



T/CECS XXX-202X

中国工程建设标准化协会标准

核电厂振动台模拟试验标准

Standard for shaking table test of nuclear power plants

(征求意见稿)

中国 XXX 出版社

202X 年 北京

中国工程建设标准化协会标准

核电厂振动台模拟试验标准

Standard for shaking table test of nuclear power plants

T/CECS XXX—20XX

主编单位：哈尔滨工业大学（威海）

批准单位：中国工程建设标准化协会

施行日期：20XX年X月X日

中国计划出版社

202X年 北京

前 言

《核电厂振动台模拟试验标准》（以下简称“标准”）是根据中国工程建设标准化协会《关于印发〈2021年第二批协会标准制订、修订计划〉的通知》（建标协字〔2021〕20号）的要求进行编制。标准编制组经深入调查研究，认真总结实践经验，参考国内外先进标准，并在广泛征求意见的基础上，制定本标准。

本标准共分为7章，主要内容包括：总则、术语和符号、试体设计与制作、加载设备、加载设计、量测仪器与设计、试验结果与分析评价。

本标准的某些内容可能直接或间接涉及专利，本标准的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本标准由中国工程建设标准化协会建筑振动专业委员会归口管理，由哈尔滨工业大学（威海）负责具体技术内容的解释。执行过程中，如有意见或建议，请反馈给哈尔滨工业大学（威海）（地址：山东省威海市文化西路2号，邮编：264209，邮箱：zaixian_chen@hit.edu.cn）。

主编单位：哈尔滨工业大学（威海）

参编单位：

主要起草人：

主要审查人：

目 次

| | |
|----------------------|----|
| 1 总则..... | 1 |
| 2 术语和符号..... | 2 |
| 2.1 术语..... | 2 |
| 2.2 符号..... | 4 |
| 3 试体设计与制作..... | 8 |
| 3.1 一般规定..... | 8 |
| 3.2 试体设计..... | 8 |
| 3.3 制作与安装..... | 9 |
| 4 加载设备..... | 12 |
| 4.1 一般规定..... | 12 |
| 4.2 具体要求..... | 12 |
| 5 加载设计..... | 14 |
| 5.1 一般规定..... | 14 |
| 5.2 安全壳、建筑物与构筑物..... | 15 |
| 5.3 设备与部件..... | 18 |
| 6 量测仪器与设计..... | 22 |
| 6.1 一般规定..... | 22 |
| 6.2 量测仪器..... | 22 |
| 6.3 量测设计..... | 23 |
| 7 试验结果与分析评价..... | 25 |
| 本规范用词说明..... | 27 |
| 引用标准名录..... | 28 |
| 条文说明..... | 29 |

CONTENTS

| | |
|---|----|
| 1 General Provisions | 1 |
| 2 Terms and Symbols | 2 |
| 2.1 Terms | 2 |
| 2.2 Symbols | 4 |
| 3 Design and Construction of Test Specimens | 8 |
| 3.1 General Requirements | 8 |
| 3.2 Design of Test Specimens | 8 |
| 3.3 Fabrication and Installation | 9 |
| 4 Loading Equipment | 12 |
| 4.1 General Requirements | 12 |
| 4.2 Specific Requirements | 12 |
| 5 Loading Design..... | 14 |
| 5.1 General Requirements | 14 |
| 5.2 Containment, Buildings, and Structures | 15 |
| 5.3 Equipment and Components | 18 |
| 6 Measuring Instrument and Design | 22 |
| 6.1 General Requirements | 22 |
| 6.2 Measurement Instrument | 22 |
| 6.3 Measurement Design | 23 |
| 7 Test Results and Analysis Evaluation | 25 |
| Explanation of Terms Used in This Code | 27 |
| List of Referenced Standards | 28 |
| Appendix: Explanation of Provisions | 29 |

1 总则

1.0.1 为统一核电厂各物项振动台地震模拟试验标准和方法，严格执行民用核设施安全第一的方针，保证核电厂各物项振动台试验工作质量，确保其技术先进、数据可靠、安全经济，制定本标准。

1.0.2 本标准适用于压水堆核电厂抗震 I、II 类物项的地震模拟振动台试验，包括安全壳、建筑物和构筑物以及设备和部件的动力特性、抗震性能及安全功能，其基本原则和振动台试验方法也适用于研究堆、重水堆、气冷堆和快中子堆核电厂。

1.0.3 非核抗震类物项的极限能力试验应按本标准实施，而其验证试验可按国家现行非核安全相关的地震模拟振动台试验标准实施。

1.0.4 振动台试验所采用的仪器设备，应经检定机构检定或校准，且在有效期内。

1.0.5 除应符合本标准规定外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 物项 structure, system and component (SSC)

核电厂建筑物、构筑物、系统和部件的统称。

2.1.2 安全级物项 safety item

安全上重要的物项，用于保证反应堆安全停堆、从堆芯排出余热或限制设计运行事件和设计基准事故的后果在可接受范围内。

2.1.3 试体 test specimen

振动台试验的对象，在原型物项基础上选取原型物项的全部或其中一部分按一定的相似关系设计建成，是试验构件、结构及设备部件的总称，包括足尺模型、缩尺模型、子结构模型等。

2.1.4 足尺模型 full scale model

尺寸、材料及边界条件与原型物项一致的试体。

2.1.5 缩尺模型 scaled model

在几何尺寸上将原型物项按相似关系缩小制作的试体。

2.1.6 单台试验 single shaking table test

通过单个振动台对试体输入地震动，模拟地震对试体作用的试验。

2.1.7 子结构振动台试验 substructure shaking table test

也称振动台混合试验，采用振动台对各物项局部进行加载试验，其余部分进行数值模拟，两部分通过变形协调和力平衡耦合的一种试验方法。

2.1.8 相似系数 similarity coefficient

试体与其原型物项的对应参数比值。

2.1.9 缩尺比 scale ratio

试体与其原型物项的几何尺寸之比。

2.1.10 弹性相似模型 elastic similarity model

为研究各物项的弹性性能，采用试验过程中基本呈现匀质弹性性能材料制作的与原型物项相似的试体。

2.1.11 弹塑性相似模型 elasto-plastic similarity model

为研究各物项的弹塑性性能，用与原型物项相似材料制成的试体。

2.1.12 地震动 ground motion

地震引起的地壳岩土介质的运动，由地震动时程和相应的峰值、谱和持续时间等参数表述。

2.1.13 楼层反应时程 floor response time history

主结构相应楼层（或高程）的地震反应曲线。

2.1.14 设计基准地震动 design basis ground motion

核电厂抗震 I、II 类物项抗震设计中作为输入采用的地震动，包括极限安全地震动和运行安全地震动两个水准。

2.1.15 极限安全地震动 ultimate safety ground motion

核电厂设计基准地震动的较高水准，是对应极限安全要求的地震动，通常为预估的核电厂所在地区可能遭遇的最大潜在地震动，对应的年超越概率为 0.1‰。

2.1.16 运行安全地震动 operational safety ground motion

核电厂设计基准地震动的较低水准，主要用于对核电厂运行安全控制、设计中的荷载组合与应力分析等，该地震动具有与极限安全地震动不同的用途。

2.1.17 要求反应谱 required response spectra (RRS)

振动台试验中由相关技术需求规定的输入反应谱。

2.1.18 正弦拍波 sine beat

由较低频率正弦波调制的某一频率的连续正弦波。一个正弦拍波的持续时间为调制频率的半个周期。

2.1.19 试验输入时程 test loading time history

振动台试验中实际输入的台面时程，包括试验输入地震动时程和试验输入楼层反应时程。

2.1.20 灵敏度系数 sensitivity coefficient

传感器输出量变化值与相应输入量的变化值之比。

2.1.21 分辨率 resolution

传感器在规定测量范围内可能检测出的被测量的最小变化量。

2.1.22 抗震性能 seismic performance

抗震性能是指地震中被测试物项所具有的性质和功能，包括强度、刚度、延性、耗能性能和刚度退化等。

2.1.23 极限能力试验 maximum capacity test

确定物项所能经受的最大地震水平试验。

2.1.24 验证试验 proof test

确定物项在设计基准地震动下的功能特性。

2.1.25 设备相似性鉴定试验 equipment similarity qualification test

确定待鉴定设备与已鉴定设备或参考设备之间性能相似等效的试验，如动力特性、抗震性能及安全功能。

2.1.26 老化处理 ageing conditioning

设备置于模拟的环境、运行和系统条件（不包括设计基准事故条件）下暴露一段时间，使设备性能降质达到允许进行设计基准事故模拟试验的状况。

2.1.27 示值误差 indication error

传感器示值与对应输入量的真值之差。

2.1.28 非完全相似误差 incomplete similarity error

部分相似系数未能满足所产生的误差。

2.2 符号

2.2.1 地震动

| | | |
|------------|----|---------------------------------------|
| $S(f)$ | —— | 试验输入地震动时程的功率谱； |
| $ F(f) $ | —— | 试验输入地震动时程平稳段的傅里叶振幅谱； |
| T_d | —— | 试验输入地震动时程平稳段的持续时间； |
| f | —— | 试验输入地震动时程的频率； |
| r_{ij} | —— | 地震动时程 $x_i(t)$ 和地震动 $x_j(t)$ 间的互相关系数； |
| $E[\cdot]$ | —— | 数学期望； |
| μ_i | —— | 地震动 $x_i(t)$ 的均值； |

| | | |
|----------|----|--------------------|
| SD_i | —— | 地震动 $x_i(t)$ 的标准差； |
| L1 | —— | 正常运行引起的荷载； |
| L2 | —— | 预计运行事件引起的附加荷载； |
| L3 | —— | 事故工况引起的附加荷载； |
| SL-1 | —— | 运行安全地震动； |
| SL-2 | —— | 极限安全地震动； |
| a | —— | 加速度； |
| t | —— | 时间； |
| T | —— | 体系在测试方向的基本自振周期； |
| a_x | —— | 时程分析地面运动最大水平加速度； |
| a_0 | —— | 与设计拟采用烈度对应的地震加速度值； |
| ω | —— | 体系在测试方向的基本自振圆频率； |
| T_p | —— | 拍间间隔； |
| ξ | —— | 阻尼比； |
| P_{sd} | —— | 目标功率谱； |
| S_a^T | —— | 目标加速度反应谱； |
| T_d | —— | 强震动持续时间； |
| P | —— | 超越概率； |
| ζ | —— | 被试设备的基频； |
| f_0 | —— | 被试设备的阻尼系数。 |

2.2.2 作用与作用效应

| | | |
|---------------|----|--------------|
| C_m | —— | 惯性力系数； |
| Z_d | —— | 最大位移； |
| w | —— | 主支承结构的主导圆频率； |
| Z_a | —— | 谱曲线的零周期加速度； |
| γ_{Eh} | —— | 地震作用分项系数； |
| F_H | —— | 水平地震作用标准值； |
| G | —— | 重力； |

- N_t —— 地脚螺栓拉力；
 N_t^b —— 螺栓的受拉承载力设计值。

2.2.3 材料性能

- h_G —— 设备重心高度；
 n_t —— 设备倾倒时，承受拉力一侧的锚固螺栓总数；
 L_s —— 螺栓间距；
 N_V —— 地脚螺栓的剪力；
 n_d —— 地脚螺栓的数量；
 N_V^b —— 螺栓的受剪承载力设计值；
 N_C^b —— 螺栓的承压承载力设计值；
 t_a —— 防滑铁件板厚；
 l_1 —— 防滑铁件长度；
 l_2 —— 防滑铁件受力点到底面的高度；
 d_0 —— 螺栓孔直径；
 N_s —— 设备一侧的防滑铁件的数量；
 f_{bend} —— 钢材的抗弯强度设计值；
 n_a —— 每个防滑铁件上的锚固螺栓数量；
 l_4 —— 防滑铁件螺栓孔中心至外边的距离。

2.2.4 振动台试验用符号

- E_s^p —— 原型物项对应的反应值误差；
 E_s^m —— 试体中传感器的测量误差；
 M_s^m —— 试体中传感器的测量值；
 M_s^p —— 原型物项对应的反应值；
 ω_s —— 采样频率；
 ω_m —— 试体关注的最高频率。

2.2.5 量测

| | | |
|---------------------|----|---------------------------------|
| S | —— | 线性传感器的灵敏度； |
| R | —— | 分辨率； |
| Y_{\max} | —— | 工作特性所决定的最大输出值； |
| Y_{\min} | —— | 工作特性所决定的最小输出值； |
| x_{\max} | —— | 测量范围的上限值； |
| x_{\min} | —— | 测量范围的下限值； |
| $\Delta x_{i,\min}$ | —— | 在第 i 个测量点上能产生可观测输出变化的最小输入变化量。 |

3 试体设计与制作

3.1 一般规定

3.1.1 振动台试验设计应依据试验目的确定，包括基本动力特性测试、动力响应测试、抗震性能及破坏机理研究等试验。设备与部件等物项，还应包括安全功能要求试验，并明确是通过其可操作性，还是仅通过结构完整性验证安全功能。当有特殊试验目的时，应在试验设计中予以说明。

3.1.2 振动台试验前应校核试体质量，加速度、速度、位移及频率范围、最大倾覆力矩和最大偏心力矩等，应确保其不超过振动台的额定性能参数。

3.1.3 安全壳、建筑物和构筑物等试体，应给出试体所在场地条件、抗震分类及设防标准、基础边界条件、几何尺寸、质量分布等信息。位于结构上的设备与部件等物项，还应给出结构振动特性、其支承位置的结构反应时程或反应谱、设备的位置、设备的性质等信息。

3.1.4 试体设计及制作应满足试验加载条件、量测条件、吊装运输设施等要求。

3.1.5 对于复杂结构，在确保实现试验目的基础上宜对试体进行合理简化。

3.1.6 对设备与部件进行相似性鉴定评价，应采用试验与分析相结合的方法，并根据设备的类型、所受载荷以及尺寸等选择鉴定样机进行试验，应满足如下要求：

- 1 不同的载荷和尺寸，应选择对抗震不利的一种；
- 2 不同的制造厂家或不同的设备类型应各选一种；
- 3 对批量生产或使用的设备或部件，应按统计理论确定其抽样率。

3.1.7 安全措施及安全相关设计应按照《地震模拟振动台试验标准》T/CECS 1589 执行。

3.2 试体设计

3.2.1 安全壳、建筑物和构筑物进行振动台试验时，试体的选择应满足下列要求：

- 1 不考虑土-结构相互作用时，可直接选取基础底面以上的结构作为试体，且需要设计基础底座；
- 2 考虑土-结构相互作用时，应将地基与结构一起作为试体。

3.2.2 设备与部件的试体应满足下列要求：

- 1 当试体需进行多个试验时，应保证其主要特性在以前的试验中未被改变；
- 2 经过振动台试验的试体不应再安装用于核电厂；
- 3 试体应满足正常运行条件，否则应予以说明；
- 4 已经通过试验而又改型不大的设备，可采用部分试验或试验和分析相结合的方法进行验证。

3.2.3 安全壳、建筑物和构筑物的相似模型缩尺比不宜小于 1/25，其子结构振动台试验的试体缩尺比不宜小于 1/4。

3.2.4 设备与部件试体振动台试验宜采用 1:1 足尺模型。当仅进行强度试验时，可使用缩尺试验；当进行设备的功能性或可运行性试验时，不应采用缩尺试验。

3.2.5 安全壳、建筑物和构筑物的模型相似设计方法及措施宜按《地震模拟振动台试验标准》T/CECS 1589 完成。

3.2.6 设备与部件的相似性鉴定要求试验，宜按《地震模拟振动台试验标准》T/CECS 1589 中弹塑性模型设计相似系数。

3.2.7 当设备与部件进行缩尺试验时，应对设备的结构尺寸、重量、重量的分布和重心、设备结构载荷传递特性和抗震刚度、确保结构完整性和边界条件的设备基础锚固强度和刚度、设备与临近物项或连接件的接口等参数的相似系数加以严格限制。

