

文章编号: 1000-128X(2017)03-0114-04

机车变流器模块实测随机振动试验规范研究

刘国涛, 周溢韬, 陈彪, 罗亚平, 张祥珊, 郭玉涛

(株洲中车时代电气股份有限公司 检测试验中心, 湖南 株洲 412001)

摘要: 为考核机车变流器模块抵抗环境振动的能力, 需要按标准 GB/T 21563—2008 中的 1 类 B 级量级进行随机振动试验, 而该标准是根据欧洲铁路大量实测数据统计归纳得出的, 与我国机车实际振动环境存在差异。对机车变流器模块在京广线和兰新线上进行实测、归纳和计算, 得到了随机振动 PSD 曲线和加速度均方根值, 并证明与标准的谱型和量级均具有一定差异性。

关键词: 变流器模块; 随机振动试验; 实测数据; 试验规范

中图分类号: U264.3⁺7; U260.14⁺3

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2017.03.025

Method Research of Random Vibration Test Specification Development for Converter Module on Rolling Stock

LIU Guotao, ZHOU Yitao, CHEN Biao, LUO Yaping, ZHANG Xiangshan, GUO Yutao

(Testing Center, Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: In order to assess locomotive converter module's ability to resist vibration environment, random vibration test should be made by the standard GB/T 21563—2008 in Class 1 B grade. This standard was summarized according to the European railway statistics derived from a large number of measured data. However, random vibration environment between European railway and our railway was different. Locomotive converter module random vibration acceleration data on the Beijing-Guangzhou line and the Lanzhou-Wulumuqi line were measured, induced, and calculated, acceleration power spectral density curve and acceleration root value were obtained. Finally, we proved that locomotive converter module measured random vibration test profile type and acceleration r.m.s. had some differences to the standard.

Keywords: converter modules; random vibration test; measured data; test specification

0 引言

随着我国铁路行业的快速发展, 机车车辆的安全问题一直备受社会的关注, 为了考核机车车辆设备的安全性和可靠性问题, 需要对其进行环境试验, 而振动环境是铁路机车车辆设备在使用过程中经常受到的诱发环境。振动环境会引起设备骨架结构开裂、紧固件松动、焊点脱落、密封失效、功能失效等现象, 轻则引起设备故障, 重则引发重大事故, 造成重大人员

伤亡和经济损失。因此振动环境试验是铁路机车车辆设备环境试验中必不可少的。

在没有实测数据的情况下, 试验通常都是依据 GB/T 21563—2008《轨道交通 机车车辆设备 冲击和振动试验》进行的。该标准中规定的试验量级、谱型和时间是根据欧洲铁路上运行的机车车辆上安装的设备的大量实测数据统计归纳得出的, 具有一定的代表性, 但机车车辆设备在原理、设计、结构和材料方面都存在很多不同之处, 且国内和国外的铁路状况有所差异。

根据以往的实测数据也发现, 不仅不同设备在不同平台所受到的振动量值差别很大, 就连谱型都存在

收稿日期: 2016-11-29; 修回日期: 2017-01-12

很大差异。因此如完全按标准中的试验谱型和量值进行试验, 有的设备可能会出现欠试验的现象, 有的设备可能会出现过试验的现象, 也有的试验条件与实际环境存在差异。通过长期的实验室试验统计也发现有些设备在试验中出现的问题在现场使用却没有问题, 而有些产品通过了振动试验后在现场使用仍会出现问题。因此, 对振动环境进行实测, 再根据实测结果确定振动环境试验条件已越来越被人们所认可和重视。

1 变流器模块振动加速度路谱测试

为了解我国机车车辆设备的振动量级和谱型数据, 以安装在HXD1C型电力机车上的TGA9型牵引变流器内的变流器模块为例。变流器模块为车体内柜体内部安装的设备, 参考GB/T 21563—2008可知变流器模块试验量级为1类B级。

考虑到测试数据样本的代表性, 本次测试线路选定路况较差东西走向的兰新线(兰州西—乌鲁木齐西)和路况较好南北走向的京广线(株洲—广州), 分别对HXD1C机车在2条线路上的运行加速度路谱进行全程测试, 2条线路共计测试里程约7800 km。

兰新线兰州西—乌鲁木齐西段路况较差, 其单边距离1948 km, 历经兰州西—武威南—张掖站—嘉峪关站—玉门站—柳园站—哈密站—鄯善站—吐鲁番站—乌鲁木齐站等10个车站区间, HXD1C机车在该线路的运行速度为60~120 km/h。本次单边测试3次, 共计测试里程约5800 km。

