

在這裡鍵入方程式。

潛艇流體動力學

方銘川

第一章 簡述

潛艇為一非常特殊的船舶，因此它的設計相當複雜。本講義內容純就其流體動力學的範圍及一些船舶流體動力學的基本常識來作論述。主要是參考 Martin Renilson 先生所著之書” Submarine Hydrodynamics” 之內容與圖說。傳統潛艇通常比一般表面商船小，因而以 “艇” 來稱之。

潛艇幾何外型概述 (相當簡單、容易理解)

◎通常以一軸對稱體為基礎

◎為了操作目的，艇上會加上一帆罩來容納潛望鏡、換氣裝置及一些桅桿，當潛艇浮在水面上時，帆罩可當作一平台來指揮控制潛艇，而帆罩對潛艇之流體動力性能亦有決定性之影響

◎在潛艇前後會有控制翼板來控制潛艇，亦具有重要之流體動力特性，一般傳統十字型之尾部控制翼包括有上下舵

◎許多現代之潛艇是靠縱軸方向上的一單螺槳來推進，通常是裝在舵之後方(與表面船隻不同)

◎雖然軸對稱體外型對水下性能是好的，但當潛艇浮出水面時，上部成彎曲型之船殼部份，不易讓船員在上面操作行動，因此常加裝一外蓋，造成一平面區以利船員作業。另外此外蓋結構亦提供了貯存空間於壓力殼外部，有助潛艇之操作。

1.3 標準潛艇幾何形狀

1.3.1 58 系列 (Series 58)

由美國 DTMB (David Taylor Model Basin) 主導以阻力檢視為主的**最早系列**，有 24 種軸對稱流線型的數學模式，相關參數為細長比、稜形係數、前端半徑、尾端半徑及最大截面位置。

此系列之結果是以**等體積**為基礎來發展的，其中包括為了方向穩定性所需的控制面所產生的屬具阻力估算。

此系列之形狀是以一 6 次多項式來定義：

$$r_x = a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + a_5x^5 + a_6x^6 \quad (1.1)$$

其中 $a_1, a_2 \dots a_6$ 之常數項在幾何參數值設定後來決定。如圖 1.5 所示：

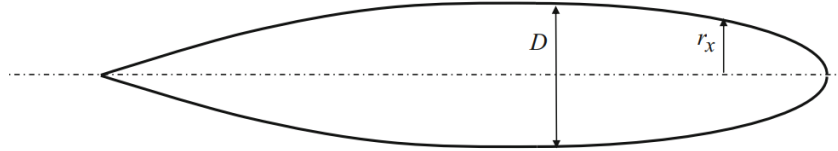


圖 1.5 Series 58 外型

1.3.2 麥林外型(Myring Shape)

此外型為一軸對稱型之潛艇船殼，其前體(fore body)為橢圓體，中間為平行舢體，後體(aft body)為拋物線體，如圖 1.6 所示：

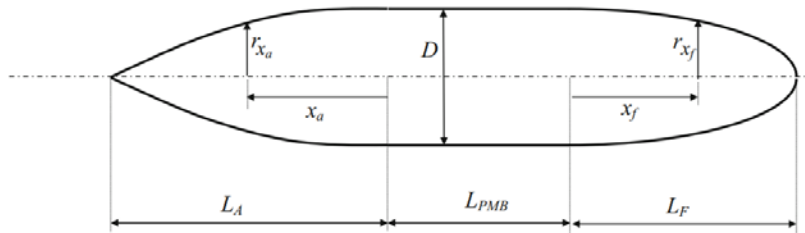


圖 1.6 Myring 外型

其幾何圖型之相關定義如下：

※前體部份

$$r_{xf} = \frac{D}{2} \left[1 - \left(\frac{x_f}{L_f} \right)^2 \right]^{\frac{1}{n_f}} \quad (1.2)$$

其中， r_{xf} 為考慮截面距離前體最尾端 x_f 處之截面半徑， L_f 為前體長度， D 為艇身直徑， n_f 是定義前體肥胖程度之係數，當 $n_f = 2$ 時，艏外型為橢圓體型。

※平行舢舨

$$r_{xPMB} = \frac{D}{2} \quad (1.3)$$

其中， r_{xPMB} 為平行舢舨之半徑。

※後體

$$r_{xa} = \frac{D}{2} - \left[\frac{3D}{2L_A^2} - \frac{\tan \alpha_t}{L_A} \right] x_a^2 + \left[\frac{D}{L_A^3} - \frac{\tan \alpha_t}{L_A^2} \right] x_a^3 \quad (1.4)$$

其中， α_t 為半艉錐角， L_A 為後體長度， x_a 為考慮截面距後體之最前端之距離。

1.3.3 DRDC (Defense Research and Development Canada)標準潛艇模型

此標準船型是一典型的 SSK 外型，如圖 1.7 所示。也是以三個船段來定義，即前體、平行舢舨及後體。基礎母船之 $L/D=8.75$

(SSK: Hunter-Killer Submarine，美國海軍退役潛艇，反潛用)

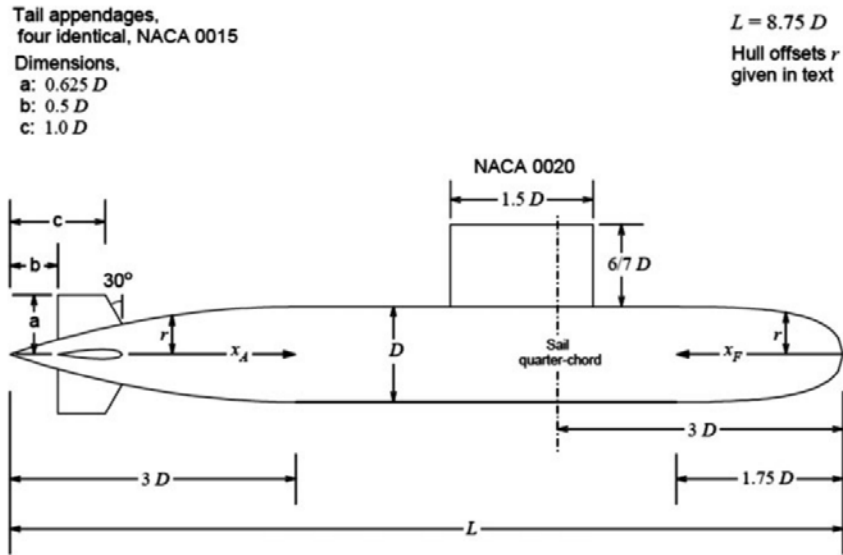


圖 1.7 DRDC 標準潛艇模型外型

※前體(長度為 1.75D)

其形狀定義為：

$$\frac{r_{xf}}{D} = 0.8685 \sqrt{\frac{x_F}{D}} - 0.3978 \frac{x_F}{D} + 0.006511 \left(\frac{x_F}{D} \right)^2 + 0.005086 \left(\frac{x_F}{D} \right)^3 \quad (1.5)$$

其中， r_{xf} 為距離前垂標 x_F 處之截面的半徑，D 為船殼直徑。

※平行舢舨體(長度 4D)

其形狀定義為：

$$r_{xPMB} = \frac{D}{2} \quad (1.6)$$

※後體(長度 3D)

其形狀定義為：

$$\frac{r_{xA}}{D} = \frac{1}{3} \left(\frac{x_A}{D} \right) - \frac{1}{18} \left(\frac{x_A}{D} \right)^2 \quad (1.7)$$

其中， r_{xA} 為距離後垂標 x_A 處之截面半徑。

1.3.4 DARPA Suboff Model

(Defense Advanced Research Project Agency, 國防高等研究計劃署)

以船型為一典型的 SSN 形狀，(SSN:核動力攻擊潛艇)，全尺寸為 105m，模型比例一般為 1/24

此模型常被使用，因此有許多包括 CFD 操縱係數驗證的檢視資料可參考，其形狀如圖 1.8 所示：

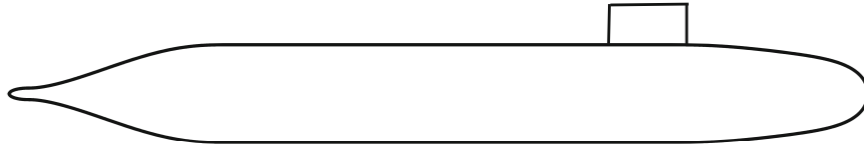


圖 1.8 DARPA Suboff 模型外型

Suboff 模型為一軸對稱船殼，全長 4.356 m，最大直徑為 0.508 m

※前體 (長度為 2D (1.016m))

形狀定義：

$$r_{xf} = (D/2) [1.126395101 x (0.3x - 1)^4 + 0.442874707 x^2 (0.3x - 1)^3 + 1 - (0.3x - 1)^4 (1.2x + 1)]^{1/2.1} \quad (1.8)$$

(0ft < x < 3.33333 ft)

其中， r_{xf} 為距離前垂標 x 處之截面半徑，單位為 feet，D 為船殼直徑。

※平行舢舨體 (長度為 4.39D (2.229m))

形狀定義：

$$r_{xPMB} = \frac{D}{2} \quad (1.9)$$

其中， r_{xPMB} 為平行舢舨之半徑。

※後體(長度為 2.19D (1.111m) 包括主後體 2D 及艏帽 0.19D) (=2D+0.19D)

長度包括主要長度 1.016m 及一尾帽長 0.095m，後垂標之定義即為艏帽的前端。

其主後體形狀定義為：

$$r_{x_a} = \frac{D}{2} \left[r_h^2 + r_h K_0 \xi^2 + \left(20 - 20r_h^2 - 4r_h K_0 - \frac{1}{3} K_1 \right) \xi^3 + (-45 + 45r_h^2 + 6r_h K_0 + K_1) \xi^4 + (36 - 36r_h^2 - 4r_h K_0 - K_1) \xi^5 + \left(-10 + 10r_h^2 + r_h K_0 + \frac{1}{3} K_1 \right) \xi^6 \right]^{1/2} \quad (1.10)$$

其中， $r_h = 0.1175$; $K_0 = 10$; $K_1 = 44.6244$

$$\xi = \frac{13.979167 - x}{3.333333}$$

$$(10.645833ft < x < 13.979167 ft)$$

※艏帽形狀定義為：

$$r = 0.1175(D/2) [1 - (3.2x - 44.733333)^2]^{1/2}$$

$$(13.979167ft < x < 14.291667 ft)$$

※帆罩

Suboff 有一帆罩在船殼之上方，其導緣 (leading edge) 位於離首垂標 0.924 m (1.820D) 而尾緣 (trailing edge) 則離 1.293 m 因此帆罩全長為 0.368m (0.724 D) 此帆罩配有一帆罩帽。

※艏屬具

有四個相同的屬具置於艏，分別角度為 0° , 90° , 180° , 270° (垂直及水平控制翼)。

1.3.5 伊朗潛艇流體動力系列(IHSS)

此系列是利用來系統性地檢視現代潛艇的流體動力特性，它有一橢圓體前體，平行舢舨及圓錐型之後體，沒有螺槳，有一對稱型 NACA 系列翼型帆罩，如圖 1.9 所示：

在 IHSS 中的一個船型會利用一個 15 位數字碼來定義，其前七個數字是定義主船殼，而剩下的 8 個數字是定義帆罩，例如：Code IHSS 1052570-351780255 之定義如表 1.1 所示：

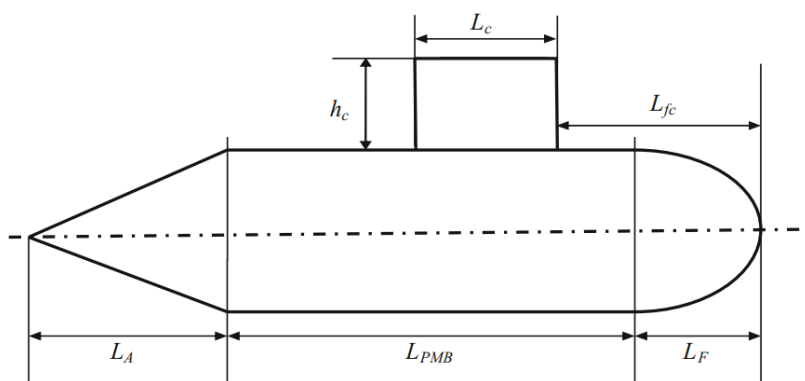


圖 1.9 IHSS 參數定義

表 1.1 IHSS 15 位數字碼定義

Digits	Meaning	Digits in example	Value in example
1st three	Ratio of length to diameter	105	10.5
4th and 5th	Ratio of fore body length to overall length	25	0.25
6th and 7th	Ratio of parallel middle body to overall length	70	0.70
8th and 9th	Ratio of distance of leading edge of sail from bow to overall length	35	0.35
10th and 11th	Ratio of length of sail to overall length	17	0.17
12th and 13th	Ratio of height of sail to diameter	80	0.80
14th and 15th	Sail foil shape	25	NACA 0025

1.3.6 Joubert/BB1/BB2

這是由 Joubert(2004, 2006)為澳洲國防部提出的一大型 SSK 的概念設計，也被很多機構用來做為標準潛艇船殼之參考用，即 BB1，而 BB2 則是將 BB1 之後端控制翼面及帆罩作改良之版本。主要之尺寸如表 1.2，外形如圖 1.10

表 1.2

Dimension	Full scale value (m)
Length overall	70.2
Beam	9.6
Depth (to deck)	10.6
Depth (to top of sail)	16.2
Propeller diameter	5.0

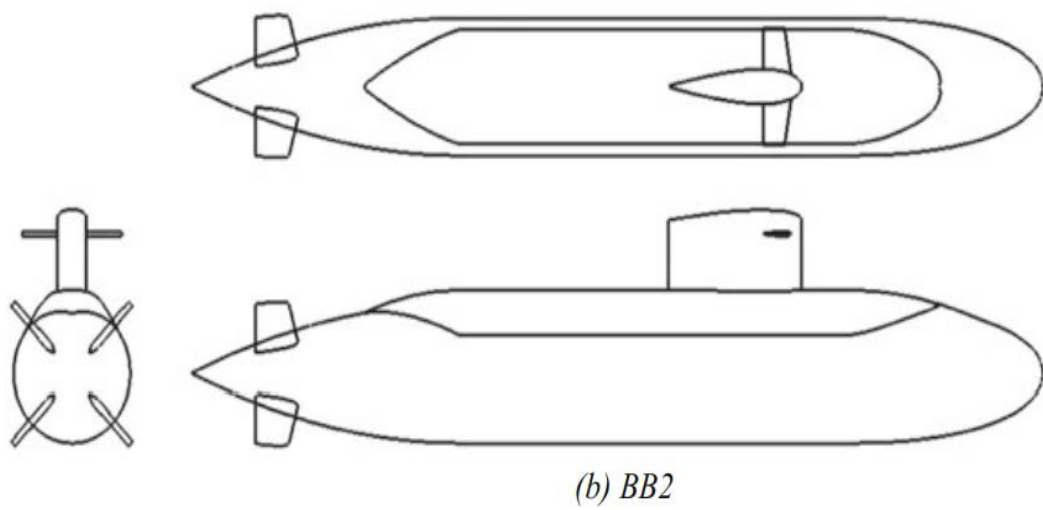
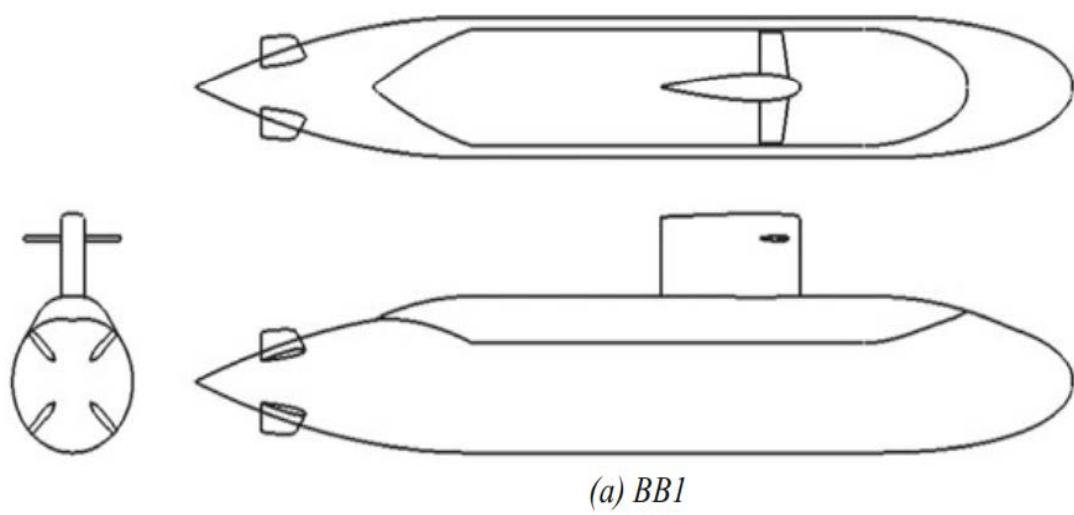


圖 1.10

第二章 水流體靜力學與控制

由於潛艇可在水上與水下，因此其排水量分為

※沉入水中排水量 (Submerged Disp.)

※水面狀態排水量 (Surface Disp.)(與表面船隻同)

而沉入水中排水量又有兩種不同之狀況，分別為(1)靜水力排水量(Hydrostatic Disp., Δ_H)(不包括自由溢入之水的總潛體質量)(2)形狀排水量(Form Disp., Δ_F)(包括自由溢入之水的總潛體質量)

所謂自由溢入之水是指主壓載櫃內及覆蓋體之下的水，與潛艇自身之總質量或總浮力無關。

形狀排水量常被流體動力學者使用，因為在推進與操縱上來講，主壓載櫃與覆蓋體內之水是隨潛艇運動的，此兩種排水量各有它的重心與浮心，如圖 2.1 所示

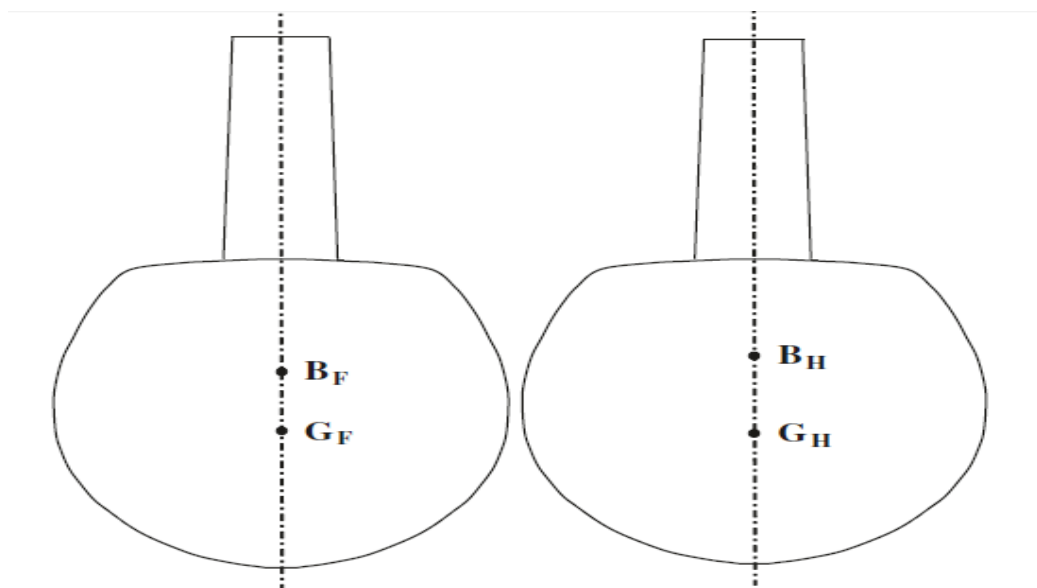


圖 2.1

對於在同一傾斜角下兩種排水量之扶正力矩應相等，因此

$$B_F G_F \times \Delta_F = B_H G_H \times \Delta_H$$

$$\frac{B_H G_H}{B_F G_F} = \frac{\Delta_F}{\Delta_H} \quad (\Delta_F > \Delta_H)$$

因為浮心 B_H 與 B_F 是一樣的，

因此重心 G_F 是高於重心 G_H ，即 $B_H G_H > B_F G_F$

◎靜態控制

在水中由質量產生之重力為 mg ，此必須由浸水體積產生之浮力

$\rho \nabla g$ 來平衡，表面船隻即是如此。但潛艇則不同，當潛艇下潛越

深其體積會越小而使浮力減小，反之若由深處上浮，則體積會變大使浮力增加。而此體積壓縮率與潛艇結構有關，而且很多現代潛艇都裝有吸音聲學瓷片，其本身為可壓縮，更增加了此問題的嚴重性。（因此潛艇在一深度最好為一不穩定平衡這樣只要稍為施一向上或向下之運動即可離開原來位置。）

海水之密度在垂直與水平面均會有小變化，尤其是由外海駛向近岸時。海水密度變化亦對潛艇在垂直平面之控制能力有顯著之影響。

而由於日常生活需求用品與武器之消耗，會使得潛艇質量產生變化，因此潛艇要能夠在質量上作快速之調節，通常是靠一系列之壓載櫃。即使如此，在沒有前進速度時在垂直平面也很難控制潛艇之運動，而需使用到外加之流體動力，如翼板。

◎橫向穩度

對一潛體而言，要在橫搖上呈現穩定，則浮心(B)必須在重心(G)之上方 ($BG > 0$)；而 BG 之定義會隨靜水力排水量或形狀排水量而不同。

但當潛艇浮出水面則情況就不同了，情況與一般表面船隻相同狀況，其穩度則因 B 會偏移中綫而變成考慮定傾中心 M，如圖 2.2，

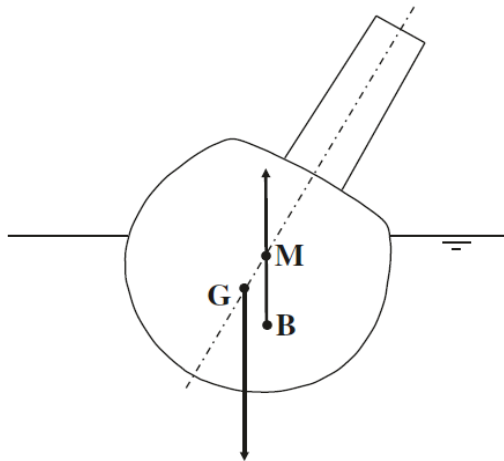


圖 2.2

而此定傾中心 M 必須在 G 上方，橫搖才會呈現穩定，即 $GM > 0$

$$\text{而 } BM = \frac{I}{\nabla}$$

I 為水綫面二次力矩面積， ∇ 為浸水體積，當潛體完全沒入水中，

$$I = 0 \text{ 則 } B = M (BM = 0)$$

另若有水櫃之水未滿時，則水櫃中會形成自由液面效應，穩度

必須作修正，此稱為 FSC (Free Surface Correction) (G 變成

G_F)，此與水櫃中之流體二次面積力矩及密度有關(與水櫃中之流體總質量沒有直接關係，與傾斜量有關)。

◎縱向穩度

與橫向穩度原理相同，但其縱向恢復力矩很小。因此使重心之縱向位置與浮心縱向位置時時刻刻維持相同是很重要的。尤其縱向重心會隨消耗品與武器之消耗而變化，因此要靠壓載櫃來調整。

◎壓載櫃

可分為兩種

(a) 主壓載櫃(Main Ballast Tank): 用來操作潛艇下潛或浮至水面之質量調節用

(b) 俯仰及補償櫃(Trim and Compensation Tank): 在潛艇潛航時，用來作微調使潛艇保持平衡

§主壓載櫃(MBT)

MBT 通常是在壓力殼之外部，在潛艇下潛時，水可自由流入之壓艙櫃。水由底部入水孔進，空氣由上端之排氣孔出。如圖 2.3 理想之入水孔大小是讓所有水櫃能同時進水充滿。其大小也會

影響到聲音訊號，因會干擾四周之流場。**小入水孔**可能會引起超壓(**over-pressure**)問題及水面穩度問題。。

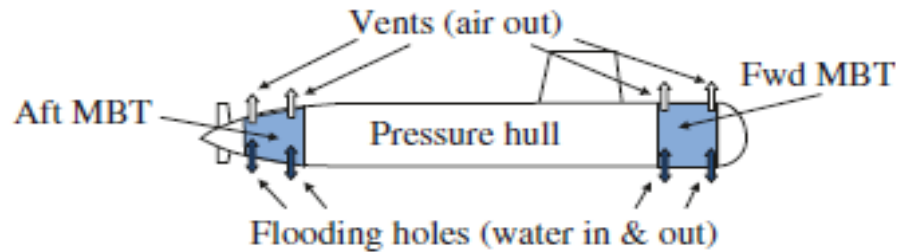


圖 2.3

§俯仰及補償壓載櫃

此兩種水櫃用來調整縱向穩度，當潛艇因消耗燃油、糧食及武器等後產生縱向質量與重心變化時使用。其佈置如圖 2.4 所示（另外，海水密度變化、船殼壓縮率以及操航接近水面之吸力，亦會使縱向質量與重心發生小變化）

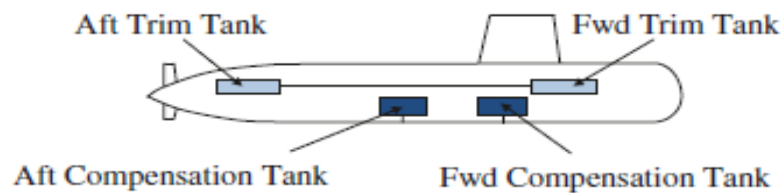


圖 2.4

理想上補償櫃應在接近 LCG 的位置而俯仰櫃應在潛艇之前後艏、艉端，此外若是為武器消耗設計之補償櫃應盡量靠近到適當位置。某些傳統潛艇在前方有一快速下沉櫃，可很快溢入水幫助下沉，而當下沉後亦可馬上放空。

此兩種水櫃若完全暴露於外部水壓時，則採硬殼櫃(Hard Tank)，否則可採軟式櫃(Soft Tank)。用來補償改變潛艇質量的，必須採硬殼，因為它直接暴露於外部水壓，必須能在深水中高壓中存活。此種系統若發生嚴重失靈時，通常視為無法控制之洩漏，必須要有一標準操作程序(SOP)來處理。

僅用來調整縱向重心之水櫃，可以採用軟式櫃，因為它跟潛深無關(沒有暴露於外部水壓中之結構問題)。

※俯仰多邊圖 (Trim Polygon)

在潛艇設計階段，必須決定所設計之俯仰櫃與補償櫃是否可符合潛艇質量與 L.C.G. 之任何可能之變化的需求。因此必須製作 所謂的俯仰多邊圖來檢視。如圖 2.5(a)

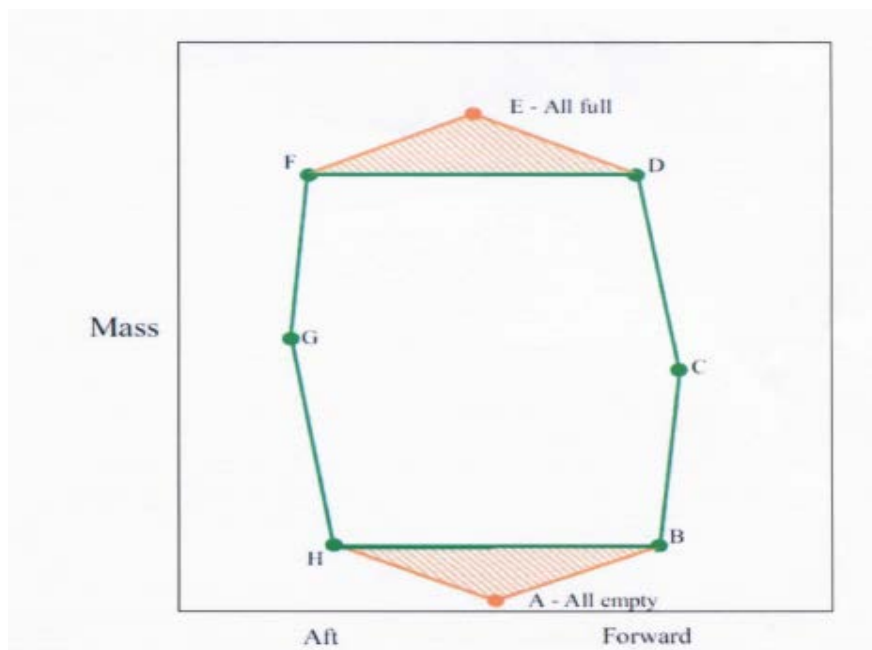


圖 2.5(a) 俯仰多邊圖
(假設 Trim tank 為硬櫃，其進水是由外部供給)

圖 2.5(b) 為對應圖 2.5(a)之各點 AH之解說圖

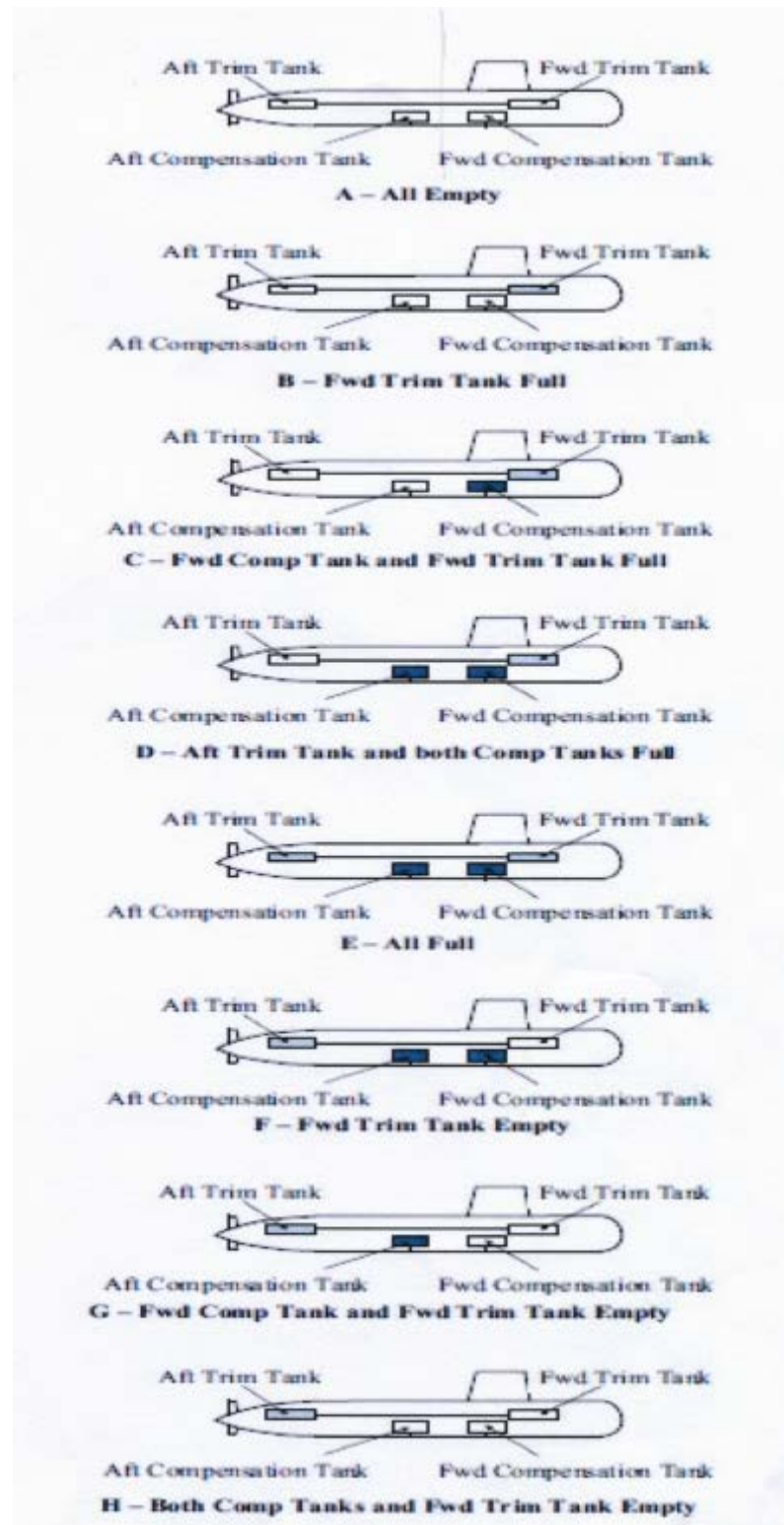


圖 2.5 (b)

在此圖中，A 點代表所有水櫃均為空櫃，橫軸代表俯仰力矩之增減量，縱軸代表質量之增減量。由 A 點向右代表增加前傾力矩（即前端俯仰櫃（FTT）加滿（至 B），假設潛艇俯仰櫃為硬櫃可由外部加水），則潛艇質量與俯仰力矩變化，L. C. G. 向前移。繼續往前端補償櫃（FCT）加滿（至 C），向上偏右則表示增加質量且 L. C. G. 亦稍向前移。接著再往後方補償櫃（ACT）加滿（至 D），向上且有點偏左，此時質量繼續增加，但 L. C. G. 稍向後移，接著再往後端俯仰櫃（ATT）加滿（至 E），此時質量繼續增加，L. C. G. 稍向後移（偏左），此時注滿全部水櫃，再依序將水櫃放空（F：前端俯仰櫃放空，G：前端補償櫃放空，H：後端補償櫃放空）回到原點 A（後端俯仰櫃放空），形成一多邊圖。

（F：ATT+FCT+ACT，G：ATT+ACT，H：ATT）

此多邊圖代表潛艇之俯仰櫃與補償櫃能達到最大功能的影響範圍。

再來我們可以潛艇在服勤狀況下，因各種消耗狀況可能產生之質量與俯仰 變化，再加上潛艇受壓縮與靠近水面吸力影響之作用，來畫出另一類似之實際服勤狀況的多邊圖，如圖 2.6（a）

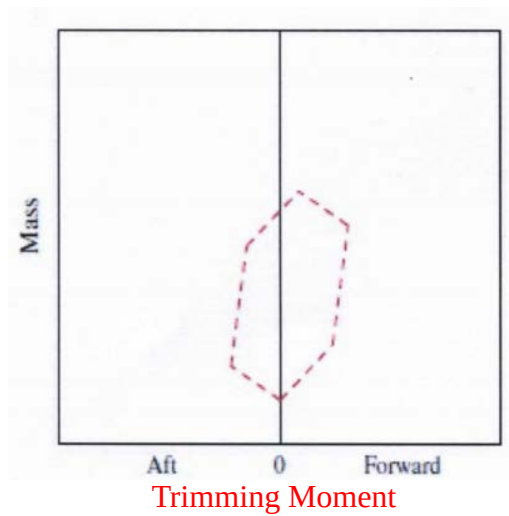


圖 2.6 (a)

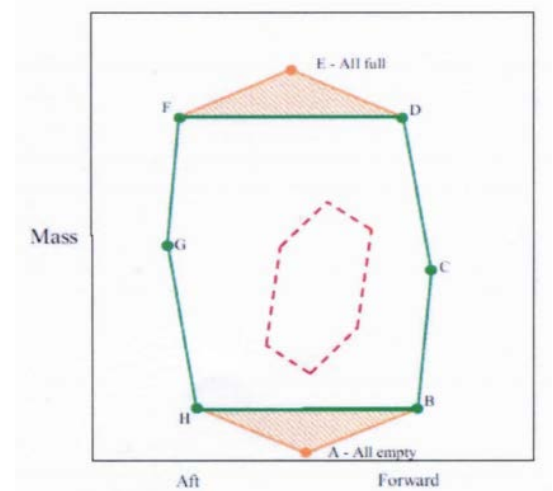


圖 2.6 (b)

將此兩圖放置一起，如圖 2.6(b)。若服勤狀況之多邊圖全涵蓋在設計俯仰圖內，則代表設計俯仰水櫃與補償水櫃可應付任何艇內消耗品及外在影響之質量與俯仰變化；反之若有任何部份超出設計俯仰多邊圖，則代表設計之水櫃不符合需求，需重新考慮。

