

# 整体和局部载荷下 双体客船整船立柱结构强度分析

袁友华<sup>1,2</sup>, 罗广恩<sup>1</sup>, 葛琨玮<sup>3</sup>, 刘 沙<sup>4</sup>

(1. 江苏科技大学 船舶与海洋工程学院, 江苏 镇江 212100; 2. 江苏绿科船舶科技有限公司 技术部, 江苏 南通 226000;  
3. 江苏航运职业技术学院 船舶与海洋工程学院, 江苏 南通 226010;  
4. 招商局邮轮制造有限公司 技术中心, 江苏 南通 226100)

**摘 要:**客船因其结构的特殊性,拥有数量庞大的立柱,且存在上下非对齐立柱,目前规范中没有针对客船立柱的强度评估指南。以一双体客船的整船立柱为研究对象,利用有限元方法,开展整船载荷下和局部载荷下的立柱强度计算,充分对比两种计算下立柱的屈服和屈曲强度。结果表明:对于双体客船,影响立柱结构强度的主导因素是局部载荷,非对齐立柱会导致横梁和纵桁应力集中,设计中需重点关注。

**关键词:**立柱;双体客船;整船载荷;局部载荷;结构强度

**中图分类号:**U661.42

**文献标志码:**A

**文章编号:**2097-0358(2023)4-0040-08

## 0 引言

游船是客船的一种,拥有各种大空间娱乐性场所,需布置较多立柱,以支撑船体结构。立柱是船体横向强框架和甲板纵桁的重要支撑点,能有效传递上层甲板的载荷,确保结构间相互支持,<sup>[1]83</sup>是客船最主要的支撑构件之一,因此客船立柱的载荷计算和强度评估非常关键。

双体船的载荷较复杂,其立柱所承载荷成分也比较复杂,因此,研究立柱所受的主导载荷对立柱的结构设计和强度评估十分重要。田雷通过对双体船大跨度甲板室的直接结构设计与规范设计进行对比,得出两种结构形式的优缺点,并分析了设计时应注意的地方。<sup>[2]</sup>张俊针对中国船级社(简称“CCS”)《钢质海船入级规范》(以下简称《钢规》)中关于支柱载荷的规定进行了探讨,将法国船级社和挪威船级社关于支柱载荷的规定和 CCS 规范进行对比,并基于一个实际项目的支柱设计,进行计算对比,结果表明,CCS 规范中关于支柱载荷的规定不适用于深舱甲板,在支柱设计时应予以注意。<sup>[1]83-85</sup>张润宏提出可利用有限元来计算和校核船舶设计中各种形式支柱的强度,采用两种方式计算了某船舱段中支柱的受力情况,比较两种方式的计算结果,总结了支柱设计的计算方法。<sup>[3]</sup>甘进等指出,为满足大型豪华邮轮大跨度空间舱室内特定区域的空间布置需求,需设置大量上下偏心连接支柱,运用非线性有限元方法,分析了圆钢-H 型钢、圆钢-方钢、圆钢-圆钢三种典型偏心组合支柱结构的极限承载能力。<sup>[4]</sup>曾骥等在某极地邮轮甲板艙部舱室单元进舱的研究中发现,临时设置的开孔和立柱拆除会出现强度和变形问题,在舱室单元进舱时需逐步去除影响进舱的立柱,表明了立柱对甲板支撑的重要性。<sup>[5]</sup>

从以上研究可看出,目前学界对于客船立柱支撑空间结构尤其是大跨度结构有一定的研究,但对于立柱本身的结构强度分析、立柱载荷的分析、立柱连接节点设计等方面的研究较少。然而,这些方面对实际船舶工程设计有较强的指导性意义,因此,本文从整船载荷和局部载荷的角度,专门针对整船立柱开展强度分析研究,总结双体客船立柱受到的主导载荷、受力特点以及设计注意事项,为后续客船的立柱设计和强度评估提供参考。

收稿日期:2023-07-18

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52171312)

