

船用舵的一般計算

梅琴生編著

人民交通出版社

本書扼要的將船舵的一般知識介紹給讀者，對於舵型的選擇，舵葉面積的決定，舵杆強度，操舵能力等都介紹了可靠的計算公式，並各舉有實例，逐一演算說明。在理論上，對於能影響舵效率的諸因素，尤其是展弦比、攻角、舵型輪廓、壓力中心點等都有較多的分析，使讀者通過這本書，可以解決一般的計算問題。

統一書號：T15044·6105-京

船用舵的一般計算

梅琴生編著

人民交通出版社出版
(北京安定門外和平里)

新華書店發行
公私合營慈成印刷工廠印刷

1957年5月北京第一版 1957年5月北京第一次印刷

開本：787×1092 1/32 印張：1 1/8張

全書：42,000字 印數：1~1000冊

定價(10)：0.28元

(北京市書刊出版業營業許可證出字第〇〇六號)



目 錄

第 一 节	什么是舵	1
第 二 节	舵的作用	3
第 三 节	舵叶的浸水面积	12
第 四 节	舵叶在水流中受力的情况	14
第 五 节	展弦比和击角极限	17
第 六 节	舵叶輪廓、击角对压力中心位置的影响	21
第 七 节	展弦比相异的各舵 C_L 、 C_d 的换算	24
第 八 节	伴流及推进器对舵效率的影响	26
第 九 节	舵之平衡	28
第 十 节	舵杆力矩計算	30
第十一节	舵杆强度	46
第十二节	操舵机能力的决定	47
第十三节	舵的結構	49
第十四节	杂述	58

第一節 什么是舵

魚在水中游行，要摆动它的尾巴，才能随心所欲的到东到西。船舶能在水上依照駕駛方向航行，也是与魚一样，主要在摆动它的尾巴——舵(又称水关)。因而舵对于船身，好比魚尾对于魚一样地重要。

舵是駕駛船舶的工具，它是一块平板或流綫型剖面的板，垂直地浸在水中，圍繞着某垂直的軸綫而旋轉，以改变它对船舶舳艫的位置。舵的种类在实际上，随着舵旋轉軸綫位置的不同，一般分作：不平衡舵、半平衡舵、平衡舵三类。随着舵与船体相联結的方式不同，也可分作：悬吊舵及鉸鍊支持舵二类。随着舵裝置在船体位置上的不同，也可分作：艉舵与艏舵、中心舵与翼舵各二类。以上各类舵可参閱图 1。

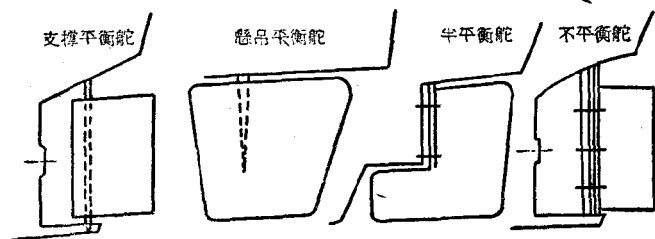


图 1

舵的基本構成部分是舵叶、舵杆、舵臂，其与船身联結的部分是依靠舵鈕、舵針、舵托、舵跟等。現概述于下：

1. 舵叶——是一块平板或流綫型剖面(又称机翼剖面)的

板所構成，它与舵杆相联結，并垂直地浸在水流中，圍繞着它的垂直軸綫而旋轉。舵叶又称水关叶子。

2. 舵杆——是一根剖面为圓形的柱体，分上舵杆与主舵杆二部分，由法蘭或其它接头以螺栓或鉚釘等联結，其方式有水平及垂直二种，前者采用較多。小的舵杆是整根制成的。上舵杆穿过船体上达甲板，杆端与舵柄（又称魚尾）或舵柄弧（又称舵扇）嵌接，由舵柄或舵柄弧来轉动舵杆。主舵杆用焊接等方法，使舵叶沿其縱中心綫与它密切結合，因而可視作为舵叶的一部分。舵杆經一水密填料函（套筒）伸入船体。

