

ICS 45.020
S 04

TB

中华人民共和国铁道行业标准

TB/T 3352—2014

高速铁路无砟轨道不平顺谱

PSD of ballastless track irregularities of high-speed railway

2014-10-30 发布

2015-05-01 实施

国家铁路局 发布

目 次

前 言 II

1 范 围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 轨道不平顺谱 1

附录 A(资料性附录) 高速铁路实测无砟轨道不平顺谱及消峰处理图 3

附录 B(资料性附录) 高速铁路实测无砟轨道不平顺谱及拟合谱图 5

附录 C(资料性附录) 高速铁路无砟轨道不平顺谱计算方法 7

附录 D(资料性附录) 轨道不平顺谱计算误差分析 9

附录 E(资料性附录) 轨道周期性不平顺描述 11

TB/T 3352—2014

前 言

本标准根据 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。
本标准由铁道部标准计量研究所归口。
本标准起草单位：中国铁道科学研究院基础设施检测研究所、西南交通大学。
本标准主要起草人：康 熊、翟婉明、刘秀波、黎国清、王卫东、田新宇、陶 凯、陈东生、高建敏。

高速铁路无砟轨道不平顺谱

1 范 围

本标准规定了线路速度 300 km/h ~ 350 km/h 的高速铁路无砟轨道不平顺谱。
本标准适用于线路速度 300 km/h ~ 350 km/h 的高速铁路无砟轨道不平顺谱分析,不适用于波长 2 m 以下轨道短波不平顺分析。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅所注日期的版本适用于本文件;凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。
GB/T 25021—2010 轨道检查车

3 术语和定义

GB/T 25021—2010 确立的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

空间频率 spatial frequency
空间波长的倒数,量纲为 1/m。

3.2

功率谱密度 power spectral density (PSD)
信号在单位频率范围内的有限均方值,分为单边谱和双边谱两种。

3.3

轨道不平顺谱 PSD of track irregularities
轨道不平顺信号的单边功率谱密度,简称轨道谱。

4 轨道不平顺谱

4.1 轨道不平顺谱描述

轨道不平顺谱包括高低、轨向、轨距和水平四种轨道不平顺谱。
轨道不平顺谱采用空间频率的单边功率谱密度描述,主要用于描述轨道不平顺随机部分。轨道不平顺谱量纲为 mm²/(1/m)。
轨道不平顺谱图采用双对数坐标表示。

4.2 轨道不平顺谱空间频率范围

轨道不平顺谱空间频率范围为 0.005 (1/m) ~ 0.5 (1/m),对应的轨道不平顺波长范围为 2 m ~ 200 m。

4.3 轨道不平顺谱拟合预处理

轨道不平顺包含随机性不平顺和周期性不平顺两部分,轨道不平顺谱描述的是轨道随机不平顺特性,轨道不平顺谱拟合时应剔除实测不平顺中周期性谱峰的影响,剔除效果参见附录 A。

4.4 轨道不平顺谱拟合公式

轨道不平顺谱采用幂函数公式(1)进行分段拟合。

$$S(f) = \frac{A}{f^k}$$

.....(1)

式中：
 f ——空间频率；
 A, k ——拟合公式系数。

轨道不平顺平均谱分段拟合公式系数采用约束非线性最小优化方法计算,见表1;分段点空间频率和相应波长采用表1分段拟合公式系数和公式(1)计算,见表2。实测轨道不平顺谱和拟合轨道不平顺谱对比图参见附录B。

表 1 高速铁路无砟轨道不平顺平均谱拟合公式系数

项 目	第 1 段		第 2 段		第 3 段		第 4 段	
	A	k	A	k	A	k	A	k
轨距不平顺	5.497 8E - 02	0.828 2	5.070 1E - 03	1.903 7	1.877 8E - 04	4.594 8	—	—
水平不平顺	3.614 8E - 03	1.727 8	4.368 5E - 02	1.046 1	4.586 7E - 03	2.093 9	—	—
轨向不平顺	3.951 3E - 03	1.867 0	1.104 7E - 02	1.535 4	7.563 3E - 04	2.817 1	—	—
高低不平顺	1.054 4E - 05	3.389 1	3.558 8E - 03	1.927 1	1.978 4E - 02	1.364 3	3.948 8E - 04	3.451 6

表 2 高速铁路无砟轨道不平顺谱分段点空间频率(1/m)及对应波长(m)

项 目	第 1、2 段		第 2、3 段		第 3、4 段	
	空间频率	空间波长	空间频率	空间波长	空间频率	空间波长
轨距不平顺	0.109 0	9.2	0.293 8	3.4	—	—
水平不平顺	0.025 8	38.8	0.116 3	8.6	—	—
轨向不平顺	0.045 0	22.2	0.123 4	8.1	—	—
高低不平顺	0.018 7	53.5	0.047 4	21.1	0.153 3	6.5

轨道不平顺谱满足自由度为 2 的 χ^2 分布,由轨道不平顺平均谱估计百分位数谱的转换系数 C ,见表3。

表 3 轨道不平顺平均谱到百分位数谱的转换系数

百分位数	10.0	20.0	25.0	30.0	50.0	60.0	63.2	70.0	75.0	80.0	90.0
转换系数 C	0.105	0.223	0.288	0.357	0.693	0.916	1.000	1.204	1.386	1.609	2.303

