

# 船舶型线设计

钱文豪

## 1 概述

在船舶主要量度基本肯定之后,就需考虑型线及总布置等主要图纸。主要量度对船舶性能有很大的影响,但它们仅给出船舶形状的主要特征,最后确定船舶形状的是船舶型线。它与船舶的浮态、快速性、稳性、耐波性(横摇阻尼、波上运动特性和砰击作用)、操纵性、装载容积、内部布置乃至施工工艺、航道、使用美观和坞修等都有关系。相同的主要量度,不同的型线,有时性能相差会很大,因此必须认真仔细地设计型线。由于设计型线时需考虑的因素很多,有些要求又往往是互相抵触的,设计者必须加以权衡。分清主次,尽量先满足船舶的基本性能要求、经济性和营运需要,适当照顾其它因素,这样才能设计出适宜的型线。

目前船舶的型线还不能完全按理论来设计,通常采用根据型船型线、船模系列试验资料和自由设计法按实际要求、有关理论知识和经验加以修改而实现。在实际工作中,常用前两种方法。对有经验的设计师,从优秀母型出发适当修改而成的型线往往优于用船模系列试验资料设计的型线。这些方法均可借助计算机绘图机设计船舶型线。

近年来,数学方法表达船体型线和计算机在造船工业中的应用有了很大的进展,电子计算机使设计研究人员从艰辛的绘图工作中解放出来。建立在大量船模试验研究和实船性能试验结果组成的数据库的基础上开发成的智能化专家系统,是迅速、有效地开发最优秀船舶型线的有力工具。

## 2 型线设计考虑因素

在主要量度已定的前提下,型线设计一般需考虑下列几个方面:

### 2.1 船型

不同船型对型线的要求各异。例如远洋、沿海和内河船,单桨、多桨船等等,设计型线时选择母型应

注意选同类型的优秀者,双桨型线不能简单地用来设计单桨型线,反之亦然。众多实例已证实易造成快速性差、螺旋桨剧振等问题。经常航行于浅水中或吃水浅的船舶之型线,应设法降低艏散波,减少尾纵倾。如尖瘦首部水线、平缓首部纵剖面、采用平直尾纵剖面、尾部应肥胖些等。船尾型线应充分遮盖推进器以防吸气。后体型线设计更应注意保证推进器的供水。

设计型线时如能兼顾附体的布置则更好。如使尾轴架处于型线变化已趋平缓部分,轴架量度适当与桨配合合理,有利于减小附体阻力、保证桨平顺供水、减小桨引起的船尾振动等。

### 2.2 快速性

型线设计时通常在兼顾其它因素的情况下首先考虑快速性。实践证明:静水阻力最低的船舶不一定是静水快速性最佳的;静水快速性最佳的船舶往往在风浪中的失速不为最小。

#### 2.2.1 推进性能

船模自航试验表明,如横剖面面积曲线保持不变,前体的剖面形状对伴流的影响不大<sup>[1]</sup>。对单桨船,不同型式的后体横剖面以不同方式影响船之阻力和推进效率<sup>[2]</sup>。后体V型横剖面在各种 $F_n$ 下阻力均最小,U型较高,常规型球尾最高。伴流分布则反之,V型最不均匀,U型次之,球尾最均匀。伴流分布越均匀,船之推进效率则越高,螺旋桨引起的振动也越小。

后体剖面形状对推进效率的影响大于对阻力的影响。因此,单桨船大多采用U型后体剖面或球尾以节省主机所需功率,球尾的缺点是生产成本高些,设计时须权衡。现代快速性优秀的中低速船舶前体大多采用V型横剖面,后体采用U型剖面带小球尾<sup>[3]</sup>。

双桨船的船尾形状对推进效率和振动影响小,因此双桨船采用阻力性能优良的V型横剖面。

#### 2.2.2 风浪中的失速

船越肥胖在风浪中失速越严重。与平直或外凸的首部水线相比,凹形首部水线的船失速更严重。但

对很宽、进流段长度较短、进流角又较大的船,过分外凸的首部水线在迎波时,由于波在船体上的反射,反易遭受过大的附加阻力<sup>[4]</sup>。

船舶在风浪中的失速与船舶的纵摇和垂荡等运动有密切关系。船舶摇荡越剧,失速也越大,而且驾驶员为避免过剧的摇荡和上浪往往人为地减速,设计时应尽量减少纵摇<sup>[5]</sup>。

表1 不同船长海船首部型线设计要点

船长或排水量	船长波长比 $L/\lambda$	船在波上情况	型线设计重点	设计要点	注意事项
$L \leq 150\text{ m}$	$> 1.5$	自摇周期较大,波上摇荡幅值较小,上浪现象不严重。	更多地考虑快速性。	前体可采用较U型横剖面 and 较小进流角。	首底避免过宽,尤其是吃水较浅时,首底适当加强,以防砰击。
120~150 m	$0.7 \sim 1.5$	首部可能上浪,首底受砰击,遇风浪后失速明显。	首部型线权衡很重要。	采用V或中V型横剖面、前倾首柱,切去首踵,以改善耐波性,减少砰击;若以快速性为主考虑对 $F_n 0.18 \sim 0.25$ 的船舶采用U型前体横剖面,减少进流角,并作首底加强 <sup>[2]</sup> 。	
5 000~8 000 t	$0.7 \sim 1.5$	多为低速船,较肥胖,风浪中失速最多,谐摇机会较多。	首部型线很重要。	前体以V型横剖面为好。	
700~1 500 t	$< 1.5$	常在海中作业,有时要求八级风中执行任务。 $L/\lambda$ 在 $0.7 \sim 1.5$ 之间的小型船舶,迎浪航行时,船首有钻浪趋势。	设计时以耐波性为主要考虑因素。	采用V型横剖面,切去首踵,显著前倾首柱(有时可达30°,采用满载水线以上较丰满型线,增加些(但不过分)前部横剖线外飘,船首几站横剖线在水面附近尽量采用直线形,以减少纵摇幅、首甲板上浪和首底砰击。	

从耐波性角度分析,型线设计考虑要点如下:

2.3.1 中横剖面形状

应权衡耐波性和快速性。采用较大的中横剖面系数 $C_M$ 和减小舭部半径可增大横摇衰减系数,减少横摇幅。要注意避免过大的 $C_M$ ,否则纵摇加速度较大。舭部半径过小,横摇加速度增大。舭部折角线定位不当会影响航速。采用大的舭部半径可使横摇缓和,对快速性有些好处。绝大多数现代船舶已不采用舭部升高,仅在 $C_M$ 较小的小型船舶从横摇和航向稳定性考虑,仍采用较大的舭部升高。

2.3.2 首部形状

首柱前倾,切去首踵,首部水线宜为直线。横剖

2.3 耐波性

船舶型线对横摇阻尼、船在波浪上的运动特性和砰击作用有决定性的影响<sup>[2]</sup>。船舶长度不同,在波浪中运动特性差别很大<sup>[6]</sup>,设计型线时应区别对待<sup>[7]</sup>(表1)。

面V型,水线以上适度外飘。应避免过分外飘,否则可能引起大的纵摇加速度、局部砰击<sup>[2]、[4]</sup>和频繁的溅水现象。要保持首底部尖瘦。

2.3.3 尾部形状

巡洋舰尾尾波小,横剖面V型为好,底部过平易砰击。后体肥瘦应与前体相适应。后体丰满会使纵摇中心后移,大大增加船首摇幅和上浪。尾部水上部分外廓线宜后倾,顶视尖形,以防止倒航时上浪<sup>[2]、[4]、[7]</sup>。

