

船舶强度与结构设计



焦甲龙

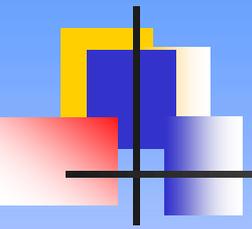


第二章 船体总纵强度计算

求得船体的总纵弯曲力矩和剪力后，就可计算船体总纵弯曲应力和剪应力，并进行强度校核。由于某些构件可能在压应力作用下失稳，故总纵弯曲强度计算是逐步近似的。

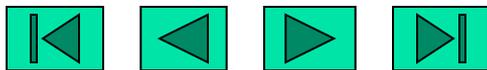
- § 1 总纵弯曲应力的第一次近似
- § 2 构件稳定检验与第二次近似
- § 3 船体构件的总纵强度计算
- § 4 船体梁弯曲剪应力计算
- § 5 许用应力
- § 6 船体挠度计算
- § 7 船体极限弯矩计算





§1 总纵弯曲的第一次近似

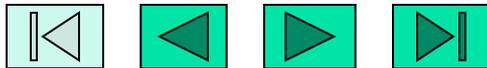
- 一、计算剖面的确定
- 二、确定计入剖面模数的构件
- 三、总纵弯曲的第一次近似



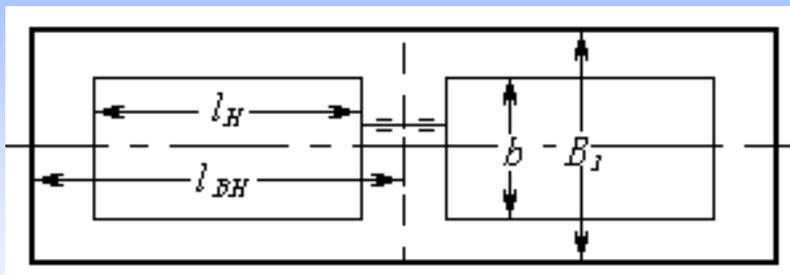
一、计算剖面的确定

在总纵弯矩的作用下，船梁上产生最大弯曲应力的剖面是最危险剖面，一般也是船梁最弱的剖面。

- 1) 在总弯矩曲线上船长中部的弯矩值最大，需对中部最弱的剖面进行计算。如机舱开口、货舱开口剖面。
- 2) 船体结构发生突变的剖面；如船体骨架式改变处、上层建筑端壁处、主体材料分布变化处等剖面。
- 3) 可能出现弯矩极大值的特殊剖面；如船舶重量分布或浮力分布特殊的剖面。



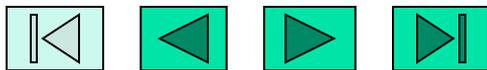
海规对集装箱船的规定



- 1) $b/B_1 \geq 0.7$;
- 2) $l_H/l_{BH} \geq 0.89$;
- 3) $b/B_1 \geq 0.6$ 且 $l_H/l_{BH} \geq 0.7$ 。

满足上述条件之一的集装箱船，在货舱区内至少应计算七个横剖面上的应力。其部位为：

- 1) 机舱前端；
- 2) 开口长度的前端；
- 3) 在开口内再取五个剖面(至少有三个在舫0.4L内)；
- 4) 所有结构突变处的剖面。



二、确定计入剖面模数的构件

确定哪些构件能够有效地参加抵抗总纵弯曲变形：

1. 纵向连续并能有效地传递总纵弯曲应力的构件，如船中部(0.4~0.5)L区域内的纵向连续构件，如上甲板、外板、内底板、纵桁、纵骨等，称为**纵向强力构件**；

2. 中部区域只占部分船长的非连续构件，称**间断构件**，如船楼、甲板室（它们的甲板和侧壁）、开口间的甲板等，参加总纵弯曲的有效性取决它们的**长度**及与主船体的**连接**情况：



间断构件计入的条件

1) 连续纵向舱口围板（多个并列舱口的内侧围板除外），当由纵舱壁或高腹板桁材有效支持时，可将其剖面计入船梁剖面模数。

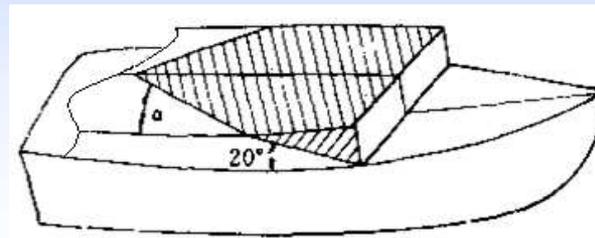
一般认为，凡连续长度不小于船体计算剖面本身高度3倍的舱口纵围板、纵桁等纵向构件均可计入船体梁剖面的计算中，但机座纵桁和其它加强纵桁均不应计入。



上层建筑和长甲板室

2) 凡长度 $\geq 0.15L$ ，且不小于本身高度6倍的上层建筑，以及同时受到不少于三个横舱壁或类似结构支持的长甲板室，可认为其中部能有效地参加抵抗总纵弯曲。

但其端部由于抵抗总纵弯曲的程度是逐步增加的，应按图扣除斜线部分的构件剖面积。



纵壁 $\alpha = 20^\circ$;

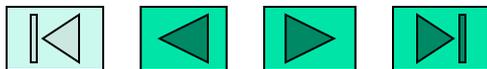
$$\text{甲板 } \alpha = \tan^{-1} \sqrt{\frac{2t_1 + 1.5t_2}{1.5t}}$$

t —上层建筑甲板厚度;

t_1 —上层建筑侧壁板厚度;

t_2 —上层建筑纵舱壁板总厚度。

注意: 此时，在上层建筑端部的侧壁和纵舱壁上不应有宽度大于孔距的窗口和其它开孔。



有开口的甲板

3) 相邻舱口间的甲板同样可视为间断构件，若计算剖面选在图中的斜线区域内时，则斜线部分的甲板剖面面积应扣除。



三、船体总纵强度第一次近似

将船体视为一变断面的空心薄壁梁（船梁），用简单梁的理论。总纵弯曲应力为：

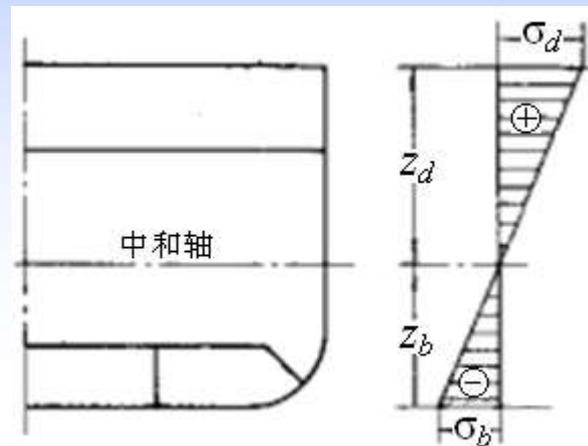
$$\sigma = \frac{M}{I} z = \frac{M}{W}$$

M —计算剖面的总纵弯矩；

I —计算剖面对水平中和轴的惯性矩；

z —求应力点至中和轴的距离；

$W=I/z$ —船体剖面模数。



可见，船体剖面上的应力呈线性分布。一般船中和轴距船底比较近，上甲板是离中和轴最远的构件，其弯曲正应力最大。

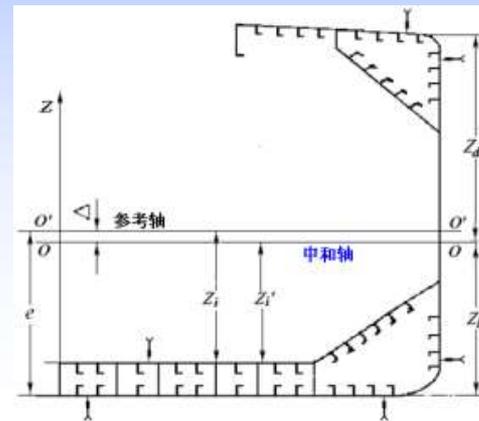


总纵弯曲的第一次近似计算

在计算船体剖面要素时，由于结构对称，只须计算半个剖面。

具体步骤为：

- 1) 画计算剖面的船体半剖面图；
- 2) 对纵向强力构件编号，应将所有距中和轴相等的相同尺寸构件列为一组编号；
- 3) 选取参考轴O-O，如取距基线 $e=(0.45\sim 0.50)D$ ；
- 4) 利用表格计算：求各组构件剖面积 A_i 、形心至参考轴的距离 z_i （参考轴以上为正）、静矩 $A_i z_i$ 、惯性矩 $A_i z_i^2$ ，对高度大的垂向构件，如舷侧板等，计算其自身惯性矩 i_0 。



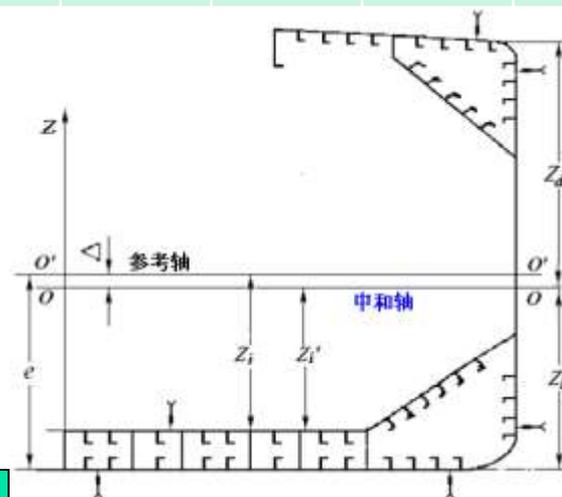
总纵弯曲应力计算表格

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		11	12
构件编号	构件名称	构件尺寸 mm	剖面面积 A_i cm^2	距参考轴 Z_i m	面积静矩 $A_i Z_i$ cm^2m	面积惯矩 $A_i Z_i^2$ cm^2m^2	自身惯矩 i_0 cm^2m^2	距中和轴 Z_i' m	弯曲应力		临界应力 N/mm^2	
									中拱 N/mm^2	中垂 N/mm^2		
1												
2												
3												
Σ			A		B	C						

$$A = \sum A_i, \quad B = \sum A_i Z_i, \quad C = \sum (A_i Z_i^2 + i_0)$$

剖面水平中和轴至参考轴的距离为:

$$\Delta = \frac{B}{A} \quad (\text{m})$$



总纵弯曲应力计算

根据移轴定理，剖面对水平中和轴的惯性矩为：

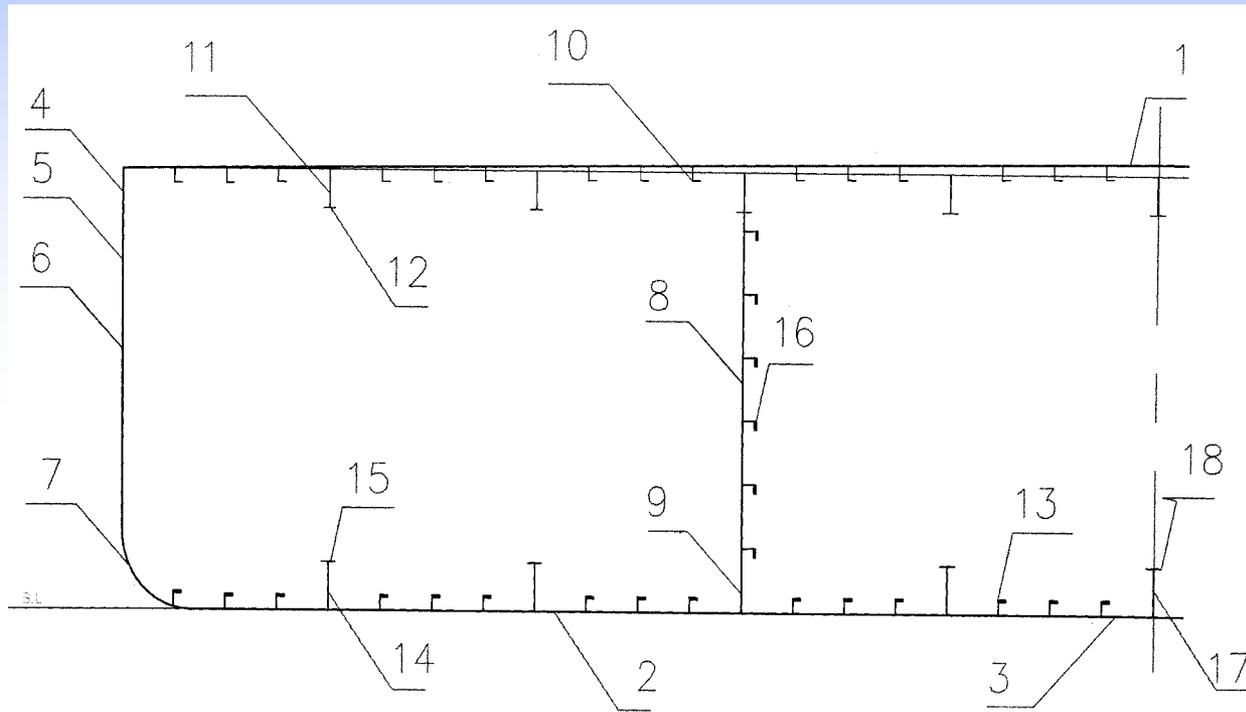
$$I = 2(C - \Delta^2 A) = 2(C - B^2 / A) \quad (\text{cm}^2 \cdot \text{m}^2)$$

任意构件至中和轴的距离为：

$$Z'_i = Z_i - \Delta \quad (\text{m})$$



总纵弯曲应力计算



总纵弯曲应力计算

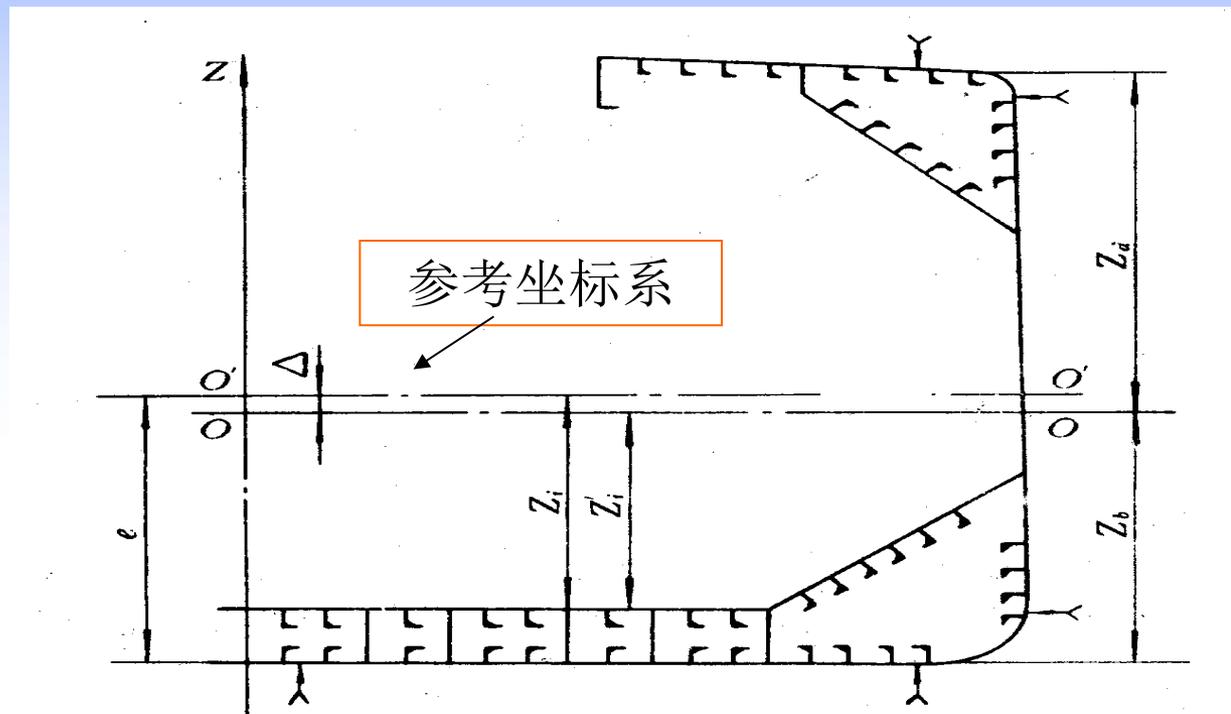


图1. 参与总弯曲的有效构件与坐标系



不同材料构件的换算面积

若构件采用不同材料时，则应先将其换算成相当基本材料的断面积后，再进行剖面要素计算。

若被换算构件的剖面积为 a_i ，应力为 σ_i ，弹性模数为 E_i ，相当的基本材料的剖面积为 a ，应力为 σ ，弹性模数为 E 。根据变形相等，承受同样的力 P 可得：

$$\varepsilon = \frac{P}{a_i E_i} = \frac{P}{a E} \Rightarrow a = a_i \times \frac{E_i}{E}, \quad \sigma_i = \sigma \times \frac{E_i}{E}, i = i_i \times \frac{E_i}{E}$$

因此，计算剖面积时，只要将被换算构件的面积 a 乘以两种材料的弹性模数之比即可。



不同材料构件的实际应力

这些构件的实际应力也应用计算应力乘以 E_i/E 。如果有垂直板时，其高度为 h_i 厚度为 t_i ，其剖面积亦应乘以 E_i/E 倍，板的自身惯性矩则为：

$$i_0 = \frac{(a_i E_i / E) h_i^2}{12}$$

$$\varepsilon = \frac{P}{a_i E_i} = \frac{P}{a E} \Rightarrow a = a_i \times \frac{E_i}{E}, \quad \sigma_i = \sigma \times \frac{E_i}{E}$$



总纵弯曲的第一次近似计算

剖面几何要素计算后，则构件中的总纵弯曲应力为：

$$\sigma_i = \frac{M}{I} Z'_i \times 10 \quad , \quad \text{N/mm}^2 \text{ (MPa)}$$

