

## 附件 1：第九届江苏大学土木工程结构创新竞赛模型加载组赛题

# 《撞击荷载下变参数两跨四车道桥梁结构设计与制作》

## 1 命题背景

随着我国科技发展，桥梁的设计和建造不断挑战极限，有力推动了我国交通强国建设，建成的公路桥梁已超过 80 万座，高铁桥梁总长达 1 万余千米，跨越大江、大河及海洋的桥梁日益增多。与此相对应，在建和已建成的桥梁被撞事故也逐年增加。据统计，长江上发生的船撞桥事故超过 200 起，其中武汉长江大桥被撞就达 68 次。2007 年 6 月发生的九江大桥桥墩被撞，导致出现 200m 长桥面垮塌、数人死亡的重大安全事故。大型船舶撞击桥梁事故的严重性引起了越来越多的关注。

本届赛题以承受移动荷载和撞击荷载的桥梁为对象，通过在赛题中加入部分待定参数，赋予赛题更多的灵活性，同时增加现场设计环节，强调对未来卓越工程师综合能力的全面要求。

## 2 结构要求

### 2.1 结构概述

要求在比赛现场设计制作一座两跨四车道桥梁（桥型不限），承受桥面移动荷载和桥墩撞击荷载。在确保结构安全的前提下，还需要对桥梁的变形进行定量控制。加载装置与模型轴测示意图如图 1。

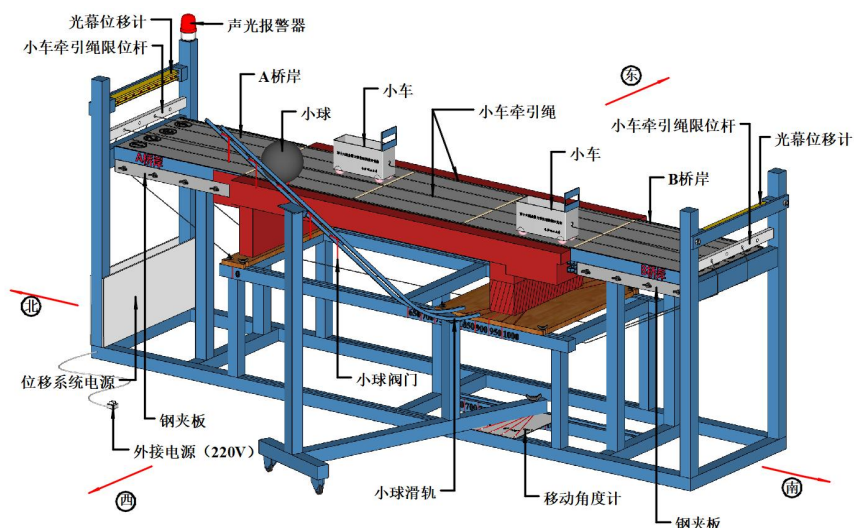
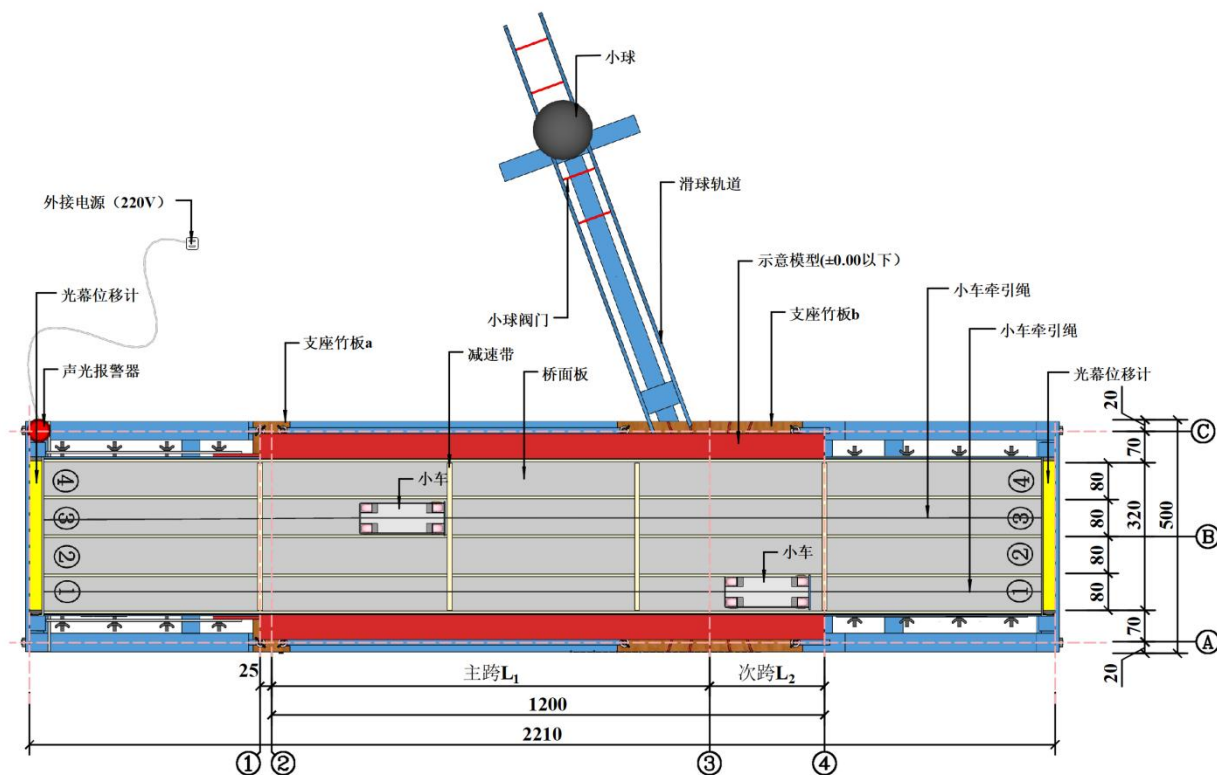


