

引用格式: 王琳, 夏孟龙, 解德. V型无压载水船舱口角隅疲劳寿命计算新方法[J]. 中国舰船研究, 2016, 11(2): 39-50.
WANG Lin, XIA Menglong, XIE De. Novel Research on the hatch corner's fatigue life of a V-shape non-ballast water ship [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2016, 11(2): 39-50.

V型无压载水船舱口角隅疲劳寿命计算新方法

王琳¹, 夏孟龙², 解德³

1 文华学院 船舶与海洋工程系, 湖北 武汉 430074

2 武汉第二船舶设计研究所, 湖北 武汉 430205

3 华中科技大学 船舶与海洋工程学院, 湖北 武汉 430074

摘要: 提出一种计算V型无压载水船这种特殊船型结构疲劳寿命的新方法, 该方法不受船型、航区航线及分析部位的限制, 具有通用性。通过结合综合海洋决策支持系统(Integrated marine decision support system)提供的海浪数据, 采用Matlab编程, 得到只属于所计算船的特定的散布图和营运特性表。然后, 通过SESAM软件计算在该营运特性表下的载荷, 采用ABAQUS建模计算热点应力。最后, 计算结构的疲劳寿命。结果表明, 经过舱口优化后, 无压载水船舱口角隅的疲劳寿命要高于母型船。

关键词: 无压载水船; 舱口角隅; 优化; 疲劳寿命

中图分类号: U661.42

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1673-3185.2016.02.007

Novel Research on the hatch corner's fatigue life of a V-shape non-ballast water ship

WANG Lin¹, XIA Menglong², XIE De³

1 Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Wen Hua University, Wuhan 430074, China

2 Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan 430205, China

3 School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

Abstract: A novel method to calculate the hatch corner's fatigue life of the V-shape non-ballast ship is proposed in this paper. The proposed method comprehensively studies the wave data provided by integrated marine decision support system, from which both the scatter diagram and operational profile are obtained through programming. The load for the operational profile is calculated with SESAM and the hot spot stress is acquired through ABAQUS modeling. Finally, the structural fatigue life is calculated. It is concluded that the hatch corner's fatigue life of the V-shape non-ballast ship is extended after hatch optimization.

Key words: non-ballast water ship; hatch corner; optimization; fatigue life

0 引言

随着《国际船舶压载水和沉积物管理与控制公约》的生效, 无压载水船无疑将成为船舶发展的

一个重要方向。该种船通过船舶型线的改进, 可以在不需要压载水的情况下保证船舶的各项性能, 从而节约所有的压载水处理费用, 经济效益极其可观。王琳等^[1]对无压载水船的各项性能进行

收稿日期: 2015-08-22

网络出版时间: 2016-3-17 10:56

作者简介: 王琳, 女, 1988年生, 硕士, 助教。

夏孟龙(通信作者), 男, 1988年生, 硕士, 助理工程师。

解德, 男, 1964年生, 博士, 教授, 博士生导师。研究方向: 船舶与海洋结构物设计制造。



了一定的研究,本文将在在此基础上进一步对无压载水船的结构疲劳寿命予以研究。

无压载水船因其船型特殊,一些规范只适合常规的船型,故采用规范来计算船舶结构的疲劳寿命对无压载水船来说并不适用^[2]。而设计波法和谱分析法均采用的是通用的散布图^[3],没有结合船舶的具体航线,因而会给计算带来不准确性,所以,必须寻求一种新的方法。本文将采用一种全新的船舶结构疲劳计算方法,以使计算不受船型的限制,对任何特殊船型均适用,同时,通过计算船的航线,得到只属于该船的唯一散布图,以避免采用通用散布图带来的不准确性。图1所示即为该方法的技术路线图。

1 散布图

母型船为已营运多年的实船,且航线固定。其航行日志记录了该船在整个航线过程中的航行

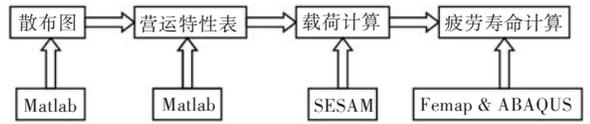


图1 结构疲劳算法技术路线图

Fig.1 Technical route of structural fatigue calculation

情况,包括在各区域航行的时间、航速、海况及浪向角等。根据该船的航线以及其在各区域的航行时间,结合综合海洋决策支持系统(Integrated marine decision support system)提供的数据(该数据库将全球海域分成104个区域,给出了每个区域每年各个方向波浪波高和周期的概率统计值),可以得到属于该船的特定散布图。

1.1 航行线路

母型船的航线如图2所示,该船共经过了图中红框所示的38个区域。

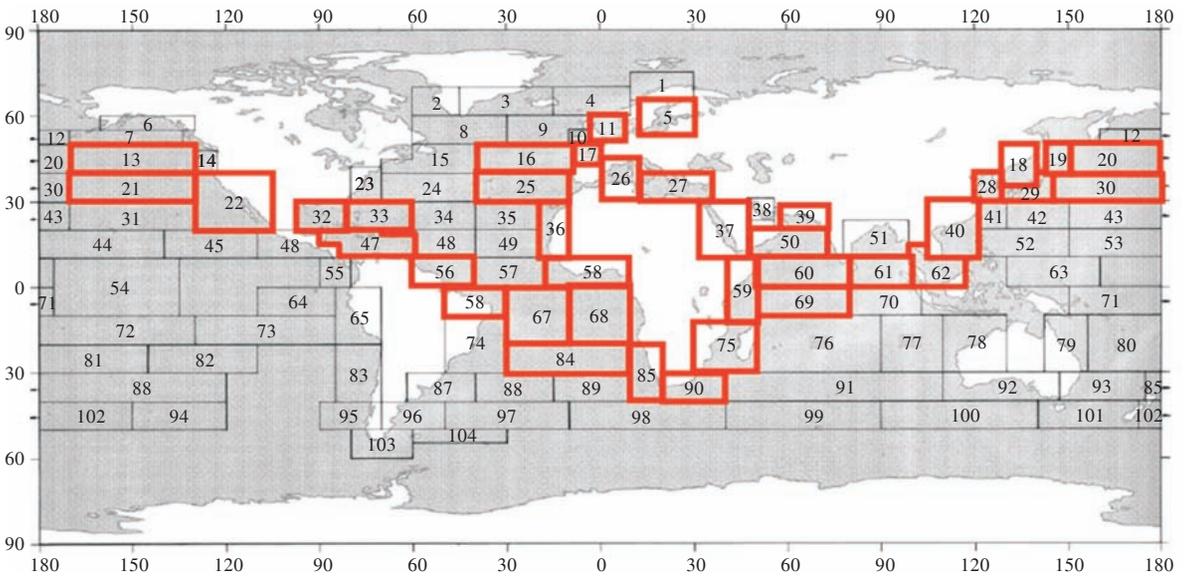


图2 母型船航行线路图

Fig.2 Parent ship's sailing route map

母型船的航海日志记录了其经过每一个区域所用的时间。将船舶经过每个区域所用的时间除以整个航线所用的总时间,便可以得到船舶在每个区域的用时占总时间的比例,如表1所示。