M —弯矩， $kN\cdot m$ ，中拱时为正，中垂时为负。

I —剖面惯性矩， $cm^2\cdot m^2$ ；

Z_i —核算点距中和轴距离， m ；

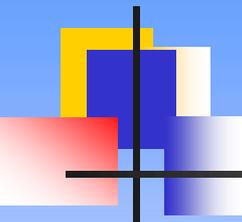
$W = I/z$ —船体剖面模数。

称该应力为总纵弯曲应力第一次近似计算值。

通常，甲板的剖面模数比船底的剖面模数小，所以也称为船体剖面的**最小剖面模数**。我国“钢质海船建造规范”规定，以该模数作为对船体结构总强度的要求。

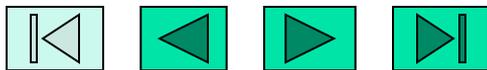
$$1 \text{ N/mm}^2 = 1 \times 10^6 \text{ N/m}^2 = 10^6 \text{ Pa (帕斯卡)} = 1 \text{ MPa}$$





§2 稳定性检验及第二次近似

1. 第一次近似的问题
2. 构件的稳定性检验
3. 船体板折减系数的计算
4. 总纵弯曲应力的第二次近似

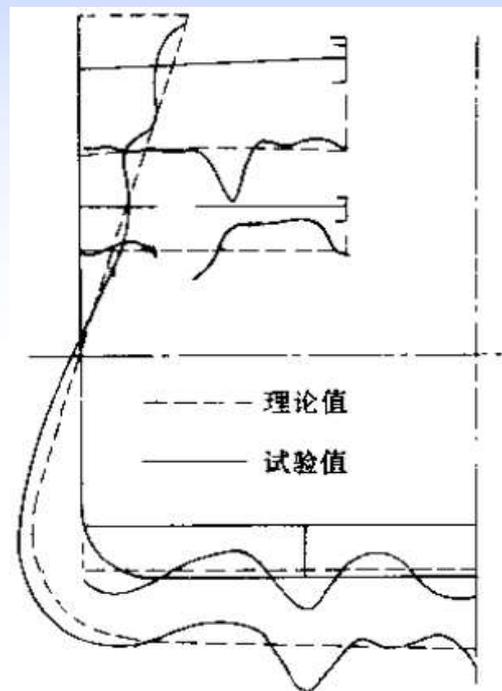


1. 第一次近似的问题

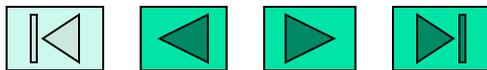
(一) 构件失稳

用简单船梁核算船体总纵强度，一般当纵向强力构件不发生失稳时，与实测结果是一致的，如图所示。所以该方法是可行的。

但19世纪，内河船 Mary 号 ($64 \times 7.02 \times 2.5\text{m}$) 横渡大西洋时，遇到波浪与船长相等，波高约为 $1.5 \sim 1.8\text{m}$ 时，在距船舳剖面前 7.3m 处被折成两段，折断前甲板板列曾产生显著的皱折。



货船 Ocean Vulcan 中拱的总弯曲应力分布



第一次近似的问题

W. John 将该船按波长64m，波高1.8m计算，结果为：

中拱状态：底部应力： -52MPa

甲板应力： +90MPa

中垂状态：底部应力： +102.5MPa

甲板应力： -142MPa

常用低碳钢

$\sigma_s=235.2 \text{ MPa(N/mm}^2\text{)}$

$[\sigma]=117.6 \text{ MPa}$

虽然中垂状态甲板应力较高但还不至于被折断。

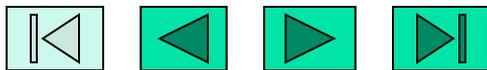


稳定性修正计算

根据 W.John 的分析，认为船体的破坏是由于受压的甲板板列中，除与构件相连部分有相互支持作用，在一定范围内的断面积完全有效外，其余部分不能承受大于板的极限荷重的压力而失稳。利用系数

$$\varphi = \frac{\text{板的欧拉应力}}{\text{该构件的总纵弯曲应力}}$$

进行修正。修正后甲板上的应力为 **250 MPa**，大大超出第一次计算应力。即考虑了某些构件抵抗总纵弯曲的有效程度后，船体上实际所受应力是很大的，这就是船体折断的原因。这也说明，**船体结构既要保证必要的强度，又要保证必要的稳定性。**



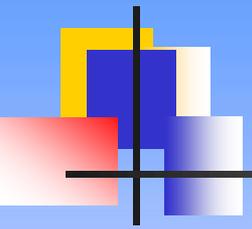
玛丽号甲板应力的计算结果:

破坏断面	静水状态			中拱状态			中垂状态		
	弯矩 (tf·m) (kN·m)	应力 (kgf/cm ²) (N/mm ²)		弯矩 (tf·m) (kN·m)	应力 (kgf/cm ²) (N/mm ²)		弯矩 (tf·m) (kN·m)	应力 (kgf/cm ²) (N/mm ²)	
		底部	甲板		底部	甲板		底部	甲板
215		190	-236	700	-520	900	1270	1025	-1420
2150	19.0	-23.6	7000	-52	90	12700	102.5	-142	

破坏原因: 船体在总纵弯曲中垂状态时, 甲板受压失稳后承压能力降低, 载荷转移到与甲板相邻的纵骨上, 纵骨应力超出屈服极限, 使船体舷边角钢发生屈服, 导致船舶断裂。

图 角钢屈服

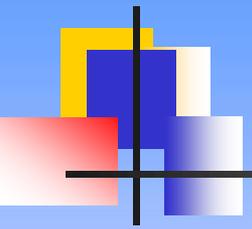




船体总纵弯曲应力第二次近似计算

■ 构件的受力与工作特征

船体总弯曲应力的计算为迭代过程：第一次近似计算时，没有考虑受压构件的稳定性问题，如果计算得到的受压构件的压应力大于欧拉应力，表明构件失稳，其抵抗总弯曲的效能下降，对该部分构件需要折减其抗压能力，折减后再次进行弯曲应力计算，直到前后两次计算得到的应力相差较小。所以计算总纵弯曲应力的过程为迭代过程。



船体总纵弯曲应力第二次近似计算

■ 构件的受力与工作特征

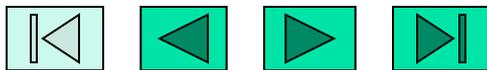
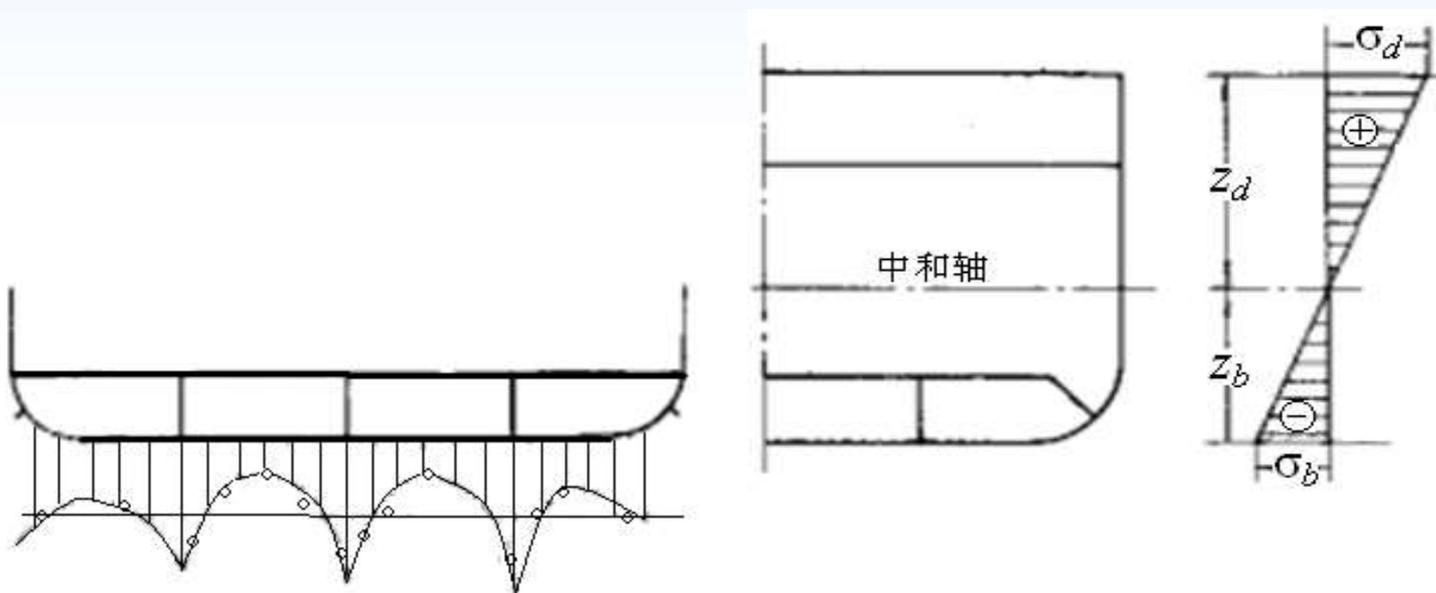
■ 船体梁构件的工作特征

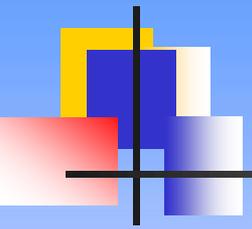
1. 载荷较小时（压应力小于欧拉应力），横剖面中纵向构件的应力同步变化，应力的变化规律符合梁理论；
2. 当载荷增大时（压应力大于欧拉应力），纵向构件中的应力不再同步增长。柔性构件（板）由于失稳，其抗压能力降低，应力不再增加，而与柔性构件相邻的骨材（纵骨、纵桁）应力大幅度增加。

第一次近似的问题所在

一些实船的试验结果也证实了这点。下图是货船Philip Schuyler在中拱时，船底应力分布的实测结果。

可见因船底板失稳，总弯曲应力的分布是不均匀的，在桁架处应力较桁架中间大得多。这与简单梁理论假定同一水平高度上的应力均匀分布相差很大。这便是总纵弯曲第一次近似计算的问题所在。



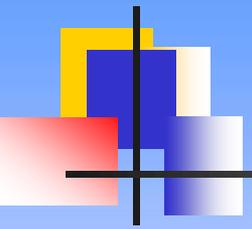


船体总纵弯曲应力第二次近似计算

■ 构件的受力与工作特征

■ 有效性:

船舶在航行中，参加抵抗总纵强度的构件是否全部有效地工作呢？第一次近似算法在计算中认为参加抗总纵弯曲的构件是全部有效地工作的。但是船舶航行中的结构损坏经验和实船强度试验结果表明，当船体受到外载荷增大到一定程度时，参加抵抗总纵弯曲的构件时不能完全有效参加工作的，特别是柔性构件（主要是板材），在受到压力作用时发生皱折现象，从而使构件中的应力分布发生变化，使得与之相连的刚性构件（主要是骨架）中的应力大大提高，有可能导致结构的破坏。



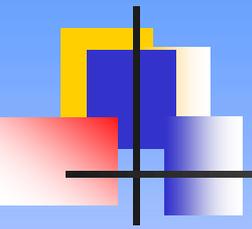
船体总纵弯曲应力第二次近似计算

■ 构件的受力与工作特征

■ 两类构件：

柔性构件：指船体外板、甲板和船底板，在载荷增加时，其首先发生失稳，并且仅能够承受相当于欧拉应力的载荷。

刚性构件：指纵骨、纵桁及平板龙骨等船体构件。其刚度远大于柔性构件，能够抵抗高水平载荷作用，而不发生失稳。



第一次近似的问题所在

(二) 多重应力作用

在进行船体强度的第一次近似中，只考虑了船体最主要的受力和变形——总纵弯矩和变形。而实际船体结构是处于复杂的受力与变形状态。

为便于分析，在船体结构强度计算中，将这种复杂的受力与变形简化为四类。因此，某些船体构件可能同时受多个应力作用，起到多种作用。这就是船体构件的多重作用特点。也是第一次近似存在的又一问题。



• 船体构件强度与失稳

受压直杆的稳定性问题-杆件的稳定性和强度之间的矛盾与统一

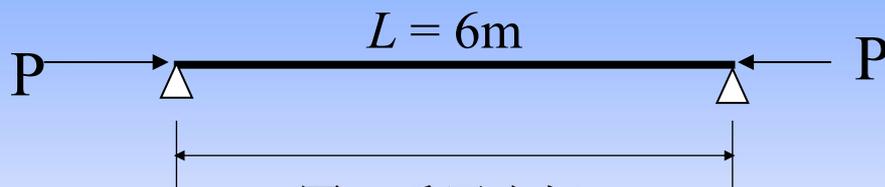


图 受压直杆

受压直杆断面为空心钢管，直径12cm，壁厚1cm，截面积37，根据海船建造规范，取许用应力为 12.4kN/cm^2 ，其可以承受的压力为：

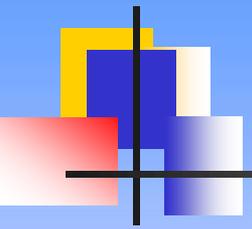
$$P = 37\text{cm}^2 \times 12.4\text{kN} = 458.8\text{kN} \quad (\text{强度允许})$$

按照稳定性计算，其允许承受压力根据欧拉公式确定。欧拉公式为

$$P_c = \frac{\pi^2 EI}{L^2} = \frac{3.14^2 \times 2.1 \times 10^4 \times 526}{600^2} = 302.5\text{kN} \quad (\text{稳定性允许})$$

显然，当压力达到强度允许的66%时，结构已经失去稳定性。





船体结构设计过程，必须满足强度和稳定性两个方面的要求。

- **船体强度计算方法的发展：**

- (1) 18世纪中叶，欧拉提出用梁理论计算计算船体的应力和变形；
- (2) 1874年，英国玛丽（Marry）号游轮在北大西洋海域折断；
- (3) 1877年，美国造船学者威廉等分析玛丽号折断的原因，提出了板失稳后抗压能力降低需要进行折减的概念：

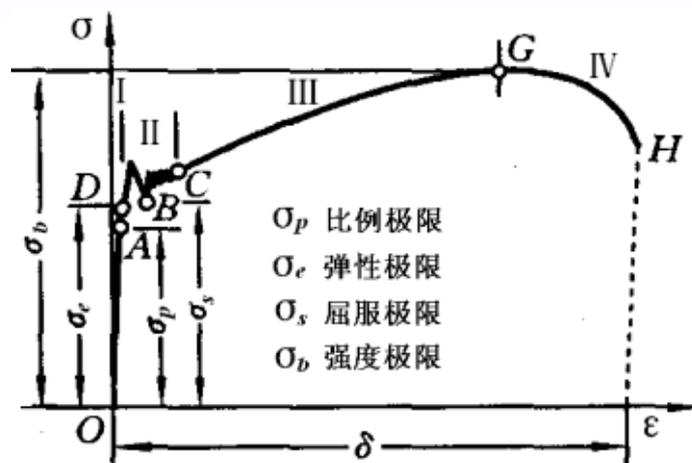
$$\varphi = \frac{\text{板的欧拉应力}}{\text{该构件的总纵弯曲应力}}$$



二、构件的稳定性检验

由于船体构件在总纵弯曲应力作用下可能失稳，所以应分别确定所有纵向强力构件的临界应力 σ_{cr} 。

在确定板的临界应力时，常不考虑材料不服从胡克定律对稳定性的影响，如按相应的理论式确定的临界应力超过材料屈服限 σ_s 时，则在计算中取 $\sigma_{cr} = \sigma_s$ 。

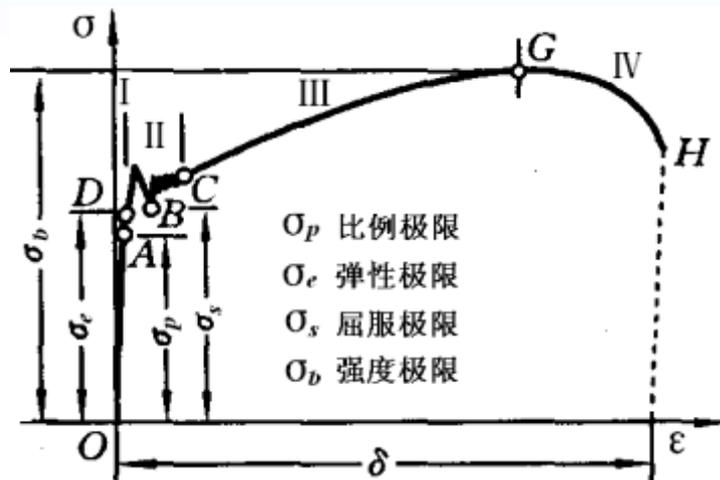


二、构件的稳定性检验

- 1) 线弹性范围，直接采用欧拉公式得到失稳时对应的压应力；
- 2) 非弹性稳定性：计算得到的欧拉应力超出比例极限，称为非弹性稳定性问题。

对于非弹性稳定的杆件，计算得到的欧拉应力为名义欧拉应力，采用适当的方法对其进行修正，得到临界应力。

对纵向**骨材**和**板架**，则必须考虑材料不服从胡克定律对稳定性的影响。



构件的稳定性检验

- 1、板的稳定性计算
- 2、纵骨的稳定性计算
- 3、甲板板架的稳定性计算



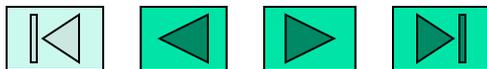
板的稳定性计算

1) 横骨架式

- ① 甲板板的临界应力
- ② 船底板和内底板的临界应力
- ③ 舷顶列板的临界应力
- ④ 舷侧外板的临界应力

2) 纵骨架式

- ① 甲板板、船底板的临界应力
- ② 主向梁的临界应力
- ③ 舷侧外板的剪切临界应力



① 横甲板板的临界应力

横骨架式甲板板的临界应力:

