

# 115 m 内河浮船坞结构强度研究

夏 苏

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200030)

**摘 要:**浮船坞结构强度的有限元计算对其安全至关重要。文章以 115 m 内河浮船坞为研究对象,利用直接计算法计算其横向强度,根据计算结果,提出了增加横向强度的三种措施,并利用模糊综合评判方法筛选出了最优的结构加强方案。最后,对该浮船坞进行总纵强度分析,并利用有限元仿真软件对船坞下水时的强度进行直接分析,保证下水过程中的强度。

**关键词:**浮船坞;横向强度;模糊综合评判;总纵强度;下水强度

**中图分类号:**U661.43

**文献标志码:**A

**文章编号:**1671-9891(2019)03-0060-06

## 0 引言

浮船坞是船舶修造行业的重要设施。随着船舶的大型化发展,浮船坞尺寸也越来越大,保证浮船坞的结构强度显得尤其重要。<sup>[1]</sup>为保证结果的准确性,在计算和分析浮船坞强度时必须选择一种行之有效的办法。本文根据《浮船坞入级规范》(2009)要求,采用大型商用有限元仿真软件 PATRAN 和 NASTRAN 对该特种船舶的结构进行强度分析。该方法可以显示整艘船的应力和变形,为后续施工奠定基础。

## 1 船型介绍

本船为 115 m 钢制内河浮船坞,浮船坞的主要参数及纵向布置图分别如表 1 和图 1 所示。

表 1 115 m 浮船坞船型参数

参数名称	参数符号	数 值	参数名称	参数符号	数值
船坞总长	$L_{OA}$	128.30 m	宽度最大值	$B_{max}$	39.60 m
船坞长	$L_D$	115.00 m	宽度最大值	$D_{max}$	19.30 m
坞宽	$B_D$	38.80 m	安全甲板距基线高度		11.20 m
坞深	$D_D$	14.80 m			
深沉吃水	$d_{max}$	10.00 m	龙骨墩高度		1.20 m
作业吃水	$d_D$	3.00 m	船员数	P	15
举升能力	$F_L$	7 000 t	肋骨间距	s	0.625 m
坞墙内宽		31.00 m	纵骨间距	$s_1$	0.600 m
浮箱宽度	B	37.00 m	梁拱	f	0.200 m
浮箱型深	D	4.00 m	航区		A 级

收稿日期:2019-08-31

作者简介:夏苏(1988—),男,江苏南通人,上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院硕士生。

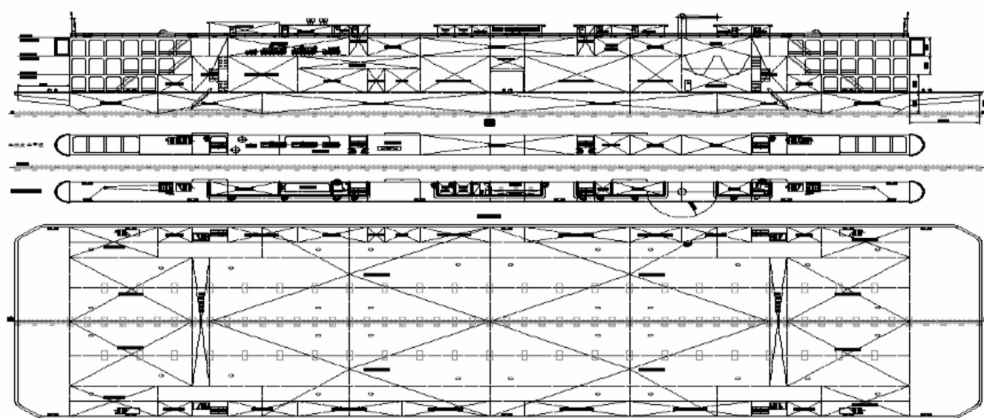


图1 115 m 浮船坞纵向布置图

## 2 浮船坞横向强度校核

### 2.1 有限元模型

建立有限元模型所选取的坐标系是通过右手原则确定的<sup>[2]</sup>,坐标系中  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向分别与船坞的纵向、横向和垂向相对应。有限元模型在纵向上取中间的全舱室和与其相邻两舱室的 1/2 舱室(#48-#112),在横向上取整个船坞宽度,在垂向上取整个船坞深度,如图 2 所示。本浮船坞的材料特性为:弹性模量  $E = 2.1 \times 10^{11}$  N/m<sup>2</sup>;泊松比  $\gamma = 0.3$ ;材料密度  $\rho = 7.85 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>。根据《浮船坞入级规范》(2009)规范“附录 1 浮船坞横向强度直接计算校核”§3.1.3.1 的规定施加边界条件<sup>[3]</sup>,浮船坞边界约束如图 3 所示。

