

轨道车辆振动实测环境的谱归纳技术

邓辰鑫, 周劲松, 宫 岛, 罗 敏

(同济大学 铁道与城市轨道交通研究院, 上海 201804)

摘要: 轨道交通车辆振动加速度实测数据具有很强的非正态性, 利用约翰森法则改进振动数据归纳标准, 并提出具有普适性的振动环境谱归纳技术. 利用实测数据进行计算, 对比改进前后方法的差异, 并检验该归纳技术的普适性. 结果表明, 改进的方法能适应非正态环境, 归纳谱能反映实际振动情况.

关键词: 轨道车辆; 随机振动; 功率谱; 非正态数据处理

中图分类号: TG156

文献标志码: A

Spectral Induction Method of Vibration in Rail Vehicles' Measurement Environment

DENG Chenxin, ZHOU Jinsong, GONG Dao, LUO Min

(Institute of Railway Transit, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The measured acceleration data of vibration in rail vehicles show strong non-normality, and Johnson's law is used to improve the criterion of inducing vibration data. A universal induction method of vibration spectrum is proposed in this paper. By using the measured data, the difference between the ordinary method and the modified method is compared, and the universality of the method is tested. The results show that the modified method can adapt to the non-normal environment and the induced spectrum can reflect the actual vibration.

Key words: rail vehicle; random vibration; power spectrum; process of abnormal data

安全. 为了设计和考核装备在振动环境中的安全性及可靠性, 必须依据实测数据、振动环境和规范标准制定振动环境归纳谱. 我国在航空机载设备振动环境谱归纳方面较早地开展了研究^[1-2], 同时也制定了振动、冲击环境数据归纳方法的军用标准^[3], 运用正态假设下的数理统计原理来归纳特征样本, 并以此计算实测谱和规范谱. 研究发现, 振动环境数据归纳方法在轨道交通领域的运用很少.

轨道交通装备需要经过标准^[4]检验后方可装车, 而国内轨道交通装备在载重、运行速度和振动环境等方面的检验标准各自迥异, 装备开发者希望掌握国内实际车辆运行环境振动谱, 并与振动试验标准比较, 以提高轨道交通装备的设计准确性和运行可靠性. 丁杰等^[5]采用军用标准 GJB/Z126-99 对实测数据进行归纳, 获得实测 1 类 A 级功率谱曲线, 并据此对车载设备进行疲劳分析. 然而, 在实际运用中轨道车辆装备振动数据存在大量的非正态样本, 正态假设导致归纳谱误差的产生. Slifker 等^[6]提出了 Johnson 法则, 利用正态拟合函数方法对非正态数据进行转换. 罗敏等^[7]利用 Johnson 法则对非正态振动数据进行转换, 解决了飞行器的非正态振动数据问题.

本研究利用 Johnson 法则对军用标准归纳方法进行改进, 处理非正态振动数据, 并运用于实测数据中; 计算某线路车辆不同振动部位和方向的振动加速度归纳谱, 与国际标准^[4] IEC 61373—2010 进行对比, 分析改进前后的差异.

1 归纳方法原理

1.1 非正态处理

Slifker 等^[6]提出, 使用一簇分布可将数据正态

随着我国轨道交通的迅速发展, 轨道车辆的运行速度、载重以及发车频次大幅提升, 致使轨道车辆振动问题日益凸显, 轴箱及转向架上因振动导致的结构裂纹、断裂和部件脱落现象日趋严重, 危及行车

收稿日期: 2019-01-03

基金项目: 国家自然科学基金(51805373)

第一作者: 邓辰鑫(1996—), 男, 博士生, 主要研究方向为机车车辆动力学与控制. E-mail: 1833398@tongji.edu.cn

通信作者: 周劲松(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为机车车辆动力学与控制.

