

正弦共振拍波在通信设备抗震性能检测中的适用性研究

毛晨曦^{1,2}, 石伟轩^{1,2}, 王涛^{1,2}, 孙国良³

(1. 中国地震局工程力学研究所 地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;
2. 地震灾害防治应急管理部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080; 3. 中国信息通信研究院, 北京 100010)

摘要:通信设备需通过抗地震性能检测合格后方可入网使用。正弦共振拍波是设备抗地震性能检测中可选的振动台激励波形之一,但在近年来的实际检测中被发现存在高烈度等级测试中难以有效激起设备响应的问题。为研究这一问题,以一种在通信机楼和基站中常用的设备机柜为研究对象,分别采用正弦共振拍波和人工地震动作为激励,开展机柜抗震性能检测试验。通过比较分析机柜在两种激励下损伤现象、自振频率、变形和加速度反应的差异,讨论正弦共振拍波在通信设备抗震性能检测中的适用性。研究表明:当设备自振频率高于3 Hz,正弦共振拍波相比人工地震动更能有效激发起设备的地震反应,建议对于此类设备以及重要性分类为“特别重要”和“重要”的设备,采用正弦拍波作为设备抗震性能检测的激励方式是必要的。最后,指出《电信设备抗地震性能检测规范》(YD 5083—2005)中存在使用正弦共振拍波进行抗震性能考核的检测程序不够明确,以及正弦共振拍波在抗震性能检测中的适用性等问题,并提出修订建议。

关键词:通信设备;抗震性能检测;正弦共振拍波;人工地震动;振动台试验

中图分类号:TU317; TH212; TH213.3

文献标志码:A

Applicability of sine beats in seismic performance test for communication network equipment

MAO Chenxi^{1,2}, SHI Weixuan^{1,2}, WANG Tao^{1,2}, SUN Guoliang³

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin 150080, China; 3. China Academy of Information and Communications Technology, Beijing 100010, China)

Abstract: Seismic resistance qualification is mandatory for telecommunication equipment prior to network deployment. While sinusoidal resonance beat waves (SRBWs) serve as optional excitations in seismic testing, practical applications have revealed operational limitations. This study comparatively investigated the seismic responses of typical telecommunication cabinets through shaking table tests using both SRBWs and artificial ground motions (AGMs). A comprehensive analysis of damage patterns, natural frequencies, deformations, and acceleration responses demonstrated SRBWs' superior efficacy in exciting seismic reactions for equipment with natural frequencies exceeding 3 Hz. The findings substantiate the necessity of employing SRBW excitations for such equipment and the critical infrastructure categorized as “essential” or “important”. Furthermore, critical examination of the current Specifications for Seismic Test of Telecommunication Equipment (YD 5083—2005) reveals technical inconsistencies in SRBW implementation, prompting proposed revisions to enhance testing protocol reliability.

收稿日期:2025-04-27; 修回日期:2025-06-22

基金项目:中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目(2024C24,2024B26);国家自然科学基金面上项目(52178513)

作者简介:毛晨曦(1974—),女,研究员,博士,主要从事结构工程抗震、通信系统地震灾害评价研究。E-mail:maochenxi@iem.ac.cn

通信作者:孙国良(1983—),男,高工,硕士,主要从事通信设备抗震可靠性研究。E-mail:sunguoliang@caict.ac.cn

Key words: telecommunication equipment; seismic resistance qualification; sinusoidal resonance beat wave (SRBW); artificial ground motion (AGM); shaking table test

0 引言

通信网络本质上是将大量设备通过物理链路相互连接构成复杂系统,从而实现人与人、人与计算机、计算机与计算机之间的信息交换、通信和资源共享。通信网络中的设备柜包括承载各类数据通信设备(路由器、网络交换机、集线器、服务器等)的专用机柜,以及各种电源类设备柜(如开关电源、UPS不间断电源、铅酸蓄电池组等)。这些设备柜在通信网络中大量布置,是通信网络维持服务功能的主体设备。

确保预期强度的地震作用下,各类设备柜具有符合要求的抗震性能无疑对维持通信网络震后功能具有重要意义。目前我国没有针对各类通信设备的抗震设计规范,通信设备的抗震设计由设备生产企业自行完成。但为控制设备震后性能,制定了通信行业标准《电信设备抗地震性能检测规范》(YD 5083—2005)^[1]。该规范要求:在我国抗震设防烈度7度及以上地区公用电信网上使用的交换、传输、移动基站、通信电源等主要设备,均需由具有检测资质的机构依据规范要求进行检测试验,合格后方可入网使用。因此规范(YD 5083—2005)是目前我国最重要的一部用以控制通信设备抗震性能的检测规范。

规范(YD 5083—2005)推荐采用两种地震动时程作为振动台检测试验的台面激励,其一是人工地震动,另一种为正弦共振拍波。所谓正弦共振拍波是一种频率与设备一阶自振频率相同的正弦拍波,采用正弦共振拍波对设备进行激励,主要考虑结构对地震波有滤波作用,安装在基站中的设备实际受到的激励可能呈现与设备一阶频率相近的特性。对设备进行正弦共振拍波激励,是为了在单一优势频率激励的情况下,对设备抗震的最不利情况进行测试。从历史上看,正弦共振拍波试验作为检测通信设备、电气设备及核电站设备抗震性能的方法之一,在国内外的设备抗震检测规范中被广泛采用^[1-4]。但近年来一些实验室反映采用正弦共振拍波检测通信设备抗震性能时,出现不能准确判断设备抗震能力的情况。同时国外的一些设备抗震检测规范,包括:美国《NEBS™ Requirements: Physical Protection》(GR-63-CORE)、日本《Earthquake Resistance Test Specifications for Communication Equipment》(NTT DoCoMo)以及欧洲《Environmental Engineering》(ETSI EN 300 019-2-3),均不再使用正弦共振拍波作为通信设备抗地震性能检测的输入激励^[5-7]。目前已有一些学者对正弦共振拍波在设备抗震性能检测中的使用做出了相关研究。程永锋等^[8]通过有限元仿真分析,对正弦共振拍波在特高压电气设备抗震试验中的适用性进行了研究,研究表明正弦共振拍波的激振频率与设备频率的不一致将大幅降低特高压电气设备的最大应力、加速度及位移的共振响应。李晓亮^[9]对国内外通信行业抗震性能检测规范进行了对比,提出了使用正弦共振拍波进行抗震性能检测存在仅适用单轴输入、不宜对装有隔震装置的设备进行检测等局限性,并建议提高规范(YD 5083—2005)中正弦共振拍波的加速度输入幅值。毛晨曦等^[10]在分立式开关电源柜的振动台试验中,分别采用正弦共振拍波、人工地震动和实际强震记录对机柜进行了激励,结果表明相比人工地震动和实际强震记录,正弦共振拍波难以激起高烈度等级下电源柜的加速度和位移响应。另外,一些学者对不同通信设备的抗震性能展开了相关研究。赵明帅等^[11]在振动台试验中,通过加载正弦共振拍波和实际强震记录对高压开关设备的抗震性能进行了研究。毛晨曦等^[12]通过对蓄电池组的振动台试验,总结了蓄电池组的损伤状态和损伤指标,通过IDA(incremental dynamic analysis)分析建立了蓄电池组的易损性曲线。郝云鹏等^[13]对综合设备机柜进行了振动台试验,采用9条不同的实际强震记录对3台相同的机柜进行了双向加载,总结出了综合设备机柜的损伤水平和损伤特征。尚庆学等^[14]选取了36款不同尺寸和规格的通信机柜进行了振动台试验,对抗震性能检测合格机柜与不合格机柜的加速度响应进行了对比分析,结果表明不合格机柜的加速度放大效应均大于合格机柜。随着规范(YD 5083—2005)修订需求被提出,正弦共振拍波继续作为通信设备抗震性能检测试验激励的适用性需要更细致的研究。