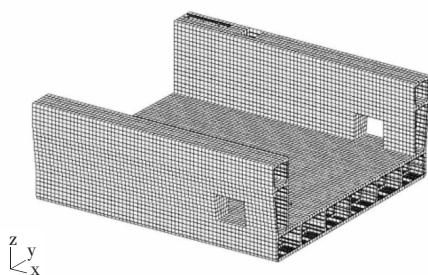


图2 有限元模型

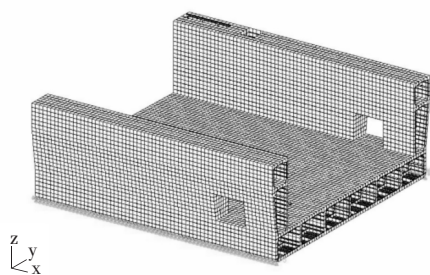


图3 浮船坞边界约束

### 2.2 载荷与工况

根据船坞在实际工作中的具体环境和状态,计算负载应不少于以下 5 种<sup>[4]</sup>:(1)浮船坞的自身重量;(2)作用于龙骨墩上的进坞船的重量;(3)船坞底部外水压力和舷外水压;(4)浮箱甲板浸入水中所产生的水压力;(5)压载水舱对于船体内板的水压力。

根据船坞的实际工作状态,在进行计算时,主要选择以下 3 种工况。工况 1 浮船坞正常工作时。这种工况是浮船坞在不装载任何压载的情况下,船中位置放置进坞船,浮船坞在船体中心线上承受进坞船的负荷。工况 2 龙骨墩抬升状态时(提升到龙骨墩的位置)。这种工况是甲板上的龙骨墩在考虑浮箱内部压载时刚刚离开水面时的状态。浮力对进入船坞的船舶所产生的影响尚未考虑在内。工况 3 在浮沉状态下可能发生的危险工作状态。这种工况下进入浮船坞的船舶已经有一部分船身进入水中,受到了浮力的作用,即进坞船舶脱离浮箱的反作用,此时浮船坞吃水取决于其自身的压载水保存量,浮船坞主要受内外水压两种载荷的作用。由于该浮船坞主要工作区域为内河,且通常都是处于停泊状态,在计算横向强度时,不考虑波浪的影响,这在规范中有很明显的体现。

### 2.3 计算结果分析

通过对以上 3 个工况的计算,当浮船坞处于工况 2(龙骨墩出水)时,其甲板横向梁和纵舱壁上的最大应力值与许用值十分接近;甲板板和横舱壁上的应力略微超过许用值,这一区域必须对主要结构部件进行加

强处理,增加浮船坞的横向强度,使其强度符合规范要求。工况 2 计算应力云图如图 4 至图 7 所示。

经过分析选取了三种加强措施:

加强措施 A 改变甲板厚度,调整位于船中宽度 5.5 m 范围内甲板的厚度,由 9 mm 加厚至 11 mm。同时,连接横舱壁的甲板厚度由 9 mm 加厚至 13 mm。

加强措施 B 改变舱壁厚度,调整位于船中宽度 5 m 范围内的横舱壁厚度,由 7 mm 加厚至 11 mm,中间纵舱壁的厚度由 7 mm 加厚至 9.5 mm。加强措施