作者简介:袁友华(1987—),男,江苏泰州人,江苏绿科船舶科技有限公司技术部工程师,江苏科技大学船舶与海洋工程学院硕士生。

## 1 目标客船立柱布置

目标客船为一艘双层底、单舷侧双体观光游览船,整船为横骨架式结构,共设4层甲板,为进行轻量化设计,保证稳性高度,上建1甲板以下(包括1甲板)为钢质结构,1甲板以上为铝合金结构。主尺度如表1所示。

表1 船舶主尺度

主尺度	数值
总长/m	71.88
片体宽度/m	6.43
连接桥宽度/m	5.87
型深/m	5.20
船宽/m	18.72
设计吃水/m	2.55
排水量/t	1 360

整船共有74根立柱,分别位于主船体结构和上层建筑区域内,从艏部到艉部相对均匀地分布,如图1所示。

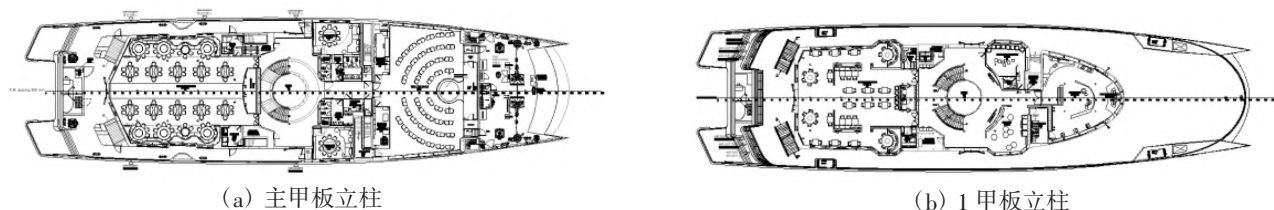


图1 立柱布置示意图

## 2 整船载荷下的立柱强度计算

### 2.1 有限元模型

笔者利用 Femap with NX-Nastran 软件建立整船有限元模型,外板、内底板、各层甲板、连接桥等主要支撑构件采用板单元模拟,横梁、纵骨、立柱等结构采用梁单元模拟,有限元模型如图2所示。目标客船有钢和铝合金两种材料,建模时材料属性需要进行分项设置,钢的杨氏模量为  $2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ ,泊松比为 0.3,密度为  $7.85 \times 10^{-9} \text{ t/mm}^3$ ;铝合金的杨氏模量为  $7.0 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ ,泊松比为 0.3,密度为  $2.7 \times 10^{-9} \text{ t/mm}^3$ 。

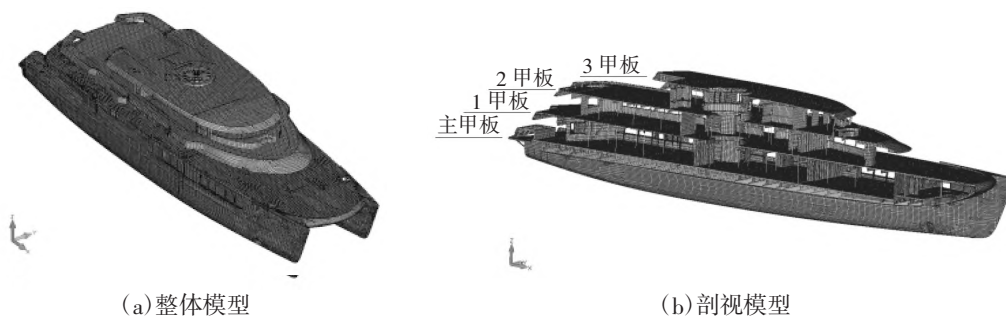


图2 有限元模型

### 2.2 载荷计算

根据 CCS《钢规》第2篇第18章的要求<sup>[6]543</sup>,双体客船受到的整船载荷由静水弯矩、波浪弯矩、总横弯矩、总横扭矩等几部分组成。

(1) 静水弯矩。静水弯矩  $M_{bys}$  根据整船的配载计算得到,如表2所示。

(2) 波浪弯矩。根据《钢规》要求,双体船片体各横剖面的中拱波浪弯矩  $M_w(+)$  和中垂波浪弯矩  $M_w(-)$  应按下列公式计算:

$$M_w(+)=+190MCL^2BC_b \times 10^{-3} \quad \text{kN} \cdot \text{m} \quad (1)$$

表 2 静水弯矩值

位置 $X/\text{m}$	$M_{\text{bys}}/(\text{kN}\cdot\text{m})$
0	50
10	4 500
27.5	26 000
39.5	26 000
60	2 000
69	0

$$M_w(-) = -110MCL^2B(C_b + 0.7) \times 10^{-3} \quad \text{kN}\cdot\text{m} \quad (2)$$

