|  |  |
| --- | --- |
| ICS | 91.120.25 |
| CCS | P 15 |

|  |
| --- |
|  |

中华人民共和国国家标准

GB/T XXXXX—XXXX



工程结构抗震混合试验方法标准

Standard for seismic hybrid test method of engineering structures

(征求意见稿)

XXXX - XX - XX发布

XXXX - XX - XX实施



目 次

[前言 III](#_Toc132890865)

[1 范围 1](#_Toc132890866)

[2 规范性引用文件 1](#_Toc132890867)

[3 术语和定义 1](#_Toc132890868)

[4 总体要求 3](#_Toc132890869)

[4.1 一般要求 3](#_Toc132890870)

[4.2 抗震混合试验的分类 3](#_Toc132890871)

[4.3 抗震混合试验系统基本构成 3](#_Toc132890872)

[4.4 抗震混合试验的一般流程 4](#_Toc132890873)

[4.5 试验安全措施 5](#_Toc132890874)

[4.6 测量系统 5](#_Toc132890875)

[5 模型设计 5](#_Toc132890876)

[5.1 一般要求 5](#_Toc132890877)

[5.2 数值模型 5](#_Toc132890878)

[5.3 试验模型 5](#_Toc132890879)

[6 拟动力混合试验 6](#_Toc132890880)

[6.1 一般要求 6](#_Toc132890881)

[6.2 求解算法 8](#_Toc132890882)

[6.3 设备性能要求 8](#_Toc132890883)

[6.4 边界协调方法 8](#_Toc132890884)

[6.5 误差来源及分析 11](#_Toc132890885)

[6.6 试验步骤 11](#_Toc132890886)

[7 实时混合试验 11](#_Toc132890887)

[7.1 一般要求 11](#_Toc132890888)

[7.2 求解算法 11](#_Toc132890889)

[7.3 设备性能要求 12](#_Toc132890890)

[7.4 边界协调方法 12](#_Toc132890891)

[7.5 时滞补偿 12](#_Toc132890892)

[7.6 误差来源及分析 12](#_Toc132890893)

[7.7 试验步骤 13](#_Toc132890894)

[8 振动台混合试验 13](#_Toc132890895)

[8.1 一般要求 13](#_Toc132890896)

[8.2 求解算法 14](#_Toc132890897)

[8.3 设备性能要求 14](#_Toc132890898)

[8.4 边界协调方法 14](#_Toc132890899)

[8.5 时滞补偿 15](#_Toc132890900)

[8.6 误差来源及分析 15](#_Toc132890901)

[8.7 试验步骤 15](#_Toc132890902)

[9 数据处理和试验报告 15](#_Toc132890903)

[9.1 数据处理 15](#_Toc132890904)

[9.2 试验报告 16](#_Toc132890905)

[附录A （资料性） 试验子结构相似律 17](#_Toc132890906)

[附录B （资料性） 向量式有限元方法 19](#_Toc132890907)

[附录C （资料性） 模型在线更新混合试验方法 21](#_Toc132890908)

[附录D （资料性） 在线数值模拟方法 22](#_Toc132890909)

[附录E （资料性） 时间积分方法 23](#_Toc132890910)

[附录F （资料性） 时间积分方法的稳定性和精度分析 25](#_Toc132890911)

[附录G （资料性） 空间加载坐标变换矩阵 27](#_Toc132890914)

[附录H （资料性） 实时混合试验稳定性分析方法 29](#_Toc132890915)

[附录I （资料性） 时滞补偿方法 30](#_Toc132890916)

[附录J （资料性） 混合试验报告 33](#_Toc132890917)

1. 前言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中华人民共和国住房和城乡建设部提出。

本文件由全国建筑构配件标准化技术委员会（SAC/TC 454）归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

工程结构抗震混合试验方法标准

* 1. 范围

本文件规定了工程结构抗震混合试验方法的术语和定义、总体要求、模型设计、拟动力混合试验、实时混合试验、振动台混合试验、数据处理和试验报告等。

本文件适用于建筑物、构筑物、桥梁等基础设施和设备的抗震混合试验。

* 1. 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；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/T 21116 液压振动台

GB/T 13309 机械振动台 技术条件

GB/T 13310 电动振动台

JGJ/T 101—2015 建筑抗震试验规程

* 1. 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

抗震混合试验 **seismic hybrid test**

将数值动力分析和物理试验加载结合起来模拟工程结构、非结构构件或设备地震响应的试验。

子结构 **substructure**

整体工程结构的一部分，属性包括几何尺寸、材料、荷载和边界条件等，分为数值子结构和试验子结构。

数值子结构 **numerical substructure**

整体工程结构中通过数值方法进行求解的部分。

试验子结构 **experimental substructure**

整体工程结构中通过物理试验进行测试的部分。

协调器 **coordinator**

组织各个子结构协同加载或分析以实现整体工程结构动力响应的平台。

时间积分方法 **time integration algorithm**

对动力系统在时间域上进行离散，并按照一定差分规则进行求解的数值方法。

拟动力混合试验 **pseudo-dynamic hybrid test**

忽略试体的率效应而采用拟静力加载方式进行的混合试验。

实时混合试验 **real-time hybrid test**

考虑试体的率效应而采用作动器进行真实速率加载的混合试验。

振动台混合试验 **shaking table hybrid test**

考虑试体的率效应而采用地震模拟振动台进行动力加载的混合试验。

边界条件  **boundary condition**

子结构与地面之间，以及子结构之间在加载或分析过程中需要保持平衡和协调的条件。

时滞  **time delay**

采用不同方式计算或加载的子结构之间在时间尺度上的差异，包括延时和滞后。

时滞补偿 **delay compensation**

为保证实时或振动台混合试验子结构之间同步而采取的减小时滞及其影响的处理方式。

荷载控制 **loading control**

以控制荷载量进行的加载方式。

[来源：JGJ/T 101—2015，2.1.9]

变形控制 **deformation control**

以控制变形量进行的加载方式。

[来源：JGJ T 101—2015，2.1.10]

