

试
验
检
测机车车辆设备振动冲击试验系统的
技 术 研 究陈高华¹, 王 鹏¹, 余 锋¹, 张巧寿², 夏树杰²(1.铁道部产品质量监督检验中心牵引电气设备检验站, 湖南 株洲 412001;
2.中国航天科技集团公司第一研究院第七零二研究所, 北京 100076)

作者简介: 陈高华 (1967-), 男, 高级工程师 (教授级), 长期从事铁路机车车辆牵引与控制技术开发及相关试验技术研究。

摘 要: 阐述了机车车辆设备力学环境试验要求, 给出了机车车辆设备振动冲击试验系统的技术条件, 分析了实现技术条件所面临的技术难点, 提出了试验系统的解决方案。基于该方案而研制的大型振动冲击试验系统通过了计量检定与试验验证, 各项技术指标均达到或超过设计要求, 满足机车车辆设备系统级产品的试验要求。

关键词: 机车车辆设备; 振动冲击; 试验系统; 技术条件; 力学环境

中图分类号: U260.14*6; U260.14*3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-128X(2012)02-0054-05

Research of Vibrating and Shock Test System for Rolling Stock Equipment

CHEN Gao-hua¹, WANG Peng¹, YU Feng¹, ZHANG Qiao-shou², XIA Shu-jie²

(1. Traction Electric Equipment Test Station, Products Quality Supervision and Test Center, Ministry of Railways, Zhouzhou, Hunan 412001, China; 2. The 702th Research Institute, the First Academy, China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100076)

Abstract: Mechanic environment test requirement of rolling stock equipment was expounded, and technic specification of rolling stock equipment vibratory and shock test system was presented. The difficulties of technic specification implementation were analyzed, and the settling scheme was provided. The giant vibratory and shock test system based on the proposed scheme had passed the measurement calibration and test certification, and all the indexes had reach or forereach the design requirements, which satisfied rolling stock equipment system test demands.

Key words: rolling stock equipment; vibrating and shock; test system; technic specification; mechanic environment

0 引言

振动冲击试验的目的是验证所设计的产品能够承受外来或自身产生的振动或冲击而不被破坏, 并能发挥其性能, 达到预定寿命^[1]。振动冲击试验系统是模拟被试对象实际工作时力学环境的关键设备, 它已广泛应用于铁路机车、汽车、船舶、航空航天、桥梁建筑、电子通信等领域。

目前, 用于振动冲击试验的设备主要有电动、液压和机械振动台3类。其中, 电动振动台具有工作频率范围宽、控制动态范围广、波形种类多、加速度波形失真度良好、最大加速度大等特点, 因而应用广泛。随着对产品安全性、可靠性和环境适应性要求的不断提高, 试验对象已由元器件、组件或分机发展成系统级产品。为了适应试验对象的变化, 大型振动冲击试验系统的研究和发展也显得越来越重要。

1 机车车辆设备的力学环境试验要求

运行中的机车车辆设备的力学环境相当复杂。机车的加减速和轮对的空转/滑行将引起车钩应力的交替变化, 车钩及其他间隙在牵引/制动工况变化时将引起纵向振动冲击, 道岔和钢轨的接缝将对轮对产生冲击, 轨道的垂直曲线及其不平顺将引起垂向振动冲击, 轨道的水平曲线及其不平顺将引起横向振动冲击。实际产生振动冲击的情况极为复杂。尽管转向架的一系、二系悬挂弹簧减缓了冲击振动对设备的危害, 但机车车辆设备仍然不可避免地要受到严重的影响^[2]。因此, 机车车辆设备必须具备现场力学环境的承受能力。

目前, 国际上通行的机车车辆设备振动冲击试验方法是以最新发布的IEC标准^[3]为依据, 标准采用全世界各个机构提供的现场数据制定了随机振动与冲击试验方法。与1999版相比, 2010版所规定的试验方法并没有变化, 但2类、3类的试验量级明显降低。

收稿日期: 2011-07-07; 收修改稿日期: 2011-08-23

我国铁路行业有关机车车辆设备的振动试验, 按所加载荷的性质来分有正弦振动试验和随机振动试验, 试验项目主要有共振试验、振动性能试验、振动耐久性试验和冲击试验。

机车车辆设备的一种正弦振动试验方法^[4], 主要内容是: 共振试验、振动性能试验和振动耐久性试验。该标准要求最大试验量级为 490 m/s^2 (正弦), 频率范围为 $1\sim70\text{ Hz}$, 最大位移为 10 mm 。