3. 舵臂——为防止舵叶在左右旋轉受水压弯折起見，在它左右兩側每隔一定間距，有舵臂交替裝置在其上，裝置办法有用鉚釘，也有用焊接的。舵臂根部分別以焊接或銷子紅套于主舵杆上，如此舵臂將舵叶与舵杆更加紧密結合在一起了。

4. 舵鈕、舵針——非悬吊的不平衡舵与半平衡舵都具有舵鈕与舵針。舵杆上的舵鈕往往是舵臂根部的延續結構，它与艏柱上的舵鈕直綫重叠，用舵針串联在一起，組成鉸鏈的功用，故舵虽裝在船身下，其舵叶仍能轉动自如。为减小摩擦損耗起見，舵鈕內应有青銅或澆鑄錫合金等的襯套（墊圈）。

5. 舵跟、舵托——舵跟或为舵杆的最低末端，或为舵杆上最下层的末顆舵鈕，它插入艏柱底脚末端的舵托內，以減輕艏柱本身对舵的荷重。舵托內放置有硬金屬的半圓垫片（又称半圓彈子）帮助舵跟在內轉动。舵托底部鑽通，当垫片摩擦时，可便于取出更換。

悬吊舵是由裝置在主甲板上的頸軸承將上舵杆联結在一起，其舵叶悬吊在水流中，并能达到旋轉的目的。

舵与船身联結裝置时，上舵杆須穿过船壳的缺口，而上伸到主甲板上。为了使水不能随着进入船体，所以將上舵杆裝置在

特別的管子內，經過船身而上伸至甲板。該管子又名水關套筒，它與船殼相聯結處，應使用填料做成水密，防水滲入。以上所述可參閱圖 2。

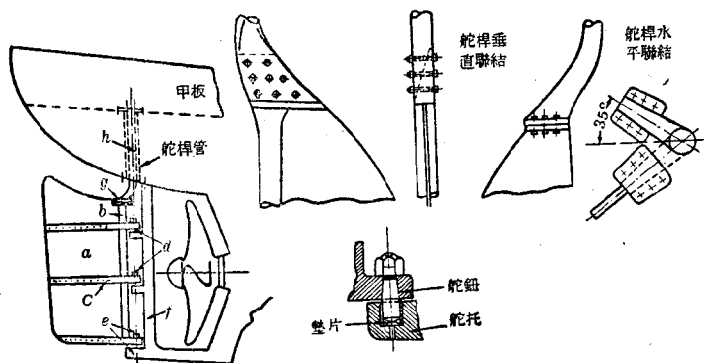


圖 2

a) 舵葉 b) 主舵杆 c) 舵臂 d) 舵鈕舵針 e) 舵鈕舵托
f) 船尾柱 g) 軸聯結(法蘭) h) 上舵杆

第二節 舵的作用

為了要說明舵的作用，當然這是指對船舶而言的，我們應先進行了解舵的擺動，以及它在擺動時對船的影響。為了要清楚地說明上述情況，分作四步來談：

1. 設現有某船舶在正舵作直線航行。因船身結構的對稱性，所以在船中綫平面上必作用着螺旋推進器的推力 T ，以及水阻力合力 R ，這兩力方向相反。如圖 3 所示。現假設駕駛者將舵擺動，當初擺動至 θ 角時，即舵葉與它原來正舵位置所夾之角到達 θ 值時，由於水流沖向舵葉的作用，發生水壓力 F 。這水压

