

附件 1：2021 年第六届四川省大学生结构设计竞赛院内选拔赛题目

《桥梁结构模型设计与制作》

1 命题背景

从小桥流水，到跨越大江大河的生命线工程，桥梁与人们的生活密切相关。桥梁的结构形式多变，从“架梁为桥”的简支梁桥和连续梁桥，到“长虹卧波”的拱桥，到有“钢铁琴弦”之称的斜拉桥，再到享有“跨度之王”美称的悬索桥，伴随着人类科技发展，桥梁的建造和设计不断挑战极限。回顾中国桥梁的历史，我们曾遥遥领先于世界，却也曾远远落后于他人，虽然充满了坎坷和波折，但工程师们却从未停下脚步。今天的中国大地上，仅公路桥梁就已超过 80 万座，高铁桥梁总长达 1 万余千米，它们跨越高山大川、连通城镇村庄，共同构成了一座 960 万平方千米的“桥梁博物馆”。

本届赛题以承受竖向静力和移动荷载的桥梁结构为对象，要求学生进行桥梁结构模型的设计与制作。

2 模型要求

2.1 模型概述

要求在比赛现场设计制作一座桥梁，承受分散作用的竖向集中静荷载以及桥面移动荷载。在确保模型安全的前提下，还需要对模型的变形进行控制。模型轴测示意图见图 1。

2.2 模型的边界条件

模型加载装置平面及立面图如图 2 所示。

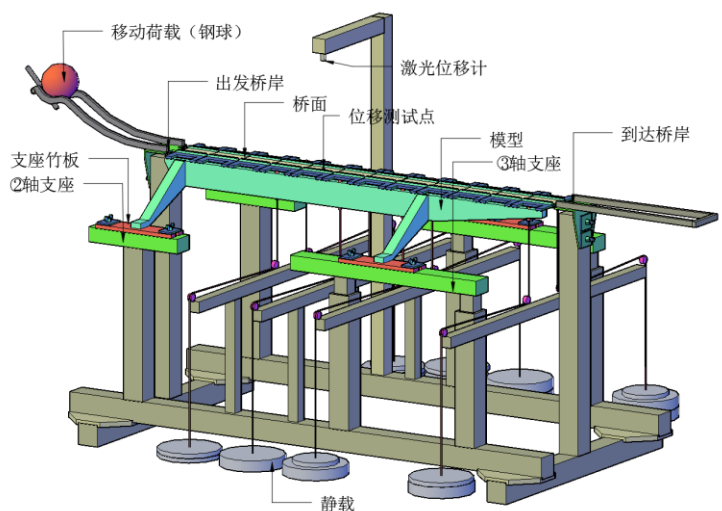
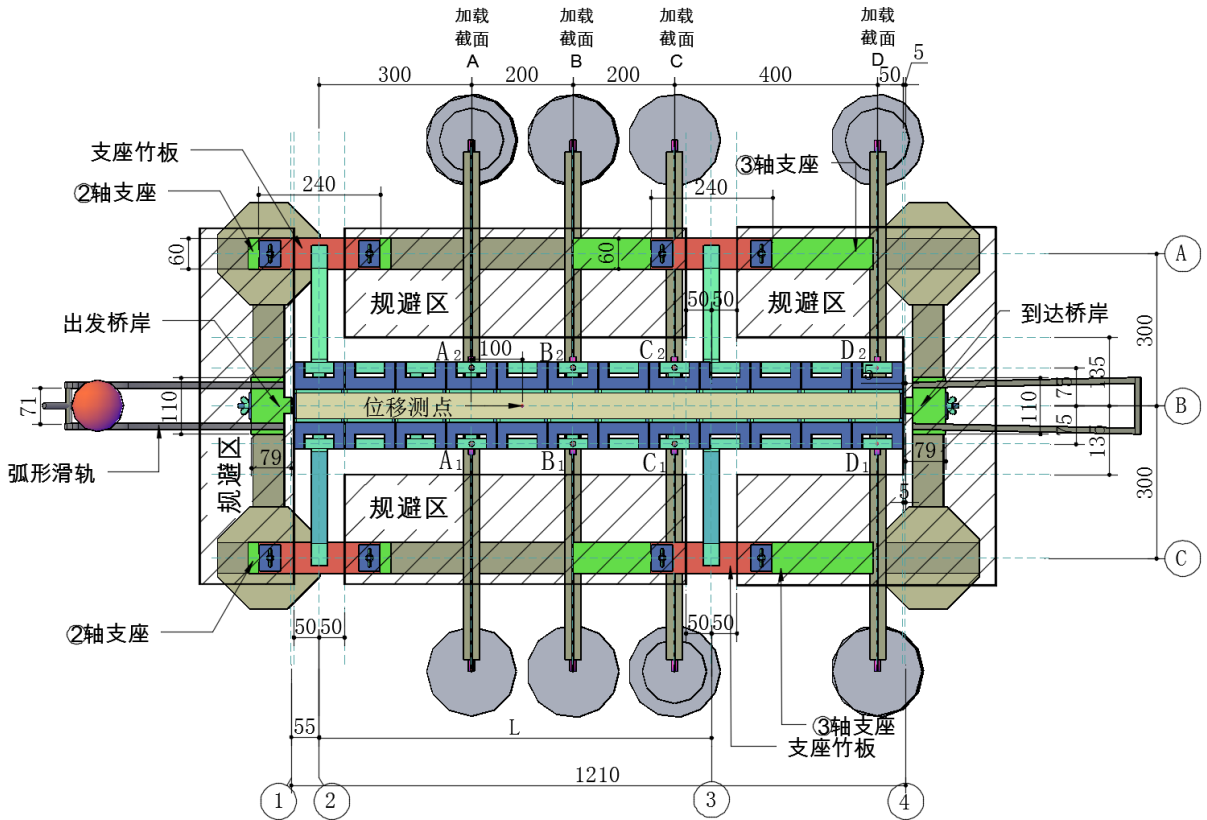
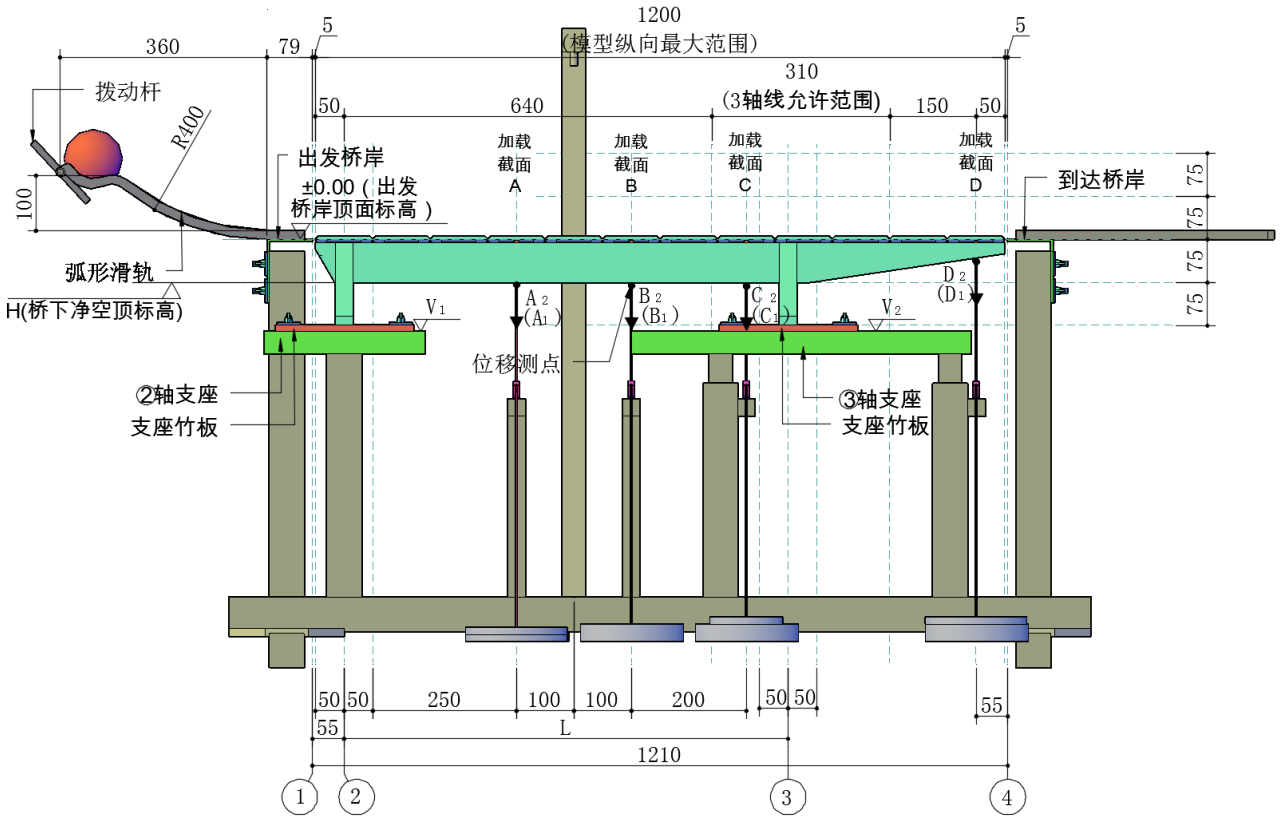


图 1 模型轴测示意图



(a) 加载装置平面图



(b) 加载装置立面图

图2 加载装置 (单位: mm)

(图中各加载点砝码数量和支座标高以比赛现场确定的参数为准, 此图仅为示意)

