

多体船型海洋除溢油船的设计

摘要：随着海上油井的增多，海上运油的频繁，近年来，海上漏油事件不时发生，墨西哥湾漏油事件、渤海漏油事件等引起了全世界的热切关注。面对除油污困难，普通除油污方法效率不高，溢油扩散快的问题，笔者设计一种“多体船型海洋除油污船”，能够高效处理海洋溢油，并且更加节能。其充分运用了多体船操纵性良好，稳定性高，阻力峰不明显，行驶速度快，载重量大等特点，并根据伯努利原理与半透膜渗透原理，将半透膜材料和多体船独特的结构结合起来，利用海水压力分离油污和海水，更加节能。

关键词：多体船，海洋，溢油，分离，半透膜

引言

随着世界经济的迅速发展,人们对石油需求的不断增加,由此促使石油开采和运输行业蓬勃发展,而海上油田由于其强大的储存量始终是油气资源的主要来源。然而近年来的海上漏油事故频发,其污染面积大,扩散范围广,危害严重,尤其是2010年墨西哥湾外海油污外漏事件,2011年蓬莱19-3油田漏油事件等,更是引起了全世界的广泛关注。

图1显示了史上重大海上漏油事件的情况。可以看出,这些重大的海上漏油事故都产生了严重的危害,无论是远洋油轮漏油,还是海上油井溢油,都造成了大面积的原油扩散,导致海洋环境受到不同程度的污染。海上漏油危害严重,通常造成大量海洋生物(鱼类、哺乳类、海洋植物等)死亡,影响生态平衡;当其扩散至沿海,便会给沿海养殖业造成重大损失,同时也危害人类的健康。海洋漏油事故发生后,其影响通常是长久的,国家和地区需要投入大量的财力物力清除溢油。

图2、图3为被石油污染的海洋生物。

海上漏油事件频发的原因是:深海油气开发存在技术瓶颈。海上油气开采属高危行业,加之深海技术极其复杂,即使世界一流水准的石油公司也难以完全杜绝泄漏事故的发生。同时,他们也缺少应对海上油气泄漏事故的有效手段。目前,全球还没有成熟的技术可以迅速解决深水泄油事故的堵漏问题。此外,人为管理不善也是事故频发的重要原因。再加上近年来海上石油运输行业发展较快,相关导航,检测,补救的等方面存在不足,因而事故经常发生。

油品入海途径主要有:

- (1) 炼油厂含油废水经河流或直接注入海洋;
- (2) 油船漏油、排放和发生事故,使油品直接入海;
- (3) 海底油田在开采过程中的溢漏及井喷,使石油进入海洋水体;
- (4) 大气中的低分子石油烃沉降到海洋水域;海洋底层局部自然溢油等。