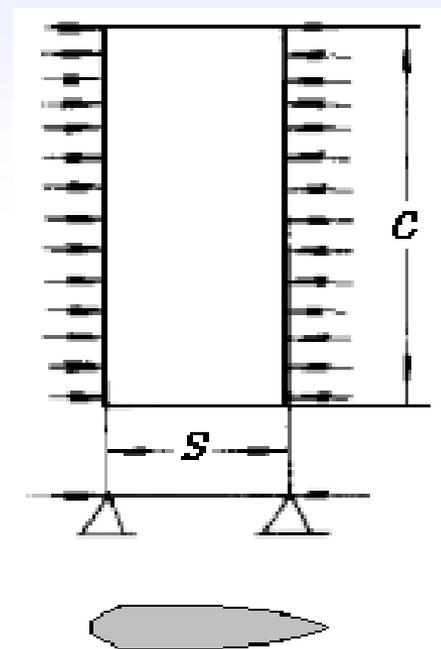
$$\sigma_{cr} \approx 19 \left(\frac{100t}{s} \right)^2 \left(1 + \frac{s^2}{c^2} \right) \quad (\text{N/mm}^2, \text{MPa})$$

t — 板厚, mm ;

s — 板的跨距即横梁间距,

c — 板的宽度即甲板纵桁间距。

$$\sigma_{cr} \approx 19 \left(\frac{100t}{s} \right)^2 \left(1 + \frac{s^2}{c^2} \right)^2$$



② 横船底和内底板的临界应力

板格的纵边可作为自由支持处理，但板格的横边由于实肋板的刚性较大，应为弹性固定，它对板的临界应力影响较大。实用上按下述公式计算：

$$\sigma_{cr} = k \times 19.6 \left(\frac{100t}{s} \right)^2 \left(1 + \frac{s^2}{c^2} \right) \quad (\text{MPa})$$

s —板的跨距即肋距；

c —板的宽度即底纵桁间距；

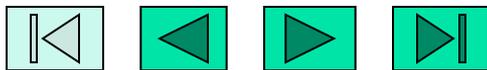
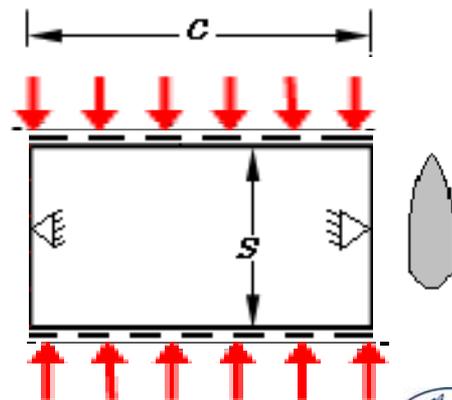
k —实肋板对板端固定程度的影响系数，取值为：

$k=1.50$ (每1档肋距设一实肋板时)；

$k=1.25$ (每2档肋距设一实肋板时)；

$k=1.15$ (每3档肋距设一实肋板时)；

$k=1.00$ (每4档肋距设一实肋板时)；



③ 横舷顶列板的临界应力

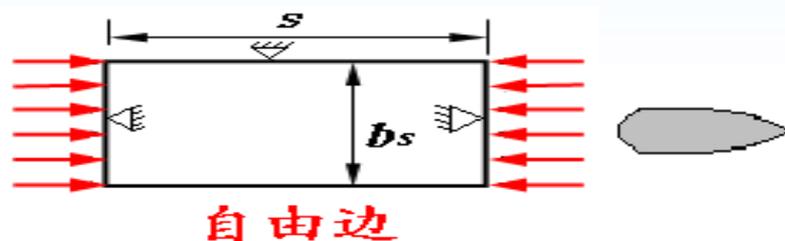
舷顶列板的厚度较舷侧外板大很多，计算其临界应力时，把它作为图示的三边自由支持、第四边完全自由的板处理。其临界应力按下式确定：

$$\sigma_{cr} = 19.6 \left(\frac{100t}{s} \right)^2 \left[1 + 0.426 \left(\frac{s}{b_s} \right)^2 - 0.143 \frac{s}{b_s (4 + s^2 / b_s^2)} \right] \quad (\text{MPa})$$

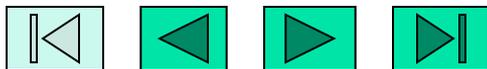
t —舷顶列板厚度；

b_s —舷顶列板的宽度；

s —舷顶列板的跨度。



如甲板边板的厚度大大超过邻近甲板板的厚度，则上式也可用来确定甲板边板的临界应力。



④ 横舷侧外板的临界应力

舷侧外板的临界应力按下式计算：

$$\sigma_{cr} = 19 \left(\frac{100t}{s} \right)^2 \quad (\text{MPa})$$

t —板厚；

s —肋距。

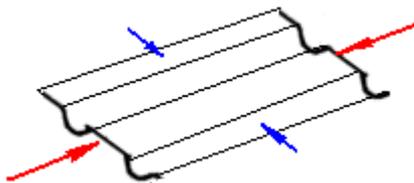
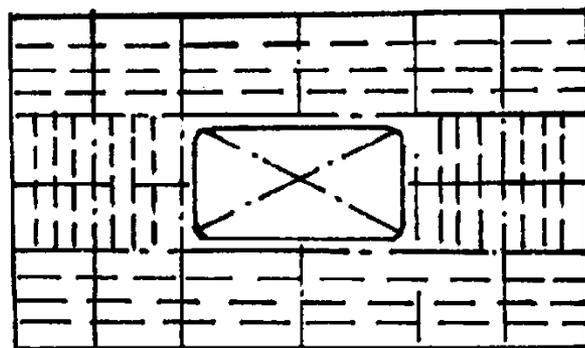


说明

板的承压能力与周界的固定条件、板格形式、**初始挠度以及横荷重等都有密切关系。**

在纵骨架式中，板的初挠度以及横荷重作用下引起的挠度，主要是沿短边方向，这种变形提高了板抵抗纵向压缩的能力。因此，计算纵骨架式板的折减系数时不考虑这些因素是偏于安全的。

在横骨架式中，上述各种因素，对板的承受纵向压缩的能力都是不利的。因此，计算折减系数时，应当予以考虑。



① 纵甲板板、船底板的临界应力

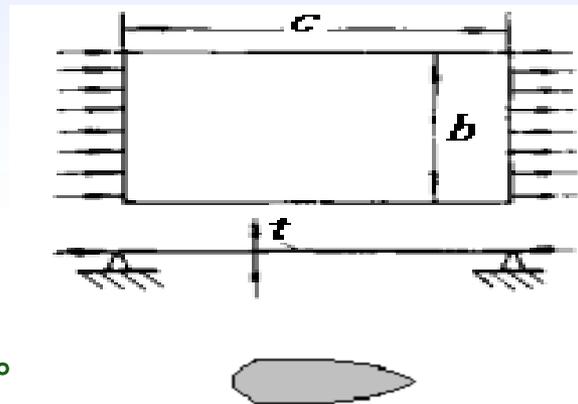
纵骨加强的甲板板、船底板等，其临界应力按下式计算：

$$\sigma_{cr} = 76 \left(\frac{100t}{b} \right)^2 \quad (\text{MPa})$$

t — 板厚；

b — 板宽，即纵骨间距；

c — 板的跨距，即强横梁或肋板间距。



③ 纵舷侧外板的剪切临界应力

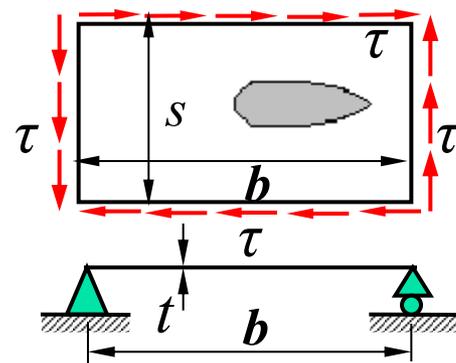
因为舷侧外板还承受总纵弯曲剪力的作用，所以还需检验其剪切稳定性。因 b/s 相当大，其临界应力一般按纯剪条件下的四周自由支持板计算

$$\sigma_{cr} = 102 \left(\frac{100t}{s} \right)^2 \quad (\text{MPa})$$

t —板厚；

s —板宽，即纵骨间距；

b —板跨距，即强横梁间距。



② 纵主向梁的临界应力

甲板纵桁、舷侧纵桁、龙骨、底纵桁及其它纵向构件均属组合梁。这些组合梁在受压时其翼板和腹板均可能失稳，由于其边界不同，因此应分别计算。

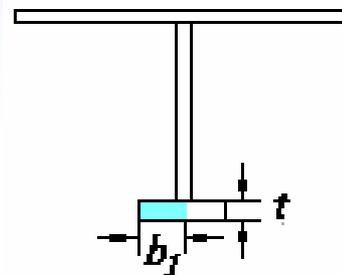
计算翼板临界应力时，将它作为三边自由支持、第四边完全自由的无限长均匀受压矩形板处理，其临界应力为：

$$\sigma_{cr} = 8.2 \left(\frac{100t}{b_1} \right)^2 \quad (\text{MPa})$$

b_1 —自由翼板的半宽(翼板对称于腹板的梁)；

或自由翼板的宽度(自由翼板设在腹板一侧的梁)。

腹板的临界应力可按沿腹板高度承受线性规律变化的压力(亦可近似为均布压力)的自由支持板进行计算。



2. 纵骨的稳定性计算

在检验纵骨的稳定性时，将其视为自由支持在相应的横向构件（强横梁、强肋骨、肋板等）上的单跨梁，按单跨压杆的**理论欧拉应力**：

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 Ei}{a^2(f + b_e t)} \quad \text{N/mm}^2$$

i —包括带板的纵骨剖面惯性矩；

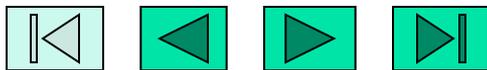
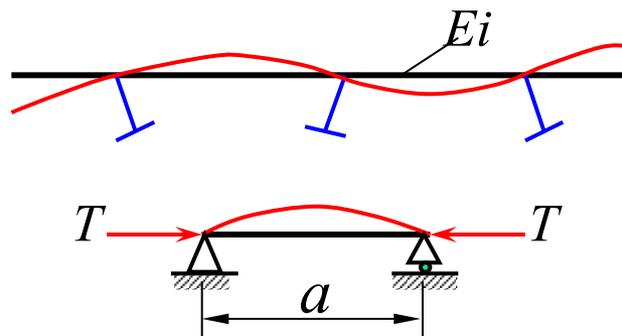
a —横向构件间距；

f —不包括带板的纵骨剖面积；

b_e —带板的宽度；

t —带板厚度；

E —材料弹性模量。



说明

计算纵骨稳定性时，当带板的压应力大于临界应力时应作折减。
此时，带板的宽度为：

$$b_e = \frac{b}{2}(1 + \varphi)$$

b_e —带板宽度，但不大于1/6跨度；

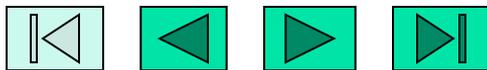
b —纵骨间距；

$\varphi = \sigma_{cr} / \sigma_c (<1)$ —折减系数，

σ_{cr} 板的临界应力， σ_c 作用于板上的压应力。

如纵骨的理论欧拉应力 σ_E 超过材料的比例极限，则必须对理论欧拉应力进行修正，考虑材料不服从虎克定律对稳定性的影响。可利用曲线进行修正，也可按下式确定纵骨的临界应力：

$$\begin{cases} \text{当 } \sigma_E \leq \frac{1}{2}\sigma_s \text{ 时, } & \sigma_{cr} = \sigma_E \\ \text{当 } \sigma_E > \frac{1}{2}\sigma_s \text{ 时, } & \sigma_{cr} = \sigma_s \left(1 - \frac{\sigma_s}{4\sigma_E}\right) \end{cases}$$



中间有支撑的内外底纵骨

对于图示中间有支撑的内外底纵骨，其欧拉应力为：

① 外底纵骨

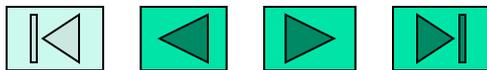
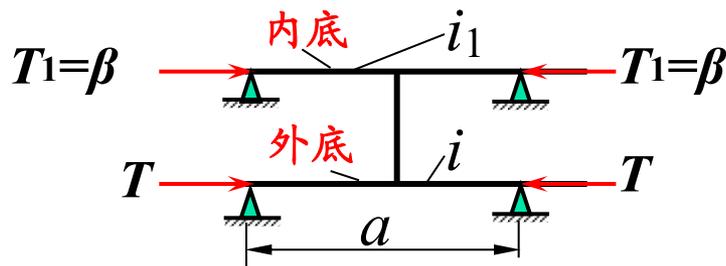
$$\sigma'_E = k\sigma_E$$

k —系数，按 β 和 ϵ 查表确定；
 σ_E —纵骨的理论欧拉应力。

② 内底纵骨

$$\sigma_E = k\beta \frac{\pi^2 E i_1}{a^2 (f_1 + b_1 t_1)}$$

f_1 —不含带板的纵骨剖面积；
 b_1 、 t_1 —带板的宽度和厚度；
 k —查表确定。



确定k值的表

前式中的 k 值，根据 β 和 ε 在下表中查取。

$$\beta = \frac{(f_1 + b_1 t_1) z_1}{(f + b t) z} \quad \varepsilon = \frac{i_1}{i}$$

f, f_1 — 外底(内底)纵骨的剖面积；

i, i_1 — 外底(内底)纵骨的带板剖面惯矩；

b, t, b_1, t_1 — 外底(内底)纵骨的带板宽、厚；

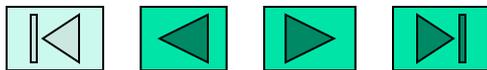
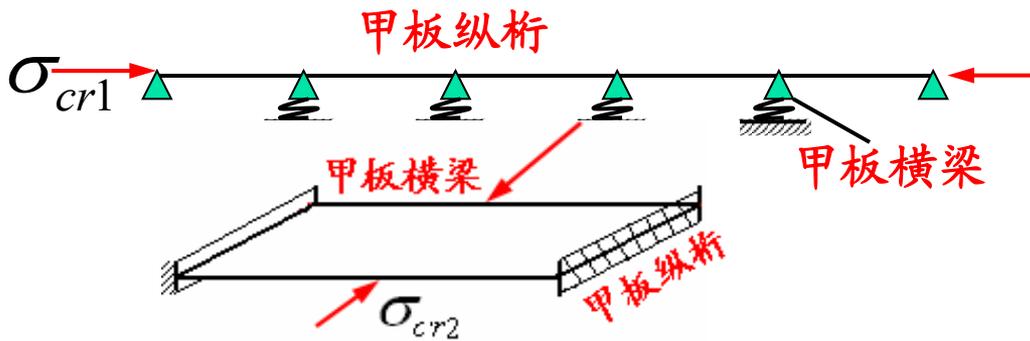
z, z_1 — 船体剖面中和轴到外底(内底)的距离。

$\varepsilon \backslash \beta$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
0.8	1.77	1.61	1.49	1.37	1.27	1.18	1.10	1.03
0.9	1.87	1.70	1.56	1.44	1.33	1.24	1.15	1.08
1.0	1.97	1.80	1.64	1.52	1.41	1.31	1.23	1.16

3. 甲板板架的稳定性计算

对有甲板纵桁的板架的稳定性计算步骤:

- ① 视纵桁为自由支持在横舱壁，被横梁弹性支承的受压杆，确定甲板纵桁的临界应力 σ_{cr1} ；
- ② 假设纵桁为横梁的刚性支座，计算舷侧至纵桁或纵桁间的甲板板架的临界应力 σ_{cr2} ；
- ③ 如果 $\sigma_{cr1} > \sigma_{cr2}$ ，则板架的稳定性用纵桁间的板架稳定性表征；反之 $\sigma_{cr1} < \sigma_{cr2}$ ，则板架的稳定性用纵桁的稳定性表征。



1. 横骨架式甲板板架

对于舱口区域，因舱口纵桁（围板）凸出甲板很高，常不需进行稳定性检验。

由于横骨架式甲板板的承压能力很低，横骨架式甲板横梁的刚度不应小于作为甲板板刚性支座时的临界惯性矩 I_{cr} 。由船舶结构力学可知， I_{cr} 为：

$$I_{cr} = \left(\frac{\pi}{\mu_1}\right)^4 \left(\frac{B_1}{s}\right)^3 \frac{B_1 t^3}{10.9} \chi_{j,\max}(\lambda)$$

μ_1 — 根据横梁端部固定系数查得；

$\chi_{j,\max}(\lambda)$ — 按参数 $\lambda = \sigma_{cr} / \sigma_E$ 和失稳半波数 j 确定的值，

此处取 $\lambda = 1$ ，于是 $\chi_{j,\max}(\lambda) = 0.405$ ；

t — 甲板平均厚度。



2. 纵骨架式甲板板架

舱口线以外的纵骨架式甲板板架，为保证板架稳定性，甲板强横梁的必要惯性矩 I 应为：

$$I = \left(\frac{\pi}{\mu_1}\right)^4 \left(\frac{B_1}{a}\right)^4 \frac{a}{b} \varphi i \chi_{j,\max}(\lambda)$$

μ_1 —根据强横梁端部固定系数查得柔性系数；

$$\lambda = \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_E^0} \times \frac{1}{\varphi} \quad \sigma_E^0 = \frac{\pi^2 Ei}{a^2(f+bt)}$$