等效力 **equivalent force**

将离散的结构运动方程等效为未知状态量的非线性方程，方程中与未知状态量无关的所有项的统称。

稳定性  **stability**

混合试验系统在试验过程中误差有界、系统响应不发散的能力。

目标量 **target**

由计算得到的需要通过加载装置在试体上复现的输入值。

响应量 **response**

试体加载后通过测量系统测得的反馈值。

相似律 **laws of similitude**

试体真实模拟实际结构所必须遵循的准则，包括空间、时间、强度、变形等。

模型在线更新 **model online update**

混合试验进行时，根据试体实测数据对数值子结构的力学参数进行修正，以减小数值子结构系统性偏差的方法。

* 1. 总体要求
     1. 一般要求
        1. 工程结构抗震混合试验的对象是可用动力方程描述的结构、非结构或设备。
        2. 子结构的划分应综合考虑试验设备条件并满足试验目的，各子结构间的边界应满足变形协调和力平衡条件，宜按下列原则确定：

a） 选取工程结构行为复杂、难以准确模拟的部分作为试验子结构进行物理试验，选取易于模拟的部分作为数值子结构进行数值模拟；

b） 对于有明确反弯点的构件，在反弯点处划分子结构；

c） 无明确反弯点的构件，在远离塑性区2倍～3倍塑性区特征尺寸的位置划分子结构。

* + - 1. 抗震混合试验应选择具有代表性的地震动时程。
      2. 抗震混合试验所采用的时间积分方法及步长应满足方法的稳定性和精确性要求。
      3. 抗震混合试验所采用的仪器设备，应按规定进行计量校准，且在有效期内。
      4. 抗震混合试验除符合本标准外，尚应符合国家和行业其他有关标准的规定。
    1. 抗震混合试验的分类
       1. 抗震混合试验分为拟动力混合试验、实时混合试验和振动台混合试验。
       2. 拟动力混合试验应符合下列规定：

a） 采用闭环自动控制的加载装置进行加载；

b） 采用试体的实测变形或荷载作为反馈值求解动力方程。

* + - 1. 实时混合试验、振动台混合试验应符合下列规定：

a） 数值子结构求解满足实时性要求；

b） 采用高速数据传输方式进行数据交换；

c） 实时混合试验的试验子结构采用动态作动器加载；

d） 振动台混合试验的试验子结构采用地震模拟振动台加载；

e） 采用时滞补偿技术以满足稳定性要求。

* + 1. 抗震混合试验系统基本构成
       1. 抗震混合试验系统包括数值子结构、试验子结构和协调器，并应符合下列规定：

a） 协调器用于保证子结构之间的协调和平衡；

b） 协调器与子结构之间应有明确的模型参数协调界面和数据交互模式，协调器为子结构提供目标量，同时接收子结构的响应量；

c） 数值子结构求解平台应具有自动化的逐步输入和输出接口；

d） 试验子结构包括试体、加载与控制装置、测量装置，以及提供支撑的反力装置和保护装置。

* + - 1. 数值子结构、试验子结构和协调器之间宜采用点对点的数据通讯方式。
      2. 协调器应按照足尺结构进行动力方程求解，缩尺模型的输入和反馈应按照相似律进行调整后反馈给协调器。
      3. 实时混合试验和振动台混合试验宜按附录A规定的相似律确定相似关系。
    1. 抗震混合试验的一般流程

抗震混合试验的一般流程包括：划分子结构、确定协调器和时间积分方法、确定加载控制和测量装置、进行模拟仿真、进行预试验、正式试验、试验数据分析，如图1所示，具体包括：

a） 子结构的划分应符合经济性、合理性和稳定性的要求；

b） 根据实际需求选择协调器和时间积分方法，积分步长和参数的选择应满足稳定性要求，宜选择具有数值阻尼和无条件稳定的时间积分方法；

c） 确定合理的输入输出和加载测量方案，控制方法可根据构件刚度选择荷载控制或者变形控制；

d） 试验前，宜进行抗震混合试验的数值仿真，确认抗震混合试验的精度和系统的可靠性；

e） 进行预试验，分析模型误差、边界误差和加载测量误差对整体响应的影响；

f） 进行正式试验；

g） 分析试验数据，撰写试验报告。



图1 抗震混合试验一般流程

* + 1. 试验安全措施
       1. 抗震混合试验安全措施应符合JGJ/T 101-2015第8章的规定。
       2. 在进行抗震混合试验时，加载系统应设置限值保护。
    2. 测量系统
       1. 拟动力混合试验的测量系统应具备下列能力：

a） 试体各测量值，应采用自动化测量仪器进行数据采集，数据采样频率不应低于0.5Hz；

b） 试体控制变量、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。

* + - 1. 实时混合试验的测量系统应具备下列能力：

a） 试体各测量值，应采用自动化测量仪器进行数据采集，数据采样频率不应低于500Hz；

b） 试体控制变量、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。

* + - 1. 振动台混合试验的测量系统应具备下列能力：

a） 测量仪器应根据试体的动力特性、动力反应、振动台的性能以及所需的测试量参数来选择；

b） 测量仪器的频率范围，其下限应低于试验用地震记录最低主要频率分量的1/10，上限应大于最高有用频率分量值；

c） 测量仪器动态范围应大于60dB；

d） 测量信号分辨率应小于需采集的最小振动幅值的1/10；

e） 量测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；

f） 附着于试体上的传感器，其重量和体积不应明显影响试体的动力特性。

* 1. 模型设计
     1. 一般要求
        1. 抗震混合试验的模型包括数值模型和试验模型，分别用于数值子结构和试验子结构。
        2. 数值模型和试验模型应满足抗震混合试验的目的并综合考虑效率、精度和试验安全等因素。
        3. 实时混合试验和振动台混合试验的数值模型和试验模型，应保持加载、测量、识别、更新、模拟和数据传输的实时性，且不应影响系统的稳定性。
     2. 数值模型
        1. 数值模型应充分表征数值子结构力学特征，宜采用有限元方法进行求解，当采用向量式有限元方法时参考附录B。
        2. 当数值模型中包含与试验模型相同力学特性的构件时，宜采用模型在线更新方法以提高数值模型的计算精度，具体步骤参见附录C且符合下列规定：

a） 在构件、截面或材料层次上开展本构模型在线识别与更新；

b） 模型在线更新时间不超过单步试验耗时的1/3；

c） 数值模型与试验模型间有明确的参数协调和数据交互模式；

d） 对于非完整边界条件的试验模型，可采用在线数值模拟方法以提高模拟精度，参见附录D。

* + 1. 试验模型
       1. 试验模型应有合理的结构特征、构造措施和边界条件，必要时应进行局部处理，以满足试验子结构安装、加载、测试和安全等需求。
       2. 试验模型在满足抗震混合试验目标及实验室加载能力条件下，宜采用足尺或较大比例尺模型，并符合下列规定：

a） 振动台混合试验的试验模型比例尺不小于1/15；

b） 其他类型混合试验的试验模型比例尺不小于1/4。

* + - 1. 缩尺试验模型应满足构件、截面或材料层次的力学等代关系或按照相似律进行设计，相似律参见附录A。
      2. 试验模型应满足试验装置与加载设备的设计受力条件、刚度条件和位移约束条件。
  1. 拟动力混合试验
     1. 一般要求

