

第二届工程结构混合动力试验技术专题研讨会 学生竞赛赛题

1 竞赛方案

建立一个平面钢框架混合试验的仿真模型。竞赛分为拟动力混合试验组与实时混合试验组。

拟动力混合试验组（赛题一）：

进行虚拟的拟动力混合仿真。参赛者需搭建混合仿真模型，其中数值子结构采用有限元软件建模。该赛题主要考察参赛者利用有限元软件开展混合试验的能力。

实时混合试验组（赛题二）：

进行虚拟的实时混合仿真。参赛者需设计实时混合试验中的实时控制器模块，建立 MATLAB/SIMULINK 仿真模型。该赛题主要考察参赛者所设计的实时控制器及时滞补偿方法的精度和稳定性。

2 研究对象

2.1 整体结构模型

研究对象为一个两层的平面钢框架，如图 1 a)所示。框架底层柱与基础为刚接，每层柱顶作用有竖向荷载 $P=200\text{kN}$ 。假定横梁的抗弯刚度无穷大，框架的动力模型可简化为层剪切型模型，每层仅考虑水平向一个自由度。框架每层质量为 $m_1 = m_2 = 40000\text{kg}$ ，采用 Rayleigh 阻尼假定，前两阶阻尼比均取为 0.03。柱子采用 Q235 钢材，焊接 H 型钢（ $\text{H}300\times300\times10\times15$ ），其截面尺寸如图 1 b)所示。框架水平方向受到 El Centro（1940，NS）地震作用。

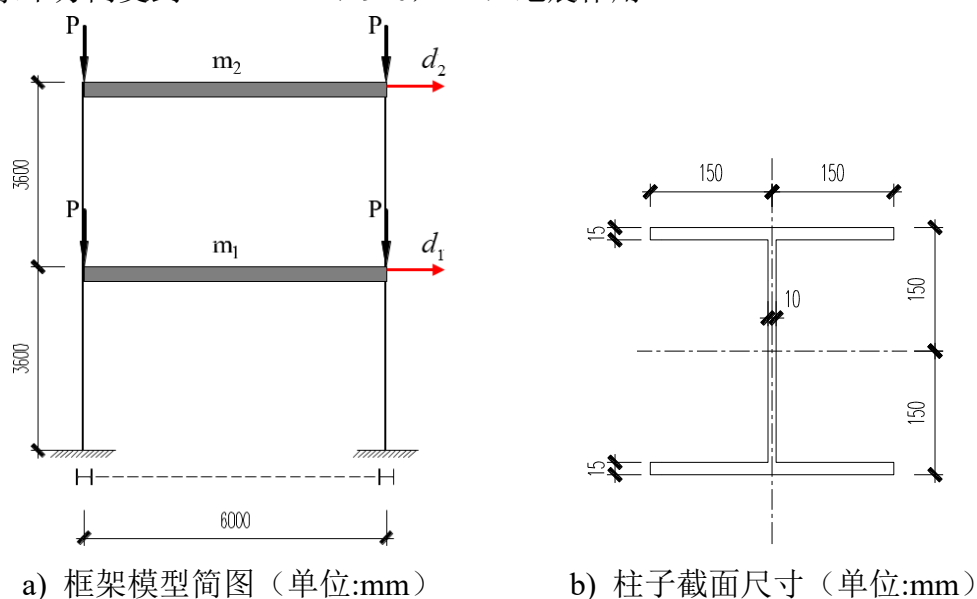


图 1 两层平面钢框架模型

2.2 子结构的划分

采用基于反弯点的子结构划分方案,即将子结构边界选取在柱子的反弯点位置,避免试验加载中柱端弯矩难以模拟的问题。取框架底层左柱的 1/2 作为子结构 1,框架底层右柱及二层作为子结构 2,其边界条件如图 2 所示。其中 d_1 、 d_2 分别为框架一层和二层的位移, d_E 、 f_E 分别为子结构 1 顶部的位移和恢复力, $f_{N,1}$ 、 $f_{N,2}$ 分别为子结构 2 一层和二层的恢复力。