2.3.4 水线面形状

垂荡阻尼与水线面系数 $C_{WP}^{3/2}$ 成正比, $C_{WP}$ 还对抗动力有影响。通常 $C_{WP}$ 大而方形系数小的船垂荡严

重。 $B/T$  大的船垂荡较大, 采用瘦削的水线面可减少垂荡荡幅。船之纵摇周期一般都不大, 纵向谐摇往往难以避免。瘦削的水线面使谐摇发生于波长较短的波浪中, 减少最大纵摇角。 $L/\lambda$  在 0.7~1.5 之间的船舶, 其满载水线面的漂心尽可能位于浮心或中站之前, 以使船迎浪航行时能随波升俯, 不易钻浪<sup>[4][8]</sup>, 但常难以做到。在满载水线附近的水线面形状不宜变化太大。

2.3.5 干舷和舷弧

富裕的干舷和大的舷弧能明显地改善耐波性, 减少上浪和溅水现象<sup>[6]</sup>, 缺点是增加造价, 作业不便。

船舶的风压中心和水压中心的侧向距离应尽量小以减少首摇, 设计小船时可调节尾倾来减少此侧向距离。

2.4 稳性与纵倾

船舶主要量度和布置确定以后, 型线对稳性影响不大。

现代集装箱船等重心较高的船舶常采用极 V 型横剖面以提高浮心, 加大水线面系数从而增加横稳心半径来满足稳性要求。

增加干舷, 采用外倾、外飘的横剖面形状可增加储备浮力, 对大倾角稳性有利, 但须与耐波性、经济性等一起权衡。

设计水线附近或货船满、轻载水线之间的横剖面型线宽度变化不应过大, 以免使不同装载情况下的稳心高变化很大, 对稳性和船之垂荡运动不利。

在绘制型线图时应把其它装载情况下的浮心纵向坐标  $X_{CB}$  与满载的一起考虑, 防止纵倾太剧。可通

过改变横剖面形状或改变排水量的垂向和纵向分布来解决。

2.5 操纵性

船尾形状, 特别是尾框形状对操纵性有极大影响<sup>[4][6][9]</sup>, 设计型线时应仔细权衡。

2.5.1 回转性和航向稳定性

表2为各种因素对船舶操纵性的影响<sup>[4][6][9]</sup>。尾鳍对船舶操纵性有巨大影响, 略为增加些尾鳍面积, 航向稳定性可获较大改善, 回转直径则明显增加。文献[11]中所述的水动力附加节能装置——不对称整流隔板用于 35 000 DW T 油船使该船在珠江内淌航航向稳定性明显优于其它肥大型船。

表2 各种因素对船舶操纵性的影响

因 素		航向稳定性	回转性
$A_R/LT$	增加	好	好
$C_B/(L/B)$	增加	差	好
$B/T$	增加	差	好
舵 部	升高	差	好
单桨单舵改成双桨单舵		差	差
尾纵倾	增加	好	差
$T/H$	减少	好	差
首踵面积	减小	好(倒航时变差 <sup>[10]</sup> )	差

2.5.2 肥大型船的操纵性

相当一部分现代运输船从经济性考虑采用肥大船型, 为提高推进效率减少桨引起的振动采用半悬挂舵、开式尾。使得肥大型船航向稳定差, 特别是小舵角低速或淌航时船不稳定。从图1<sup>[6]</sup>可见, 这种船尾的不稳定回线环宽明显大于以往的闭式船尾。

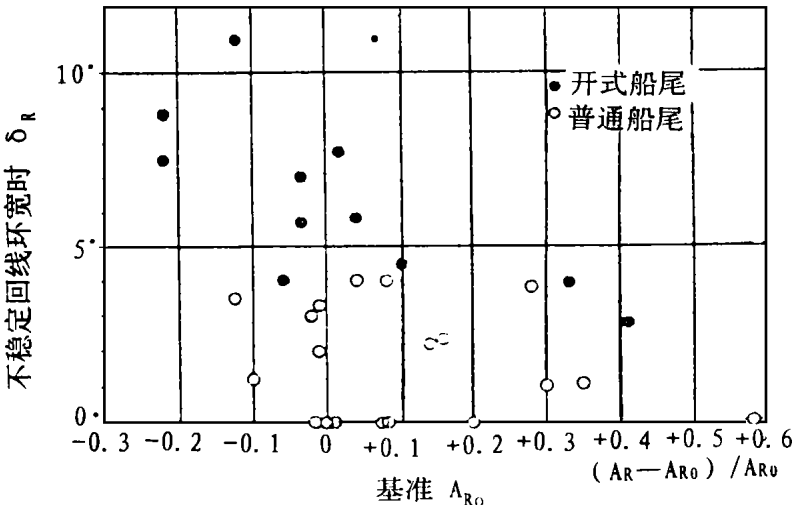


图1 肥大型船逆螺线操纵试验不稳定回线环宽

设计这类肥大型船型线时: a) 桨舵尽量向尾布置; b) 尽可能削瘦尾部型线; c) 调整舵、桨、船尾到适当间隙<sup>[12]</sup>; d) 采用尽可能大之舵面积; e) 采用可提高推进效率的整流隔板<sup>[11]</sup>, 或采用特种操纵装置。

## 2.6 工艺与美学

在型线设计中应适当考虑工艺性, 方便日常保养、维修和坞修。水上部分型线还应考虑美观, 特别是首尾柱拱形外廓线、飞剪式等给人以动感、乘风破浪等遐想余地。

设计型线在不影响性能的情况下尽可能多地采用可展开曲面, 如尾封板、甲板中部用平板等等, 有时还可采用仅由平面和单向曲面组成的简易船型, 以缩短建造周期, 降低造价。首、尾柱、踵部的船底型

线应方便下水、坞修时墩架的铺设。

## 2.7 内部布置与装载容积

目前设计货船往往要求货装得尽量多, 如集装箱船, 常考虑箱载来光顺型线, 有时会造成前后肩特别明显。更好的办法也许是以流体动力性能优秀的船型作为母型进行变换, 直至按要求包容下所有集装箱货, 然而这种“包容集装箱”的做法并不可取。对集装箱船, 这时可允许近船体的角隅处理成如图2<sup>[2]</sup>所示的突出船体型线的良好流线形体。这种做法的好处可使整个型线合理、快速性良好。突出流线形体阻力增加很小, 比包容它们增加的量小得多。在船前部突出几乎不增加阻力, 位于船体后部略产生些水流分离。

