

超大舱口集装箱船舱口围板的强度分析及连续性的处理

李小平 黄芳昌

摘 要 本文以 4 000 TEU 级巴拿马型集装箱船为基础, 采用计算和比较方法, 通过对超大舱口集装箱船纵向连续舱口围板在弯扭时的受力与变形特性及其在船体梁弯扭中的作用分析, 结合纵向舱口围板高度变化对船中剖面模数影响的统计分析, 提出超大舱口集装箱船舱口围板结构形式及连续性处理方法。

关键词 超大舱口集装箱船 总纵强度 剖面模数 翘曲应力

1 概 述

集装箱船在营运中具有独特的优点和经济效益, 是国际航运业近十几年来发展最快的船型之一, 尤其是大型集装箱船 (2 500 TEU 以上) 更是受到船东的青睐, 对超大舱口集装箱船 (开口宽达型宽的 85~ 90%) 来说, 研究纵向连续舱口围板的作用及其对总纵强度和扭转的影响, 合理解决舱口围板局部强度和过渡形式, 是大型集装箱船设计中的技术之一。

大甲板开口的纵向连续舱口围板, 作为强力构件参与总纵弯曲, 承受较高的总纵弯曲应力, 同时还承受舱口盖传递过来的集装箱载荷和水动力扭矩、货物扭矩等。

大型集装箱船舱口围板处于高应力状态, 采用的材料又是较高等级的高强度钢, 其疲劳强度也是设计者应该十分重视的问题。

根据国际载重线公约要求, 一般露天甲板上的舱口围板高度要大于 600 mm, 对 4 000 TEU 级巴拿马型集装箱船, 舱口围板高达 1 400 mm 以上, 这样高的舱口围板对船体的总强度和扭转到底有否好处值得研究。如果舱口围板在开口间断设置使其不参与总纵弯曲, 那么船体的总纵强度又如何呢, 也是本文需进一步探讨的问题。

2 舱口围板在弯扭时的受力与变形

船体发生弯曲扭转变形时, 水平弯曲与扭转耦合较为危险, 通常将船体总纵弯曲和扭转分开单独考虑。对连续的舱口围板来说, 它与主船体一起参与船体总纵弯曲, 其受力特征如图 1 所示 (中拱), 其

中 R 为总纵弯曲应力, S 为来自主船体的剪力。

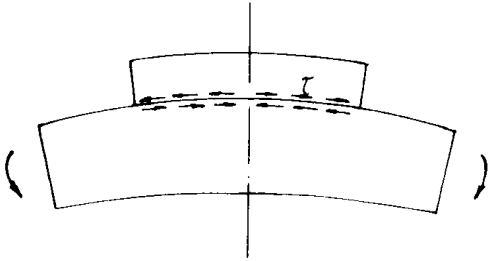


图 1 舱口围板受力变形图

舱口围板对总纵强度的作用可以从其对船体中剖面模数的影响反映出来。本文对四种方案进行了比较, 其结果如下表 1。

表 1

参数 方案	剖面面积 (cm^2)	ZCG (m)	W_{TOP} (m^3)	W_R (m^3)	$\$W \ddot{a} v_R$ (%)	甲板开口百分比 (%)
É	50597. 0	9. 465	26. 702	26. 566	0. 5	89. 4
°	52019. 0	9. 543	27. 261	26. 566	2. 6	87. 7
„	51298. 0	9. 405	27. 31	26. 566	2. 8	91. 2
ì	54220. 3	9. 663	28. 402	26. 566	6. 9	87. 7
不设舱口围板	—	—	26. 30	26. 566	- 1. 0	89. 4