◎上浮與下潛之穩度

當潛艇潛航時，B 在 G 上面則為穩定，而在水面航行則需

$GM > 0$ 。但當由浮航便成潛航之過渡期，其浮心與重心均在改變

且 I 值亦在改變，因此亦影響到定傾中心 M 之改變。

為了保證在此過渡過程中潛艇能維持穩定，各相關重心、浮心與定傾中心與吃水之關係圖可先作出作為參考，如圖 2.7。

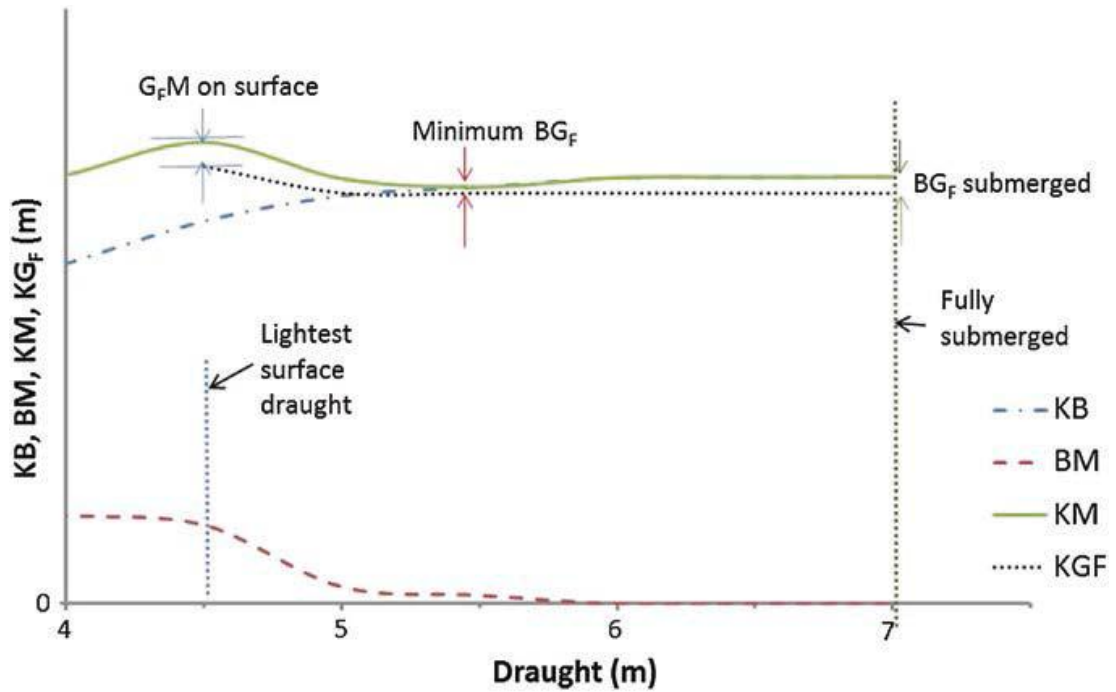


圖 2.7

此圖中 4.5m 吃水是最小浮航吃水，在約 5.5m 吃水覆蓋體部份會全部入水，而潛艇在 7m 吃水完全潛入水中，此例子之 $G_F M > 0$ ，最小之 $BG_F > 0$ ，完全入水時之 $BG_F > 0$ ，代表都是穩定的。

(KG_F 為經過自由液面修正過之 KG)

有另一種複雜性需注意，即當浮出水面時，會有一些水仍停留在覆蓋體及其它自由入水處內一段時間，而造成重心比原圖 2.7 中假設的重心高。而此部份水脫離潛艇之時間與溢水孔之大小

有關，但大孔會在下潛時引起噪音產生的問題。

◎坐底之穩度

有時因操作之問題，潛艇會利用補償櫃進水來沉坐於海床上，

則其橫向穩度會額外受到龍骨向上外力之影響，如圖 2.8。

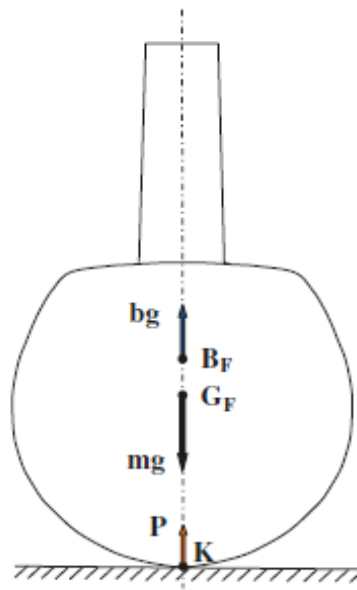


圖 2.8

由力平衡觀念而言

$$mg - bg - p = 0$$

當向在傾斜一小角度 ϕ ，則其橫傾力矩為 $(KG_F \times mg - KB_F \times$

$bg) \sin \phi$ 。

此處用的是形狀排水量(form displacement)，因為補償櫃為內櫃，其進水是額外加入的。

若潛艇要扶正則必須要有一反方向之力矩產生，即 $KB_F \times$

$$bg > KG_F \times mg$$

由此可決定潛艇要維持穩定時，則補償櫃可加入的最大量之水。假使補償櫃之位置在艇身之低處，則可能加水量多寡較不會影響到穩度而不需加以設限，但位置較高時則必須限制入水量。

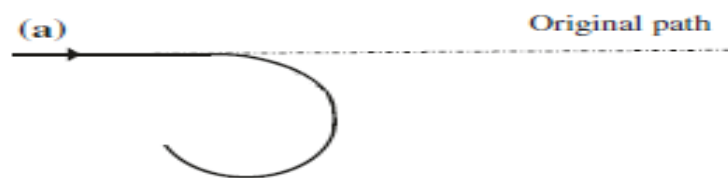
◎浮出冰面之穩度

必須將潛艇停在一薄冰底下，然後在沒有前進速度的狀況下，慢慢浮出冰面。此時帆罩先接觸冰面，造成一向下力，此力隨著壓艙水排出而增大，而且浮力也相對於重力變大，直到冰面破裂，這過程牽涉的穩度分析方式與坐底之穩度一樣。

第三章 操縱與控制

潛艇操縱之基本觀念與水面船隻相似，但最大的不同是潛艇之運動操航可在六個自由度運作，但非常不可能需要在倒車時作操航。與水面船隻一樣，有四種不同的運動穩定性的標準，如圖 3.1

a. 不穩定(Unstable)(control fixed)



b. 直線穩定性(Straight line stability) (control fixed)



c. 方向穩定性(Directional stability) (control fixed in vertical plane, with control in horizontal plane)



(實線為 critically damped)

d. 位置運動穩定性(Positional motion stability)(with control)



圖 3.1

潛艇在垂直平面之操縱與運動穩定性，所需要自由度考量，比起水平平面操縱與運動之需求是不相同的。例如一般之軍事潛艇在垂直平面之操作範圍非常有限，通常僅有一些艇長度而已。超過其上限將衝出水面，低於下限則將超過可下潛深度或撞到海床，特別是高速核子潛艇都希望有一良好的垂直平面運動穩定性自由度。這對低速的傳統潛艇較不重要，因為它在地形多變化的海床上方操作時，由於在垂直平面具有高自由度的操縱性能力，故可能會有些戰略優勢。

對於水平平面運動，在無控制之狀況下(Control fixed)，其最大的可能運動穩定性為直線穩定性，即潛艇在受到一干擾後能回到直線運動，但若要達到方向穩定性，則必須靠控制。但在垂直平面上，即便是無控制狀況，潛艇在受到一小干擾後，潛艇亦可回到原方向，這可能是由於靜水力(hydrostatic force)之影響，提供了一縱搖回復力矩。

以船體固定坐標來描述潛艇之運動方程式如(3.1)~(3.6)所示。右邊代表艇體之加速度動力項

$$X = m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] \quad (3.1)$$

$$Y = m[\dot{v} - wp + ur + x_G(qp + \dot{r}) - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p})] \quad (3.2)$$

$$Z = m[\dot{w} - uq + vp + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p}) - z_G(p^2 + q^2)] \quad (3.3)$$

$$K = I_{xx}\dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr - (\dot{r} + pq)I_{zx} + (r^2 - q^2)I_{yz} + (pr - \dot{q})I_{xy} \\ + m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] \quad (3.4)$$

$$M = I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp - (\dot{p} + qr)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{zx} + (qp - \dot{r})I_{yz} \\ - m[x_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{u} - vr + wq)] \quad (3.5)$$

$$N = I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq - (\dot{q} + rp)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{xy} + (rq - \dot{p})I_{zx} \\ + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] \quad (3.6)$$

當原點位於縱向與橫向中心時，上式中之 $x_G = y_G = 0$ ，若原點也在垂向中心上，則 z_G 也為零。

X, Y, Z, K, M, N 分別代表縱移，橫移，起伏，橫搖，縱搖與橫擺之流體動力。 u, v, w, p, q, r 則分別代表縱移，橫移，起伏，橫搖，縱搖與橫擺之速度。

◎流體動力(穩態假設)

如水面船隻一樣，在運動方程式中的各項流體動力與每個運動變數的關係，可以以一具數列係數之數學式來表示，而這些係數與使用何種數學模式之取捨，依經驗來決定。通常一個組織單位會使用一種數學模式來表示不同之潛艇。只要表示流體動力的數學模式一決定，不同之潛艇的每個相關係數也就會針對其外型的不同而作變

化。

因為不同的單位所用的數學模式可能不同，因此不必要且不可能去比較不同單位之係數值，當然，當有修正改善時，且數學模式有進一步精進時，必須將過去潛艇所得之係數數據再作進一步檢視確認。以下潛艇流體動力與潛艇運動函數關係的數學模式 Eqs. (3.7)-(3.12)取自於 Gertler 及 Hagen 在 1967 年發表之報告。這些方程式在 1979 年被 Feldman 修正過。

Gertler M, Hagen GR (1967) Standard equations of motion for submarine simulation. Naval Ship Research and Development Center, Report No 2510, Washington, June 1967

Feldman J (1979) DTNSRDC revised standard submarine equations of motion. David W Taylor Naval Ship Research and Development Center, Ship Performance Department, DTNSRDC/SPD-0393-09, June 1979

$$\begin{aligned} X = & \frac{1}{2} \rho L^4 \left[X'_{qq} q^2 + X'_{rr} r^2 + X'_{rp} rp \right] \\ & + \frac{1}{2} \rho L^3 \left[X'_{\dot{u}} \dot{u} + X'_{vr} vr + X'_{wq} wq \right] \\ & + \frac{1}{2} \rho L^2 \left[X'_{uu} u^2 + X'_{vv} v^2 + X'_{ww} w^2 + X'_{\delta R \delta R} u^2 \delta_R^2 + X'_{\delta s \delta s} u^2 \delta_s^2 + X'_{\delta B \delta B} u^2 \delta_B^2 \right] \\ & + \frac{1}{2} \rho L^2 \left[a_i u^2 + b_i u u_c + c_i u_c^2 \right] \\ & - (W - B) \sin \theta \\ & + \frac{1}{2} \rho L^2 \left[X'_{vv\eta} v^2 + X'_{ww\eta} w^2 + X'_{\delta R \delta R \eta} \delta_R^2 u^2 + X'_{\delta s \delta s \eta} \delta_s^2 u^2 \right] (\eta - 1) \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned}
Y = & \frac{1}{2}\rho L^4 \left[Y'_r \dot{r} + Y'_{\dot{p}} \dot{p} + Y'_{p|p|} p|p| + Y'_{pq} pq + Y'_{qr} qr \right] \\
& + \frac{1}{2}\rho L^3 \left[Y'_{\dot{v}} \dot{v} + Y'_{vq} vq + Y'_{wp} wp + Y'_{wr} wr \right] \\
& + \frac{1}{2}\rho L^3 \left[Y'_r ur + Y'_p up + Y'_{|r|\delta R} u|r|\delta_R + Y'_{v|r|} \frac{v}{|v|} \left| (v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}} \right| |r| \right] \\
& + \frac{1}{2}\rho L^2 \left[Y'_* u^2 + Y'_v uv + Y'_{v|v|} v \left| (v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}} \right| + Y'_{vw} vw + Y'_{\delta R} u^2 \delta_R \right] \\
& + (W - B) \cos \theta \sin \phi \\
& + \frac{1}{2}\rho L^3 Y'_{r\eta} ur (\eta - 1) \\
& + \frac{1}{2}\rho L^2 \left[Y'_{v\eta} uv + Y'_{v|v|\eta} v \left| (v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}} \right| + Y'_{\delta R \eta} u^2 \delta_R \right] (\eta - 1) \quad (3.8)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Z = & \frac{1}{2}\rho L^4 \left[Z'_{\dot{q}} \dot{q} + Z'_{pp} p^2 + Z'_{rr} r^2 + Z'_{rp} rp \right] \\
& + \frac{1}{2}\rho L^3 \left[Z'_{\dot{w}} \dot{w} + Z'_{vr} vr + Z'_{vp} vp + Z'_q uq + Z'_{|q|\delta s} u|q|\delta_s \right] \\
& + \frac{1}{2}\rho L^3 \left[Z'_{w|q|} \frac{w}{|w|} \left| (v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}} \right| |q| \right] \\
& + \frac{1}{2}\rho L^2 \left[Z'_* u^2 + Z'_v uv + Z'_w uw + Z'_{w|w|} w \left| (v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}} \right| \right] \\
& + \frac{1}{2}\rho L^2 \left[Z'_{|w|} u|w| + Z'_{ww} w \left| (v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}} \right| \right] \\
& + \frac{1}{2}\rho L^2 \left[Z'_{vv} v^2 + Z'_{\delta s} u^2 \delta_s + Z'_{\delta B} u^2 \delta_B \right] \\
& + (W - B) \cos \theta \cos \phi \\
& + \frac{1}{2}\rho L^3 Z'_{q\eta} uq (\eta - 1) \\
& + \frac{1}{2}\rho L^2 \left[Z'_{w\eta} uw + Z'_{w|w|\eta} w \left| (v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}} \right| + Z'_{\delta s \eta} \delta_s u^2 \right] (\eta - 1) \quad (3.9)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
K = & \frac{1}{2}\rho L^5 \left[K'_{\dot{p}} \dot{p} + K'_r \dot{r} + K'_{qr} qr + K'_{pq} pq + K'_{p|p|} p|p| \right] \\
& + \frac{1}{2}\rho L^4 \left[K'_p up + K'_r ur + K'_{\dot{v}} \dot{v} + K'_{vq} vq + K'_{wp} wp + K'_{wr} wr \right] \\
& + \frac{1}{2}\rho L^3 \left[K'_* u^2 + K'_v uv + K'_{v|v|} v \left| (v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}} \right| + K'_{vw} vw + K'_{\delta R} u^2 \delta_R \right] \\
& + (y_G W - y_B B) \cos \theta \cos \phi - (z_G W - z_B B) \cos \theta \sin \phi \\
& + \frac{1}{2}\rho L^3 K'_{*\eta} u^2 (\eta - 1) \quad (3.10)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M = & \frac{1}{2}\rho L^5 \left[M'_{\dot{q}}\dot{q} + M'_{pp}p^2 + M'_{rr}r^2 + M'_{rp}rp + M'_{q|q|}q|q| \right] \\
& + \frac{1}{2}\rho L^4 \left[M'_{\dot{w}}\dot{w} + M'_{vr}vr + M'_{vp}vp \right] \\
& + \frac{1}{2}\rho L^4 \left[M'_{\dot{q}}uq + M'_{|q|\delta_s}u|q|\delta_s + M'_{|w|q} \left(v^2 + w^2 \right)^{\frac{1}{2}} \left| q \right| \right] \\
& + \frac{1}{2}\rho L^3 \left[M'_{*}u^2 + M'_{uw}uw + M'_{w|w|}w \left(v^2 + w^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right] \\
& + \frac{1}{2}\rho L^3 \left[M'_{|w|}u|w| + M'_{ww} \left| w \left(v^2 + w^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right| \right] \\
& + \frac{1}{2}\rho L^3 \left[M'_{vv}v^2 + M'_{\delta_s}u^2\delta_s + M'_{\delta_B}u^2\delta_B \right] \\
& + (x_G W - x_B B)\cos\theta \cos\phi - (z_G W - z_B B)\sin\theta \\
& + \frac{1}{2}\rho L^4 M'_{q\eta}uq(\eta - 1) \\
& + \frac{1}{2}\rho L^3 \left[M'_{w\eta}uw + M'_{w|w|\eta}w \left(v^2 + w^2 \right)^{\frac{1}{2}} \left| + M'_{\delta_s\eta}u^2\delta_s \right| (\eta - 1) \right] \quad (3.11)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
N = & \frac{1}{2}\rho L^5 \left[N'_{\dot{r}}\dot{r} + N'_{\dot{p}}\dot{p} + N'_{pq}pq + N'_{qr}qr + N'_{r|r}r|r| \right] \\
& + \frac{1}{2}\rho L^4 \left[N'_{\dot{v}}\dot{v} + N'_{wr}wr + N'_{wp}wp + N'_{vq}vq \right] \\
& + \frac{1}{2}\rho L^4 \left[N'_{\dot{p}}up + N'_{r}ur + N'_{|r|\delta_R}u|r|\delta_R + N'_{|v|r} \left(v^2 + w^2 \right)^{\frac{1}{2}} \left| r \right| \right] \\
& + \frac{1}{2}\rho L^3 \left[N'_{*}u^2 + N'_{uv}uv + N'_{v|v|}v \left(v^2 + w^2 \right)^{\frac{1}{2}} \left| + N'_{vw}vw + N'_{\delta_R}u^2\delta_R \right| \right] \\
& + (x_G W - x_B B)\cos\theta \sin\phi + (y_G W - y_B B)\sin\theta \\
& + \frac{1}{2}\rho L^4 N'_{r\eta}ur(\eta - 1) \\
& + \frac{1}{2}\rho L^3 \left[N'_{v\eta}uv + N'_{v|v|\eta}v \left(v^2 + w^2 \right)^{\frac{1}{2}} \left| + N'_{\delta_R\eta}u^2\delta_R \right| (\eta - 1) \right] \quad (3.12)
\end{aligned}$$

當潛艇以自推速率前進時， $\eta=1$ ，一般當操作趨近於穩態時，此近似值可以接受。所有相關之流體動力係數可由實驗，數值計算或經驗公式得之。

注意以上之方程式(3.7)-(3.12)是用於十字型**艏控制翼**之船型。對於X型**艏控制翼**則需作修正。

若原點設在縱向重心，則 $x_G=0$ ，方程式(3.7)-(3.12)將可簡化許

多。然而原點位置將會影響一些係數，而有以下之轉換關係：

$$Y_{rG} = Y_{rO} - Y_v x_G$$

$$N_{rG} = N_{rO} + Y_v x_G^2 - N_{vO} x_G - Y_{rO} x_G$$

$$N_{vG} = N_{vO} - Y_v x_G$$

$$Z_{qG} = Z_{rO} - Z_w x_G$$

$$M_{qG} = M_{qO} + Z_w x_G^2 + M_{wO} x_G + Z_{qO} x_G$$

$$M_{wG} = M_{wO} - Z_w x_G$$

下標 G 表示原點設在縱向重心，下標 O 表示原點距離縱向重心 x_G 。

Y_v 與原點之縱向位置無關。

另一種替代方式是利用查表方式來找流體動力與運動變數的關係。

如 1993 年 Jensen 使用之方法。例如圖 3.2 表示，橫擺力矩與舵角

之關係圖，是由查表方式，將幾個已知之數據點整順成一曲綫，再

來內插任何一點所需要的數據。此方法對於那些原來力或力矩與運

動參數關係並不是一條清楚已知的平順曲綫時，特別有用。

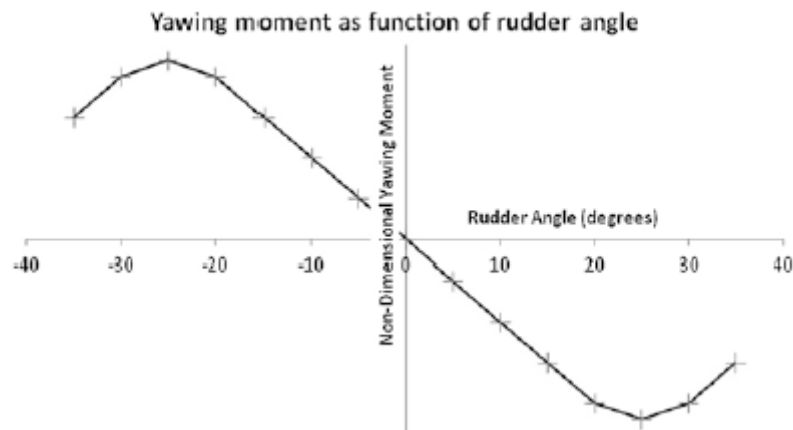


圖 3.2 橫擺力矩與舵角之關係圖

※個別流體動力係數之敏感度分析

$$S = \frac{\Delta R / R^*}{\Delta H / H^*}$$

ΔR 為一試驗結果 R^* 之差值(變動 ΔH 後)

ΔH 為個別流體動力係數變數之差值

不同之潛艇形狀，其對個別流體動力係數之敏感度不同

※流體動力係數決定方法

(1) 模型試驗

一般採束縛模型試驗(Captive model test)，通常採 5~6m 之大模型，但即使如此，屬具部份尺寸也很小，因此其雷諾數也小。此外，渦流之尺度效應也無法完全了解。因此盡量將模型取大，以消除這些尺度效應。通常會加入渦流激發器於船體與屬具。

若潛艦夠深，則僅需考慮雷諾數，不需要考慮正確的福祿數。

基本上此項實驗不見得要在水中(拖航水槽)，亦可在風洞中執行。

當使用拖航水槽時，必須注意自由液面影響，應避免有波產生。

大部份的設施，在做潛艇測試時，都有一常有的測試速度來維持連續一致性。例如英國 Haslar 之 QinetiQ 設備，其正常之測試速度為 10ft/s。使用標準紊流器方式以及相同大小之模型，此表示對於所有的測試，任何尺寸效應等測量值均可維持一致性。

若有用支柱來支撐模型，而且流體動力之量測感測器是在模型內部時，則支柱受力不必計入，但支柱之流場仍會影響船模四周之流場。因此有時會以模型倒掛在支柱下方的方式來作實驗，或側向平放的方式(視所要量測的係數而訂)，如圖 3.3，以減少支柱影響。亦可以後插式之方式處理，如圖 3.4，但此方式就無法加入推進器之影響。

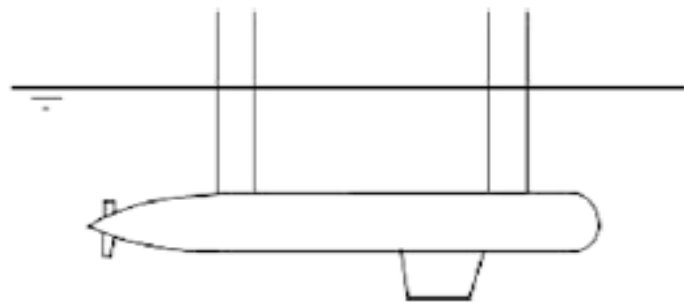


圖 3.3 模型倒掛在支柱下方之實驗方式

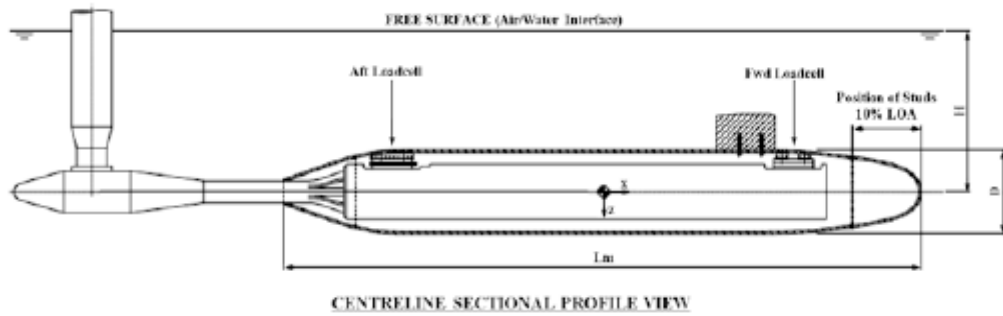


圖 3.4 後插式之實驗方式

此拘束模型測試方式是將模型限制在某一所要之運動，再量取其對應之力。

※平移測試(橫移/起伏)

為了得到橫移速度產生之力與力矩係數，如 Y_v 、 N_v 等，其方式是將潛艇模型側躺平放，而其橫移速度之產生是在垂直平面上調整模型與水流之角度來產生。此可避免支柱會隨水流成一角度(若在水平平面調整轉則支柱會與水流形成一角度)，此可減少支柱帶來的流體動力干擾。但因大部分之拖航水槽寬度大於水深，因此此方式測試比起在水平面調整模型與水流角度之方式，會有槽壁效應(即水槽底部)之影響，而且此方式若會有自由液面之影響，則不適用。

若要量測起伏方向之流體動力，如 Z_w 、 M_w 等，則將模型倒放置來調整其垂向面之角度，以產生所需之起伏速度。

以上測試結果常以無因次化來表示，如圖 3.5 所示

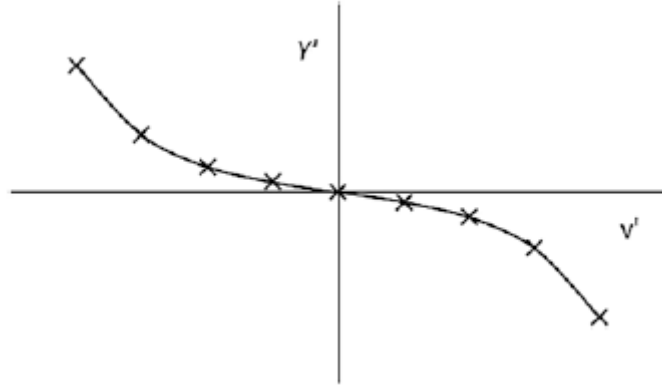


圖 3.5 橫移速度(V)產生之力 Y' 測試結果

在此例子中，若用螺槳轉速來造成自推的速度，則 (3.8) 式可簡化為 (3.13) 式

$$Y = \frac{1}{2} \rho L^2 [Y_*' u^2 + Y_v' uv + Y_{v|v}|v|v|] \quad (3.13)$$

其中 Y_*' 、 Y_v' 及 $Y_{v|v}'$ 為未知數，可由本實驗得到。 Y_*' 是由於一個非對稱的結果，即在 $v'=0$ 時， $Y' \neq 0$ 。剩下的兩個係數，則由數據中去迴歸得來， Y_v' 為綫性(在低速 v' 得到)，而 Y_{vv}' 代表非綫性的特徵。注意在圖 3.5 所示，為一反對稱(skew symmetric)，因此需要一奇數項，例如 $v|v|$ 而不是 v^2 ，也可用 v^3 。但因流體動力傾向於與速度平方成正比，因此 $v|v|$ 較常用。

若要考慮屬具角度影響之力與力矩，亦可由設定相對之屬具角度來實驗取得數據。但由於尺度效應影響，屬具之雷諾數常比實體低很多，對其升力與阻力會有影響，必須加以說明。而且屬具是在模型本身之邊界層內運作，由於雷諾數效應之緣故，模型之邊界層比實際船隻要大很多，故也會影響結果。

另外主體與屬具之橫擺或起伏速度與屬具角度之交叉耦合效應也可得到，如同推進器之 rpm 因屬具角度的關係對產生的力與力矩之影響也可得到。但在錯的雷諾數中試驗，尺度效應影響仍應注意。

※旋轉臂設備(Rotating Arm)

此設備通常用來量取力(或力矩)與橫擺速率的關係，其裝置如圖 3.6。其模型一般以倒置方式測試(i. e. 帆罩在下)，此裝置亦可用來量測縱搖速度產生之力與力矩，只要將模型之側邊向上擺放在水平面上，即可達成。此轉臂亦裝有一輔助拖車(sub-carriage)可調整不同之半徑，因此可得到不同之縱搖速度(q)與不同之橫擺速率(r)。其力矩與橫擺角速度的關係測試結果，可如圖 3.7 所示，亦可看出有無橫向速度(v)亦會影響其結果(將潛體轉一角度)。

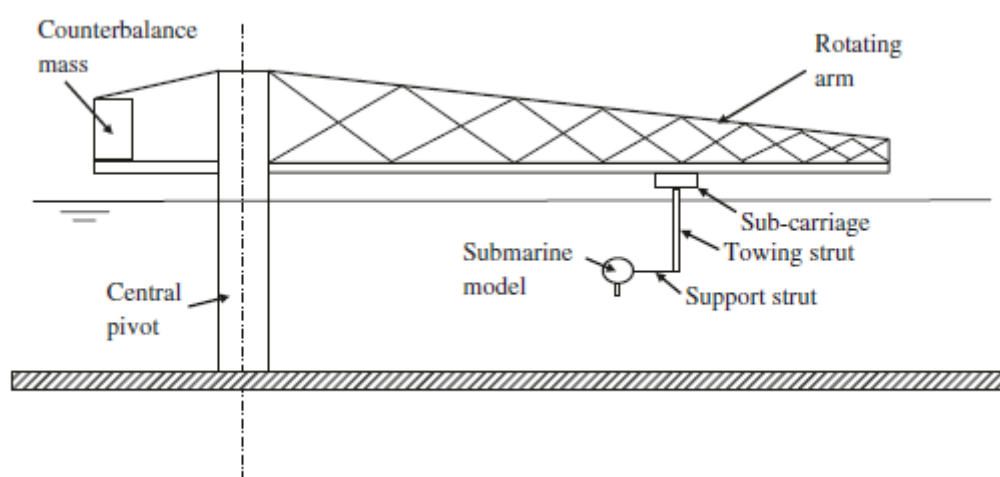


圖 3.6 旋轉臂設備

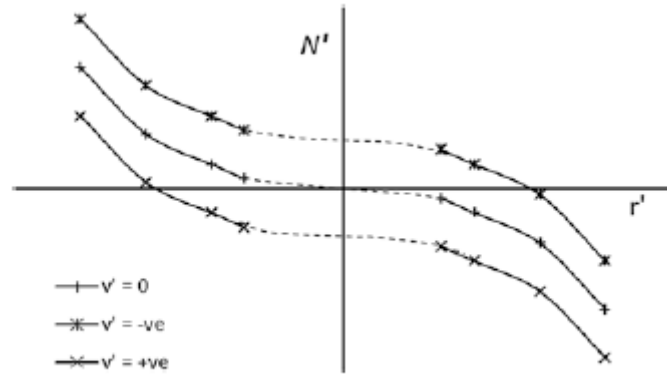


圖 3.7 橫向力矩與角速度之關係圖

但旋轉臂設施對於小角速度無法測試，因為需要很長之旋轉臂來使 q' ， $r'=0$ 時，為一直線(綫性關係)，如圖 3.7 之虛線所示，此部份實驗是不可能達到的。

當 $v=0$ 時，(3.12)式可以簡化為 (3.14) 式

$$N = \frac{1}{2}\rho L^3 [N_{r|r}|r|r|] + \frac{1}{2}\rho L^4 [N_r'ur] + \frac{1}{2}\rho L^3 [N_*'u^2] \quad (3.14)$$

其中 $N_{r|r}'$ 、 N_r' 及 N_*' 可以由圖 3.7 迴歸求得，但對於低 r' 之曲線定義有困難，因此其 N_r' 之正確值較難得到。

※平面運動機構(Planar Motion Mechanism)(PMM)

此平面運動機構可用來量取潛體附加質量，也可用於拖航水槽中來量取旋轉運動相關之力與力矩。一般潛體是利用垂向式之平面運動機構即 VPMM，如圖 3.8，可分為(a)純平移；與 (b)純轉動。

當模型倒置時，可由純平移運動得到純起伏，由純轉動運動得到純縱搖，如果以模型側向橫置，則相對上，亦可得純橫移與純橫擺。



圖 3.8 垂向式之平面運動機構

※純起伏($v=p=q=r=0$)

將模型倒置，作純起伏運動，推進器之 rpm 設在自航點，則在支架上量到之力，為 (3.3) 式(固體運動分量)與(3.9)式(流體動力分量)之結合力，表示如下

$$\begin{aligned}
Z_m(t) = & \frac{1}{2}\rho L^3 [(Z'_w - m')\dot{w}] \\
& + \frac{1}{2}\rho L^2 [Z'_* u^2 + Z'_w uw + Z'_{w|w}|w||w|] \\
& + \frac{1}{2}\rho L^2 [Z'_{|w}|u||w| + Z'_{ww}w^2]
\end{aligned} \tag{3.15}$$

(以上由潛艇模型之運動方程式 $\sum F = ma$ 得之，即

$$-Z_m(t) + \sum F_{Hydro} = ma)$$

在不計入不對稱影響下，其綫性方程式可簡化為

$$Z_m(t) = \frac{1}{2}\rho L^3 [(Z'_w - m')\dot{w}] + \frac{1}{2}\rho L^2 [Z'_w uw] \tag{3.16}$$

同樣地，純起伏產生之綫性縱搖力矩方程式可寫為

$$M_m(t) = \frac{1}{2}\rho L^4 [(M'_w + m'x'_G)\dot{w}] + \frac{1}{2}\rho L^3 [M'_w uw] \tag{3.17}$$

假設平移運動為正弦運動

則

$$z = z_0 \sin \omega t \tag{3.18}$$

$$w = z_0 \omega \cos \omega t \tag{3.19}$$

$$\dot{w} = -z_0 \omega^2 \sin \omega t \tag{3.20}$$

則由正弦運動產生所量測之力亦為正弦力，但有相位差即同相 (*in*

phase)與不同相(*out of phase*)，i. e.

$$Z_m(t) = Z_{in} \sin \omega t + Z_{out} \cos \omega t \tag{3.21}$$

$$M_m(t) = M_{in} \sin \omega t + M_{out} \cos \omega t \tag{3.22}$$

將(3.18)-(3.20)代入 (3.16)-(3.17)再與(3.21)(3.22)比較可知道

量測之同相力與不同相力，其無因次化為

$$Z'_w = \frac{Z_{out}}{\frac{1}{2}\rho L^2 u z_o \omega} \quad (3.23)$$

$$(Z'_{\dot{w}} - m') = -\frac{Z_{in}}{\frac{1}{2}\rho L^3 z_o \omega^2} \quad (3.24)$$

$$M'_w = \frac{M_{out}}{\frac{1}{2}\rho L^3 u z_o \omega} \quad (3.25)$$

$$(M'_{\dot{w}} - m'x'_G) = -\frac{M_{in}}{\frac{1}{2}\rho L^4 z_o \omega^2} \quad (3.26)$$

(由以上可解出 Z'_w , $Z'_{\dot{w}}$, M'_w , $M'_{\dot{w}}$)

利用此方式求得之係數與頻率有關，因此可能需要外插到零頻率，以求得穩態之值((3.7)式~(3.12)式所用的係數是屬於穩態狀況)，但當潛艇在深潛之狀況，則通常不必要，但若適當需要的話，仍應考慮。

(b)純縱搖($p=r=w=v=0$)

則

$$\theta = \theta_0 \sin \omega t \quad (3.27)$$

$$q = \theta_0 \omega \cos \omega t \quad (3.28)$$

$$\dot{q} = -\theta_0 \omega^2 \sin \omega t \quad (3.29)$$

相對應之力與力矩係數可由下列各式得之

$$(Z'_q + m') = \frac{Z_{out}}{\frac{1}{2}\rho L^3 u \theta_0 \omega} \quad (3.30)$$

$$(Z'_q + m'x'_G) = -\frac{Z_{in}}{\frac{1}{2}\rho L^4 \theta_0 \omega^2} \quad (3.31)$$

$$(M'_q - m'x'_G) = \frac{M_{out}}{\frac{1}{2}\rho L^4 u \theta_0 \omega} \quad (3.32)$$

$$(M'_q - I'_{yy}) = -\frac{M_{in}}{\frac{1}{2}\rho L^5 \theta_0 \omega^2} \quad (3.33)$$

(由以上解出 Z'_q , Z'_q , M'_q , M'_q)

※純橫移($p=q=r=w=0$)