机车车辆设备的一种冲击试验方法^[5], 将试验分为 A、B、C 3 类, 通常按 A 类进行, 最大冲击量级为 88 m/s^2 , 冲击波形为半正弦波, 持续时间为 $25(1\pm25\%)\text{ ms}$ 。

国标^[6]推荐的振动和冲击试验方法, 主要包括: 功能性试验、模拟长寿命试验和冲击试验, 并根据设备在机车上的安装位置将试验等级分为 1 类 (A 级和 B 级)、2 类、3 类。表 1 为国标规定的功能性试验和模拟长寿命试验的严酷等级, 图 1 为国标规定的 ASD 频谱。

表 1 功能性试验、模拟长寿命试验严酷等级

类别	取向	功能性试验		模拟长寿命试验	
		$\geq 10\text{ min}$	r.m.s(m/s ²)	(5 h)	r.m.s(m/s ²)
1 类 (车体安装)	A 级	垂向	0.75	5.90	
		横向	0.37	2.90	
		纵向	0.50	3.90	
	B 级	垂向	1.00	7.90	
		横向	0.45	3.50	
		纵向	0.70	5.50	
2 类 (转向架安装)	垂向	5.4	42.5		
	横向	4.7	37.0		
	纵向	2.5	20.0		
3 类 (车轴安装)	垂向	38	300		
	横向	34	270		
	纵向	17	135		

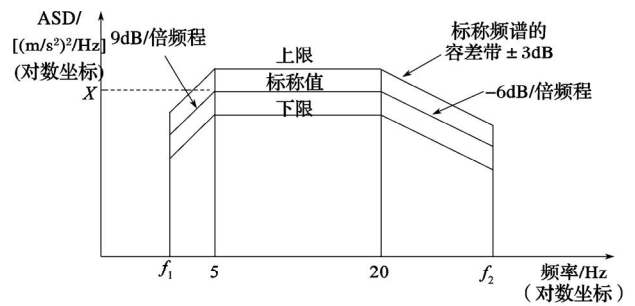


图 1 加速度谱密度 (ASD) 频谱图

表 2 为国标规定的冲击试验的严酷等级, 图 2 为国标规定的脉冲波形。

表 2 冲击试验严酷等级

类别	取向	峰值加速度	标称持续时间
		A/m · s ⁻²	D/ms
1 类 A 级 和 B 级	垂向	30	30
	横向	30	30
	纵向	50	30
2 类	全部	300	18
3 类	全部	1 000	6

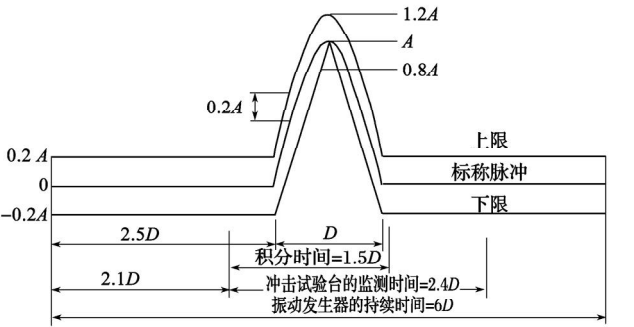


图 2 冲击试验容差范围一半正弦脉冲

2 振动冲击试验系统的技术条件

为了确保新研制的产品符合各种市场准入的技术要求, 所研制的振动冲击试验系统应同时满足 IEC、GB、TB 和 JIS 标准的试验要求。

2.1 总体要求

振动冲击试验系统主要用于机车车辆的大型机械、气动、电气和电子设备或部件的正弦振动、随机振动和冲击试验。设备应工作稳定, 在达到 80% 额定推力的情况下, 应有不低于 5 h 的连续工作能力, 要求其可靠性好、性能稳定、控制精度高, 并且要求使用、操作和维修方便。

新型 HXD 系列电力机车、HXN 系列内燃机车和 CRH 系列动车组相比传统机车和动车组, 其电气设备的尺寸更大, 质量要求更高, 表 3 给出了 3 种典型试件的有关情况。

