



T/CECS XXX-202X

中国工程建设标准化协会标准

振动台模拟试验方法标准

Technical standard for Shaking Table Test

(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

振动台模拟试验方法标准

Technical standard for Shaking Table Test

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

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，编制组经深入调查研究，认真总结实践经验，参考国内外有关标准，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、试体的设计与制作、试验加载、试验量测、试验结果处理与评价、安全措施等。

请注意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：21b933010@stu.hit.edu.cn）。

主编单位：哈尔滨工业大学（威海）

参编单位：武汉理工大学；哈尔滨工业大学；苏州科技大学；北京工业大学；天津大学；东南大学；广州大学；防灾科技学院；国机集团科学技术研究院有限公司；天津福云天翼科技有限公司；北京思齐致新科技有限公司；湖南大学；中国汽车工业工程有限公司；中国建筑科学研究院；北京建筑大学；东北电力大学；青岛理工大学；华侨大学；四川大学；温州大学；中国信息通信研究院；中国航空规划设计研究总院

主要起草人：

主要审查人：

目 次

1 总则.....	3
2 术语和符号.....	4
2.1 术语.....	4
2.2 符号.....	6
3 试体的设计与制作.....	8
3.1 一般规定.....	8
3.2 相似关系设计.....	8
3.3 试体加工制作.....	10
4 试验加载.....	11
4.1 一般规定.....	11
4.2 设备要求.....	11
4.3 试体安装.....	11
4.4 加载工况.....	12
4.5 加载控制.....	13
5 试验量测.....	14
5.1 一般规定.....	14
5.2 量测仪器基本要求.....	14
5.3 量测设计.....	15
6 试验结果处理与评价.....	18
6.1 一般规定.....	18
6.2 数据处理与评价.....	18
7 安全措施.....	20
7.1 一般规定.....	20
7.2 具体措施.....	20
用词说明.....	21
引用标准名录.....	22
附：条文说明.....	23

Contents

1	General provisions	3
2	Terms and symbols.....	4
2.1	Terms	4
2.2	Symbols	6
3	Design and Construction of test specimen	8
3.1	General requirements	8
3.2	Design of similitude law	8
3.3	Construction of test specimens	10
4	Test loading	11
4.1	General requirements	11
4.2	Equipment requirements	11
4.3	Specimen installation	11
4.4	Loading conditions	12
4.5	Loading control	13
5	Test measurement	14
5.1	General requirements	14
5.2	Basic requirements for measurement.....	14
5.3	Measurement Design	15
6	Processing and evaluation of test	18
6.1	General requirements	18
6.2	Data processing and evaluation	18
7	Safety measures	20
7.1	General requirements	20
7.2	Specific measures.....	20
	Explanation of wording	21
	List of quoted standards	22
	Addition: Explanation of provisions	23

1 总则

1.0.1 为规范地震模拟振动台试验方法，保证试验质量、安全经济，制定本标准。

1.0.2 适用于建筑物、构筑物的地震模拟振动台试验，包括地震模拟振动台单台试验、地震模拟振动台台阵试验、子结构地震模拟振动台试验、水下地震模拟振动台试验。

1.0.3 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。

1.0.4 地震模拟振动台试验除应符合本标准外，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 试体 test specimen

地震模拟振动台试验的对象，是试验构件、模型结构的总称。

2.1.2 地震模拟振动台单台试验 shaking table test

通过单个振动台台面对试体输入地面运动，模拟地震对试体作用的抗震试验，简称为单台试验。

2.1.3 地震模拟振动台台阵试验 multiple shaking tables test

通过不少于 2 个地震模拟振动台模拟地震对试体的作用进行的抗震试验，简称为台阵试验。

2.1.4 子结构地震模拟振动台试验 substructure shaking table test

也称地震模拟振动台混合试验，采用振动台对结构拟研究部位进行加载试验，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，简称为子结构振动台试验。

2.1.5 水下地震模拟振动台试验 underwater shaking table test

通过水下振动台台面对试体输入地面运动，模拟涉水试体地震时受水体和地震共同作用的抗震试验，简称为水下振动台试验。

2.1.6 原型结构 prototype structure

按施工图拟建或已建成的结构。

2.1.7 模型结构 model structure

在原型结构基础上选取原型结构的全部或其中一部分按一定的相似关系设计建成的结构，包括足尺模型、缩尺模型、子结构模型等。

2.1.8 足尺模型 full scale model

尺寸、材料、边界条件与原型结构一致的模型结构。

2.1.9 缩尺模型 scaled model

在几何尺寸上将原型结构按相似关系缩小制作的模型结构。

2.1.10 相似系数 similarity coefficient

模型结构与原型结构的对应物理量比值。

2.1.11 缩尺比 scale ratio

模型结构与原型结构的几何尺寸之比。

2.1.12 弹性相似模型 elastic similarity model

为研究在外界荷载或振动作用下结构或构件的弹性性能，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结构相似的模型结构。

2.1.13 弹塑性相似模型 elastic-plastic similarity model

为研究在外界荷载或振动作用下结构或构件的弹塑性性能，用与原型结构相似材料制成的模型结构。

2.1.14 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 作用与作用效应

ε	——	应变；
$\mu\varepsilon$	——	微应变；
σ	——	应力；
p_w	——	水压力；
P	——	动水压力；
C_m	——	惯性力系数；
$\ddot{x}$	——	结构加速度；
d	——	结构位移。

2.2.2 材料性能

E	——	弹性模量；
ρ	——	质量密度；
m'_m	——	模型结构质量；
m_a	——	附加于模型结构上的人工质量；
m_p	——	原型结构质量；
ρ_f	——	水体密度。

2.2.3 几何特性

L	——	几何尺寸；
R	——	结构迎水面宽度。

2.2.4 地震模拟振动台试验用符号

ω_s	——	采样频率；
ω_m	——	试体的最高频率；
M_s^p	——	原型结构对应的反应值；
M_s^m	——	试体中传感器的测量值；
E_s^p	——	原型结构对应的反应值误差；
E_s^m	——	试体中传感器的测量误差。

2.2.5 模型结构试验相似系数

S_a	——	加速度相似系数；
S_d	——	位移相似系数；
S_L	——	几何尺寸相似系数；
S_E	——	弹性模量相似系数；
S_{EN}	——	能量相似系数；
S_f	——	频率相似系数；
S_F	——	力相似系数；
S_g	——	重力加速度相似系数；
S_t	——	时间相似系数；
S_v	——	速度相似系数；
S_ε	——	应变相似系数；
S_σ	——	应力相似系数；
S_ρ	——	质量密度相似系数；
S'_ρ	——	等效质量密度相似系数；
S_ν	——	泊松比相似系数；
S_A	——	面积相似系数；
S_M	——	质量相似系数；
S_K	——	刚度相似系数；
S_C	——	阻尼相似系数；
S_R	——	测量物理量相似比；
S_{F-Vel}	——	流体速度相似系数；
S_{F-Qua}	——	流体流量相似系数；
S_{F-P}	——	流体压力相似系数；
S_{F-F}	——	流体力相似系数；
S_R	——	测量物理量相似系数；
S_G	——	剪切模量相似系数；
S_μ	——	泊松系数相似系数；
S_τ	——	剪切应力相似系数；
S_γ	——	剪应变相似系数。

3 试体的设计与制作

3.1 一般规定

3.1.1 振动台试验的作用一般包括结构动力特性测试、结构动力响应测试、结构抗震性能评价及结构破坏模式探索等，如有特殊试验目的，应在试验方案中予以说明。

3.1.2 振动台试验应校核试验工况的最大加速度、最大速度、最大位移、频率范围、最大倾覆力矩和最大偏心力矩等，不超过振动台的额定性能参数。

3.1.3 在振动台试验方案设计中，应给出试体所在场地条件、结构形式、几何尺寸等基本信息。

3.1.4 采用模型或截取部分结构作试体时，试体与原型结构应在主要特性方面满足相似条件。

3.1.5 试体设计及制作应满足试验条件、吊装设施、量测手段等要求。

3.1.6 试体制作所采用主要材料应进行力学性能试验，并应符合现行相关国家标准。

3.1.7 模型试体材料重力密度不足时可采用均匀布置的附加质量块弥补。附加质量块与试体竖向构件之间应留足够间隙，避免二者碰撞。

3.1.8 缩尺比过小导致试验结果难以反映原结构的破坏特征时，可采用子结构振动台试验方法。

3.1.9 缩尺模型加速度时程输入参数，宜满足幅值、频谱成分和持续时间的相似条件。如不能完全满足相似条件，应进行非完全相似误差分析。

3.2 相似关系设计

3.2.1 模型相似关系应综合试验目的、尺寸效应、振动台性能、制作条件、实验室条件和吊装设施等因素进行设计。

3.2.2 试体的缩尺比应综合考虑试验条件，并符合下列规定：

- 1 砌体试体缩尺比不宜小于 $1/4$ ；
- 2 振动台试验弹塑性相似模型的缩尺比不宜小于 $1/25$ ；
- 3 振动台弹性相似模型试验的缩尺比不宜小于 $1/100$ ；
- 4 子结构振动台试验试体缩尺比不宜小于 $1/4$ 。

3.2.3 模型试验应按方程式分析法或量纲分析法建立相似关系，并应符合下列规定：

1 当模型与原型结构在具同样重力加速度效应情况下进行试验时，宜按弹塑性相似模型相似系数确定相似关系；实际试验时可采用人工质量模拟的弹塑性相似模型确定相似关系；当受振动台承载能力限制时，可采用实用弹塑性相似模型确定相似关系；

