

2011 年第五届全国大学生结构设计竞赛赛题：

带屋顶水箱的竹质多层房屋结构

一、竞赛模型

竞赛模型为多层房屋结构模型，采用**竹质材料**制作，具体结构形式不限。模型包括小振动台系统、上部多层结构模型和屋顶水箱三个部分，模型的各层楼面系统承受的荷载由附加铁块通过实现，小振动台系统和屋顶水箱由承办方提供，水箱通过热熔胶固定于屋顶，多层结构模型由参赛选手制作，并通过螺栓和竹质底板固定于振动台上，图 1 给出了一示意性结构图。

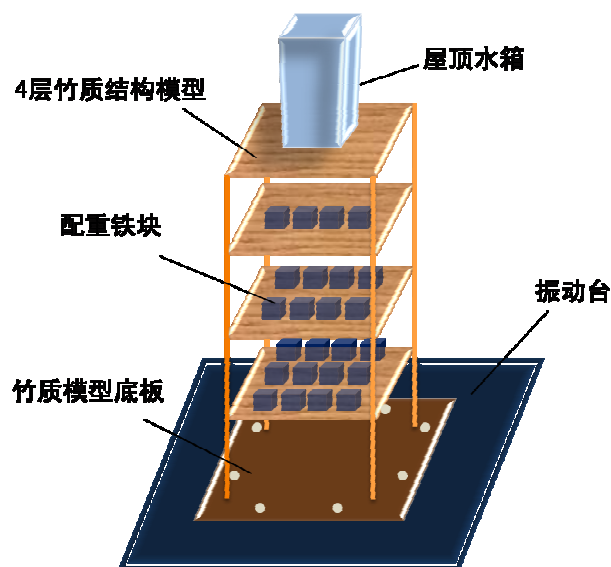


图 1 模型示意图

二、模型要求

2.1 几何尺寸要求

(1) 底板：多层结构模型用胶水固定于模型底板上，底板为 $33\text{cm} \times 33\text{cm} \times 8\text{mm}$ 的竹板，底板用螺栓固定于振动台上。

(2) 模型大小：**模型总高度应为 100cm**，允许误差为 $\pm 5\text{mm}$ 。总高度为模型底板顶面至屋顶(模型顶面)上表面的垂直距离，但不包括屋顶水箱的高度。**模型底面尺寸不得超过 $22\text{cm} \times 22\text{cm}$ 的正方形平面**，即整个模型需放置于该正方形平面范围内，模型底面外轮廓与底板边缘应有足够的距离以保证螺栓能顺利紧固。

(3) 楼层数：**模型必须至少具有 4 个楼层**，底板视为模型第一层楼板。除第一层以外，每层楼面范围须通过设置于边缘的梁予以明确定义。

(4) 楼层净高：**每个楼层净高应不小于 22cm**。楼层净高是指该楼层主要横向构件顶部与其相邻的上一层楼层主要横向构件底部之间的最小距离。若底板上设置有地梁，则第一层净高需自地梁顶部开始计算；若无地梁则从底板顶面开始计算。柱脚加劲肋、隅撑及其他外立面构件不影响计算楼层净高。

(5) 使用功能要求：楼层应具有足够的承载刚度，各层空间应满足使用功能要求。**在模型内部，楼层之间不能设置任何横向及空间斜向构件。**模型底层所有方向的外立面底部正中允许各设置一个 $12\text{cm} \times 12\text{cm}$ (高 \times 宽)的门洞。

(6) 楼层有效承载面积：楼层范围为各承重分区最外围楼层梁构件所包络的平面，不包括模型内部核心筒区域。在楼层范围内与楼面构件直接接触的铁块的覆盖面积定义为**楼层有效承载面积**，模型的**总有效承载面积应在 600cm^2 至 720cm^2 的范围之内，且每个楼层的有效承载面积不得小于 25cm^2** 。模型顶面为平面，应满足安全放置水箱的要求。