其相對應之力與力矩之係數，求法與純起伏類似

$$Y'_v = \frac{Y_{out}}{\frac{1}{2}\rho L^2 u y_0 \omega} \quad (3.34)$$

$$(Y'_v - m') = -\frac{Y_{in}}{\frac{1}{2}\rho L^3 y_0 \omega^2} \quad (3.35)$$

$$N'_v = \frac{N_{out}}{\frac{1}{2}\rho L^3 u y_0 \omega} \quad (3.36)$$

$$(N'_v - m'x'_G) = -\frac{N_{in}}{\frac{1}{2}\rho L^4 y_0 \omega^2} \quad (3.37)$$

(由以上解出 Y'_v , Y'_v , N'_v , N'_v)

※純橫擺($p=q=v=w=0$)

與純縱搖類似，可求得下列力與力矩

$$(Y'_r - m') = \frac{Y_{out}}{\frac{1}{2}\rho L^3 u \psi_0 \omega} \quad (3.38)$$

$$(Y'_i - m'x'_G) = -\frac{Y_{in}}{\frac{1}{2}\rho L^4 \psi_0 \omega^2} \quad (3.39)$$

$$(N'_r - m'x'_G) = \frac{N_{out}}{\frac{1}{2}\rho L^4 u \psi_0 \omega} \quad (3.40)$$

$$(N'_i - I'_{zz}) = -\frac{N_{in}}{\frac{1}{2}\rho L^5 \psi_0 \omega^2} \quad (3.41)$$

(由以上解出 Y'_r , Y'_i , N'_r , N'_i)

通常先以 VPMM 來決定綫性係數(這些是會影響潛艇之直線穩定性的項目)，可用來作改良外型及決定屬具的尺寸。只要上述設計完成要移至下一階段時，還要在拖航水槽及旋轉臂設備來執行進一步的測試。

◎近似之技巧

在潛艇初步設計階段都希望能估計其操縱性能，一般可藉由計算流體方式(CFD)或實驗求得，但必須先決定其尺寸之大小(例如屬具)，來得到所需要的直線穩定性的標準，此時若有一簡單的近似方法來做綫性係數之預估是有其必要性。

但因為此種近似方式並非很準確，因此使用上要小心，最好有 CFD 或實驗做確認。對於非綫性係數之預估，則不能做太大的期待。

一般潛艇不像表面船隻，有許多公開之數據可參考。而要決定其相

關係數一般是先決定裸船部分，然後再加入屬具之影響，包括帆罩。雖然初步之評估不需要考慮船體與屬具之交互影響，但最後設計仍必須考慮。

通常，由船體貢獻在操縱係數的影響相當低，反而來自帆罩與流體控制翼板在操縱係數的影響要大的很多。

◎船體部份

對一純軸對稱體，橫移與橫擺，可以視為起伏與縱搖，其相關係數是可相同的，如 $Y'_v = Z'_w$, $Y'_r = Z'_q$.. 等，但 N'_v 與 M'_w 跟 $N'_\dot{v}$ 與 $M'_\dot{w}$ 之符號相反，即 $N'_v = -M'_w$, $N'_\dot{v} = -M'_\dot{w}$ (根據右手定則，xy 平面順時針為正，zx 平面逆時針為正)

對軸對體所有在水平或垂直面上之橫搖力矩及運動之所有偶合項皆為零，有些線性項也由於對稱之故為零，如

$$Y'_p = Y'_p = Y'_* = Z'_* = Z'_v = M'_* = N'_r = N'_\dot{r} = N'_p = N'_* = 0$$

在理想流體中，此對稱體不會有力產生，但會有一馬克力矩(i. e. Munk moment)。即流力中所謂的 *D'Alembert's paradox*: 當一物體以等平移速度在一無限、無黏性、無旋轉之流體中前進，則沒有流體動力作用於物體上 ($Y'_v = Z'_w = 0$, $Y'_r = Z'_q = 0$ $N'_r = M'_q = 0$)，但會有力矩存在，例如 $N'_v \neq 0$, $M'_w \neq 0$, 即

$$N'_v = -(k_y + k_x)m'$$

$$M'_w = (k_z + k_x)m'$$

以上關係並不適用於黏性流體。

而對於一前後亦對稱之潛體與加速度有關之附加質量 $Y'_v = Z'_w \neq 0$ 與

附加質量慣性矩 $N'_r = M'_q \neq 0$ ；在理想流體中

$$Y'_v = -k_y m', \quad Z'_w = -k_z m', \quad N'_r = -k_z I'_{zz}, \quad M'_q = -k_y I'_{yy}$$

k_x, k_y, k_z 為 x, y, z 方向運動之附加質量係數。 m' 為無因化的質量， I'_{yy}

與 I'_{zz} 為無因化的縱搖與橫擺之質量慣性矩。而其他耦合項

$Y'_r = N'_v = Z'_q = M'_w = 0$ 。這些與流體加速度有關之項亦適用於黏性流

體。

一般利用具相同長度及直徑橢圓體來預估這些值是足夠準確使用

的，下式可用來得到相當於橢圓體之直徑公式(假設潛艇之質量與橢

圓體之質量相同)

$$\bar{d} = \left(\frac{6\Delta}{\pi \rho L} \right)^{0.5}$$

而一橢圓體之 $k_x, k_y, k_z, I'_{yy}, I'_{zz}$ 可由下式近似求得

$$k_x = -0.00047 \left(\frac{L}{\bar{d}} \right)^2 + 0.0134 \left(\frac{L}{\bar{d}} \right) - 0.059$$

$$k_y = k_z = -0.00088 \left(\frac{L}{\bar{d}} \right)^2 + 0.0245 \left(\frac{L}{\bar{d}} \right) + 0.805$$

$$I_{yy} = I_{zz} = \frac{\pi\rho}{30}L\bar{d}^4\left(\left(\frac{L}{\bar{d}}\right)^2 + 1\right)$$

質量與質量慣性矩之無因次化分別為

$$m' = \frac{\Delta}{\frac{1}{2}\rho L^3}$$

$$I'_{yy} = \frac{I_{yy}}{\frac{1}{2}\rho L^5}$$

因為潛艇是在實際流體中航行，故 $Z'_w \neq 0$ ， $M'_w \neq 0$ ，可利用下列半經驗公式求得

$$Z'_w = \left[0.5\left(\frac{L}{D}\right) - 11\right] \times 10^{-3}$$

$$M'_w = \left[-\left(\frac{L}{D}\right) + 20\right] \times 10^{-3}$$

$$(Y'_v = Z'_w, N'_v = -M'_w)$$

對於旋轉運動產生之相關係數(Y'_r ， Z'_q ， N'_r 及 M'_q)並無相關公式可用，但因為這些係數貢獻於船體之影響很小，遠不如屬具影響大，

尤其在船艏，因此可省略。這是因為在船體兩端局部區域的橫向速度最大。

◎固定屬具

所謂固定屬具是包括帆罩、艏平面翼板、艉平面翼板、舵及導罩。

由於流體流過這些屬具時，若有一局部之攻角，則會產生力，可以以升力面之概念來看，分成升力與阻力

$$\text{升力} = \frac{1}{2} \rho V^2 S_a \alpha C_{L\alpha}$$

$$\text{阻力} = \frac{1}{2} \rho V^2 S_a \alpha C_{D\alpha}$$

以上為無因次化之升力及阻力係數。

當屬具受到前面船體之影響時，速度 V 必須作修正，即所謂跡流影響。

物體之側向力公式可以下式表示

$$\text{升力} \times \cos \alpha + \text{阻力} \times \sin \alpha$$

而相關之水平運動與垂直運動之屬具流體動力係數可寫為

$$\frac{\partial Y_{app}}{\partial v} = Y_{vapp} = -\frac{1}{2} \rho V S_a (C_{L\alpha} \cos \alpha + C_D \sin \alpha) \quad (3.42)$$

$$\frac{\partial Z_{app}}{\partial w} = Z_{wapp} = -\frac{1}{2} \rho V S_a (C_{L\alpha} \cos \alpha + C_D \sin \alpha) \quad (3.43)$$

(單位速度所具有的力)

其中 Y_{vapp} 是水平運動單位橫移速度(v)之側向力變化率， Z_{wapp} 是垂直運動單位起伏速度(w)之垂向力變化率。 C_D 為零攻角之無因次阻力(長度的平方)，以上公式是假設升力斜率係數 $C_{L\alpha}$ (lift slope) 是在所希望之方向產生升力，即 (3.42) 式是對應於帆罩及舵(固定)之水平側向力，而 (3.43) 式是對應於艏艉之水平翼板(固定)之垂向力。若艏部不是十字型，則升力斜率係數 $C_{L\alpha}$ 之方向需要作調整。

若有導罩，則其力亦要加入。 $(Y'_{vapp} = \frac{Y_{vapp}}{\frac{1}{2}\rho VL^2} , Z'_{wapp} = \frac{Z_{wapp}}{\frac{1}{2}\rho VL^2})$

以上所需屬具之 $C_{L\alpha}$ 與 C_D 對船體之操縱係數影響很顯著(特別是在艤部的屬具)，可由實驗或數值方法(CFD)或經驗公式求得。

由於在前面有船體之影響，而且有半錐角會使它們可能處在減速流中運作之影響。因此通常這些艤部屬具之 $C_{L\alpha}$ 值會受影響，要特別注意，

屬具所產生之力矩係數可由以下式得之

$$\frac{\partial N_{app}}{\partial V} = N_{vapp} = l_{app} \times Y_{vapp} \quad (3.44)$$

$$\frac{\partial M_{app}}{\partial W} = M_{wapp} = -l_{app} \times Z_{wapp} \quad (3.45)$$

其中 l_{app} 為屬具壓力中心之力臂(距原點之水平座標)。以上兩式若要

無因次化，則以長度的三次方處理

屬具引起之相關轉動流體動力係數，可由下式得之

$$Y_{rapp} = l_{app} \times Y_{vapp} \quad (3.46)$$

$$Z_{qapp} = l_{app} \times Z_{wapp} \quad (3.47)$$

$$N_{rapp} = l_{app}^2 \times Y_{vapp} \quad (3.48)$$

$$M_{qapp} = l_{app}^2 \times Z_{wapp} \quad (3.49)$$

r : 橫擺角速度

q : 縱搖角速度+

屬具之附加質量可以將屬具假設為一平板求得，因為屬具之附加質

量對潛體操縱影響不大，因為它是加入屬具原實際質量得到總係數來做相關潛艇操縱特性之預估。

一般平板之附加質量可用下式來預估

$$m_{added} = \pi K_a \rho \frac{a^2}{4} b \quad (3.50)$$

a : 平板之弦長

b : 平板之展寬

K_a 為係數，與展弦比有關，如表 3.2 所示。

表 3.2

b/a	K_a
1.0	0.478
1.5	0.680
2.0	0.840
2.5	0.953
3.0	1.000
3.5	1.000
4.0	1.000

當平板加入地板效應(Ground-board effect)時，其有效展弦比變為原來幾何展弦比之兩倍，因此對於原幾何展弦比(b/a)為 1.5 以上之

舵與翼板之附加質量的公式為

$$m_{added} = \pi\rho \frac{a^2}{4} b \quad (3.51)$$

(i. e. $K_a=1$) (因為 b/a 變成 3 以上)

當然若有其他較適合之預估方法亦可使用。

因此屬具之線性橫移與起伏之附加質量的無因次化係數為

$$Y'_{vapp} = -\frac{m_{added}}{\frac{1}{2}\rho L^3} \quad (3.52) \quad (\text{舵，帆罩})$$

$$Z'_{wapp} = -\frac{m_{added}}{\frac{1}{2}\rho L^3} \quad (3.53) \quad (\text{水平控制翼})$$

其他之相關對應之附加質量的流體動力係數如(3.54)式~(3.59)式所

示。

$$N'_{\dot{v}app} = \frac{l_{app} \times Y'_{\dot{v}app}}{L} \quad (3.54)$$

$$M'_{\dot{w}app} = -\frac{l_{app} \times Z'_{\dot{w}app}}{L} \quad (3.55)$$

$$Y'_{\dot{r}app} = \frac{l_{app} \times Y'_{\dot{r}app}}{L} \quad (3.56)$$

$$Z'_{\dot{q}app} = \frac{l_{app} \times Z'_{\dot{q}app}}{L} \quad (3.57)$$

$$N'_{\dot{r}app} = \frac{l_{app}^2 \times Y'_{\dot{r}app}}{L^2} \quad (3.58)$$

$$M'_{\dot{q}app} = \frac{l_{app}^2 \times Z'_{\dot{q}app}}{L^2} \quad (3.59)$$

以上所討論的為固定屬具的狀況(包括帆罩、艏平面翼板、艉平面翼板、舵及導罩)

◎螺槳

在螺槳方面，當一個單獨螺槳(open propeller)與入流有一角度時，會產生一側向力，如同一固定翼板放置在螺槳的縱向位置一樣，對潛體之操作會有影響。但除非有充足正確之數據，否則很難預估一個單獨螺槳對操縱係數之影響。

◎控制面

有關在潛艇操縱運動方程式 (3.8) 式~(3.12) 式之主動式(active)控制面之相關的流體動力可以以(3.60) 式~(3.65) 式來估算(若相對應之升力 $C_{L\delta}$ 已知)。其中下標之” B” 代表艏控制翼，” R” 代表舵，” S” 代表艉控制翼，而相對應之升力 $C_{L\delta}$ 可查相關之升力面之表。若艉部非十字舵則以上係數將不同。

$$Y_{\delta R} = \frac{1}{2} \rho V_R^2 A_{plane_{rudder}} C_{L\delta R} \quad (3.60)$$

$$N_{\delta R} = \frac{1}{2} \rho V_R^2 A_{plane_{rudder}} x_{rudder} C_{L\delta R} \quad (3.61)$$

$$Z_{\delta B} = \frac{1}{2} \rho V_B^2 A_{plane_{bow}} C_{L\delta B} \quad (3.62)$$

$$M_{\delta B} = \frac{1}{2} \rho V_B^2 A_{plane_{bow}} x_{bow} C_{L\delta B} \quad (3.63)$$

$$Z_{\delta S} = \frac{1}{2} \rho V_S^2 A_{plane_{stern}} C_{L\delta S} \quad (3.64)$$

$$M_{\delta S} = \frac{1}{2} \rho V_S^2 A_{plane_{stern}} x_{stern} C_{L\delta S} \quad (3.65)$$

V_R 、 V_B 與 V_s 分別為舵、艏控制翼及艉控制翼之局部區域速度，一般而言，艏控制翼之局部區域速度(V_B) 非常接近潛艇速度，而其餘兩者則會受船體與推進器影響。

*潛艇水平平面之操縱

*迴旋

*迴旋第一階段(first phase)

當艉部開始打舵，產生一側向力與力矩會產生橫移、橫搖與橫擺之加速度，在此迴旋階段，此三項運動之速度很小可省略，傾斜角也一樣。由於作用在舵上之額外阻力所產生的減加速亦很小，也可省略，因此 第一階段之方程式可近似為 (3.66)式~(3.68) 式

橫移(Sway):

$$\begin{aligned} m[\dot{v} + x_G \dot{r} - z_G \dot{p}] &\approx \frac{1}{2} \rho L^4 [Y'_r \dot{r} + Y'_p \dot{p}] + \frac{1}{2} \rho L^3 [Y'_v \dot{v}] \\ &+ \frac{1}{2} \rho L^2 [Y'_* u^2 + Y'_{\delta R} u^2 \delta_R] \end{aligned} \quad (3.66)$$

橫搖(Roll):

$$\begin{aligned} I_{xx} \dot{p} - \dot{r} I_{zx} - m[z_G \dot{v}] &\approx \frac{1}{2} \rho L^5 [K'_p \dot{p} + K'_r \dot{r}] \\ &+ \frac{1}{2} \rho L^4 [K'_v \dot{v}] + \frac{1}{2} \rho L^3 [K'_* u^2 + K'_{\delta R} u^2 \delta_R] \end{aligned} \quad (3.67)$$

橫擺(Yaw):

$$I_{zz}\dot{r} - \dot{p}I_{zx} + m[x_G\dot{v}] \approx \frac{1}{2}\rho L^5 \left[N'_r\dot{r} + N'_p\dot{p} \right] + \frac{1}{2}\rho L^4 [N'_v\dot{v}] + \frac{1}{2}\rho L^3 \left[N'_*u^2 + N'_{\delta R}u^2\delta_R \right] \quad (3.68)$$

*迴旋第二階段(second phase)

當加速一段時間後，橫移、橫搖及平擺之速度就產生了，此時

(3.66) 式~(3.68)式不再適用，此速度將產生流體動力，並導致加速度隨時間減少，其所適用之方程式可參考(3.1) 式~(3.12) 式(通式)

*迴旋第三階段(third phase)

當加速度減為零時($\dot{u} = \dot{v} = \dot{r} = \dot{p} = \dot{\phi} = 0$)，潛艇將作一穩態之之水平平面迴旋，其方程式如 (3.69) 式~(3.72) 式

Surge

$$-m[vr + x_G r^2] = \frac{1}{2}\rho L^4 [X'_{rr}r^2] + \frac{1}{2}\rho L^3 [X'_{uu} + X'_{vr}vr] + \frac{1}{2}\rho L^2 [X'_{vv}v^2 + X'_{\delta R\delta R}u^2\delta_R^2] + \frac{1}{2}\rho L^2 [a_i u^2 + b_i u u_c + c_i u_c^2] + \frac{1}{2}\rho L^2 [X'_{vv\eta}v^2 + X'_{\delta R\delta R\eta}\delta_R^2 u^2] (\eta - 1) \quad (3.69)$$

Sway

$$\begin{aligned}
m[ur - y_G r^2] &= \frac{1}{2} \rho L^3 \left[Y'_r ur + Y'_{|r|\delta R} u |r| \delta_R + Y'_{v|r|} \frac{v}{|v|} |v| |r| \right] \\
&+ \frac{1}{2} \rho L^2 \left[Y'_* u^2 + Y'_v uv + Y'_{v|v|} v |v| + Y'_{\delta R} u^2 \delta_R \right] \\
&+ (W - B) \sin \phi \\
&+ \frac{1}{2} \rho L^3 [Y'_{r\eta} ur] (\eta - 1) \\
&+ \frac{1}{2} \rho L^2 \left[Y'_{v\eta} uv + Y'_{v|v|\eta} v |v| + Y'_{\delta R\eta} u^2 \delta_R \right] (\eta - 1)
\end{aligned} \tag{3.70}$$

Roll

$$\begin{aligned}
r^2 I_{yz} - m[z_G ur] &= \frac{1}{2} \rho L^4 [K'_r ur] \\
&+ \frac{1}{2} \rho L^3 \left[K'_* u^2 + K'_v uv + K'_{v|v|} v |v| + K'_{\delta R} u^2 \delta_R \right] \\
&+ (y_G W - y_B B) \cos \phi - (z_G W - z_B B) \sin \phi \\
&+ \frac{1}{2} \rho L^3 K'_{*\eta} u^2 (\eta - 1)
\end{aligned} \tag{3.71}$$

Yaw

$$\begin{aligned}
m[x_G ur + y_G vr] &= \frac{1}{2} \rho L^5 [N'_{r|r|} r |r|] \\
&+ \frac{1}{2} \rho L^4 [N'_r ur + N'_{|r|\delta R} u |r| \delta_R + N'_{v|r|} v |r|] \\
&+ \frac{1}{2} \left[\rho L^3 N'_* u^2 + N'_v uv + N'_{v|v|} v |v| + N'_{\delta R} u^2 \delta_R \right] \\
&+ (x_G W - x_B B) \sin \phi \\
&+ \frac{1}{2} \rho L^4 N'_{r\eta} ur (\eta - 1) \\
&+ \frac{1}{2} \rho L^3 \left[N'_{v\eta} uv + N'_{v|v|\eta} v |v| + N'_{\delta R\eta} u^2 \delta_R \right] (\eta - 1)
\end{aligned} \tag{3.72}$$

在此要注意，由於舵及控制翼之阻力以及船體因橫移及橫擺速度產

生額外之阻力，會使前進速度減低

因此推進器在此速度下，不是在自航點上操作。當在此低前進速度

時，在推進器上之額外轉矩將造成轉速降低，但此會依帶動主機的

型式(電動馬達，柴油引擎或蒸汽渦輪機)而異。

假設由迴旋引起的起伏與縱搖力矩被控制翼平衡掉，則 (3.69) 式

~(3.72) 式可用來求解一穩態迴旋之值。

若將其減化為綫性運動，即假設小舵角，前進速度固定，省略橫搖

且

$W = B, x_G = x_B, y_G = 0$, 只考慮橫移及橫擺，則橫移及橫擺之方程式可

寫為(3.73) 式~(3.74) 式

$$0 = \frac{1}{2}\rho L^3 [Y'_r - m']ur + \frac{1}{2}\rho L^2 [Y'_{\nu}uv + Y'_{\delta R}u^2\delta_R] \quad (3.73)$$

$$0 = \frac{1}{2}\rho L^4 [N'_r - m'x'_G]ur + \frac{1}{2}\rho L^3 [N'_{\nu}uv + N'_{\delta R}u^2\delta_R] \quad (3.74)$$

m 與 x_G 之無因次化為

$$m' = \frac{m}{\frac{1}{2}\rho L^3} \quad (3.75)$$

$$x'_G = \frac{x_G}{L} \quad (3.76)$$

求解(3.73) 式與(3.74) 式可得下列 (3.77) 式所示之迴旋半徑 R

之值($R=V/r$)

$$\frac{R}{L} = \frac{1}{\delta_R} \left[\frac{N'_{\nu}(Y'_r - m') - (N'_r - m'x'_G)Y'_{\nu}}{N'_{\delta}Y'_{\nu} - N'_{\nu}Y'_{\delta}} \right] \quad (3.77)$$

(3.77) 式只適用於小舵角狀況，其中省掉了平面運動(橫移及平擺)

及垂直運動(起伏與縱搖)之耦合效應

※潛艇在水平平面之穩度

潛艇水平平面之穩度指標, G_H , 可由下式來表示

$$G_H = 1 + \frac{N'_v(m' - Y'_r)}{N'_r Y'_v} \quad (3.78)$$

對操縱性能而言，越高越佳，通常為一小的正值。

※樞紐點(pivot point)

當潛艇作一水平迴旋時，船體本身會有橫移速度，而其中會有一點之橫移速度為零，此點稱為樞紐點(如圖 3.16，潛艇打一左舵，則潛艇之局部橫移速度由在船艏指向左舷，然後往船艉漸漸變成指向右舷，其中沿船身有一點之橫移速度為零)

在艉之橫移速度之值是大的，因此在潛艇作迴旋時，它會影響艉部屬具及螺槳之性能。

Fig. 3.16 Local transverse flow vectors in a steady turn to port

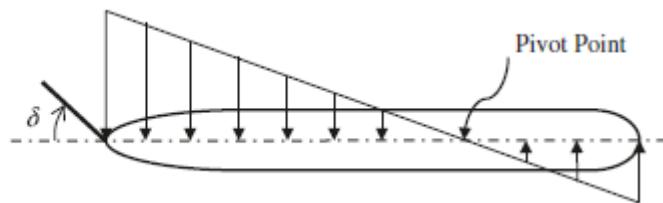


圖 3.16

※有效舵角

舵的有效攻角可能遠小於實際的幾何舵角，因此由舵產生之橫擺力矩將小於綫性理論值，如圖 3.17 所示。

Fig. 3.17 Flow vectors at stern of submarine turning to port

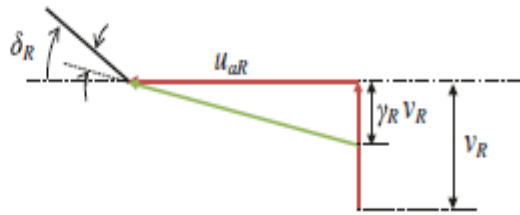


圖 3.17

在此圖中， δ_R 為幾何舵角，在舵的軸向速度為 u_{aR} 。這個與考慮跡流的前進速度相似，然而它是以舵的展寬(span)來平均，而不是螺槳半徑。一般在舵的局部橫移速度是 V_R ，但由於艇身之流體直線化的效應， γ_R ，使實際橫移的速度(V_R)變小為 $\gamma_R V_R$ 。

因為潛艇舵的大部分幾乎都不太受到船殼影響時，故 γ_R 非常接近 1。這與表面船隻不同。因此潛艇之實際舵角 δ_R 與有效舵角 $\delta_{R_{eff}}$ 之差值(i. e. $\tan^{-1}(\frac{\gamma_R V_R}{u_{aR}})$)將比表面船隻來得大。

有效舵角之計算公式如(3.79) 式

$$\delta_{R_{eff}} = \delta_R - \tan^{-1}\left(\frac{\gamma_R V_R}{u_{aR}}\right) \quad (3.79)$$

有效速度 V_{Reff} 為 (3.80) 式

$$V_{Reff} = \sqrt{u_{aR}^2 + (\gamma_R V_R)^2} \quad (3.80)$$

舵產生之升力與阻力與有效舵角之關係，可以如圖 3.18 所示

由舵的有效攻角可得到升力與阻力，進而求出橫移力、縱移力與橫擺力矩。

以上相同之概念，可適用於潛艇作垂向運動的水平控制翼板。

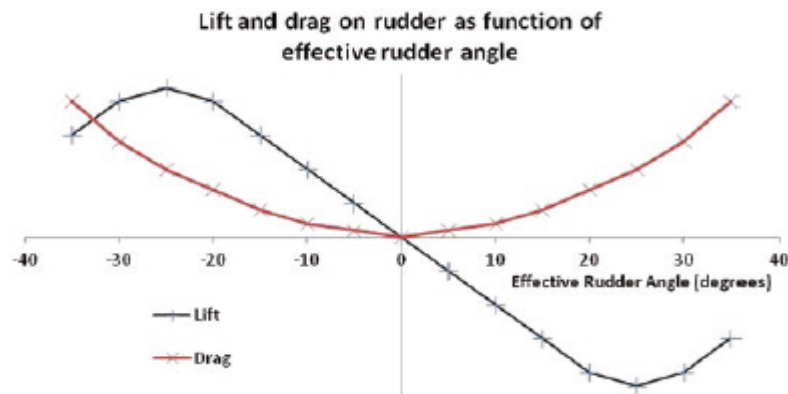


Fig. 3.18 Lift and drag on rudder as functions of δR_{eff}

圖 3.18 舵產生之升力與阻力與有效舵角之關係

※迴旋時的傾斜

當潛艇作一迴旋時，其艇身與帆罩將因局部橫移速度而受到側向力

(如圖 3.19，i.e. 潛艇在作左迴旋第一階段時，沿艇身之力)，進

而受到一橫搖力矩(如圖 3.20，i.e. 潛艇在作左迴旋第一階段時，

力的垂向位置)。尤其在帆罩部分，會有一急速橫搖(snap roll)造

成一很大的橫搖角。因此帆罩之位置相當重要。若帆罩位置靠近樞

紐點，因橫移速度很小，則橫向力會相當小，若位於樞紐點之後(即

往船後)，則橫向力可能會變的相當大，引起之橫搖角則相對大。另

外帆罩本身在迴旋時，因攻角的關係也會產生側向力，而影響傾斜的大小。

Fig. 3.19 Forces along the length of the submarine in the first phase of a turn to port

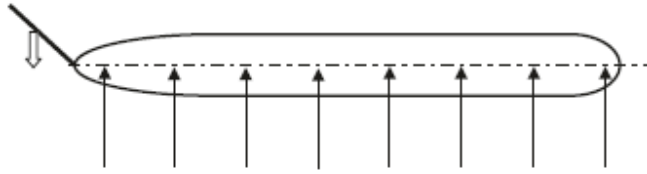


Fig. 3.20 Vertical location of forces in the first phase of a turn to port

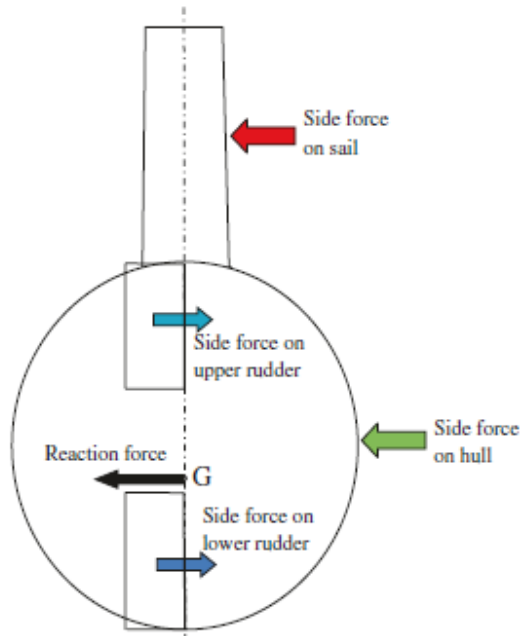


圖 3.19 & 圖 3.20 艇身與帆罩因橫移速度而受到側向力及橫搖力矩

※迴旋時帆罩之影響

帆罩與船身在作迴旋時，會產生渦旋。由帆罩產生一強的尖端渦旋 (tip-vortex)，而在船身上的帆罩的影射體(image)則會產生一相反之環流(opposing circulation)，這將會影響改變船身頂部及底部所放出之渦流，而形成垂直平面上的力與力矩，通常是在艏形成一

向下之力(i. e. 式(3.9)與(3.11)中之 $Z'_{vv}, Z'_{rr}, M'_{vv}, M'_{rr}$ ，即橫移速度平方與橫擺速度平方引起之起伏與縱搖非線性項)。主要原因是帆罩對船身的渦旋產生了影響，因此帆罩渦流所造成的力，對船身的影響，大於對帆罩本身自己的影響。

帆罩的出現，對於艇身壓力分佈之影響，可以由圖 3.22 來看。圖 3.22(a)無漂移角及無帆罩時，則艇身頂部與底端之壓力相等，因此 $Z'_*=0, M'_*=0$ 。圖 3.22(b) 無漂移角有帆罩時，艇身頂部與底端之壓力仍大致相等，僅帆罩附近有壓力變化，這變化在潛艇以 $v=r=0$ 前進時將造成潛艇穩態運動的起伏力與縱搖力矩(Z'_*, M'_*)不為零。當漂移角出現時(如圖 3.22(c)(d) 16°)，壓力將因漂移角而減低，因為艇身頂部與底端之橫向流速度均增加。此時若無帆罩時艇身頂部與底端之壓力差仍為零故無起伏力與縱搖力矩 $Z'_{vv}, Z'_{rr}, M'_{vv}, M'_{rr}$ 亦為零(如圖 3.22(c))。當有帆罩時則在帆罩之後的艇身頂部與底端之壓力差相當明顯而造成 $Z'_{vv}, Z'_{rr}, M'_{vv}, M'_{rr}$ 不為零，而此時帆罩後端的艇身頂部的負壓會小於艇身底端之負壓而產生一向下之力，形成一使艙上翹之俯仰力矩而造成艙仰艙俯的現象，因此在此情形之這些係數均為正值。此現象使得潛艇在做水平迴旋時，會造成艙仰艙俯之現象，稱為“stern dipping”，此為帆罩造成的現象，但對於一軸對體則不會有此現象。因此在作艙屬具與任何控制邏輯時必須考

慮此現象，讓潛艇可維持水平航行。

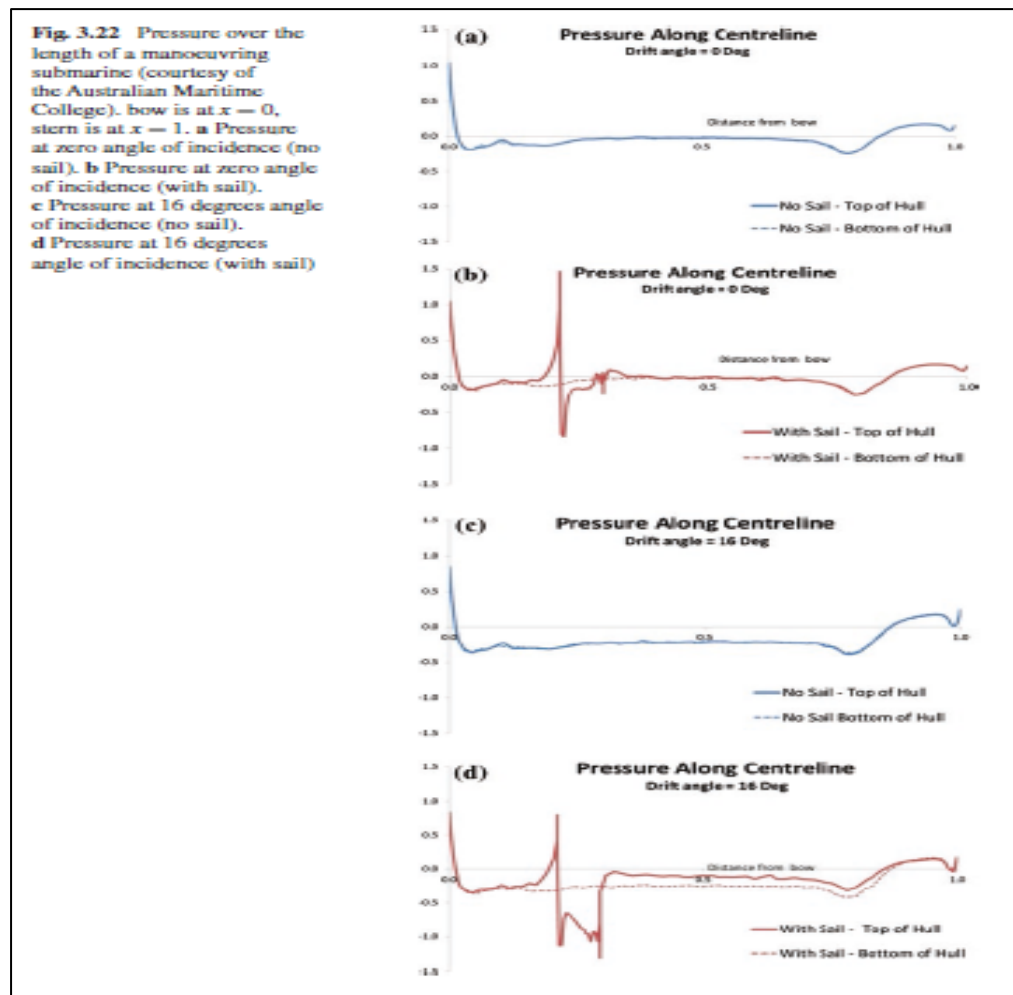


圖 3.22 一操縱中之潛艇船身的壓力分佈(船艏為 $x=0$ ，船艉為 $x=1$)

※側向阻力中心

一橫向力作用在此點，船體僅會橫移不會旋轉，亦即只有橫移速度 ($v \neq 0$) 而無橫擺速度 ($r=0$)。對一前進之潛艇，其側向阻力中心通常約在艏後 $1/3$ 船長處。一般而言，此中心位置不變，但當前進速度為 0 時，則靠近舭，當漂移角很小時（線性範圍），其求法如

(3.81) 式

$$x_{CLR} = \frac{N'_v}{Y'_v} L \quad (3.81)$$

因此為了讓潛艇作迴旋，其作用之側向力，離 CLR 越遠越好，因為 CLR 在舢前方，因此側向力越向後越佳，這也說明為何舵是放在艉。

※在垂直平面上之操縱

※垂直平面上之穩度

垂直平面上之穩度指標， G_v ，可以由(3.82)式來求得

$$G_v = 1 - \frac{M'_w(m' + Z'_q)}{M'_q Z'_w} \quad (3.82)$$

在垂直平面上，小自由度的可操作性及高程度之穩度是我們所期望的。這是由於大深度改變的危險性，常會在潛望鏡深度造成突轉現象（broaching）或在深潛時發生觸礁或超過潛航深度。尤其在高速時。因此 G_v 通常是一大的正值。

