

基于不平顺谱的轨道不平顺状态评价与识别探讨

徐磊^{1,2}, 陈宪麦^{1,2}, 张晴¹, 李斌¹

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 高速铁路建造技术国家工程实验室, 湖南 长沙 410075)

摘要:线路不同区段轨道质量参差不齐,但其幅频差异能很好地在各区段轨道不平顺功率谱密度(PSD)曲线上得到表征。基于此,结合沪宁客运专线轨检数据,从识别和评价两个方面对轨道平顺状态进行了研究。基于不同区段轨道谱存在幅频特性差异,提出以200 m为一研究单元,通过分段离散各单元轨道谱幅频信息,以三维图的形式进行不平顺的时频域识别分析。借鉴轨道谱分级管理的方法,同时综合波段整体不平顺和波段内各波长幅值波动程度两项指标,研究并给出了评价各里程单元平顺性的方法,将综合评价后各区段所属不平顺状态等级划分为优秀、良好、合格、失格。

关键词:轨道不平顺功率谱密度;不平顺状态;时频域;识别;评价

中图分类号:U211 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-0373(2012)03-0062-06

0 引言

轨道不平顺是轮轨系统的激扰源,一方面直接影响行车的安全性和平稳性,另一方面由于轨道不平顺激扰引起的动荷载将加速轨道不平顺的发展,从而进一步加大对行车安全性和车辆轨道设备使用寿命的影响^[1]。轨道不平顺功率谱密度(以下简称“轨道谱”,亦称 PSD)即单位频宽内的不平顺的均方值,包含了波长和幅值两方面的信息,是铁路线轨道不平顺检测数据的函数统计,它反映了整段线路轨道不平顺波长和幅值的统计特性。

现阶段,对轨道平顺状态评价的方法主要有3种,即轨道局部不平顺超限评分法、用轨道质量指数(Track Quality Index,简称 TQI)来评价轨道状态的方法、用能反映轨道不平顺幅值和波长的功率谱密度来评价轨道平顺状态的方法。目前我国轨道质量状态主要采用局部不平顺超限评分和轨道质量指数来评定。欧美及日本等许多国家的铁路用轨道谱诊断和综合评判铁路轨道的平顺性^[2-5]。欧洲高速铁路采用轨道谱反演曲线的上、下限界谱,对轨道的平顺性进行评判。近年来,国内基于轨道谱评判轨道平顺性也做了许多有意义的工作^[6-7]。进一步研究用轨道谱实时评判和识别一定单元长度内轨道不平顺的幅值和波长特征,用随波长不同的轨道谱值,同时结合里程信息,识别线路各区段在各波长范围的不平顺性,并针对性的评判轨道平顺性在各波段的优良、合格、失格等级,将更科学的评判轨道不平顺状态,进一步提高轨道不平顺识别和评判水平^[6]。

基于轨道谱能良好的表征不平顺波幅信息,将从空间域的角度就轨道不平顺识别与评判进行研究。

1 基于轨道谱的线路不平顺识别与评判

以往对轨道谱分析是以整条线路平均轨道谱为研究对象,利用谱线特征区分机车车辆的激励环境,分析、诊断轨道病害,而没有波长、幅值及里程信息的有机整合。以下通过划分研究单元(即里程单元)来表征空间域信息,同时对各里程单元轨道不平顺谱进行频段分解,用频段内各波长谱值表征轨道平顺性优劣,以此实现各波长平顺性的空间域识别。同时,以频段内谱面积值平方根(SAV)代表波段整体不平

收稿日期:2012-04-09

作者简介:徐磊 男 1988年出生 硕士研究生

基金项目:国家自然科学基金(51008315)

顺,频段内各波长谱值标准差(SSD)代表波长幅值的波动程度,结合两个方面对轨道平顺性进行综合评价。研究分析表明,使用轨道谱离散方法不仅能准确识别各波长不平顺大小沿线路里程的分布情况,而且能为各里程单元平顺性作出综合评价,为高效管理养护轨道不平顺提供了重要的科学依据。不过,轨道谱作为一种数值处理方法,必须依赖测试数据的真实性、可靠性和完备性,才能付诸工程实践^[8]。