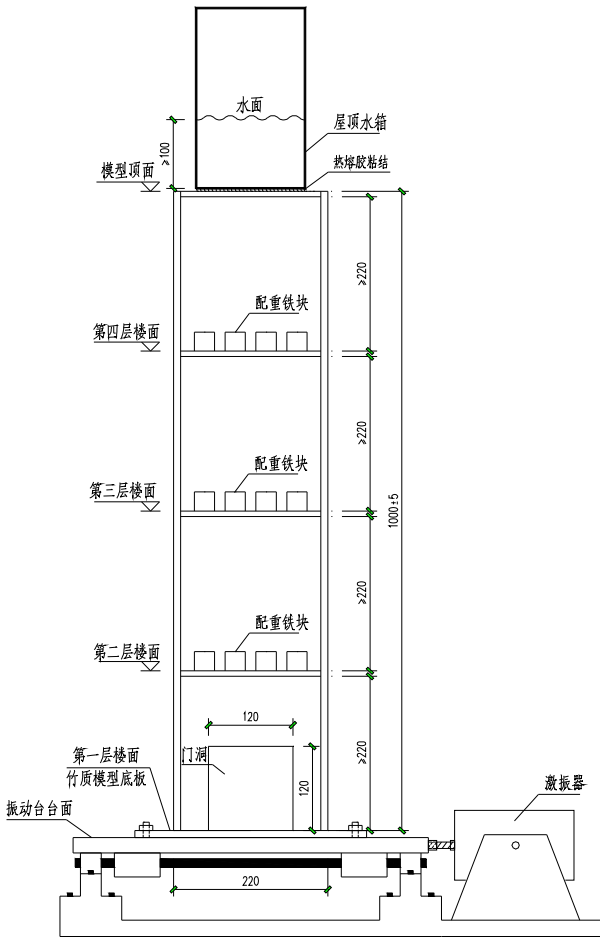


图2 模型立面示意图(单位: mm)

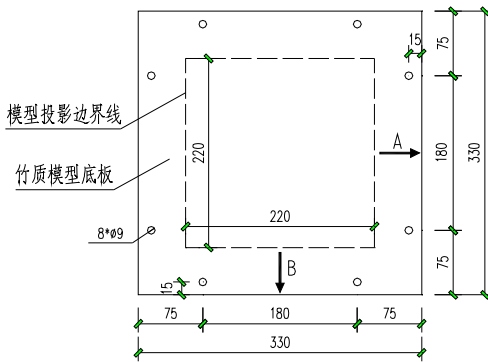


图3 模型底板示意图(单位: mm)

2.2 模型及附加铁块安装要求

(1) 利用热熔胶将附加铁块固定在模型除底层以外的各个楼层的楼面结构上，可在楼层上设置固定铁块辅助装置，但**辅助装置和铁块不能超出楼层范围且不能直接跟柱接触**，若辅助装置或铁块与柱子接触，则该层净高以接触点的高度位置开始计算。

(2) 提供大、小两种规格铁块。大铁块长、宽、高约分别为 12cm 、 6cm 与 3.2cm ，重量为 1800g 。小铁块的长、宽、高约分别为 6.0cm 、 4.5cm 与 3.2cm ，重量为 675g 。**由于加载设备限制，模型中附加铁块总重量不得超过 30kg 。**

(3) 模型顶面上应放置水箱，且水箱内应至少注入 10cm 高的水。水箱尺寸的长、宽、高为 $15.5\text{cm} \times 15.5\text{cm} \times 25.7\text{cm}$ ，容量为 4L 。模型顶面不能放置铁块。

(4) 模型试验仅在单一水平向施加地震作用，模型的抗侧体系应在计算书中阐述清楚。试验时模型放置方向按照安装底板标识(A 或 B，如图 3 中所示)通过抽签挑边确定。

三 加载设备介绍

结构模型采用 WS-Z30 小型精密振动台系统进行模拟水平地震作用的加载，考察模型承载力。振动台系统的主要组成部分及相关参数信息如下（详情可参见竞赛材料及设备介绍附件 2）：