式中,  $M$  为弯矩分布系数;  $L$  为船长,  $\text{m}$ ;  $B$  为船宽,  $\text{m}$ ;  $C_b$  为方形系数, 计算取值不应小于 0.6;  $C$  为波浪系数, 当  $L < 90 \text{ m}$  时,  $C = 0.041 2L + 4$ 。

计算中需要关注船舶的航区折减影响, 根据《钢规》, 目标船航行区域为 2 类航区, 波浪弯矩可以折减 15%。根据公式(1)和(2), 考虑折减, 最终计算得到片体的中拱波浪弯矩  $M_w(+)=18\,705 \text{ kN}\cdot\text{m}$ , 中垂波浪弯矩  $M_w(-)=-23\,464 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。

(3) 总纵弯矩。总纵弯矩  $M_{\text{by}}$  为静水弯矩  $M_{\text{bys}}$  与波浪弯矩  $M_w$  的叠加值, 由于该船是双体船, 波浪弯矩取片体波浪弯矩的 2 倍, 这也是与单体船型的最大区别。计算得到: 中拱状态下总纵弯矩  $M_{\text{by(中拱)}} = M_{\text{bys(max)}} + 2M_w(+)=63\,410 \text{ kN}\cdot\text{m}$ , 中垂状态下总纵弯矩  $M_{\text{by(中垂)}} = M_{\text{bys(max)}} + 2M_w(-)=-20\,928 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。

(4) 总横弯矩。相对于单体船, 双体船由于宽度较大, 船舶的左右片体相对横摇会产生较大的横向弯矩, 因此, 需考虑这一载荷的影响。根据《钢规》, 双体船连接桥总横弯矩  $M_{\text{bx}}$  计算如下:

$$M_{\text{bx}} = 9.81C_1C_2C_3\Delta(b+b_1) \quad \text{kN}\cdot\text{m} \quad (3)$$

式中:  $b$  为片体宽度,  $\text{m}$ ;  $b_1$  为连接桥宽度,  $\text{m}$ ;  $D$  为船舶型深,  $\text{m}$ ;  $C_3$  为航区系数, 取 0.6, 双体船按 2 类航区折减;  $\Delta$  为双体船排水量,  $\text{t}$ ;  $C_1$ 、 $C_2$  为系数, 计算如下:

$$C_1 = 0.15 \left( \frac{b}{D} \right)^2 - 0.778 \frac{b}{D} + 0.866 \quad (4)$$

$$C_2 = -2.386 \frac{b_1}{B} + 1.937 \quad (5)$$

计算得到总横弯矩  $M_{\text{bx}} = 15\,606 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。

(5) 总横扭矩。相对于单体船, 双体船的左右片体相对纵摇会产生较大的总横扭矩  $M_{\text{ty}}$ , 计算时需考虑这一载荷的影响。根据《钢规》, 总横扭矩按如下公式计算:

$$M_{\text{ty}} = 1.226C_3\Delta L \quad (6)$$

计算得到总横扭矩:  $M_{\text{ty}} = \pm 66\,728 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。

### 2.3 工况组合

将以上载荷分别加载到模型上, 并根据《钢规》要求, 进行载荷组合, 此外, 由于双体船结构并非严格意义上的左右对称, 因此叠加中同时应考虑扭转工况的正负方向, 工况组合共计 20 种, 如表 3 所示。