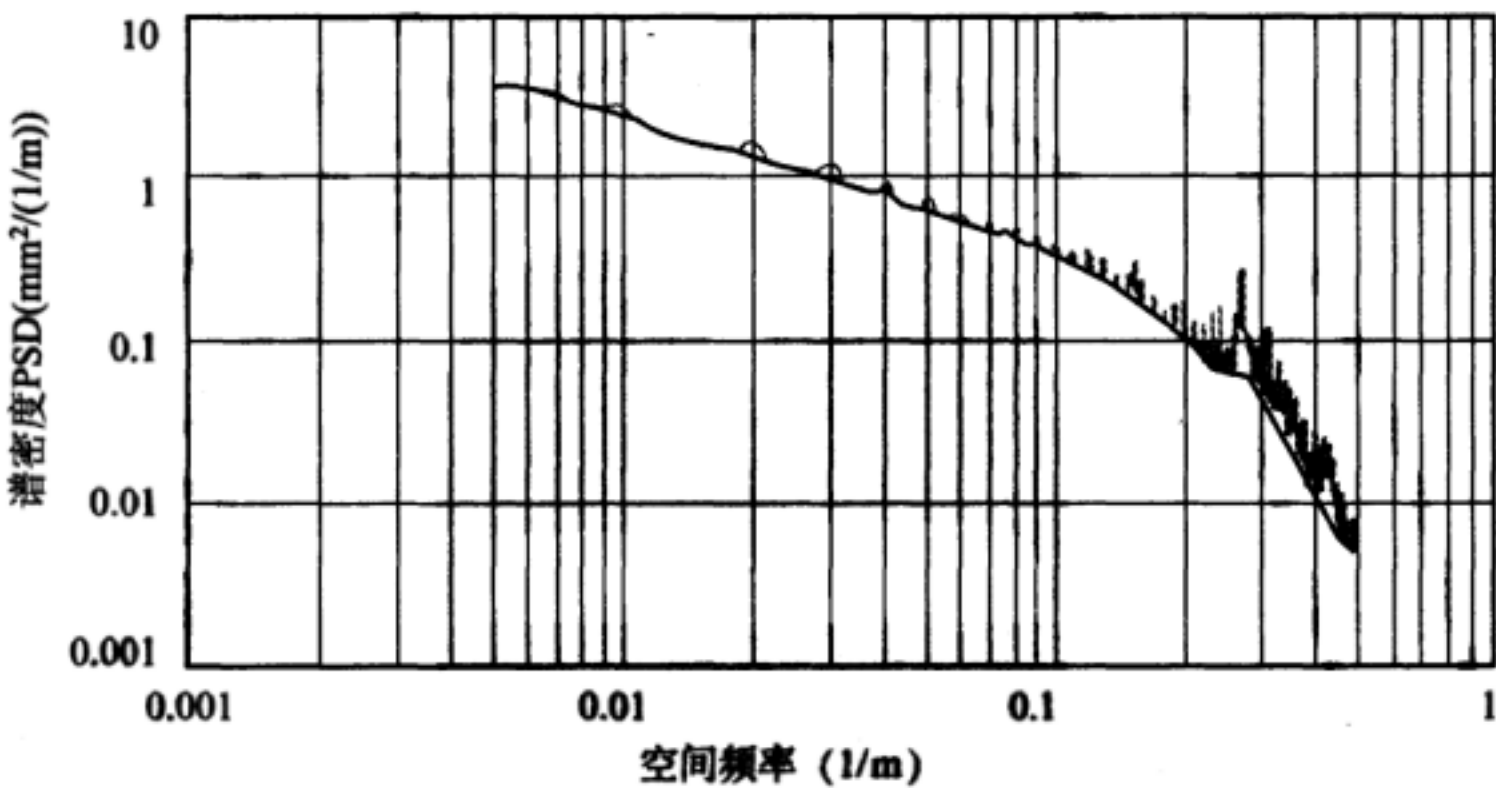
轨道不平顺谱计算方法参见附录 C。
轨道不平顺谱计算误差分析参见附录 D。
轨道周期性不平顺描述参见附录 E。

附录 A
(资料性附录)