1.1 主要步骤

以沪宁客运专线2010年10月200 km路段的轨检数据为研究对象,200 m为一研究单元,则分析序号为: $T_i = 1, 2, 3, \dots, 1\,000$ 。

其主要步骤如下:

(1)对沪宁客运专线200 km轨检数据进行分组,借鉴轨道不平顺质量指数(TQI)的分析长度,以200 m为一研究单元(即里程单元),在计算出各组轨道不平顺功率谱的基础上,对1 000组不平顺谱的波长及相应幅值离散化处理。

(2)通过分析沪宁客运专线左高低轨道谱,如图1所示,发现在31 m波长以上,谱值呈下降趋势,呈负相关性,与波长增大,不平顺幅值普遍增大的统计规律相违背。为不影响分析精度,截取0.033~1 m⁻¹频率范围(相应波长1~30 m)内的

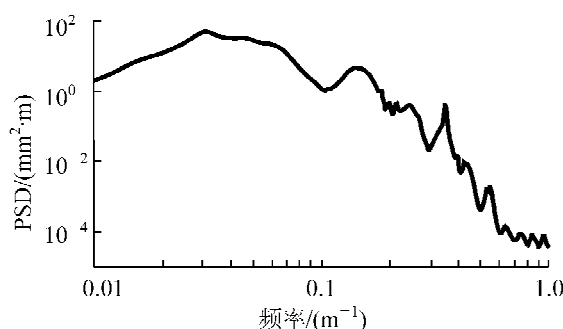


图1 沪宁客运专线左高低不平顺谱

轨道不平顺谱进行分析。由于轨道不平顺幅值在长波部分较大,有的甚至是中、短波长的几十倍,为更好地显示不平顺幅值变化,采用分频段显示里程单元轨道谱值的方法。同时,结合沪宁客运专线左高低轨道谱线分布特征,将频率划分为6个频率区段,即相应波长范围:1~1.5 m、1.5~2 m、2~5 m、5~10 m、10~20 m、20~30 m。将1 000组轨道谱6个频率区段对应的频率点及其谱值离散至各研究单元,即将波长和幅值信息反馈至各里程单元。

(3)以各研究单元轨道不平顺功率谱值为分析信号,利用复合梯形公式进行积分^[9]得到各区段单项不平顺在各频段的SAV值,以 $E_{x,j}$ 表示,通过 $E_{x,j}$ 的矩阵化可实现不平顺波长、幅值、里程信息的有机整合。

$$E_{x,j} = \begin{bmatrix} E_{1,1} & \cdots & E_{1,6} \\ E_{2,1} & \cdots & E_{2,6} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ E_{m,1} & \cdots & E_{m,6} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, $x = 1, 2, \dots, 7$ 为各单项不平顺; $j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ 为分解频段; $m = 1, 2, \dots, 1\,000$ 为研究单元总数。各频率点代表相应的频率,频段内频率值为线性分布。

(4)对1 000个里程单元进行频段轨道谱值谱下面积开方和频率点谱值标准差化处理,以谱下面积值平方根(SAV)代表相应波段范围的整体不平顺,谱值标准差(SSD)代表波段内各波长幅值波动程度。

(5)统计SAV、SSD不同频段内处在不同平顺性等级的里程单元,综合各里程单元的SAV、SSD等级,做出评价并对平顺性较差的里程单元进行波长和幅值分析,找出最不利特征波长,针对性采取维修措施。

1.2 基于轨道谱的平顺性识别

图2为沪宁线左高低不平顺谱值在某些频段不同频率点离散后在里程单元的不平顺谱值分布。

如图2所示,结合图1轨道谱进行分析,可以发现轨道谱值三维分布图很好地表征了轨道不平顺沿里程单元的波幅特征。如图2(b)所示波长5~10 m谱值分布,其不平顺幅值主要集中在频率点4~19(对应波长6~8.8 m)之间,对于凸形峰值所在7 m波长,结合不平顺谱数据,其不平顺幅值较大处主要分布在里程单元80、610、675、683、716(对应里程15.8~16 km、121.8~122 km、134.8~135 km、136.4~136.6 km、143~143.2 km)等处。分析图2(c)2~5 m波段谱值分布图,可以发现不同幅值大小的尖峰波段,特

