

冲击响应谱在机车设备 冲击试验上的应用

吴永生, 刘国涛, 姜 华, 黄 成

(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: 考核铁路机车车辆上装载的产品抵抗冲击的能力需对其进行冲击试验, 但典型冲击脉冲波如半正弦波不能真实有效地模拟实际复杂的冲击振动环境。借助计算机技术和环境模拟理论, 冲击响应谱试验可以较真实地模拟系统所受到的冲击环境。首先对冲击响应谱与经典冲击脉冲做了比较, 然后说明了冲击响应谱的物理模型及冲击响应谱试验的原理, 并叙述了时域波形合成方法及其优化算法, 最后以实例介绍了冲击响应谱试验的流程, 为后期冲击响应谱试验的进行提供了实践支持。

关键词: 冲击响应谱; 时域波形合成; 冲击试验; SRS 试验

中图分类号: O347.1; U260.14

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2016.06.017

Research of Shock Response Spectrum on Shock Test of Rolling Stock Equipment

WU Yongsheng, LIU Guotao, JIANG Hua, HUANG Cheng

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

Abstract: In order to assess product's ability to resist impact, shock tests should be made on rolling stock equipment of railway. However, classical shock such as half-sine shock could not simulate the actual impact environments effectively. With the development of computer technology and environmental simulation theory, shock response spectrum test could simulate the real impact of the system by environment more realistic. Firstly, shock response spectrum and classical shock pulses were compared. Then the physical model of shock response spectrum was subjected, as well as the shock response spectrum test principles. After that, a detailed description of time-domain waveform synthesis methods and optimization algorithms was presented. Finally, an example was taken to introduce SRS test processes, which provided support for the future SRS test.

Keywords: shock response spectrum (SRS); time-domain waveform synthesis; shock test; SRS test

0 引言

冲击试验的目的是确定产品在使用和运输过程中承受非重复性机械冲击的适应性, 其结构的完好性以及该产品耐冲击载荷作用的置信度^[1]。目前铁路机车车辆设备的冲击试验多以简单脉冲产生的冲击效果来模拟实际的冲击环境, 如 GB/T 21563—2008^[2]中的半正弦波形脉冲。这种模拟方法使用方便、操作简单且

重复性好, 但进行加速度功率谱密度分析可知: 简单冲击如 GB/T 21563—2008 中规定的 1 类冲击 30 ms 脉宽有较大的低频能量, 可使设备由于低频过试验而损坏。因此使用脉冲波作为冲击试验规范往往存在着较大的局限性。

随着计算机技术和环境模拟理论的发展, 以及实时数字控制系统功能的不断完善, 冲击试验技术发生了巨大变化, 用数字振动控制系统进行冲击响应谱 (shock response spectrum, 简称 SRS) 模拟已经成为

冲击环境试验的主要方法^[3]。冲击响应谱试验可以较真实地模拟系统所受到的冲击环境。

1 冲击响应谱试验与传统冲击试验比较

和经典波形的冲击相比，冲击响应谱有如下几点优势^[4]：

①研究冲击的目的不是研究冲击波形本身，而更注重的是研究冲击运动对系统的损伤势。用冲击的时间历程来描述损伤势不但困难，而且有时会得出错误的结论。而冲击响应谱规范则能很好地避免这样的错误。

