

客运专线轨道不平顺功率谱分析

陈秀方, 金守华, 曾华亮

(中南大学土木建筑学院, 长沙 410075)

[摘要] 轨道不平顺是车辆振动的主要激励源,也是限制列车最高运行速度的主要因素之一,直接关系到列车运行的平稳性、安全性和舒适性。文章以秦沈客运专线轨检车实测轨道不平顺数据为统计样本,基于样本平稳性检验,采用 FFT 方法进行样本空间的谱估计,并由 MATLAB 编程得到轨道不平顺谱密度。基于轨道不平顺样本的总体平均,得出了谱密度频率平滑曲线和谱密度曲线拟合表达式,并与我国重载提速干线的谱密度曲线进行了对比分析。在此基础上,对秦沈客运专线的轨道状态进行了评估。

[关键词] 客运专线;轨道不平顺;功率谱密度;平稳性检验

[中图分类号] U211.3 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2008)04-0056-04

1 前言

轨道不平顺是指轨道几何形状及其空间位置的偏差,主要包括轨道的方向、高低、水平、轨距等不平顺。轨道不平顺的形成和发展是诸多随机性因素共同作用的结果。对于新建客运专线,这些因素主要包括:钢轨的初始平直性,线路施工偏差,道床与路基弹性不均匀性以及路基的不均匀沉降等^[1]。轨道不平顺是机车、车辆振动的主要激励源,直接关系到列车运行的平稳性、安全性和舒适性,是限制列车最高运行速度的主要因素之一。世界各国广泛采用功率谱密度来描述轨道不平顺状态,UIC ORE C152, D161 等专门委员会对欧洲许多铁路的轨道不平顺都进行了功率谱分析。20 世纪 80 年代,美国铁路依据 FRA 轨道安全标准所划分的 6 个速度和轨道状态级别,制定了轨道不平顺功率谱。为适应高速铁路发展的需要,欧洲铁路提出了用于高速机车车辆设计和高速线路管理的“欧洲高速铁路轨道谱”。

我国对轨道不平顺谱密度进行了长期的试验研究^[2,3],但对于新建客运专线铁路轨道不平顺谱密

度尚缺乏系统成果,文章以秦沈客运专线在线检测轨道不平顺数据为样本,研究分析客运专线轨道不平顺谱密度,得出了新建客运专线轨道不平顺谱密度及其拟合曲线,并与既有运营铁路轨道不平顺谱密度进行比较,为客运专线铁路工程设计、施工及管理提供基本参数。

2 样本的来源及平稳性检验

2.1 样本的来源

文章分析采用的样本来源于轨道检查车 2002 年 11 月检测秦沈客运专线右线轨道不平顺的数据采样,检测速度控制在 200~250 km/h,采样间距为 0.25 m,总长约 33 km。

2.2 样本的平稳性检验

随机信号的平稳性检验在信号检验中最为重要,其目的是检查被测随机信号的时间历程是否属于平稳随机过程。文章用以进行谱密度计算的 FFT 法,及其他许多(如最大熵等)方法都是建立在平稳性假定基础之上的,其优点是简单实用,并能满足工程精度要求。

文章采用轮次检验法检验轨道不平顺数据的平

[收稿日期] 2007-03-16

[基金项目] 铁道部科技发展计划项目(2000G49-C1)

[作者简介] 陈秀方(1939-),男,江西兴国县人,教授,博士生导师,铁道部秦沈客运专线科技攻关专家组成员;金守华(1963-),男,安徽全椒县人,中南大学土木建筑学院博士研究生

稳性^[3]。实验研究表明^[4~6],多数轨道不平顺样本记录具有平稳性或弱平稳特征,可以近似作为平稳随机过程来处理。文章对 12 个样本分别利用轮次检验法进行了检验,所有样本均具有平稳随机过程的特征,可视为平稳随机过程。