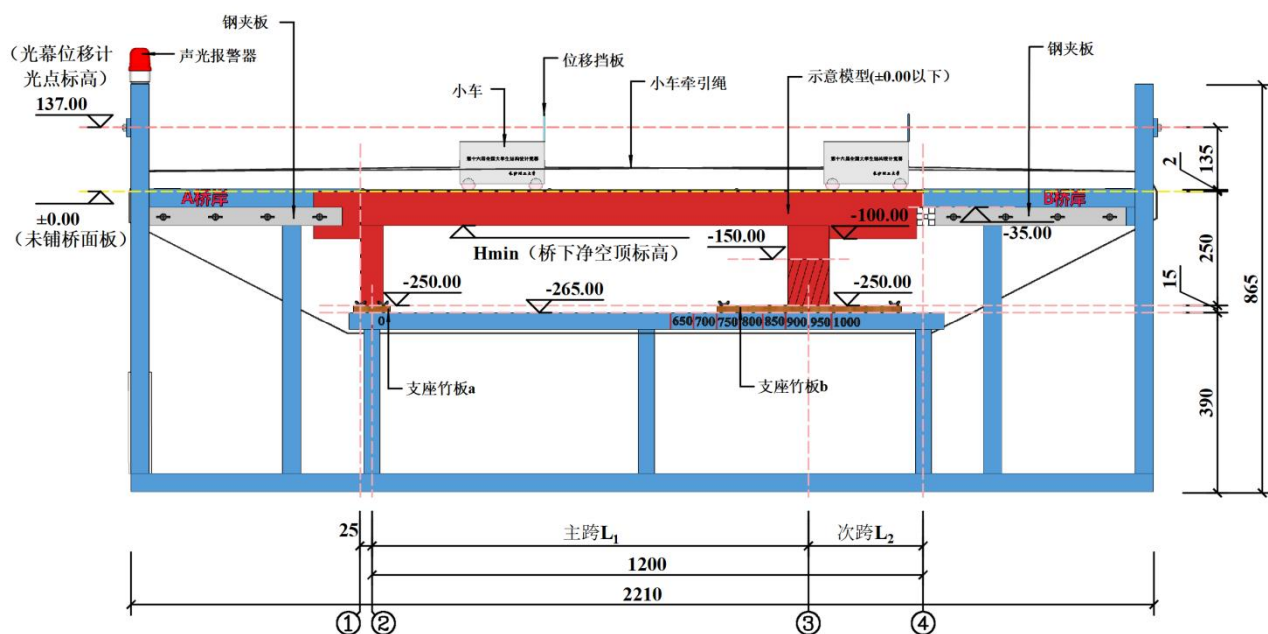
图 1 加载装置与模型轴测示意图

### 2.2 桥梁结构的边界条件

结构加载装置与模型示意平面及立面图如 2 所示。



(a) 加载装置与模型示意平面图



(b) 加载装置与模型示意立面图 (不含撞击加载装置)

图 2 加载装置与模型示意图 (单位: mm) (此图仅为示意)

## 2.2.1 桥岸

- a) 如图 2 所示，桥梁结构的两端分别连接 A 桥岸和 B 桥岸。定义 A 桥岸内侧立面为①轴线（与桥梁端部接触），定义 B 桥岸的内侧立面为④轴线（与桥梁端部接触），两个桥岸的平面投影均以③轴线为对称轴。①轴线与④轴线的间距为 1225mm。
- b) A、B 桥岸顺桥长度均为 450mm，宽度均为 330mm，定义桥岸顶面（未铺桥面板）标高为±0.00。A、B 桥岸两侧面均设有钢夹板，钢夹板长 370mm，宽 35mm，厚 4mm，通过四个手动螺丝与桥岸侧面连接，通过松动螺丝（禁止卸下），顺桥方向可移动不超过 40mm，钢夹板用于固定桥端（含斜拉桥、悬索桥拉索等），模型可与钢夹板任意位置（含手动螺丝）接触；模型可与 A、B 桥岸的底面、三个竖直侧面及凹槽和 B 桥岸④轴线左侧 15mm 范围的水平平台接触；模型不能与桥岸顶面（标高±0.00 处）和外侧端面接触；模型与桥岸各部位的接触面均不能用胶水、螺钉等固定。
- c) 在 A、B 桥岸设置如图 9 所示的光幕位移计，光幕位移计对射红外线光点中心标高为 +137mm，用于控制加载过程中桥梁的挠度。