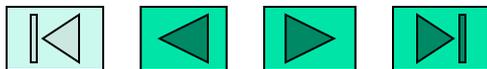
φ —考虑材料不服从胡克定律对稳定影响的修正系数；

i —包括带板的纵骨剖曲惯性矩；

σ_{cr} —希望达到的板架临界应力；

f —不包括带板的纵骨剖面积；

t —甲板平均厚度。



稳定性要求

船底板及强力平板的临界应力通常不得低于：由静水弯矩和波浪弯矩平均值合成的最大可能压应力；或者0.4倍材料屈服极限值。

舷侧外板，不论在中垂或中拱情况，在弯曲剪力作用下应保证有2倍的稳定性储备。



三、船体板折减系数的计算

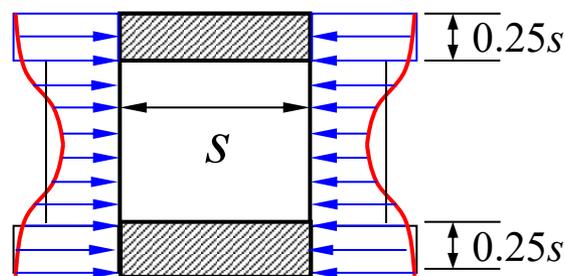
- 1) 剖面折减的概念
- 2) 板折减系数的计算式
 - ① 纵骨架式
 - ② 横骨架式



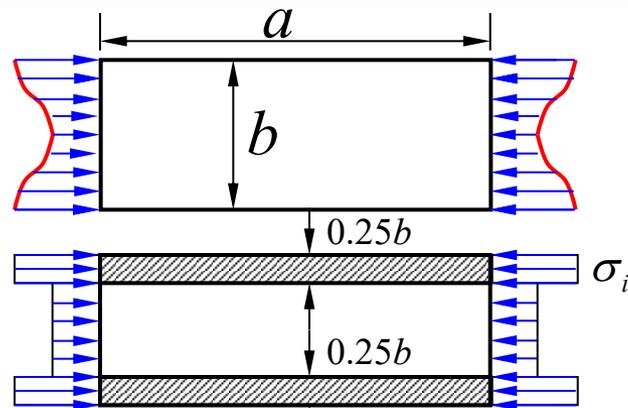
1) 剖面折减的概念

船体总纵弯曲时，纵向骨架梁在计算载荷下是不允许失稳的，因此在船体构件中只有板可能失稳。

第一次近似计算求出总纵弯曲应力之后，若所得压应力大于相应构件的临界应力，表明该构件失稳。板失稳后，在同一水平高度上的应力沿板宽不再保持均匀分布，与纵向骨架梁相连的部分板宽内应力较高，板宽的中间部分应力较低，如图。



横骨架式板失稳后的应力分布



纵骨架式板失稳后的应力分布



折减系数 ϕ 的概念

说明船体板不能完全有效地参加抵抗总纵弯曲，为了仍能运用简单梁的公式计算总纵弯曲应力，采用折减系数 ϕ ，把船体剖面一部分失稳的板剖面积缩小为假想不失稳的刚性构件剖面积。

具体做法是：将纵向强力构件分为刚性构件和柔性构件两类。

刚性构件：受压不失稳的刚性骨架梁、舳列板，及与它们毗连的每一侧宽度等于该板格短边长度 0.25 倍的那一部分板。

柔性构件：板格的其余部分在受压后可能失稳，它只能承受等于其临界应力的压应力。



折减系数 ϕ 的计算

将柔性构件用某个虚拟的刚性构件代替，但要保持剖面上承受的压力值不变，即：

$$\sigma_{cr} \times A = \sigma_i \times A'$$

A —被代替的柔性构件实际剖面积；

A' —虚拟的刚性构件剖面积；

σ_{cr} —板格的临界应力；

σ_i —按梁的公式计算的刚性构件应力。

由上式可得折减系数 ϕ 为：

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_i} = \frac{A'}{A} = \phi$$



① 纵骨架式

对于只参加抵抗总纵弯曲的构件（如上甲板）有：

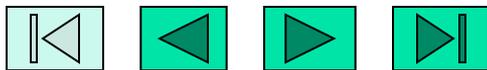
$$\varphi = \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_i} \beta$$

σ_{cr} —按纵骨架式强力板确定的板格临界应力；

σ_i —与所计算的板在同一水平线上的刚性构件的总纵弯曲压应力的绝对值；

β —系数， $\beta = 2 - \frac{b}{75t}$ 若 $\beta > 1$ ，则取 $\beta = 1$ ；

b —纵骨间距。



同时受 σ_1 和 σ_2 作用的板

对于同时参加抵抗总纵弯曲及板架弯曲的构件（如船底板、内底板）有：
$$\varphi = \frac{\sigma_{cr} + \sigma_2}{\sigma_i}$$

σ_2 —相应构件的板架弯曲应力，并应计及其正负符号（拉伸为正，压缩为负），可取其邻近的中内龙骨的应力。

$\sigma_2 > 0$ 为拉应力，此时该板不会失稳，反而提高了它抵抗总纵弯曲压力的能力；

$\sigma_2 < 0$ 为压应力，该板因受板架弯曲应力而降低了抵抗总纵弯曲压应力的能力，特别当 σ_2 超过了板能承受的最大压应力，则在板架弯曲压应力作用下该板就要进行折减，所以就不再能承受总纵弯曲压应力 σ_i 了，故该构件的折减系数 $\varphi = 0$ 。



② 横骨架式

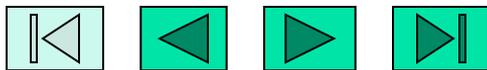
若不考虑初挠度及横荷重的影响，则：

$$\varphi = \sigma_{cr} / \sigma_i$$

σ_{cr} —板格的临界应力，不同部位的板，按不同的公式计算。

横骨架式舷侧外板和纵舱壁板，因总纵弯曲应力沿高度呈线性分布，应分段折减。此时 σ_i 用相应段的平均总纵弯曲压应力。注意，在横骨架式船体板中，由于初挠度和横荷重的存在，板承受纵向压缩的能力会降低。在计算折减系数时不考虑它们的影响是偏危险的。

按上述公式确定的折减系数应在 $1 \geq \varphi \geq 0$ 范围内，若 $\varphi > 1$ ，则应取 $\varphi = 1$ 。

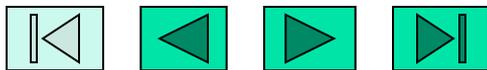


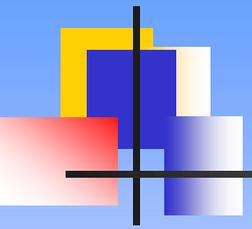
四、总纵弯曲的第二次近似

从折减系数算式可见：折减系数与总纵弯曲压应力值有关；而总纵弯曲压应力的值又与构件的折减系数有关。因此，总纵弯曲应力的计算是逐步近似的过程。

若总纵弯曲压应力均未超过板的临界应力，则不必进行折减计算，直接用总纵弯曲应力的第一次近似值进行强度校核。

在船体板的稳定性检验后，若有构件失稳，则须按相应公式计算折减系数。然后采用表格方法进行中拱与中垂的总纵弯曲应力的第二次近似计算。





船体总纵弯曲应力第二次近似计算

■ 总纵弯曲应力第二次近似计算步骤

1、选取参考轴

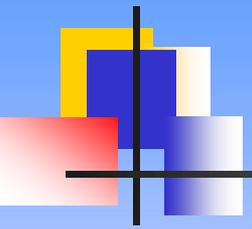
(1) 选取第一次计算的参考轴为参考轴

以第一次计算得到的 A 、 B 、 C 值为基础，在第一次计算时的参考轴下计算折减掉的面积、以及折减掉的面积对第一次计算时的参考轴的静矩、惯性矩。

(2) 选取第一次计算得到的中和轴为参考轴

此时，剖面面积仍为 A ，但是静矩 $B = 0$ ， $C = I$ 。则以 A 、 $B = 0$ 以及 $C = I$ 为基础，进行剖面折减计算。





船体总纵弯曲应力第二次近似计算

2、计算柔性构件面积

对于受压构件，计算柔性构件的面积，先确定刚性构件的面积，则其余部分为柔性构件面积。

表格计算：

3、计算折减系数及折减掉的面积 ΔA

折减掉的面积 ΔA 为负。

4、计算折减掉面积的静矩及移轴惯性矩

计算折减掉的面积相应的静矩 ΔB 、及总的惯性矩 ΔC

相应的 ΔB 、 ΔC 也都是负的。



船体总纵弯曲应力第二次近似计算

第二次计算剖面抗弯几何特性计算表

构件编号	构件名称	剖面积 A_i (cm^2)	折减系数 φ_i	$\varphi_i - 1$	(3)×(5) $A_i(\varphi_i - 1)$ (cm^2)	距参考轴 距离 Z_i (m)	静力矩 (6)×(7) ($\text{cm}^2 \cdot \text{m}$)	惯性矩 (7)×(8) ($\text{cm}^2 \cdot \text{m}^2$)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
	I 第一次近似计算结果				A		B	I, C
	II 折减构件				ΔA		ΔB	ΔC
	∑				A_1		B_1	C_1

总纵弯曲应力的第二次近似

设某构件*i* 需进行折减的截面积为 A_i ，折减系数为 φ_i ，则修正面积为 $\Delta A_i = A_i(\varphi_i - 1)$ ，分别求出修正面积对第一次近似的参考轴的静矩和惯性矩，即：

$$\begin{cases} \sum A_i(\varphi_i - 1) = \Delta A \\ \sum A_i(\varphi_i - 1)Z_i = \Delta B \\ \sum A_i(\varphi_i - 1)Z_i^2 = \Delta C \end{cases}$$



总纵弯曲应力的第二次近似

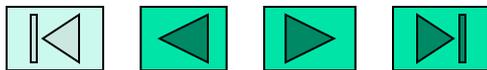
5、计算折减后剖面的有效参与总弯曲的面积、静矩及惯性矩

将上面的计算结果与第一次近似计算结果相加得：

$$\begin{cases} A_1 = A + \Delta A \\ B_1 = B + \Delta B \\ C_1 = C + \Delta C \end{cases}$$

6、计算中和轴的位置及折减后有效参与总弯曲的面积对中和轴的惯性矩

$$\Delta_1 = \frac{B_1}{A_1} (\text{m}), \quad I_1 = 2\left(C_1 - \frac{B_1^2}{A_1}\right) (\text{cm}^2 \cdot \text{m}^2)$$



总纵弯曲应力的第二次近似

7、计算折减后各个构件的总弯曲应力

任一构件至中和轴的距离为：

$$Z'_i = Z_i - \Delta_i \quad (\text{m})$$

任一构件第二次近似计算总纵弯曲应力为：

$$\sigma'_i = \frac{M}{I_1} Z'_i \times 10 \quad (\text{N/mm}^2, \text{MPa})$$



总纵弯曲应力的再次近似

总弯曲应力计算迭代停止

$$\frac{(\sigma_i - \sigma_{i+1})}{\sigma_i} \leq 5\%$$

如果第二次近似计算的总纵弯曲应力与第一次近似计算值相差不大于5%，则可用第一次近似计算值进行总纵强度校核，否则必须再进行一次近似计算。如果迭代三次后前后两次的误差仍大于5%，则说明结构折减严重，稳定性不满足，需要修改结构设计方案。



总纵弯曲应力的再次近似

再次近似时，第二次近似的结果作为第三次近似计算的基础。

所以某构件的修正面积为：

$$\Delta A'_i = A_i(\varphi'_i - \varphi_i), \quad \varphi'_i = \sigma_{cr} / \sigma'_i$$

余各项计算与第二次近似计算完全一样。如果计算结果仍不能满足要求，则说明该结构设计不合理，应考虑新的设计方案，如设法提高柔性构件的稳定性等。

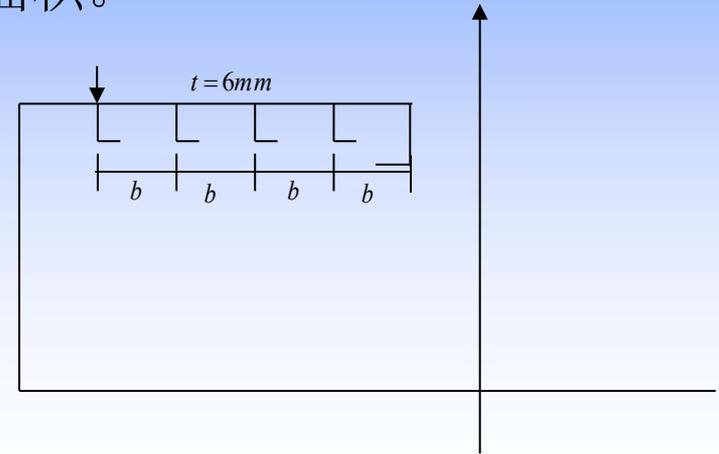
注意：由于在不同弯曲状态下构件的折减系数是不同，因此第二次及更高次近似计算均应分别对船舶在中拱状态和中垂状态下进行。



例题1: 纵骨架式甲板，纵骨间距为 $b = 600$ mm，甲板板厚 $t = 6$ mm。在总强度第一次计算中，得甲板总弯曲应力为 $\sigma_1 = 98$ MPa。试求：

- 1) 计算甲板折减系数； 2) 折减掉的面积。

***甲板边板不折减。**



解： (1) 求欧拉应力

$$\sigma_{cr} = 76 \left(\frac{100t}{b} \right)^2 \quad (\text{MPa})$$

(2) 计算折减系数 $\phi = \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_i} = 0.8$

(3) 确定柔性构件面积：扣除刚性构件面积，得到柔性构件面积。

$$A = (3 \times 0.5b + 0.25b \times 2) \times t = 4 \times 0.5b = 2bt = 2 \times 60 \times 0.6 = 72 \text{ cm}^2$$

(4) 计算半个剖面折减掉的面积

$$\Delta A = A - \phi A = A(1 - \phi) = 72(1 - 0.8) = 14.4 \text{ cm}^2$$



作业

2.1、 2.2、 2.5



船体构件的多重作用

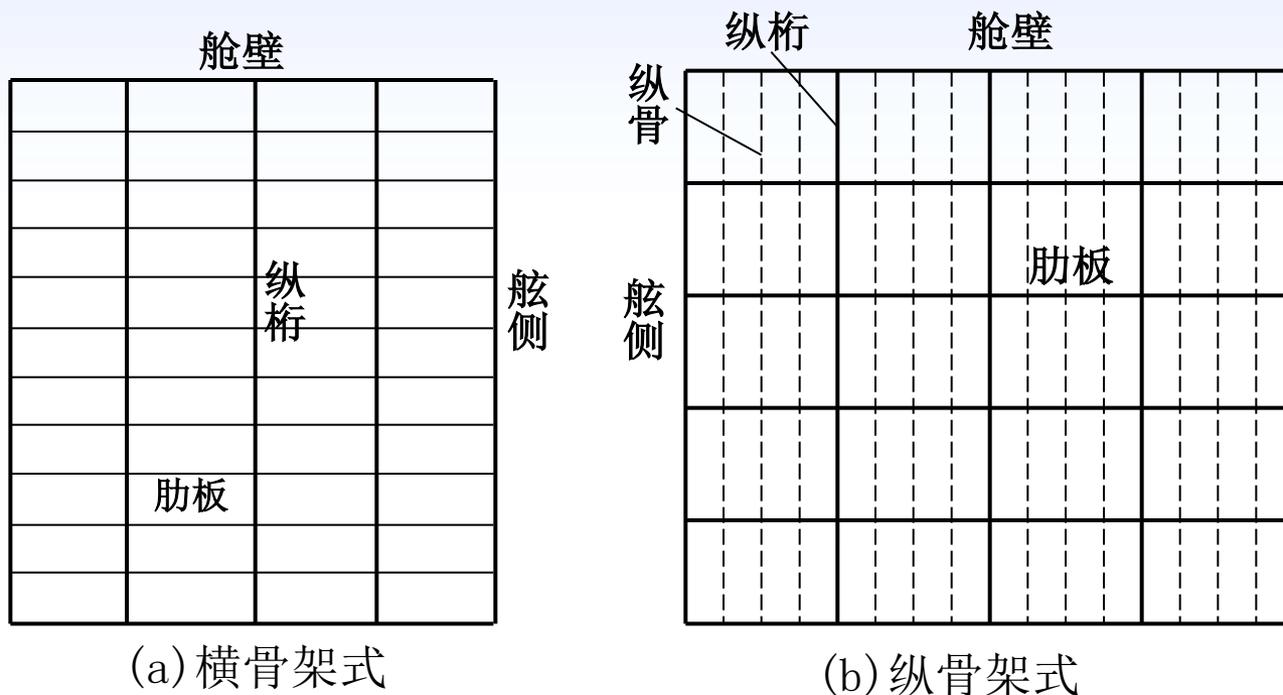
在船体强度计算中，船体构件受到多重作用力，产生多种应力。另外，各类构件的作用及其应力的性质是不同的，因此在考虑构件参加抵抗总纵弯曲的有效程度的基础上，还应计及构件的多重作用。即船体构件的总纵强度包括：总纵弯曲应力和局部弯曲应力两部分。局部弯曲应力将在第3章介绍。

- 1、力的传递，多重作用概念
- 2、弯曲应力的组成与纵向构件分类
- 3、底部构件的应力合成



船体构件的多重作用

船体结构是由许多部件组成的，这些部件各自承担其一定的作用。其中一些是直接承受外力的构件，另一些则承受别的构件传来的力。以图中两种典型结构形式的船底板架为例，进行船体结构受力和传力过程分析。