2 对于可忽略重力加速度影响的模型，以及弹性相似模型，可按忽略重力效应的弹性相似模型的相似系数确定相似关系；

3 人工模拟质量的等效质量密度的相似系数 S'_p ，应按下列公式计算确定。

$$S'_p = \frac{m'_m + m_a}{S_L^3 \cdot m_p} \quad (3.2.3-1)$$

式中： m'_m ——模型结构质量；

m_a ——附加于模型结构上的人工质量；

m_p ——原型结构质量；

S_L ——几何尺寸相似系数。

3.2.4 水下振动台试验可增大模型结构迎水面宽度和波高，以增大模型的动水力和波浪力，使其水动力相似比与重力、弹性力等其他力的相似比保持一致。

3.2.5 水下振动台试验进行模型设计时，宜满足以下要求：

1 在模型材料和几何相似比确定的基础上，确定等效密度相似比和加速度相似比。对于需要满足弹性力-重力相似准则的试验，其加速度相似比为 1；等效密度相似比则应根据弹性相似准则计算；

2 确定迎水面宽度。根据确定的几何、等效密度以及加速度相似比，根据式 3.2.5-1 确定模型的迎水面宽度 R ，使得水动力相似比等于重力、弹性力等其他力的相似比。

$$P = -\frac{\pi}{4} \rho_f C_m R^2 \ddot{x} \quad (3.2.5-1)$$

式中： P ——动水压力；

C_m ——惯性力系数；

R ——结构迎水面宽度，构件在水中单向运动时，垂直于运动方向上的构件宽度；

ρ_f ——水体密度；

$\ddot{x}$ ——结构加速度。

3.2.6 土-结构相互作用振动台试验，应综合考虑多介质模型材料性质、模型制作技术、模型箱边界效应、振动台试验与测试能力等因素设计试验模型的相似比。

3.3 试体加工制作

3.3.1 砌体模型制作需满足下列要求：

1 砌体结构缩尺模型所用块材，可采用特制缩尺块材，也可用原型结构所用块材切割成缩尺块材；

2 砌体结构试体第一皮砖或砌块与底梁之间、最上层砖或砌块与顶梁之间的水平灰缝砂浆强度等级应高于试体设计砂浆强度等级，且不应低于 M10。

3.3.2 混凝土试体宜采用力学性能和骨料级配与原型结构有相似性的混凝土。

3.3.3 模型的钢筋或钢材应符合相似性的要求，尚需满足下列要求：

1 采用光面钢筋模拟带肋钢筋时宜作表面刻痕处理；

2 当采用调直处理的盘圆筋时，应计入力学性能的影响；

3 小比例缩尺模型的动力试验可采用钢丝、铜材等模拟原型结构中的钢筋、钢材。

4 试验加载

4.1 一般规定

4.1.1 振动台设备应根据试体平面尺寸、高度、重心位置、加载加速度幅值、自振频率范围等试验条件选用。

4.1.2 当选择特定的振动台设备开展试验时，应确保试体设计与加载工况特性符合振动台的性能指标限制。

4.1.3 振动台台阵系统尚应满足以下要求：

- 1 对于可移动的振动台台阵，应在试验方案中明确各个子台的布置位置；
- 2 对于作动器可拆装的振动台台阵系统，应提供作动器的布置方式。

4.1.4 对于采取防水设施的水下振动台系统，试验时应考虑防水设施对水体的扰动和对水中试体的动力影响。

4.2 设备要求

4.2.1 振动台设备应具有明确的功能参数指标，包括台面尺寸、振动方向、自由度数、最大负载、频率范围、最大功能曲线、额定偏心力矩、额定倾覆力矩和控制方式等。

4.2.2 振动台系统在工作频率范围内应具备足够的波形再现精度，振动台的空台背景噪声宜小于 $0.01g$ 。正弦激励下，振动台空载加速度波形失真度应小于 25%，位移波形失真度应小于 5%；随机振动下，振动台空载加速度波形相关系数应大于 95%，加速度峰值误差应小于 10%。

4.2.3 振动台系统应具备完善的波形管理功能。应具备白噪声、人工波、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。

4.2.4 振动台系统启动和停机时不宜对试体产生明显冲击，最大冲击加速度不应超过 $0.1g$ ，对于具有竖向运动分量的振动台，其升降过程中台面偏转角度不应超过 0.5 度。

4.2.5 振动台控制系统宜具有与子结构振动台试验平台良好的通信能力。

4.3 试体安装

4.3.1 可采用吊装、搬运车平移等方式将试体移动至振动台区域，试体移动过程

中应避免脱落、翻转、磕碰、倾覆等。

4.3.2 试体安装时振动台台面应处于水平的停机位置，试体在振动台上应当居中或对称布置安装。

4.3.3 试体与振动台的连接应具有足够的强度和刚度，试体安装孔应具有足够的直径，应预留足够的连接螺栓数量，连接螺栓宜采用扭矩扳手紧固，宜采取必要的防松措施。

4.3.4 对于浮放于振动台台面的小型试体，应保证试体基底与台面有可靠的接触，必要时可设置找平层或垫层。

4.3.5 安装于试体上的配重块要与试体可靠连接，配重块应有间隔的安装于试体上，应避免配重块产生局部振动。

4.3.6 对于试验中可能产生倒塌或倾覆的试体，应采取可靠的安全防护措施。

4.3.7 不应在振动台上进行焊接作业。

4.4 加载工况

4.4.1 振动台试验用加速度时程按下列规定选取：

1 当试体所对应的原型结构具有明确的建设场地类别、抗震设防烈度和设计地震分组时，宜根据原型结构的设计反应谱选择 2-3 条加速度时程；

2 当缺少必要的场地类别资料或为了研究不同场地条件下的地震响应规律时，可每种场地类别选择 2-3 条加速度时程；

3 当选择人工拟合的加速度时程时，加速度时程的有效持续时间不应少于试体基本周期的 10 倍；

4 加速度时程可选择沿试体弱轴方向的单向振动分量；对于质量和刚度分布明显不对称试体宜选择双向加速度时程；对于大跨度、长悬臂及高层试体可增加竖向加速度时程；

5 地震加速度时程的最大幅值、时间步长和持续时间应按本标准第 3 章模型试验的相似比例进行修正；

6 对于振动台台阵试验，进行加速度时程选取和频谱压缩时，应当考虑不同子台位移、速度相似关系影响。

4.4.2 试体的动力特性宜采用白噪声激励法或正弦扫频法测定。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，加速度幅值宜小于 $0.1g$ ，有效

持续时间不宜少于 120s。

4.4.3 当采用锤击法、初位移法等方法测试试体自振特性时，宜在试体安装在振动台前进行，确需在振动台上测试的，应考虑振动台系统特性对测试结果的影响。

4.4.4 振动台试验的多次分级加载按照下列步骤进行：

- 1 输入地震加速度幅值应逐次递增，加速度幅值的分级宜覆盖多遇地震、设防烈度地震和罕遇地震所对应的加速度值；
- 2 当试体进入非线性阶段时，应逐级增加输入加速度幅值并宜采用典型工况进行试验，使试体由轻微损坏逐步发展到破坏阶段；
- 3 对试体进行振动台多次分级加载时，应考虑多次加载对试体承载能力的影响；
- 4 当试体可能发生性能退化和频率改变时，应及时对试体的自振特性进行复测。

4.4.5 对于子结构振动台试验，界面力的施加应与振动台加载同步。

4.5 加载控制

4.5.1 振动台试验前应对振动台控制参数和设置进行检查和确认，确保控制系统处于正常运行状态。

4.5.2 进行振动台试验前宜对加载加速度时程的加速度、速度和位移幅值和相位进行校核和检查。

4.5.3 对于多振动台台阵系统，在试验前应对振动台的台面位移同步性能进行确认。

4.5.4 试验时应及时测试试体的自振频率，以掌握试体的损伤状态，为进一步的试验加载提供依据。

4.5.5 振动台试验过程中应对试体连接和传感器安装状态进行随时检查，避免试体松动和传感器掉落。

4.5.6 当采用带负载迭代提升振动台波形再现精度时，应考虑迭代对试体性能可能产生的影响。

4.5.7 子结构振动台试验的开发和测试时应避免对振动台系统造成不可恢复的更改。

5 试验量测

5.1 一般规定

5.1.1 振动台试验需量测试体的位移、速度、加速度、应变反应，按输入地面运动加速度过程在试体上描绘与记录裂缝的出现和扩展，确定破坏部位和破坏形式。量测传感器的所有信号应连续可靠输入计算机或通过专用数据采集系统进行数据采集和处理，量测数据结果由计算机终端显示或其他输出设备输出。

5.1.2 量测传感器可采用接触和非接触方式，根据需量测物理量的精度、重要性等要求，选取数字或模拟传感器。

5.1.3 量测仪器应根据试体的动力特性、动力反应、地震模拟振动台的性能以及所需量测的参数选定。

5.1.4 量测选用的各种仪器在试验前后均应进行标定，以确保量测的精度和效果。

5.2 量测仪器基本要求

5.2.1 应根据试验目的选择量测仪表，仪表量程宜为试体极限破坏计算值 1.5 倍，分辨率应满足最小荷载作用下的分辨能力。

5.2.2 位移量测仪表的标识精度不宜大于所测总位移的 0.2%，示值允许误差应不大于满量程的 $\pm 0.5\%$ 。

5.2.3 应变式量测仪表的精度、误差和量程，宜满足下列规定：

1 各种应变式传感器标识精度不宜大于 $2\mu\varepsilon$ ，示值允许误差不大于满量程的 $\pm 1.0\%$ ，量程不宜小于 $3000\mu\varepsilon$ ；

