

22m 组合式拖船拖桩及连接装置强度计算

赵铁军，陈斌波，曹仁丹
(江苏现代造船技术有限公司，江苏镇江 212003)

摘 要：通过有限元软件对某内河组合式拖船进行了整船有限元计算分析。在计算过程中，对连接装置及拖桩处的结构模型进行了简化，并通过有限元计算与理论计算进行对比。结果表明：模型简化合理，为其他类似船舶结构强度计算提供方法参考。

关键词：组合式拖船；拖桩；连接装置；有限元分析

中图分类号：U661.43 **文献标识码：**A

0 引言

根据工程需求，有些船舶需要较长距离运输或者在航道无法通航的水域进行使用，这就导致了组合式船舶的产生。组合式船舶的特点就是采用可拆卸的连接装置代替传统的焊接形式，目前市场上出现的组合式船舶一般是趸船或者工程船。

组装式船舶的强度计算难点在于连接装置的强度计算，规范中仅给出了设有主浮箱和在其两侧对称布置的边浮箱组成的船舶的连接装置强度计算公式，而对超规范的连接形式，规范中并没有连接装置的设计依据，因此如何合理的设计及校核连接装置是组合式船舶设计的一个重要问题。22m 组合式拖船是将拖桩设置在两个浮箱之间，采用法兰与两个浮箱进行连接，因此拖桩处的连接强度校核也是本船设计的关键。本文采用有限元计算分析，对组合式拖船直接计算中模型的简化处理及计算载荷的确定等内容进行研究，得到其拖桩及连接装置强度计算的合理可行的计算方法，下面以 22m 内河组合式拖船为例进行阐述。

1 船舶概况

本船为作业于内河 A 级航区的组合式拖船，由左右 2 个浮箱组成，船舶中后部设置两个机舱，双机、双桨、双舵的中尾机型拖船，主要用于组合式起重船的拖曳工作。浮箱及组合船的主要参数见表 1。

表 1 浮箱及组合船的主要尺度 m

项目名称	船长	船宽	型深	吃水
浮箱左	22.00	4.00	2.75	1.50
浮箱右	22.00	4.00	2.75	1.50
组合船	22.00	8.10	2.75	1.50

