列车运行监控装置主机的超高斯 加速振动试验研究

许丽

(湖南铁路科技职业技术学院,湖南 株洲 412001)

摘要:目的 解决 LKJ 主机的超高斯振动试验问题。方法 基于 LKJ 主机的实测振动环境数据,提出一种超高斯振动数据归纳方法,并应用该方法归纳出 LKJ 主机 x、y、z 向的实测 PSD,同时按 5.66 的加速因子构 建出超高斯加速振动试验剖面,其中 x、y、z 向 PSD 的 RMS 分别为 3.34、6.28、3.85 m/s²,峰度分别为 6.48、 6.58、6.81,频率范围均为 2~350 Hz。最后,采用超高斯加速试验剖面分别对 2 个 LKJ 主机进行超高斯振动 试验验证。结果 试验共激发出 7 类故障模式,这与特定线路运行 LKJ 主机现场故障模式高度吻合。结论 该 试验方法验证了 LKJ 主机超高斯加速振动试验的有效性。

关键词:LKJ;超高斯;加速因子;振动试验;数据归纳;可靠性 中图分类号:U260.14+3 文献标识码:A 文章编号:1672-9242(2022)08-0135-08 DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.08.016

Research on Super-Gaussian Accelerated Vibration Test of LKJ Case

XU Li

(Hunan Vocational College of Railway Technology, Hunan Zhuzhou 412001, China)

ABSTRACT: This research aims to solve the problem of the super-Gaussian vibration test of the LKJ case. Therefore, this paper proposes a super-Gaussian vibration data induction method based on the measured vibration environment data of the LKJ case, and uses this method to sum up the x-direction, y-direction and z-direction of the LKJ case measured PSD, and constructed a super-Gaussian accelerated vibration test profile according to an acceleration factor of 5.66, in which the RMS of the x, y, and z-direction PSD are 3.34, 6.28, 3.85 m/s² respectively, the kurtosis is respectively 6.48, 6.58, 6.81, and the frequency range is 2~350 Hz. Finally, the super-Gaussian acceleration test profile is used to verify the super-Gaussian vibration test of the two LKJ case. The test has excited 7 types of failure modes, which are highly consistent with the on-site failure mode of the LKJ case running on a specific line. In conclusion, this test method verifies the effectiveness of the super-Gauss accelerated vibration test of the LKJ case.

KEY WORDS: LKJ; super-Gaussian; acceleration factor; vibration test; data induction; reliability

列车运行监控装置(LKJ)是我国自主研制的以保证列车运行安全为目的的关键铁路产品,其具备列

车运行的监控、记录、显示、报警提示和数据分析等 功能,对防止列车"两冒一超"、保障行车安全等方

Received: 2021-04-10; Revised: 2021-06-01

XU Li. Research on Super-Gaussian Accelerated Vibration Test of LKJ Case[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(8): 135-142.

收稿日期: 2021-04-10; 修订日期: 2021-06-01

作者简介:许丽(1979—),女,硕士,讲师,主要研究方向为轨道交通信号自动化、列车运行控制及其检测技术。

Biography: XU Li (1979-), Female, Master, Lecturer, Research focus: rail transit signal automation, train operation control and its test technology. **引文格式:** 许丽. 列车运行监控装置主机的超高斯加速振动试验研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(8): 135-142.

面具有显著的效果,可广泛应用于各型电力机车、内燃机车和动车组^[1-3]。

LKJ 作为关键轨道交通电子装置,根据 GB/T 25119^[4]的规定,在出厂前应按 GB/T 21563^[5]中1类 B 级要求完成高斯振动试验。然而,在某些特殊线路上运行的 LKJ 主机,虽然按 GB/T 21563 的要求通过了高斯振动试验,但在使用过程中仍出现了如紧固件松动、数据线磨损、死机、存储卡顿等多类振动失效故障模式。通过对特殊线路的振动环境测试与分析可知,其实测振动数据呈现超高斯分布的特性,这与GB/T 21563 中规定的高斯振动存在明显差异。

