



清华大学第二十一届结构设计大赛组委会文件

组字 [2015] 002 号

清华大学第二十一届结构设计大赛专业组比赛赛题

一、命题背景

我国位于世界两大地震带——环太平洋地震带和欧亚地震带之间，属于地震高发国家，例如近年来新疆于田 7.3 级地震、四川芦山 7.0 级地震等等。而桥梁是人们生活中常见的土木工程建筑物，起着缩短距离、跨越天堑的作用，在不少地区甚至是当地经济发展的生命线。因此，在地震作用下，桥梁的安全性不容小觑。不同桥梁在地震作用下有各异的破坏形式，其中曲线桥梁的墩柱扭转破坏是常见问题，这也引起了土木工程领域广泛的关注。



图 1-1 Foothill Boulevard 桥墩柱扭转破坏（Northridge 地震）

3D 打印是一种以数字模型文件为基础，运用粉末状金属或塑料等可粘合材料，通过逐层打印的方式来构造物体的快速成型技术，用于制造各种复杂精密的零部件，该技术在工业设计、建筑、航空航天、医疗产业等领域都有所应用。

清华大学第二十一届结构设计大赛以振动荷载下的曲线桥梁模型为基础，结合 3D 打印这一新的构筑技术，扩展参赛同学的设计能力：通过计算机三维结构设计，鼓励同学们对振动荷载这一平时接触较少的荷载形式进行更深入的认识与研究，并在桥梁这一具体的结构形式上加以运用和实践，理解其中的力学原理。同时，利用 3D 打印技术解放参赛者的结构制作时间，模拟现实中桥

梁的分段施工合拢。

本次结构设计大赛以曲线桥梁制作、3D 打印、振动荷载为其三大核心点，旨在提高同学们综合运用知识的能力，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座曲线桥梁，符合各项尺寸与净空要求，能够承受移动荷载和振动荷载。选手在加载前将所有结构构件和节点制作好，由现场裁判团检查后进行拼接完成比赛结构，接受尺寸与净空检查，然后进行加载实验。弯桥分为 2 段直线段，1 段曲线段，各段连接采用 3D 打印节点，除此以外，各构件与连接节点要求采用桐木和 502 胶水制作。拼装过程不能用胶水及其它任何辅助工具和材料。新生组节点统一不使用 3D 打印，拼装过程中允许使用 502 胶水。

三、 模型要求

1. 弯桥各段尺寸要求请参照附图1。桥高（由振动台顶面算至桥面底部最低点）至少为400mm，直线段最小长度为300mm，其中悬臂段（由边缘算至柱中心）最小为200mm。两直线段夹角为 120° 。
2. 桥梁模型至多设置3根桥墩，两两之间最小净跨（一柱边缘到另一柱边缘的最小距离）要求为200mm。其中两直线段的桥墩须大致放置在加载板的对角线上。选手需自行制作墩脚以便于压条固定，所有墩脚与固定螺钉必须完全放置在加载板内。加载板平面图见附图4，桥墩放置示意图参照附图1。
3. 桥面板由组委会提供，具体尺寸参照附图2。选手制作的模型必须带有围护栏，围栏须高出制作桥体（不包括提供的桥面板）顶面至少30mm，以防止桥面板从桥体上滑落。
4. 模型桥宽度不作要求，但选手制作的桥体必须可以牢固放置桥面板，不得因桥面有隔空或模型受轻微晃动而掉落。桥体、围栏与桥面板放置示意图参照附图3。
5. 模型桥结构形式不限，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分为结构构件材料和节点材料两种。
2. 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