2.2.1 桥岸

- 如图 2 所示，桥梁模型的两端分别连接出发桥岸和到达桥岸。作为移动荷载的铅球从出发桥岸滚动上桥，从到达桥岸离开桥面。定义出发桥岸内侧立面为轴线①，到达桥岸的内侧立面为轴线④，两个桥岸的平面投影均以轴线B为对称轴。轴线①与轴线④之间的间距为 1210mm。
- 出发桥岸和到达桥岸宽度均为 79mm，长度均为 110mm，由 4mm 后钢板弯折而成，顶面标高为±0.00。
- 在出发桥岸设置如图 3 所示的弧形滑轨。滑轨的外侧圆弧半径为 400mm，由两根截面为 15mm*10mm 的弧形钢棒组成，钢棒之间的净距间距为 71mm。
- 到达桥岸设置如图 4 所示的梯形导轨，用于停留铅球。

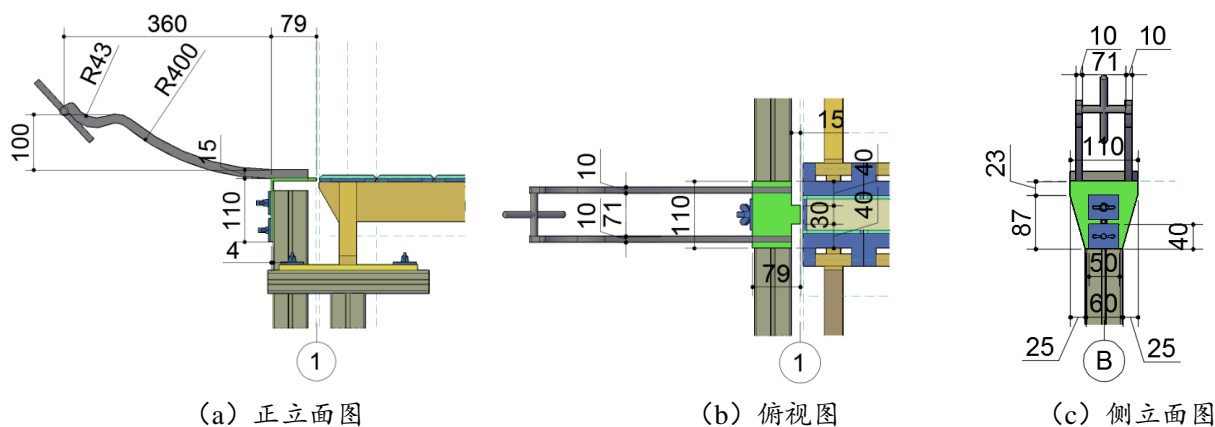


图3 出发桥岸详图

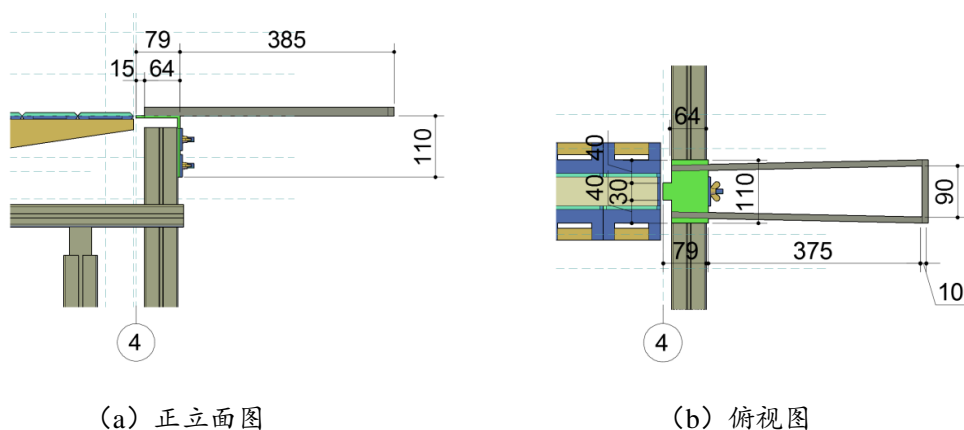


图4 到达桥岸详图

2.2.2 ②轴支座

- 如图 2 所示，在轴线①的右侧 55mm 处设置轴线②。允许在轴线②的左右两侧各 50mm 范围内设置桥梁支撑结构，实现模型与②轴支座之间的连接。

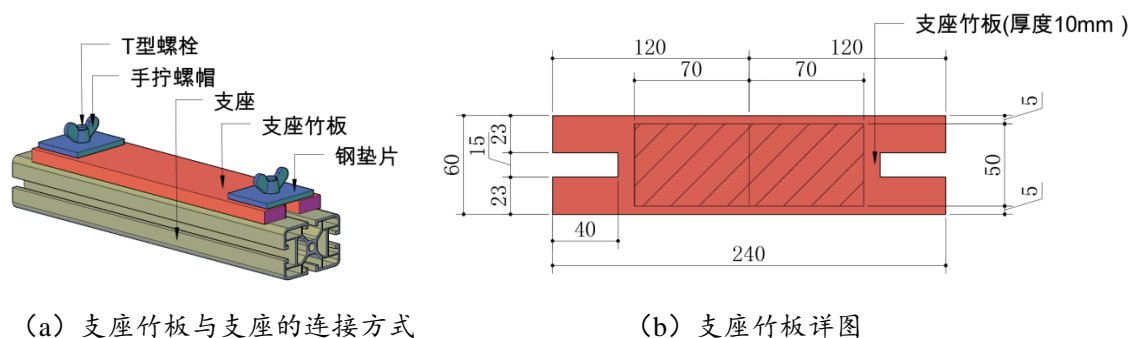
- b) ②轴支座为 60*60mm 截面铝型材，长 280mm。
- c) 两个②轴支座对称布置在③轴线的两侧，纵轴分别位于①轴和③轴，相距 600mm。两个②轴支座中心的平面位置分别位于横向轴线②轴和纵向轴线①轴、③轴的交点，两个②轴支座具有相同的顶面标高 ($V_1 = -160mm$)。

2.2.3 ③轴支座

- a) 如图 2b 所示，在轴线②、④之间设置轴线③。轴线③与轴线②的距离为 L，L 的取值为 850mm。允许在轴线③的左右两侧各 50mm 范围内设置桥梁支撑结构，实现模型与③轴支座之间的连接。
- b) 如图 2a 所示，两个③轴支座对称布置在③轴线的两侧，纵向轴线分别位于①轴和③轴，相距 600mm。两个支座具有相同的顶面标高 V_2 ，标高 $V_2 = V_1 = -160mm$ 。

2.2.4 模型与支座的连接

- a) 模型固定在支座竹板。支座竹板通过 T 型螺栓、钢垫片及手拧螺栓与支座连接（如图 5a 所示）。
- b) 如图 5b 所示支座竹板外轮廓尺寸为：长 240mm，宽 60mm，厚 10mm。在支座竹板的两端开有宽 15mm、长 40mm 的凹槽，利用 T 形螺栓将支座竹板固定于②轴、③轴支座顶面。在竹板表面标记有日字线，模型仅可与日字线内区域（图 5b 中的阴影区域）接触。