3 轨道不平顺功率谱分析

3.1 总体平均和频率平滑

在工程中常用总体平均和频率平滑方法来降低样本估计的随机误差。ISO/DIS 8608 采用时间平均作为总体平均,就是对 N 个独立的样本作出功率谱密度估计,然后在谱分量的各个频率上计算 N 个估计的平均。文章将整个样本空间划分为 12 个独立的样本,每个样本所包含的离散数据点为 2 048 个。对每个样本分别作功率谱密度估计,然后在整个样本空间上作 12 次总体平均来降低估计误差。

频率平滑是对估计中若干个相邻的谱分量作平均,文章采用倍频程(即变带宽)频率平滑。ISO/DIS 8608 对各倍频程频率平滑的空间频率区间划分作了规定,如表 1 所示。不同倍频程参数见表 2。

表 1 倍频程频率平滑的空间频率区间划分

Table 1 Frequency interval division of octave frequency smoothness

频率平滑计算的倍频程	倍频程	1/3 倍频程	1/12 倍频程
空间频率区间/ m^{-1}	最低频 ~ 0.031 2	最后一个倍频程 ~ 0.25	其余 ~ 最高频

表 3 提速干线轨道中心线轨道谱的拟合曲线特征参数

Table 3 Characteristic parameters of fitting curves for PSD on speed-up main railway lines

特征参数	A	B	C	D	E	F	G
高低	0.665 0	-1.435 7	0.573 7	0.813 8	1.912 3	-0.123 4	0.006 3
轨向	0.705 2	1.625 3	0.715 1	-2.597 7	3.712 8	-0.269 1	0.011 2

秦沈客运专线轨道高低、方向不平顺功率谱密度如图 1 所示。从图 1 中可以看出,秦沈客运专线轨道高低和方向不平顺包含许多不同幅值和波长的谐波成分,波长范围较宽,包含有 0.5 ~ 100 m 波长的不平顺;谱曲线连续变化,在高低不平顺谱图中可看到,在波长 0.5 ~ 1 m 范围含有明显的周期性不平顺,这与钢轨接头焊接不良、轨枕间隔弹性不均等综合因素有关;此外,秦沈客运专线轨道不平顺在 2 ~ 3 m 的窄带范围和 25 m 左右波段内尚有较明显的周期性不平顺,其轨道平顺性的改善,有赖于施工

表 2 倍频程参数

Table 2 Octave parameters

	生成倍频程的计算参数		倍频程表的范围和频带数		
	带宽	中心频	倍频程	倍频程	频带数
	比 k	率 n_c	下限	上限	
倍频程	2	$2^{1/2} \cdot n_1$	0.001 4	0.442	5
1/3 倍频程	$2^{1/3}$	$2^{1/3 \cdot 1/2} \cdot n_1$	0.044 2	0.280 6	8
1/12 倍频程	$2^{1/12}$	$2^{1/12 \cdot 1/2} \cdot n_1$	0.272 6	8.234 4	59

注: n_c 表示中心频率, n_c 表示倍频程下限

3.2 秦沈客运专线轨道不平顺功率谱分析

轨道不平顺功率谱可用功率谱图来表示。功率谱图是以空间频率或波长为横坐标、功率谱密度值为纵坐标的连续曲线,它可以明确地展现组成轨道不平顺随机波形中各个波长的成分。从功率谱密度曲线可以看出轨道不平顺所包含的幅值和波长信息。从曲线的高低可以判断轨道的质量状态,曲线位置越低,表示轨道的平顺状态越好。

尽管轨道不平顺的功率谱密度曲线是通过分析大量实测样本得到的统计特征曲线,但一般并不具有特定的解析函数关系。为便于描述和应用,通常采用一个接近谱密度曲线的拟合曲线函数来表示。