### 2.2.2 ②轴支座

图 2 所示，在①轴线的右侧 25mm 处设置②轴线。可在②轴线的左右两侧各 25mm 范围和③轴线的上下两侧各 180mm 范围围成的区域内设置桥梁支撑结构（桥墩），②轴支座竹板 a 能承受竖向荷载，即桥梁支撑结构（桥墩）底面可放置在②轴支座竹板 a 规定区域，不能用胶水、螺钉等固定，②轴支座竹板 a 顶面标高为-250mm。

### 2.2.3 ③轴支座

图 2 所示，在轴线②、④之间设置③轴线。③轴线与②轴线的距离为桥梁主跨  $L_1$ ， $L_1$  的取值为 650mm、750mm、850mm、950mm 之一，即③轴线位置（主跨  $L_1$ ）为待定参数，赛前从四个位置中抽签确定。可在③轴线的左右两侧各 50mm 范围和③轴线的上下两侧各 180mm 范围围成的区域内设置桥墩，桥墩底部与③轴支座竹板 b 之间用螺钉连接，③轴支座竹板 b 顶面标高为-250mm。

### 2.2.4 ④轴支座

图 2 所示，③轴线与④轴线的距离为桥梁次跨  $L_2$ ， $L_2$  的取值为 550mm、450mm、350mm、250mm 之一， $L_1$  抽签确定后，通过  $L_1+L_2=1200\text{mm}$  确定  $L_2$  值，允许在④轴线左侧 15mm 范围内设置桥梁支撑结构，即桥梁支撑结构可接触④轴支座规定区域，且不能用螺钉或胶水等固定，④轴左侧支座顶面标高为-35mm。

### 2.2.5 模型与支座的连接

- a) 模型固定在支座竹板上，如图 3 所示支座竹板 a 外轮廓尺寸为：长 500mm，宽 80mm；支座竹板 b 外轮廓尺寸为：长 500mm，宽 400mm。支座竹板厚度为 15mm，两侧开有宽 14mm、长 15mm 的凹槽，利用 T 形手动螺栓将支座竹板固定在承台顶面，支座竹板表面均标记有田字线，桥墩（含螺钉）仅可与田字线内区域（图 3 中的阴影区域）接触，其中③轴处桥墩标高-150 以下结构（图 2（b）所示桥墩斜线区）和螺钉布置必须对称于③轴和⑥轴。
- b) 模型安装时，手动 T 型螺栓将支座竹板固定在加载台④轴和⑦轴重合的承台纵杆上，两轴线以轴线⑥为对称轴，相距 460mm。通过移动 T 型螺栓使支座竹板 b 横向中心线与③轴位置线重合（误差在 5mm 内）。②轴处支座竹板 a 固定在加载承台上重复使用（不允许胶水或螺钉等连接），允许桥墩放置在支座竹板 a 上，也可不接触。③轴处用自攻螺钉将桥梁固定在支座竹板 b 上，预安装固定后模型能自身保持悬臂平衡，即假定桥面结构处于±0.00 水平放置时除②轴和③轴桥墩底面外其他构件不能接触标高为-250mm 的地面及以下处（拉索锚固端等柔性构件可临时弯曲到结构上），可通过手持支座竹板搬运整个模型。除钻自攻螺钉外，不允许对支座竹板 b 进行其它任何形式的加工，每使用一个螺钉相当于增加 1g 模型质量，螺钉总数量不超过 12 颗。

