

ICS 29.240

F 20

备案号: 68840-2019

DL

中华人民共和国电力行业标准

DL/T 1960 — 2018

变电站电气设备抗震试验技术规程

Technical code for seismic test of substation electrical equipment

2018-12-25 发布

2019-05-01 实施

国家能源局 发布

目 次

前言..... II

1 范围..... 1

2 规范性引用文件..... 1

3 术语和定义..... 1

4 试件的设计与制作..... 2

 4.1 一般规定..... 2

 4.2 相似关系设计..... 2

 4.3 试件制作..... 4

5 自振特性试验..... 4

 5.1 一般规定..... 4

 5.2 试验装置..... 4

 5.3 测试方法及测点和激振点选择..... 4

 5.4 试验步骤..... 4

 5.5 试验数据采集与处理..... 5

6 拟静力试验..... 5

 6.1 一般规定..... 5

 6.2 试验装置及加载设备..... 5

 6.3 测量仪表的选择..... 5

 6.4 加载方法..... 6

 6.5 试验数据采集与处理..... 6

7 拟动力试验..... 6

 7.1 一般规定..... 6

 7.2 试验系统..... 6

 7.3 试验实施和控制方法..... 6

 7.4 试验数据采集与处理..... 7

8 地震模拟振动台试验..... 7

 8.1 一般规定..... 7

 8.2 试验仪器..... 7

 8.3 地震动输入..... 7

 8.4 测点布置..... 9

 8.5 试验数据采集与处理..... 9

 8.6 抗震性能评估..... 9

9 抗震试验中的安全措施..... 10

 9.1 一般规定..... 10

 9.2 拟静力、拟动力试验中的安全措施..... 11

 9.3 地震模拟振动台试验中的安全措施..... 11

附录 A（规范性附录） 地震加速度反应谱..... 12

附录 B（资料性附录） 地震模拟振动台试验报告格式及内容..... 13

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009《标准化工作导则 第 1 部分：标准的结构和编写》给出的规则起草。

本标准由中国电力企业联合会提出并归口。

本标准起草单位：中国电力科学研究院有限公司、中国地震局工程力学研究所、国网北京经济技术研究院、西安西电避雷器有限责任公司、中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司、中国电力工程顾问集团华北电力设计院工程有限公司、中国水利水电科学研究院、中国建筑科学研究院、中国地震灾害防御中心、北方工业大学、北京建筑大学。

本标准主要起草人员：程永锋、卢智成、王涛、张自平、张伯艳、黄宝莹、杨小光、尤红兵、郭东锋、林震、刘菲、屈铁军、韩淼、朱祝兵、钟珉、李圣、刘振林、孙宇晗、高坡、林森、张谦、王海菠、刘海龙、韩嵘。

本标准在执行过程中的意见或建议反馈至中国电力企业联合会标准化管理中心（北京市白广路二条一号，100761）。

变电站电气设备抗震试验技术规程

1 范围

本标准规定了变电站电气设备抗震试验涉及的专用术语、试件、试验方法与步骤、抗震能力评定、抗震试验报告及试验中的安全措施等内容。

本标准适用于抗震设防烈度为 6 度~9 度、I₀类~III类场地输变电工程中交流 1000kV 及以下电压等级变电站内电气设备的抗震试验。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 18306 中国地震动参数区划图

GB 50260 电力设施抗震设计规范

DL/T 5352 高压配电装置设计规范

JGJ/T 101—2015 建筑抗震试验规程

3 术语和定义

GB 18306、GB 50260、DL/T 5352、JGJ/T 101—2015 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

