xiaoyan¹, Lian Songliang³

(1.State Key Laboratory of Performance Monitoring Protecting of Rail Transit Infrastructure,
East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

2.Engineering Research Center of Railway Environment Vibration and Noise of the
Ministry of Education, East China Jiao Tong University, Nanchang 330013, China;

3.Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education,
Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: This paper studied the estimation method of track irregularity spectrum of the speed raising line in China and put forward the track irregularity spectrum of the speed raising line in our country. In order to improve the accuracy of power spectrum, linear interpolation was used to eliminate outliers, and EMD mode decomposition method was used to eliminate trend items and filter them. Based on the maximum entropy method and Welch method, the track irregularity spectra of the speed-up lines were obtained, and the characteristics of track irregularity spectra in different months were compared and analyzed. The nonlinear least square method was used to fit the track irregularity spectra expressions and fitting parameters of the speed-up lines. The results show that the resolution and accuracy of track irregularity spectra obtained by Welch method and maximum entropy method are better than Welch method. By comparing the three fitting functions based on the nonlinear least square method, the nlinfit function can better fit the track irregularity spectrum of the speed-raising line, and the fitting parameters of track spectrum of the speed-raising line are proposed, which can provide reference for the maintenance and optimization design of the speed-raising line.

Key words: speed up rail lines; maximum entropy method; orbit irregularity power spectrum; the fitted power spectrum