(a) 横骨架式

(b) 纵骨架式

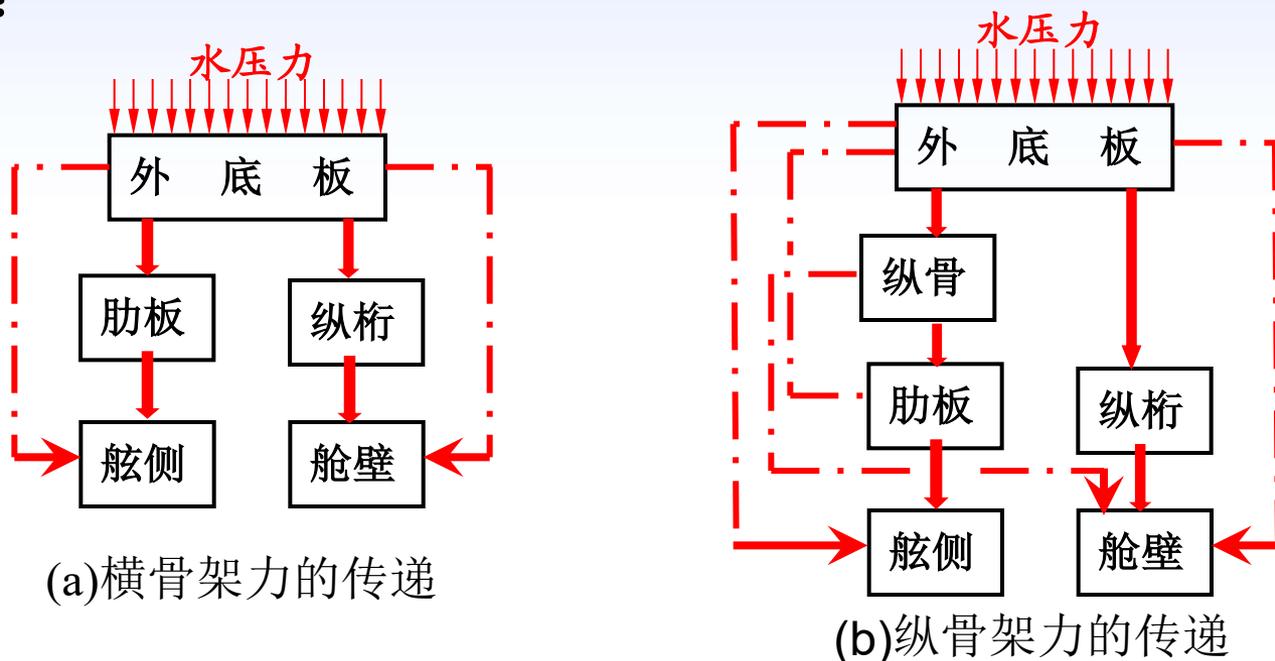


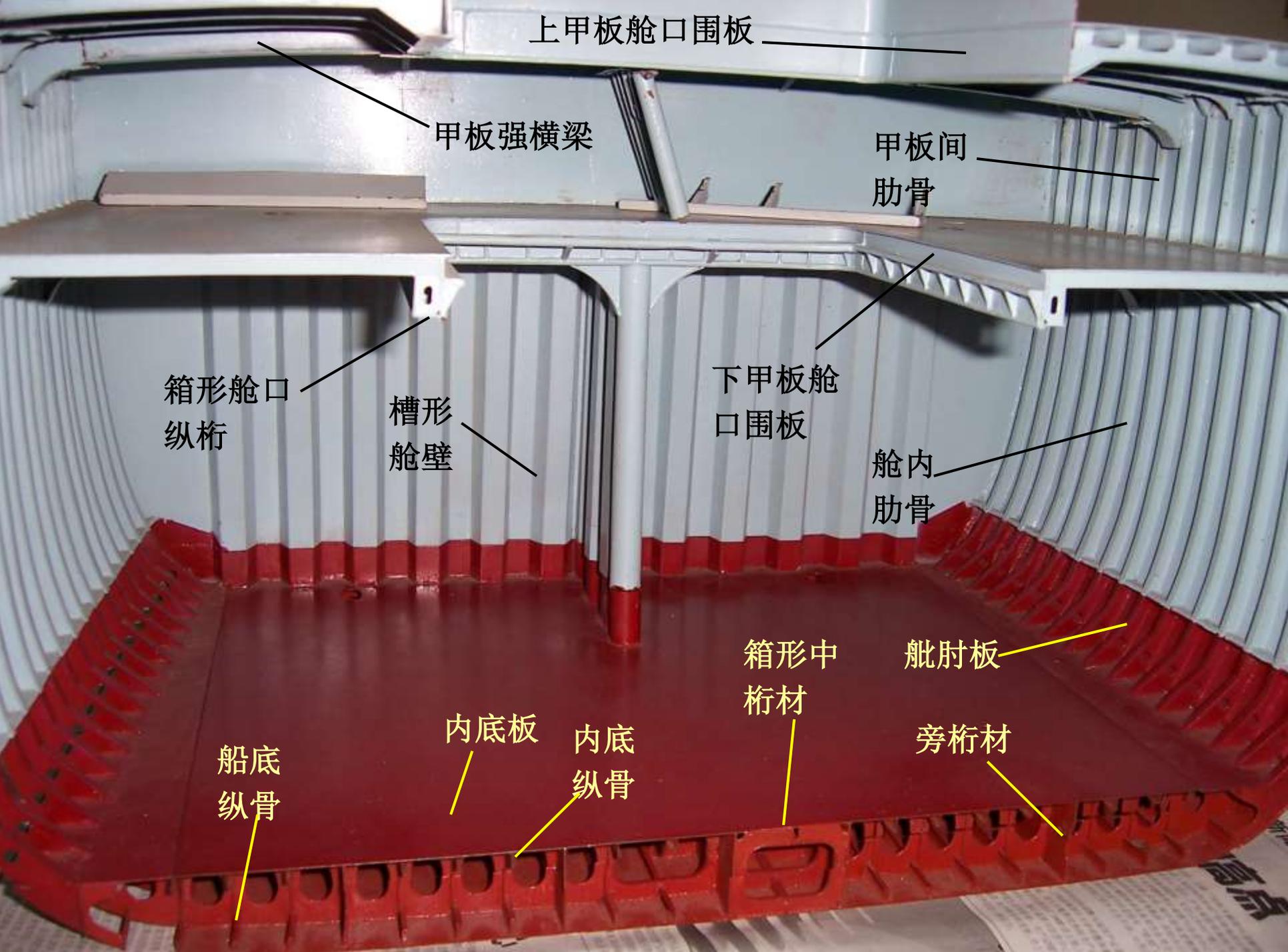
17.5万吨散货船



1. 力和变形的传递

由于构件相互连接，其作用和变形是很复杂的。假定船底板架只受水压力。直接承受水压力的构件是外底板，外底板将力和变形传给主向梁（纵骨、组合肋板），主向梁传给由实肋板与纵桁组成的板架，最后再传到板架的支承周界（横舱壁及舷侧）上。传力过程如图：





上甲板舱口围板

甲板强横梁

甲板间
肋骨

箱形舱口
纵桁

槽形
舱壁

下甲板舱
口围板

舱内
肋骨

船底
纵骨

内底板

内底
纵骨

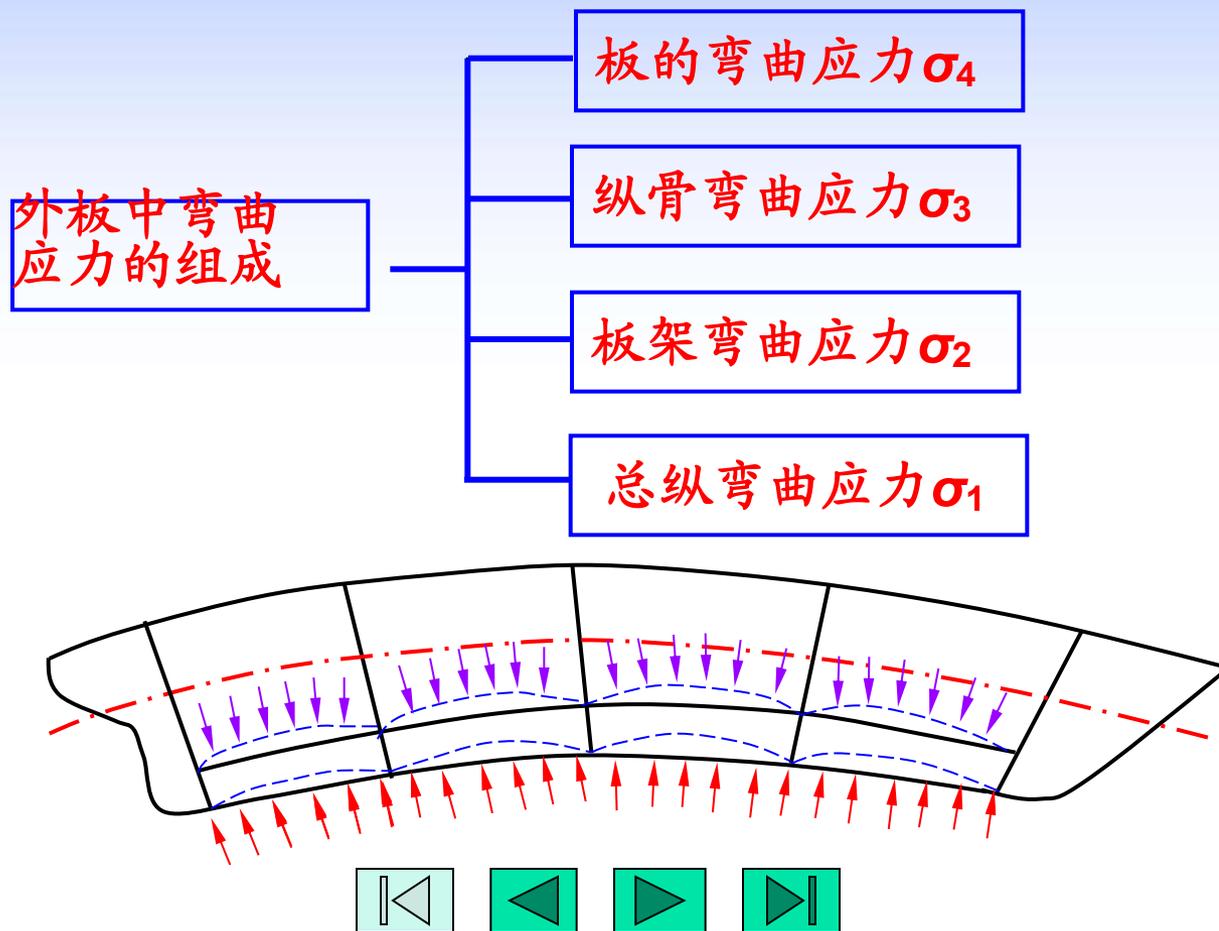
箱形中
桁材

舳肘板

旁桁材

2. 弯曲应力的组成

由此可知：船体构件承受多种作用、产生多种应力的工作特点。
其变形特征如图所示。

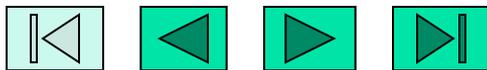


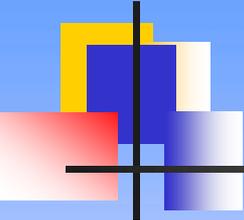
2、纵向构件的分类

按纵向构件在传递载荷时产生的应力种类，分为：

- 1) 第一类构件：只承受总纵弯曲的纵向构件，如不计甲板荷重的上甲板；
- 2) 第二类构件：同时承受总纵弯曲和板架弯曲的纵向构件，如船底纵桁；
- 3) 第三类构件：同时承受总纵弯曲、板架弯曲以及纵骨弯曲的纵骨；或同时承受总纵弯曲、板架弯曲及板弯曲的横骨架式板；
- 4) 第四类构件：同时承受总纵弯曲、板架弯曲、纵骨弯曲及板弯曲的纵骨架式板。

以上各种弯曲，除总纵弯曲外均称为局部弯曲。





• 构件的受力与工作特征

- 多重性：
纵向强力构体分为四类：
a——总纵弯曲
b——板架弯曲
c——纵骨弯曲
d——板的弯曲

构件类型	承受弯曲	部位
第一类构件	a	上甲板（不计自重）
第二类构件	a、b	船底纵桁
第三类构件	a、b、c	纵骨（纵骨架式） 船底板（横骨架式）
第四类构件	a、b、c、d	船底外板 （纵骨架式）

应力合成方法

1、第一类构件与第二类构件

合成位置：跨中、仓壁处

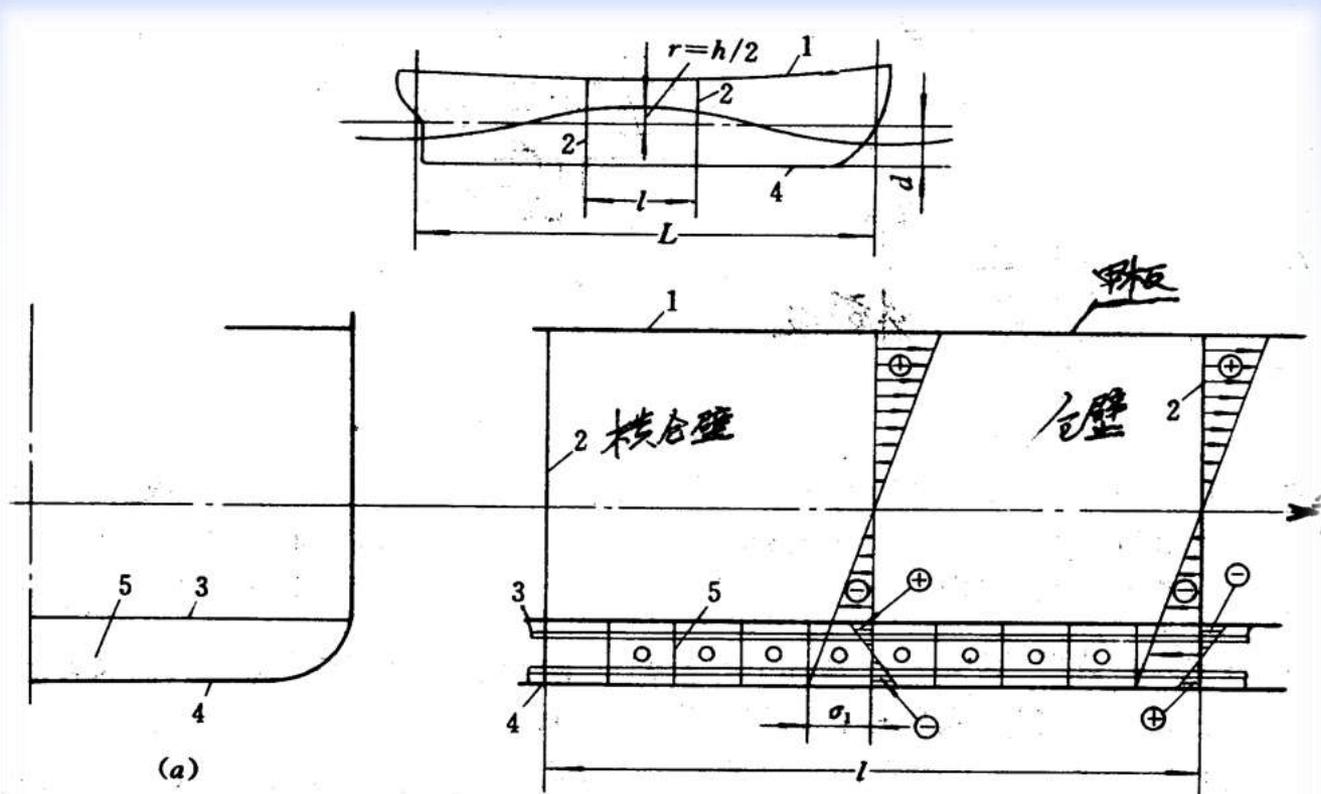


图 第二类构件应力合成:跨中和仓壁位置

2、第三类构件

合成位置：纵骨跨中（两个肋板之间）和肋板位置

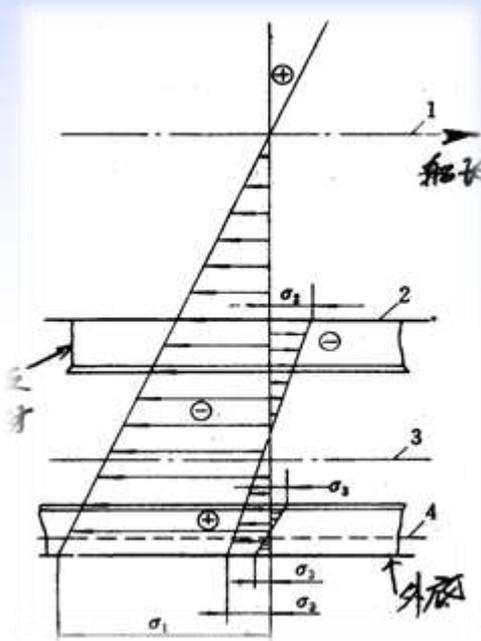
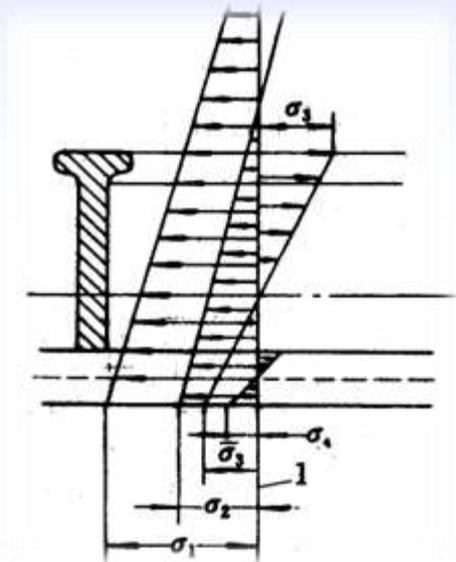