②传统的冲击规范严格规定脉冲的类型，而冲击响应谱规范对冲击脉冲的类型和产生冲击的方法不做严格要求，因此试验的灵活性增大。

③冲击响应谱是响应等效的，对产品的作用效果也等效，因此冲击响应谱模拟比规定冲击脉冲来模拟更接近实际冲击环境。

另外，产品实际承受的冲击是一种复杂的瞬态振动（见图1），半正弦波或后峰锯齿波等典型冲击脉冲不可能真实有效地模拟实际复杂的冲击环境。

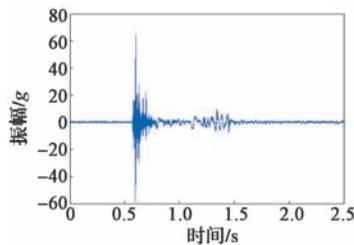


图1 实际环境中设备所受的复杂瞬态冲击示例

④通过冲击响应谱分析，可以对设备各部件所承受的最大动力载荷有较准确的掌握，从而预测出冲击潜在的破坏；同时提供一个较灵活的技术，实现试验的可重复性。

综合以上4点可知：冲击响应谱试验技术是冲击试验发展的方向。目前，美国等发达国家的冲击响应谱试验技术已较成熟，美军标 MIL-STD-810G、MIL-STD-7005 等冲击试验规范要求以冲击响应谱作为冲击试验的标准。在我国 GJB-150A 中也推荐优先使用冲击响应谱代替经典脉冲。

2 冲击响应谱的物理模型

冲击响应谱是一系列不同频率、具有一定阻尼的线性单自由度系统受到冲击力产生的最大响应与系统频率的关系曲线。它是用来衡量系统受到冲击作用效果的尺度。

一个实际的物理系统可以分解为多个不同的单自由度系统，对于每个单自由度系统进行冲击响应分析计算，取系统响应的最大值，然后将其固有频率组成一个数据点。这样分解成多少个单自由度系统就可以得到多少组数据点。最后将这些点用光滑的曲线连接，即可得到整个系统的冲击响应谱，如图2所示^[5]。

从图2中可以看出，把一个实际的物理模型分解成包含有 n 个不同固有频率的单自由度系统，而每个子系统都可以简化成质量-弹簧-阻尼系统。但是上

述模型在实际操作上是困难的甚至是不能实现的，为了更方便地利用数学方法计算响应谱，必须对模型进行适当的简化。简化的思路如下：将多个单自由度系统中最低的频率 f_1 取出，分析此系统的响应，假设峰值响应为 A_1 ，然后改变 f_1 为 f_2 ，其余条件不变，得出峰值响应 A_2 。依此类推，重复上述的步骤，当 f 遍历 $f_1 \sim f_n$ 便得到整个系统的峰值响应 $A_1 \sim A_n$ 。将各点 (f_1, A_1) 、 (f_2, A_2) 、 \dots 、 (f_n, A_n) 用光滑的曲线连接就可以得到整个系统的冲击响应谱。

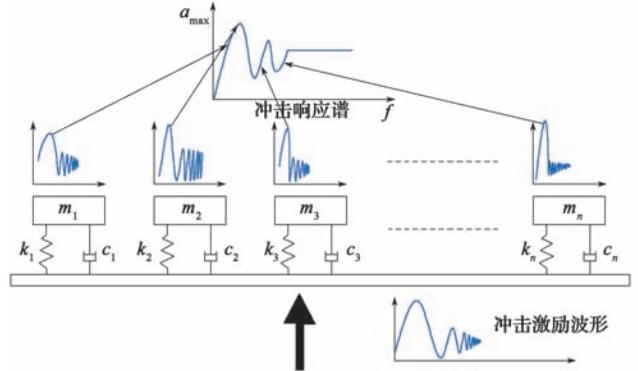


图2 实际物理系统拆分成多个单自由度系统物理模型

3 冲击响应谱试验

3.1 冲击响应谱规范

冲击响应谱规范规定一条标准的曲线，有上下限容差，试验优劣的判定依据是产生的冲击响应谱是否在规范规定的容差范围内^[6-7]。图3是一条标准的冲击响应谱曲线。 f_1 和 f_3 分别是分析频率的上、下限， f_2 是拐点频率， ϕ_1 和 ϕ_2 分别是曲线的斜率。各国规定的冲击响应谱规范的上、下限容差稍有差别，例如：美军标 MIL-STD-810D 中规定在 0~3 000 Hz 频率范围内，容差带范围为 ± 6.0 dB，3 000 Hz 以上容差带范围为 $+9.0/-6.0$ dB，并要求有 50% 的正偏差。

