

# 《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。

## 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。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。

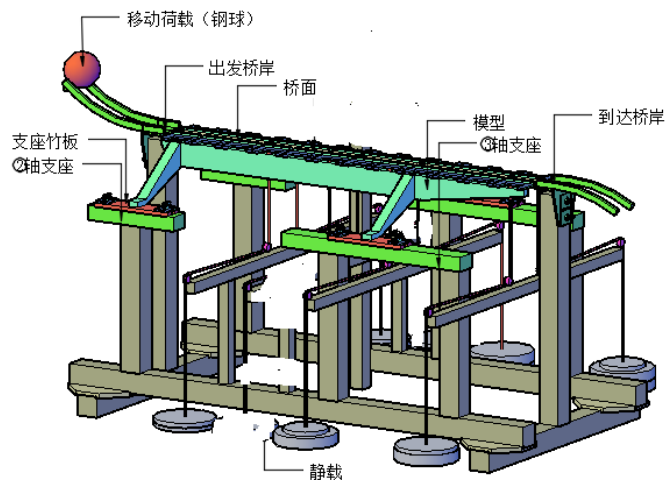
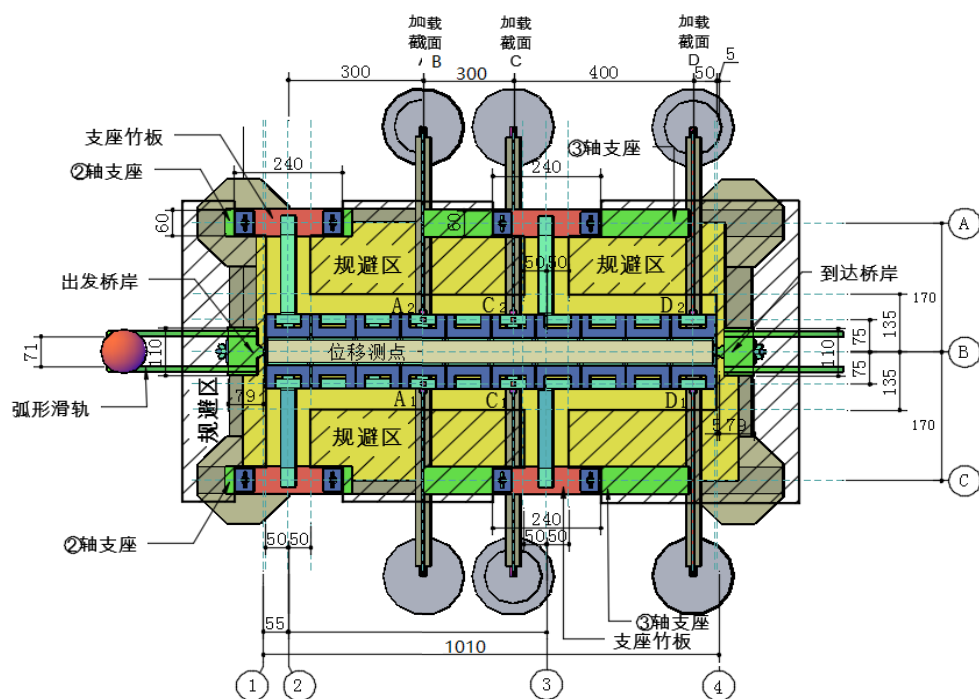
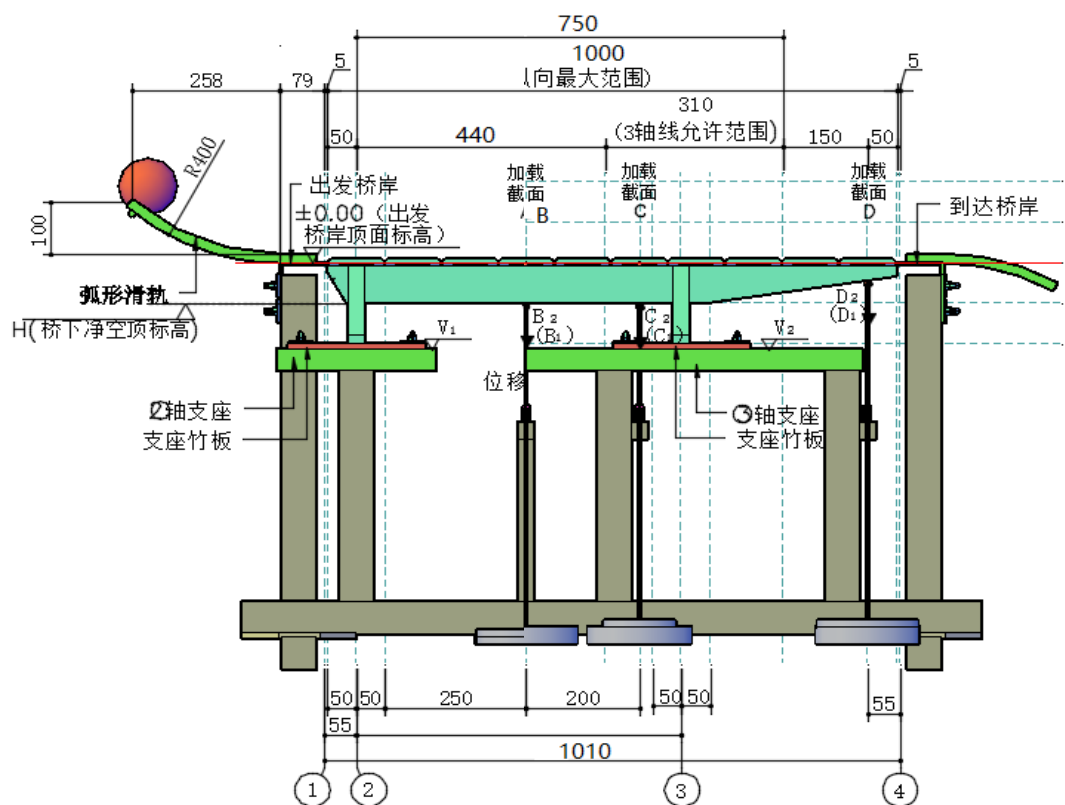