22m 组合式拖船布置情况见图 1。

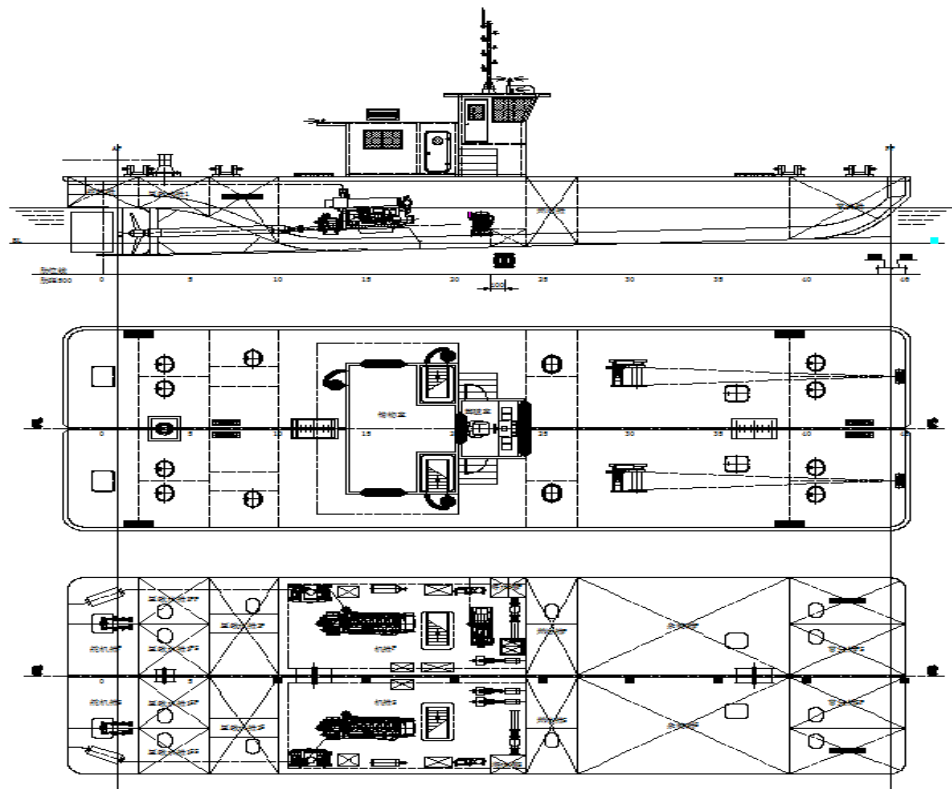


图 1 22m 组合式拖船总布置图

2 连接装置

本船左、右浮箱采用 2 个连接器进行连接，连接器的上端采用螺栓组连接，下端采用销轴连接，每个螺栓组由 6 个 M48mm×200 mm （GB/T1228-2008）高强度螺栓组成。连接器示意图见图 2。

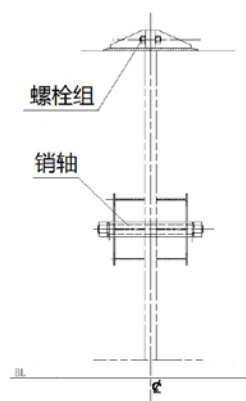


图 2 连接器示意图

拖桩与左、右浮箱采用法兰连接，法兰盘厚度均为 30mm，法兰盘之间通过 16 个螺栓进行连接，螺栓选用 M30 mm×160 mm （GB/T1228-2008）高强度螺栓，拖桩所在肋位的浮箱下端采用销轴连接，如图 3 和图 4 所示。

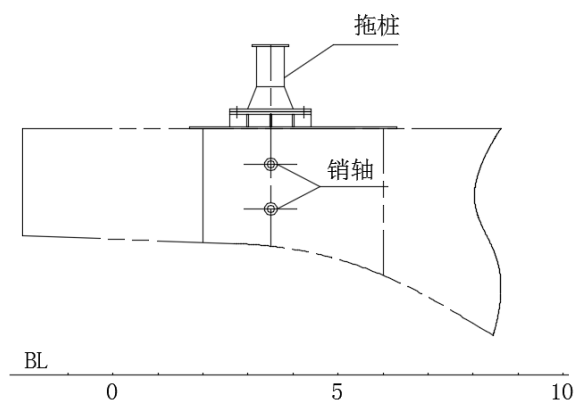


图 3 拖桩侧视图

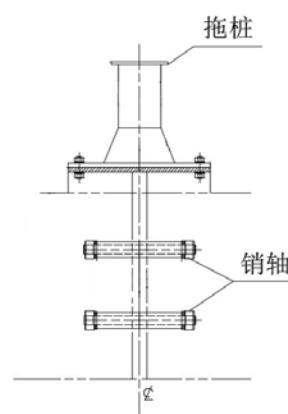


图 4 拖桩剖视图

3 有限元计算

本文采用 MSC.Patran/Nastran 软件进行建模计算，由于上层建筑部分对船体结构强度影响较小，本船模型的范围：包括左右浮箱、浮箱间螺栓连接、销轴连接及拖桩法兰连接等。有限元模型的单元类型：主要构件腹板采用板单元模拟，主要构件面板及其他骨材用梁单元模拟^[1]。销轴和螺栓采用梁单元 Beam 模拟，全船有限元模型如图 5 所示。

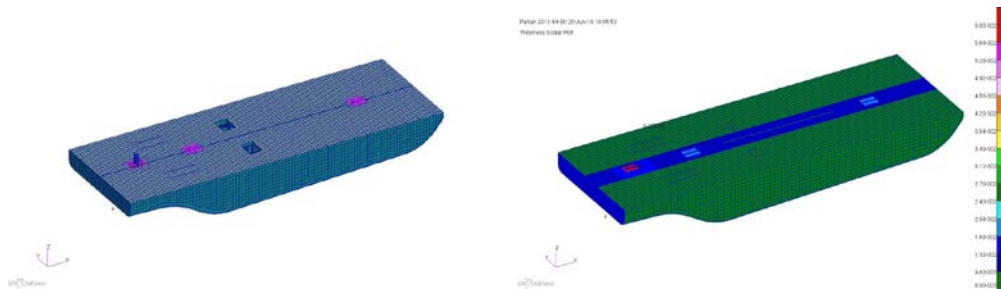


图 5 全船有限元模型

3.1 连接装置及拖桩简化方法

连接装置螺栓组的简化，建模时，将基座简化为对应 2 个 MPC-RBE2（多点约束），螺栓采用梁单元 Beam 模拟，其能承受拉伸、剪切、扭转，通过参数设置，使梁单元与螺栓几何属性一致。螺栓组简化模型见图 6，销轴模型简见图 7。