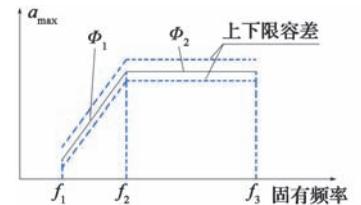


图3 冲击响应谱规范曲线

图4为 MIL-STD-810G 中推荐的在没有测量数据的情况下几种设备使用的试验冲击响应谱，表1为其对应的试验谱值。

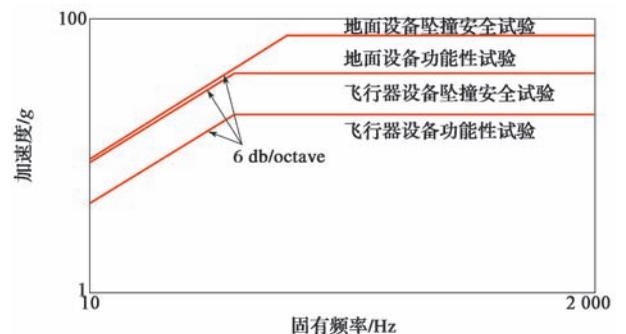


图4 未测量数据时使用的冲击响应谱

表 1 未测量数据时使用的试验冲击响应谱 (MIL-STD-810G)

试验	峰值加速度 /g	持续时间 /ms	频率折点 /Hz
飞行器设备功能性试验	20	15~23	45
地面设备功能性试验	40	15~23	45
飞行器设备坠撞安全试验	40	15~23	45
地面设备坠撞安全试验	75	8~13	80

3.2 冲击响应谱试验的基本原理

用振动台做冲击试验时, 首先要求控制仪根据试验规范合成一个加速度时域波形, 然后转化成适当量级的电信号, 经数模转换器 (D/A) 转变成连续的时域模拟信号后输出到功率放大器以推动振动台, 振动台上控制点的响应通过加速度传感器传回到控制仪, 经模数转换器 (A/D) 转换成离散的数字信号后进行响应谱分析, 与规定的试验参考谱比较后对驱动信号进行修正以进行下一量级的试验。其基本原理见图 5。

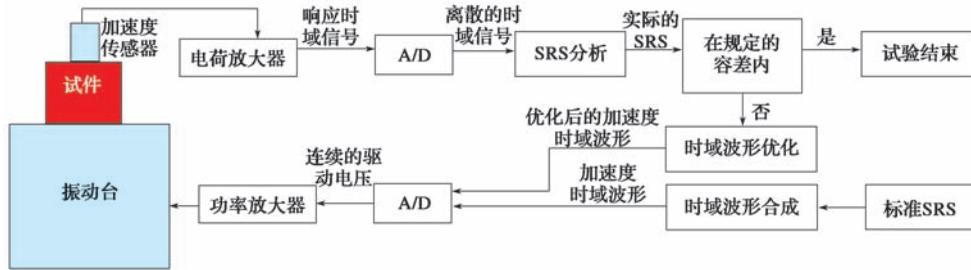


图 5 冲击响应谱试验系统原理图

根据定义, 冲击响应谱反映的是线性单自由度系统固有频率与系统受到冲击时所产生的最大响应之间的关系, 其间不包含激励与响应之间的相位信息, 因此, 冲击时域波形和冲击响应谱之间不存在唯一的对应关系。

3.3 冲击响应谱时域波形合成

在振动台上试验前需先将冲击响应谱转化为时域波形。本文使用合成基波法 (WAVSYN)^[8] 研究加速度时域波形的合成及优化。合成基波法合成的时域波形可满足初始和最终速度、位移为零的条件。该法采用的基本波形为:

$$W_{(t)m}=0 \quad (0 < t < t_{dm}) \quad (1)$$

$$W_{(t)m} = A_m \sin \left[2\pi \frac{f_m}{N_m} (t - t_{dm}) \right] \sin \left[2\pi f_m (t - t_{dm}) \right] \quad (t_{dm} < t < T_m + t_d) \quad (2)$$

$$W_{(t)m}=0 \quad (t > T_m + t_{dm}) \quad (3)$$

式中: m —分析频率点数; A_m —波形的振幅; f_m —波形的频率; N_m —半正弦波数目, 取大于等于 3 的奇整数; t_{dm} —相对零时刻的波形延迟时间; T_m —波形持续时间。