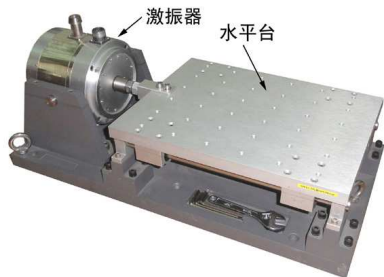


图 4 水平振动台和激振器



图 5 功率放大器

水平振动台：型号：WS-Z30-50

指标：水平台尺寸：506×380×22mm，荷载：30kg，重量：11.5kg，材料：铝合金 LY12。

功能：承载实验模型。

激振器：型号：JZ-50

指标：工作频率：0.5～3000Hz，最大位移：±8mm，激振力：500N，重量：28kg

功能：使水平台振动。

功率放大器：型号：GF-500W

指标：失真度：<1%，噪声：<10mV，输出阻抗：0.5Ω，工作频率：DC～10000Hz，

输出电流：25A，输出电压：25V，功率：500VA，供电电压：220VAC，尺寸：44x48x18cm，

重量：18g

功能：为激振器提供输出功率

关于该振动台系统的其它组成部分(控制传感器、振动台控制仪、电荷放大器等)的介绍详见附件 2。

四、加载与测量

4.1 输入地震波

本次竞赛采用振动台单方向加载，通过输入实测地震动数据模拟实际地震作用。振动台输入的地震波取自 2008 汶川地震中什邡八角站记录的 NS 方向加速度时程数据，原始记录数据点时间间隔 Δt 为 0.005s，即数据采样频率 f 为 200Hz，全部波形时长为 205s，峰值加速度 581gal。截取原始记录中第 10s~42s 区间内的数据，并通过等比例调整使峰值加速度放大为 1000gal，作为本次竞赛加载所用的**基准输入波**，如图 6 所示，其数据文件如附件 3 所示。

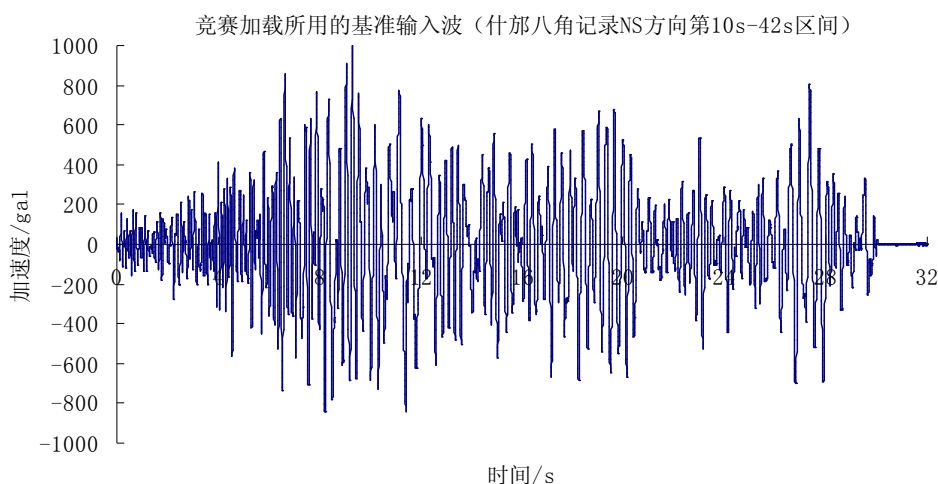


图 6 竞赛加载所用的**基准输入波**（32s）

4.2 荷载施加方式

竞赛加载共分三级进行。在三级加载中，通过控制加载设备输入电压和地震波数据采样频率获得具有不同输出峰值加速度和不同卓越频率的地震波，以全面检验模型对于不同强度和频谱成分地震波作用下的承载能力。加载时**功率放大器的增益(Gain)旋钮统一调至 90 度标识**，此时三级加载的设备输入电压和数据采样频率控制值如下表所示：

加载等级	输入电压	采样频率	加载时间、	台面最大加速度参考值
第一级	0.4V	200Hz	32 秒	0.353g
第二级	0.6V	250Hz	26 秒	0.783g
第三级	0.7V	300Hz	21 秒	1.130g

注：上表中的台面最大加速度参考值通过连接于加载设备台面的加速度传感器测量得到，此时，振动台上的竹模型附加了 24 块小铁块，台面位移未超限。实际输出的台面加速度峰值会因模型结构型式、附加铁块重量及布置方式的不同而存在一定差异。

4.3 台面振动加速度峰值的测量

在对每个模型的每一级加载过程中，都通过传感器对台面振动加速度进行实测。**本次竞赛采用的加载设备所允许的台面最大位移为 $\pm 8\text{mm}$** ，若一些模型在加载过程中，振动台面位移超限，致使台面与限位装置撞击，产生高频加速度分量，将会对结果产生影响。因此实测的台面振动加速度将经过滤波处理后输出，**设定加载设备的滤波限值为低通 20Hz**。加载过程中，将实时显示该级加载下台面振动加速度的峰值 I ，用于最终模型效率比的计算（参见第七项：评分标准）。

注：如因台面位移超限而引起的结构不良反应符合 4.4 所列情况，均判加载失败。

4.4 模型失效评判准则

在进行加载时，出现下列任一情形则判定为模型失效，不能继续加载。同时，将上一个加载级别视为该模型实际所能通过的最高加载级别，并作为模型效率比计算的依据（参见第七项：评分标准）。

- (1) 第一级加载时：**模型中的任一构件出现破坏**；
- (2) 第二级加载时：**模型的主要构件——梁和柱中任一构件出现破坏**；
- (3) 第三级加载时：**模型整体或任一楼层发生坍塌或任一柱脚脱离底板**；
- (4) **每一级加载过程中有铁块脱落或水箱飞出**。