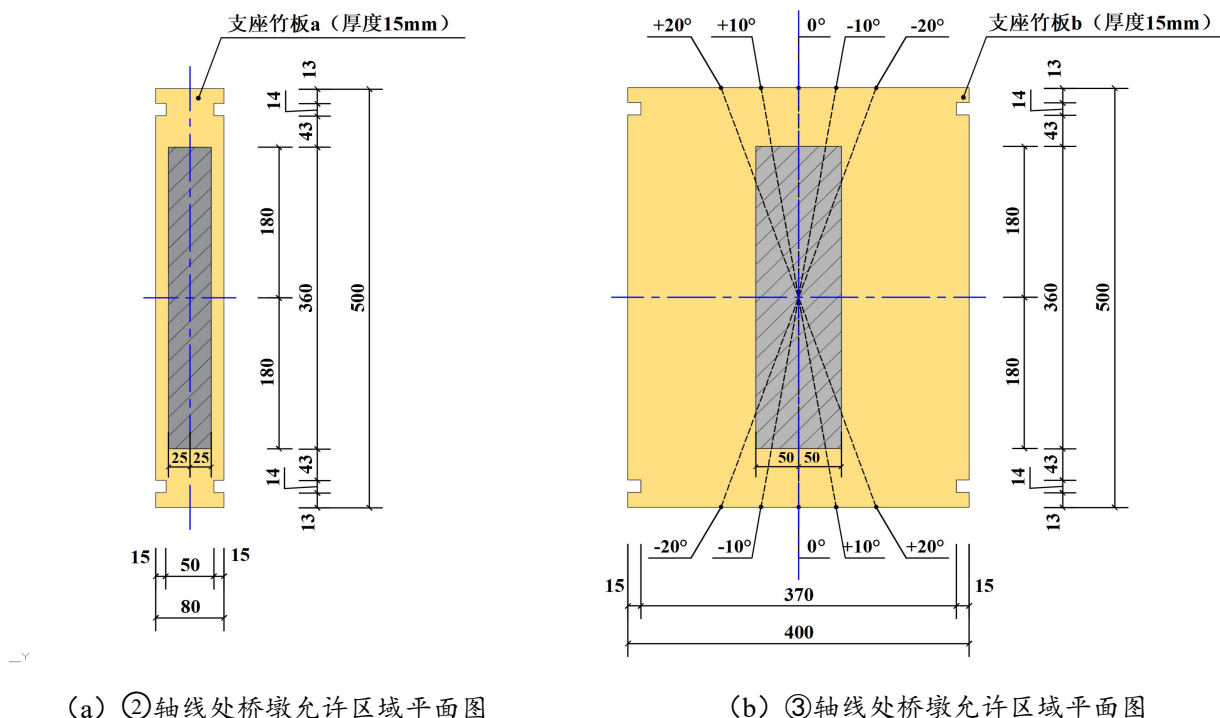


图 3 桥墩允许区域平面图（单位：mm）

## 2.2.6 尺寸要求

桥梁连接 A 和 B 两个桥岸，铺设桥面板后四个车道均能行驶总高 165mm（含位移挡板高

度)的小车,加载时小车(含位移挡板)不能触碰桥面以上结构。对赛题中未明确的尺寸(如:桥面以上结构高度等)均不做尺寸限制,除前述规定外,需要考虑的尺寸限制条件包括:

- a) 为保证桥下通航要求,如图 2 (b) 所示,对主跨  $L_1$  桥下净空顶标高  $H$  的最小值  $H_{\min}$  进行规定,  $H_{\min}$  为待定参数,其取值范围为  $-100\text{mm} \sim -40\text{mm}$ ,按照  $20\text{mm}$  阶梯随机取值。

注:对桥下净空要求不适用于次跨  $L_2$  (次跨  $L_2$  标高大于  $-100\text{mm}$ , 图 2 (b) 所示)、②轴线两侧  $25\text{mm}$  范围、③轴线两侧  $50\text{mm}$  范围。

- b) 桥梁结构平面投影宽度不小于  $320\text{mm}$ 。

## 2.3 荷载的施加方式

### 2.3.1 桥面移动荷载

- a) 移动荷载的施加方法是:将整捆小车牵引绳裁成每根约  $4.6$  米长,经桥岸端部限位杆上圆孔穿入,两绳端打结,穿入小车前后端大圆孔,用力拉直后卡入夹缝下端的小孔内,牵引绳如图 2 (b) 所示形成闭环,牵引绳在两个桥岸端部的限位杆圆孔中心标高为  $+40\text{mm}$ ,队员在桥岸端部通过手拉牵引绳(绳穿过限位孔后)移动载重小车,施加移动荷载。
- b) 采用定制矩型砝码,每辆小车配置一块  $2\text{kg}$  和四块  $1\text{kg}$  砝码,砝码外形尺寸如图 4 所示。
- c) 每级小车加载重量  $Z$ ,第一级小车加载重量  $Z_1$  取  $40\text{N}$ ,第二级  $Z_2$  和第三级  $Z_3$  相同,取  $60\text{N}$ 。
- d) 小车移动过程中,桥梁应具备足够的刚度,挠度限值  $[w]$  为  $\pm 15\text{mm}$ 。

### 2.3.2 桥墩撞击荷载

撞击荷载通过质量约为  $560$  克不锈钢小球,直径为  $138\text{mm}$ ,从高处加速滑落,转变为水平撞击荷载。小球形心的初始高度为相对于桥墩底面(支座竹板  $b$  上表面)高度,初始高度取值为  $500\text{mm}$ ,撞击荷载加载角度为西- $10$  度(定义  $A$  桥岸方向为正北方位,如图 3 和图 6 所示,  $0$  度为垂直于桥梁长度方向,角度正负以支座竹板  $b$  上刻度为准)。撞击荷载的施加方法是:由参赛队员手持小球放到统一抽取的初始高度处,打开阀门,小球沿滑轨滑落,水平撞击③轴处桥墩。



图 4 砝码尺寸示意图(单位:  $\text{mm}$ )