从图1中可以看到,重大海上漏油事故,一般是几千吨到几百万吨原油泄漏,不仅造成大面积海域受污染,海洋生态环境遭到严重破坏,而且损失大量宝贵的

原油。因而控制溢油扩散，清理油污需要快速和高效，同时，对泄漏的原油要做到尽可能的回收，以减小损失。

面对海上漏油事故，我们既要从根源上解决问题，加强管理。同时也要做好相应的补救工作。

在此，我们先来看一下各种海上漏油补救方法。

时间	事故情况
2007年11月	装载4700吨重油的俄罗斯油轮“伏尔加石油139”号在刻赤海峡遭遇狂风，解体沉没，3000多吨重油泄漏，致出事海域遭严重污染。
2002年11月	利比亚籍油轮“威望”号在西班牙西北部海域解体沉没，至少6.3万吨重油泄漏。法国、西班牙及葡萄牙共计数千公里海岸受污染，数万只海鸟死亡。
1999年12月	马耳他籍油轮“埃里卡”号在法国西北部海域遭遇风暴，断裂沉没，泄漏1万多吨重油，沿海400公里区域受到污染。
1996年2月	利比亚油轮“海上女王”号在英国西部威尔士圣安角附近触礁，14.7万吨原油泄漏，致死超过2.5万只水鸟。
1992年12月	希腊油轮“爱琴海”号在西班牙西北部拉科鲁尼亚港附近触礁搁浅，后在狂风巨浪冲击下断为两截，至少6万多吨原油泄漏，污染加利西亚沿岸200公里区域。
1991年1月	海湾战争期间，伊拉克军队撤出科威特前点燃科威特境内油井，多达100万吨石油泄漏，污染沙特阿拉伯西北部沿海500公里区域。
1989年3月	美国埃克森公司“瓦尔德斯”号油轮在阿拉斯加州威廉王子湾搁浅，泄漏5万吨原油。沿海1300公里区域受到污染，当地鲑鱼和鲱鱼近于灭绝，数十家企业破产或濒临倒闭。这是美国历史上最严重的海洋污染事故。
1979年6月	墨西哥湾一处油井发生爆炸，100万吨石油流入墨西哥湾，产生大面积浮油。
1978年3月	利比亚油轮“阿莫科·加的斯”号在法国西部布列塔尼附近海域沉没，23万吨原油泄漏，沿海400公里区域受到污染。
1967年3月	利比亚油轮“托雷峡谷”号在英国锡利群岛附近海域沉没，12万吨原油倾入大海，浮油漂至法国海岸。

图 1



图 2

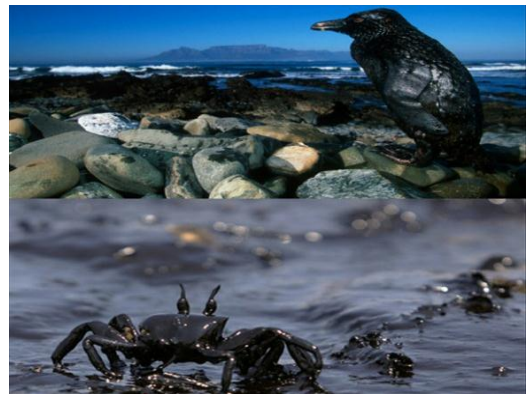


图 3

1.1 围油法

如图 4，围油法就是用围栏将漂浮在水面上的油圈起来，在防止其扩散的同时，使用船只牵引，将其聚拢，方便下一步的漏油回收再利用。围油法适用范围很广，但受天气因素的影响比较大，能见度过低以及其他不佳气象条件都会限制除油工

作的顺利进行，而且通过拖船拖曳围油栏清理漏油的围油作业持续时间一般较长。不过，围油法能最大限度的减少除油作业对海洋生态环境的二次影响。一般情况下围油法需要两艘拖船，至少一艘油回收船，还有一条很长的围栏。

1.2 分散剂法

分散剂法是海上漏油事故中用得最多的一种方法，其原理是降低油和水的界面张力，借助海浪的力量，在海水波动与湍流的作用下，将成片的漏油分散成小颗粒，稀释于整个水体中。分散剂法的优势是能够快速的将聚集在水面的漏油稀释在水体中，降低大量漏油对生物造成的危害，尤其是海鸟与海洋哺乳动物，但分散剂本身有毒，可能对海洋造成二次污染。图 5 为分散剂法原理示意。



图 4

1.3 生物降解法

生物降解法的目标就是提高海洋中微生物对石油烃类物质的分解速率。分解速率主要有三个限制因素：1. 嗜油微生物的数量；2. 氮、磷营养物质的供给；3. 对好氧石油分解菌的氧气供给。基于上述因素，生物降解法的具体操作分为两种途径，一种是利用海洋中本身就存在的嗜油微生物，供以营养物质与氧气；另一种途径是，在营养物质与氧气富足的条件下，向海中投入大量的嗜油微生物。图 6 为嗜油微生物。