图 1 模型轴测示意图



(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 ⑤ 为对称轴。轴线①与轴线④之间的间距为 1010mm。
- 出发桥岸和到达桥岸宽度均为 79mm, 长度均为 110mm, 由 4mm 厚钢板弯折而成, 顶面标高为  $\pm 0.00$ 。
- 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, 在到达桥岸处设置向下弯曲的轨道 (图 4a), 引导铅球落到位于地面的海绵缓冲垫上。

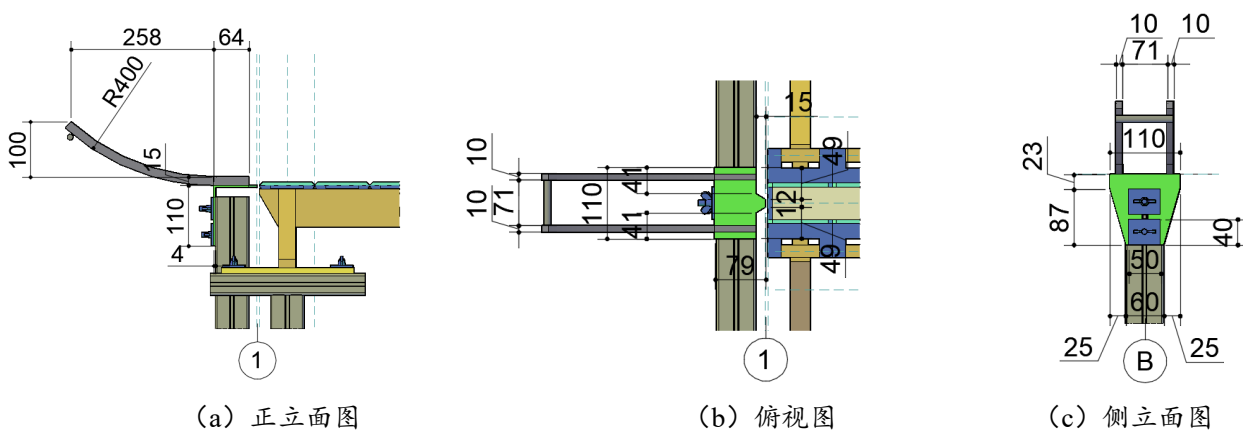


图3 出发桥岸详图

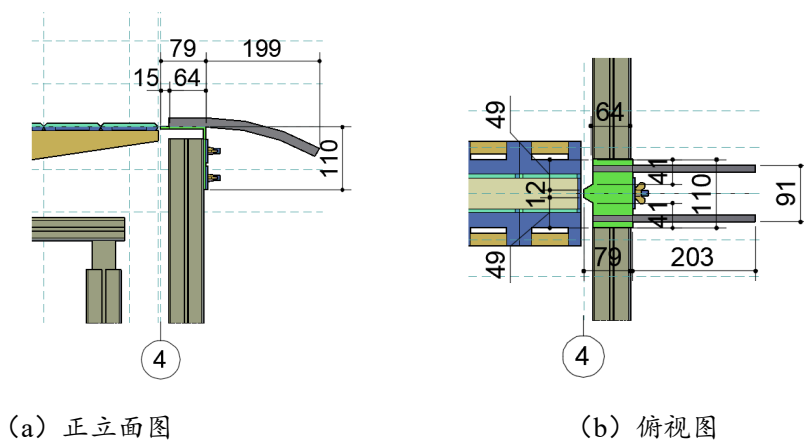


图4 到达桥岸详图

### 2.2.2 ②轴支座

- a) 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 ⑥轴线的两侧, 纵轴分别位于 ④轴和 ⑧轴, 相距 340mm。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 ④轴、⑧轴的交点, 两个②轴支座具有相同的顶面标高 ( $V_1 = -160\text{mm}$ )。

### 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  $L$ ,  $L$  的取值范围为 440mm~750mm, 其具体数值由各参赛队自主确定。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 ⑥轴线的两侧, 纵向轴线分别位于 ④轴和 ⑧轴, 相距 340mm。两个支座具有相同的顶面标高  $V_2(V_2 = -160\text{mm})$ 。
- 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, 安装支座竹板时应使其横向中心线与 ②轴或 ③轴重合。