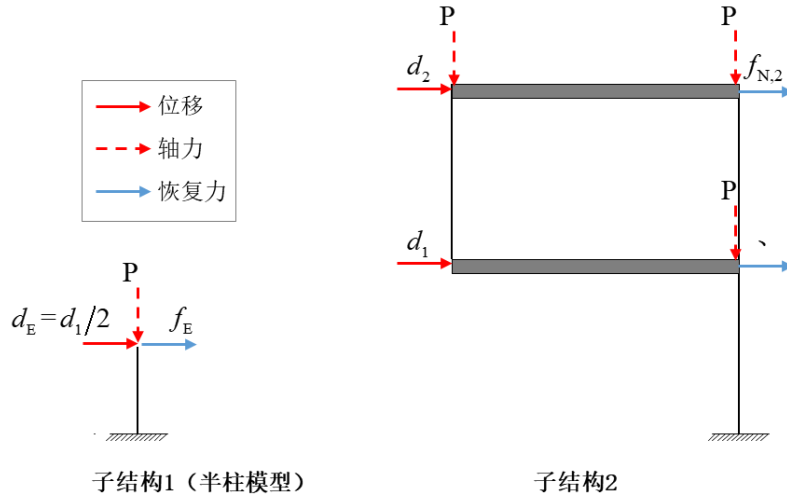


图 2 子结构边界条件示意图

子结构 1 顶部位移(即原底层左柱反弯点处的位移)近似取为 $d_E = d_1/2$, 施加定轴力 P 。子结构 2 的边界取为底层左柱顶部。由于横梁的抗弯刚度无穷大,柱顶的转角可以忽略不计,因此不考虑柱端弯矩对水平恢复力的影响,直接将子结构 1 的水平恢复力施加到子结构 2 的边界处,即底层左柱的水平恢复力近似取为 $f_{E,1} = f_E$ 。

3 拟动力混合仿真(赛题一)

3.1 拟动力混合仿真模型

拟动力混合试验的仿真模型主要包含三大模块,分别是协调器模块、试验子结构模块以及数值子结构模块。协调器模块负责求解整体结构的运动平衡方程,并将求得的位移分别发送给试验子结构和数值子结构;试验子结构和数值子结构分别进行位移控制的加载和静力分析,并将测得或计算得到的恢复力返回给协调器模块。

其中,协调器模块与数值子结构模块也可以合并建模。在合并建模时,建立整体结构的动力模型,试验子结构作为一个虚拟的试验单元参与整体结构的计算。

赛题一不考虑试验子结构部分,即子结构 1 和子结构 2 均为数值子结构。分别建立子结构 1 和子结构 2 的数值模型,开展数值混合仿真。

3.1.1 协调器

在拟动力混合仿真中，整体结构的运动方程可表示为

$$\mathbf{M}\mathbf{a} + \mathbf{C}\mathbf{v} + \mathbf{R}_N(\mathbf{d}_N) + \mathbf{R}_E(\mathbf{d}_E) = -\mathbf{M}\begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix}\ddot{x}_g \quad (1)$$

其中， \mathbf{M} 、 \mathbf{C} --分别表示结构的质量矩阵和阻尼矩阵， $\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}$ ， \mathbf{C} 可根据

Rayleigh 阻尼假定计算得到；

d_E 、 d_N --分别表示子结构 1 和子结构 2 的位移， $\mathbf{d}_N = \{d_1, d_2\}$ ， $d_E = d_1/2$ ；

\mathbf{R}_E 、 \mathbf{R}_N --分别表示子结构 1 和子结构 2 的恢复力， $\mathbf{R}_E = \{f_E, 0\}^T$ ，

$\mathbf{R}_N = \{f_{N,1}, f_{N,2}\}^T$ ；

\ddot{x}_g --地震动加速度。

方程（1）可利用时间积分方法来进行求解。常见的时间积分方法包括中心差分法、Newmark- β 方法、OS 方法、HHT 方法等等。

3.1.2 数值子结构

数值子结构需采用有限元软件进行建模，该模型在每一步的运行过程中，首先从协调器模块接收位移命令，然后进行静力计算获得恢复力，最后将恢复力传回给协调器模块，求解下一步的位移。

数值子结构中，钢材可采用双线性的单轴本构模型，其屈服强度 f_y 、弹性模量 E 以及应变强化系数 b_s 的取值如表 1 所示。

表 1 钢材本构模型参数参考值

材料	f_y (MPa)	E (MPa)	b_s
钢材	235	200 000	0.05

3.2 需提交的成果及评价标准

3.2.1 需提交的成果

赛题一需提交的成果包括：

(1) 完整的拟动力混合仿真模型一套，其中至少一个数值子结构采用有限元软件进行建模。在此前提下，参赛选手可自由选择数值建模工具和建模方法，也可以利用现有的混合试验软件建模。