将表1通过 Matlab 编写成数据文件 data_1, 详细程序如下:

```
%D_0002_Example_data_1.m
function t=D_0002_Example_001_data_1();
global w;
w=[0 0 0 0 0.0140 0 ...
0 0 0 0 0.0140 0 ...
0.0280 0 0 0.0150 0.0070 0.0140 ...
0.0070 0.0480 0.0620 0.0200 0 0 ...
```

0.0070	0.0340	0.0340	0.0290	0.0300	0.0690	...
0	0.0070	0.0140	0	0	0.0270	...
0.0350	0	0.0050	0.0500	0	0	...
0	0	0	0	0.0210	0	...
0	0.0350	0	0	0	0	...
0	0.0280	0	0.0210	0.0140	0.0340	...
0.0340	0.0280	0	0	0	0.0140	...
0.0340	0.0350	0.0070	0	0	0	...
0	0	0.0360	0	0	0	...
0	0	0	0	0	0.0340	...
0.0280	0	0	0	0	0.0280	...
0	0	0	0	0	0	...
0	0	0	0	0	0	...
0	0	0	0	0	0	...
0	0	0	0	0	0	...

表3 母型船散布图
Tab.3 Scatter graph of parent ship

有义波高/m	过零周期/s											总计
	<4	4~5	5~6	6~7	7~8	8~9	9~10	10~11	11~12	12~13	>13	
0~1	19.6	51.3	52.5	29.8	10.9	2.7	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	167.0
1~2	5.5	38.5	84.6	96.2	68.5	31.9	10.3	2.3	0.5	0.0	0.0	338.4
2~3	1.1	11.6	36.4	60.8	67.1	47.9	22.8	7.7	2.0	0.5	0.0	257.9
3~4	0.3	3.0	11.3	22.5	32.4	31.1	19.6	8.6	2.9	0.8	0.1	132.5
4~5	0.0	0.8	3.4	7.4	12.2	14.6	11.5	6.1	2.4	0.8	0.2	59.3
5~6	0.0	0.2	1.0	2.6	4.7	6.2	5.6	3.5	1.5	0.5	0.2	25.8
6~7	0.0	0.0	0.3	0.9	1.7	2.5	2.6	1.7	0.9	0.4	0.1	11.1
7~8	0.0	0.0	0.2	0.4	0.7	1.1	1.2	0.9	0.6	0.2	0.0	5.2
8~9	0.0	0.0	0.0	0.2	0.3	0.4	0.6	0.5	0.3	0.0	0.0	2.3
9~10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.0	0.0	0.9
10~11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.3
11~12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12~13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13~14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
>14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
总计	26.4	105.5	189.7	220.7	198.4	138.7	74.9	31.6	11.2	3.2	0.5	1 000.8

```
fprintf(%7.1f,s(t,:));
fprintf('\n');
end
```

1.4 散布图换算

表3所示的散布图是按照波高间隔1 m来分布的。在实际情况中,通常是将海况按照波浪级别分成10级。在本例中,波高在10 m以上的情况几乎没有,因此只取1~7级波浪。按照实际情况,需将按波高划分的散布图转换为按海况划分的散布图^[4]。以周期为7~8 s的为例进行说明。

统计资料表明,波浪是一种各态历经的平稳随机过程,其波高的概率密度函数服从三参数的威布尔分布。将每一个周期段的波浪情况进行三参数威布尔拟合,确定威布尔分布中3个参数的具体值^[5]。周期为7~8 s的拟合结果如图4所示。拟合后,按照新的波高范围进行计算,周期为7~8 s的散布图转换如表4所示。

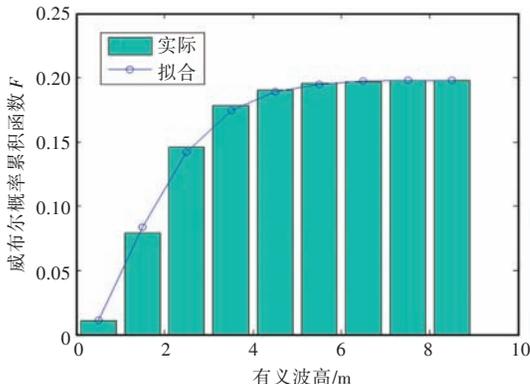


图4 周期为7~8 s的威布尔拟合结果

Fig.4 Weibull fitting results of periodic 7~8 s

表4 周期为7~8 s的散布图转换

Tab.4 Scatter graph transformation of periodic 7~8 s

有义波高/m	出现的概率	海况	有义波高范围/m	出现的概率
0~1	10.9	1	0~0.1	0.0
1~2	68.5	2	0.1~0.5	10.9
2~3	67.1	3	0.5~1.25	54.7
3~4	32.4	4	1.25~2.5	76.6
4~5	12.2	5	2.5~4	41.3
5~6	4.7	6	4~6	13.0
6~7	1.7	7	6~9	1.7
7~8	0.7		总计	198.2
8~9	0.3			
9~10	0.1			
10~11	0.0			
11~12	0.0			
12~13	0.0			
13~14	0.0			
>14	0.0			
总计	198.4			