### 2.3.3 桥面板

桥面板的平面尺寸为 2115mm\*330mm，由 2mm 厚的竹材+人造革材料构成，表面画上车道线和减速带位置线，粘贴 5 根车道隔离带（确保小车行驶不偏离车道）和  $J_1$ 、 $J_2$ 、 $J_3$ 、 $J_4$  四根减速带，减速带位置将桥跨大致分为三等分，车道隔离带和减速带横截面尺寸如图 5 所示，加载时桥面板  $J_1$  减速带中心线与①轴线重合（或  $J_4$  减速带中心线与④轴线重合），允许队员在 A 或 B 桥岸端部压住桥面板（不允许两桥岸同时压住），确保小车行驶时桥面板相对位置不滑动。

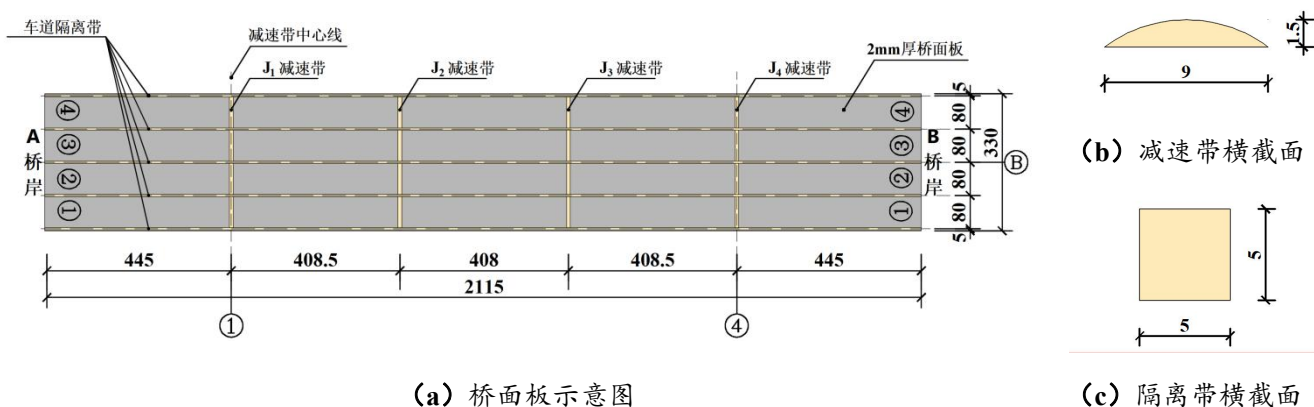


图 5 桥面板示意图（含减速带、隔离带）（单位：mm）

## 3 加载装置

### 3.1 加载装置组成

加载装置如图 6 所示。组成加载装置的主要构件为铝型材，通过角铝和螺栓进行连接，其它附件包括光幕位移计、声光报警器、位移电源系统（24V）、位移挡板、小球、滑球轨道等。



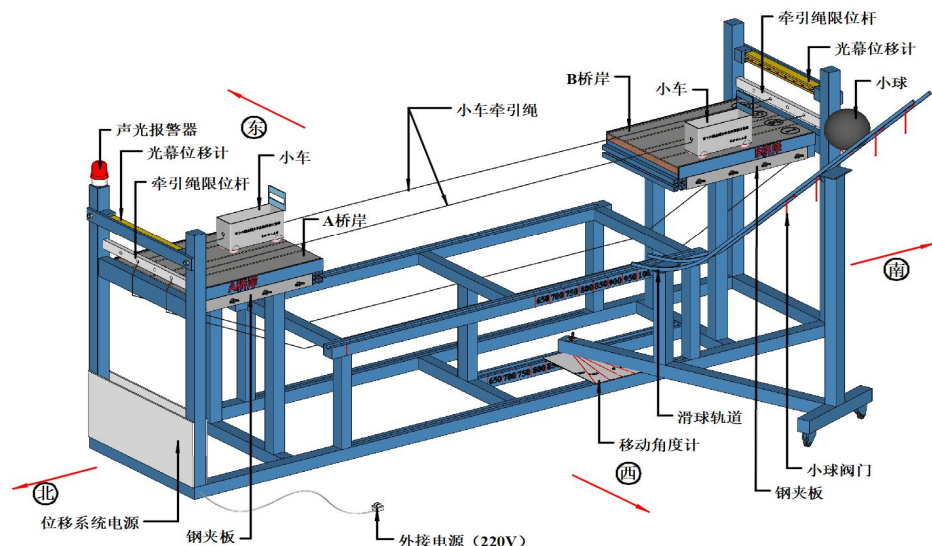


图6 加载装置轴测示意图

### 3.2 加载小车

小车轴测示意图如图7所示，小车尺寸如图8所示，每辆小车内最多可放6kg定制砝码，其中2kg砝码放置在小车最底层，小车南端（B桥岸方向）方孔内插入图8（d）所示位移挡板，用于控制加载时桥梁的挠度限值 $[w]$ ，每辆小车（含位移挡板）和牵引绳的质量之和约为200g。

