第二部分

第三章 船舶稳性

稳性的主要内容

- 稳性的基本概念
- 基本的初稳性计算
- 货物移动和装卸对浮性及稳性的影响
- 其他影响

节次安排

1. 概述…
2. 浮心的移动、稳心和稳心半径…
3. 初稳性公式和稳性高…
4. 船舶静水力曲线图…
5. 重量移动对船舶浮态及初稳性的影响…
6. 装卸载荷对船舶浮态及初稳性的影响…
7. 自由液面对船舶初稳性的影响…
8. 悬挂重量对船舶初稳性的影响…
9. 船舶在各种装载情况下浮态及初稳性的计算…
10. 船舶倾斜试验…

第1节 概述

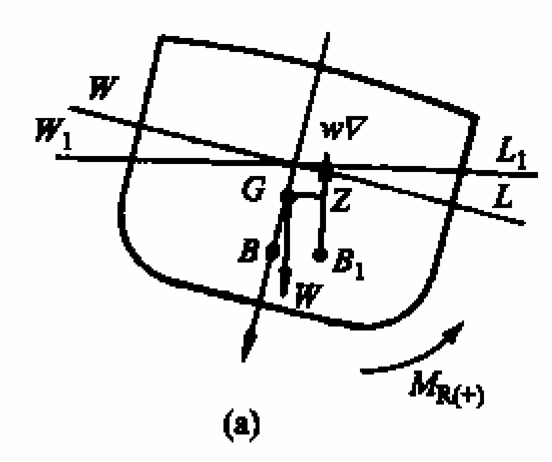
- 船舶在停泊或航行的过程中会受到各种外力的作用：
  - 风、浪、货物的移动与装卸等
  - 船舶的浮态会发生变化
- 船舶在外力作用下偏离其平衡位置而倾斜，当外力消失后，能自行回复到原来平衡位置的能力，称为<u>船舶稳性</u>。
  - 或者说船舶稳性是船舶在外力作用消失后保持其原有位置的能力。

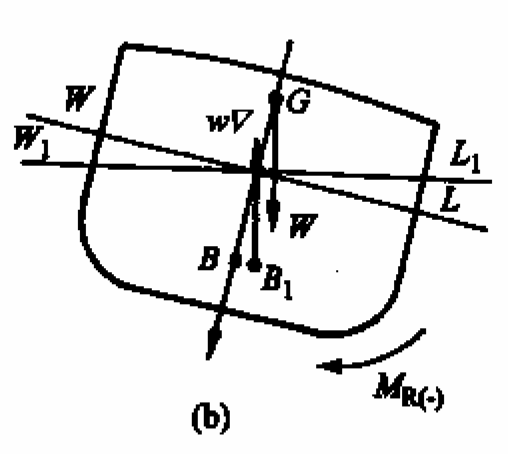
船舶倾斜时作用在船上的两个力矩

- 外力作用对船施加一个力矩——<u>倾斜力矩</u>
  - 倾斜力矩>船舶倾斜>水线位置发生变化<重心与重量不变>排水体积不变，但水下形状变化>浮心位置发生变化>重心和浮心不再位于同一铅垂线上>重力和浮力形成一个力偶，这个力偶的矩称作<u>复原力矩</u>
  - 复原力矩通常记为M_R

$$M_R = \Delta \overline{GZ}$$

- 式中GZ称为复原力臂
  - » 复原力矩可能为正，也可能为负。
  - » 为正使船复原，为负加剧倾斜。





- 倾斜力矩产生的原因有：
  - 风和浪的作用、船上货物的移动、旅客集中于某一舷侧、拖船的急牵、火炮的发射以及船舶回转等，其大小取决于这些外界条件，是外因。
- 复原力矩的大小取决于排水量、重心和浮心的相对位置等因素，是内因。
- 船舶稳性着重研究
  - 船舶复原力矩的计算及其有关的影响因素。

稳性的分类和研究方法（1）

横稳性和纵稳性

- 船舶在任何方向的倾斜，可分成如下两种基本浮态：
  - 船舶的横向倾斜，即向左舷或右舷一侧的倾斜(简称横倾)；
  - 纵向的倾斜，即向船首或船尾的倾斜(简称纵倾)。
  - 倾斜力矩的作用平面平行于中横剖面时称为横倾力矩，它使船舶产生横倾。
  - 倾斜力矩的作用平面平行于中纵剖面时称为纵倾力矩，它使船舶产生纵倾。
  - 船舶在横向和纵向抵抗倾斜的能力，分别称为横稳性和纵稳性。