3. 对于专业组和外系组，各桥段连接节点必须用3D打印完成，选手可选用AutoCAD等软件建立三维节点模型，利用组委会提供的3D打印软件布置打印模型并计算打印时间，最终打包提交可直接打印的.up3文件，由科协负责打印出来。后续会有软件培训讲解建模软件以及打印软件的详细使用方法。3D打印文件要求与预约方法详见组委会3号文件。
4. 选手自行选择时间地点制作拼装结构所需部件，在指定比赛时间在现场完成拼装和加载。
5. 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。
6. 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。
7. 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）、遥控小车及负重块、砝码、振动台、桥面板组成，加载板固定于振动台上，见附图5，遥控小车示意图与具体参数见附录1。
2. 加载设备提供6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6所示。
3. 桥面板尺寸见附图2，质量为0.96kg，由硅胶制作，可以不考虑其刚度，模拟现实中沥青路面。

（二）加载要求

1. 荷载分为移动荷载与振动荷载。移动荷载为固定负重的遥控小车通过桥体，振动荷载由振动台施加。
2. 初赛时移动荷载遥控小车及其上负重为4kg；施加振动荷载时，桥上配重为4kg，由2个2kg砝码分开放置，放置位置由裁判团选择，初赛振动波形及其他信息见附录2。决赛时移动荷载遥控小车及其上负重为6kg；施加振动荷载时，桥上配重至少6kg，选手可根据自己的结构情况增加配重（基本单位为1kg），其中起步的6kg由3个2kg砝码分开放置，剩余增加的配重优先选用2kg砝码，例如选手选择9kg配重，则砝码配置为2+2+2+2+1（kg），所有配重位置均由裁判团决定，决赛振动波形仅幅值与初赛波形不同，见附录2。

荷载	移动荷载	振动配重
初赛	4kg	4kg (2+2)
决赛	6kg	至少6kg (2+2+2+...)

3. 由于桥面制作问题导致桥面板不平整，可能引起的小车前进困难、振动时造成动力冲击和加载时间延长等因素，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。
4. 遥控小车通过桥梁模型的时间不得超过1min，超时将对S₃项按时间阶梯进行扣分。详见七、3、(4)遥控小车通行超时扣分。
5. 桥面板必须全程牢固放置在桥体上，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. 上台前选手拼装完成比赛结构，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桥梁模型，放上桥面板，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）选手自行操控小车通过桥梁；（2）撤去小车，根据之前选手选择的配重和裁判团选择的位置，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，使得桥面板无法稳定放置或小车不能顺利通过桥梁；
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，使得桥段之间分离；
5. 模型出现较大变形、失稳或围栏发生严重损毁，使得桥面板或所加配重掉落；
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。遥控小车操作将在初赛前一周组织各组进行熟悉与练习。
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，由轻到重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，直至现场有10组参赛队通过加载或20组参赛队全部加载完成。

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。组委会将在初赛前组织若干次预加载环节，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 、造型美观评分 S_2 和加载表现评分 S_3 三部分组成，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_3 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：

$$S = S_1 + S_2 + S_3$$

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 15 分，评审委员将参考以下分项得分。

计算书	5 分
结构选型与制作质量	5 分
设计图与安装过程	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	5 分
设计图与安装过程	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 设计图与安装过程 项酌情扣分。

2、造型美观评分 S_2

各组选手在决赛前提交一张本组结构的实物图，在决赛的加载环节开始前将各组结构实物图统一编辑成册，由现场的评委与观众进行投票。造型美观评分满分为 15 分，对应的计算公式如下：

$$S_2 = 15 \times \frac{P}{P_{\max}}$$

其中，P 表示该参赛队所得票数， P_{\max} 表示票数最高参赛队所得票数。

3、加载表现评分 S_3

加载得分 S_3 满分为 70 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：

$$S_3 = 70 \times (\beta_1 S_{\text{load}} + \beta_2 S_{\text{weight}})$$

(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 6kg，具体质量由选手在赛前自行确定。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：