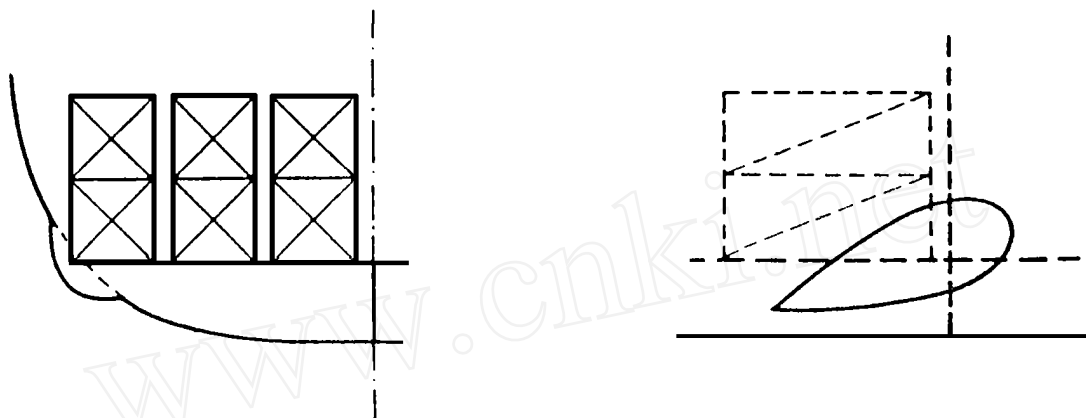


图2 集装箱堆角隅船壳局部处理示意图

## 2.8 振动

船体振动的危害众所周知, 振源为螺旋桨、主机、辅机、波浪等。调查表明螺旋桨作为引起振动的主要原因约占80%。一旦发生振动, 再想办法去解决就相当困难, 因此在设计之初就应加以考虑。减小螺旋桨引起振动的措施为设计优秀的船尾型线, 给螺旋桨创造一个良好的工作流场, 防止桨叶与船体间隙过小; 设计与主机匹配良好的低激振力螺旋桨<sup>[13]、[14]、[15]</sup>; 采取结构措施避开振源频率, 并使结构刚性不出现突变<sup>[15]</sup>。

对于建成后才发现剧振的船舶, 如确是伴流场不均匀所致的话, 则可采用附加水动力装置<sup>[2]</sup>或喷水、喷气等<sup>[14]</sup>措施改善伴流场; 重新设计大侧斜桨、叶梢卸载螺旋桨<sup>[14]</sup>取代原螺旋桨或修割桨叶; 在螺旋桨上方船底适当位置处设置吸振穴, 以减小螺旋桨干扰力的传递<sup>[16]</sup>。

可采用的附加水动力装置有补偿导管<sup>[17]</sup>、整流

导管<sup>[18]</sup>、桨前整流鳍<sup>[19]</sup>、桨前扇形整流鳍<sup>[20]</sup>、整流隔板<sup>[11]</sup>、导流顶鳍<sup>[21]、[22]、[23]</sup>、整流隧道、减艏涡鳍、抑空气泡鳍、阻断叶梢涡垂向鳍、旋涡发生器、前置叶轮<sup>[14]</sup>等。节能尾轴架<sup>[24]</sup>可减少尾轴架船舶螺旋桨的激振力。

在采取措施前应仔细分析桨盘面处伴流场, 弄清是哪个区域的伴流场不均匀而引起螺旋桨激振, 同时考虑各船的具体情况和尾框、桨、舵布置情况采取相应措施来改善之。如螺旋桨正上方处有伴流峰, 可采用整流导管、导流顶鳍等; 如艏涡进入桨盘面并出现伴流峰, 可采用补偿导管、桨前扇形整流鳍、减艏涡鳍等; 由桨叶梢涡引起的振动, 可用垂向鳍、叶梢卸载螺旋桨。有时, 如快速船, 螺旋桨引起的振动严重而伴流场分布较均匀, 此时应在减小螺旋桨诱导的振动方面采取措施。

对于使桨叶和船体间隙减小的措施, 应注意它们改善伴流峰区的得益是否超过间隙减少而带来的

不利。

有些改善伴流场的措施在快速性、操纵性或增加在波浪上的阻尼等方面亦有得益,如整流导管、整流隔板等等;但有些措施会增加阻力,降低船舶的推进效率,如旋涡发生器据报道增加阻力达17~25%<sup>[14]</sup>;有些措施在螺旋桨周期干扰力的作用下会产生局部振动,如[19]所述的桨前整流鳍,在此不一赘述,设计时应仔细权衡。

### 3 型线的权衡设计

主要量度决定以后,虽然绘制型线时自由发挥的余地较小,但在排水量沿船长的分布、中横剖面系数、首尾端形状等方面仍有重要而积极的工作可做。

设计横剖面面积曲线有三种方法:根据型船、系

首尾端形状的选取自由度较大。设计型线时需特别注意如下各小节讨论的内容。

#### 3.1 横剖面面积曲线

##### 3.1.1 横剖面面积曲线的作用

横剖面面积曲线(图3)表征船舶横剖面面积沿船长的分布,据此用近似积分法可算出被设计船的排水体积,如与重量估算有出入,应适当调整横剖面面积曲线。该曲线所围面积形心的纵向位置即船之浮心纵向位置 $X_{CB}$ ,改变横剖面面积曲线纵向分布可调节 $X_{CB}$ 。该曲线所围面积与其长方形面积之比即为棱形系数 $C_P$ 。它对船舶剩余阻力影响大,宜从快速性和经济性权衡选取。横剖面面积曲线是绘制型线图的基础,它必须光顺,否则对阻力性能影响大。

去流段长度的推荐值<sup>[2]</sup>:

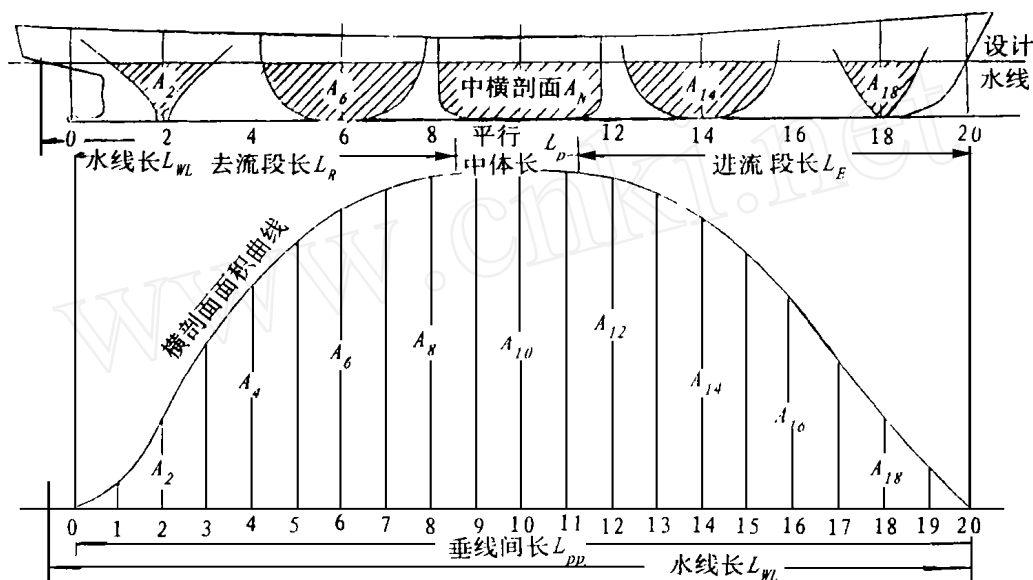


图3 横剖面面积曲线

列试验资料的横剖面面积曲线按实际需要作变换和自由设计法,分别在4.5和6中讨论。

##### 3.1.2 进流、去流段长度和前、后肩形状

正确选取与平行中体和浮心纵向位置相关联的进流、去流段长度以及处理好前、后肩的形状可明显改善船舶的阻力性能。为使首波和前肩波产生有利干扰,进流段长度应等于首兴波波长或其倍数<sup>[25]</sup>。

$$L_E = 0.1694V^2 \quad V \text{—航速(kn)}$$

$$= 0.64V^2 \quad V \text{—航速(m s}^{-1}\text{)}$$

$$= 6.3Fn^2L_{PP}$$

$$A_{Isen} \text{ 建议}^{[2]} L_E = 0.217V^2 \quad V \text{—航速(kn)}$$

$$A_{Isen} L_R = 3.20\sqrt{BT/C_B}$$

其中 $L_E$ 和 $L_R$ 的定义见图73,  $A_{Isen}$ 推荐的 $L_E$ 、 $L_R$ 包括了横剖面面积曲线平行中体旁曲线弯曲最急剧部分。

