

大学生结构设计竞赛视角下的乌篷船结构优化设计实践

李朝阳, 曹舒, 胡哲瑜, 杜子强, 陈震 (通讯作者)

(江汉大学数字建造与爆破工程学院, 湖北武汉 430056)

摘要: 本文按照第十八届全国大学生结构设计竞赛要求, 设计出两种结构形式的乌篷船模型方案。通过理论分析、有限元数值模拟以及模型试验对各方案模型的承载能力、重量、稳定性、抗撞击性以及防水性等指标进行综合对比, 最终优选出一种性能良好且重量较轻的乌篷船结构方案。研究表明, 采用箱型截面形式的杆件能够制作出轻质高强且刚度高的结构模型, 增加斜撑、横梁等构件数量可有效提高结构整体稳定性与刚度, 但需控制数量以减轻重量。本文研究成果为本次结构设计竞赛的参赛团队提供了理论依据与实践指导, 也为后续结构设计竞赛提供参考与借鉴。

关键词: 结构设计竞赛; 多方案对比; 有限元分析; 优化设计;

0 引言

第十八届全国大学生结构设计竞赛以乌篷船为主题, 要求参赛者以竹材、防水膜、胶水为材料, 设计并制作在航行中能承受载重、水压力和撞击力的乌篷船结构模型。本次研究以竞赛要求为导向, 通过多方案对比分析, 探索出一种承载高、重量轻、易制作的乌篷船结构设计方案。

1 竞赛要求

1.1 模型构成

乌篷船模型由船体结构、船篷结构和辅助加载所需的非结构部件三部分组成。船体结构由内部龙骨与船舷(竹材制作)、隔水层(防水膜)构成, 如图 1 所示。

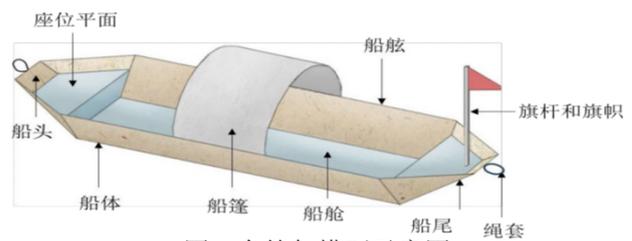


图 1 乌篷船模型示意图

1.2 模型制作材料要求

模型制作材料包括竹材、防水膜和胶水。竹材包括 0.20mm、0.35mm 和 0.5mm 三种厚度的竹皮以及截面为 6mm × 1mm、2 × 2mm 和 3 × 3mm 的三种竹杆, 聚乙烯材质的防水膜和 502 胶水。各材料参考力学指标见表 1。

表 1 模型材料力学性能指标

竹材				防水膜		
密度	顺纹抗拉强度	抗压强度	弹性模量	密度	拉伸断裂强度	弹性模量
0.8g/cm ³	60MPa	30MPa	6GPa	0.95g/cm ³	20MPa	1GPa

1.3 模型尺寸

船体结构中间部位为船舱, 两端各设置一个座位, 须满足规避区的净空要求, 如图 2 所示。船体结构参数具体数值要求见表 2。



(a) 立体图 (b) 规避区 II、III 尺寸
图 2 船体结构规避区

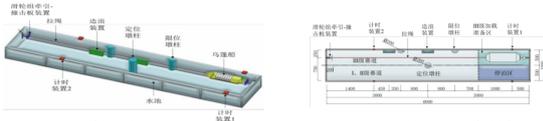
表 2 船型参数 (单位: mm)

船体	规避区 I	规避区 II/III	规避区 IV	船体结构的空间外边界长 × 宽 × 高	船篷宽度 × 限高
总长	船舱净空总长 × 宽 × 深	座位净空长 × 宽 × 深	船篷下净空长 × 高	界长 × 宽 × 高	高
a	$L_1 \times B_1 \times H_1$ 三棱柱长 × 宽 × 深 $e \times f \times H_1$	$d \times d \times h$	$L_{IV} \times H_{IV} \times B_{IV}$	$a \times b \times c$	$B_{IV} \times H_{max}$

960	660×240×100 80×30×100	80×80×50	160×80×200	960×320×200	200×160
-----	--------------------------	----------	------------	-------------	---------