拖桩及法兰盘的简化，拖桩采用梁单元 Beam 模拟，拖桩下端部与法兰盘采用 MPC 关联。法兰盘采用板单元模拟，两块法兰之间由很多螺栓连接，固定螺栓的结合件之间不能相互活动，可以将两块法兰简化为刚性连接。模型见图 8。

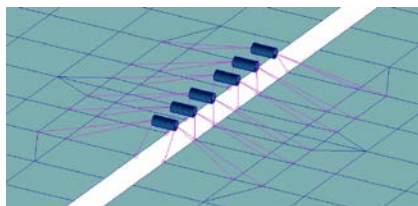


图 6 螺栓组模型简化

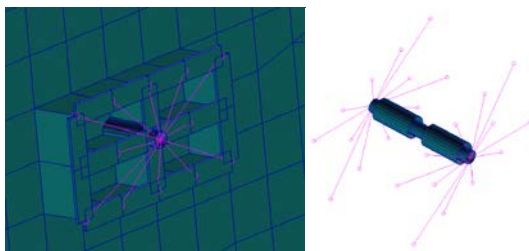


图 7 销轴模型简化

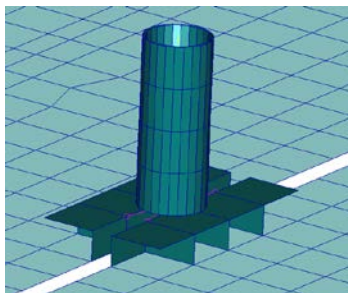


图 8 拖桩模型简化

3.2 边界条件

在船首节点施加纵向、横向、垂向线位移约束；艏封板右舷节点施加垂向线位移约束；艏封板左舷节点施加横向、垂向线位移约束。边界条件见图 9。

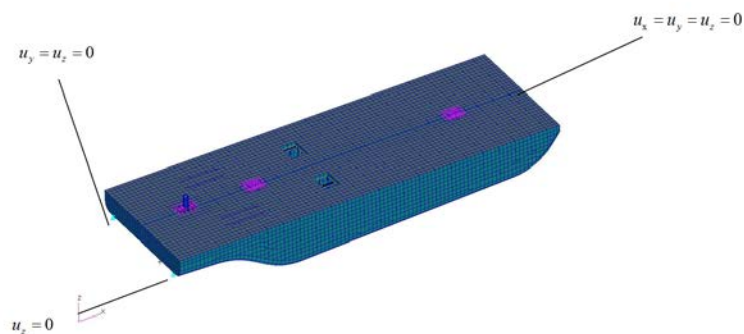


图 9 边界条件图 ($u_x u_y u_z$ 中文含义是什么)

3.3 工况及载荷施加

3.3.1 计算工况

本船工况的选取主要根据作业时实际拖缆角度下不同受力的情况，可将计算工况分为以下 8 种工况，见表 2。

表 2 计算工况

序号	工况名称	载荷情况
LC01	0030 作业	中垂波面
LC02	3030 作业	中垂波面
LC03	6030 作业	中垂波面
LC04	9030 作业	中垂波面
LC05	0030 作业	中拱波面
LC06	3030 作业	中拱波面
LC07	6030 作业	中拱波面
LC08	9030 作业	中拱波面
注： 0030—指拖力与船体中心线重合，与基线面角度 30° 3030—指拖力与船体中心线角度 30° ，与基线面角度 30° 6030—指拖力与船体中心线角度 60° ，与基线面角度 30° 9030—指拖力与船体中心线角度 90° ，与基线面角度 30°		