2 动态电阻应变量测装置的标识精度不宜大于 $1\mu\varepsilon$ 。

5.2.4 试体各量测值尚需满足如下要求：

1 应采用自动化动态数据采集系统进行量测，采样频率不宜低于 1 kHz；

2 应通过标准 A/D 接口实现数据采集，字长不宜低于 16 位。

5.2.5 量测仪器的动态范围应大于 60 dB，量测信号分辨率应小于需采集最小振动幅值的 1/10。

5.2.6 量测仪器的使用频率范围，其下限宜低于试验用地震记录最低主要频率分量的 1/10，上限应高于最高有用频率 2 倍分量值。

5.2.7 开展倒塌破坏振动台试验时，宜采用非接触式立体视觉测量，且应变测量

最小分度值不宜大于 $50\mu\epsilon$ 。

5.2.8 量测用传感器尚需满足以下条件：

- 1 应具有良好的抗冲击性能，且便于安装和拆卸；
- 2 附着于试体上的传感器，其重量和体积不应影响试体的动力特性；
- 3 连接导线应采用屏蔽电缆；
- 4 输出阻抗、输出信号应与记录仪器或数据采集系统匹配；
- 5 宜具有防尘、防潮、防电磁干扰性能。

5.2.9 加速度、速度或位移传感器及相应的动态量测配套仪表，应根据需量测的动态参量确定。

5.2.10 传感器的横向灵敏度应小于 0.05。

5.2.11 数据采集系统宜具备触发采集功能，宜采用振动台时钟触发采集，以实现与振动台采集信号同步。

5.2.12 子结构振动台试验，宜采用实时计算平台完成数值模型实时求解、时滞补偿等的计算。可采用独立的实时计算平台完成，并应与振动台控制系统之间保持低延迟的数据传输。

5.2.13 子结构振动台试验宜选用高精度反力测量装置量测试体的反力。当采用实时子结构计算时，实测反力应能够低延迟传输给实时计算平台，并能与振动台控制系统采集的数据同步。

5.2.14 水下振动台动力试验中，布置于水下的传感器应为专用水下传感器，或进行可靠的防水处理。

5.3 量测设计

5.3.1 量测设计应给出以下数据信息：

- 1 以示意图形式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 传感器的型号、规格（量程、灵敏度等）、数量等；
- 3 需要用的数据线规格（线径、芯数）、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。

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

- 1 宜优先布置在加速度反应较大且分布均匀的部位；
- 2 宜在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 整体结构模型在试体顶部、模型体型或刚度发生变化的楼层宜加密布置，其它楼层可根据需要，沿试体高度均匀布置；
- 4 测点应布置在楼层两主轴方向的质心处，当需量测扭转分量时，尚需在楼层的端部布置测点。

5.3.3 传感器的选用与安装需要注意：

- 1 位移传感器宜采用非接触式仪表，应布置在变形反应较大的部位。当采用接触式位移量测试体位移时，固定于台面或实验室地面上的仪表架应有足够的刚度；
- 2 应变片应布置在试体中受力复杂、变形较大的构件或部位；
- 3 传感器与被测试体间应粘结牢固，其连接导线也应捆绑在试体上，在振动台台面边缘部分的数据线应留有足够的冗余长度，避免因振动台运动对数据线产生拉扯；
- 4 传感器与试体间尚应使用绝缘垫隔离，且应防止隔离垫与被测试体发生谐振；
- 5 传感器量测仪表应可靠接地，有源传感器的供电设备，应与传感器连线可靠屏蔽。

5.3.4 试验的全过程宜以录像作动态记录。对于试体主要部位的开裂、失稳屈曲及破坏情况，宜拍摄照片并作出记录。

5.3.5 量测仪器精度应与缩尺后模型进行匹配，以避免缩尺后模型响应变化超过了仪器工作范围。

5.3.6 两点间相对位移的测量宜采用直接量测法。

5.3.7 动态数据采集应消除混叠影响。可采用抗混滤波器和提高采样频率的方法。

- 1 应采用具有抗混滤波器的量测仪表，对信号进行抗混滤波；
- 2 不具备抗混滤波功能的量测仪表，应根据试体的振动频率范围设定动态数据采集系统的采集频率，除应满足采样定理，即：

$$\omega_s \geq 2\omega_m \quad (5.3.7-1)$$

式中： ω_s ——采样频率；

ω_m ——试体的关注的最高频率。

之外，应尽可能提高 A/D 采样率，以便于后期数字滤波和重采样，降低混叠影响。

5.3.8 应根据实测信号的性质选择合适的窗函数解决频率泄漏问题。

6 试验结果处理与评价

6.1 一般规定

6.1.1 对采用不同的地震加速度记录和最大地震加速度完成的试验，均应对试验数据进行处理，主要包括下列内容：

- 1 试体各层质心主方向上的加速度、速度、位移时程曲线；
- 2 利用测量数据分析获得试体的频率、阻尼比、振型、动力放大系数等信息；
- 3 根据数据获得试验时程曲线；
- 4 根据位移数据获得试体的层间位移（角）分布图；
- 5 根据加速度数据获得试体的惯性力沿高度的分布图。

6.1.2 结构动力特性测试应保证测试前后结构状态不变，不对试体造成损伤。

6.2 数据处理与评价

6.2.1 试验数据分析前，应对数据进行下列处理：

- 1 参照《正态样本离群值的判断和处理》GB/T 4883 对无效数据进行辨别和剔除；
- 2 根据传感器的标定值及应变计的灵敏度系数等对试验数据进行修正；
- 3 根据试验情况和分析需要，采用滤波处理、零均值化、消除趋势项等减小测量误差的措施；
- 4 根据相似系数确定原型结构对应位置处的反应值：

$$M_s^p = \frac{M_s^m}{S_R} \quad (6.2.1-1)$$

式中： M_s^m ——试体中传感器的测量值；

M_s^p ——原型结构对应的反应值；

S_R ——测量物理量相似比。

6.2.2 试体的位移与加速度反应宜分别通过位移传感器与加速度传感器测量。当由加速度、速度测量数据计算位移值时，应进行消除趋势项和滤波处理。

6.2.3 在进行数据结果绝对误差分析时，应考虑相似系数对数据误差的放大或缩小作用：

$$E_s^p = \frac{E_s^m}{S_R} \quad (6.2.3-1)$$

式中： E_s^m ——试体中传感器的测量误差；

E_s^p ——原型结构对应的反应值误差；

S_R ——测量物理量相似系数。

6.2.4 当采用白噪声激励确定试体的动力特性，应根据试体实际情况在时域或频域中求取动力特性。

6.2.5 结构动力特性测试的时域数据处理应符合下列规定：

- 1 对记录的测试数据应进行零点漂移、记录波形和记录长度的检验；
- 2 试体的自振频率可在记录曲线上比较规则的波形段内取有限个周期的平均值；
- 3 试体的阻尼比可按自由衰减曲线求得，稳态正弦激振时可根据实测后的共振曲线采用半功率点法计算确定。

6.2.6 结构动力特性测试的频域数据处理应符合下列规定：

- 1 频域数据处理时的采样间隔应符合采样定理的要求；
- 2 频域中的数据应采用滤波、零均值化方法进行处理；
- 3 试体的自振频率可采用自功率谱分析或傅里叶谱分析方法求得；
- 4 试体的阻尼比宜采用自相关函数分析、曲线拟合法或半功率点法确定；
- 5 试体的振型宜采用自功率谱分析、互功率谱分析或传递函数分析方法确定；
- 6 对于复杂试体的测试数据，宜采用谱分析、相关分析、传递函数分析和相干分析等方法进行分析。

6.2.7 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建筑物、构筑物及其子结构的抗震性能。

6.2.8 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 安全措施

7.1 一般规定

7.1.1 在试体安装、试验、拆除过程中，应做好安全防护措施，避免试体破坏造成人员伤亡和设备损坏。

7.1.2 振动台试验方案中应有安全防护措施，试验时应按规定设置必要的安全防护警示标识。

7.1.3 实验室应制定吊车安全操作规程，试体的吊装、加载设备的安装及运输过程应遵守吊车安全操作规程。

7.1.4 试验中应遵守仪器仪表和设备的安全操作规定。

7.1.5 对于试验中可能产生破坏的试体应当采取相应的安全防护措施。

7.2 具体措施

7.2.1 振动台试体安装、拆除时应做好工作人员、仪器设备的安全防护。

7.2.2 试体与台面的连接应经过必要的受力校核，确保连接部位安全可靠。

7.2.3 非试验期间，振动台与基坑间隙应注意覆盖保护。

7.2.4 水下振动台的激振器区域应具备漏水监测功能及多重防泄漏能力，且应有漏水紧急预案。

7.2.5 电子试验设备和测试仪器应可靠接地。

7.2.6 振动台控制系统和数据采集系统应设有不间断电源。

7.2.7 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设置。急停功能应考虑物理联动的逻辑顺序。

7.2.8 振动台控制系统应有各种故障的报警指示装置，试验系统与振动台基坑可能的碰撞点处应设有缓冲消能装置。

7.2.9 试验时试体外围应设置防止附加配重块移位或甩出伤人的防护网、防护挡板等。

7.2.10 试验时宜利用实验室的吊车通过吊钩及钢缆绳与试体相连，或在试体外围设置防护钢架，避免试验过程中试体倒塌造成设备损坏。

7.2.11 试验加载过程中，所有人员不应进入标识的危险区。

7.2.12 试验结束后的吊装方案，应考虑试体破坏造成的安全影响。

用词说明

1 为了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，非这样做不可的用词：

证明词采用“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用词：

证明词采用“应”；反面词采用“不应”或“不得”。

3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先先这样做的用词：

证明词采用“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”。

2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

- 1 《建筑抗震设计规范》 GB 50011
- 2 《建筑抗震试验标准规程》 JGJ101
- 3 《液压振动台》 GB/T 21116
- 4 《电动振动台》 GB/T 13310
- 5 《砌体基本力学性能试验方法标准》 GB/T 50129
- 6 《普通混凝土力学性能试验方法标准》 GB/T 50081
- 7 《金属材料拉伸试验第 1 部分：室温试验方法》 GB/T 228. 1
- 8 《正态样本离群值的判断和处理 》 GBT 4883