详细程序如下:

```
%D_0002_Example_002_0708.m
function xdx
t=[1 0.0 1.0 1.0 0.5 0.0108 0.0108 0.1875 0.0545 0.0545 0.9455
2 1.0 2.0 1.0 1.5 0.0685 0.0793 0.1190 0.3454 0.3999 0.6001
3 2.0 3.0 1.0 2.5 0.0670 0.1463 0.0520 0.3379 0.7378 0.2622
4 3.0 4.0 1.0 3.5 0.0323 0.1786 0.0197 0.1629 0.9007 0.0993
5 4.0 5.0 1.0 4.5 0.0122 0.1908 0.0075 0.0615 0.9622 0.0378
6 5.0 6.0 1.0 5.5 0.0047 0.1955 0.0028 0.0237 0.9859 0.0141
7 6.0 7.0 1.0 6.5 0.0017 0.1972 0.0011 0.0086 0.9945 0.0055
8 7.0 8.0 1.0 7.5 0.0007 0.1979 0.0004 0.0035 0.9980 0.0020
9 8.0 9.0 1.0 8.5 0.0003 0.1982 0.0001 0.0015 0.9995 0.0005];
subplot(3,3,2), bar(t(:,5), t(:,6),'c'), hold on , axis([0 10 0 0.25])
subplot(3,3,5), bar(t(:,5), t(:,7),'c'), hold on , axis([0 10 0 0.25])
```

```

subplot(3,3,8),bar(t(:,5),t(:,8),'c'),hold on ,axis([0 10 0 0.25])    0.1983
i=1;                                                                    H2=(H21+H22)/2;
for m=0.22:0.005:0.3;                                                  subplot(3,3,3), plot(h2,pp2,'b^-'),hold on
x=log(t(:,5)-m);y=log(-log(t(:,11)));                                [f2,FF2,QQ2]=xdxd(h2,q2,m2,H2);
p=polyfit(x,y,1);                                                    zx2=[0.0107 0.0107 0.1875
h=p(1);q=exp(-p(2)/p(1));                                           0.0562 0.0669 0.1313
yy=p(1). *x+p(2);                                                    0.0764 0.1433 0.0549
zzz(i,1)=m;                                                           0.0404 0.1837 0.0145
error1(i)=sum(1-exp(-(t(:,5)-m)/q.^h))-t(:,10).^2;                 0.0128 0.1965 0.0017
error2(i)=sum((yy-y).^2);                                           0.0017 0.1982 0 ];
i=i+1;                                                                subplot(3,3,6), plot(H2,zx2(:,2), 'b^-');
end                                                                    subplot(3,3,9), plot(H2,zx2(:,3), 'b^-');
subplot(3,3,1),plot(zzz,error1,'ro'),hold on                          function[f,F,Q]=xdxd(h,q,m,xx)
.....                                                                    f=(h/q.*((xx-m)/q).^(h-1)).*exp(-((xx-m)/q).^h);
h2=p2(1);q2=exp(-p2(2)/p2(1));                                        F=1-exp(-((xx-m)/q).^h);
[f2,F2,Q2]=xdxd(h2,q2,m2,t(:,5));                                    Q=exp(-((xx-m)/q).^h);
subplot(3,3,2), plot(t(:,5),f2*0.1983,'b^-');
subplot(3,3,5), plot(t(:,5),f2*0.1983,'b^-');
subplot(3,3,8), plot(t(:,5),Q2*0.1983,'b^-');
H21=[m2;0.5;1.25;2.5;4;6]; H22=[0.5;1.25;2.5;4;6;9]
pp2=(-exp(-(H22-m2)/q2).^h2)+exp(-((H21-m2)/q2).^h2)*

```

将所有周期范围的散布图都按照上述方法编程并进行转换,得到新的散布图如表5所示。由于设计船与母型船的航线相同,所以表5既是母型船的散布图,又是设计船的散布图。

表5 母型船转换后的散布图
Tab.5 Converted scatter graph of parent ship

有义波高/m	过零周期/s											总计
	<4	4~5	5~6	6~7	7~8	8~9	9~10	10~11	11~12	12~13	>13	
0~0.1	8.8	12.6	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	23.9
0.1~0.5	10.7	37.8	50.6	30.2	10.9	2.6	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	143.2
0.5~1.25	5.1	34.7	69.8	76.8	54.7	25.7	9.0	0.9	0.1	0.0	0.0	276.8
1.25~2.5	1.6	16.5	49.2	76.5	76.6	52.0	23.8	9.7	2.6	0.5	0.0	309.0
2.5~4	0.3	3.3	14.4	29.5	41.3	39.0	23.6	11.2	3.8	1.3	0.2	167.9
4~6	0.0	0.5	2.8	6.8	13.0	16.4	14.2	7.4	3.2	1.1	0.3	65.7
6~9	0.0	0.0	0.3	0.6	1.7	2.7	3.7	2.3	1.3	0.4	0.0	13.0
总计	26.5	105.4	189.6	220.4	198.2	138.4	74.7	31.5	11.0	3.3	0.5	999.5

2 营运特性表

船舶的设计航速为15 kn,在实际航行过程中,受海况等因素的影响,航速并非一直保持15 kn,

而且浪向也有变化。从船舶的航行日志中,可以得到其在各海况下的航速情况如表6所示,浪向与海况的情况如表7所示。

由表5~表7可以得到船舶的营运特性表。例

表6 船舶航速与海况概率
Tab.6 Ship speed and sea state probability

航速/kn	海况							总计
	1	2	3	4	5	6	7	
10~12	0.007 8	0.000 0	0.000 0	0.007 2	0.013 0	0.032 6	0.014 8	0.075 4
12~14	0.030 5	0.031 5	0.214 0	0.211 2	0.019 57	0.150 9	0.000 0	0.833 8
14~16	0.000 0	0.019 6	0.026 1	0.028 5	0.006 7	0.009 7	0.000 0	0.090 6
总计	0.038 3	0.051 1	0.240 1	0.246 9	0.215 4	0.193 2	0.014 8	0.999 8

表7 船舶浪向与海况概率
Tab.7 Wave direction and sea state probability

浪向	海况							总计
	1	2	3	4	5	6	7	
迎浪	0.006 6	0.006 4	0.031 6	0.033 8	0.031 3	0.031 9	0.014 8	0.156 4
首斜浪	0.212 0	0.018 7	0.115 4	0.119 1	0.112 4	0.102 2	0.000 0	0.489 0
横浪	0.003 8	0.011 4	0.036 5	0.037 1	0.026 8	0.022 4	0.000 0	0.138 0
尾斜浪	0.002 7	0.007 1	0.025 0	0.025 2	0.019 1	0.015 7	0.000 0	0.094 8
顺浪	0.003 4	0.009 9	0.032 2	0.032 7	0.023 8	0.019 9	0.000 0	0.121 9
总计	0.037 7	0.053 5	0.240 7	0.247 9	0.213 4	0.192 1	0.014 8	1.000 1