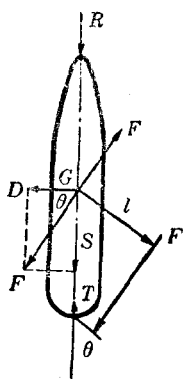


图 3

力 F 对于船舶重心 G 而言, 产生力偶 Fl , 及二作用分力 D, S 。力偶 Fl 的作用, 是使船舶绕通过 G 点的垂直轴线, 船首向舵摆动方向旋转。分力 D 此时等于 $F \cos \theta$, 使船向外移动, 并使船发生向舵所在方向横的微倾, 所以 D 又称漂浮力。另一分力 S , 此时等于 $F \sin \theta$, 它减缓航速, 具有与阻力 R 同样的作用。

船的直线航向因舵的摆动而遭到破坏, 引起阻力 R 不再与推力 T 同作用在一平面上, 而与中綫平面夾一 ϕ 角度, R 的作用点 K 开始由艏向艉移动, 并集中于漂浮方面的舷侧。此时的水阻力合力 R 随着作用点的改变, 对船的作用也随之起了变化与前不同了。 R 对重心点 G 的作用, 也具有力偶 Rq 及二作用分力 Q 与 N 。力偶 $R \cdot q$ 也促使船向舵摆动方向旋转。分力 $Q = R \sin \phi$, 其方向适与 F 之分力 (见图 3); 漂浮力 D 相反, 起减轻船的偏驶与横向微倾。分力 $N = R \cos \phi$, 与 F 之分力 S 一样, 也起减缓航速的作用。

上述情况, 开始摆舵为时甚短促, 所以在本阶段中船虽已有转动的趋势, 但其轨迹尚未成为曲线, 或縱成曲线而曲度尚微小, 故可仅考虑水压力 F 及阻力 R 的作用变化, 因曲线轨迹而具有的离心力作用暂且不計。如图 4 所示。

2. 在本阶段中, 船行轨迹已形成曲线, 或曲度已较显著, 对于作用于重心 G 点的惯性离心力已不能略而不計, 应考虑入內。此惯性离

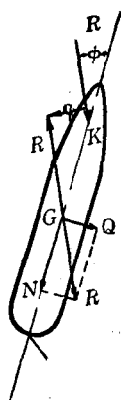


图 4

心力的作用方向，应是曲线在 G 点的法线方向，如图 5 所示。它与漂浮力 D ，及漂浮力 Q ，组成合力 E 。这合力 E 又与推力 T ，阻力 R 之分力 N ，合组成另一合力 P 。总合力 P 与通过 G 点的中綫平面所夹的 β 角称为船的漂浮角。船依照 β 角的方向航行。

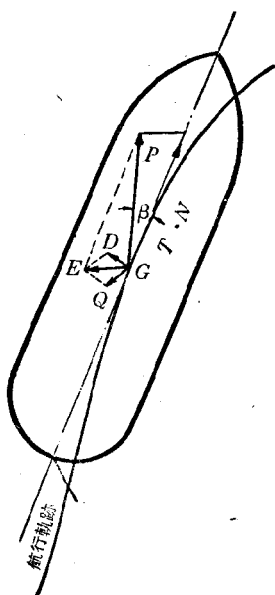


图 5

当然因为船行軌跡曲线的曲度随时在变化，影响到水阻力作用在船身上的压力 R 一再重行分布，即总水阻力 R 的作用点 K 沿中綫平面由艏逐渐向艉后移，甚至会越过 G 点，这就促使 β 角也在随时变化（不仅 G 之漂浮角随时不同，即在船中綫平面上任一点的 β 角也在变化）。但 R 作用点 K 位在 G 的前面时， $R \cdot q$ 是协助 $F \cdot l$ 促使船舶转动，待当 K 点越过 G 点繼