振动冲击试验系统应能按 GB/T 21563—2008 中的 1 类 B 级的要求完成表 3 所示典型系统级产品的随机振动和冲击试验, 并能完成 $1\sim30\text{ Hz}$ 、 10 m/s^2 的扫频和定频的正弦振动试验。

表 3 典型系统级产品的外形尺寸、质量和安装方式

名称	尺寸 (长×宽×高) / m	试品质量 / t	夹具质量 / t	重心高 / m	实际安装方式
典型试件 1 机车变流器	$3.75 \times 1.06 \times 2.0$	3.5	1.0	1.10	安装在车体上
典型试件 2 动车组变流器	$3.1 \times 2.4 \times 0.65$	2.0	4.0	0.35	吊挂在车体下方
典型试件 3 牵引电机	$1.5 \times 1.2 \times 1.1$	6.2	0.9	0.60	抱轴吊挂在转向架上

2.2 设备的主要技术参数

2.2.1 振动台

频率范围	1~2 000 Hz
额定正弦推力	≥ 200 kN
额定随机推力(r.m.s)	≥ 200 kN
峰值随机推力	$\geq 2.7\sim 4$ 倍额定随机推力(r.m.s)
最大加速度	≥ 980 m/s ²
最大速度	≥ 2.0 m/s
最大位移	≥ 76 mm
最大负载	$\geq 2\,000$ kg
一阶谐振频率	1 600(1 $\pm$ 15%) Hz

2.2.2 水平滑台与垂直扩展台

水平滑台：

采用镁铝合金；

台面尺寸 $\geq 3\text{ m}\times 3.5\text{ m}$ ；

一阶谐振频率 ≥ 300 Hz；

抗倾覆力矩 $> 550\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。

垂直扩展台：

采用镁铝合金；

台面尺寸 $\geq 3\text{ m}\times 3.5\text{ m}$ ；

一阶谐振频率 ≥ 150 Hz。

2.2.3 功率放大器

①应采用固态开关功率放大器。

②电流、电压值可调，具有软停机功能。

③保护功能包括但不限于：输出过电压、输出过电流、功放电源过电流、功放电源高电压、功放电源低电压、过位移、过热、励磁电源供电、电网缺相、模块保护、紧急停机等保护功能。

参数如下：

效率	$\geq 90\%$
信噪比	≥ 65 dB
冷却方式	风冷
噪声	≤ 70 dB

2.2.4 励磁电源

励磁电源输出电压连续可调或分段可调。

2.2.5 冷却单元

振动台台体冷却为水冷。

2.2.6 控制器

①控制器输入。分辨率 24 位 A/D；电路特性为模拟滤波器+160 dB/oct 数字滤波；动态范围 ≥ 120 dB；信噪比 ≥ 100 dB；信号调理为电压或电荷输入。

②控制器输出。分辨率 24 位 A/D；电路特性为模拟滤波器+160 dB/oct 数字滤波；动态范围 ≥ 110 dB。

③控制精度高、动态范围宽。采用双 DSP 并行处理结构，24 位分辨率的 A/D、D/A，配合高精度浮点数字滤波和低噪声设计技术，具有很高的动态范围和控制精度。

3 振动冲击试验系统的解决方案

由于研制的振动冲击试验系统系首创产品，要满

足机车车辆设备振动冲击试验，并达到规定的技术要求，需解决以下技术难点。

3.1 振动冲击试验系统的设计难点

①功放和动圈需要完全匹配，以达到 2.75 倍的过载倍数（即冲击推力达 550 kN）。国内外小振动台中冲击推力一般是额定推力的 2 倍，随着推力的增大，功率放大器的功率随之增大，并联的缺陷就突现出来，导致其冲击过载倍数很难达到 2 倍。

②镁铝合金的水平滑台和垂直扩展台，台面尺寸均为 $3\text{ m}\times 3.5\text{ m}$ ，铸造与加工困难。

③普通振动台的行程为 50 mm，而所研制的大型振动台要求行程达到 76 mm，以确保系统级产品冲击试验时有足够的安全裕量。

④试验时间长，且要求使用环境温度高达 40℃，冷却系统设计比较复杂。

⑤为保证电子设备的安全性和可靠性，要求功放与振动台保持 3 m 以上距离，在保证距离的同时实现小功率损耗较为困难。

⑥试件质量大且偏载严重，要求水平滑台和垂直扩展台的承载和抗倾覆力矩大。

⑦为了满足 1~2 000 Hz 振动试验频率范围的要求，隔振地基的设计和施工困难。

3.2 振动冲击试验系统的组成

根据技术条件，研制的振动冲击试验系统由 200 kN 电动式振动台、功率放大器、冷却单元、 $3\text{ m}\times 3.5\text{ m}$ 滑台、 $3\text{ m}\times 3.5\text{ m}$ 扩展台、控制仪等 5 个部分组成。工作原理如图 3 所示。