- 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。

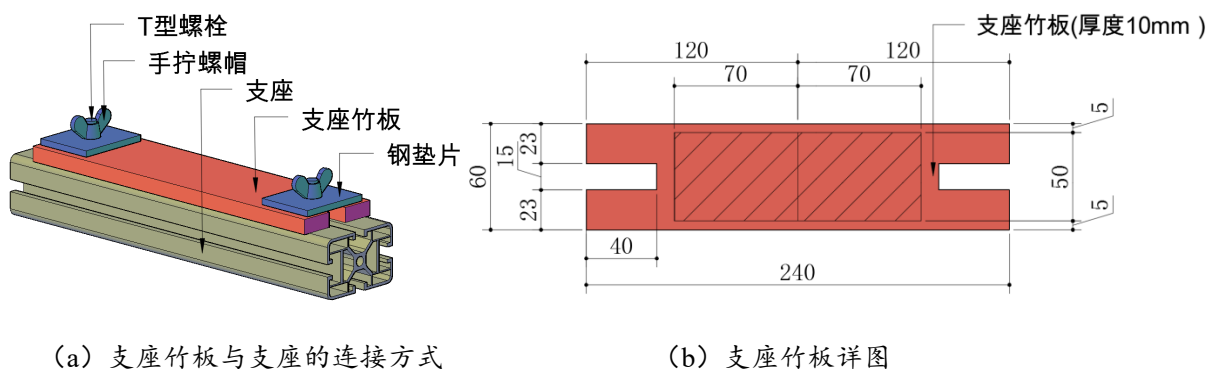


图5 支座竹板及与支座的连接方式

## 2.3 荷载的施加方式

### 2.3.1 竖向静荷载

- 竖向静载的平面悬挂位置如图 2(a)所示，共有 B、C、D 三个加载截面。在 B、C、D 三个加载截面分别设置一对加载点： $B_1$  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 ⑥轴线两侧，距离 ⑥轴线的距离均为 75mm。
- 以上六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。
- 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。
- 六个竖向静载加载点悬挂砝码重量  $G_{B1}$ 、 $G_{B2}$ 、 $G_{C1}$ 、 $G_{C2}$ 、 $G_{D1}$  和  $G_{D2}$  见下表。

| $G_{B1}$ | $G_{B2}$ | $G_{C1}$ | $G_{C2}$ | $G_{D1}$ | $G_{D2}$ |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 80N      | 90N      | 50N      | 60N      | 40N      | 70N      |