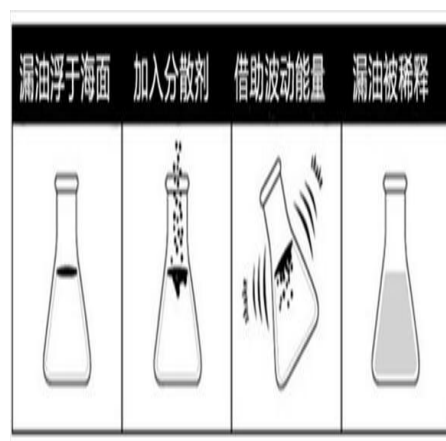


图 5

1.4 几种方法优劣分析

从以上三种常见的海上漏油补救方法中可以看出，这 3 种方法都存在这样或那样的不足。

首先看围油法。围油法一般需要好几艘不同类型的船只配合协调工作，即不便于单船独立作业，作业船只之间较为依赖，因而故障率也随之提高。而且围油法受天气因素的影响比较大，能见度过低以及其他不佳气象条件都会限制除油工作的顺利进行。另外，围油法利用一条很长的围栏围油，即定点围圈清理，由于围栏的长度是有限制的，一次围油面积不可能太大，面对大面积的海上溢油和较快的原油扩散，围油法围油次数一定不少，完成一次漏油事故的整个海面溢油的清理持续时间较长。

再看分散剂法。分散剂法是使用分散剂将成片的漏油分散成小颗粒，稀释于整个水体中，该方法虽然能够快速的将聚集在水面的漏油稀释在水体中，但却不能将原油回收再利用，对于重大漏油事件和大面积

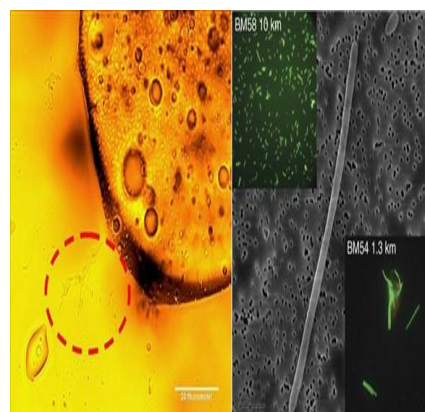


图 6

的溢油，一般是几百吨至上万吨的原油入海，不回收的话将损失更大，同时也要投入大量的分散剂。另外，分散剂本身有毒，会对海洋造成二次污染。

而生物降解法需要向原油扩散海区投入嗜油微生物，及其所需的营养物质和氧气，这样，对于大面积溢油，投入量是相当大的，同时，在投放前需要培养嗜油微生物，这样便增加了工作量。

因此，设计一种高效，节能，环保的除油污船很有意义和价值。以下便是笔者的设计。

核心创意

2.1 多体船简介

顾名思义，我们一般把具有两个或两个以上的船体，其上部用强力构架联成一个整体的船称为多体船（如图 7、图 8、图 9）。目前世界上已有的多体船主要有：双体船、三体船、四体船和五体船。同单体船相比，多体船具有更加优越的浮性和稳性、耐波性、机动性，能够大量装载，抗打击能力强，因此在民用和军用领域得到了广泛的应用。



图 7

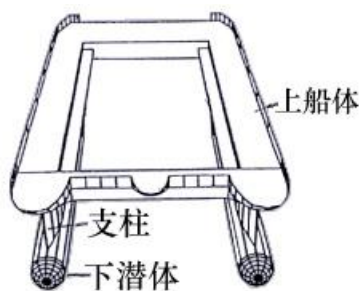


图 8



图 9

2.2 除油船总体结构

基于引言部分中的分析，设计的“多体船型海洋除溢油船”应具有以下功能或特点：1. 能快速驶达海上事发地点；2. 适用范围广，能在复杂海况下作业；3. 能高效清理油污，同时回收原油；4. 环保，对海洋环境不造成二次污染；5. 节能。