别在波长 2.8 m、4 m、4.7 m、5 m,对应频率点 1、3、13、39,存在尖峰幅值,与不平顺谱特征波长相对应。同时,可以发现,三维图中有些波长幅值没有很好的表现出来,可采用缩小频段范围的方法;针对有些频段原始频率点较少的情形,可采用插值方法,如图 2(a)所示。对于其他单项轨道不平顺可以照此法,实现空间域各波长平顺性识别。

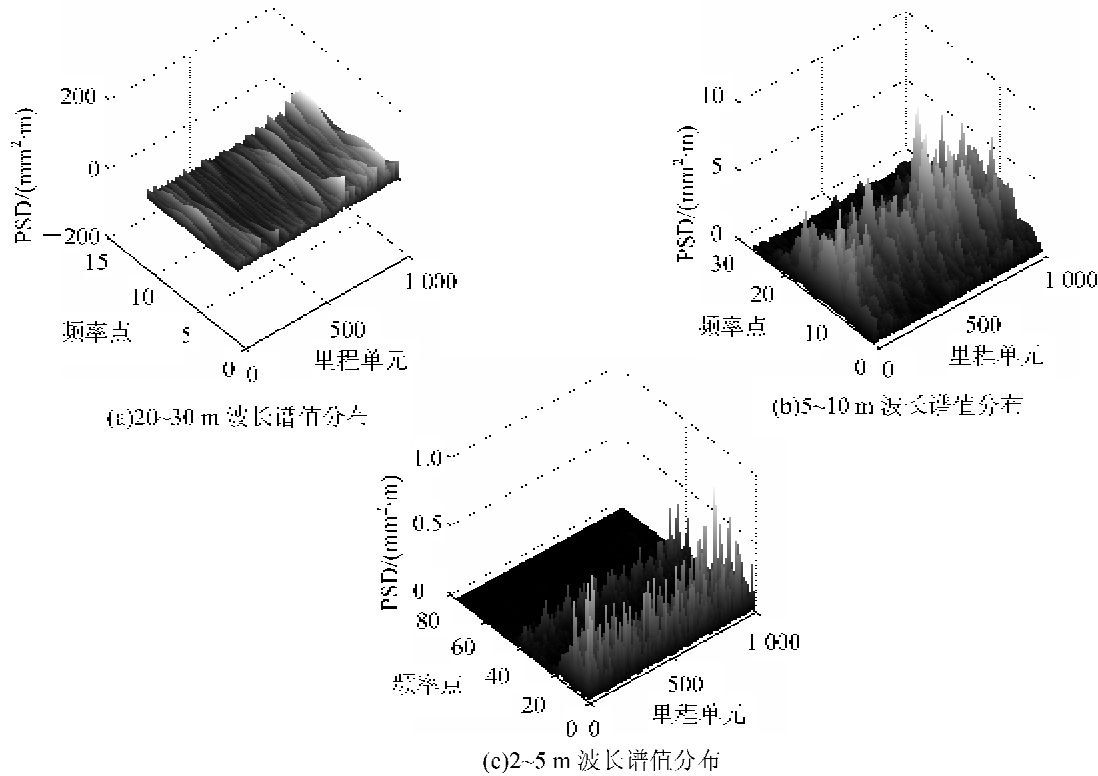


图 2 沪宁线左高低各频段不平顺谱值分布

1.3 不平顺评价方法研究

以沪宁客运专线 20 ~ 30 m 波段谱值分布为例进行分析,综合考虑代表波段整体不平顺的谱面积平方根值(SAV)和代表波段内不同波长幅值波动情况的谱值标准差(SSD),编程统计落入各等级区段的里程单元,然后进行评价分析。