注: 方案É——集装箱间距 150 mm, 舷边甲板宽 1. 711 m, 纵横骨架式

方案°——集装箱间距 100 mm, 舷边甲板宽 1. 985 m, 纵横骨架式

方案„——集装箱间距 100 mm, 舷边甲板宽 1. 425 m, 设三排舱口, 纵横骨架式

方案ì——集装箱间距 100 mm, 舷边甲板宽 1. 985 m, 纵骨架式

ZCG——中和轴距基线距离

$$\$W = W_{TOP} - W_R$$

W_{TOR} ——考虑了舱口围板后甲板以上计算点（按式（1）计算）处的剖面模数

W_R ——规范要求的甲板剖面模数

由表 1 可知，舱口围板对总纵强度是有一定作用的。加设舱口围板可以增加船体剖面惯性矩，甲板边线处剖面模数增加。但是，若考虑纵向连续舱口围板参加船体总纵强度，则按规范要求的甲板剖面模数需计算至舱口围板上的某一点处，从而使得剖面模数往往满足不了规范要求。为此，通常的解决办法是加厚甲板和舱口围板，结果导致重量增加和重心的提高，即形成所谓的恶性循环。

在船体扭转状态下，舱口围板亦参与扭转变形，同时舱口围板本身还会发生翘曲变形和横向变形，但属于开式结构，其抗扭能力毕竟不能与抗扭箱相比。本文对 4 000TEU 级集装箱船设舱口围板与不设舱口围板进行了分析比较，其舱口围板最大变形如下表 2。此外，船体发生扭转时，人们感兴趣的是最大舱口对角线变形以及翘曲应力，其分析结果见表 3。

表 2

参 数	横向变形 (mm)	纵向翘曲变形 (mm)
方 案		
设舱口围板	- 92 81	- 15 65
不设舱口围板	- 94 19	- 16 09

表 3

参 数	$\$ l$ (mm)	$\$`$ ($^{\circ}$)	R_{max} (N/mm ²)		
			B	C	D
方案					
设舱口围板	58 2	0 6489	51 33	88 67	81 97
不设舱口围板	61 0	0 6864	55 12	—	96 17

注：\$ l\$——最大舱口对角线伸长量；

\$`——最大扭角；

R_{max} ——最大翘曲应力（B：艏部；C：舱口围板角隅处；D：甲板角隅处）。

由表 2 和表 3 可以看出舱口围板对船体扭转变形是有一定益处的。

3 纵向连续舱口围板高度对船中剖面模数的影响

对于纵向连续舱口围板，其横剖面面积计入船中剖面模数时，因所在的位置离中和轴较远，所以其面积的增减对船中剖面模数有较敏感的影响。一般

来说，增加横剖面面积，船中剖面模数会增加。但由于规范规定，当有连续舱口围板时，计算船中剖面模数时，围板上的计算点到中和轴之间的垂直力臂 Z_c ，按下式计算：

$$Z_c = Z_c (0.9 + 0.2y/B) \quad (1)$$

式中 Z_c ——中和轴至连续强力构件顶点的垂直距离（m）

y ——连续强力构件顶点与船体中心线之间的水平距离（m）

B ——船宽（m）

按此垂直力臂计算得到的船中剖面模数又会是怎样变化呢？不妨先通过一个简化的模型来分析一下，然后再通过几个实例计算统计一下按规范要求的船中剖面模数随舱口围板高度变化的情况。

设有一薄壁结构剖面面积为 A_1 ，自身惯性矩为 I_1 ，重心距底边为 y_1 ，现在其顶边加一微小面积 A_2 ，高度为 h ，其重心距底边为 y_2 （如图 2 所示），求对顶边边线剖面模数的变化情况。