1.4 模型加载

加载装置主要由水池系统（含水池、墩柱系统）、造浪装置、滑轮组牵引-撞击板装置、计时装置及其他加载配套设施等组成，如图 3 所示。



(a) 示意图 (b) 尺寸详图
图 3 加载装置图 (单位: mm)

比赛时提供单钩圆柱形铸铁砝码和塑料容器坛状砝码（装铁砂或水）。模型分三级加载，其加载载重分别为：1kg、10kg 和 18kg。

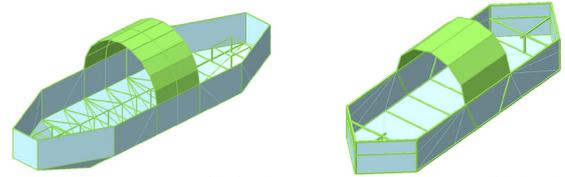
1.5 加载测试评分规则

加载测试环节的得分是在乌篷船能正常牵引进行情况下，在保证承载能力、稳定性、抗撞击性和防水性等性能的前提下，模型重量越轻、航行时间越短则得分越高。

2 结构选型

2.1 方案对比

通过对多套乌篷船模型方案的初步探索与反复试错，最终设计出两种船体方案，其结构型式如图 4 所示，图中绿色部分为竹材，蓝色部分为防水膜。



(a) 第一种方案 (b) 第二种方案

图 4 两种方案结构型式图

方案一的船体骨架部分主要用截面为 2mm × 2mm 的实心竹杆，一、二级加载点附近（船首尾突立部分）杆件截面为 3mm × 3mm 的实心竹杆，船舷和船底采用单层防水膜。

方案二的船体骨架部分主要用矩形截面空心箱型杆，其截面尺寸为 5mm × 5mm，厚度为 0.2mm；船体底部和船舷斜杆采用截面尺寸为 5mm × 5mm，厚度为 0.5mm 的矩形截面空心箱型杆；船篷骨架采用截面为 2mm × 2mm 的实心竹杆；船舷和船底采用单层防水膜。

2.2 构件与节点构造

在确保结构强度、刚度与稳定性的同时实现自重最小，构件选型遵循两大原则：一是采用小截面实心杆件或空心箱型杆件，尽量减少冗余材料；二是基于材料强度充分利用原则。两种方案的乌篷船模型中主要杆件截面形状及特点如表 3 所示。

表 3 两种方案结构型式对比

方案比较	第一种方案	第二种方案
特点	斜撑多，整体稳定性高。杆件数量多，单根杆件简单，制作工作量适中，节点连接较复杂，胶水用量适中。	型式简洁，传力路径明确，杆件数量较少，单根杆件制作较复杂，节点连接较简单，胶水用量较多。
杆件数	322 根	80 根
节点数	133 个	97 个
杆件构成	2mm × 2mm、3mm × 3mm 两种矩形截面实心杆	主体 5mm × 5mm × 0.2mm、5mm × 5mm × 0.5mm 两种矩形截面空心箱型杆；局部 2mm × 2mm 矩形截面实心杆；
自重	165 克	65 克

在节点连接设计上，考虑“操作便捷性”与“连接牢固性”。模型所有构件均采用 502 胶水进行基础粘结，并根据节点实际受力大小与方向差异，针对性采取差异化加固措施。

3 结构建模

3.1 结构模型

船体模型结构分析软件选用通用有限元软件 Midas Civil，该软件操作简单、功能丰富，是土木工程结构

分析和设计的高效工具。

3.2 结构建模中的主要参数 (1) 材料参数部分：根据赛题中提供的信息，视竹材为各向同性材料；

(2) 几何信息部分：各构件截面型式及尺寸按实际情况输入，并符合赛题规定；

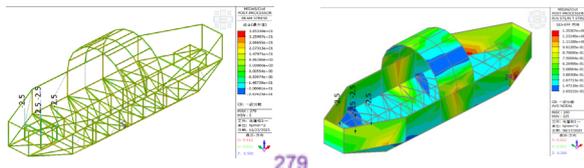
(3) 荷载工况部分：考虑自重、水压力和各级外荷载共同作用下的荷载组合进行计算。