高速铁路实测无砟轨道不平顺谱及消峰处理图

A.1 轨距不平顺谱

轨距不平顺谱及消峰处理图参见图 A.1。

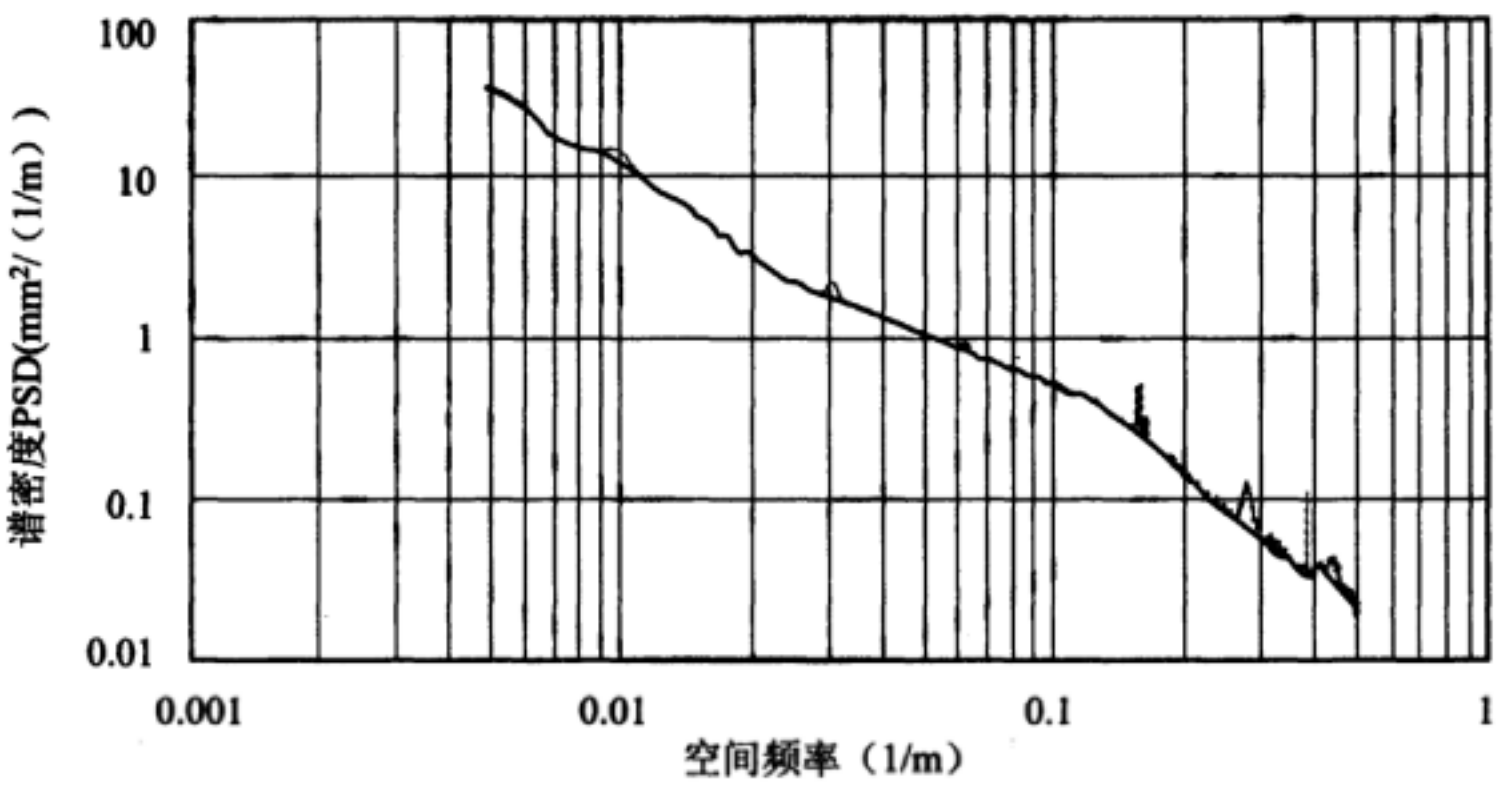


说明：——轨距不平顺谱；
——消峰后轨距不平顺谱。

图 A.1 轨距不平顺谱

A.2 水平不平顺谱

水平不平顺谱及消峰处理图参见图 A.2。