针对上述问题,本文以一种在通信机楼和基站中常用的IDC(internet data center)机柜为研究对象,分别采用正弦共振拍波和人工地震动作为振动台激励,开展机柜的抗震性能检测试验。通过比较分析IDC机柜在两种激励下的损伤现象、自振频率、变形和加速度反应的差异,讨论正弦共振拍波继续作为通信设备抗震性能检测激励的适用性。最后,指出规范(YD 5083—2005)中正弦共振拍波激励相关规定中存在的问题,并提出修订建议。

1 规范对于正弦共振拍波的使用规定

规范(YD 5083—2005)中,当采用正弦拍波作为检测试验的振动台激励时,具体采用如图 1 所示的 5 个连续的 5 周期正弦拍波序列,对设备的激励方式为单轴激励。

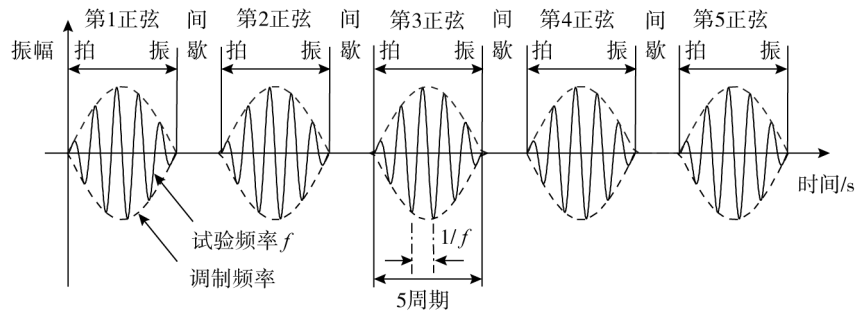


图 1 5 个正弦 5 周期拍波序列

Fig. 1 Sequence of 5 sine beats with 5 cycles

图 1 的拍波序列,其中一个正弦共振拍波的数学表达式为

$$a(t) = a_0 \cdot \sin 2\pi f t \cdot \sin \frac{2\pi f t}{\rho} \tag{1}$$

$$0 < t < \frac{\rho}{2f} \tag{2}$$

式中: a_0 为激励幅值; f 为设备共振激励频率,即取设备一阶固有频率; t 为正弦共振拍波幅值达到 $a(t)$ 的时刻,每个正弦共振拍波的持时不应超过 $\rho/2f$; ρ 为设备共振频率和调制频率的比值,该比值的调整可以控制正弦拍波的周期数,正弦 5 周期拍波取 $\rho = 10$ 。

另外,每个拍波之间需保持一定的时间间歇,以使设备在前一个拍波激励下的振动响应基本消失,不与后续拍波激励的响应产生叠加。间歇时间 t_0 大小应满足式(3)的要求:

$$t_0 > \frac{1}{f} \times \frac{100}{\xi} \tag{3}$$

式中: ξ 为试验频率的临界阻尼。

由于通信设备一般放置在建筑的楼层上,因而设备检测时还需考虑楼层相对建筑基底的加速度放大。规范(YD 5083—2005)中对水平和竖向激励正弦拍波的幅值规定见式(4)~式(5):

$$a_H = k_1 \times k_2 \times a_0 \tag{4}$$

$$a_V = \frac{1}{2} a_H \tag{5}$$

式中: a_H 和 a_V 分别为施加给振动台的水平和竖向加速度幅值; k_1 为设备重要度系数; k_2 为建筑物楼面加速度放大倍率,考虑了设备安装在楼面上时,建筑物楼面对地面加速度的放大作用; k_1 和 k_2 的取值见表 1; a_0 为地面加速度峰值,其取值见表 2。考虑到正弦拍波是激励设备共振响应,为防止响应过大导致抗震检测误判,相对于同等强度的人工地震动,正弦拍波的 a_0 的取值进行了折减,折减百分比也列在表 2 中。

表 1 规范(YD 5083—2005)中 k_1 及 k_2 的取值表

Table 1 Recommended values of k_1 and k_2 in YD 5083—2005

设备种类	k_1	k_2
电源设备	1.2	3
交换设备	1.1	2
传输设备	1.1	2
移动基站设备	1.1	3

如表 2 所示,依据规范(YD 5083—2005)的规定,需进行 7、8、9 烈度这 3 个强度水平的地震动检测试验,在每个地震动强度下通信设备应满足的性能目标如下:

- 1) 在7烈度抗地震考核后,被测设备结构不得有变形和破坏。
- 2) 在8烈度抗地震考核后,被测设备应保证其结构完整性,主体结构允许出现轻微变形,连接部分允许出现轻微损伤,但任何焊接部分不得发生破坏。
- 3) 在9烈度抗地震考核后,被测设备主体结构允许出现部分变形和破坏,但设备不得倾倒。

表2 规范(YD 5083—2005)中人工地震动和正弦共振拍波的峰值地面加速度取值

Table 2 Values of peak ground acceleration for artificial ground motions and sinusoidal resonance beat waves in YD 5083—2005

地震动水准	7 烈度		8 烈度		9 烈度	
	水平	垂直	水平	垂直	水平	垂直
人工地震动/g	0.10	0.05	0.20	0.10	0.40	0.20
正弦拍波/g	0.08	0.04	0.15	0.08	0.30	0.15
折减比例/%	80	80	75	75	75	75