文献[1,4]采用如下拟合函数来表达轨道谱特征:

$$S(f) = \frac{A(f^2 + Bf + C)}{f^4 + Df^3 + Ef^2 + Ff + G} \quad (1)$$

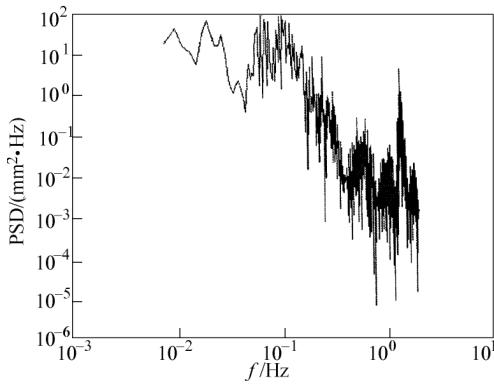
式中, $S(f)$ 为轨道不平顺功率谱; f 为空间频率, m^{-1} ; A, B, C, D, E, F, G 为轨道谱特征参数。

文献[4]给出了我国重载提速干线轨道高低和方向不平顺功率谱密度拟合曲线的参数,如表 3 所示。

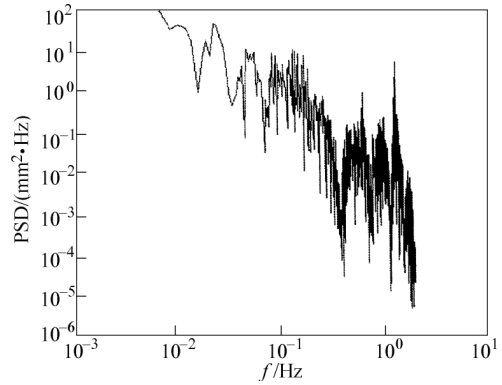
技术水平的进一步提高。

图 2 是对轨道高低不平顺功率谱密度在整个样本空间上作 12 次总体平均,并与我国重载提速干线进行对比结果。通过对比可以发现,该段线路轨道不平顺功率谱密度曲线总的来说低于我国重载提速干线,表明该段线路轨道不平顺总体优于我国重载提速干线。

文章对其总体平均后的高低不平顺谱密度进行了平滑处理,频率平滑的频率区间以表 1 为标准,所选区间如表 4。



(a) 高低不平顺



(b) 方向不平顺

图1 单个样本轨道不平顺功率谱密度图

Fig.1 PSD of track irregularity for single sample

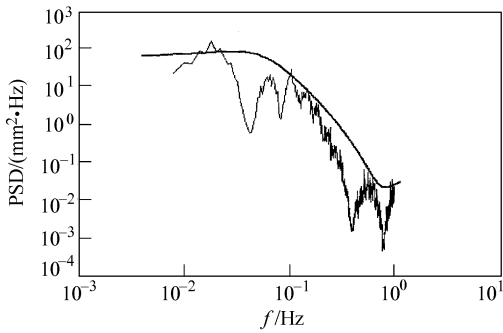


图2 平均12次轨道高低谱曲线与我国提速干线的对比

Fig.2 PSD of track profile by the average of 12 samples compared with speed - up

表4 区间的划分

Table 4 Interval division

频率平滑计算的倍频程	倍频程	1/3 倍频程	1/12 倍频程
空间频率区间/ m^{-1}	0.003 9 ~ 0.031 2	0.049 6 ~ 0.25	0.280 6 ~ 2
频带数	4	8	34

将作平滑处理后得出的谱密度图与重载提速干线的谱曲线进行比较,结果如图3所示。

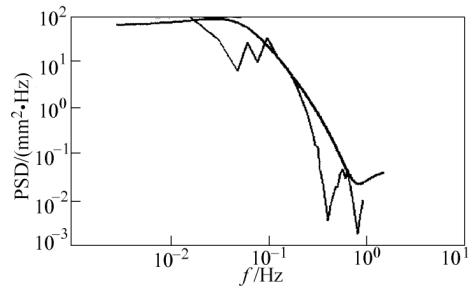


图3 平滑处理后的谱密度图与我国提速干线的对比

Fig.3 Smoothing PSD compared with speed - up main railway lines of China

本文还对该段线路轨道高低和方向不平顺功率谱密度曲线进行了拟合,拟合采用式(1)的函数形式,所得到的参数见表5,拟合曲线如图4所示。

表5 轨道不平顺拟合曲线参数值

Table 5 Parameters of the fitting curves for rack irregularity

特征参数	A	B	C	D	E	F	G
高低	1.713 1	-1.263 4	1.972 3	5.123 7	4.112 1	1.102 5	0.007 9
方向	1.315 7	-3.775 2	2.884 6	4.332 1	5.989 1	0.998 6	0.009