率效应不明显的工程结构可采用拟动力混合试验方法。

拟动力混合试验采用下列三种架构：

a） 当协调器求解动力平衡方程时，各子结构应按照静力过程进行分析或加载，如图2所示；

b） 当采用数值子结构代替协调器时，数值子结构应采用逐步积分的动力时程分析，如图3所示；

c） 当协调器仅用于协调和平衡边界时，试验子结构应避免迭代，如图4所示。



图2 协调器为数值子结构（试验子结构可为振动台试体）



图3 协调器求解动力方程



图4 协调器仅用于协调子结构

各数值子结构可采用不同数值方法求解，各试验子结构可采用不同的试验加载系统。

各子结构可分布在不同的实验室开展模拟或试验，形成设备共享的分布式子结构混合试验，如图5所示。



图5 分布式子结构混合试验

* + 1. 求解算法

拟动力混合试验的动力平衡方程可参考附录E选择OS方法进行求解。

当选择显式时间积分方法时，应参考附录F检验稳定性和精确性。

* + 1. 设备性能要求

拟动力混合试验一般采用作动器进行加载，也可采用具有变形和荷载控制功能的千斤顶进行加载。

加载系统传感器变形测量相对误差最大允许值为示值的±1%，荷载测量相对误差最大允许值为示值的±1%。

拟动力混合试验的测量系统应符合4.6.1的规定。

* + 1. 边界协调方法

按照下列方法进行拟动力混合试验边界协调：

a） 数值子结构可采用边界约束或荷载的形式实现边界条件；

b） 试验子结构应采用加载装置实现边界条件模拟；

c） 在边界协调精度允许时，可采用图6、图7、图8所示的边界协调加载简化方法。

边界协调符合下列条件：

a） 对动力自由度有直接影响的边界条件，应满足严格的平衡和协调条件；

b） 对动力自由度有间接影响的边界条件，宜满足严格的平衡和协调条件，当确认对动力行为影响不大时，可适当放松；

c） 对动力自由度无影响的边界条件，可采用反弯点加载、重叠领域加载等放松的方式，以简化加载装置。

试验前，应对拟动力混合试验的边界协调方式进行检验，并符合下列规定：

a） 采用边界协调简化方案的混合试验应进行边界协调检验，以确定简化方案造成的误差；

b） 边界协调检验应采用数值模拟进行仿真，分为线弹性模型检验和弹塑性模型检验，混合仿真结果应与相应的整体结构数值模拟对比；

c） 混合仿真中的试验子结构应采用数值模拟的方式进行，所采用的方法应能准确模拟试验子结构的加载条件；

d） 边界协调检验应分为宏观变形响应检验和局部荷载响应检验；

e） 宏观变形响应检验包括所直接控制的动力自由度位移响应、通过简化协调方法实现的静力自由度变形响应。与整体数值模型相比，动力自由度变形响应误差不应超过5%，通过简化方法实现的静力自由度变形响应误差不宜超过20%；

f） 局部荷载响应检验包括边界附近节点的弯矩，以及其他反映构件或结构的力学指标，局部荷载响应误差不宜超过30%。

需要控制转动自由度的试体，可采用下列三种方式之一进行加载。

a） 利用两个水平方向作动器间的协调运动模拟试体的水平自由度和转动自由度，利用垂直方向作动器对轴向自由度进行加载，如图6所示。

b） 利用一个水平方向作动器模拟试体的水平自由度，利用两个垂直作动器通过刚臂协调竖向和转动自由度的加载，如图7所示。

c） 可采用四连杆装置约束转动自由度的转动，如图8所示。

d） 采用多台作动器进行多自由度加载时，可按照附录G的空间加载坐标变换矩阵进行笛卡尔坐标系和作动器坐标系之间的变换。

拟动力混合试验的加载应符合下列规定：

a） 采用试体实测变形或荷载作为控制的反馈信号；

b） 反力系统应具有足够的强度和刚度，变形一般不超过1/2000的跨度或高度。



标引序号说明：

1——反力墙；

2——反力台座；

3——作动器；

4——反力架；

5——试件；

6——刚臂；

7——随动装置。

图6 反力架配合作动器的边界协调加载简化方法



标引序号说明：

1——反力墙；

2——反力台座；

3——作动器；

4——试件；

5——刚臂。

图7 反力台座配合作动器的边界协调加载简化方法



标引序号说明：

1——反力墙；

2——反力台座；

3——作动器；

4——四连杆加载装置；

5——随动装置；

6——试件；

7——千斤顶。

图8 四连杆配合作动器对墙体的边界协调加载简化方法

* + 1. 误差来源及分析

拟动力混合试验误差主要来自于时间积分方法误差、模型简化误差、边界协调简化误差、试验加载控制与测量误差等。

边界协调简化误差主要来自于边界条件变化对子结构力学特征的影响。

试验加载误差主要来源于加载控制系统的控制误差、加载反力系统造成的各种非线性影响和约束系统的摩擦力等，应满足下列条件：

a） 加载系统的实际变形控制相对误差最大允许值为预测最大位移的±1%；

b） 加载系统的实际荷载控制相对误差最大允许值为预测最大荷载的±1%；

c） 宜采用线性修正的方式修正加载误差；

d） 反力系统和约束系统的摩擦系数不超过0.01。

在拟动力混合试验中，应对仪表布置、支架刚度、荷载最大输出量、限位等采取减小试验系统误差的措施。

* + 1. 试验步骤

拟动力混合试验应按4.4进行，并应符合下列规定：

a） 根据子结构力学特征确定边界协调的实施方案；

b） 对拟动力混合试验开展数值仿真，其试验子结构模拟应符合加载条件，并反映边界协调的实施过程，数据交换应依托实际的硬件设备。

* 1. 实时混合试验
     1. 一般要求

对于率效应显著的速度相关型试件，应采用实时混合试验以准确反映试件的力学性能。

数值子结构应实时计算，保证与试验子结构加载的同步，可采用简化模型以满足计算效率要求。

实时混合试验中的试验子结构具备下列条件：

a） 采用具备实时反馈控制系统及动态作动器的加载设备对试件进行实时加载；

b） 宜采用变形控制加载，荷载控制加载时应采用专门措施；

c） 反力系统应具有足够的刚度，自振频率应不小于作动器油柱共振频率的2倍。

实时混合试验的加载方法应符合下列规定：

a） 积分步长不小于加载系统采样周期2倍时，应在每个积分时间步内分子步加载，可采用对目标位移线性插值方法；

b） 积分步长小于加载系统采样周期2倍时，可每积分步发送一次命令。

* + 1. 求解算法

实时混合试验的动力平衡方程可根据实时加载要求参考附录E选择显式方法进行求解。

当选择隐式积分方法时，可采用等效力控制方法求解，具体步骤包括：

a） 采用时间积分方法将动力平衡方程写成式（1）的等效静力形式；

b） 将式（1）右侧的等效力作为加载目标量进行控制加载，并求解结构动力响应；

****** （1）

式中：

|  |  |
| --- | --- |
|  | ——第*i+*1步的位移向量，单位为米（m）; |
|  | ——第*i+*1步的混合体系等效力，单位为牛顿（N）； |
|  | ——数值子结构刚度矩阵，单位为牛顿每米（N/m）； |
|  | ——试验子结构反力，单位为牛顿（N）； |
|  | ——数值子结构静反力，单位为牛顿（N）； |
|  | ——第*i+*1步的速度向量，单位为米每秒（m/s）。 |