用冲击响应谱来描述冲击, 目前通用的规范是给定一定频率范围内所对应的冲击响应谱值 A_{SRS} , 且有一定的持续时间要求。在进行冲击谱分析时, 分析带宽通常选 1/6 oct, 阻尼系数一般选 $\zeta=0.05$ ($Q=10$), 对于一个给定的频率范围, 按 1/6 oct 步长分析, 有多个波形成分, 因此, 合成总的时域波形可表示为

$$S_{(t)} = \sum_{m=1}^n W_{(t)m} \quad (4)$$

式中: n 为波形成分的总数目。

根据上述的计算公式, 可以计算出一组时域波形。

3.4 优化计算

优化计算的目的是使合成的时域波形的最大加速度值小于振动台的最大许可值, 同时由该时域波形计算的冲击响应谱值满足试验规范的要求^[9]。

3.4.1 冲击响应谱修正方法

在计算冲击响应谱值时, 设分析频率点 f_m 的冲击谱计算值为 A_{ss} , 该点的 A_m 与 A_{ss} 之间一般为非线性关系, 为了排除非线性的影响, 假设冲击谱值在微小变化范围内是线性的, 给出一调节步长 k , 此时 f_m 的波形振幅增量为

$$\Delta A_m = \left| \frac{A_{SRSm}}{A_{ss}} - 1 \right| A_m / k \quad (5)$$

式中: A_{SRSm} 为分析频率点 f_m 对应的冲击谱规范值^[10];

A_m 的取值为 $A_m = \frac{A_{SRSm}}{N_m}$ 。

修正后的 f_m 点对应的 A'_m 值可按下式计算:

$$A'_m = \Delta A_m + A_m \quad (6)$$

参数 A_m 的变化对于冲击响应谱影响最大, 通过式 (5)、式 (6) 计算后用 A'_m 代替 A_m 计算冲击响应谱, 可使分析频率点 f_m 的冲击响应谱计算值 A_{ss} 不断逼近该点的冲击响应谱规范值 A_{SRSm} 。

3.4.2 时域优化计算方法

设振动台最大许可的加速度幅值为 A_{max} , 根据冲击响应谱修正方法进行加速度时域波形合成时, 只是单纯考虑了冲击响应谱值满足规范要求, 而对应的时域波形的最大加速度值很可能超过振动台的最大许可值, 因此有必要进行加速度时域优化。

用式 (4) 进行时域波形合成时, 假设合成到第 i 个频率分析点 f_i 时的加速度值为 $S_{(i)}$, 若 $S_{(i)} \leq A_{max}$, 则该合成时域波形符合要求, 若 $S_{(i)} > A_{max}$, 则调整 t_{di} , 具体调节算法如下:

给出一个延迟调节量 Δi , 此时 f_i 点对应的延迟时间调节为

$$t'_{di} = t_{di} + \Delta i \quad (7)$$

根据调节后的 t'_{di} 重新合成时域波形, 同时进行冲击响应谱计算, 当冲击响应谱值不满足规范要求时, 按冲击响应谱修正方法进行调整, 直至满足要求。

4 应用示例

假设某试验规范如下:

20~55 Hz, 6.5 dB/oct;

55~290 Hz, 1g;

试验持续时间: 小于等于 1 000 ms;

冲击响应谱容差带: -1.0~3.0 dB。

本例计算冲击响应谱时, 分析带宽取 1/6 oct, 阻尼系数取 $\zeta=0.05$ ($Q=10$)。首先合成时域波形 (见图 6), 对应的冲击响应谱值见图 7, 对应的冲击响应谱值满足试验规范要求; 将驱动信号转化为 -12 dB 量级, 输入到振动台系统, 计算出台面上控制点的响应加速度波形, 其对应的 SRS 在容差范围内, 而后按 3 dB 量级递增。-9 dB 量级时对应的冲击响应谱值见图 8, 此时冲击响应谱值在高频段稍低于规范值, 将对应的高频段驱动电压调低, 然后以 -6 dB 量级激励振动台, 对应的冲击响应谱值见图 9, 此时冲击响应谱值在高频段又稍高于规范值; 再将驱动电压略做调整, 以 -3 dB 量级激励, 最后满量级激励, 0 dB 量级时响应加速度波形见图 10, 对应的冲击响应谱值见图 11, 此时冲击响应谱值符合规范要求, 试验结束。