- c) 模型安装时，应使支座竹板对称轴线与相应位置的定位轴线重合。
- d) 可使用自攻螺钉将模型固定在支座竹板上，也可以选择不使用自攻螺钉，仅将模型放置在支座竹板上。除钻自攻螺钉外，不允许对支座竹板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。



(a) 支座竹板与支座的连接方式

(b) 支座竹板详图

图5 支座竹板及与支座的连接方式

2.2.5 规避区

模型设计时，需要考虑的尺寸限制条件包括：

- a) 如图 2(a)所示的 4 个阴影区域为规避区，各规避区均为竖向无限延伸的棱柱体，不允许桥梁结构构件进入规避区。
- b) 如图 2(b)所示，为保证桥下通航要求，对桥下净空顶部标高 H 的最小值 H_{\min} 进行规定， H_{\min} 为-100mm。

注：对桥下净空要求不适用于图 2 所示②轴线两侧 50mm 范围及③轴线两侧 50mm 范围。

- c) 对桥上部空间不做尺寸限制。

2.3 荷载的施加方式

2.3.1 竖向静荷载

- a) 竖向静载的平面悬挂位置如图 2(a)所示，共有 A、B、C、D 四个加载截面。在 A、B、C、D 四个加载截面分别设置一对加载点： A_1 和 A_2 、 B_1 和 B_2 、 C_1 和 C_2 、 D_1 和 D_2 ，每对加载点的平面投影位置对称布置在②轴线两侧，距离②轴线的距离均为 75mm。
- b) 以上八个竖向静载加载点的竖向位置均需位于各自所在截面的桥面标高以下。
- c) 竖向静荷载的施加方法是：采用统一配发的尼龙绳在加载点绑扎绳套，采用挂钩从加载点上引垂直线，并通过转向滑轮装置将加载线引到加载台两侧，采用在挂盘上（挂盘质量约 500g）放置砝码的方式施加竖向荷载。
- d) 八个竖向静载加载点悬挂砝码重量 G_{A1} 、 G_{A2} 、 G_{B1} 、 G_{B2} 、 G_{C1} 、 G_{C2} 、 G_{D1} 和 G_{D2} 均相同，且可按 10N 砝码递增，不断增加静载。
- e) 砝码规格为 10N。为了降低砝码的叠放高度，避免砝码散落危险，选用薄型开口秤砣，10N 砝码厚度 12mm。
- f) 连接竖向加载点的模型结构应具备足够的刚度，禁止竖向加载点在施加竖向荷载过程中产生大位移，从而改变荷载传力模式。