c） 力-位移转换系数可由数值子结构初始刚度、试验子结构初始刚度和拟动力刚度计算确定，并在试验过程中保持不变；

d） 等效力控制器可采用比例-积分控制器或滑动模态控制器；

e） 应依据试件性能将等效力命令进行插值，以真实反映率效应相关试件性能。

* + 1. 设备性能要求

实时混合试验一般采用动态作动器进行加载，动态作动器工作频率不宜低于20Hz，时滞不宜超过30ms，加载速率应满足试验率效应需求。

加载系统传感器变形测量相对误差最大允许值为示值的±1%，荷载测量相对误差最大允许值为示值的±1%。

实时混合试验宜采用实时环境求解数值子结构，并实现与控制器的实时同步数据传输。

实时混合试验的测量系统应符合4.6.2的规定。

* + 1. 边界协调方法

实时混合试验边界协调方法可按6.4实施。

实时混合试验边界协调方法宜简单有效，避免作动器由于过约束或相互干涉影响加载系统的稳定性。

* + 1. 时滞补偿

实时混合试验应考虑时滞的影响，依据系统性能进行时滞补偿，使其满足稳定性和精确性要求，可按附录H进行稳定性分析。

系统时滞的确定可采用离线方法估计定常时滞，采用在线方法估计变化时滞。

常用的时滞补偿方法包括：多项式外插补偿、逆模型补偿、自适应时间序列时滞补偿，具体步骤参见附录I，并符合下列条件：

a） 多项式外插补偿的阶数宜不大于4，多项式系数应根据实测时滞设定；

b） 逆模型补偿应防止高频放大造成的失稳；

c） 时滞变化的加载系统宜采用自适应时滞补偿算法提高补偿效果，可选用自适应时间序列时滞补偿方法。

* + 1. 误差来源及分析

实时混合试验时，应减小试验加载误差的影响，宜考虑时间积分方法、模型简化误差、边界协调简化误差影响。

实时混合试验应根据试验数据评价试验时滞，时滞计算可采用频域评价或互相关评价指标。当互相关评价指标为0时，应采用频域评价指标进行补充计算。

宜采用均方根误差和峰值误差评价实时混合试验加载准确性。

实时混合试验容许误差应根据结构的重要性、试验子结构的比例、加载设备精度、试验条件等因素确定，时滞不宜超过10ms，均方根误差不宜超过15%，峰值误差不宜超过5%。

* + 1. 试验步骤

实时混合试验应按4.4进行，并符合下列规定：

a） 根据子结构力学特征确定边界条件的实现方案；

b） 实时混合试验前，应进行数值仿真，根据动力加载装置的实测传递函数确定合适的时滞补偿方法和控制参数，当试体具有强烈非线性时，宜采用自适应控制技术；

c） 将数值子结构的计算程序从宿主机编译至目标机，数值模型应在规定时步内完成计算；

d） 开展预试验，计算试验时滞，并分析时滞影响；

e） 实施过程中，宜根据作动器的输入信号与反馈信号的异常值判断是否立即停止试验。

* 1. 振动台混合试验
     1. 一般要求

振动台混合试验采用地震模拟振动台对试验子结构进行实时动力加载，其余部分作为数值子结构进行模拟计算，可应用于包括地基-结构相互作用、多跨结构动力响应、轨道交通列车-桥梁系统动力相互作用、调谐减震建筑结构动力分析等场景。