京广线株洲—广州段路况较好, 其单边距离657 km, 历经株洲站—衡阳站—韶关站—广州站等4个车站区间, HXD1C机车在该线路的运行速度为60~80 km/h。本次单边测试3次, 共计测试里程约2000 km。

测点位置选择在变流器模块对角2个固定点位置, 测试方向为垂向、横向、纵向3个方向。

2 实测振动加速度时域数据

路谱实测数据为时域数据, 其中包含有异常数据和机车怠速状态下的数据, 在进行分析处理前需要先对时域数据做检验, 避免将异常数据引入到分析过程中。常规的做法是, 所有在机车车辆设备数据确认过程中发现异常并无法通过编辑有效修正的测量数据应予以剔除, 同时也不能在工程中应用。此外, 应对时域数据进行平稳性、各态历经性和正态性检验的方法较多, 如物理检验、目视定性检验、均方根值检验、实施分析检验、轮次检验、方差检验和概率密度函数检验、卡埃平方拟合优度检验及偏态峰态检验等。

本文在实测加速度路谱数据检验中, 采用概率密度函数法对各数据进行平稳性和正态性检验, 其基本理论为若一个随机过程 $x(t)$ 是平稳的, 则其统计特性不随时间 t 变化, 在 t 为任意值时的随机变量的概率密度函数和概率分布函数都是相同的。而当 $x(t)$ 是各态

历经时, 则可以用一个样本函数 $x(t)$ 的统计特性代表整个过程的相应的统计特性。即各态历经随机过程的概率密度函数和概率分布函数可以从 $x(t)$ 计算出来。图1为变流模块测点的概率密度函数和概率分布曲线, 通过对比一维高斯概率密度曲线和概率分布曲线可知此测点基本服从高斯分布, 即具有正态性。

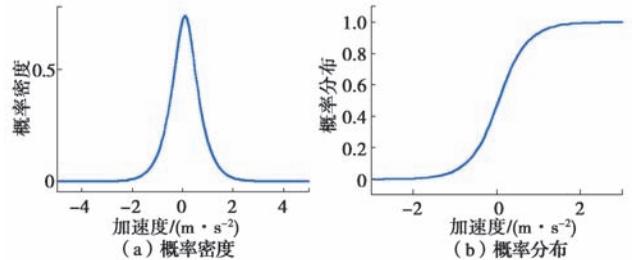


图1 变流模块测点的概率密度和概率分布曲线

3 实测振动加速度功率谱密度计算

机车车辆设备的实测振动数据为随机振动, 是一种非确定性振动。当机车车辆设备由于自身和外界的各种原因作随机振动的时候, 事先不可能确定设备中测试点在某时刻的位置以及振动的有关振幅、频率或者相位等参数的瞬时值, 即不能用确定函数来描述这种振动, 也就是对机车车辆振动系统的激励事先不能用确定函数来描述。故需要对实测的时域数据进行分析处理, 得到具有规律性的功率谱密度曲线, 以使实测数据具有复现性。本次分析中, 功率谱的计算采用的是Welch法(改进周期图法), 对数据分段后, 先对每段数据都在时域上乘以窗函数(选用Hanning窗), 然后做快速傅里叶变换, 对其模方, 即柯立-杜开(Cooley-Tukey)法求得功率谱, 再求渐近无偏估计的段平均。由如上介绍的方法可以得到变流器模块每个测试点每个数据通道各次测量的PSD曲线。图2为变流器模块测点纵向部分振动PSD曲线。

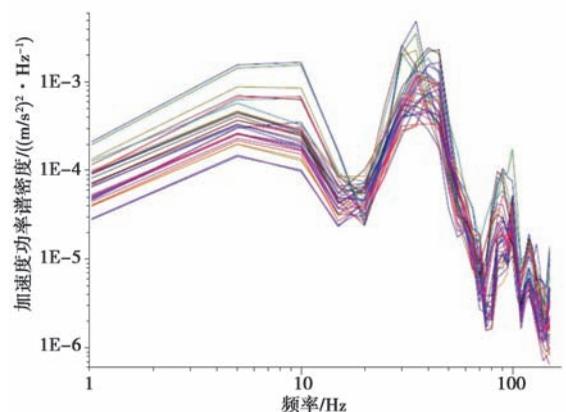


图2 变流器模块测点纵向多次测量的PSD曲线

4 随机振动加速度功率谱密度谱型估计

为了以单一随机振动加速度PSD曲线代表变流器模块内2个对角测点单轴向多次测试的PSD曲线, 需要对各测点多次测试数据PSD曲线进行归纳, 即将属

于同一总体的数据进行归类, 每个试验轴向分别得到一张 PSD 曲线。

1) 频段划分

按特征样本 PSD 沿频率轴分布情况划分频段, 对特征样本 $\tilde{G}_k(p)$ 相邻谱线对应的 $\sqrt{\tilde{G}_k(p)}$ 进行参数假设检验。