上述推荐值只在一定条件下才可满足。

前后肩均不宜过于明显。有时放大首尾部分排水体积以适当减少前后肩突可降低船舶阻力。

##### 3.1.3 重心、浮心纵向位置

重心纵向位置理论上应与阻力性能最佳的浮心纵向位置相对应。最佳浮心位置为 $C_B$ 和 $F_n$ 的函数,常有较大的选择范围,这个关系由阻力试验确定。自

航状态最佳浮心位置更靠后些, 因为浮心位置后移会导致兴波阻力减小, 形状阻力增加。自航试验最佳浮心位置后移虽增加了形状阻力但同时提高船身效率而改善推进效率, 即快速性最佳的浮心位置应略比阻力最佳浮心位置后移些。

实际上, 重心和浮心, 即使在设计状态下也常常是不重合的。这种偏离一般发生在不同吃水等情况时装均质货的一些装载状态, 如所谓的开闭互换式遮蔽甲板船。由于各种装载状态下的重心位置变化通常是很大的, 轻载常尾倾, 重载则反之, 所以重心与浮心纵向位置相重合是很难做到的。要按快速性最佳的浮心位置尽量调整重心, 使之位于所推荐的范围内。总体设计时, 要进行权衡, 如果对快速性和所需功率的考虑使容积和空间分配上牺牲过多时, 就有必要根据重心位置来选浮心位置, 通常在重心和浮心两者极端值之间取折衷值。当重心和浮心纵向位置不一致时, 船就会纵倾, 但这种纵倾很小, 常约为两心距离的三分之二。

对目前常见的尾机型船, 部分装载或空载总处于螺旋桨浸深更佳的尾倾状态。

#### 3.1.4 载重量的重心

为使纵倾不过份依赖于装货, 可用下列方法将载重量重心后移, 即向快速性最佳的浮心方向移动, 但移动量值有限。

(1) 对较重的货物, 货物重心尽可能向船舫移, 措施如下:

- a) 前部不设舷弧, 无货舱短首楼;
- b) 防撞舱壁尽可能向后设置;
- c) 抬高前部货舱的双层底;
- d) 选用基座底面较小的推进系统, 以便使机舱前舱壁尽可能向后;
- e) 小型货船选用尾楼甲板船型。其优点容易满足干舷规范, 机舱空间多、改善驾驶视线; 缺点是空载出港尾纵倾大。

(2) 储藏舱容积取得比所需的大, 以便纵向移动燃油和淡水来调整纵倾。

(3) 对不占用全部货舱的散装重货, 可适当地布置货物来调整重心, 这种做法在装载矿砂和原油等货物时同样适用。原油船前舱大多全空或部分装油, 不能随意分布重、轻杂货, 一般装运均质杂货的船, 满载时浮态应接近正浮。集装箱船有时允许随意布置, 但主要是垂向布置为多。

### 3.2 船首和前体

船首按其型式分, 有普通首、球首或特种首等数

种。普通首根据横剖面形状和首柱外廓线还可作进一步划分。

#### 3.2.1 首柱外廓线

直立型首(图4)直到20世纪30年代还很常见, 以后水上、水下部分首型逐渐越来越倾斜。切除首踵可减少阻力, “梅尔”船型就是切除首踵, 配以V型横剖面来减小摩擦阻力的。

现在常见的是前倾型首。与直立型首相比有如

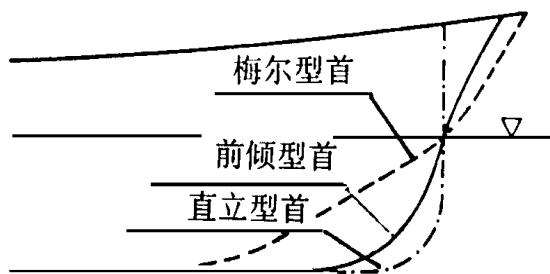


图4 各种首型(不带球鼻)

下优点: 减小甲板飞溅淹湿; 增加储备浮力; 较好的防撞作用。两船相撞, 水上部分损坏概率更大; 更美观, 特别是飞剪型首。

总长受限制的船, 特别是内河船, 首柱前倾较小。

#### 3.2.2 前体横剖面形状

对于船舶横剖面形状的特征, 常用字母U、V作形象刻画, 通常不用定量方式来表达特征U、V的程度。

下面就设计水线下横剖面面积、型深和水线以上甲板高度方向的横剖面与中线面之间的外飘角均相同的情况下(见图5)比较极U和极V型横剖面的优缺点。

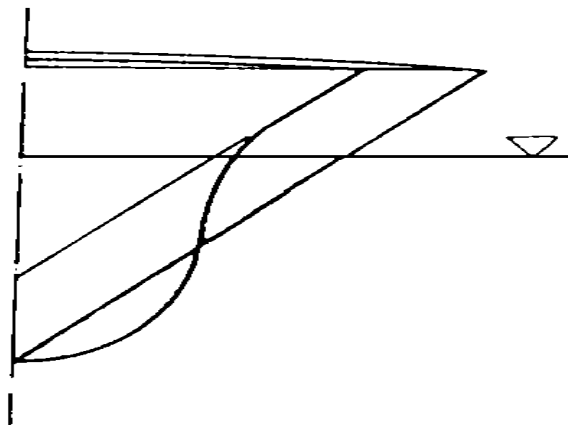


图5 水下横剖面面积相同的前部U型和V型横剖面

- (1) V 型横剖面的优点
- 水线以上部分的空间体积更大;
  - 设计水线处宽度更大, 从而有关的水线面惯性矩和浮心高度也较大, 这两者都增大横稳心垂向坐标值;
  - 湿面积较小, 钢料重量较轻;
  - 曲面曲率减缓, 外板加工费较低;
  - 耐波性较好, 因为储备浮力较大, 砰击的力度和频率更小;

f) 甲板面积更大——对集装箱船的前部舱口宽度有特别重要的意义;

g) 在给定排水量的条件下压载航行, V 型剖面吃水较大, 方形系数比 U 型剖面船小。V 型横剖面船舶在小排水量时的阻力比 U 型小, 相同功耗时航速更高, 而且达到要求浸深所需的压载量也少。

### (2) V 型横剖面的缺点

前体采用 V 型横剖面摩擦阻力较小但兴波阻力较大, 通常  $F_n$  在 0.18~0.25 范围内 (与其他船体形状因素亦有关), 总阻力比 U 型横剖面高。只有在下面两种情况下, 前体采用 V 型横剖面才对阻力起有利作用:

- 普通货船  $F_n < 0.18$  或  $F_n > 0.25$  的范围内;
- $B/T > 3.5$  的船舶在更大的  $F_n$  范围内。

### (3) 比较前体 U 和 V 型横剖面的试验研究

哥德堡造船学院对一艘船模变换 U 和 V 型前体横剖面 (无球首) 进行了试验研究<sup>[2]</sup>。这两个方案的横剖面面积曲线相同, 主尺度比值均为:  $C_B = 0.675$ ;  $C_M = 0.984$ ;  $B/T = 2.4$ ;  $L/B = 7.24$ 。所有“极 U 型横剖面”在曲线转捩点处都成垂直的切线, 而“极 V 型前体”在 19 站附近则接近于直线 (图 6)。结论如下:

a) 在 V 型剖面阻力更佳的范围内, 应使用极 V 型横剖面, 以充分发挥 V 型横剖面的全部优点 (图 7)。

b) 在 U 型剖面阻力更佳的范围内应权衡其优缺点。在适用范围两端处应使用中间型的剖面形状; 在 U 型横剖面流体动力性能更优的中部范围, 如总体设计允许, 宜采用近乎极 U 型横剖面。新一代货船各速度范围均偏爱采用前体 V 型横剖面, 因为易满足甲板堆放集装箱的要求。

上述结论是从以前常用的  $L/B = 7$  左右的船模比较试验得出的, 而对目前流行的  $L/B = 5$  左右的船舶, 尚未见比较前体 U、V 型横剖面的试验研究,

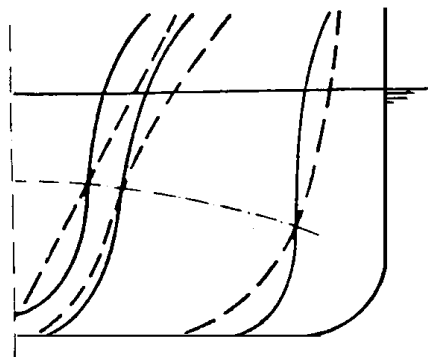


图6 前部极 U 和极 V 型横剖面形状  
(哥德堡造船学院比较模型)

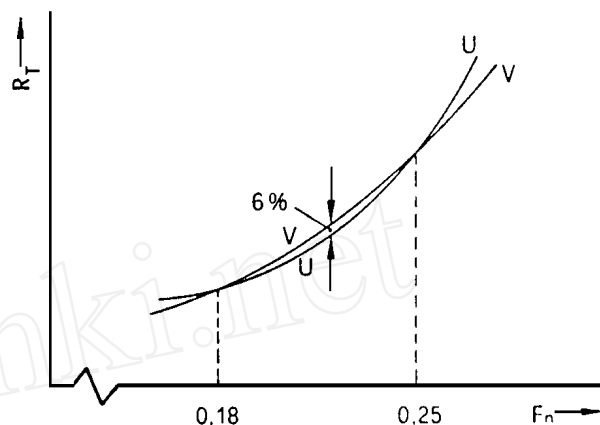


图7 无球首船 U 型和 V 型前体横剖面的典型阻力曲线 (所有阻力曲线都相交于两点)

球首对 U、V 型横剖面的影响也未见有所报道, 对现代下部呈楔形的球首配 V 型前体横剖面似更合适。

### (4) 水线以上部分前体横剖线的外飘

航运公司提出的各种要求经常使前体水线以上横剖线有明显的外飘, 如船首甲板上装载集装箱、门式起重机轨道一直伸到前部舱口、汽车、火车渡船首柱以后的一定距离内设计水线附近设允许的最小通道宽度等。

与前体横剖线小外飘相比大外飘有以下几个优点: a) 减少甲板飞溅淹湿; b) 增加局部储备浮力; c) 减少纵摇摇幅; d) 使复原力臂曲线升高。缺点: a) 处于首波中会增加阻力; b) 会产生飞溅; c) 需用较多的结构材料; d) 可能引起大的纵摇加速度和砰击。

增加前、后体横剖线在水线以上部分的外飘, 对提高复原力臂曲线效果良好。货船首楼舷边外飘角

可达40°。

### 3.2.3 满载水线的进流角

横剖面积曲线决定以后,满载水线形状最为重要,它对剩余阻力影响很大。决定其形状的主要因素为满载水线面面积、平行中体长度、首尾端形状及首端进流角。

而满载水线首部形状的一个主要特征量为半进流角  $i_E$  (图8),它与横剖面形状、横剖面积曲线和船宽等有关。如型线设计采用自由设计法,  $i_E$  可从表

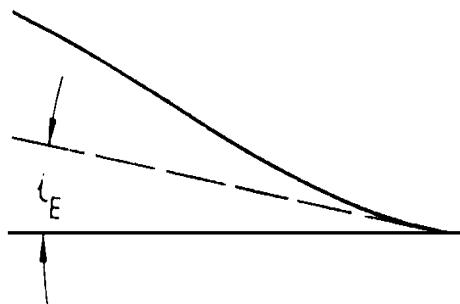


图8 水线半进流角

3选取。

表3 满载水线半进流角的推荐值<sup>[2]</sup>

$C_P$	$L/B = 7.0$ 时的 $i_{E0}$	$L/B \neq 7.0$ 时的计算公式	备注
0.55	8	$\operatorname{tg} i_E = \operatorname{tg} i_{E0} \cdot \frac{7}{(L/B)}$	推荐值主要适用于无球首船
0.60	9		
0.65	9~10		
0.70	10~14		
0.75	21~23		
0.80	33		
0.85	37		

现代船舶前体多为V型横剖面,所用的水线半进流角比表列值略大些。

### 3.2.4 设计水线首端的形状

设计各条水线时要考虑首端形状的圆弧半径,设计水线附近及水下的水线首端圆弧半径应尽可能小,其尖锐程度取决于结构型式。首柱用钢板轧圆的结构,其圆弧的最小半径为板厚的3~4倍。采用型钢首柱,首端可尖锐,如圆钢棒状首柱(图9)。圆钢的直径应稍大于该处列板总厚度,以防止冰块等对焊缝的磨损。图示之例,型线图上的端点不到首垂线。型线宽度与首柱宽度不一致,而首垂线仍在首柱圆钢的外缘。

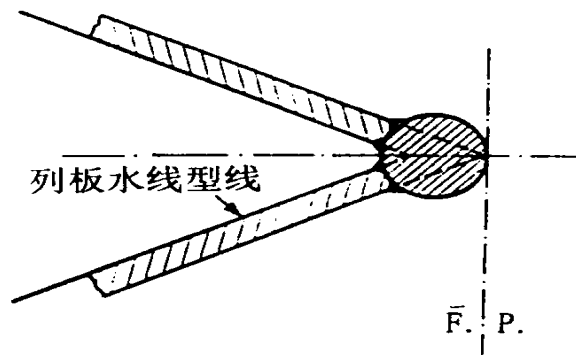


图9 设计水线端部的圆钢棒状首柱

露天甲板处亦应采用小的首柱圆弧半径,否则波浪中的阻力随前端圆弧半径的增加而迅速增大。

$C_B = 0.72$ ,  $R_{\text{甲板}} \text{取} 0.08(\frac{B}{2})$ 。设计水线面以下的圆弧半径允许大些。从首柱圆钢到列板的过渡部分的加工量很大。