※有效的水動力平面翼板角度

當潛艇利用艉控制平面翼板來作縱搖操控時，則會產生起伏與縱搖之混合運動，而會產生局部的垂向流向量，如圖 3.24 所示。

另外潛艇在某些操作理由上，希望只有起伏而沒有縱搖，例如潛望

鏡深度之操作。如圖 3.25 所示

Fig. 3.24 Local vertical flow vectors in a steady pitch to dive



Fig. 3.25 Local vertical flow vectors in a steady heave, with no pitch



圖 3.24（起伏與縱搖之混合運動）& 圖 3.25（純起伏運動）

與舵同樣地作用，水流流過艏艉水平翼板之有效角度與翼板之角度

不同，可由下列公式計算（(3.83) 式與(3.84) 式）

$$\delta_{B_{eff}} = \delta_B - \tan \frac{\gamma_B w_B}{u_{aB}} \quad (3.83)$$

$$\delta_{S_{eff}} = \delta_S - \tan \frac{\gamma_S w_S}{u_{aS}} \quad (3.84)$$

γ_B 與 γ_S 為艇身之流體直線化影響係數一般接近 1，特別是中間或帆
單翼板的 γ_B

而艏艉水平翼板之有效速度分別

$$V_{B_{eff}} = \sqrt{u_{aB}^2 + (\gamma_B w_B)^2} \quad (3.85)$$

$$V_{S_{eff}} = \sqrt{u_{aS}^2 + (\gamma_S w_S)^2} \quad (3.86)$$

※中性點(Neutral point)

一垂直力作用於此點時，潛艇僅會作深度之改變，而不會作縱搖角之改變。此點大約在潛艇艏後方三分之一船長處，如圖 3.26 所示。

(類似側向阻力中心)

Fig. 3.26 Approximate position of Neutral Point for submarine with high forward velocity

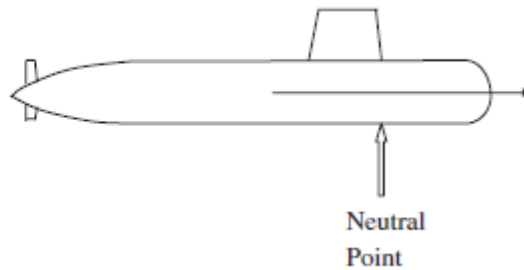


圖 3.26

在小縱搖角時（線性範圍），其公式如（3.87）式

$$x_{NP} = -\frac{M'_w}{Z'_w}L \quad (3.87)$$

對一個軸對稱體而言，側向阻力中心與中性點為同一點，當潛艇低速前進時，其起伏速度相對於縱移速度不算小，此時將會有一大的縱搖角(即大攻角)，如圖 3.27 所示

Fig. 3.27 Submarine with heave velocity and low forward velocity

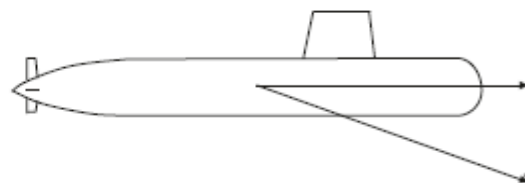


圖 3.27

則此時起伏力與縱搖力矩將由非線性影響主導。在此情況下，中性點將向後往舯移，其公式如（3.88）式

$$x_{NP} = - \left(\frac{M'_w u w + M'_{w|w|} w |w| + M'_{|w|} u |w| + M'_{ww} w^2}{Z'_w u w + Z'_{w|w|} w |w| + Z'_{|w|} u |w| + Z'_{ww} w^2} \right) L \quad (3.88)$$

在正常之前進運動下，(3.87)式可以使用，當縱移速度小且起伏速度大時，則(3.88)式適用。若潛艇在潛望鏡深度低速航行時，即屬於此情況，因為可能由於表面吸力的損失或水密度變化之影響，使得起伏速度很明顯。

※臨界點(critical point)

在臨界點施予一垂向力時，潛艇只會有縱搖角之變化，而不會有深度變化。因此當一垂直力作用在此點時，有一俯仰力矩等於此垂向力大小乘以臨界點與中性點之距離，如圖 3.28 所示。此垂向力將使潛艇產生俯仰，此俯仰將產生一垂向流體動力在船身，而引起一俯仰力矩及靜水力力矩 ($mgBG \sin \phi$, i. e. 浮心移動造成 GB 傾斜)，如圖 3.29 所示。

Fig. 3.28 Upward force at Critical Point

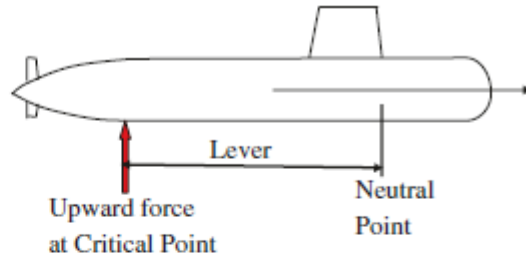


Fig. 3.29 Forces on a submarine due to upward force at Critical Point

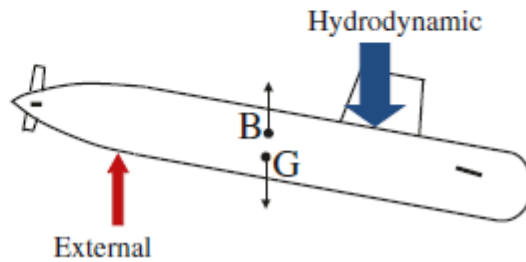


圖 3.28 & 圖 3.29

由定義來看，若一垂向力作用於臨界點，則此力將被一垂向流體動力平衡掉，而潛艇不會改變深度。上述產生之流體動力力矩與速度平方成正比，而靜水力力矩與速度無關。臨界點之位置 x_{CP} 可由 (3.89) 式得之

$$x_{CP} = \frac{2mgBG}{\rho L^2 Z'_w u^2} - L \frac{M'_w}{Z'_w} \quad (3.89)$$

低速時，臨界點可能變得相當往後，可能甚至在艉水平翼板之後。

※中性點與臨界點對潛艇垂直平面上操縱之影響

此影響與潛艇前進速度有關：

(a) 潛艇中速前進時

潛艇中速前進時，中性點約在艏後 $1/3$ 船長處，而臨界點將在它稍為後面一些，如圖 3.30 所示。在此情況，當一向上力作用於艏部水平控制翼板時，由於作用向上力位置與中性點位置的力臂關係，潛艇將形成艏俯。因為此作用力在臨界點之後，此俯仰角將產生一向下之流體動力在船身，此力大於在中性點之向上力，而造成潛艇往下沉，如圖 3.31 所示。這是潛艇中速前進時要改變深度之正常方法，不需要用到艏部水平控制翼板。

Fig. 3.30 Positions of neutral point and critical point for a submarine at moderate speed

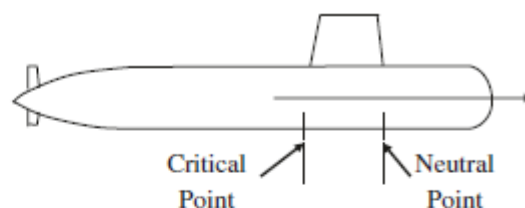


Fig. 3.31 Submarine diving when upward force at stern hydroplane is aft of Critical Point

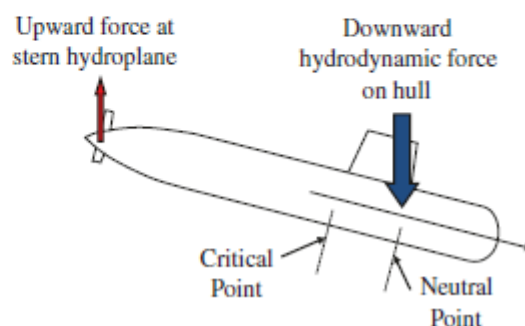


圖 3.30 &圖 3.31

(b) 潛艇低速前進時

此時潛艇之臨界點在相當後面。當臨界點與艏部水平翼板重合時(如圖 3.32)，一個作用於翼板向上之力將使潛艇產生艏

俯，跟中速前進相同。

Fig. 3.32 Positions of Neutral Point and Critical Point for a submarine at low speed

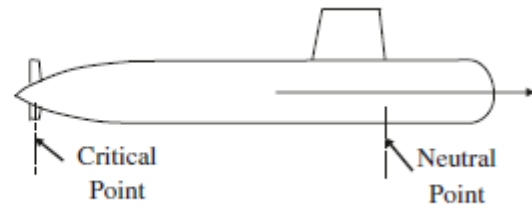


圖 3.32

然而，因向上力作用在臨界點，使得作用在船身之向下流體動力與此向上力相等，因而僅產生一俯仰力矩，但不改變其深度，如圖 3.33 所示。

Fig. 3.33 Submarine attempting to dive using stern hydroplanes only when upward force at stern hydroplane is at the Critical Point—submarine will remain at constant depth!

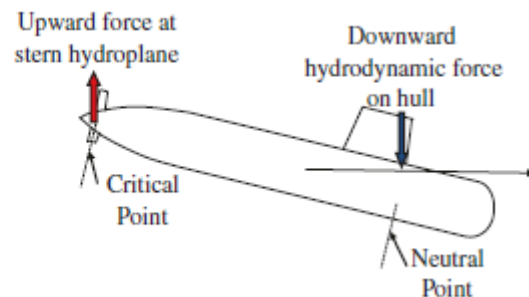


圖 3.33

因此在低速若要改變深度，則要作動船艏之水平翼板，若艏水平翼板在中性點上，則無法改變俯仰角，僅會下潛。換句話說若艏翼板在中性點之前，則亦可同時也用來增加俯仰角，進而增加向下流體動力，增加下潛速率。

(c) 潛艇在非常低速前進時

此時，潛艇之臨界點在船艏水平翼板之後，如圖 3.34。

Fig. 3.34 Positions of Neutral Point and Critical Point for a submarine at very low speed

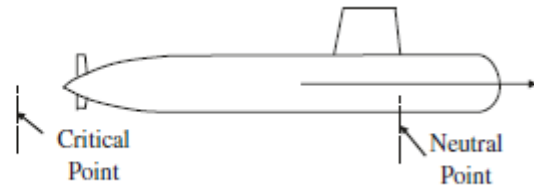


圖 3.34

若一升力作用於艏水平翼板(在臨界點之前)，則作用於船體之向下流體動力將小於此升力，而使潛艇上升如圖 3.35。

Fig. 3.35 Submarine attempting to dive using stern hydroplanes only when upward force at stern hydroplane is forward of the Critical Point—submarine will rise!

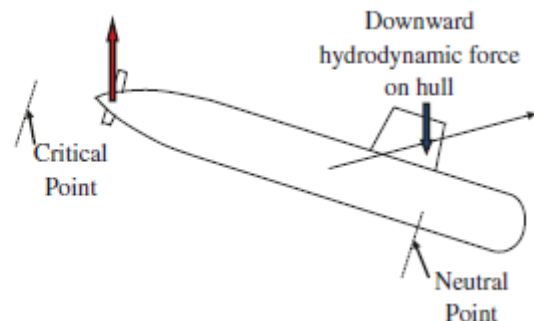


圖 3.35

因此為了使潛艇下潛，必須在艏、艏水平翼板施予向下之力。

這種在艏水平翼板相反操作的影響，是與直覺相反的，時常會使人在這種極端慢速下操作潛艇時，引起令人倉皇失措的感覺。

此外要注意的是，在此非常低速下，中性點可能會向後移(取

決於起伏速度與前進速度相比較之大小)，而此將會增加艏水平控制翼板與中性點之距離而增加艏水平翼板控制改變俯仰角之能力。因此艏水平控制翼板在潛艇低速航行時，非常重要。因此潛艇若設計在低速航行時，必須要有能產生夠大力的艏水平控制翼。

※靠近水面之操縱

※水面吸力

當潛艇接近水面航行時，會有一向上力，即為水面吸力，此對潛艇在潛望鏡深度航行時，會有顯著之影響，在做運動模擬時需考慮，因有安全之疑慮。水面吸力不僅發生在平靜水面，在有風浪時可能更大。當潛艇遇到水面吸力時，它可能需要一額外的壓載，來避免出水時的突轉(broaching)。這要非常小心處理，就如同潛艇在由水面離開做下潛時，水面吸力將明顯減少，而變成較重的狀態，再加上壓縮率的關係，可能造成一個無法控制的下潛，尤其在低速水平控制翼板效率很差的時候。因此控制面之大小，可能要能符合波浪中潛艇在潛望鏡深度時，需要能控制深度的要求。

(a)靜水中之水面吸力

在靜水中，水面吸力是由於在潛艇上方之體積比下方小，造成較高

之流速，因此具有較低之壓力，如圖 3.36 所示。此現象與表面船隻通過岸邊或淺水域相似。

Fig. 3.36 Schematic of streamlines around a submarine travelling close to the surface

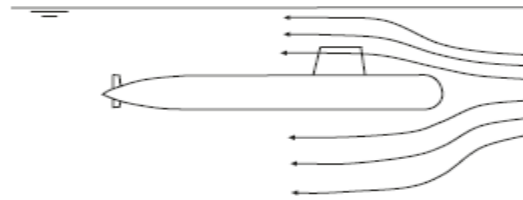


圖 3.36

此水面吸力可以藉力與力矩之方式顯示於潛艇的運動方程式中，例如在 (3.9)式~(3.12) 式中將 Z'_* 以 H^* 之函數來表示，以 H^* 代表距水面距離的無因次化。

$$H^* = \frac{H}{D} \quad (3.90)$$

H 是水面距潛艇中心綫之距離， D 是潛艇之直徑，如圖 3.37 所示

Fig. 3.37 Definition of H and D



圖 3.37

但當潛艇靠近自由液面時，會引起表面波，因此自由液面變成不是平坦的，因此所產生之表面波，使得此水面吸力變得複雜，此與福祿數 Fr 有關，即 $Z'_*(H^*, Fr)$ ，同時也會產生一縱搖力矩 $M'_*(H^*, Fr)$ 。而且亦會產生興波阻力。

圖 3.39 為一有帆罩無屬具之 Suboff 潛艇模型所受水面吸力與福祿

數的關係圖 ($H^*=1.5$)，可以看到在低速時，吸力是負的，亦即是向上。而速度增加時，吸力變成正的，亦即是向下的。這是由於不同之速度產生了不同之波形的緣故。

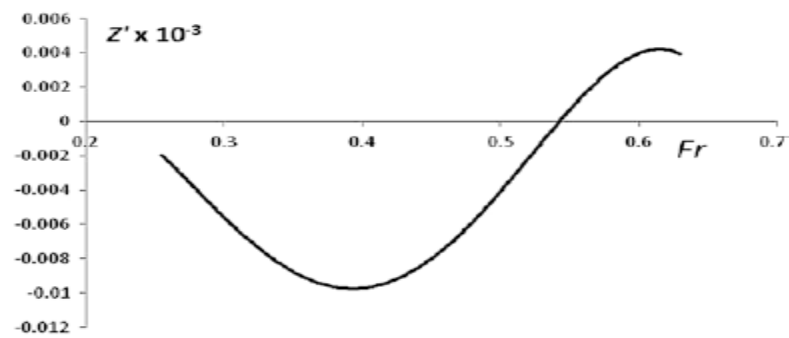


Fig. 3.39 Surface suction as a function of Froude number Suboff geometry with sail only; $H^* = 1.5$ (taken from computational results presented in Griffin 2002)

圖 3.39

圖 3.40 為沒有帆罩之 Suboff 潛艇模型水面吸力產生的起伏力與縱搖力矩對速度(Froude Number)之關係。

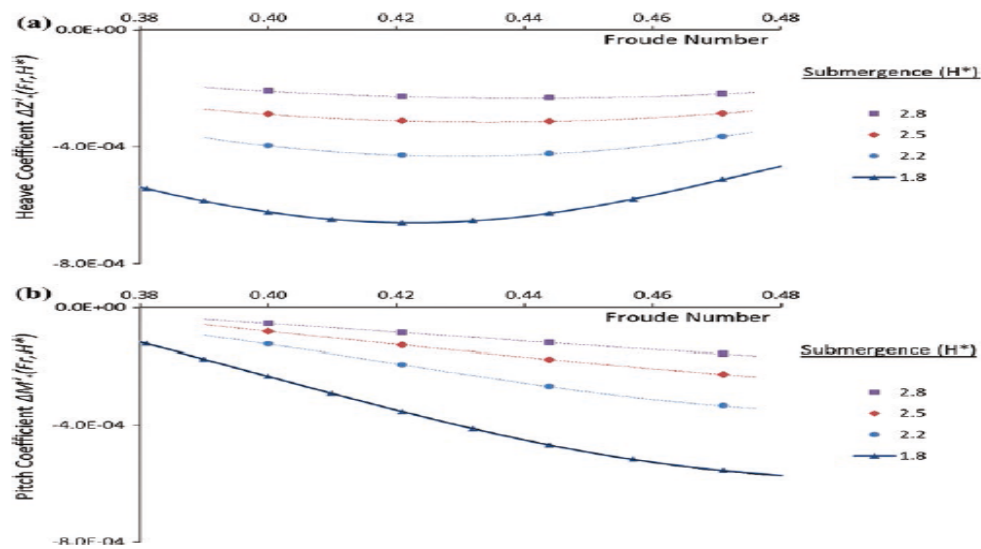


Fig. 3.40 Heave force and pitch moment coefficients as functions of Froude number Suboff geometry with no sail (taken from computational results presented in Renilson et al. 2014). a Heave force coefficient. b Pitch moment coefficient

圖 3.40

而其相對應之壓力中心與速度之關係，則表示於圖 3.41。

Fig. 3.41 Longitudinal position of centre of pressure as functions of Froude number Suboff geometry with no sail (taken from computational results presented in Renilson et al. 2014)

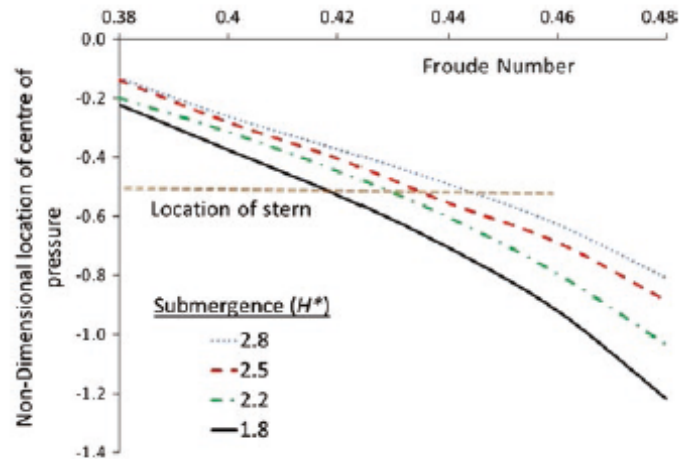


圖 3.41

由圖可見在壓力中心皆在舢之後，甚至可能位於艉之後。因此需要用水平翼板來平衡船體，如圖 3.42 所示。此無法靠額外的壓載來平衡。

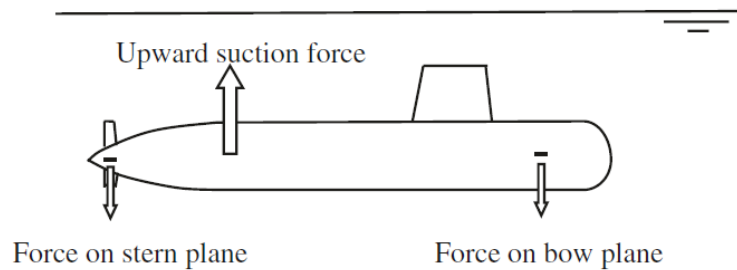


圖 3.42

(b)在風浪中之水面吸力

當潛艇靠近一具有風浪之水面時，其承受之力與力矩為一與波浪同步率之簡諧運動，同時也承受波浪產生的低頻二階的水面吸力影響。此低頻二階力與船速、水深、海況以及波向有關。有資料顯示一 10000 噸之潛艇在 50m 深度處，由於波浪產生之水面吸力，需要

約 20~30 噸之補償水來阻止潛艇衝出水面。一階的力是波高的函數，而二階力則為波高的平方的函數。

二階起伏力與波向有很大之關係，在迎波及逐波狀況力較大，而在橫向波則減小很多，甚至變成正值，即變成向下力。

在潛望鏡深度有波浪影響時，控制翼板之大小與壓載系統之設計必須同時考慮來控制潛深的需求。

※垂直平面上之操縱

當潛艇潛得很深時，作用在它上面的力與力矩的大小會與其運動(速度與加速度)、螺槳轉速 rpm 以及屬具角度有關係，而此時流體動力與力矩與潛艇深度及俯仰角無關。然而當潛艇靠近水面時，則就有關係了。特別要注意的是俯仰角與縱搖角 θ 不同，因為俯仰角是潛艇縱向中心線相對於水平面來測量的角度，而不是相對於潛艇行進的方向。而縱搖角是以潛艇縱向中心線為基準之相對的旋轉角。當潛艇平行水平面前進時，兩者相同。

因此當水面出現時，流體動力與力矩會受影響，在垂直力有關之方程式(3.9)與(3.11)式中，必須加入額外的項，如表 3.7 所示。然而，雖然原則上當潛艇在靠近水面操航時，所有的流體動力應該是潛深、俯仰角以及速度的函數，但根據文獻(Brogia et al. 2007,

Polis et al. 2013)實際上不需要去考慮，因為事實上，此影響變化並不大，可省略。

表 3.7

Table 3.7 Additional coefficients required to represent the effect of the free surface on the hydrodynamic heave force and pitch moment			
Effect	Coefficient	Equation	Comments
Heave force as a function of distance from free surface	$Z'_*(H^*, \tau, F_r)$	3.9	This coefficient already exists in Eq. 3.9 due to asymmetry, however when operating close to the surface it will be a function of H^* , τ , and F_r as discussed in sub Sect. 3.8.1
Pitch moment as a function of distance from free surface	$M'_*(H^*, \tau, F_r)$	3.11	This coefficient already exists in Eq. 3.11 due to asymmetry, however when operating close to the surface it will be a function of H^* , τ , and F_r as discussed in sub Sect. 3.8.1
Heave force as a function of trim angle	$Z'_t(H^*, \tau, F_r)$	3.9	This is a new coefficient. When operating deeply submerged, trim angle does not influence the hydrodynamic force, however, when close to the surface this effect needs to be taken into account
Pitch moment as a function of trim angle	$M'_t(H^*, \tau, F_r)$	3.11	This is a new coefficient. When operating deeply submerged, trim angle does not influence the hydrodynamic moment, however, when close to the surface this effect needs to be taken into account

※在水平面上之操縱

如同垂直平面一樣，水平平面之流體動力(橫移力、橫搖力矩與橫擺力矩)原則上應與潛深、俯仰角及速度有關，但影響很小故亦可省略。

除了因靠近水面產生之波浪阻力外，其餘在垂直平面所多出之額外

項，在水平平面中並不需考慮。

※操縱基準

表 3.8 為不同操縱基準的推薦範圍。此表在初步設計階段用來決定固定及控制屬具的尺寸是適當的。

表 3.8

Table 3.8 Recommended range of stability and control indices (taken from Ray et al. 2008)		
Parameter	Expression	Acceptable range
Vertical stability index	G_V	0.5–0.8
Horizontal stability index	G_H	0.2–0.4
Stern planes heave effectiveness	$Z'_{\delta S} / [(0.001L)(Z'_w - m')]$	2.5–4.5
Stern planes pitch effectiveness	$M'_{\delta S} / [(0.001L^2)(M'_q - I'_{yy})]$	0.2–0.4
Bow planes heave effectiveness	$Z'_{\delta B} / [(0.001L)(Z'_w - m')]$	0.7–1.7
Bow planes pitch effectiveness	$M'_{\delta B} / [(0.001L^2)(M'_q - I'_{yy})]$	–0.8 to –0.2
Rudder sway effectiveness	$Y'_{\delta R} / [(0.001L)(m' - Y'_v)]$	3.0–5.0
Rudder yaw effectiveness	$N'_{\delta R} / [(0.001L^2)(N'_r - I'_{zz})]$	0.2–0.6

操縱限制

安全的潛艇操航必須對潛艇動力學有清楚的了解，尤其是緊急操縱與極端狀況操航。將操縱限制加在潛艇上，是為了保證它能存活在一個可處理的失能狀況下來操航。安全操作範圍(SOE: Safe Operating Envelopes)的產生是讓船員確保潛艇在發生可處理的失能(credible failure)狀況下，可以挽救回來。

典型的可處理的失能狀況，包括下列：

- (a)永久性的控制翼面卡住，通常發生在最後的指令角度
- (b)在最大指令角度時，控制翼面暫時性的卡住

(c)偏離功能範圍的控制翼面，此狀況控制翼面是因為控制系統失能而跑到失控(hard over)之位置

(d)可安全控制及不可安全控制的溢水(floods)

(e)馬力失效

作為潛艇安全評估的一部分來說，以上各項跟其他 “可處理的失能” 必須被決定，而且發生的概率也要知道。

此外，也需要檢查臨界操作狀況，例如在近水面低速時，儘可能合適地給潛艇操作一些限制

要產生 SOEs，必須要有一正確的操縱數值模式；要能在很短時間可模擬很多的潛艇操縱。而且這個模擬軟體必須是經過正確的驗證與認可

安全操作範圍(SOE: Safe Operating Envelopes)

SOEs 是放置在潛艇之操作上的限制，以保證在一可處理的失能狀態下，仍可恢復到安全狀態。

這些限制可以用操縱限制圖(MLDs) (**Manoeuvring Limitation Diagrams**)或安全操縱範圍(SMEs)(**Safe Manoeuvring Envelopes**)來描述。

MLDs 是由各種不同的控制翼面限制組成，其中對一所給定的起始縱

搖角，有一組控制翼面角度的限制，顯示在一單一圖面上，如圖 3.49(a)(為一十字型艦的潛艇的典型 MLDs)。對於不同的初始縱搖角，或不同的初始俯仰狀況，可能就要用到更多不同的圖。

SMEs 是由各種不同的縱搖角限制組成，其中對於一假設的卡住角度，有一組縱搖角的限制，顯示在一單一圖面上，如圖 3.49(b)。

對於不同卡住角假設或不同俯仰狀況，可能就要用到更多不同的圖。

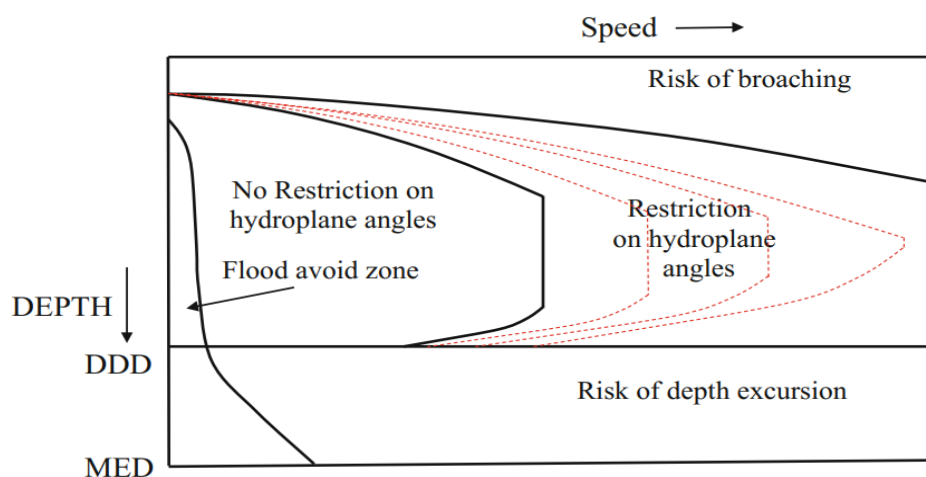


圖 3.49(a) MLDs 之範例（一起始縱搖角對應不同深度與速度產生控制翼面角度的限制結果）

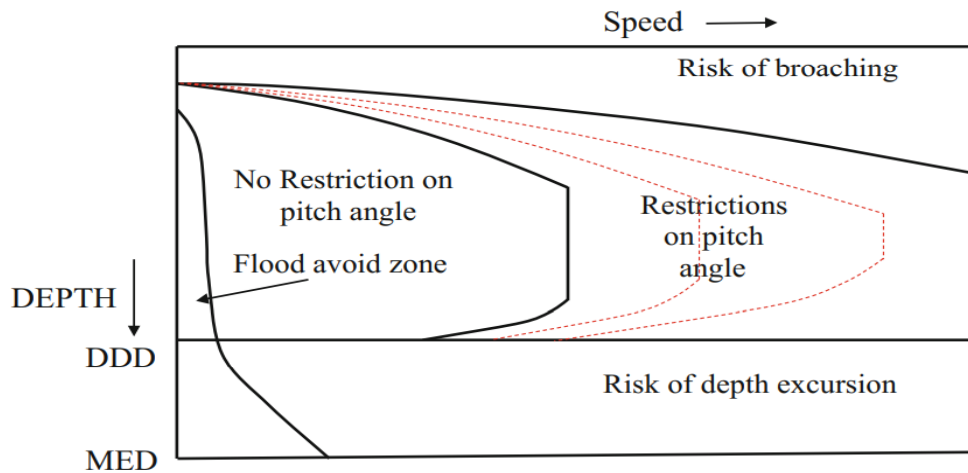


圖 3.49(b) SMEs 之範例(一假設的卡住角度對應不同深度與速度產生縱搖角度的限制結果)

(DDD: Deep Diving Depth, MED: Maximum Excursion Depth)

SOEs 之產生方式

為了產生一 SOEs，必須有一潛艇的操縱模擬模型，因為這是一個安全界限的因素，其軟體必須經過驗證。另外也必要知道在每種失能的狀況下，船員能夠掌控的標準操作程序(SOPs)，包括船員反應時間的估計。不一樣的 SOPs 都可以拿來做檢視，對於一特殊意外之指導可以發展出一與操作者有關的適當 SOP。

因此 SOEs 要去跑一個大範圍狀況的模擬來評估潛艇之軌跡來決定它是否可存活，這需要重覆很多次，來得到所有的界限(圖 3.49(a)與 3.49(b))，因為這種理由，一個可用的模擬工具是需要的，可用來很快且合理的執行，因為有相當多的狀況要評估。

安全係數必須加在許多未知狀況上，例如模擬模型的不準性，船員反應時間，潛艇俯仰及壓載狀況以及初始狀態。

以下為一些重要的 SOEs “可處理的失能” 狀況的 SOP 處理方式：

※艏部控制面卡住部分

一十字型艏潛艇，在艏部控制面卡住時，其典型的 SOP 處理如下：

(a)下全速後退 rpm 之指令

(b)假使可用_{可用}的話，操作艏之控制面

(c)將舵定在艏位置

因此要模擬此合成運動，必須了解原動機的行為(包含要得到倒車馬力需多久時間以及馬力與 rpm 之關係)以及倒車時作用在俾葉的流體動力。

若潛艇在發生下列情況下，艏控制面卡住之後，則會發生失能狀況

(a)超過最大巡航深度(MED)

(b)撞到海床

(c)達到水面能接近_{能接近}的極限

(d)形成一過度的不正常俯仰角

下列為在潛艇艏控制面卡住之後，定義成功解危的狀況：

(a)沒有超過最大巡航深度或碰到海床或超出水面

(b)沒有超過最大允許之俯仰角

(c)可回到往控制面卡住之前方向的趨勢

(d) 有維持住原來的復原速度

※浸水(滲水)

滲水可能是經由與海水相連的系統發生。對於滲水事故之標準處理程序為：

1. 儘可能保證潛艇在安全狀況
2. 若可以的話，使用全速前進之 rpm
3. 將所有主壓載艙清空
4. 操作潛艇至水面上

對柴油潛艇而言，若滲水發生在包括電池的推進設備艙間，可能造成電力損失。因此在操演模擬時，就必須考慮進去。

在滲水事故發生後，定義成功解危之狀況為：

(a)沒有超出巡航深度或撞海床

(b)沒有超過最大允許之俯仰角

(c)在有一可接受之預浮力標準下，潛艇必定可回到水面

在潛艇可能先以艏上浮的狀況下，要以高上升速率與無動力上浮對模型而言是困難的，但在模擬時，顯示這是可能發生時，應特別注意。

根據 Watt 跟 Bohlmann(2004)，在以浮力上升時之水平面穩度，通常伴隨有下列之折衷的調節動作：

- (a)高的入射角，特別在高速
- (b)同時有正與負的縱搖速度與加速度
- (c)只清掉前面的壓載艙

此代表在作緊急上升時，最好用高縱搖角來增加速度，因此減少入射角，如此可以延遲不穩定的開始，也減少不穩定的作用時間。

混合高速與縱搖角變化，增加了不穩定的可能性，因此一旦所要的縱搖角達到了，建議就維持此固定縱搖角，直到船隻出水面，不要在出水之前拉平。

假設必須先清掉前面的壓載艙櫃，**脫險後，也要儘可能儘速向後清掉剩餘的艙。**

※操船限制

SOEs 所顯示的操縱極限範圍，提供了潛艇上操船之限制，由於缺乏潛艇在**極限**狀況下的操縱知識，因此以最小的保守主義觀念來確定**SOEs** 是有經過正確的計算，是有其必要的。因此有許多工作必須著重於對潛艇在緊急狀況行為的了解與預測。

這些極限範圍的大小，在設計階段就必須了解清楚，如此才能讓潛

艇的操作有效性正確評估。

※自由航行模擬試驗：

此種試驗是以一相對低成本，在一控制的環境中，用來檢視潛艇的操縱特性。其目的為：

- (a)評估一既有或建議設計的操縱特性，包括對設計可能改變所產生的影響或服役中的損害(包括控制面完全或部分失靈的狀況)
- (b)檢視不同控制策略
- (c)發現在極端狀況下潛艇之行為，包括緊急狀況，驗證緊急狀況程序處理的可用性以及操縱限制圖的驗證。
- (d)提供驗證數值模擬之數據
- (e)提供系統鑑定技術應用之數據

已有些國家有能力作此項實驗，如英國(2014), 荷蘭(2014), 法國(1999), 美國(2001)。此項試驗已被視為保證潛艇操作安全一項主要的工具。

典型的自由航行模型試驗的模型船約五米左右，太小會有尺度效應影響，因為它們的控制翼很小。即使有五米長，仍要注意尺度效應，因為控制翼是在低雷諾數，其操作是在一很大的邊界層內。

通常此模型至少要半自動式，因為時常無法送達指令給模型。一

般可設計成可裝儀器之隔艙式鋁製壓力殼，包括玻璃纖維外罩。此外罩可修改成所需要的外型及控制面型式。在壓力殼內部可維持一正壓力以減少小的滲漏水。

另外一種來達到一單鋁製船殼的變通方法是利用一個每個個別組件都位在自己壓力艙內部的空間肋骨結構體(模組化)，此方式可較容易複製較大 L/D 比例之潛艇，為英國 QinetiQ 公司所發展出的。

一自由航行模型通常裝備有下列設備：

- (a)推進馬達(具有控制器與轉速之量測功能)
- (b)後端的流體控制翼，前端的流體控制翼及舵(具有伺服系統，控制器以及變化角度的量測功能)
- (c)俯仰與壓載系統(包括可移動之質量與壓艙水系統)
- (d)慣性位置量測系統
- (e)都卜勒速度儀
- (f)深度及壓力量測儀
- (g)自動導航系統
- (h)數據記錄，儲存系統
- (i)電池電力組
- (j)模型與岸邊之連繫系統可提供數據下載，下一次測試之輸入以及電池充電

(k) 緊急收回之壓載系統

(l) 緊急定位器系統

此模型必須要有一機制來作重力浮力的平衡的良好調整。不管是垂向或縱向，因為這對模型俯仰平衡的能力是很重要的。而且變換垂向重心的能力，對於複製實際的 BG 值，可能也很重要。潛艇之慣性質量力矩也很重要可利用一複合單擺裝置來量測。