### 2.4 边界条件

边界条件的施加以及模型边界约束位置示意分别如表 4 和图 3 所示。需注意, 支点 A、B、C 组合用于分析弯曲工况, A、B、C' 组合用于分析扭转工况, 其中点 C' 的  $z$  向位置位于连接桥底板外板与中纵剖面的交点处; 需注意纵向弯曲工况时, 若  $z$  向力系不平衡, 则可引起支点 A、B 处的附加支座反力, 此时应忽略 A、B 位置处的结果, 该工况仅用于考察船中区域。

### 2.5 屈服计算衡准

出于对立柱结构重要性的考虑, 参考《钢规》对于强横梁等直接计算的要求, 许用应力衡准取  $124/K$ , 其中  $K$  是材料系数。目标客船是钢铝混合船, 对于钢质材料 AH36, 材料系数取 0.72, 所以许用应力值取为  $124/0.72 = 172 \text{ MPa}$ 。对于铝合金材质, 材料系数  $K_a$  公式如下:

表 3 工况组合

序号	工况代号	工况组合
1	LC-10	$M_{bx}$ (向内)
2	LC-20	$M_{bx}$ (向外)
3	LC-31	$0.8 M_{bx}$ (向内)+ $0.6 M_{by}$
4	LC-32	$0.8 M_{bx}$ (向内)+ $0.6 M_{by}$ -
5	LC-41	$0.8 M_{bx}$ (向外)+ $0.6 M_{by}$
6	LC-42	$0.8 M_{bx}$ (向外)+ $0.6 M_{by}$ -
7	LC-51	$0.6 M_{bx}$ (向内)+ $0.8 M_{by}$
8	LC-52	$0.6 M_{bx}$ (向内)+ $0.8 M_{by}$ -
9	LC-61	$0.6 M_{bx}$ (向外)+ $0.8 M_{by}$
10	LC-62	$0.6 M_{bx}$ (向外)+ $0.8 M_{by}$ -
11	LC-70	$M_{by}$ (中拱)
12	LC-80	$M_{by}$ (中垂)
13	LC-91	$0.8 M_{by}$ (中拱)+ $0.6 M_{by}$
14	LC-92	$0.8 M_{by}$ (中拱)+ $0.6 M_{by}$ -
15	LC-101	$0.8 M_{by}$ (中垂)+ $0.6 M_{by}$
16	LC-102	$0.8 M_{by}$ (中垂)+ $0.6 M_{by}$ -
17	LC-111	$0.6 M_{by}$ (中拱)+ $0.8 M_{by}$
18	LC-112	$0.6 M_{by}$ (中拱)+ $0.8 M_{by}$ -
19	LC-121	$0.6 M_{by}$ (中垂)+ $0.8 M_{by}$
20	LC-122	$0.6 M_{by}$ (中垂)+ $0.8 M_{by}$ -

表 4 整船有限元模型边界条件

位置	线位移约束			角位移约束		
	$x$	$y$	$z$	$x$	$y$	$z$
支点 A	固定	固定	固定	—	—	—
支点 B	—	固定	固定	—	—	—
支点 C	—	—	固定	—	—	—
支点 C'	—	固定	—	—	—	—

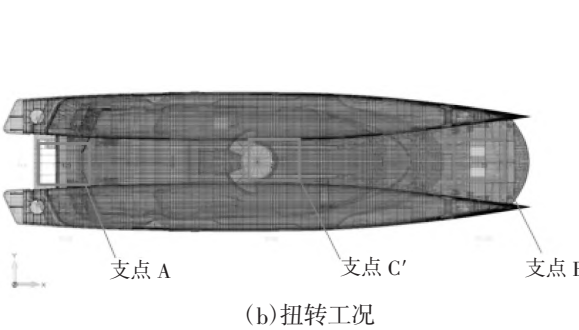
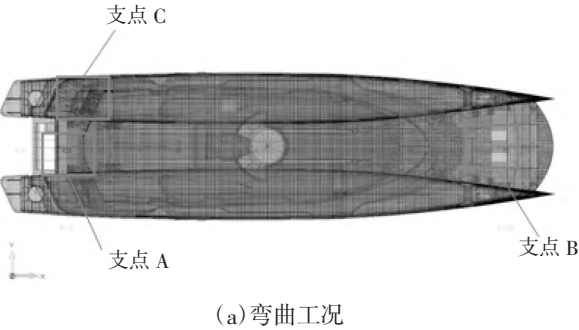