稳性的分类和研究方法（2）

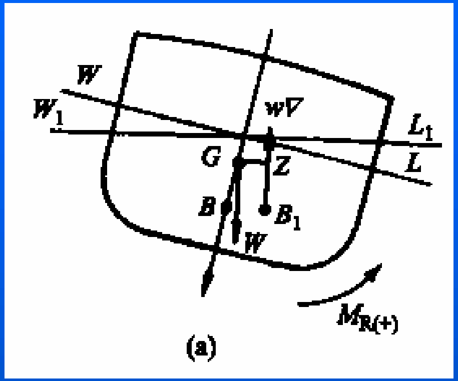
静稳性和动稳性

- 假若倾斜力矩的作用是从零开始逐渐增加，使船舶倾斜时的角速度很小，可忽略不计，则这种倾斜下的稳性称为静稳性。
- 若倾斜力矩是突然作用在船上，使船舶倾斜有明显的角速度的变化，则这种倾斜下的稳性称为动稳性。

稳性的分类和研究方法（3）

- 通常把稳性问题分为下面两部分进行讨论：
  - (1)初稳性(或称小倾角稳性)：一般指倾斜角度小于10°～15°或上甲板边缘开始人水前(取其小者)的稳性。
  - (2)大倾角稳性：一般指倾角大于10°～15°或上甲板边缘开始入水后的稳性。
  - – 把稳性划分为上述两部分的原因是，在研究船舶小倾角稳性时可以引入某些假定，既使浮态的计算简化，又能较明确地获得影响初稳性的各种因素之间的规律。此外，船舶的纵倾一般都属于小角度情况。大角度倾斜一般只在横向倾斜时产生，因此大倾角稳性也称为大倾角横稳性。

第2节　浮心的移动、稳心和稳心半径



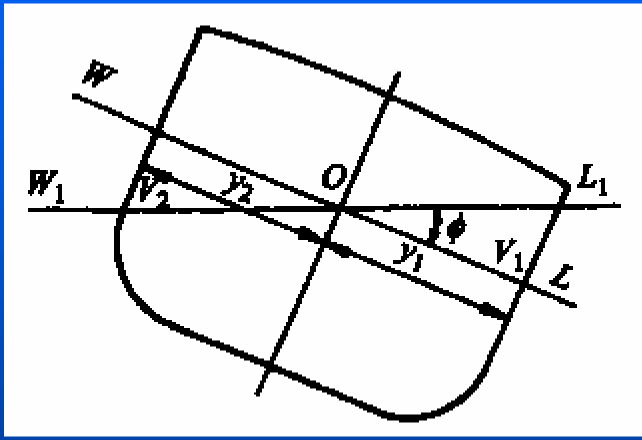
(a)

- 稳性的主要问题：
  - 复原力矩的计算
    - 新的浮心位置的计算和确定，是求出复原力矩的关键。
- 在讨论稳性问题时：

1. 首先确定倾斜水线的位置
2. 求出浮心位置和浮力作用线的位置
3. 分析复原力矩的大小及方向

一、等体积倾斜水线

- 如图示，设船舶平浮时的水线为WL，在外力作用下横倾一小角度Φ后的水线为W_1L_1.由于船仅受倾斜力矩的作用，排水体积保持不变，故倾斜水线W_1L_1应是等体积倾斜水线。
- 为了确定W_1L_1的位置，对入水楔形LOL_1和出水楔形WOW_1分别进行分析。