假使壓縮性也要檢視的話，則一種複製實船壓縮性特性的方法也必須考慮。這個也許可以利用俯仰與壓載控制系統來達到。

假設需要的話，模型應裝設有一阻斷開關，允許潛水人員或其他人在必要時，可關閉馬達。在湖泊中實施，應有緊急壓載系統與定位系統，以便失敗時可回收模型。。

最後，應有一機制能將模型吊入及吊出水中，包括母船以及一適當的吊車。

一典型的自由航行潛艇模型之剖面內部圖如圖 3.50 所示

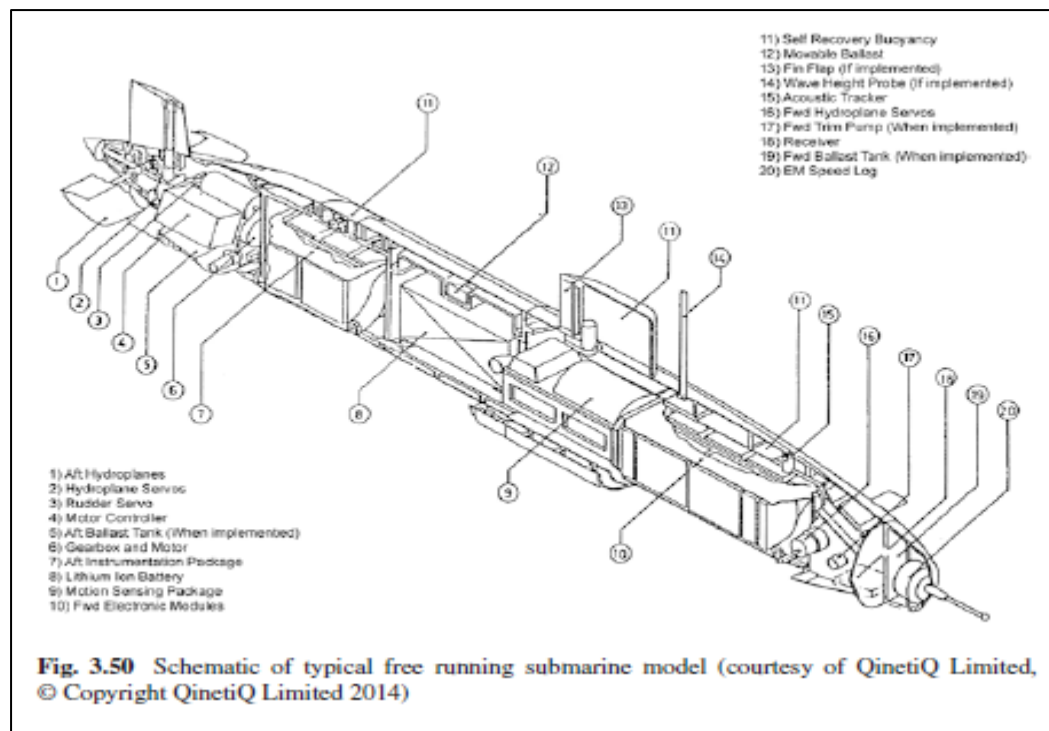


圖 3.50 典型的自由航行潛艇模型之剖面內部圖

應儘可能使用商用現成品設備或技術(COTS-(commercial off the shelf))，當然適當的備品也應要具備可用，可以在測試其間隨時備用，包括維修與保養。理想上壓力殼必須要能很容易合理的在現場打開，去詳估內部的設備狀況。

此種自由航行模型實驗，也可在既有的水流體動力試驗水槽實施，其好處當然是可控制相關之環境與模型操作，以及可清楚看到模型試驗的狀況，但此測試水槽要夠深來允許深度變化操作，但一般不太容易，因此要做比較嚴謹的測試，還是必須找一個適當的湖泊試驗區。

對於一個適當的湖泊試驗場所應具備下列需求：

- (a)足夠的面積範圍，不會受淺水區域之影響，對一 5 米之模型，至少要有 200mX200m 之深水區，當然越大越好，這樣可以在每次測試時，可以同時做多項的操縱試驗。
- (b)適當的深度，可供深度變化操縱試驗，但太深，會造成萬一失敗時，模型不易回收或丟失的問題。因此對一 5 米之模型，20 米至 30 米是最理想的。
- (c)工作母船可很容易的下放或回收。
- (d)適當的辦公室，工具間，有電力給測試人員使用。亦有安全的模型與裝備儲放空間。
- (e)需要的話，要有效正測量儀器之設備。
- (f)需要的話，要有潛水人員操作的設備。
- (g)適當的遮蔽體，尤其是防止風及風引起的浪。
- (h)不要有水流
- (i)溫度與密度的連續性(不變性)。
- (j)充分的隱密性，最好是作測試時，沒有其他人。

另外，測試場地離主基地越近越佳，在支援上與連絡均較方便。

※潛艇操縱試俾

全尺寸的潛艇操縱試俾，通常有幾個不同的目的：

(a)確立設計規範是否符合(不管是初步設計或已修正的設計)

(b)可改善未來操船預測的數據獲得

數據的獲得，尤其重要，尤其是可協助了解模型與全尺寸操作性能之後間的關聯。

※確定性操縱演習(Definitive maneuvers)

確定性之操縱演習有好幾種，可分別來確定潛艇之各項的操縱性能好壞，但在作各種試驗之前，船隻必須是平衡，以穩定速度航行在一穩定的航向或深度，而且維持一有效時間，以確信初始狀態是穩定的。

以下就各種確定性操縱演習試驗作一說明：

I. 迴旋圈試驗(Turning circle):

舵角設定在一常數，讓潛艇作完全 360° 之航向變化。主要量測之數據為戰術直徑，前進距離，橫距，漂移角，傾斜角以及速度損失，如圖 3.51。其目的是用來判斷船隻之穩定迴旋能力。其主要結果與初速度關係不大。

Fig. 3.51 Turning circle

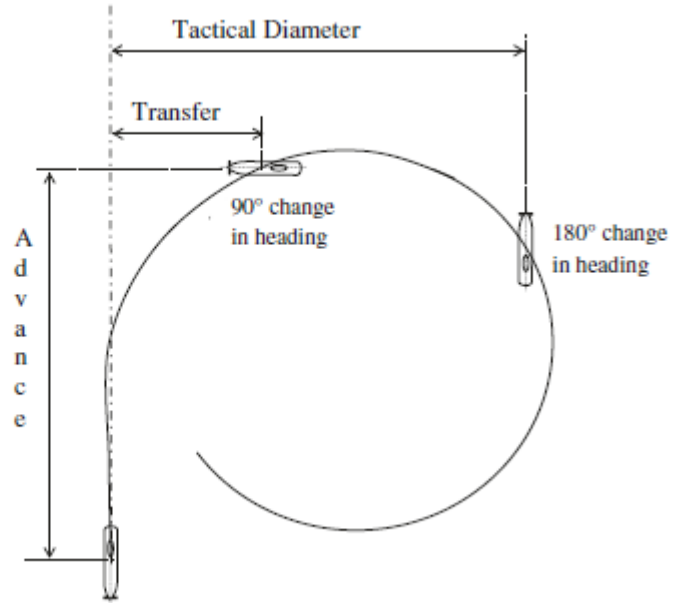


圖 3.51

II. 拉回試驗(Pull out):

當船隻在作一穩態迴旋時(例如在一迴旋圈結束時)，舵角歸零，然後去記錄船隻最後之橫擺速度歷程。利用此橫擺速度歷程來評估船隻之直線穩定度。可與迴旋圈試驗同時執行，如圖 3.52。

Fig. 3.52 Pull out

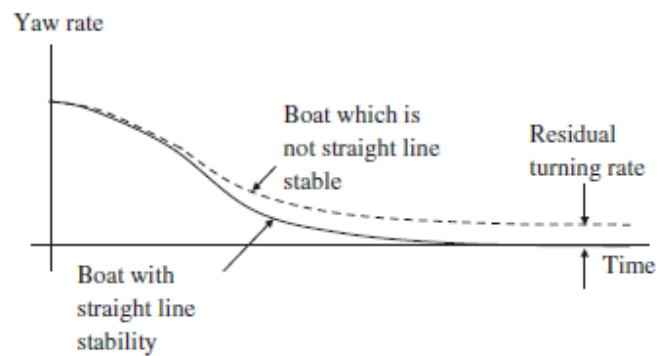


圖 3.52

III. Z 型試驗(Zig-Zag):

對於水平的 Z 型試驗，是將垂直舵很快且很順的打至一固定之角度 δ_0 ，然後維持至船隻的方向角達到所要的預定航向角 Ψ_0 ，再馬上將舵打至 $(-\delta_0)$ 舵角，再維持至船的航向角轉至 $(-\Psi_0)$ 。通常 δ_0 與 Ψ_0 以 20° 來操作稱之為 20-20 Z 型試驗。當然 δ_0 與 Ψ_0 角度也可自由選擇。對於垂直面的 Z 型試驗，則需以艏部之水平控制翼來取代垂直舵，航向角變化角則以縱搖角變化來取代。此種試驗通常亦叫做超射操縱演習(overshoot maneuver)。主要量測在所設定的每個控制翼面角度變化的時間、橫擺與縱搖之超射角、航跡寬度與深度的超射偏量以及到達最大寬度偏量與最大巡航深度之時間。此試驗主要用來測試潛艇方向改變或深度改變之能力。此結果與速度有關(因為舵與控制翼板之速率為常數)，如圖 3.53。

Fig. 3.53 Zig-zag

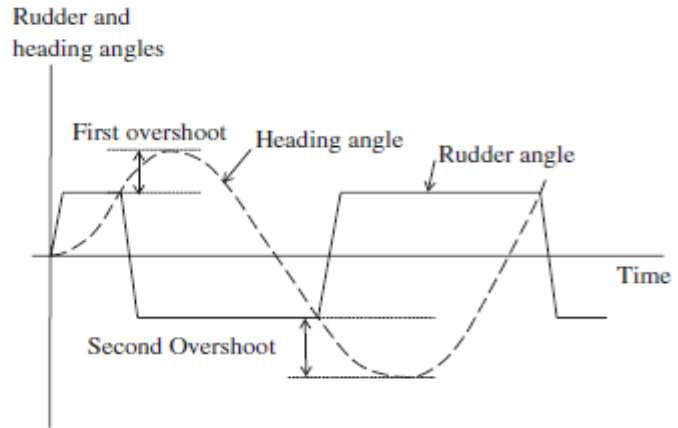


圖 3.53

IV. 漫航試驗(緩慢曲折前進)(Meander):

此試驗與垂直面 Z 型試驗相似，**唯一**差別在當縱搖角達到時，控制翼面歸零。主要量測潛艇之軌機，用來顯示其運動穩度以及維持定深的能力。

V. 螺旋試驗(Spiral Test):

將舵打到一設定的最大舵角(如 25°)，維持直到一穩定橫擺速率(如圖 3.54 中之 A 點)，然後再以固定之減量(如 5°)減少，同時維持至另一穩定橫擺速率，如此繼續找出舵角與橫擺速率之關係。至最大的反向舵角(如 -25° ，F 點)，再反覆往迴至 A 點，可得到如 圖 3.54 之曲線圖。

由此試驗可了解舵之控制能力與直線穩定度。如果出現如圖

3.54(b)中的 BDEH 之磁滯迴圈(hysteresis loop)，即代表不穩

定之範圍。此結果與初速度沒太大關係，但此試驗可能相當耗時，而且對不穩定的船無法提供在此磁滯迴圈內之資訊。

Fig. 3.54 Spiral test.
a Straight line stable.
b Straight line unstable

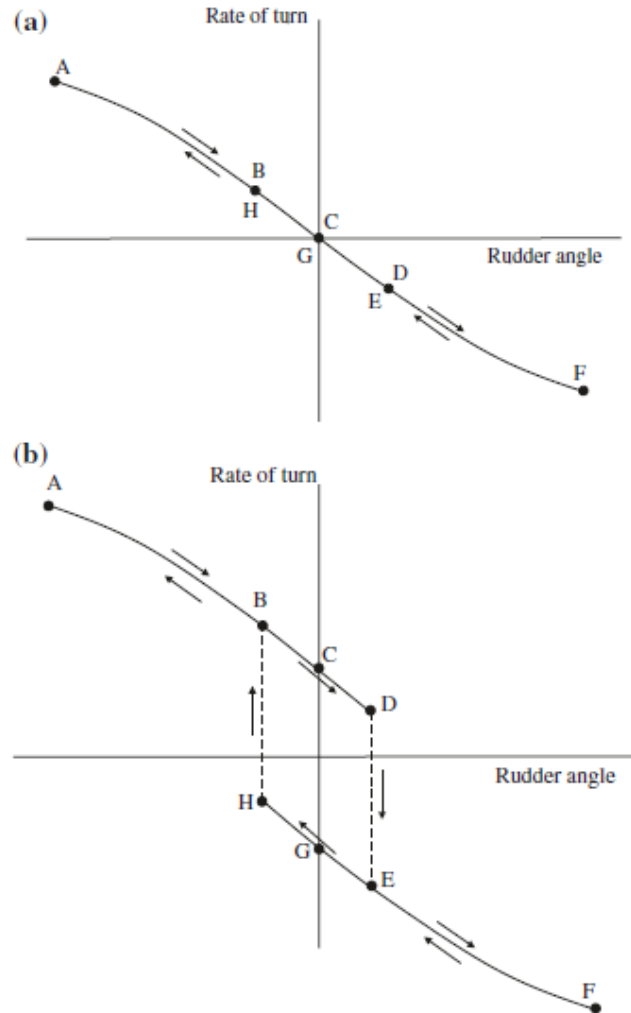


圖 3.54

VI. 反螺旋試驗(Reverse Spiral Test):

記錄打至一所需要之橫擺速度之舵角，如此重覆對一範圍內之不同橫擺角作試驗找出所對應之舵角，亦即同樣可作出每舵角所對應之橫擺速率關係(但此方法在磁滯迴圈中，對不同之橫擺

速率可能有相同之舵角)。主要也是用來了解控制能力與直線穩定度。船隻初速度亦不大影響結果，但對不穩定船而言，可提供在磁滯迴圈內之資訊。

以上在作水平面測試時，可能需要操控前後水平翼板，以保持潛艇定深與姿態。

※試俾之準備：

在執行試俾前，正確決定試俾的目的，是非常重要的。例如是否只是純粹要檢查一艘新潛艇是否符合設計規範，或是不是要得到新的數據來驗證相關的操縱資訊。前者是已經確定那艘船隻需執行試俾的狀況，而若是後者的話，則選擇的潛艇將依所考慮的情況來決定，例如可得性(availability)。

一旦試俾的目的經確定同意後，則試俾順序必須規劃出來，包括：

- (a)範圍以及高標準需求
- (b)所需要的裝備
- (c)試俾計畫
- (d)試俾團隊與相關民間人事資料
- (e)試俾項目之詳細表列，包括每個項目之所有需求
- (f)風險與安全評估狀況分析

試俾裝備的決定與適當之規範是重要的，包括量測儀器所需的準確度。可利用現有存在的潛艇平台管理系統來量測記錄某部份所需要的數據。不管是否可能，任何可能影響操作的因素，都必須在早期設計階段就作一了解。

另外，任何會影響控制面動作之器具，必須事先做好完善準備，並在風險評估與安全之狀況分析中加入考慮。

在規劃試俾時，甚至在選擇那艘船隻時，在試俾前幾個月就要將各種考慮放入此船隻操作計畫中。專家設備可能是需要的，因此潛艇需要有可以讓此項設備能適合於潛艇使用的機制空間。而在試俾之後也可以馬上移除。此項時間與成本必須包含在規劃中。

設備在裝入潛艇之前，在陸上必須做多次的虛擬測試。船上應有足夠的備用品，至少一組試俾團隊要能夠在船上執行診斷任務與裝備的修理，否則一個小的機能失常，將使整個試俾徒勞無功。

如何分析試俾結果須非常小心，因此量測設備所需的精準度以及類比頻率的數位轉換是否恰當均應注意。另外，對於在船上執行一主要數據的運行分析(running analysis)的計畫藍圖應該要發展具備。這種現場即時分析對於保證所有頻道能正確運行是很重要的。而且其結果是要可用的。操船模擬機對於潛艇試俾的操縱者是有利的，可以充份了解需求的事情，而且可在規劃階段時得到指導何者

是需要，何者不需要。因此對試俾之規範，可提供相當多實際有用的資訊。

一個清楚的風險評估與安全狀況是必須的，應包括：

- (a) 安裝、經診斷有價值的運作、以及試俾設備的移除(例如任何限制空間的問題)
- (b) 試俾裝備對潛艇安全的衝擊影響(例如任何控制動作會受到限制的影響)
- (c) 每次操作的安全，尤其是當在接近 MLDs 邊界時
- (d) 每次操作預期的結果，以及放棄一次操作的需要性，以及若操作試驗超出預期參數時要執行的方法。
- (e) 由潛艇操作導致非軍方試俾人員的危險(例如在訓練逃生與救難時，是需對所有試俾人員實施)

※試俾的執行：

試俾團隊與潛艇船員之和諧互動，對試俾的順利完成是非常重要的。試俾成員應負責觀察，監督整個試俾的執行，而不需要自己去操作潛艇。因為潛艇之安全是在船員的手上。而由於所有團隊與潛艇船員，都在同一潛艇之有限空間活動，因此彼此良好之互動也相當重要。

在每次測試之前的艇身平衡必須正確知道，除非特別需求，否則艇身應儘可能接近平衡。而且在每次下達指令前，適當的時間必須把握，以保證初始狀態是穩定的。假設太倉促的話，可能整個測試結果都是沒用的。在下達指令之前的每個參數應該都記錄下來，如此事後的最後分析才會有信心。

對每個試俾結果，應儘可能即時採用主要的連續進行分析 (running analysis)。雖然這樣只是相當初步的分析，但它將保證所取的數據是正確可用的，結果是可用的。在數據沒有經過這種連續進行分析，就執行下一次測試，是非常冒險的。因為若有一個或多個頻道失效，則整個測試就完全做虛功。若有時間壓力必須完成，則數據必須做一快速的檢視，保證所有頻道都是正常運作，而在每一組測試後運行分析，必須符合實用且儘量快速的實施。在試俾期間，在適當的時段，都必須作備分儲存。表 3.10 為各種不同確定性操縱試俾，將可能需要的次數與時間列表。

表 3.10

Table 3.10 Typical definitive manoeuvres used for submarine trials (adapted from Ray 2007)			
Trial	Number of variants (for each speed)	Number of speeds	Approx total time
Overshoot (zig-zag) in vertical plane (dived)	One to five sets of plane angles for each speed, repeated using bow/stern planes alone and in combination and for both rise/dive	5	8½ h dived
Meander test in vertical plane (dived)	One; repeated using bow/stern planes alone and in combination and for both rise/dive	2	
Overshoot (zig-zag) in horizontal plane (dived)	Four sets of rudder angles for each speed; repeated for port as well as starboard deflection	5	8½ h dived
Turning circle (dived)	One to two rudder angles for each speed; repeated for port as well as starboard deflection	4	
Spiral manoeuvre in horizontal plane (dived)	One	3	
Overshoot (zig-zag) manoeuvre in horizontal plane (surfaced)	Two to three sets of rudder angles for each speed; repeated for port as well as starboard deflection	3	3 h on surface
Turning circle (surfaced)	One rudder angle for each speed; repeated for port as well as starboard deflection	2	
Spiral manoeuvre in horizontal plane (surfaced)	One	3	
Grand total			20 h

※試俾結果的分析：

對於前面所列之各項確定性操縱法而言，其分析是相當直接的，而且其主要的特性可以依需要得到，如圖 3.51, 圖 3.52, 圖 3.53 及圖 3.54 所顯示的。然而對其他試俾項目，例如要與自由航行模型測試結果作數據校正，或者要驗證數據值預測的結果，其工作是相當複雜的。

首先，模擬要儘可能與真正海試的初始狀態接近。其次在海試中，任何在控制面的指令角度或轉速(rpm)所發生之缺陷，在模擬過程中要能複製。但實際上，真正時程之數據的比較是相當困難的，同一時程內有些數據正確，有些則否，很難完整地與海試指令或結果完全吻合。

另一種變通的就是將模擬設定與海試有相同的軌跡、速度、縱搖角與方向角，利用控制翼面使其在此相同的狀況**操作**。則為了達到此模擬，可以找出需要多少額外的外力與力矩。利用此種方式較容易決定有那些模擬項目需要修正來改善預測。

第四章 阻力與流體

潛艇的阻力對於它的速度與耐力有主要的影響。此外高阻力也會影響聲學訊號，因為有兩項原因：(1)增加了流體噪音(2)為了達到所需速度，必須增加推進馬力，因而增加噪音。

流體通過潛艇時，將影響自身的噪音，因此會影響到所有感測器之效率。當它流進推進器時，也會影響螺槳噪音與推進效率。

流體的分離現象應避免。當潛艇的截面積沿船殼長度遞減時，它可能會發生，此時流體是減速的，如圖 4.1 所示。因此當截面積是遞減時，要特別注意，就如艏區域；而在船殼外罩以及其他截面積有遞減時，都有可能發生。換句話說在沿船長截面積增加的區域是不可能發生分離現象，因為流體是加速的。因此了解流體在潛艇四周之行為，對於船體設計是重要的。

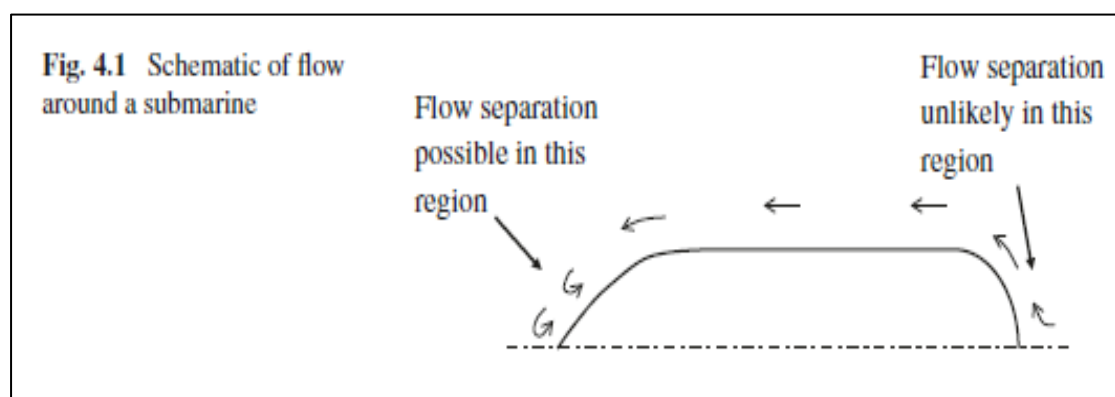


圖 4.1

※阻力之分量

基本上，潛艇之阻力分量與表面的船隻相似的，如圖 4.2 所示

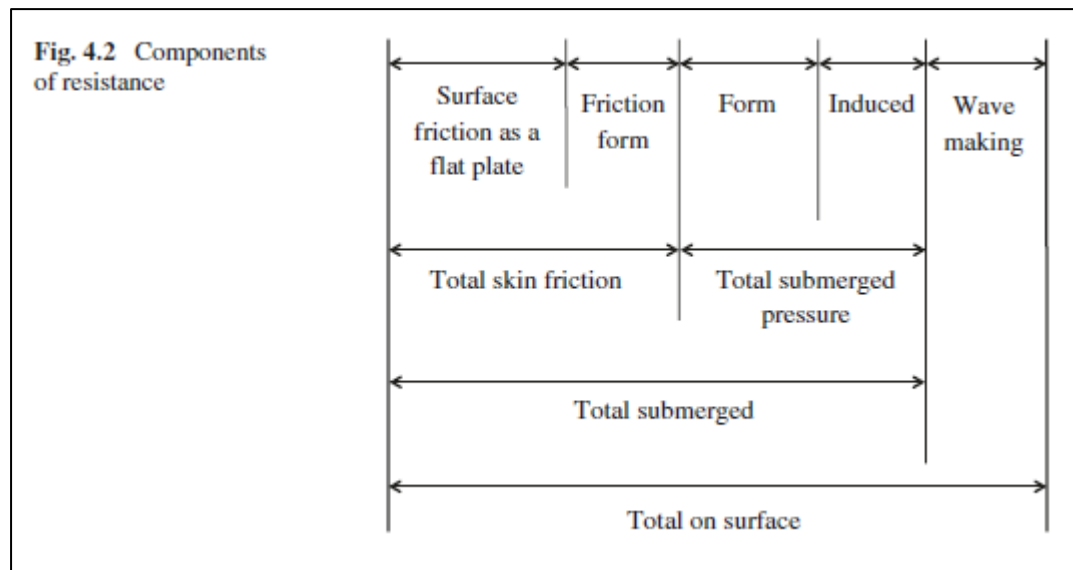


圖 4.2

與表面船隻最大的差別在潛艇沒入深水中時，將沒有興波阻力。因此，此沒入水中之阻力，將等於下列阻力分量的和。

- (a) **如平板之表面磨擦力**(Surface Friction):即等於一具相同浸水面積，相同長度的平板磨擦力(相同的雷諾數)
- (b) **摩擦形狀阻力**(Frictional-form Resistance):因為潛艇有它自己的形狀(3D)，其流體速度不會與通過一平板一樣。在某些地方較高，有些地方較低。此摩擦形狀阻力即因此而產生，但通常很小。
- (c) **形狀阻力**(Form Resistance):此分量是因為物體形狀產生的黏性壓力阻力。流綫性的形狀比鈍形的形狀較小
- (d) **誘導阻力**(Induced Resistance):此阻力是由物體升力產生，

通常是由於屬具因為流體不順，產生升力或是船身不對稱造成。

以上(a)項與(b)項合起來稱為表面磨擦總阻力，此阻力與船殼面相切。對一沒入深水之潛體而言，形狀阻力(c)與誘導阻力(d)合成來稱之為總壓力阻力，此力是與船殼面垂直，因為通常船殼面之誘導阻力通常很小，總壓力阻力非常接近形狀阻力，因此通常以形狀阻力來描述總壓力阻力。

對一典型的潛艇，深潛之總壓力阻力不會超過表面磨擦總阻力的 10%~20%。因此表面磨擦總阻力是深潛潛艇的主要阻力。所以要減少此部份的阻力，就是減少浸水表面積。因此流綫型之形狀，一般會減少壓力阻力，但反而會增加浸水表面積，造成摩擦阻力增加。

當靠近水面時，則因造波關係，會多出興波阻力，此與福祿數及水面下距離有關。

※船體形狀之影響

最佳潛艇裸船形狀為軸對稱且縱截面類似淚滴型，如圖 4.3。最胖之截面在艏後約 30~40%處，但不是絕對的。

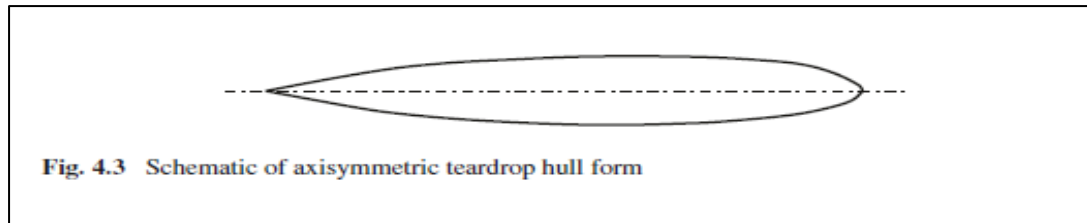


圖 4.3

若在固定體積下，增加潛艇長度可減少形狀阻力，但會增加摩擦阻力。圓形截斷面的浸水面積最低，因此其摩擦阻力最低。外罩與其它會增加浸水面積的外形物都會增加摩擦阻力。

在考慮船體外形的整體形狀時，下列兩項參數是很重要的：

(a) 細長比(L/D): 其中 L 為潛艇長度， D 為直徑

(b) 稜形係數 $C_P = \frac{\nabla}{A_m L}$ ，其中 ∇ 為潛艇體積， A_m 是舭截面積

圖 4.4 為一軸對稱淚滴型船的阻力對 L/D 曲綫關係圖。由圖可知一淚滴型裸船的最小阻力值約發生在 $L/D=6.6$ 。而最佳的 C_P 值約為 0.61。

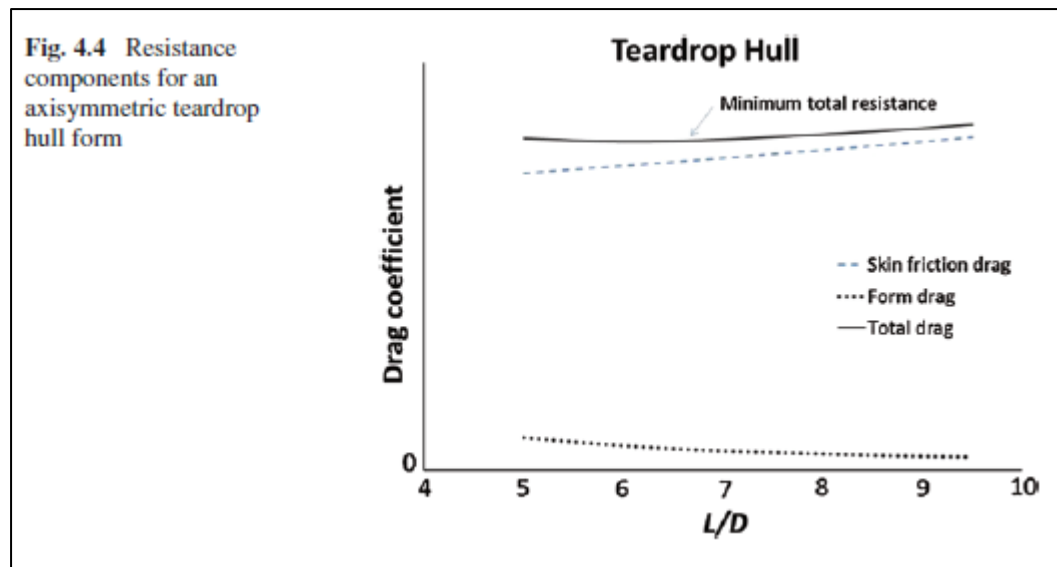


圖 4.4

若船體不是淚滴型，而且大部分船體為圓斷面之平行舢舨(PMB)時，則摩擦阻力與形狀阻力會改變，如圖 4.5 所示。其最佳的 L/D 值較高約為 8。

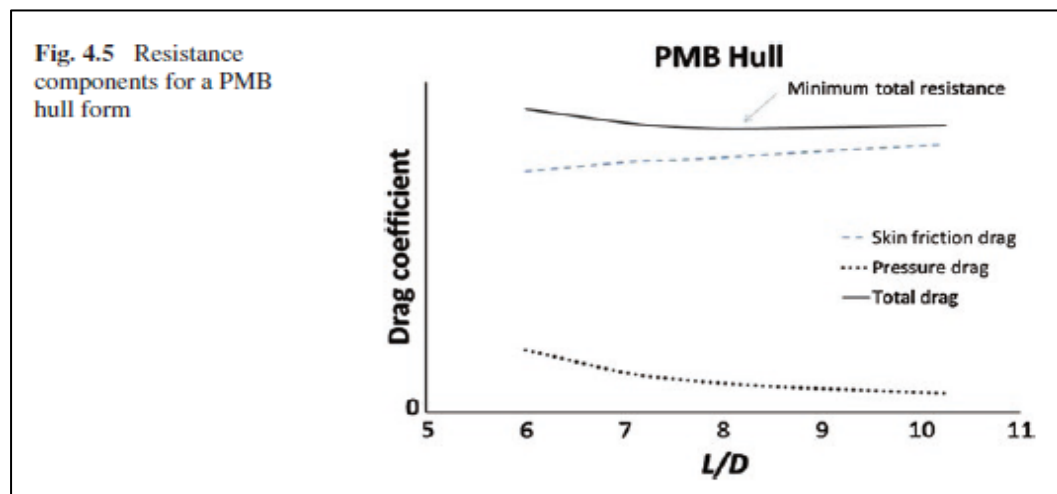


圖 4.5

PMB 船型的總阻力比淚滴型船型大，但淚滴型之建造成本比一般傳統型高，因此常有替代之建議，壓力殼以 PMB 圓斷面建造，而外殼以淚滴型來覆蓋，如圖 4.6。

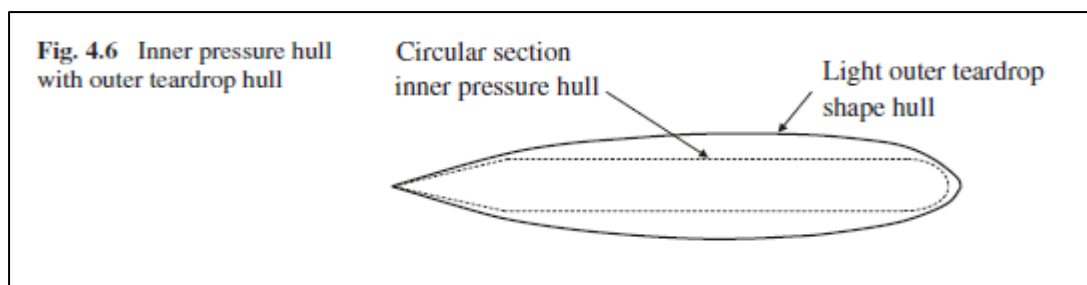


圖 4.6

以相同舢截面積或體積而言，圖 4.6 之外形之阻力比 PMB 船型之阻力低。然而在內外殼間之自由溢水空間，必須考慮為船殼的一部分，此額外之質量之影響，可能要比較佳船殼外形所得到流體動力好處來得重要。此意謂在許多實際例子中，較簡單的 PMB 外型，實際上其阻力會比這種組合最佳化的淚滴型船型低。

在分析潛艇四周的水流時，很重要的一個考慮，就是要減少有干擾或不穩定的水流進入推進器中。因此所有的屬具，例如帆罩、外殼覆蓋以及控制翼面都要非常小心設計，而且跟它們有關的跡流都要追蹤，以保證不會引起推進器的任何問題。

為了方便討論一潛艇通常分成三個部分來考慮：(1)前體(**fore body**)(L_f) (2)平行舢體(L_{PMB}) (3)後體(**aft body**)(L_A)，如圖 4.7 所示

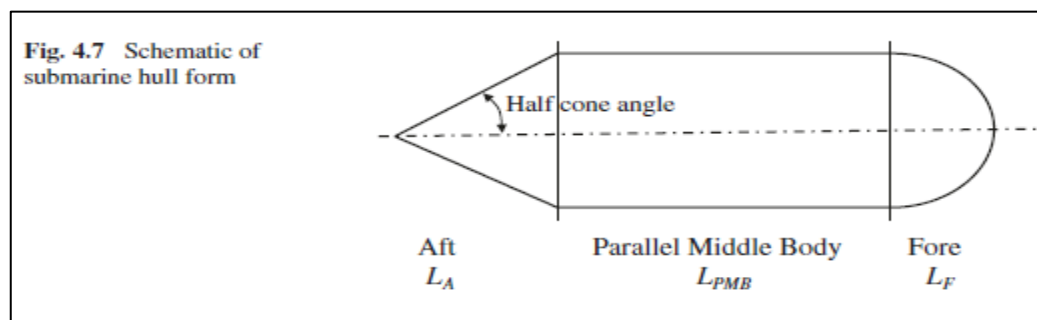


圖 4.7

※前體形狀

最小阻力的理想前體形狀，為軸對稱之橢圓體。但是此最佳型狀並非潛艇阻力的主要影響因素。對很多潛艇的前體型狀設計目標，是控制讓層流區盡可能向後延伸，以保證層流能覆蓋整個聲納陣列。這個通常可以用增加前體的胖度來達成，因為這樣可藉維持加速前體區的水流來延遲過渡區(transition)發生。若前體為軸對稱，則形狀可以方程式(4.1)來求得

$$r_{x_f} = \frac{D}{2} \left[1 - \left(\frac{x_f}{L_F} \right)^{n_f} \right]^{\frac{1}{n_f}} \quad (4.1)$$

其中 r_{x_f} 是沿 x 方向距離前體最後端部 x_f 處之截面的半徑，如圖 4.8 所示。

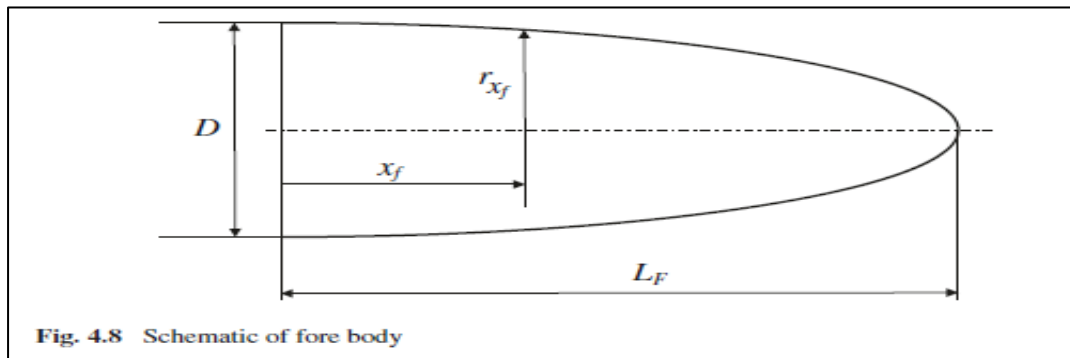


圖 4.8

L_F 是前體之長度， D 是船體直徑。 n_f 為定義前體肥瘦之常數。當 $n_f=1$ 時，其艏形狀為圓錐形，當 $n_f=2$ 時其艏形狀為橢圓形。通常 n_f 值越大，前體的總阻力越大，但體積也會較大，所以要達到相同浮力所需要的潛艇總長度將會較小。因此對最小總阻力的 n_f 時，必須