中国工程建设标准化协会标准

振动台模拟试验方法标准

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，参考了地震模拟振动台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，《振动台模拟试验方法标准》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.....	26
2 术语和符号.....	29
3 试体的设计与制作.....	30
3.1 一般规定.....	30
3.2 相似关系设计.....	32
3.3 加工制作.....	37
4 试验加载.....	39
4.1 一般规定.....	39
4.2 设备要求.....	40
4.3 试体安装.....	41
4.4 加载工况.....	43
4.5 加载控制.....	44
5 试验量测.....	46
5.1 一般规定.....	46
5.2 量测仪器基本要求.....	46
5.3 量测设计.....	47
6 试验结果处理与评价.....	50
6.1 一般规定.....	50
6.2 数据处理与评价.....	50
7 安全措施.....	53
7.1 一般规定.....	53
7.2 具体措施.....	53

1 总则

1.0.1 本标准编制的目的是在进行建筑结构地震模拟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 本条规定了本标准的适用范围，主要针对工业与民用建筑物和一般构筑物进行地震模拟振动台试验。地震模拟振动台试验是指用地震模拟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。试验对象可以是结构构件、局部试体、整体结构的缩尺模型或实际结构。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。对于核电、通讯、机电等设备产品的抗震性能试验，应按相关行业的标准要求进行试验。

地震模拟振动台单台系统可由图 1 所示的组成部分组成。

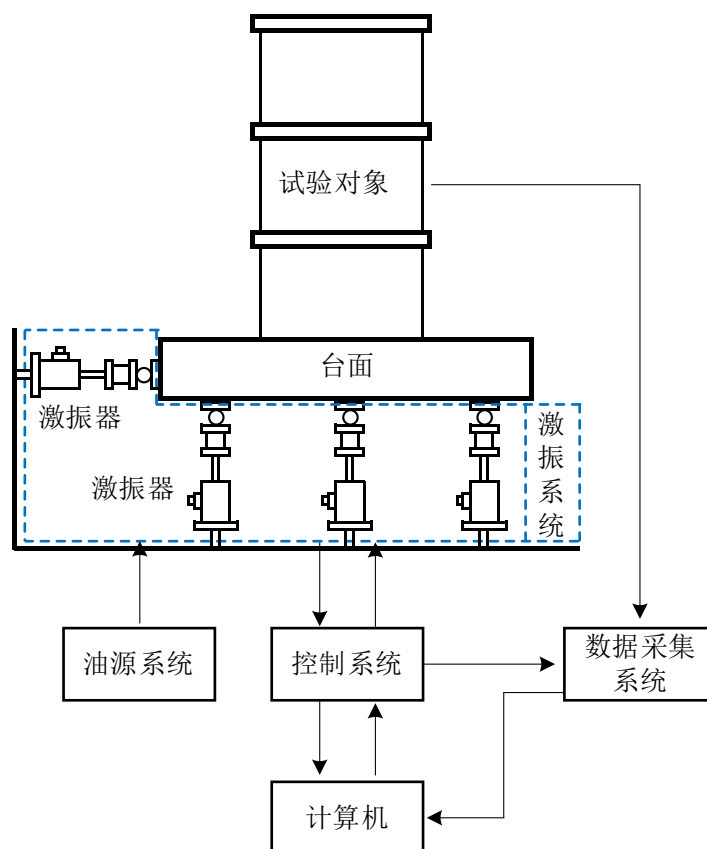


图 1 地震模拟振动台组成示意图

地震模拟振动台台阵系统可由图 2 所示的组成部分组成,其由多台小型振动台组成,可有效且经济地进行大尺寸、多跨、多地震输入的结构抗震试验,

其可根据现实情况选择不同的台面连接方式，以实现不同功能的台阵系统。

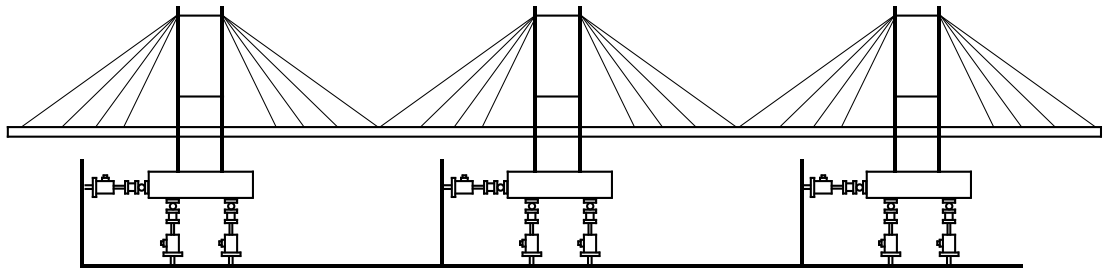


图 2 地震模拟振动台台阵组成示意图

子结构地震模拟振动台系统可由图 3 所示的组成部分组成，其试体是取整体结构的一部分（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
对试体输入地面运动，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出的边界条件，实现对整体结构的抗震试验。

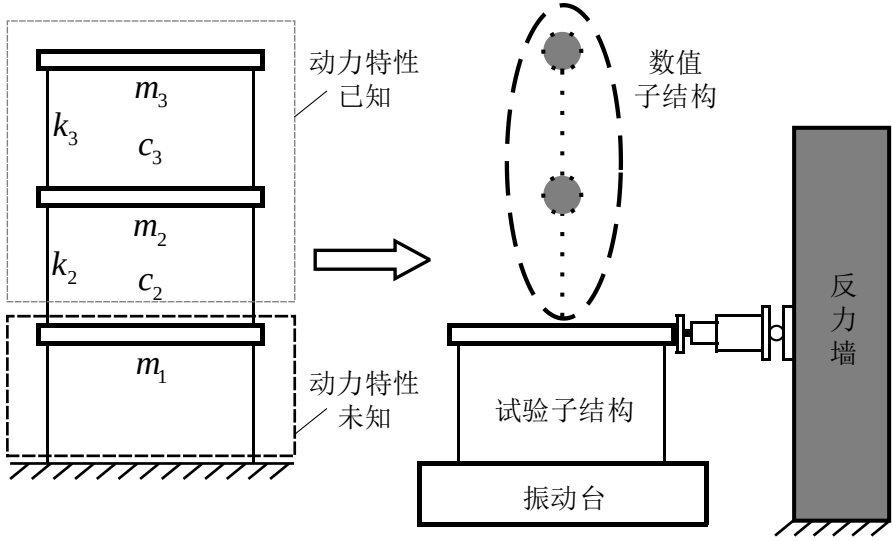


图 3 子结构振动台试验示意图

水下地震模拟振动台系统可由图 4 所示的组成部分组成，其需要在普通振动台的基础上加入进排水系统以及水给振动台带来的控制问题。

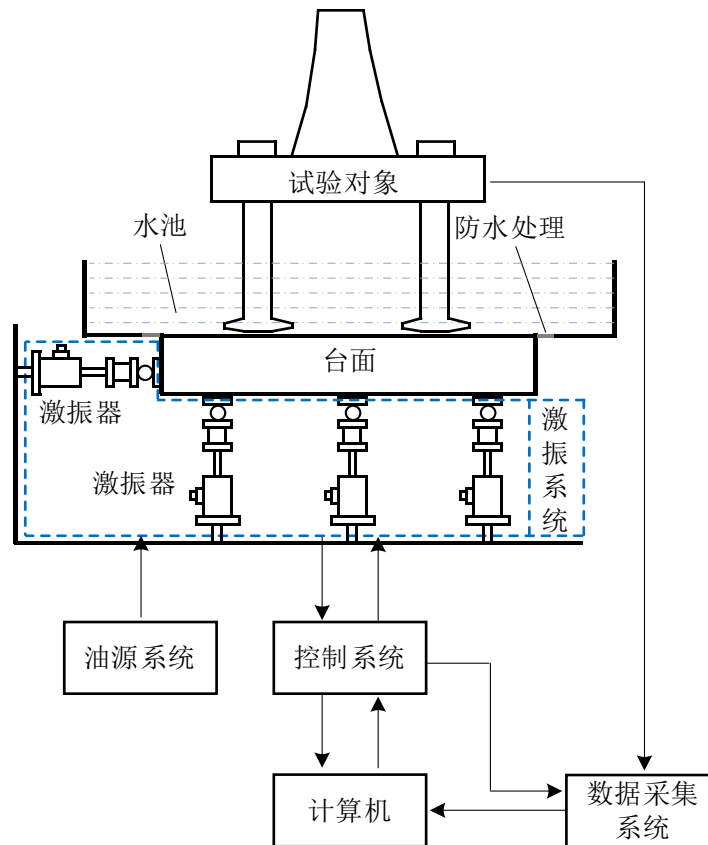


图 4 水下地震模拟振动台组成示意图

1.0.3 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、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。