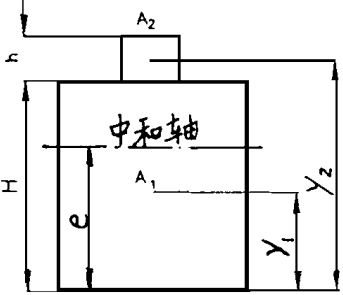


图 2

原剖面对顶边边线的剖面模数：

$$W_{d1} = \frac{I_1}{H - y_1} \quad (2)$$

增加面积后对底边的惯性矩：

$$I = I_1 + A_1 y_1^2 + A_2 y_2^2 \quad (3)$$

重心距底边距离为：

$$e = \frac{A_1 y_1 + A_2 y_2}{A_1 + A_2} \quad (4)$$

图 2 所示剖面对中和轴的惯性矩为：

$$I_2 = I - (A_1 + A_2) e^2 = I_1 + A_1 y_1^2 + A_2 y_2^2 - \frac{(A_1 y_1 + A_2 y_2)^2}{A_1 + A_2} \quad (5)$$

对顶边边线的剖面模数为：

$$W_{d2} = \frac{I_2}{H + h - e} = \frac{I_1 (A_1 + A_2) + A_1 A_2 (y_1 - y_2)^2}{A_1 (H + h - y_1) + A_2 (H + h - y_2)} \quad (6)$$

$W_{d2}-W_{d1}=$

$$\frac{I_1A_2(y_2-y_1)-I_1(A_1+A_2)h+A_1A_2(y_1-y_2)^2(H-y_1)}{(H-y_1)[A_1(H+h-y_1)+A_2(H+h-y_2)]}$$
 (7)

令 $W_{d2}-W_{d1}=\frac{E}{C}$

$$F=I_1A_2(y_2-y_1)-I_1(A_1+A_2)h+A_1A_2(y_1-y_2)^2(H-y_1)$$
 (8)

$H > y_1, H + h > y_1, H + h > y_2, \quad C > 0$

故仅当 $F > 0$ 时, 设舱口围板对船中剖面模数

是有好处的。

现通过几艘集装箱船舱口围板高度 h 的变化, 来观察船中剖面模数的变化情况, 计算结果见表 4 ~ 表 7, 其中:

$h\ddot{O}$ —— 舱口围板高度与型深之比;

A —— 舱口围板的剖面积;

W_c —— 距中和轴以上 Z_c 处的剖面模数;

W_d —— 甲板边线处的剖面模数。

表 4

$h\ddot{O} \text{ (}\dot{a}\text{)}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
$A \text{ (cm}^2\text{)}$	146.3	147.0	147.7	148.4	149.1	149.9	150.6	151.3	152.0	152.7
$W_c \text{ (m}^3\text{)}$	3.353	3.321	3.293	3.269	3.250	3.233	3.221	3.211	3.205	3.202
$W_d \text{ (m}^3\text{)}$	3.550	3.624	3.703	3.786	3.873	3.965	4.061	4.162	4.268	4.379
$h\ddot{O} \text{ (}\dot{a}\text{)}$	24	26	28	30	32	34	36	38	40	
$A \text{ (cm}^2\text{)}$	153.5	154.2	154.9	155.6	156.3	157.0	157.8	158.5	159.2	
$W_c \text{ (m}^3\text{)}$	3.201	3.203	3.208	3.215	3.224	3.236	3.250	3.266	3.284	
$W_d \text{ (m}^3\text{)}$	4.496	4.618	4.746	4.880	5.020	5.166	5.319	5.479	5.646	

注: 船长 $L_{bp}=86.7\text{ m}$, 型宽 $B=15.6\text{ m}$, 型深 $D=8.0\text{ m}$

表 5

$h \text{ (mm)}$	400	800	1600	2600	3600	4600	5000	5600	6000	6400
$h\ddot{O} \text{ (}\dot{a}\text{)}$	2.1	4.2	8.4	13.7	19.0	24.3	26.4	29.6	31.7	33.8
$W_c \text{ (m}^3\text{)}$	17.33	17.131	16.816	16.557	16.426	16.407	16.428	16.486	16.543	16.613

注: $L_{bp}=220.42\text{ m}$, $B=32.2\text{ m}$, $D=18.95\text{ m}$, 结构吃水 $d_s=12.5\text{ m}$, 方形系数 $C_b=0.675$