3.2.8 验证试验的试体，可先选择样机设备与部件，再进行实际设备与部件的试验。

3.2.9 对于附加消能减震/振装置结构的振动台试验模型设计，应按阻尼器提供的阻尼力等效的原则确定模型阻尼器参数。

3.2.10 对于隔震/振结构的振动台模型试验设计，应保证模型结构与原型结构具有相同的相应方向的减震/振系数。

3.3 制作与安装

3.3.1 安全壳、建筑物和构筑物试体的加工制作宜按现行标准《地震模拟振动台试验标准》T/CECS 1589 有关规定执行，尚应符合国家现行有关标准的规定。

3.3.2 设备与部件的试体应按技术文件规定的生产工艺与流程进行加工制作，且应符合国家现行有关标准的规定。

3.3.3 试体制作所采用的主要材料应进行材料力学性能试验，试验测试方法应符合现行相关标准。

3.3.4 土-结构相互作用振动台模型试验，需保证土体相似材料拌和及施工后的均匀性。施工时宜采用分层压实，层间刮毛，每层厚度不宜大于 20cm。

3.3.5 试体底座设计应满足强度、刚度要求，并在预留吊点、安装孔等位置进行局部加强设计。对减震支座，应预埋可靠连接件。

3.3.6 安全壳、建筑物和构筑物等试体底部应通过锚固装置与振动台面牢固固定，应满足以下要求：

- 1 试体与振动台之间的固定连接件应满足强度和刚度要求，不致引起试体基底输入运动的频率和幅值的变化；

- 2 试体安装孔应确保安装允许公差，厚板安装孔应保证安装垂直度；

- 3 采用螺栓连接时，连接螺栓数量应根据受力计算确定，且应预留足够数量的安装孔；连接螺栓应采取防松措施；

- 4 对于无法用螺栓与振动台面连接的试体，可采用 L 型抗震防滑角铁进行限位；

- 5 需要单独设计刚性基础的试体，应对其基础进行稳定性和强度校核。

3.3.7 对于浮放于振动台台面的试体，应保证试体与台面有可靠的接触，可设置找平层或垫层。

3.3.8 设备与部件的试体模型的安装方式应与原型实际安装条件相符，且应满足下列要求：

- 1 试体固定方式应与原型实际安装情况相同，并应有文件记录，提供紧固装置和联接的说明；

- 2 如有多种安装条件，应选择最不利的安装方式；

- 3 支承处的输入运动和加载方式应模拟真实情况；

- 4 试体应按照运行条件进行安装，任何仅用于试验的固定或连接设施不应影响试体的安全功能及受力性能；

- 5 外接电缆、水管、气管、油管等应与原型实际安装情况相同。试验中还应考虑连接的电缆线、信号馈线的影响、通电与不通电的影响等。

3.3.9 设备与部件的试体模型，应满足以下装配、固定和工作条件的要求：

1 试体的装配和固定方式应符合原型实际安装条件。原型中如有支承构架或隔减震/振措施，以及对试体抗震性能有重要影响的连接件，试验中必须计入；

2 试体宜符合实际的环境和运行条件。当试验环境与条件和实际环境与运行条件不一致时，应论证其对试验结果带来的影响。

3.3.10 试体移动可采用吊装、搬运车平移等方式，全过程应保持平稳，避免脱落、翻转、磕碰、倾覆等。

3.3.11 试体安装时振动台台面应处于水平的停机位置，试体在振动台上宜居中或对称布置安装，应在振动台停机状态下安装试体。

3.3.12 设备与部件在试验期间需要维护和修理时，应确定问题的严重程度并记录在试验报告中。修理后的试体应重新进行试验。

3.3.13 试体制作时应按下列规定进行质量控制：

1 试体采用的主要材料、半成品、成品、建筑构配件、器具和设备应进行现场验收，凡涉及安全、功能的有关产品，应按各专业工程质量验收规范规定进行复验，并应经试验负责人检查认可；

2 各工序应按施工技术标准进行质量控制，每道工序完成后，应进行检查；

3 相关专业工种之间，应进行交接检验，并形成记录。未经试验负责人检查认可，不得进行下道工序施工。

4 加载设备

4.1 一般规定

4.1.1 试验前应根据模拟地震作用包络性、试体结构性能及相关功能状态等试验指标要求选用加载设备。

4.1.2 加载设备应再现试体所要求的地震作用，满足试验指标要求及试体的相关功能状态。

4.1.3 振动台试验前宜对加载设备系统性能进行检查，评估再现相关作用及功能状态对试体、加载设备与量测仪器的影响并采取必要措施。

4.2 具体要求

4.2.1 振动台系统应具有足够的最大性能、工作频率范围和足够的波形再现精度，随机振动下带负载迭代后加载方向的加速度幅值误差不应大于 10%，相关系数不应小于 0.95。

4.2.2 对于核电构建筑物模型试验，振动台工作频带不宜小于 0.5~50Hz，对于大型振动台，其高频工作频率不应低于 25Hz。对于核电设备和设施试验，振动台高频工作频率不宜低于 100Hz。

4.2.3 振动台系统背景噪声应小于 0.02g (20gal)。

4.2.4 振动台系统在启动和停机时不应产生明显冲击，各向冲击加速度最大值不应超过 0.05g。

4.2.5 振动台系统应具有足够的加速度反应谱再现能力。负载下试验加载方向的台面实测加速度反应谱应包络要求反应谱，且满足下列要求：

- 1 反应谱计算应采用相同阻尼比、每倍频程分析线数 ≥ 10 ，频率范围宜为 0.5Hz~50Hz；

- 2 反应谱包络误差的 90%应小于 15%，其他部分（10%）不应大于 25%；

- 3 最多 3 次迭代后实测谱曲线应上包或平包要求反应谱，实测谱低于的 10%要求反应谱的频点不应多于 5 个。

4.2.6 振动台系统应具有完善的波形管理功能。应具备白噪声、正弦波的生成，人工波、天然波、功率谱、反应谱等目标控制信号的导入、导出、显示与修改功能。

- 4.2.7 当带试体迭代以提升振动台波形再现精度时，应对迭代中试体可能造成的损伤或破坏进行风险评估。
- 4.2.8 当采用多台振动台开展台阵试验时，应对振动台台阵的加速度和位移同步控制性能进行评估或测试。
- 4.2.9 对于子结构振动台混合试验，振动台控制系统应具有与子结构试验控制系统之间实现协同控制的实时通信能力。
- 4.2.10 振动台控制系统应设有不间断电源或其他措施提供备用电力，且应具备短路、过载、断相及漏电保护装置。
- 4.2.11 振动台控制系统应具备指令信号与观测信号的超限检查功能。当台面反应超过限位幅值时，应有自动停机的功能，还应具有可靠的手动急停功能。急停功能应按物理联动的逻辑顺序进行设计。
- 4.2.12 振动台控制系统应有各种故障的报警指示装置，试验系统或与振动台基坑可能的碰撞点处应设有缓冲消能装置。
- 4.2.13 非试验期间，振动台与基坑间隙应注意覆盖保护。
- 4.2.14 子结构振动台试验加载控制系统的开发和测试不应对振动台系统造成不可恢复的更改。
- 4.2.15 当试体带电、带液、带危险物质、保持高温、高压状态或者可能产生破坏效应时，应对试验全过程进行风险评估，并采取必要的安全防范措施。

5 加载设计

5.1 一般规定

5.1.1 当核电构筑物选用小缩尺比试体或进行必要简化时，应结合数值模拟评估缩尺效应对试验结果可能产生的影响。当开展核电设备和部件振动台试验时，应充分考虑振动台高频控制性能对试验结果可能产生的影响。

5.1.2 试验前应确保试验输入时程的有效频率范围、最大速度和最大位移在振动台的有效性能范围内。

5.1.3 依据试验目的，可选择进行设备与部件的验证试验和极限能力试验。

5.1.4 对设备与部件进行验证试验，其试体必须先经过功能检验，应考虑环境老化影响。

5.1.5 试体的试验输入时程应根据其所在位置采用地震加速度时程或楼层反应时程。可按下列方法确定：

1 试验输入的地震动时程的确定，可调整与厂址地震背景和场地条件相近的实测强震地震动加速度时程得出，或采用其他数学方法生成；

2 试验输入的楼层反应时程的确定，可采用抗震分析、试验或两者结合的方法。抗震分析可采用时程分析法、反应谱法或等效静力法。

5.1.6 试验输入时程宜覆盖天然地震记录、人工合成波和特定条件的地震时程。

5.1.7 试验输入时程的反应谱应能包络不同阻尼比的要求反应谱，要求反应谱宜按地震安评结果或设计要求进行确定。

5.1.8 各工况试验前后宜测试试体的基本动力特性。基本动力特性测试应保证测试前后试体状态不变，不对试体造成损伤，不影响试体安全功能。

5.1.9 基本动力特性试验宜采用白噪声激励法测定，也可用主振型法和传递函数法。白噪声的频率范围宜为 0.5Hz~50Hz，应能覆盖试体的自振频率范围，加速度幅值宜取 $50\text{cm/s}^2\sim 80\text{cm/s}^2$ ，单方向有效持续时间不宜少于 60s。台面白噪声激振可采用三向同时加载或单向分别加载。

5.1.10 运行设备与部件的振动台试验，应在模拟运行工况和监测其性能的条件下进行。对于布置有多个器件的复杂组件，当无法在运行工况下进行试验，宜采用安装不投入运行器件的代替方法，同时测量各器件位置上的动态反应，并

作为在运行工况下对各器件进行独立振动台试验的输入。

5.1.11 缩尺模型试验输入时程应根据设计的相似系数对本章规定的幅值、时间步长、频谱成分和持续时间进行调整，且持续时间不宜小于 5 秒。

5.2 安全壳、建筑物与构筑物

5.2.1 本节适用于安全壳、建筑物和构筑物的加载设计，其试验输入地震动时程的确定也适用于直接安装于基础上的设备与部件。

5.2.2 试验输入时程可输入单组或多组，每组应包括两个正交水平分量和一个竖直分量的时程。

5.2.3 振动台试验加载时，试验输入时程的选择应符合下列要求：

1 宜选取不少于三组地震动加速度时程进行试验。可直接选用典型强震记录的地震动加速度时程，且至少应有一条人工地震动加速度时程；

2 对于台阵试验，进行试验输入地震动加速度时程选取和频谱压缩时，应进行不同子台位移、速度相似关系影响分析；

3 每条试验输入地震动加速度时程的强震持续时间不应小于 6s，总持续时间不宜小于 25s。

5.2.4 试验输入地震动加速度时程应符合下列规定：

1 试验输入地震动加速度时程的傅立叶相位谱具有在 $0\sim 2\pi$ 相角范围内均匀随机分布的特征；

2 在满足地震动加速度时程包络函数的条件下，可采用频域或时域的调整方法，使试验输入时程的反应谱能包络不同阻尼比的要求反应谱，谱值低于要求反应谱的控制点数不得多于 5 个，相对误差不得超过 10%，且反应谱控制点处谱值总和不得低于要求反应谱的相应值；

3 在 0.5Hz~33Hz 频率范围内，反应谱的控制点数不得少于 75 个，且应大体均匀分布于频率的对数坐标上，可按倍频程控制频点数，各频段的频率增量可按本标准表 5.2.4 采用；

表 5.2.4 反应谱的频率增量 (Hz)

| | | | | | | | | |
|------|---------|---------|---------|---------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 频率范围 | 0.2~3.0 | 3.0~3.6 | 3.6~5.0 | 5.0~8.0 | 8.0~15.0 | 15.0~18.0 | 18.0~22.0 | 22.0~33.0 |
| 频率增量 | 0.1 | 0.15 | 0.20 | 0.25 | 0.50 | 1.00 | 2.00 | 3.00 |

4 仅生成单组试验输入地震动时程时，可采用如下两种方法并满足相应要求：

- 1) 基于功率谱调整试验输入地震动时程。由试验输入地震动时程计算得出的在 0.3Hz~24Hz 频率范围内的功率谱的平均幅值，不小于对应频率区间内由要求反应谱得出的功率谱的 80%。试验输入地震动时程的功率谱 $S(f)$ 按下式计算：

$$S(f) = \frac{|F(f)|^2}{\pi T_d} \quad (5.2.4-1)$$

式中： $|F(f)|$ ——时程平稳段的傅里叶振幅谱；

T_d ——时程平稳段的持续时间。

频率 f 处的功率谱平均幅值取频带 $[f-0.2f, f+0.2f]$ 内功率谱 $S(f)$ 的平均幅值。

- 2) 基于反应谱调整试验输入地震动时程。生成的试验输入地震动时程的离散时间间隔不得大于 0.01s；计算试验输入地震动时程的 5% 阻尼比反应谱所需控制点数在频带 $[f, 10f]$ 范围内不得少于 100 个，且在对数坐标下均匀分布于 0.1Hz~50Hz 频段内；试验输入地震动时程在所有控制点处的反应谱值不得低于要求反应谱的 90%；反应谱的每个控制点，在其相应频率 $\pm 10\%$ 的频带内，谱值不应全部低于要求反应谱；试验输入地震动时程的 5% 阻尼比反应谱在所考虑频段内的所有控制点处，谱值不得超过 5% 阻尼比要求反应谱的 1.3 倍。

5 当生成多组（至少 4 组）试验输入地震动时程时，同一方向上各地震动时程反应谱的平均值应包络相应阻尼比的要求反应谱；

6 每两条试验输入地震动时程间的互相关系数不应大于 0.16。时程 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 间的互相关系数由下式计算：

$$r_{ij} = \frac{E\{[x_i(t) - \mu_i][x_j(t) - \mu_j]\}}{SD_i SD_j} \quad (5.2.4-2)$$

式中： r_{ij} ——时程 $x_i(t)$ 和 $x_j(t)$ 间的互相关系数；

$E[\bullet]$ ——数学期望；

μ_i ——地震动 $x_i(t)$ 的均值；

SD_i ——地震动 $x_i(t)$ 的标准差。

5.2.5 试验输入时程峰值应符合下列规定：

- 1 极限安全地震动的加速度峰值应按地震安评结果或设计要求进行确定；
- 2 当有特殊试验目的时，如极限能力试验，应根据试验目的确定输入的加速度峰值。

5.2.6 试验输入时程加载方向及比例关系应符合下列要求：

- 1 应至少在两个水平主轴方向分别进行试验；
- 2 测试核电厂试体两个水平方向地震作用相互影响时，应按设计规定的加速度幅值同时进行双水平方向试验；
- 3 核电厂试体对竖向地震动反应敏感时，宜同时进行两个水平方向和竖向三向地震动输入试验；
- 4 两个水平向的加速度峰值应采用相同数值，竖向加速度峰值宜采用水平向设计加速度峰值的 2/3。

5.2.7 根据试验目的，可选择多次分级加载或单次强震加载等。

5.2.8 子结构振动台试验的试验输入时程应为其在原型结构中支承点处的反应时程。

5.2.9 对于子结构振动台试验，边界约束力的施加应与振动台加载同步。

5.2.10 试验时需考虑运行荷载时，其荷载组合按表 5.2.10 选用，且应符合下列规定：

- 1 对于抗震I类和抗震II类物项，应根据其类别施加 L1 与设计基准地震组合；
- 2 对于抗震I类和抗震II类物项，如果 L2 或 L3 由地震荷载引起并（/或）与地震荷载同时发生的可能性大（如 L2 与地震无关，但发生相当频繁，就可能

是这种情况)，则应施加 L1 和 L2（或 L3）与设计基准地震组合；

3 对已确认会发生与抗震I类或抗震II类物项相互作用的其他抗震物项，应施加与抗震I类或抗震II类物项相同的荷载组合，但可用不同的安全裕度；

4 对于非核抗震类物项，应施加相关设计基准荷载按常规工业规范进行的组合。

表 5.2.10 与地震荷载的荷载组合

| 抗震类别 | L1 | L2 | L3 | 地震荷载 | 安全裕度 |
|---------------------------|----|----|----|-------------|------------------------------|
| I | √ | — | — | SL-2 | 依据较高风险设施的设计规范（核规范） |
| | √ | √ | — | SL-2 | 同上 |
| | √ | — | √ | SL-2 | 同上 |
| II | √ | — | — | SL-2 或 SL-1 | 依据风险与核动力厂不同（通常较低）的设施的设计规范 |
| | √ | √ | — | SL-2 或 SL-1 | 同上 |
| | √ | — | √ | SL-2 或 SL-1 | 同上 |
| 与抗震 I 类或抗震 II 类物项发生空间相互作用 | √ | — | — | SL-2 或 SL-1 | 依据较高风险设施的设计规范（核规范）或较低风险的设计规范 |
| | √ | √ | — | SL-2 或 SL-1 | 同上 |
| | √ | — | √ | SL-2 或 SL-1 | 同上 |
| 非核抗震类 | √ | — | — | 常规地震输入 | 依据常规风险设施的设计规范 |

注：设计荷载的分组如下：L1：正常运行引起的荷载；L2：预计运行事件引起的附加荷载；L3：事故工况引起的附加荷载。SL-1：运行安全地震动；SL-2：极限安全地震动。

5.3 设备与部件

5.3.1 设备与部件振动台试验宜同时在三个主轴方向上进行加载，且其中一个方向应为抗震性能最不利的方向。对于对称试体，可同时在竖向和一个水平方向进行双向振动台试验。如满足下列相关条件，可采用单方向加载，但应分别在三个主轴方向加载：