图 3 边界条件

$$K_a = 235 / R_{lim} \tag{7}$$

式中, $R_{lim}$ 表示焊接状态下母材最小可保证的屈服应力 $R_{p0.2}$ ,取不大于焊接状态下母材的最小可保证的抗拉强度 $R_m$ 的70%。分析可知:

$$R_{lim} = \min(R_{p0.2}, 0.7R_m) \tag{8}$$

对于 $R_{p0.2}$ 和 $R_m$ 的取值,根据CCS《材料与焊接规范》要求<sup>[7]94</sup>,目标客船立柱材为6082-T6,其为挤压型材



6000 系列,硅镁含量高,屈服强度是 250 MPa,金相效率  $\beta$  值可取 0.45,该型号铝合金焊接后的最小屈服应力  $R_{p0.2} = 0.45 \times 250 \text{ MPa} = 112.5 \text{ MPa}$ ,其焊接状态下的  $R_m$  取 290 MPa,则  $0.7R_m = 203 \text{ MPa}$ 。根据公式(7)和(8),材料系数  $K_u = 235/112.5 = 2.09$ ,因此,该型号铝合金材料许用应力取为  $124/2.09 = 59 \text{ MPa}$ 。

由上面计算可以看出,对于铝合金材质的衡准要求比较苛刻,需经过严格的计算来确定,因此在设计中,对于铝合金的设计使用要格外注意。

## 2.6 屈曲计算衡准

对于立柱屈曲的计算,可以采用如下公式进行临界应力计算;屈曲强度评估中,对立柱两端采用简支约束,进行临界应力校核。立柱柔度和临界柔度分别用公式(9)和(10)进行计算:

$$\lambda = \frac{\mu l}{\sqrt{I/A}} \quad (9)$$

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{\sigma_y}} \quad (10)$$

式中, $\mu$  是长度系数; $I$  是截面惯性矩, $\text{m}^4$ ;  $A$  是立柱截面积, $\text{m}^2$ ;  $l$  是立柱长度, $\text{m}$ ;  $E$  是弹性模量, $\text{N/mm}^2$ ;  $\sigma_y$  是材料屈服应力,MPa。

当  $\lambda \geq \lambda_p$  时(弹性失稳),根据欧拉公式,临界应力为:

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad (11)$$

当  $\lambda < \lambda_p$  时(非弹性失稳),临界应力为:

$$\sigma_{cr} = \sigma_y - \frac{\sigma_y^2}{4\pi^2 E} \lambda^2 \quad (12)$$

临界载荷为:

$$F_1 = \sigma_{cr} \times A \quad (13)$$

屈曲因子  $UC = F_1/F_2$ ,其中  $F_2$  为通过有限元直接计算的单根立柱最大轴向压力值,如果  $UC > 1$ ,则屈曲强度满足要求。

## 2.7 计算结果

按甲板层数统计立柱的轴向应力与屈曲计算结果如表 5 所示,由此可以看出,立柱结构在整船载荷下的轴向应力无论是受压还是受拉,其结果都比较小,满足强度要求,且应力余量较大。从屈曲结果上看,屈曲因子的余量也较大。这说明,在整船载荷下的立柱结构足够安全。

表 5 整船载荷下的应力计算结果

序号	区域	立柱材质	最大轴向应力/MPa	许用值/MPa	最小屈曲因子
1	主甲板下	钢质	-34.77	172	5.5
2	主甲板上	钢质	20.29	172	4.6
3	1 甲板上	铝合金	14.32	59	8.6
4	2 甲板上	铝合金	-11.49	59	9.2

## 3 局部载荷下的立柱强度计算

以上是关于整船载荷下立柱结构的分析,整体性载荷均是对所有波浪、重量等载荷的积分,沿着船长或船宽方向分布,并通过压力或均布力的形式施加到船体结构上。但实际上,立柱区域支撑着甲板传递的人员、结构、设备、惯性力等载荷,这些都是局部性载荷,因此有必要开展局部载荷下的立柱强度分析,以确保立柱结构充分安全。