- 三角形LOL_1的面积为

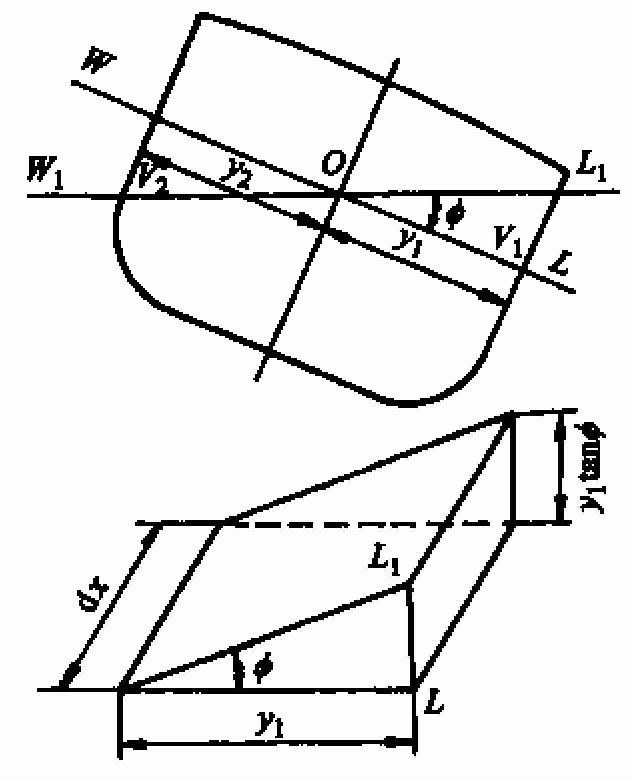
$$\frac{1}{2}y_1^2\tan\phi$$

- 沿船长取dx一小段，其体积

$$dV_1=\frac{1}{2}y_1^2\tan\phi dx$$

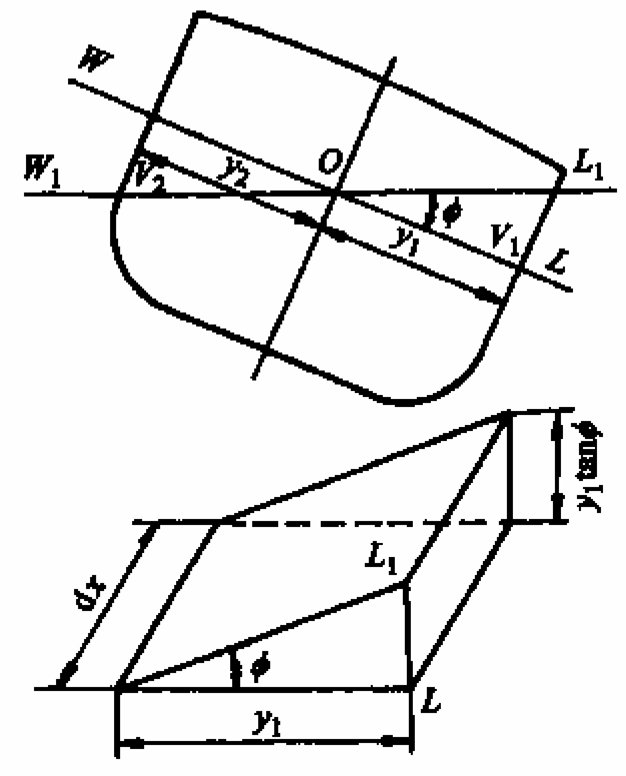
- 整个入水楔形的体积

$$V_1=\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}}\frac{1}{2}y_1^2\tan\phi dx=\tan\phi\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}}\frac{1}{2}y_1^2dx$$



- 同理，可以求出出水楔形的体积

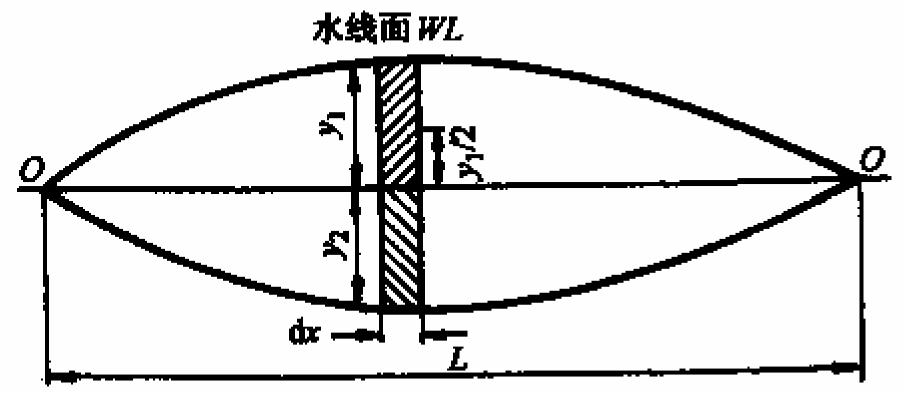
$$V_2 = \tan\phi \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \frac{1}{2} y_2^2 \, dx$$



- 在等体积倾斜的情况下，出水楔形的体积和入水楔形的体积必然相等，即$y_1=y_2$。由此可得

$$\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \frac{1}{2} y_1^2 \, dx = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \frac{1}{2} y_2^2 \, dx$$

