

西南交通大学研究生学术素养提升计划

西南交通大学
第十三届研究生结构设计竞赛



主办单位：西南交通大学研究生院

承办单位：西南交通大学土木工程学院、西南交通大学土木工程学院研究生会

2024年4月1日

1、选题背景

装配式桥梁因受力状态简单明确、加工制造标准化和工厂化、运输和施工简便高效、维护管养成本低、环境亲和力高等特点，近年来受到了越来越多的关注。

西部山区的高速公路建设多采用高架桥，此时装配式桥梁的优势更加凸显。

据此，本赛题以山区装配式桥梁为背景，需要设计和制作出能同时满足装配化的要求并能够有足够抗落石冲击要求的桥梁模型。

2、竞赛模型

竞赛模型为一座可承载一定荷载的两跨桁架连续刚构桥或单塔两跨斜拉桥或单塔两跨自锚式悬索桥，不可制作为其他类型桥梁，否则取消比赛资格。总跨度为 2.3m-2.7m，需要制作装配式桥墩，桥墩高度和形式可以依据结构特点自行设计而定，但桥墩横截面最大尺寸不超过 35 cm×35 cm，桥墩底部采取专门夹具固定。

模型只能采取统一发放的材料制作，一经发现使用其他辅助材料，视为作弊，取消比赛资格。模型加载系统和测量系统由承办方提供。

3、模型要求

3.1 制作材料

组委会将统一提供 PVC 塑料板（可借助电吹风热弯后塑形）、PVC 塑料管、桐木条和塑料螺钉螺母四种材料，各参赛队设计、制作模型仅限于使用以上材料，且允许对所给材料进行适当加工、组合。但 PVC 塑料管的单根长度不能超过 30cm，否则取消比赛资格。

模型制作过程中不得使用任何形式的粘接剂，如胶水。对于连接用的节点构造，可采用 3D 打印的方式，但尺寸不可超过 5cm^3 的立方体空间。

3.2 模型重量

结构模型的总重量（含拼装时用的临时结构）不超过 4500 克，超过者不能参加比赛。

3.3 模型尺寸和制作要求

桥梁需保持主梁和桥面连续，模型的纵桥向长度要求在 $(2300, 2700)$ mm 范围内，横桥向宽度要求在 $(200, 250)$ mm 范围内，模型具体长宽尺寸由参赛队伍自行拟定。桥面纵坡应控制在 3.0% 以内（否则无法牵引小车，等同于失去比赛资格），并保持桥面连续。**不符合要求的模型直接取消比赛资格。**

桥梁模型由可以现场拼装的若干段组成，每段可由主梁、拱上立柱（吊杆）和主拱构成，也可以由其中的一个或两个构成。每个拼装构件最大尺寸不大于 30cm。主拱端部需要做成一个直角面，否则无法对拱角进行约束。

模型的所有构件在赛前备好，并在交验模型时先校验各个构件是否满足最大尺寸的要求，然后每个队仅能指派 2 名选手在现场，在指定区域和路线，将构件拼装为一个整体模型，裁判员记录拼装时间并由参赛队员确认。

模型拼装完成后，各个构件需要保持紧密，且在搬运过程中不得散落。对于组装完成在搬运过程中发生散落的模型，**主委会只提供一**

次修理模型的机会。

3.4 模型桥面

(1) 桥面铺设材料可以为 PVC 塑料板或 PVC 塑料管或两者的组合结构，如 PVC 管可对剖充当桥面板的 U 肋。

(2) 模型需设置相应平整，并具有一定刚度和强度的桥面构造，能够用于移动小车加载。若加载时桥面塌陷导致小车无法行进，或桥面发生破坏，算为加载失败。

(3) 模型桥面以上须保证不小于宽 210mm×高 200mm 的桥面通行净空，以用于移动小车加载。

3.5 实验平台

请参赛者认真解读实验平台附图，仔细考虑支座情况（图 1）。整个结构模型要求单跨拱桥结构，实验平台共设置 4 个支座。上方两个支座位于主梁两端，可提供竖向、横向和纵向约束，支座水平间距可调，可为模型主拱提供竖向、横向和纵向约束以及转角约束。中间桥墩或桥塔底部采用刚性抱箍约束。主梁或加劲梁的端支座高度和间距是固定的，仅可微调。