1.0.4 本标准同现行国家标准《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

2.1.6-2.1.9 原型结构是实际研究的对象，通常为已建或拟建的结构。模型结构用于解决或探究某一特定问题，并结合实际实验条件，在原型结构基础上按一定的相似关系或选取原型结构的一部分而设计建成的结构，包括足尺模型、缩尺模型、子结构模型等。

2.1.11 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。

2.1.12 弹性相似模型主要用于研究原型结构的弹性性能，它和原型结构的几何形状相似，但模型材料不一定要和原型结构材料相似，可以用均匀的弹性材料（如有机玻璃）制作。

2.1.13 弹塑性相似模型用与原型结构材料相似的材料制成，能够反映原型结构的弹塑性性能以及结构的破坏状态，因此也称强度相似模型。

2.1.14 非完全相似是与相似理论的几何相似相对应的概念，是指模型结构的部分特性不能同时满足于一个相同的比例关系。非完全相似误差指的是在非完全相似情况下，模型结构所得到的应力、位移经换算后的数值与原型结构相应数值的相对误差。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，满足与原型结构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 试体的设计与制作

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。

3.1.2 一般情况下，校核最大加速度、最大速度、最大位移、频率范围。对高耸结构、高层结构等还需要校核最大倾覆力矩和最大偏心力矩。

3.1.4 构件、子结构、整体结构的缩尺模型或是原型结构都可以是抗震试验的对象。理论上试体需要在几何条件、物理特性和边界条件上与原型结构相似。当试体设计中难以严格满足所有相似条件时，应在主要特性方面满足相似条件。

1 几何条件相似指的是模型与原型各相应部分长度 L 互成比例，即要求长度、位移、应变等物理相似系数间应满足的关系。结构原型与模型试体的几何相似：

$$\frac{S_d}{S_E S_L} = 1 \quad (1)$$

式中： S_d ——位移相似系数；

S_E ——弹性模量相似系数；

S_L ——长度相似系数。

刚度相似条件：

$$\frac{S_E S_L}{S_K} = 1 \text{ 或 } \frac{S_G S_L}{S_K} = 1 \quad (2)$$

式中： S_K ——刚度相似系数；

S_G ——剪切模量相似系数。

2 物理特性相似指的是模型与原型的相应各点应力和应变间的关系相同。

$$S_\mu = 1 \quad (3)$$

$$S_\sigma = S_E \cdot S_\epsilon \quad (4)$$

$$S_\tau = S_G \cdot S_\gamma \quad (5)$$

式中： S_μ ——泊松系数相似系数；

S_σ ——法向应力相似系数；

S_ε ——法向应变相似系数；

S_τ ——剪切应力相似系数；

S_γ ——剪应变相似系数。

3 边界条件相似指的是模型与原型在外界接触区域内的各种条件的各种条件保持相似，包括支撑条件、约束情况和边界上受力变形情况相似等。

3.1.5 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、拆装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；在框架试验时，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。

3.1.6 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，因此要求试体与试体的不同浇筑期同批次同时间制作，并同条件下养护；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体，以备试验各阶段使用。砌体试块与混凝土试块力学性能试验还应分别符合现行国家标准《砌体基本力学性能试验方法标准》GB/T 50129 与国家标准《普通混凝土力学性能试验方法标准》GB/T 50081 的规定。

对于含有各类钢筋（包括钢丝、钢绞线、金属板材）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（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。

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。

3.1.7 当现实中难以找到高密度材料以增大模型试体材料的有效密度时,可采用人工质量模拟方法,即在试体上附加合适的质量,但应注意人工质量需要结合试体自身特征去确定其分布情况。确定好分布情况后,各部分的质量块应均匀布置。附加的荷重必须与试体连接牢固,避免试验过程中松动与移动,且应与试体竖向构件之间保持合适间隙,避免碰撞。

3.1.8 子结构振动台试验技术复杂,涉及到计算子结构和试验子结构的选取、数值积分方法、加载控制方法、边界条件模拟等,对试验人员与试验设备要求较高,在其它方法难以满足试验要求时可采用该方法。如当缩尺比过小导致试验难以反映原结构的破坏特征、结构破坏集中在局部范围时,为实现关键部位较大相似比的模型试验,可采用子结构振动台试验方法。

3.2 相似关系设计

3.2.2 试体尺寸的确定应综合考虑试验目的、实验场地大小与试验设备情况等因素,在此基础上对试体的缩尺比进行控制以满足试验要求。

对于砌体构件,应限制试体高宽比,以保证墙体不出现弯曲型破坏,一般情况下其高度应以宽度尺寸的二倍为限;墙体厚度与高宽尺度相比很小,模拟厚度缩小会促使试体出面失稳破坏,因此建议缩尺比不小于 $1/4$ 。对于砌体结构振动台试验,综合考虑模型制作难度与振动台承载能力的限制,其缩尺比也不宜小于 $1/4$ 。

综合我国高层结构的发展、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,并借鉴《建筑抗震试验标准规程》JGJ/T 101-2015 中钢结构弹塑性要求,将缩尺比限制在不小于 $1/25$ 。一般情况下,钢筋混凝土弹塑性模型缩尺比不小于相应的钢结构模型。

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。

3.2.3 为保证试验结果的真实性,除对材料的要求外,模型必须满足与原型结构在几何、物理和边界和力学条件的相似,动力试验尚应满足质点动力平衡方程式相似和运动初始条件的相似,即需对试体进行相似关系设计。

1 方程式分析法,运用方程式分析法确定相似条件,必须在进行模型设计

前对所研究的物理过程各物理量之间的函数关系，即对试验结果和试验条件之间的关系提出明确的数学方程式，然后才能根据数学方程式，确定相似条件。用方程式分析法确定相似条件，方法简单、概念明确。

2 量纲分析法，当待考察问题的规律尚未完全掌握、问题较为复杂没有明确的系数关系式时，常采用量纲分析法确定相似关系。量纲(也称因次)的概念是在研究物理量的数量关系时产生的，它说明量测物理量时所采用单位的性质。一般来说，选取三个物理量的量纲作为基本量纲，其余物理量的量纲可以作为导出量纲推导得到。例如，在一般结构工程问题中，各物理量的量纲都可由长度、时间、力三个基本量纲导出，此系统称为绝对系统；或由长度、时间、质量三个基本量纲导出，此系统称为质量系统。建筑结构模型试验常用物理量的质量系统量纲见表 1。也可以选用其他量纲作为基本量纲，只要基本量纲是相互独立和完整的，各物理量之间的量纲关系实际满足的是一种量纲协调。

地震模拟振动台试验可根据试验目的将试体设计为弹性相似模型、强度相似模型。

弹性相似模型由于是研究结构弹性阶段的工作性能，模型的比例不可选得很大，一般为原型的 1/100。弹性相似模型不能够预测混凝土结构和砌体结构开裂后的性能，也不可能预测钢结构屈服后的性能，同样也不能预测实际结构所发生的许多其他的非弹性性能以及结构的破坏状态。

强度模型对材料模拟要求比较严格，不仅要求材料的非线性本构关系要与原型结构相似（如用微粒混凝土代替混凝土），而且往往模型材料的密度也需要提高很多，在实际模型设计中一般采用附加质量的方法关系来解决，称为用人工质量模拟的弹塑性相似模型。此外，受振动台承载能力的限制，只能施加部分附加质量，此时可对台面输入地面运动加速度进行放大以满足惯性力的等效，这种模型即为本标准中的实用弹塑性相似模型。

当试验材料和几何相似比一旦确定，试验模型的其它相似关系主要取决于模型的配重。模型配重的取值应同时考虑振动台承载能力、配重的竖向重力效应影响和振动台的有效频率范围。

对于地震地面运动作用下结构动力反应问题的研究，参与的物理参数有应力（ σ ）、几何尺寸（ L ）、时间（ t ）、加速度（ a ）、重力加速度（ g ）、材料弹性

模量 (E)、密度 (ρ) 和位置向量 ($\vec{r}$) 以及考虑初始条件的物理初始应力 (σ_0) 和初始位置向量 ($\vec{r}_0$), 其函数关系为:

$$\sigma = F(L, t, a, g, E, \rho, \vec{r}, \sigma_0, \vec{r}_0) \quad (6)$$

按量纲分析的 π 定理, 如一个物理现象可由 n 个物理量构成的物理方程描述, n 个物理量中有 k 个基本物理量, 可选 k 个基本单位, 则该物理现象也可以用这些物理量组成的 ($n-k$) 个无量纲群的关系式来描述。在工程系统中基本物理量为质量 (M)、长度 (L) 和时间 (T), 即 $k=3$ 。为此可组成 $n-k=10-3=7$ 个独立的无量纲项 (相似判据 π), 所以无量纲项的函数关系为:

$$\pi = f\left(\frac{\sigma}{E}, \frac{\vec{r}}{L}, \frac{t}{L} \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \frac{a}{g}, \frac{a_1 \rho}{E}, \frac{\sigma_0}{E}, \frac{\vec{r}_0}{L}\right) \quad (7)$$

即

$$\frac{\sigma}{E} = f\left(\frac{\vec{r}}{L}, \frac{t}{L} \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \frac{a}{g}, \frac{a_1 \rho}{E}, \frac{\sigma_0}{E}, \frac{\vec{r}_0}{L}\right) \quad (8)$$