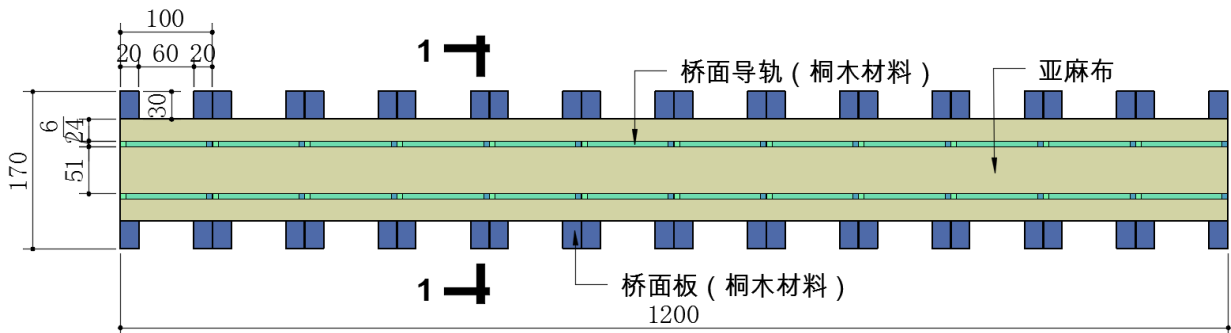
2.3.2 移动荷载

移动荷载为 50N 铅球（直径为 111mm）。移动荷载的施加方法是：由参赛队员将铅球放置在出发桥岸滑轨顶端的凹槽内；手持拨动杆驱动铅球离开凹槽，实现对铅球的释放；铅球沿桥岸弧形滑轨加速移动后上桥（落差 100mm），滚动过桥。在满足加载要求的前提

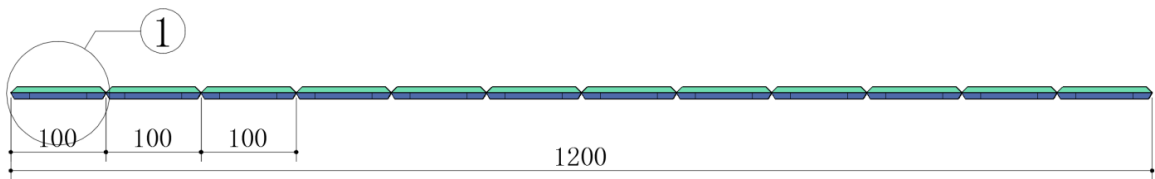
下，铅球登上到达桥岸则移动荷载加载成功。

2.3.3 桥面板

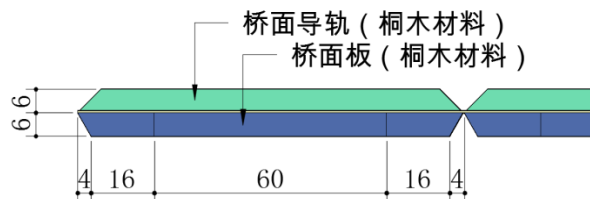
- 桥面板的平面尺寸为 1200*170mm，由组委会提供。如图 6 和图 7 所示，桥面板主体由粘在亚麻布上的 12 块桐木板（外框尺寸 170*99.6*6mm）组成。
- 为了防止铅球滚偏，在桥面板上表面沿纵轴线方向平行粘贴两列桐木条，每列 12 根，单根桐木条的截面尺寸为 6*6mm，两列桐木条之间的净距为 51mm。对桐木板和桐木条相邻的端面做倒角处理，使桥面板具有自由的纵向弯折变形能力。桥面板详图如图 6 所示。
- 为了减少对桥梁承重结构布置的影响，在每块桥面桐木板的两端设置了豁口，豁口尺寸及位置详见图 6(a)。
- 桥面板的平面位置安装如图 2(a) 所示，桥面板纵轴线与⑩轴线重合。桥面板只是放置在桥梁结构上，不得对桥面板做任何形式的处理。桥面板顶面的初始标高（未施加外力情况下）可以自行确定。桥面板的自重约为 330g。