振动台混合试验系统由振动台物理加载子系统、数值仿真计算子系统、数据采集与传输子系统三个子系统组成，如图9所示。



图9 振动台混合试验系统构成

振动台混合试验应保证数值仿真的模拟精度和计算效率、振动台的同步精确加载、试验子结构与数值子结构边界的数据采集与交互的实时性。

振动台应根据试验子结构的尺寸、质量以及试验要求选用。

振动台混合试验应考虑振动台加载误差、试验子结构与数值子结构边界复现误差的影响，根据振动台与试验子结构特性进行控制，使其满足稳定性和精确性要求。

实时性难以满足时可选用数值子结构与试验子结构迭代加载的离线迭代方法，如图10所示。



图10 振动台离线迭代混合试验基本流程

振动台混合试验的数值模型除应符合5.2的规定，还符合下列规定：

a） 不满足实时计算要求的数值模型，选用计算任务分解策略、代理模型方法或并行计算，实现数值实时计算；

b） 数值模型积分步长大于控制信号采样周期时，得到目标量应采用插值方法生成与控制信号采样周期一致的加载信号；

c） 数值子结构的模型参数选取应接近于真实结构参数，可使用模型在线更新算法对数值模型参数进行更新。

* + 1. 求解算法

振动台混合试验的动力平衡方程可根据实时加载要求参考附录E选择显式方法进行求解。

时间积分方法宜选择计算精度高、稳定性好、计算效率高、含有数值阻尼的算法。

* + 1. 设备性能要求

振动台混合试验中使用的液压振动台、机械振动台、电动振动台应分别满足GB/T 21116、GB/T 13309、GB/T 13310中对设备性能的规定。

振动台的时滞宜小于50ms。

振动台混合实验宜采用实时环境求解数值子结构，并实现与控制器的实时数据传输。

振动台混合试验的测量系统应符合4.6.3的规定。

* + 1. 边界协调方法

振动台混合试验的数值子结构和试验子结构的边界应通过振动台台面实现协调和平衡条件。

在水平单自由度振动台混合试验中，数值子结构与试验子结构的交界面宜选取在只有平动位移，而转动位移可忽略的位置。

在多自由度的振动台混合试验中，数值子结构与试验子结构的交界面宜根据振动台的加载自由度选择，使交界面的主要位移响应可在振动台上实现。

采用多个振动台进行振动台混合试验时，数值子结构与试验子结构每个交界面参照8.4.2或8.4.3选取位移并实现边界条件。

为实现边界平衡条件，按下列规定选择合适的反馈力测量方案：

a） 试验子结构的反馈力为振动台内置的测力计所测数据减去台面惯性力；

b） 当试验子结构较小时，可将试验子结构安装于辅助平台上，并将该辅助平台通过测力计固定于振动台的台面，即可通过测力计测量试验子结构的反力；；

c） 对于试验子结构复杂测力情况，可以采集易测响应量通过实时反演算法求解获取反馈力；

d） 必要时，可在试件与振动台联接处增加多向力传感器，获取垂向力和弯矩的反馈。

* + 1. 时滞补偿

应根据振动台试验系统的动力特性，参考7.5选择合适的补偿方法。

* + 1. 误差来源及分析

振动台混合试验的误差主要包括时间积分方法误差、振动台控制误差、数值子结构建模误差和子结构之间边界协调误差。

测量边界协调物理量的传感器，在试验前应进行严格标定和校准，保证试验的精度。

试验误差应参考7.6.3和7.6.4进行分析和评价。

* + 1. 试验步骤

振动台混合试验应按4.4进行，并符合下列规定：

a） 振动台混合试验前，应进行数值仿真，根据动力加载装置的实测传递函数确定合适的时滞补偿方法和控制参数，当试体具有强烈非线性时，宜采用自适应控制技术；

b） 设计边界反馈力测量方案，安装力测量装置；

c） 将数值子结构的计算程序从宿主机编译至目标机，数值模型应在规定时步内完成计算；

d） 进行预试验，计算试验时滞，并分析时滞影响；

e） 按顺序依次启动：数据采集与传输子系统的程序、数值仿真计算子系统的程序、振动台物理加载子系统的程序；

f） 混合试验结束时，按顺序依次停止：振动台物理加载子系统的程序、数值仿真计算子系统的程序、数据采集与传输子系统的程序；

g） 应确保振动台控制面板的超限紧急制动功能处于开启状态，以防止试验过程中因振动台失稳导致的试验子结构或仪器损坏；

h） 实施过程中，应密切关注振动台的输入信号与反馈信号，若出现异常应立即停止试验。

* 1. 数据处理和试验报告
     1. 数据处理

应对试验数据进行处理和分析，完整描述工程结构在不同水准地震下的行为表现，提供判断工程结构抗震性能的技术依据。

试验数据分析前，应对数据进行下列处理：

a） 根据传感器的标定值及应变计的灵敏系数等对试验数据进行修正；

b） 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。

应对试验数据进行图形处理，各图形应考虑计入结构进入弹塑性阶段后各次试验依次产生的残余变形影响。主要图形数据宜包括基底总剪力-顶端水平位移曲线图、层间剪力-层间水平位移曲线图、试体各质点的位移时程曲线图和恢复力时程曲线图、各地震水准损伤分布图、能力需求分析曲线图。

应分析获取各地震水准结构基底总剪力最大值、顶端水平位移最大值、层间位移最大值，并按JGJ/T 101-2015 中5.4.2和5.4.3的规定获取试体开裂、屈服、极限和破坏时的基底总剪力、顶端位移、层间位移和相应的最大地震加速度。

振动台混合试验采用白噪声确定试体自振频率和阻尼比时，宜通过自功率谱或传递函数分析求得，试体振型宜通过互功率谱或传递函数分析确定。

振动台混合试验试体的位移响应量宜通过位移传感器直接量取，也可对实测速度反应时程进行积分求取绝对位移，但应采用低频特性良好的速度传感器，并在积分前消除趋势项和进行滤波处理。

* + 1. 试验报告

应明确指出试验目的，包含检验结构的抗震性能需求，在报告中应对试验中得到的地震响应量进行专项描述。

应详细给出试验采用的地震动记录信息，包括地震动时程、峰值强度、反应谱、与设计反应谱的对比等。

应说明测试的地震动水准、强度，以及试件的全部加载历程。

应明确说明试验采用的数值算法及其参数，说明试验中的算法精度和误差。

应包含试验设备信息，包括但不限于作动器精度、作动器能力、油源信息和加载架形式等。

应包含试验误差分析。

应提供完整的加载数据和量测数据记录，包括但不限于作动器的力、位移记录，试件变形、应变记录等。

可参考附录J进行撰写。

1. （资料性）  
   试验子结构相似律

A.1 试验子结构相似律应符合下列规定：

a） 缩尺模型按力学基本方程或量纲分析法建立相似律；

1. 试验子结构与数值子结构在相似律上协调。

A.2 采用缩尺模型的拟动力混合试验和实时混合试验的试验子结构相似律宜根据表A.1选用，并应符合下列规定。

a） 拟动力混合试验应保证试验子结构基本力学特性的相似，实时混合试验和振动台混合试验还应保证试验子结构动力特性和动力荷载特性的相似。

b） 人工模拟质量的等效质量密度的相似系数******应按式（A.1）、（A.2）计算确定。

****** （A.1）

****** （A.2）

式中：

******——人工模拟质量的等效密度相似系数；

******——人工模拟质量施加于模型上的附加材料的密度，单位为千克每立方米（kg/m3）；

******——模型材料的密度，单位为千克每立方米（kg/m3）；

******——原型材料的密度，单位为千克每立方米（kg/m3）；

******——密度相似系数；

******——弹性模量相似系数；

******——几何尺寸相似系数；

******——密度相似系数。

表A.1 拟动力混合试验和实时混合试验的试验子结构相似律

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 类型 | 物理量 | | 试验子结构相似律 | |
|  |  | | 拟动力混合试验 | 实时混合试验 |
| 材料性能 | 应变 |  | 1 | 1 |
|  | 应力 | （N/m2） |  |  |
|  | 弹性模量 | （N/m2） |  |  |
|  | 泊松比 |  | 1 | 1 |
|  | 质量密度 | （kg/m3） |  |  |
| 几何性能 | 几何尺寸 | （m） |  |  |
|  | 线位移 | （m） |  |  |
|  | 角位移 | （rad） | 1 | 1 |
|  | 面积 | （m2） |  |  |
| 荷载和内力 | 集中荷载 | （N） |  |  |
|  | 线荷载 | （N/m） |  |  |
|  | 面荷载 | （N/m2） |  |  |
|  | 力矩 | （N·m） |  |  |
| 动力特性 | 时间 | （s） | － |  |
|  | 频率 | （Hz） |  |  |
|  | 重力加速度 | （m/s2） |  | 1 |
|  | 速度 | （m/s） |  |  |
|  | 加速度 | （m/s2） |  | 1 |