抗震设防烈度 seismic precautionary intensity

按国家规定的权限批准作为一个地区抗震设防依据的地震烈度。一般情况，取 50 年内超越概率 10%的地震烈度。

3.2

地震加速度反应谱 seismic acceleration response spectra

通过激励方式，获取结构的自振频率、振型和阻尼比等参数的试验。

3.3

自振频率 natural frequency

由结构本身的质量和刚度所决定的频率称为自振频率，其中最低自振频率称为基频。

3.4

地震模拟振动台 earthquake simulation shaking table

用于再现各种形式的地震波，模拟地震过程的试验装置和系统。

3.5

加速度时程曲线 acceleration time history curve

地震加速度随时间的变化关系曲线。

3.6

倍频程 octave

频率比为 2ⁿ 的两个频率之间的频段称为 *n* 个倍频程。

3.7

缩尺试件 scaled test specimen

将原型结构按相似关系缩小制作的模型。

3.8

原型试件 **prototype test specimen**

按照与原型结构相同的材料和尺寸制作的模型。

3.9

自振特性试验 **natural vibration characteristics test**

通过激励方式，获取结构的自振频率、振型和阻尼比等参数的试验。

3.10

拟静力试验 **pseudo-static test**

通过荷载控制或变形控制对试件进行低周往复加载，使试件从弹性阶段直至破坏的全过程试验。

3.11

拟动力试验 **pseudo-dynamic test**

将计算机与试验装置在线联结的一种试验方法，是动力学数值计算与拟静力位移控制加载试验相结合来获得结构地震反应的时间过程的试验方法。

3.12

地震模拟振动台试验 **earthquake simulation shaking table test**

通过振动台台面对试件输入地面运动，模拟地震对试件作用的试验。

4 试件的设计与制作

4.1 一般规定

4.1.1 具备原型试验条件时，应优先采用原型试验，试验条件受限时，可采用缩尺试件试验。

4.1.2 采用缩尺试件时，试件各部件所用材料宜与原型相同。

4.1.3 采用缩尺试件时，应根据试验目的，使试件与原型结构在几何、物理、构造、力学和边界条件等方面的主要特性满足相似条件。

4.1.4 缩尺试件的尺寸应综合考虑试验的目的和要求、试验设备条件确定，在满足地震模拟振动台承载能力的条件下，特高压变压器、高压并联电抗器试件的缩尺比例不宜小于 1/3。

4.1.5 试件材料重力密度不足时可采用附加质量块弥补。

4.1.6 当采用连接件将试件固定时，连接件的设计应满足该设备的安装要求，并有足够大的刚度，不应因增加连接件而改变试件的自振特性。

4.2 相似关系设计

4.2.1 缩尺试验应按力学基本方程或量纲分析法建立相似关系。

4.2.2 拟静力、拟动力试验宜按表 1 规定的相似系数确定相似关系。

表 1 拟静力、拟动力试验模型相似系数

类型	物理量		量纲	相同材料缩尺模型
材料性能	应力	σ (N/mm ²)	FL ⁻²	1
	应变	ε	—	1
	弹性模量	E (N/mm ²)	FL ⁻²	1
	泊松比	μ	—	1
	密度	ρ (kg/m ³)	FL ⁻³	1/S _L
	黏结应力	u (N/mm ²)	FL ⁻²	1

表 1（续）

类型	物理量		量纲	相同材料缩尺模型
几何特性	几何尺寸	L (m)	L	S_L
	线位移	δ (m)	L	S_L
	角位移	β (rad)	—	1
	面积	A (m ²)	L ²	S_L^2
荷载	集中荷载	p (N)	F	S_L^2
	线荷载	ω (N/m)	FL ⁻¹	S_L
	面荷载	q (N/m ²)	FL ⁻²	1
	力矩	M (N·m)	FL	S_L^3

4.2.3 地震模拟振动台试验宜按表 2 规定的相似系数确定相似关系，并应符合下列规定：

- a) 试件应与原型的弹性模量相同；
- b) 当试件与原型结构在具有同样重力加速度效应的情况下进行试验时，相似系数宜按表 2 中弹塑性模型相似关系确定；实际试验时可采用人工质量模拟的弹塑性模型，受振动台试验能力限制时，可采用实用弹塑性模型；
- c) 对于可忽略重力加速度影响的试件和只涉及弹性范围工作的弹性试件，可按表 2 中忽略重力效应的弹性模型的相似系数确定相似关系；
- d) 人工模拟质量的等效质量密度的相似系数应按式（1）和式（2）计算确定：

$$S'_\rho = \frac{\rho_{1m} + \rho_{0m}}{\rho_p} \tag{1}$$

$$\rho_{1m} = \left(\frac{S_E}{S_L} - S_\rho \right) \cdot \rho_p \tag{2}$$

式中：

- ρ_{1m} ——人工模拟质量施加于试件上的附加材料的密度；
- ρ_{0m} ——试件材料的密度；
- ρ_p ——原型结构材料的密度。

表 2 振动台试验试件相似系数

类型	弹塑性模型	用人工质量模拟的弹塑性模型	实用弹塑性模型	忽略重力效应的弹性模型
几何尺寸 S_L	S_L	S_L	S_L	S_L
弹性模量 S_E	1	1	1	1
质量密度 S_ρ	$\frac{1}{S_L}$	S'_ρ	$\frac{S'_\rho}{S_a}$	S_ρ
时间 S_t	$\sqrt{S_L}$	$\sqrt{S_L}$	$\sqrt{\frac{S_L}{S_a}}$	$S_L \sqrt{S_\rho}$
频率 S_f	$\frac{1}{\sqrt{S_L}}$	$\frac{1}{\sqrt{S_L}}$	$\sqrt{\frac{S_a}{S_L}}$	$\frac{1}{S_L} \sqrt{\frac{1}{S_\rho}}$
位移 S_d	S_L	S_L	S_L	S_L