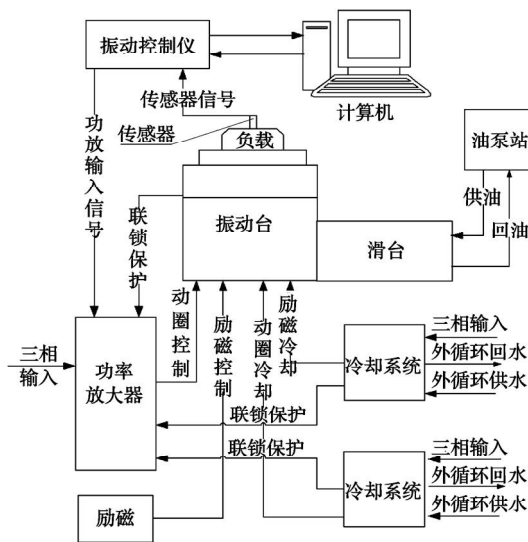


图 3 振动冲击试验系统原理图

3.2.1 200 kN 电动式振动台

振动台主要由动圈部分、支承导向装置、励磁装置、冷却系统、台体隔振装置以及翻转装置等几部分组成，在研制时充分考虑振动台各部分设计的工艺性、结构的合理性等一系列问题，现对其关键技术作一个简要介绍。

1) 大型动圈结构设计技术

动圈是振动台的核心部分, 它的性能直接影响振动台的性能, 动圈的一阶谐振频率也直接影响振动台使用频率, 而动圈的一阶谐振频率与动圈的材料、尺寸、结构、质量等多方因素密切相关, 在设计过程中如何优化动圈结构以提高其一阶谐振频率是振动台设计的关键问题。

2) 绕组冷却技术

200 kN 振动台功率大, 线圈发热量大, 必须采用水冷方式冷却。但由于振动台内水、电同行, 结构复杂, 且当振动台功率大(发热量大)、线圈匝数多时, 所需冷却水流量及压力很大, 从而容易导致接头处漏水, 影响振动台的正常使用。200 kN 振动台各水管接头都采用可靠的结构形式, 动圈的线圈绕组采用了漆包绝缘铜管线, 很好地防止了管路漏水。

3) 可调励磁电源技术

目前电动振动台励磁系统一般采用三相桥式不可控整流电路结构, 该结构输出电压不可调。200 kN 振动台配套功放新研制了可调励磁装置, 根据系统功率要求来调节励磁电压, 可调励磁系统采用三相桥式全控整流电路结构, 整流元件采用晶闸管, 通过对晶闸管实行有效的门极触发, 实现了整流电压0~500 V连续可调, 整流电流0~700 A连续可调。

3.2.2 冷却系统结构设计

200 kN 振动台冷却系统通过闭环水循环系统保证振动台工作时处于合适的工作温度, 冷却系统由2个热交换器、2个水泵和2个水箱组成。其中一个热交换器和水泵给动圈供冷却水, 另一个给励磁线圈和短路环供冷却水。

3.2.3 功率放大器

振动冲击试验系统要求功放失真度小、功率输出足够、体积小、可靠性高。为了满足550 kN冲击推力的要求, 新研制的高压开关功放采用PWM集成控制技术和IGBT全桥电路实现高压大功率输出。

高压开关功放主要由直流电源、主电路、控制电路、输出滤波器和显示通信电路等几部分组成, 直流电源接入交流380 V, 通过整流、滤波为主电路提供直流电压。主电路是由IGBT全控器件构成的全桥逆变器, 它将直流电源输出的直流电压逆变成PWM脉冲交流电, 再通过输出滤波器得到所需的波形信号。控制电路从输出滤波器的输出采集反馈信号并与给定信号比较, 经控制电路的输出信号控制主电路开关管的通、断。输出滤波器将主电路输出的PWM脉冲波形信号进行解调、滤除、载波处理, 输出信号驱动振动台。