经研究,在高斯振动中,其加速度幅值超过3倍 均方根值(RMS)的时间仅占0.27%;而实测的超高 斯振动数据中,其加速度幅值超过3倍RMS的时间 高达1.5%。由于产品的累积疲劳损伤大多数是由2~4 倍均方根有效值的峰值加速度所引起的^[6],因此若仍 按高斯振动对特定线路上运行的LKJ主机进行振动 试验验证,则会明显减少该设备的疲劳损伤,也无法 充分激发或复现现场的故障模式。因此,为真实模拟 特殊线路上运行的LKJ主机的振动环境,本文针对 传统数据归纳方法无法适用于超高斯振动数据归纳 的现状,通过对特殊线路的振动环境进行测试与数据 处理,提出了一种超高斯振动数据归纳方法,并通过 加速以缩短试验时间,从而构建出LKJ主机的超高 斯加速振动试验剖面,通过试验验证,复现了LKJ 主机的多类现场故障模式。

1 振动环境测试与数据处理

本次选取 LKJ 主机振动失效率较高的某特殊线 路进行振动环境实测,其历经 10 个站点(9 个线路 区间段),其距离为 1 948 km,测试 3 次,测试里程 约为 5 800 km。在 LKJ 主机固定点及机车 I 类车体 安装典型区域共布置 12 个测点,并定义机车运行方 向为 x 向(纵向),运行方向的左右方向为 y 向(横 向)和运行方向的上下方向 z 向(垂向)。

通过振动环境测试获得约 100 G 的实测数据,并 按 GB 10593.3^[7]的要求对实测数据的平稳性、周期 性、各态历经性和正态性进行检验。经检验发现,实 测数据呈平稳随机超高斯特性(某段实测数据的概率 密度函数见图 1),将实测的时域数据采用 Welch 法 计算得到各组数据的功率谱密度(Power Spectral Density, PSD)^[8-9]。

2 超高斯振动数据归纳方法

数据归纳是制定振动试验剖面的先决条件,目前 常用的振动数据归纳方法有 GB 10593.3—90《电工 电子产品环境参数测量方法振动数据处理和归纳方 法》、HB/Z 87—84《飞机飞行振动环境测量数据的归



图 1 实测振动数据概率密度函数(双线性坐标) Fig.1 Probability density function of measured vibration data (bilinear coordinates)

纳方法》^[10]和 GJB/Z 126—99《振动、冲击环境测量 数据归纳方法》^[11]。其中,HB/Z 87和 GB 10593.3 采用了极值包络法,该方法按最大量级进行包络,并 未考虑数据样本量和数据分布特性,因此所归纳出的 试验条件往往过于严酷^[12-13];GJB/Z 126采用的统计 容差法相对于极值包络法具有质的飞跃,但该方法只 适用于高斯振动数据的归纳。为此,本文针对机车设 备实测数据和运行的实际情况,提出一种实测超高斯 振动数据的归纳方法。

2.1 同一路段同一测点多次测量数据归纳

按照 Welch 法计算得到同一路段(如站点 1—2) 和同一测点 *n* 次测量的 PSD 值,然后对 *n* 次测量的 PSD 值采用线性平均法进行归纳,见式(1)。

$$\overline{G}(f) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} G_i(f) \tag{1}$$

式中: $\overline{G}(f)$ 为在频率 f & n 次测量 PSD 值的平均值, $(m/s^2)/Hz$; n为同一路段测量次数; $G_i(f)$ 为在频率 $f \& \mathfrak{L}$ 第 i 次测量的 PSD 值, $(m/s^2)/Hz$ 。

按式(1)对12个测点在每一路段的*x、y、z*轴 方向3次测量的PSD进行归纳,每一振动方向(如*x* 轴方向)可得到108份PSD值。图2为某测点在*x* 轴方向3次测量数据归纳所得的PSD图。

2.2 同一路段同一区域多个测点测量数据 归纳

在实际测试中,同一区域内只能布置有限个测 点,而同一区域内多个测点测量数据归纳是为了解决 如何利用该区域内有限个测点数据的分析结果,正确 地反映该区域内所有测点数据特征的问题^[14]。其归纳 方法为在同一区域内布置了r个测点,则在同一路段 上拥有r个测量 PSD,将r个 PSD 布置在同一个频率 轴上,则在某一频率点上对应有r个 PSD 值(G_1 , G_2, \dots, G_r),则:



图 2 某测点 3 次测量数据归纳所得的 PSD (x 轴方向) Fig.2 PSD (x-axis direction) obtained by summarizing three measurement data at a certain measuring point: a) PSD of 3 measurements; b) PSD summarized by 3 measurements

$$\overline{G} = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^{r} G_i \tag{2}$$

$$\overline{S} = \sqrt{\frac{1}{r-1} \sum_{i=1}^{r} (G_i - \overline{G})^2}$$
 (3)