设计以穿浪多体船结构为依托，具体由船体、动力装置、推进装置、油污收集装置、分离装置和储油舱等几部分组成。下面是对各个部分的设计方案。

2.2.1 船体外形设计

利用多体船兴波阻力小，航行快，船体大，稳定性高等优点，我设计的除油污船外形和穿浪多体船外形类似。

考虑到除油污的高效率和船体大小的合理性，设计将以五体船为基础。

多体船排水量为：

排水量（公吨）=长×宽×吃水×方模系数（立方米）/0.9756（海水）或 1（淡水）（立方米）

2.2.2 动力装置与推进装置

通过对比各种类型的发动机和船舶推进器，笔者决定设计的多体船型海洋除溢油船的发动机采用柴油发动机，推进器采用螺旋桨，相比其他方案，这样设计使系统效率高、耗能小、易操纵、构造简单、价格低、重量轻，而且螺旋桨在水线以下而受到保护。如图 10，动力系统工作原理为：主机（柴油机①）经减速装置减速，锥形齿轮③、⑩相交轴间传动，传动轴系⑤传动，以驱动螺旋桨⑦（推进器），螺旋桨旋转时，桨叶不断把大量水向后推去，在桨叶上产生一向前的力，即推进力。螺旋桨桨叶像一小段机翼，桨叶上的水动力在前进方向的分力构成拉力，即船舶推进力。

由于除油污船机动性要求不高，也不需太大的推进力，因而主机我们采用一般的柴油发电机，螺旋桨采用普通 3 叶螺旋桨（如图 10-⑦），比起其他类型的螺旋桨，具有结构简单、易于布置、安装以及维修等优点。此外，在船尾设计两组柴油机和推进器（如图 11），这样，既可以用两台小型发动机代替大功发动机，又可以通过操纵两个独立的动力系统来改变船的航向（坦克变向原理），从而可以简化系统结构，如减少“舵”等，避免特种螺旋桨的使用。

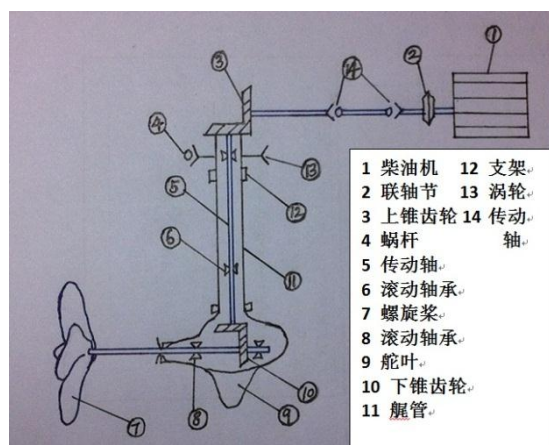


图 10

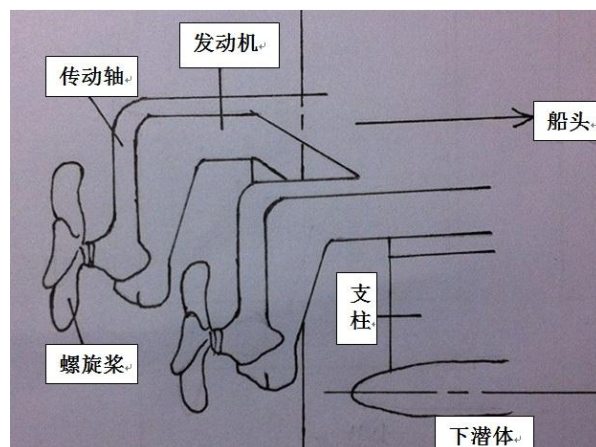


图 11

计算推进器功率

(1). 先计算柴油发动机的输出功率：

$$P = W/t = F_s/t = Fv$$

这里 v 是线速度，而在引擎里，曲轴的线速度 $v = \text{曲轴的角速度 } \omega \times \text{曲轴半径 } r$ ，代入上式得：

功率 $P = \text{力 } F \times \text{半径 } r \times \text{角速度 } \omega$ ；

而力 $F \times \text{半径 } r = \text{扭矩 } T$

得出：功率 $P = \text{扭矩 } T \times \text{角速度 } \omega$

因为 $1\text{Kw} = 1000\text{N}\cdot\text{m}/\text{s}$ ，所以在每秒钟内输入 P （单位 Kw） $\times 1000$ 的功，而角速度的单位是弧度/秒，在弧度制中一个 π 代表 180 度

所以

$$\text{功率 } P(\text{kW}) \times 1000 = 2\pi \times \text{扭矩 } (\text{N}\cdot\text{m}) \times \text{转速 } (\text{rpm}) / 60$$