### 3.1 有限元模型

基于前文的整船有限元模型,在每层甲板的结构模型与整船有限元模型保持一致的情况下,分别对每层甲板施加设计载荷进行强度分析。

### 3.2 载荷计算

根据《钢规》要求,甲板的设计压头  $h$  应按如下计算:主甲板取 1.2 m;1 甲板取 0.9 m;2 甲板取 0.6 m;3

甲板取 0.45 m。同时考虑到客船甲板的装载率, 装载系数取 1.39, 可计算得到各层甲板的压力为: 主甲板  $P_0 = 8.472 \text{ kPa}$ ; 1 甲板  $P_1 = 6.354 \text{ kPa}$ ; 2 甲板  $P_2 = 4.236 \text{ kPa}$ ; 3 甲板  $P_3 = 3.177 \text{ kPa}$ 。

此外, 结构本身受到重力的影响, 计算中自重取 1.0 g。各层甲板的加载示意如图 4 所示。

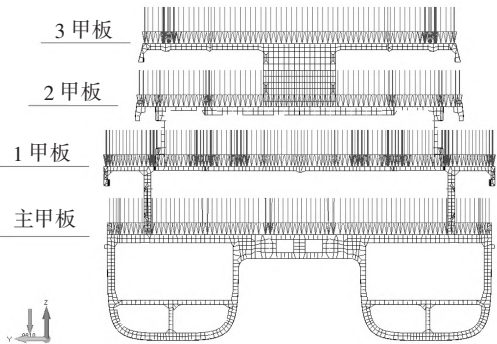


图 4 局部载荷图示

3.3 边界条件

整船立柱都集中在内底板上方, 由内底承受所有立柱载荷, 并最终传递至船体外板, 与静、动水压力平衡。为分析立柱的受力, 本文对内底板进行简支约束, 以支撑各层甲板的载荷。

3.4 计算结果

计算得到局部载荷下的立柱应力和屈曲因子如表 6 所示, 由此可以直观地看出计算结果满足强度要求, 但应力水平和屈曲系数较整船载荷的计算结果明显增大, 应力余量下降很多, 尤其是 1 甲板上的立柱, 其余量不足 10%。

表 6 局部载荷下的应力计算结果

序号	区域	立柱材质	最大轴向应力 / MPa	许用值 / MPa	最小屈曲因子
1	主甲板下	钢质	-112	172	2.5
2	主甲板上	钢质	-55.35	172	2.1
3	1 甲板上	铝合金	-56.2	59	6.2
4	2 甲板上	铝合金	-26.44	59	12.0

各层立柱的应力云图结果如图 5 所示, 最大应力出现的位置在船舶尾部餐厅这一大空间区域, 如图 6 所示, 其左右布置不对称, 左舷为一大包间餐厅, 无立柱设计, 右舷为 4 个独立小包间, 包间隔断中间均设置立柱。这一区域采用钢质材料, 立柱分布不均匀且上下不对齐, 同时发现该区域部分立柱连接的甲板横梁应力集中十分明显, 接近许用应力, 这极有可能是由于甲板上下两根立柱不对齐, 形成剪切所致的。