图 第三类构件应力迭加

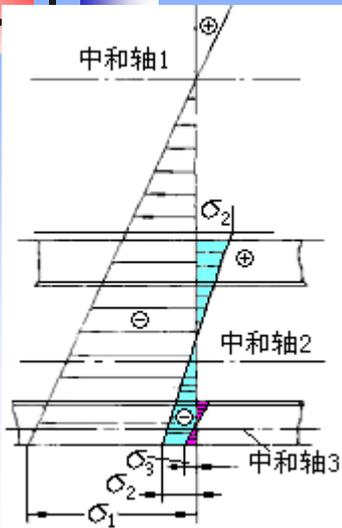
3、第四类构件

合成位置：板架跨中（横仓壁之间）、纵骨跨中和肋板位置、横仓壁位置



$$\bar{\sigma} = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + (\pm)\sigma_4$$

3. 底部构件的应力合成



$$\sigma = \pm\sigma_1 \pm\sigma_2 \pm\sigma_3 \pm\sigma_4$$

波浪上船体总纵弯曲应力 (σ_1)



板架在横舱壁间的弯曲应力 (σ_2)

跨度中央

舱壁处

加强筋在肋板间的弯曲应力 (σ_3)

加强筋在肋板间的弯曲应力 (σ_3)

跨度中央

肋骨处

跨度中央

肋骨处

板的弯曲应力 (σ_4)

板的弯曲应力 (σ_4)

板的弯曲应力 (σ_4)

板的弯曲应力 (σ_4)

外表面

内表面

外表面

内表面

外表面

内表面

外表面

内表面

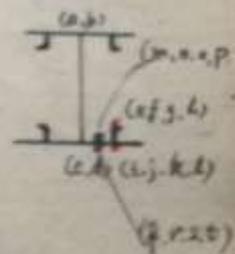
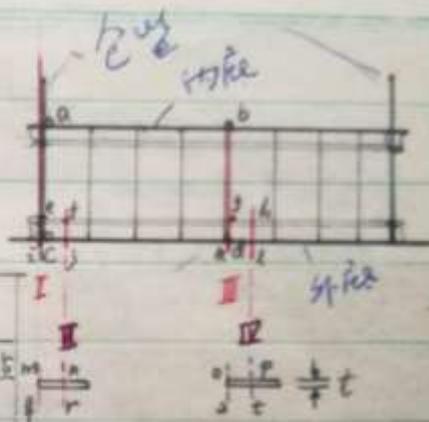


§2-5 应力合成和强度校核 (II)

一、应力合成

1. 计算剖面、计算点

构件类别	应力成份	计算剖面	计算点
一	σ_1	* 任一剖面	高中初和最低点 (1个)
二	$\sigma_1 + \sigma_2$	I、III两剖面	a, b, c, d
三	$\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$	I, II, III, IV	e, f, g, h i, j, k, l
四	$\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4$	I, II, III, IV	m, n, o, p q, r, s, t



* 按第一级近似计算校正
几个包壳剖面。

书图 2-19 P.68

2. 说明: (应力合成注意)

① $\sigma_1 \rightarrow \sigma_1$ 沿全长不变

② I, III 之 σ_2 取 σ_{2a} , III, IV 之 σ_2 取 σ_{2b}

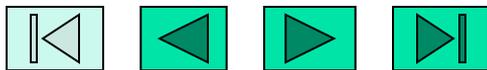
③ 外板内外表之 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 认为同。

§4 船体梁弯曲剪应力计算

船体总纵弯曲时，横剖面上除存在弯曲应力外，还受剪力作用而在同一剖面产生剪应力。其最大剪力一般作用在距首尾端约1/4船长附近，应当校核这些剖面构件受剪应力的强度和稳定性。通常，在中拱或中垂，静置在波浪上的剪应力均应 $< 0.25\sim 0.35\sigma_y$ ；同时，舷侧外板在剪应力作用下应保证有2倍的稳定性储备。

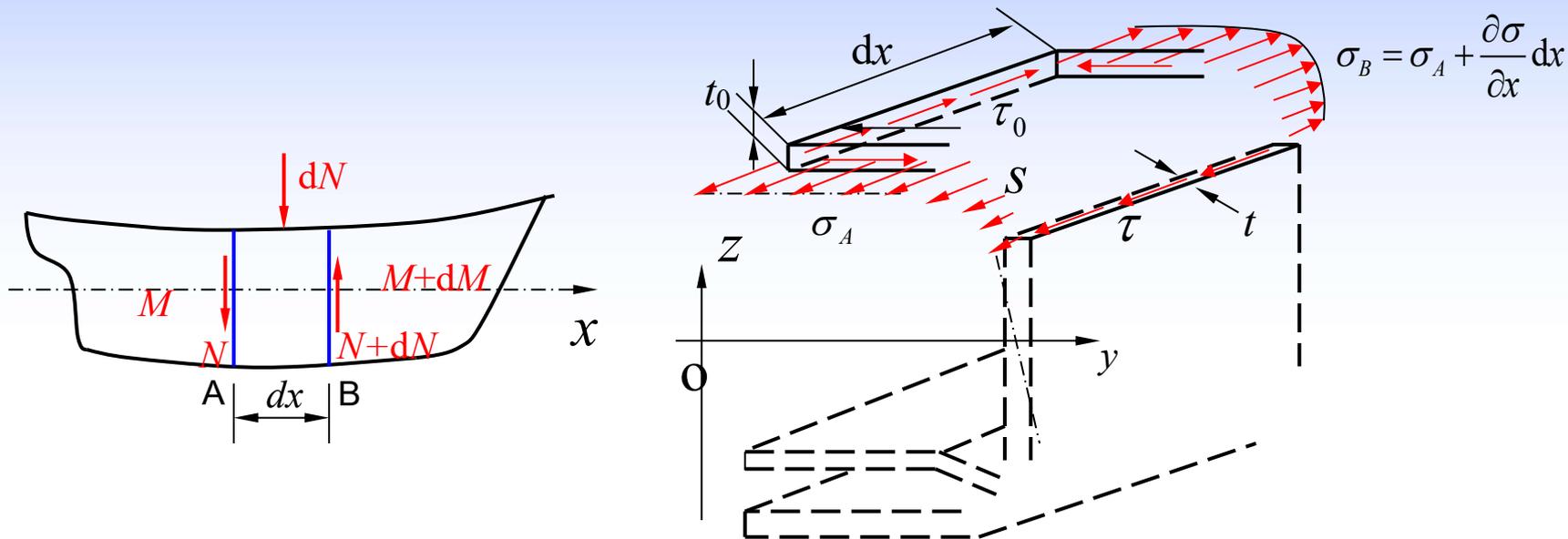
船体结构是左右对称的，计其剪应力时只考虑半个剖面。

一、船体梁弯曲剪应力的一般公式

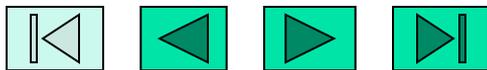


一、船体梁弯曲剪应力的公式

从船梁微段 dx 中切出图示的一块 $dx \cdot s$ ，其中纵向切口，一个在任选的某一原点处，另一个在离原点的弧长为 s 处。



在各切面上作用着弯曲应力和剪应力，由于板厚小，可认为剪应力顺着板面方向且沿厚均匀分布。



剪力流

于是沿船体梁轴向、纵向力的平衡方程式为：

$$\tau \times t dx = \int_0^s \left(\frac{\partial \sigma}{\partial x} dx \right) \times t ds + \tau_0 t_0 dx \quad (1)$$

由材料力学的梁理论知：

$$\sigma = \frac{Mz}{I}, \quad N = \frac{\partial M}{\partial x} \quad (2)$$

将(2)式代入(1)式，有：

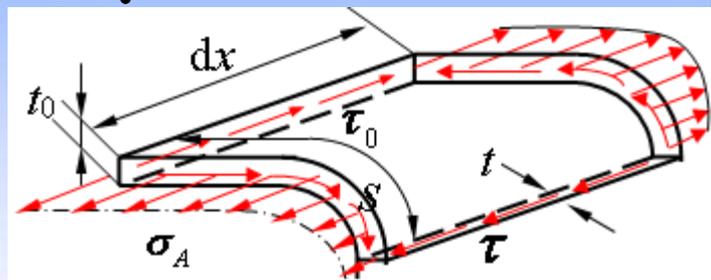
$$\tau t = \frac{N}{I} \int_0^s zt ds + \tau_0 t_0 \quad q = \tau t, \quad q_0 = \tau_0 t_0$$

称 τt 为剪力流，并记 $q = \tau t$, $q_0 = \tau_0 t_0$ 和记从 $s = 0$ 的点

(计算弧长的原点)起到所求剪应力点为止的剖面积对中和轴的静矩

(对纵骨架式结构还应包括纵骨剖面积的静矩)为： $m^0(s) = \int_0^s zt ds$

它是剖面几何要素和沿剖面的位置 s 的函数。



I : 船体横剖面（全剖面）
对水平中和轴的惯性矩。



剪应力在船体剖面上的分布

于是上式可简写为:

$$q = \frac{Nm^0(s)}{I} + q_0, \quad \text{或} \quad \tau = \frac{Nm^0(s)}{It} + \frac{\tau_0 t_0}{t}$$

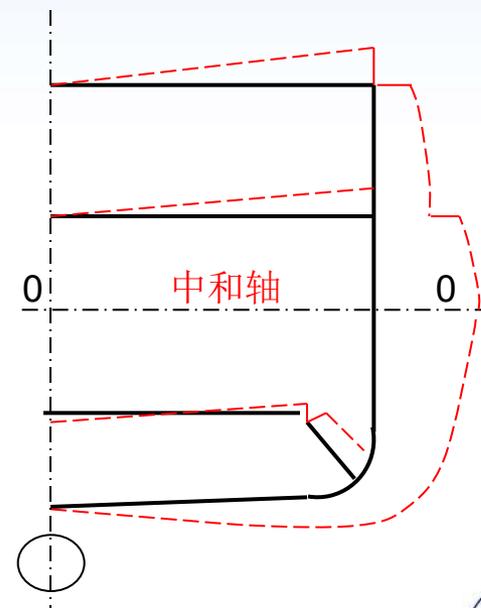
t : 所求剪应力点处的板厚;

t_0 : $s=0$ 处的板厚;

q_0 : 该处的剪力流。

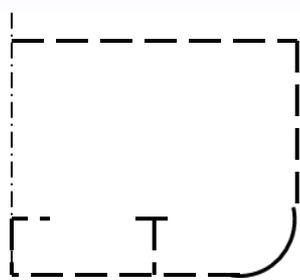
由上式可知, 剪力流与弯矩无关, 仅与剖面对中和轴的静矩有关, 故剪力流分布规律决定于剖面几何要素。

任一艘体剖面上, 剪力 N 和惯性矩 I 是定值, 故剪应力值随 $m^0(s)$ 而变。中和轴处静矩 m^0 最大, 剪应力亦常为最大值。在板厚 t 或静矩 m^0 突变处, 剪应力也突变。由于 m^0 在中和轴两侧呈抛物线变化, 剪应力亦呈抛物线变化。

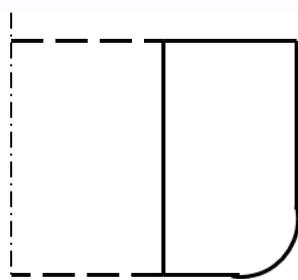


船体剖面的结构型式

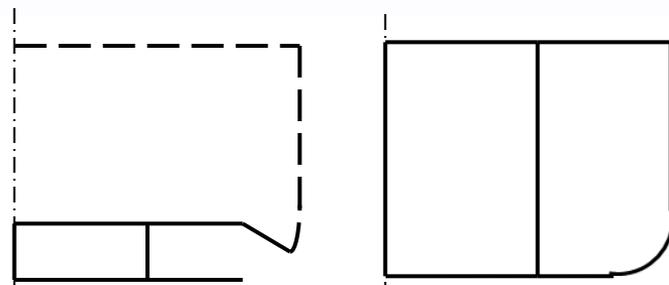
船体剖面有开式与闭式两种型式。整个横剖面除甲板开口外，应均为闭式。图(a)在船体中心线处甲板板结构对称，该处剪应力为零，这种结构相当于开式剖面；图(b)和(c)为具有双层底或纵舱壁结构，因而属闭式剖面。



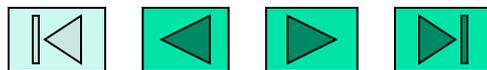
(a) 开式



(b) 单闭式



(c) 多闭式



1. 开式剖面构件的剪应力

开式剖面上有明显的剪应力零点，故将计算 s 的原点取在这些零点上。故开式剖面上任意点的剪流，可由平衡条件求得，即：

$$q^0 = \frac{Nm^0(s)}{I} \quad \text{或} \quad \tau_0 = \frac{Nm^0(s)}{It}$$

$m^0(s)$ 按半个剖面计算，零剪力点到计算点间的剖面积对中和轴的静矩。

因计算剖面处 N ， I 为定值，剪力流 q^0 与面积静矩 $m^0(s)$ 的分布是相同的，但单位不同。而剪力流 q^0 的方向，手工计算时，可观察决定，因为船体梁**腹板**上的剪流方向总是与总的剪力 N 的方向相同的。



2. 多闭室剖面的剪应力

1) 变形协调条件与平衡条件

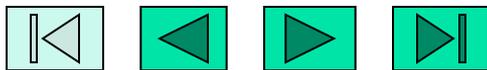
多闭式属超静定问题。当剖面只有弯曲，而无扭转变形时，剖面上任一点的剪应变为：

$$\gamma = \partial u / \partial s \quad u: \text{轴向位移。}$$

封闭剖面的剪切变形积分一周应等于零，即： $\oint \gamma ds = 0$

表示虽然剖面由于剪应力的作用而发生变形，但仍作为一闭环而连结为一个整体。即在任选原点处将船梁纵向切开，则在切开处两侧纵剖面上必须施加大小相等、方向相反的剪流 q^0 ，以保证切口剖面不发生纵向滑移。因为纵向剪切应变从切口的一边沿剖面积分一周到切口的另一边，正好就等于剖面切口的纵向滑移，于是有：

$$\text{纵向滑移} = \oint \gamma ds$$



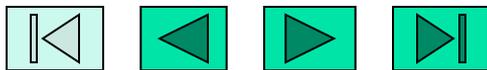
多闭室剖面的剪应力

因为 $\gamma = \frac{\tau}{G} = \frac{q}{Gt}$ ，因此可根据变形协调条件

$$\oint \frac{q}{t} ds = 0$$

求得未知的剪力流 q^0 。

为计算多闭室剖面的剪应力，首先要对每一闭室选定一个计算 $m^0(s)$ 的起点，然后根据变形协调条件确定相应的未知剪力流 q_i 。这相当于将多闭室化为一个个的开式剖面进行计算。

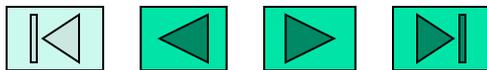


多闭室剖面的剪应力

将每一闭室假想地纵向切开，并在纵向切口剖面施加剪力流 q_i ，把船体梁半剖面变成具有若干支路的“开式”剖面，但每一支路在“开口”端都具有非零的剪力流 q_i 。

由于每一个假想“开口”端的非零剪力流 q_i 都在对应于该支路的原闭室剖面上引起常量剪力流分量 q_i ，所以第 i 闭室剖面上的总剪力流 \hat{q}_i 的平衡条件应为：

$$\hat{q}_i = q_i^0 + q_i + \sum_{j=1}^k q_{i,j} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$



多闭室剖面的剪应力

$$\hat{q}_i = q_i^0 + q_i + \sum_{j=1}^k q_{i,j} \quad (i=1,2,\dots,n)$$

$q_i^0 = \frac{Nm^0(s)}{I}$ — 第*i*闭室按开式剖面计算的剪力流分量，即静定剪力流；

q_i —第*i*闭室上的常剪流分量；

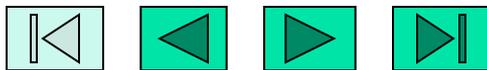
$q_{i,j}$ —与第*i*闭室相邻的第*j*闭室上的常剪流分量，仅在公共壁上计及；

n —剖面闭室总数；

k —与第*i*闭室相邻的闭室总数。

然后对每一个闭室列出变形协调条件：

$$\oint \frac{\hat{q}_i}{t} ds = 0, \quad (i=1,2,\dots,n)$$



多闭室剖面的剪应力

则代入平衡条件表达式可得：

$$\oint_{\text{闭室 } i} \frac{q_i}{t} ds + \sum_{j=1}^k \oint_{\text{闭室 } i} \frac{q_{i,j}}{t} ds = - \oint_{\text{闭室 } i} \frac{q_i^0}{t} ds$$

其中 $\oint_{\text{闭室 } i} \frac{q_{i,j}}{t} ds$ 为与第*i*闭室相邻的第*j*闭室剖面上的常剪力流在闭室*i*上的闭路积分，显然仅沿着它们的公共壁才有非零值。上式可进一步简化为：

$$\oint_{\text{闭室 } i} \frac{q_i}{t} ds + \sum_{j=1}^k \int_{i,j} \frac{q_{i,j}}{t} ds = - \oint_{\text{闭室 } i} \frac{q_i^0}{t} ds \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

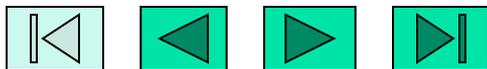
此处 $\int_{i,j}$ 表示沿两相邻闭室 *i*、*j* 公共壁积分。



符号规定

在利用上述公式进行计算时，先假定： $N/I=1$ ，并要注意以下规定。

- ① $m^0(s)$ 的计算：一旦切口位置确定后，计算面积静矩 $m^0(s)$ 的积分，从该切口开始沿着每一支路分段进行。计算 $m^0(s)$ 时假定 z 轴向上；
- ② q_i 的方向：开始假设常剪力流 q_i 沿所在闭室 i 的顺时针方向，若算出的 q_i 为负值，表明它是逆时针方向；
- ③ $m^0(s)/t$ 、 q/t 的闭路积分：所有闭路积分均沿所在闭室 i 的顺时针方向进行，当 $m^0(s)$ 的积分方向及常剪力流方向与闭路积分方向相反时，则该闭路积分值变号。