3.6 模型测点设置

支座水平间距可调，可为模型主拱提供竖向、横向和纵向约束以及转角约束。中间桥墩或桥塔底部采用刚性抱箍约束。主梁或加劲梁的端支座高度和间距是固定的，仅可微调。

3.7 设计说明书

进入决赛的参赛作品，必须提供详细的设计说明书。

3.8 加载

为确保公平，比赛时所有模型的加载都需按最不利的情况进行，即小车并行加载时需要停留在刚度最小位置（由评审老师选定）。

4、加载方式及过程

4.1 预载

预载前首先须校验各参赛作品制作（包括材料、结构尺寸、净空尺寸等）是否满足竞赛规定的限制要求。

预载前须测定参赛作品总重量 G （单位： g ），并校验 G 数值是否满足竞赛规定的限制要求（不超过 $4500g$ ）。对于满足重量要求和制作要求的结构，方可进行荷载加载试验及位移测试。

移动荷载加载前，须在每跨集中加载点各悬挂 $2kg$ 的砝码作为基准荷载，并在桥面铺设总重量 $4kg$ 的钢带作为均布荷载，并以此作为位移测试的变形基准点。

若在挂砝码的过程中，发生绳子断裂破坏，或者构件局部断裂破坏，导致砝码跌落，主委会仅允许一次现场修理机会。

预载时的移动小车荷载加载方式为：两辆自重各为 $3kg$ 的移动小车，分别从模型两端牵引相向而行，匀速通过整个模型。

移动小车通过整个模型的时间约为 30 秒，由工作人员牵引。

小车移动过程中由工作人员操作仪器自动采集模型 3 个位移测点的位移值（在基准荷载下的位移为 0 位移、测量因移动荷载而引起的位移增量）。

计算各模型的预载荷重比 P/G ，其中 P 取为 $4500g$ 。

对加载成功的作品按预载荷重比大小进行初步排名。

5.2 二次加载

二次加载方案分为两个步骤进行。第一步为位移测试荷载工况，第二步为承载能力荷载工况。参赛作品须按表 1、表 2 所示的加载顺序进行试验，每通过一个工况的测定和校验后方可进行下一工况的加载试验。

各加载步骤和荷载工况的内容及成绩评定方法详见表 1 和表 2。

位移测定在第一步的荷载工况下进行，按表 1 说明进行测定。所测位移数值为：在预载变形的基准上，由移动小车加载所引起的结构竖向挠曲。位移校验时其最大绝对值大于 20mm 者在分数计算时为负分，若超过 30mm，即视为加载失败。变形过大，导致加载小车无法正常牵引过桥，也视为加载失败。

5、加载方法与失效评判

预载后，若结构发生较大变形，跨中或两端的静变形量超过 25mm，算作结构失效。但此静变形仅作为失效与否判据，不参与评分。若结构在超过此静变形后未破坏，可继续参赛，但不计算成绩和名次。

预载过程中，发生以下情形之一者，即视为加载失败：

- (1) 模型主要构件出现明显失稳或连接破坏
- (2) 模型局部构造发生破坏且影响加载过程顺利进行.
- (3) 模型结构发生破坏而不能继续承担荷载
- (4) 位移测点在进行位移测定的工况下的最大竖向位移超过规

定限值（25mm）

（5）若在小车加载过程中，发生绳子断裂破坏，或者构件局部断裂破坏，导致砝码跌落，则认定为加载失败。

二次加载试验失败的判定：

在整个加载过程中，发生以下情形之一者，将视为加载失败，退出加载试验：

（1）模型主要构件出现明显失稳或连接破坏

（2）模型局部构造发生破坏且影响加载过程顺利进行（桥面破坏，或因塌陷导致小车无法以轮子滚动的方式正常通行，而是以底部贴着桥面滑行）

（3）模型结构发生破坏而不能继续承担荷载

（4）位移测点在进行位移测定的工况下的最大竖向位移超过规定限值（25mm）

（5）若在小车加载过程中，发生绳子断裂破坏，或者构件局部断裂破坏，导致砝码跌落，则认定为加载失败。

6、模型材料及制作工具

软质 PVC 塑料板：厚度 2mm，用于制作结构构件。力学性能参考值：弹性模量 1.5-15MPa，抗拉强度 30MPa。

塑料螺钉螺母：用于模型结构构件之间的连接，直径 4mm，长

度 12mm。

PVC 塑料管：外直径 8mm，壁厚 1mm。

桐木条：4mm×4mm，方形截面，或直径 4mm 圆形截面。

以上所有材料可以进行二次加工，连接节点可 3D 打印（空间尺寸不超过 5cm³ 立方体）。注意：（1）本次比赛不可使用任何类型的粘胶作为构件之间的连接，违者取消比赛资格。（2）组装后的结构构件最大尺寸不超过 30cm。

