



清华大学第二十二届结构设计大赛组委会文件

组字 [2016] 002 号

清华大学第二十二届结构设计大赛专业组比赛赛题

一、命题背景

位于马来西亚吉隆坡的石油双塔建筑是世界上最高的双塔楼，共 88 层，高 452 米，由两个独立塔楼组成，最大的特点是在两座主楼的 41 和 42 楼之间有一座长 58.4 米、距地面 170 米高的天桥，连接两座塔楼。此建筑设计巍峨壮观，气势雄壮，著名电影《偷天换日》曾取景此楼。

然而，以天桥连接的双子塔楼在结构的抗震设计上却是一个难题。高空中的天桥连接着两座塔楼，二者在振动过程中由于振型的不同，使得中间的天桥处于复杂的受力状态，实际工程中会在天桥与塔楼的连接部位通过相关的抗震设计避免天桥发生破坏

清华大学第二十二届结构设计大赛以振动荷载下的双子塔楼为模型，要求选手使用指定材料制作结构模型，通过振动加载观察并学习两座塔楼在天桥连接下的振动特性，以及天桥的受力特点及破坏形式，理解其中的力学原理。

本次结构设计大赛以双子塔楼模型、振动荷载、多自由度振动为核心，旨在提高同学们综合运用知识、从实际现象中发现问题并解决问题的能力，培养同学们的团队协作与创新设计意识，激发同学们的科研探索热情。



二、赛题概述

竞赛赛题要求参赛选手设计一对连体双子塔楼，符合各项尺寸与净空要求，能够承受振动荷载。选手在加载前制作好比赛结构，接受尺寸与净空检查，然后进行加载实验。连体双子塔楼分为两个三层框架，一个空中连廊，各构件与连接节点要求采用桐木和 502 胶水制作。

三、模型要求

1. 塔楼模型尺寸要求请参照附图1、2。楼层净高（每层楼内部净空高度）至少为200mm，楼板净空面积为 $100 \times 200\text{mm}$ （每个方向长度均不得小于要求，且长边必须作为建筑侧边）
2. 连廊构件跨度（即两塔楼净间距）不小于150mm，宽度不小于100mm，且在俯视图中连廊构件的边缘必须与整体结构外边缘重合，请参照附图1、2。
3. 楼板及连廊上垫硅胶垫，砝码放置在硅胶垫上，硅胶垫尺寸同 要求1 中楼板净空面积。选手的结构须满足硅胶垫能够放置在楼板上，且每层楼有足够的柱间距保证砝码能够从楼外放置到楼内。
4. 结构振动过程中砝码不得掉落。楼层上的硅胶垫具备一定的抗滑能力，但选手仍可以考虑设置围护结构，保护砝码。选手应考虑振动过程中硅胶垫可能的滑落问题。
5. 塔楼及连廊结构形式不限，但制作过程中不得改变所用材料的力学性能。
6. 作品力求创造性，结构合理，制作精巧。
7. 各参赛队仅能提交一份作品。
8. 完整的作品包括以下部分：
 - ①结构设计计算书。包括荷载分析、结构选型、计算简图、内力分析、承载能力估算。（本部分对一、二年级学生可不作要求）
 - ②设计方案。结构图若干，包括主要构件、节点详图及材料表。
 - ③结构模型（实物）。要求模型制作符合设计制作要求，并与计算书一致。如修改模型，要求同时修改计算书。
9. 作品由各参赛队命名。作品名称必须健康向上、突出特点，经组委会批准后生效。

四、模型材料及工具

1. 本届大赛的模型材料，即结构构件材料为桐木、通用性502胶，材料价目表如下表所示：

材料		规格 (mm ²)	单价 (元)
桐木	杆	5*6*1000	0.5
		3*5*1000	0.5
		2*4*1000	0.5
		2*2*1000	0.5
	板	1*55*1000	2.0
通用性 502 胶		瓶	2.0

2. 模型制作所用材料仅限于组委会所提供的材料，允许对所给材料进行加工、组合，但所加工、组合后的材料均不得改变材料的力学性能。如模型中采用任何非组委会提供的材料，一经查实，将取消参赛资格。
3. 材性试验报告将在命题讲解时提供，并鼓励选手根据需要做更多的试验。
4. 选手自备制作工具。