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

其中，L 表示该参赛组的振动荷载质量， 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，

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

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

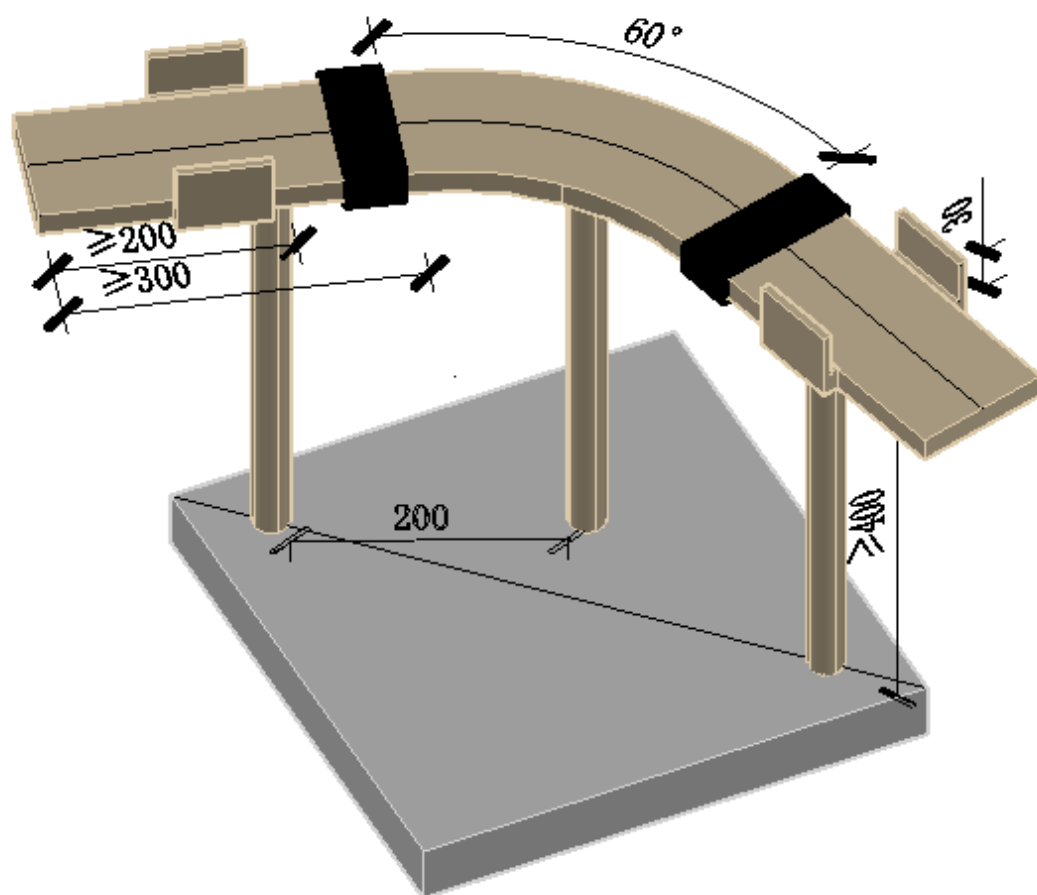
式中， n 表示通过初赛的专业组选手小组数量， $S_{\text{weight},i}$ 表示第 i 小组的拼装时间分项得分 S_{weight} 。
 V_{load} 的计算方法相同，不再赘述。