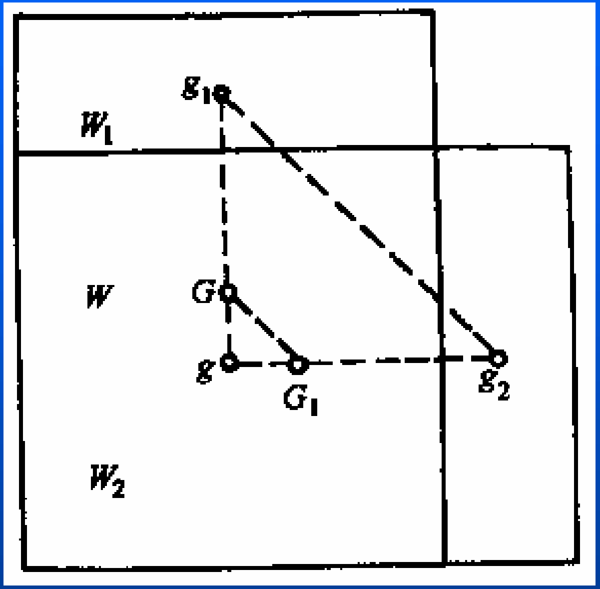
$$\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \frac{1}{2} y_1^2 \, dx = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \frac{1}{2} y_2^2 \, dx$$



- 两个积分分别表示水线面WL在轴线o-o两侧的面积对于轴线o-o的静矩。
- 因此，上式表示水线面WL对于轴线o-o的面积静矩等于零，亦即o-o通过水线面WL的形心(或称为漂心)。
- 由此可以得出结论：**两等体积水线面的交线o-o必然通过原水线面WL的漂心。**
- 这样，当已知船的倾角Φ(小角度)及原水线面WL的漂心位置后，立即可以确定倾斜Φ角以后的等体积水线W_1L_1的位置.

二、浮心的移动

- 重心移动原理
  - 图中表示由重量W_1及W_2两个物体所组成的系统，其总重量$W=W_1+W_2$，重心在G点。
  - 若将其中重量为W_1的物体从重心g_1点移至g_2点，则总重量W的重心将自G点移至G_1点，且有



$$\overline{GG_1} \parallel \overline{g_1g_2} \qquad \frac{\overline{GG_1}}{\overline{g_1g_2}} = \frac{W_1}{W}$$

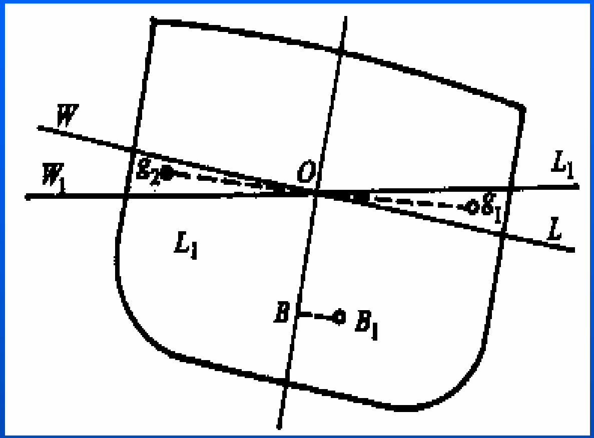
或

$$\overline{GG_1} = \frac{W_1\,\overline{g_1g_2}}{W}$$

上式表明: 整个重心的移动方向平行于局部重心的移动方向，且重心移动的距离GG_1与总重量W成反比.

船舶倾斜后浮心的移动距离

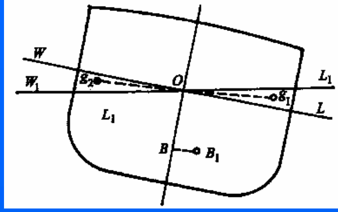
- 如图示，船在正浮时的水线为WL，排水体积为▽，横倾小角度ϕ后的水线为W_1L_1。设V1、V2表示入水及出水楔形的体积，g1、g2表示入水及出水楔形的体积形心。由于V1＝V2，因此可以认为，船在横倾至W_1L_1时的排水体积相当于把楔形WOW_1这部分体积移至楔形LOL_1处，其形心则自g2移至gl。