对特征样本 $\tilde{G}_k(p)$ 相邻谱线对应的 $\sqrt{\tilde{G}_k(p)}$ 进行均值 $\bar{X}_k(p)$ 和方差 $S_k^2(p)$ 估计:

$$\left. \begin{aligned} \bar{X}_k(p) &= \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P \sqrt{\tilde{G}_k(p)} \\ S_k^2(p) &= \frac{1}{P-1} \sum_{p=1}^P \left[\sqrt{\tilde{G}_k(p)} - \bar{X}_k(p) \right]^2 \end{aligned} \right\} (k=1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

对相邻谱线的均值 $\bar{X}_k(p)$ 和方差 $S_k^2(p)$ 计算统计量 $F_n(k, k+1)$ 和 $t_n(k, k+1)$:

$$\left. \begin{aligned} F_n(k, k+1) &= \frac{S_k^2(p)}{S_{k+1}^2(p)} \\ t_n(k, k+1) &= \frac{\bar{X}_k(p) - \bar{X}_{k+1}(p)}{\sqrt{(S_k^2(p) + S_{k+1}^2(p))/P}} \end{aligned} \right\} (k=1, 2, \dots, N-1) \quad (2)$$

假设特征样本相邻谱线 k 和 $k+1$ 的 PSD 属于同一总体, 则 $F_n(k, k+1)$ 服从自由度为 $(P-1, P-1)$ 的 F 分布, $t_n(k, k+1)$ 服从自由度为 $2(P-1)$ 的中心 t 分布。

在给定的置信度 $(1-\alpha)$ 下, 若

$$\left. \begin{aligned} F_{(P-1, P-1); \alpha/2} \leq F_n(k, k+1) \leq F_{(P-1, P-1); (1-\alpha/2)} \\ |t_n(k, k+1)| \leq t_{2(P-1); (1-\alpha/2)} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

成立, 则特征样本相邻谱线 k 和 $k+1$ 的 PSD 属于同一总体, 否则不属于同一总体。

将相邻属于同一总体的谱线归并在同一频段内, 形成 H 个频段。 h 频段两端点的谱线号为 $k_{h1}, k_{h2}(h=1, 2, \dots, H)$, 谱线数为 $N_h = k_{h2} - k_{h1} + 1$ 。频段内 $\sqrt{\tilde{G}_k(p)}$ 近似服从正态分布。

2) 频段内 PSD 平直谱的估计

对 h 频段内的数据 $\sqrt{\tilde{G}_h(p)}$ 进行均值 $\bar{X}_h(p)$ 和方差 $S_h^2(p)$ 估计:

$$\left. \begin{aligned} \bar{X}_h(p) &= \frac{1}{P \cdot N_h} \sum_{p=1}^P \sum_{k=k_{h1}}^{k_{h2}} \sqrt{\tilde{G}_h(p)} \\ S_h^2(p) &= \frac{1}{P \cdot N_h - 1} \sum_{p=1}^P \sum_{k=k_{h1}}^{k_{h2}} \left[\sqrt{\tilde{G}_h(p)} - \bar{X}_h(p) \right]^2 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

计算置信度为 $(1-\alpha)$ 、分位点为 β 的平直频段容差上限系数 F :

$$F = \frac{t_{P \cdot N_h - 1; (1-\alpha)} + Z_\beta \sqrt{\frac{P \cdot N_h - 1}{\chi_{(P \cdot N_h - 1); \alpha}^2}}}{\sqrt{P \cdot N_h}} \quad (5)$$

第 p 个特征样本 $\tilde{G}_h(p)$ h 频段内平直谱的容差上限

估计 $G_h(p)$:

$$G_h(p) = \left[\bar{X}_h(p) + F \cdot S_h(p) \right]^2 \quad (6)$$

($p = 1, 2, \dots, P; k = 1, 2, \dots, H$)

3) 振动环境条件随机振动规范谱

在双对数坐标下, 用直线连接由式 (6) 得到的相邻平直谱, 得到置信度为 $(1-\alpha)$ 、分位点为 β 的振动环境条件随机振动规范谱 $G(p)$ 。