即

$$P = T_n \times (360/60 \times 1000) = T_n/9550$$

而设计为使用两个柴油发动机组，因而发动机总输出功率为：

$$P_{\text{总}} = 2P$$

(2). 计算螺旋桨功率

$$P_{\text{桨}} = P \times \eta$$

P 为发动机输出功率， η 为联轴节和传动轴的效率。

螺旋桨的静止推力为：

$$Th = (D/10)^3 \times (P/10) \times (N/1000)^2 \times 22$$

船体变向原理

通过改变两组推进器的输出功率，即改变螺旋桨转速，使船的航向改变，增大左边螺旋桨转速或减小右边螺旋桨转速，船向右偏航；增大右边螺旋桨转速或减小边左螺旋桨转速，船向左偏航。两边的螺旋桨等速率转动时，船直线航向。

2.2.3 油污收集装置

海上除油污可分为两个主要步骤，即收集海水和溢油的混合液，然后将两者分离。

由于设计以五体船为依托。当除油污船在污染海域行驶时，海面漂浮的油污将进入船身五个单体之间的四个通道内。如图 12 所示。

在船尾布局可收放的倾斜板，如图 13、图 14 所示。当船处于非作业状态时（如驶往漏油事发地点过程中），收起倾斜板，减少船身阻力，以便船快速到达漏油地点，而作业时，将倾斜板放下，海水和油污的混合物进入单体之间，接着由倾斜板引导至分离舱，继而对混合液体进行分离。

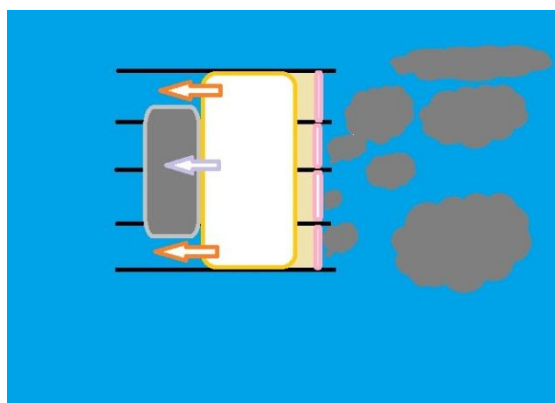


图 12

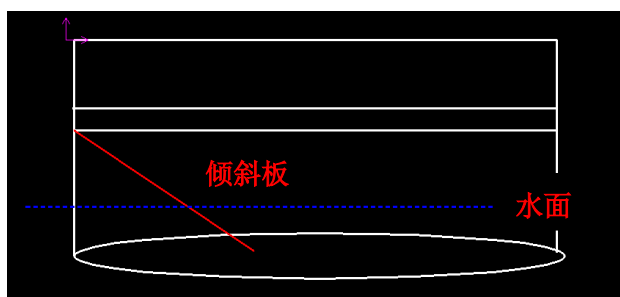


图 13

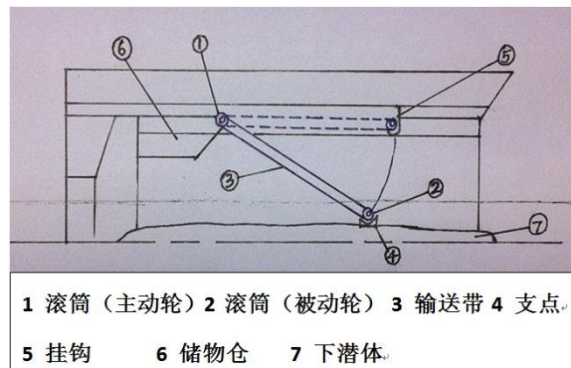


图 14

2.2.4 分离装置

笔者设计的分离装置根据半透膜渗透原理和伯努利原理。

海水和油污分离装置设计在五个单体上，单体内部有空间，用于储存要进行分离的液体混合物。单体外壁为半透膜材料，如图 15 所示，整个船体由五个这样的单体构成。

以下为半透膜渗透原理：

半透膜是一种只给某种分子或离子扩散进出，对不同粒子的通过具有选择性的薄膜（如图 16）。其只允许离子和小分子自由通过的膜结构，生物大分子不能自由通过半透膜，其原因是因为半透膜的孔隙的大小比离子和小分子大但比高分子小（如油脂分子）。半透膜现已大规模应用于海水和苦咸水（见卤水）淡化、锅炉