(2) 拟动力混合试验仿真结果文档。结果包括一层和二层的位移、速度、加速度时程曲线，并与整体结构的时程分析结果（见赛题一附件）进行对比。

3.2.2 评价标准

以 50s 的 El Centro(NS, 1940)地震动（见附件 ELC180_0.005_50s.txt）作用下，一层水平位移的均方根误差（RMSE: Root-mean-square error）作为基本评价指标。其计算方法为

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [d_1(i) - d_{1,ref}(i)]^2}{\sum_{i=1}^N [d_{1,ref}(i)]^2}} \times 100\% \quad (2)$$

式中 N 为总时间步数， $d_1(i)$ 表示第 i 步一层的水平位移，下标 **ref** 代表整体结构时程分析的参考解。

额外加分项包括：

（1）仿真过程的可控性。为了考虑真实试验中可能出现的异常情况，可设计仿真流程控制程序（仿真过程中可以暂停和继续）和异常处理程序（数值计算异常中断后能保存中断时的状态，再次运行时能从中断状态启动，避免对试件重复加载）。

（2）多平台数值建模，即分别使用两种有限元软件建立两个数值子结构的模型。

3.3 附件说明

Entire_Dynamic	整体结构 OpenSees 动力时程分析模型，其模拟结果为参考解
Evaluation_RMSE	计算 RMSE 误差的 MATLAB 程序

4 实时混合仿真（赛题二）

按照加载工具的不同，目前实时混合试验一般分为基于作动器的实时混合试验和基于振动台的实时混合试验。本赛题为基于作动器的实时混合仿真。

赛题二需考虑试验子结构的建模，子结构 1 为试验子结构，子结构 2 为数值子结构。需建立包含作动器、试件、传感器的试验控制模型。为了保证计算的实时性，假定结构始终处于弹性，且建模时不考虑轴力。

4.1 实时混合仿真模型

实时混合仿真模型基本框架如图 3 所示，包括数值子结构、实时控制器及时滞补偿模块、作动器、试验子结构、传感器五个部分。本赛题需设计其中的实时控制器及时滞补偿模块。

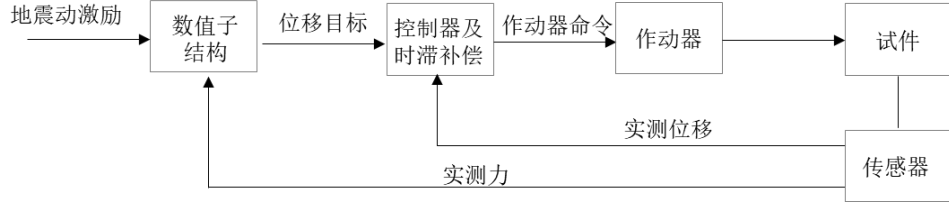


图3 实时混合仿真模型基本框架

4.1.1 数值子结构模型

相对于拟动力混合试验，实时混合试验主要是为了考虑速度相关型试件的性
能，整体结构的运动方程可表示为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{R}_N(\mathbf{x}) + \mathbf{R}_E(x_E, \dot{x}_E) = -\mathbf{M}\begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \ddot{x}_g \quad (3)$$

其中， \mathbf{x} 、 $\dot{\mathbf{x}}$ 、 $\ddot{\mathbf{x}}$ 分别表示位移、速度、加速度，其余物理量的符号表述与式（1）
相同。由于不考虑结构的非线性，式（3）可进一步写为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}_N\mathbf{x} + \mathbf{R}_E(x_E, \dot{x}_E) = -\mathbf{M}\begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \ddot{x}_g \quad (4)$$

令 $\mathbf{Z} = \begin{Bmatrix} \mathbf{x} \\ \dot{\mathbf{x}} \end{Bmatrix}$ 、 $\mathbf{y} = \begin{Bmatrix} \mathbf{x} \\ \dot{\mathbf{x}} \end{Bmatrix}$ 、 $\mathbf{u} = \begin{Bmatrix} \ddot{x}_g \\ R_E \end{Bmatrix}$ ，则式（4）可以状态方程形式表示

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{Z}} = \mathbf{AZ} + \mathbf{Bu} \\ \mathbf{y} = \mathbf{CZ} + \mathbf{Du} \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{I}_{2 \times 2} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K}_N & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{2 \times 1} & \mathbf{0}_{2 \times 2} \\ -\{1, 1\}^T & -\mathbf{M}^{-1} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 2} \\ \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{I}_{2 \times 2} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K}_N & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix} \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{2 \times 1} & \mathbf{0}_{2 \times 2} \\ \mathbf{0}_{2 \times 1} & \mathbf{0}_{2 \times 2} \\ -\{1, 1\}^T & -\mathbf{M}^{-1} \end{bmatrix}$$