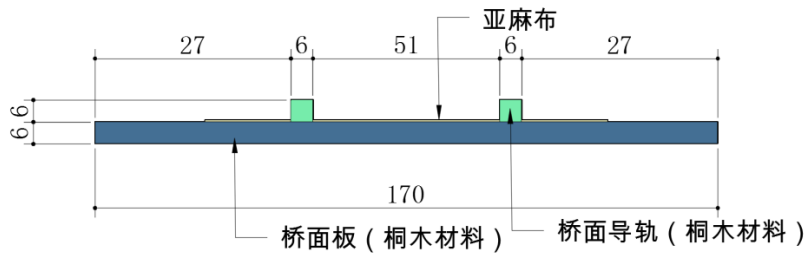
(a) 桥面板俯视图



(b) 桥面板正视图



(c) ①局部图



(d) 1-1 剖面图

图6 桥面板详图



图7 桥面板照片

2.3.4 荷载的施加顺序

- a) 第一级加载，八个加载点逐级增加砝码荷载，并能保持结构稳定。
- b) 第二级加载，保持上一级静载作用，施加移动荷载。

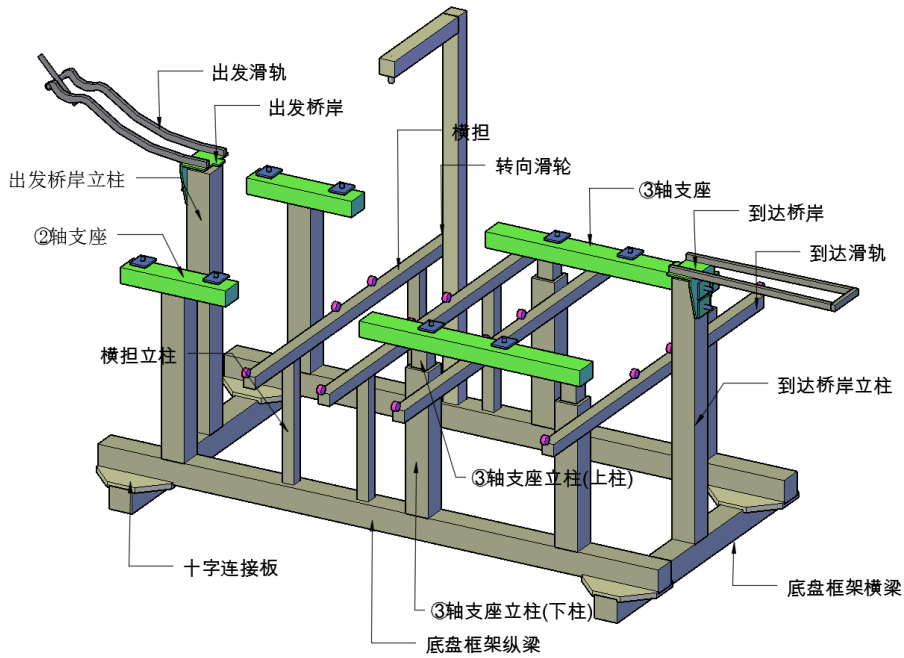


图8 加载装置轴测示意图

3.2 特殊节点构造

除了采用角铝进行构件连接外，加载装置中涉及到的其它节点构造如下：

- a) 底盘框架节点：底部框架由四根 60*60 重型铝型材组成。为增加底盘刚度，四根铝型材之间两两通过图 10(a)所示十字连接板连接，形成矩形底盘框架。
- b) ③轴支座立柱抽拉节点：如图 8 所示，每个③轴支座由两根立柱支撑，每根立柱由上柱和下柱组成。上柱与下柱之间的连接示意如图 10(b)所示。拧松紧定螺栓，通过抽拉上柱实现对支座顶面标高的调整，调整到位后拧紧紧定螺栓。

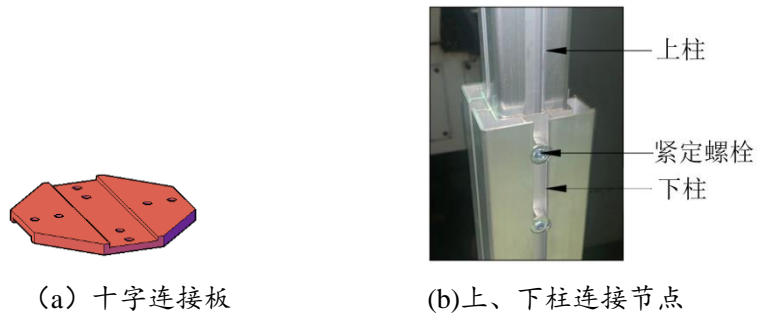


图10 特殊节点示意图

4 参数的确定

参数汇总详见表 1。

表1. 赛题中的独立参数取值

参数名称	代号	取值
③轴支座顶面标高	V_2	-160mm
桥下净空顶标高最小值	H_{min}	-100mm
竖向加载点相关荷载	G_{A1}	10N 递增
	G_{A2}	
	G_{B1}	
	G_{B2}	
	G_{C1}	
	G_{C2}	
	G_{D1}	
	G_{D2}	

5 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 2 所示，竹材参考力学指标见表 3。

表2. 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)	3 张
	1250mm×430mm×0.35 (+0.05) mm	集成竹片 (双层)	3 张
	1250mm×430mm×0.50 (+0.05) mm	集成竹片 (双层)	3 张
竹杆件	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，通常为公差；