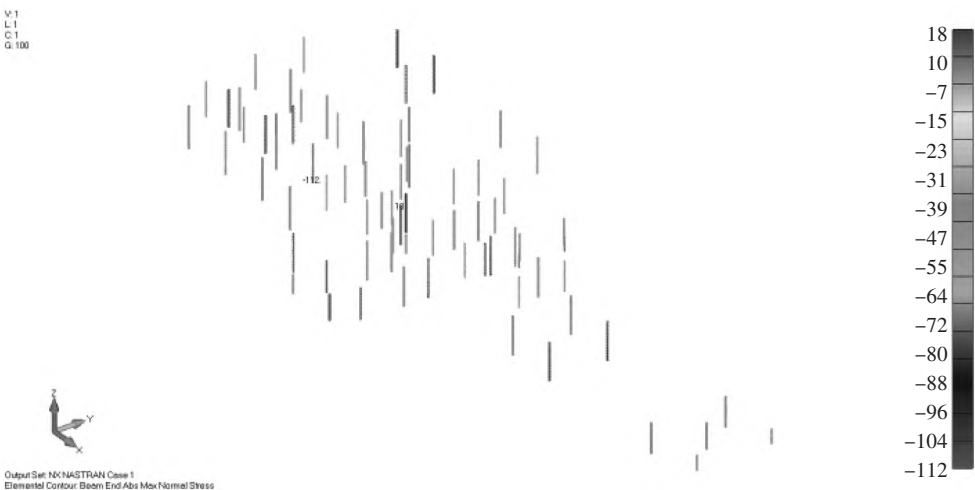


图 5 立柱应力云图

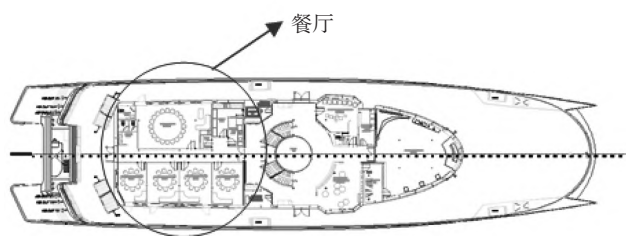


图6 最大应力所在区域

此外,铝合金材质部分应力均较小,这是因为铝合金结构在上建上方,其所受的甲板载荷较小,且铝合金本身的重量也较轻,其结构足够支撑这些载荷。

为进一步研究非对齐立柱之间甲板横梁的应力分布情况,建立细网格模型,计算所得结果如图7所示。根据《钢规》,细网格许用应力衡准取  $1.6 \times 172 = 275$  MPa。从细网格的应力结果看,应力满足强度要求,并略有余量。从应力分布看,相比粗网格,细网格的应力分布更加精细,且高应力均集中在横梁面板上面,腹板的应力在垂向越靠近面板越大,在横向离立柱越远应力就越小。其中一个明显的分布特点,就是应力的最大值并非位于横梁、纵桁交接点处的面板,而是交叉点附近的面板。

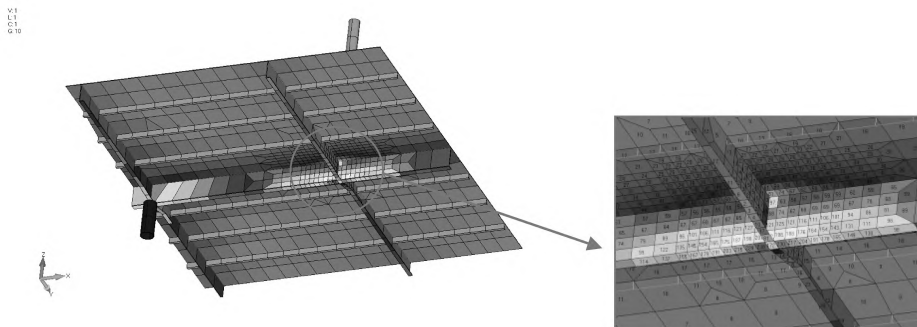


图7 非对齐立柱细网格分析

#### 4 立柱应力结果对比

选取典型的 20 根立柱在整体性载荷和局部性载荷下的应力值,对比结果如图8所示,从中可以看出,整船载荷下的应力不到局部性载荷下应力的 10%,有些甚至不到 1%。由此可以得出,决定客船立柱设计尺寸的是局部性载荷,而非整船载荷。

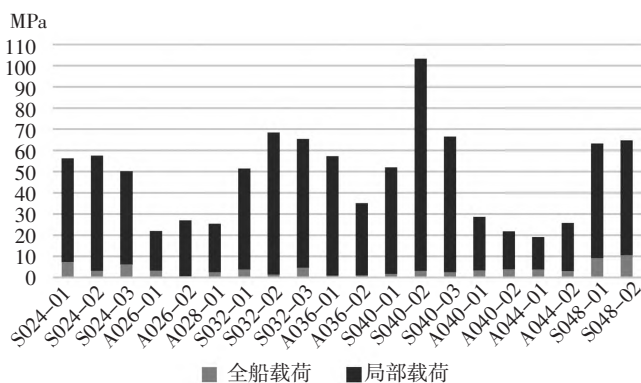


图8 应力对比图

#### 5 结论

(1)对比以上分析结果,可以发现局部载荷下的结构应力比整船载荷下的应力要大得多,说明立柱结构设计是由局部载荷决定的,如果仅按整船载荷评估立柱强度,则极有可能会错过主导工况,而导致评估结果没有意义。