表 6

$h \text{ (mm)}$	400	800	1200	1600	2600	3600	4600	5600	6000
$h\ddot{O} \text{ (}\dot{a}\text{)}$	2.1	4.2	6.4	8.5	13.8	19.1	24.5	29.8	31.9
$W_c \text{ (m}^3\text{)}$	17.078	16.842	16.635	16.455	16.113	15.904	15.810	15.815	15.843

注: $L_{bp}=216.0\text{ m}$, $B=30.4\text{ m}$, $D=18.8\text{ m}$, $d_s=12.0\text{ m}$, $C_b=0.675$

表 7

$h \text{ (mm)}$	400	800	1600	2600	3600	4600	5600	6000	6400
$h\ddot{O} \text{ (}\dot{a}\text{)}$	1.86	3.72	7.44	12.1	16.7	21.4	26.0	27.9	29.8
$W_c \text{ (m}^3\text{)}$	28.414	28.072	27.502	26.979	26.639	26.457	26.416	26.434	26.472

注: $L_{bp}=279.0\text{ m}$, $B=32.22\text{ m}$, $D=21.5\text{ m}$, $d_s=13.5\text{ m}$, $C_b=0.682$

由表 3~ 表 7 及图 3、图 4 可以概括出如下两点:

1) 连续纵向舱口围板计入船中剖面模数后, 甲板边线处中剖面模数随舱口围板高度的增加而增大, 舱口围板越高甲板处的强度储备越大, 这是众所周知的, 对提高大开口集装箱船的扭转强度亦是有益的;

2) 连续纵向舱口围板计入船中剖面模数后, 规范要求的舱口围板计算点处的船中剖面模数不是单调变化的, 而是在 h/d 达到 24~ 28 时出现一个极小值。这说明, 当舱口围板高度与型深之比小于 24~ 28 时, 增加舱口围板高度, 反而使按规范要求计算的船中剖面模数减小, 所以应适当选择舱口围板高度, 在满足使用条件下舱口围板高度应尽可能低。

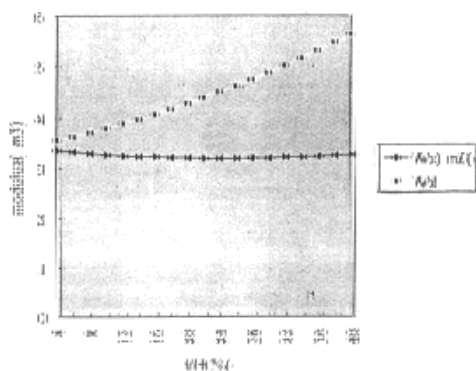


图 3

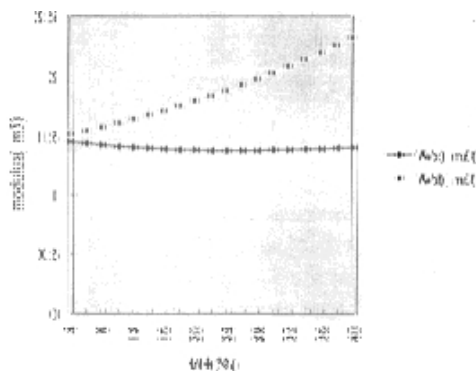


图 4

4 纵向舱口围板肘板的设计

舱口盖上堆放有集装箱, 当船体发生横摇时产生的惯性水平力分量 F_y 对肘板根部形成弯矩作用, 如图 5 所示, 因此对肘板根部的局部强度须特别

考虑。根据 BV 规范要求, 肘板根部的剖面模数不应小于:

$$W = \frac{7.85d}{m} 2F_y \quad (9)$$

式中 d ——舱口围板高度 (m)