2 典型通信机柜抗震性能检测试验

2.1 试验设备及传感器布置

为了研究正弦共振拍波在柜体类设备抗震性能检测中的适用性,本文选用了一种在通信机楼和基站中常用的 IDC 通信设备机柜,尺寸为 600 mm×1 200 mm×2 000 mm(宽×深×高),如图 2(a)所示。通信行业将机柜的宽度方向称为“边到边方向”,将深度方向称为“门到门方向”,为与行业保持一致,本文后续也采用这一术语。机柜内部安装了 5 层托盘,用以承载配重。底部托盘距底板 200 mm,顶部托盘距机柜顶 400 mm,其余托盘之间安装间隔为 400 mm,如图 2(b)所示。每层托盘上安装 100 kg 的配重,模拟机柜正常工作时所承载设备的重量,配重通过螺栓与前门两侧的方孔条连接固定,其余部分浮放在托盘上,如图 2(c)所示。试验中机柜通过 4 根 M12 螺栓固定在刚性支座上,刚性支座固定在振动台上。试验选用了 2 台规格完全相同的柜子,分别输入正弦共振拍波和人工地震动作为激励,以尽量避免由于设备本体差异对试验结果的影响。

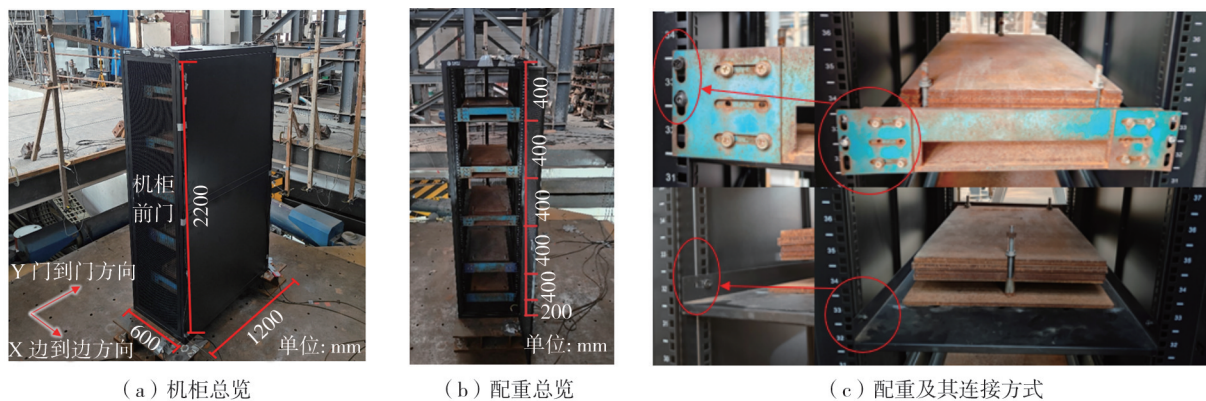


图2 试验选用的 IDC 机柜

Fig.2 IDC cabinet used in the test

试验加载时,规定机柜边到边方向为 X 向,门到门方向为 Y 向,垂直地面方向为 Z 向。图 3 为试验中传感器的布置示意图。在机柜前门柜底和顶部、后门柜底和顶部分别布设 1 个三向加速度传感器(编号 A2、A4、A3 和 A5),监测机柜底部和顶部加速度反应。在柜子顶部和底部沿 Y 向和 X 向分别布置共 8 个拉线位移计,如图 3(b)所示,监测机柜底部和顶部水平位移。另外,在振动台台面上布置 1 个三向加速度传感器(编号 A1),以及沿 X 向和 Y 向分别布置 1 个位移传感器(编号 D9 和 D10),监测台面在 2 个水平方向的加速度和位移。为监测机柜内配重的加速度反应,以及配重块相对于托盘的位移反应,在机柜第 4、5 层配重上分别布置 1 个加速度传感器(编号 A6 和 A7)和 1 个拉线位移计(编号 D11 和 D12),如图 3(c)和(d)所示。试验中所用的拉线位移计量程为±500 mm,精度为 0.1 mm;加速度传感器量程为 10 g,各传感器试验前均经过标定。

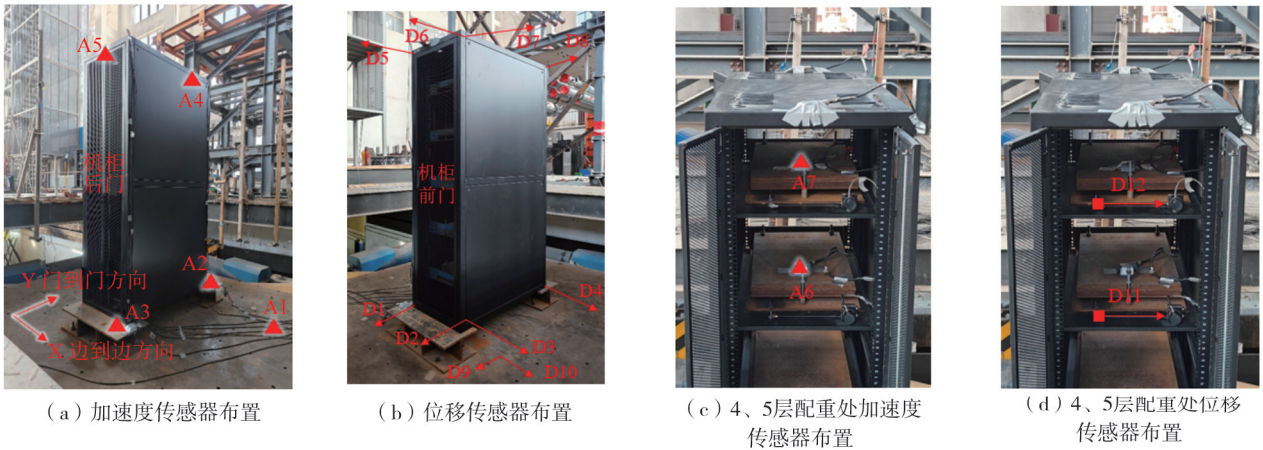


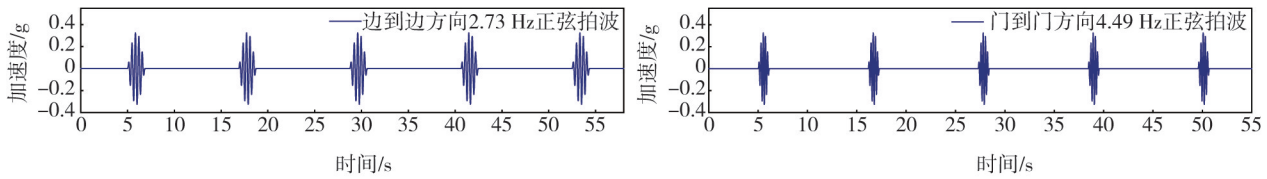
图 3 机柜传感器布置图

Fig. 3 Sensors layout of the cabinet

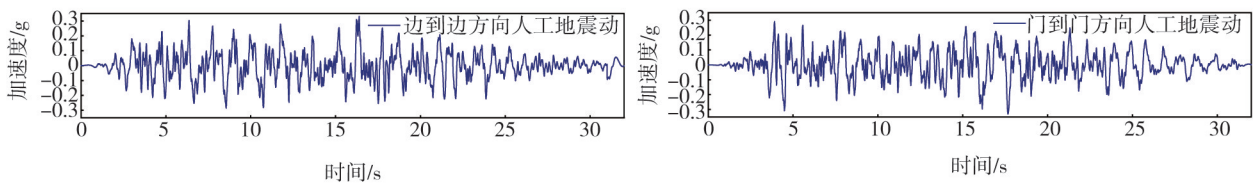
2.2 振动台输入选取

对所选用的 2 台 IDC 机柜分别输入正弦拍波和人工地震动,比较机柜在这两种激励下的反应特征。由于人工地震动目前仍被国内外各类规范^[1-7]广泛采用作为通信和电力设备抗震性能检测实验用振动台激励,因此 IDC 机柜在人工地震动激励下的反应和损伤特征将被用来作为比较标准,以评估正弦拍波激励下 IDC 机柜的反应和损伤是否合理地反映了机柜的真实抗震性能。