(2)立柱及与其连接的支撑结构的设计,需重点关注大空间区域位置,尤其是非对齐立柱区域,与立柱连接的甲板纵桁和强横梁容易产生应力集中,一般需要进行细网格分析。

(3) 由于甲板结构的局部载荷是由顶部逐一传递到底部的, 所以越往上, 立柱、甲板等所受载荷越小, 若出于轻量化考虑, 可选用铝合金材质。

(4) 在设计中, 需考虑铝合金焊接后的退火状态, 其许用应力相比传统低碳钢小很多, 比其自身屈服应力也小很多, 因此设计时要严格控制铝合金设计区域的应力峰值。

## 6 结束语

立柱是客船结构设计的关键点之一, 因此, 基于合理载荷计算的强度分析显得尤为重要。本文基于整体和局部载荷, 对一双体客船的立柱进行了较全面的强度分析, 得出了一些工程计算的结论。在后续研究中, 将重点关注大空间布局下的立柱结构, 分析关键载荷因素, 整理出简化计算公式, 进一步提高计算效率。

## 参考文献:

- [1] 张俊, 凌芳芳. CCS 规范中支柱载荷规定解析[J]. 船舶工程, 2018(S1): 83-85.
- [2] 田雷. 大跨度无支撑甲板室的两种骨架形式比较[J]. 中国水运, 2014(3): 15-16, 20.
- [3] 张润宏, 朱良生. 支柱结构的有限元研究[J]. 科学技术与工程, 2010(17): 4333-4336.
- [4] 甘进, 叶文强, 任鹏良, 等. 大型邮轮偏心支柱结构极限承载力研究[J]. 中国造船, 2021(3): 28-39.
- [5] 葛坤玮, 曾骥, 朱红娟, 等. 极地探险邮轮舱室单元进舱方案设计与强度分析[J]. 船舶工程, 2021(11): 38-43.
- [6] 中国船级社. 钢质海船入级规范[M]. 北京: 人民交通出版社, 2021.
- [7] 中国船级社. 材料与焊接规范[M]. 北京: 人民交通出版社, 2018.

(责任编辑: 张 利)

# Structural Strength Analysis of Whole Ship Pillars of a Catamaran Passenger Ship Under Integral and Local Loads

YUAN You-hua<sup>1,2</sup>, LUO Guang-en<sup>1</sup>, GE Shen-wei<sup>3</sup>, LIU Sha<sup>4</sup>

(1. School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Jiangsu University of Science and Technology,  
Zhenjiang 212100, China;

2. Technical Department, Jiangsu Greentech Marine Engineering Company, Limited, Nantong 226000, China;

3. School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Jiangsu Shipping College, Nantong 226010, China;

4. Technology Center, China Merchants Cruise Shipbuilding Company, Limited, Nantong 226100, China)

**Abstract:** A passenger ship has a large number of pillars due to its special structure, and there are non-aligned pillars vertically. In current specifications there is no strength assessment guideline for the pillars of a passenger ship. Taking the whole ship pillars of a catamaran passenger ship as a research object, the finite element method is utilized to carry out the strength calculation of pillars under the whole ship integral load and local loads respectively, and the yield and buckling strengths of the pillars under the two kinds of calculation are fully compared, and the results show that: for a catamaran passenger ship, the dominant factor for the strength of the pillar structure is local load, and the non-aligned pillars lead to the stress concentration of the transverse beams and longitudinal girders, which need to be particularly focused in the design.

**Key words:** pillar; catamaran passenger ship; whole ship integral load; local load; structural strength