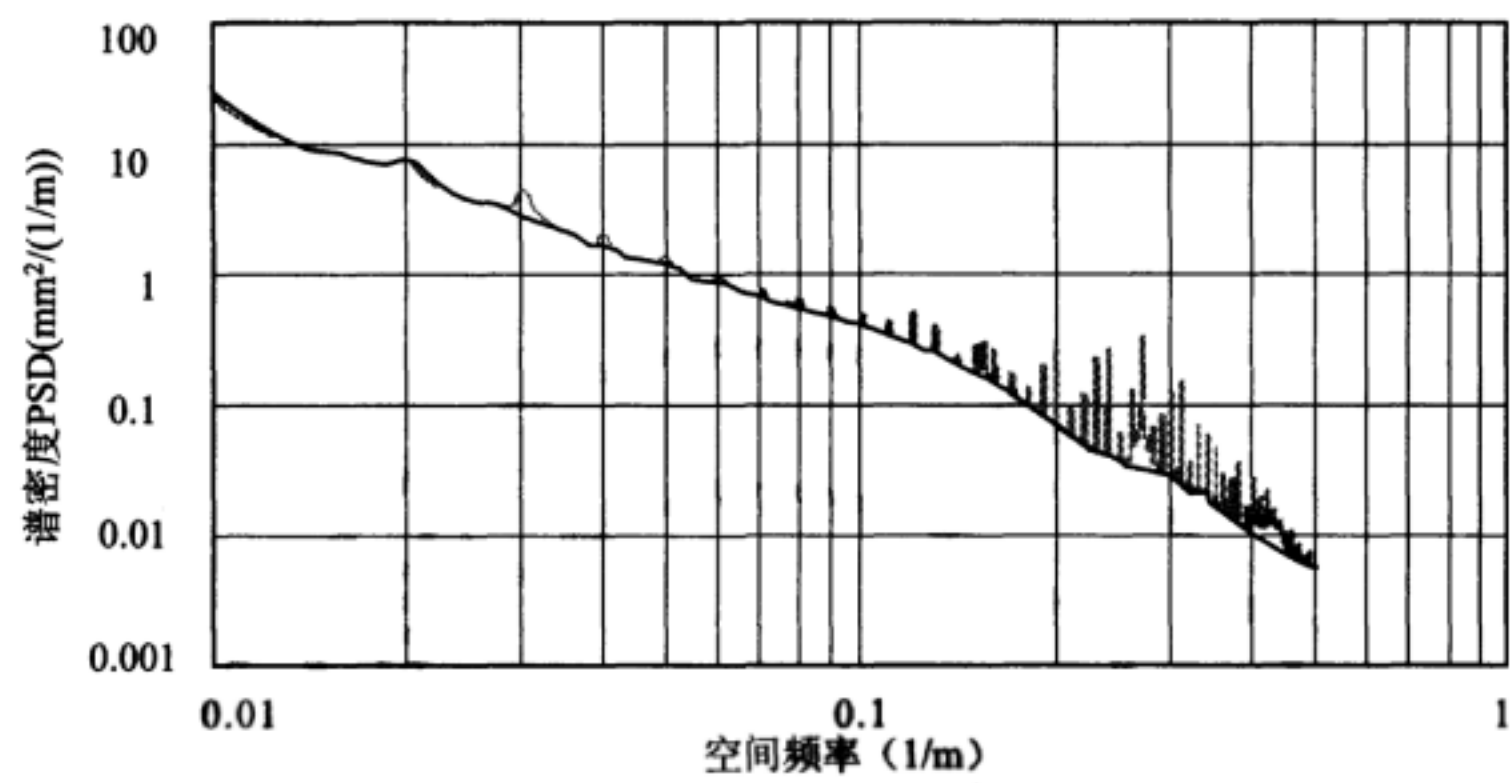


说明：——水平不平顺谱；
——消峰后水平不平顺谱。

图 A.2 水平不平顺谱

A.3 轨向不平顺谱

轨向不平顺谱及消峰处理图参见图 A.3。

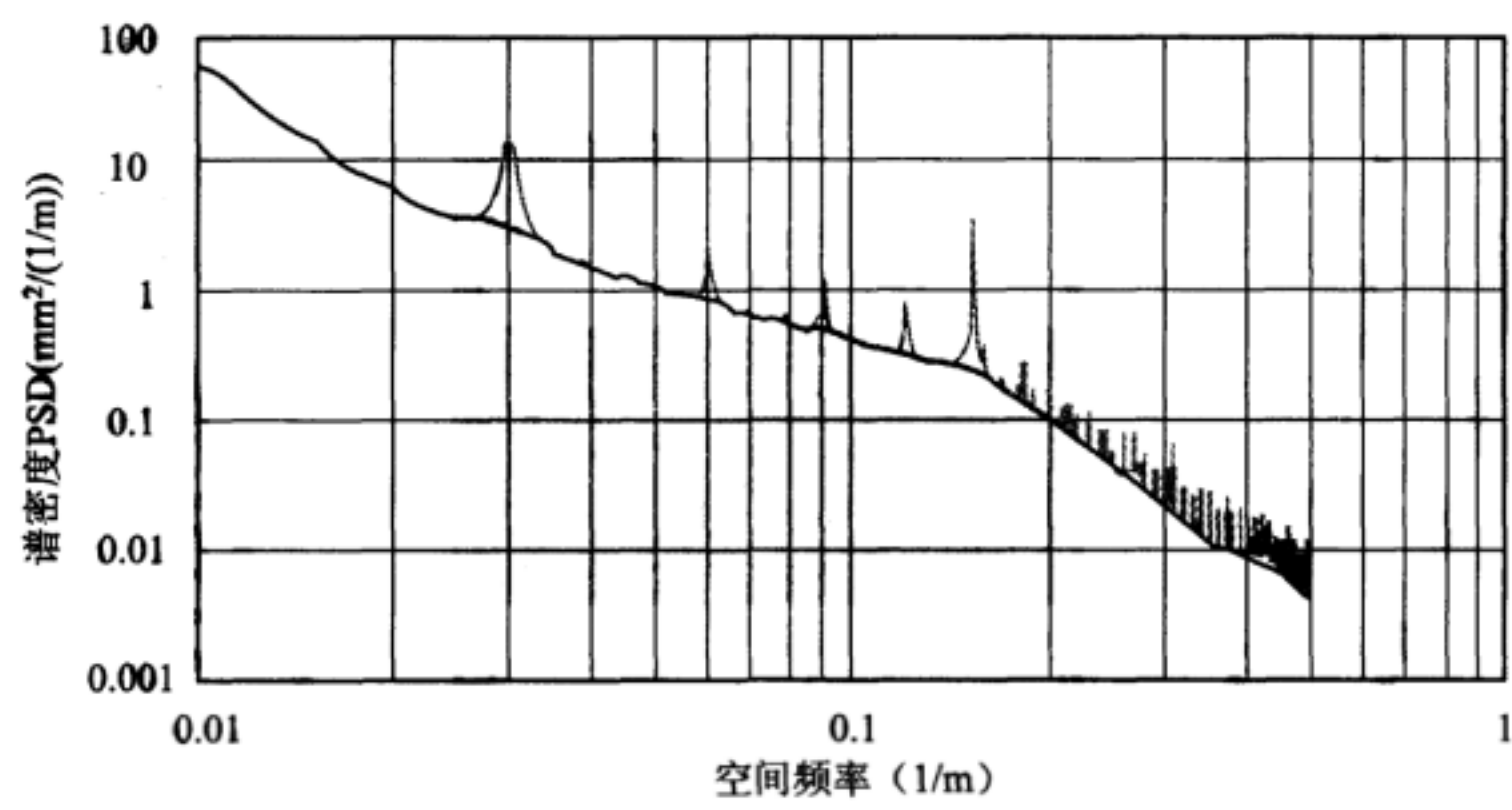