如,在整个航行过程中,船舶处于海况1、周期4~5 s、航速10~12 kn、迎浪状态的概率(概率为放大1 000倍的结果)为:

$$p = 12.6 \times \frac{0.0078}{0.0383} \times \frac{0.0066}{0.0377} = 0.4492 \quad (1)$$

按照该方法,通过编程,可以得到船舶在整个航行过程中共3个航速、7个海况、11个周期、5个浪向共计 $7 \times 11 \times 3 \times 5 = 1155$ 个营运状态的表格,如表8所示(因设计船的航速等情况与母型船相同,所以表8也是设计船的营运特性表)。详细程序如下:

```
%D_0011_Example_001_S1.m
dfv=[0.0078 0.0000 0.0000 0.0072 0.0130 0.0326 0.0148;
      0.0305 0.0315 0.2140 0.2112 0.1957 0.1509 0.0000;
      0.0000 0.0196 0.0261 0.0285 0.0067 0.0097 0.0000];
a={'10-12kn' '12-14kn' '14-16kn'};
dfq=[0.0066 0.0064 0.0316 0.0338 0.0313 0.0319 0.0148;
      0.0212 0.0187 0.1154 0.1191 0.1124 0.1022 0.0000;
      0.0038 0.0114 0.0365 0.0371 0.0268 0.0224 0.0000;
      0.0027 0.0071 0.0250 0.0252 0.0191 0.0157 0.0000;
      0.0034 0.0099 0.0322 0.0327 0.0238 0.0199 0.0000];
b={'head' 'bow' 'beam' 'quart' 'follow'}
S=[8.8 12.6 2.5 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
   10.7 37.8 50.6 30.2 10.9 2.6 0.4 0.0 0.0 0.0 0.0
   5.1 34.7 69.8 76.8 54.7 25.7 9.0 0.9 0.1 0.0 0.0
   1.6 16.5 49.2 76.5 76.6 52.0 23.8 9.7 2.6 0.5 0.0
   0.3 3.3 14.4 29.5 41.3 39.0 23.6 11.2 3.8 1.3 0.2
   0.0 0.5 2.8 6.8 13.0 16.4 14.2 7.4 3.2 1.1 0.3
   0.0 0.0 0.3 0.6 1.7 2.7 3.7 2.3 1.3 0.4 0.0];
t={['<4sec' '4-5sec' '5-6sec' '6-7sec' '7-8sec' '8-9sec'...
   '9-10sec' '10-11sec' '11-12sec' '12-13sec' '>13sec'};
k=1;
for iHeading=1:5;
  for jSpeed=1:3;
    for mSeaState=1:7;
      for nTz=1:11;
        fmc=S(mSeaState,nTz);
        fv=dfv(jSpeed,mSeaState)/sum(dfv(:,mSeaState));
        fq=dfq(iHeading,mSeaState)/sum(dfq(:,mSeaState));
        p=fmc*fv*fq;
        if p>=0.01
          xd(k,:)={kb{iHeading}a{jSpeed}mSeaStatet{nTz}p};
          k=k+1;
        end
      end
    end
  end
end
end
xlswrite('D_0011_Example_001_S1.xls',xd)
```

表8 船舶营运特性表

Tab.8 Ship operation characteristics table

序号	航速/kn	海况	过零周期/s	浪向	出现的概率
1	10~12	1	<4	顺浪	0.161 628
2	10~12	1	<4	尾斜浪	0.128 351
3	10~12	1	<4	横浪	0.180 643
4	10~12	1	<4	首斜浪	1.007 797
5	10~12	1	<4	迎浪	0.313 748
6	10~12	1	4~5	顺浪	0.231 422
7	10~12	1	4~5	尾斜浪	0.183 776
8	10~12	1	4~5	横浪	0.258 648
9	10~12	1	4~5	首斜浪	1.442 982
10	10~12	1	4~5	迎浪	0.449 230
...
1 155	14~16	7	>13	迎浪	0
总计					999.5

3 载荷计算

通过船舶流体分析软件 SESAM 中的 WASIM 模块,输入船舶模型.pln 文件及装载情况,给定航速、波高、周期、浪向等条件,可以得到船舶指定截面6个方向的受力情况,在计算结构疲劳强度时,选择船舫垂向弯矩^[6]。

本文以母型船满载情况为例进行说明,图5所示为采用 SESAM 软件计算载荷时的情况。

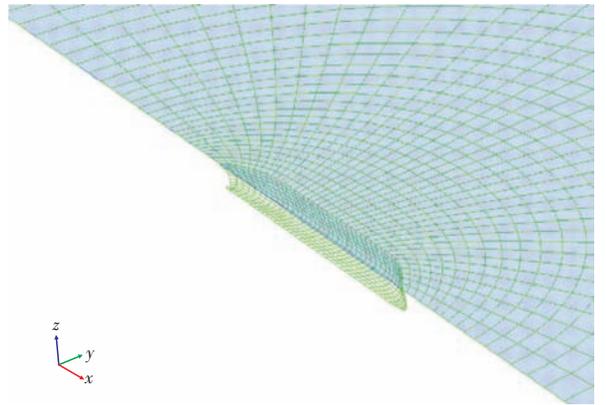


图5 SESAM 计算载荷

Fig.5 Load calculation in SESAM

软件 SESAM 中输出的是所选船舶横截面上每一种情况下垂向弯矩的谱密度函数图形,以及谱密度函数的零阶矩、一阶矩、二阶矩和四阶矩,如图6所示。本文所选的船舫横截面为距船舫舱口角隅2个强框架处(强肋骨间距2 400 mm)。