表3. 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 ³	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) 为每队提供长度为 200mm 高强尼龙绳（2mm 粗）8 段，绑扎在竖向加载点上（绑扎方式自定），用于模型和导线挂钩之间的连接。高强尼龙绳不得兼作结构构件。每个竖向加载点需用红笔标识出，作为挂点中心，据此得出水平两侧各 5mm、共 10mm 的挂点区域。绑扎于模型上的高强尼龙绳只能设置在此区域中，且在加载过程中，不得滑出此区域。尼龙绳的绑扎需要在模型提交前完成，尼龙绳质量计入模型自重。
- d) 为每队提供 3 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。

6 模型提交

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 $M_i=M_{Ai}+M_{Bi}$ 。

7 模型预安装及尺寸检查

7.1 模型预安装

在候场期间进行模型预安装。参赛队员将模型按照 2.2.4 条所述方法与支座竹板连接，并将连接好竹板后的模型固定在如图 11 所示的检测装置上。安装时提供手枪钻、直尺、铅笔等辅助工具。安装完成后，需铺设 2.3.3 条所述桥面板。模型安装时间不超过 30 分钟。

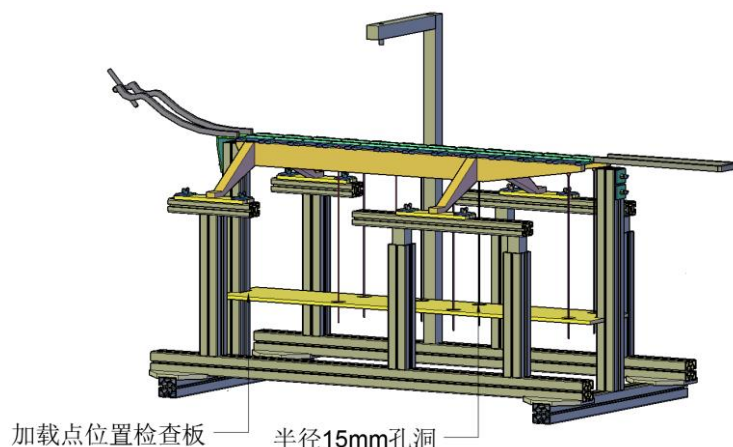


图11 辅助安装装置示意

7.2 模型尺寸检查

预安装完成后，进行几何外观尺寸检测和加载点位置检查。

- a) 几何外观尺寸检查：检测内容包括模型长度、桥下净空要求、规避区要求等。
- b) 加载点位置检查：模型下方设置如图 11 所示的木板，木板上有 8 个以加载点垂足为圆心，15mm 为半径的圆孔。选手需在每个加载点上绑扎的绳套上利用 S 形钩挂上带有 100g 重物的尼龙绳，尼龙绳直径为 2mm。8 根自然下垂的尼龙绳，在绳子停止摆动后，可以同时穿过圆孔，但都不与圆孔接触，则检测合格。尼龙绳与圆孔边缘接触则视为检测失效。
- c) 以上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。如在此过程中出现模型损坏，不得对模型进行修补。安装完毕后，不得再触碰模型。

8 加载测试过程

8.1 模型安装到加载台上

将模型安装在加载装置上后，在模型竖向加载点的尼龙绳吊点处挂上加载绳，在加载绳末端挂上加载挂盘，每个挂盘及加载绳的质量之和约为 500g。以上模型安装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。此处安装时间不超过 4 分钟。

8.2 模型陈述

由一个参赛队员陈述，时间控制在 1 分钟以内。评委提问及参赛队员回答，时间控制

在 2 分钟以内。

8.3 模型挠度的测量及模型刚度要求

- a) 位移测量点位于桥面 A、B 加载截面中间位置的⑧轴处（图 2a）。采用激光位移计进行位移测量。位移测量点在加载前已粘贴 50mm*50mm 的铝片（厚度 0.5mm）作为激光标靶。
- b) 激光位移计位于测量点正上方，注意不要在激光线上或附近布置有可能妨碍位移测试的构件。如由于结构构件布置不当妨碍了位移测量，等同于位移超标。
- c) 模型安装完成后，将激光位移计光标对准标靶中点，位移测量装置归零，位移量从此时开始计数。
- d) 为了保证桥梁具有足够的刚度，要求在第一级荷载作用下位移测试点的最大允许挠度限值 $[w]$ 为 $\pm 10\text{mm}$ 。挠度数值的读取时间为第一级加载施加后读秒阶段的最后时刻。

8.4 具体加载步骤

准备完毕，参赛选手举手示意，开始计时。分二级进行加载，加载由参赛队员完成。在整个加载过程中禁止牵挂砝码的钢丝绳与模型构件接触。

- a) 第一级荷载：按照 2.3.1 条所述各加载点位置及荷载进行第一级静载加载。加载由参赛队员进行，加载完成需举手示意，计时 10 秒钟，结构未失效，则加载成功，赛会人员读取挠度值后进行后继加载。
- b) 第二级荷载：按照 2.3.2 条所述施加移动荷载。模型未失效，且铅球成功登上到达桥岸，则加载成功。每参赛队有 3 次第二级测试机会。