评价步骤及方法如下:

(1)SAV 和 SSD 以各自平均值为基准,在其最大值与平均值、最小值与平均值之间划分 U1、U2、U3、U4 和 D1、D2、D3、D4 等 8 个平顺性等级。SAV 平均值、最大值、最小值分别表示为 SAV_mid、SAV_max、SAV_min,SSD 平均值、最大值、最小值分别表示为 SSD_mid、SSD_max、SSD_min。各等级划分方法见表 1。SSD 等级划分同此法。U1、U2、U3、U4 分别定义为一般、合格、失格、极差,D1、D2、D3、D4 分别定义为良好、较好、优秀、极好。如表 2、表 3 为单项 20 ~ 30 m 波段 SAV、SSD 评价方法。

表 1 等级-界限值范围对照表

等级	界限值范围
U1	SAV_mid ~ 0.2(SAV_max - SAV_mid)
U2	0.2(SAV_max - SAV_mid) ~ 0.5(SAV_max - SAV_mid)
U3	0.5(SAV_max - SAV_mid) ~ 0.8(SAV_max - SAV_mid)
U4	0.8(SAV_max - SAV_mid) 以上
D1	SAV_mid ~ 0.2(SAV_mid - SAV_min)
D2	0.2(SAV_mid - SAV_min) ~ 0.5(SAV_mid - SAV_min)
D3	0.5(SAV_mid - SAV_min) ~ 0.8(SAV_mid - SAV_min)
D4	0.8(SAV_mid - SAV_min) 以下

表2 20~30 m 波长范围沪宁客运专线各区段谱面积开方值-轨道不平顺等级对照表

mm

轨道不平顺	轨距	左轨向	右轨向	左高低	右高低	水平	扭曲
极好	$\leq 0.289\ 8$	$\leq 0.481\ 7$	$\leq 0.488\ 8$	$\leq 0.459\ 2$	$\leq 0.459\ 4$	$\leq 0.138\ 4$	$\leq 0.205\ 6$
优秀	(0.289 8,0.457 6]	(0.481 7,0.816 2]	(0.488 8,0.808 5]	(0.459 2,0.823 8]	(0.459 4,0.823 2]	(0.138 4,0.247 2]	(0.205 6,0.367 2]
较好	(0.457 6,0.625 4]	(0.816 2,1.150 7]	(0.816 2,1.150 7]	(0.823 8,1.188 4]	(0.823 2,1.187 1]	(0.247 2,0.356 0]	(0.367 2,0.528 8]
良好	(0.625 4,0.737 2]	(1.150 7,1.373 7]	(1.150 7,1.373 7]	(1.188 4,1.431 5]	(1.187 1,1.429 7]	(0.356 0,0.428 6]	(0.528 8,0.636 5]
一般	(0.737 2,1.039 8]	(1.373 7,1.903 1]	(1.341 2,1.918 2]	(1.431 5,2.018 3]	(1.429 7,1.986 2]	(0.428 6,0.570 0]	(0.636 5,0.850 1]
合格	(1.039 8,1.493 7]	(1.903 1,2.697 2]	(1.918 2,2.783 6]	(2.018 3,2.898 4]	(1.986 2,2.820 9]	(0.570 0,0.782 1]	(0.850 1,1.170 5]
失格	(1.493 7,1.947 5]	(2.697 2,3.491 2]	(2.697 2,3.491 2]	(2.898 4,3.778 5]	(2.820 9,3.655 5]	(0.782 1,0.994 2]	(1.170 5,1.490 9]
极差	$> 1.947\ 5$	$> 3.491\ 2$	$> 3.649\ 1$	$> 3.778\ 5$	$> 3.655\ 5$	$> 0.994\ 2$	$> 1.490\ 9$