E-mail: jinsong.zhou@tongji.edu.cn

化,如下所示:

$$\tilde{x} = \gamma + \eta k_a(x; \lambda, \epsilon) \quad (1)$$

其中,

$$k_a(x; \lambda, \epsilon) = \begin{cases} \sinh^{-1}\left(\frac{x-\epsilon}{\lambda}\right), & a = 1 \\ \ln\left(\frac{x-\epsilon}{\lambda+\epsilon-x}\right), & a = 2 \\ \ln\left(\frac{x-\epsilon}{\lambda}\right), & a = 3 \end{cases} \quad (2)$$

式中: x 为原样本数个体,其转换结果为 \tilde{x} ; γ 和 η 分别为转换的中心点和伸缩比例系数; λ 和 ϵ 分别为原样本的中心点和伸缩比例系数。

对于给定的 z , 计算标准正态分位点 $(-3z, -z, z, 3z)$ 的分位数, 并以此确定原样本的四个分位点 (x_1, x_2, x_3, x_4) . 通常 z 的取值^[8] 在 0.25 到 1.25 范围内. 令 $o = x_4 - x_3$, $n = x_2 - x_1$, $r = x_3 - x_2$. 根据 on/r^2 的大小选择方程 k_a 的形式, 即: 当 $on/r^2 = 1$ 时, $a=1$; 当 $on/r^2 > 1$ 时, $a=2$; 当 $on/r^2 < 1$ 时, $a=3$. 选定方程后, 根据估计法则^[6] 对其中的参数 γ 、 η 、 λ 和 ϵ 进行估计。

选取转换后数据集的规定水平下的分位点, 实现对原始数据样本的上限系数的估计。

1.2 时域处理

时域数据可分成不同样本和不同通道, 各自形成独立的样本, 因此对样本进行正态检验^[9] 是很有必要的. 振动过程中, 外界环境的突然变化带来误差较大的数据, 如果这些数据不排除, 就会降低结果的精度, 甚至得出错误的结论^[10].

处理过程中, 由于采样频率高且样本容量大, 因此采用 Jarque-Bera 检验法对样本数据进行正态检验. 对于数据集中的每个样本, 若满足正态分布, 则认为不存在偏差数据; 若不满足正态分布, 在将数据正态化后, 通过下式估计上限:

$$x_1 = \bar{x} + Qs \quad (3)$$

式中: x_1 、 \bar{x} 和 s 分别为样本的估计上限、样本均值和样本标准差; Q 为原样本在正态转换后规定水平下的分位数. 去除超限的数据点, 并重置为该分布下的随机数。

1.3 频域处理

1.3.1 特征样本

计算所有样本的功率谱数据, 记为 $G_k(i, j)$ ($i=1, 2, 3, \dots, L_1$; $j=1, 2, 3, \dots, M_1$; $k=1, 2, 3, \dots, N_1$). 其中, L_1 表示通道数, M_1 表示样本数, N_1 表示谱线数. $G_k(i, j)$ 的均方根值为 $\alpha_{\text{RMS}}(i, j)$, 并按下式对均值 X_i 和方差 S_i^2 进行参数估计:

$$\begin{cases} X_i = \frac{1}{M_1} \sum_{j=1}^{M_1} \alpha_{\text{RMS}}(i, j) \\ S_i^2 = \frac{1}{M_1 - 1} \sum_{j=1}^{M_1} (\alpha_{\text{RMS}}(i, j) - X_i)^2 \end{cases} \quad (4)$$

选取第 i 个和第 m 个数据通道, 根据均值和方差计算统计量 $F(i, m)$ 和 $t(i, m)$, 如下所示:

$$\begin{cases} F(i, m) = \frac{S_i^2}{S_m^2}, & i \neq m \\ t(i, m) = \frac{X_i - X_m}{\sqrt{(S_i^2 + S_m^2)/M_1}}, & i \neq m \end{cases} \quad (5)$$