五、模型加载要求

(一) 加载仪器说明

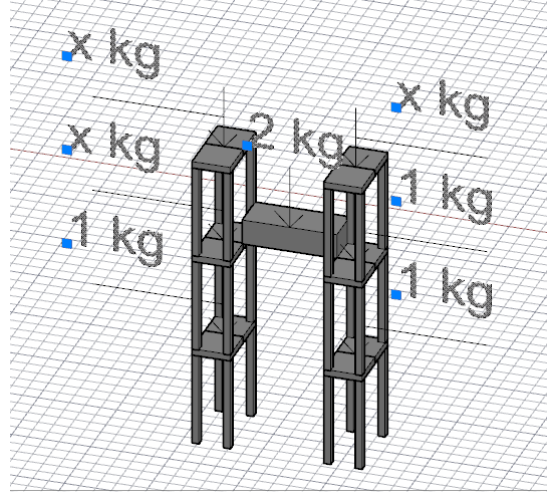
1. 加载设备主要由加载板、结构固定装置（钢压条）、砝码、振动台、硅胶垫组成，加载板固定于振动台上，见附图3、4。
2. 加载设备提供8个钢压条来固定结构模型与加载台台面，钢压条与台面采用M2.5螺栓固定，其具体形状和尺寸详见附图5所示。
3. 硅胶垫尺寸同 要求1 中楼板净空面积，由硅胶制作，可以不考虑其刚度，模拟现实中楼面。

(二) 加载要求

1. 荷载为振动荷载，由振动台施加。
2. 右图给出了加载砝码的方式。其中，左侧一层、右侧一、二层为固定荷载楼层，加1kg砝码，

左二、三层与右三层为可变荷载楼层。

3. 初赛时，可变荷载楼层上的砝码为3kg，连廊上配重2kg，放置位置由裁判团选择，初赛振动波形及其他信息见附录1。决赛时可变荷载楼层上的起始砝码为5kg，连廊上配重2kg，加载成功后选手有不多于两次的机会挑战可变荷载楼层上的更大的砝码质量（基本单位为0.5kg），如果挑战失败，之前成绩不保留，决赛振动波形仅幅值与初赛波形不同，见附录1。



4. 由于楼面制作问题导致的不平整，可能引起的问题，需要选手在设计、制作时考虑在内，产生的后果由选手自行负责。
5. 硅胶垫及砝码必须全程牢固放置在楼板上，中途发生掉落视为失效。
6. 模型在加载过程中不作净空要求，但是应避免结构变形过大导致无法正常加载。
7. 模型在加载仪器上的安装固定只能使用组委会提供的压条和螺母，不得自带装备固定。
8. 模型须保证在加载全过程中能够稳定地放置在加载仪器上，加载过程中选手不得以任何方式接触结构和加载装置的任何部位。
9. 模型安装由选手完成，工作人员在选手允许的情况下可进行协助配合。

（三） 加载步骤

1. 在准备区，电子秤定模型自重，电子称精度为0.1g。
2. 上台前工作人员现场测量模型净空是否符合要求。
3. 选手在加载板上现场安置模型，放上硅胶垫，做好固定工作。
4. 队伍中其他选手在安装模型过程中进行答辩展示。
5. 荷载施加按以下步骤进行：（1）按照基本荷载，摆好砝码，启动振动台施加振动荷载；（2）若加载成功选手有不多于2次机会选择的更大的配重（增量最小值为0.5kg），摆好砝码，启动振动台施加振动荷载。
6. 加载结束后卸除模型，同时下一组进入另一加载区加载。

（四） 失效条件

凡出现下列情况之一者，即属模型失效：

1. 模型无法完成拼装或模型无法按照设计要求正确安装就位，如柱脚无法完全放置在加载板

内等情况，详情参照三、模型要求；

2. 因模型的部件障碍、变形过大、整体翘起或模型发生破坏等原因，使得砝码无法稳定放置；
3. 模型加载时发生严重破坏，如结构整体垮塌，因柱脚破坏导致的结构倾覆，局部结构出现严重破坏等情况；
4. 模型发生节点拔出或者劈裂，使得构件之间分离；
5. 模型出现较大变形、失稳或围栏发生严重损毁，使得硅胶垫或所加配重掉落；
6. 评审委员会认为失效的其它情况。