加强措施 C 增加对角支撑,在船中左右 2.5 m 处增加两道纵向支撑,纵向支撑的尺寸为  $L75 \times 75 \times 7$ 。

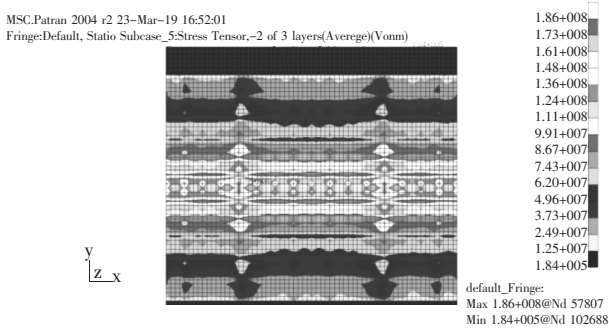


图 4 浮船坞甲板应力云图

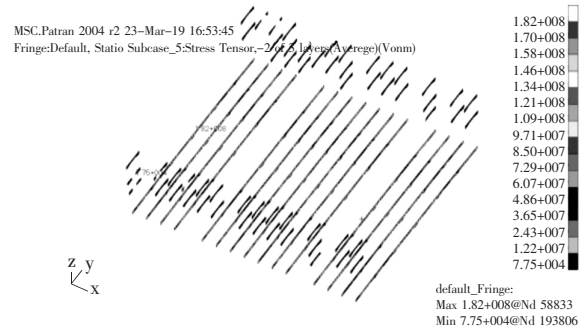


图 5 浮船坞甲板横梁应力云图

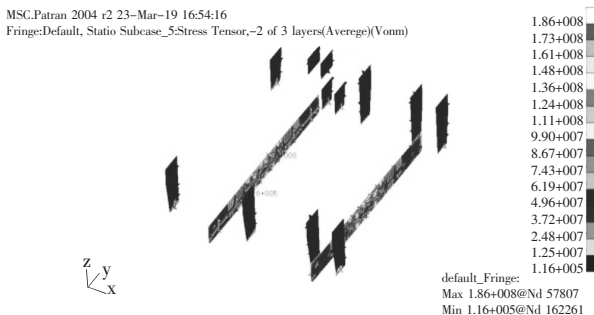


图 6 浮船坞横舱壁板架应力云图

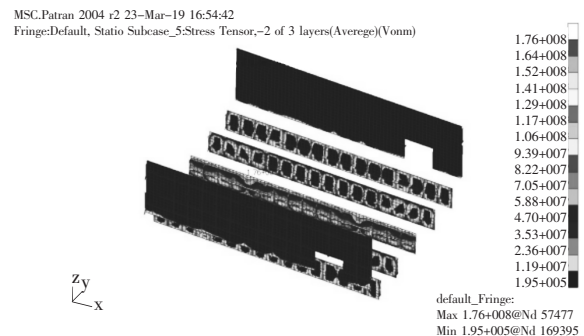


图 7 浮船坞纵舱壁板架应力云图

## 2.4 模糊综合评判

针对上述 115 m 浮船坞的三种结构加强措施进行模糊综合评价:

(1)因素权重集。经过计算  $U$  的因素权重集  $A$  为:

$$A = (0.36 \ 0.34 \ 0.30)$$

其中,结构强度 0.36、结构建造 0.34、成本控制 0.3。

$U_2$  的因素权重集  $A_2$  为:

$$A_2 = (0.37 \ 0.35 \ 0.28 \ 0.20)$$

其中,焊接要求 0.37、切割工艺 0.35、装配难易 0.28、涂装要领 0.20。

(2)确定评价对象的评语集。这三种加强措施中取一种最优的措施。其评语集  $V$  可表示为:

$$V = \{V_1, V_2, V_3\}$$

其中  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$  分别表示加强措施 A、加强措施 B 和加强措施 C。

(3)量化指标。三种加强措施的量化指标如表 2 所示。

表 2 量化指标

量化指标	加强措施 A	加强措施 B	加强措施 C
焊接要求	0.85	1	0.75
切割工艺	1.01	1.04	1.06
装配难易	0.90	0.90	1
涂装要领	1	0.95	0.85

除了上述三个因素外,还可以通过建立系数的方法来确立结构强度、成本控制和切割过程。某一因素对评估对象的精确程度很大程度上与实际计算值和参考值两者之间的比值有关。横向强度最大应力值往往用来表征结构强度的大小,切割过程可以通过切割长度和切割要求来判断,成本控制可以通过实际重量和材料计算成本来衡量,如表 3 所示。

表 3 三项因素的量化指标

评估指标	量化指标		
	计算值	参考值	满意度系数
结构强度/MPa	加强措施 A	110	1.68
	加强措施 B	101	1.83
	加强措施 C	142	1.30
成本控制/万元	加强措施 A	5.86	1.12
	加强措施 B	5.95	1.18
	加强措施 C	5.87	1.10
切割工艺要求/m	加强措施 A	86	1.07
	加强措施 B	88	1.08
	加强措施 C	90	1.06