表 2（续）

类型	弹塑性模型	用人工质量模拟的 弹塑性模型	实用弹塑性模型	忽略重力效应的 弹性模型
速度 S_v	$\sqrt{S_L}$	$\sqrt{S_L}$	$\sqrt{S_L S_a}$	$\sqrt{\frac{1}{S_\rho}}$
加速度 S_a	1	1	S_a	$\frac{1}{S_L} \cdot \frac{1}{S_\rho}$
应力 S_σ	1	1	1	1
应变 S_ϵ	1	1	1	1
力 S_F	S_L^2	S_L^2	S_L^2	S_L^2

4.3 试件制作

- 4.3.1 原型结构试件应严格按照设备厂家规定的生产工艺与流程制作，且应为生产厂家自检合格产品。
- 4.3.2 试件的设计及制作应满足安装、加载、量测等要求。
- 4.3.3 应按照相似关系制作缩尺试件。

5 自振特性试验

5.1 一般规定

- 5.1.1 试验场地应避开外界干扰源。
- 5.1.2 充气设备应充气至额定压力后再进行自振特性测试。
- 5.1.3 试验测试系统应每年进行一次系统校准，应有主管计量部门出具的校准证书。

5.2 试验装置

- 5.2.1 测试系统一般由激振系统、传感器、动态信号采集分析仪等组成，测量用的传感器应具有良好的机械抗冲击性能，且便于安装和拆卸，传感器的重量和体积不应明显影响试件的动力特性。
- 5.2.2 测试系统通频带频率范围应选择 0.5Hz~100Hz，信噪比应大于 80dB。

5.3 测试方法及测点和激振点选择

- 5.3.1 可以选择激振器加载法、锤击法、张拉释放法、环境激励法（脉动法）、地震模拟振动台动态特性探查试验法等不同方法测试设备的结构动力特性。
- 5.3.2 激振器加载法、锤击法既适用于模型试验，也适用于原型试验；张拉释放法适用于结构形式简单、具有一定柔度的结构体系；环境激励法（脉动法）适用于室外设备且受环境激励影响较明显的结构体系；地震模拟振动台动态特性探查试验法适用于同时开展结构抗震性能的试验。
- 5.3.3 测点的布置位置和数量应满足试件动力特性分析的需求。
- 5.3.4 对于支柱类电气设备，激振点宜选在设备顶端，也可在地震模拟振动台上进行下部激振。
- 5.3.5 对于变压器类电气设备，激振点宜选在变压器套管或升高座顶端，也可选在变压器箱体顶部的 4 个角，条件允许时也可在地震模拟振动台上进行下部激振。

5.4 试验步骤

- 试验按照以下步骤进行：
- a) 安装固定试件；

- b) 根据试验对象及其目的,选择合适的测量参数;
- c) 结合试件特点和试验要求布置测点;
- d) 根据试验要求选择并安装采集仪器;
- e) 采集仪器连接(包括屏蔽线和接地线的连接),对整个测试系统进行调试;
- f) 合理设置检测参数,包括对采样频率、数据采集时间、数据采集系统放大倍数等参数进行设置;
- g) 采集数据并保存。

5.5 试验数据采集与处理

5.5.1 试验数据采集前应做好原始记录,记录的主要内容有:

- a) 试验项目介绍;
- b) 测量仪器,包括测量仪器的名称、型号、编号、基本参数、检测日期等;
- c) 测点布置情况说明,可附简图或照片;
- d) 试验过程中的情况说明;
- e) 试验人员、校核人员、试验日期、试验单位等。

5.5.2 数据采集前,应首先对各测试仪器进行校准。

5.5.3 数据采集过程中,为减少噪声干扰,可采取静电屏蔽或接地等措施。

5.5.4 应对激励信号和测试得到的各测点响应信号同步采集。

5.5.5 试验过程中,由于干扰及其他各方面因素的存在,部分采集数据可能偏离真实值,分析前宜对采集数据进行趋势项消除、滤波处理等。

5.5.6 动力参数识别可采用频域识别法,主要步骤包括:

- a) 固有频率的判断。幅值最大峰值处;频响函数分析中,自振频率处相干函数较大,一般接近于1;对于相同方向的多个测点,各测点在自振频率处具有近似同相位或反相位特点。
- b) 阻尼比宜按半功率带宽法或对数衰减法进行确定。