将所有情况的谱密度函数(共1 155个)按照营运特性的顺序填入如表9所示的表中。

其中,零阶矩即为该谱密度函数的标准差。为了使所有情况下的谱密度函数都满足窄带谱的要求,必须对其谱密度函数进行修正,谱宽参数 ϵ 如式(2)所示。

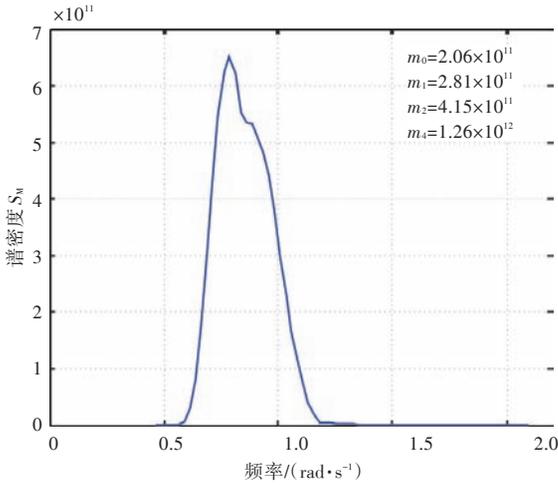


图6 SESAM输出载荷谱密度函数

Fig.6 Output load spectral density function in SESAM

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4}} \quad (2)$$

经计算(式(3)),即可得到修正后的标准差。最终得到弯矩的谱密度函数标准差如表10所示。

$$m_0' = \left(1 - \frac{1}{2}\varepsilon^2\right)m_0 \quad (3)$$

在软件SESAM中输入设计船的型线数值装载及波浪航速情况,即可计算出设计船的载荷情况,如表11所示。表10和表11分别为母型船和设计船在满载状态下所受的弯矩。母型船和设计船在空载状态下所受的载荷情况也可以算出。

4 结构疲劳寿命计算

4.1 结构模型

母型船与设计船的主尺度如表12所示。

表9 营运特性下船舯剖面y方向弯矩谱密度函数

Tab.9 Bending moments spectral density function of midship section in y direction

序号	航速/kn	海况	过零周期/s	浪向	出现的概率	零阶矩 $m_0/$ ($N^2 \cdot m^2$)	一阶矩 $m_1/$ ($N^2 \cdot m^2 \cdot s^{-1}$)	二阶矩 $m_2/$ ($N^2 \cdot m^2 \cdot s^{-2}$)	四阶矩 $m_4/$ ($N^2 \cdot m^2 \cdot s^{-4}$)
1	10~12	1	<4	顺浪	0.161 628	3.80×10^{10}	1.42×10^{10}	5.71×10^9	9.26×10^8
2	10~12	1	<4	尾斜浪	0.128 351	1.59×10^{11}	9.38×10^{10}	5.56×10^{10}	1.96×10^{10}
3	10~12	1	<4	横浪	0.180 613	5.46×10^{11}	6.52×10^{11}	8.05×10^{11}	1.37×10^{12}
4	10~12	1	<4	首斜浪	1.007 797	8.01×10^{10}	1.40×10^{11}	2.67×10^{11}	1.32×10^{12}
5	10~12	1	<4	迎浪	0.313 748	4.95×10^{10}	9.88×10^{10}	2.10×10^{10}	1.19×10^{12}
6	10~12	1	4~5	顺浪	0.231 422	2.12×10^{11}	8.90×10^{10}	3.76×10^{10}	6.73×10^9
7	10~12	1	4~5	尾斜浪	0.183 776	6.17×10^{11}	3.43×10^{11}	1.91×10^{11}	6.03×10^{10}
8	10~12	1	4~5	横浪	0.258 648	1.38×10^{12}	1.36×10^{12}	1.39×10^{12}	1.63×10^{12}
9	10~12	1	4~5	首斜浪	1.442 982	4.30×10^{11}	5.26×10^{11}	6.78×10^{11}	1.49×10^{12}
10	10~12	1	4~5	迎浪	0.449 230	2.06×10^{11}	2.81×10^{11}	4.15×10^{11}	1.26×10^{12}
...
1 155	14~16	7	>13	迎浪	0	2.46×10^{16}	1.92×10^{16}	1.56×10^{16}	1.27×10^{16}

表10 母型船营运特性下船中剖面y方向弯矩

Tab.10 Midship section bending moments in y direction of parent ship

序号	航速/kn	海况	过零周期/s	浪向	概率	弯矩谱密度函数零阶矩 $m_0/$ ($N^2 \cdot m^2$)
1	10~12	1	<4	顺浪	0.161 628	3.66×10^{10}
2	10~12	1	<4	尾斜浪	0.128 351	1.58×10^{11}
3	10~12	1	<4	横浪	0.180 643	5.09×10^{11}
4	10~12	1	<4	首斜浪	1.007 797	6.70×10^{10}
5	10~12	1	<4	迎浪	0.313 748	4.33×10^{10}
6	10~12	1	4~5	顺浪	0.231 422	2.11×10^{11}
7	10~12	1	4~5	尾斜浪	0.183 776	6.12×10^{12}
8	10~12	1	4~5	横浪	0.258 648	1.28×10^{12}
9	10~12	1	4~5	首斜浪	1.442 982	3.69×10^{11}
10	10~12	1	4~5	迎浪	0.449 230	1.72×10^{11}
...
1 155	14~16	7	>13	迎浪	0	2.19×10^{16}

表11 设计船营运特性下船中剖面y方向弯矩

Tab.11 Midship section bending moment in y direction of design ship

序号	航速/kn	海况	过零周期/s	浪向	概率	弯矩谱密度函数零阶矩 $m_0/(N^2 \cdot m^2)$
1	10~12	1	<4	顺浪	0.161 628	7.98×10^{10}
2	10~12	1	<4	尾斜浪	0.128 351	3.51×10^{11}
3	10~12	1	<4	横浪	0.180 613	4.01×10^{11}
4	10~12	1	<4	首斜浪	1.007 797	1.29×10^{11}
5	10~12	1	<4	迎浪	0.313 748	1.09×10^{11}
6	10~12	1	4~5	顺浪	0.231 422	4.53×10^{11}
7	10~12	1	4~5	尾斜浪	0.183 776	1.34×10^{12}
8	10~12	1	4~5	横浪	0.258 648	7.76×10^{11}
9	10~12	1	4~5	首斜浪	1.442 982	5.22×10^{11}
10	10~12	1	4~5	迎浪	0.449 230	2.53×10^{11}
...
1 155	14~16	7	>13	迎浪	0	3.65×10^{16}