3.2.4 水平滑台

水平滑台(见图4)的作用是将振动台的水平方向运动传递给试件, 或者在水平振动试验中支撑大型试件。高质量的水平滑台具有以下特性:

①较宽的频率范围和较小的波形畸变。

②较大的负载能力和力传递率。

③对滚动、偏转和俯仰力矩有较高的约束能力。

3 m×3.5 m水平滑台是为了满足系统级产品在水平方向的振动冲击试验而设计, 由支座、滑板、液压系统、联接件和导向机构等主要部分组成, 具有以下特点:

①滑板采用铝镁合金。铝镁合金质量小, 强度、刚度大, 具有较大的固有频率和横向刚度, 能满足大载荷、高加速度等试验要求。

②导向机构采用14个行程为120 mm的T型轴承, 用以限制滑板的横向和上、下运动, 从而提高滑台抗滚动、偏转、俯仰力矩的能力。T型轴承具有供油压力低, 承载能力强, 抗倾覆能力强, 不易因发热而“抱死”, 易于维护等优点。

③联接件采用镁合金铸造, 质量小, 刚度大, 能保证力的有效传递。

④支座采用钢板加筋焊接结构, 保证足够的刚度和强度。



图4 水平滑台

3.2.5 垂直扩展台

垂直扩展台面是大型振动冲击试验不可或缺的组成部分, 它方便了系统级产品的安装。垂直扩展台(见图5)采用铝镁合金铸造结构, 一体式加强筋有效地增加了其结构强度, 台面设计承载11.6 t, 有效台面尺寸为3 m×3.5 m。扩展台由4部分组成:

①支撑台面: 安装试件所用。

②导向系统: 由8套直线轴承和12个摇臂组成, 起到导向和抗偏心的作用。

③空气弹簧: 由4个空气弹簧起到支撑承载的作用。

④支架: 起到支撑扩展台并与振动台连接的作用。



图5 垂直扩展台

3.3 振动冲击试验系统隔振地基

隔振地基是整个试验系统正常持续工作的关键。目前国内的大型振动冲击试验系统地基一般采用空气弹簧隔振的形式,地基质量为振动台额定推力折算后的10倍,最低试验频率为5 Hz。

鉴于机车车辆设备要求的最低试验频率为2 Hz,常规的空气弹簧隔振不能满足要求,只能从改进地基着手。设计的地基采用大体积钢筋混凝土结构,整个地基一次浇注成型,满足1~2 000 Hz试验频率范围的要求。

隔振地基结构如图6所示,地基下布置有隔振砂垫层,四周留有隔振沟,沟内填充阻尼材料,使整个地基与外部完全隔离,大大减少了振动试验对周围环境的影响。

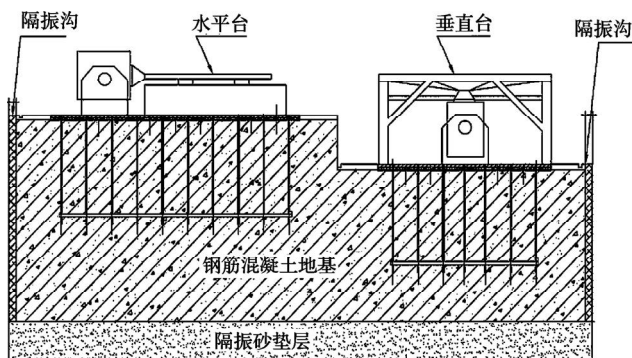


图6 振动冲击试验系统隔振地基结构图

4 性能指标的试验验证

为了验证振动冲击试验系统的各项技术指标,进行了一系列的试验测试。在振动和冲击验证试验时,用产品和夹具进行配重,试验时运动部件的总质量达11.2 t。

振动验证试验时,试验频率范围为2~150 Hz,加速度均方根值(RMS)为8 m/s²,水平向与垂向振动试验均持续进行5 h不中断,其振动试验谱如图7、图8所示。