表3 20~30 m 波长范围沪宁客运专线各区段谱值标准差-轨道平顺等级对照表

mm · m

轨道不平顺	轨距	左轨向	右轨向	左高低	右高低	水平	扭曲
极好	$\leq 0.268\ 7$	$\leq 0.900\ 4$	$\leq 0.822\ 7$	$\leq 1.014\ 7$	$\leq 1.079\ 3$	$\leq 0.086\ 6$	$\leq 0.182\ 8$
优秀	(0.268 7,0.592 9]	(0.900 4,2.049 3]	(0.822 7,1.900 8]	(1.014 7,2.401 5]	(1.079 3,2.463 9]	(0.086 6,0.194 8]	(0.182 8,0.417 5]
较好	(0.592 9,0.917 2]	(2.049 3,3.198 2]	(1.900 8,2.994 9]	(2.401 5,3.788 3]	(2.463 9,3.848 4]	(0.194 8,0.303 0]	(0.417 5,0.652 2]
良好	(0.917 2,1.133 3]	(3.198 2,3.964 2]	(2.994 9,3.719 0]	(3.788 3,4.712 8]	(3.848 4,4.771 5]	(0.303 0,0.375 1]	(0.652 2,0.808 7]
一般	(1.133 3,2.597 8]	(3.964 2,10.188]	(3.719 0,9.385 4]	(4.712 8,11.384]	(4.771 5,12.398]	(0.375 1,0.817 9]	(0.808 7,1.706 2]
合格	(2.597 8,4.794 6]	(10.183 8,19.53]	(9.385 4,17.885]	(9.385 4,17.885]	(12.398 1,23.88]	(0.817 9,1.482 1]	(1.706 2,3.052 6]
失格	(4.794 6,6.991 3]	(19.513 3,28.83]	(17.884 9,26.38]	(21.390 3,31.40]	(23.838 0,35.28]	(1.482 1,2.146 2]	(3.052 6,4.399 0]
极差	$> 6.991\ 3$	$> 28.842\ 7$	$> 26.384\ 4$	$> 31.396\ 8$	$> 35.277\ 9$	$> 2.146\ 2$	$> 4.399\ 0$

(2) 基于波段整体不平顺和波幅波动情况为行车安全、舒适性等都存在一定的影响,建议综合考虑波段整体不平顺和不同波长的幅值波动情况,将里程单元的 SAV 和 SSD 不同等级区用数值表示,以最终平均加权数值代表其综合不平顺性,数值越大,平顺性越差。U1、U2、U3、U4、D1、D2、D3、D4 分别表示为 5、6、7、8、4、3、2、1。如 909 里程单元即位于 SAV 的 U4 区,又位于 SSD 的 U4 区,则其不平顺评价值为 16,为最差的轨道不平顺区段,需要重点维修。

(3) 综合评价方法及评价值,优秀区:2~4;良好区:5~7;合格区:8~14;失格区:15~18。优秀区表明其平顺性优秀,良好区表明其平顺性良好,合格区表明其平顺性一般,失格其表明其平顺性较差。还可以根据各区段的不同评价值,对轨道平顺性进行更细致的评判。如对于优秀区,最优:2,极优:3,较优:4。