这个方程中式中的每一项在模型和原型中都应相等, 由此得到本标准表 1 所列的各项动力相似条件。

地震模拟振动台试验的模型试体是与原型结构在同样相等的重力加速度 g 下进行试验的, 即 $S_g = g_m / g_p = 1$ 。当 $S_g = g_m / g_p = 1$, 则该项 $E / \rho = L$, 相似关系满足 $S_E / S_\rho = S_L$, 即要求模型材料较原型材料有更小的刚度或是更大的密度。对于混凝土结构, 由于模型材料和原型材料的刚度和密度一般是非常接近的, 因此就限制了使用强度模型研究结构非线性和重力效应问题的可能性。如果模型使用和原型相同的材料, 即 $S_E = S_\rho = 1$, 则要求 $S_g = 1 / S_L$, 这样对于小比例的模型就要求有非常大的加速度, 给地震模拟振动台试验带来困难, 所以在实际试验时采用人工质量模拟的强度模型。

当采用人工质量模拟的强度模型试验时, 要求用高密度材料来增加结构上有效的模型材料强度, 这种高密度材料并不影响结构的性能, 仅是为了满足 $S_E / S_\rho = 1$ 的相似要求。实际上就是在模型上附加适当的分布质量, 但这些附加质量不能改变结构的强度和刚度的特性, 且不能因为配重过大导致局部非试验

目的破坏。

本标准表 1 第 3、4 列中的 S'_p 为考虑人工质量模拟的等效质量密度的相似常数。本标准公式 (3.2.3-1) 中的 ρ_{0m} 为模型中具有结构效应材料的质量密度， ρ_{1m} 为作为人工质量模拟施加于模型上的附加材料的质量密度，可由本标准公式 (3.2.3-2) 确定。

对于由重力效应引起的应力比地震作用引起的动应力小得多的结构，模型设计可忽略重力加速度 g 的影响，即可排除 $S_g = 1$ 的约束条件，因此这类模型不须要模拟人工质量，不模拟重力影响。当模型选用和原型结构相同材料时，即 $S_E = S_p = 1$ ，则 $S_t = S_L$ 及 $S_a = 1/S_L$ ，即要求时间及加速度的比例很大，因而导致测量精度及动力激振等困难，同时也会增大材料应变速率的影响。竖向加速度对水平抗剪有影响时，此时不应该按忽略重力加速度影响的模型考虑。

对于试验只涉及线性范围工作性能的弹性相似模型，可以将重力效应和动力效应分开，同样可以不考虑重力加速度。但这类模型不能模拟由几何非线性引起的次生效应。

表 1 动力试验模型相似系数

类型	物理量	弹塑性相似模型	用人工质量模拟的弹塑性相似模型	实用弹塑性相似模型	忽略重力效应的弹性相似模量
几何特性	几何尺寸 S_L	S_L	S_L	S_L	S_L
	位移 S_d	S_L	S_L	S_L	S_L
	角位移 S_θ	1	1	1	1
	截面积 S_A	S_L^2	S_L^2	S_L^2	S_L^2
材料特性	应力 S_σ	S_E	S_E	S_E	S_E
	应变 S_ϵ	1	1	1	1
	弹性模量 S_E	S_E	S_E	S_E	S_E
	质量密度 S_p	$\frac{S_E}{S_L}$	S'_p	$\frac{S'_p}{S_a}$	S_p
荷载	力 S_F	$S_E S_L^2$	$S_E S_L^2$	$S_E S_L^2$	$S_E S_L^2$

(续) 表 1 动力试验模型相似系数

类型	物理量	弹塑性相似模型	用人工质量模拟的弹塑性相似模型	实用弹塑性相似模型	忽略重力效应的弹性相似模量
动力特性	时间 S_t	$\sqrt{S_L}$	$\sqrt{S_L}$	$\sqrt{\frac{S_L}{S_a}}$	$S_L \sqrt{\frac{S_p}{S_E}}$
	频率 S_f	$\frac{1}{\sqrt{S_L}}$	$\frac{1}{\sqrt{S_L}}$	$\sqrt{\frac{S_a}{S_L}}$	$\frac{1}{S_L} \sqrt{\frac{S_E}{S_p}}$
	速度 S_v	$\sqrt{S_L}$	$\sqrt{S_L}$	$\sqrt{S_L S_a}$	$\sqrt{\frac{S_E}{S_p}}$
	加速度 S_a	1	1	S_a	$\frac{1}{S_L} \cdot \frac{S_E}{S_p}$
	重力加速度 S_g	1	1	1	1
其他	能量 S_{EN}	$S_E S_L^3$	$S_E S_L^3$	$S_E S_L^3$	$S_E S_L^3$

3.2.4-3.2.5 对于涉及水中结构的模拟地震试验,除需考虑 3.2.1-3.2.3 节的设计原则外,尚应考虑水体带来的附加影响和模拟相似条件。由于水通常无法按量纲分析得到缩尺效果,本节增加对水动力相似条件的模拟说明。根据量纲分析理论,建议水下振动台动力试验相似系数如表 2 所示。

表 2 水下振动台动力试验相似系数表

类型	物理量	关系式
材料关系	应变 S_ϵ	S_ϵ
	应力 S_σ	$S_\epsilon S_E$
	弹性模量 S_E	S_E
	泊松比 S_ν	S_ν
	密度 S_ρ	S_E/S_L
几何关系	长度 S_L	S_L
	面积 S_A	S_L^2
	位移 S_d	S_L

(续) 表 2 水下振动台动力试验相似系数表

类型	物理量	关系式
动力相似	质量 S_M	$S_\rho S_L^3$
	刚度 S_K	$S_E S_L$
	阻尼 S_C	S_M/S_T
	时间 S_t	$(S_M/S_K)^{0.5}$
	频率 S_f	$1/S_T$
	速度 S_v	$S_d/S_T = S_L^{0.5}$
	加速度 S_a	S_d/S_T^2
	重力加速度 S_g	S_g
流体相似	流体速度 S_{F-Vel}	$S_L^{0.5}$
	流体流量 S_{F-Qua}	$S_L^{2.5}$
	流体压力 S_{F-P}	S_L
	流体力 S_{F-F}	S_L^3

3.2.6 土-结构相互作用振动台试验由于多介质非线性相互作用的特点, 综合考虑模型材料性质、模型制作技术、模型箱边界效应等因素, 使模型材料的刚度相似比尽可能与原型一致, 考虑模型材料的变形相似比与几何相似比的一致性。必须考虑振动台的台面尺寸、性能、承载吨位及试验能力。根据上述原则及模型结构和模型土的特点可选取不同的基本物理量如下: 模型结构为长度、弹性模量、加速度; 模型土为剪切波速、密度、加速度。

3.3 试体加工制作

3.3.1 砌体结构为砖或砌块和砂浆两种材料组成的复合材料结构。当设计模型时, 要求模型与原型具有相似的应力-应变关系曲线, 即要求 $S_\sigma = S_E = S_\epsilon = 1$, 且试验模型也需要按比例缩小制作, 因此应采用与原型相同材料的缩尺砖块或砌块制作, 其可通过定制或从原型材料切割获得。为保证试验中墙体与底梁间发生滑移破坏不早于墙体自身破坏, 对灰缝砂浆强度等级提出了相应的规定。

3.3.2 在地震模拟振动台试验中, 用作模拟钢筋混凝土的理想材料通常为微粒混凝土, 其力学性能和级配结构与普通混凝土满足较好的相似性, 能满足混凝土

强度模型的相似要求。在微粒混凝土中，粒径为 2.5mm~5.0mm 的粗砂被用作代替普通混凝土中的粗骨料，粒径为 0.15mm~2.5mm 的细砂被用作代替普通混凝土中的细骨料，并以一定的水灰比及配合比组成新型模型材料，其能满足混凝土强度模型的相似要求。

3.3.3 对于混凝土结构强度，其钢筋的应力-应变关系对结构非弹性性能的影响较大。在地震模拟振动台试验中，混凝土结构模型在地震作用下进入非弹性工作时，结构模型的荷载-变形性能、裂缝发展和分布与其钢筋和混凝土粘结性能有关，而裂缝的发展又会影响结构内力重分布，因此模型结构钢筋材料性能应尽可能与原型结构钢筋材料满足相似要求，包括钢筋的屈服强度、极限强度、弹性模量等参数；此外，钢筋应力-应变曲线的形状也应尽量和原型结构钢筋的相应指标相似。当模型采用光面钢筋时，宜作表面刻痕处理。

对于经过冷拉调直的钢筋，为保持钢筋的原有性能，必须进行相应处理以使钢筋恢复到具有明显屈服点和屈服台阶，提高钢筋的延性。

对于高层建筑，其振动台试验模型通常为小比例缩尺模型，一般采用镀锌铁丝代替原型结构钢筋，可采用钢材或紫铜模拟原型结构中的钢材。当采用紫铜模拟时应考虑焊接对紫铜力学性能的影响。