冲击验证试验时,冲击波形为半正弦波,脉宽为30 ms,加速度为50 m/s²,正反向各冲击1次,最大冲击推力达560 kN,冲击试验波形如图9、图10所示。

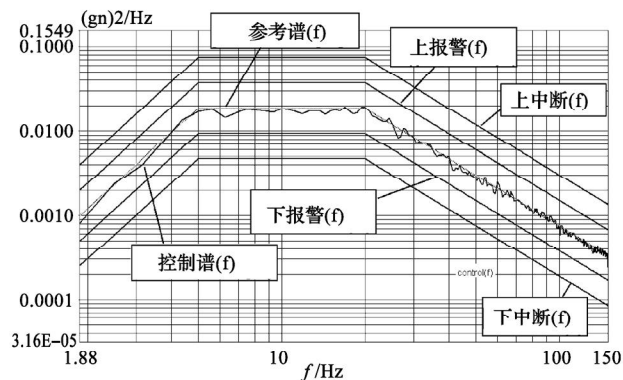


图7 水平振动试验谱

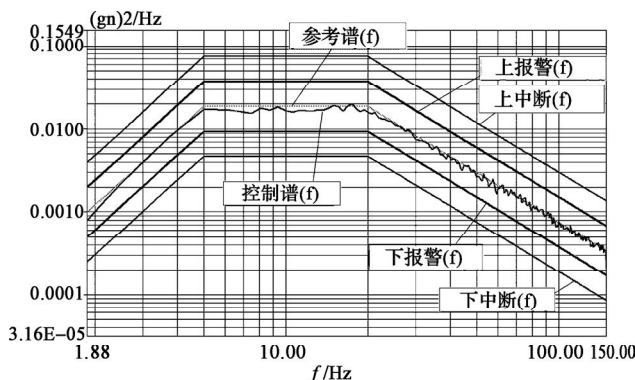


图8 垂向振动试验谱

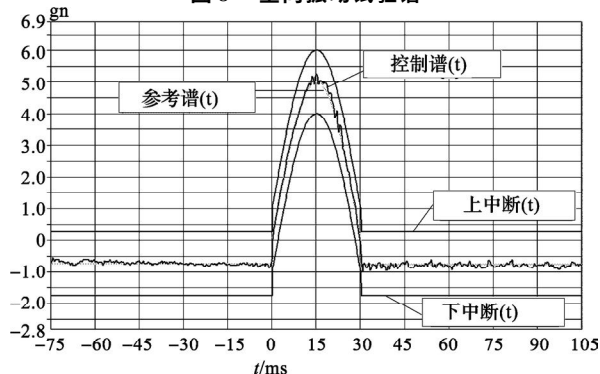


图9 正向冲击试验波形

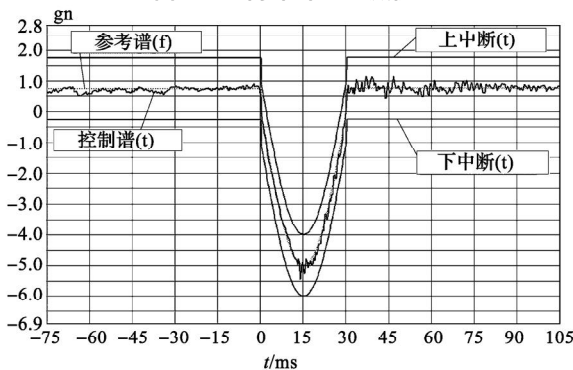


图10 反向冲击试验波形

5 结语

从新型机车车辆设备力学环境试验的需求分析入手,提出振动冲击试验系统的技术条件。针对实现该技术条件所面临的技术难点,提出了试验系统的解决方案。通过设计优化与质量控制,所研制的振动冲击试验系统经过安装、调试、计量检定和试验验证,系统的各项技术指标均达到或超过了预定值,满足了新型机车车辆设备振动冲击试验的能力需求。

参考文献:

- [1] 张巧寿. 振动试验系统现状与发展[J]. 机电新产品导报, 2001 (9-10).
- [2] 李 季. 机车车辆部件的振动试验[J]. 内燃机车, 2009 (5).
- [3] IEC61373—2010, Railway applications rolling stock equipment shock and vibration tests [S].
- [4] TB/T2542—2000, 铁路机车车辆部件振动试验方法 [S].
- [5] TB/T2988—2000, 铁路机车车辆部件冲击试验方法 [S].
- [6] GB/T 21563—2008, 轨道交通机车车辆设备冲击和振动试验 [S].
- [7] GB/T 18328—2001, 振动台选择指南 [S].
- [8] JJG 948—1999, 数字式电动振动试验系统 [S].