- 1 不同方向相互耦合效应可忽略或无耦合；
- 2 由于其安装条件的限制仅受到单向激励时；
- 3 其他情况经论证可仅进行单方向加载的。

5.3.2 对横向布置的穿墙套管等大跨度、长悬臂试体，宜采用三向输入进行验证

试验；当试验条件受限时，可采用水平和竖向双向同时输入波形进行验证试验，但在确定水平向输入分量时应计入双水平向输入的叠加效应和方向效应。

5.3.3 振动台试验可采用多频反应谱方法、单频包络谱方法，并应符合相应的规定：

1 对于带支架体系原型设备的振动台试验，宜选择多频反应谱方法，其试验输入时程可采用符合设备支架支承点处楼板谱的实际强震加速度记录或人工合成地震动加速度时程。当仅进行设备本体或设备的部件验证试验时，其输入地震动加速度幅值应计入设备支架体系的动力反应放大效应；

2 安装地点不确定或难以实现现场安装条件的试体，宜选择单频包络谱方法；输入激励一般采用正弦扫描波或单频正弦拍波；

3 极限性能试验可采用多频反应谱方法或单频包络谱方法，可以逐级提高激振幅度直至观察到试体失常。

5.3.4 多频反应谱法的振动台试验，当选用人工合成地震动时程作为试验输入时，除应满足第五章第二节第四条的要求外，尚应满足下列要求：

1 由其生成的反应谱应包括要求反应谱的整个频率范围，直至要求反应谱的截断频率；

2 由其引起参考点（在振动台台面上或试体与台面的刚性连接处布置）的加速度幅值，应不小于要求反应谱的零周期加速度值；

3 其总持续时间不低于 30s，其中强烈部分（幅值超过最大值的 25%）的持续时间应大于 15s，且至少有 6 个峰值（正的或负的）超过其最大值的 70%，时间步长宜取 0.01s；

7 各正交轴上的试验输入时程应是相互独立的，宜采用互相关系数判断其独立性。

5.3.5 多频反应谱法的振动台试验，可采用 5 个正弦共振调幅 5 波组成的正弦扫描波或单频正弦拍波，且应满足下列要求：

1 在阻尼比相同的情况下，其生成的反应谱应大于给定的楼层反应谱值，但其相对差值不应超过 50%；

2 频率需包括楼层反应的整个频段，在无特殊论证时，可取为 1.0-33.0Hz；

3 频率的容许误差可按表 5.3.5 确定：

表 5.3.5 频率容许误差

| 频率 (Hz) | 频率容许误差 |
|----------|--------|
| 0.0~0.25 | 0.05Hz |
| 0.25~5.0 | 20.0% |
| >5.0 | 1.00Hz |

4 各拍的加速度时程可按下列规定确定：

1) 当 $t \geq 5T$ 时, $a=0$; 当 $0 \leq t \leq 5T$ 时, a 值可按下列公式确定：

$$a = a_x \sin \omega t \cdot \sin \frac{\omega t}{10} \quad (5.3.5-1)$$

$$a_x = 0.75a_0 \quad (5.3.5-2)$$

式中：
 a —— 各时程的水平加速度 (g)；
 t —— 时间 (s)；
 T —— 体系在测试方向的基本自振周期 (s)；
 a_x —— 时程分析地面运动最大水平加速度 (g)，不小于给定的安装部位要求反应谱的零周期加速度值；
 a_0 —— 与设计拟采用烈度对应的地震加速度值 (g)；
 ω —— 体系在测试方向的基本自振圆频率 (Hz)。

2) 为避免各拍地震反应的叠加，各拍间隔可按下列式确定：

$$T_p \geq \frac{1}{2\pi\xi f} \quad (5.3.5-3)$$

式中：
 T_p -拍间间隔 (s)；
 f -体系在测试方向的基本频率 (Hz)；
 ξ -阻尼比。

5 其激起的设备重心处的反应值不得低于给定的包络反应谱的幅值。

5.3.6 安装在柔性管线上设备的振动台试验可采用单频输入的正弦拍波，在三个正交轴的每个轴向，应分别施加相同的频率和加速度。施加的频率、持续时间及幅值还应满足下列要求：

1 应在设备共振频率和从 2Hz~32Hz（或如果考虑流体动力载荷时的其他截止频率）频率范围内，以 1/3 倍频程增量进行单频试验；

2 当需考虑高于 32Hz 的频率，应以 1/6 倍频程增量进行单频试验；

3 各频率下的持续时间应等于确定完整的设备可运行性所需要的时间或 15s, 取两者中的较大值;

4 幅值不应小于安装部位要求反应谱的零周期加速度值, 且其激起的设备重心处的反应值不得低于给定的包络反应谱的幅值。

5.3.7 各工况加载时间间隔应不会导致试体反应叠加。

5.3.8 当试体有支承结构时, 应考虑支承结构的动力放大作用。

5.3.9 试体应先经过老化试验, 试验可参照现行标准进行。

5.3.10 当试体支承于同一结构或两个以上结构的多个支座且各支承点处的运动有很大差别时, 可采用台阵试验, 各支承点处宜采用多点输入。也可采用各支承点处反应谱的上包络线进行单台振动台试验, 但应考虑由于各支承点相对位移对试验结果的影响。

5.3.11 振动台验证试验加载次数及加速度幅值应满足下列要求:

1 先应对试体进行 5 次运行安全地震模拟试验, 再做 1 次极限安全地震模拟试验;

2 电气设备可用 2 次极限安全地震模拟试验代替 5 次运行安全地震模拟试验;

3 阀门可用 2 次幅值为极限安全地震反应值的 $2/3$ 的正弦扫描试验代替 5 次运行安全地震模拟试验;

4 振动台试验中采用的试验输入时程应包络现有相关技术标准规定的时程, 运行安全地震模拟试验的加速度峰值不应小于 $1/2$ 极限安全地震模拟试验的加速度峰值。

5.3.12 安全级设备与部件的振动台试验, 应符合实际的环境和运行条件。当试验环境与条件和实际环境与运行条件不一致时, 应论证其对试验结果带来的影响可接受或对影响进行修正。

5.3.13 直接做振动台试验有困难的设备与部件, 宜按照两步进行加载试验。第一步, 用计算方法或试验方法得到在地震作用下设备中该部件支承点处的加速度响应; 第二步, 以此加速度响应值作为输入, 单独对部件作振动台试验。

6 量测仪器与设计

6.1 一般规定

6.1.1 量测仪器可实时记录台面再现波形和试体的结构性能、地震反应及功能状态等相关数据，明确反映试验地震作用包络性、结构安全和功能状态，保证测试参数的原真性、完整性和可溯源性。

6.1.2 量测宜优先选择非接触式、智能型和数字式动态传感器，根据量测物理量的数值范围、精度要求等指标，选择匹配的数据采集系统和调理放大仪器。

6.1.3 量测用传感器和数据采集设备在试验前应进行检查校准，试验前后和试验过程中应进行适时的拍照和录像。

6.1.4 试验数据应标注传感器位置和编号，并应及时进行检查、整理和备份。

6.2 量测仪器

6.2.1 量测用传感器的类型、型号、规格、数量和安装位置应根据试验需求选定，在满足关键物理量量测的前提下应结合数值模拟对传感器布设位置和数量进行优化和确认。

6.2.2 传感器选用时宜优先选用智能型、数字型和非接触式传感器及采集系统。

6.2.3 接触安装时应优先选择不对试体动力特性产生明显影响的传感器。

6.2.4 量测用传感器应具有足够的抗冲击性能。

6.2.5 量测用传感器宜便于安装和拆卸。

6.2.6 量测用传感器宜具有防水、防尘、防电磁干扰性能。

6.2.7 量测用传感器应具有足够的量程和灵敏度，量程不应小于预估试体动力反应最大值的 1.5 倍，精度不宜小于满量程的 2%。

6.2.8 位移传感器和加速度传感器的允许误差不宜大于满量程的 5%。应变式传感器的标识精度不宜劣于 $2\mu\varepsilon$ 。

6.2.9 数据采集系统应与传感器输出阻抗、信号类型相匹配。

6.2.10 数据采集系统的采样频率不宜低于试验加载波形有效高频分量的 5 倍且不应低于 200Hz，宜设置抗混滤波以提高数值质量。

6.2.11 数据采集系统宜采用通道独立的模数转换接口，模数转换精度不应低于 16 位，动态范围不应低于 90dB。

6.2.12 当同时使用多套数据采集系统时，多套数据采集系统应进行时钟同步。

6.2.13 数据采集系统宜具备触发采集和同步功能，宜采用振动台控制系统的脉冲或时钟触发同步采集。

6.3 量测设计

6.3.1 量测设计文件应根据核电厂结构与设备抗震试验的结构性能和功能状态测试需求制定，并应明确试验设备、量测仪表和量测方法，所有测点应有文字和图件说明。

6.3.2 量测仪表的布设应与试体结构性能和功能状态相关，可包含核电产品抗震试验所要求保持的代表性环境、电气、流体、机械特性等功能状态参数。对于安全级设备，应量测试验前、中、后设备的安全功能和地震反应参数。

6.3.3 量测设计应给出下列数据信息：

- 1 采用清晰直观的示意图展示传感器布设位置，对于特定位置的传感器，配以文字说明；

- 2 传感器的类型、型号、规格、数量等；

- 3 需要用的数据线规格、长度和数量；

- 4 使用的数据采集系统通道类型、数量和模块数。

6.3.4 应变量测应考虑测点的主应力方向和应变分布情况，选择合适标距的应变片或应变花。

6.3.5 子结构振动台混合试验应选择低噪声高精度的高性能传感器和数据采集设备。采用实时运算平台进行子结构数值求解和加载控制时，应充分考虑通讯延迟和时滞对试验的影响。

6.3.6 记录试验时应设置摄像设备以观察和记录试体的吊装、调试、动力响应、破坏情况和功能变化，试验关键环节应进行人工观察、记录和拍照记录。

6.3.7 传感器布置数量和位置，应根据量测实际需求、传感器数量和数据采集通道数量等情况综合确定，其布置位置符合下列规定：

- 1 宜选择地震反应较大和功能状态表征部位布置测点；

- 2 宜选择试体的底梁或底板上布置测点，以校验试体底部相对于台面的运动；

- 3 加速度传感器可设于设备的重心处、设备的最高处和最低处。

6.3.8 振动台台面上或试体与台面的刚性连接处应布置测点，用以测试并确定试验再现地震作用的包络性。试体为安装在支架或者管线上设备部件时，还应在试体重心处设置测点，用以测试并确定重心处加速度反应的包络性。

6.3.9 试验的全过程宜对试体整体及关键部位拍摄照片，并使用录像作动态记录。对于试体主要部位的开裂、失稳屈曲及破坏情况，以及功能状态变化情况，应重点拍摄照片并作出记录和标记。

6.3.10 传感器宜布设在量测物理量较大部位和典型部位。当采用接触式传感器时，应保证传感器安装牢靠，有效固定。

6.3.11 传感器安装方式应与所测物理量协同一致，同向布置的多个传感器应当保持平行。

6.3.12 对于金属外壳传感器，应考虑与试体间的绝缘隔离。

6.3.13 传感器用连接导线应采用屏蔽电缆，连接接头宜采用免焊航空接头，且应固定在试体、支架或台面上，在振动台台面边缘部分的数据线应留有足够的冗余长度。

6.3.14 数据采集系统应可靠接地，传感器和数据采集系统供电宜使用带稳压功能的不间断电源。

6.3.15 涉水类和水下振动台试验中宜选用防水型传感器或进行有效的防水处理。

6.3.16 对采用隔震技术的振动台基础，振动台试验期间宜对振动台基础进行监测。

6.3.17 数据采集系统应设有不间断电源或其他措施提供备用电力，且应具备短路、过载、断相及漏电保护装置。

7 试验结果与分析评价

7.0.1 对无效数据进行辨别和筛除应符合现行国家标准《正态样本离群值的判断和处理》GB/T 4883 的有关规定。试验数据处理及分析应按《地震模拟振动台试验标准》T/CECS 1589 完成。

7.0.2 由振动台试验获得试体在不同加速度输入下的结构反应及试验现象，可依据相关规范规定评价核电厂各物项的抗震性能、安全功能。

7.0.3 核电厂抗震 I 类物项的验证试验，应评价其在地震发生期间和地震后能执行如下功能：

- 1 维持和保证反应堆冷却剂系统承压边界的完整性；
- 2 使反应堆安全停堆并保持在安全停堆状态；
- 3 堆芯余热排出；
- 4 能减少和防止放射性物质向环境释放，并保证不超过规定限值。

7.0.4 核电厂抗震 II 类物项的验证试验，应评价其在地震发生期间和地震后影响抗震 I 类物项执行安全功能的可能性。

7.0.5 对安全壳、建筑物和构筑物采用缩尺模型进行原型结构性能评价时，应将测量结果根据设计相似系数换算为原型结构相应数值，并结合非完全相似误差分析，进行综合评价。

7.0.6 对设备与部件进行相似性鉴定评价时，应从功能特性相似、激振特性相似、物理特性相似、激振和物理同时考虑相似来说明所依据的鉴定样机，确定鉴定原型与鉴定样机的相似性与差别，且需应满足下列要求：

- 1 采用 5%临界阻尼的鉴定样机试验反应谱应包络同阻尼待鉴定设备所研究频率范围内的要求反应谱；
- 2 鉴定样机的试验记录应能证明待鉴定设备的安全性能。

7.0.7 试验报告应能完整记录试验设备、试验过程以及参数数据，并能够对试体的性能进行正确评估。

7.0.8 试验后的试体，应就其外形、结构和功能进行测试和检查，并与试验前的基准数据进行比较，以证明试体在地震后的完整性、功能性和可运行性。必要时可进行拆卸检查，重大损伤应记录在试验报告中，并进行评价。

7.0.9 设备合格性评定应包括下列因素：

- 1 是否发生破坏设备结构完整性的损伤；
- 2 设备典型部位应力、应变、位移、变形是否超过允许值；
- 3 设备是否发生功能性和可运行性故障；
- 4 仪控电设备的电器仪表失去输出信号(含开路或短路)，给出乱真的输出；
- 5 在整个工作范围内，仪表或控制设备的整定值或脱扣整定值的漂移大于规定的准确度或刻度值变化大于规定的准确度。

本规范用词说明

为便于在执行本标准条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1 表示很严格，非这样做不可的：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；

2 表示严格，在正常情况下均应这样做的：

正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；

3 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；

4 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

引用标准名录

- 1 《正态样本离群值的判断和处理》 GB/T 4883
- 2 《地震模拟振动台试验标准》 T/CECS 1589

中国工程建设标准化协会标准
核电厂振动台模拟试验标准

T/CECS xxx-20xx

条文说明

制定说明

本标准制定过程中，编制组进行了广泛的调查研究，参考了核电厂振动台模拟试验相关的已有研究成果和技术标准，并通过试验和工程实践总结了关于地震模拟振动台试验的操作、评价方法。

为便于广大技术和管理人员在使用本标准时能正确理解和执行条款规定，《核电厂振动台模拟试验标准》编制组按章、节、条顺序编制了本标准的条文说明，对条款规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项等进行了说明。本条文说明不具备与标准正文及附录同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握标准规定的参考。

目 次

| | |
|-----------------------|----|
| 1 总则..... | 32 |
| 2 术语和符号..... | 36 |
| 3 试体设计与制作..... | 38 |
| 3.1 一般规定 | 38 |
| 3.2 试体设计 | 40 |
| 3.3 制作与安装 | 41 |
| 4 加载设备..... | 47 |
| 4.1 一般规定 | 47 |
| 4.2 具体要求 | 47 |
| 5 加载设计..... | 50 |
| 5.1 一般规定 | 50 |
| 5.2 安全壳、建筑物与构筑物 | 52 |
| 5.3 设备与部件 | 54 |
| 6 量测仪器与设计..... | 60 |
| 6.1 一般规定 | 60 |
| 6.2 量测仪器 | 61 |
| 6.3 量测设计 | 64 |
| 7 试验结果与分析评价..... | 69 |

1 总则

1.0.1 本标准编制的目的是在进行核电厂振动台试验时有统一的试验准则，保证试验的质量和测试结构的一致性与可靠性。

1.0.2 本条规定本标准的适用范围。我国拟建的核电厂绝大多数采用压水型反应堆，但也有少量其他堆型，如重水堆、气冷堆、快中子堆等。本标准有关具体设计要求的条款主要适用于压水堆核电厂，但基本原则和地震作用计算方法也适用于重水堆、气冷堆和快中子堆核电厂，可以适应我国民用核电发展的要求。

国际上核电厂物项的抗震分类有 2 类~4 类不等。《核动力厂抗震设计与鉴定》HAD 102/02、《核电厂抗震设计规范》GB 50267—2019 和现行国家标准《压水堆核电厂物项分级》GB/T 17569 均规定核电厂物项的抗震分类采用 3 类。尽管各具体物项的抗震分类规定有所不同，但整体划分为 3 类有利于规定相关设计要求和方便设计人员的使用，故本标准的物项抗震分类仍规定为 3 类。将核电厂的物项划分为抗震 I 类、抗震 II 类和非核抗震类。