假设数据通道 i 和 m 的功率谱属于同一总体, 则 $F(i, m)$ 服从自由度为 $(M_1 - 1, M_1 - 1)$ 的 F 分布, $t(i, m)$ 服从自由度为 $2(M_1 - 1)$ 的中心 t 分布。

在给定置信度 $(1-\alpha)$ 下, 若

$$\begin{cases} F_{(M_1-1, M_1-1), \alpha/2} \leq F(i, m) \leq F_{(M_1-1, M_1-1), (1-\alpha/2)} \\ |t(i, m)| \leq t_{2(M_1-1), (1-\alpha/2)} \end{cases} \quad (6)$$

成立, 则假设成立, 即数据通道 i 和 m 的功率谱属于同一总体; 反之, 则不属于同一总体。

归并属于同一通道的数据, 形成特征样本 $\tilde{G}_k(p, q)$ ($p=1, 2, \dots, P_1$; $q=1, 2, \dots, Q_p$; $k=1, 2, \dots, N_1$). 其中, P_1 表示特征样本数, Q_p 表示特征样本容量。

1.3.2 实测谱

令

$$x_k(p, q) = \sqrt{\tilde{G}_k(p, q)} \quad (7)$$

并对样本 $x_k(p, q)$ 进行均值 $X_k(p)$ 和方差 $S_k^2(p)$ 的参数估计, 如下所示:

$$\begin{cases} X_k(p) = \frac{1}{Q_p} \sum_{q=1}^{Q_p} x_k(p, q) \\ S_k^2(p) = \frac{1}{Q_p - 1} \sum_{q=1}^{Q_p} (x_k(p, q) - X_k(p))^2 \end{cases} \quad (8)$$

计算置信度为 $(1-\alpha)$ 、分位点为 β 的容差上限系数 F_{11} , 如下所示:

$$F_{11} = \frac{t_{(Q_p-1), (1-\alpha)}}{\sqrt{Q_p}} + Z_\beta \sqrt{\frac{Q_p - 1}{\chi_{(Q_p-1), \alpha}^2}} \quad (9)$$

式中: Z_β 为满足 $P(Z \leq Z_\beta) = \beta$ 的正态分布分位点; $\chi_{(Q_p-1), \alpha}^2$ 为自由度是 $(Q_p - 1)$ 的 χ^2 分布 α 分位点。

对第 p 个样本进行容差上限估计, 如下所示:

$$G_k(p) = (X_k(p) + F_{11} S_k(p))^2 \quad (10)$$

从而得到每个特征样本的随机振动实测谱 $G_k(p)$ 。

1.3.3 规范谱

按特征样本频段分布情况进行划分, 对样本

$x_k(p, q)$ 相邻谱线进行假设检验, 如下所示:

$$\begin{cases} F(k, k+1) = \frac{S_k^2(p)}{S_{k+1}^2(p)} \\ t(k, k+1) = \frac{X_k(p) - X_{k+1}(p)}{\sqrt{(S_k^2(p) + S_{k+1}^2(p))/Q_p}} \end{cases} \quad (11)$$

假设相邻谱线 k 和 $(k+1)$ 的功率谱属于同一总体, 则 $F(k, k+1)$ 服从自由度为 (Q_p-1, Q_p-1) 的 F 分布, $t(i, m)$ 服从自由度为 $2(Q_p-1)$ 的中心 t 分布。

在给置信度 $(1-\alpha)$ 下, 若

$$\begin{cases} F_{(Q_p-1, Q_p-1); \alpha/2} \leq F(k, k+1) \leq F_{(Q_p-1, Q_p-1); (1-\alpha/2)} \\ |t(k, k+1)| \leq t_{2(Q_p-1); (1-\alpha/2)} \end{cases} \quad (12)$$