小心取捨。然而要記得前面提過，前體的形狀設計也被用來控制流體，盡可能不要讓在聲納陣列後方之層流變成紊流。

當 n_f 約等於 2.2 時，可以得到一個好的前體形狀。通常較大的 n_f 值之前體的壓力阻力較大。將 n_f 降至 2.2 之下，通常並不會顯著地降低壓力阻力。然而較大的 n_f 值將造成一較大的壓力阻力於前體。其增加之壓力阻力可以下式(4.1a)估計

$$\Delta C_{P_{fp}} = 0.01 \frac{A_F}{S} (n_f - 2.2) \quad 2.2 \leq n_f \leq 5 \quad (4.1a)$$

其中 A_F 為前體之前向截面積， S 是整艘潛艇之浸水面積。

上述軸對稱之前體在靠近水面時將產生顯著之興波阻力。因為潛艇花在近水面的時間不長，因此這不是問題。但像 SSK 可能會有在水面附近執行一陣子之任務，會由於軸對稱前體而引起顯著的燃油耗率增加，因此此類潛艇之前體設計就必須考慮到此類近水面的性能需求。另外也要小心前體對艏聲納性能之影響。

※平行舢舨

為了使浸水表面積最小，最佳的平行舢舨體的截面形狀為圓形。但通常在潛艇浮出水面時，為使船員容易在上面行動，在艇身上面會覆蓋一非水密輕重量的外罩，因此就偏離了圓形截面之外形設計，如

圖 4.9。

外罩也可用來貯存一些物件，它們可以通過艙間，但這些物件必須在深水航行深度時能抗壓。



圖 4.9

如前面圖 4.5 所示，具平行舢之潛艇最佳的 L/D 約為 8。然而若增加 L/D 對一固定體積的船將導致直徑變小，這對建造費用可變便宜一點。而也必須注意的一點是，若 L/D 太小，則可能需要較大的屬具來維持控制。因為屬具對阻力有實質的影響，因此一般建議應該取較大的 L/D 值。

※後體形狀

後體主要形狀為半尾錐角之形狀，如圖 4.7 所示。太長的後體（即具低的半錐角），則其浸水面積將增加，因此增加摩擦阻力，而且也增加重量與成本。而另一方面，若太短，即半錐角變大則可能

引起流體分離現象，除了會增加自身產生之噪音與船殼阻力外，也將使干擾流進入推進器，而引起螺槳噪音。

後體必須考慮的是它跟推進器是連結在一起的。在船體軸綫上的單螺槳會造成一加速流，如圖 4.10 所示。而分離現象在流體加速時很少發生。這代表沒有推進器的後體理想形狀與有推進器的情況不一樣。有推進器的情況將允許一個較大的半尾錐角及較胖的後體。

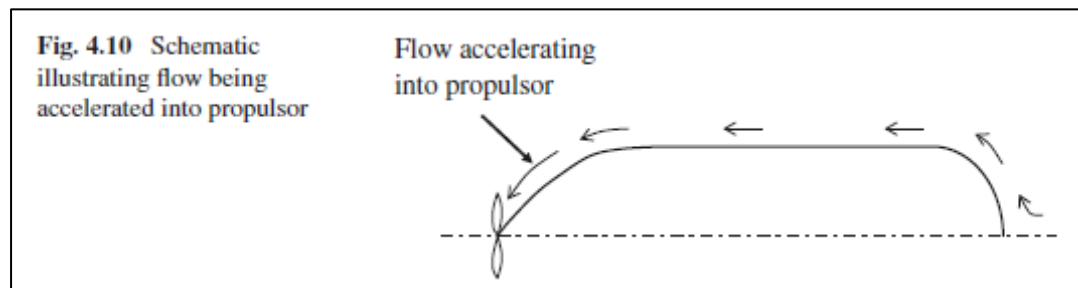


圖 4.10

在一現代潛艇上，單螺槳的正常安排，是將控制屬具(舵及翼面)置於螺槳前方，如圖 4.11 所示。軸對稱的安排，也允許大直徑低速的螺槳，此代表此螺槳之效率可以很高。

Fig. 4.11 Typical aft arrangement of propulsor and control appendages



圖 4.11

除了螺槳會對船殼四周水流有所影響外，船殼也影響進入螺槳之水流，這是由於：

- (a) 在螺槳前方之船體產生的跡流
- (b) 由於在螺槳前方低壓導致的推力減少

船殼效率 η_H 之定義如(4.2)式：

$$\eta_H = \frac{(1 - t)}{(1 - w)} \quad (4.2)$$

其中 t 為推減係數， w 為泰勒跡流係數。胖的後體將產生高的跡流，此會造成船殼效率大於 1。

螺槳縱向的位置對它的性能不是非常的重要，但一般都希望螺槳與屬具有一合理的分開距離，因為當屬具產生干擾流時，會產生一不平衡流進入螺槳而產生噪音。

除了在軸向產生加速流外，螺槳也會使旋轉方向流加速，此為

能量損失，因此會造成效率降低。

表面船隻通常將舵緊接在螺槳之後，以減少旋轉流產生的能量損失，但大部分的潛艇並非如此。而採用噴射型泵的螺槳系統即是為了減少旋轉損失的一種理由，另外也可放置一定子(stator)於螺槳前，來減少其旋轉損失。

屬具

屬具對潛艇的阻力有很顯著之影響，此外，它們產生渦流也連帶造成噪音，而且也可影響進入螺槳之水流，尤其是當屬具與水流不在同一軸線上時。因此屬具的影響是非常重要必須小心的考慮，包括帆罩、艏與艉部的水平控制面，舵、聲納鼓。屬具在船殼邊界層之圖示如圖 4.12 所示。

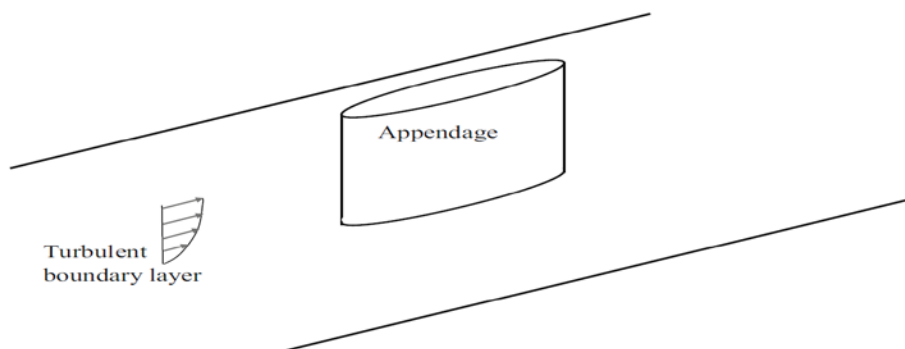


Fig. 4.13 Appendage in hull boundary layer

圖 4.12 屬具在船殼邊界層之圖

屬具與水流在同一軸線時

當水流流過一具屬具之船體表面時，其之間的干擾在交接處造成一複雜之水流，如圖 4.13 所示之入流場的邊界層的結果。此水流的主要特點是一馬蹄渦(horseshoe vortex)的形成，它是由於入流接近屬具形成的，有一個三維的停滯點在屬具的前端邊緣之前形成，而有一回流在船體表面與停滯點之間發生，在屬具的前方造成了一渦流如圖 4.13b 所示，此渦流的大小與強度隨著屬具前端邊緣的鈍度增加而增加。對於具有後掠型(sweepback)之屬具，其分離線很靠近屬具。

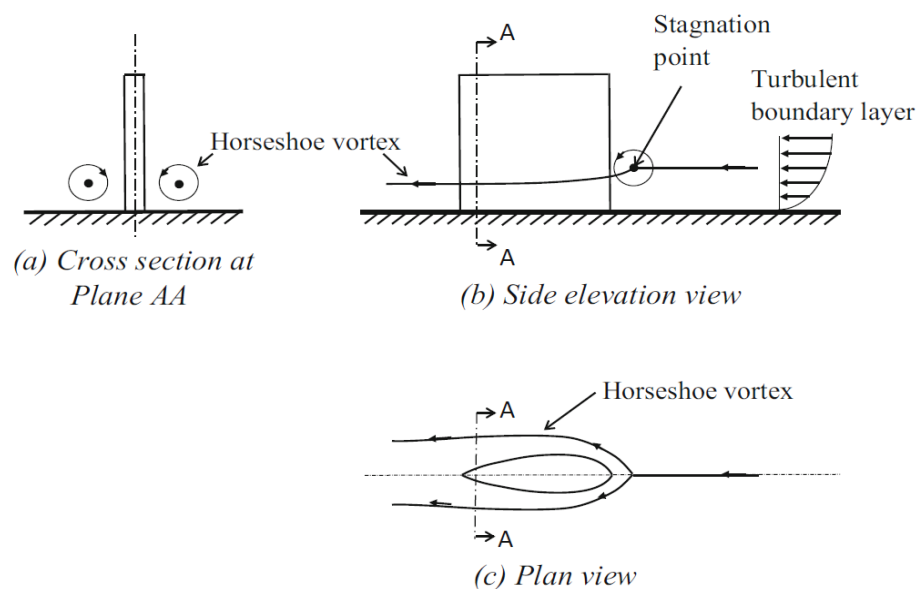


Fig. 4.14 Horseshoe vortex around an appendage

圖 4.13 入流場的邊界層馬蹄渦(horse vortex)的形成

即使屬具為流線型，此渦流結構仍然是不穩定的，其速度可能有變成雙峰(bimodal)速度的可能。通常較向前且較薄之屬具，由它產生之馬蹄渦的大小較低。

由於紊流邊界層的影響，利用 RANS 來預測此渦流的行為是困難的，常必須利用更進一步的計算技巧，例如 DES(Detached Eddy Simulation) 或 LES(Large Eddy Simulation)。

除了馬蹄渦外，也會形成第二渦流(secondary vortices)，如圖 4.14 所示。而在某些環境下，第二渦流不止一個，可以好幾個。

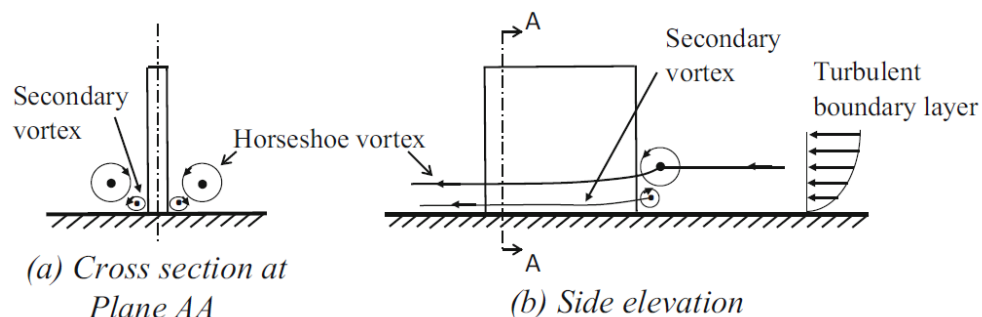


Fig. 4.15 Generation of secondary vortices

圖 4.14 第二渦流的形成

此馬蹄渦與其他相關的第二渦流會產生噪音，也影響進入推進器之水流，又進一步產生噪音，因此壓制這些渦流對減低潛艇噪音是重要的。

事實已顯示利用一等半徑的排帶(fillet)是無法減少馬蹄渦現象，然而利用一個適當設計的導緣側板(leading edge strake)，如圖 4.15 所示，可以移除分離現象，此可同時消除在零攻角之渦流結構。此也減低了連接流的阻力(junction flow drag)

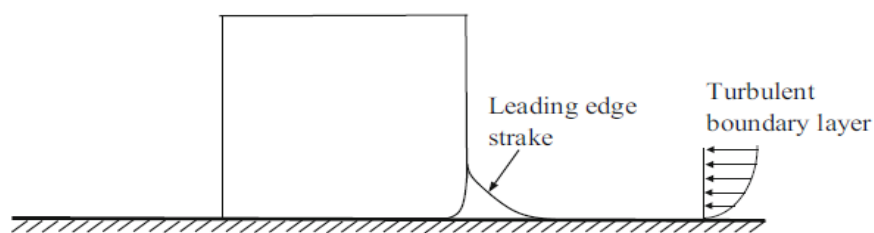


Fig. 4.16 Leading edge strake

圖 4.15 導緣側板

Toxopeus et al(2014)發現最佳的側板長高比約為 2。小的側板無法移除馬蹄渦，然而太大的話可能會增加尖端渦流的大小。側板的大小也會影響流進推進器的水流品質，小一點會改善，太大則跡流會變差。他們發現最佳的側板尺寸與帆罩大小有關，而不是邊界層的高度。他們建議側板之長度至少要帆罩弦長的 18%而高度不要大於帆罩弦長的 15%。此大小很明顯可以加到帆罩的體積計算內。

另外 Liu et al(2010, 2011, 2014)也建議在屬具前緣兩側加裝渦流

控制檔板(vortex control baffler) ，如圖 4.16 所示。

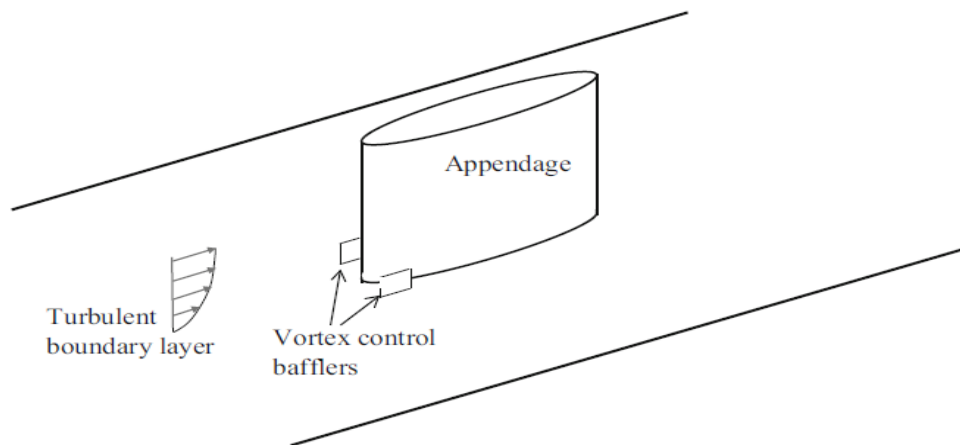


Fig. 4.17 Schematic of vortex control bafflers

4.16 渦流控制檔板(vortex control baffler)

其作用是產生一與馬蹄渦相反轉向之接觸渦流(attached vortex)，某些證據顯示此渦流控制檔板可以減少馬蹄渦之強度，因此對推進器之入流是有利的。此檔板可用於帆罩以及後端控制面來改善推進器入流。然而由屬具及檔板一起產生之噪音，事實上沒有低於屬具自己產生的，因此若屬具產生的馬蹄渦並不會影響推進器時，不宜使用這種渦流控制檔板，例如帆罩的控制翼板，因為噪音沒有減少，尖端渦流也可能在零攻角時由屬具產生如圖 4.17。但若帆罩的尖端形狀經過適當設計的話，則尖端渦流可一併清除。

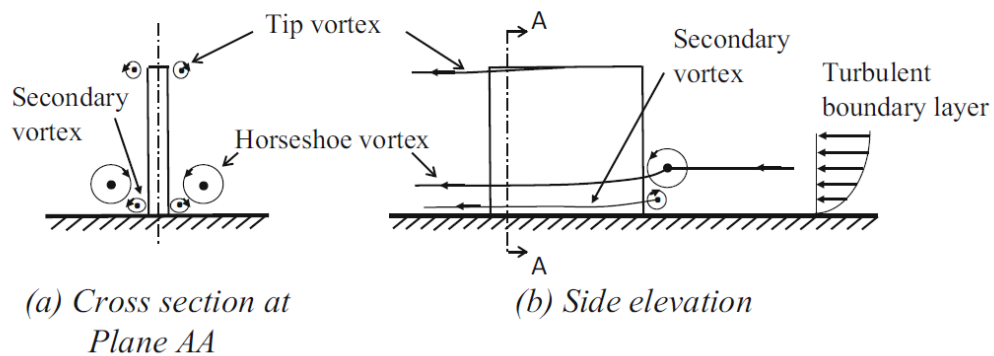


Fig. 4.18 Generation of tip vortices

圖 4.17 在零攻角時由屬具產生尖端渦流

※近水面之操作

當潛艇靠近水面航行時，將產生表面波，造成興波阻力，這將與福祿數(Fr)與潛深(H^*)有關。因為帆罩將靠近水面而產生非常顯著的波型，而以帆罩的弦長為基礎的福祿數，應也被用來考慮評估，不僅僅是考慮以船長為基礎的福祿數而已。

當興波阻力不能忽略時，靠近水面航行的潛艇的最佳 L/D 值，可能會高於深潛的潛艇。

對於可能要花相當多時間於水面的潛艇而言，其前體形狀的設計會不同於深潛時，應該好好考慮帆罩的體積，因為它可能是一設計重要的因素。圖 4.18 為一潛艇的表面波型與興波阻力的關係圖。此曲線有峰(humps)與谷(hollows)，是由於沿船體不同波型造成干擾的結果，與福祿數(Fr)有關，相對於水面船舶，潛艇較不顯著。

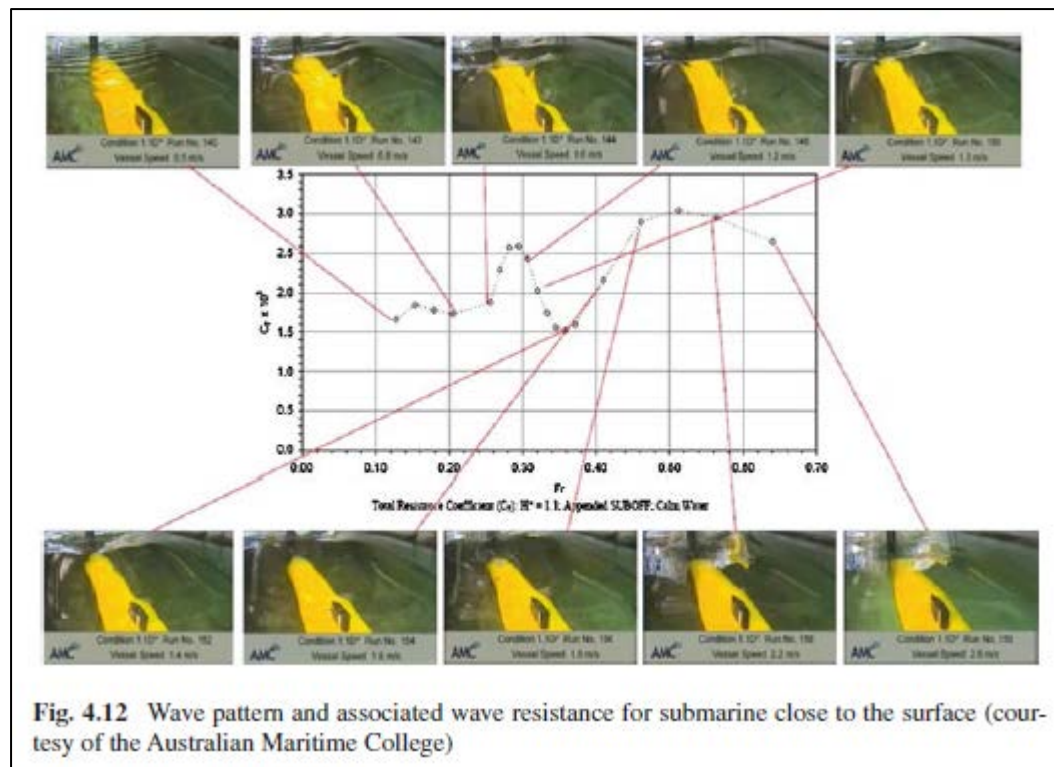


Fig. 4.12 Wave pattern and associated wave resistance for submarine close to the surface (courtesy of the Australian Maritime College)

圖 4.18

此外當潛艇靠近水面航行時，呼吸管及潛望鏡等有用到時，也要考慮進去。而在前面曾提到的表面吸力，會造成衝出水平面之力，這個力需要安置屬具來補償，但這樣又會引起屬具上的誘導阻力，這也要考慮。若有波浪時，亦必須考慮它的阻力。

桅桿

當靠近水面時，呼吸管或潛望鏡可能破水前進而產生額外阻力與羽狀結構之波型如圖 4.19，此也會影響視覺訊號

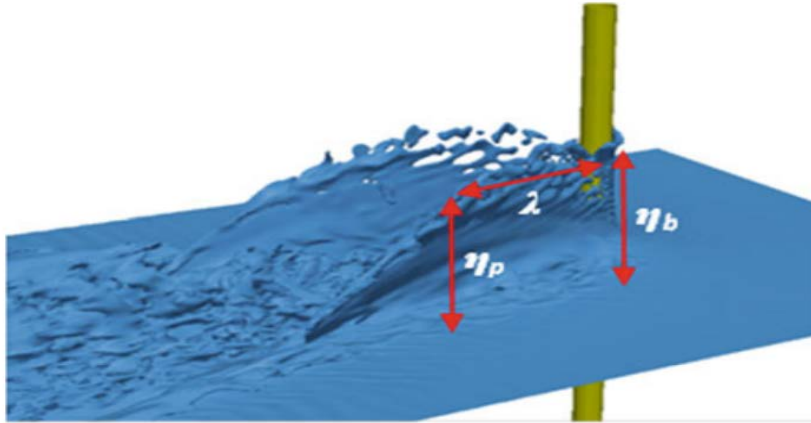


圖 4.19

二維圓柱之阻力係數在不考慮自由液時與雷諾數有關，在有興趣的雷諾數範圍，此值可能在 0.3~1.2 之間，而此羽狀波亦會產生興波阻力。以設計目的，一般可取阻力係數 1.2 來做為圓柱截面的桅桿設計，對於流線型之桅桿其阻力係數很小。

若有多根桅桿則要考慮互相干擾的影響，總阻力之影響多少與在桅桿前方的桅桿大小有關，參考表 4.1 及圖 4.20

表 4.1

Config. No.	Description
2	Two circular cylinders of equal area
3	Forward circular cylinder with smaller area
4	Forward circular cylinder with larger area
6	Two NACA0012 section cylinders with same area

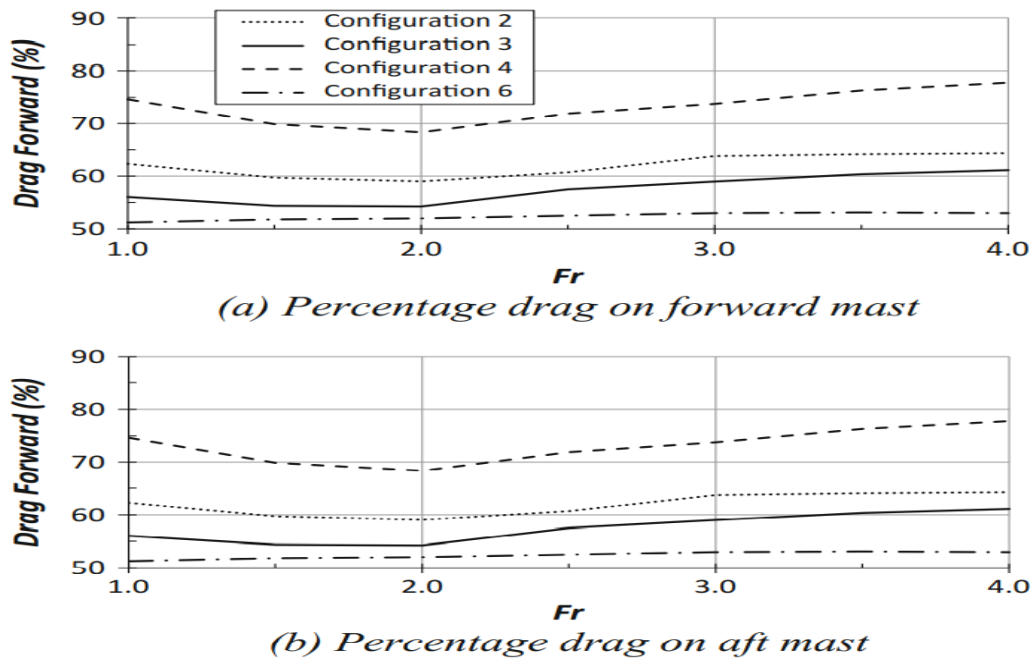


圖 4.20

※潛艇阻力預測

潛艇阻力的預測包括各種的操作狀況，如深潛、近水面、裸船、含屬具、控制翼面等，可以船模試驗或 CFD 的方式來決定。

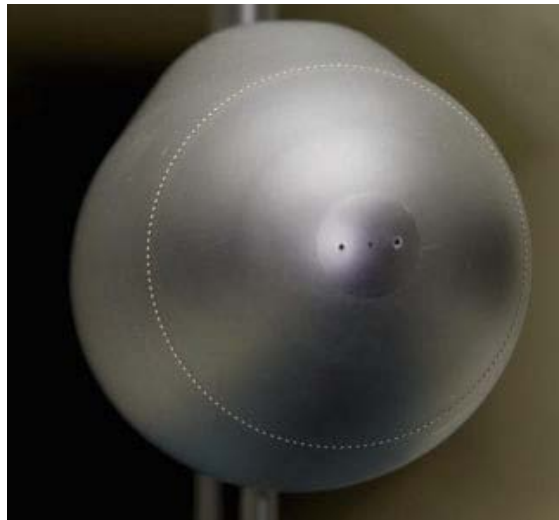
※船模試驗

紊流器

跟表面船隻一樣，為了讓船模達到紊流，會在潛艇船模近艏處加紊流器，而每個流體實驗室都有它自己的紊流器設置程序與方式。但要保證在所有屬具上產生紊流是困難的，尤其是控制翼及舵，因為它們的雷諾數太小了，利用大的紊流器或許可以達到，但

會增加紊流器的阻力，因此船模越大越佳，但即使 5m 的船模，屬具仍太小。

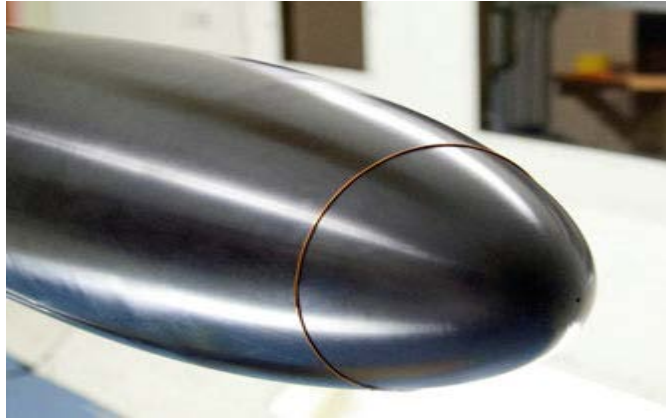
有幾種不同之紊流器可用，如絆索(trip wire)，鉚釘/針(studs/pins)，砂帶(sand strips)，Hama Strip 等，如圖 4.21



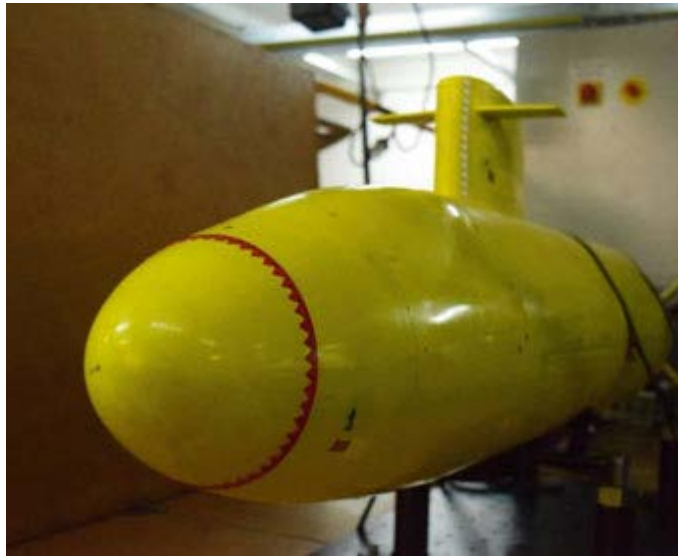
(a) Trip dots on wind tunnel model
(courtesy of DST Group)



(b) Grit on wind tunnel model
(courtesy of DST Group)



*(c) Trip wire on wind tunnel model
(courtesy of DST Group)*



*(d) Hama strips on towing tank model
(courtesy of AMC)*



*(e) Trip studs on towing tank model
(courtesy of AMC)*

圖 4. 21

ITTC 有推薦適合表面船隻的紊流器安置程序與方式，而且隨時都在更新，可參考 28th ITTC(ITTC, 2017)

對於絆索方式紊流器，Jones 等(2013)建議下列公式之雷諾數(Re_{dT}) 在 580-900 為有效的過度區，若高於 900 則可能變為過度紊流

$$R_{e_{dT}} = \frac{U_1 d_T}{\nu} = \frac{U_\infty d_T \sqrt{1-C_p}}{\nu} \quad (4.3a)$$

其中 U_1 為在邊界層邊緣之流速， d_T 是絆索之直徑， U_∞ 是名義流速(nominal stream wise velocity)， C_p 是壓力係數。

因為傳統的紊流器引起之阻力相當大，因此 Shen 等(2015)發展了一種適用於軸對稱體的薄線紊流器，其大小可達 $Re_{dT}=400$ 。此類之紊流器阻力小，約船模阻力的 2%

不管使用何種紊流器，必須維持一致性，如此不同之試驗才能比較。如此也才能真正推導船模與實船之間的對應關係。

※深潛狀態的阻力：

一般對於深潛潛艇的方法是在拖航水槽測試，如圖 4.22，此模型以倒掛方式測試，是為了減少支柱對潛體的干擾。測試深度越深越好，以避免自由液面的影響，但也要注意槽底的影響，也要避免。此種裝置也可用來做自推試驗。

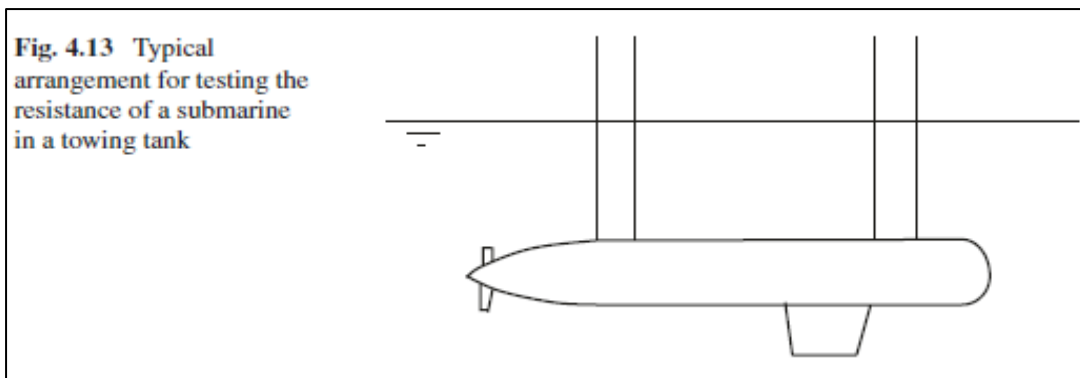


圖 4.22

因為不可能達到全尺寸的雷諾數，而在深潛狀態亦與福祿係數無關，通常測試以盡可能高速來測，但不能有顯著的表面波。大部分的流體動力水槽都有其測試的標準速度。跟表面船隻一樣，因為雷諾數遠低於實船，在船模將有部分是層流，因此在近艏處亦要加紊流器來達到紊流狀態，每個水槽亦都有它自己的方式。然而對於屬具部份特別是控制翼面及舵是有其困難的，因為它們的雷諾數太小了。太大的紊流器將會影響水流而造成額外的紊流器阻力。這也是要採用大船模的理由，而即便採夠大的船模，其控制翼面與舵仍然太小，雷諾數仍很低。

由船模試驗來推估實船之結果是一重要的問題，而表面船隻由於有許多實船的試俾資料，可供修正參考，可以建立較可靠的關係式，但潛艇則非常少有試俾資料可供建立相關的修正關係式，因此船模試驗結果必須非常小心的取用分析，這些問題包括

(a) 支柱對船模試驗的干擾

- (b) 拖航水槽的槽壁效應與興波阻力
- (c) 在船模上紊流的程度，尤其是屬具
- (d) 在實船上所具有額外的阻力，例如來自於壓載艙的水孔、通風孔以及船殼上任何其它的不平順的地方

另外一種方法，也可用來測試深潛的阻力，即利用風洞，因為它可能可以達到一較高的雷諾數，也不會有表面波的影響，也較容易做流場觀測，如圖 4.23 所示



圖 4.23

※近水面之阻力

為了得到潛艇近水面航行的阻力，此時在拖航水槽拖航之船模則不能再倒置，因為必須測量帆罩與水面交互干擾之影響，但這可能導致另一問題，如圖 4.24 所示，支柱對帆罩的干擾問題，因此可採後

插式之方式來支撐船模，如圖 4.25。但此種方式則不能用來做自推試驗，或需要裝螺槳做實驗時用。

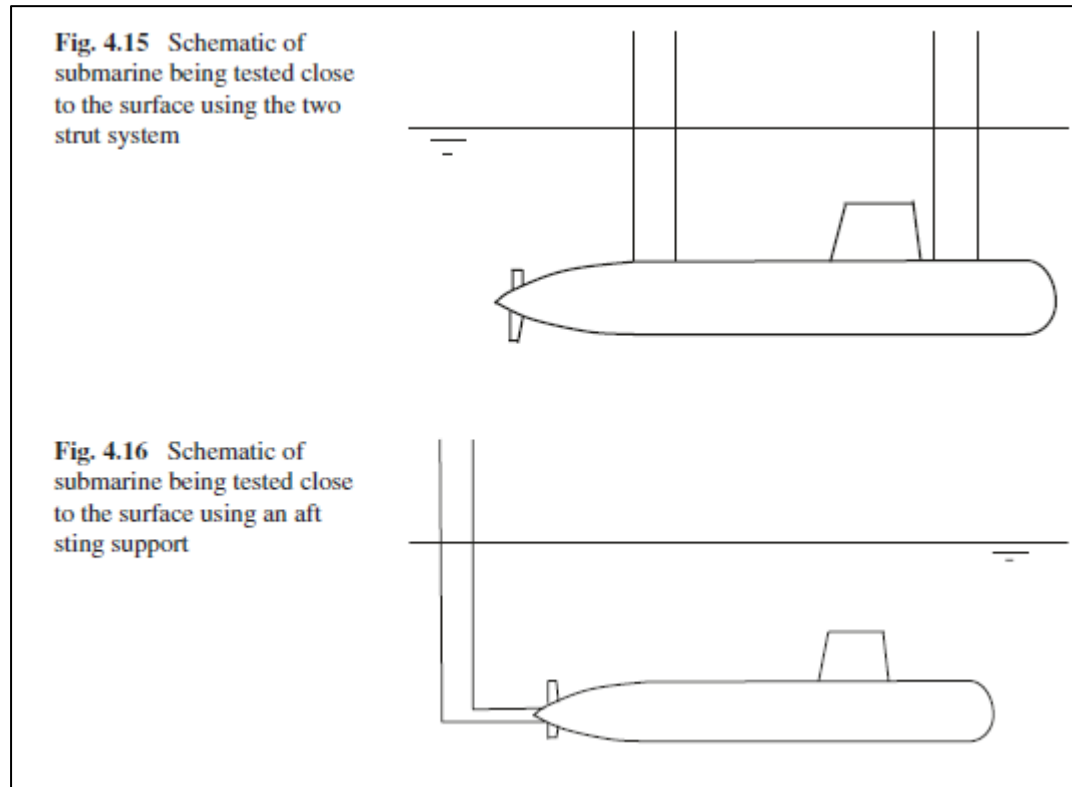


圖 4.24(Fig. 4.15 雙支柱式) & 圖 4.25(Fig. 4.16 後插式)