某些特种形状船首设计水线的前端采用大圆弧半径,如用于丰满船舶的抛物线型首(3.5.1)。

### 3.3 球首

球首按用途分有撞角型、声呐和减阻球首等。本节主要介绍现代SV型和整流球首的设计考虑、球首对船舶性能的影响和球首实际应用的准则。

#### 3.3.1 球首设计要素的考虑

球首用以下六个形状特征值来定义: a) 横剖面形状; b) 侧面形状; c) 突出于首垂线外的长度; d) 中心线位置; e) 面积比; f) 与船体的过渡。设计球首的准则: 起到相同减阻作用的球首, a) 体积小者好——其形状阻力小; b) 表面积小者好——其摩擦阻力小; c) 伸出长度小者好——摩擦阻力小、造价低; d) 建造方便者好——其造价增加量值小。如两个球首效果相同,介于两者参数之间的球首效果可能更优。从a)可知减少兴波阻力的球首,如与低球心球首有相同的减阻效果,球心位置高的球首其体积可取得小;从a)、b)点一并考虑压载工况减阻效果、耐波性、操纵性,采用图10所示形状的球首是合适的。它横剖面下部明显削尖,可减小砰击效应;它下部水线首部也尖瘦,使船在压载航行时球首起到了加长普通首一样的效果;当部分球首浸水时附加阻力小、破波阻力小;球首顶部建议采用圆拱形横剖面,因为圆形比其它形状表面积小、建造方便,不用担心砰击作用。



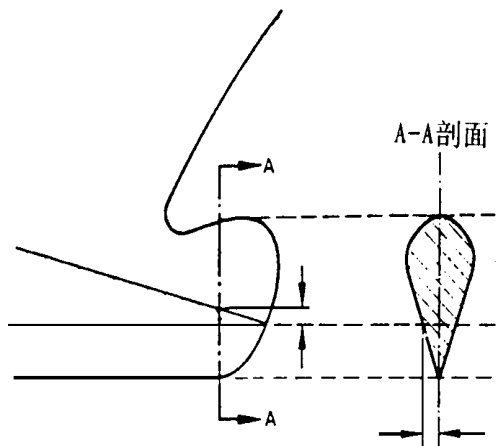


图10 现代球首的形状

### (1) 球首横剖面的形状

下部横剖面尖瘦并突出在首垂线前的现代球首,几何上与V型横剖面前体相配。突出首垂线前的水滴形、圆柱型等球首和不突出首垂线前的泰勒球首与U型横剖面前体易于光顺过渡。这些形状合适的组合是否所需功率最小,还需进一步证实。

### (2) 侧面形状

按照Wigley,如不出现更大的自由液面干扰时<sup>[2]</sup>,在球首宽度范围内其最高点位于设计水线以下。图11所示为性能优秀的现代SV型球首。此种球首设计时,首柱前球首上部侧面形状升高不要超出设计水线。如首柱前的球首侧面形状向后下倾斜(见图12),允许更大的球首高度,即最高点可接近设计水线甚至可超出设计水线。

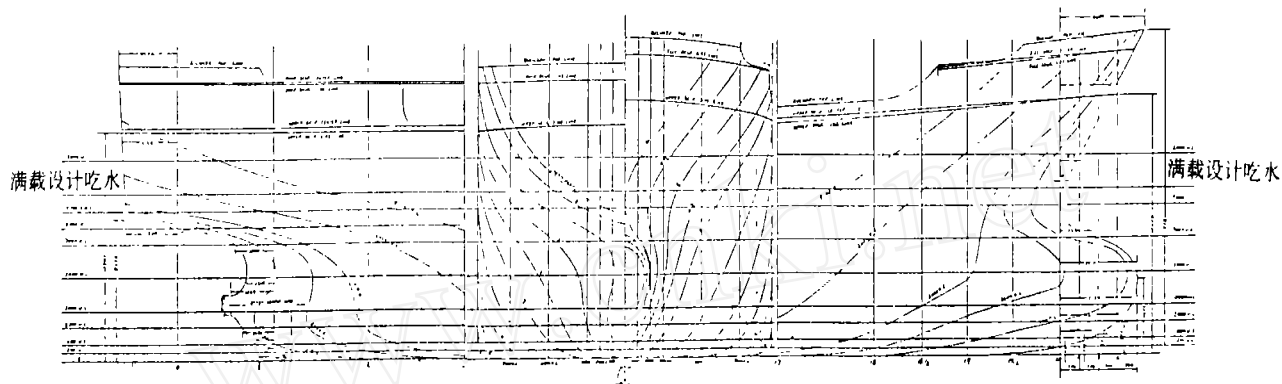


图11 SV型球首和小球尾型线

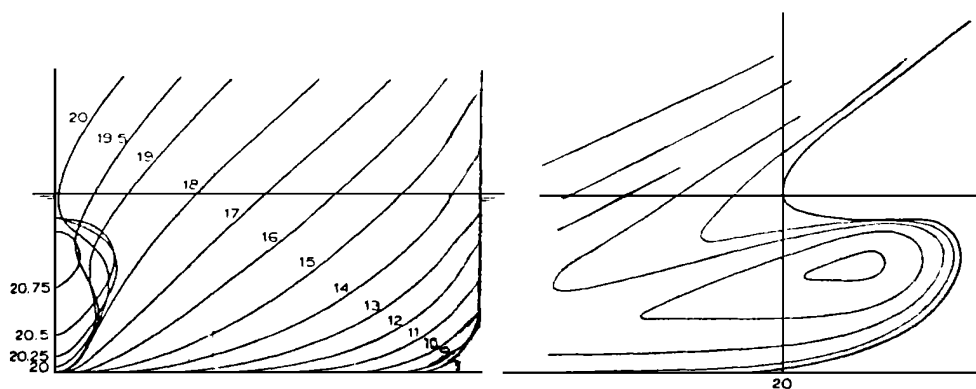


图12 上翘型SV型球首

### (3) 上部高出设计水线的球首<sup>[2]</sup>

如设计时设法避免球首上表面产生的大量旋涡,上部高出设计水线的球首可进一步减小阻力。把球首上表面设计成下凹至首垂线,使之起导流面的作用。高出水线的球首对所需推进功率的影响通常

要比浸没在水下的球首大得多。设计得好,减阻效果相当好。

球首高出设计水线时,主管部门会把首垂线定于球首外廓线与设计水线的交点处(图13)。因此与全浸式球首不同,这种型式球首,会增加干舷,入级

和客船水密分舱的计算长度。

关于球首高度更应注意干舷规范的规定,以干舷甲板型深的85%处水线长度作为计算长度。对于低干舷甲板船,如遮蔽甲板船,仍可能增加计算长度,即使球首接近设计水线(图14)。