7、模型现场安装、加载及测试步骤

7.1 赛前准备：

检查模型是否满足赛题要求、是否满足安装要求。

安装要求：交模型时，首先校验单个构件尺寸是否大于 30cm，采用 3D 打印的连接件不超过 5cm³ 立方体，然后每队指派 2 名队员，将各个构件现场拼装成一个整体，裁判记录拼装时间并由队员确认，方可提交模型，且模型可搬运不散架（现场拼装散架的模型仅提供一次修理机会）。

模型拼装处可以使用卯榫连接，或塑料螺钉螺母连接，禁止使用胶水。

拼装过程中，主委会提供临时拱脚约束，一次拼装一个构件，拼装好的结构需要自稳定（否则算失败，可修改一次模型），可用临时措施支撑拼装中的结构，但临时措施计入总重。

7.2 加载及测试步骤

详见表 1 和表 2。

8、评分标准：

8.1 总分构成

评分按结构总分 100 分+拼装总分 20 分计算，结构总分其中包括：

- (1) 说明书和现场表现 20% (共 20 分)
- (2) 结构制作精美度 25% (共 25 分)
- (3) 加载表现评分 55% (共 55 分)

拼装总分 20 分，按照以下公式计算：

拼装成绩 $P=20*t_{min}/t$ ，其中 t 为单个模型的拼装时间， t_{min} 为最小拼装时间，单位秒，精确到小数点后 2 位。

注：（1）初赛时仅考虑结构分的第三项得分和拼装得分，只进行一次加载，通过者按照荷重比排名；（2）决赛时需要考虑全部四项得分，且需要进行二次加载。

8.2 评分细则

A. 说明书及设计图（共 10 分，初赛时不计入此项。）

- (1) 计算内容的完整性 (共 5 分)

包含模型的力学计算过程，清晰详细为满分，不详为 2 分，没有为零分。

- (2) 图文表达的清晰性、规范性 (共 5 分)

包含模型设计、制作和测试三方面内容，每一项各为 3 分，都有为满分，

说明书可能包含的内容如：结构选型思路、结构建模及主要计算

参数、受荷分析、节点构造、模型加工图，模型测试照片和结果。

B. 结构选型与制作质量（共 35 分）

(1) 结构的美观性（共 15 分）

结构涂装是否美观，色彩搭配是否协调。

(2) 模型制作的精致性（共 15 分）

制作粗糙，得 5 分；制作一般，得 10 分；制作精美，得 15 分。

制作粗糙者，如直接把 PVC 材料切割成粗糙的板或条，简单拼装后的作品。制作精美者，如桁架梁的精美雕刻，或桁架杆件单独制作，有节点板等细节构造的作品。

C. 加载表现评分

(1) 加载试验成绩总分 55 分，其中位移成绩 15 分、静载成绩 30 分、动载成绩 10 分。

(2) 位移成绩总分 15 分，其计算方法如下：

$$\text{位移成绩} = K1 \times 15 \quad (\text{公式 1})$$

其中，位移成绩系数 K1 按下式计算(δ 为实际测试最大位移)

$$K1 = (10 - \delta) / 10 \quad (\text{公式 2})$$

(3) 静载成绩总分为 30 分，其计算方法如下：

$$\text{静载成绩} = K2 \times 30 \quad (\text{公式 3})$$

其中，静载系数 K2 按下式计算

$$K2 = \frac{\beta_i}{\beta_{\max}} \quad (\text{公式 4})$$

上式中， β_i 表示第 i 个模型的静载“荷重比”，即静载集中力加载

值与模型重量之比； β_{\max} 为所有进入决赛的作品中的最大静载荷重比。

(4) 动载成绩总分为 10 分，其计算方法如下：

$$\text{动载成绩} = K3 \times 10 \quad (\text{公式 5})$$

其中，动载成绩系数 $K3$ 取值为：通过动载加载工况者 $K3=1$ ，否则 $K3=0$ 。

(5) 加载试验成绩即为位移成绩、静载成绩、动载成绩之和：

$$\text{加载试验成绩 } K = K1 \times 15 + K2 \times 30 + K3 \times 10 \quad (\text{公式 6})$$