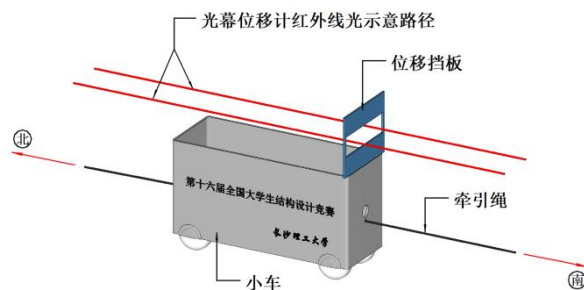
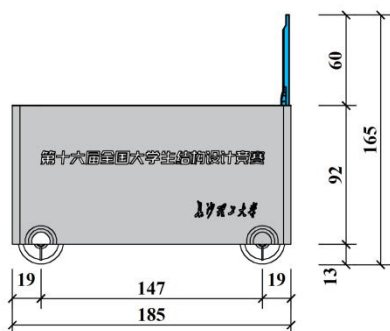
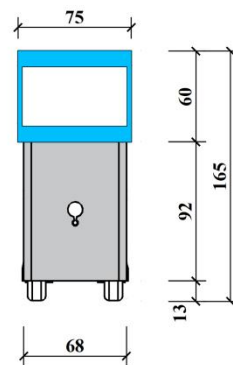


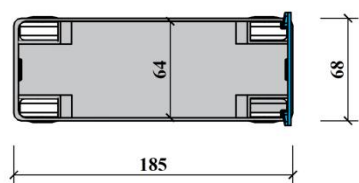
图7 小车轴测示意图



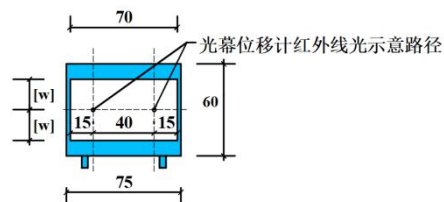
(a) 小车立面图



(b) 小车侧视图



(c) 小车俯视图

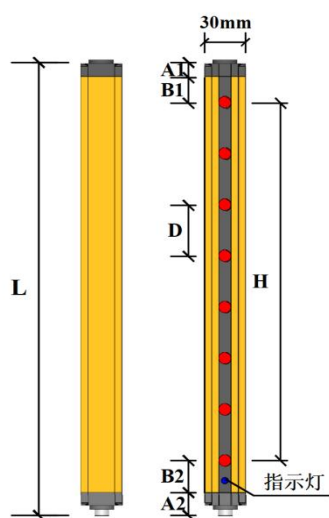


(d) 位移挡板示意图

图 8 加载小车详图 (含位移挡板) (单位: mm)

### 3.3 光幕位移计构造

采用光幕位移计和声光报警器进行挠度限值 $[w]$ 测量, 光幕位移计通过电信号连接声光报警器, 光幕位移计通电开启, 其水平发射的 8 根红外线光如受到小车位移挡板遮挡, 声光报警器会发出声光报警, 8 根红外线光的相邻光点间距为 40mm, 光幕位移计固定后其发射的红外线光点中心标高为+137mm, 每 2 根红外线控制一个车道挠度限值, 桥岸处车道 2 根红外线光与小车挡板的相对距离如图 7 和图 8 (d) 所示, 光幕位移计尺寸构造示意如图 9 所示:



A1: 上端盖: 12mm

A2: 下端盖+航空头: 19mm

B1: 上盲区: 10mm

B2: 下盲区: 25mm

D: 光点间距: 40mm

H: 光栅保护高度: 280mm

L: 光幕总长度: 359mm

图 9 光幕位移计示意图

## 4 待定参数的确定

### 4.1 待定参数的确定方式

具体参数大小, 以最新通知文件为准。

### 4.2 待定参数汇总

本题目中所有待定参数汇总详见表 1 和表 2。



表 1. 模型制作开始前确定的独立待定参数及取值范围

参数名称	代号	取值范围	附注
主跨跨度	$L_1$	650mm、750mm、850mm、950mm	100mm 阶梯取值
主跨 $L_1$ 桥下净空顶标高最小值	$H_{\min}$	-100mm、-80mm、-60mm、-40mm	20mm 阶梯取值

表 2. 模型预安装和尺寸检查后统一抽签确定的独立待定参数及取值范围

参数名称	代号	取值范围	附注
第一级加载车道	N1	1、2、3、4	从四个车道中抽取 1 个车道
第二级和第三级增加车道	N2	1、2、3、4	保留第一级加载车道，从其余三车道中抽取 1 个车道