5.5.7 采用时域法识别结构动力参数时,应符合 JGJ/T 101 的相关要求。

6 拟静力试验

6.1 一般规定

6.1.1 本章适用于支柱类电气设备、电气设备套管在低周往复荷载作用下的抗震性能试验。

6.1.2 试验过程中应采取适当的防失稳技术措施。

6.2 试验装置及加载设备

6.2.1 试验装置与试验加载设备应满足试验设备的设计受力条件和支承方式的要求。

6.2.2 试验台座、反力墙、门架、反力架等,其传力装置应具有足够的刚度、承载力和整体稳定性。试验台座应能承受竖向和水平向的反力。试验台座提供反力部位的刚度不应小于试验设备的10倍,反力墙顶点的最大相对侧移不宜大于1/2000。

6.2.3 作动器的加载能力和行程不应小于试验设备计算极限承载力和极限变形的1.5倍。

6.2.4 加载设备精度应满足试验要求。

6.3 测量仪表的选择

6.3.1 应根据试验目的选择测量仪表,仪表量程不宜小于试件极限破坏计算值的1.5倍,分辨力应满足最小荷载作用下的分辨能力。

6.3.2 位移测量仪表的最小分度值不宜大于所测总位移的0.5%。示值允许误差应为满量程的±1.0%。

6.3.3 应变的测量仪表的精度、误差和量程应符合下列规定：

- a) 各种应变式传感器最小分度值不宜大于 2，示值允许误差为满量程的 $\pm 1.0\%$ ，量程不宜小于 4000；
- b) 静态电阻应变仪的最小分度值不宜大于 1。

6.4 加载方法

6.4.1 试验前，应先进行预加荷载试验。在设备或套管顶部对其进行侧向水平力加载，宜按 $0 \rightarrow 5\%P_{\max} \rightarrow 10\%P_{\max} \rightarrow 20\%P_{\max} \rightarrow 0$ 进行，侧向水平力的最大值 P_{\max} 取值为试件重量的 0.15 倍~0.30 倍。

6.4.2 试验过程中，应保持反复加载的连续性和均匀性，加载或卸载的速度应一致。

6.4.3 拟静力试验的加载程序宜采用荷载—变形双控制的方法。

6.5 试验数据采集与处理

6.5.1 数据采集过程应与试验控制过程协调一致。

6.5.2 数据采集系统的 A/D 转换位数不宜低于 16 位。

6.5.3 每次试验完毕，应对试验数据采用图形处理，得到试件的滞回曲线和骨架曲线，分析结构的初始刚度、刚度退化及极限承载力等力学性能。

7 拟动力试验

7.1 一般规定

7.1.1 对刚度较大的多质点模型，可采用等效单质点拟动力试验方法。

7.1.2 拟动力试验前，应根据试件的拟建场地类型选择具有代表性的地震动输入时程，地震动输入的选择应符合 8.3 的规定。

7.2 试验系统

7.2.1 拟动力试验系统应符合下列规定：

- a) 加载设备宜采用闭环自动控制的电液伺服试验系统；
- b) 与动力反应直接有关的控制参数仪表不应采用非传感器式的机械直读仪表。

7.2.2 加载设备的性能应符合下列规定：

- a) 试验系统应能实现力和位移反馈的伺服控制；
- b) 系统动态响应的幅频特性不应低于 $2 (\text{mm} \times \text{Hz})$ ；
- c) 力值系统允许误差宜为满量程的 $\pm 1.5\%$ ，分辨力应小于或等于满量程的 0.1%；
- d) 位移系统允许误差宜为满量程的 $\pm 1\%$ ，分辨力应小于或等于满量程的 0.1%；
- e) 加载设备在一段加速度时程曲线的试验周期内，应稳定可靠、无故障地连续工作。

7.2.3 测量仪表可按 5.3 的规定选择。

7.2.4 试件各测量值，应采用自动化测量仪器进行数据采集，数据采集频率不应低于 1Hz。

7.2.5 拟动力试验采用的计算机（包括软件）应满足实时控制与数据采集、数据处理、图形输出等功能要求。

7.2.6 试件控制参量、结构量测参量应通过标准 D/A 接口、A/D 接口，实现控制与数据采集。

7.2.7 试验装置的设计应符合 5.2 的规定。

7.3 试验实施和控制方法

7.3.1 拟动力试验应根据试件不同工作状态的要求，将输入地震动输入按相似关系对加速度幅值和时

间间隔进行调整。

7.3.2 试验前宜对试件先进行小变形静力加载试验，以确定试件的初始侧向刚度。

7.3.3 拟动力试验初始计算参数应包括各质点的质量与试件的高度、初始刚度、自振周期、阻尼比等。

7.3.4 试验的加载控制量应取试件各质点在地震作用下的反应位移。当试件刚度很大时，可采用荷载控制下逼近位移的间接加载控制方法，但最终控制量仍应是试件质点位移量。