成立, 则假设成立, 即相邻谱线 k 和 $(k+1)$ 的功率谱属于同一总体; 反之, 则不属于同一总体。

归并属于同一总体的相邻谱线, 形成 H_1 个频段, 第 h ($h=1, 2, \dots, H_1$) 频段两端的谱线分别为 k_{h1} 和 k_{h2} , 谱线数为 N_h 。对第 h 频段的数据 $x_k(p, q)$ 进行均值 $X_h(p)$ 和方差 $S_h^2(p)$ 的参数估计, 如下所示:

$$\begin{cases} X_h(p) = \frac{1}{Q_p N_h} \sum_{q=1}^{Q_p} \sum_{k=k_{h1}}^{k_{h2}} x_k(p, q) \\ S_h^2(p) = \frac{1}{Q_p N_h - 1} \sum_{q=1}^{Q_p} \sum_{k=k_{h1}}^{k_{h2}} (x_k(p, q) - X_h(p))^2 \end{cases} \quad (13)$$

计算置信度为 $(1-\alpha)$ 、分位点为 β 的容差上限系数 F_{12} , 如下所示:

$$F_{12} = \frac{t_{(Q_p N_h - 1); (1-\alpha)} + Z_\beta \sqrt{Q_p N_h - 1}}{\sqrt{Q_p N_h}} \quad (14)$$

对第 h 个样本进行容差上限估计, 如下所示:

$$G_h(p) = (X_h(p) + F_{12} S_h(p))^2 \quad (15)$$

从而得到每个特征样本的随机振动规范谱 $G_h(p)$ 。

图 1 为数据归纳流程。在时域数据处理中, 利用非正态转换获取上下限, 剔除出野点; 在谱线归纳中, 对非正态的数据进行转换, 求得上限谱。

2 基于实测振动数据的谱归纳分析

2.1 实测背景

某线路地铁车辆运营时, 一运行公里数约为 18 万的车辆(旧车)出现提吊装置振裂现象。据实测现场反馈, 旧车轴箱明显比新上线车辆(新车)振动剧烈, 并且提吊装置振裂现象只出现在旧车中。分析时, 对比了新旧两车的振动数据, 归纳了多通道数据

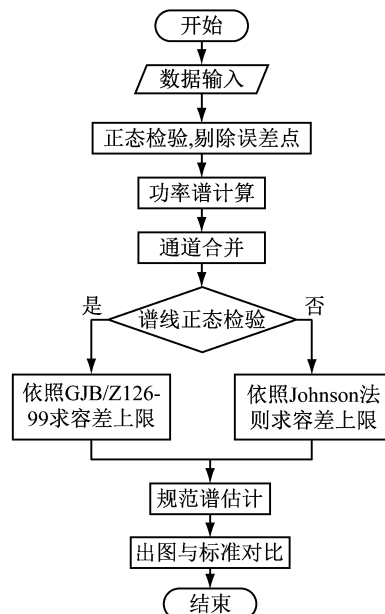


图 1 谱归纳流程

Fig.1 Flow chart of spectral induction

的频谱。实测中, 在一测试车辆的轴箱上均布置了测点, 垂横每向各 8 个通道; 同时, 在对应的构架中部和端部布置了 6 个测点, 在车体地板上布置了 4 个测点。轴箱测点的采样频率为 2 048 Hz, 构架和车体的采样频率分别为 1 024 Hz 和 512 Hz。测试时, 全程上下行共行驶 5 次。

表 1 为振动加速度数据统计结果。由表 1 可知, 车辆的振动加速度数据均为非正态数据。

表 1 数据样本统计值对比

Tab.1 Comparison of statistical values of data samples

项目	振动加速度最大值/(m·s ⁻²)	振动加速度均方根值/(m·s ⁻²)	偏度	峰度
轴箱	70.91	5.58	0.05	18.350
构架	55.34	3.34	-0.02	19.940
车体	2.89	0.28	0.06	5.826
正态样本			0	3.000