- 设船横倾后的浮心自原来的B点移至B_1点，利用重心移动原理，可以求得浮心的移动距离为

$$\overline{BB_1} = \overline{g_1 g_2}\,\frac{V_2}{\nabla}$$ 且 $$\overline{BB_1} \parallel \overline{g_1 g_2}$$

$$\overline{BB_1} = \overline{g_1 g_2}\frac{V_2}{\nabla}$$



- 由于$V_1 = V_2$，故$g_1o = g_2o = g_1g_2/2$，代入上式得：

$$\overline{BB_1} = 2\,\overline{g_1O}\frac{V_1}{\nabla}$$

  - » 上式右端V_1g_1o是入水楔形体积对于倾斜轴线0-0的静矩

$$V_1\,\overline{g_1O} = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \frac{1}{2}y \cdot y\tan\phi\,\mathrm{d}x \cdot \frac{2}{3}y = \frac{1}{3}\tan\phi\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} y^3\,\mathrm{d}x$$

- 在Φ为小角度时，$\tan\Phi = \Phi$，故

$$2V_1\,\overline{g_1O} = \frac{2}{3}\phi\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} y^3\,\mathrm{d}x$$

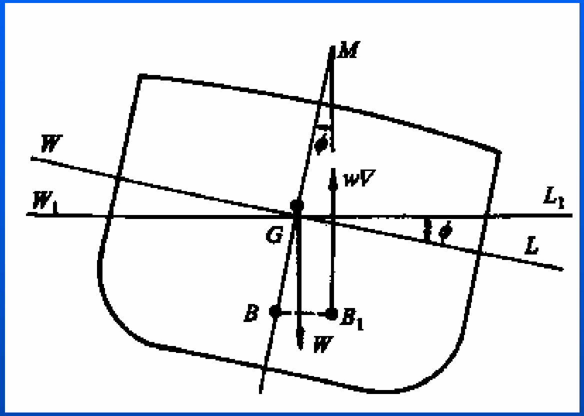
- 积分式 $\frac{2}{3}\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} y^3\,\mathrm{d}x$ 为水线面WL的面积对于纵向中心轴线0-0的横向惯性矩I_T，因此

$$\overline{BB_1} = \frac{I_T}{\nabla}\phi$$

- 可见，浮心移动的距离BB_1与横向惯性矩I_T、横倾角Φ成正比，而与排水体积▽成反比.

三、稳心及稳心半径

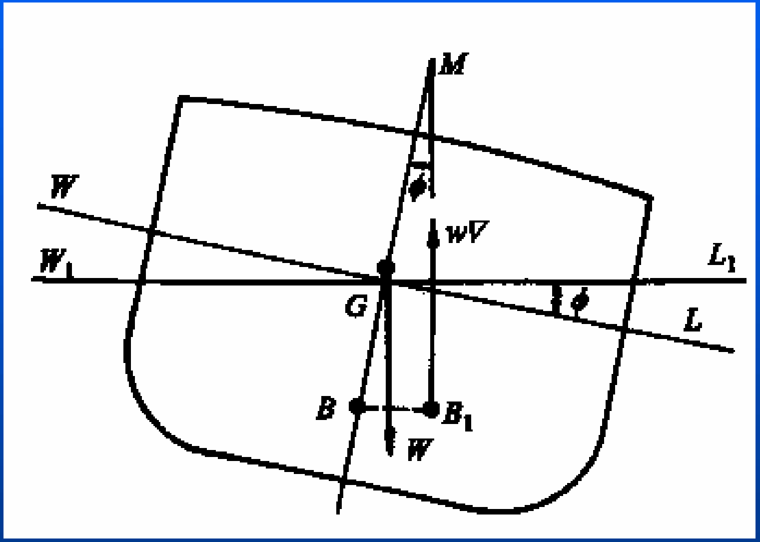
- 船舶在横倾Φ角后，浮心自原来的位置B沿某一曲线移至B_1，这时浮力的作用线垂直于W_1L_1，并与原正浮时的浮力作用线(中线)相交于M点。当Φ为小角度时，曲线BB_1可看作是圆弧的一段，M点为曲线BB_1的圆心，而$BM=B_1M$为曲线BB_1的半径。



- 船舶在小角度倾斜过程中，可假定倾斜前后的浮力作用线均通过M点，因此，M点称为**横稳心(或初稳心)**，BM称为**横稳心半径(或初稳心半径)**.