4 计算结果

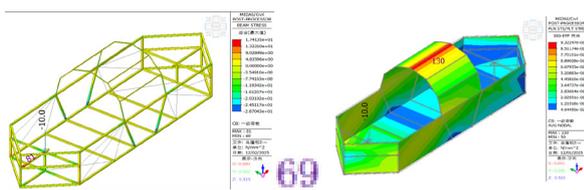
4.1 应力分布

(1) 第一级荷载组合加载

按比赛要求，在船体一端的座位平面上放置一个重量为 1kg 的圆柱形铸铁砝码，第一级荷载组合加载情况下两种方案的模型应力分布情况如图 5 所示。



第一种方案竹材应力分布图 (b) 第一种方案防水膜应力分布图

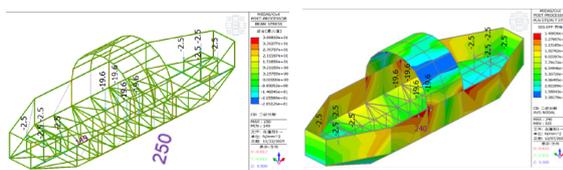


(c) 第二种方案竹材应力分布图 (d) 第二种方案防水膜应力分布图

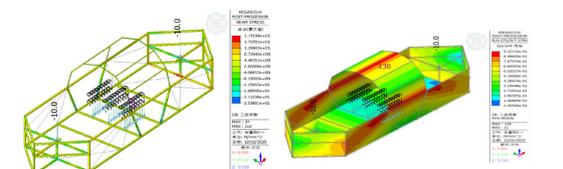
图 5 第一级荷载组合加载下模型应力分布图

第二级荷载组合加载

第二级荷载是在船体两端的座位平面上各放置一个重量为 1kg 的圆柱形铸铁砝码，同时在船舱中放置 1 个装有 8 kg 铁砂的坛状砝码，船体总载重 10kg。该荷载组合工况下两种方案的模型应力分布情况如图 6 示。



(a) 第一种方案竹材应力分布图 (b) 第一种方案防水膜应力分布图



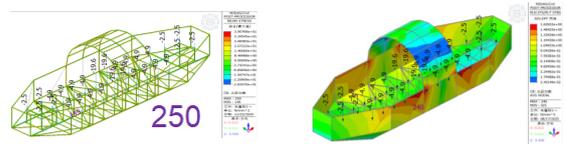
(c) 第二种方案竹材应力分布图 (d) 第二种方案防水膜应力分布图

图 6 第二级荷载组合加载下模型应力分布图

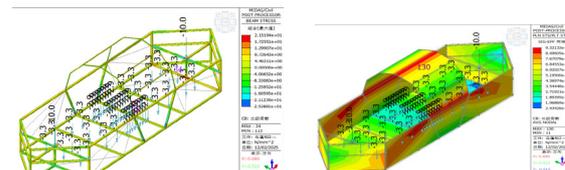
第三级荷载组合加载

第三级荷载是在第二级荷载的基础上再在船舱

中增加 4 个各装有 2 kg 水的坛状砝码，船体总载重 18kg，两种方案的模型应力分布情况如图 7 所示。



第一种方案竹材应力分布图 (b) 第一种方案防水膜应力分布图

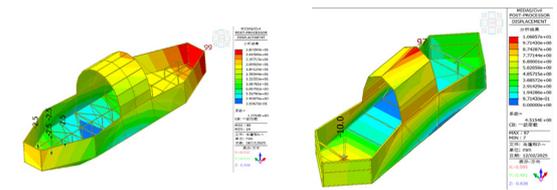


(c) 第二种方案竹材应力分布图 (d) 第二种方案防水膜应力分布图

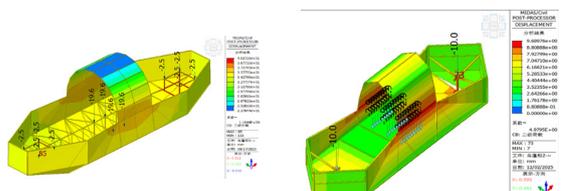
图 7 第三级荷载组合加载下模型应力分布图

4.2 变形情况

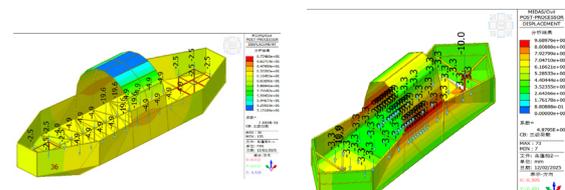
同时考虑砝码重量、水压力、船体自重作用下的各级荷载组合工况下两种方案的模型变形情况分别如图 8~ 图 10 所示。