式中: \overline{G} 为同一区域内 r 个测点在某频率点上的 实测 PSD 值的平均值; G_i 为同一区域内第 i 个测点在 某频率点上的实测 PSD 值; r 为同一区域内的测点个 数; \overline{S} 为同一区域内 r 个测点在某频率点上的实测 PSD 的标准偏差。

根据置信系数 1 – a 得到实测 PSD 平均值的置信 上限值 G_{l-a}^{u} 为:

$$G_{1-a}^{u} = \overline{\mathbf{G}} + \frac{S \times t_{r-1,a/2}}{\sqrt{r}} \tag{4}$$

式中:1-*a*为规定的置信系数,取*a*=0.1^[5]; $t_{r-1,a/2}$ 为按自由度r-1和a/2值自t分布上查出的值。

由式(4)可求得各频率点处的 G_{1-a}^{u} 值,将全部 G_{1-a}^{u} 值布置在频率轴上,可得到一个归纳的 PSD 值, 该 PSD 值包含了同一区域中r个测点数据的信息。

按式(2)—(4)对 I 类车体安装区域中 12 个 测点在 x, y, z 轴方向的实测数据进行归纳,每个振 动方向可得到 9 份 PSD 值。其中,对"站点 1—2" 区间在 x 轴方向实测数据归纳所得的 PSD 值如图 3 所示。



Fig.3 PSD (station 1—station 2) induced by 12 measuring points in *x*-axis direction: a) PSD of 12 measuring points; b) PSD after data induction of 12 measuring points

2.3 同一区域多个路段测量数据归纳

我国的机车设备以运行里程来确定维修等级,机 车设备的运行里程与其使用寿命对应,设备的运行里 程越长,则振动累计损伤也越大。因此,在进行实测 数据归纳时,应根据路段区间的里程长短来确定该路 段实测数据在归纳数据中的比重,即该路段区间的里 程越长,则在归纳数据中的比重也越大。因此,可采 用加权平均法对同一区域多个路段的测量数据进行 归纳,具体为将总测试线路(如站点1—10)按车站 分成 m段(如站点1—2为其中一段),则在总测试 线路上可获得 m 个按前面所提方法归纳而成的实测 PSD 值,将这 m 个实测 PSD 值布置在同一频率轴上, 则在某频率点上对应的 m 个 PSD 值 G₁, G₂,…,G_m可按 式(5)进行归纳:

$$G_L = \sum_{i=1}^m \gamma_i G_i \tag{5}$$

式中: G_L 为某频率点上 *m* 个路段的测量数据归 纳出的 PSD 值; γ_i 为第 *i* 路段的加权系数, $\gamma_i = l_i / L$, $\sum_{i=1}^{m} \gamma_i = 1$; l_i 为测试线路上第 *i* 路段的里程, km; *L*为 测试线路的总里程, km; G_i 为在某一频率点上,某 一路段的实测 PSD 值; *m* 为测试线路所分成的段数。 由式(5)可求得各频率点处的 G_L 值,将全部 G_L 值布置在频率轴上,可得到1个归纳的PSD值,该 PSD值包含了同一区域中m个路段的数据信息,并且 某路段的里程越长,则该路段的实测数据在归纳所得 的PSD值中比重越大。本次实测线路共分为9个路 段,各路段里程数和加权系数见表1。

表 1 各路段里程和加权系数 Tab.1 Mileage and weighting factor of each road section

weighting fuetor o	r each road beetion
里程/km	加权系数γ
277	0.142
257	0.132
223	0.114
132	0.068
165	0.085
321	0.165
263	0.135
148	0.076
162	0.083
1 948	1.000
	里程/km 277 257 223 132 165 321 263 148 162 1948

应用表 1 中的加权系数按式(5)的方法,将 9 个路段实测数据进行归纳,得到在 *x*、*y*、*z* 轴方向的 PSD 值,如图 4—6 所示。其中,1 份 PSD 值中包含 了在该振动方向上 12 个测点在 9 个路段 3 次测量得 到的 324 份实测 PSD 值的特征信息。









图 5 y 轴方向 9 个路段实测数据归纳所得的 PSD 值 (2~350 Hz)