表12 母型船与设计船的主尺度

Tab.12 Principal dimensions of parent ship and design ship

参数	母型船	设计船
总长/m	179	179
垂线间长/m	175	175
船宽/m	27.6	35.6
型深/m	14.2	14.2
设计吃水/m	11.4	11.4
排水量/t	44 166	44 168
设计航速/kn	15	15

由表可知,母型船与设计船的总长、垂线间长、型深、设计吃水及设计航速均相同,排水量仅相差2 t。另外,其内部结构形式也相同,舷侧均为横骨架式,船底和甲板为纵骨架式,双底双壳。保持设计船各项板厚、型材及骨材尺寸、肋骨间距、纵骨间距、结构布置等与母型船一致,计算两者典型部位的结构疲劳强度并进行对比。

根据规范,建立船舶船舫的有限元模型^[7-8]。单元大小根据肋骨间距、船底纵骨间距、甲板纵骨间距等予以合理安排。由于软件SESAM中选择的横剖面为距舱口角隅2个强框架处,因此建模只建到该处即可。又因船舶为左、右对称,故只建立左边模型。母型船与设计船的结构模型分别如图7和图8所示。

4.2 边界条件

船中纵剖面关于y轴对称,在前、后端面中和轴与中纵剖面相交处各建立一个独立点,端面纵向构件节点的自由度与独立点相关^[8],如图7和图8所示。

4.3 热点应力计算

在第3节中,已得到所选剖面的载荷情况。

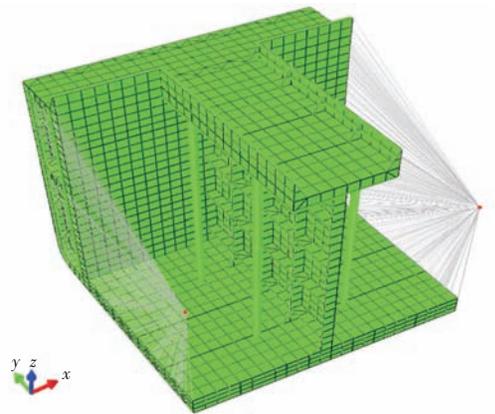


图7 母型船有限元模型

Fig.7 Finite element model of parent ship

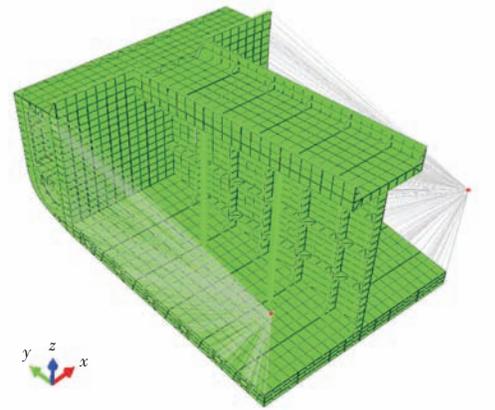


图8 设计船有限元模型

Fig.8 Finite element model of design ship

由于1 155个载荷各不相同,不能一一施加于有限元模型进行计算,故对有限元模型施加大小为1 000 kN·m的单位载荷,计算关键位置的应力,然后按照比例关系换算成真实载荷下的应力。

在单位载荷的作用下,母型船与设计船的应力云图分别如图9和图10所示。从中可以看到,两者的应力最大值K均出现在舱口角隅处,其中母型船的最大值为0.155 3 MPa,设计船的最大值

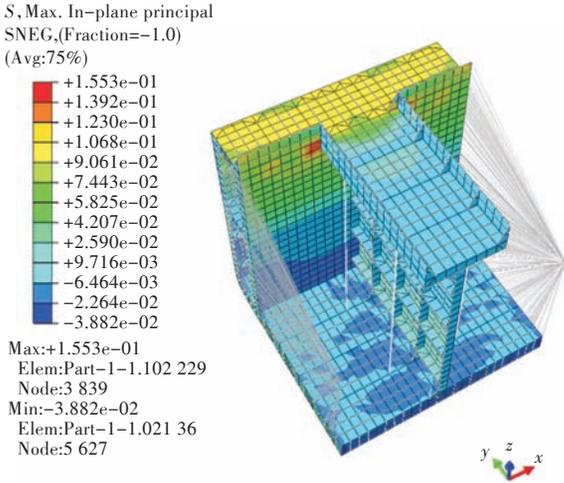


图9 母型船应力云图

Fig.9 Stress contours of parent ship

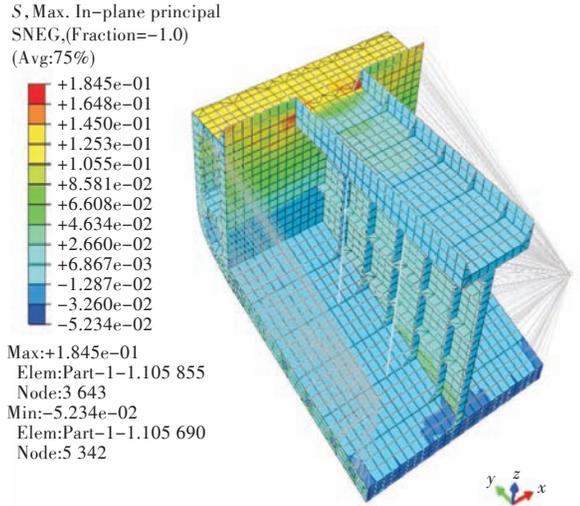


图10 设计船应力云图

Fig.10 Stress contours of design ship

为0.184 5 MPa。所以,选择最大应力的舱口角隅处作为疲劳寿命的计算点^[9]。

根据母型船和设计船在单位载荷下舱口角隅处的应力值,结合表10和表11,由式(4),即可得

到母型船和设计船在实际载荷作用下应力谱密度函数的零阶矩,如表13和表14所示。

$$m_{01} = (K/1\ 000\ 000)^2 m_0' \quad (4)$$

其中,母型船的K值为舱口角隅处的最大应

表13 母型船营运特性下舱口角隅热点应力
Tab.13 Hot stresses in hatch corner of parent ship

序号	航速/kn	海况	过零周期/s	浪向	概率	热点应力谱密度函数零阶矩 m_{01}/MPa^2
1	10~12	1	<4	顺浪	0.161 628	8.83×10^{-4}
2	10~12	1	<4	尾斜浪	0.128 351	3.81×10^{-3}
3	10~12	1	<4	横浪	0.180 613	1.23×10^{-2}
4	10~12	1	<4	首斜浪	1.007 797	1.62×10^{-3}
5	10~12	1	<4	迎浪	0.313 748	1.04×10^{-3}
6	10~12	1	4~5	顺浪	0.231 422	5.09×10^{-3}
7	10~12	1	4~5	尾斜浪	0.183 776	1.48×10^{-2}
8	10~12	1	4~5	横浪	0.258 648	3.09×10^{-2}
9	10~12	1	4~5	首斜浪	1.442 982	8.90×10^{-3}
10	10~12	1	4~5	迎浪	0.449 230	4.15×10^{-3}
...
1 155	14~16	7	>13	迎浪	0	5.28×10^2