说明：-----轨向不平顺谱；
——消峰后轨向不平顺谱。

图 A.3 轨向不平顺谱

A.4 高低不平顺谱

高低不平顺谱及消峰处理图参见图 A.4。



说明：-----高低不平顺谱；
——消峰后高低不平顺谱。

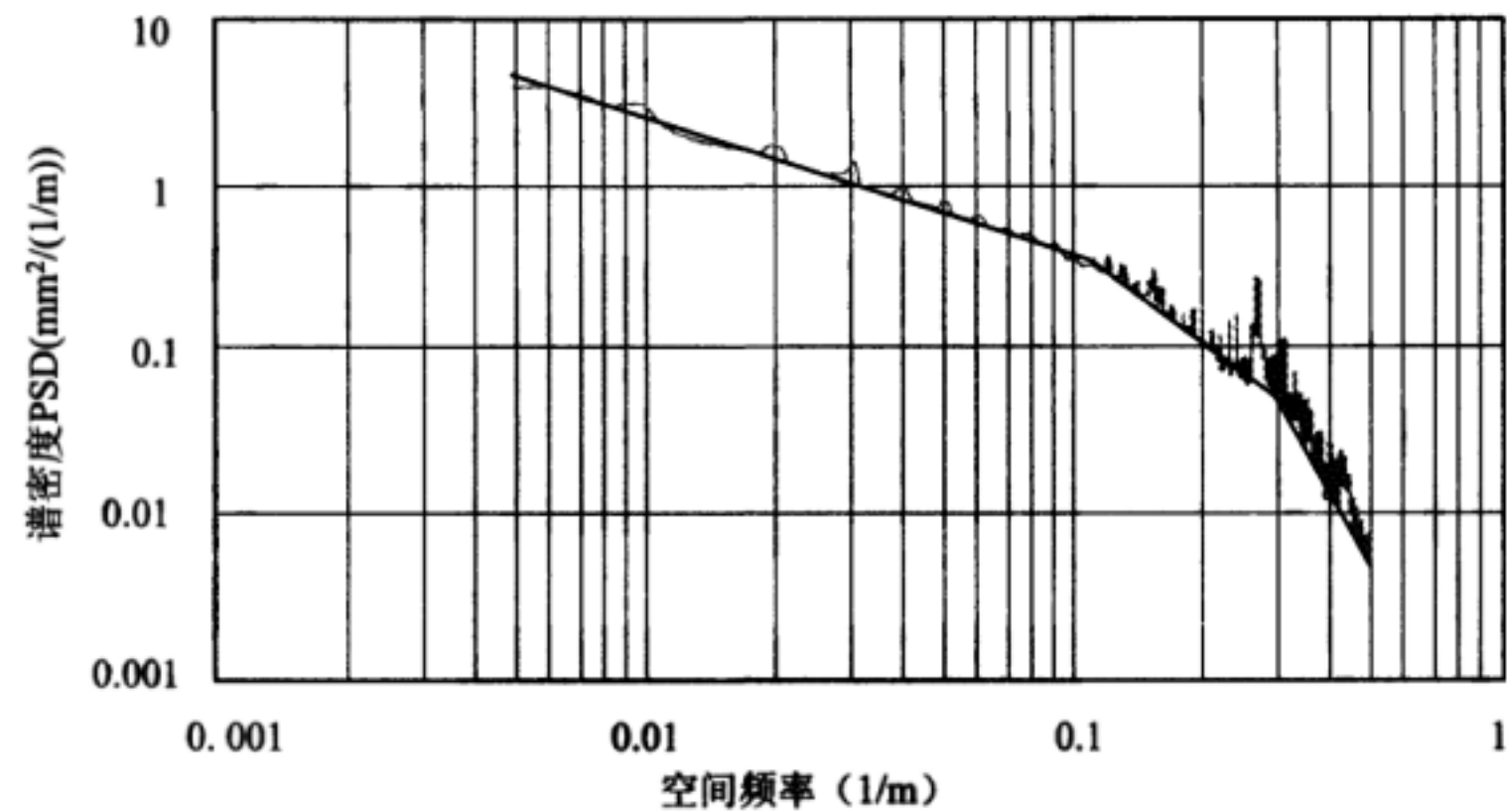
图 A.4 高低不平顺谱

附录 B
(资料性附录)