（4）遥控小车通行超时扣分

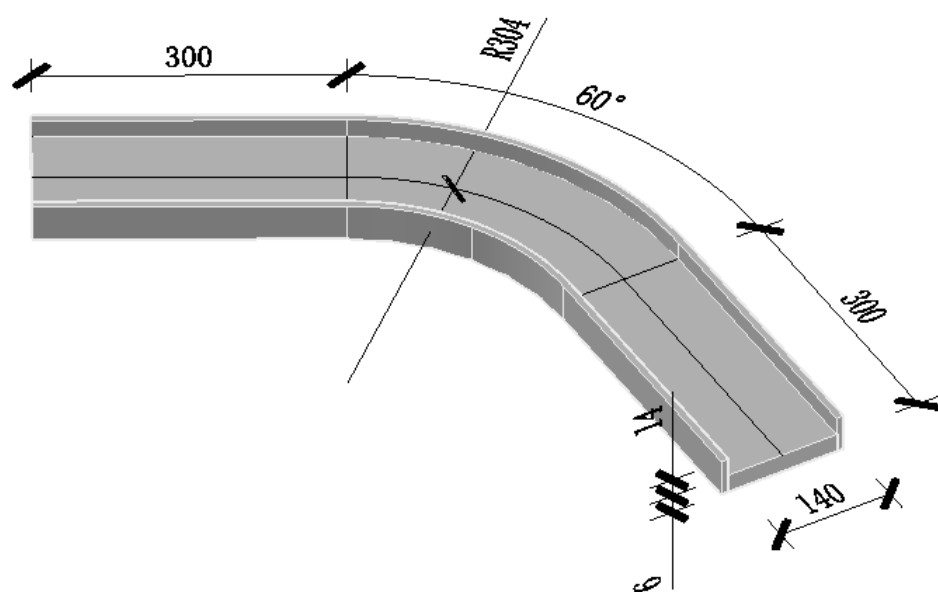
如果遥控小车通过桥梁模型时间超过 1min，则每超过 10s 对 S_3 项扣除 1 分，时间向上归档，例如：通行时间为 1min13s，则 S_3 项扣 2 分。