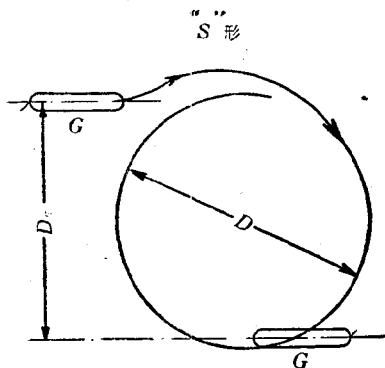


图 6 D_T = 机敏迴轉直径 D = 定轉直径

續向艉后移时， $R \cdot q$ 就开始对 $F \cdot l$ 起相互抵消的作用。这作用在开始时，因 q 小， Rq 小，船仍受 $F \cdot l$ 的作用繼續在变化它的航行軌跡，待 $R \cdot q$ 渐渐增大以至等于 $F \cdot l$ 值时，船体上各力就相互平衡，于是航行軌跡也由“S”形成固定的圓周； β 角逐成固定見图 6。

3. 船的航速在摆舵开始,受到水阻力增加的原因。降落得很快,稍后,降落得慢些,到船上所受到的各作用力达到相互均匀平衡时,航速不再降落变成一固定速度,即形成一固定值。因此,当船的运动轨迹形成圆周,一如上述时,固定的航速称为定轉速率、相应地船行运动称为定轉运动。

于是从图 6,船从摆舵开始时的位置,到轉动 180 度后船的位置間的垂直距离(以船重心 G 为測量标准)称船舶的机敏迴旋直径,船定轉运动时,其重心 G 所划成的定旋圓周的直径,称为船的定轉直径。

a) 定轉速率的計算公式:

$$\frac{V_g}{V} = 1 - \frac{A\theta}{K_s S} \quad (1)$$

V = 未摆舵前的航速(浬);

V_g = 定轉速率(浬);

A = 舵叶浸水面积(平方公尺);

S = 船浸水之中綫平面面积(平方公尺)

$= L \cdot d$;

L = 船舶水綫長(公尺),

d = 此时船舶的平均吃水(公尺);

θ = 舵摆动的角——舵角(度);

K_s = 倍数,見表 1 V = 排水体積(立方公尺)。

表 1

$V/SL=$	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15
$K_s=$	4.25	3.77	3.33	2.97	2.68	2.45	2.27	2.13	2.02	1.94	1.88	1.83

6) 机敏迴旋半径的計算:

$$\Sigma F_x = 0 \quad (M + M') \frac{dv}{dt} \cos \beta = \left(\frac{M + M'}{\rho_1} \right) V_1^2 \sin \beta + R_x + F_x - T \quad (2)$$

$$\Sigma M_G = 0 \quad I \frac{d^2 \gamma}{dt^2} = P \cdot l - R \cdot q \quad (4)$$

$I = (M + M')$ 对于通过 G 垂直轴的惯性力矩;

$\rho_1 = G$ 点的瞬时机敏迴旋半徑。

船航行运动到达定轉运动时,航速已固定,即

$V_i = V_g$, 航行軌跡已成圓周。

因之
$$\frac{d\psi}{dt} = 0 \quad \frac{d^2\gamma}{dt^2} = 0$$

$$Fl = Rq$$

所以 (2)、(3)、(4) 式可改写为:

$$(M+M') \frac{V_g^2}{\rho} \sin \beta + R_x + F_x - T = 0 \quad (5)$$

$$(M+M') \frac{V_g^2}{\rho} \cos \beta - R_y + F_y = 0 \quad (6)$$

$$Fl - Rq = 0 \quad (7)$$

ρ = 机敏迴旋半徑。

解式 (5) (6) (7) 得

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{(M+M') V_g^2 \cos \beta}{R_y - F_y} \\ &= \frac{(M+M') V_g^2 \cos \beta}{(R-F) \cos \theta} \quad (\theta = \text{摆舵角}) \\ &= \frac{(V+V') V_g^2 \cos \beta \cdot \delta}{F \left(\frac{l}{q} - 1 \right) \cos \theta} \quad \left(R = \frac{Fl}{q}, \delta = \text{密度} \right) \end{aligned}$$

或

$$\rho = \frac{(V+V') \delta \cdot V_g^2 \cos \beta}{F \left(\frac{l}{q} - 1 \right) \cos \theta} \quad (8)$$