$2F_y$ ——置于舱口盖上的全部集装箱所引起的横向惯性力 (KN)

m ——位于舱口一侧某一个货舱的舱口围板边肘板数

下面根据 DNV 规范计算一个货舱段舱口盖上所有集装箱产生的横向惯性力:

$$2F_y = 0.67 a_t Q \quad (10)$$

式中 a_t ——横向加速度 m/s^2

Q ——舱口盖上所有集装箱的总质量, 考虑到对箱重限制, 可取每个箱子重 15 t, 质量为 1320 t

例: 船长 $L = 279$ m $V = 22$ kn $C_v = 0.2$

$$C_W = 10.75 - \left[\frac{(300 - L)}{100} \right]^{3.02} = 10.65$$

横摇加速度 $a_{ry} = 0.3517 m/s^2$

$$g_0 = 9.81 m/s^2$$

$$a_0 = 3C_W \ddot{\alpha} + C_2 V \sqrt{L} = 0.3779$$

横荡加速度 $a_y = 0.3g_0 \cdot a_0 = 1.1123 m/s^2$

横摇角为 $5 = 0.4338$ 弧度

$$\text{则 } a_t = \sqrt{a_y^2 + (g_0 \sin 5 + a_{ry})^2} = 4.618 m/s^2$$

由公式 (10): $2F_y = 0.67 \times 4.618 \times 1320 = 4084$ (KN)

如舱口围板边肘板隔档设, 则 $m = 9$

$$W = \frac{7.85 \times 1.4}{9} \times 4084 = 4987.0 \text{ cm}^3$$

肘板根部实取 $\frac{20 \times 600}{25 \times 200}$ (剖面模数为 5228.2 cm^3)

在此特别注意的是, 该肘板的面板必须与甲板焊接, 所以在肘板趾端处甲板下方应设有刚性构件 (如纵骨等), 使面板能有较好的支承。

必须指出的是: 上述计算是针对传统的集装箱船而言的。对于现代大型集装箱船来说, 舱口盖大都纵向布置, 在两端的横向舱口围板处设有坚固的止滑装置, 该装置能有效地承受船舶横摇时传递过来的惯性力, 从而使得纵向舱口围板边肘板所承受的惯性力大大减小。从国外建造的 3800 TEU 集装箱船来看, 纵向舱口围板边肘板均四档肋距设置, 且无面板加强, 仅注意肘板根部的处理, 如图 6 所示。当然在舱口盖锁紧装置及支承块处的局部加强则另当

别论, 读者如有兴趣可参见 [6]。

5 舱口围板结构形式 尺寸及其过渡形式

大型集装箱船大都有较高的舱口围板, 完全能满足甲板上的舷边通道对高度的要求。对 4 000 TEU 级巴拿马型集装箱船来说, 舱口围板高度大都在 1 400 ~ 1 600 mm 左右。为满足船体中剖面模数要求, 舱口围板厚度应适当加厚, 船中围板厚度一般为 40~ 44 mm, 与上甲板厚度大体相同。同时每隔四档设置防倾肘板, 水平方向设置纵向加强构件。

舱口围板结构形式传统的做法是纵向连续舱口围板往上伸出水平面板一定高度, 如图 5 所示, 这样可以防止水进入舱内。但是对于大型集装箱船来说, 舱口围板与水平面板相交处为高应力集中区域, 须

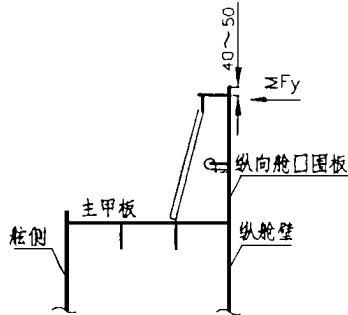


图 5

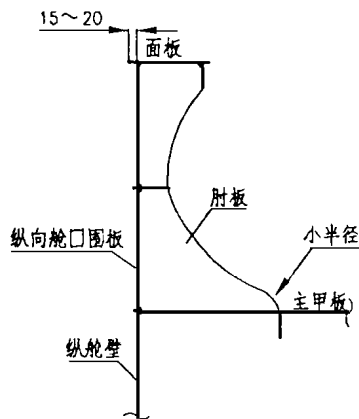


图 6

作特殊考虑。较好的做法是将水平面板伸入货舱约 15~ 20 mm, 且边缘要打磨光滑以减少应力集中及缺口效应, 其结构形式如图 6。另外, 纵向舱口围板与横向舱口围板的水平面板连接处亦须局部加厚, 且应有圆角, 如图 7 和图 8 所示。