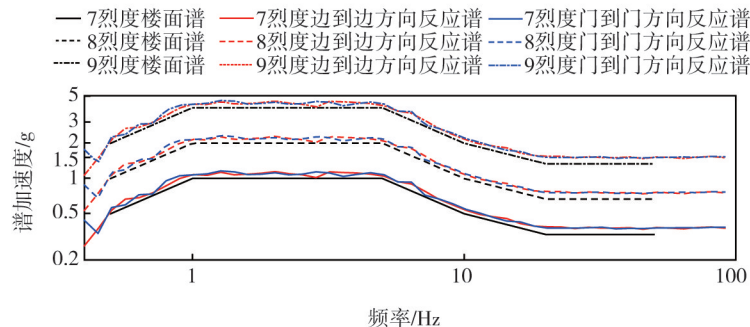
试验中对 1 号机柜施加正弦共振拍波,其振动时程依据式(1)和式(2)生成。需要说明的是,试验过程中随着激励幅值的增大,机柜的自振频率是随其损伤发展而不断降低的,因此在每个幅值的激励开始前和结束后,都要对机柜输入白噪声以识别机柜的一阶自振频率,并且在输入下一个幅值的正弦共振拍波激励时依据变化后的机柜频率确定其正弦拍波的共振激励频率,即式(1)中的 f 。图 4(a)为试验开始前针对完好机柜施加的正弦共振拍波时程。



(a) 7烈度下正弦共振拍波加速度时程



(b) 7烈度下人工地震动加速度时程



(c) 7、8、9烈度下人工地震动与对应楼面谱包络关系

图 4 振动台输入激励时程及反应谱

Fig. 4 Time histories and response spectra of the excitations input to the shaking table

对2号机柜施加人工地震动激励,人工地震动时程依据规范(YD 5083—2005)中的楼面谱生成。根据规范(YD 5083—2005)要求,生成后并输入给振动台的人工地震动需满足如下要求:台面采集到的人工地震动的反应谱需能够包络对应烈度下规范(YD 5083—2005)中的楼面谱。图4(b)为试验中采用的人工地震动时程,图4(c)为3个地震动强度下该人工地震动反应谱与规范(YD 5083—2005)楼面谱的比较,从图中可以看出,人工地震动的反应谱在全部频率范围内都很好包络了规范的楼面谱。

对机柜进行共3个强度水平的地震动检测,分别相当于7、8、9烈度设防地震。对于人工地震动和正弦拍波,3个地震动强度对应的地面峰值加速度 a_0 依据表2确定。在此基础上,根据表1,考虑设备重要度和设备所在建筑物楼面的加速度放大效应,IDC机柜(作为移动基站设备)的计算系数取为 $k_1=1.1$, $k_2=3.0$ 。因此对于人工地震动,3个地震动强度下计划输入给台面的峰值加速度 A_0^* 分别为0.33、0.66、1.32 g;对于正弦拍波, A_0^* 经过折减后则分别为0.26、0.50、0.99 g。表3列出了试验加载工况。由于振动台存在迭代误差,试验中实际施加给台面的峰值加速度也有误差,因此表3分别给出了每个工况下台面计划施加的峰值加速度和实际施加峰值加速度。此外,表3还列出了实际施加的正弦拍波相对于人工地震动的折减比例,以观察正弦拍波的实际折减效果。

表3 试验工况表

Table 3 Test cases (loading protocol)

地震动激励	1号机柜(正弦拍波)					2号机柜(人工地震动)		
	工况	计划 A_0^*/g	实际 A_0^*/g	实际 A_0^*/A_0^*	频率 f/Hz	工况	计划 A_0^*/g	实际 A_0^*/g
白噪声 Y	1	0.2				15	0.2	
白噪声 X	2	0.1				16	0.1	
7烈度 Y	3	0.26	0.29	80%	4.49	17	0.33	0.36
7烈度 X	4	0.26	0.31	88%	2.73	18	0.33	0.35
白噪声 Y	5	0.2				19	0.2	
白噪声 X	6	0.1				20	0.1	
8烈度 Y	7	0.50	0.56	75%	4.30	21	0.66	0.74
8烈度 X	8	0.50	0.54	75%	2.15	22	0.66	0.72
白噪声 Y	9	0.2				23	0.2	
白噪声 X	10	0.1				24	0.1	
9烈度 Y	11	0.99	1.05	89%	2.73	25	1.32	1.17
9烈度 X	12	0.99	0.85	67%	1.76	26	1.32	1.26
白噪声 Y	13	0.2				27	0.2	
白噪声 X	14	0.1				28	0.1	

2.3 试验结果分析

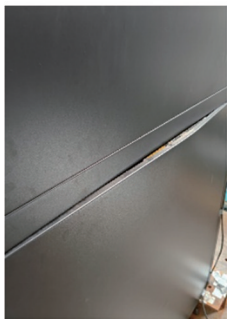
2.3.1 机柜的特征损伤现象及损伤发展过程

表4列出了2台机柜在不同强度地震动测试下的特征损伤现象,从中可以观察机柜的损伤发展过程,并比较正弦拍波和人工地震动激励下机柜地震损伤表现的异同。总体而言,在7烈度测试中,1号和2号机柜均无损伤,符合规范(YD 5083—2005)的要求。8烈度测试中,2台机柜在门到门方向基本无损伤,但在边到边方向均出现了严重损伤:机柜承重钢框架的梁、柱焊接节点出现较为严重的焊缝开裂,这是规范(YD 5083—2005)中的规定不允许的,因此2台机柜均未通过8烈度抗震性能检测。9烈度测试中,在边到边方向,2台机柜的损伤进一步加重,梁、柱节点焊接开裂几乎贯通,但机柜均未完全倾倒,虽然机柜的损伤表现满足了9烈度抗震性能检测的要求,但由于其未能通过前面的8烈度检测,因此9烈度检测结果仍为不合格。值得注意的是,9烈度门到门方向的测试中,2台机柜的损伤特征出现了比较大的差别:正弦拍波激励下的1号机柜出现了中等程度的损伤,如侧板屈曲、卡口断裂,这种损伤会显著降低机柜自振频率和沿该方向的后续抗震能力;但人工地震动激励下的2号机柜则几乎无损伤,仍然保持了完好,说明这一工况下人工地震动没能有效激励起机柜的地震反应。后面对机柜地震反应数据的分析中,2台机柜在9烈度门到门方向上出现损伤特征差异的原因会被进一步研究讨论。