机敏迴旋半徑一般等于船浸水長的 5~9 倍, 較巨型的船

船 ρ 可到达 12 倍 ~ 16 倍的船浸水長。

4. 摆舵时的船倾侧

当船摆舵时，水压力 F 对于船身之主要作用是迫使其轉动，改变航向。但因而也連帶产生其他副作用，如迫使船繞 OX 軸起側摆运动或側斜运动，繞 OY 軸起升降运动。虽然这些运动与旋轉运动相比要小得多，但却还有它一定的作用存在，不能漠視。現叙述如下(如图 8)。

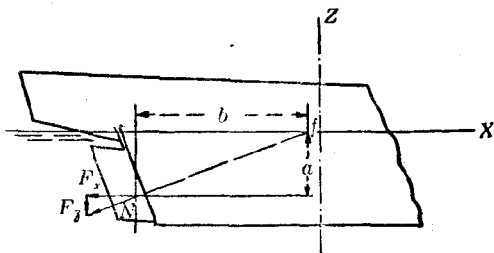


图 8

a) 升降运动——設力 F 作用在舵叶重心 N 处，此力 F 分成三个作用分力： F_x, F_y, F_z 。 F_y 的作用方向与 OY 軸平行，所以对升降运动沒有影响，暫不討論。現設 OY 軸通过船的漂浮中心 f 点。

$a = F_x$ 作用力綫至 f 点的垂直距。

$b = F_z$ 作用力綫至 f 点的垂直距。

$F_z \cdot b$ 力偶使艏下沉、艉上升。

$F_x \cdot a$ 力偶使艏上升、艉下沉。

現令 M_y 是使船发生升降运动的力矩，

那么

$$M_y = F_x a - F_z \cdot b$$

若 $M_y \neq 0$ ，就表示船舶具有升降現象； $M > 0$ 时，艏吃水减少，艉吃水增加。 $M < 0$ 时，艏吃水增加，艉吃水减少。

若 $M_Y = 0$, 那么 $F_X a = F_Z b$, 船无升降运动发生, 也就是说: F_X 与 F_Z 的合力 F 必通过 f 点。

升降运动就是船的纵向倾侧现象。

若 $M_Y \neq 0$, 纵倾侧存在时, 船舶的纵向力矩稳定率必与这 M_Y 相平衡, 否则船会沿纵向倾复。

所以纵向力矩稳定率

$$\Delta G M_L \sin \alpha = M_Y$$

α = 船艏吃水差夹角;

$G M_L$ = 纵向稳倾高度, Δ = 船的排水量。

通常 $G M_L \sin \alpha \Delta$ 的值远较 M_Y 为大, 尤其大船更甚。所以沿纵向的倾复, 很少发生过。

b) 侧摆运动—— F 力的另一分力 F_Y 作用在船上, 如图 9 所示, 使船发生横侧微倾。现假设船舶的排水量当微微横倾时, 仍能保持不变, 那么 OX 轴必定通过载重水面的 H 点。 F_Y 的作用点是舵叶重心 N 点, 力偶 $F_Y \cdot \overline{NH}$ 促使船向舵所在向横倾