(a) 第一种方案 (b) 第二种方案
图 8 第一级荷载组合下模型位移分布图



(a) 第一种方案 (b) 第二种方案
图 9 第二级荷载组合下模型位移分布图



(a) 第一种方案 (b) 第二种方案
图 10 第三级荷载组合下模型位移分布图
4.3 结果分析

根据 Midas Civil 软件的计算结果, 两方案模型在各级荷载组合(工况)下的材料最大应力和模型最大变形情况分别见表 4 和表 5。

表 4 应力计算结果对比

方案比较 最大拉应力 (MPa)		方案一		方案二	
		最大压应力 (MPa)	最大拉应力 (MPa)	最大压应力 (MPa)	
竹材应力	工况一	38.5	26.7	17.4	28.7
	工况二	39.0	26.5	21.5	25.4
	工况三	39.1	28.2	21.5	25.4
防水膜应力	工况一	1.35	---	0.93	---
	工况二	1.40	---	0.93	---
	工况三	1.63	---	0.93	---

表 5 变形计算结果对比

方案比较		方案一 (mm)	方案二 (mm)
最大变形	工况一	28.7	10.7
	工况二	40.3	9.7
	工况三	67.7	9.7

从应力计算结果来看: 两种设计方案均能满足竞赛规定的全部三级荷载下的强度要求; 可按乌篷船模型以最大压应力不超过竹材抗压强度为控制条件, 在保证强度条件的情况下将材料的利用率发挥到最大。

从变形计算结果看: 在各级工况下, 方案二显著优于方案一。其原因是结构由空心箱型杆件组成, 其抗扭刚度、材料利用率和结构稳定性均能大幅提高; 同时船底防水膜在水的浮力作用下能与杆件一起有效承担砝码重量、减小船体变形。

在模型制作和工作性能方面: 第一种方案杆件数量多, 节点连接较复杂, 制作工作量总体而言较大, 而且采用上下两层结构, 其稳定性不够好。第二种方案相比第一种方案在结构形式、重量、稳定性、抗撞击性方面具有明显的优势, 难点在于单个构件制作的精细度。斜撑、横梁等构件数量的增加能有效增强结构整体稳定性和刚度但需控制数量以减轻重量。

经综合对比分析和模型制作、加载试验以及模型重量比较, 最终选定第二种方案参赛。

5 结论

本文按照第十八届全国大学生结构设计竞赛要求, 通过对两种乌篷船结构设计方案的对比分析研究, 最终确定了一种既能高承载、重量轻又有良好的稳定性和抗撞击性的乌篷船结构作为参赛方案。该方案通过合理的结构布局和构件选择, 实现了乌篷船结构的高

性能化和轻量化。该研究成果为本次乌篷船结构设计的参赛团队提供了理论依据和实践指导, 也为后续结构设计竞赛提供参考和借鉴。

参考文献

[1] 第十八届全国大学生结构设计竞赛组委会. “建行杯”第十八届全国大学生结构设计竞赛赛题与规则[Z].2025.

[2] 王永宝, 张留鹏, 王健, 等. 大学生结构设计竞赛受压空心杆力学性能试验研究. 高等建筑教育, 2021, 30(4): 148-157. DOI: 10.11835/j.issn.1005-2909.2021.04.020.

[3] 宋晓冰, 吴晓昂, 闫斌, 等. 大学生结构设计竞赛方案设计原则及案例分析[J]. 力学与实践, 2020, 42(3): 388-393. DOI: 10.6052/1000-0879-19-237

[4] Song X, Wu X, Yan B. Design principles and case analysis of College Students' Structural Design Competition[J]. Mechanics in Engineering, 2020, 42(3): 388-393.

[5] Wang Y, Qin P, Wang J, et al. Experimental study on mechanical properties of basic rods for structure design contest for college students[J]. Journal of Guangdong Communication Polytechnic, 2021, 20(1): 76-80.

课题: 湖北省大学生创新训练计划项目——基于大学生结构设计竞赛的乌篷船结构与制作 (S202511072077)