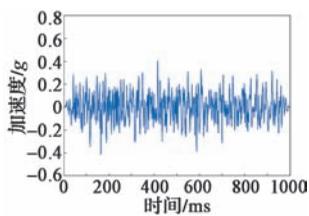


图 6 初始合成的时域波形

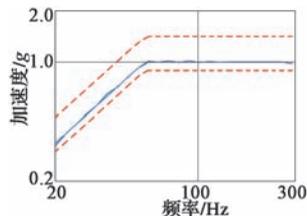


图 7 初始合成的冲击响应谱

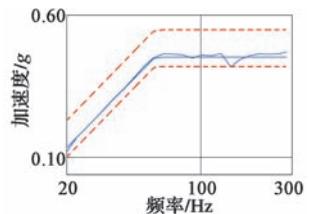


图 8 -9 dB 量级时的冲击响应谱

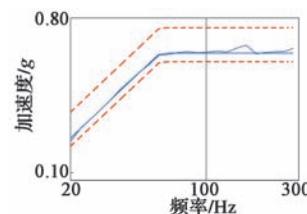


图 9 -6 dB 量级时的冲击响应谱

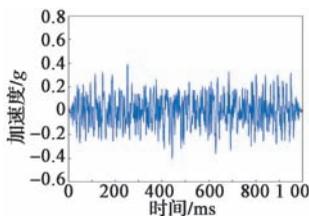


图 10 0 dB 量级时的加速度波形

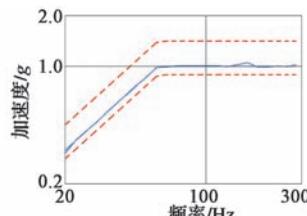


图 11 0 dB 量级时的冲击响应谱

5 结语

在已获得铁路机车车辆设备实际运行过程中的冲击数据的条件下, 利用计算得到的冲击响应谱进行

SRS 试验, 改变了传统的经典的半正弦脉冲试验仅考虑冲击波形和脉宽的不足, 可将设备的结构对冲击的响应和冲击波形进行综合分析, 从而使冲击试验模拟出更接近真实冲击环境的效果, 以达到激发实际使用中可能出现的由冲击导致的设备故障, 进而提高产品的环境适应性。

参考文献:

- [1] 振动与冲击手册编写组. 振动与冲击测试技术 [M] // 振动与冲击手册. 北京: 国防工业出版社, 1990.
- [2] 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.
- [3] 赵玉刚. 冲击响应分析方法及其应用 [D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [4] 蹇永博. 冲击响应谱试验技术研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
- [5] Cyril M Harris, Allan G Piersol. Shock and Vibration Hand Book [M]. New York: McGraw-Hill Book Company Inc, 2002.
- [6] 卢来洁, 马爱军, 冯雪梅. 冲击响应谱试验规范评述 [J]. 振动与冲击, 2002, 21(2): 18-20.
- [7] ENVIRONMENTAL ENGINEERING CONSIDERATIONS AND LABORATORY TESTS: MIL-STD-810G [S]. 2008.
- [8] Rober C Yang, Herbert R Saffall. Development of a waveform synthesis technique—A supplement to response spectrum as a definition of shock environment [J]. The Shock and Vibration Bull, 1972, 42(2): 45-53.
- [9] 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.
- [10] 李传日, 袁宏杰, 王德言, 等. 军用装备实验室环境试验方法第 18 部分: 冲击试验: GJB 150.18A—2009 [S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 2009.
- [11] 刘洪英, 马爱军, 冯雪梅. 冲击响应谱控制系统仿真研究 [J]. 计算机仿真, 2003, 20(7): 23-25.
- [12] 都军民, 戴宗妙. 冲击响应谱在冲击试验中的应用研究 [J]. 舰船科学技术, 2007, 29 (增刊 1): 19-21.



作者简介: 吴永生 (1976-), 男, 工程师, 现主要从事电气产品检验及环境与可靠性试验技术研究工作。