由此方法对变流器模块 318 组测试数据进行谱型估计, 在本次分析中 α 取 0.1, 分位点 β 取 0.9, 得到变流器模块的随机振动加速度功率谱密度曲线分别如图 3~ 图 5 所示。

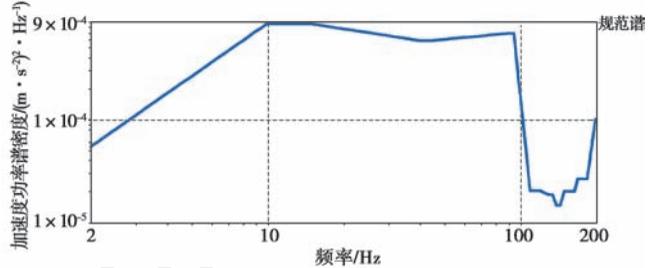


图 3 经过归纳后变流器模块垂向 PSD 曲线

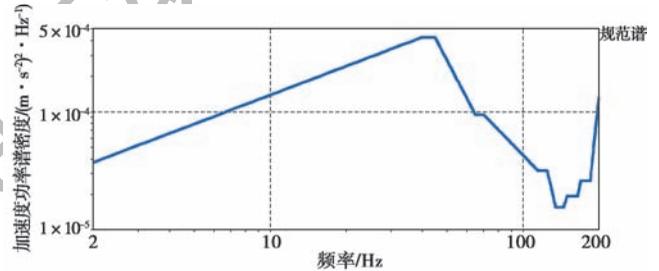


图 4 经过归纳后变流器模块横向 PSD 曲线

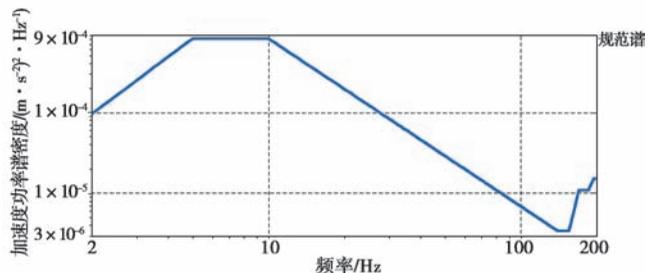


图 5 经过归纳后变流器模块纵向 PSD 曲线

5 功能随机振动试验加速度均方根值计算

1) 通过运行数据计算功能随机振动试验的 r.m.s. 值
假设在变流器测量位置所测得的运行数据包含“ n_1 ”个测量值, 其相应的加速度均方根测量值可计算为

$$a_{r.m.s.} = \sqrt{\sum_{k=2}^{n_1} \frac{(\tilde{G}_k(p) + \tilde{G}_{k-1}(p))(f_k - f_{k-1})}{2}} \quad (k=1, 2, \dots, n_1) \quad (7)$$

式中: $\tilde{G}_k(p)$ —测量数据编号为“ k ”的 ASD 值, $(m/s^2)^2/Hz$;

f_k —测量数据编号为“ k ”的频率值, Hz。

应用“ n_2 ”个加速度均方根测量值, 计算出变流器

基于实测路谱数据计算得到的功能振动试验的加速度均方根值为

$$\bar{a}_{r.m.s.} = \frac{\sum_{q=1}^{n_2} a_{r.m.s.}(q)}{n_2} \quad (q=1, 2, \dots, n_2) \quad (8)$$

$$STD = \sqrt{\frac{\sum_{q=1}^{n_2} (a_{r.m.s.}(q) - \bar{a}_{r.m.s.})^2}{n_2}} \quad (q=1, 2, \dots, n_2) \quad (9)$$

1类B级功能随机振动试验的加速度均方根值按下式计算:

$$a_{r.m.s.} = \bar{a}_{r.m.s.} + 2STD \quad (10)$$

2) 计算功能随机振动试验的加速度均方根值与标准差异

由上述公式计算得到的各测量数据的加速度均方根值和标准偏差如表1所示。其计算后的实测加速度均方根值和标准偏差如表2所示。

表1 实测加速度均方根量级与标准值对比相对差异

方向	最大运行量级 r.m.s./(m.s ⁻²)			平均运行量级 r.m.s./(m.s ⁻²)			标准偏差		
	标准值	实测值	相对差异	标准值	实测值	相对差异	标准值	实测值	相对差异
车体垂向	1.24	1.41	13.71%	0.49	0.26	-46.94%	0.26	0.24	-7.69%
车体横向	0.43	1.53	255.8%	0.29	0.36	24.14%	0.08	0.22	175%
车体纵向	0.82	0.93	13.41%	0.30	0.26	-13.33%	0.20	0.12	-40.0%