7.3.5 量测试件各质点处的变形和恢复力，宜采取该级加载下多次采集的算术平均值。

7.3.6 在拟动力试验中，应对仪表布置、支架刚性、荷载最大输出量、限位等采取消除试验系统误差的措施。

7.3.7 拟动力试验所选取的计算方法要满足数值稳定性的相关规定。

7.4 试验数据采集与处理

7.4.1 试验数据采集应符合 6.5 的相关要求。

7.4.2 试验数据处理应符合 JGJ/T 101—2015 中 6.4 的相关要求。

7.4.3 对采用不同的地震加速度记录和最大地震加速度进行的每次试验，均应对试验数据进行图形处理，各图形应考虑计入试件经历各次试验产生残余变形的影响。主要图形数据应包括下列内容：

- a) 基底总剪力——顶端水平位移曲线图；
- b) 试件各质点的水平位移时程曲线图和恢复力时程曲线图；
- c) 最大加速度和最大位移时试件的水平位移图、恢复力图、剪力图、弯矩图等。

8 地震模拟振动台试验

8.1 一般规定

8.1.1 电气设备抗震性能验证试验时应分别在两个主轴方向上检验危险断面处的应力值。对于对称结构的电气设备可只对一个方向进行试验。对于结构形式复杂或斜向布置的悬臂电气设备应在水平双向和竖向同时输入地震波进行试验。

8.1.2 带支架的设备应将支架和设备作为一个整体进行试验。不能进行整体试验的，支架设计参数已知时，采用实际支架的动力放大系数；支架设计参数未知时，地震输入加速度应乘以支架动力反应放大系数。特高压支柱类电气设备和 GIS 设备的支架地震动力放大系数取 1.4，其他电压等级电气设备的支架地震动力放大系数取值应符合 GB 50260 的要求，各电压等级变压器类设备的支架地震动力放大系数取 2.0。

8.1.3 试验前应明确被试设备的技术条件，包括设备结构的清晰描述、型号、技术规格、地震动输入、输出的边界条件、必要的运行条件等。

8.2 试验仪器

8.2.1 地震模拟振动台应根据试验需要输出各种模拟地震动。

8.2.2 地震模拟振动台的选择原则应符合 JGJ/T 101—2015 的要求。

8.2.3 地震模拟振动台与测试仪器应每年进行一次系统校准，应有主管计量部门出具的校准证书。

8.2.4 试验的全过程应以录像作动态记录，对于试件主要部位的损坏情况宜拍摄照片和写实记录。

8.3 地震动输入

8.3.1 对于研究性试验，可采用实际强震记录或人工地震动时程作为地震动输入。输入地震动时程不应少于三条，其中至少应有一条标准人工波。对于产品鉴定性试验，宜采用一条人工地震动时程作为试验输入，输入人工地震动时程的频谱特性应满足 8.3.4 的相关规定。

8.3.2 对于特高压电气设备，当需进行竖向地震作用的时程试验时，地面运动最大竖向加速度可取最大水平加速度的 80%，两个水平方向和竖向的地震动输入峰值加速度的组合比例为 1：1：0.8。对于非特高压电气设备，当需进行竖向地震作用的时程试验时，地面运动最大竖向加速度可取最大水平加速度的 65%，两个水平方向和竖向的地震动输入峰值加速度的组合比例为 1：0.85：0.65。

8.3.3 电气设备的抗震设防烈度或地震动参数应根据 GB 18306 的有关规定确定。重要高压电气设备可按抗震设防烈度提高 1 度或按 50 年超越概率 2% 的设计地震动参数进行抗震设防，抗震设防烈度为 9 度及以上时的地震动峰值加速度取 0.5g。抗震设防烈度与试验用地震动峰值加速度的对应关系应符合表 3 的规定。

表 3 抗震设防烈度与试验用地震动峰值加速度的对应关系

抗震设防烈度	6	7	7	8	8	9
试验用地震动峰值加速度（一般设备）	0.05g	0.10g	0.15g	0.20g	0.30g	0.40g
试验用地震动峰值加速度（重要设备）	0.10g	0.20g	0.30g	0.40g	0.50g	0.50g

8.3.4 应按图 1 所示构造地震影响系数曲线，按照与地震影响系数曲线对应的试验谱合成用于台面输入的人工地震动时程。当电气设备的场地条件已知时， T_g 应按已知的地震动参数和 GB 50260 的要求取值，当电气设备的场地条件未知时， T_g 取 0.9s。图 1 中各形状参数应符合下列规定：