抗震 I 类物项是指在发生 SL-2 的情况下仍需要保持安全功能能力的物项。安全等级划分为 B-SC1、BSC2、B-SC3、F-SC1 和 F-SC2 的物项及其支承结构应作为抗震 I 类物项。通常 F-SC3 物项不作为抗震 I 类物项，但以下情况应作为抗震 I 类物项：用于缓解 DEC-A 工况的系统；F-SC1 或 F-SC2 的机械、电气或仪控设备所在厂房中的分区隔离、火灾探测和消防系统。对于包容 T-SC3 设备的构筑物，其抗震类别与其包容的设备保持一致。抗震 I 类物项应保证在地震发生期间和/或地震后能执行规定的安全功能。

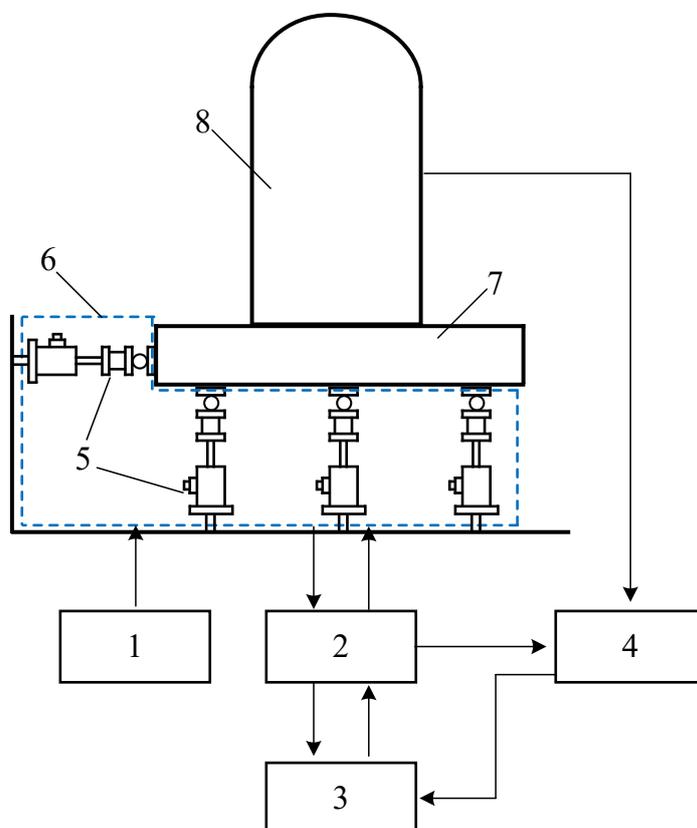
抗震 II 类物项，即非抗震 I 类物项，若在发生 SL-2 的情况下其失效可能影响抗震 I 类物项执行安全功能，应定为抗震 II 类。根据地震可能引起的后果类型。抗震 II 类物项需要满足“稳定性”或“完整性和密封性”的要求。

非核抗震类物项，即抗震 I、II 类以外的物项。可参考《地震模拟振动台试验标准》进行振动台试验。

振动台试验是指用振动台对试体进行加载以获取其动力特性和动力反应的试验，用于判别和鉴定结构的抗震性能和能力，以及验证结构抗震分析结果。试验对象可以是试验构件与试体等。除试体以外的，根据不同试验目的所设计

的振动台试验对象，统称为试验构件，如隔振装置、阻尼器、以及试验方法验证等用的试件。本标准也适合于隔震、减震产品的抗震性能测试，在进行隔震、减震产品抗震性能测试时，尚应满足现行有关标准的要求。

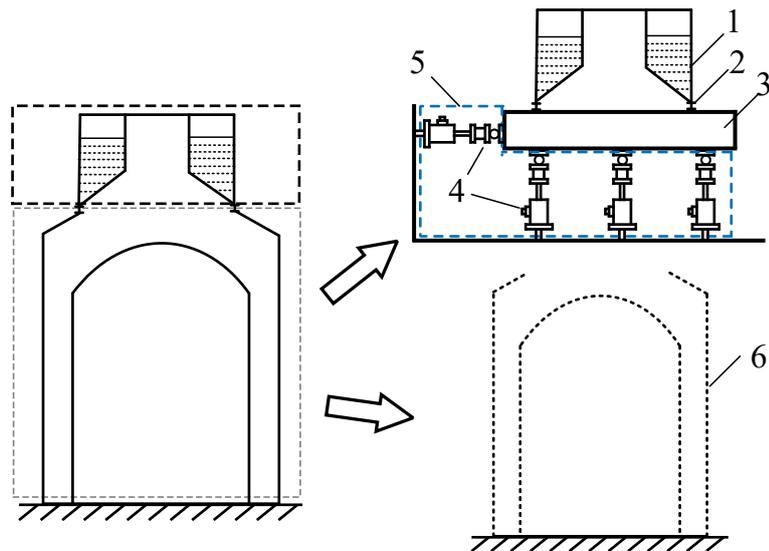
振动台单台系统可由图 1 所示的组成部分组成。



1—动力系统；2—控制系统；3—计算机；4—数据采集系统；
5—激振器；6—激振系统；7—台面；8—试验对象

图 1 振动台组成示意图

子结构振动台系统可由所示的组成部分组成，其试体是取整体结构的一部分，即试验子结构，该部分结构在试验过程中进入强非线性；整体结构的其他部分作为计算子结构，该部分处于弹性或弱非线性。通过振动台台面对试体输入地震动，同时对计算子结构进行计算，得到边界条件的控制参数，借助作动器、橡胶-质量系统等满足试体暴露处的边界条件，实现对整体结构的抗震试验。



1—试验子结构；2—TMD；3—振动台台面；4—激振器；
5—激振系统；6—数值子结构

图2 子结构振动台试验示意图

1.0.4 本标准中提及的常用试验仪器设备均以国家计量部门的标准规定为准。由于试验仪器设备随工业的发展，新产品向高科技、新功能发展，流向市场和更新速度快。因此，试验中在满足本标准规定的基本要求下，应选用精度更高的仪器设备。

受电子元器件老化和环境因素的影响，振动台控制器的模拟量环节可能会产生漂移，传感器灵敏度参数会随时间发生改变，为了保证振动台控制性能的可靠性，振动台的控制性能应进行定期的检查和测试，当出现性能变化时应及时对控制参数进行整定和调整，振动台控制用传感器应进行定期校准，对于安装于激振器内部的传感器，可利用振动台运动物理量的相互关系进行互校准，振动台试验时应保证振动台控制用传感器处于校准有效期内。振动台与测试仪器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。

1.0.5 本标准同现行国家标准《核电厂抗震设计标准》GB 50267、《核设备抗震鉴定试验指南》HAF·J 0053、《核动力厂抗震设计与鉴定》HAD 10202、《电力设施抗震设计规范》GB 50260、《Recommended Practice for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations》IEEE-323、《核电厂安全重要电气设备鉴定》GB/T 12727、《核电厂安全级电气设备抗震鉴定》GB/T 13625、《核电厂能动机械设备鉴定》NB/T 20036、《压水堆核电厂阀门抗

震鉴定试验》EJ/T 1022.15、《建筑抗震设计规范》GB 50011，以及有关的结构设计、荷载、仪器、设备等规范有密切关系，所以在执行本标准的规定时，还应遵守相关标准规范的规定。

2 术语和符号

2.1.2 安全重要物项是指属于某一安全组合的一部分，或其失效或故障可能导致对厂区人员或公众辐射照射的物项，包括安全级物项和安全有关级物项，安全级物项是指安全上重要的物项，安全有关级物项是指对安全重要但不属于安全级的物项。

2.1.3 物项是实际研究的对象，通常为已建或拟建的核电厂建筑物、构筑物、系统和部件的统称。试体用于解决或探究某一特定问题，并结合实际试验条件，在物项基础上按一定的相似关系或选取原型物项的一部分而设计建成，包括足尺模型、缩尺模型、子结构模型等。

2.1.9 大缩尺比，即意味着缩尺比数值大，接近足尺；小缩尺比，即意味着缩尺比数值小，例如 1/100。通常，缩尺比大于等于 1/5 时为大缩比结构，缩尺比小于 1/5 时为小缩比结构。

2.1.10 弹性相似模型主要用于研究其原型物项的弹性性能，它和其原型物项的几何形状相似，但模型材料不一定要和其原型物项材料相似，可以用均匀的弹性材料制作，如有机玻璃。

2.1.11 弹塑性相似模型用与原型物项材料相似的材料制成，能够反映原型物项的弹塑性性能以及结构的破坏状态。楼层反应时程可通过抗震分析、试验或两者结合的方法确定。抗震分析可采用时程分析法、反应谱法或等效静力法。

2.1.13 楼层反应时程可通过抗震分析、试验或两者结合的方法确定。抗震分析可采用时程分析法、反应谱法或等效静力法。

2.1.17 要求反应谱应按地震安评结果或设计部门要求进行确定，如果没有地震安评结果或设计部门要求，可采用美国核管会导则 RG1.60 规定的水平方向标准地震反应谱或其他适用的水平方向地震标准反应谱，参照 GB 50267 附录 F 进行确定。

2.1.20 线性传感器的灵敏度为一常数，计算公式如下：

$$S = \frac{Y_{\max} + Y_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (2.1.20)$$

式中： Y_{\max} ——工作特性所决定的最大输出值；

Y_{\min} ——工作特性所决定的最小输出值；

x_{\max} ——测量范围的上限值；

x_{\min} ——测量范围的下限值。

注：

1 灵敏度是一个有量纲得量，其量纲取决于传感器输出量的量纲和输入量的量纲；

2 上述公式也可用来计算非线性传感器的平均灵敏度。

2.1.21 分辨率的计算公式如下：

$$R_x = \max |\Delta x_{i,\min}| \quad (2.1.21)$$

式中： $\Delta x_{i,\min}$ ——在第*i*个测量点上能产生可观测输出变化的最小输入变化量；

$\max |\Delta x_{i,\min}|$ ——在整个量程内取最大的 $\Delta x_{i,\min}$ ，即得传感器在整个量程内能产生可观测输出变化的最小输入变化量。

注：死区和阈值一般视为传感器零位处的分辨率。

2.1.22 抗震性能一般包括结构的强度、刚度、延性、耗能性能和刚度退化等。抗震能力是抗震性能的表现，也就是能抵御多大地震的能力。

2.1.23 极限能力试验用以确定设备的极限能力,试验数据可用以证明相关设备对于给定的抗震要求或应用的适用性。一般的做法是在试验中不断提高激振参量的幅度并进行一系列运行操作，直至观察到设备失常。

2.1.24 对于安全壳、建筑物和构筑物，主要确定其在设计基准地震动下的抗震性能。对于设备与部件，主要确定其在设计基准地震动下的安全性能，并证明其符合设备规格书要求所进行的试验。

2.1.28 非完全相似是指试体的部分特性不能满足设计的相似系数要求。非完全相似误差指的是在非完全相似情况下，试体所得到的反应经换算后的参数值与原型物项相应值的相对误差。目前几乎所有的结构缩尺试验都是非完全相似模型，例如型钢缩尺后无法在型钢表找到相应尺寸的型号，这即为几何非完全相似；在很多情况下，满足与原型物项材料弹塑性阶段应力-应变关系相似的模型材料是难以找到的，这即为本构非完全相似。

3 试体设计与制作

3.1 一般规定

3.1.1 结构动力特征的基本物理量，一般指结构的自振周期或自振频率、振型和阻尼；对于隔震、减震产品的抗震性能测试，如减震系数等，应在试验方案中予以说明。结构抗震性能一般包括结构的强度、刚度、延性、耗能性能和刚度退化等。结构抗震能力是结构抗震性能的表现，也就是能抵御多大地震的能力。

被鉴定的设备应能够证明在地震期间和(或)之后能执行其安全功能。要求的安全功能不仅取决于设备本身，还取决于设备在系统和电厂中的作用。地震期间的安全功能可能与地震之后所要求的安全力能相同，也可能不同。例如，可能要求某一电气设备在地震期间不误动作，或在地震期间和之后都能行能功能，或可能要求它在地震期间保持完好而在地震之后要求执行能功能，或是上面这些要求任意组合。而对另一设备，可能只要求在地震期间和之后保持结构完整性。这些给定要求应是明确，并且对安全功能的定义应作为设备鉴定技术要求文件的一部分给出。

3.1.2 一般情况下，校核试体质量、最大加速度、最大速度、最大位移、频率范围。对高耸物项等还需要校核最大倾覆力矩和最大偏心力矩。振动台的额定参数通常包括额定激振力、额定负载、额定加速度以及额定频率范围。

3.1.3 应根据试验目的并参考相应规范明确试体设计时需要考虑的重量，如结构自重、活载；特别是非结构构件的重量，如填充墙。

各物项的具体抗震分类及设防标准可参照相关技术标准确定。例如，在适用时，可采用现行国家标准《压水堆核电厂物项分级》GB/T 17569 的规定。

3.1.4 试验时要防止发生非试验目的的破坏。试体设计和制作时除了要满足试验目的外，还要综合考虑试验条件、防止非试验目的破坏的构造要求、吊装运输设施等要求进行设计和制作，例如应考虑台面尺寸、螺栓间距等因素来设计试体，以方便相应的安装，还需要满足便于加载和量测的要求。

试体试验中，当试体满足相似条件和试验加载设备条件，尚需满足构造要求。例如，加载点处局部承压不够造成试体的提前破坏，或钢筋由于锚固长度不够而被拔出；与台座固定的底梁在横向加载下因锚固端部被剪坏而使试验无

法进行。

3.1.5 简化手段可采用巨型结构抽层、次结构简化等方式，以降低模型加工复杂程度，确保质量和工期。且需通过试验模型简化前后有限元对比分析，对复杂结构试验模型的简化可行性进行评估，确保简化造成的结构主要抗震性能指标误差能够满足试验目的要求。

核动力厂中的设备与部件一般采用与原型结构外形与尺寸相似的足尺或者缩尺模型进行振动台试验，但是当设备与部件的形式过于复杂以至于不便于做振动台试验时，可根据如图 3 所示的结构特征采用不同的方式进行简化，降低模型的复杂程度。

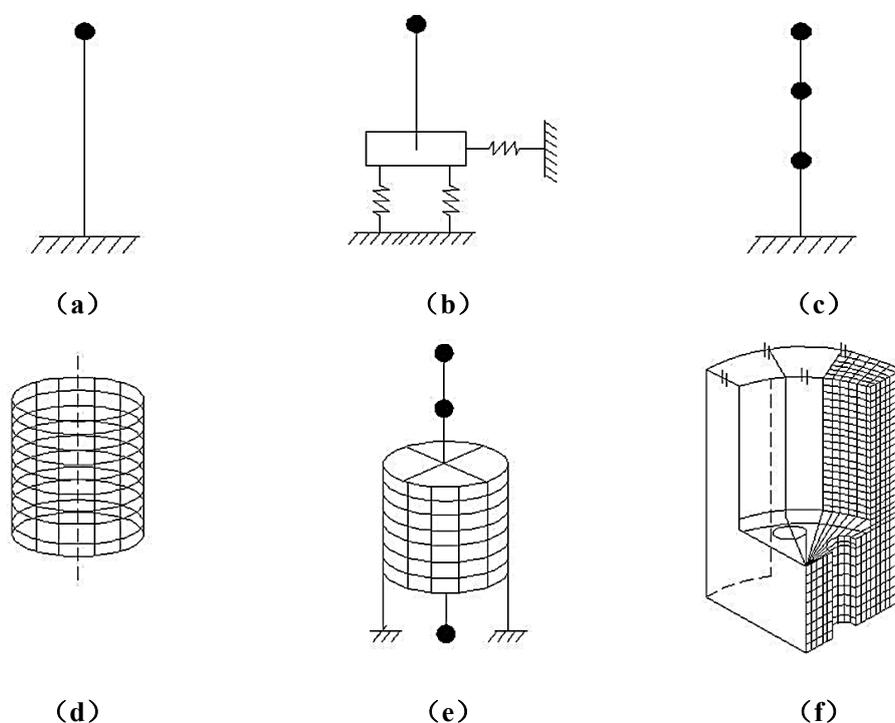


图 3 动力或静力分析的各种设备模型示例

在使用这些方式降低模型加工难度的同时，应使用最适宜、可靠的模型简化方法，使其给结果带来的不确定性最小。

如果某些结构部件的反应具有不确定性，则应建立多于一个的简化模型。为了对不确定性的判断提供依据，应进行敏感性分析。为了消除可能存在的确定性，应通过多组平行试验或对不同数值模型比较，对简化后的模型进行验证。