六、 竞赛规程及要求

1. 要求3至4人组队参赛，且必须在规定时间内向组委会报名。
2. 每人只允许参加一个参赛队；各队独立设计、制作。各组作品不得相互抄袭和模仿，如果发现雷同作品，则由裁判团现场备案，并进行裁定，期间相关参赛队可以进行申诉，所有组进行完加载之后，由裁判团宣布是否对相关参赛队进行处罚（取消其参赛成绩）。
3. 初赛时选手自行选择时间地点制作结构，只需在初赛当天指定时间将结构带至参赛地点加载即可。之前的预加载环节不提供振动加载测试，选手自行分析波形，利用横向荷载加载装置进行拟静力试验。
4. 初赛按照成绩进行排名，前20组参赛队获得决赛资格。决赛前，先由组委会称量各组结构的质量，由重到轻确定各组决赛加载顺序。决赛时，按照顺序加载，出现结构失效的情况则淘汰出赛，比赛继续进行，直至20组结构全部加载完毕，按照评分细则决定参赛组排名及获奖情况。
5. 选手决赛参赛作品与初赛参赛作品须保持结构形式一致，且决赛作品相比初赛作品结构质量增加不得超过 20g，质量减轻不限，违规者取消参赛资格。
6. 仪器和设备不可避免的有一定的制作误差，请选手谅解并在制作中予以考虑。组委会将在初赛及决赛前组织预加载环节，请选手踊跃参加。
7. 如遇不可抗因素导致比赛无法顺利进行，由组委会和评审委员会协商给出解决方案。

七、 评分标准

各组总评分 S 最高得分为 100 分。结构制作、拼装违反规定者和在加载过程中失效者不参与评分。决赛总评分由概念设计评分 S_1 和加载表现评分 S_2 两部分组成，其中加载表现评分从荷载等级和承载效率两个方面进行评定。

初赛:

只计加载表现评分 S_2 中的承载效率部分,即结构自重。通过加载的选手,按照结构自重由低到高进行排名。

决赛:

$$S = S_1 + S_2$$

1、概念设计评分 S_1

根据本次比赛章程,所有专业组成员需要提交结构计算书并进行不超过 5 分钟的现场答辩(完全由大二学生组成的参赛队可用结构概念设计代替计算书),因此概念设计评分 S_1 将综合考虑计算书(或概念设计)等方面进行评分。概念设计评分 S_1 满分为 20 分,评审委员将参考以下分项得分。

计算书	10 分
结构选型与制作质量	5 分
安装时长	5 分

完全由大二学生组成的参赛队按以下分项得分进行参考

结构选型与制作质量	10 分
安装时长	10 分

新生组和外系组不进行概念设计评分 S_1 的评定,直接以满分计入。

评审委员将在选手答辩后现场进行评分,并在去掉一个最高分和一个最低分后,以平均分计为选手概念设计评分 S_1 。

选手安装结构与答辩同步进行,安装时间不得超过 5 分钟,否则将在安装时长项酌情扣分。

2、加载表现评分 S_2

加载得分 S_2 满分为 80 分,从结构配重等级和承载效率两个方面进行评定,计算公式的形式如下:

$$S_2 = 80 \times (\beta_1 S_{\text{load}} + \beta_2 S_{\text{weight}})$$

(1) 配重等级评分 S_{load}

各参赛组在决赛中的振动环节所放置配重最小为 5kg,所加荷载质量越大,加载成功后得到的分数越高。失效结构不参与评分。

结构荷载等级得分 S_{load} 按下式进行计算:

$$S_{\text{load}} = 1 - \sqrt{\frac{L_{\text{max}} - L}{L_{\text{max}} - L_{\text{min}}}} \times 40\%$$

其中, L 表示该参赛组的单层可变荷载楼层上的振动荷载质量, L_{min} 表示在所有通过加载的参赛队中所加最小的配重质量, L_{max} 表示在所有通过加载的参赛队中所加最大的配重质量。

(2) 承载效率评分 S_{weight}

各参赛组的结构自重 G 将在拼装前进行称重,精确到 0.1g,承载效率评分 S_{weight} 按下式进行计算:

$$S_{\text{weight}} = \frac{G_{\min}}{G}$$

其中， G 表示该参赛组的结构自重， G_{\min} 表示在所有通过加载的参赛队中最小的自重。

(3) 系数 β_1 与 β_2 的确定

决赛系数将根据所有通过初赛的专业组选手的实际情况进行设置。记 V_{load} 为决赛准备阶段各入围专业组选手提交的配重质量等级的初步计算得分 S_{load} 的变异系数， V_{weight} 为所有入围决赛的专业组选手的承载效率评分 S_{weight} 的变异系数，决赛系数 β_1 与 β_2 按下式确定：

$$\begin{cases} \beta_1 + \beta_2 = 1 \\ \beta_1/\beta_2 = V_{\text{load}}/V_{\text{weight}} \end{cases}$$