高速铁路实测无砟轨道不平顺谱及拟合谱图

B.1 轨距不平顺谱

轨距不平顺谱及拟合谱图参见图 B.1。

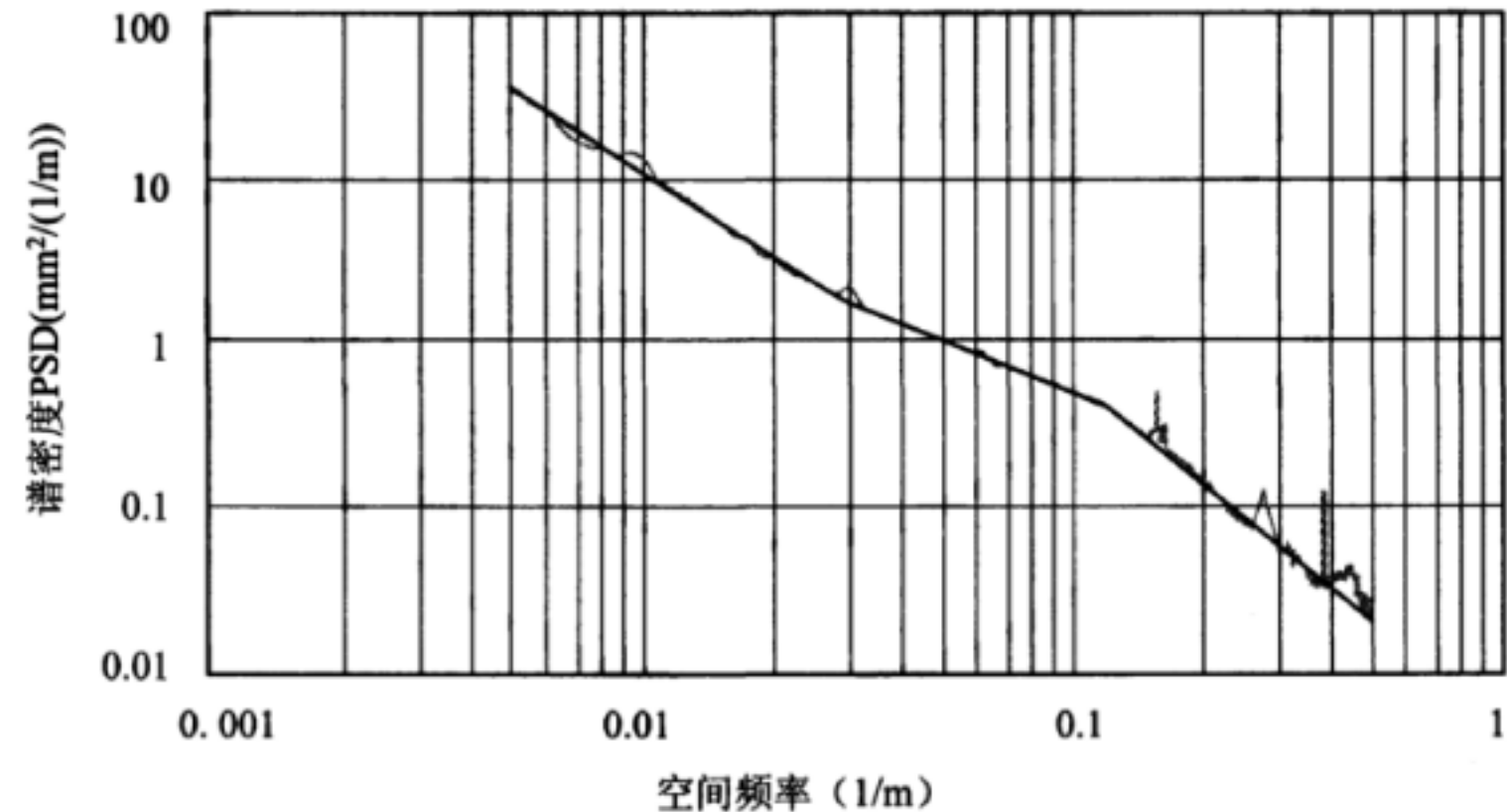


说明：-----轨距不平顺谱；
——拟合轨距不平顺谱。

图 B.1 轨距不平顺谱

B.2 水平不平顺谱

水平不平顺谱及拟合谱图参见图 B.2。

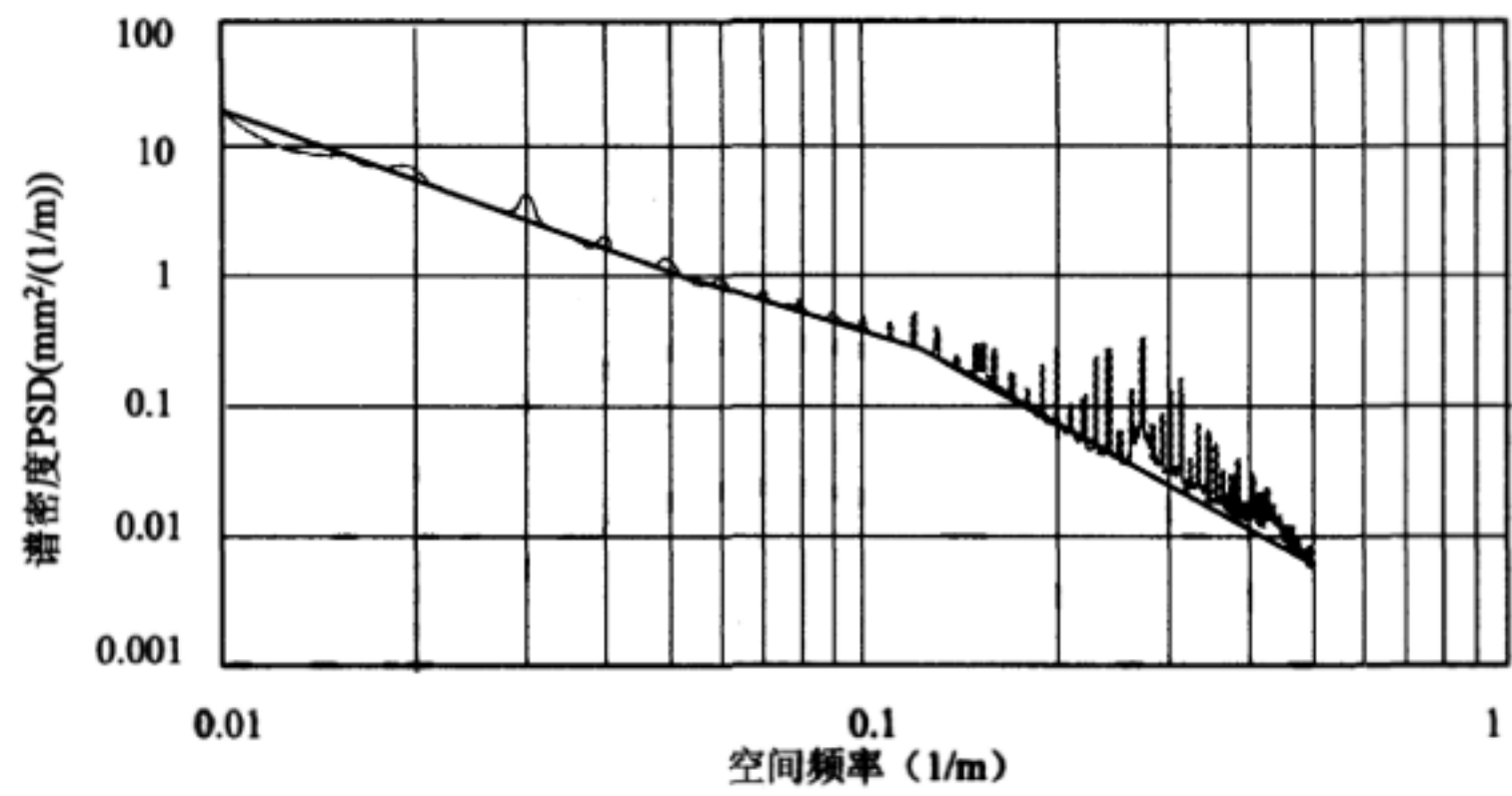


说明：-----水平不平顺谱；
——拟合水平不平顺谱。

图 B.2 水平不平顺谱

B.3 轨向不平顺谱

轨向不平顺谱及拟合谱图参见图 B.3。

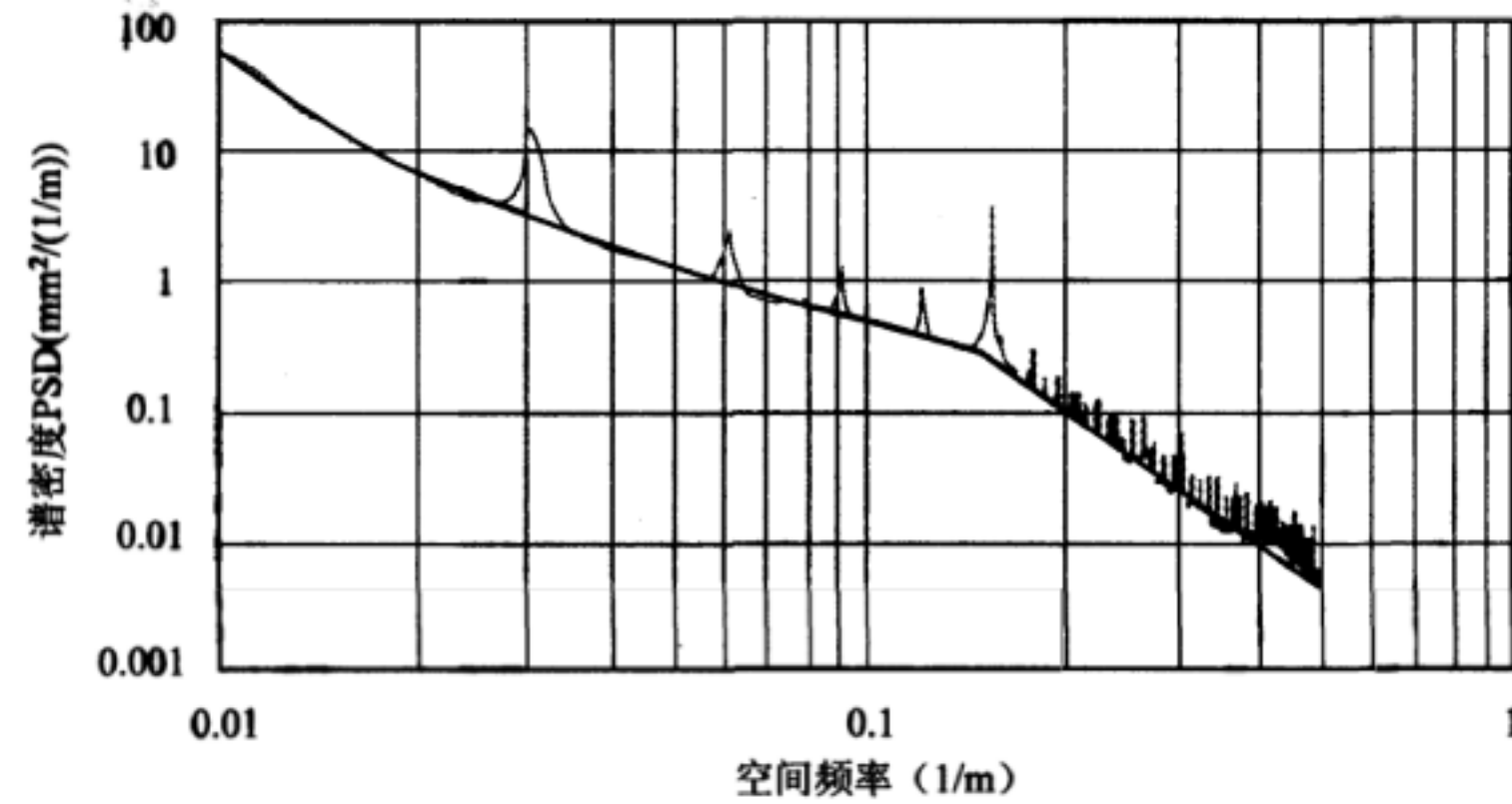


说明：-----轨向不平顺谱；
——拟合轨向不平顺谱。

图 B.3 轨向不平顺谱

B.4 高低不平顺谱

高低不平顺谱及拟合谱图参见图 B.4。



说明：-----高低不平顺谱；
——拟合高低不平顺谱。

图 B.4 高低不平顺谱

附录 C
(资料性附录)

高速铁路无砟轨道不平顺谱计算方法

C.1 概 述

轨道不平顺谱主要采用快速傅立叶变换(FFT)计算单元轨道不平顺幅值谱,由幅值谱计算单元轨道不平顺谱,对计算的全部单元轨道不平顺谱进行统计获取线路轨道不平顺谱。

C.2 轨道不平顺检测波长范围

高速铁路无砟轨道高低、轨向不平顺管理和检测波长范围为 1.5 m ~ 120 m。波长 120 m 以上高低和轨向不平顺谱采用幂函数外推获得。

C.3 轨道不平顺预处理

轨道不平顺检测数据由于外界环境干扰、传感器和数据采集、传输异常等原因包含粗大误差,简称异常值;同时由于标定误差和惯性器件温度漂移等原因,水平和轨距检测数据存在趋势项。因此,直接利用轨道不平顺检测数据计算轨道不平顺谱误差较大,需要对检测数据进行预处理,剔除异常值和趋势项。

C.4 轨道不平顺谱计算单元长度

为了保证轨道不平顺谱计算精度,减小轨道不平顺谱偏度误差,轨道不平顺谱计算单元长度应大于轨道不平顺包含的最大波长的 5 倍。采样间隔为 0.25 m,实际计算长度建议为 1 024 m(4096 点)。

C.5 窗 函 数

为了避免轨道不平顺谱泄漏失真,需要对检测数据进行锥化处理,也就是加窗,采用加权曲线处理检测数据,计算轨道不平顺谱,再利用修正因子修正。

常用的窗函数有:
矩形(Rectangular)窗:

$$w(n) = \begin{cases} 1 & n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \\ 0 & n \notin \{0, 1, 2, \dots, N-1\} \end{cases} \dots\dots\dots (C.1)$$

三角(Bartlett)窗:

$$w(n) = \begin{cases} 2n/(N-1) & 0 \leq n \leq (N-1)/2 \\ 2-2n/(N-1) & (N-1)/2 \leq n \leq N-1 \end{cases} \dots\dots\dots (C.2)$$

汉宁(Hanning)窗:

$$w(n) = 0.5 - 0.5 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad \dots\dots\dots (C.3)$$

海明(Hamming)窗:

$$w(n) = 0.538 - 0.462 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad \dots\dots\dots (C.4)$$

布莱克曼(Blackman)窗:

$$w(n) = 0.42 - 0.5 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) + 0.08 \cos\left(\frac{4\pi n}{N-1}\right) \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad \dots\dots\dots (C.5)$$

余弦矩形(Tukey)窗:

$$w(n) = \begin{cases} 0.5 - 0.5 \cos \frac{5\pi n}{N-1} & 0 \leq n \leq \frac{1}{10}(N-1) \\ 1 & \frac{1}{10}(N-1) \leq n \leq \frac{9}{10}(N-1) \\ 0.5 - 0.5 \cos \frac{5\pi n}{N-1} & \frac{9}{10}(N-1) \leq n \leq (N-1) \end{cases} \dots\dots\dots (C.6)$$