表14 设计船营运特性下舱口角隅热点应力
Tab.14 Hot stresses in hatch corner of design ship

序号	航速/kn	海况	过零周期/s	浪向	概率	热点应力谱密度函数零阶矩 m_{01}/MPa^2
1	10~12	1	<4	顺浪	0.161 628	2.72×10^{-3}
2	10~12	1	<4	尾斜浪	0.128 351	1.19×10^{-2}
3	10~12	1	<4	横浪	0.180 613	1.37×10^{-2}
4	10~12	1	<4	首斜浪	1.007 797	4.39×10^{-3}
5	10~12	1	<4	迎浪	0.313 748	3.71×10^{-3}
6	10~12	1	4~5	顺浪	0.231 422	1.54×10^{-2}
7	10~12	1	4~5	尾斜浪	0.183 776	4.56×10^{-2}
8	10~12	1	4~5	横浪	0.258 648	2.64×10^{-2}
9	10~12	1	4~5	首斜浪	1.442 982	1.78×10^{-2}
10	10~12	1	4~5	迎浪	0.449 230	8.61×10^{-3}
...
1 155	14~16	7	>13	迎浪	0	1.35×10^3

力0.155 3 MPa,设计船的K值为舱口角隅处的最大应力0.184 5 MPa。

母型船和设计船空载时的舱口角隅的热点应力情况也可按相同的方法算出。

4.4 结构疲劳寿命计算

4.4.1 疲劳寿命计算原理

根据 Miner 线性累积损伤理论^[10],结构在多级恒幅交变应力作用下的总损伤的表达式为

$$D = \sum_i^k D_i = \sum_i^k \frac{n_i}{N_i} \quad (5)$$

式中: D_i 为第 i 级应力范围作用下的损伤度; n_i 为第 i 级应力范围作用下的实际循环次数(由载荷谱确定); N_i 为第 i 级应力范围作用下到达破坏时的循环次数(由 S-N 曲线确定)。

当应力范围用一定时间内的连续概率密度函数表示时,疲劳累积损伤的表达式可写为

$$D = \int_L \frac{dn}{N} = \int_0^\infty \frac{N_L f_S(S) dS}{N} = N_L \int_0^\infty \frac{f_S(S)}{N} dS \quad (6)$$

式中: S 为应力范围; $f_S(S)$ 为应力范围分布的概率密度函数; N 为应力范围为 S 的单一循环载荷作用下达到破坏所需的循环次数; N_L 为一定时间内的应力循环的总次数; $dn = N_L f_S(S) dS$, 为落在 $[S, S+dS]$ 应力范围内的循环次数。

利用 S-N 曲线的关系 $N=AS^{-m}$, 代入式(6), 即可得到

$$D = \frac{N_L}{A} \int_0^\infty S^m f_S(S) dS \quad (7)$$

式中, A 和上标 m 为函数的参数。

船舶在短期分布中所受的交变应力是均值为 0 的窄带平稳随机过程。根据随机过程理论, 其应力幅值服从瑞利分布:

$$f(x) = \frac{x}{\sigma_x^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}\right) \quad (8)$$

式中: x 为应力幅值; σ_x^2 为应力幅值的方差, 也等于应力响应谱密度函数的零阶矩 m_0 。

S 为应力范围(最大应力减去最小应力), 应力范围为应力幅值的 2 倍, 即 $S=2x$ 。因应力幅值出现 2 次而应力范围只出现 1 次, 因此, 应力范围出现的概率为应力幅值的一半, 即 $f_S(S)=0.5f(x)$ 。代入式(8), 得

$$f_S(S) = \frac{S}{4\sigma_x^2} \exp\left(-\frac{S^2}{8\sigma_x^2}\right) \quad (9)$$

将式(9)代入式(7), 即可求出某一短期分布

的疲劳损伤, 由于某一短期分布出现是有一定概率的, 因此还要乘以该短期分布出现的概率 p_i 。

$$\text{令} \quad \frac{S^2}{8\sigma_x^2} = t$$

$$\text{则} \quad dt = \frac{S}{4\sigma_x^2} dS$$

$$S = (8\sigma_x^2 t)^{\frac{1}{2}}$$

$$\begin{aligned} D_i &= \frac{p_i N_L}{A} \int_0^\infty S^m f_{Si}(S) dS = \\ &= \frac{p_i N_L}{A} \int_0^\infty S^m \frac{S}{4\sigma_{xi}^2} \exp\left(-\frac{S^2}{8\sigma_{xi}^2}\right) dS = \\ &= \frac{p_i N_L}{A} \int_0^\infty (2\sqrt{2}\sigma_{xi})^m t^{\frac{m}{2}} e^{-t} dt = \\ &= \frac{p_i N_L (2\sqrt{2}\sigma_{xi})^m}{A} \int_0^\infty t^{\frac{m}{2}+1-1} e^{-t} dt = \\ &= \frac{p_i N_L (2\sqrt{2}\sigma_{xi})^m}{A} \Gamma\left(\frac{m}{2} + 1\right) \quad (10) \end{aligned}$$

将所有短期分布的疲劳损伤累加, 便可得到总的累积损伤, 即

$$D = \sum_i^k D_i = \sum_i^k \frac{p_i N_L (2\sqrt{2}\sigma_{xi})^m}{A} \Gamma\left(\frac{m}{2} + 1\right) \quad (11)$$