9 判定标准

9.1 模型违规标准

出现以下 10 种情况之一，判定违规，取消比赛资格：

- a) 不满足 2.2.4b 条关于模型与支座竹板接触范围的相关要求。
- b) 不满足 2.2.5a 条关于模型不得进入规避区的相关规定。
- c) 不满足 2.2.5b 条关于桥下净空要求的相关规定。
- d) 不满足 2.3.1 条关于竖向加载点位置的相关规定。
- e) 发生经评委认定的 2.3.1f 条关于竖向加载点处发生大位移的情况。

- f) 不满足 5a 条关于模型材料使用的相关要求。
- g) 发生经评委认定的 5c 条关于尼龙绳兼作结构构件的情况。
- h) 不满足 5d 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。

9.2 加载失效判定标准

加载过程中出现以下 7 种情况之一，判定加载失效，则终止加载，本级（或本步）加载及以后级别加载成绩为零：

- a) 第一级加载发生结构倒塌。
- b) 第二级加载发生结构倒塌，或者三次第二级加载铅球均未登上到达桥岸
- c) 发生模型与除铅球之外的加载装置（包括钢丝绳）直接接触。
- d) 发生 5c 条关于绳套滑出标识区域的情况。
- e) 加载过程中无论任何原因出现处于加载状态的砝码落地现象。
- f) 评委认定不能继续加载的其他情况。

9.3 加载测试停止标准

出现以下情况，可判定加载结束。

- a) 满足 9.2 条关于加载失效的标准。

10 评分标准

10.1 总分构成

结构评分按总分 100 分计算，其中包括：

- a) 模型结构与制作质量分值: 10 分
- b) 现场陈述与答辩分值: 10 分
- c) 加载表现分值: 80 分
- d) 违规扣分

10.2 评分细则

- a) 模型结构与制作质量分: 满分 10 分

第 i 队的模型结构与制作质量分 A_i 由专家根据模型结构体系（结构的合理性、创新性、实用性等）与制作工艺（制作质量、美观性等）进行评分，其中模型结构与制作质量

各占 5 分。该项分数的评判由评委针对实物模型进行。

b) 现场陈述与答辩分:满分 10 分

第 i 队的现场陈述与答辩分 B_i 由专家根据队员现场陈述和回答评委提问的综合表现(内容表述、逻辑思维、创新点和回答等)进行评分, 满分 10 分。

c) 加载表现评分: 满分 80 分

第一级加载得分系数:

$$k_{1i} = \begin{cases} \text{Min}(1, \frac{M_{\min}}{M_i} \times \frac{G_i}{G_{\max}}), & \text{该级加载成功} \\ 0, & \text{该级加载失败} \end{cases}$$

其中, M_i 为某参赛队模型的质量; M_{\min} 为所有通过二级加载的模型中的质量最小值, 若所有队伍均未通过第二级加载, 则 M_{\min} 取通过加载级别(或加载步)最多的所有模型中的质量最小值。 G_i 为某对第一级施加砝码重量, G_{\max} 为通过第一级加载队伍中砝码重量最大值。

第二级加载得分系数:

$$k_{2i} = \begin{cases} \text{Min}(1, \frac{M_{\min}}{M_i} \times \frac{G_i}{G_{\max}}), & \text{该级加载成功} \\ 0, & \text{该级加载失败} \end{cases}$$

其中, 第二级加载仅有 3 次加载机会, 若在第一次加载成功, 则得分系数 k_{2i} 乘以系数 1.0; 若第二次加载成功, 则得分系数 k_{2i} 乘以系数 0.8; 若第三次加载成功, 则得分系数 k_{2i} 乘以系数 0.6。

第 i 队的加载表现得分 C_i

$$C_i = 50k_{1i} + 30k_{2i}$$

d) 罚分标准

出现以下情况, 进行罚分, 所罚分数累计计算, 总罚分记为 F_i 。

- 1) 候场安装时间超过 7.1 条所示的 30 分钟安装限制, 每超过 1 分钟, 罚 1 分, 不足 1 分钟按照 1 分钟计算。
- 2) 模型场内安装时间超过 8.1 条所示的 4 分钟安装限制, 每超过 1 分钟, 罚 2 分, 不足 1 分钟按照 1 分钟计算。
- 3) 第一级加载过程中, 如位移测试点测得的位移超过 8.3 所述最大允许挠度限值,

罚 20 分。

10.3 总分计算公式

第 i 支队总分计算公式为：

$$S_i = A_i + B_i + C_i - F_i$$