- 当Φ为小角度时，圆弧 BB_1约等于直线 $BB_1=BM\ \Phi$，结合下式

$$\overline{BB_1} = \frac{I_T}{\nabla}\phi$$



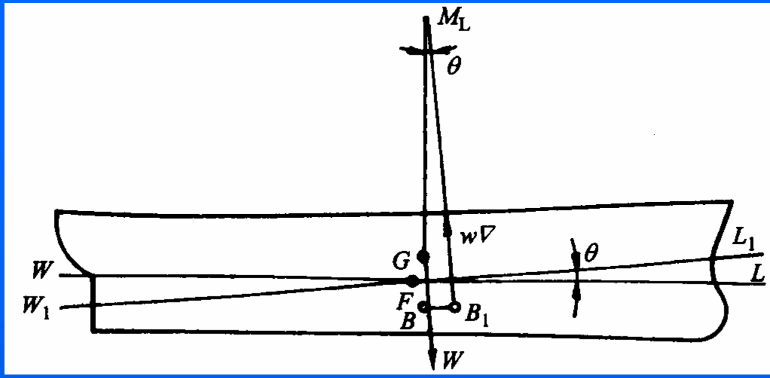
- 则得横稳心半径：

$$\overline{BM} = \frac{I_T}{\nabla}$$

$$\overline{BM} = \frac{I_T}{\nabla}$$

- 上式的导出是在研究等体积小角度倾斜时所得到的，而在实际解决初稳性问题时，可推广到倾斜角度小于10～15度的情况。
- 这相当于假定：
  - 船舶在等体积小角度倾斜过程中，浮心移动曲线是以横稳心半径为半径的圆弧，稳心M点位置保持不变，浮力作用线均通过稳心M。
    - 根据这个假定既可使讨论问题简化，又能在实用中计算简便。

纵稳心和纵稳心半径



- 船舶在等体积纵倾时的情况，与上面所讨论的横倾情况相同，完全可以得出类似的结果。
  - 纵稳心半径

$$\overline{BM}_L = \frac{I_{LF}}{\nabla}$$

    - 式中：I_{LF}为水线面面积Aw对于通过该水线面漂心F的横轴的纵向惯性矩

$$I_{LF} = I_L - A_W x_F^2$$

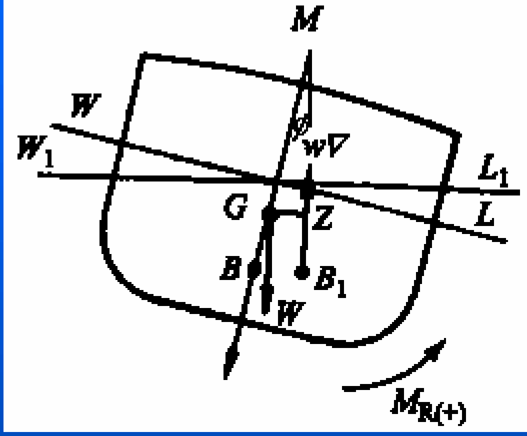
    - I_L为水线面面积Aw对于通过该水线面中站处Oy横轴的纵向惯性矩

$$I_L = 2\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} x^2 y \mathrm{d}x$$

    - x_F为水线面WL的漂心F的纵向坐标。

第3节 初稳性公式和稳性高

- 船舶横倾某一小角度Φ时，如船上的货物并未移动，则重心位置G保持不变，而浮心则自B点移至B1点。此时重力W的作用点G和浮力△的作用点B1不在同一铅垂线上，因而产生了一个复原力矩M_R，即