用水软化和废水处理，并与离子交换结合制取高纯水，乳品、果汁的浓缩以及生化和生物制剂的分离和浓缩方面。

在船体内已收集的混合液体与船体外海水间隔以半透膜，半透膜一方油污浓度高，另一方油污浓度低，水可通过半透膜渗透。为阻止水的移动在高浓度一侧所加的压力称为渗透压，记为 $P_{\text{渗}}$ （如图 17）。水的运动之所

以停止，是该压力与通过膜的水的化学势能相等所致。

（1）. 当对船体内的高浓度混合液所加压力等于渗透压时，即 $P_x = P_{\text{渗}}$ ，渗透将处于平衡状态，即半透膜两侧不进行物质交换。

（2）. 当对船体内的高浓度混合液所加压力小于渗透压时，即 $P_x < P_{\text{渗}}$ ，渗透为为正渗透（自然渗透），此时船体外的水分子将透过半透膜进入船体内。

（3）. 当对船体内高浓度混合液所加压力大于渗透压时，即 $P_x > P_{\text{渗}}$ ，渗透为反渗透（逆渗透），此时船体内的水分子将透过半透膜排除船体外。

分析以上 3 种情况，为达到排出海水，保留油污的目的，我们需使船体内混合液的压力大于渗透压，即半透膜两侧发生逆渗透现象。

为此，我们可根据伯努利原理，利用流体流速差产生的压强差，使船体内混合液压强大于渗透压。具体原理如下：

伯努利原理：

$$P_{\text{总}} = P_{\text{静}} + \frac{1}{2}\rho V^2$$

如图 18，当船以速度 V 向前行驶，可看作船体静止，水流以速度 V 流向船体。这时，根据 $P = \rho gh$ 知，海面附近的静止海水压力为 $P = 0$ （一般海况下可视海面静止）。对靠近船体的水流速度做平均处理，即近似认为贴近船体各点处水流速度是相等的，由伯努利原理知，贴近船体的海水静压力为：

$$P_1 = P_{\text{总}} - \frac{1}{2}\rho V^2 = 0 - \frac{1}{2}\rho V^2 = -\frac{1}{2}\rho V^2$$

而船内混合液的压强为：

$$P_2 = P = 0$$

故半透膜两侧的静压差为：

$$\Delta P = P_1 - P_2 = 0 - \left(-\frac{1}{2}\rho V^2\right) = \frac{1}{2}\rho V^2$$