A.3 振动台混合试验的试验子结构相似律符合下列规定。

a） 当模型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，宜采用表A.2中弹塑性模型相似律；实际试验时可采用人工质量模拟的弹塑性模型，受振动台承载能力限制时，可采用实用弹塑性模型。

b） 对于可忽略重力加速度影响的模型和只涉及弹性范围工作的弹性模型，可采用表A.2中忽略重力效应的弹性模型的相似律。

表A.2 振动台混合试验的试验子结构相似律

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 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 |  |  |  |  |
| 弹性模量 |  |  |  |  |
| 质量密度 |  |  |  |  |
| 时间 |  |  |  |  |
| 频率 |  |  |  |  |
| 重力加速度 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 位移 |  |  |  |  |
| 速度 |  |  |  |  |
| 加速度 | 1 | 1 |  |  |
| 应力 |  |  |  |  |
| 应变 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 力 |  |  |  |  |
| 能量 |  |  |  |  |

1. （资料性）  
   向量式有限元方法

B.1 向量式有限元方法应按下列步骤进行：

a） 采用质点点值描述待分析结构参数；

b） 采用途径单元描述质点的运动轨迹；

c） 采用虚拟的逆向运动获得单元纯变形，并根据质点位置向量计算单元内力；

e） 根据运动控制方程计算下一时刻质点位置向量，再利用该位置向量计算单元内力；按此步骤逐步循环直至计算完成。

B.2 质点的运动控制方程按式（B.1）计算：

****** (B.1)

式中：

|  |  |
| --- | --- |
|  | ——质量（惯性矩）矩阵，单位为千克或千克平方米（kg或kg·m2）； |
|  | ——质点所承受的外力合力（矩）向量，单位为牛顿或牛顿米（N或N·m）； |
|  | ——质点的内力合力（矩）向量，单位为牛顿或牛顿米（N或N·m）； |
|  | ——质点的（角）加速度向量，单位为米每秒二次方或弧度每秒二次方（m/s2或 rad/s2）。 |

B.3 考虑结构自身阻尼为瑞利阻尼时，质点的运动控制方程和阻尼力按式（B.2）~（B.5）计算：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (B.2) |
|  | (B.3) |
|  | (B.4) |
|  | (B.5) |

式中：

|  | ——运动过程中质点的阻尼力（矩），单位为牛顿或牛顿米（N或N·m）； |
| --- | --- |
|  | ——单元的刚度矩阵，单位为牛顿每米（m）； |
| 、 | ——瑞利阻尼的质量和刚度相关系数； |
|  | ——质点的（角）速度向量，单位为弧度每秒或米每秒（rad/s或m/s）； |
| ***、*** | ——结构的第*m*、*n*阶模态的圆频率，单位为弧度每秒（rad/s）； |
| ***、*** | ——***、***对应的模态阻尼，单位牛顿秒每米（Ns/m）； |
|  | ——结构刚度相关的阻尼力（矩），单位为牛顿或牛顿米（N或N·m）； |
|  | ——第*i*步的质点内力（矩）向量，单位为牛顿或牛顿米（N或N·m）； |
|  | ——第*i*步质点的（角）速度向量，单位为弧度每秒或米每秒（rad/s或m/s）； |
|  | ——数值积分计算步长，单位为秒（s）。 |

B.4 不考虑阻尼项时，运动控制方程的求解可采用中心差分方法，按式（B.6）~（B.8）计算：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (B.6) |
|  | (B.7) |
|  | (B.8) |

式中：

|  | ——与质点连接的若干结构单元特征长度，单位为米（m）； |
| --- | --- |
|  | ——轴力波在结构单元内的传递速度，单位为米每秒（m/s）； |
|  | ——临界步长，单位为秒（s）； |
|  | ——第*i* 步的质点外力（矩）向量，单位为牛顿或牛顿米（N或N·m）； |
|  | ——第*i*步的质点(角)位移向量，单位为弧度或米（rad或m）； |
|  | ——初始时刻质点的（角）位移向量，单位为弧度或米（rad或m）； |
|  | ——初始时刻质点的（角）速度向量，单位为弧度每秒或米每秒（rad/s或m/s）； |
|  | ——初始时刻质点的（角）加速度向量，单位为弧度每秒二次方或米每秒二次方（rad/s2或m/s2）。 |

B.5 静态分析时，宜通过增设虚拟阻尼耗能或施加缓慢加载函数求得运动控制方程的静态解。

a） 增设虚拟阻尼耗能时，虚拟阻尼力公式可按下式计算：

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | | | (B.9) |
| 式中： | |  | |
|  | ——质点的虚拟阻尼力（矩），单位为牛顿或牛顿米（N或N·m）； | | |
|  | ——任意取值的阻尼因子； | | |

b） 静态分析或者考虑阻尼影响时，差分公式可按下式计算：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 时， |  | (B.10) |
|  |  | (B.11) |
| 时， |  | (B.12) |
| 式中： |  |  |
| 、 | ——第-1步和第1步时间内的质点（角）位移向量，单位为弧度或米（rad或m）； | |

B.6 结构模态频率（或周期）、模态振型和模态阻尼比，宜通过虚拟实验模态技术获得。

1. （资料性）  
   模型在线更新混合试验方法

C.1 在线模型更新混合试验方法原理如图C.1所示，应按下列步骤进行：

a） 将由积分方法计算得到位移命令******发送给试验加载系统完成对试验子结构加载并测量试验子结构恢复力******和位移******；

b） 将位移命令******输入到假定数值模型模块计算得到模型未更新数值子结构恢复力******；

c） 将位移命令******、试验子结构恢复力******和位移******输入到模型识别模块得到试验子结构模型参数识别值，更新相应数值子结构模型参数，计算其恢复力******。

d） 重复步骤a）~c)，直至试验结束。



图C.1 在线模型更新混合试验方法示意图

C.2 可开展基于构件、截面或材料本构层次模型参数识别和更新的模型在线更新混合试验。

C.3 基于双线性模型的构件层次模型在线更新混合试验按照下列步骤进行。

a） 在第*i*个时间步，应采用数值积分方法求解结构运动方程，获取试验子结构和数值子结构第*i*+1步位移。

b） 应将计算出的试验子结构部分边界自由度上的位移，发给连接试验子结构的作动器进行加载，测量试验子结构恢复力******和位移******。

c） 基于试验子结构采用识别算法在线识别第*i*+1步试验子结构的双折线模型参数，分别为：第一刚度******，第二刚度******，屈服力******。

d） 采用模型参数识别值在线更新数值子结构相应的模型参数。

e） 将试验子结构恢复力反馈给结构运动方程。

f） 循环进行步骤a）~ e），直至混合试验结束。

1. （资料性）  
   在线数值模拟方法

D.1 在线数值模拟方法应按下列步骤进行：

a） 在第*i*个时间步，应采用数值积分方法求解结构运动方程，获取整体结构动力自由度上的位移向量******，并将其发送给整体结构有限元模型中对应的自由度；

b） 应利用整体结构动力自由度的位移向量******和上一积分步估计出的本构模型参数******，对结构整体模型进行一次非线性静力分析，并将计算出的试验子结构部分边界自由度上的位移向量******，发给连接试验子结构的作动器；

c） 作动器按位移******驱动试件获取实测的位移******和反力******，发送给识别模块；

d） 本构模型参数在线估计******；

e） 用参数******更新整体有限元模型中本构模型参数******，再次根据整体结构模型的位移向量******完成一步静力分析，并提取整体结构模型相应节点反力******返回时间积分模块；