对大型集装箱船来说, 机舱前端舱口角隅处翘曲应力很高, 舱口围板在机舱前端处连接应视具体布置采用适当的过渡形式, 以尽可能减小机舱前端处应力集中现象。

舱口围板与甲板室区域的过渡形式主要有三种: 第一种是将外板向上延伸, 使上甲板、舷侧、桥楼甲板及舱口围板形成封闭式结构, 端部约束较好, 可以参与抗扭作用, 如图 9 所示; 第二种是将舱口围板纵通全船, 舱口围板高度全船保持不变, 连续性好而无突变现象, 如图 10 所示; 第三种是所谓的甲板室结构, 舱口围板向上延伸至 NO 11 平台甲板, 形成开式结构, 无舷侧构件, 通道宽畅, 如图 11 所示。

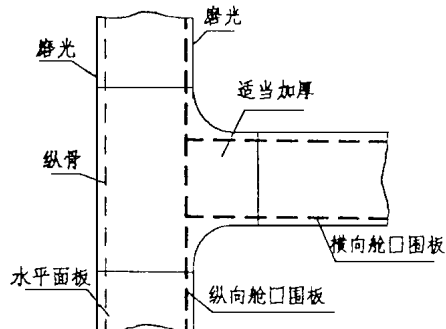


图 7

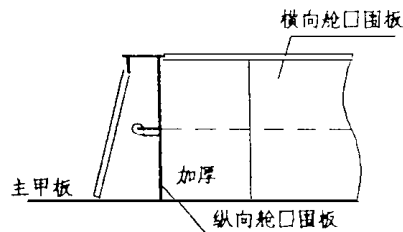


图 8

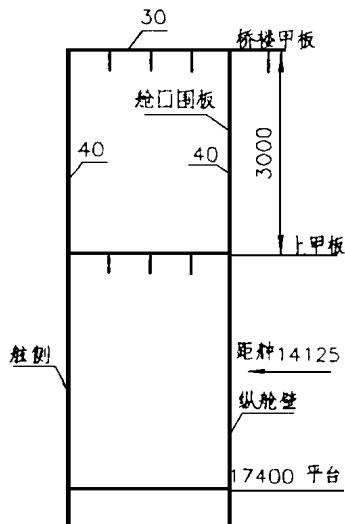


图 9

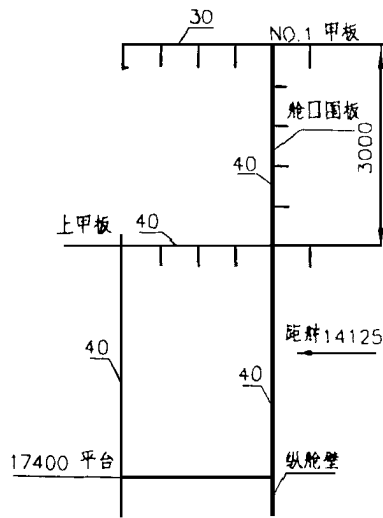


图 11

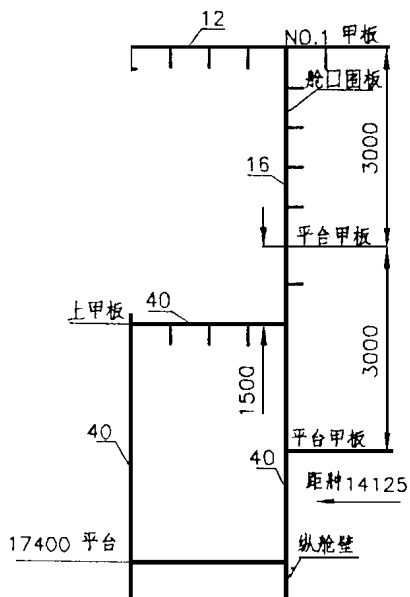


图 10

6 结 论

1) 超大舱口集装箱船由于甲板开口宽, 舷边狭窄, 甲板面积小, 舱口围板面积相对甲板来说所占比例大, 所以设置纵向连续舱口围板发挥其对船体梁中剖面模数的贡献是十分有利的。正如本文研究中指出的那样, 设一定高度的纵向连续舱口围板对总

纵强度及扭转变形有一定的贡献, 甲板边线处中剖面模数储备加大。就 4 000 TEU 级巴拿马型集装箱船可设 1 400~ 1 600 mm 高的纵向连续舱口围板, 厚度可取与上甲板相同。同时本文对机舱前端、货舱开口前端以及纵向和横向舱口围板结构过渡形式提出了一些比较好的设想, 可供设计参考。

2) 对于间断设置的纵向舱口围板, 设计中也是可行的, 横向通道方便, 但不容忽视结构过渡处易产生应力集中, 须谨慎处理局部加强问题。若舱口围板较高, 采取部分间断部分连续, 仍可提高甲板边线处的剖面模数储备, 亦可减小应力集中, 而且能提供横向通道, 对于这个问题有待于进一步研究。

参考文献

- 1 陈铁云, 陈伯真主编 船舶结构力学 国防工业出版社
- 2 陈伯真主编 薄壁结构力学 上海交通大学出版社
- 3 DNV. Rules For Classification of Ships Part 3 Hull and Equipment Main Class, 1994
- 4 BV. Rules And Regulation FO r The Classification of Ships Part ° 2A Hull Structure, 1996
- 5 LR. PASS Direct Calculation user's Manual, June 1992
- 6 50 000 DWT OPEN HATCH BULK CARRIER. de2 signed by MAR IC, 1996

CONTENTS

GENERAL

- The dream has come true—A review of hovercraft development *Chen Xiaodi* (4)

Abstract: The paper discussed in general the theory of the hovercraft, its state of the art of application and Development together with a view of future prospects of the hovercraft

Key Words: air-cushion vehicle Side-wall surface effect ship Development trend

SHIP TYPE SHOW CASE