本项扣分上限为 6 分。

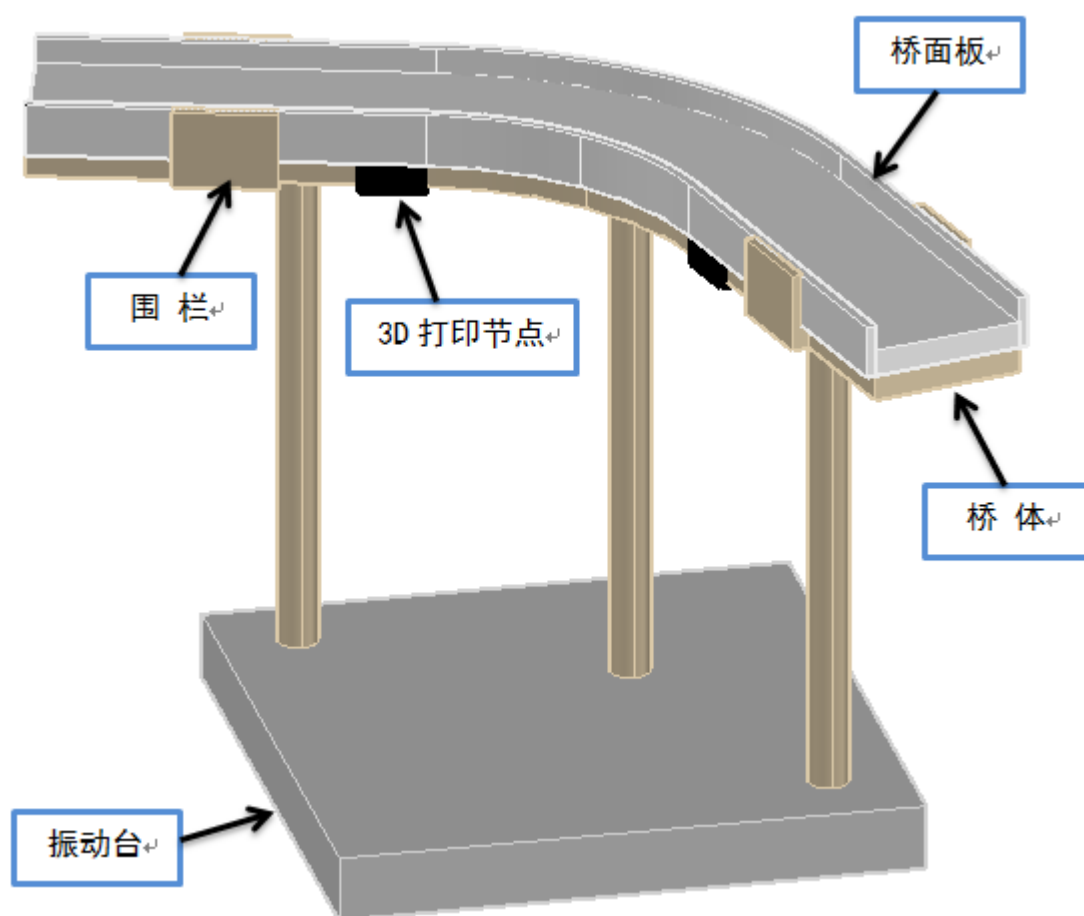
八、 附图



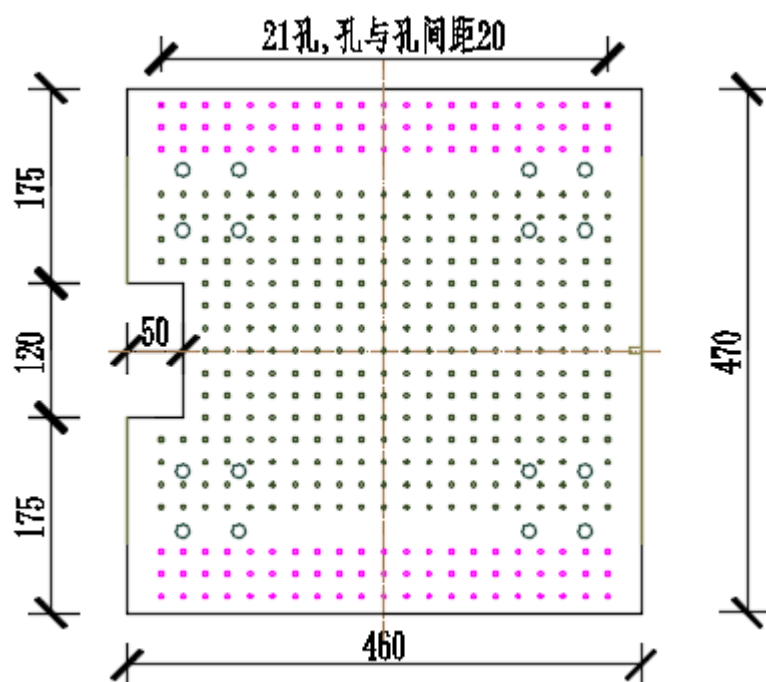
附图1 桥梁模型尺寸示意图



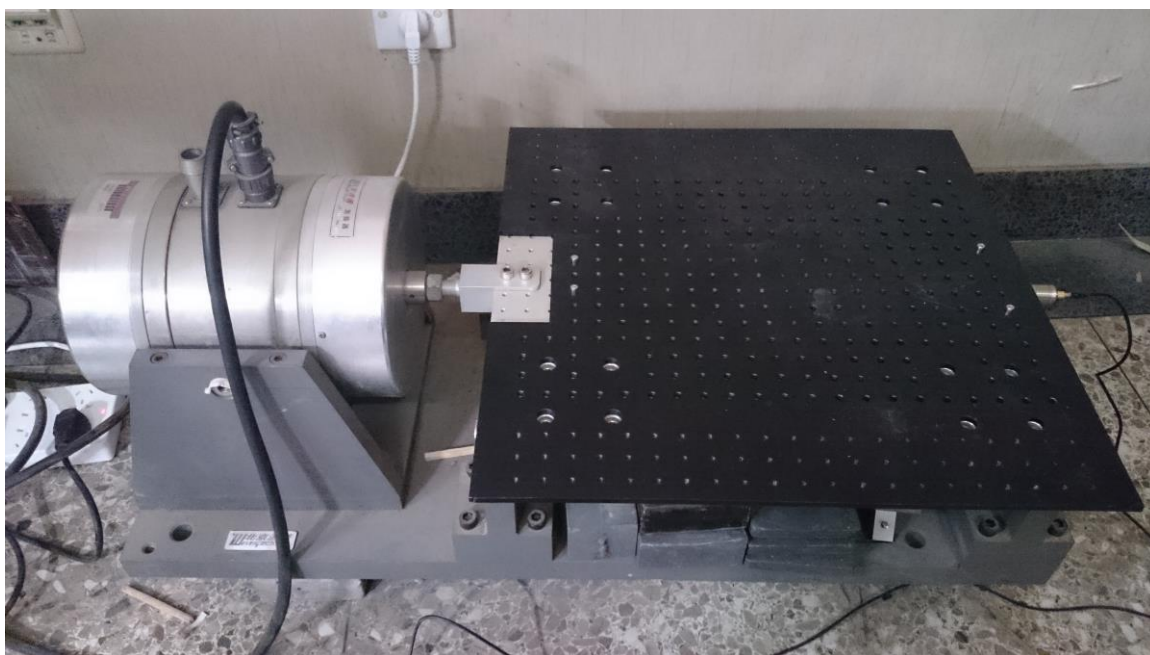