侧, 如(1)节所述, 力 F_Y 并迫使船舶向左移动。

因 F_Y 而引起的横倾侧将被渐渐增大的水阻力 R_Y 所阻止, 即

$$F_Y \cdot \overline{NH} = R_Y \cdot \overline{HC}$$

C 点是 R_Y 作用线与船中綫面的交点。

若水阻力 R_Y 所引起的力偶尚在微小阶段, 不足阻止 $F_Y \cdot \overline{NH}$ 力偶时, 此倾侧也会被

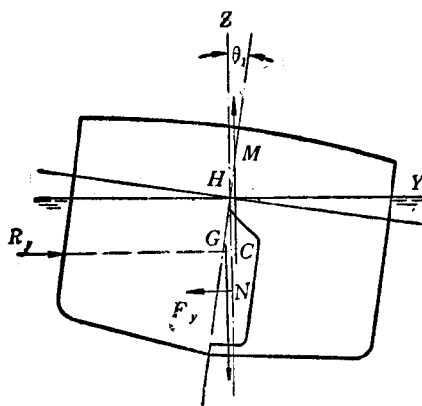


图 9

船的横向力矩稳定率所平衡，即 $\Delta GM_L \sin \theta_1 = F_Y \overline{NH} - R_Y \overline{CH}$ ，否则会导致倾复危险。因而在航速较高的船舶；具有较大舵叶面积，其 F_Y 的作用也较大，则 $F_Y \cdot \overline{NH}$ 不宜过大，以免导致因失掉平衡而船只横复。

以上为横倾侧微小时情况，若倾侧较大时；即当船的航行轨迹曲线已具有较大的惯性离心力时，考虑横向平衡，尚得计算及离心力，如图10。因而横向力矩稳定率的平衡式尚须修正如下：

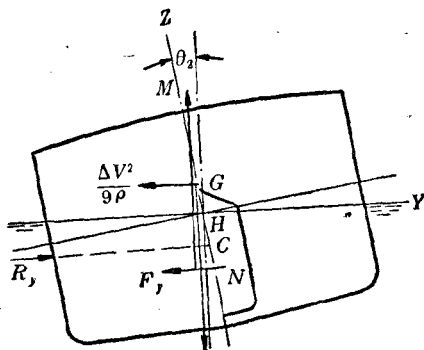


图 10

$$\Delta GM_L \sin \theta_2 = \frac{\Delta V^2}{g \rho} \cos \beta \overline{GH} \cos \theta_2 + R_Y \overline{CH} - F_Y \overline{NH}$$

θ_2 = 较大的横倾角；

β = 漂浮角。

在图上也可见离心力矩与 $F_Y \cdot \overline{NH}$ 力偶处在相反的方向，事实上也往往如此。所以对于船舶在定转运动阶段时，若突然急速回舵，可能会因 $F_Y \overline{NH}$ 之失去，相应地增加了数值： $\frac{\Delta V^2}{g \rho} \cos \beta \overline{GH} \cos \theta_2 + R_Y \overline{CH}$ ，于是使船失去平衡，而导致横向倾复的危险。

第三節 舵葉的浸水面積

船舶因其工作性質的不同，需要舵的目的也隨而各異，大致來談，可分保持航向與改變航向二類。

船舶的駕駛者想要維持船舶的固定航向，片面地認為將舵固定，結果是不能達到目的的。因船在航行時，會遭受到很多的外力，例如風、波浪、水流等都能影響它的航向；不斷地迫船離開它的航向偏駛。因而在事實上，為了要維持航向，只有不斷地擺動舵葉；擺動舵角約 $2 \sim 3^\circ$ 以校正被迫偏离的航向。這種微微的擺動舵角，有時每分鐘會達到十多次之多。所以凡是進行遠程航行，航道又是寬曠通暢，以及靠港啟碇掉首改向航行較少的船，舵裝置的主要目的是保持航向。它對於船的機敏迴旋半徑最低值的要求，並不十分重視。

凡靠港，啟碇頻繁的短航船舶，或航道曲折狹窄，又必須於中頻頻掉首改向的船舶，它的工作條件是必須在淺狹的航道以及較短促的時間內，盡量縮短其機敏迴旋半徑，以達到獨立而穩妥地改變航向的操作。因之，對於這類船來言，裝置舵的主要目的是改變航向。要求舵的高度靈活性是這類船的主要目的，如港作船、輪渡、軍艦等。

船的方向性能是依機敏迴旋半徑的大小而定，舵靈活，則機敏迴旋半徑較短。為了要選擇舵的靈活程度以符合航行條件，有必要來討論機敏迴旋半徑。現我們重溫一下機敏迴旋半徑的公式：

$$\rho = \frac{(V + V')V^2 \cos \beta \delta}{F \left(\frac{l}{g} - 1 \right) \cos \theta}$$