4 试验加载

4.1 一般规定

4.1.1 振动台试验所选择的振动台台面尺寸、有效负载、最大倾覆力矩、最大加速度、最大速度、最大位移、工作频率范围等性能指标应满足试体加载要求。对于小缩比的试体模型，应选择具有较高频率范围的振动台；对大缩比或足尺的试体模型，应选择低频性能较好和较大位移行程的振动台。在振动台负载一定的情况下，大行程的激振器的最大工作频率较低，反之频率较高的激振器其位移行程相对较小。振动台的大位移与高频率特性往往难以兼顾，因此在选用振动台时，应当关注振动台的最大位移和工作频率范围。为满足试验要求，地震模拟振动台的台面尺寸、最大负载、运动参数、最大抗扭转力矩和最大抗倾覆力矩等技术指标应当满足试体模型的平面尺寸、重量、重心位置和加载幅值要求。

4.1.2 对于存在试验条件限制，只有特定的振动台可以使用时，应当根据振动台性能对试体模型进行适当的缩尺，保证试体模型的尺寸、重量、重心位置符合振动台台面尺寸、最大负载、最大倾覆力矩和最大偏心力矩限制。试验加载加速度时程的最大加速度、最大速度和最大位移应在振动台的最大功能范围之内。

4.1.3 多振动台组成的振动台台阵系统具有可移动、满足不同尺寸试体模型加载、可实现多维多点地震动加载的优势，但是振动台子台的移动安装比较耗时费力，因此在试验加载设计中应当考虑振动台子台的布置问题，在试验方案设计阶段应与振动台实验室技术人员进行充分的沟通，确定振动台子台的安装方式和可移动使用范围，确定振动台子台的布置位置和布置方式。

国内有一些振动台台阵可以对激振器进行拆卸和重新布置，以满足不同自由度的加载需求，这类振动台台阵尚需要确定激振器的布置方式。

4.1.4 水下振动台试验中，对于水下振动台运动可能造成影响的因素应予以考虑，例如柔性防水布会对振动台的运动产生干扰，充气式防水气枕的充气压力要根据水深进行适当调节；造波、造流设备所产生的水体流场会受到振动台运动和试体振动的共同影响，在振动台试验中要考虑这些因素对试验效果的影响。

4.2 设备要求

4.2.1 用于振动台试验的振动台设备应具有良好的性能。对于液压振动台，其基本参数和技术要求应符合《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《电动振动台》（GB/T 13310）的规定；对于其它驱动方式的振动台，其基本参数和技术要求可参照《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。

4.2.2 振动台应满足建筑物、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宜控制在 0.01g 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。正弦激励下，振动台空载加速度波形失真度应小于 25%，位移波形失真度应小于 5%；随机振动下，振动台空载加速度波形相关系数应大于 95%，加速度峰值误差应小于 10%。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，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。

4.2.3 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、人工波等，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；在工况管理中应当具备波形的绑定、调幅和频率压缩等功能；对于用户提供的加速度时程和频谱数据，应当具备导入、导出、显示、修改（调幅、滤波、重采样、频率压缩、时间平移等）等功能。

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 0.1g。对于具有竖向运动的振动台，其升降过程中不应产生过大的偏转，以免试体产生过大的倾覆力矩。

4.2.5 子结构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（实时加速度、速度和位移信号）、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。

4.3 试体安装

4.3.1 一般情况下，试体可采用实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，避免试体和临近设施受损。

4.3.2 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实验效果的偏差时，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。

4.3.3 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。

4.3.4 对于浮放于振动台台面的机柜、展柜等试体模型时，应调节地脚螺栓使其与振动台台面可靠的接触，当试体模型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。

4.3.5 当试体上需要安装配重块时，应确保配重块与试体有可靠的连接，配重块与试体之间可采用螺栓、水泥砂浆连接或发泡胶连接。对于多个或多层配重块，当布置于试体产生变形的部位时，宜间隔布置，避免配重块形成整体改变试体刚度或形成“成拱”效应改变配重块的受力分布。当配重块与试体的连接面积较小或不够平整时，应适当加强配重块的连接，避免配重块产生局部振动影响试体的受力。

4.3.6 对于试验中可能产生倒塌或倾覆的结构试体，应采取可靠的安全防护措施。对于重量较轻、体积较小的试体，可以采用吊车用钢丝绳或尼龙吊带对试体进行适当约束；对于可能产生局部迸裂、掉落的试体，宜在振动台台面铺设橡胶板等柔性覆盖层以保护台面；对于需要上人的结构模型，以在柱间设置水平拉索和尼龙网以保护人员安全。对于试验中可能产生整体倒塌的试体模型，必要时可设置辅助性刚性支架对试体模型的运动范围进行约束。对于可能脱落的传感器、安装于试体上的小型仪器等应进行可靠的固定，必要时应采用拴绳、胶带、挡块等措施对其进行防护处理。

4.3.7 在振动台上进行焊接作业时所产生的游动电流可能会对振动台控制器、传感器产生强烈的干扰甚至导致元器件损坏，因此不应在振动台上进行焊接作业。对于振动台台阵试验等大型结构试体，应采用螺栓连接进行振动台上的组合作业。因特殊原因确需在振动台上进行少量焊接时，应确保焊机地线搭接在试体上临近焊点位置处，严禁在振动台台面等任何振动台设备上搭接焊机地线。焊接时应应对振动台作动器、传感器和信号线进行必要的遮盖防护。

4.4 加载工况

4.4.1 振动台试验的信号输入一般采用地震加速度时程，少数情况会采用位移时程、反应谱或功率谱。对于加速度时程，一般选择实际地震记录（天然波），也可以根据结构和场地特征拟合生成人工加速度时程（人工波）。当试验目的是用于对结构进行抗震性能评估时，选用的加速度时程应与结构抗震分析所采用的时程曲线一致，以符合现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB50011 的要求。当缺少必要的场地类别资料或为了研究不同场地条件下的地震响应规律时，可各类场地类别分别选择一定数量的加速度时程，以充分考虑场地类别的影响。当采用拟合的人工加速度时程时，根据《建筑抗震设计规范》GB50011 的要求，其有效持续时间一般为结构基本周期的 5~10 倍，振动台试验中人工加速度时程宜取其上限。加速度时程的幅值最大值宜按《建筑抗震设计规范》GB50011 中的相关规定取用。当试体采用缩尺模型时，台面输入的加速度时程应按模型试体的动力相似关系进行幅值调整和频率压缩。对于振动台台阵试验，进行加速度时程幅值调整和频谱压缩时，并不能保证所对应位移时程与试体的几何相似关系相一致，对于多维多点振动台台阵试验，可能由于子台位移的不一致导致附加的结构内力，在加速度时程选取和处理时，宜同时校核其对应的位移时程是否满足试验加载要求。

同一建筑单元同一平面内质量、刚度分布不对称，或虽在本层平面内对称，但沿高度分布不对称的结构，需要考虑双向水平地震作用下的扭转影响。对于较高的高层建筑、大跨度和长悬臂结构，需要考虑竖向地震作用对结构性能的影响。

4.4.2 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。

4.4.3 试体模型的自振特性也可以采取锤击法、初位移法等手段进行测试，但应注意的是当试体安装在振动台上时，测试结果会受到振动台系统特性的影响，

一般需要同时测试台面的振动并对据此对试体测试结果进行修正。当试体模型在振动台之外进行自振特性测试时，应对试体模型进行可靠的锚固，试体未可靠固定时应考虑试体模型的约束条件对测试结果的影响。

4.4.4 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。但多次加载也会引起试体模型的动力特性改变。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。

4.4.5 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，确保界面力的施加与振动台的加载同步。

4.5 加载控制

4.5.1 在振动台动力系统启动前，应首先启动并设置控制系统使其处于正常工作状态，为了保证系统正常运行，在正式试验前应当进行例行的检查，避免因控制问题导致试体受到冲击而产生损伤。

4.5.2 对于超过振动台系统最大性能的输入信号，有的振动台系统会自动弹出警告，有的振动台系统还能自动对信号进行限幅滤波处理，但大多数振动台系统并不会对原始加速度信号所对应的最大速度和最大位移进行检查，指令超限情况下会导致波形再现精度恶化甚至导致激振器撞缸事故，因此建议在试验前对超出振动台最大功能的输入加速度时程进行适当调整或处理，避免出现波形超限现象。

4.5.3 振动台台阵系统的位移同步性能对于保证多振动台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。

4.5.4 振动台试验过程中试体模型可能产生积累的损伤，导致自振频率产生下降，对于可能产生损伤的试体模型，应当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，以确定是否进行进一步的试验。

4.5.5 振动台试验中随着试体的多次加载，试体连接螺栓可能产生松动，传感器可能发生松动和掉落，因此在试验过程中应当定期检查试体的连接状态和传感器的安装状态，及时修复失效的传感器，必要时对试体的连接螺栓进行紧固。

4.5.6 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。

4.5.7 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备份，避免造成不可恢复的系统更改。

5 试验量测

5.1 一般规定

5.1.1 振动台试验时，试体的加速度、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。

地震模拟振动台试验的测点、测量次数都较多，应采用自动化数据采集设备。

5.1.3 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；根据地震模拟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。

5.1.4 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；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。

5.2 量测仪器基本要求

5.2.1 选用的量测仪表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。

5.2.4-5.2.5 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。

5.2.6 量测仪器的使用频率范围是指在此范围内的频率特性的上升或下降不超过

一定比例值的频率范围，有的以百分数表示，一般提出为 $\pm 10\%$ ，也有的以分贝数表示。

合理选定量测仪器的使用频率范围。地震过程是一个瞬态过程，由于量测仪器本身的瞬态响应，将会使测试结果畸变，为减小波形畸变与高频段失真、在各反应记录中能真实记录数据、在低频段不失真，量测仪器的使用频率范围宜从零频开始且远大于振动台的使用上限频率。一般来说在使用频率的下限为被测振动中最低频率分量的 $1/10$ 以下，上限为观测的被测试体频率上限的 2 倍，就可满足要求。