- 水平段，周期小于 0.03s 的区段；
- 直线上升段，自 0.03s 至 0.1s 的区段；
- 水平段，自 0.1s 至 T_g 的区段；
- 曲线下降段，自 T_g 至 $5T_g$ 的区段；
- 直线下降段，自 $5T_g$ 至 6.0s 区段；
- 周期大于 6.0s 的结构所采用的地震影响系数应专门研究；
- 地震影响系数曲线按式（3）表达：

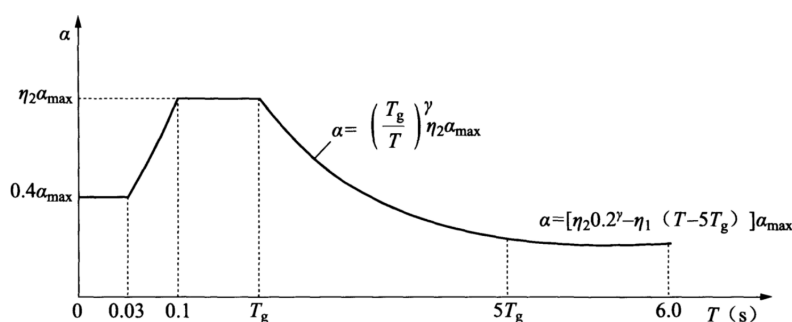


图 1 地震影响系数曲线

$$\alpha = \begin{cases} 0.4\alpha_{\max} & 0 \leq T < 0.03 \\ \left[0.4 + \frac{\eta_2 - 0.4}{0.07}(T - 0.03) \right] \alpha_{\max} & 0.03 \leq T < 0.1 \\ \eta_2\alpha_{\max} & 0.1 \leq T < T_g \\ \left(\frac{T_g}{T} \right)^\gamma \eta_2\alpha_{\max} & T_g \leq T < 5T_g \\ [\eta_2 \cdot 0.2^\gamma - \eta_1(T - 5T_g)]\alpha_{\max} & 5T_g \leq T < 6.0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\gamma = 0.9 + \frac{0.05 - \xi}{0.3 + 6\xi} \quad (4)$$

$$\eta_1 = 0.02 + \frac{0.05 - \xi}{4 + 32\xi} \quad (5)$$

$$\eta_2 = 1 + \frac{0.05 - \xi}{0.08 + 1.6\xi} \quad (6)$$

式中：

α ——地震影响系数，应按 GB 50260 的规定取值；

α_{\max} ——地震影响系数最大值，应按 GB 50260 的规定取值；

T ——结构自振周期；

T_g ——设备所在场地的特征周期；

ξ ——结构阻尼比，电气设备应采用结构实际阻尼比，若实际阻尼比未知，建议取 2%；

γ ——曲线下降段的衰减指数；

η_1 ——直线下降段的下降斜率调整系数，当计算值 $\eta_1 < 0$ 时， η_1 应取 0；

η_2 ——阻尼调整系数，当计算值 $\eta_2 < 0.55$ 时， η_2 应取 0.55。

8.3.5 采用标准人工波地震动时程试验时，台面实际输出时程波经计算分析得到的试验反应谱（TRS）在结构主要频率点处应包络相同阻尼比的地震加速度反应谱（RRS），整个频率范围内两者误差宜在 -5%~+10% 之间，人工地震波时程的总持续时间不应少于 30s，其中强震动（至少为最大值的 30%）部分不应小于 10s，信号至少有 6 个峰值（正的或负的）超过其最大值的 70%。实际强震记录（天然地震波）的平均地震影响系数曲线应与 8.3.4 规定的地震影响系数曲线在统计意义上相符。

8.3.6 实际强震记录及人工合成的地震动加速度时程对应的速度和位移时程无基线漂移。

8.3.7 当进行多方向地震输入试验时，应满足相关系数不大于 0.3 的要求。

8.3.8 不同设防加速度等级、2%阻尼比下的特高压电气设备抗震试验用地震加速度反应谱形状及数值见附录 A。

8.4 测点布置

测点布置按照下列要求进行：

- 试件安装应符合 JGJ/T 101 的相关要求；
- 结合试件特点和试验要求布置测点；
- 根据试验要求选择并安装仪器；
- 仪器连接，对整个测试系统进行调试；
- 合理设置测试仪器参数。

8.5 试验数据采集与处理

8.5.1 在抗震性能试验前结合试验要求输入白噪声，测试试件的自振频率、振型、阻尼比等。白噪声峰值宜控制在 0.05g~0.10g，持续时间应为 60s~120s。

8.5.2 结合试验要求输入地震动时程进行试验，采集数据并保存。

8.6 抗震性能评估

8.6.1 抗震性能试验后应再次输入白噪声，以分析被试试件的自振频率等动力特性的变化情况，并对试件进行相关电气性能检查，具有封闭性能要求的试件，应检查试件的封闭性能。