但， β_1 与 β_2 ，若大于 0.6，取 0.6；若小于 0.4，取 0.4。

新生组和外系组不另外计算系数，决赛系数与专业组相同。

附：

变异系数的计算方法提供如下：

$$V_{\text{weight}} = \frac{S_{\text{weight}}}{\bar{x}_{\text{weight}}}$$

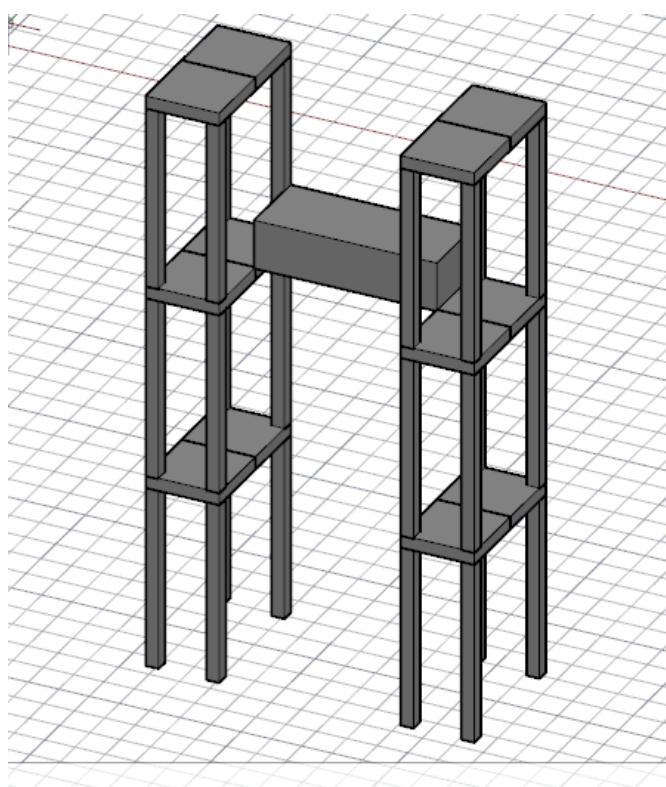
其中，

$$\bar{x}_{\text{weight}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{\text{weight},i}$$

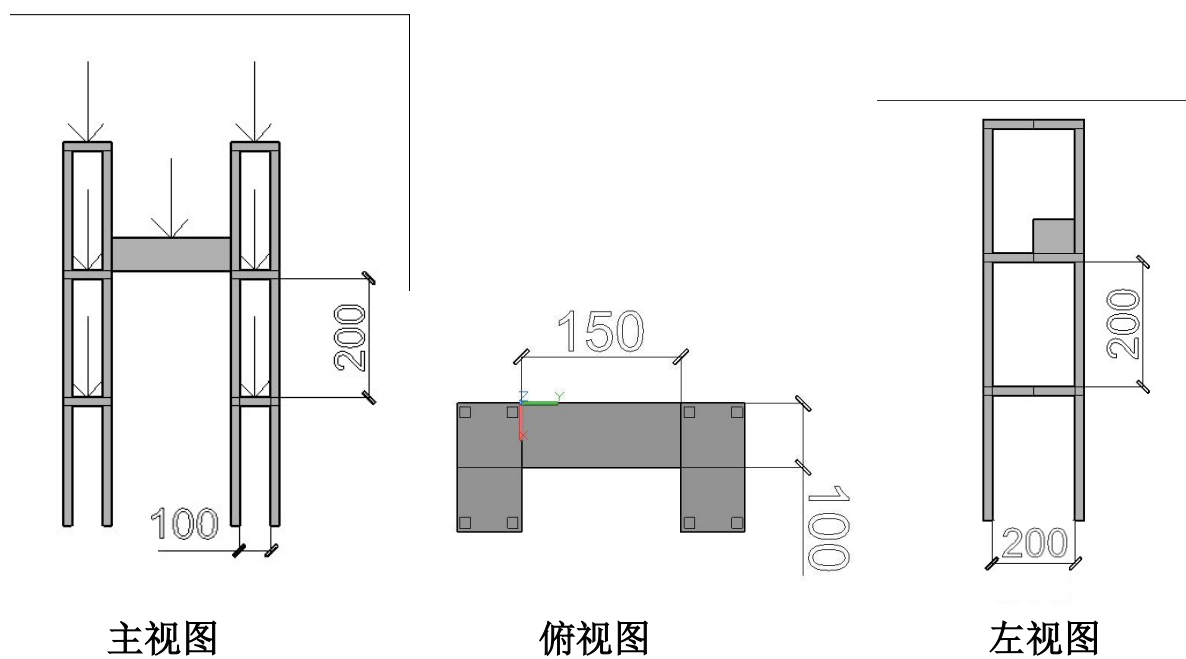
$$S_{\text{weight}} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (S_{\text{weight},i} - \bar{x}_{\text{weight}})^2}$$