3.3.2 载荷施加

(1) 舷外水压：根据计算工况处于平衡状态时的设计波波面（包括中拱波面和中垂波面），按压力分布施加到模型的湿表面各单元上。等效设计波取余弦波。波长等于船长，波高 h_e 等于按下式计算所得之值：

$$h_e = \alpha_M K_{Cw} K_w (C_b + 0.7)$$

$$K_w = (192.9 \frac{L}{D} - 5.332 \frac{L}{D} B - 33.09L + 12650.6) \times 10^{-4};$$

$$K_{Cw} = 8.134 - 13.23C_w + 5.887C_w^2;$$

式中： h_e 为波高，m； C_w 为满载水线面系数， $C_w=0.979$ ； L 为船长， $L=22m$ ；

B 为船宽， $B=8.1m$ ； D 为型深， $D=2.75m$ ； α_M 为航区修正系数， $\alpha_M=1$ 。

(这里描述不够清楚，求得波面函数的作用是什么，先有波面函数，再有艏艉吃水)根据稳性计算书中的艏艉吃水数据可得各工况的波面函数见表 3。

表 3 各工况波面函数

工况	波面函数
LC01、LC02、 LC03、LC04	$\max(0,9810*(0.785*\cos r(0.285*('x-0.4)))+2.068+(0.929-2.068)/22*('x-0.4)-'z))$
LC05、LC06、 LC07、LC08	$\max(0,9810*(-0.785*\cos r(0.285*('x-0.4)))+2.068+(0.929-2.068)/22*('x-0.4)-'z))$
式中： x 为计算点沿船长方向坐标，m； z 为计算点沿型深方向坐标，m	

（2）货物载荷：压载水重量使用压力场施加到舱室相应单元上。拖力施在拖桩顶端，拖力与基线夹角为 30°，由船尾正后方按 30° 旋转至左舷方向进行施加，拖力大小参照《钢质内河船舶建造规范》进行计算，

$$F = 1.3 \left(B + 2d + 191 \frac{Bd}{L_s} \right) L_s V^2 \times 10^{-3}$$

式中： F 为 kN ； L_s 为被拖船水线长， $L_s=45.35m$ ； B_1 为被拖船船宽， $B_1=22.06m$ ； d 为被拖船满载吃水， $d=1.2m$ ； V 为拖带航速， $V=3.0\text{ m/s}$ 。

（3）结构重量：结构重量根据稳性计算书中的空船重量数据分布，以重力 g 的形式施加到模型上。

3.4 计算结果及分析

3.4.1 计算结果

经过计算，拖力在不同的角度情况下，横向的时候，拖桩应力最大，全船最大应力出现在 LC04 工况下，其计算结果见表 4，LC04 工况计算应力云图见图 10。

表 4 计算应力结果

构件名称	相当应力/MPa		剪切应力/MPa	
	许用	计算	许用	计算
船底板、舷侧外板及甲板	192	70.5	91	13.4
纵桁结构	192	10.2	91	9.08
横向强框架	192	15.2	91	13.6
横舱壁板	192	44.0	91	18.1
拖桩	192	37.2	91	20.7
销轴	110	33.6	50	18.7