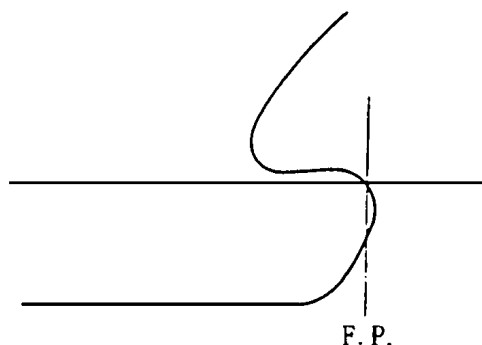


图13 高出设计水线球首的首垂线位置

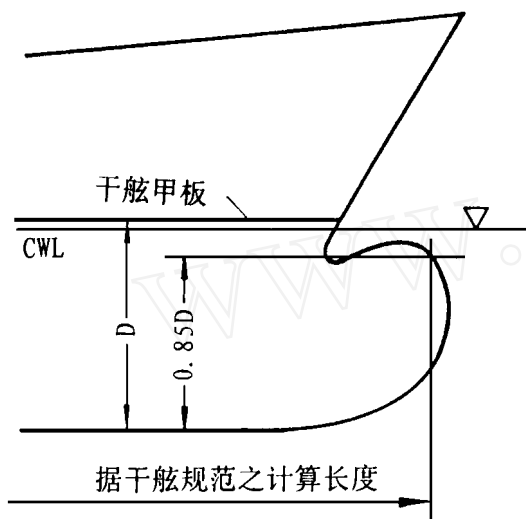


图14 低干舷甲板船干舷的计算长度

#### (4) 突出长度

球首突出于首垂线外的长度取决于  $F_n$  和球首形状。突出长度建议取船宽的20%,但不超出首柱上端点。突出长度超过  $0.2B$ , 阻力上改善甚微<sup>[2]</sup>。今天已很少建造无外突的球首。如能用球首前缘与首柱上缘连成的直线型首柱填补设计水线附近的空缺,往往可以使阻力大为减小。

#### (5) 球首中心线

球首中心线往往难以精确定义。设计球首时应使之向后向下倾斜与流线平行。这条准则亦适用于设计球首的最大宽度线和球首上的凹槽部分,如有的话。

首柱处及其后的流线之倾斜度,丰满船比尖瘦船更大,因此丰满船的球首与船体之间的凹槽应向后下倾斜更大些。

#### (6) 面积比 $A_{BT}/A_M$

面积比是首垂线处球首横剖面面积与船舶中横剖面面积之比。如果球首正好伸到首垂线,或前缘位于首垂线之后,应把横剖面面积曲线顺延到首垂线处,在首垂线处(离开实际曲线)量取球首横剖面面积(图15)。在设计吃水工况,通常浸没球首船的阻力随该面积比的增大而减小。

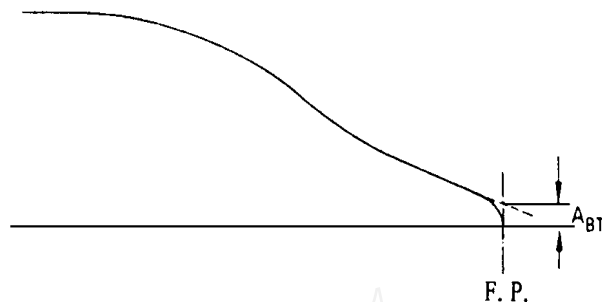


图15 不突出首垂线球首在首垂线处的理论横剖面面积

对如下情况须限制球首面积比,可比阻力性能最佳值低得多。a) 兼顾压载吃水时的阻力性能; b) 避免过大的碰击作用; c) 锚泊作业时锚不碰到球首; d) 球首太宽可能增加高型球首的阻力,因为这种球首上部特别容易产生旋涡。

如能采用高出设计水线的球首,虽然设计水线以上的球首横剖面不计入通常的面积比中,但它增加了有效面积比,只要选用适应此效应的球首形状,就能明显地降低阻力<sup>[2]</sup>。

#### (7) 过渡段

从球首向船体的过渡段可以是光顺的或者处理成折线。后者球首称为附加球首。球首和船体之间的凹形表面配合流线越好,它增加的阻力也就越小。一般来说,凹形表面所增加的阻力小于凸形表面。光顺过渡段适用于装载状态多变的船舶之球首,它对减少非设计工况时的阻力有利;折线形过渡段适用于航行工况单一的球首船,它可使过渡段所增加的阻力减至最低。设计时应加以权衡。

总之,设计球首时为保持相同排水体积,在减小满载设计水线进流角的同时亦应减小前肩,否则会使前肩过突;设计球首要注意尽可能只改变与无球首时首兴波产生有利干扰的那部分水流的流动方向和距离,而不改变其它部分水流的流动方向或加长

它们的流动距离。

### 3.3.2 球首对性能的影响

#### (1) 球首和普通首比较基础

普通首是指水准面迅速削尖到中线面的老式船首。模型试验或方案研究比较普通首和球首优劣时,通常都保持垂线间水准面长度不变。

计算现代球首船阻力时,先用通常计算阻力方法求出无球首船的阻力,而后再考虑球首的阻力扣除额。可求这种阻力减少值的计算方法很少,而且大多未充分考虑现代明显突出首柱的球首形状。但借助于所有阻力计算方法都可从各种来源的经验数据对球首作阻力扣除。文献介绍的球首之阻力扣除额不是与形状阻力就是与总阻力有关。由于有球首和无球首对比船的流体动力长度明显不一样,这种计算球首功率扣除额的方法用于计算现代球首不如用于计算不突出首垂线外的球首那样准确可靠。

据30年代的文献报道,球首仅在  $F_n = 0.23 \sim 0.7$  范围内减小阻力。直到1956年通过建造“Grena”号船才认识到  $F_n = 0.17 \sim 0.23$  范围内它也能减少阻力。早期非突出首柱型球首阻力减少最多为6%,大多数还不到此值。而现代性能优良的水动力长度放长的球首阻力减小有时可超过20%。在  $F_n > 0.23$  时球首主要作用是使首波前移;而带大体积球首、首波波长较短的球首的额外作用可使前肩处排水体积前移,即利用球首排水体积来使前肩进一步后移,从而使进流段长度向首兴波波长靠近(图16)。

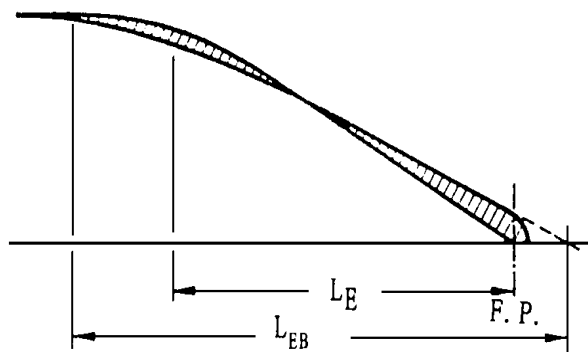


图16 球首增加实效进流段长度

#### (2) 球首对船舶性能的影响

球首影响船舶设计、结构、制造和使用等方面,如:

- a) 不同吃水时的静水阻力;
- b) 波浪中航行的阻力;
- c) 耐波性;
- d) 推进特性;

- e) 航向稳定性和回转性能;
- f) 设首侧推可能性,如设置的话其效率及附加阻力;
- g) 纵倾;
- h) 船首分段的结构、制造和建造成本;
- i) 干舷;
- j) 锚泊设计和操作时锚与球首碰撞的危险性;
- k) 渔船、调查船等定位装置的采用;
- l) 受船坞和船闸最大长度的限制;
- m) 冰区航行。

使用球首时上述特性都发生变化,现对 a)、b)、d)、m) 作扼要介绍。

#### 球首船的冰区航行<sup>[2]</sup>

如果把球首的上缘提高一个冰层厚度,就能起到一定的破冰作用。船在中等冰层厚度的航区航行时,球首比普通首,甚至比某些破冰船船首优点更多,因为球首可使破碎的冰块翻转,而使冰块湿边沿船体滑走,外板的磨损小,阻力也小。但最大的破冰厚度,球首比专用的破冰型船首要薄。