8.6.2 对于一阶自振频率低于 2Hz 的电气设备，应尽量降低采样频率和加大采样分析点数 N ，以保证高的频率分辨率，减少频率和阻尼比的分析识别误差。

8.6.3 在计算振动台输出的加速度试验反应谱（TRS）时，应保证每倍频程分析线数（LPO）大于 15，以保证分析频率间隔足够小。

8.6.4 地震作用下设备最大等效应力 σ_{\max} 根据试验过程中测定的设备危险断面处最大等效应变 ε_{\max} 和设备弹性模量按式 (7) 计算得到:

$$\sigma_{\max} = E \cdot \varepsilon_{\max} \cdot \frac{a_E}{a_{EH}} \quad (7)$$

式中:

a_E ——地震模拟振动台试验过程中设备基频点处的需求反应谱值;

a_{EH} ——地震模拟振动台试验过程中设备基频点处的试验反应谱值。

8.6.5 电气设备力学性能评估时应考虑不同荷载之间的组合, 电气设备的地震作用效应和其他荷载效应的组合, 应按式 (8) 计算:

$$Z_E = Z_{Ge} + Z_{Eh} + 0.25Z_{Wk} + Z_{pk} \quad (8)$$

式中:

Z_E ——地震工况下荷载效应标准值组合;

Z_{Ge} ——设备自重效应标准值;

Z_{Eh} ——地震作用效应标准值;

Z_{Wk} ——风荷载效应标准值, 特高压设备按照设备应用所在地 100 年一遇的设计风速取值, 其他电压等级电气设备按照设备应用所在地 50 年一遇的设计风速取值;

Z_{pk} ——设备内部压力标准值、导线实际拉力和运行荷载等。

8.6.6 电气设备的力学性能评估验算, 应保证设备根部或其他危险断面处产生的应力值小于设备或材料的容许应力值。当采用破坏应力或破坏弯矩进行验算时, 陶瓷材料套管和支柱绝缘子的应力及弯矩应分别满足式 (9) 和式 (10) 的要求:

a) 荷载作用产生的套管和绝缘子总应力应按式 (9) 验算:

$$\sigma_{\text{tot}} \leq \frac{\sigma_v}{k} \quad (9)$$

式中:

σ_{tot} ——荷载组合作用下产生的总应力, Pa;

σ_v ——设备或材料的破坏应力值, Pa;

k ——荷载作用下设备的安全系数, 在大风等长期荷载作用下取 2.5; 在地震短时荷载作用下, 对于瓷质类电气设备取 1.67。

b) 荷载作用产生的瓷套管和瓷绝缘子总弯矩应按式 (10) 验算:

$$M_{\text{tot}} \leq \frac{M_v}{k} \quad (10)$$

式中:

M_{tot} ——荷载组合作用下产生的总弯矩, N·m;