符号规定

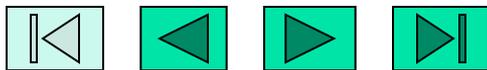
根据上述规定，因相邻闭室的常剪力流方向总是与所进行的闭路积分方向相反，故上式中的第二项积分应为：

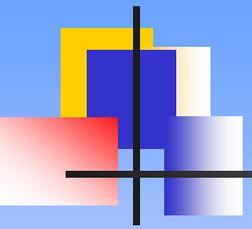
$$\int_{i,j} \frac{q_{i,j}}{t} ds = -q_{i,j} \int_{i,j} \frac{1}{t} ds$$

因此，平衡方程成为：

$$\oint_{\text{闭室}i} \frac{q_i}{t} ds - q_{i,j} \sum_{j=1}^k \int_{i,j} \frac{1}{t} ds = - \oint_{\text{闭室}i} \frac{q_i^0}{t} ds \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

④ \hat{q}_i 的**方向**：若最后计算出的 \hat{q}_i 为正， \hat{q}_i 表明它沿所在闭室的顺时针方向作用，否则沿逆时针方向。



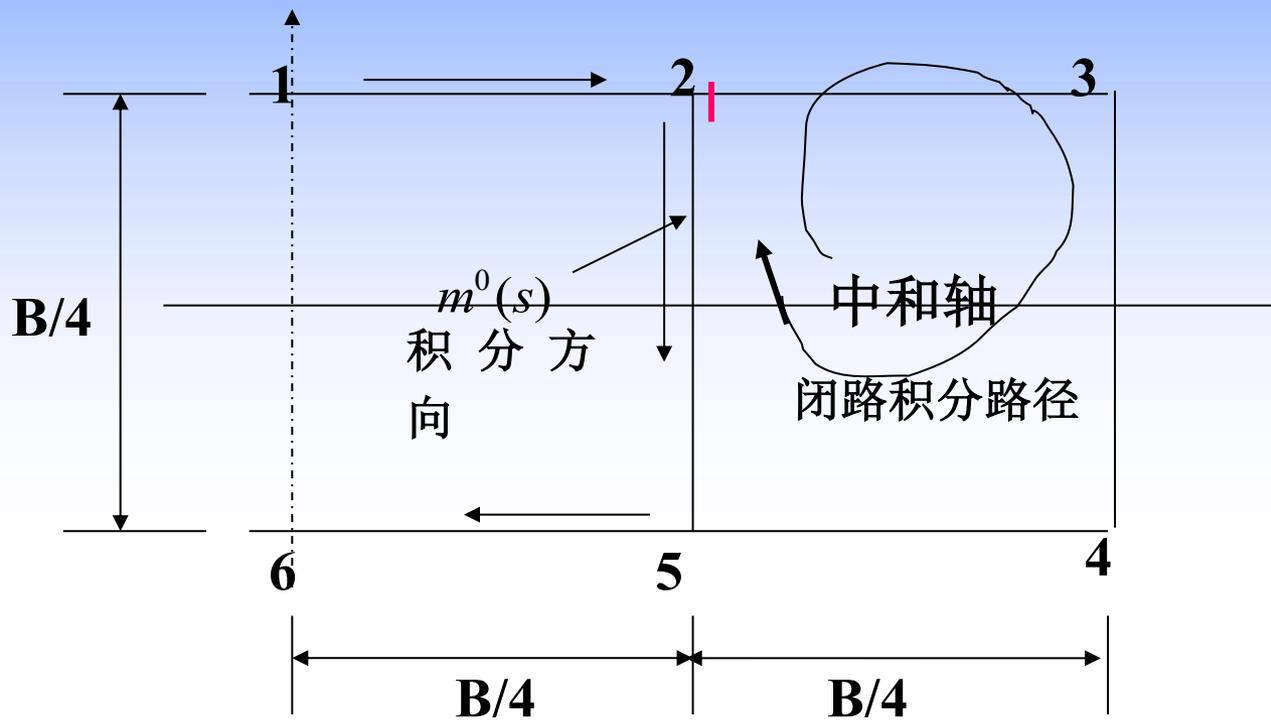


单个闭室: $\hat{q}_i = q_i^0 + q_{0,i} + \sum_{j=1}^k q_{0,i,j}$

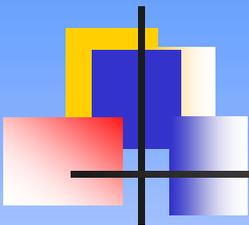
$$\hat{q}_i = q_i^0 + q_{0,i}$$

如果总剪力流为负号，则说明实际剪力流方向与所假设的剪力流方向相反。

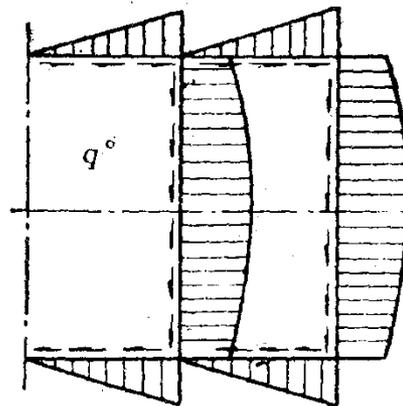
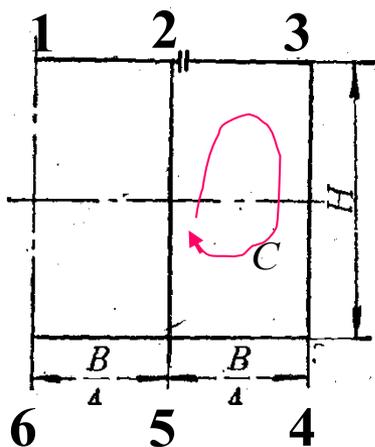
算例、剖面具有一道纵仓壁，中和轴位于 $\frac{1}{2}$ 型深处，所有板厚 t ，剖面剪力为 N ，计算剪力流。



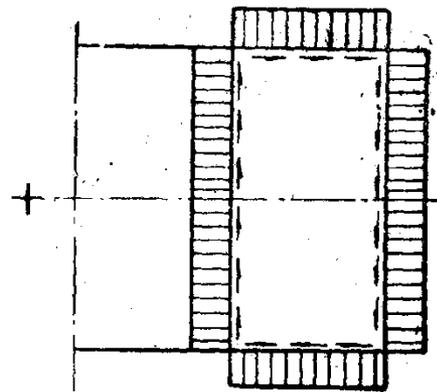
解：点1和点6在中纵剖面，剪应力等于零，取点1为静矩零点，计算开口部分剪力流，开口1-2 和 6-5 的剪力流为 q^0 。



闭口为2-3-4-5-2，在闭口点2切开，施加常剪力流 $q_{1,0}$ 。点2为计算闭口的静矩零点。



按照开式剖面公式计算结果



切开2点后施加的常剪力流

$$\oint_C \frac{m^0(s)}{t} ds = \frac{1}{t} \left[\int_{2-3} m^0(s) ds + \int_{3-4} m^0(s) ds + \int_{4-5} m^0(s) ds + \int_{5-2} m^0(s) ds \right]$$

$$\oint_C \frac{m^0(s)}{t} ds = \frac{1}{t} \left[\int_{2-3} m^0(s) ds + \int_{3-4} m^0(s) ds + \int_{4-5} m^0(s) ds - \int_{5-2} m^0(s) ds \right]$$

$$\oint_C \frac{m^0(s)}{t} ds = \frac{1}{t} \left[\int_{2-3} m^0(s) ds + \int_{4-5} m^0(s) ds \right]$$

静矩积分方向与闭路积分方向相反

$$m_{2-3}^0(s) = \int_0^{s_2} \frac{B}{8} t_A ds_2 = \frac{B}{8} t_A s_2$$

$$2-3: \int_{2-3} m^0(s) ds = \int_0^{B/4} \frac{B}{8} t_A s_2 ds_2 = \frac{B}{8} t_A \frac{1}{2} \left(\frac{B}{4}\right)^2$$

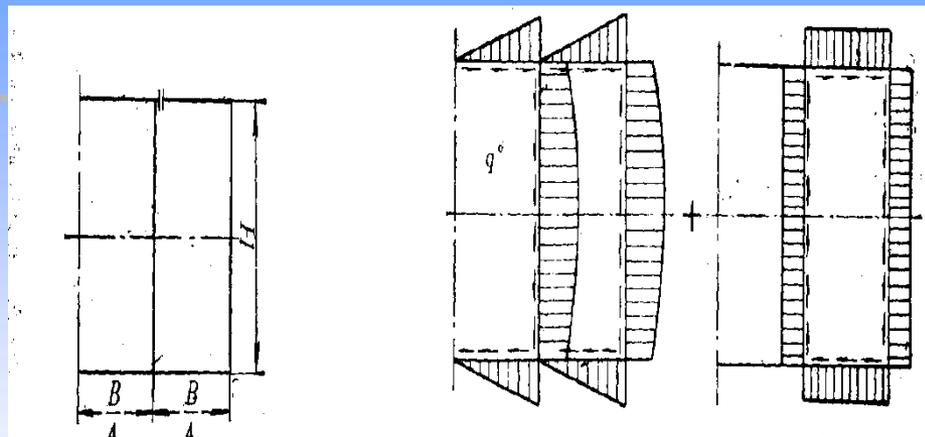
积分方向

静矩积分方向

$$4-5: \int_{4-5} m^0(s) ds = \int_0^{B/4} \frac{B}{8} t_A s_2 ds_2 = \frac{B}{8} t_A \frac{1}{2} \left(\frac{B}{4}\right)^2 \quad \frac{1}{t_A} \oint_C m^0(s) ds = \frac{B^3}{128}$$

$$\frac{1}{t} \oint_C ds = \frac{1}{t} \left(\frac{B}{4} \times 4 \right) = \frac{B}{t}$$

$$q_1 = - \frac{N \oint_C \frac{m^0(s)}{t} ds}{I \oint_C \frac{ds}{t}} = - \frac{NB^2 t}{128I}$$



按照开式
剖面公式
计算结果

切开2点后
施加的常
剪力流

负号说明实际常剪力流方向为逆时针。

叠加求总剪力流：

注意：闭口区求总剪力流时，静矩计算的起始点要与选闭口切口位置。

$$\text{闭口区：} \quad \hat{q}_1 = q_1^0 + q_{1,0} = \frac{Nm^0(s)}{I} - \frac{NB^2 t}{128I}$$

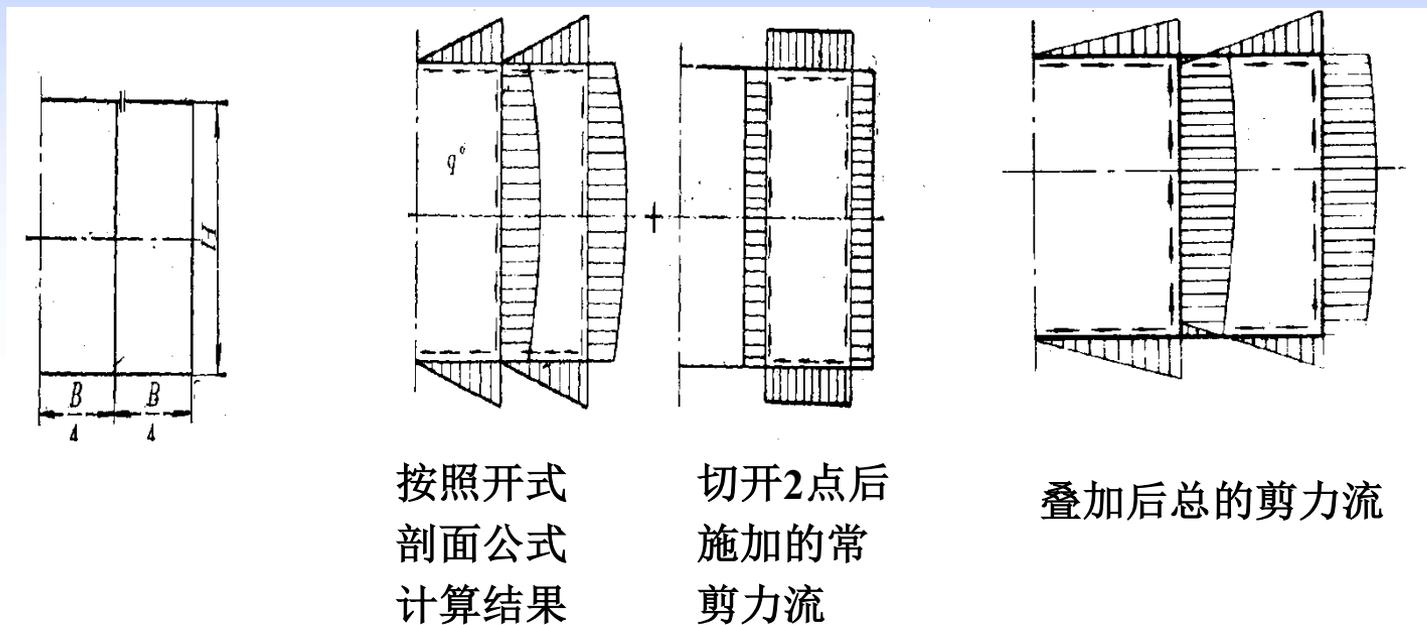
开口与闭口分界线的剪力流：

$$\hat{q}_{2-5} = q_{2-5}^0 + q_{1,0} = \frac{Nm_{2-5}^0(s)}{I} - \frac{NB^2 t}{128I}$$

注意：闭口区求总剪力流时，静矩计算的起始点要选在闭口切口位置。



实际常剪力流为逆时针方向。



近似计算公式

实用上，这类闭式结构的剪应力可采用近似方法估算。通常，假定同一水平线上点的剪应力相等。

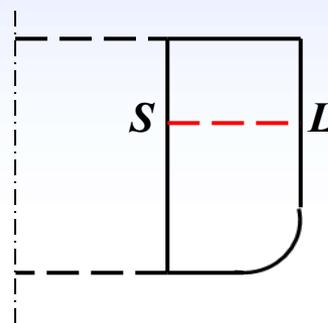
如右图中 S ， L 两点处 $\tau_S = \tau_L$ ，利用单闭式剪力流公式可导得：

$$\tau_S = \tau_L = \frac{NS}{I(t_S + t_L)}$$

S —水平线 SL 以上部分的剖面积对中和轴的静矩；

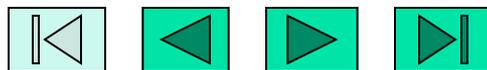
I —计算剖面对中和轴的惯性矩；

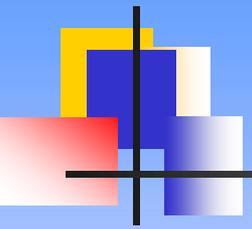
t_S —纵舱壁板厚、 t_L —舷侧外板厚。



舷侧外板按上式求得的近似值一般较精确值高10%；而纵舱壁则较精确计算值低10~20%。

(具体计算参见书中算例)





§5 许用应力

- 一、许用应力与安全系数
- 二、安全系数的选取

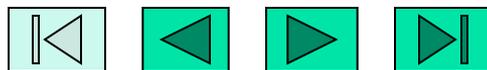


一、许用应力与安全系数

许用应力是指在船体结构在各种工况下，所容许承受的最大应力值。许用应力通常小于构件材料破坏时材料所对应的极限应力值。以保证其强度有足够的储备。

许用应力的选择和改变将直接影响结构的型式、材料的耗费和结构的使用年限等。

因此，正确决定作用在船体上外力的大小和性质，及确定船体构件的许用应力，是结构设计和强度计算中最重要的部分。



安全系数的选取

理论上，材料的极限应力除以安全系数即得到许用应力。安全系数通常决定于以下因素：

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{\text{极限应力}}}{k}$$

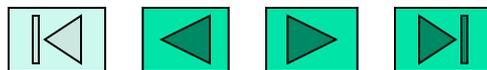
k - 安全系数，反映强度储备的系数

一般船舶工程结构安全系数取1.5 ~ 2.0

海洋工程结构更高，一般为2 ~ 2.5。

极限应力取法与材料性质和载荷形式有关：

- (1) 塑性材料：极限应力取屈服极限；
- (2) 承受交变载荷：极限应力取疲劳极限。



安全系数的选取

- 1) 计算载荷表征实际载荷的精度（载荷的大小和性质）；
- 2) 给定载荷下，结构响应分析的精度（包括应力分布、数值计算、结构计算模型偏离实际结构的影响等）；
- 3) 材料机械性能的稳定程度；
- 4) 建造工艺、施工质量对结构材料强度的影响；
- 5) 营运条件及使用年限决定的腐蚀磨损情况；
- 6) 结构破坏所引起的后果。

不同的计算方法，许用应力也不同。



许用应力实际标准

目前，船体强度计算具有假定的性质，因实际上，许用应力标准是根据舰船设计、建造和营运经验，以及积累的实船静载测量和航行试验结果，按安全和经济的原则确定的。

安全系数的选取也是经验的，其大小受某些研究人员对船舶营运情况的主观分析所决定，其值在各个历史时期也不同，而且在不同的规范、标准中也不相同。另外，选用时还特别要**注意外力、内力的计算方法和许用应力的一致性**。