上述失效准则中的“构件破坏”定义为构件出现明显开裂、断开或者节点脱开。

五、模型材料

竞赛期间，承办方为各队提供如下材料及工具用于模型制作。

(1) 竹材：用于制作结构构件。有如下两种规格：

竹材规格	款式
1250×430×0.50mm	本色侧压双层复压竹皮
1250×430×0.35mm	本色侧压双层复压竹皮
1250×430×0.20mm	本色侧压单层复压竹皮

竹材力学性能参考值：弹性模量 $1.0 \times 10^4 \text{MPa}$ ，抗拉强度 60MPa。

(2) 502 胶水：用于模型结构构件之间的连接及水箱与模型的固定。

(3) 热熔胶：用于铁块与模型的固定。

(4) 模型底板：底板厚度约 8mm，长与宽分别为 33cm 和 33cm。底板上除预设孔洞外，不得另行钻孔。

(5) 制作工具：美工刀、钢尺、砂纸、锉刀、改锥、小型锯子。

另外，承办方还提供公用的砂轮机。

六、模型现场安装、加载及测试步骤

6.1 赛前准备

(1) 模型称重：将制作好的模型（不含底板、铁块和水箱）称重（精度 0.1g）；

(2) 将模型安装在底板上，并将铁块固定在模型上，然后：

① 核查每层铁块的数目及覆盖面积是否与所提交方案吻合，计算每层承受的附加铁块质量 W_i ；统计水箱中的注水质量(W_w)；

② 进行高度测量，测出每一层所放置铁块的最底面至模型底板的垂直高度 h_i ；测出模型实际总高度 H ；以上高度计量单位均为 cm；

③ 根据式(1)计算模型等效负载重量 W_e ：

$$W_e = \left(\sum W_i \frac{h_i}{H} + W_w \right) \frac{H}{100} \quad (1)$$

(3) 得到入场指令后，迅速将模型及底板运进场内，安装在振动台上，紧固螺栓，固定水箱，准备进行加载。**赛场内安装时间不得超过 10 分钟。**

(4) 以上过程由各队自行完成，赛会人员负责监督、标定测量仪器和记录。如在此过程中出现模型损坏，则视为丧失比赛资格。

6.2 加载及测试步骤

(1) 参赛队代表进行 2 分钟陈述，之后评委提问 2 分钟。

(2) 依次进行三级加载，每级加载完成后依据 4.4 的失效评判准则评价模型是否失效。

七、评分标准

7.1 总分构成

结构评分按总分 100 分计算，其中包括：

- | | |
|-------------------|----------|
| (1) 计算书及设计图 10% | (共 10 分) |
| (2) 结构选型与制作质量 10% | (共 10 分) |
| (3) 现场表现 5% | (共 5 分) |
| (4) 加载表现评分 75% | (共 75 分) |

7.2 评分细则

A. 计算书及设计图

- | | |
|------------------|---------|
| (1) 计算内容的完整性 | (共 6 分) |
| (2) 图文表达的清晰性、规范性 | (共 4 分) |

注：计算书要求包含：结构选型、结构建模及主要计算参数、受荷分析、节点构造、模型加工图（含材料表）、**铁块分布详图、水箱注水重量**。

B. 结构选型与制作质量

- | | |
|---------------|---------|
| (1) 结构合理性与创新性 | (共 6 分) |
| (2) 模型制作美观性 | (共 4 分) |

C. 现场表现

- | | |
|----------|---------|
| (1) 现场陈述 | (共 3 分) |
| (2) 现场答辩 | (共 2 分) |

D. 加载表现评分

本次比赛各组模型在加载环节的表现将根据其效率比 E_i 的计算结果进行评分。效率比 E_i 的计算如式(2)所示：

$$E_i = \frac{I \times W_e}{100M_M} \quad (2)$$

其中各项指标的意义与计算如下：

W_e 为所有各层铁块的总重量(W_i)和水箱注水重量(W_w)，并考虑高度的加权系数后计算得到的等效负载重量，如式(1)所示；

M_M 为模型(不含底板和螺栓)质量。

I 为该级加载完成后通过振动台加速度传感器实测的台面振动加速度峰值。

设 E_{\max} 为所有模型中的最高效率比，各模型根据其效率比结果获得的加载表现分 K 的计算公式如式(3)：

$$K = \frac{E_i}{E_{\max}} \times 75 \quad (3)$$

以上 A-D 各项得分相加，分数最高者优胜。