从公式知道:

$a = \rho$ 与排水体积有关, 船較大, 需要的 ρ 也大。

$b = \rho$ 与航速有关, 船速高的, 需要的 ρ 也較大。

$c = R$ 作用力点 K 距 G 之距离是 q , 一般此时 q 位在 G 点稍后处, 若能促 K 点往前移动; 即縮小 q , ρ 值就能隨而縮小。因而艏吃水深船, K 点离 G 較远; q 較大, 需要的 ρ 也較大, 反之亦然。为了要縮短机敏迴旋半徑以增加船的灵活性, 有將艏下截的死木割去的, 例如裝置半平衡舵的艏, 以使 K 前移而變小 q , 达到縮小 ρ 的目的。

d. 現再根据力 $F = \frac{1}{2} \delta C V_g^2 A$ 的关系 (詳后)

C = 係数, A = 舵叶浸水面积。

將 F 值代入 ρ 的公式得:

$$\begin{aligned}\rho &= \frac{(V + V') V_g^2 \cos \beta \delta}{\frac{1}{2} \delta V_g^2 A C \left(\frac{l}{q} - 1 \right) \cos \theta} \\ &= \frac{2(V + V') \cos \beta}{A C \left(\frac{l}{q} - 1 \right) \cos \theta}\end{aligned}$$

从以上公式也知舵面积較大, ρ 值就可縮小。

从上述推演, 使我們知道要增加航行的灵活性, 就是縮短机敏迴旋半徑为主要措施, 要达到措施的兌現, 只有: 1) 增大舵叶浸水面积, 2) 割去艏下半截船体的死木, 3) 减小艏吃水。船速与船型大小对 ρ 虽有影响, 但其性能之重要性更甚于 ρ , 改变一点就会牽涉整体計算, 因而对之考虑以适合 ρ 的职能較少。

增大舵叶浸水面积对增强方向性能是为最有效的办法, 但舵面积增大, 摆舵所耗的功率也会隨而增大, 因此, 应在兩者之間, 設法获得最合需要的舵面积来。

一般来讲,海洋航行的船舵,要较内河航行的船舵为小。海洋航行的船舵面积在 $0.02 \sim 0.033 Ld$ 之間,内河船舵面积在 $0.045 \sim 0.08 Ld$ 之間,用明輪推进的船舵面积則更大。以上 L 是船的浸水長, d 是平均吃水。

表 2

船 别	海上运输船	沿海运输船	海上拖輪	内河拖輪	内河运输船
舵叶面积	$0.02 Ld$	$0.025 Ld$	$0.03 Ld$	$0.05 \sim 6$	0.05

第四節 舵葉在水流中受力的情况

今有一船舵,自由地(指尚未裝置于船舶而言)在理想水流中,以等速等向行駛,舵叶面与它本身前进方向所夾的角称为击角。由于击角的存在,水流冲向舵面,使舵面兩側的水压力分布互不相等,于是产生压力差。这压力差的总值可以 F_N 表示之, F_N 垂直作用于舵面压力中心 P 点。以上所述完全是以舵自由地在理想水流中航行而言,按实际情形,水分子均具有粘性,粘附于舵周圍。舵行动时,水分子就随之俱动形成一条水帶,使 P 点另受切綫方向摩擦力 F_t 的作用,如图 11。 F_N 与 F_t 在舵面上組成合力 F 。 F 力可另分二分力 F_d 、 F_L , F_L 力的作用綫因垂直于航行方向,致能驅使舵叶轉动, F_d 力的作用綫因与舵面前进方向相平行,所以对舵祇起阻力作用。

F 力的大小,很显然的是与舵叶浸水面积 A 、舵速、舵的类型、击角、水密度及水之粘性有关,即

$$F = f(A, \theta, S, V, \rho, \mu) \quad (9)$$