常用窗函数性能对比参见表 C.1。

表 C.1 常用窗函数性能对比

窗 函 数	最大旁瓣与主瓣峰值比 dB	泄漏因子 %	主瓣宽度	3 dB 主瓣宽度 $2\pi/N$
Rectangular	- 13.3	9.14	$4\pi/N$	0.879
Tukey	- 13.5	6.98	$40\pi/9N$	0.977
Bartlett	- 26.5	0.28	$8\pi/N$	1.270
Hanning	- 31.5	0.05	$8\pi/N$	1.367
Hamming	- 42.5	0.03	$8\pi/N$	1.270
Blackman	- 58.1	0.00	$12\pi/N$	1.562

C.6 轨道不平顺谱计算方法

轨道不平顺谱计算方法如下：

- a) 轨道不平顺按 1 024 m 划分单元；
- b) 剔除计算单元中轨道不平顺包含的异常值和趋势项；
- c) 根据检测速度和轨道不平顺标准差进行计算单元有效性判断；
- d) 对有效单元的轨道不平顺进行加窗处理,并进行 FFT 计算,记录单元的轨道不平顺谱；
- e) 对计算的全部轨道不平顺谱进行统计分析；
- f) 轨道不平顺谱消峰处理；
- g) 轨道不平顺谱公式拟合。

附录 D
(资料性附录)

轨道不平顺谱计算误差分析

基于 FFT 方法计算轨道不平顺谱的统计精度可以用标准化均方根误差来表示,按公式(D.1)计算:

$$\begin{aligned}\varepsilon_R &= \left\{ \frac{E[\hat{S}(f) - S(f)]^2}{S(f)^2} \right\}^{\frac{1}{2}} = \left\{ \frac{1}{B_e L} + \frac{B_e^4}{576} \left[\frac{S''(f)}{S(f)} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (D.1) \\ &= (\varepsilon_r^2 + \varepsilon_b^2)^{\frac{1}{2}}\end{aligned}$$

- 式中:
- f ——空间频率(l/m);
 - $\hat{S}(f)$ ——轨道不平顺谱估计值;
 - $S(f)$ ——轨道不平顺谱真值;
 - B_e ——频率分辨率;
 - L ——轨道不平顺计算总长度;
 - ε_r ——随机误差;
 - ε_b ——偏度误差。

从公式(D.1)可知:偏度误差随着 B_e 增加而增大,而随机误差随着 B_e 增加而减小,因此通过 B_e 同时减小偏度误差和随机误差是矛盾的。但由于随机误差还随着 L 增加而减小,因此可以先根据偏度误差要求来确定 B_e ,然后根据随机误差要求和已确定的 B_e 确定总长度 L 。对于轨道不平顺谱来说,轨道不平顺总长度 L 都能满足要求,由于轨道不平顺谱主要反映轨道随机不平顺谱,因此主要考虑轨道不平顺谱随机误差。

按公式(D.2)计算轨道不平顺谱随机误差为

$$\varepsilon_r = (B_e L)^{-\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (D.2)$$

若不考虑频率平滑, B_e 按公式(D.3)计算为

$$B_e = \frac{1}{L'} \dots\dots\dots (D.3)$$

- 式中:
- L' ——直接用于 FFT 计算的轨道不平顺长度,单位为米(m)。

考虑频率平滑时,频率平滑包括计算全部记录的谱,然后在相邻频率间对谱进行平均,频率分辨率按公式(D.4)计算为

$$B'_e = r \times B_e = \frac{r}{L'} \dots\dots\dots (D.4)$$

- 式中:
- r ——被平均的原谱的频率分量数。
- 如果令分块数 q 按公式(D.5)计算:

$$q = \frac{L}{L'} \dots\dots\dots (D.5)$$

则轨道不平顺谱随机误差按公式(D.6)计算为

$$\varepsilon_r = \left(\frac{1}{q}\right)^{\frac{1}{2}}$$

.....(D.6)

由以上公式可知:一次计算的随机误差很大,达到 100% ,但随着分段次数的增加随机误差逐渐减小。如果分段 100 次,随机误差可以降到 10% 。因此, B_0 确定后,可以通过增加轨道不平顺谱的计算分段次数来降低随机误差,达到随机误差要求。

附录 E
(资料性附录)
轨道周期性不平顺描述

高速铁路无砟轨道在连续多跨相同跨度简支梁上的高低不平顺存在周期等于简支梁长的周期性不平顺;板式无砟轨道高低不平顺存在周期等于轨道板长的周期性不平顺,CTRS I 型板式无砟轨道高低不平顺存在周期等于底座板长的周期性不平顺。轨距和轨向不平顺存在周期等于钢轨定尺长的周期性不平顺。轨道周期性不平顺在轨道不平顺谱上都存在对应倍频谱峰。周期性轨道不平顺不能用谱密度表示,可以通过倍频能量表示。连续多跨 32 m 简支梁和 CRTS II 型板式无砟轨道轨道板变形引起的高低周期性不平顺谱峰较大,相应的谱峰倍频能量参见表 E.1。

表 E.1 周期性高低不平顺倍频能量

	32 m 简支梁				CRTS II 型板式无砟轨道轨道板	
倍频数	1	2	3	4	1	2
频率 1/m	0.030 6	0.061 5	0.091 8	0.122 1	0.154 3	0.308 6
能量 mm ²	8.381 2E - 02	8.158 2E - 03	2.914 1E - 03	2.122 2E - 03	1.950 1E - 02	4.286 7E - 04

中 华 人 民 共 和 国
铁道行业标准
高速铁路无砟轨道不平顺谱
PSD of ballastless track irregularities of high-speed railway
TB/T 3352—2014

*

中国铁道出版社出版、发行
(100054,北京市西城区右安门西街8号)
读者服务部电话:市电(010)51873174,路电(021)73174
北京市昌平开拓印刷厂印刷
版权专有 侵权必究

*

开本:880 mm × 1 230 mm 1/16 印张:1 字数:21 千字
2015 年 2 月第 1 版 2015 年 2 月第 1 次印刷

*



定 价:10.00 元