(6) 总成绩 $T = \text{加载试验成绩 } K + \text{拼装成绩 } P$

结构评分分项中第 A-B 项内容均在加载前评毕，第 C 项内容在决赛加载试验现场评定。模型尺寸及材料使用不符合设计制作要求者，不得进入加载试验阶段。

在参赛过程中有其他违规现象者将直接淘汰，不进入比赛评分阶段。以上 A-C 各项得分相加为结构总得分。

9、参赛选手所需提交的资料：

提供模型即可，但进入决赛的参赛选手还需要向组委会提交设计说明书和答辩 PPT（电子文档 1 份和纸质文档 3 份），说明书需在封面处注明参赛队伍名称，参赛队员姓名与学号，文件夹以 YXX 组命名。文件夹内附上述文件。

10、附则：

(1) 本竞赛规则中若出现叙述不一致之处，请咨询竞赛组委会。

(2) 本竞赛细则最终解释权归竞赛组委会。

(3) 所有参赛选手均可申请参加钢桥组装赛（有奖品），由现场抽签决定参赛资格，可放弃也可转让，具体详见钢桥组装赛指南。

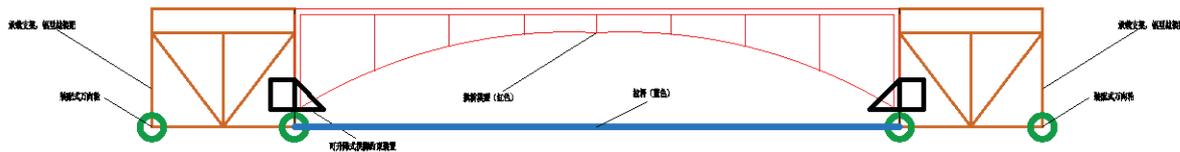


图 1 加载设备示意图

说明：

- (1) 本图尺寸单位为 mm；
- (2) 跨径 2300mm–2700mm，参赛者自行确定；
- (3) 两端边支座可提供竖向支撑和纵向支撑；
- (4) 拱脚支座高度 H 可以上下调节；
- (5) 位移传感器位置可移动，但必须布置在跨中和两个 1/4 跨。

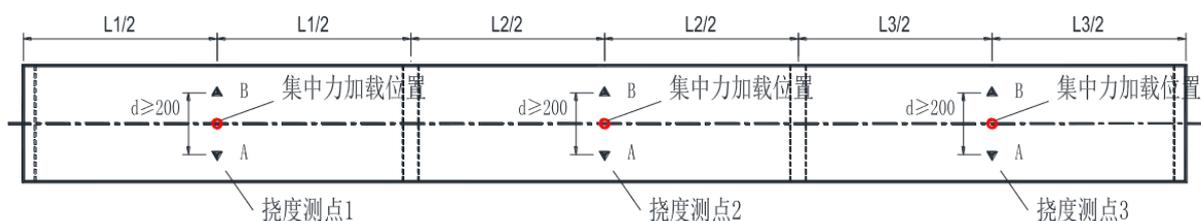


图 2 桥梁结构集中力加载位置

说明：集中力加载点布置在桥轴线上；位移测点关于桥轴线左右对称，且间距不小于 200mm。现场根据评委判定选取较弱的两跨进行位移试验。

表 1 模型第一次加载及评定系数

加载		加载说明	测定和校验内容	成绩评定系数 K_i			
步骤	工况			加载失败		加载通过	
第一次加载（位移测试荷载工况）	1.1 预载	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 按要求摆放结构模型、调试位移测试仪器。 ✓ 将集中力布置于三跨跨中吊点处，具体见示意图。 ✓ 集中力大小为单点 2kg（用 2kg 的基准砝码施加）。 ✓ 均布力为整体 4kg（用 4kg 钢带施加）。 ✓ 此步骤主要是起稳定模型的作用，便于位移数值测量，提高其精确度。 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 校验结构是否出现整体、构件、局部破坏或结构失稳。出现上述情况者视为该工况加载失败。 ✓ 预载后，若结构发生较大变形，跨中或两端的静变形量超过 2.5cm，算作结构失效。 ✓ 该步骤下测试的静变形仅作为失效与否判据，不参与评分。 ✓ 若结构未破坏，可继续参赛，但不计算成绩和名次。 	位移	$K1=0$	位移	$K1=0$
				静载	$K2=0$	静载	$K2=0$
				动载	$K3=0$	动载	$K3=0$