Fig.5 PSD (2 ~ 350 Hz) derived from measured data of 9 road sections in *y*-axis direction



图 6 z 轴方向 9 个路段实测数据归纳所得的 PSD 值 (2~350 Hz)

Fig.6 PSD (2 ~ 350 Hz) derived from measured data of 9 road sections along *z*-axis

2.4 实测 PSD 的均方根有效值计算

计算实测 PSD 的均方根有效值是制定加速超高 斯振动试验剖面的前提条件,图 4—6 所示 PSD 的均 方根有效值可按式(6)求得:

$$a_{\rm rms} = \sqrt{\sum_{k=2}^{n_1} \frac{\left[G_k(p) + G_{k-1}(p)\right](f_k - f_{k-1})}{2}}, (k=2,3,\ldots,n_1)(6)$$

式中: n_1 为在实测 PSD 频带范围内所包含的离散 PSD 值的个数; $G_k(p)$ 为第 k 个 PSD 值, (m/s²)/Hz; f_k 为 $G_k(p)$ 对应的频率值,Hz。

根据式(6)对图 4—6 中的均方根有效值进行计 算,可得到 *x、y、z* 轴方向的加速度均方根有效值分 别为 0.59、1.11、0.68 m/s²。

3 超高斯加速振动试验剖面设计

加速超高斯振动试验剖面设计是整个试验过程 的核心内容^[15],目前轨道交通行业还没有制定超高斯 振动试验标准,因此需要自主制定试验剖面。本次试 验剖面设计包括加速因子计算、峰度值估计和超高斯 试验剖面制定等内容。

3.1 加速因子计算

加速振动试验通过增大试验量级从而缩短试验 时间,而加速因子是制定加速试验剖面的关键参数, 本次采用 GB/T 21563 中的典型疲劳强度曲线(见图 7)计算加速因子^[4,16]。



在图 7 中,试验时应力幅度为 $\Delta \sigma_{t}$,循环次数为

$$D_1 = \alpha_1 \Delta \sigma_t^{m_1} N_t$$
 (7)
式中: D_1 为 LKJ 主机在试验时的损伤; α_1 为常数。
若 LKJ 主机的实际运行时循环次数 $N_s \ge N_D$ 时,则
 $D_2 = \alpha_2 \sigma_s^{m_2} N_s$ (8)

式中: D_2 为 LKJ 主机在实际使用时的损伤; α_2 为常数。

将式(7)除以 D_1 ,式(8)除以 D_2 ,令 $\alpha_1^* = \alpha_1 / D_1$, $\alpha_2^* = \alpha_2 / D_2$,可得:

$$\alpha_1^* \Delta \sigma_t^{m_1} N_t = 1 \tag{9}$$

$$\alpha_2^* \Delta \sigma_s^{m_2} N_s = 1 \tag{10}$$

$$\sum_{t=1}^{m_{1}} \Delta \sigma_{t}^{m_{1}} N_{t}$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{\Delta \sigma_s^{m_2} N_s} \tag{12}$$

在图 7 中, D 点的循环次数为 $N_{\rm D}$, 对应的应力 幅度为 $\Delta \sigma_{\rm D}$, 代入式(11)和式(12), 可得:

$$\alpha_1^* = \frac{1}{\Delta \sigma_D^{m_1} N_D} \tag{13}$$

$$\alpha_2^* = \frac{1}{\Delta \sigma_{\rm D}^{m_2} N_{\rm D}} \tag{14}$$

$$\Delta \sigma_{\rm t} = \left(\frac{1}{N_{\rm t} \alpha_{\rm l}^*}\right)^{\frac{1}{m_{\rm l}}} \tag{15}$$

$$\Delta \sigma_{\rm s} = \left(\frac{1}{N_{\rm s} \alpha_2^*}\right)^{\frac{1}{m_2}} \tag{16}$$

根据式(15)、(16)、加速因子 β 为:

$$\beta = \frac{\Delta \sigma_{t}}{\Delta \sigma_{s}} = \frac{A_{t}}{A_{s}} = \frac{(N_{s} \alpha_{2}^{*})^{1/m_{2}}}{(N_{t} \alpha_{1}^{*})^{1/m_{1}}} =$$
(17)

$$\frac{N_{\rm s}^{1/m_2} (\Delta \sigma_{\rm D}^{m_1} N_{\rm D})^{1/m_1}}{N_{\rm t}^{1/m_1} (\Delta \sigma_{\rm D}^{m_2} N_{\rm D})^{1/m_2}} = \frac{N_{\rm s}^{1/m_2}}{N_{\rm t}^{1/m_1}} (N_{\rm D})^{1/m_1 - 1/m_2}$$