## 5 模型设计与理论方案

### 5.1 模型设计

表 1 待定参数确定后，各参赛队利用笔记本电脑和有限元软件进行桥梁设计计算。

### 5.2 理论方案

理论方案内容需包括实训过程总结和现场设计计算两部分。

实训过程总结主要从理论、试验和计算等方面说明参赛队是如何为最终比赛进行准备的；现场设计计算部分需包括计算模型描述、主要计算参数、计算结果。计算结果需从强度、刚度、稳定和冲击荷载等方面进行评价。各队还需提供一张可以清楚表示模型结构体系的 A3 幅面的轴测图（不包括桥面板和加载装置部分）。

以上理论方案需分别以电子版 PDF 格式和 Word 格式提交，模型轴测图需以电子版 PDF 格式提交。理论方案模板见附件 2：第九届江苏大学土木工程结构创新竞赛理论方案（模型加载组）。

## 6 模型制作要求

- a) 模型采用竹材制作，竹材规格及发放量如表 3 所示，竹材参考力学指标见表 4。组委会对现场发放的竹材材料仅从规格上负责。

表 3. 竹材规格及用量上限

竹材规格		竹材名称	每队发放量
竹皮	1250mm×430mm×0.20 (+0.05) mm	集成竹片（单层）	2 张

竹杆件	1250mm×430mm×0.35 (+0.05) mm	集成竹片 (双层)	2 张
	1250mm×430mm×0.50 (+0.05) mm	集成竹片 (双层)	2 张
	930mm×6mm×1.0 (+0.5) mm	集成竹材	20 根
	930mm×2mm×2.0 (+0.5) mm	集成竹材	20 根
	930mm×3mm×3.0 (+0.5) mm	集成竹材	20 根

注：竹材规格括号内数字仅为材料厚度误差限，通常为正公差；

表 4. 竹材参考力学指标

密度	顺纹抗拉强度	抗压强度	弹性模量
0.8 g/cm <sup>3</sup>	60 MPa	30 MPa	6 GPa

- b) 为每队提供 502 胶水（30g 装）8 瓶，用于结构构件之间的连接。
- c) 为每队提供 2 张 A3 大小的 3mm 厚卡纸作为模型拼装时的**定位辅助材料**，该材料不得用于模型本身。
- d) 模型制作期间，统一提供美工刀、剪刀、水口钳、砂纸、尺子（钢尺、三角板、卷尺）、镊子、滴管、打孔器等常规制作工具。

## 7 模型提交

比赛时，提交模型时由工作人员对模型称重，得到  $M_{Ai}$ （精度 0.1g）。将安装模型使用的自攻螺钉总数量折算成模型质量  $M_{Bi}$ （单位：g），模型总质量  $M_i = M_{Ai} + M_{Bi}$ 。

## 8 模型预安装和尺寸检查

模型预安装和尺寸检查时提供加载装置、尺寸检测板、桥面板和支座竹板 b。

模型称重结束，参赛队员将模型按照 2.2.5 条所述方法与支座竹板 b 连接，并将连接支座竹板 b 的桥梁固定在加载装置上。安装时提供手电钻（可自带）、直尺、铅笔等辅助工具。安装完成后，进行几何外观尺寸检测和规避区检查，包括模型主跨  $L_1$  桥下净空顶标高、宽度不小于 320mm、③轴线处桥墩标高-150mm 以下结构及螺钉的对称布置等要求。铺设 2.3.3 条所述桥面板。模型安装和尺寸检查操作由各队自行完成，赛会人员负责监督、标定测量仪器和记录，尺寸检查结束，参赛队员将模型和支座竹板 b 从加载台上取下，摆放到指定位置。如在此过程中出现模型损坏，不得对模型进行修补。以上模型预安装和尺寸检查时间为 12 分钟。

## 9 加载参数确定

全部模型预安装及尺寸检查结束后，由不同学校参赛队员抽签确定各级加载车道。

## 10 加载测试过程

### 10.1 加载准备

得到入场指令后，参赛队员手持支座竹板 b，将模型放到加载承台上（队员进入加载区域开始计时），调整支座竹板 b 位置，将支座竹板 b 和模型两端固定在加载台上（含钢夹板固定拉索等），铺设桥面板，在桥岸将牵引绳两端部（已打结）与每辆小车前后连接，摆正小车出发位置，通过开关电源测试光幕位移计是否正常工作，测试结束后关闭光幕位移计。如在此过程中出现模型损坏，不得对模型进行修补。加载准备时间不得超过 4 分钟。以上加载准备过程由各队自行完成，赛会人员负责监督和记录。

### 10.2 桥梁挠度测量及刚度要求

第二级加载前打开光幕位移计，在 A、B 桥岸处让光幕位移计发射的红外线光穿过小车位移挡板内孔中心高度处，小车行驶相对桥岸处桥面板标高上下浮动位移超过 15mm，声光报警器会自动报警。第二级和第三级加载根据位移超限声光报警情况扣分或记为加载失败。

### 10.3 具体加载步骤

陈述答辩结束，有参赛队员进入加载区域，开始计时。分三级进行加载，加载由参赛队员完成，整个加载过程需在 5 分钟内完成。在整个加载过程中禁止小车不按车道或跨车道行驶。