圖 4.26 為單支柱貫穿帆罩之方式，亦可使用。但此兩種方式的支柱要夠強，保證在作試驗不會變形。圖 4.23 應較適合，因為它可加入螺槳之效應，亦即也可用來做自推試驗。

(相關的潛艇阻力實驗之基本原理及程序，請見附錄一)

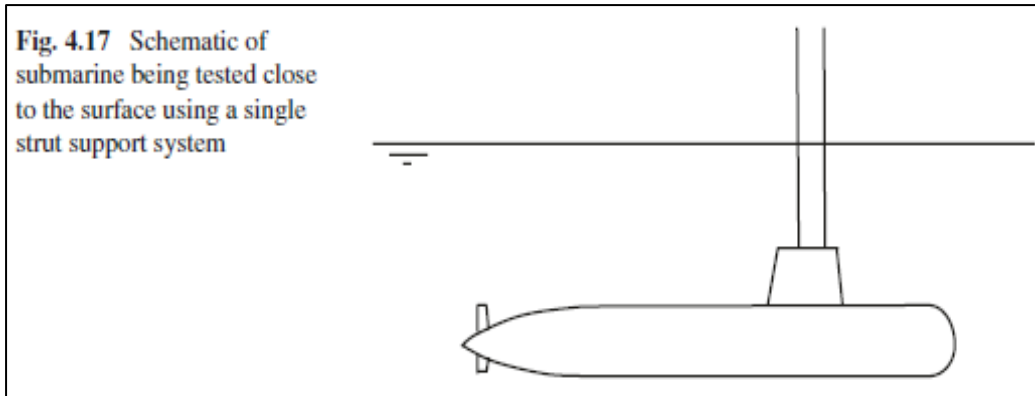


圖 4.26 單支柱貫穿帆罩式

※計算流體動力學(CFD)

利用 CFD 之方法，可以得到船模試驗所不能達到的全尺寸雷諾數，甚至可很有效率的研究流體的性質型態以及屬具的影響，也可以很方便的改變船殼型式做微小變動之影響觀察，但截至目前並沒有一套標準的 CFD 方法來預測潛艇阻力。因此邊界條件的設定、網格的建立以及不同數值模式的方法，都可能產生不同的結果。因此若要比較兩艘不同潛艇的性質差異，必須也要保證是使用相同的 CFD 程序方法。

因為仍有許多不確定性存在於實體模型測試，要找出其與 CFD 結果之關係，再轉至全尺寸預測的餘裕是仍無法預料的。因此要利用 CFD 來找出一套標準的預測程序，恐怕比模型試驗還困難。

※近似方法技巧

除了上述兩種方法，有些近似的潛艇阻力預估方法，可以在構想階段來使用。

※船殼部分

因為船殼主要的阻力是摩擦阻力及形狀阻力。Hughes 的平板摩擦公式，如 (4.3) 式，可用來求平板的摩擦力

$$C_{F_{flat}} = \frac{0.067}{(\log_{10} Re - 2)^2} \quad (4.3)$$

無因次化型式：

$$C_{F_{flat}} = \frac{R_{F_{flat}}}{\frac{1}{2} \rho S V^2} \quad (4.4)$$

其中 $R_{F_{flat}}$ 為平板摩擦阻力， S 是船體浸水面積， V 是船速，計算時，帆罩的浸水面積應考慮進去，但注意到帆罩與船殼**接合面**的面積應扣除。對於翼型帆罩，這可能不重要，但對於混合式帆罩 (blended style sail) 這必須考慮進去，因為它**接合面積較大**會造成顯著的不同。若潛艇的浸水面積在初步設計階段不知道時，可以下式 (4.5) 來初估

$$S_{hull} \cong 2.25D(L - L_{PMB}) + \pi D L_{PMB} \quad (4.5)$$

第一項是用於近似前、後體的浸水總面積，第二項為平行舢舨體的浸

水面積（假設為圓截面，若有外罩要另外加入），此公式不包括帆罩的接合面的面積。

然而，在前面我們已提過，表面摩擦總阻力還包括船舶摩擦形狀阻力，通常可用 ITTC' 57 公式來預測((4.6)式)

$$C_{F_{form}} = \frac{0.075}{(\log_{10} Re - 2)^2} \quad (4.6)$$

此無因次化之摩擦阻力包括了摩擦形狀阻力之量

但近來 CFD 研究數據中發現對於上式，因為 L/D 的影響必須加入一些餘裕(Leong 2017)，因此對潛艇而言，下列無因次摩擦阻力可較佳近似

$$C_{F_{form}} = \frac{0.075}{(\log_{10} Re - 2)^2} \left(1 + 0.3 \frac{D}{L}\right) \quad (4.7)$$

除此之外，由於潛艇表面的不光滑或一些表面不平順，如船殼或外罩或水孔、通風孔等，需要加入一些餘裕，這些非常難估計；表面船隻通常加 0.0004，但這不包括壓載艙的通風孔等之額外阻力。

形狀或壓力阻力(C_p)通常不大，可以以下列黏性壓力阻力之函數來表示((4.8) 式)

$$C_p = [\xi_{hull} + \xi_{PMB} \left(\frac{L_{PMB}}{L}\right)^{n_{PMB}}] \left(\frac{L}{D}\right)^n C_{F_{form}} \quad (4.8)$$

其中 L_{PMB} 為平行舢舨體的長度，其它相關係數可由表 4.1 依不同船型查出，上式中刮號中第一項是不包括平行舢舨體的壓力阻力，第二項是平行舢舨體的壓力阻力。

表 4.1

ξ_{hull}	4
ξ_{PMB}	15
n_{PMB}	3
n	-1.8

上式(4.8)適用於軸對稱體，其他的形狀或外罩，必要的話，必須再另做修正

對於一全前體($L_{PMB} > 2.2$)，其壓力阻力將比公式(4.8)估算的值大，所增加在前體之壓力阻力可以公式(4.1a)來估算。

外罩之摩擦阻力可以與船殼相同的方式來求得，即額外的外罩浸水面積應加入計算。對於在外罩上額外的通風孔，艙區及不規則處，都會增加摩擦阻力。外罩的壓力阻力與外型有關，然而一典型的外罩如圖 4.27，其增加的壓力阻力約為軸對稱型的 15%



圖 4.27

船殼的總阻力可以下式(4.9)來得到

$$R_{T_{hull}} = \frac{1}{2} \rho V^2 S_{hull} \left[C_{F_{form_{hull}}} + \Delta C_{F_{form_{hull}}} + K_c C_{P_{hull}} + \Delta C_{P_{bow}} \right] \quad (4.9)$$

其中 S_{hull} 為船殼浸水面積包括外罩但不含與帆罩相交部分， K_c 為外罩因子，如表 4.2

表 4.2

Type of casing	Casing factor, K_c
No casing	1.0
Simple casing, as Fig. 3.2	1.15

※帆罩

因為與船殼一起，帆罩主要的阻力分量為表面摩擦及形狀阻力所用之摩擦阻力係數與船殼相同(4.3)式，但雷諾要以帆罩之弦長來計算，此為平板公式，而形狀阻力係數依 Leong(2017)以 CFD 方式可得

$$C_{F_{form_{sail}}} = \frac{0.08}{(\log_{10} Re - 2)^2} \quad (4.10)$$

上式適用於 $\left(15\% \leq \frac{t_{sail}}{c_{sail}} \leq 40\%\right)$

除此之外，由於帆罩並不平順(smooth)，必須再加入一餘

裕 $\Delta C_{F_{form_{sail}}}$ ；對表面船隻，一般取 0.0004 來彌補船體表面粗

糙度之因素，但這樣仍沒有考慮到如通風口等所增加之阻力

帆罩之壓力阻力可以以公式(4.11)

$$C_{P_{sail}} = 10 \left(\frac{t_{sail}}{c_{sail}} \right)^{1.75} C_{F_{form_{sail}}} \quad (4.11)$$

$$(15\% \leq \frac{t_{sail}}{c_{sail}} \leq 40\%)$$

則帆罩之總阻力為

$$R_{T_{sail}} = \frac{1}{2} \rho V^2 S_{sail} [C_{F_{form_{sail}}} + \Delta C_{F_{form_{sail}}} + C_{P_{sail}}] \quad (4.12)$$

(S_{sail} 為帆罩之浸水面積)

對於混合式帆罩，其形狀壓力阻力與其外型有關，其值較大，而且混合型帆罩之前向投影面積較大。即使如此，此項阻力仍然很小。

※控制翼面

對一薄流線型形狀其最大截面在導緣後 30%處的翼面，其總阻力可
以下式(4.13)得之

$$C'_{T_{cs}} = [2 + 8\left(\frac{t_{cs}}{c_{cs}}\right) + 120\left(\frac{t_{cs}}{c_{cs}}\right)^{4.5}] C_{F_{form_{cs}}} \quad (4.13)$$

其中 $C'_{T_{cs}}$ 以平面型面積為基礎之阻力係數， t_{cs} 為控制翼面厚度， c_{cs} 為控制翼面之弦長， $C_{F_{form_{cs}}}$ 為包括摩擦型狀阻力之摩擦係數，如下

$$C_{F_{form}_{CS}} = \frac{0.08}{(\log_{10} Re - 2)^2} \quad (4.14)$$

Re 為控制翼面之雷諾數

(4.13)式以平面面積計算而非潛水面積，是因為在設計之初始階段後者可能還不知道

則控制翼面之總阻力為

$$R_{T_{cs}} = \frac{1}{2} \rho V^2 A_{plan} C'_{T_{cs}} \quad (4.15)$$

其中 A_{plan} 為控制翼面之平面型面積

所有控制翼面之總阻力則為各控制翼面值的總和，其阻力可以

(4.16) 式來估計

$$R_T = R_{T_{hull}} + R_{T_{sail}} + \sum R_{T_{cs}} \quad (4.16)$$

※交互影響

由於潛艇外部各裝置在水流中會產生互相干擾之影響，這部分也必須要考慮進去，但相當複雜。

第五章 推進

※推進器與船殼之交互影響

※流進推進器之水流

任何推進器的效率與聲學性能都會受到流進水流之影響。這些影響因素包括船殼外型，特別是後體型狀與艉錐角、任何外罩的大小及外所形、帆罩的大小與外型、以及後部屬具的形狀與大小等。

推進器放置於潛艇後端運作與作單獨實驗方式時遭遇之水流不同。

這是由於潛艇之跡流影響造成，基本上此跡流與表面船隻相似。

流進推進器之跡流的影響，如圖 5.1 所示，圖中顯示出等速度的圍綫。其中由此圍綫往船體內部的速度比在圍綫上的速度低，往船體外部的速度則比較高。

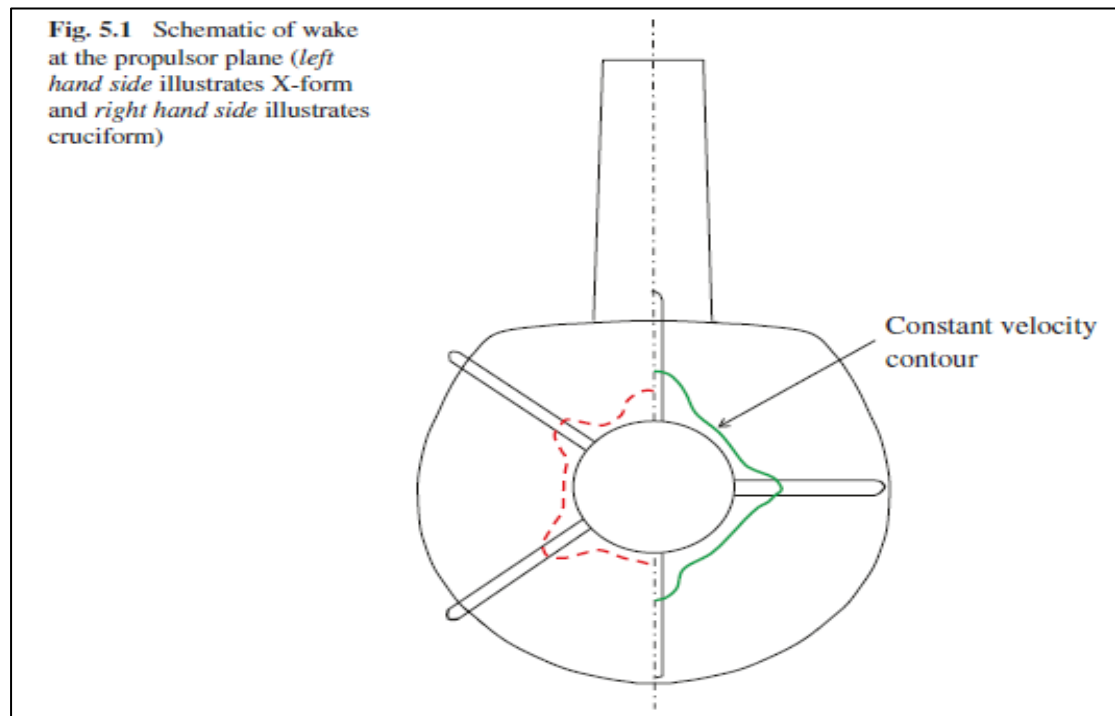


圖 5.1

在圖 5.1 中，左手邊的圖為 X-型的結果，其等速度綫以虛綫表示。由圖顯示在上方之速度稍為較低，這是由帆罩的跡流所影響。同樣地，在與兩個翼面上的速度也較低。（*註：當等速度圍綫越往船體外代表相對於比其他越往船體內處同半徑位置點的速度低）

右手邊之圖則為十字型之結果。其等速綫以實綫表示。由於帆罩與上舵的影響，在其頂部有一相當低的速度。而在水平穩定翼的跡流邊上之速度亦較低。在底部舵面上的速度也較低。

水流速度的改變對螺槳葉片之影響，顯示在圖 5.2。進入葉片的合成速度是由軸向速度(V^*)與在葉片上的圓周速度($\pi n D_{local} - V_\theta$)組成。其中 n 為轉速， D_{local} 為局部區之直徑。 V_θ 為跡流中之局部切線速度

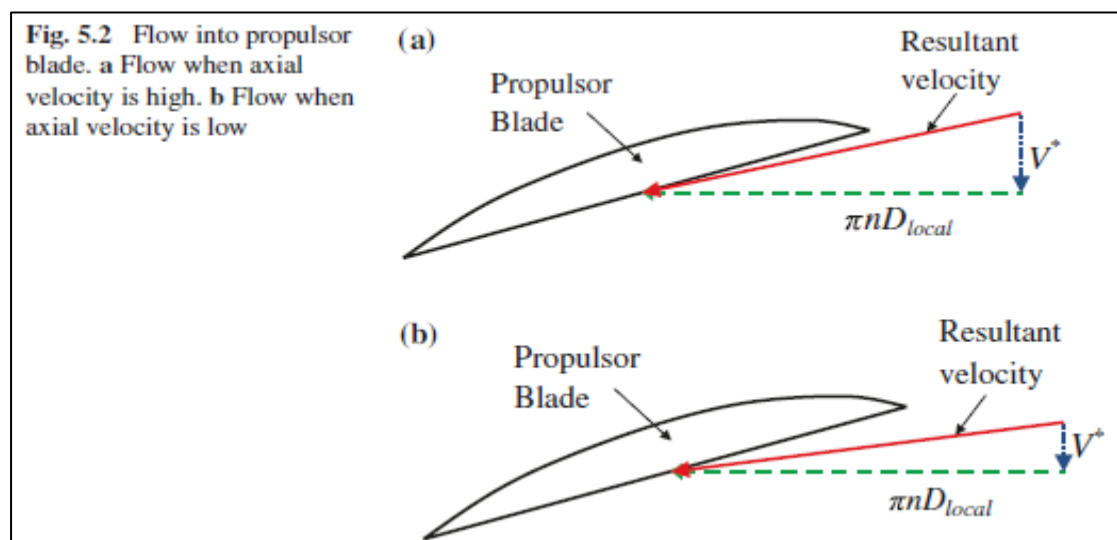


圖 5.2

圖 5.2a 為局部軸向速度之例子，其速度相當高。此處代表在圓周上

的一個角度的位置，其跡流不大。也可看出其合成速度相對於葉片的角度不大，這是設計的狀況。而圖 5.2b 代表一較低局部軸向速度的例子，即代表對應在某一屬具之圓周上一個角度位置的軸向速度。在這個例子合成速度與葉片的角度(攻角)與圖 5.2a 之例子大很多，因此會產生較大的升力於葉片上。

因此在葉片上的力會隨葉片圓周位置而不同，而引起一振動，此振動頻率與轉速、葉片數以及高跡流區域之數目有關。它會傳給軸而產生相當大之振動給整個作動系統，甚至船殼。因此在選螺槳擇葉片數時要小心，此跟圓周跡流型態有關。

通常實用上會把流入推進器的跡流當成螺槳設計的一部分。一般而言，有動力(powered)與無動力(unpowered)的跡流量測都要作，以便得到軸向跟切綫方向的分量。此量測可採用雷射都卜勒測速儀，於水中或空氣中均可。另一種方法亦可使用 CFD 方法來得到。

***跡流量化方式**

跡流周圍變化量的大小，可以兩種方式來量化：(1)變形係數(Distortion Coefficient, Dc)，(2)跡流目標函數(Wake Objective Function, WOF)。兩種方法都是發展來評估跡流場中的變形，使得比較後體對推進器的影響成為可能。

DC 方法是以一所給半徑的跡流平均值的圓周率變化量來做考量，對每一個半徑其平均軸向跡流 ($\bar{w}$) 可以一個圓來積分決定出，則變形係數(Dc)即為在此半徑，以它的平均值為基礎之跡流標準偏差，
i. e. 式(5. a)

$$Dc = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (w_i - \bar{w})^2}{n-1}} \quad (5. a)$$

量測點的數目 n 要夠多到使 Dc 值與數目無關，Dc 可進一步繪製成一與半徑有關之函數圖，如圖 5. 2-1，潛艇幾何形狀(如帆罩或翼板設計)對變形係數在幅向分布的影響可以很清楚地看出來。這使得船殼幾何形狀對進入推進器的水流可以量化。

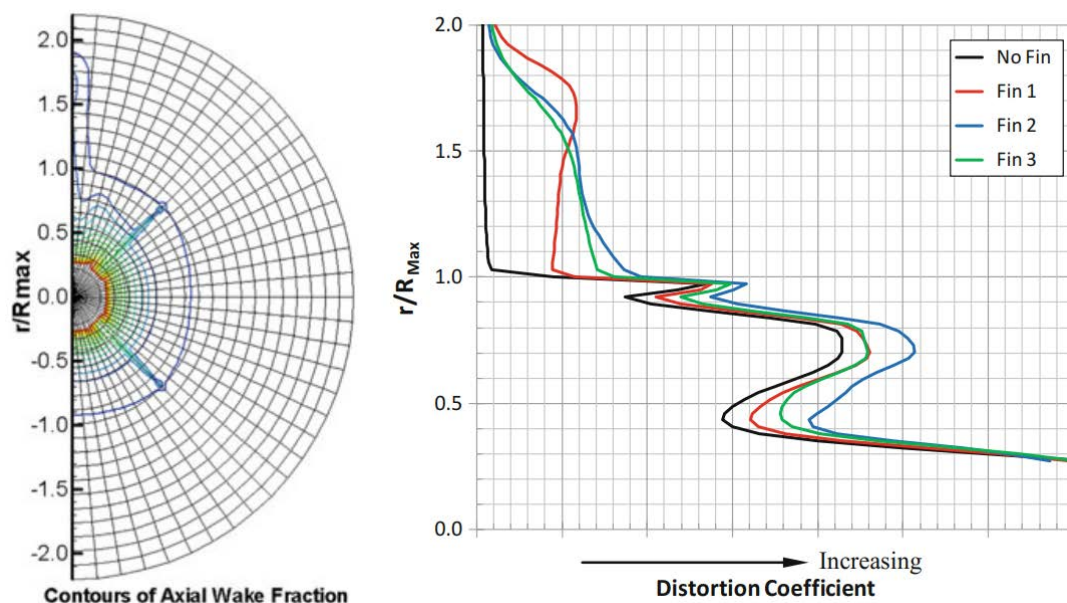


圖 5. 2-1

另一替代的方法是利用 WOF 方法，這方法是以流體相對於螺槳葉片的區域角度變化量 (β) 為基礎，如式(5. b)

$$\beta = \arctan\left(\frac{V^*}{\pi n D_{local} - V_\theta}\right) \quad (5. b)$$

式(5. c)為跡流目標函數之定義

$$WOF = \frac{\int_{r=hub}^{r=tip} \oint_{\theta} \left| \frac{\partial \beta}{\partial \theta} \right| f(\theta, r) d\theta r dr}{\int_{r=hub}^{r=tip} \oint_{\theta} f(\theta, r) d\theta r dr} \quad (5. c)$$

其 f 為一權重函數*van der Ploeg A (2012,2015)，用來調整螺槳圓盤一特殊區域之權重

注意到由式(5. c)得到之 WOF 是一整個螺槳圓盤的單一值。若權重函數沒有使用，則跡流目標函數可以用式(5. d)來計算

$$WOF(r) = \oint_{\theta} \left| \frac{\partial \beta}{\partial \theta} \right| d\theta \quad (5. d)$$

此式可以繪出 WOF 與半徑之函數圖

*van der Ploeg A (2012) Objective functions for optimizing a ship's aft body. In: Proceedings of the 11th international conference on computer and IT applications in the maritime industries (COMPIT), Liège, Belgium, pp 494–507, Apr 2012

*van der Ploeg A (2015) RANS-based optimization of the aft part of ships including free surface effects. In: Proceedings of the international conference on computational methods in marine engineering, MARINE 2015, 15–17 June, Rome. pp 242–253

※跡流

跡流的定義如下：

$$w = \frac{V - V_a}{V} \quad (5.1)$$

此定義為泰勒跡流， V 為船速， V_a 為推進器的前進速度

此泰勒跡流與艏錐角及螺槳直徑對船體直徑之比例($D_{propeller}/D_{hull}$)有

關，如圖 5.3。注意此圖用的是全錐角(即半錐角的兩倍)

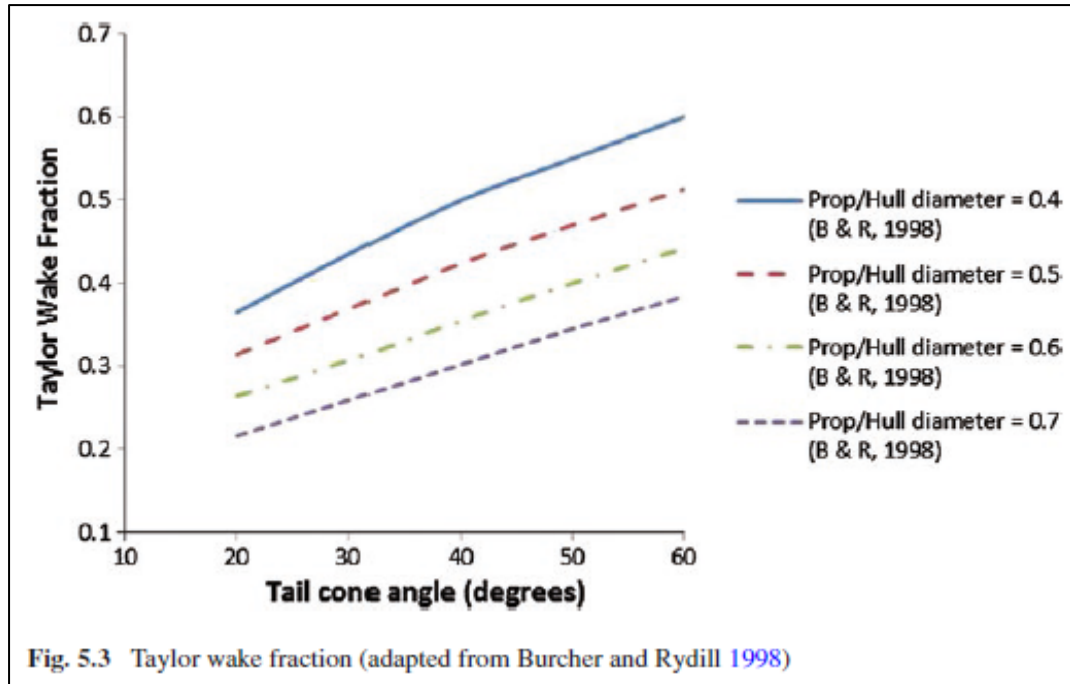


圖 5.3

※推減係數

推進器另一影響，即會在艉產生一低壓，產生一後推力使得原推力減少。以下為推減係數(t)之定義

$$t = \frac{T - R_T}{T} \quad (5.2)$$

其中 T 為螺槳推力， R_T 為船殼總阻力

此推減係數亦與艉錐角及螺槳直徑與船體直徑之比例($D_{\text{propeller}}/D_{\text{hull}}$)

有關，如圖 5.4 所示。(其艉錐角指全艉錐角)

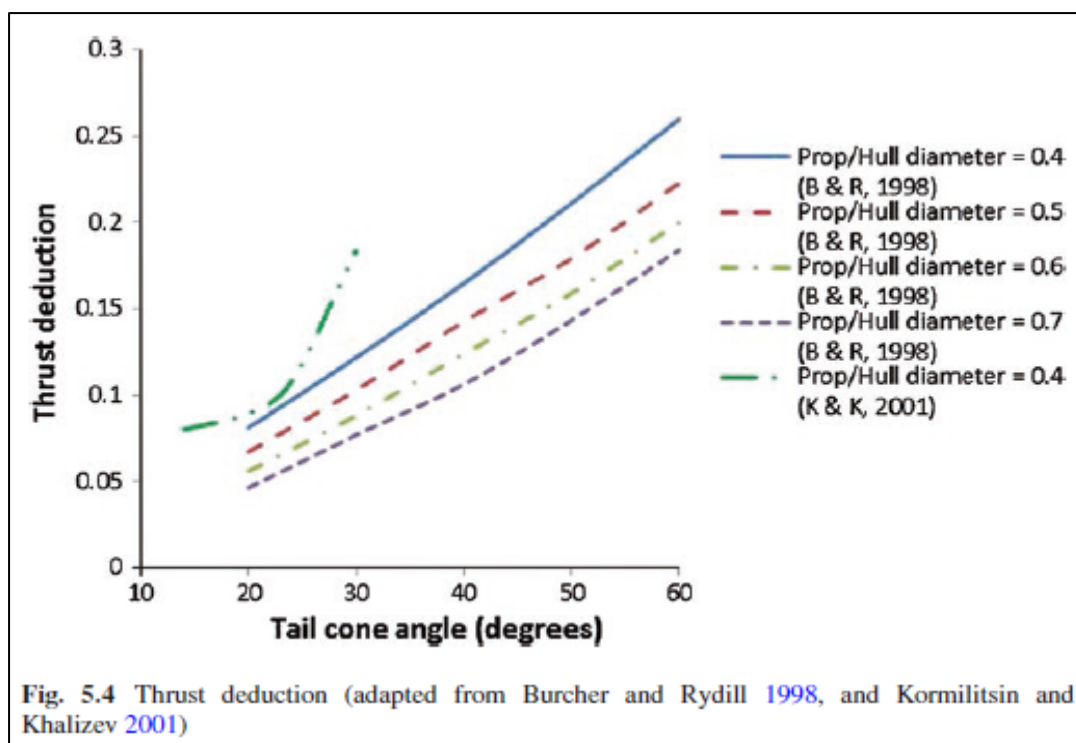


圖 5.4

※船殼效率比

船殼效率 η_H 為有效馬力 ($P_E = R_T \times V$) 與推力馬力 ($P_T = T \times V_A$) 之比，它並不是一個效率而是一個比例，因此可能大於 1，定義如下：

$$\eta_H = \frac{P_E}{P_T} = \frac{(1 - t)}{(1 - w)} \quad (5.3)$$

P_E 為有效馬力， P_T 為推力馬力， t 為推減係數， w 為泰勒跡流

利用圖 5.3 與圖 5.4 之數據可得到船殼效率，如圖 5.5。可以看出它大都大於 1，這是由於高跡流低推減係數的緣故。在初步設計階段，此圖可拿來參考估計，但最終還是要做自推試驗。

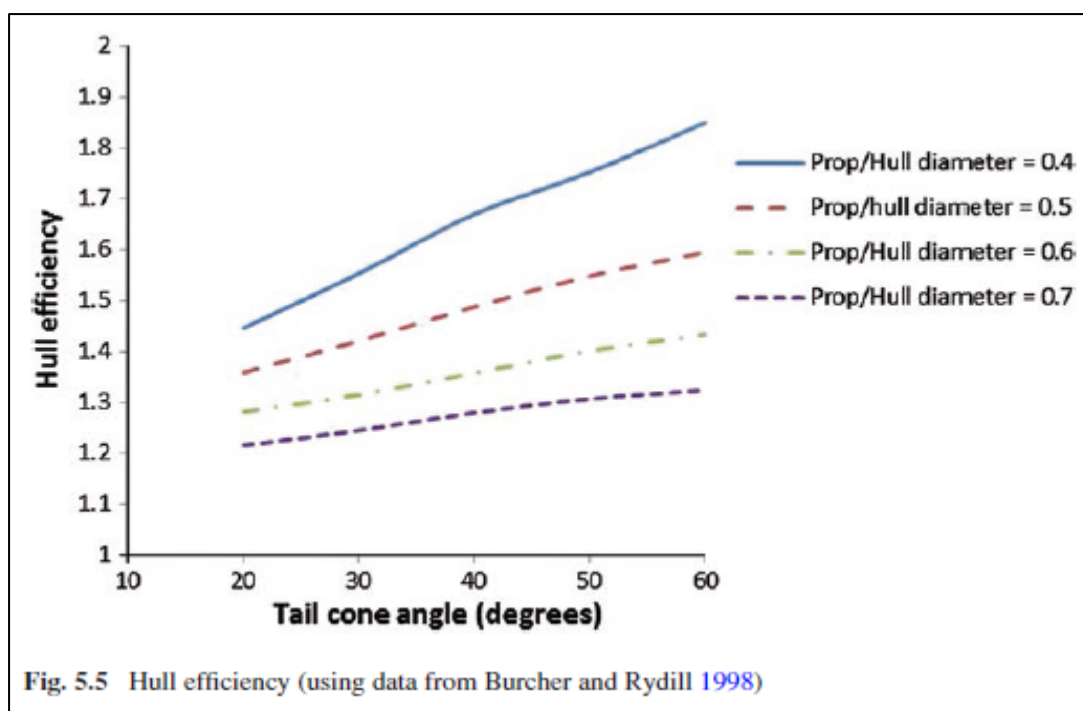


圖 5.5

※相對旋轉效率

相對旋轉效率 η_R 為自推螺旋槳效率與單獨螺旋槳效率之比。在軸線上之潛艇單螺旋槳的 η_R 與其後體形狀及屬具有關，也與螺旋槳直徑與船殼直徑比 ($D_{\text{propeller}}/D_{\text{hull}}$) 有關。對一螺旋槳直徑與船殼直徑比在 0.4~0.7 之間，全艤錐角在 $20^\circ \sim 50^\circ$ 時，其 η_R 約為 1.05。

此表示螺旋槳放在潛艇後面運作的效率比單獨螺旋槳高。部份的原因是屬具使水流變得較直的效應，這樣可以減少因為渦漩造成的損失，也可置放一個定子(stator)在螺旋槳前端，可進一步減少旋轉損失。

對小螺旋槳直徑與大艤錐角的狀況其 η_R 值可減至 1 以下。當螺旋槳直徑遠大於船殼直徑，且艤錐角小時，其 η_R 趨近於 1，因為此時之螺旋槳相當於在單獨螺旋槳的狀態。

※準推進係數 (Quasi Propulsive Coefficient) (QPC)

準推進係數是有效之馬力(P_E)對傳到螺槳之馬力($P_D=2\pi nQ$)之比，是由不同的效率組成如下之(5.4)式

$$QPC = \eta_H \eta_O \eta_R \quad (5.4)$$

其中 η_H 是船殼效率， η_O 是螺槳單獨效率， η_R 是相對旋轉效率。

一般單螺槳之潛艇的 QPC 在 0.8~1.0

※具單螺槳的軸對稱船殼

大部份現代傳統潛艇都是同軸單螺槳推進，如圖 5.6。這種安排使它可以有一低轉速的最佳大直徑螺槳，以產生高效率。

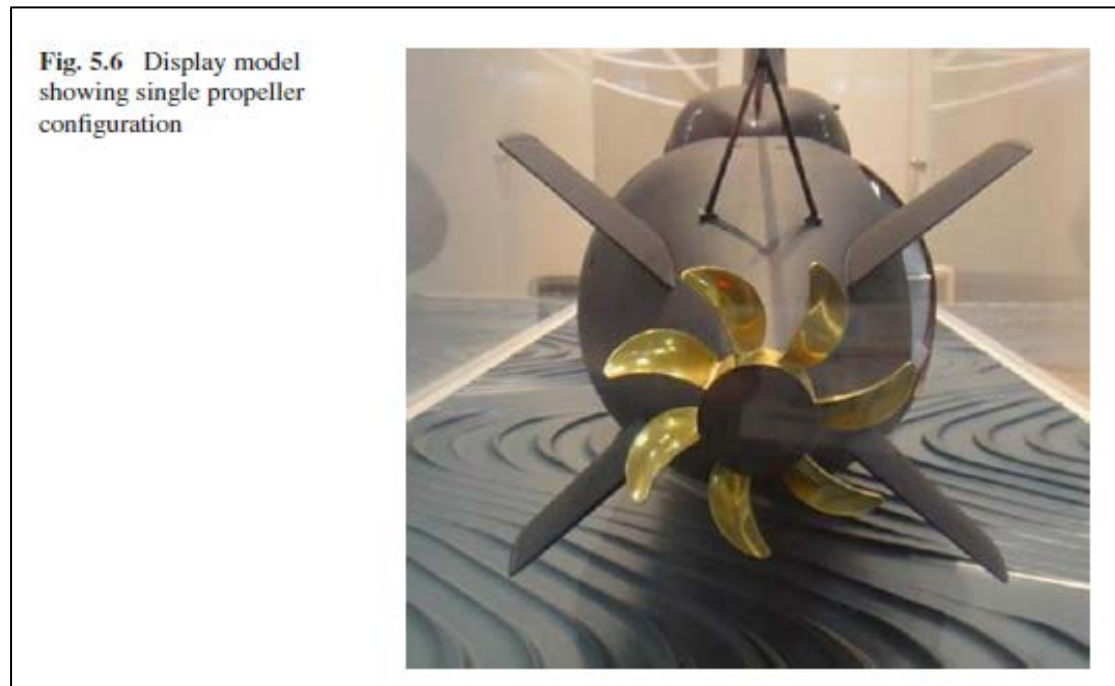


圖 5.6

潛艇螺槳的初步設計與表面船隻相同，也有一系列之數據可使用。

螺槳的主要尺寸包括(a)葉數(b)直徑(c)螺距(d)轉速(e)葉片面積。

一潛艇螺槳設計的首要需求為葉數的選擇，這是基於要使螺槳在艤後跡流中運作時，要使由外力產生的噪音能達到最小。在圖 5.1 中所看到的十字型艤，由於翼板、帆罩、外罩的關係，通常在四周圍有四個區域流體會減少。因此四葉螺槳的每個葉片將會同時承受縮減流體的影響，而引起顯著的振動及噪音。因此四葉倍數的螺槳均不佳，應該避免。而對 X 型艤的螺槳，則必須避開五葉倍數的螺槳。