对沪宁客运专线 1000 组里程单元进行 SAV 和 SSD 单项统计分析,如图 3 所示。

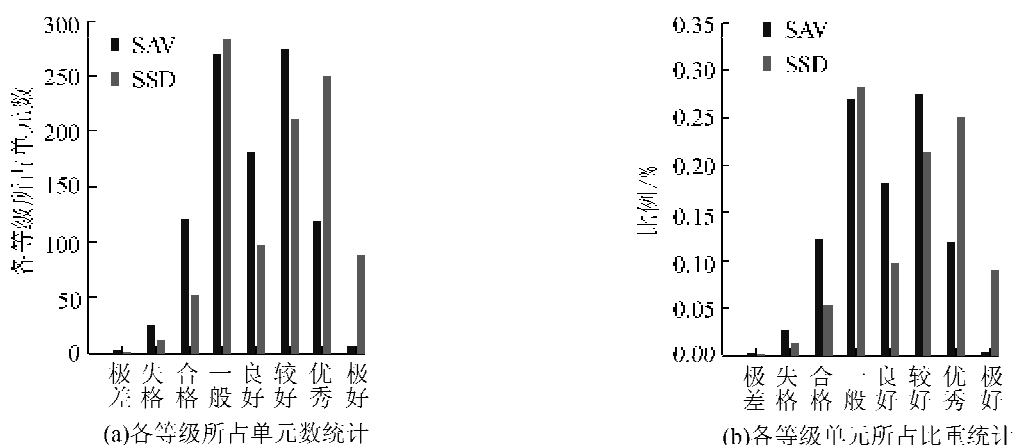


图3 沪宁客运专线左高低 20~30 m 波段 SAV、SSD 单项不平顺各等级统计

从图 3 分析表明,沪宁客运专线左高低 20~30 m 波段整体不平顺状态较好,失格以上单元数所占比例不到 10%,处于较好以上单元数已接近或超过 50%。但同时发现,SAV 和 SSD 同等级单元所占比重往往存在较大差别,如优秀、极好等级区两者比重差异达到 50% 以上,说明线路某段整体平顺状态较好时,其波段内各波长幅值波动程度不一定较小,所以综合考虑 SAV、SSD 等级划分更科学。如图 4 所示为综合

评价分布图。

从图 4 分析发现,进行综合评价后,进一步提高了线路平顺性要求,失格单元数有所上升,优秀单元数有所下降,扩大了需要紧急维修的线路单元范围,有利于保证沪宁客运专线良好的平顺状态。需要指出的是,由于所分析的轨检数据有限,暂只给出了具体的评价方法,此评价方法现阶段较适合于对线路各区段不同波段不平顺状态进行纵向相对评价。随着以后研究的开展,还需不断完善,建立各等级通用评价价值。

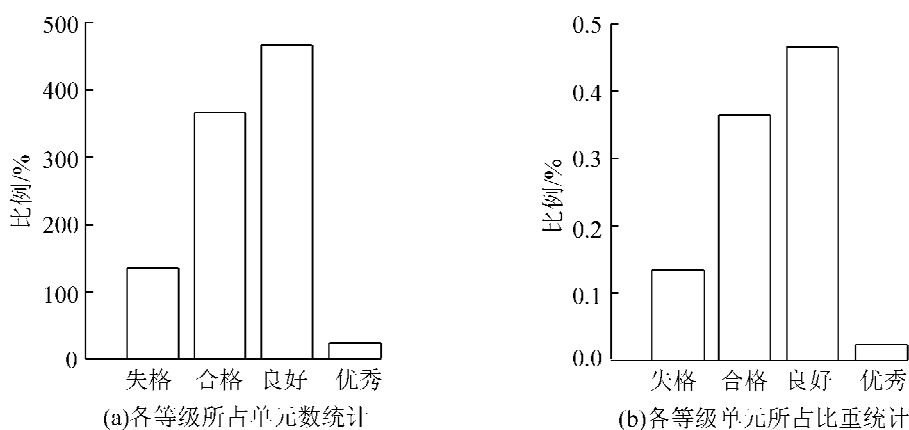


图 4 综合评价后各等级统计

2 结论

轨道不平顺对列车的行车安全性、平稳性、车辆和轨道部件的寿命以及环境噪声等都有重要影响,随着铁路高速化、重载化的不断发展,更加需要全面、合理、科学地对轨道平顺状态进行识别与评估,以保证铁路的安全运营。由于已有的轨道不平顺常用分析方法不能很好的整合时、频域全方位信息。基于轨道谱能比较全面的反映轨道平顺状态,故以各里程单元轨道谱为研究对象,建立了识别各路段不同波长平顺状态的谱值三维图,能精确的反馈沿线各波长段的不平顺信息,识别状态不良的区段。同时,初步探讨了各路段在不同波段的轨道平顺状态评价方法,利用此评定方法,根据轨道不平顺的实际影响,可以科学地评价轨道平顺状态,对指导轨道维修管理,保证高速行车的安全与平稳,具有十分重要的意义。