1. 重复步骤a）~ e），直至试验结束。

D.2 在线数值模拟方法可采用无迹卡尔曼滤波方法完成模型参数识别。

1. （资料性）  
   时间积分方法

E.1  时间积分方法可采用中心差分法、Newmark-**方法、OS方法和实时子结构OS方法等。

E.2 中心差分法为显式方法，其基本公式见式（E.1）~（E.4）：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (E.1) |
|  | (E.2) |
|  | (E.3) |
|  | (E.4) |

式中:

|  | ——数值子结构的质量矩阵，单位为千克（kg）; |
| --- | --- |
|  | ——数值子结构的阻尼矩阵，单位为牛顿秒每米（Ns/m）; |
|  | ——第*i*步加速度向量，单位为米每秒二次方（m/s2）; |
|  | ——第*i*步的外部等效力，单位为牛顿（N）； |

E.3 Newmark-**方法为隐式方法，其基本公式见（E.5）~（E.9）：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (E.5) |
|  | (E.6) |
|  | (E.7) |
|  | (E.8) |

当时，给定初值条件为。

Newmark-**法的稳定极限为：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (E.9) |

式中:

|  |  |
| --- | --- |
|  | ——结构的圆频率，单位为弧度每秒（rad/s）； |
| *、* | ——Newmark时间积分法的控制参数，通常取0.25和0.5。 |

E.4 OS方法为半显式半隐式方法，其基本公式见（E.10）~（E.14）：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (E.10) |
|  | (E.11) |
|  | (E.12) |
|  | (E.13) |
|  | (E.14) |

式中:

|  |  |
| --- | --- |
|  | ——预测位移向量，单位为米（m）; |

E.5 实时子结构OS方法为半显式半隐式方法，其基本公式见（E.15）~（E.19）：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (E.15) |
|  | (E.16) |
|  | (E.17) |
|  | (E.18) |
|  | (E.19) |

式中:

|  |  |
| --- | --- |
|  | ——预测速度向量，单位为米每秒（m/s）； |
|  | ——预先假定的试验子结构初始刚度矩阵，单位为牛顿每米（N/m）； |
|  | ——预先假定的试验子结构初始阻尼矩阵，单位为牛顿秒每米（Ns/m）； |

E.6 当采用其他时间积分方法时，需要在试验前进行稳定性和精度分析，以证明所选择的方法和时间积分步长满足稳定性和精度要求。

1. （资料性）  
   时间积分方法的稳定性和精度分析

F.1  时间积分方法的稳定性分析

时间积分方法的稳定性谱半径分析方法应按下列步骤进行：

a） 根据单自由度结构的动力特性，得到在某一时刻的运动方程；

b） 由运动方程改写得到其递推形式；

c） 求递推形式中的积分算子逼近矩阵的特征值；

d） 求取积分算子逼近矩阵的谱半径；

e） 由谱半径判断时间积分方法的稳定性；

对于线性结构，时间积分方法的稳定性可由其积分算子逼近矩阵的谱半径确定。

对于单自由结构，在时刻的动力平衡方程将质量归一化后可写为：

****** (F.1)

式中：

——第步的质量归一化外荷载，单位为牛顿（N）。

运动方程(F.1)改写成递推形式：

****** (F.2)

式中：

******——积分算子逼近矩阵；

******——荷载算子矩阵。

积分算子逼近矩阵******的谱半径为******，定义如下：

****** (F.3)

式中：

——积分算子逼近矩阵******的第*j*个特征值。

谱半径方法的稳定性判定条件：

****** (F.4)

当时间积分方法的积分算子逼近矩阵******的谱半径满足******时，算法是稳定的。

线性多自由度体系的动力响应求解问题可通过振型叠加法转化为一系列单自由度结构体系的响应求解，仅需研究单自由度结构体系响应求解的时间积分方法稳定性。

F.2 时间积分方法的精度分析

精度分析按下列步骤进行：

a） 确认数值积分算法稳定；

b） 在无阻尼情况下，采用振幅衰减*AD*和周期延长*PE*两个指标分析时间积分方法的精度；

c） 振幅衰减*AD*和周期延长*PE*按式（F.5）进行计算：

***, *** (F.5)

式中：

***,***——结构的实际振幅和采用时间积分方法后的数值振幅，单位为米（m）；

***,***——结构的实际自振周期和采用时间积分方法后的数值周期，单位为秒（s）。

1. （资料性）  
   空间加载坐标变换矩阵

G.1 采用多个作动器进行空间或平面多自由度混合试验时，应进行空间加载坐标变换。

G.2 空间加载坐标变换应按下列步骤进行：

a） 选择代表结构真实运动或响应的点作为控制点；

b） 根据加载装置作动器布设的几何参数特征和控制点坐标确定控制点笛卡尔坐标系位移到作动器伸缩量的非线性方程；

c） 每个加载步中，将上述非线性方程进行线性化，得到作动器伸缩量到控制点笛卡尔坐标系位移的转换关系矩阵；

d） 由控制点笛卡尔坐标系位移和作动器的空间位置确定作动器出力到笛卡尔坐标系反力的转换关系。

G.3 第*i*步从笛卡尔坐标系控制点位移到作动器的伸缩量的坐标转换矩阵见式（G.1）:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (G.1) |

采用旋转变换矩阵******，第 *j* 作动器的伸缩量******可写为式（G.2）：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (G.2) |

式中：

|  |  |
| --- | --- |
|  | ——作动器的初始长度，单位为米（m）； |
|  | ——作动器相对初始长度的伸缩量，单位为米（m）； |
|  | ——笛卡尔坐标系控制点位移平动分量构成的向量，单位为米（m）； |
|  | ——第 *j* 个作动器（或外接位移传感器）的尾端球铰位置，单位为米（m）； |
|  | ——第*j*个作动器（或外接位移传感器）初始平台端球铰空间坐标，单位为米（m）; |
|  | ——第*j*个作动器从初始控制点到初始球铰空间坐标的矢量，单位为米（m）; |
|  | ——从笛卡尔坐标系控制点位移到作动器的伸缩量的坐标转换矩阵。 |