$$M_R = \Delta\overline{GZ} = \Delta\overline{GM}\sin\phi$$

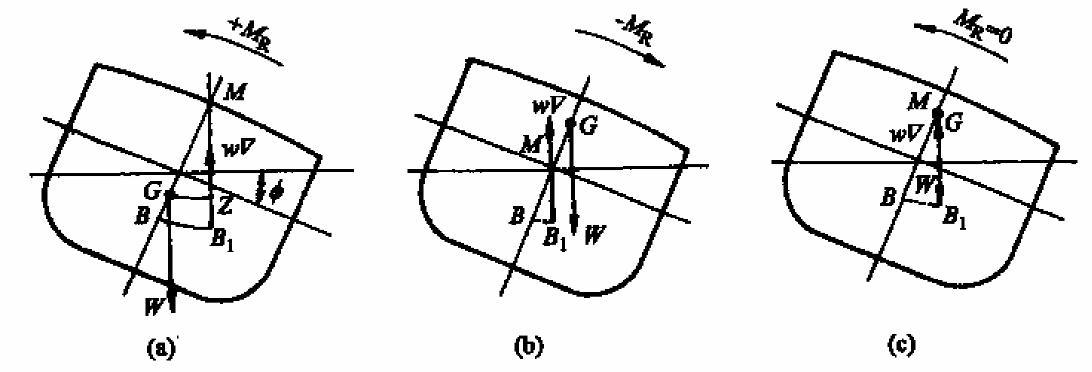
式中：GZ为复原力臂；GM为**横稳性高**，亦称**初稳性高**

当横倾角度较小时，sin Φ = Φ ，故上式可写成

$$M_R = \Delta\overline{GM}\phi$$

以上两式称为**初稳性公式**

- 从复原力矩MR和横倾方向(或从稳心M和重心G的相对位置)之间的关系，可以判断船舶平衡状态的稳定性能。



(1)重心G在稳心M之下，M_R的方向与横倾方向相反，当外力消失后，它能使船舶回复至原来的平衡状态，所以称为稳定平衡(如图 (a))。此时，GM和MR都为正值。

(2)重心G在稳心M之上，M_R的方向与横倾方向相同，它使船舶继续倾斜而不再回复至原来的平衡状态，所以称为不稳定平衡(如图 (b))。此时，GM和MR都为负值。

(3)重心G和稳心M重合，GM＝0，M_R＝0，当外力消失后，船不会回复到原来位置，也不会继续倾斜，称为中性平衡或随遇平衡(如图 (c))。

船舶在水面上的平衡状态不外乎上述三种情况，其中(2)、(3)两种情况是不允许出现的，因为这种船舶在倾斜后不可能回复到原来的平衡位置，也就是说，这种船舶的稳性得不到保证.

$$M_R = \Delta \overline{GM} \phi$$

- 从初稳性公式中可以看出：
  - 船舶在一定排水量下产生小横倾时，横稳性高GM越大，复原力矩M_R也越大，也就是抵抗倾斜力矩的能力越强。
  - **横稳性高GM是衡量船舶初稳性的主要指标。**
    - 但是横稳性高不能过大，过大的船，摇摆周期短，在海上遇到风浪时会产生急剧的摇摆，所以横稳性高的数值要选取适当。

各类船舶横稳性高的范围

船舶类型	$\overline{GM}$/m	船舶类型	$\overline{GM}$/m
客船	0.3～1.5	战列舰	2.0～3.0
干货船	0.3～1.0	巡洋舰	0.9～1.8
油船	1.5～2.5	驱逐舰	0.7～1.2
拖船	0.5～0.8	鱼雷艇	0.5～0.8
渔船	0.5～1.0	潜艇(水上)	0.3～0.8
航空母舰	2.7～3.5	潜艇(水下)	0.2～0.4

横倾角的估算

- 根据初稳性公式，可以求得引起船舶横倾1º所需的横倾力矩公式。以M_0表示引起横倾1º所需的横倾力矩，令Φ＝ 1º=1/57.3rad，根据初稳性公式，这力矩和复原力矩相平衡，即

$$M_R = \Delta \overline{GM} \phi \longrightarrow M_0 = \frac{\Delta \overline{GM}}{57.3}$$

如有横倾力矩M_H作用于船上，则由此引起的横倾角度:

$$\phi = \frac{M_H}{M_0}$$

纵稳性公式和纵稳性高

纵稳性公式：$M_{RL} = \Delta \overline{GM}_L \sin\theta$ $M_{RL} = \Delta \overline{GM}_L \theta$

式中：GM_L为纵稳性高

纵稳心M_L较重心G高得多。通常，纵稳性高GM_L与船长L为同一数量级，因此在设计船舶时，除浮吊等特种船舶外，一般不必考虑纵向稳性问题.