参 考 文 献

- [1] 陶红军. 遂渝线轨道不平顺统计分析[J]. 四川建筑, 2010, 30(3): 213-216.
- [2] 罗林, 张格明, 吴旺青, 等. 轮轨系统轨道平顺状态的控制[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2006.
- [3] 佐藤吉彦. 新轨道力学[M]. 徐涌, 译. 北京: 中国铁道出版社, 2001.
- [4] 德国联邦铁路慕尼黑研究中心. 城间特快列车 ICE 技术任务书[M]. 周本宽, 译. 成都: 西南交通大学出版, 1993.
- [5] 王福天. 车辆系统动力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1994.
- [6] 陈宪麦, 王澜, 陶夏新, 等. 我国干线铁路通用轨道谱的研究[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(3): 73-77.
- [7] 陈宪麦, 杨凤春, 吴旺青, 等. 秦沈客运专线轨道谱评判方法研究[J]. 铁道学报, 2006, 28(4): 84-88.
- [8] 肖本林, 郑建强, 邓友生. 基于小波包分析的结构损伤识别研究进展[J]. 公路工程, 2011, 36(1): 36-40.
- [9] 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.

Evaluation and Identification Discussion of Track Irregularity State Based on Irregularity Spectrum

Xu Lei^{1,2}, Chen Xianmai^{1,2}, Zhang Qing¹, Li Bin¹

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;

2. National Engineering Laboratory for High Speed Railway Construction, Changsha 410075, China)

Abstract: The railway quality of different sections on the line is uneven, and its amplitude-frequency differences can get good characterization through each section's rail irregularities power spectral density (PSD) curve. Based on these, combined with the track inspection data of Shanghai-Nanjing Dedicated Railway, we did a research on the track smooth state from two aspects including identification and evaluation. Based on the existence of amplitude-frequency characteristic differences at different sections' track spectra, with 200 m for a research unit proposed, and via dispersing the amplitude-frequency message at different frequency band of each unit's track spectrum, we can conduct the identification and analysis of the track irregularity at the time-frequency domain in the form of three-dimensional diagram. Borrowing idea from the classification method of track irregularity management, through a comprehensive research of two indicators of the overall irregularity of the waveband and the fluctuation extent of each wavelength-amplitude at waveband, the method of evaluating the smooth state of each mileage unit was put forward, which divides the unit zone's irregularity state into the rank of outstanding, good, qualified and disqualified after comprehensive evaluation.

Key words: track Irregularity spectrum density; irregularity state; time-frequency domain; identification; evaluation

(责任编辑 车轩玉)

~~~~~  
(上接第32页)

## 参 考 文 献

- [1] 张晓玲. 浅谈弹性地基梁的计算方法[J]. 山西建筑, 2008(5): 150-151.
- [2] 黄义, 何其社. 弹性地基上的梁、板、壳[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [3] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [4] 王勖成, 邵敏. 有限元法基本原理和数值方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- [5] 蔡四维. 弹性地基梁的新解法[J]. 土木工程学报, 1959, 6(5): 67-68.
- [6] 热莫奇金辛尼曾. 弹性地基上基础梁和板的实用算法[M]. 北京: 中国工业出版社, 1959.

## Finite Element Analysis of Common Shallow Foundation

Li Lei<sup>1</sup>, Wang Xinmin<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Academy of Health Diagnosis and Control for Large Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** This paper mainly discusses how to use finite element method to realize large complex analysis of foundation problems in the same condition as the normative method or standard frame. Through the discussion of simple effective simulation of the soil based on E. Winkler foundation model calculation, the method of the shallow foundation calculation and analysis through ANSYS is studied. Finally, using the numerical example, this paper introduces the common foundation in various forms, and the application of the algorithm and compares it with the result from normative method. The result of this paper has certain theoretical meaning and application value in engineering practice.

**Key words:** shallow foundation; finite element analysis; ANSYS; elastic foundation beam

(责任编辑 车轩玉)