假设 LKJ 主机的寿命为 25 a, 1 a 运行 300 d, 每 天工作 10 h,则其运行时间为 2.7×10⁸ s^[2]。由于实测 PSD 值的最小频率为 2 Hz,则与其使用寿命相对应 的最少循环次数为:

$$N_{\rm s} = \frac{2.7 \times 10^8}{1/f_{\rm min}} = 5.4 \times 10^8 \tag{18}$$

由式(18)可知,实际使用寿命的最少循环次数 大于图 7 中截止极限 1.0×10⁸。

假设试验时间为 5 h (1.8×10⁴ s),则试验时的最 少循环次数为:

$$N_{\rm t} = \frac{1.8 \times 10^4}{1/f_{\rm min}} = 3.6 \times 10^4 \tag{19}$$

试验时 $\Delta \sigma_t$ 位于图 7 中第 2 部分, $m_1 = 4$, $m_2 = m_1 + 2 = 6^{[2]}$, 由式 (17) —(19)可得:

$$\beta = \frac{N_{\rm s}^{\frac{1}{m_1}}}{N_{\rm t}^{\frac{1}{m_1}}} (N_{\rm D})^{\frac{1}{m_1 - m_2}} = 5.66$$
(20)

3.2 峰度值统计

工程中常用峰度来描述超高斯随机过程,当峰度 *k*=3时为高斯过程,当峰度*k*>3时为超高斯过程。 峰度计算公式见式(21)。

$$k = \frac{E[x - E(x)]^4}{\left\{E[x - E(x)^2]\right\}^2}$$
(21)

式中: *k* 为峰度; *x* 为随机变量; *E*(*x*) 为随机变量*x* 的均值。

在进行峰度值统计时,从9个路段中分别抽取多 组实测时域数据,使用 LMS Test Lab 软件按式(21) 对峰度进行统计,其结果见表 2。由表 2 可得到 *x*、*y*、 *z* 轴方向的平均峰度值分别为 6.48、6.58、6.81。

3.3 试验剖面构建

加速超高斯随机振动试验剖面的加速度均方根 有效值可按式(22)计算。

$$A_{\rm rms} = \beta \cdot a_{\rm rms} \tag{22}$$

式中: β 为加速因子, β =5.66; a_{rms} 为实测 PSD 值的均方根有效值,在x、y、z 轴方向的有效值分别 为 0.59、1.11、0.68 m/s²。

	表 2	峰度统计	
	Tab.2 Kurt	osis statistics ta	able
数据编号	方向	峰度值 k	平均峰度值 k
1	x	6.46	
2	x	6.26	
3	x	6.38	6 19
4	x	6.46	0.40
5	x	6.44	
6	x	6.87	
7	у	7.86	
8	у	6.33	
9	У	7.07	6 58
10	У	7.25	0.56
11	У	5.55	
12	у	5.42	
13	Ζ	6.29	
14	Ζ	6.96	
15	Z	5.71	6.81
16	Z	6.57	0.01
17	Z	7.41	
18	Ζ	7.92	

由式(22)可求得在x、y、z轴方向加速试验剖 面的加速度均方根有效值分别为 3.34、6.28、 3.85 m/s², 然后使用振动控制软件的均方根有效值修 正功能,得到加速后的x, y, z轴方向的 PSD 值(即 加速试验剖面),同时加入表2中统计出的x、y轴方 向的峰度值,即可得到加速超高斯随机振动试验剖 面,如图 8-10 所示。







Fig.9 Accelerated super Gaussian random vibration test section in y-axis direction: a) Measured super-Gaussian vibration test section in the x-axis direction; b) kurtosis-time curve (*k*=6.48)



图 10 z 轴方向加速超高斯随机振动试验剖面 Fig.10 Accelerated super Gaussian random vibration test section in z-axis direction: a) Measured super-Gaussian vibration test section in the z-axis; b) kurtosis-time curve (k=6.81)