2.2 时域处理

选取 5 s 轴箱垂向振动的数据片段进行计算, 计算得到偏度和峰度分别为 0.04 和 17.47, 根据

$$J = \frac{N}{6} \left(\gamma_s^2 + \frac{(\gamma_k - 3)^2}{4} \right) \quad (16)$$

计算得到的统计量 J 远大于自由度为 2 的 χ^2 分布在显著性水平 0.05 下的分位点, 故正态假设不成立。式(16)中, J 、 N 、 γ_s 和 γ_k 分别表示检验统计量、样本容量、偏度和峰度。根据式(3)在正态转换后求取上限, 用该分布下的随机数代替超限的数据点。图 2 显示了处理前后轴箱振动的部分数据。表 2 对比了处理前后振动加速度数据统计值。

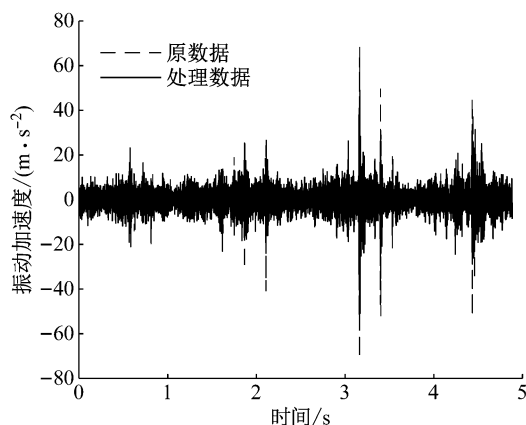


图 2 处理前后部分时域数据对比

Fig. 2 Comparison of time domain data before and after processing

表 2 处理前后统计值对比

Tab. 2 Comparison of statistical values before and after processing

项目	振动加速度最大 大值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	振动加速度均方 根值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	偏度	峰度
原数据	70.91	5.58	0.05	18.35
处理数据	50.84	5.10	0.01	8.92

由表 2 可知,处理数据的最大绝对值比原数据小,但其均方根值几乎保持不变,未改变数据整体的能量特征,并且偏度更接近于零,峰度大大减小。处理方法不改变样本分布,对振动信号能量的影响很小,能极大程度保留原始数据特征,并剔除部分振动野点。

2.3 频域分析

根据第 1.3 节所述,归纳谱为实测谱和规范谱的总称,表示由 GJB/Z126-99 原方法和 Johnson 法则改进法 2 种方法所求的功率谱。实测谱为频率轴连续的功率谱,规范谱是由实测谱中相邻同分布的谱线合并而成的平直谱图。标准谱为 IEC 61373—2010 中轨道车辆装备振动^[4]的上限谱。

图 3 和图 4 分别显示了旧车和新车轴箱的垂向振动归纳谱。原方法和改进法所求的归纳谱分别用 G 和 J 表示。

由图 3 可知,改进法所求得归纳谱值略大于原方法,原因是非正态数据某一分位点比转换后数据同一水平下的分位点小。原始数据中单个样本的统计值不能准确地估计样本总体,转换后求得的容差上限系数更能反映总体的真实情况。对比归纳谱中的实测谱和规范谱,实测谱是频率轴连续的谱图,规范谱则形成了频段。实测谱能清楚地显示每一个谱线,规范谱则将相邻同分布的谱线合并,便于归纳比较。对比归纳谱和标准谱,原方法所求的旧车和新车