M_v ——设备或材料的破坏弯矩, N·m。

8.6.7 对于鉴定性抗震试验, 经抗震试验考核后, 设备的电气性能和密封性能应无明显变化, 不影响设备的继续运行。

8.6.8 抗震试验报告应由试验负责单位提供, 具体试验内容及格式参见附录 B。

9 抗震试验中的安全措施

9.1 一般规定

9.1.1 变电站电气设备抗震试验方案中应有安全防护措施, 试验时应按规定设置各种安全防护警示标识。

9.1.2 试验室应制定吊车安全操作规程, 试件的吊装、加载设备的安装及运输过程应遵守吊车安全操

作规程的规定。

9.1.3 电子试验设备和测试仪器应设置接地装置。

9.1.4 试件的固定、连接应经过验算，试验时试件应采取安全保护措施。

9.1.5 试验中应遵守仪器仪表和设备的安全操作使用的规定。

9.2 拟静力、拟动力试验中的安全措施

9.2.1 试验用的加载设备应具有足够的承载力和刚度。进行大型试件试验时，应对所使用加载架的承载力、刚度进行验算。

9.2.2 可能发生碎块崩落的和试件倒塌时，应设置安全托架、支墩及保护栏网。

9.2.3 试件高度较高易发生试件出平面破坏时，应设置侧向保护装置。

9.2.4 试验时所使用的测量仪表，应采取保护措施。

9.3 地震模拟振动台试验中的安全措施

9.3.1 应采取必要的措施避免试件在搬运、吊装过程中受到冲击或剧烈振动造成不可预期的损伤。

9.3.2 试验时应利用实验室的起重行车，通过吊钩和柔性钢缆与试件联系，钢缆应具有足够的松弛度，以保证试件在试验过程中能自由运动。

9.3.3 试验场地内应划分出危险区，试验时一切人员应远离危险区。

9.3.4 试验过程中应采取防止设备破坏时砸坏台面、污染液压系统及损坏其他测量仪器的措施。

附 录 A
(规范性附录)
地震加速度反应谱

特高压设备在场地条件未知，不同设防加速度等级、2%阻尼比下地震加速度反应谱数值见表 A.1，反应谱形状见图 A.1。

表 A.1 不同设防加速度等级、2%阻尼比下地震加速度反应谱数值

频率 (Hz)	不同设防加速度等级对应的加速度				
	0.1g	0.15g	0.2g	0.3g	0.4g
0.167	0.055	0.083	0.110	0.165	0.220
0.182	0.058	0.087	0.116	0.174	0.232
0.200	0.061	0.092	0.122	0.183	0.244
0.222	0.065	0.098	0.130	0.195	0.260
0.250	0.072	0.108	0.144	0.216	0.288
0.333	0.096	0.144	0.192	0.288	0.384
0.500	0.142	0.213	0.284	0.426	0.568
1.000	0.279	0.419	0.558	0.837	1.116
1.111	0.309	0.464	0.618	0.927	1.236
10.000	0.309	0.464	0.618	0.927	1.236
33.333	0.100	0.150	0.200	0.300	0.400
100.000	0.100	0.150	0.200	0.300	0.400

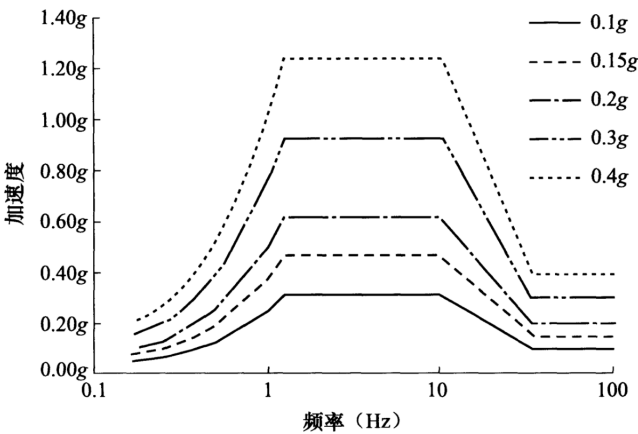


图 A.1 不同设防加速度等级、2%阻尼比下的地震加速度反应谱形状

附 录 B
(资料性附录)
地震模拟振动台试验报告格式及内容

B.1 地震模拟振动台试验报告封面示例

变电站电气设备抗震性能试验报告

设备名称及型号
试 验 类 别
试 验 单 位
委 托 单 位
委 托 号

鉴定性或研究性

批准:
审核:
主检:

试验单位 (盖章)
日期

注: 无试验单位盖章及检审批签字, 试验报告无效

B.2 地震模拟振动台试验报告内容

B.2.1 概述

- a) 考虑的荷载，包括操作荷载、恒荷载、地震作用等；
- b) 试验内容及工况介绍；
- c) 为进行试验所作必要假设的介绍；
- d) 试验见证单位及代表；
- e) 铭牌的详细内容；
- f) 其他需要在该节中介绍的内容。

B.2.2 评估对象数据

- a) 几何尺寸及质量；
- b) 设备的固有频率；
- c) 阻尼比；
- d) 材料容许应力（或破坏应力）及弹性模量；
- e) 其他需要在该节中介绍的内容。

B.2.3 试验方法

- a) 试验方法的描述；
- b) 试验输入边界条件介绍；
- c) 测点和测量仪器的描述；
- d) 其他需要在该节中介绍的内容。

B.2.4 结果

- a) 试验测得的固有频率和阻尼比；
 - b) 试验输入时程的地震影响系数曲线与 8.3.4 规定的地震影响系数曲线的对比；
 - c) 最大位移、加速度和应力的位置和数值；
 - d) 试验过程中正常或异常情况描述，试件若在考核时破坏，应对破坏的情况加以描述，并附破坏照片；
 - e) 其他需要列举的结果；
 - f) 结论。
-

中 华 人 民 共 和 国
电 力 行 业 标 准
变电站电气设备抗震试验技术规程
DL/T 1960—2018

*

中国电力出版社出版、发行
(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)
北京传奇佳彩印刷有限公司印刷

*

2019年8月第一版 2019年8月北京第一次印刷
880毫米×1230毫米 16开本 1印张 31千字
印数 001—500册

*

统一书号 155198·1523 定价 15.00元

版 权 专 有 侵 权 必 究
本书如有印装质量问题, 我社营销中心负责退换



中国电力出版社官方微信



电力标准信息微信

为您提供 **最及时、最准确、最权威** 的电力标准信息



155198.1523