式中: k 为短期分布的总个数; σ_{xi}^2 为第 i 个短期分布应力幅值的方差, 即表 13 和表 14 中的热点应力谱密度函数的零阶矩。

对于双斜率的 S-N 曲线, 同样可以推导出

$$\begin{aligned} D_i &= \frac{p_i N_L}{A_1} \int_0^{S_1} S^{m_1} f(S) dS + \frac{p_i N_L}{A_2} \int_{S_1}^\infty S^{m_2} f(S) dS = \\ &= \left[\frac{p_i N_L}{A_1} (2\sqrt{2}\sigma_{xi})^{m_1} \gamma\left(1 + \frac{m_1}{2}, t_i\right) + \right. \\ &\quad \left. \frac{p_i N_L}{A_2} (2\sqrt{2}\sigma_{xi})^{m_2} \Gamma\left(1 + \frac{m_2}{2}, t_i\right) \right] \quad (12) \end{aligned}$$

式中, $t_i = (S_1^2/8\sigma_{xi}^2)$, 其中 S_1 为 S-N 曲线转折处的应力值。

本文选用《双舷侧散货船结构强度直接计算指南》提供的双斜率 S-N 曲线(空气中), 曲线转折处的应力值为 53.38 MPa。具体参数见表 15。

表 15 双斜率 S-N 曲线(空气中)参数
Tab.15 The parameters of dual slope S-N curves (in air)

	A	m
$N < 107$	1 012.182	3.0
$N > 107$	1 015.637	5.0

该方法的流程图如图 11 所示。

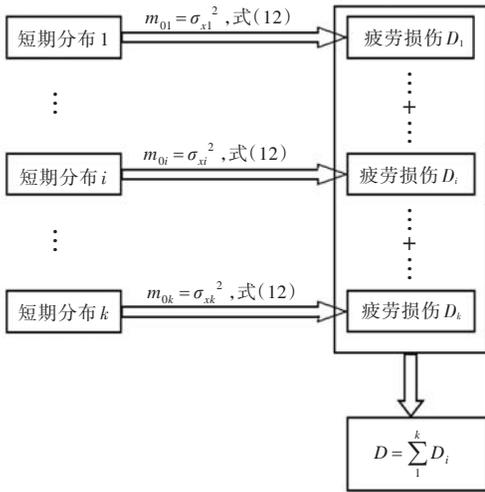


图11 累计损伤计算流程图

Fig.11 Calculation flow chart of accumulated damage

4.4.2 疲劳寿命计算结果

由表13、表14以及空载情况的热点应力,再结合式(12),通过编程便可得到计算船舶的疲劳寿命(表16):

```
%D_0011_Example_001_SS1.m
a=xlsread('designm.xls','F2:G1156');
k=1;
for j=1:1:1155
    if a(j,1)>0
        aa(k,1:2)=a(j,1:2);
        k=k+1;
    end
end
pi=aa(:,1)/1000;
m0=aa(:,2);
m1=3.0;a1=10.^12.182;S1=53.38;
m2=5.0;a2=10.^15.637;
NL=10^8/20,x1=1+m1/2;x2=1+m2/2;
t=(S1^2/8/m0);
for j=1:length(m0)
    D1(j)=NL/a1*gamma(x1)*(1-gammainc(t(j),x1))*...
    (2*(2*m0(j))^0.5)^m1*pi(j);
    D2(j)=NL/a2*gamma(x2)*(gammainc(t(j),x2))*...
    (2*(2*m0(j))^0.5)^m2*pi(j);
end
Di=D1+D2;
D=sum(Di)
year=1/D
```

表16 母型船与设计船疲劳寿命对比

Tab.16 Comparison of fatigue life between parent ship and design ship

疲劳寿命/年	
母型船	8.2
设计船	3.0

4.4.3 设计船舱口角隅优化

由表16可见,设计船的疲劳寿命要低于母型

船的,为此,必须对设计船的舱口角隅进行优化。将设计船船长方向的舱口围板向船中纵剖面移动2 m,以减小设计船的舱口大小,从而使其与母型船的相等。同时,将舱口角隅处的舱口围板板厚增加50%^[10]。如图12所示,优化后,设计船在1 000 kN单位弯矩下的最大应力为0.115 2 MPa。将0.115 2 MPa代入式(3),再按照上述方法计算设计船的疲劳寿命,结果如表17所示。可见,优化后设计船的疲劳寿命要高于母型船的。

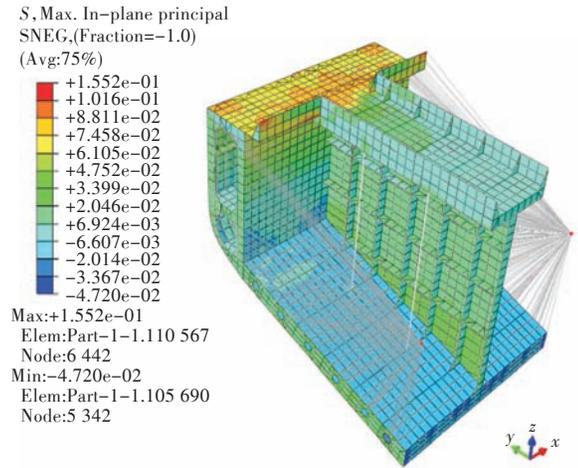


图12 优化后设计船的应力云图

Fig.12 Stress contours of design ship after optimization

表17 优化后设计船与母型船疲劳寿命对比

Tab.17 Comparison of fatigue life with parent ship and design ship after optimization

疲劳寿命/年	
母型船	8.2
优化后的设计船	12.5

5 结论

1) 本文以计算无压载水船舱口角隅的疲劳寿命为例提出了一种不受船型和航线等因素限制、可用于计算船舶任何部位结构疲劳寿命的新方法。

2) 根据船舶具体的航线,得到了属于该船的、独有的散布图和营运特性表,避免了传统谱分析法和设计波法采用通用散布图所带来的不准确性。

3) 可以准确得到每一种短期分布出现的概率,避免了其他方法采用估算的概率所带来的误差。

4) 该方法涉及大量编写的程序,后期可以将所有程序打包编写为有操作界面的软件,只需输入船舶的航线等信息,即可得到属于该船的散布图和营运特性表,甚至直接得到其结构疲劳寿命。