附图2 桥面板尺寸示意图



附图3 桥梁模型整体各构件示意图



附图4 加载板平面图



附图5 振动台加载平台实图



附图6 固定压条示意图

九、 附录

附录 1 加载遥控小车说明

主要结构图：

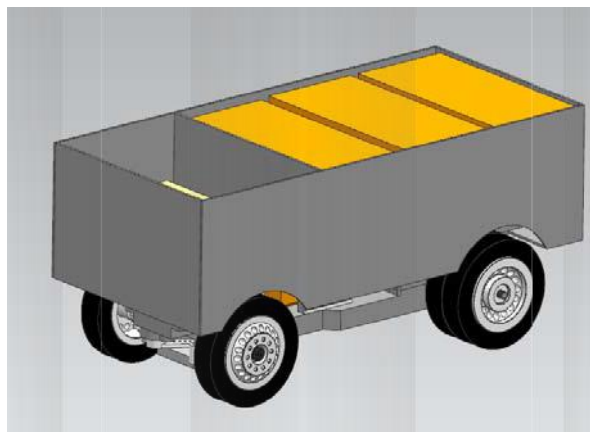


图 1 小车外观图

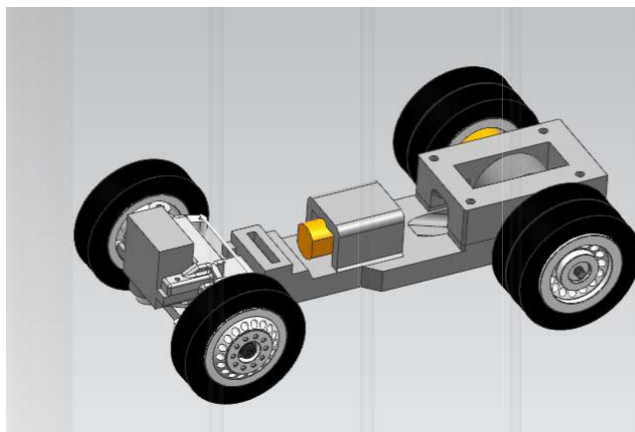


图 2 小车结构图

外形尺寸：177mm×90mm×93mm

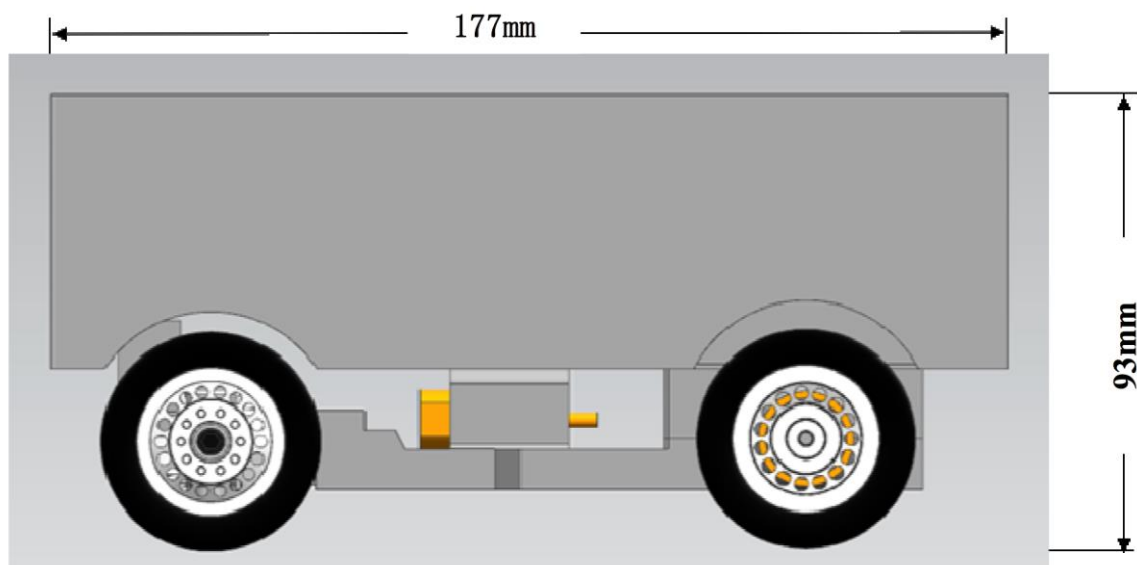
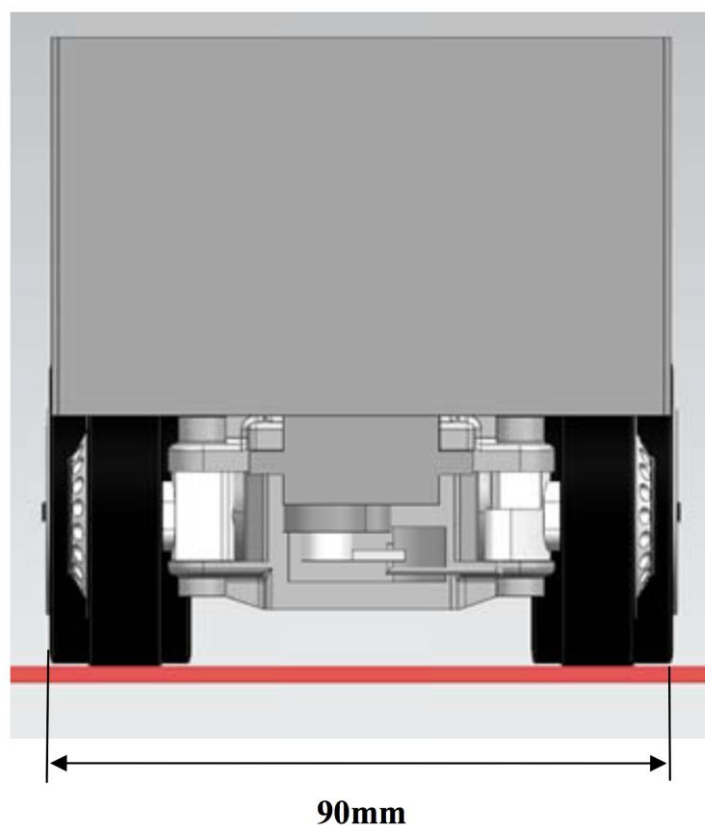