GB/T 21563 与实测超高斯振动试验参 3.4 数对比

GB/T 21563 标准与实测加速超高斯随机振动试 验参数的对比见表 3。

表 3 GB/T 21563 与实测超高斯振动试验参数对比 Tab.3 Comparison of GB/T 21563 and measured super Gaussian vibration test parameters

		-			-		•	
主向	加速度均方根有效值/(m·s ⁻²)		峰度值 k			频率范围/Hz		
刀門	GB/T 21563	实测剖面	相对差异	GB/T 21563	实测剖面	相对差异	GB/T 21563	实测剖面
x	4.25	4.39	3.29%	3	6.48	116%	2~150	2~350
У	2.09	6.21	197.13%	3	6.58	119%	2~150	2~350
Z	2.83	3.86	36.39%	3	6.81	127%	2~150	2~350

由表 3 可知, 实测剖面的加速度均方根有效值、 峰度值与 GB/T 21563 的相对差异分别为 3.29%~ 197.13%和 116%~127%,并且实测剖面的频率范围 (2~350 Hz)大于标准规定的频率范围(2~150 Hz)。 由此可见,某特殊线路的振动量级较高,且为超高斯 分布,这与 GB/T 21563 中规定的振动试验条件存在 显著差异,因此按 GB/T 21563 进行振动试验,难以 对应于某特殊线路 LKJ 的振动疲劳耐久性进行充分 验证。

4 LKJ 主机超高斯振动试验验证

首先,按表 4 中的参数,搭建超高斯振动试验 系统。然后,随机抽取 2 台 LKJ 主机,通过铝制振 动夹具安装在振动台面上,并在固定点处布置 2 个 振动控制点,1 个振动监测点,采用 2 点平均控制方 式,分别按图 8—10 所示试验剖面,依次对 2 台 LKJ 主机进行超高斯加速振动试验(如图 11 所示)。试 验过程中监控主机的速度信号、机车信号、机车工 况信号、压力信号、输出控制信号等主要性能参数。 2 台 LKJ 主机超高斯振动试验中所暴露的故障模式 见表 5。

表 4 超高斯振动试验系统参数 Tab.4 Super-Gaussian vibration test system parameters

振动台	功率放大器	振动控制器	加速度计
速度 3.2 m/s 电动振动台	100 KVA 功率放大器	VR9500 控制器	B&K4526 型



图 11 超高斯加速振动试验状态 Fig.11 Super Gaussian accelerated vibration test status

表 5 LKJ 主机暴露出的故障模式

Tab.5 F	ailure	modes	exposed	bv	the	LKJ	host
140.01	anare	mouco	chpobea	υ,	une	1110	1100

序号	故障模式
1	数据存储卡顿、原始记录文件丢失
2	装置窗口显示的运行速度及距离与实际不符,
	并报警轮对空转
3	达标提前启控,限速突降
4	运转中监控主机复位
5	速度信号故障,途中速度突降为0
6	运行中显示屏重复启动
7	数据线磨损、紧固螺钉松动

根据 LKJ 主机在近 2 a 内的现场运行故障数据分 析可知,超高斯加速试验中所激发出的故障模式与特 定线路现场故障模式高度吻合,由此也验证了所设计 的超高斯加速振动试验剖面的合理性。

5 结论

1)针对 LKJ 主机的超高斯振动试验问题,提出 了超高斯振动数据归纳方法,并应用该方法归纳出了 LKJ 主机在 *x*、*y*、*z*向的实测振动 PSD 值。

2)文中计算出本次振动试验的加速因子为5.66, 并采用实测振动数据统计出了x、y、z向的平均峰度 值分别为6.48、6.58、6.81,从而构建出LKJ主机的 超高斯加速振动试验剖面。经对比发现,超高斯剖面 的加速度 RMS 值、峰度值与 GB/T 21563 规定值的相 对差异分别为 3.29%~197.13%和 116%~127%,且超 高斯振动剖面 2~350 Hz 的频率范围大于标准规定的 2~150 Hz。

3)为验证超高斯加速振动试验的有效性,抽取 了 2 台 LKJ 主机分别进行了超高斯加速振动试验。 结果表明,超高斯加速试验中所激发出的 LKJ 主机 的故障模式与特定线路现场故障模式高度吻合。

参考文献:

[1] 周志飞. LKJ2000 监控记录装置的冗余设计[J]. 机车电 传动, 2003(1): 22-26.