表 4 试验机柜在不同激励下的典型损伤现象

Table 4 Typical damage phenomena of test cabinets under various excitations

地震动强度	加载方向	1 号机柜	2 号机柜
7 烈度	Y	弹性阶段,无损伤。	弹性阶段,无损伤。
	X	前门受挤压轻微屈曲,4、5 层配重与托盘存在相对位移。	前门受挤压轻微屈曲,4、5 层配重与托盘存在相对位移。
8 烈度	Y	部分配重与方孔条连接螺栓松动;底部一侧侧板面外屈曲,如图 5(a) 所示;侧板与框架连接构件轻微屈曲,如图 5(b) 所示。	部分配重与方孔条连接螺栓松动。
	X	前门与后门均脱扣打开,屈曲程度加深,后门掉落半扇,如图 5(c)、(d) 所示;框架梁柱节点焊缝开裂,如图 5(e)、(f) 所示。	前门与后门均脱扣打开,屈曲程度加深,且无法正常关闭,如图 6(a)、(b) 所示;框架梁柱节点焊缝开裂,框架整体有明显残余变形,如图 6(c)~(j) 所示。
9 烈度	Y	两侧侧板全部屈曲,并脱扣甩出,如图 5(g)、(h) 所示;上部侧板卡扣全部断裂,如图 5(i) 所示;侧板连接构件屈曲变形加深,如图 5(j) 所示。	下部两侧侧板轻微屈曲。
	X	前门掉落,前门框架梁柱焊缝处裂缝贯通,后门框架梁柱焊缝处裂缝延伸,如图 5(k)~(o) 所示;框架整体有明显残余变形,如图 5(p) 所示;配重连接处部分螺栓松动甚至被拉断,部分方孔屈曲、断裂,如图 5(q)、(r) 所示。	前门框架梁柱焊缝开裂贯通,后门框架梁柱焊缝处裂缝延伸,梁柱节点挤压屈曲严重,如图 6(h)~(l) 所示;框架整体残余变形严重,几近倒塌,前门内部框架梁柱节点撕裂,内部连梁连接处屈曲,如图 6(m)~(o) 所示;配重连接处螺栓松动,部分方孔屈曲、断裂,托盘连接处面外屈曲,如图 6(p)~(r) 所示。



(a) 下部一侧侧板屈曲



(b) 侧板连接构件变形



(c) 后门掉落



(d) 前门打开



(e) 前门梁柱节点焊缝开裂



(f) 后门梁柱节点焊缝开裂



(g) 两侧侧板屈曲脱扣



(h) 两侧侧板屈曲脱扣



(i) 上部侧板卡扣断裂



(j) 侧板连接构件屈曲加深



(k) 前门掉落



(l) 前门梁柱连接焊缝裂缝贯通



(m) 前门梁柱节点焊缝裂缝贯通



(n) 后门梁柱节点焊缝裂缝延伸



(o) 后门梁柱节点焊缝裂缝延伸

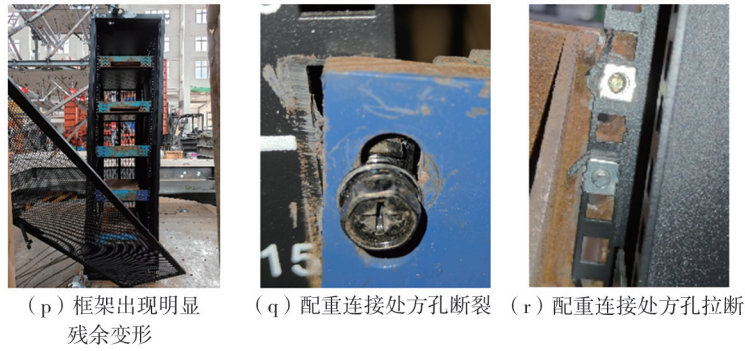


图5 1号机柜损伤现象

Fig.5 Damage phenomena of cabinet 1



图6 2号机柜损伤现象

Fig.6 Damage phenomena of cabinet 2

2.3.2 频率变化趋势的比较分析

图7 给出了试验过程中2台机柜自振频率的变化,横坐标为台面的峰值加速度 A_0 。从图中可以看出,

在边到边方向和门到门方向,2 台机柜的频率变化呈现出不同的特征。在边到边方向,2 台机柜频率降低趋势和频率变化范围基本一致。仅是 2 号机柜在 8 烈度测试之后频率未出现进一步的降低,这主要是因为 8 烈度激励后,2 号机柜的梁柱节点焊接开裂已经比较充分如图 6(d)~(j)所示,在后续的 9 烈度激励下即使节点焊缝完全开裂如图 6(i)~(l)所示,机柜的频率也不再进一步的降低空间。但在门到门方向,1 号机柜在 3 个地震动强度下频率持续降低,并且降低范围较大(从 4.49 Hz 降低至 0.98 Hz,降低了约 78%);相比之下 2 号机柜频率降低十分有限,从 3.52 Hz 降低至 2.93 Hz,仅降低了约 17%。结合表 4 中 2 台机柜在门到门方向的损伤现象差异,验证了在门到门方向正弦拍波相比人工地震动更有效地激励起了机柜的地震反应。

进一步研究 2 台机柜在边到边和门到门方向频率变化趋势的差异,发现这种差异主要源于机柜在上述两个方向上初始频率的不同。在边到边方向,机柜的初始频率为 2.34 Hz 和 2.73 Hz,频率较低,说明抗侧刚度较小;但在门到门方向,机柜的自振频率为 3.52 Hz 和 4.49 Hz,频率较高,抗侧刚度较大。基于这一现象本文得到一个推断:对于抗侧刚度较小、自振频率较低的通信设备,例如自振频率小于 3 Hz 的设备,正弦拍波和人工地震动均能有效激励起设备的地震反应;但对于抗侧刚度较大、自振频率较高的设备(频率高于 3 Hz),例如各类电源柜,依据规范(YD 5083—2005)中楼面谱生成的人工地震动,可能无法有效激励起设备的地震反应,此时采用正弦共振拍波激励是必要的。