3.2 试体设计

3.2.2 设备与部件的试体应满足下列要求：

1 能证明振动台试验中应力循环所引起的疲劳效应不会使试体降级，影响其执行安全功能的能力，可再安装用于核电厂；

3 正常运行条件应按设计要求确定或参照相关标准执行，如能动阀门进行振动台试验时，应充满工作介质，且其水流方向与一个振动方向一致，工作压力应满足下列要求：基本动力特性试验可不加压；安全功能要求试验时，应保持试验工作压力，且不小于 38°C 时的额定压力；

4 对新型或改型较大的设备，应采取地震模拟振动台试验验证其抗震能力。

3.2.3 随着科学技术的不断进步及振动台硬件设施的日益完善，近年来振动台的台面尺寸逐渐增大。例如，日本的 E-Defense 振动台台面尺寸达到 20m×15m；天津大学国家大型地震工程模拟研究设施中的大型地震模拟振动台台面尺寸为 20m×16m。这些大型振动台的建成使得大缩尺比的振动台试验得以实现，进一步推动了结构动力学和地震工程领域的实验研究。贯彻民用核设施安全第一、防震减灾以预防为主的总体指导思想，综合现有振动台的试验能力提升以及试验加工难度、弹塑性相似模型非完全相似误差因素，本规范在修订过程中参考了如表 1 所示的已开展的核电厂及其附属结构的缩尺振动台试验，同时借鉴《建筑抗震试验标准规程》JGJ/T 101-2015 中钢结构弹塑性要求，综合考虑下将缩尺比限制在不小于 1/25。

表 1 参考的已开展的核电厂及其附属结构的缩尺振动台试验

| 编号 | 研究对象 | 缩尺比 | 年份 | 备注 |
|----|------------------------------------|------|------|--------------|
| 1 | 安全壳 | 1/15 | 2012 | 中国地震局工程力学研究所 |
| 2 | 某核电厂泵房直立墙 | 1/16 | 2014 | 大连理工大学 |
| 3 | 安全壳 | 1/15 | 2014 | 中国地震局工程力学研究所 |
| 4 | 以 AP1000 核电站核安全壳、附属厂房和顶部水箱为一体的耦合结构 | 1/80 | 2016 | 广州华商职业学院 |
| 5 | 核岛屏蔽厂房和辅助厂房整体结构 | 1/16 | 2017 | 北京工业大学 |

(续) 表 3.2.1 参考的已开展的核电厂及其附属结构的缩尺振动台试验

| 编号 | 研究对象 | 缩尺比 | 年份 | 备注 |
|----|-------------------|------|------|------------------|
| 6 | 地基土-屏蔽厂房-辅助厂房整体结构 | 1/40 | 2017 | 北京工业大学 |
| 7 | 屏蔽厂房 | 1/25 | 2017 | 中国地震局工程力学研究所 |
| 8 | 某高温气冷堆核电厂结构 | 1/20 | 2018 | 北京工业大学 |
| 9 | 安全壳及附属厂房 | 1/10 | 2019 | 上海大学 |
| 10 | 某工程厂址核安全高边坡 | 1/30 | 2020 | 核工业西南勘察设计研究院有限公司 |
| 11 | 某工程厂址核安全高边坡 | 1/20 | 2020 | 核工业西南勘察设计研究院有限公司 |
| 12 | AP1000 屏蔽厂房 | 1/40 | 2020 | 同济大学 |
| 13 | 屏蔽厂房及内部结构 | 1/25 | 2020 | 中国地震局工程力学研究所 |
| 14 | 双壳体核电厂 | 1/9 | 2024 | 上海大学 |

对于子结构振动台试验，由于子结构界面模拟的复杂性，其模型缩尺比应尽可能大，从而发挥子结构试验的优势。对于做试验方法方面的研究，可不受该比例限制。

3.2.4 试验装置不能支承大尺寸原型设备时，可采用缩尺模型进行试验，但应满足模型相似准则。进行强度试验时，可采用缩尺模型；但考验设备在振动台上的功能性或可运行性时，缩尺模型不能反映真实情况。

3.3 制作与安装

3.3.2 设备与部件的生产工艺和流程制作宜按现行标准《压水堆核岛机械设备制造规范》EJ/T 1012、《压水堆核电厂核岛机械设备焊接规范》EJ/T 1027.1~1027.19 和《变电站电气设备抗震试验技术规程》DL/T 1960 等有关规定执行，尚应符合国家现行有关标准的规定。

3.3.3 砂浆与混凝土均为非匀质材料，其力学性能与时间和养护条件有较大关系，因此要求与试体同批次同时间制作，并同条件养护；材性试验和试体宜同期完成，以确保测试数据的可靠。试体设计与制作过程中应预留足够的试块，以备试验各阶段使用。特殊混凝土应采用棱柱体试块进行测量弹性模量及轴心抗压强度，每组试块宜为 6 个。微粒混凝土棱柱体尺寸建议为 70×70×210mm，细

石混凝土棱柱体尺寸建议为 150×150×300mm。

对于含有各类钢筋的试体，试验结果分析需着重参考其屈服强度、抗拉强度、伸长率及冷弯各力学性能。试体数量应满足国家有关标准的规定，且其应直接从试体所用的不同直径或厚度、不同种类材料中抽取。其长度、力学性能评定、测量方法等应符合现行国家标准《金属材料拉伸试验第 1 部分：室温试验方法》GB/T 228.1 及相关标准的规定。在模型设计时，宜追求强度相似。

模型材料弹性模量影响结构刚度，是结构动力试验关键特性，应满足动力试验相似关系要求。当需要获得试体的钢筋应力变化过程时，首先应确定钢筋的弹性模量，并通过加载试验获得其应力-应变变化过程，绘制出应力-应变曲线。模型弹性模量宜采用材性试验实测值。有充分依据时，模型弹性模量可采用通过强度计算得到的推算值；模型材料弹性模量误差不宜大于 10%，不应大于 20%。

3.3.5 底座设计避免底座受弯过大或者吊装不当形成的作用力对试体形成破坏。试体制作前，可按照振动台台面制作一个可循环使用的 1:1 的钢质伪台面，伪台面的平面尺寸及连接孔等与振动台台面相同，这样试体即可在伪台面上制备，完成后安装到振动台台面上，进而提高试体制备及其与台面安装的精度。在减震结构试体中应预埋减震装置的连接件，并保证在试验中不产生变形，宜采用螺栓连接。

3.3.6 安全壳、建筑物和构筑物等试体底部固定应满足以下要求：

2 试体与振动台的连接质量会对试验结果产生重要的影响。对于钢结构，柱底连接板应具有足够的厚度，厚度不宜小于 10mm。当采用独立柱基础时，宜在柱底连接板设置定位工装，定位工装可在试体安装就位后拆除；对于混凝土结构，应设置地梁以减小试体安装中柱体产生侧向变形，混凝土地梁的高度不宜小于 80mm，必要时地梁底面可设置钢板。对于受力较小的小型试体，试体安装孔的直径可比台面螺栓孔大 2mm，对于大型试体和侧向刚度较大的试体，为了保证试体安装过程中孔位能够与螺孔匹配，其直径宜比台面螺栓孔大 5mm-10mm。试体安装孔应有良好的垂直度，试体底部与台面螺栓孔对应的位置均应留孔，以方便安装过程中对安装螺栓数量和位置进行调节。当试体安装孔因误差过大无法与台面螺栓孔对中时，可对安装孔进行适当扩孔处理，应避免通过

强行调整安装孔位置导致试体产生初始变形。连接螺栓宜采用扭矩扳手进行紧固，螺栓紧固时宜间隔或对称紧固，以保证螺栓受力均匀，连接螺栓宜采取必要的防松措施，以避免试验过程中产生松动，并在试验工况间适时检查和复拧。振动台台面或其与试体的连接件应能将地震作用全部传递到试体上；

3 试体底部采用膨胀螺栓或螺栓固定在振动台台面时，地脚螺栓的规格尺寸应根据其所承受的拉力和剪力计算确定。

地脚螺栓拉力，应按下式计算：

$$N_t = \frac{\gamma_{Eh} \cdot F_H \cdot h_G - 0.5Gl}{n_t \cdot L_s} \leq N_t^b \quad (3.3.6-1)$$

式中： N_t ——地脚螺栓拉力（N）；

γ_{Eh} ——地震作用分项系数，取 1.3；

F_H ——水平地震作用标准值（N）；

h_G ——设备重心高度（mm）；

G ——重力（N）；

n_t ——设备倾倒时，承受拉力一侧的锚固螺栓总数；

L_s ——螺栓间距（mm）；

N_t^b ——每个螺栓的受拉承载力设计值（N/mm²）。

地脚螺栓剪力，应按下式计算：

$$N_v = \frac{F_H}{n_d} \quad (3.3.6-2)$$

式中： N_v ——地脚螺栓的剪力（N）；

n_d ——地脚螺栓的数量。

根据上式计算出的 N_v 和 N_t 值，还应满足下列公式的要求：

$$N_v \leq N_v^b \quad (3.3.6-3)$$

$$N_v \leq N_c^b \quad (3.3.6-4)$$

$$\sqrt{\left(\frac{N_v}{N_v^b}\right)^2 + \left(\frac{N_t}{N_t^b}\right)^2} \leq 1 \quad (3.3.5-5)$$

式中： N_v^b ——每个螺栓的受剪承载力设计值（N/mm²）；

N_c^b ——每个螺栓的承压承载力设计值 (N/mm²)。

4 对于无法用螺栓与台面连接的试体,应用 L 形抗震防滑角铁进行限位。防滑铁件的板厚,应按下式计算:

$$t_a \geq \sqrt{\frac{6\gamma_{Eh} \cdot F_H \cdot l_2}{f_{\text{bend}} \cdot (l_1 - n_a d_0) N_s}} \quad (3.3.6-6)$$

式中: t_a —— 防滑铁件板厚 (mm);
 l_1 —— 防滑铁件长度 (mm);
 l_2 —— 防滑铁件受力点到底面的高度 (mm), 在设备底部以下的部位有线形 (指轮廓线) 的突出部分时, l_1 可从突出部分的底部算起;
 d_0 —— 螺栓孔直径 (mm);
 N_s —— 设备一侧的防滑铁件的数量;
 f_{bend} —— 钢材的抗弯强度设计值 (N/mm²);
 n_a —— 每个防滑铁件上的锚固螺栓数量。

螺栓的剪力应按下式计算:

$$N_V = \gamma_{Eh} \cdot F_H / (n_a \cdot N_s) \quad (3.3.6-7)$$

螺栓的拉力应按下式计算:

$$N_s = \gamma_{Eh} \cdot F_H \cdot l_2 / (l_4 \cdot n_a \cdot N_s) \quad (3.3.6-8)$$

式中: l_4 —— 防滑铁件螺栓孔中心至外边的距离。

根据上式计算出的 N_V 和 N_t 值,还应满足公式 (3.3.6-3) ~ (3.3.6-5) 的要求。

3.3.7 对于浮放于振动台台面的试体,应调节地脚螺栓使其与振动台台面可靠的接触,当试体与振动台台面的接触面存在较大间隙时,可设置找平层或合适的垫层、垫块,以保证台面运动加速度能正确传递和作用到试体上。

3.3.8 试体的动力性能与抗震试验结果直接相关,因此试验时应保证其动力性能与实际运行条件一致。试体的安装方式应与实际安装条件相符,安装条件包括安装方向和安装方式均应与实际相符合,安装方式包括固定方式,如螺栓连接或焊接,地脚螺栓的数量和大小、排列方式,焊缝的型式和焊接长度等应与实

际相符，外接电缆水管、气管、油管等。中间紧固装置应不会对输入运动产生滤波作用或改变任何频率。当中间紧固装置和联接仅在鉴定期间使用而在实际安装中不用的时候，应加以评估并在报告中列明。

3.3.9 安装条件应包括在安装支承处的输入载荷和加载方式应模拟真实情况，当试体支承在几个支座上及各支承点的运动有很大差别时，应经论证后选取起主导作用的支承部位，在这个主导支承部位上的支承安装情况和输入的模拟地震动应必须与实际完全相同，对其它支承点，则尽可能地对支承安装情况和输出地震动按实际情况进行模拟。如有可能，也可采用多点激振，根据各支承点的响应谱作多点输入。

3.3.10 一般情况下，试体在加工和运输阶段应避免对试体产生破坏和损伤，试体在试验室内可采用试验室的吊车进行就位安装，试体吊装过程中应注意吊车运行平稳缓慢，避免突然停机，吊车运行区域内人员要提前疏散，避免试体下方有人员存在；对于超过吊车起吊高度和负荷的高大重的试体模型，可采用水平牵引方式将试体模型平移至振动台上。当振动台停机时振动台台面与基础之间存在间隙时，应使用具有足够承载力的搭接盖板进行覆盖，台面与基础高度不一致时，还应设置合适的坡度以利于试体通过。无论采用何种运输方式，应避免试体在移动过程中产生倾覆、掉落、翻转和撞击，避免试体和相关设施受损。

3.3.11 为了试体安全和可靠的固定，应保证试体安装时振动台台面处于水平位置，必要时可采用水平尺对台面水平度进行简易复测，当台面水平度存在影响试验效果的偏差时，可设置必要的找平层进行调整。试体在振动台上应居中或对称布置，避免在加载过程中产生过大的偏心力矩。对于振动台台阵系统，在试体安装时尚应保证各子台的台面位置误差在许可的范围之内。

3.3.12 实施抗震试验期间，对设备进行的任何整修应根据其程度分为维护或修理并记录在试验报告中。维护工作包括设备(如继电器)校准和硬件重新拧紧等。如在运行基准地震试验期间进行了维护，则可作为设备地震后现场维护检查和维修工作的一部分。修理包括设备某些部位的焊接或重焊、更换损坏的部件(如断裂的螺栓)和重新拧紧松动的电气端子等。

当需要维护时，应确定问题的严重程度并记录在试验报告中。如在运行基

准地震试验期间进行了维护，则可作为设备地震后现场维护检查和维护工作的一部分。

除非证明有合理的原因，通常设备在运行基准地震试验期间、安全停堆地震试验期间或之后需要进行修理时，修理后应重新进行试验。当安全停堆地震试验期间要求修理的情况不影响其间或其后设备安全功能时，且安全停堆地震也显示没有因其他试验而产生累积效应，并且不会在随后的鉴定试验[如失水事故(LOCA)试验]中对设备性能产生不可接受的影响，则试验可以继续。除非有合适的理由，当修理造成设计变更时，应对设备重新进行试验。在进行修理时，修理情况应详细记录在试验报告中。

4 加载设备

4.1 一般规定

4.1.1 应根据核电厂结构及设备系统抗震试验所要求的包络性地震作用，选择合适的振动台系统。振动台应具备方便快捷的控制调节模式、迭代控制等。试验系统具有通过计算机实现自适应迭代的能力，其包括但不限于离线迭代、在线迭代等。

在试验过程中，如果需要验证试体保持某些核电特定功能时，应选择满足要求且确保安全的量测仪器。

4.1.2 用于振动台试验的加载设备应具有良好的性能，能再现试体所承受的地震作用和功能状态，确保满足试验指标要求，实现试验加载与测试全过程的严酷性、代表性和包络性。

对于液压振动台，其基本参数和技术要求应符合现行国家标准《液压振动台》GB/T 21116 的规定；对于电磁振动台，其基本参数和技术要求应符合现行国家标准《电动振动台》GB/T 13310 的规定；对于其他驱动方式的振动台，其基本参数和技术要求可参照现行国家标准《液压振动台》GB/T 21116 或《电动振动台》GB/T 13310 的相关规定。振动台的台面尺寸、振动方向、自由度数、最大负载、频率范围、最大位移、最大速度、最大加速度、额定偏心力矩和额定倾覆力矩、控制方式、波形控制精度等技术指标应通过系统验收和性能测试予以明确。

4.1.3 对于大多数振动台系统，一般需要在试验前进行系统辨识和迭代测试，为确保控制性能满足要求，条件许可的情况下应对振动台的性能进行必要的测试，确保加载工况下振动台性能满足试验需求。

在试验过程需要验证试体保持某些核电特定功能（如带电工作、高温高压、高速流体等）时，应评估其对振动台加载及量测系统的影响并采取必要措施。

4.2 具体要求

4.2.3 振动台应满足物项、结构物抗震性能试验的加载精度要求。根据国内振动台调研结果，振动台的空台背景噪声峰值宜控制在 0.02g 以内，对于大型台面和大加速度的振动台，空台背景噪声可适当放宽。对于以加速度反应谱和功率谱

作为控制指标的振动台试验，可在试验前约定振动台的波形控制要求。考虑振动台在满载和弹性负载下的性能差异较大，一般不对满载和弹性负载下的控制性能提出要求，在试验方案设计阶段可以与振动台实验室技术人员对振动台在试体安装条件下的波形再现精度进行专门约定。