#### 球首船的海上航行性能

讨论如下三方面:

a) 纵摇运动的阻尼 通常球首船的纵摇运动阻尼比普通首船大,尤其是装有为增加阻尼而专门设计的球首。当波长大致等于船长时的共振区内阻尼作用就更大。甚至波长较短时,球首仍有一定的阻尼作用,反之,当波长大于  $1.3 \sim 1.5$  船长时,球首船的振幅大于无球首的同型船,但在此波长范围内,纵摇振幅与波高相比是小的。

b) 在汹涌海面上不降低功率情况下的航行性能 在恶劣海面上,底部尖削的球首碰击力度和频率比普通球首要小得多,因为具有平坦下表面的普通球首易受水碰击。

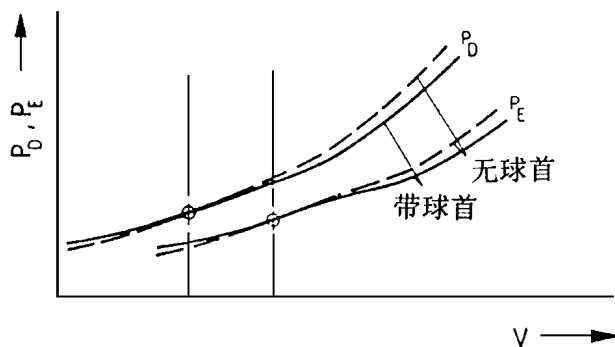
c) 在波浪中所需功率的增加 虽然球首船在风浪中航行更平稳些,但波浪引起的阻力增加是船长与波长之比的函数,故球首船的阻力增加值,在较大范围内,都比普通首船大。这点与舭龙骨作用相似。阻尼能量多半来自推进功率。在比较平静水面上航行时带有舭龙骨的船航行时更平稳些,但其波浪阻力要比无舭龙骨、横摇激烈的船来得大。

在小于  $0.9$  船长的短波范围内,船的纵摇频率低于临界值,此时球首船的波浪中阻力低于无球首船。

#### 阻力和推进功率的比较

安装球首引起的功率节省随吃水的减小视不同





$V_1$ ——相同收到功率时之航速  
 $V_2$ ——相同阻力时之航速  
 图19 有球首与无球首的船舶功率比较

### 3.3.3 球首实际应用的准则<sup>[2]</sup>

决定是否采用球首应从经济上加以论证,即考虑吃水的变化和实际海况中球首所能得到的功率节省、计入球首的投资费用,再比较球首船和相当的无球首船的总成本。只要把上述相应的关系定量化就

可作出判别。

下面的方法可作为球首应用与否的判别依据:

#### (1) 功率等效长度

如已知采用球首所能节省的功率,通过计算阻力和推进性能进行比较,就可确定普通首(无球首)要达到与球首相同的阻力减小值必须增加的船长。

引入“功率等效船首形状”及相应长度的概念。考虑在相同航速和相同功率的情况下普通首船和球首船相应不同的船长来作比较,球首船的功率等效长度是以球首前缘计算的。

$F_n < 0.25$ 时普通首船的功率等效长度通常要比球首船的功率等效长度小; $F_n > 0.26$ 时则反之(图20)。 $F_n$ 在0.29~0.32范围内,通过放长普通船的长度根本无法达到采用球首船那样的效果。这就是说,低速船放长设计水线获得减少所需功率的效果要比采用突出首垂线到该放长设计水线处的球首来得大。而设置在 $F_n > 0.26$ 船上的球首则节省功率更多,即普通首的等效功率长度大于球首船。

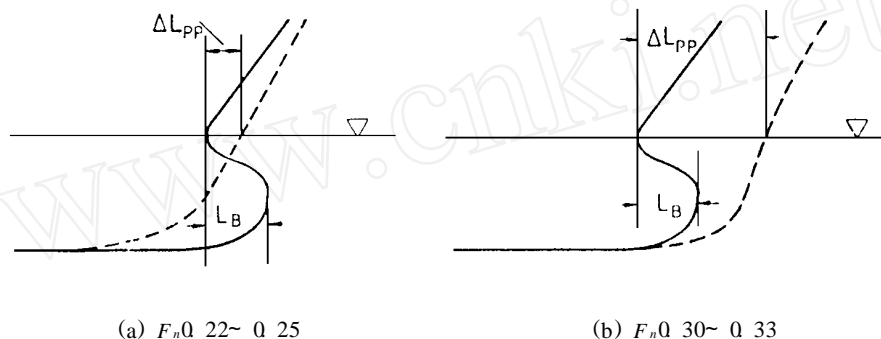


图20 功率等效船首形状

图21为不同 $F_n$ 时要获球首那样的效果,普通首必须加长的 $\Delta L_{PP}$ 值。阴影部分的上边界线为大方形系数,或与 $F_n$ 相比 $C_B$ 偏大的船的功率等效加长值;下边界为小 $C_B$ 船的功率等效加长值。从图可求得考虑经济性的临界值。 $F_n < 0.24$ 时等效加长值始终小于球首长度; $F_n > 0.3$ 时,增加船长达不到采用球首的效果。

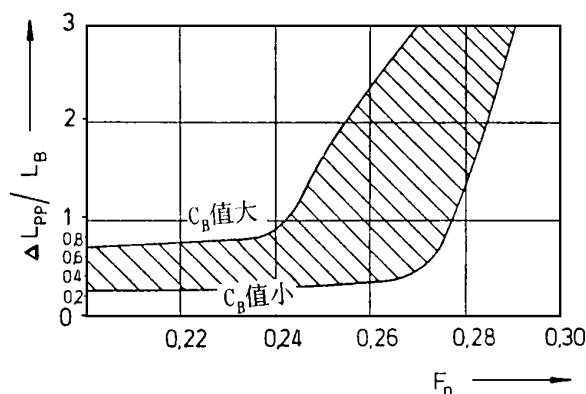
#### (2) 钢料等效长度(图22)

船体钢料重量或船体钢料费用与等排水量球首船的数值相同时的无球首船长度称为钢料等效长度。

#### (3) 等效长度的分析

讨论是否采用球首,可先只考虑船厂得益最大的几个因数,取合同条件为考虑的基础,暂且忽略耐波性、部分装载等情况,比较少数几个可能的方案。

对同一艘船比较装与不装球首,确定推进功率减小



$L_B$ : 球首突出于首垂线外的长度  
 $\Delta L_{PP}$ : 普通首的功率等效加长值

图21 得到与球首相同效果的普通首的功率等效加长值

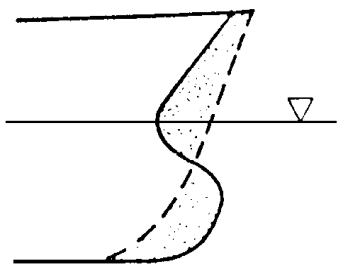


图22 钢料重量等效的船首形状

值和功率等效长度、钢料重量或钢料费用等效长度。设计全通甲板船时受干舷的约束,此时不能简单地用加长通常的前体来代替球首而不考虑增加干舷、减小吃水。但可暂时忽略把船设计成装载容积不变(如对无球首船取较大的船宽和较高的型深)的其它补偿办法。如果干舷不受限制,优化自由度就较大。

a) 假定所有其它成本项保持不变,比较球首船和普通首船的功率等效长度情况下的钢料费用;

b) 再在相等钢料费用的条件下比较它们所需的推进功率。  
(待续)

www.cnki.net