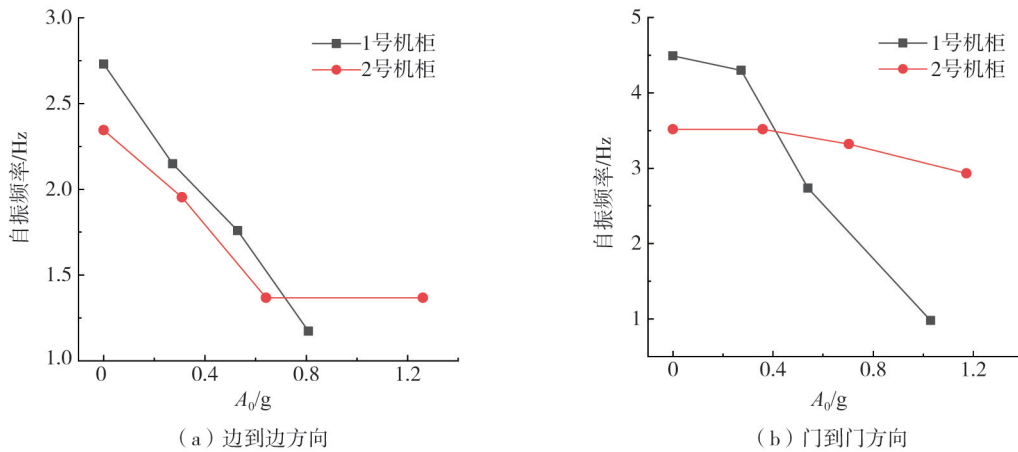


图 7 机柜自振频率的变化

Fig. 7 Variation of fundamental frequency of the cabinets

2.3.3 柜顶最大相对位移角的比较分析

图 8 为 2 台机柜在 3 个地震动强度下最大柜顶相对柜底位移角的变化。最大柜顶相对柜底位移角是反映机柜在地震动作用下变形程度的指标,简称最大柜顶位移角,按公式(6)计算:

$$\theta_{\max} = \frac{\max(x_{ii}^{\text{top}} - x_{ii}^{\text{bottom}})}{H} \tag{6}$$

式中: x_{ii}^{top} 和 x_{ii}^{bottom} 分别为机柜振动过程中 t_i 时刻机柜顶部和底部的水平位移; H 为机柜的高度。

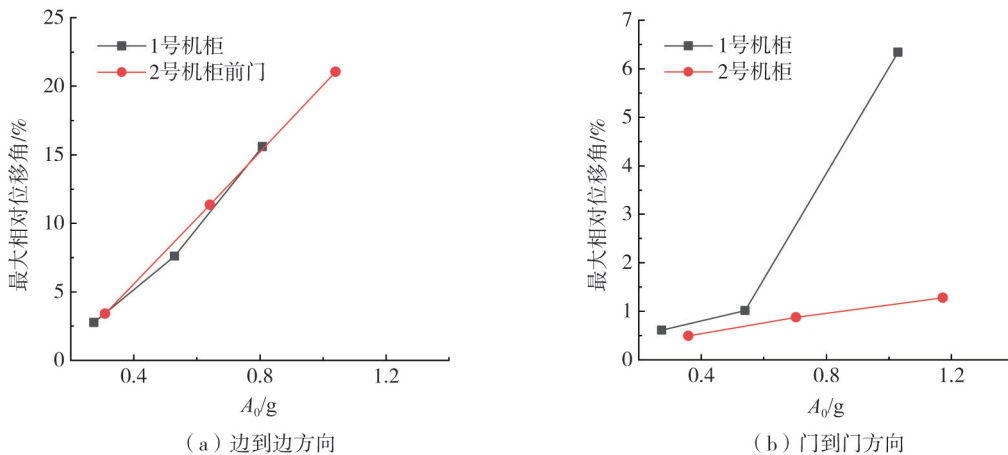


图 8 最大柜顶相对柜底位移角

Fig. 8 Maximum drift ratio at the top of the cabinet relative to the base

从图8可以看出,在边到边方向上,2台机柜最大柜顶位移角随地震动强度的变化趋势一致,几乎呈线性变化。结合表4和图5的机柜损伤现象可以判断,边到边方向,当最大柜顶位移角达到约7.6%时(机柜1在8烈度下的最大柜顶位移角),机柜即可发生严重破坏,承重框架梁柱节点焊缝即可严重开裂。在门到门方向上,1号机柜柜顶位移角显著大于2号机柜,尤其在9烈度地震动激励下,位移角达到约6.5%,比2号机柜(1.13%)的位移角增大约83%,该水平的位移角表明机柜在该方向已达到中等破坏。

2.3.4 加速度放大系数的比较分析

图9为2台机柜顶部和第5层配重位置的最大加速度随地震动强度的变化。从图中可以看出,在边到边方向上,随地震动强度的增大,机柜在上述2个位置处的加速度没有线性增加,尤其在8烈度测试之后,加速度反而随地震动强度增加显著下降,这是由于机柜出现损伤并且持续发展,耗散了一部分地震能量,从而降低了柜顶的加速度反应。在门到门方向上,2台机柜的加速度反应略有不同:2号机柜的加速度反应一直呈线性增长,说明该机柜在这个方向上损伤轻微或基本完好;1号机柜的加速度虽然随着地震动强度增加而增大,但增大趋势在8烈度测试后显著放缓,反映了1号机柜在此强度地震动激励后出现的中等强度损伤。图9所呈现的机柜加速度反应特征与前面所述机柜的损伤现象、自振频率和最大柜顶位移角的变化规律一致。