4.2.4 在振动台的启动和停机阶段，振动台容易产生不受控的运动，这种运动会对安装于振动台台面的试体产生破坏性冲击效应，甚至导致试体产生损坏，为了试体的安全，要求振动台设备的冲击加速度最大不超过 0.05g。对于具有竖向运动的振动台，其升降过程中不应产生过大偏转，以免试体产生过大倾覆力矩。

4.2.6 考虑到一些现存振动台系统缺乏完善的波形管理功能，特对振动台的波形管理功能做出规定。对于常用的白噪声、正弦波等，控制系统应具有不同频宽、不同幅值和不同相位波形的生成能力；在工况管理中应具备波形的绑定、调幅和频率压缩等功能；对于用户提供的地震动加速度时程和频谱数据，应具备导入、导出、显示、修改等功能，如调幅、滤波、重采样、频率压缩、时间平移等。

4.2.7 一些振动台需要带试体通过多次迭代提升其波形再现精度，这种情况下对试体在迭代过程中可能产生的损伤进行评估，当迭代过程中可能导致试体损伤时，应对迭代信号幅值和迭代次数进行必要的限制。

4.2.8 振动台台阵系统的位移同步性能对于保证台阵试验的质量至关重要，大多数振动台台阵系统针对振动台子台的位移控制性能进行了优化，也有一部分振动台台阵系统由于子台控制参数设置存在加速度幅值一致但位移波形存在较大差异的情况，这种情况下应在试验前针对位移控制精度的影响进行必要的测试和评估。

4.2.9 振动台试验中一般需要采集试体的振动状态，根据振动台台面和试体的运动状态确定施加于试体的界面力。子结构振动台试验的控制可采用独立的实时计算平台或附加于振动台控制器的板卡来实现，在数值子结构求解和控制指令执行过程中需要尽可能降低系统的延迟，这要求振动台控制系统提供一定的预留通信接口以满足子结构试验的控制需要。一般而言，振动台控制器应能够将台面运动状态、激振器反力以模拟量或数字量的形式传输给子结构试验控制平台，其中台面运动状态包括实时加速度、速度和位移信号等。

4.2.10 振动台作为一种先进的结构抗震动力试验设备，在控制系统及采集系统内均应配置不间断电源。当外界供电等发生故障而突然停电时，系统报警并保证供电连续性，保障系统采集的试验数据安全储存。

4.2.11、4.2.12 振动台试验设备应经过特定的安全性设计，除控制系统自动限位保护之外，还应在软件层面和物理层面设计多道防线，包括手动急停设置等。此外，急停需要考虑物理联动的逻辑顺序，应从能量蓄积的逻辑远端，例如激振器、分油器，油源的近段逐级关闭，避免物理损坏。振动台控制系统的加速度、速度、位移的限值，以及警报指示装置和缓冲消能装置等都是振动台系统自身的安全保护装置。当激振器运动超过预设的限位幅值时，系统除应发生报警指示外，应由限位控制装置使振动台自动停机。当振动台控制系统出现故障无法正常工作，或试验出现失控时，应由手动急停装置停机。当台面失控而产生撞击时，缓冲装置应起到消能作用，避免台面与基坑发生碰撞，致使台面及激振器部件受损。

4.2.13 试验期间振动台与基坑间隙应打开，试验人员往返于台面和振动台外围观测区域时应用有可靠的安全保障，试验人员在振动台外围观测试体试验现象时，基坑间隙处亦应有可靠的安全保障措施。

4.2.14 子结构振动台试验开发和测试阶段应尽量避免对原振动台系统软硬件进行修改，当确需对原振动台系统设置进行调整和修改时，应进行完整的记录和状态参数备份，避免造成不可恢复的系统更改。

4.2.15 在进行高风险试验时，试体的状态可能对试验人员、设备及周围环境带来潜在的危险。例如，带电的试体可能导致电击事故，带液或含有危险物质的试体可能泄漏或引发化学反应，高温或高压状态下的试体可能存在爆炸或烫伤的风险。为了确保试验安全，必须对试验过程中的每一个环节进行全面的风险评估，识别潜在的安全隐患，并采取相应的防范措施。这些措施可能包括使用防护罩、绝缘设备或耐高温材料，设置紧急断电装置、泄压装置或防泄漏措施，配备必要的安全防护设备如防护服、面罩、灭火器等。此外，还需要定期进行安全检查，确保试验设备和防护措施处于有效状态。通过全面的风险评估和严格的安全措施，可以有效减少试验过程中可能出现的安全事故，保障人员安全，确保试验顺利进行，同时防止设备损坏和外部环境的污染。

5 加载设计

5.1 一般规定

5.1.1 核电厂设备或结构部件通常体积较大，形状复杂，振动台的台面需要足够的尺寸和空间，才能完全容纳这些试件。如果台面过小或空间不足，试件可能无法正确安装或固定，导致试验不准确或无法进行；如果振动台的台面过小，试件可能会超出台面的边界，导致边界效应的干扰，影响试验结果的准确性。振动台试验模拟的是地震中的动态反应，试件的自由运动应尽可能不受台面边界限制，因此台面尺寸应足够大，确保试件能在试验中自由、真实地表现出其动态响应；试件在台面上不应局限于某个狭小区域，否则可能会影响振动的均匀传递。振动台通常通过台面均匀传递振动，台面尺寸过小可能会导致振动分布不均匀，影响试件的整体动力反应。因此，足够的台面空间可以保证振动在试件上的均匀传递，从而得到更准确的测试结果；核电厂设备和结构的抗震性能测试需要尽可能模拟实际工况，而设备和结构的尺寸往往较大。振动台的台面和空间尺寸必须能够支持真实的试件进行测试，以便准确反映其在实际地震中的抗震性能。如果振动台的台面尺寸不足，就无法充分模拟核电厂的实际条件，导致试验结果的可靠性下降；振动台试验过程中会产生较大的振动力，试件在测试过程中会经历强烈的运动。为了防止试件脱离或撞击振动台周围的设备或结构，振动台应提供足够的空间进行固定和安装，避免试验中发生意外情况。

当确定试验和使用的振动台时，应根据振动台的确定指标，可确定试体的缩尺比；当存在多个振动台可以选择时，应根据试验需求选择合适试验净空高度、台面尺寸和负载能力的振动台加载设备。当核电构建筑物需要进行较大比例的缩尺或进行必要简化时，应结合数值模拟评估缩尺效应对试验结果可能产生的影响。当开展核电设备和部件振动台试验时，应充分考虑振动台高频控制性能对试验结果可能产生的影响。

5.1.3 验证试验用来鉴定设备满足某一特定要求。设备应承受设备安装位置特定的反应谱、时程或其他载荷，不需要探查设备的损坏阈值。因此，验证试验需要制定一份详细的技术规格书，技术规格书通常由最终用户或其代理方作为应

用要求提出。对设备进行试验是按规定的性能要求，而不是按其极限能力，通用试验可认为是验证试验的特殊情况。通常，所制定的技术规格书包括大多数或全部已知的要求，目的是通过一次试验给出多种应用场合的鉴定结果，得到的通用要求反应谱一般包括有较高加速度水平的宽带谱，需要注意的是，各种要求的包络可能产生一个过于严酷的试验输入。易损度试验用以确定设备的极限能力，试验数据可用以证明相关设备对于给定的抗震要求或应用的适用性。

极限能力试验应以给出设备能力数据的方式进行，这些数据与各种安装条件和管理机构的不同要求有关。地震环境的变化已证明对设备或系统的极限能力有影响，其中的一种变化就是激励的方向性。另外，环境还具有冲击，瞬态或稳态振动的特点。

5.1.4 功能检验目的是检验正常运行条件下的功能是否正常，并取得基准数据。环境老化影响包括热老化、辐照老化、运行老化（磨损和振动）等，应根据设备的实际情况进行考虑。

5.1.5 目前常用的生成地震动加速度时程的方法有两种：第一种方法是采用三角级数或其他数学变换的方法拟合地震动频谱特性生成，第二种方法是以相似地震环境和场地条件下的实测强震加速度时程作为初始时程进行调整得出。国外技术标准有优先采用第二种方法的趋势。

5.1.8 振动台试验过程中试体模型可能产生积累的损伤，导致自振频率下降，对于可能产生损伤的试体模型，应在工况中间隔设置动力特性测试工况，工况运行结束立即对试体模型的自振频率进行计算和比较，以掌握试体的基本动力特性及损伤状态，确定是否进行进一步的试验。结构动力特性测试中，尽可能避免对结构进行二次损伤，必须要做好相应的试验设计和相应措施。

5.1.9 对于结构模型动力特性的测试，经验表明白噪声试验或正弦扫频试验可取得比较理想的效果，一般而言白噪声试验的效率更高，但对频率精度不如正弦波扫频高。对于复杂结构模型，宜采用多向不相关的白噪声进行试验。白噪声和正弦扫频的频段应能覆盖所关心的试体自振频率范围，所使用白噪声或正弦扫频信号的加速度幅值不宜过大，有效持续时间不宜过短，以避免试体产生非线性并且能够充分激发试体的振动。白噪声为广谱输入，应进行必要的分析，避免对长周期结构造成损伤，影响试验结果。

5.1.10 复杂设备，如控制盘，这可能是不现实的。这些控制盘上通常布置有许多器件，这些器件可能分属于多个系统，而这些系统的其他控制盘则可能布置在电厂的多个不同位置，在运行工况下对这些控制盘进行试验不切实际。

5.2 安全壳、建筑物与构筑物

5.2.2 实际地震动包含有水平和竖向两个方面的加速度同时作用，因此每组试验输入时程应包含三个分量。

5.2.3 本条对强震持续时间做出了统一的规定，每条试验输入地震动加速度时程的强震持续时间可取 6s~15s。强震持续时间作为总持续时间的一部分，有多种不同的定义，不同定义的强震持续时间可能有很大差异。影响加速度持续时间的因素十分复杂，统计结果离散性极大，难以给出确定的结果，工程上一般采用适当的、较长的持续时间。

5.2.4 试验输入地震动加速度时程应符合规定的详细解释如下：

1 本条主要内容沿袭了《核电厂抗震设计规范》GB 50267—97 的相关规定。试验输入时程的傅立叶相位谱在 $0-2\pi$ 相角范围内均匀分布，这是实测地震动加速度记录的基本谱特征之一；

2 试验输入时程的反应谱与要求反应谱相协调，可使抗震设计的时程分析和反应谱分析采用的输入地震动基本一致，得出的结果具有可比性。要求反应谱应按地震安评结果或设计要求进行确定，如果没有地震安评结果或设计要求，可采用美国核管会导则 RG1.60 规定的水平方向标准地震反应谱或其他适用的水平方向地震标准反应谱，参照 GB 50267 附录 F 进行确定。为满足包络谱的要求，包络的验收准则是从人工加速度时程所得到的反应谱不得有大于 5 点低于设计要求反应谱的 10%。如果要求反应谱在低频段具有相当高的加速度值，此时要求振动台有很高的位移特性。因振动台的能力所限，可以不要求在低频（一般 5Hz 以下）段的试验反应谱(TRS)包络要求反应谱（RRS）。此时可按下列规定处理：如果 5Hz 以下没有共振反应（这在动态特性探查试验可以发现），则要求 RRS 在 3.5Hz 以上被包络，但激振运动在 1Hz—3.5Hz 范围内仍要被维持；如果 5Hz 以下有共振现象，则只要求在最小的自振频率的 70%以上的频率部分包络要求反应谱值；

3 试验输入时程的反应谱应有足够的控制点数才能达到时间过程与反应谱

的协调一致；

4 由要求反应谱得出的目标功率谱由反应谱通过以下公式计算：

$$P_{sd}(\omega) = \frac{\xi}{\pi\omega} [S_a^T(\omega)]^2 \frac{1}{-\ln[(-\pi / \omega T_m) \ln(1-P)]} \quad (5.2.4)$$

式中： $S_a^T(\omega)$ —— 目标加速度反应谱；

T_m —— 强震动持续时间，取 $T_m=15$ 秒，持续时间 30 秒；

P —— 超越概率，取 $P=0.85$ ；

ξ —— 阻尼比。

5.2.6 人工地震动时程应能使设备的响应达到设备技术规格书中的要求反应谱或要求的加速度值，振动台最好能同时产生水平和竖向的运动，输出的波形和幅值应能方便地用计算机控制。

5.2.7 如果关注结构强震破坏，宜进行单次强震加载，可避免多次加载带来的累积损伤。对于需进行抗震性能考核的试体，如考核加速度幅值两级相差较大，宜中间加一级进行试加载，用于预判幅值较大的加速度输入值。如电气设备的抗震性能考核，第一级 0.2g，第二级 0.8g，中间可试加载一级 0.3g 用来判断 0.8g 的输入值。防止非线性反馈导致输入值过大或者过小。

振动台试验的多次分级加载应按下列步骤进行：

- 1 输入地震动加速度幅值应逐次递增；
- 2 当试体进入非线性阶段时，应逐级增加输入加速度幅值进行试验；
- 3 利用振动台对试体进行多次分级加载时，应对每次加载后试体承载能力或累积损伤进行测试。

振动台试验的多次分级加载可使试体模型经历不同震级的地震作用，测试结构在不同震级的频率、振型、阻尼、刚度退化、能量吸收和动力反应等特性，观测模型开裂、损伤与破坏的过程，同时也可根据上一级加载的情况对下一级加载模型可能出现的情况进行预测。当试体可能发生性能退化和自振频率改变时，应及时采用白噪声试验或正弦扫频试验对试体的自振频率、振型和阻尼比进行复测。当试体模型的承载力不足以支持进一步的试验加载时，应及时停止试验以避免造成危险。

试验采用分级多次加载方法时，应依据核电厂模型理论计算的弹性和非弹

性地震反应情况，确定分级次数及对应的台面加速度幅值，并宜覆盖运行安全地震动和极限安全地震动相对应的加速度幅值测试试体出现从弹性阶段、弹塑性阶段甚至到破坏阶段依次变化的地震反应。运行安全地震动的取值可综合考虑厂址地震安全性评价结果、设计中的荷载组合于地震作用效应计算方法、相关物项的完整性及功能要求等综合确认。

根据试验加载工况，每次输入某一幅值的地震动加速度时程波形，记录模拟核电厂的动力响应，观察核电厂各部位的变形、破坏情况，分析加速度放大系数和核电厂试体的抗震性能；若需要进行破坏试验，可继续加大台面输入加速度波的幅值或在某一加速度幅值下多次进行地震输入，直到核电厂试体发生整体破坏现象，观察、记录核电厂试体的极限抗震能力。

5.2.8 子结构振动台试验中试体的试验输入时程应根据其所在位置，根据其在原型支承点处的时程进行施加。

5.2.9 子结构振动台试验中，可以通过采集振动台的指令输出或台面加速度，确保边界约束力的施加与振动台的加载同步。

5.3 设备与部件

5.3.1 设备与部件振动台试验以两个主轴方向上试体根部和其他危险断面处产生的最大应力值能否满足要求为主要内容。有些设备的 X 轴、Y 轴方向的结构是不对称的，两个轴向的动力特性和动力响应也不一样，实际地震动的运动方向也不是固定的，故应分别进行 X 轴、Y 轴振动台试验。

对于需在地震情况下通过试验验证功能的部件，如符合下列条件之一的，采用一次单方向的激振即可认为满足要求，否则应采用多向同时输入：如果部件设计审查和外观检查或探查试验清楚地证明部件三个方向的激振效应是相互足够独立的；振动台强度的增加能计及三个方向同时激振所引起的相互作用（例如，在单方向激振幅度的增加能包络因耦联效应引起另一方向的反应）。

单方向试验应保守地反映出在设备安装位置上的地震激励，并考虑在其他正交方向上没有运动的情况。当能表明输入运动主要是单方向时，或能表明要进行试验的设备在三个正交轴的每一根轴上的反应都相互独立时，可采用单方向试验。当器件正常安装在放大一个方向上运动的控制盘上时，或器件受约束只在一个方向上产生运动时，或其一个方向上产生应力的位置不同于其他任何

一个正交方向所产生的应力时，就属于前者的情况。当设备所有轴之间相互耦合很小或能给出其他证据时，属于后者情况。

单方向试验方法存在限制，实际地震运动本是一种空间的三向运动，因此单向试验只有在下列情况下才是适用的。当三向中的每两向相互耦合很小，或无耦合：或者当设备由于其安装条件的限制受到单向激励时，例如，由于设备正常安装在单方向放大运动的支承上或如果由于部件的结构和（或）安装条件的限制使设备只能在一个方向上运动时，或当某一方向上的输入相对其它方向的输入大很多时，则单向试验可以被接受。

5.3.2 大多数电气设备对竖向地震作用不太敏感，且耐受垂直力的抗压抗拉强度大，不一定都要进行水平和竖向双向试验。对于少数电气设备和电气装置如穿墙套管、长跨母线装置等，对竖向地震反应较敏感，宜进行水平和竖向双向试验。