(4)二级模糊评判。根据表 3 的量化指标,焊接要求、切割工艺、装配难易及涂装要领的评判矩阵为:

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0.85 & 1.00 & 0.75 \\ 1.01 & 1.04 & 1.06 \\ 0.90 & 0.90 & 1.00 \\ 1.00 & 0.95 & 0.85 \end{bmatrix}$$

由此可得  $U_2$  结构建造模糊评判集为:

$$B_2 = A_2 \times R_2 = (0.37 \quad 0.35 \quad 0.28 \quad 0.20) \begin{bmatrix} 0.85 & 1.00 & 0.75 \\ 1.01 & 1.04 & 1.06 \\ 0.90 & 0.90 & 1.00 \\ 1.00 & 0.95 & 0.85 \end{bmatrix} = (1.12 \quad 1.18 \quad 1.10)$$

(5)一级模糊评判。采用上述方法,可得到  $U$  的模糊评判:

$$B = A \times R = (0.36 \quad 0.34 \quad 0.30) \begin{bmatrix} 1.68 & 1.83 & 1.30 \\ 1.12 & 1.18 & 1.10 \\ 1.07 & 1.08 & 1.06 \end{bmatrix} = (1.31 \quad 1.38 \quad 1.16)$$

利用模糊综合评价法对三种加强措施进行评价,通过计算确定加强措施 B 优于另外两种加强措施。

### 3 总纵强度分析

#### 3.1 有限元模型

总纵强度计算有限元模型如图 8 所示。

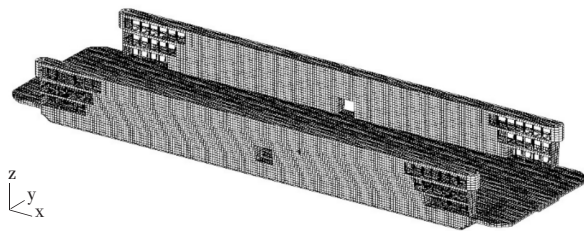


图 8 浮船坞有限元模型

### 3.2 载荷及工况

根据船坞的实际工作状态,在进行计算时,选择正常工作状态作为计算工况。载荷包括永久载荷浮船坞自重、可变载荷进坞船的重量,为方便载荷的添加,将进坞船的重量假定全部作用于龙骨上。浮船坞浮箱还需要承受排水时增大的外部水压力、浮箱甲板承受的水压力以及波浪载荷。

### 3.3 计算结果分析

计算应力云图如图 9 所示:

(1)甲板上出现了较大应力,主要原因是工作状态下的重力和浮力等载荷对浮船坞的影响。最大应力值为 186 MPa,小于许用值 215 MPa,但余量不大;

(2)内部骨架的最大应力主要出现在坞墙的两端,并且发生应力集中的可能性较高;

(3)由于舷外水压力较小,且不受船舶进坞的影响,舷侧应力值较小,且应力计算值可以保证拖航的安全状态,因此对于本浮船坞纵向强度而言,拖航条件相较于其他工况影响较小。

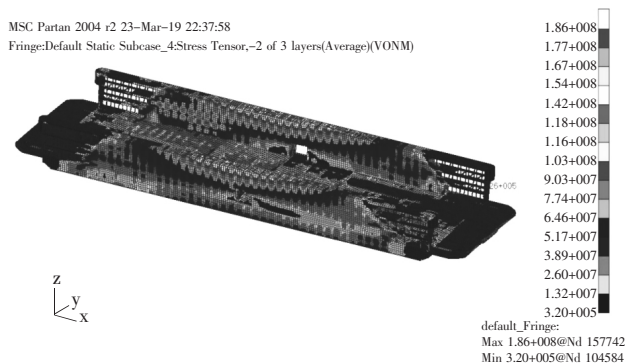


图 9 总纵强度整船应力云图

## 4 下水强度分析

波浪无法在船舶在下水过程中影响其总纵强度,并且与水接触区域的面积很小。然而,由于船体局部的负荷和水压力载荷的作用,它将对总纵强度产生一定的影响。本船采用纵向下水,有限元模型如图 10 所示。下水过程中的载荷主要包括:自身的重力、端部浮力和前支架的反作用力。根据利用的重力加速度和密度保证结构自重,浮船坞末端的浮力取决于从前部计算的船尾浮动运动的距离,前支架的反作用力根据图 11 确定。