5.2.10 横向灵敏度是在与传感器敏感轴重直的任何方向受到单位激振时，传感器获得的信号输出量。

5.2.11 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。

5.2.12 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。

5.2.13 子结构振动台试验需要测量试体的反力，用于计算下一步加载目标。可选用高精度反力测量装置实现，但实测反力应低延迟传输给实时计算平台，并应与振动台控制系统采集的数据同步。该反力测量装置安装在振动台与试体之间，与试体和振动台牢固连接，防止松动。

5.2.14 水下振动台试验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。

5.3 量测设计

5.3.2 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。一般情况下，模型的顶层（结构屋

盖)是加速度反应最大的部位;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。输入振动台台面的地面运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模型结构的地震作用。另外,模型各楼层与底梁或底板间的相对位移才是模型结构的真正变形,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。

5.3.3 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,或固定于实验室地面,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。

5.3.4 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。

5.3.5 原型结构在缩尺后,其加载与响应的尺度也会相应发生变化,仪器的性能需要和缩尺后模型需求相匹配,而不是与原型结构匹配,包括:幅值、频谱成分等。

5.3.6 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。

5.3.7 动态数据采集应消除频率混叠。应采用带抗混滤波功能的量测仪表。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 10 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。

5.3.8 截断信号，即截取测量信号中的一段信号，一般会带来截断误差，截取的有限长信号不能完全反映原信号的频率特性。具体地说，会增加新的频率成分，并且使谱值大小发生变化，这种现象称为频率泄漏。应根据实测信号的性质选择合适的窗函数解决频率泄漏问题，如：矩形窗、汉宁窗、凯赛-贝塞尔窗、平顶窗等（见图5）。

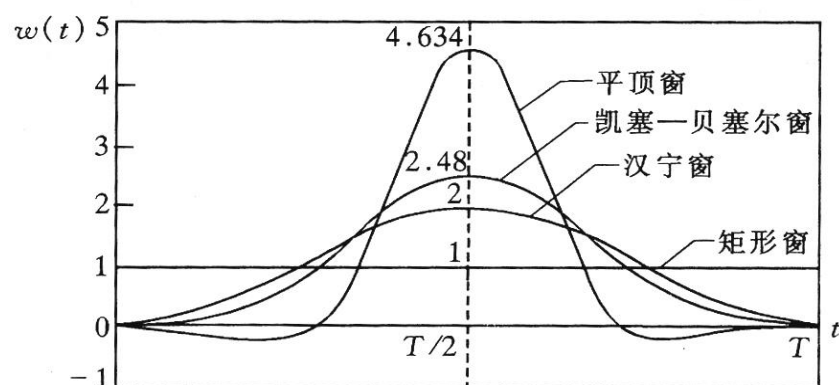


图5 四种窗函数的时域图形

加窗虽然使原信号时域波形发生较大变化，但却更有效地保留了原信号的频率信息。一般来讲，主瓣变宽所造成的泄漏是次要的，而旁瓣变高所造成的泄漏是主要的，它能导致较严重的皱波效应。因此，加窗减少泄漏的副作用是增加了主瓣宽度，但总的效果得到改善。

6 试验结果处理与评价

6.1 一般规定

6.1.1 建筑结构振动台模型试验的加速度反应宜通过分布在试体不同位置、不同高度、不同方向上的加速度传感器直接获取，测量值即为试体的绝对加速度数值。传感器尽量布置在试体质心处。一般来说，加速度传感器的测量值稳定，可以用来推算更多的模型信息。比如，可以对其进行功率谱分析获得模型结构的频率、阻尼比；可以通过不同高度处的加速度峰值与基础加速度峰值之比获得模型结构的动力放大系数；可以通过对加速度数值积分获得模型结构的位移；还可以通过楼层加速度峰值与相应楼层质量的乘积获得模型结构的惯性力分布规律等。各图形应考虑计入结构模型试体进入弹塑性阶段后各次试验依次产生的残余变形影响。

6.1.2 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。

6.2 数据处理与评价

6.2.1 当数据采集系统不能对传感器的标定值、应变计灵敏度系数等进行自动修正时，应在数据处理时作专门的修正。为了消除噪音、干扰和漂移，减少波形失真，应采用滤波、零值均化和消除趋势项等数据处理。在试验过程中获得的测量值均为试体的测量值，若需要获得原型结构的反应值，则需要除以测量物理量对应的相似系数。在此基础上，可考虑台面实测输出加速度峰值与台面设计输入加速度峰值间差异等的影响进行修正。

6.2.2 试体位移反应除采用位移计量测外，也可采用对加速度反应进行二次积分求得。在进行参量变换时，如振动加速度波形通过波形积分求得速度波形，速度波形求得位移波形等，即使是较小的波形基线移动量，在积分运算中也会造成较大的影响，使积分运算结果产生较大的偏差。因此，当用加速度波形通过二次积分求得位移波形时，必须做好消除趋势项和滤波处理。通过加速度测量信号两次积分并进行消除趋势项和滤波处理得到的位移响应与直接用位移传感器测得的位移响应之间存在误差，特别是当加速度测量信号低频成分较多时误差会更大，所以对于低频结构的位移测量应直接采用位移传感器。当采用加速

度测量信号两次积分来获得位移信号时，可将试件相同测点的二次积分位移信号与实测位移信号进行对比，以确定合适的高通滤波截止频率。

6.2.3 传感器用于模型试验中时，其绝对误差直接影响的是缩尺后的模型，而在最后的原型结构响应误差分析时，需要把这部分误差除以测量物理量相似系数以考虑缩尺对误差的影响。

6.2.4 当用白噪声激振法，依据台面输入和试体动力反应，考虑试体实际情况在时域或频域中求取动力特性。自振动力特性时，宜采用分析功能较强的模态分析法。条件不具备时也可采用传递函数或互功率谱法求得试体的自振特性。应根据结构实际情况选取阻尼比的求取方法，可从时域中求取；也可在频域中求取，例如半功率点法、点峰法、双峰法、三点法、二点法、实频和虚频法。

6.2.5 结构振动信号的零点漂移和波形失真问题宜在记录时解决。如记录时不能解决，也可把零漂或失真的信号记录下来，在对结构振动信号进行处理时将带有零漂和失真的信号删除。对结构振动信号进行记录时，记录长度应不少于调频后地震动持时加上 5 倍模型结构基本周期。

利用半功率点法计算结构阻尼比时，一般不取曲线上的第一个峰点，最好选择衰减曲线上的第 3、4 个峰点。

6.2.6 结构动力试验数据在频域处理时，常用的几个统计特征函数为：自相关函数，互相关函数，自功率谱密度（简称自谱）函数，互功率谱密度（简称互谱）函数，傅里叶谱（也称傅氏谱）传递函数和相干函数。

对结构振动信号进行频域分析时，频率上限应选 3~5 倍或 5~10 倍的奈奎斯特频率（Nyquist frequency）。在频域对结构信号进行互谱分析来求结构高振型特性的具体做法是：如果结构上的测点是按 1、3、5……层布点时，可选第 3 层测点为参考点，其他测点信号与第 3 层测点的信号进行互谱分析，给出各测点信号幅值的正负号，然后将各幅值归一化处理后画出除第一振型外的其他振型。

6.2.7 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《建筑与市政工程抗震通用规范》GB55002、《建筑抗震设计规范》GB50011、《建筑机电工程抗震设计规范》GB50981、

《混凝土结构设计规范》GB50010、《钢结构设计标准》GB50017、《城市桥梁抗震设计规范》CJJ166、《非结构构件抗震设计规范》JGJ339、《建筑消能减震技术规程》JGJ297、《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ3等相关规范或标准规定。例如，由位移时程反应可以计算结构的层间位移角，可结合试验现象依据《建筑抗震设计规范》GB50011 相关规定对结构的抗震性能进行评价。

6.2.8 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 安全措施

7.1 一般规定

7.1.2 通过大量振动台试验实践证实，试验过程中的安全防护措施是非常重要的；为保证试验的顺利实施，安全措施没有得到保证情况下不允许进行试验；试验时按规定设置危险区域、防坠落、防漏电、防火等各种安全防护警示标识。

7.1.3 试验中安全事故，多发生在试体吊装过程中，特别是雇用临时工作人员更易出现安全事故，本标准要求必须遵守国家有关的安全操作规定。

7.1.4 试验中使用的设备，特别是大型的复杂设备、精密的仪器仪表都有其具体的操作规定，在实际试验中必须遵守相应的安全操作规定。

7.2 具体措施

7.2.2 试体固定、连接用的螺栓应经过抗拉、抗剪等验算，确保螺栓始终处于弹性范围内且能提供试体固定需要的足够的预紧力，保证试体边界条件满足试验要求。

7.2.4 水下振动台的电气、液压设备位于水体下方，应设置多道防水设施防止因防水气囊破裂、防水措施失效而导致的试验事故。

7.2.6 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。

7.2.7-7.2.8 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。

7.2.9-7.2.11 振动台试验时由于试体在整个试验过程处于运动状态，特别是在试验最后阶段试体有倒塌的危险，因此整个试验过程采取相应安全措施尤为重要，以保证振动台系统及试验人员的安全。吊车等起重设备、升降平台等操作应遵守相应规程。

7.2.12 试体经过试验，部分构件或局部结构可能已经破坏，吊离振动台的吊装方案应考虑试体破坏的影响，确保吊装安全。