5.3.3 振动台试验采用多频反应谱方法、单频包络谱方法时应符合相应的规定：

1 对于原型设备带支架体系和原型电气装置体系即比较接近实际运行状态，振动台以输入人工合成地震动比较合理。而仅对设备本体进行抗震试验里，振动台输入应考虑支架的动力放大作用；

2 EC、日本、法国等除采用反应谱法外，也同时规定可采用动力时程分析法。世界各国电气设备电气抗震试验所采用的波形不同，目前所采用的主要波形有单频波和多频波两类。另一方面，一般支架对地震动有滤波作用，传到设备底部时已近似为接近设备频率的正弦波，故也可采用正弦波作为地震输入；

3 试体失常前的最高激振幅度超出极限安全地震动的量可视为试体的鉴定裕量。极限性能试验代价很高，只在必要时才进行，设备制造商可用此试验进行产品定型鉴定。

5.3.4 多频反应谱法的振动台试验，当选用人工合成地震动时程作为试验输入时，尚应满足下列要求：

1 在抗震鉴定试验中，不论是单频波试验还是多频波试验，均要求试验反应谱（TRS）包络要求反应谱（RRS），在比较这两条反应谱曲线时，临界阻尼比应选取同一值。如果在某些情况下，希望过去的试验数据用于校核能否包络一个新的要求反应谱（RRS）时，应取试验反应谱的临界阻尼比不比要求反应

谱的小，这样才是可以接受的；

3 此条是对人工时程的总持续时间和稳定强震信号的要求。这一部分对于低频部分丰富的远程地震和自然频率接近低频段的设备尤为重要。地震的持续时间与地震的最低频率有关，地震波的范围是 0.2~33Hz（周期是 5~0.03 秒）。

“指南”中要求人工时程的总持续时间 15~30 秒包含 3~6 个长周期波，而稳定强震时间 10 秒包含 2 个周期。如果高频部分比较丰富，为准确反映高频部分的分量，可以取 0.005 秒或更小的值作为时间步长计算人工加速度时程；

4 输入的各正交轴上的时程曲线应是相互独立的，判断是否相互独立可采用以下准则：在其强震动持续时间内的互相关系数的绝对值小于 0.3；或将持续时间至少划分为 12 段，要求各段在频率域内的最大互相关系数的平均值小于 0.5。若不满足相互独立性要求，则应在水平 4 个方向（相隔 90°）的每个方向上分别与垂直方向组合进行试验，每次试验持续时间为 30s。

5.3.5 本规范对原 2s 的拍间间隔做出修改，根据体系的基频和阻尼比确定拍间间隔，避免各拍的叠加效应。

5.3.6 只有在下列情况采用单频振动才是合理的：

1 要求的响应谱由单一频率控制（如由于结构的过滤作用，处于较高标高的楼板反应谱属这一类）；

2 设备在 0~33HZ 范围内只有一个主频、其他阶自振频率上的响应与之相比均很小；或这些自振频率均在 33HZ 以上；或在 0~33HZ 范围内，有几个自振频率，且他们相隔频段较宽，相互间没有耦合影响。

5.3.7 在振动台试验中，各次模拟地震动之间的时间间隔应以其反应不致叠加为原则。时间间隔可按下式确定：

$$T > \frac{1}{2\pi\zeta f_0} \quad (5.3.7)$$

式中： ζ —— 被试设备的基频；
 f_0 —— 被试设备的阻尼系数。

5.3.8 由于建筑物或构筑物对地面运动加速度值都有一定程度的放大作用，因此仅对设备和部件的试体进行振动台试验时，必须乘以支承结构动力响应放大系数。但也不得不指出，根据中国电力科学研究院、国网北京经济技术研究院、

同济大学、西北电力设计院和郑州机械研究所等单位的相关研究结果均显示，支架的动力放大系数比较复杂，与场地土类别、设备重量和刚度、支架材料与形式等都密切相关，且变化幅度较大。因此：

1 当支架设计参数确定时，应将直接与设备作为一个整体进行振动台试验；

2 当支架设计参数缺乏时，当支架设计参数未知，而又需要对电气设备和电气装置本体进行单独抗震试验时，通过在振动台上对设备有无支架的对比试验和计算分析结果，建议根据支架刚度与高度选择支架动力放大系数，原则上支架刚度越小、高度越大，支架动力放大系数越大，反之亦然。对于预期安装在室外、室内底层、地下洞内、地下变电站底层地面上或低矮支架上的设备，其支架的动力反应放大系数的取值不宜小于 1.2，且支架设计应保证其动力反应放大系数不大于所取值；

3 安装在室内二、三层楼板上的设备和部件，建筑物的动力反应放大系数应取 2.0。对于更高楼层上的设备和部件，应专门研究；

4 安装在变压器、电抗器的本体上的部件，动力反应放大系数应取 2.0。

日本通过实测和动力响应分析的结果，取建筑物二、三层的动力放大系数在 2 倍以下。为研究建筑物的抗震性能，西北电力设计院与同济大学联合进行了发电厂及变电站主控制楼和 110kV 屋内配电装置楼的模型房屋在振动台上的模拟地震试验，试验结果表明：建筑物各层楼动力放大系数为楼层越高， β 越大，并随输入加速度增加而减小。当输入加速度值为 0.5g 及以下时，二、三层楼动力反应放大系数为 1.5~2.5。

根据国内、外研究结果，为简化电气设备的抗震计算，建议取建筑物二、三层的动力放大系数为 2.0；变压器、高压电抗器的出线套管抗震设计应考虑变压器和高压电抗器基础及本体的动力响应放大系数。日本根据试验研究结果，提出变压器基础及本体的动力响应放大系数为 2.0。

燕山石油化工公司的“变压器抗震鉴定标准编写组”在振动台上进行了 4 台 6kV~10kV、1000kV·A 及以下电力变压器的模拟地震试验，测得变压器本体上部加速度值时振动台输入加速度值的 1.2 倍~2.0 倍，其中动力反应较大的一台变压器振动试验各部位的动力反应加速度实测值如表 2 所示。

表 2 变压器各部位动力响应加速度值

| 测点部位 | 台面输入 | 套管底部 | 套管上部 | 油枕 | 冷却器 |
|--------|------|------|------|------|------|
| 加速度值 g | 0.04 | 0.08 | 0.12 | 0.11 | 0.09 |
| 动力放大系数 | — | 2.00 | 3.99 | 2.75 | 2.25 |

表 2 中的动力放大系数以振动台输入加速度值为基础，从表 2 可以看出，变压器本体的动力放大系数为 2.0 及以上。综合上述国内外研究成果，建议取变压器和高压电抗器基础及本体的动力放大系数为 2.0。

5.3.9 对于要求在安全停堆地震期间和（或）之后能够可靠保持其性能的设备，在进行抗震鉴定试验之前，应进行振动老化试验。这些试验应能模拟厂址所规定的与运行基准地震次数等效的疲劳效应，以及电厂正常和瞬态运行工况引起的厂内振动等效的疲劳效应。如果可能，建议模拟电厂寿期的等效条件。如做不到，则至少应达到与设备鉴定寿命相一致的等效疲劳效应。

振动老化的目的是要表明，与电厂运行有关的较低水平的正常和瞬态振动以及发生概率较大的较低烈度地震既不会对设备安全功能产生有害影响，也不存在安全停堆地震期间这些功能失效的情况。这些试验也是 GB/T 12727 中老化要求的一部分。非地震振动条件下的老化试验应在运行基准地震和安全停堆地震试验之前进行。

具体老化试验可参照的标准包括《能动机械设备鉴定》NB/T 20036，《核电厂安全电气系统设备鉴定》IEC 60780。如能动阀门振动台试验前应进行寿命试验，其试验次数和工况可由技术规格书规定，但应考虑阀门整个寿期调试和循环次数，可选 2000 次，包括 500 次冷态试验（可由热态试验代替）和 1500 次热态试验。

5.3.10 能动机械设备的鉴定一般不必考虑支承点的差动运动，但下述特殊情况除外：被鉴定设备（或零件）在同一结构上的支承点不少于 3 个，或在不同结构上的支承点不少于 2 个，或处于管道部件和支承结构间。这些特殊情况需要考虑差劲运动。

支承点的最大相对位移可以计算得到。对于每个支承点，其最大位移可以用下式计算：

$$Z_d = \frac{Z_a g}{w^2} \quad (5.3.10)$$

式中： Z_d —— 最大位移，m；
 g —— 重力加速度， 9.8m/s^2 。
 w —— 主支承结构的主导圆频率，弧度/s；
 Z_a —— 谱曲线的零周期加速度，即 g 的倍数。

如果能证明各支承点的位移是不相关的，则支承点之间的相对位移应当采用平方和的平方根（SRSS），否则用绝对值求和确定。对于受管线和主结构同时支承的管线上部件（例如阀门），相对位移也用绝对值求和确定。

5.3.11 振动台试验的目的是考核设备在规定的地震作用下，能否执行其规定的安全功能。在试验中和试验前后应对设备的功能特性和可运行能力进行测量，对其承压边界的结构完整性进行监测。

5.3.12 安全级设备的抗震鉴定试验应在设备处于正常运行工况（电气负载、机械载荷、热载荷、压力等）和其他会对安全功能产生不利影响的电厂工况下进行。应证明这些载荷的模拟是合理和可接受的。如试验中没有这些载荷，则应说明未加这些载荷是合理的。

核电厂中有些设备要承受流体动力载荷引起的震动，典型的包括与安全释放阀排放和失水事故（LOCA）有关的载荷。流体动力载荷会影响老化和抗震试验要求。

5.3.13 对于某些部件的振动台试验，由于它们装配在整个设备中整个设备直接作抗震试验有困难(如设备过大，无法激振，或部件在设备之中，不便于操作)，可分为两步进行。对部件采用两步法进行的振动台试验，应确保部件的振动台试验中加速度输入是整体设备在该部件位置处的加速度响应值。

6 量测仪器与设计

6.1 一般规定

6.1.1 振动台试验时，应实时测试记录地震前、中、后试体的动力反应以及功能状态参数。加速度、速度、位移和应变是试验要求主要量测的结构动力反应，是提供试验分析的主要数据。对于结构裂缝的产生和扩展的过程以及裂缝的宽度可利用多次逐级加载的间隙进行描绘和记录，这都将有利于最终对结构的震害分析和破坏机理的研究。

鉴定试验中应根据试验规格书的要求，利用计算机、必要的传感器和其他仪器仪表，对涉及设备结构特性、振动特性(如自振频率、振型和临界阻尼比等)、功能特性、运行特性(如压力、温度、流量、电流、电压等)、地震反应(如各典型点的位移、速度、加速度，应力，应变等)等各种数据进行量测。应有足够的测量通道、数据采集及分析系统对测量数据进行记录和分析处理，必要时也可利用其他外加仪表设备。

6.1.2 振动台试验的测点、测量次数都较多，应采用自动化数据采集设备。量测仪器应根据试体的动力特征来选择，是指需要测试试体的固有振动参数，以确定量测仪器的频率范围和分析处理的方法；根据动力反应来选择，是指需要量测的最大反应幅值，是稳态反应还是瞬态反应；根据振动台的性能来选择，是指量测仪器的频率范围、最大可测幅值、动态范围，分辨率一定要能覆盖；根据所需量测的参数，是指需要量测的是什么运动物理量，是绝对量还是相对量。

6.1.3 量测用传感器和各种仪器仪表在试验前后均应进行检查，并与试验全过程旁站观察协调记录并融合分析。量测用传感器信号应可靠的输入计算机或通过专用数据采集设备进行数据采集和处理。量测选用的各种仪器按照计量规程进行检查标定，并表明仪器的误差，另外，试验前后均应进行仪器及数据线等完好性调试，以确保量测的精度和效果。具有零频特性的传感器可用静态标定方法获得其灵敏度、线性度及横向灵敏度；如拉线式电阻位移计、电涡流式位移计、差动变压器式位移计、激光位移计等可采用相对位移标定法进行静态标定，当用于振动台试验时应进行动力频响补偿；力平衡加速度计、压阻加速度计、固态加速度计等可利用倾斜法进行静态标定。对于非零频特性传感器的灵敏度、

幅频特性、相频特性、线性度的标定，可采用标准振动台相对标定法。

6.2 量测仪器

6.2.1 量测用传感器的类型、型号、规格、数量和安装位置应根据试验的具体需求进行选定。在确保能够准确测量关键物理量的基础上，应结合数值模拟方法对传感器的布设位置和数量进行优化，以提高测量精度和试验效率。通过模拟分析，能够有效地识别传感器布置的最佳方案，避免冗余或不足的测量点，同时减少试验误差对结果的影响，从而确保测试数据的可靠性和代表性。

6.2.2 宜优先选用技术先进、性能优良的智能型、数字型和非接触式传感器及采集系统。随着科技的不断进步，传感器技术也经历了从传统的模拟型到现代的数字型、智能型传感器的演变。传统的模拟传感器多依赖于物理量的直接转换和模拟信号的处理，常见的如电压、电流型传感器，存在易受噪声干扰、信号衰减等问题。随着微电子技术的发展，数字型传感器逐步取代了模拟传感器，它能够直接将测量信号转化为数字信号，减少了数据传输过程中的损失和误差，提升了测量精度和稳定性。而智能型传感器则在数字传感器的基础上，结合了自校准、数据处理和自诊断等功能，使得传感器不仅能够精确测量，还能实时进行数据分析和处理。非接触式传感器，如激光、超声波、红外线传感器等，避免了接触摩擦的影响，适用于高温、腐蚀性强或难以接触的测量环境，大大提高了测量的可靠性和耐用性。与传统传感器相比，这些新型传感器具有更高的精度、更强的抗干扰能力、更高的适应性和更长的使用寿命。

6.2.3 在试验中，传感器的质量和体积对试体的动力特性有重要影响，特别是在动态响应试验中，传感器的质量和安装位置会影响试体的振动模式、频率响应和阻尼特性。例如，在振动台测试或结构振动分析中，传感器的重量可能会改变试体的固有频率，导致试验结果的偏差或不准确。而传感器的体积过大会占用更多空间，可能影响试体的受力和变形状态。因此，在选择传感器时，应优先考虑那些质量较轻、体积较小的型号，这样能够最大限度地减少对试体动力学性能的影响，确保试验数据的准确性。随着科技的发展，尤其是微电子技术和材料科学的进步，现代传感器的设计趋向于小型化、轻量化，能够在不牺牲性能的前提下，减少对被测物体的干扰。因此，加入传感器后试体频率误差不应超过 5%。

6.2.4 在动态测试和振动试验中，量测传感器会受到试验过程中产生的冲击、振动以及瞬时应力的作用，尤其是在振动台等动力试验中，这些冲击力可能对传感器的稳定性、精度甚至使用寿命产生影响。因此，选择具有足够抗冲击性能的传感器尤为重要。传感器的抗冲击性能通常与其结构设计、材料特性以及封装技术相关，具备高强度外壳、抗震缓冲设计的传感器能够有效抵御外部冲击，确保在激烈的动态环境中仍能保持准确的测量。振动台作为一种常见的动力试验设备，通过模拟不同频率、幅度的振动和冲击力，检验结构的抗震性能和稳定性。在此类试验中，传感器需要能够在高频、强振动环境下稳定工作，否则可能导致测量数据的偏差或传感器本身的损坏。因此，选择合适的抗冲击性能强的传感器不仅能提高测试的精度，还能延长设备的使用寿命，确保试验结果的可靠性。

6.2.5 在实际试验过程中，传感器的安装与拆卸操作常常需要频繁进行，尤其是在不同试验阶段或多次试验中，快速而便捷的安装与拆卸能够大大提高试验的效率和灵活性。传感器设计应考虑到安装方便性，避免复杂的安装步骤和工具需求，确保操作人员可以在较短时间内完成传感器的安装、调整 and 拆卸，同时降低人为操作失误的风险。易于安装和拆卸的传感器能够提高试验系统的维护性和可重复性，尤其是在进行多次不同条件下测试时，不必每次都耗费大量时间进行安装准备。此外，便捷的拆卸设计还有助于在测试过程中及时更换或调整传感器，避免因设备故障或参数不适合而影响整个试验过程。

6.2.6 在核电振动台试验中，传感器常常面临严苛的环境条件，如水、灰尘和电磁干扰等。水源可能来自测试过程中使用的冷却系统、溶液泄漏或湿气侵入等情况，尤其在高温高湿的测试环境中，传感器一旦暴露于水中，可能导致电路短路或腐蚀，影响测量精度甚至损坏设备。电磁干扰则通常来自振动台的电动驱动系统、试验设备本身或周围的电气设备，这些电磁波可能对传感器的信号产生干扰，导致数据失真。为了应对这些挑战，传感器应具备一定的防护性能，如防水设计（IP67 或更高等级）可以有效防止水分进入，而防尘性能（IP6X 等级）则能够确保在高尘环境中保持稳定运行。同时，防电磁干扰的措施，如使用屏蔽材料、屏蔽电缆和合理布置传感器线路等，可以有效避免外部电磁场的影响，保证数据的准确性。在实际操作中，可以为传感器配备防护外壳或密封