表2 计算后的实测加速度均方根量级与标准值对比相对差异

方向	计算后的加速度量级 r.m.s.		
	标准值/(m.s ⁻²)	计算值/(m.s ⁻²)	相对差异
车体垂向	1.01	0.75	-25.74%
车体横向	0.45	0.80	77.78%
车体纵向	0.70	0.50	-28.57%

对变流器模块的加速度均方根值最大值、平均值和标准偏差与标准中1类B级量级进行比对, 发现实测数据的垂向和纵向加速度均方根值平均、标准偏差和计算后的加速度均方根值都低于标准对应值, 而横向加速度均方根值平均、标准偏差和计算后的加速度均方根值都低于标准对应值, 证明实测数据与标准值

具有一定的差异性。

6 总结

对变流器模块实际装车振动数据进行测试, 测试路线选取京广线和兰新线, 测试里程超过7 800 km, 对变流器模块实测时域路谱数据进行了异常数据剔除和时域数据检验, 再计算相应的PSD曲线。由此每组时域数据对应得到1条PSD曲线。为对数据做进一步归纳, 将变流器测点各组单向数据应用统计分析的方法归纳为1组PSD曲线, 置信度(1- α)取0.9, 分位点为 β 取0.9, 这样, 每个试验方向都得到1组对应的PSD曲线。经过比对实测谱和标准给出的规范谱, 发现变流器模块的实测谱型较标准谱型存在较大差异, 且加速度均方根值实测数据与标准值也具有一定的差异性。故在条件允许的情况下采用实测谱型进行随机振动试验较标准给出的规范谱与真实情况更加接近。

参考文献:

- [1] 《振动与冲击手册》编著委员会.《振动与冲击手册》第二卷[M].北京:国防工业出版社, 1988.
- [2] Cyril M Harris, Allan G. Piersol. Shock and Vibration Hand Book [M]. New York: McGraw-Hill Book Company Inc, 2002.
- [3] 王浚, 黄本诚, 万才大, 等. 环境模拟技术[M].北京:国防工业出版社, 1996: 755-758.
- [4] 毛远琪, 言武, 何丹炉. 轨道交通 机车车辆设备 冲击和振动试验: GB/T 21563-2008 [S].北京:中国国家标准化管理委员会, 2008.
- [5] 李奇志, 陈国平, 邓君. 随机振动环境实测数据无偏估计方法研究[J].现代雷达, 2011, 33(2): 70-77.
- [6] Railway applications-Rolling stock equipment-Shock and vibration tests: IEC 61373: 2010 [S]. 2010.

作者简介: 刘国涛(1986-), 男, 工程师, 现主要从事振动试验及振动试验方法研究工作。

(上接第113页)

- Vibration analysis of a railway carbody using a shell model [J]. Journal of System Design and Dynamics, 2008, 2(1): 93-104.
- [5] Tadao Takigami, Takahiro Tomioka, Joel Hansson. Vibration Suppression of Railway Vehicle Carbody with Piezoelectric Elements (A Study by Using a Scale Model of Shinkansen) [J]. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 2007, 1(5): 649-660.
 - [6] 李伟, 缪炳荣, 张盈, 等. 高速列车缩尺比例车体模态参数识别研究[J].铁道车辆, 2016, 54(2): 1-4.
 - [7] 邱飞力, 张立民, 王学亮. 应用 Test. Lab 进行高速车体线路模态试验[J].噪声与振动控制, 2012, 32(2): 67-70.

- [8] 余建新, 赵鹏, 谭惠丰. 虚假模态参数识别试验研究[J].哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(7): 47-50.
- [9] 刘军, 高建立, 穆桂脂, 等. 改进锤击法试验模态分析技术的研究[J].振动与冲击, 2009, 28(3): 174-177.
- [10] Brian J Schwarz, Mark H Richardson. Experimental modal analysis [J]. CSI Reliability week, 1999, 35(1): 1-12.
- [11] 张新玉, 张文平, 李全, 等. 圆柱形薄壳结构的试验模态分析方法研究[J].哈尔滨工程大学学报, 2006, 27(1): 20-25.

作者简介: 李旭娟(1990-), 女, 硕士研究生, 主要从事结构载荷识别研究。