的归纳谱在主频段部分都未超过标准谱,而从改进法所求的归纳谱中可以看出,旧车轴箱振动在部分主频段超过标准谱,与实测中旧车轴箱提吊振裂现象一致。

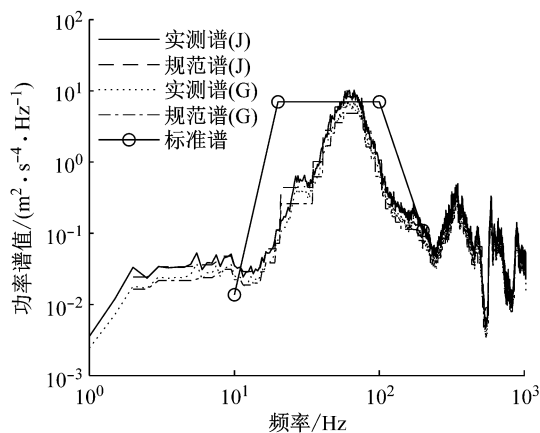


图 3 旧车轴箱垂向振动归纳谱与标准谱对比

Fig. 3 Comparison between induced spectrum and standard spectrum of axle box's vertical vibration of old vehicle

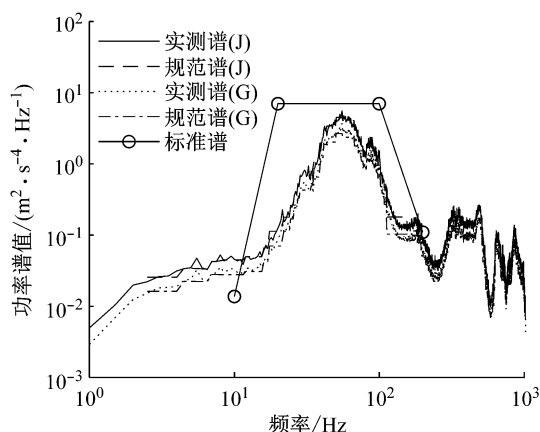


图 4 新车轴箱垂向振动归纳谱与标准谱对比

Fig. 4 Comparison between induced spectrum and standard spectrum of axle box's vertical vibration of new vehicle

2.4 偏差分析

记原方法和改进法所求的实测谱分别为 G_{ko} 和 G_{kj} 。计算偏差比 δ_k , 如下所示:

$$\delta_k = \frac{G_{ko} - G_{kj}}{G_{ko}} \times 100\% \quad (17)$$

对于同一样本,分别使用 2 种方法计算归纳谱并计算两者的偏差比。整个谱线中偏差的平均值为 29%,同时存在偏差较大的谱线,最大值为 35%。

图 5 为 2 种方法所求谱线值偏差比的分布。由图 5 可知,偏差比的分布大部分维持在 29.1% 左右。

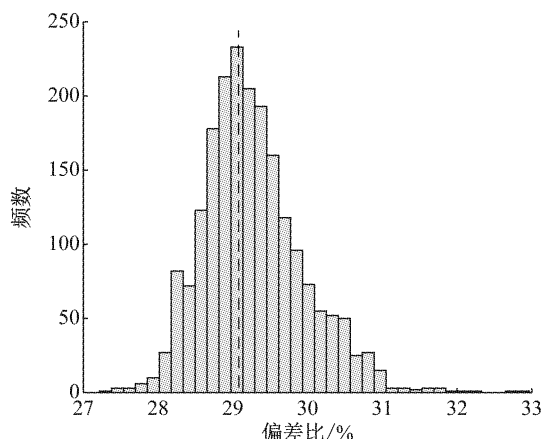


图 5 偏差分布

Fig.5 Deviation distribution

选取某个频段的谱线值,对比 2 种方法的估计结果.表 3 对比了该频段 2 种方法所求得的上限系数和上限值.其中,改进法所求得上限系数比原方法所求得的高 28.1%,上限值高 17.9%.

表 3 上限系数和上限值对比

Tab.3 Upper bound coefficient and upper bound value

方法	上限系数	上限值
原方法	1.331 8	0.003 49
改进法	1.853 5	0.004 25

图 6 显示了该频段原始谱线值的分布,谱线值样本是非正态的.由图 6 可知,改进法所求得的上限值要大于原方法的计算结果.对于具有大量非正态样本的数据集,2 种方法的计算结果存在明显差别.