反渗透时，水分子的渗透速率即液流能量 N 为：

$$N = Kh (\Delta P - \Delta \pi)$$

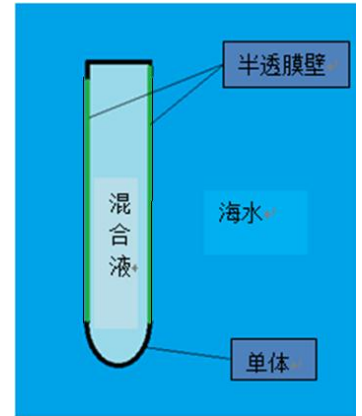


图 15

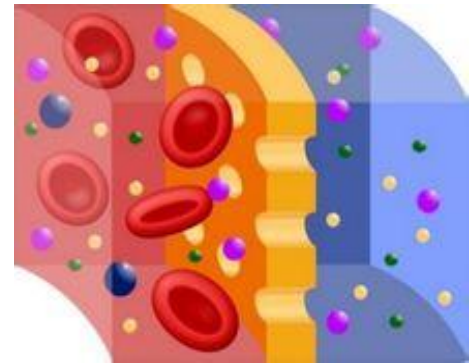


图 16

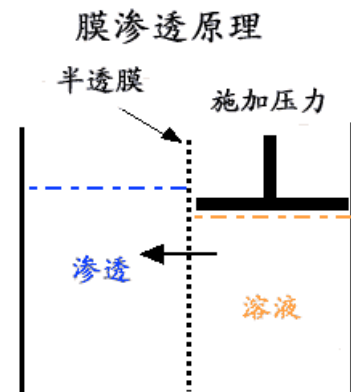


图 17

式中 K_h 为水力渗透系数，它随温度升高稍有增大； ΔP 为膜两侧的静压差； $\Delta \pi$ 为膜两侧溶液的渗透压差。稀溶液的渗透压 π 为：

$$\pi = iCRT$$

式中 i 为溶质分子电离生成的离子数； C 为溶质的摩尔浓度； R 为摩尔气体常数； T 为绝对温度。

由此可知，船行驶速度 V 越大，半透膜两侧的静压差 ΔP 越大，则水分子的渗透速率 N 越大，而随着渗透的进行，油污浓度增大，渗透压差将增大，此时，水分子的渗透速率逐渐降低，要使水分子的渗透速率不降低，或者使逆渗透继续进行，就要提高船的前进速度，这样显然是不经济的。

而且我们清理海洋溢油是以清理为最主要目标的，同时回收原油，回收时我们仅需对原油进行预浓缩即可，因为在船舶上进行高浓度的浓缩显然是不经济的，也没有必要。

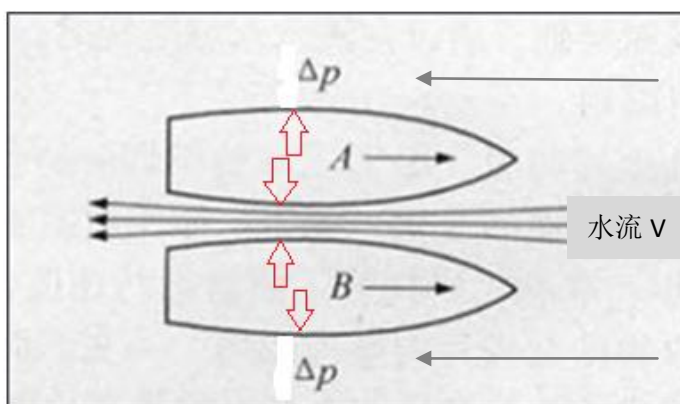


图 18

2.2.5 储油箱

经过收集装置收集海水和油污的混合液体，以及分离装置对其进行分离，得到预浓缩的原油后，需将较高浓度的原油（可能含有部分残余水）移至储油舱，这样便能使分离流程继续进行，同时及时转移高浓度原油有利于逆渗透，保持较高的渗透速率。

对多体船型除溢油船效率的初步计算

结合以上设计内容，我对所设计的多体船型除油污船进行了作业效率的初步计算。

双体船型除草船在非作业时航行速度为 35 节左右（相当于 65 千米每小时），这样，除溢油船就能快速到达溢油事故地点。在作业时前进速度约为 10m/s，而船体宽大约为 20m，因而，除草船每秒能清理 200 平方米的海域，每小时能清理 720000 平方米（即 72 公顷）的海域，而且，多体船载重量大，可储存的油污量大，能够长时间作业。因而，当多艘这样的除溢油船同时作业时，除油效率是相当可观的。

应用前景分析

海上漏油事故频繁发生，对海洋生态环境影响严重，社会关注度高。面对除油污困难，普通除油污方法效率不高，溢油扩散快的问题，笔者设计了“多体船型海洋除溢油船”，其具有能快速驶达海上事发地点；适用范围广，能在复杂海况下作业；清理和回收油污效率高；环保，对海洋环境不造成二次污染；节能等诸多优点。因而本设计应用前景广阔。

参考文献:

- [1] 史一鸣. 小水线面船姿态控制鳍面积分析研究[J]. 船舶工程, 2004. 05.
- [2] 黄鼎良. 小水线面双体船性能原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.
- [3] 王焕文主编. 舰船电力系统及自动装置. 第 1 版. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [4] 郑华耀主编. 船舶电气设备及系统. 大连: 大连海事出版社, 2005.
- [5] 刘宗德, 史际昌. 船舶轮机问答. 第二版. 北京: 人民交通出版社, 1985.
- [6] 国家标准局编. 电气制图及图形符号国家标准汇编. 北京: 中国标准出版社, 1989.