垫圈，确保其在恶劣环境中仍然能够正常工作，这些措施将有助于提升测试的可靠性和传感器的长期稳定性。

6.2.7 选用的量测仪器应根据试验目的来决定，同时还要考虑设备条件，一般来说，主要根据试体极限破坏估算值来选择仪表，使其既能满足量程要求，又能满足最小分辨能力。

6.2.8 位移传感器、加速度传感器和应变测量仪器在满足量程要求下，精度要尽可能高。

6.2.9 传感器在测量过程中会产生不同类型的信号（如电压、电流或频率信号），且每种信号都有特定的输出阻抗。如果数据采集系统的输入阻抗与传感器的输出阻抗不匹配，可能会导致信号的反射、衰减或失真，从而影响数据的准确性。因此，选择数据采集系统时，必须确保其输入阻抗与传感器的输出阻抗匹配，以确保信号能够准确传输并被正确采集。此外，信号类型也需匹配，例如，如果传感器输出的是模拟信号，则数据采集系统需要能够处理模拟信号并转换为数字数据；如果传感器输出数字信号，数据采集系统则应具备相应的数字信号处理能力。只有确保传感器与数据采集系统之间的匹配，才能保证信号的完整性和准确性，提高测试结果的可靠性。合理匹配不仅能避免信号失真，还能延长系统的使用寿命，减少由于不匹配而可能引起的设备故障。

6.2.10 动态数据采集应消除频率混叠。当无法满足物理抗混滤波要求时，可采用提高采样频率的方法，即：采样频率取高于试体量测信号中最高频率成分的5倍，获取采样数据后，进行低频重采样和低通滤波滤掉高于所需量测频率的信号频率成分，可减小频率混叠带来的影响。注意，抗混滤波器是物理滤波电路，在模拟信号未进入 A/D 采集前即已滤除信号中的高频成分，起到避免采样混叠的效果；当模拟信号已经过 A/D 后，此时采样已经完成，混叠效应已经产生。

6.2.11 量测接口硬件的量程、精度、速度应满足试验需要，能与数据采集软件运行并可可靠通讯。本条提出的数据采集系统是指结构反应、非控制量的量测自动化仪表。数据采集系统应与主控计算机联网通讯，达到试验系统基本要求。为保证关注的试体振动频率的测量以及阻尼比的分析准确，频率分辨率应尽可能地小，即可通过降低采样频率或增大谱分析点数 N 实现。考虑到数据采集应消除混叠的影响，采样频率通常不应小于 256Hz。对于经数字模拟分析或经预

采样分析得到的试体振动频率低于 1.5Hz 的试体，例如高层建筑以及电力设备中的避雷器或互感器的一阶自振频率一般为 1Hz 左右或更低，通常可取采样频率为 128Hz， N 为 16384 以满足上述要求。

6.2.12 在复杂的试验或测试过程中，可能需要使用多套数据采集系统同时对不同的传感器进行数据采集。例如，在多点振动测试或大型结构测试中，多个传感器可能被安装在不同的位置，且每个传感器都需要与相应的数据采集系统连接。如果不同的数据采集系统没有时钟同步，可能会导致各系统采集的数据存在时间差异，进而影响数据的比较和分析，产生误差。例如，在多个传感器同时测量一个结构的不同部位时，若各系统的时间戳不一致，可能会导致测得的信号存在不同步的情况，从而影响整体的动态响应分析。因此，为了确保所有数据的时间一致性和测试结果的可靠性，必须对多套数据采集系统进行时钟同步。时钟同步能够确保所有系统在相同的时间点记录数据，避免因时间偏差而导致的数据失真或分析误差。此外，时钟同步还能简化数据处理流程，提高试验结果的精确性，尤其是在进行复杂的多点监测、频率分析或模态识别时，确保数据之间的一致性是非常重要的。

6.2.13 振动台试验时可采用数据采集系统采集试体的位移、速度、加速度、应变等信号。振动台控制系统采集的数据与数据采集系统采集的数据应保持同步。因此，数据采集系统宜选用具备振动台控制系统触发采集功能的设备，以实现与振动台采集信号同步。

6.3 量测设计

6.3.2 被鉴定设备应在地震期间和（或）震后能执行其安全功能。地震期间的安全功能与震后功能可以相同，也可以不同。因此，每次鉴定中对地震期间和（或）震后的安全功能都应明确。应在文件中提供鉴定数据，以对每次试验中的安全功能论证给予支持。当在地震期间要求有能动功能或不误动作时，应提供鉴定数据作为鉴定设备执行其功能的可靠依据。分辨率应能识别出被测参量发生有意义的微小变化。

6.3.3 传感器的规格主要包括量程、灵敏度等。数据线规格主要包括线径、芯数等。

量测试体的振动位移可分为绝对位移测量和相对位移测量两种。绝对位移

测量是指试体相对于空间不动点的位移，数据包括振动台台面的运动位移分量。相对位移测量是指试体相对于振动台台面，或试体楼层间的相对位移。相对位移值也可以从绝对位移值中对两点间进行相减获得，但误差大，故较理想的应是直接量测其两点的相对位移为佳。

6.3.4 在进行应变测试时，选择测点的主应力方向是至关重要的，因为主应力方向是材料受力最强的方向，在该方向上应变最为显著，能够最直接地反映出结构的受力情况。应变片或应变花的选择应基于主应力方向，以确保能够准确测量到结构受力引起的变形。例如，在拉伸或压缩试验中，应变片应沿着主拉伸方向安装，而在弯曲试验中，应变片应选择受弯最强的区域，并与主应力方向一致。应变分布情况同样需要考虑，因为不同区域的应变可能存在较大差异，尤其是在非均匀载荷或复杂应力状态下，应变片的标距（即安装距离）应根据应变梯度进行选择，以确保能够有效捕捉到应变变化。合适的标距能够提高应变测量的精度，避免由于标距过短或过长造成的应变测量误差。此外，在复杂结构的应变测量中，应变花（即多个应变片组合成的阵列）能够更全面地反映多方向应变状态，提供更为准确的应力分析数据。通过合理选择应变片和应变花的布设，可以确保应变测量结果的准确性，并有效反映材料或结构的真实受力状况。

6.3.5 子结构振动台试验需要实时求解数值模型获得振动台加载目标命令，同时需要时滞补偿方法降低振动台加载时滞，因此，数值模型求解和时滞补偿要求在实时计算平台完成。可以依托振动台控制器的实时计算板卡完成，也可选用单独的实时计算平台。实时计算平台应与振动台控制系统保持低延迟的数据传输。

6.3.6 在试验过程中，试体的各个操作环节，如吊装、调试、动力响应和破坏情况等，均可能对试验结果产生重要影响，因此，设置足够的摄像设备以实时记录这些环节是非常必要的。通过摄像设备，能够全面、准确地记录试验的全过程，为后期的数据分析、故障排查和结果验证提供重要依据。此外，人工观察和记录也是不可或缺的一部分，试验人员可以及时发现异常情况并做出判断，确保试验的顺利进行。在关键试验环节，如试体吊装、加载过程和破坏试验时，拍照记录能清晰地捕捉到重要的瞬间，帮助研究人员分析试验中出现的突发情

况或异常变化。综合运用摄像设备、人工观察和拍照记录，能够为试验提供全面的多角度证据，不仅提升试验的透明度和可靠性，也为后期的试验报告和研究成果提供详实的数据支持。

试验的全过程宜对试体整体及关键部位拍摄照片，并使用录像作动态记录。对于试体主要部位的开裂、失稳屈曲及破坏情况，以及功能状态变化情况，应重点拍摄照片并作出记录和标记。

振动台试验得到的结构反应大部分是动态信号，对于试验过程中结构发生和出现的各种开裂、失稳、破坏甚至倒塌过程，采用录像等动态记录是最为理想的方式。

6.3.7 加速度传感器布置数量和位置应符合下列规定：

1 加速度传感器是振动台试验中的主要量测仪器设备，布置的数量也最多。加速度传感器的布置数量视振动台数据采集系统的通道数确定，布置位置应优先选择在结构反应最大或复杂变化的部位，测点关键部位宜在附近设置备用测点，用于对关键点位测试数据进行校核或替补；

2 输入振动台台面的地震动加速度是通过试体的底梁或底板传递给上部模型试体的，这相当于实际地震时通过地基基础将地震作用传递给上部结构，此时底梁或底板上测得的加速度反应是真正对上部试体的地震作用。另外，模型各楼层与底梁或底板间的相对位移才是试体的真正变形，在底梁或底板上布置传感器可用于观察模型与振动台面的固定情况，并对模型的地震位移反应试验数据进行修正；

3 一般情况下，模型的顶层是加速度反应最大的部位，如结构屋盖；对于体型或刚度发生变化的楼层，如设置加强层，其地震反应变化较复杂，是需通过试验进行验证设计有效性的部位，也应布置传感器；

4 对需测扭转分量时，需在楼层的端部对角线方向布置测点，通常在楼层端部两侧布置测点，通过频谱分析可确定扭转频率。

6.3.10 位移传感器分接触式和非接触式两种。采用接触式位移传感器时，有时会一端固定试体模型上，另一端固定在支架上，支架或固定于振动台面，或固定于试验室地面，此时要求支架具有足够的刚度，以减小因振动台的振动引起支架的振动变形。接触式传感器建议采用玻璃片或塑料片作为绝缘垫，与试体

模型或振动台台面粘接。

6.3.11 传感器安装方向应与所测参数方向一致，若存在夹角时，会低估结构响应；而且同向的多个传感器不平行时，也会影响这些传感器之间的相对数值，如扭转位移、层间位移等。当试验对象不能提供垂直或平行传感器布置方向参照时，应设计相应措施，保障传感器布置方向的准确性。

6.3.12 在进行动态测试或振动台试验时，金属外壳传感器可能会与试体表面发生接触，若两者之间存在电气连接，则可能会引起电气干扰或影响试体的电气特性。为了避免这种情况，需要对金属外壳传感器与试体之间进行有效的绝缘隔离。常见的绝缘手段包括使用高绝缘性的材料作为隔离层，如橡胶、塑料、陶瓷或特种绝缘涂层等，这些材料具有良好的电绝缘性，能够有效阻止电流或电场的传导。另一种方法是通过在传感器安装时，设置非导电的垫片或隔离支架，使传感器与试体之间保持一定的距离，避免直接接触。在某些情况下，还可以使用电气隔离装置，如光耦合器或变压器，以实现信号的隔离，确保传感器输出的信号不受外部电气影响。通过这些绝缘措施，不仅能防止电气干扰对测量结果的影响，还能保护传感器和试体免受电气损伤，提高试验数据的准确性与可靠性。

6.3.13 多段屏蔽电缆需要连接时，电缆和屏蔽网应分别连接，宜采用焊接方式。

6.3.14 在试验测试中，数据采集系统及其连接的传感器通常需要在高精度和高稳定性条件下工作。可靠的接地设计是确保系统安全性和稳定性的基础，能够有效防止由于电气干扰或静电积累导致的信号失真或设备损坏。接地不仅可以减少外部电磁干扰对系统的影响，还能避免由电流过大或电压波动引发的安全问题。此外，数据采集系统和传感器的供电系统应选用带有稳压功能的不间断电源（UPS）。这种电源可以确保在电力波动或断电情况下，系统继续稳定运行，避免因电力不稳而导致数据丢失或系统崩溃。稳压功能可以使系统在波动的电压环境中保持恒定的工作电压，从而避免因电压不稳定导致的信号噪声和设备故障。特别是在长时间的试验过程中，稳定的供电和接地设计能够确保数据的高准确性和测试的连续性，提升整个试验系统的可靠性和数据质量。

6.3.15 涉水类振动台试验中，如水下振动台试验、含水率较高的岩土类振动台试验和液化场地振动台试验均需对传感器进行防水处理，需考虑电气隔离要求，

涉水传感器易发生故障，而在试验过程中一般不具备水下检查和修换传感器的条件。

6.3.16 现在有些振动台基础采用隔振，对隔振系统的监测很必要。在一些关键部分，布置传感器或视频系统，监测基础的变形，预防安全事故。

6.3.17 振动台作为一种先进的结构抗震动力试验设备，在控制系统及采集系统内均应配置不间断电源。当外界供电等发生故障而突然停电时，系统报警并保证供电连续性，保障系统采集的试验数据安全储存。

7 试验结果与分析评价

7.0.2 由振动台试验获得结构物或构筑物在不同加速度输入下的试验现象、破坏过程、破坏模式和结构反应时程等信息，可依据相关规范规定评价建筑物、构筑物及其子结构的抗震性能。包括现行国家标准《核电厂抗震设计标准》GB 50267、《核设备抗震鉴定试验指南》HAFJ 0053、《核动力厂抗震设计与鉴定》HAD 10202、《电力设施抗震设计规范》GB 50260、《Recommended Practice for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations》IEEE-323、《核电厂安全重要电气设备鉴定》GB/T 12727、《核电厂安全级电气设备抗震鉴定》GB/T 13625、《核电厂能动机械设备鉴定》NB/T 20036、《压水堆核电厂阀门抗震鉴定试验》EJ/T 1022.15 等相关规范或标准规定。

7.0.3 履行上述安全功能的安全 1、2、3 级机械设备和安全级电气设备（1E 级设备），属于抗震 I 类设备。

抗震 I 类设备中，能动的机械设备（如泵阀风机）和电气设备，应采用抗震试验方法验证其可运行性，功能性和完整性。其中能动设备，要求其可运行性，称为抗震 1A 类；非能动设备，有功能性要求，如应急堆芯冷却水管道，在地震时不会因变形影响其流量，称为抗震 1F 类；只有完整性要求的称为 1I 类。对于抗震 I 类设备要求在极限安全地震动时分别满足其完整性（密封性），功能性和可运行性要求。

7.0.5 在试验过程中，通过传感器获得的是模型结构的测量值，为避免直接使用缩尺模型测量值导致不合理的评价结果，应根据相应物理量的相似系数将模型结构测量值换算为原型结构的测量值，以评价原型结构的性能。

7.0.7 试验评价报告宜包括以下内容：

- 1 被试设备的类型、特性参数和所属厂家；
- 2 被试设备的选择和模型简化情况及其依据；
- 3 被试设备的安装、固定方式，运行条件，环境条件，被试设备的边界条件，如输入、输出连接件，安装固定件等，并与实际情况进行比较；

4 振动台的名称、主要特性和所属单位以及对数据采集和分析系统、测试仪表和测试通道数的描述，还包括仪表的标定日期和其它试验室条件的描述；

- 5 被试设备所采用的试验反应谱(TRS)和要求的反应谱(RRS)，及包络情

况；

6 试验的目的、要求和内容。试验的方法和步骤；

7 试验前的检测结果，包括各基准数据的测量结果，即老化试验 [热老化、辐照老化、运行老化、(包括机械老化或振动老化等)] 后的功能试验结果，并按试验大纲检查被试设备的控制装置，固定装置和驱动装置的功能特性是否正常；

8 测点的选择与布置，测点布置图及其说明；

9 试验结果应包括以下内容：

1) 动态特性探查试验的结果以及试验数据分析结果；

2) 被试设备的各次功能试验结果 (如果有的话，包括极限试验的结果)，及设备可运行性的验证。包括试验前、试验过程中和试验后的功能情况 (正常或失效) 及各参数的测量结果，如应力、应变、加速度、位移、变形、压力、温度、流量、电流、电压等。包括实测数据，照片和试验期间所进行的任何调整，甚至更换的记录及故障分析；

注意：对未能达到满意试验结果的设备组件或器件而需进行修理、修改或更换时，设备的整个试验必须重复进行，如果试验中更换某些部件，按有关规定先对它们进行老化处理才能装入进行抗震试验。

3) 在试验过程中的目视检查结果和其它观察到的异常情况的纪录和说明；

4) 对设备进一步改进的建议；

5) 与计算分析结果的比较 (如有可能时)；

6) 结论。

10 试验负责人，试验单位，试验日期。

7.0.9 设备合格性评定中包含的各因素的具体说明如下：

1 破坏设备结构完整性的损伤包括裂纹、泄漏、功能部件损坏、松动等；

3 功能性和可运行性故障包含机械设备中的阀杆运动受阻、阀门转动力矩过大、泵或风机的转动件(如转子、叶轮)与固定部件(如壳体)发生碰撞等；

4 乱真的输出包含继电器触点抖动超过规定值等。