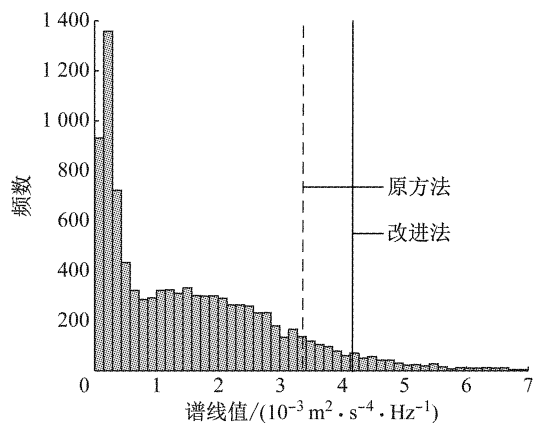


图 6 谱线值分布

Fig.6 Distribution of spectral line values

图 7 和图 8 分别显示了旧车车体横向和构架横向振动归纳谱.由图 7 可知,旧车车体横向振动能量主要在 10 Hz 以内,低频振动十分明显并超过标准谱,反映了实测过程中低频晃车和舒适性的劣化.由图 8 可知,旧车构架横向振动在低频部分超过标准谱,主要是在 2 Hz 到 5 Hz 有较大的振动谱值.在 50

Hz 频段附近,谱线出现峰值,并且与车体振动峰值是对应的.谱分析方法在不同实测部位的振动数据上均能使用,得出的结果基本符合实测现象,可以验证该方法具有处理轨道车辆振动实测环境的普适性.

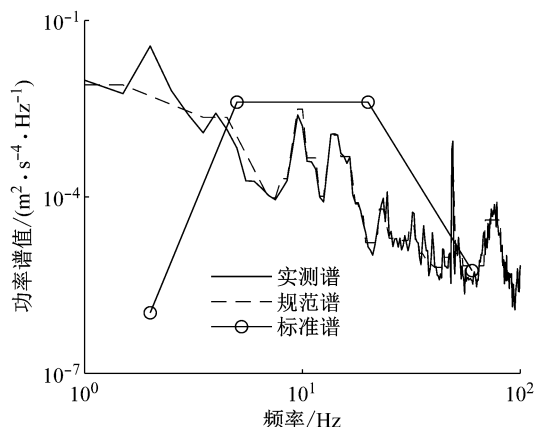


图 7 旧车车体横向振动归纳谱

Fig.7 Induced spectrum of body's lateral vibration of old vehicle

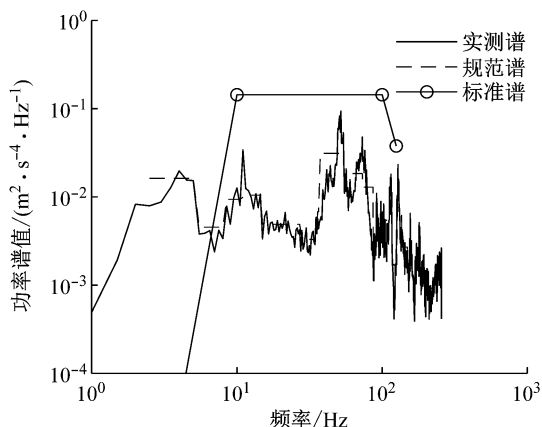


图 8 旧车构架横向振动归纳谱

Fig.8 Induced spectrum of frame's lateral vibration of old vehicle

3 结语

基于 GJB/Z126-99 军用标准,提出了适用于轨道车辆振动环境数据归纳的方法和流程.原方法计算的非正态样本上限偏小,并用 Johnson 法则对原方法进行了改进,使得上限值更接近实际.研究的数据归纳技术可用于非正态数据、多通道、不同部位和不同振动方向,具有更好的普适性和准确性.利用归纳得出的实测谱和规范谱,可对振动情况做出可靠和准确的判断.