4.1.2 试验子结构模型

试验子结构的加载方案如图4所示，采用1个水平作动器施加水平位移。假
定试件的阻尼为0，则试验子结构的力反馈为

$$R_E(x_E, \dot{x}_E) = k_E x_E \quad (7)$$

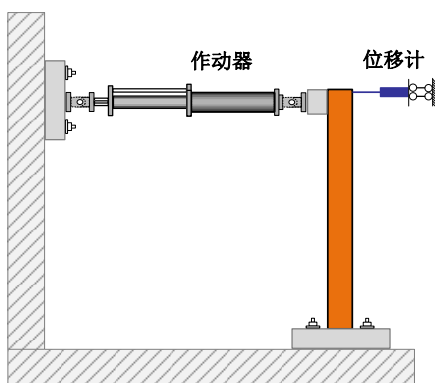


图 4 试验子结构加载示意图

4.1.3 作动器模型

作动器模型采用如下简化的传递函数

$$T_A(s) = K_p \frac{(1+T_z s)e^{-T_d s}}{\left[1 + 2\zeta T_w s + (T_w s)^2\right](1+T_{p3}s)} \quad (6)$$

为了考虑模型参数的不确定性，假定传递函数中各个参数均为服从正态分布的随机变量。各参数的均值及标准差如表 2 所示。该作动器原始模型来源于 Benchmark Control Problem in RTHS (<https://goo.gl/DWY1uF>)，通过识别 Benchmark 模型得到上述传递函数参数。

表 2 作动器传递函数模型参数

参数	K_p	T_w	ζ	T_{p3}	T_d	T_z
均值	1.0042	0.0038319	0.28797	0.0098583	0.0043262	0.005956
标准差	4.147e-5	1.5492e-7	5.6334e-5	4.4952e-6	8.8255e-7	4.5976e-6

附件提供的 SIMULINK 模型通过改变上述各参数的取值来考虑其不确定性。因此，参赛者需模拟至少 21 种工况。工况 1 (Nominal case) 中各参数均采用均值；工况 2-21 (Perturbed case) 中各参数的取值为满足正态分布的随机数。

4.1.4 实时控制器及时滞补偿模块

该模块由参赛者设计。附件提供了采用 PI 控制器的 MATLAB/SIMULINK 实时混合仿真模型，供参考。

4.2 需提交的成果及评价标准

4.2.1 需提交的成果

赛题二需提交的成果包括：

(1) 实时混合试验仿真模型中的实时控制器及时滞补偿模块，需采用 MATLAB/SIMULINK 建立。

(2) 实时混合试验仿真模型说明文档。介绍所使用的控制器方法原理、参数定义及模拟结果。模拟结果包括作动器的控制效果、一层和二层的位移、速度、加速度时程曲线,且需与整体结构弹性时程分析结果(见赛题二附件)进行对比。

4.2.2 评价标准

以 50s 的 El Centro(NS, 1940)地震动(见附件 ELC180_0.005_50s.txt 或 ELC180.mat)作用下,一层水平位移的均方根误差作为评价标准,其计算方法同式(2)。其中参考解为整体结构弹性时程分析的结果。

注意: 为了考虑作动器参数的不确定性,需模拟至少 21 种工况,即 1 个 Nominal case 和至少 20 个 Perturbed case。

4.3 附件说明

Simulink_RTHS	完整的 MATLAB/SIMULINK 实时混合仿真模型,其中控制器(Controller 模块)设计为 PI 控制。参赛者需自行设计控制器及时滞补偿模块,替换掉 Controller 模块 (需使用 MATLAB R2014 或更高版本)
Entire_Dynamic_Elastic	进行弹性时程分析的 MATLAB 程序,作为参考解

5 奖项设置

拟动力混合试验组(赛题一)和实时混合试验组(赛题二)将分别评奖,每组评出一等奖、二等奖、三等奖若干名。

6 附则

1. 竞赛报名及附件下载请登录 <https://hs2019.aconf.org>, 竞赛成果提交截止 2019 年 7 月 30 日;
2. 参赛者可以个人身份或团队形式参赛,每个团队不超过 3 人;
2. 参赛者可选两个竞赛题中的一个参加,也可同时参加;
3. 竞赛活动及所有奖励的最终解释权归竞赛组委会。
5. 联系方式:

杨格 15391519630, yangge@whut.edu.cn