G.4 从作动器的伸缩量到笛卡尔坐标系控制点位移的转换关系见式（G.3）:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (G.3) |

G.5 作动器出力到控制点笛卡尔坐标系反力的转换关系矩阵见式（G.4）、（G.5）：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (G.4) |
|  | (G.5) |

式中：

“×”表示叉乘。

|  |  |
| --- | --- |
|  | ——作动器加载后的当前长度，单位为米（m）； |
|  | ——笛卡尔坐标系控制点位移向量，单位为米（m）； |
|  | ——笛卡尔坐标系控制点力响应向量，单位为牛顿（N）; |
|  | ——所有作动器力响应组成的向量，单位为牛顿（N）; |
|  | ——作动器的力响应到笛卡尔坐标系空间坐标力响应的转换矩阵； |

1. （资料性）  
   实时混合试验稳定性分析方法

H.1 实时混合试验非线性稳定性分析方法应按下列步骤进行：

a） 由试体的特征及其试验数据确定非线性类型；

b） 由数值子结构求解时间积分方法、非线性类型、加载系统离散传递函数模型和时滞补偿环节离散传递函数，求得混合试验系统的开环离散脉冲传递函数；

c） 基于实时混合试验系统的开环传递函数求取增益裕度和相位裕度；

d） 由增益裕度和相位裕度确定混合试验系统是否稳定；

e） 由增益裕度和相位裕度给出保证系统稳定的刚度非线性的范围和临界时滞，分析试验系统设计是否合理。

H.2 实时混合试验的非线性稳定性应按下列规则判定：

a） 当增益裕度大于1，且相位裕度大于0的时候，系统稳定；

b） 当增益裕度小于1，且相位裕度小于0的时候，系统不稳定；

c） 当增益裕度大于1、相位裕度小于0，或增益裕度小于1、相位裕度大于0的时候，系统稳定性应采用奈奎斯特稳定判据分析，并按照H.3条判定。

H.3 采用奈奎斯特稳定判据分析的非线性实时混合试验系统，应按下列准则判断系统稳定性：

a） 当非线性刚度比系数小于系统的增益裕度时，系统是稳定的；

b） 当非线性刚度比系数大于或等于系统的增益裕度时，系统不稳定；

c） 当加载设备时滞小于临界时滞时，混合试验系统是稳定的；

1. 当加载设备时滞等于或大于临界时滞时，混合试验系统是不稳定的。

H.4 为保证实时混合试验系统具有一定的鲁棒性，系统的增益裕度应大于2.0，系统的相位裕度宜在30°～60°范围内。

H.5 可采用伯德图方法进行增益裕度和相位裕度分析，以得到保证系统稳定的非线性范围和临界时滞。

1. （资料性）  
   时滞补偿方法

I.1 时滞补偿方法选择遵循下列原则：

a） 根据实时混合试验和振动台混合试验中包括加载系统和物理子结构在内的物理系统实测动力特性，可从多项式外插补偿、逆模型补偿、自适应时间序列补偿等方法中选择；

b） 试件与加载系统动力相互作用可忽略且时滞小于20ms时，宜选用多项式外插补偿；

c） 试件与加载系统动力相互作用可忽略但时滞不小于20ms时，宜选用逆模型补偿方法；

1. 试件与加载系统动力相互作用不可忽略时，宜选用自适应时间序列补偿。

I.2 多项式外插补偿方法应按下列步骤进行：

a） 物理子结构安装完成后，混合试验开始前，采用预先离线试验测量物理系统时滞；

b） 采用多项式外插补偿方法时，加载系统输入位移指令应按式（I.1）计算：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (I.1) |

式中：

*—*输入给加载系统的位移控制命令，单位为米（m）；

—加载系统需再现的当前步目标位移，单位为米（m）；

—加载系统需再现的时刻前的目标位移，单位为米（m）；

—外插多项式阶数；

—外插多项式系数；

—试验系统实测时滞，单位为秒（s）。

c） 根据实测时滞大小、试件与输入频率范围选择合理的多项式阶数，并根据表I.1选用外插多项式系数。

表I.1 多项式外插系数表

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *n* | *a*0 | *a*1 | *a*2 | *a*3 | *a*4 |
| 0 | 1 | - | - | - | - |
| 1 | 2 | -1 | - | - | - |
| 2 | 3 | -3 | 1 | - | - |
| 3 | 4 | -6 | 4 | -1 | - |
| 4 | 5 | -10 | 10 | -5 | 1 |

I.3 逆模型补偿方法应按下列步骤进行：

a） 物理子结构安装完成后混合试验开始前，采用预先离线试验识别物理系统传递函数；

b） 采用逆模型补偿方法时，加载系统输入位移指令应按式（I.2）计算：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (I.2) |

式中：

*—*物理系统线性频域传递函数；

*—*选用的低通滤波器频域传递函数；

c） 根据实测传递函数特性、试件与输入频率范围选择合理的低通滤波器,滤波器截止频率不宜高于100Hz。

I.4 自适应时间序列时滞补偿应按下列步骤进行：

a） 物理子结构安装完成后混合试验开始前，采用预先离线试验识别物理系统时滞和幅值误差，预估其变化范围；

b） 采用自适应时间序列时滞补偿方法时，加载系统输入位移指令应按式（I.3）～（I.7）计算：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (I.3) |
|  | (I.4) |
|  | (I.5) |
|  | (I.6) |
|  | (I.7) |

式中：

—加载系统需再现的第*k*步目标位移*n*阶微分量；

—加载系统第*k*步实测位移，单位为米（m）；

c）  初始值元素，其中*AD*为幅值误差；

d） 目标位移微分阶数*n*宜取2， *q=n*+1；

e） 自适应时间序列时滞补偿算法按图I.1所示实现。

图示, 示意图

描述已自动生成

图I.1 自适应时间序列时滞补偿

1. （资料性）  
   混合试验报告

J.1 混合试验报告的结构及内容可按照下列提纲编写：

a） 混合试验目的

——试验对象描述

——地震环境及地震动

——混合试验架构

——时间积分方法数值稳定性和精确性

——动力系统的稳定性裕度分析

b） 数值模型

——整体分析模型和边界简化模型

——数值子结构

——与试验子结构的通讯接口

c） 试验子结构

——试体设计

——加载方案

——测量方案

——与数值子结构的通讯接口

d） 边界协调方案

——边界协调方案

——边界协调检验

e） 试验数据分析

——整体响应对比分析

——局部响应对比分析

——整体和局部典型损伤图片

——试验误差分析

f） 抗震性能分析

——塑性发展过程与破坏机制分析

——局部性能表现与分析

——基于能力需求分析的抗震性能确定

g） 结论

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_