参考文献:

- [1] 丰志强, 阎楚良, 张书明. 飞机机载设备振动环境谱的数据处理与编制[J]. 航空学报, 2006, 27(1): 465.
FENG Zhiqiang, YAN Chuliang, ZHANG Shuming. Data processing and compilation of vibration environmental spectrum for aircraft airborne equipment [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2006, 27(1): 465.
- [2] 田永卫, 阎楚良, 张书明, 等. 飞机随机振动环境实测试验数据的归纳方法[J]. 振动、测试与诊断, 2014, 34(6): 1129.
TIAN Yongwei, YAN Chuliang, ZHANG Shuming, *et al.* Inductive method of flight test data measured from aircraft random vibration environment [J]. *Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis*, 2014, 34(6): 1129.
- [3] 振动、冲击环境测量数据归纳方法: GJB/Z126-99[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
The inductive methods for environmental measured data of vibration and shock: GJB/Z126-99 [S]. Beijing: Standards Press of China, 1999.
- [4] International Electrotechnical Commission Technical Committee 9. Railway applications, rolling stock equipment-shock and vibration test: IEC 61373—2010 [S]. Geneva: Standards Press of International Electrotechnical Commission, 2010.
- [5] 丁杰, 张平, 王鹏. 机车车辆设备振动试验标准与实测数据的分析[J]. 机械工程学报, 2016, 52(22): 129.
- [6] SLIFKER J F, SHAPIRO S S. The Johnson system: selection and parameter estimation [J]. *Technometrics*, 1980, 22(2): 239.
- [7] 罗敏, 姜同敏, 袁宏杰. 一种可靠性试验实测振动数据的处理方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2007(10): 1237.
LOU Min, JIANG Tongmin, YUAN Hongjie. Method for inducing reliability test measured vibration data[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2007(10): 1237.
- [8] OWEN D B, LI H. The starship for point estimates and confidence intervals on a mean and for percentiles [J]. *Communication in Statistic Simulation and Computation*, 1998, 17: 325.
- [9] 谭炳麟. 随机振动数据的数字功率谱分析[J]. 上海交通大学学报: 自然科学版, 1979(1): 93.
TAN Binglin. The date digital spectral analysis in random vibration[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University: Natural Science Edition*, 1979(1): 93.
- [10] 姜兴渭, 石伟, 张跃民. 随机振动数据处理数字化方法研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1985(3): 54.
JIANG Xingwei, SHI Wei, ZHANG Yuemin. A study of the digitization method of data processing for random vibration[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 1985(3): 54.
- [21] WIKSTRÖM B O, KJELLBERG A, DALLNER M. Whole-body vibration: a comparison of different methods for the evaluation of mechanical shocks[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 1991, 7(1): 41.
- [22] 薛定宇, 陈阳泉. 高等应用数学问题的 MATLAB 求解[M]. 4 版. 北京: 清华大学出版社, 2004.
XUE Dingyu, CHEN Yangquan. Advanced applied mathematical problem solutions with MATLAB [M]. 4th ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [23] LIU C, HERMAN R. Road profile, vehicle dynamics, and ride quality rating [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 1999, 125(2): 123.
- [24] HINZ B, SEIDEL H, MENZEL G, *et al.* Effects related to random whole-body vibration and posture on a suspended seat with and without backrest[J]. *Journal of Sound & Vibration*, 2002, 253(1): 265.
- [25] DEMIC M, LUKI C J, MILI C Ž. Some aspects of the investigation of random vibration influence on ride comfort[J]. *Journal of Sound & Vibration*, 2002, 253(1): 109.
- [26] BREIMAN L. Classification and regression trees [M]. Abingdon: Routledge, 2017.
- [27] 高增礼, 张玉芬. 路面性质对乘坐舒适性影响的主观评价[J]. 中国公路学报, 1995, 8(1): 33.
GAO Zengli, ZHANG Yufen. Pavement characteristics on subjective road riding comfort assessment[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 1995, 8(1): 33.

(上接第 1476 页)