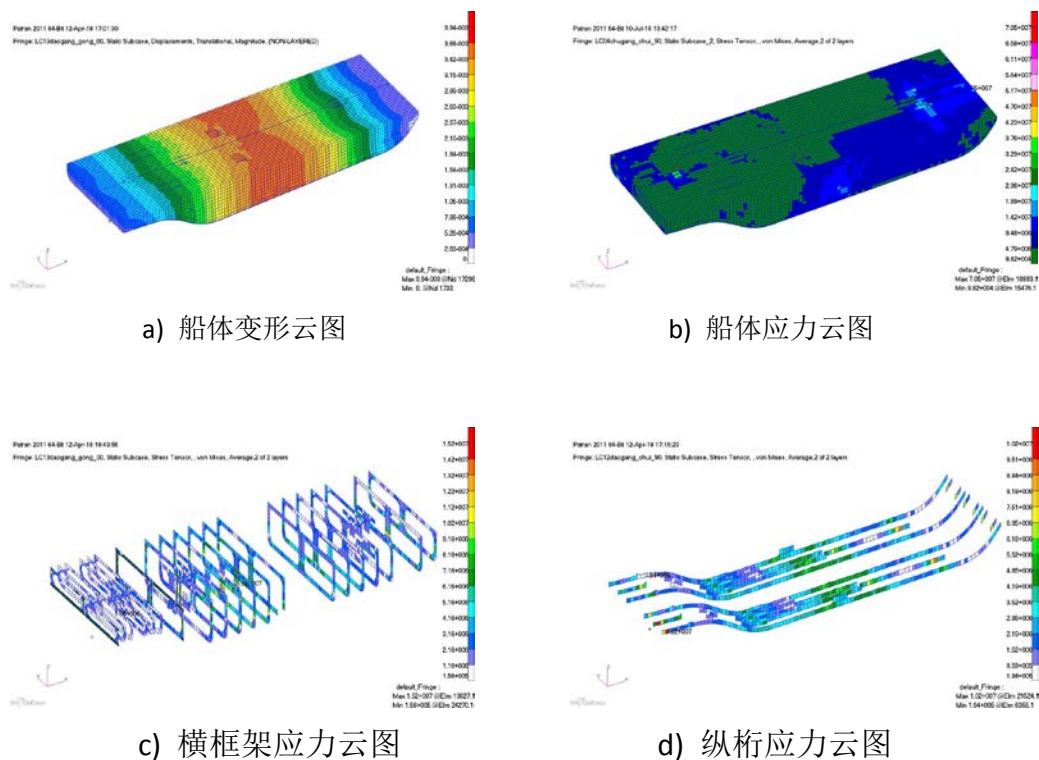


图 10 LC04 工况计算应力云图

3.4.2 计算分析

拖桩法兰螺栓的强度校核通过两种计算方法对比：一是根据《最新钢结构实用设计手册》中的理论进行计算校核拖桩处的法兰螺栓组强度；二是通过有限元

计算直接读取简化法兰模型处的剪切应力，根据法兰的面积求出法兰处受到的剪力，然后直接计算出螺栓的应力。

(1) 理论计算：作用在法兰盘上的（这里的 F 一样吗，不一样用不同的字母，100 值从哪里来的） $F = FCOS30^0 = 100 \times COS30^0 = 86.6 \text{ kN}$ 。由 16 个螺栓共同分担，因此单个螺栓的剪切应力为

$$[\tau] = \frac{F}{nA} = \frac{86600}{16 \cdot \pi \cdot 15^2} = 7.6 < 250 \text{ Mpa}。$$

有限元计算：单剖面法兰承受的最大剪力出现在 LC04 工况下，最大剪力（前面表示航速，力的单位不能用 V 表示） $V = 162.9 \text{ kN}$ 。由 16 个螺栓共同分担。因此单个螺栓的剪切应力

$$[\tau] = \frac{V}{nA} = \frac{162900}{16 \cdot \pi \cdot 15^2} = 14.4 < 250 \text{ Mpa}。$$

经过计算，理论计算的拖桩法兰螺栓的最大应力为 7.6MPa，有限元简化模型直接计算的拖桩法兰螺栓的最大应力为 14.4MPa，根据结果可得，两种计算方法的结果相近，模型简化合理。

4 结语（用 1，2，3。。作结论）

从上述计算及分析可以看出，对组合式拖船的连接装置及拖桩进行模型简化，计算结果与理论分析结果一致，通过模型简化可以大大提高建模效率，快速校核组合式结构物的强度，本模型简化方法对比较复杂的组合连接形式的强度计算提供了有益参考。

参考文献：

- [1] 中国船级社. 钢质内河船舶建造规范[S]. 北京：人民交通出版社，2016.
- [2] 张永昌. MSC NASTRAN 有限元分析理论基础与应用[M]. 北京：科学出版社，2004.
- [3] 严正庭, 晓栎, 佳隆, 王明镜, 王军, 王锡殿. 最新钢结构实用设计手册[M]. 南宁：广西科学技术出版社，2003.8.
- [4] 钟晨, 杨青, 迟少艳. 半潜船可拆卸式浮箱连接螺栓强度计算方法研究[J]. 船舶与海洋工程，2014（2）：20-23.

作者简介：

赵铁军（1986—），男，硕士，工程师，研究方向：船舶与海洋结构物设计制造。

仅供交流



江苏船舶微信公众号



江苏船舶网上投稿系统