通常用首尾的吃水差来表达船舶的纵倾情况。若船长为L，首尾吃水差为t（首倾时取作正值，尾倾时取作负值)，则纵倾角 θ 为：

$$\theta \approx \tan\theta = \frac{t}{L}$$

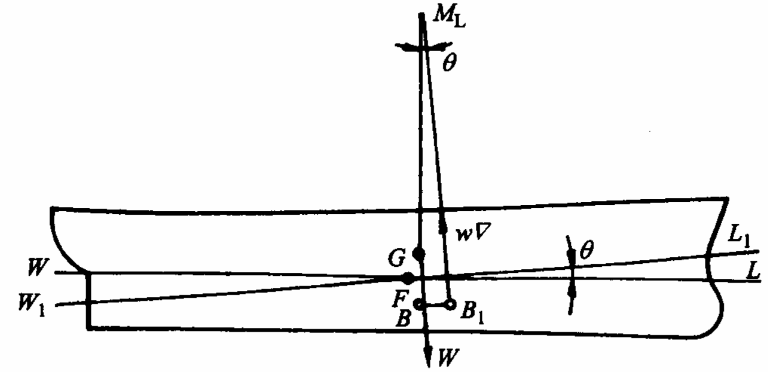
纵稳性公式为：

$$M_{RL} = \Delta \overline{GM}_L \frac{t}{L}$$

$$M_{RL} = \Delta \overline{GM}_L \frac{t}{L}$$

- 根据上式可以求得引起船舶纵倾1cm所需的纵倾力矩(即每厘米纵倾力矩)公式。
  - 以MTC表示每厘米纵倾力矩，令t=1cm=1/100m，则有

$$MTC = \frac{\Delta \overline{GM}_L}{100L}$$



由于浮心和重心之间的距离BG与纵稳心半径BM_L相比是一个小值，因此可以认为GM_L=BM_L,，则：

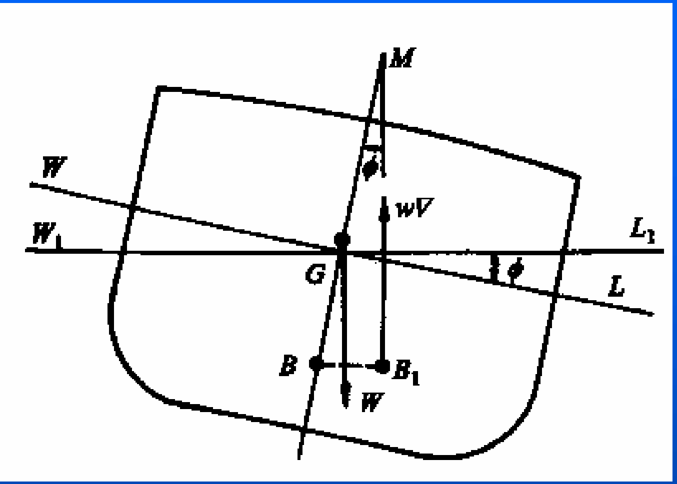
$$MTC = \frac{\Delta \overline{BM}_L}{100L}$$

如有纵倾力矩M_T作用于船上，由此引起的纵倾值t以厘米计)为:

$$t = \frac{M_T}{MTC}$$

- 概括说来，船舶初稳性中最重要的问题是，弄清楚浮心B、重心G和稳心M的位置以及三者之间的关系：

初稳性高GM是衡量船舶初稳性的重要指标，可写成:

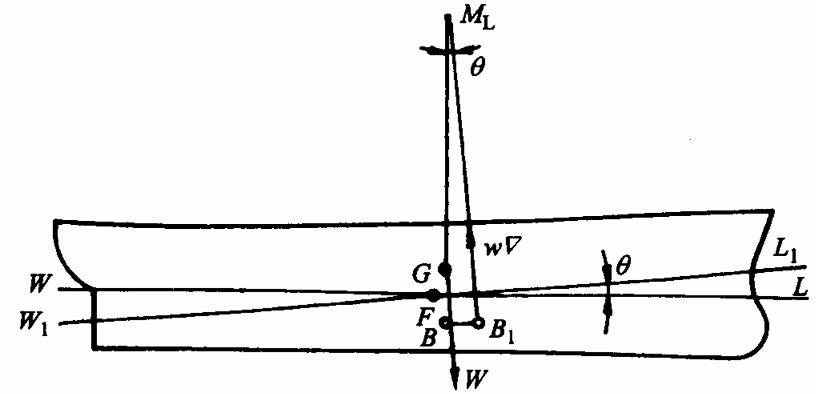


$$\overline{GM} = \overline{KB} + \overline{BM} - \overline{KG}$$

式中：KB为浮心高度(或以浮心垂向坐标Z_B表示)；BM为初稳心半径(或称横稳心半径)；KG为重心高度(或以重心垂向坐标Zg表示)

令BG=KG-KB为浮心和重心之间的距离，则上式亦可写成

$$\overline{GM} = \overline{BM} - \overline{BG}$$



同样，纵稳性高GM_L可写成

$$\overline{GM}_L = \overline{KB} + \overline{BM}_L - \overline{KG}$$

式中：BM_L为纵稳心半径。

上式又可写成： $$\overline{GM}_L = \overline{BM}_L - \overline{BG}$$