- On The environmental protection ship and environmental dredging *Liu Housu* (6)

Abstract: A discussion is made on the ship type and major functions of the environmental protection Ship and the performance of the typical environmental dredging ships built by foreign shipyard. The paper analysed the future demand in China in the environmental protection ship market

Key Words: Environmental protection ship Environmental dredging Market prospect

- On the river and lake dredging in China and selection of anti-flooding first-aid ship
..... *Huang Jichang Zhang Wanxing, etc* (12)

Abstract:

Key Words:

STRUCTURE CONSTRUCTION

- On the strength analysis and way of continuation of hatch coaming of container ship with super-large hatch openings *Li Xiaoping Huang fangchang* (16)

Abstract: By using the 4000 TEU Panamax container ship as the base, and through calculation and comparing, the paper analyzed the loading on the longitudinally continuous hatch coamings of the super-large hatch opening under bending and torsion, their deformation characteristics and their functions in the hull girder bending and torsion, and put forward finally the suitable structural form of the hatch coaming and the way to realize their continuation

Key Words: Container ship with super-large hatch opening Overall longitudinal strength Sectional module Warping stress

MARINE ENGINEERING

- How to prevent fire hazard in engine room *Dong Xingzhang* (22)

Abstract: Fire takes place more frequently in engine room than in other places for the ship. So it is of significant importance to prevent fire in engine room.

Key Words: Engine room Fire Reason Prevention

MARINE ELECTRICITY