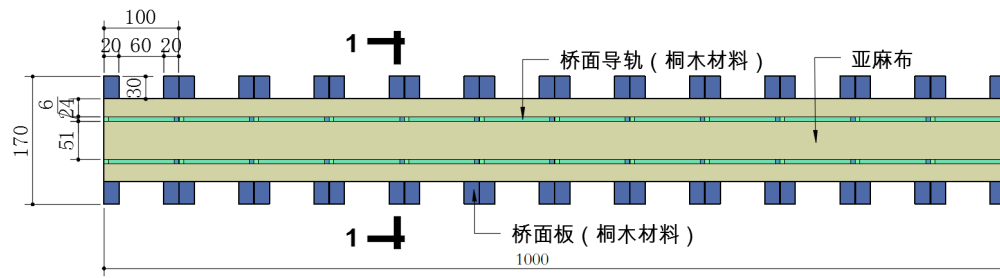
- 连接竖向加载点的模型结构应具备足够的刚度，禁止竖向加载点在施加竖向荷载过程中产生大位移，从而改变荷载传力模式。

### 2.3.2 移动荷载

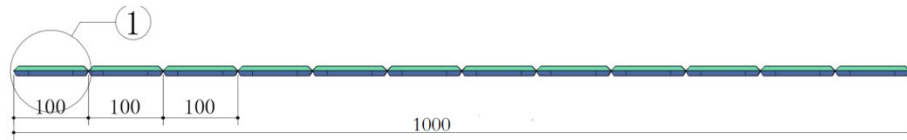
移动荷载为 50N 铅球（直径为 111mm）。移动荷载的施加方法是：由参赛选手手持铅球，使铅球静止于轨道上（初始标高任选），松手释放铅球。铅球沿桥岸弧形滑轨加速移动后上桥（落差 100mm），滚动过桥。在满足加载要求的前提下，铅球登上到达桥岸则移动荷载加载成功。

### 2.3.3 桥面板

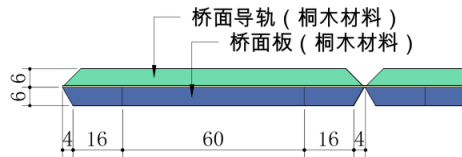
- 桥面板的平面尺寸为 1200\*170mm，由组委会提供。如图 6 和图 7 所示，桥面板主体由粘在亚麻布上的 12 块桐木板（外框尺寸 170\*99.6\*6mm）组成。
- 为了防止铅球滚偏，在桥面板上表面沿纵轴线方向平行粘贴两列桐木条，每列 12 根，单根桐木条的截面尺寸为 6\*6mm，两列桐木条之间的净距为 51mm。对桐木板和桐木条相邻的端面做倒角处理，使桥面板具有自由的纵向弯折变形能力。桥面板详图如图 6 所示。
- 为了减少对桥梁承重结构布置的影响，在每块桥面桐木板的两端设置了豁口，豁口尺寸及位置详见图 6(a)。
- 桥面板的平面位置安装如图 2(a)所示，桥面板纵轴线与 ⑥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。



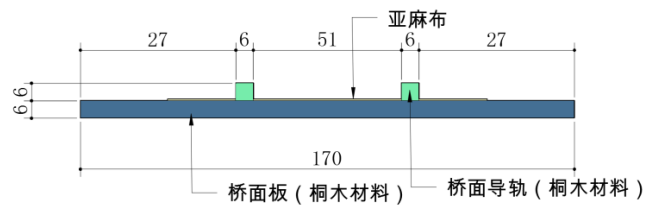
(a) 桥面板俯视图



(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

- 第一级加载，六个加载点分别悬挂各自的待定荷载。
- 第二级加载，保持 C 加载截面的  $C_1$ 、 $C_2$  加载点静载不变，从其左侧加载点 ( $B_1$ 、 $B_2$ ) 或右侧加载点 ( $D_1$ 、 $D_2$ ) 中任选一个加载点，将该加载点的所有砝码转移至另一侧的任一加载点上（移出和移入砝码的加载点由参赛队自主确定）。