1.2 移动荷载	<ul style="list-style-type: none"> ◇ 两工作人员分别牵引一辆移动小车，由双车道同时匀速相向移动，通过模型。 ◇ 移动小车长约 10cm，小车重量 3 kg。 ◇ 当小车行驶至各跨跨中时，须停止 5 秒，然后前进。 ◇ 小车通过整个模型的时间限定在 1 分钟之内。 ◇ 选取整个加载过程中四个位移测点的最大绝对值作为模型竖向位移 δ（单位 mm）。 <ul style="list-style-type: none"> ◇ 撤除悬挂的集中荷载 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 校验结构是否出现整体、构件、局部破坏或结构失稳。出现上述情况者视为该工况加载失败。 ✓ 校验整个加载过程中模型位移值是否超限。 ✓ 变形过大导致小车无法正常通行视为失败。 ✓ 桥面板变形过大导致小车无法通行或桥面破损视为加载失败。 	位移	$K1=0$	位移	由 δ 计算 $K1$
			静载	$K2=0$	静载	由 6kg 计算 $K2$
			动载	$K3=0$	动载	$K3=0$
备注	(1) 第一次加载全部成功后方可进入第二次加载流程。(2) 成绩评定系数的计算参见 8.2。					

表 2 模型第二次加载及评定系数

加载		加载说明	测定和校验内容	成绩评定系数 K_i			
分步	工况			加载失败		加载通过	
第二次加载 (承载力荷载工况)	2.1 集中力增载	<ul style="list-style-type: none"> ◇ 将各吊点的集中力荷载增加至 3kg。 ◇ 单点集中力荷载由基准荷载 2kg 和附加荷载 1kg 构成。其中，基准荷载 2kg 砝码由一根可自由变形的弹簧悬挂在吊点上，附加荷载 1kg 砝码由一根铅发丝线悬挂在基准荷载下方。 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 校验结构是否出现整体、构件、局部破坏或结构失稳。 ✓ 出现上述情况者视为该工况加载失败。 ✓ 该步骤不进行位移校验。 	移	K1	移	K1
				载	由 6kg 计算 K2	载	由 6kg 计算 K2
				载	K3=0	载	K3=0

2.2 移动荷载	<ul style="list-style-type: none"> ◇ 用两辆相同的移动小车串连后形成总重为 6kg 的一个车辆组, 由工作人员从一个车道牵引匀速行驶至刚度较弱跨的跨中, 停止前进。 ◇ 具体车道及刚度较弱跨的选择由现场评委根据模型加载情况指定。 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 校验结构是否出现整体、构件、局部破坏或结构失稳。 ✓ 出现上述情况者视为该工况加载失败。 ✓ 校验整个加载过程中模型位移值是否超限。 ✓ 变形过大导致小车无法正常通行视为失败。 ✓ 桥面板变形过大导致小车无法通行或桥面破损视为加载失败。 	移	K1	移	K1
			载	由 6kg 计算 K2	载	由 6kg 计算 K2
			载	K3=0	载	K3=0
2.3 振	◇ 保持 2.2 荷载工况。	✓ 校验结构是否出现整		K1		K1

	动 和 冲 击 加载	<ul style="list-style-type: none"> ◇ 自由下放一个位于固定高度的篮球, 让篮球自由撞击模型桥墩顶部, 如此反复撞击桥墩顶部, 直到停止撞击。 ◇ 任模型发生自由振动, 或破坏, 或侧倾。 	<p>体、构件、局部破坏或结构失稳。</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 若模型整体倾倒, 或垮塌, 或砝码掉落, 则视为该工况加载失败。 ✓ 若模型未损坏, 或仅出现局部损伤或破坏, 且小车仍可正常通行, 则视为加载成功。 ✓ 该步骤不进行位移校验。 	移		移	
				载	K2	载	K2
				载	0	载	K3=1
备 注	(1) 第二次加载前不允许对模型的安装进行调整。(2) 成绩评定系数的计算参见 8.2						