ZHOU Zhi-fei. Redundancy Design of LKJ2000 Monitor & Record Device[J]. Electric Drive for Locomotive, 2003(1): 22-26.

- [2] 王奇. LKJ2000 型列车运行监控记录装置的可靠性与安 全性设计[J]. 机车电传动, 2001(5): 26-29.
 WANG Qi. Reliability and Safety Design of LKJ2000 Train Monitoring and Recording Device[J]. Electric Drive for Locomotive, 2001(5): 26-29.
- [3] 王鹏, 胡平贵, 刘国涛, 等. 列车运行监控装置主机的 可靠性鉴定试验[J]. 机车电传动, 2017(4): 15-19.
 WANG Peng, HU Ping-gui, LIU Guo-tao, et al. Reliability Appraisal Test of Main Engine of Train Operation Monitoring Device[J]. Electric Drive for Locomotives, 2017(4): 15-19.
- [4] GB/T 25119—2010, 轨道交通 机车车辆电子装置[S].
 GB/T 25119—2010, Railway Applications—Electronic Equipments Used on Rail Vehicles[S].
- [5] GB/T 21563—2018, 轨道交通 机车车辆设备 冲击和 振动试验[S].
 GB/T 21563—2018, Railway Applications—Rolling Stock Equipment—Shock and Vibration Tests[S].
- [6] CONNON W H. Comments on Kurtosis of Military Vehicle Vibration Data[J]. Journal of the Institute of Environmental Sciences,1991(10): 38-41.
- [7] GB 10593.3—1990,电工电子产品环境参数测量方法 振动数据处理和归纳[S].
 GB 10593.3—1990, Methods of Measuring Environmental Parameters for Electric and Electronic Products-Treatment and Induction for the Vibration Data[S].
- [8] 丰志强.飞机机载设备振动/温度环境谱数据处理与程序设计[D].北京:中国农业机械化科学研究院,2005. FENG Zhi-qiang. Vibration/Temperature Data Processing and Program Design of Environmental Spectrum for Aircraft Airborne Equipment[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Science, 2005.
- [9] 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(2): 289-293. FENG Zhi-qiang, YAN Chu-liang, ZHANG Shu-ming. Data Processing and Compilation of Vibration Environmental Spectrumfor Aircraft Airborne Equipment[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(2): 289-293.

- [10] GJB/Z 126—99, 飞机飞行振动环境测量数据的归纳方法
 [S].
 GJB/Z 126—99, The Inductive Methods for Environmental Measured Data of Vibration and Shock[S].
- [11] GJB/Z 126—99, 振动、冲击环境测量数据归纳方法[S]. GJB/Z 126—99, The Inductive Methods for Environmental Measured Data of Vibration and Shock[S].
- [12] 姚起杭.制订振动环境试验标准的有关问题综述[J]. 航空标准化, 1980(S2): 1-22.
 YAO Qi-hang. Summary of Related Issues in the Formulation of Vibration Environmental Test Standards[J]. Aviation Standardization, 1980(S2): 1-22.
- [13] 穆立茂,黄海英,张靖.货车货厢振动环境测试与数据 处理[J].装备环境工程,2007,4(4):27-30.
 MU Li-mao, HUANG Hai-ying, ZHANG Jing. Vibration Test and Data Processing of Truck Compartment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2007, 4(4): 27-30.
- [14] 朱玉琴,肖勇,苏艳. 装甲平台诱发环境振动数据处理 技术与应用研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(3): 72-76.
 ZHU Yu-qin, XIAO Yong, SU Yan. Application Research of Vibration Data Processing Technology for Armed Vehicle Platform Induced Environment[J].
 Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(3): 72-76.
- [15] 王冬梅,谢劲松.随机振动试验加速因子的计算方法
 [J].环境技术,2010,28(2):47-51.
 WANG Dong-mei, XIE Jin-song. Acceleration Factor Calculation Method of Random Vibration Test[J]. Environmental Technology, 2010, 28(2):47-51.
- [16] 富冈隆弘.关于 IEC 61373《轨道交通 机车车辆设备 冲击和振动试验》修订的介绍[J].铁道技术监督,2012, 40(4): 7-11.

TOMIOKA Takahiro. Introduction to the Revision of IEC 61373 "Impact and Vibration Test of Rail Transit, Rolling Stock Equipment"[J]. Railway Quality Control, 2012, 40(4): 7-11.

责任编辑:刘世忠