c) 第三级加载，保持上一级静载作用，施加移动荷载。

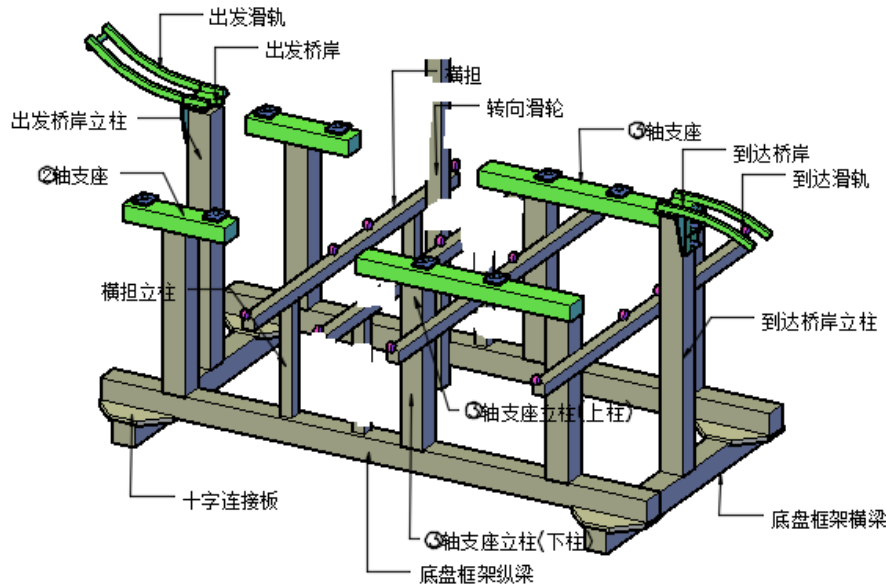


图8 加载装置轴测示意图

### 3 加载装置

#### 3.1 加载装置组成

加载装置如图8、图9所示。组成加载装置的主要构件为铝型材，通过角铝和T型螺栓进行连接。其它附件包括转向滑轮、十字连接板、出发滑轨、到达滑轨、砝码托盘、桥面板等。

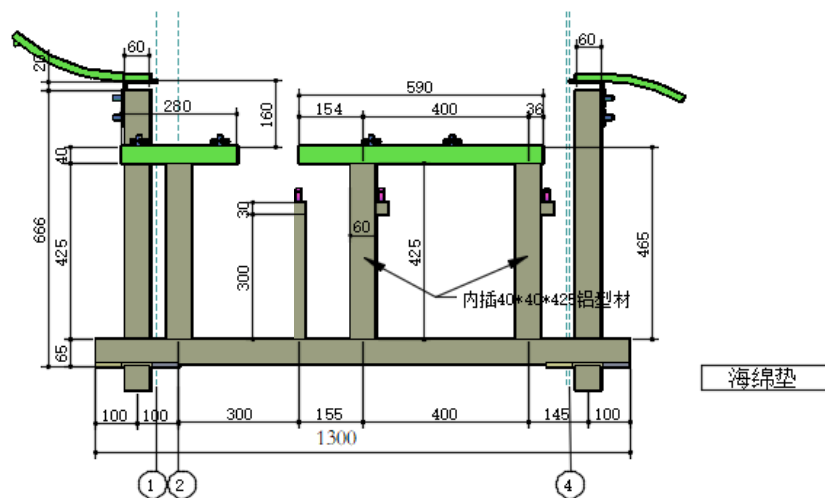
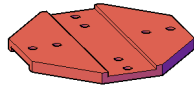


图9 加载装置立面图

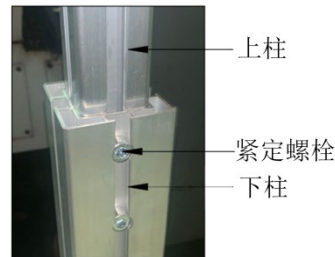
### 3.2 特殊节点构造

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。



(a) 十字连接板



(b) 上、下柱连接节点

图10 特殊节点示意图

## 4 模型制作要求

- a) 模型制作材料由组委会统一提供。各参赛队使用的材料仅限于组委会提供的材料。如发现违规使用其他材料，一律取消比赛成绩。

表1. 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） | 2 张   |
|      | 1250mm×430mm×0.35 (+0.05) mm | 集成竹片（双层） | 1 张   |
|      | 1250mm×430mm×0.50 (+0.05) mm | 集成竹片（双层） | 1 张   |
| 竹杆件  | 930mm×6mm×1.0 (+0.5) mm      | 集成竹材     | 10 根  |
|      | 930mm×2mm×2.0 (+0.5) mm      | 集成竹材     | 10 根  |
|      | 930mm×3mm×3.0 (+0.5) mm      | 集成竹材     | 10 根  |

注：竹材规格括号内数字仅为材料厚度误差限，通常为正值；

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 <sup>3</sup> | 60 MPa | 30 MPa | 6 GPa |

- b) 为每队提供 502 胶水（30g 装）5 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）6 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。允许对尼龙绳进行裁剪操作

- d) 为每队提供 1 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。
- e) 模型制作期间，统一提供美工刀、剪刀、水口钳、磨砂纸、尺子（钢尺、丁字尺、三角板）、镊子、滴管等常规制作工具。