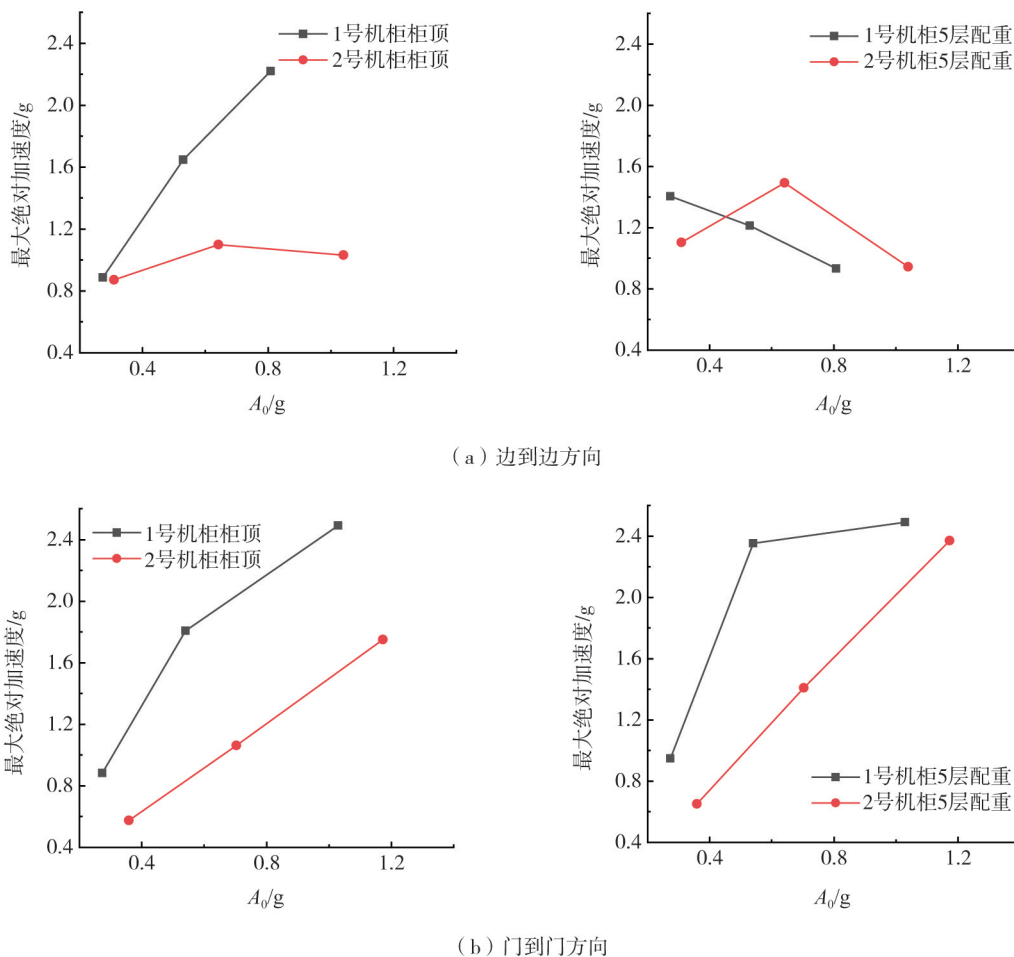


图9 柜顶及5层配重最大加速度

Fig.9 Maximum accelerations at the top and 5th floor of the cabinet

当机柜布置在通信机楼内,柜顶和机柜内放置设备位置处的加速度放大系数对于进行机柜安装工程抗震设计十分重要,因此图10总结了柜顶和第5层配重处相对于柜底的加速度放大系数。从图中看出,对于本文研究的IDC机柜,在边到边和门到门方向,柜顶的加速度放大系数均未超过3。值得注意的是,2台机柜在2个加载方向上,5层配重位置的加速度放大系数均大于柜顶的加速度放大系数,最大的加速度放大系数达到4.8,这可能是由于配重在地震激励下与侧板出现撞击所致,但机柜内部安装设备位置处加速度放大系数的范围还需要更多试验研究确定。

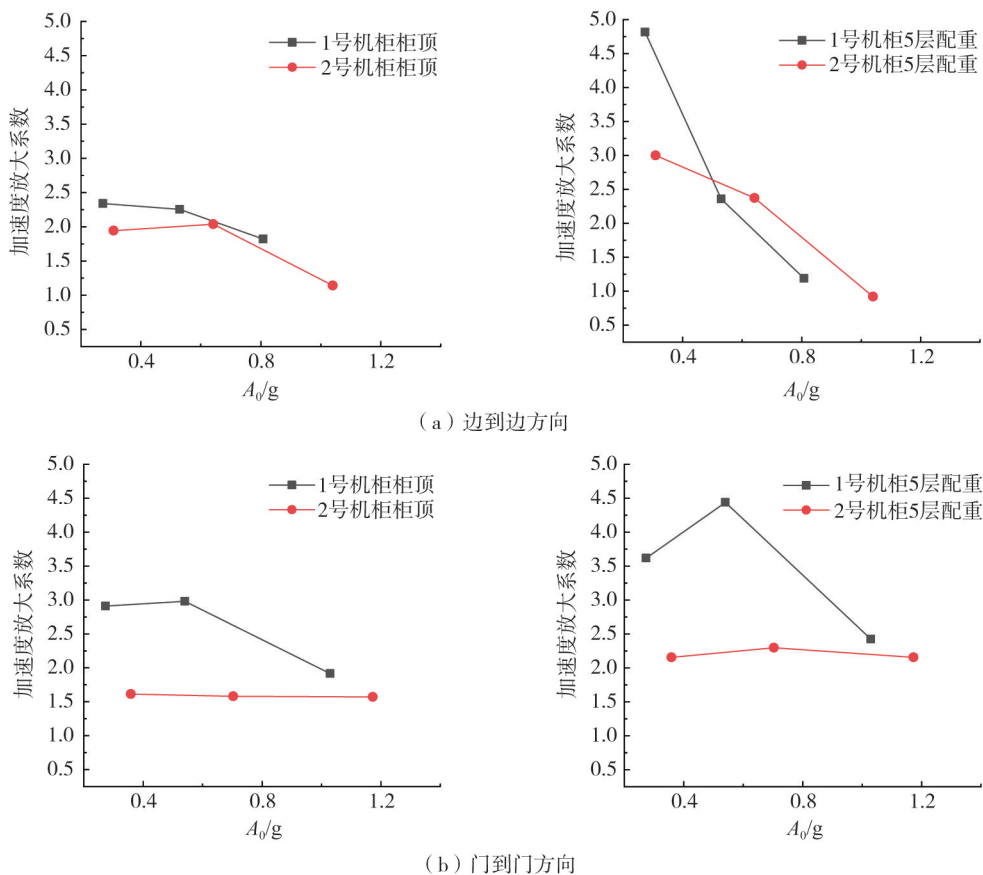


图10 柜顶及5层配重处加速度放大系数

Fig.10 Acceleration amplification ratios at the top and 5th floor of the cabinet relative to the base

3 关于正弦共振拍波适用性的讨论

从前面的试验结果可以看出,在通信设备抗震性能检测试验中保留正弦共振拍波激励是有必要的。依据本文的试验结果,当设备的自振频率低于3 Hz,采用人工地震动和正弦共振拍波都可以有效激励起设备的地震反应,而且这两种激励方式得到的设备抗震性能评定结果是一致的。但是当设备的自振频率高于3 Hz,依据规范(YD 5083—2005)目前的楼面谱生成的人工地震动,可能无法有效激励起设备的地震反应。在这种情况下,单独采用正弦共振拍波单独作为激励方式,或者与人工地震动一起作为激励方式是必要的。此外,通信设备依据其在通信网络中的作用具有不同的重要性,如表5为《电子信息设备安装工程抗震技术规范》(SJ/T 11948—2024)^[15]中对通信设备给出的重要性分类。对于表中分类为“特别重要”和“重要”的设备,考虑其在通信网络中的重要性,建议对其进行更为严格的抗震性能检测,即无论设备自振频率在哪个范围都采用正弦共振拍波作为激励方式。