- a) 第一级加载，按规定的第一级小车加载重量，将砝码放入一辆小车车厢内，小车按统一抽签确定的车道从 A 桥岸出发，在 J<sub>2</sub> 减速带处区域（即减速带位于小车前后轮之间）停稳后，队员举手示意开始计时，10 秒计时结束，然后继续行驶至 B 桥岸（后轮通过桥岸处 J<sub>4</sub> 减速带），则第一级加载成功。
- b) 第二级加载，按规定单辆小车加载重量，将砝码放入两辆小车车厢内，保持第一级加载的小车车道不变，增加统一抽签确定的第二辆小车车道，打开光幕位移计，两辆小车从 B 桥岸出发，分别行驶停靠到 J<sub>2</sub> 减速带区域和 J<sub>3</sub> 减速带区域（减速带位于小车前后轮之间），两车均停稳后，队员举手示意开始计时，10 秒计时结束，小车继续行驶至 A 桥岸（后轮通过桥岸处 J<sub>1</sub> 减速带），整个过程光幕声光报警器不报警（挠度不超限），则第二级加

载成功。

- c) 第三级加载，将第二级加载的两辆小车载重和车道保持不变，从第二级加载结束后的 **A 桥岸出发**，均行驶至 **J<sub>2</sub> 减速带** 区域（减速带位于小车前后轮之间），两车均停稳后，参赛队员手持撞击小球放到规定的初始高度处，**打开小球阀门**，小球沿滑轨滑落，正对着③轴线桥墩平面形心点进行撞击加载，撞击结束，停留 10 秒，10 秒计时结束，小车继续行驶至 **B 桥岸**（后轮通过桥岸处 J<sub>4</sub> 减速带）停靠，整个过程光幕**声光报警器不报警**（挠度不超限），第三级加载成功，关闭光幕位移计，取出小车内砝码，松开小车北端（A 桥岸方向）牵引绳，取下桥面板到指定位置，卸下模型（含支座竹板 b），将加载区域设备整理到加载准备前（入场前）的位置，**全部队员携带模型离开加载区域**，加载计时结束，队员将加载完成的模型存放到指定位置。

## 11 标准

### 11.1 模型违规标准

出现以下 7 种情况之一，判定违规，取消比赛资格：

- a) 不满足 2.2.1 条关于模型与桥岸接触范围的相关要求。
- b) 不满足 2.2.5 条关于模型与支座竹板接触范围或预安装固定在支座竹板 b 上后保持悬臂平衡的相关要求。
- c) 不满足 2.2.6 条关于模型尺寸要求规定。
- d) 不满足 7b 条关于模型材料使用的相关要求。
- e) 不满足 7d 条关于不得将模型制作辅助材料用于模型本身的相关要求。
- f) 不满足 7e 条关于模型制作工具的相关规定。
- g) 发生经评委认定的实物模型与设计图纸明显不符的情况。

### 11.2 加载失效判定标准

加载过程中出现以下 5 种情况之一，判定加载失效，终止加载，本级加载及以后级别加载成绩为零：

- a) 加载时发生结构倒塌或局部构件显著破坏导致加载车道不能通行载重小车。
- b) 加载时光幕声光报警器发出**持续报警声（持续 3 秒钟及以上）**，或任何一级加载时光幕声光报警器发出第 2 次报警声。
- c) 加载过程中队员手碰触模型或 J<sub>1</sub> 至 J<sub>4</sub> 减速带之间的桥面板（含全部减速带）。

- d) 加载过程中无论任何原因出现处于加载状态的小车车身触碰桥面以上结构或滑出行驶车道或悬空落地等现象。
- e) 评委认定不能继续加载的其他情况。

### 11.3 加载测试停止标准

出现以下 3 种情况之一，既可判定加载结束。

- a) 加载时间超出 11.4 条关于整个加载过程需在 5 分钟内完成的规定。
- b) 满足 12.2 条关于加载失效的标准。
- c) 满足 13.2e 条关于罚分达到上限的标准。

## 12 评分标准

### 12.1 总分构成

结构评分按总分 100 分计算，其中包括：

- a) 加载表现分值: 100 分

### 12.2 评分细则

- a) 加载表现评分：满分 100 分

第一级成功加载得分系数： $k_{1i} = \min(1, \frac{M_{\min}}{M_i})$

第二级成功加载得分系数： $k_{2i} = \min(1, \frac{M_{\min}}{M_i})$

第三级成功加载得分系数： $k_{3i} = \min(1, \frac{M_{\min}}{M_i})$

其中， $M_i$  为某参赛队模型的质量； $M_{\min}$  为所有通过三级加载的模型中的质量最小值，若所有队伍均未通过第三级，则  $M_{\min}$  取通过加载级别最多的所有模型中的质量最小值。若某级加载不成功，当级及后续级别加载得分系数均记为 0。

第  $i$  队的加载表现得分  $D_i$

$$D_i = 40k_{1i} + 30k_{2i} + 30k_{3i}$$