图 3 小车外形尺寸图



90mm

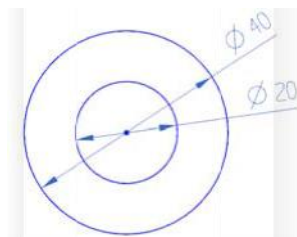
图4 小车轮距图

轴距：117mm

轮距：前 68mm/后 70mm

速度：6-8m/min

转弯半径：20mm×40mm（转弯时内外侧留下痕迹的直径）



车架结构：主副组合结构

驱动方式：后轮驱动，并带有差速器

爬坡度：7%以下

离地间隙：12.4mm

自重：1kg

控制器：自动跳频数字系统

附录 2 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。

初赛所用振动波：

地震波数据点时间间隔 t 为 0.002s ，即数据采样频率 f 为 500Hz ，波形时长为 60s ，波形如图 1 所示：

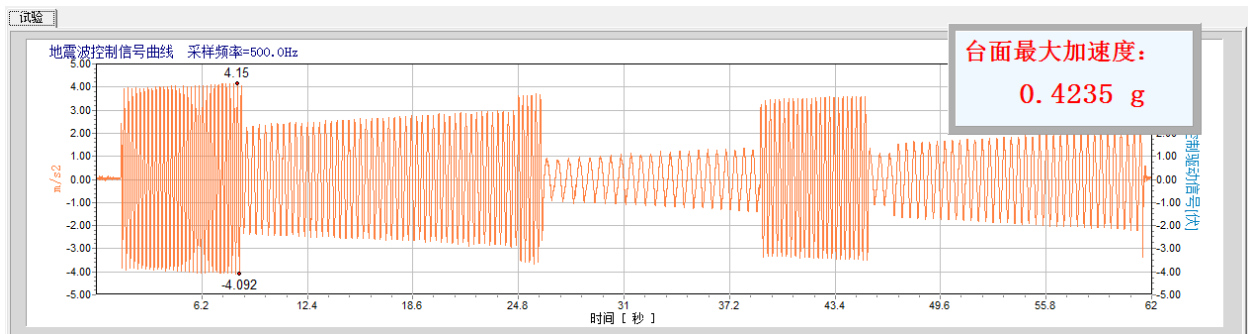


图 1 初赛振动波形曲线

设备输入电压和数据采样频率控制值如下表所示：

输入电压	采样频率	加载时间	台面最大加速度参考值
1V	500Hz	60s	0.4235g

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。

决赛所用振动波：

地震波数据点时间间隔 t 为 0.002s ，即数据采样频率 f 为 500Hz ，波形时长为 60s ，波形如图 2 所示：

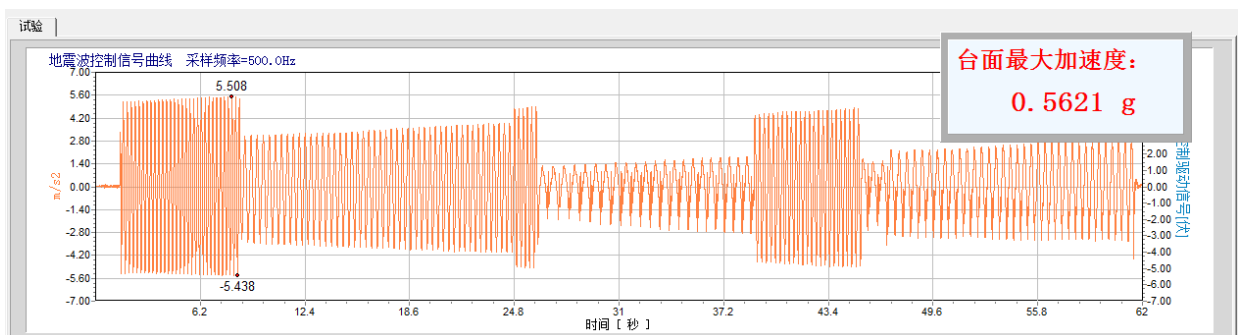


图 2 决赛振动波形曲线

设备输入电压和数据采样频率控制值如下表所示：

输入电压	采样频率	加载时间	台面最大加速度参考值
1V	500Hz	60s	0.5621g

决赛波形与初赛相比仅幅值不同。波形文件同预赛。

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。