4 结语

由轨道不平顺谱密度图分析可得出下列结论。

1)秦沈客运专线轨道不平顺包含有诸多的谐波成分,0.5 ~ 100 m 波长的不平顺都有出现,波长

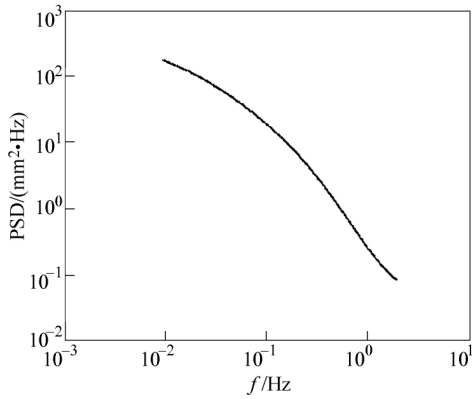
范围较宽;

2)轨道谱曲线连续变化,在高低不平顺谱密度图中可看到,在波长0.5 ~ 1 m 范围内含有明显的周期性不平顺,与钢轨接头焊接不良、轨枕间隔弹性不均等综合因素有密切关系;

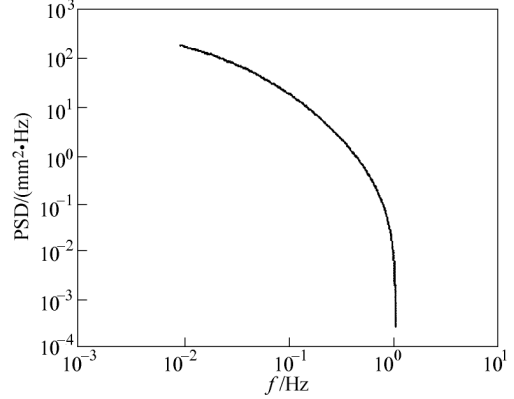
3)在不平顺谱密度图中可看到,在2 ~ 3 m

的窄带范围内有较明显的凸形峰,表明钢轨本身

在轧制过程中可能存在有周期性不平顺。



(a) 高低不平顺



(b) 方向不平顺

图4 轨道不平顺功率谱密度拟合曲线

Fig.4 Fitting curves of PSD for rack irregularity

4)从谱密度图中可以看到含有与25 m轨长相关的复杂周期波的尖峰谱线,表明其轨道结构和施工技术水平还有待提高;

5)秦沈客运专线轨道平顺状态总体优于我国重载提速干线,但在较短波段内周期性不平顺比较明显,且幅值较大;

6)对秦沈客运专线轨道不平顺分析所得出的轨道不平顺谱密度拟合曲线,是高速铁路安全性、平稳性和舒适性评估的重要技术参数。

以上研究成果可为制订客运专线轨道设计、施工、管理以及钢轨的生产与焊接等工程标准提供依据,具有重要的工程实用意义。

参考文献

- [1] 陈秀方. 轨道工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005
- [2] 李秋义. 高速铁路无缝线路动力稳定性概率分析理论研究[D]. 长沙: 中南大学, 2003
- [3] 赵济海, 王哲人, 关朝露. 路面不平度的测量、分析与应用[M]. 北京理工大学出版社, 2000
- [4] 罗林, 魏世斌. 我国干线轨道不平顺功率谱的研究[M]. 北京: 铁道部科学研究院, 1999
- [5] Otnes R K, Enochson L. Digital Time Series Analysis[M]. John Wiley and Sons, Inc., 1982
- [6] 胡津亚, 曾三元. 现代随机振动[M]. 中国铁道出版社, 1989

(下转 83 页)