规范中的强度都是**相对强度**



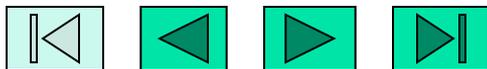
计算波高的标准

早年总纵弯曲的许用应力公式按波高取为1/20船长计算，随船长而增加。

但据观测资料，该值对小船偏低；对大船偏高。即大船实际遇的波高低于计算值，船体实际所受到的总纵弯曲应力将低于计算值。所以，船舶尺度增大时，其许用应力可以提高一些。

在前苏联1962年的标准中，计算波高为：

$$h = \begin{cases} 0.64\sqrt{L} - 1.0(\text{m}), & (L \leq 120\text{m}) \\ 6(\text{m}), & (L > 120\text{m}) \end{cases}$$



>120m 干货和油船的许用应力

$$h = \begin{cases} 0.64\sqrt{L} - 1.0(\text{m}), & (L \leq 120\text{m}) \\ 6(\text{m}), & (L > 120\text{m}) \end{cases}$$

船长>120m，计算波高均取6m。这是基于系统分析了世界各国L=120~240m的干货船和油船，将船舶静置于波长等于船长、波高等于一定值的坦谷波上计算总纵弯矩时，所得船中剖面上甲板的总纵弯曲应力实际上是相同的。因此，规定许用应力不随船长而变。对于干货船和油船的总纵弯曲许用应力规定为：

$$[\sigma_1] = 0.5 \sigma_s \text{ (油船 } 0.45 \sigma_s \text{)}$$



按合成应力校核的第二类构件

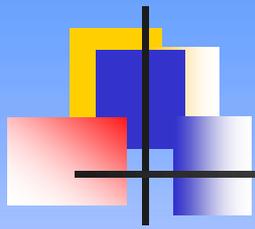
按合成应力校核总纵强度的第二类构件，其许用应力 $[\sigma_1 + \sigma_2]$ 规定为：

$$[\sigma_1 + \sigma_2] = 0.65\sigma_s \quad (\text{油船} 0.55\sigma_s) \quad (\text{在跨中剖面})$$

$$[\sigma_1 + \sigma_2] = 1.0\sigma_s \quad (\text{油船} 0.9\sigma_s) \quad (\text{在支座剖面})$$

由于许用应力法简单，且经过长期应用，大量的资料、规则、规范等均以此为基础，故目前在造船界仍广泛采用此法评定船体强度。





军舰设计中的许用应力

采用布勃诺夫(Бубнов)提出的许用应力公式:

$$[\sigma] = 0.25\sigma_s \left(3 + \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \right)$$

$[\sigma_{\min}]$ —绝对值最小的正应力;

$[\sigma_{\max}]$ —绝对值最大的正应力。

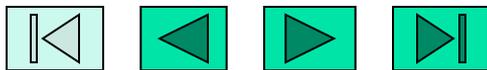


§6 船体挠度计算

船体挠度不如强度重要。但对于用高强度钢或铝合金建造的船、在极浅航道航行的船，特别是船长与型深之比很大的船，船体梁变形的问题应予注意。

船体梁变形（挠度）过大，会影响主机、轴系的运转，影响舾装件的安装、仪表的使用，甚至可能导致上层建筑端部因应力集中而破坏。对满载中垂挠度过大的船，受载重线限制，会减少船舶的载重量。对内河浅水航道船，过大的挠度甚至可能使通过浅滩发生困难。

注意：船体挠度计算对军船十分重要。



一、弯曲挠度

船体为变断面薄壁梁，取船尾为原点， x 轴指向船首， y 轴垂直向上，则作用在任意剖面上的弯矩 $M(x)$ 与挠度间的关系：

$$EI(x)v'' = M(x)$$

对上式积分，利用首尾端变形的边界条件： $x=0$ 和 $y=L$ 有 $v(0)=v(L)=0$ ，可得：

$$v(x) = \frac{1}{E} \left[\frac{x}{L} \int_0^L \int_0^x \frac{M(x)}{I(x)} dx dx - \int_0^x \int_0^x \frac{M(x)}{I(x)} dx dx \right]$$

$I(x)$ ：距船尾 x 处的船体纵向构件的剖面惯性矩；

E ：船体材料的弹性模量。



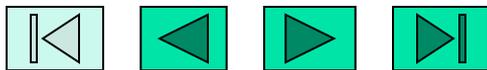
弯曲挠度

弯曲挠度计算用表格进行。通常取20站，但在某些情况下取10站就足够精确了。逐站画出船体剖面的惯性矩曲线。船体剖面惯性矩近似计算式为：

$$I(x) = I_{\text{船中}} \left[\frac{1}{3} + \frac{8}{3} \left(1 - \frac{x}{L}\right) \frac{x}{L} \right]$$

若船中剖面的最大总纵弯矩值已知时，船中的弯曲挠度可用下式近似估算

$$v_{\text{船中}} = \beta \frac{M_{\text{max}} L^2}{EI_{\text{船中}}} \quad \beta = (0.08 \sim 0.10) \circ$$



二、剪切挠度

船体梁总纵弯曲时，船体剖面还会因剪力而发生上下移动，产生剪切挠度。剪切挠度方程可根据剪力的功与剪切变形能相等的条件求得。

在 dx 微段内剪切变形能为：

$$\int_A \frac{1}{2} \frac{\tau^2}{2G} dA dx$$

x —剖面处的船体剖面积。



剪切挠度

利用剪力功与剪切变形能相等:

$$\frac{1}{2} N \times dv = \frac{dx}{2G} \int_A \tau^2 dA$$

于是距原点 x 处剖面的剪切挠度:

$$v = \int_0^x dv = \int_0^x \frac{dx}{NG} \int_A \tau^2 dA$$

由于船体横剖面形状及剖面剪应力 τ 的分布比较复杂, 实施上式积分十分困难, 常采用下述近似方法:

$$\tau = N / A_\omega$$

A_ω : 横剖面承受剪切的相当面积, 一般只计及船体垂向构件的剖面积——**船体梁的腹板部分面积**



剪切挠度

根据首尾端剪切挠度为零，剪切挠度方程为：

$$v = \frac{1}{G} \left[\int_0^x \frac{N}{A_\omega} dx - \frac{x}{L} \int_0^L \frac{N}{A_\omega} dx \right]$$

由于剪切挠度一般仅为弯曲挠度的10%左右，所以常不计算。

为了简略估计剪切挠度，可假定船体是剖面积为 A_ω 的等剖面箱形梁。于是，上式可改写为：

$$\begin{aligned} v &= \frac{1}{GA_\omega} \left[\int_0^x N(x) dx - \frac{x}{L} \int_0^L N(x) dx \right] \\ &= \frac{1}{GA_\omega} \left\{ [M(x) - M(0)] - \frac{x}{L} [M(L) - M(0)] \right\} = \frac{M(x)}{GA_\omega} \end{aligned}$$



剪切挠度与总挠度

由此可知，只要把弯矩曲线缩小 $1/(GA_{\omega})$ 倍，就可得到剪切挠度的近似值。若利用船中剖面的 A_{ω} ，所得的挠度值偏低。

弯曲挠度与剪切挠度之和即为船体总纵弯曲的总挠度。船体的总挠度与船长之比一般应小于 $1/400\sim 1/500$ 。

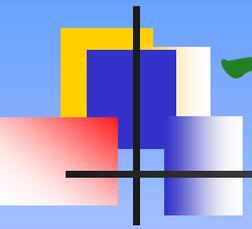


§7 船体极限弯矩计算

一、极限弯矩与结构的过载能力

二、极限弯矩计算





一、极限弯矩与结构的过载能力

船体结构要保证正常航行时有足够的强度，还应在搁浅、碰撞、水下爆炸等意外状态下有足够的强度储备。由于意外状态下的外力难以确定，不能进行准确的强度计算，因而采用船体剖面中的**极限弯矩**估计船体的过载能力。

极限弯矩是指船体剖面内离中和轴最远点构件的应力达到材料的屈服极限(受拉)或临界应力(受压)时，船体剖面中所对应的总纵弯矩。



极限弯矩

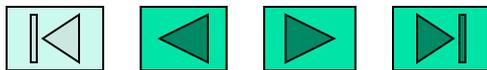
以材料的屈服极限为衡准，是因为钢结构应力超过该值时，结构将产生塑性变形。当船体结构边缘纤维中的总纵弯曲应力超过材料的屈服极限时，船体梁将出现整体性的总纵弯曲变形，这是不允许的。故极限弯矩为：

$$M_j = \sigma_s W_{yh} \quad \text{或} \quad M_j = \sigma_{cr} W_{ys}$$

W_{yh} —假定剖面距中和轴最远点的拉应力等于材料屈服极限时的船体最小剖面模数；

W_{ys} —假定构件距中和轴最远点的压应力等于其临界应力时的船体最小剖面模数；

σ_{cr} —距中和轴最远点构件的临界应力。



按极限弯矩校核船体强度

为了按极限弯矩检验船体强度，应将所得的 M_j 值与在波谷上和波峰上相应计算弯矩 M 进行比较，即应满足：

$$M_j / M \geq n$$

n — 过载系数（强度储备系数），其取值见有关标准。

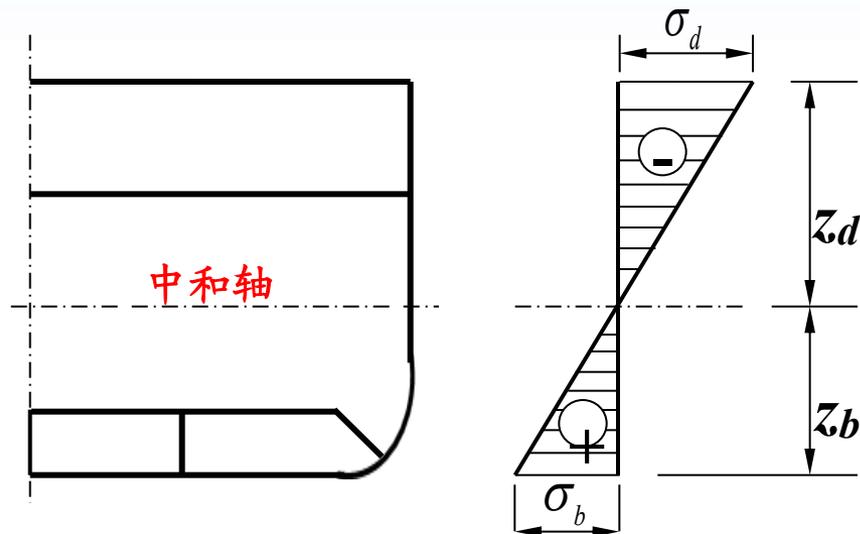


二、极限弯矩计算

实际上是计算极限状态下船体的最小剖面模数。因此，首先应确定船体剖面上的应力分布，然后用总纵弯曲应力第二次近似计算的方法求折减后的剖面模数。

通常，船体横剖面的中和轴偏于船底一边。因此，极限弯矩应对下述两种情况进行计算：

- 1) 在强力甲板中作用着等于屈服极限 σ_s 的拉应力（中拱状态）；

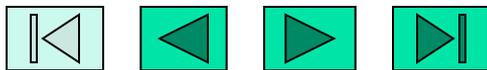
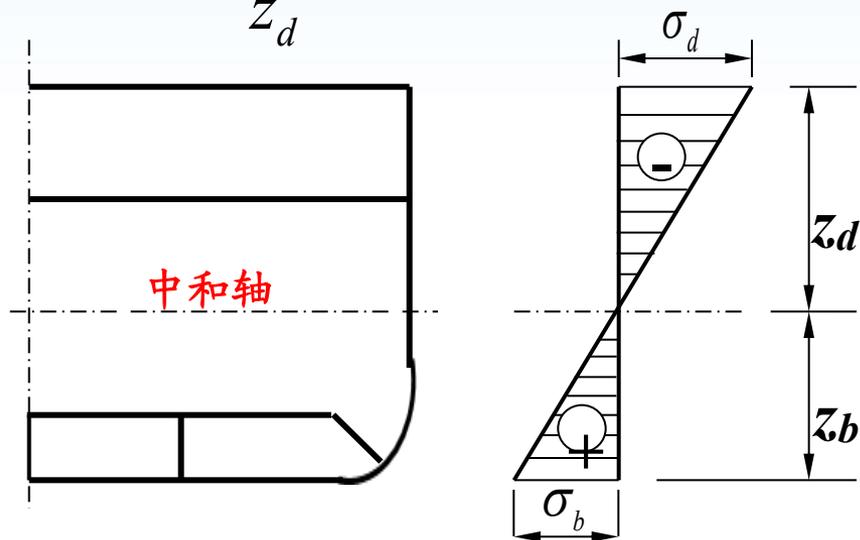


极限弯矩计算

2) 在强力甲板中作用着等于骨架梁临界应力 σ_d 的压应力（中垂）。具体计算该临界应力时，应考虑材料不符合胡克定律的修正。

假定在极限弯矩作用下，船体刚性构件中的应力沿型深方向按下图所示线性规律分布。即

$$\sigma_b = \sigma_d \frac{z_b}{z_d}$$



极限弯矩计算

于是，对任意构件中的应力可按式确定：

$$\sigma_i = \frac{z_i}{z_{\max}} \sigma_{\max}$$

z_i —任一构件距中和轴的距离；
 z_{\max} —离中和轴最远构件至中和轴的距离；
 σ_{\max} —离中和轴最远构件的应力，等于 σ_s 或 σ_{σ_0} 。

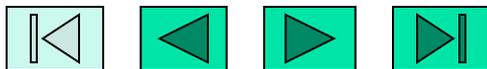
求得各构件的应力后，计算受压构件的折减系数：

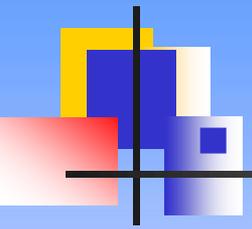
$$\varphi_i = \sigma_{cr} / \sigma_i$$

σ_{cr} —按 § 2 节公式确定的板的临界应力；

若 $\Phi > 1$ ，则取 $\Phi = 1$ 。

剖面折减计算过程与总纵弯曲应力第二次近似计算完全一样。





极限弯矩

■ 极限弯矩的计算方法

计算要分别计算中拱和中垂状态。

- (1) 令强力甲板的拉应力达到屈服极限，并假定弯曲应力成斜直线分布，计算其它构件的应力；
- (2) 对受压构件，计算临界应力及按比例计算压应力
- (3) 进行受压构件的折减计算
- (4) 再次计算剖面模数
- (5) 直至前后两次剖面模数之差不大于**10%**，则得到塑性剖面模数

$$\text{极限弯矩: } M_j = \sigma_y W_s$$

要求塑性剖面模数不小于第一次近似计算剖面模数的75%，如果不满足该要求，则横剖面构件稳定性不足。



极限弯矩计算

若按此步骤求得的船体最小剖面模数 W_{yh} 或 W_{ys} 小于 $0.9W$ （总纵强度第一次近似的最小剖面模数），需再进行一次近似，直至前后两次计算值相差不超过10%为止。

运输船最终的 W_{yh} 或 W_{ys} 不得小于 $0.75W$ ，否则船体构件的稳定性无充分保证，此时，须改变船体结构，以提高船梁主要构件的稳定性。



适度的强度储备

若求得的极限弯矩与总纵弯矩比过大，表明船体有不必要的过大强度储备，船体结构材料没有充分利用；反之，若比值低于要求值 n ，则结构强度没有保证。

$$n = \frac{M_j}{M} = \frac{\sigma_s W_{yh}}{[\sigma]W} = k \frac{W_{yh}}{W}$$

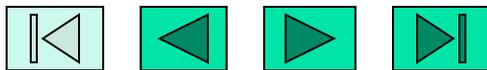


强度储备与过载能力

由式
$$n = \frac{M_j}{M} = \frac{\sigma_s W_{yh}}{[\sigma]W} = k \frac{W_{yh}}{W}$$

- 强度储备系数 k 值越大,则过载能力也越大;
- 若总纵弯曲计算应力比许用应力 $[\sigma]$ 低,则相当于提高了 k 值,也相当于增大了过载能力;
- 若在极限状态下板的折减过大,必然降低 W_{yh} 或 W_{ys} ,因而也就降低了过载能力。

因此,为了提高船体梁的过载能力,应尽可能降低板在极限弯矩作用下的折减程度。在设计中应保证甲板边板、舷顶列板等的临界应力达到结构材料的屈服极限,也就是说,这些构件在极限弯矩作用下不应当失稳。



第二章作业

某型深为3.5m的横骨架式船，第一次近似计算船中剖面要素时，参考轴选在基线上1.4m处，得到以下各数（半剖面）：

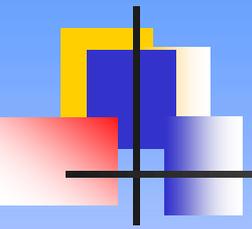
	面积(cm ²)	静矩(cm ³)	惯性矩(cm ⁴)
参考轴以上	492	803.4	1467
参考轴以下	1052	1035.0	1240

该船于中拱状态受到最大弯曲力矩为 25940kN·m，试计算为使船底板在第二次计算的折减系数不小于 0.5，该船底板的最小厚度至少应为多少？（肋距600mm，船底板的临界应力：

$$\sigma_{cr} = 19.6 \left(\frac{100t}{s} \right)^2$$

N/mm²，s：肋距，t：板厚。





作业

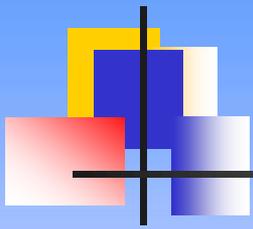
2.1、 2.2、 2.5



进度计划

第0章 绪论	33p	4
第1章 引起船梁总弯曲的外力	74p	6
第2章 船体总纵强度计算	99p	8
第3章 船体局部强度计算	84p	6
第4章 船体扭转强度计算	17p	2
第5章 型材剖面设计	59p	4
第6章 船体中剖面设计	122p	8
第7章 船体规范法设计	38p	2





THANK YOU!!!



广东省船舶与海洋工程技术研究开发中心
Naval Architecture and Ocean Engineering
R&D Center of Guangdong Province