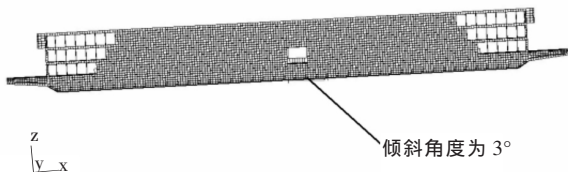


图 10 浮船坞下水有限元模型(倾斜角度为 3°)

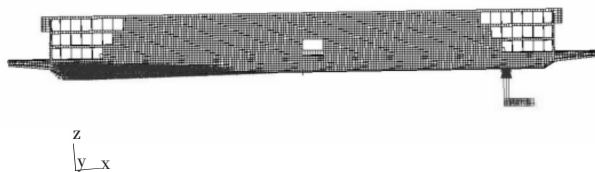


图 11 浮船坞下水载荷施加

下水过程总纵强度计算应力云图如图 12 所示,由此可以得到如下的结论:

(1)水压力为船舶尾部与水接触的区域受到的主要载荷。同时浮力也会影响局部区域,并且使得船体产生向上的弯曲变形。



(2)支撑前支架位置处的应力云图颜色最亮,表明浮动支架局部的应力很大。该位置是下水的第二阶段应力最严重的地区,需考虑采取强化措施,如增加支架宽度、调整支架位置等。

(3)船舶末端平台上的上下水压力相互平衡且抵消,平台上受到的压力载荷较小。

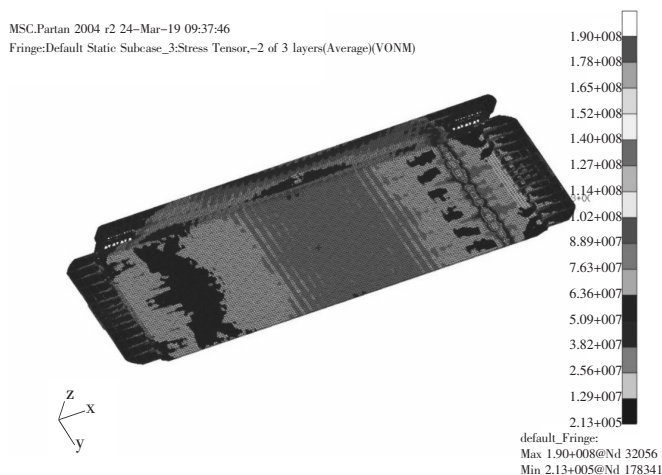


图12 整船应力云图

## 5 结束语

本文建立了115 m内河浮船坞有限元模型,根据《浮船坞入级规范》(2009)关于浮船坞的相关规定,利用直接计算法验证各个主要构件的横向强度,根据计算结果提出三种加强措施,并利用模糊综合评判方法选取最优的结构加强措施,对浮船坞进行总纵强度分析,并利用有限元仿真软件对船坞下水时的强度进行了直接分析,保证了下水过程中的安全。

## 参考文献:

- [1]姜磊,陈攀,李坤.119 m 浮船坞结构强度计算分析[J].船海工程,2015(5):5-7.
- [2]张朝晖.ANSYS11.0 结构分析工程应用实例解析[M].第2版.北京:机械工业出版社,2008.
- [3]中国船级社.浮船坞入级规范[M].北京:人民交通出版社,2009.
- [4]赵振宇.浮船坞结构强度直接计算方法对比研究[D].大连:大连海事大学,2011.

(责任编辑 张 利)

# Study on Structural Strength of 115 m Inland River Floating Dock

XIA Su

(School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** The finite element calculation of structural strength for a floating dock is critical to its safety. In this article, a 115 m inland river floating dock is taken as the research object, and the horizontal strength is calculated by direct calculation method. According to the calculation, three measures to enhance its lateral strength are proposed, and the optimal structural strengthening scheme is selected by fuzzy comprehensive evaluation method. Finally the total longitudinal strength analysis of the floating dock is carried out, and the strength of the dock when launching into water is directly analyzed by a finite element simulation software to ensure its strength in the launching process.

**Key words:** floating dock; lateral strength; fuzzy comprehensive evaluation; total longitudinal strength; launching strength