## 5 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  $M_i = M_{Ai} + M_{Bi}$ 。

## 6 模型预安装及尺寸检查

### 6.1 模型预安装

模型提交时模型预安装。模型预拼装时为各队提供用于加载测试的桥面板和支座竹板。

参赛队员将模型按照 2.2.4 条所述方法与支座竹板（每队四块）连接，并将连接好竹板后的模型固定在装置上。安装时提供手枪钻、直尺、铅笔等辅助工具。

### 6.2 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) 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。

## 7 加载测试过程

### 7.1 模型安装到加载台上

模型安装及尺寸检查合格后，连同支座竹板一起从检查装置上拆下模型，等待入场指令。得到入场指令后，参赛队员迅速将模型运进场内，安装在加载装置上。

## 7.2 具体加载步骤

准备完毕，参赛选手举手示意，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 480 秒内完成。

- 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。
- b) 第二级荷载：按照 2.3.4b 条所述荷载转移规则先后进行两步荷载转移。加载由参赛队员进行，每一步加载完成均需举手示意，读秒 10 秒钟，模型未失效，则加载成功，进行后继加载。
- c) 第三级荷载：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 2 次第三级测试机会。

## 8 判定标准

### 8.1 模型违规标准

出现以下情况之一，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 2.3.1 条关于竖向加载点位置的相关规定。
- d) 不满足 4a 条关于模型材料使用的相关要求。
- e) 发生经评委认定的 4c 条关于尼龙绳兼作结构构件的情况。
- f) 不满足 4d 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。
- g) 不满足 4e 条关于模型制作工具的相关规定。

### 8.2 加载失效判定标准

加载过程中出现以下情况之一，判定加载失效，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（第一步或第二步）发生结构倒塌。如第二步结构垮塌，第一步加载成绩有效。
- c) 第三级加载发生结构倒塌，或者两次第三级加载铅球均未登上到达桥岸。
- d) 发生模型与除铅球之外的加载装置（包括钢丝绳）直接接触。
- e) 发生关于绳套滑出标识区域的情况。

- f) 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。
- g) 评委认定不能继续加载的其他情况。

### 8.3 加载测试停止标准

出现以下 2 种情况之一，既可判定加载结束。

- a) 加载时间超出 10.4 条关于整个加载过程需在 480 秒内完成的规定。
- b) 满足 11.2 条关于加载失效的标准。

## 9 评分标准

### 9.1 总分构成

结构评分按总分 100 分计算，其中包括：

- a) 理论方案分值: 10 分
- b) 模型结构与制作质量分值: 10 分
- c) 加载表现分值: 80 分
- d) 违规扣分

### 9.2 评分细则

- a) 理论方案分：满分 10 分

第 i 队的理论方案分  $A_i$  由评委根据计算内容的科学性、完整性、准确性和图文表达的清晰性与规范性等进行评分。

- b) 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  $B_i$  由评委根据模型结构体系（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和模型轴测图进行，如发现实物模型与设计图纸出现明显差异，经评委会认定，可取消该队的参赛资格。

- c) 加载表现评分：满分 80 分

第一级加载得分系数：

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

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或第二级加载，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。

第二级加载得分系数：

$$k_{2-1i} = \begin{cases} \text{Min}(1, \frac{M_{min}}{M_i} \times (\frac{G_{2-1i}}{G_{2-1max}})^{1/n}), & \text{该步加载成功} \\ 0, & \text{该步加载失败} \end{cases}$$

其中， $G_{2-1i}$  为某队第二级转移的砝码重量， $G_{2-1max}$  为通过第二级加载的所有队伍中该步转移的砝码重量最大值， $n$  为调整系数，取 2。

第三级加载得分系数：

$$k_{3i} = \begin{cases} \text{Min}(1, \frac{M_{min}}{M_i} \times (\frac{G_{3-i}}{G_{3-max}})^{1/n}), & \text{该步加载成功} \\ 0, & \text{该步加载失败} \end{cases}$$

第  $i$  队的加载表现得分  $D_i$

$$D_i = 30k_{1i} + 30k_{2-1i} + 20k_{3i}$$

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  $F_i$ 。

模型场内加载时间超过每超过 1 分钟，罚 2 分，不足 1 分钟按照 1 分钟计算。

### 9.3 总分计算公式

第  $i$  支队总分计算公式为：

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