虽然在通信设备抗震性能检测试验中保留正弦拍波激励是必要的,但规范(YD 5083—2005)中对于如何正确进行正弦拍波测试的试验过程描述不够清晰,缺失了一些重要的试验细节。规范(YD 5083—2005)规定待检测设备需从低于8烈度的起始烈度开始,逐级激励至设备的送检烈度。若设备在强度逐步增大的逐级激励中满足了更高烈度等级抗震性能考核,那么设备抗震性能的安全余量是相对充足的。如前面所述,待检测设备在强度逐步增大的地震动激励下,自振频率随其损伤的发展是逐渐降低的,如果采用正弦拍波进行抗震性能检测,需要在每一个地震动强度检测试验前后均对设备进行频率测试,及时掌握设备的频率变化,并在下一个地震动强度的抗震性能测试前调整正弦拍波的激振频率,确保正弦拍波频率与设备当前频率一致,才能有效激励设备共振响应。目前在规范(YD 5083—2005)中对于这一点未做详细说明,可能导致一些实验室仅在7烈度测试开始前测试设备自振频率,而后一直采用这个初始频率作为正弦拍波的频率,导致在8烈度和9烈度试验中不能有效激励设备共振响应,以致出现对设备抗震性能水平的误判。未来当规范(YD 5083)规范进行修订时,这一点应给予重视。

表5 规范(SJ/T 11948—2024)对通信设备的重要性分类及抗震性能目标

Table 5 Importance classification of communication equipment and corresponding seismic performance objectives according to SJ/T 11948—2024

重要性分类	设备重要性说明	抗震性能目标		
		多遇地震	设防地震	罕遇地震
一般	1.大震后可不需要立即修复的设备。 2.不属于特别重要或重要的电子信息设备。	完好、无损坏	基本完好、轻微损坏	中度或比较严重损坏
重要	1.功能中断将造成较大次生灾害。 2.功能中断将造成较大的经济损失。 3.功能中断将导致信息传输、应急系统中断,影响灾后救援。 4.昂贵或者修复需要极大费用的设备。 5.地震后需要立即恢复功能。	完好、无损坏	完好、无损坏	基本完好、轻微损坏
特别重要	1.功能中断将造成重大次生灾害。 2.功能中断将造成重大的经济损失。 3.功能中断将导致信息传输、应急系统中断,严重影响灾后救援。 4.地震时使用功能不允许中断。	完好、无损坏	完好、无损坏	完好、无损坏

4 结论

文中以通信机楼和基站中常用的 IDC 机柜为研究对象,基于振动台试验重点研究了正弦共振拍波作为通信设备抗震性能检测激励的适用性。通过研究主要得到以下结论:

1)在通信设备抗震性能检测试验中保留正弦共振拍波激励是必要的。

2)当设备的自振频率低于 3 Hz,可以选择人工地震动和正弦共振拍波中任一种作为振动台台面激励均可;当设备的自振频率高于 3 Hz,应单独采用正弦拍波激励单独作为激励方式,或者与人工地震动一起作为激励方式。

3)对于重要性分类为“特别重要”和“重要”的设备,建议对其进行更为严格的抗震性能检测,无论设备自振频率在哪个范围都采用正弦共振拍波作为激励方式。

参考文献:

- [1] YD 5083—2005 电信设备抗地震性能检测规范[S]. 北京:北京邮电大学出版社, 2006.
YD 5083—2005 Specification for seismic test of telecommunication equipment[S]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2006. (in Chinese)
- [2] GB 50260—2013 电力设施抗震设计规范[S]. 北京:中国计划出版社, 2013.
GB 50260—2013 Code for seismic design of electrical installations[S]. Beijing: China Planning Press, 2013. (in Chinese)
- [3] IEC 60068-3-3:2019 Environmental testing—Part 3-3: Supporting documentation and guidance—Seismic test methods for equipment[S]. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2019.
- [4] 尤红兵, 张郁山, 赵凤新. 电气设备振动台试验输入的合理确定[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 118-124.
YOU Hongbing, ZHANG Yushan, ZHAO Fengxin. Reasonable determination of input waves for shake-table test of electrical equipments[J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 118-124. (in Chinese)
- [5] ETSI EN 300 019-2-3 V2.5.1 Environmental Engineering (EE); Environmental conditions and environmental tests for telecommunications equipment; Part 2-3: Specification of environmental tests; Stationary use at weatherprotected locations[S]. France: ETSI, 2020.
- [6] GR-63-CORE. NERS™ Requirements: Physical Protection [R]. Piscataway, NJ, USA: Telcordia Technologies, 2012.
- [7] Earthquake Resistance Test Specifications for Communication Equipment[S]. Tokyo, Japan: NTT DoCoMo, 2018.
- [8] 程永锋, 朱祝兵, 邱宁, 等. 特高压电气设备抗震试验共振拍波适用性及合理地震动输入研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1753-1759.
CHENG Yongfeng, ZHU Zhubing, QIU Ning, et al. Research of resonance beat wave applicability and reasonable seismic input used in seismic test of UHV electrical equipments[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1753-1759. (in Chinese)
- [9] 李晓亮. 中、美、日和欧洲通信设备抗震检测规范分析研究[J]. 世界地震工程, 2016, 32(3): 153-157.
LI Xiaoliang. Comparative study on standards of seismic test for telecommunications equipment among China, America, Japan and Europe[J]. World Earthquake Engineering, 2016, 32(3): 153-157. (in Chinese)
- [10] 毛晨曦, 冯帅, 张亮泉, 等. 分立式开关电源系统抗震性能的振动台试验研究[J]. 世界地震工程, 2024, 40(3): 222-233.
MAO Chenxi, FENG Shuai, ZHANG Liangquan, et al. Shaking table test study on seismic performance of discrete switching power supply system[J].

- World Earthquake Engineering, 2024, 40(3): 222-233. (in Chinese)
- [11] 赵明帅, 李洪泉, 陈彦江, 等. 高压开关设备抗震性能振动台试验研究[J]. 高压电器, 2015, 51(4): 98-103.
ZHAO Mingshuai, LI Hongquan, CHEN Yanjiang, et al. Shaking table test on high voltage switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(4): 98-103. (in Chinese)
- [12] 毛晨曦, 冯利飞. 基于振动台试验的移动通信节点机房蓄电池组地震易损性分析[J]. 世界地震工程, 2019, 35(3): 10-20.
MAO Chenxi, FENG Lifei. Seismic fragility analysis of storage batteries in mobile communication node room based on shaking table test[J]. World Earthquake Engineering, 2019, 35(3): 10-20. (in Chinese)
- [13] 郝云鹏, 冯利飞, 毛晨曦. 典型通信设备机柜的振动台试验研究[J]. 地震研究, 2020, 43(3): 485-490, 602.
HAO Yunpeng, FENG Lifei, MAO Chenxi. Study on shaking table tests of a typical telecommunication cabinet[J]. Journal of Seismological Research, 2020, 43(3): 485-490, 602. (in Chinese)
- [14] 尚庆学, 韩镒, 孙国良, 等. 基于振动台试验的通信机柜地震易损性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(5): 57-63.
SHANG Qingxue, HAN Di, SUN Guoliang, et al. Seismic fragility analysis of telecommunication cabinets based on shaking table tests[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54(5): 57-63. (in Chinese)
- [15] SJ/T 11948—2024 电子信息设备安装工程抗震技术规范[S]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2024.
SJ/T 11948—2024 Technical specification for seismic isolation engineering of electronic information equipment[S]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2024.