式中， n 表示通过初赛的专业组选手小组数量， $S_{\text{weight},i}$ 表示第 i 小组的拼装时间分项得分 S_{weight} 。 V_{load} 的计算方法相同，不再赘述。

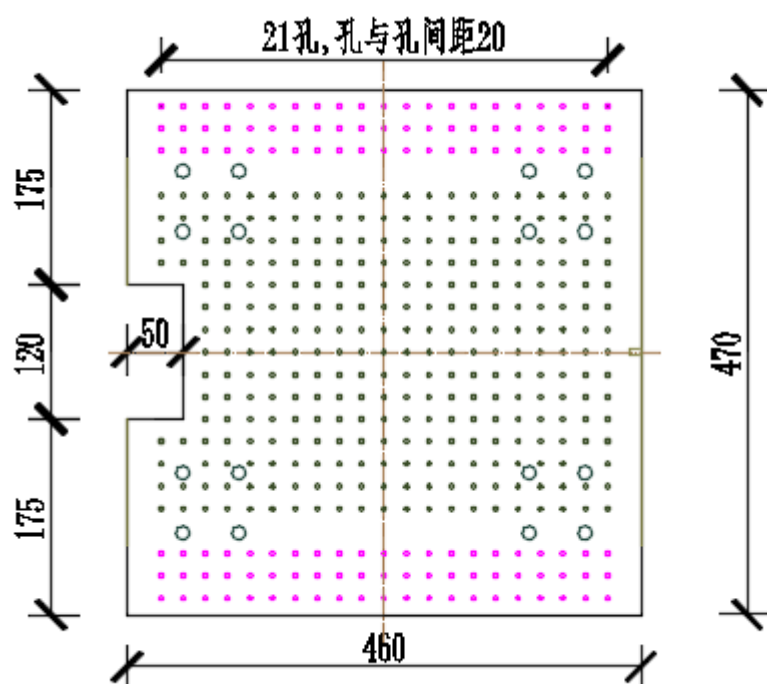
八、 附图



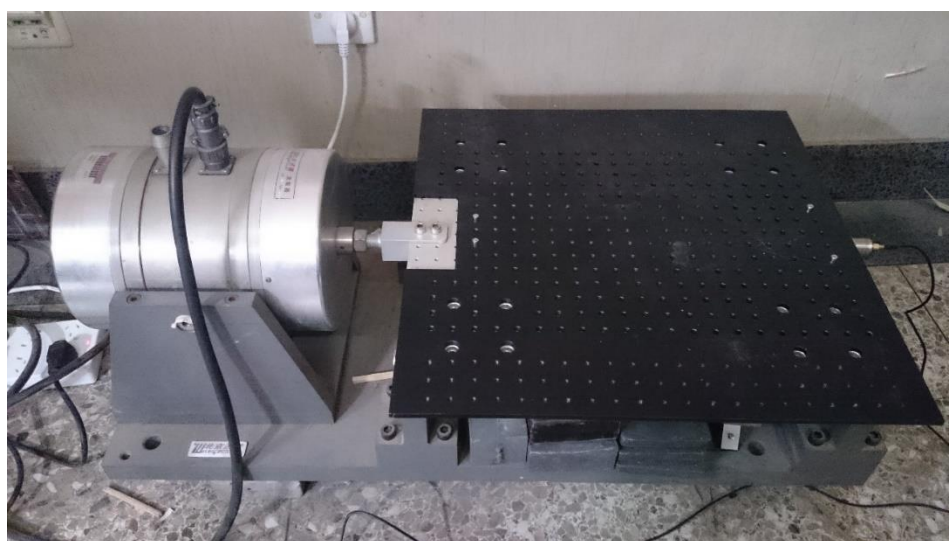
附图1 双子塔楼模型示意图



附图2 双子塔楼三视图及尺寸示意图



附图3 加载板平面图



附图4 振动台加载平台实图



附图5 固定压条示意图

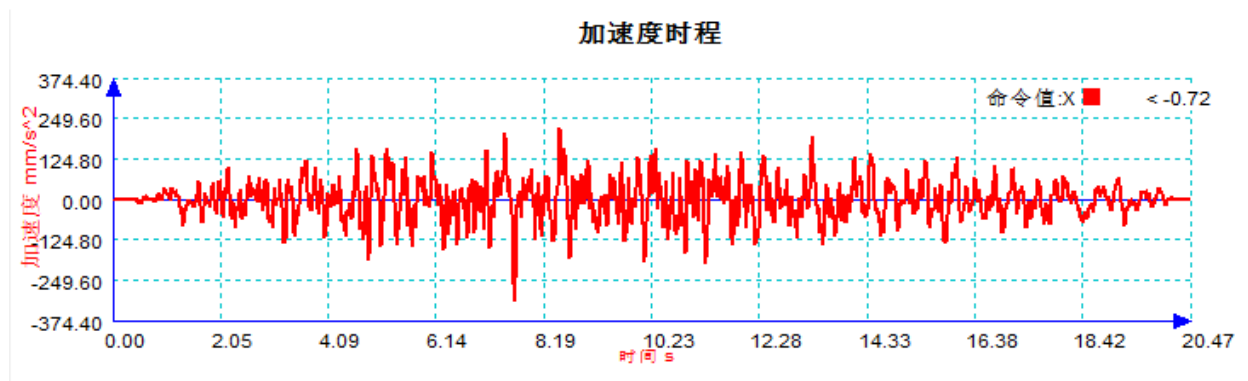
九、附录

附录 1 比赛波形

本次竞赛采用振动台单方向加载，通过输入地震动数据模拟地震作用。共两条地震波：Taft 波和 EL-Centro 波

1、Taft 波形

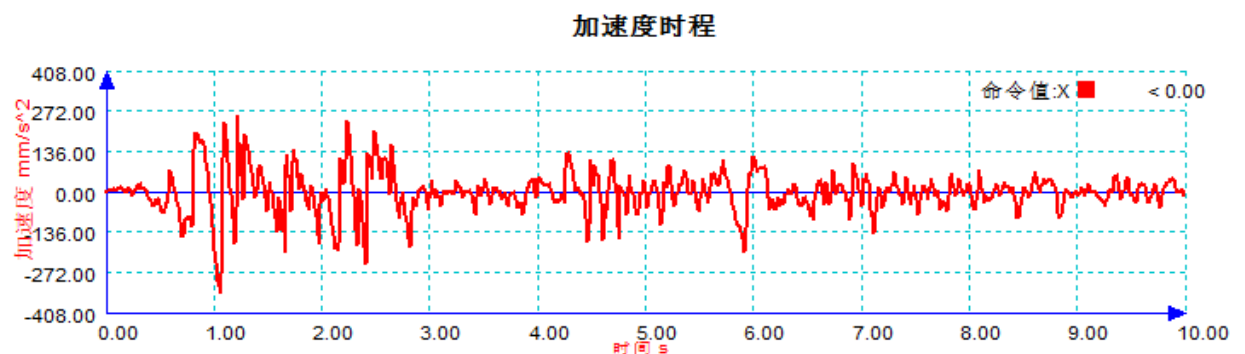
地震波数据点时间间隔 t 为 0.01s ，即数据采样频率 f 为 100Hz ，波形时长为 20s ，波形如图 1 所示：



峰值加速度为 312.77mm/s^2 ，初赛时地震波放大 7 倍，加速度最大值约为 $0.2g$ ，决赛放大 13 倍，加速度最大值约为 $0.4g$ 。

2、EL-Centro 波形

地震波数据点时间间隔 t 为 0.01s ，即数据采样频率 f 为 100Hz ，波形时长为 10s ，波形如图 1 所示：



峰值加速度为 340.3mm/s^2 ，初赛时地震波放大 6 倍，加速度最大值约为 $0.2g$ ，决赛放大 12 倍，加速度最大值约为 $0.4g$ 。

用于动力分析的波形文件请各参赛组联系组委会进行拷贝，文件格式为 .txt，由选手自行加工并分析。

声明: 因设备固有性能限制, 在加载过程中会有台面与限位装置撞击的现象发生, 由此产生的高频加速度分量亦认定是荷载作用。而当其引起的结构不良反应符合赛题中五、(四) 失效条件所列情况时, 均判定为加载失败。