理想上，葉數越高越佳，至少有要一主要的葉數來避免可能的共振，但太高的葉數在實際製造上，有許多可行性的顧慮，因此通常實用上採七葉。

單螺槳潛艇的螺槳、直徑是不受限制的，因此它可以就它需要的推力來選擇最佳的直徑，此可以由一既有的螺槳系列，根據所給的轉速來選擇。而螺矩也就可以由此系列之數據來決定。其程序與表面船隻相同。

雖然潛艇轂(hub)的尺寸通常比表面船隻大很多。但由表面船隻發展出來的螺槳系列，通常也可提供潛艇令人滿意的基本螺槳設計，也可作不錯的效率估計以及適當的概念設計等。這是因為在轂處的螺槳速度分布比葉片其它位置的速度低很多，因此它對整體的推力與扭矩的貢獻很小。但若有潛艇的系列數據，那當然是最好的

設計參考。

所需要的葉片面積要選擇可避免空泡的。葉片面積太小將引起太大的負荷於葉片上，而使葉片抵抗空泡的性能變差。

當潛艇潛得越深，空泡就不再是問題，因為壓力變大，空泡不會發生。但當接近水面時，對一不好的葉片面積，空泡問題就成了大問題，特別是在非設計狀況下，例如在加速迴旋或剎俾時。通常對一沒有損傷的潛艇螺槳，在操作狀況下，要避免空泡並非難事。

即使選了多葉的螺槳，每個葉片也將在跡流中運作。而由於在跡流中，四周都會變化造成其承受之負荷也會變化，如此就會造成振動與水中噪音。因此為了克服此現象，通常採用高歪斜螺槳，如圖 5.6。此表示只有一個葉片的截面在任何時間都是遇到低的軸向流，使得此種整體影響減低。然而利用此多餘的歪斜要小心，英避免葉片上不必要的彎曲，以及注意在使用倒俾推力時，產生的在葉片上的大應力。

只要螺槳的尺寸一決定，就可以考慮設計外貌以及如何進一步減少流體噪音。例如採用比表面船隻設計較厚的截面形狀，通常可避免吸力及壓力邊的空泡。為了避免葉尖渦旋(Tip-Vortex)及轂端渦旋(hub-vortex)產生之空泡，潛艇螺槳通常會減少在葉尖及轂的負荷。同時在尾殿緣(trailing edge)區需要小心設計來減少尾殿緣

噪音。單純地減少鳴音(singing)是沒有效的，必須考慮整個噪音的頻譜，因此潛艇螺槳通常不提供防鳴音(anti-singing)的尾殿緣設計。

為了減少旋轉損失，在螺槳前方可加一前旋式定子(pre-swirl stators)。這些定子設計必須與螺槳設計一起考慮，特別是定子數目的選擇以及屬具、定子與螺槳之間的干擾關係必須小心考慮。

圖 5.7 為 HMS Trafalgar 公司的潛艇螺槳實體照。



圖 5.7

※具單噴射泵之軸對稱船體

噴射泵(pumpjet)是在一個導罩內由兩個或更多的葉片列組成，其葉片可能是轉子(rotor)或定子型。其設計目標之一是用定子來移走由轉子產生的轉動流。這個轉動流大都出現在單螺槳後面，代表著流體動力的損耗，因為能量用於轉動水流而不是推進船隻，因而減低

了效率。圖 5.8 為一具噴射泵之潛艇在 SSPA 空蝕水槽之實體照。

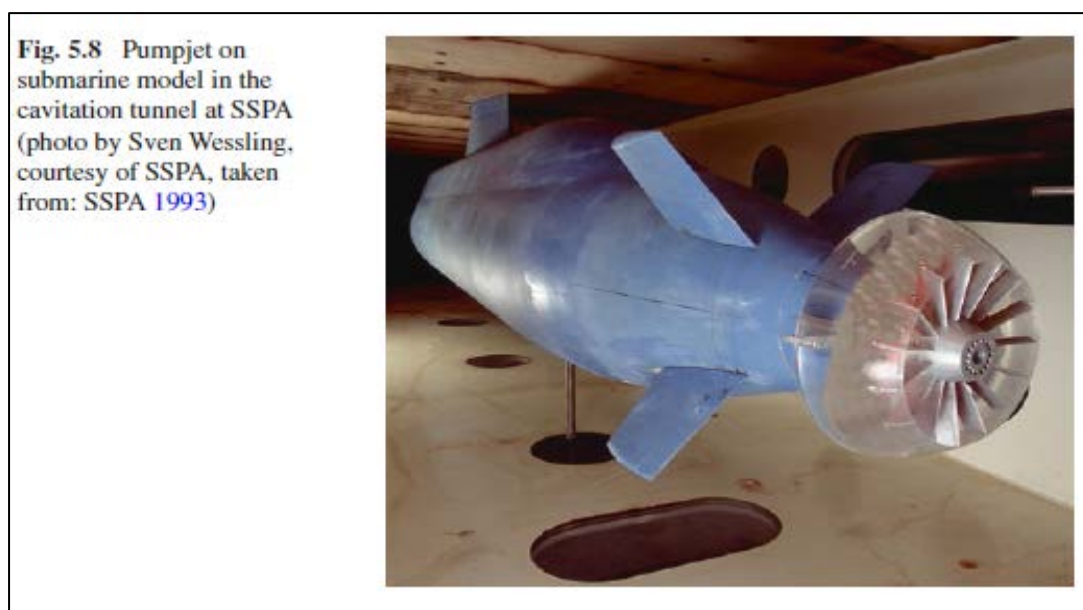


圖 5.8

噴射泵設計的主要動機是要用來減少潛艇之流體噪音，但也有人說它也具有較高的效率。

噴射泵提供了一種控制葉片上之水流速度的方法，使得我們能夠直接處理空泡性能，讓它能達到有效率。此外，導罩扮演了葉片的端牆(end wall)角色，因此使它們的葉尖處沒有負荷，而可以比沒導罩推進器的直徑小。如此在葉尖處之速度可以較小。但其間隙就相當重要，因為在這個地方可能發生空泡，理想狀況是間隙越小越好。

一噴射泵之定子列可以設計在轉子列之後，稱為後旋式(post-swirl)也可以在前面稱為前旋式(pre-swirl)，如圖 5.9 所示。後旋式的噴射泵需要額外的支柱來支持導罩，如圖 5.9a。

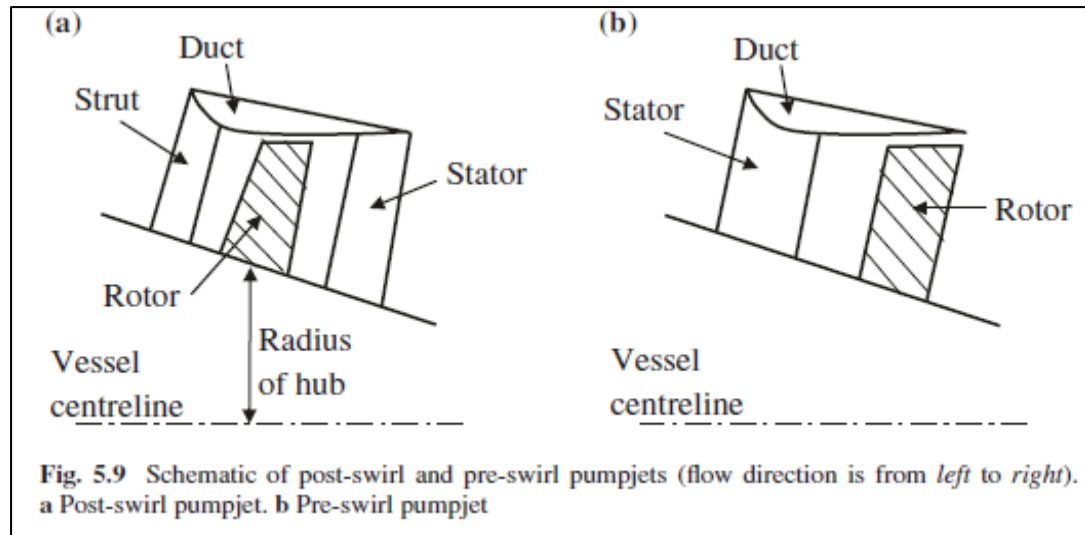


圖 5.9

定子在後旋式噴射泵中可以貢獻 25%的總推力，並減少轉子所需的負荷，因此減低了空泡的傾向。此外導罩可設計來減低流速以增加壓力，兩種方式均可用來控制空泡，此對潛艇在高速區是一特別重要的問題。

另外，在前旋式噴射泵中的定子會多出一阻力，此代表在轉子上的實際推力將大於噴射泵的總推力，降低了它的空蝕性能。因為在定子上的阻力關係，前旋式一般比後旋式的效率低(雖它們的效率可能跟螺槳一樣或甚至更好)；在一後旋式的噴射泵中，轉子直接在屬具(帆罩與後控翼)的跡流中運作，在葉片率定頻率(rated frequencies)會引起窄頻輻射噪音，可能會很顯著。

對於一前旋式的噴射泵，其定子會將屬具產生的跡流在到達轉子之前過濾掉，使其變成較安靜的推進器。而且分佈在定子上面的

流速比後旋式的較小。因此若潛艇在一空蝕不成問題的深度中航行，前旋式的噴射泵可比後旋式的安靜。

噴射泵也可設計兩列定子，在轉子前後各一列。

基本上，噴射泵也可能更多列的轉子或也可使用反轉轉子來移除旋轉流，這與魚雷或表面船隻使用的方式一樣。

噴射泵通常在一列或多列中有許多葉片。葉片的數目可能是一個避免共振的主要數目，每列避免有相同數目之葉片。

因為葉片數是影響噴射泵性能的關鍵，尤其是聲音性能。任何服役中潛艇上的葉片數都是高度機密。

雖然直徑較小，噴射泵通常比相對等的螺槳重很多，因為它多了許多附件，包括導罩與定子。

在噴射泵上之葉片通常都是個別製造來接到轂上，這比一固定螺距螺槳所需要的轂更複雜，此表示轂可能需要一較大的直徑。因此一個噴射泵可以裝在潛艇的更前方艇身直徑較大的地方。此外噴射泵因較重，若放置太後面會造成問題，這也是要把它放置比傳統螺槳較前面的另一個理由。

影響空泡性能的主要參數是葉片面積。面積太小會造成葉片上之負荷太大，使空蝕性能變差。若直徑小，則很難提供一有效的葉片面積，因此所需要的葉片面積對噴射泵的直徑設計有主要的影

響。

一更重要的參數是轉子葉尖速率。較高的葉尖速率將造成較大可能性的葉尖渦漩空泡，此通常是影響空泡開始速率(CIS)的空泡型態。

噴射泵所需之直徑將比同等級的螺槳小，因為導罩提供的端壁效應使其轉子葉尖有較高的負荷。

低推進器旋轉速率可改善空泡與聲音性能；然而低旋轉速率會導致大直徑之需求。因此旋轉速率與直徑的選擇是一種權衡考慮的問題。

導罩設計可以是加速型或減速型，兩種極端的導罩型如圖 5.10 所示。對一加速型的導罩入口之面積大於出口面積，減速型則相反。

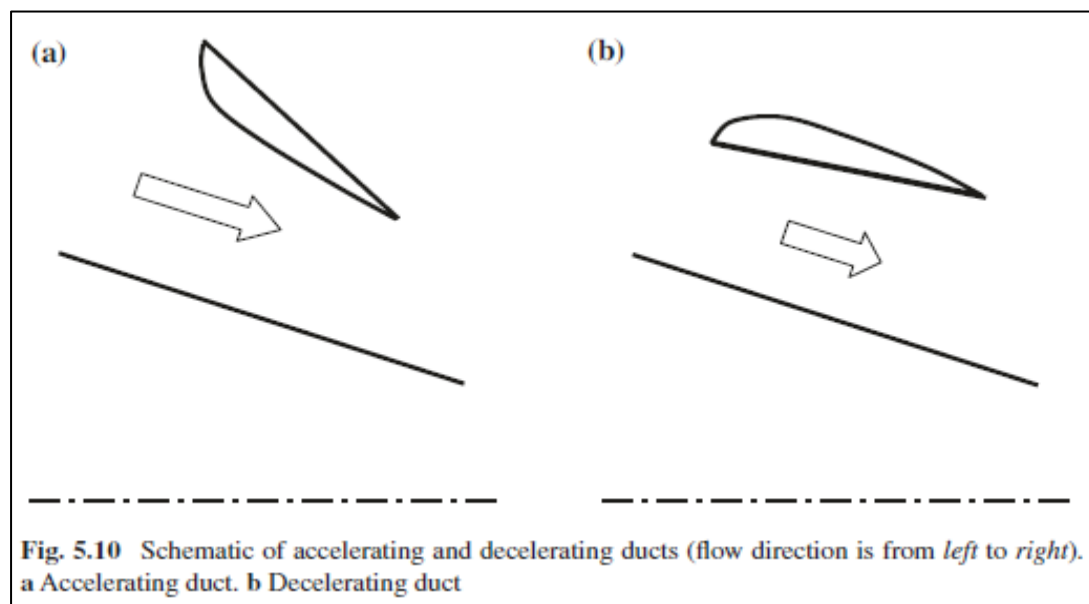


圖 5.10

加速導罩的設計，可提供一正推力增加轉子與導罩混合的效率。這種概念通常用於在低速需要高推力的表面船隻，例如在從事拖航狀況。另一方面，低推力高速度之船是低螺槳負荷，通常無法由加速導罩得到好處。

當裝置加速導罩時，葉片上的水流速度較高，將造成低壓，因此會降低空泡性能。而減速導罩則相反，會有較佳之空泡性能。但導罩會增加阻力，因此造成需要較大的葉片推力，使效率降低。

最佳導罩外型與推進器之負荷 B_p 有關，其定義如(5.5) 式

$$B_p = \frac{NP_s^{0.5}}{V_a^{2.5}} \quad (5.5)$$

其中 N 為轉速(rpm)， P_s 為傳遞到軸之馬力(hp)， V_a 為前進速度(knots)。對表面船隻而言，對導罩有利的 B_p 要大於 40。而潛艇通常遠小於這個值。此代表從流體動力的觀點來看，導罩本身並非是一優點。

定子與轉子的葉片之展弦比比傳統單獨螺槳小很多。它們完全沒有傳統潛艇螺槳所具有一樣的歪斜程度。

一個好的噴射泵設計不會導致裝置後方有旋轉流。而旋轉流代表能量損失，因此使得噴射泵有機會比一單獨螺槳效率高。在另一方面，導罩與定子會有額外阻力，會使效率降低。對一單獨的後旋式噴射泵的設計的效率引用值大約在 0.833。一般噴射泵在軸對稱

體後面的跡流中運作，會有較高的效率。

噴射泵的倒俾性能比傳統螺槳差很多。其中原因之一是因為導罩設計，特別是尖銳的尾殿緣(trailing edge)。對需要良好倒俾性能的表面船隻的導罩設計，如拖船，其尾殿緣為圓滑型，但此會減少前進狀態之效率。

※其它推進器型式

5.4 Other Configurations

5.4.1 Contra-rotating Propulsion

Contra-rotating propulsion consists of two propellers rotating in opposite directions on the same shaft. The aft propeller recovers some of the rotational energy imparted by the forward propeller. Thus, in principle, the propulsive efficiency can be much greater than for a single propeller.

Contra-rotating propulsion was used successfully on the USS Jack from 1967 to 1989, demonstrating a 10% increase in propulsive efficiency (Dutton 1994).

As contra-rotating propulsion spreads the load over two propellers the blade loading is decreased, and hence cavitation is reduced. In addition, the propulsor rotational speed and/or the diameter can be reduced, again improving cavitation performance. However, not so much is known about the non-cavitating acoustic performance of contra-rotating propulsion, and it is not commonly used for submarines.

On the other hand, contra-rotating propulsion has been common in the past for torpedo propulsion, as shown in Fig. 5.15. This is partly due to the reduction in the rolling moment that would be caused by a single propeller. However, modern torpedoes tend to use pumpjet propulsion

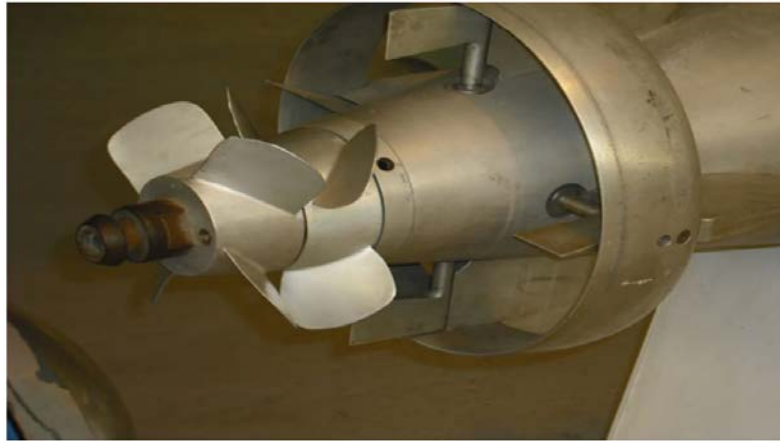


Fig. 5.15 Contra-rotating propellers on a MK 44 Torpedo

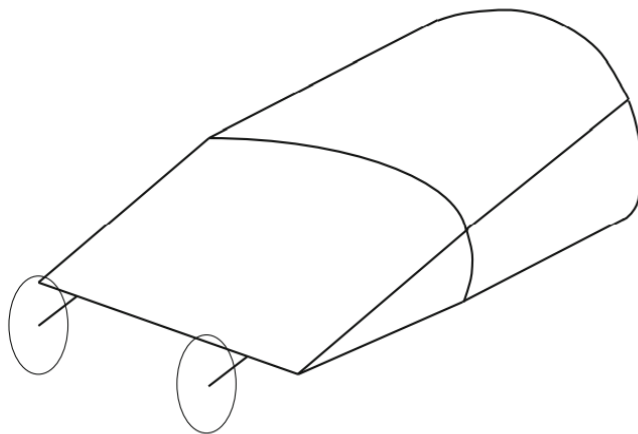
5.4.2 Twin Propellers

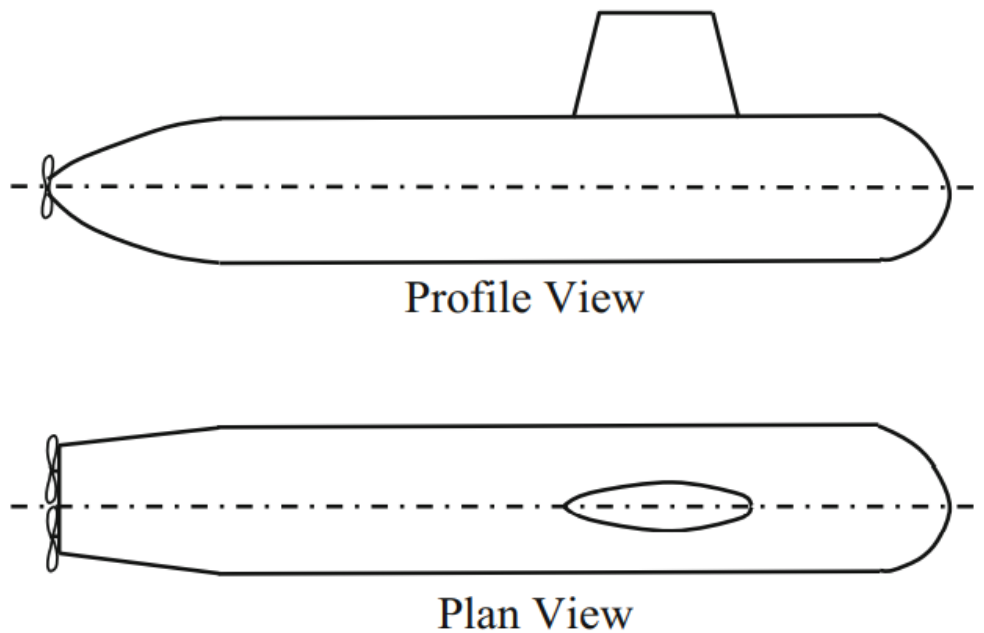
In some cases it is desirable to use twin propellers, which also improves the redundancy of the propulsion system. Examples of submarines which use twin screw propellers are the Russian Delta and Typhoon classes.

Changing from a single shaft to a twin shaft power plant of the same total output will result in an increase in nominal displacement of 10–20% (Kormilitsin and Khalizev 2001).

As with all propulsion types, the inflow to the propellers is vital to their acoustic performance. Thus, when twin propellers are being used on an axisymmetric submarine the inflow can be improved by flattening the after body, to result in a shape somewhat like that shown schematically in Fig. 5.16.

Fig. 5.16 Configuration for twin screw arrangement



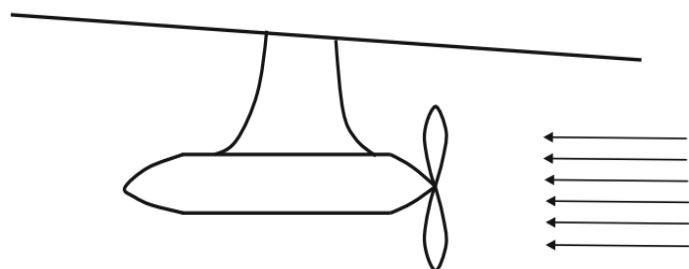


5.4.3 Podded Propulsion

Podded propulsion is used for a number of surface ships. It normally comprises an azimuthable(可轉動方位) pod(筴, 吊艙) enclosing an electric motor. Generally, the propeller is arranged ahead of the pod in a tractor(牽引機) configuration, and therefore in undisturbed flow, as shown in Fig. 5.17.

Such a system could be adapted in the future for use on a submarine, particularly for a twin screw arrangement as shown in Fig. 5.18. Note that the pods make it possible to line up the propeller axis with the local flow direction. In addition, if these pods are azimuthable, then these could replace the stern planes. However, various issues such as the electromagnetic signature(電磁訊號) and shock resistance (巨大的阻力) would need to be considered before being used on a submarine.

Fig. 5.17 Podded propulsion for a surface ship



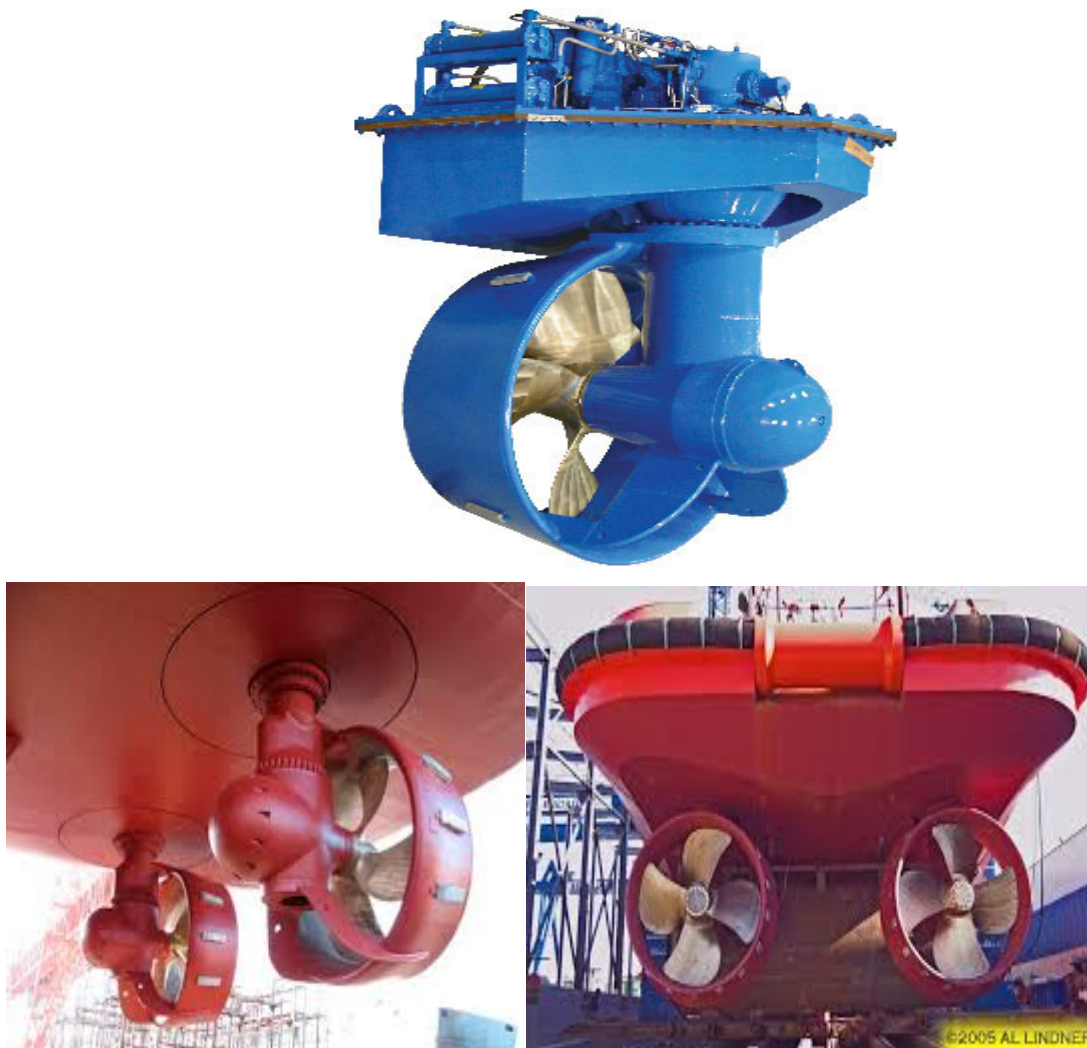
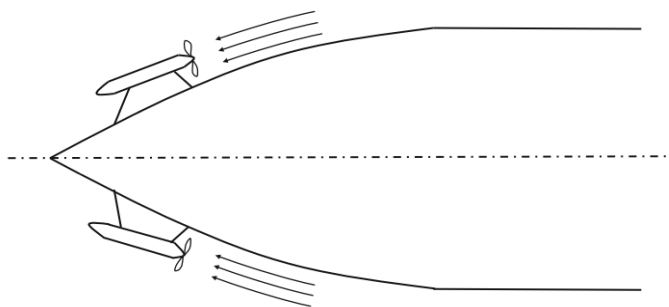


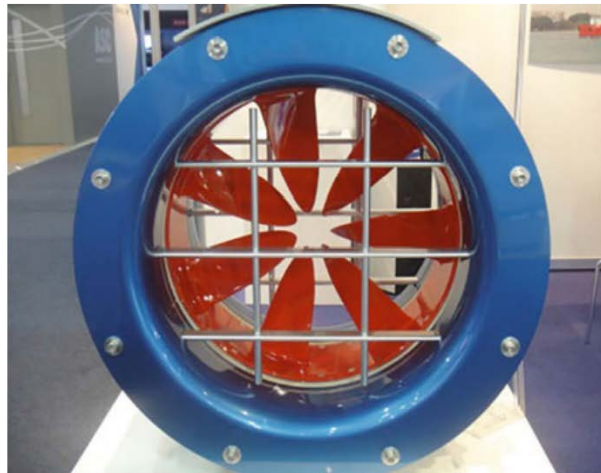
Fig. 5.18 Plan view of possible podded propulsion layout



5.4.4 Rim(輪緣) Driven Propulsion (無穀式螺槳)

With rim driven propulsion the rotor in a duct is driven through its tip using a permanent-magnetic electric motor, rather than using a shaft arrangement, as shown in Fig. 5.19. (無軸)

Fig. 5.19 Typical rim driven propulsor (for a transverse thruster on a surface ship)



The lack of a shaft improves the flow into the blades and hence can reduce vibration, and subsequent hydro-acoustic noise. In addition there is no gap between the outer edge of the rotor and the duct. This results in improved cavitation performance, compared to a shaft driven design, which must incorporate this gap. The inner portion of the rotor blades, which has the lowest velocity, is where the “tip” is, so the resulting vortices will be smaller in magnitude.

As the rotor is driven independently by its outer edge, contra-rotating rotors do not require the mechanical issues associated with a shaft, as discussed in sub Sect. 5.4.1. Also, the rotational speed of the different rotors can be independently controlled. (不同轉子的轉速可獨立控制)

Finally, since the rotor is driven by a permanent-electric motor in the duct, it can be configured in a similar manner to a podded propulsor, and can be fully azimuthable, if required. Alternatively it can simply replace the single propulsor on the axis of an axisymmetrical hull shape.

※推進器性能的預估

模型試驗

跟表面船隻一樣，潛艇的推進器流體動力性能預估包括一大尺寸推進器的單獨試驗以及一裝置在潛艇後面的庫存推進器(stock propulsor)試驗

單獨試驗一般在一空蝕水槽進行，空蝕必須完全避免，通常它是在高壓操作因此不會像表面船隻一樣會發生，而潛艇推進器在空蝕狀態下之操作行為亦不重要，因為空蝕是完全避免的。

推進器與船殼交互影響之試驗方式與表面船隻相似，但 Froude No. 不重要，因此它可以以一單一速度來執行試驗，試驗是以不同的螺槳 rpm (n)、推力(T)及轉矩(Q)來執行，並且量測船舶阻力(R_T)，由此可得到在實船自航速度之有效跡流與推減係數，與表面船隻類似。此程序必須先知道庫存螺槳之單獨試驗性能以及沒有自推潛艇之阻力。

由模型試驗來得到實體潛艇阻力時，必須切記表面船隻所使用的形狀係數(form factor)獲得之程序是不適用的。而只要實船阻力一決

定，則要應用於船模在實船自推點操作之摩擦阻力修正力 F_D 就可以得到。因此船模試驗就可以用一要操作之螺槳，以推力(T_M)，轉矩(Q_M) 作用於螺槳，然後在 X 方向量測船模所受之力。調整螺槳轉速直到作用在船模之縱向方向力等於表面摩擦修正力 F_D ，此時表示船模在實船的自航點，則推減係數 t 可由下式得之

$$t = \frac{T_M + F_D - R_T}{T_M}$$

R_T 是船模阻力，自推試驗所量測到的 T_M 與 Q_M 可由下式無因次化

$$K_{TM} = \frac{T_M}{\rho D^4 n^2}, \quad K_{QM} = \frac{Q_M}{\rho D^5 n^2}$$

接下來之分析可以用 “等推力法” (Thrust Identity)或 “等轉矩法” (Torque Identity)來分析

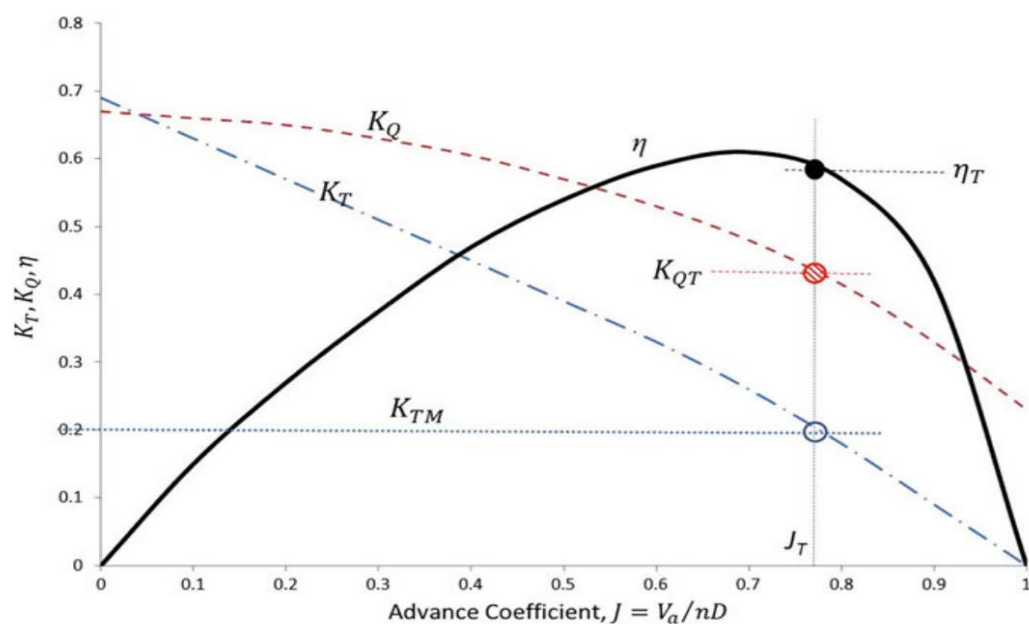


圖 5.11 單獨螺槳試驗曲線(等推力法)

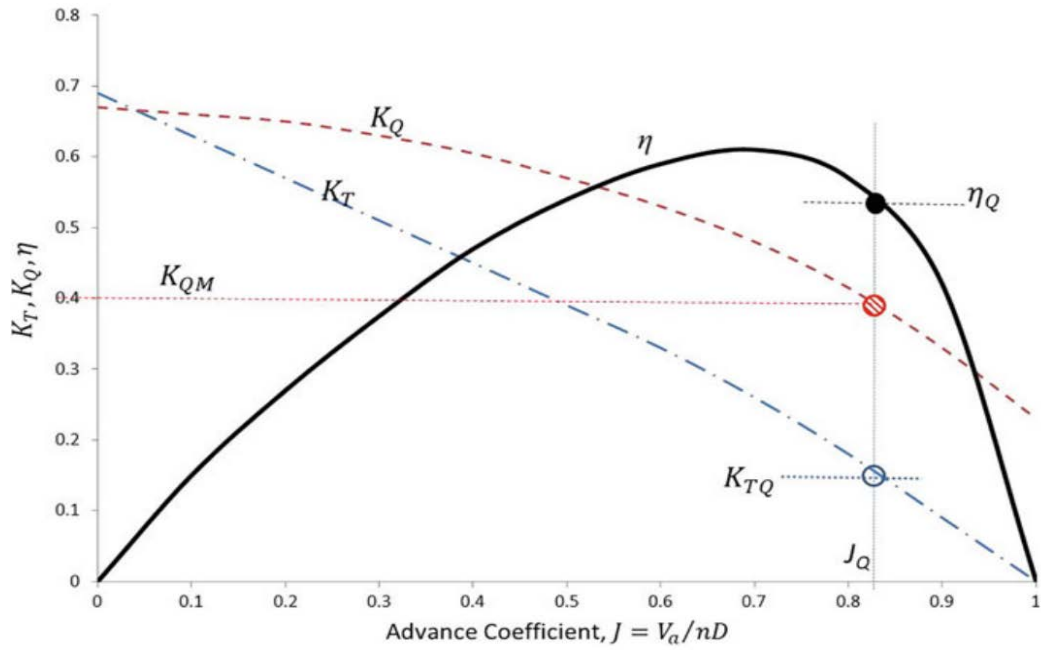


圖 5.12 單獨螺槳試驗曲線(等轉矩法)

等推力法

將自推試驗所量測到的推力 K_{TM} 同等於單獨試驗之 K_T 值，找出其對稱之前進係數 J_T (圖 5.11)，即

$$J_T = \frac{V_a}{nD}$$

由 J_T 求出 $V_a = J_T nD$ 可求出泰勒跡流值

$$W_T = \frac{V - V_a}{V} = 1 - \frac{J_T nD}{V}$$

而相對旋轉效率 η_R 為自推效率 η_B 與單獨效率 η_O 之比

$$\eta_R = \frac{\eta_B}{\eta_o}$$

其中 $\eta_B = \frac{J_T}{2\pi} \frac{K_{TM}}{K_{QM}}, \quad \eta_o = \frac{J_T}{2\pi} \frac{K_T}{K_Q}$

因 $K_{TM}=K_T$ 假設推力相等時 $K_Q=K_{QT}$

$$\eta_{RT} = \frac{K_{QT}}{K_{QM}}, \quad (\eta_{RT} = \frac{\eta_B}{\eta_o} = \frac{K_{TM}}{K_{QM}} \frac{K_Q}{K_T} = \frac{K_{QT}}{K_{QM}})$$

等轉矩法 (參考圖 5.12)(與前面等推力法所述類似之推導)

因 $K_{QM}=K_Q$ 假設轉矩相等時 $K_T=K_{TQ}$

$$\eta_{RT} = \frac{K_{TM}}{K_{TQ}} \quad (\eta_{RT} = \frac{\eta_B}{\eta_o} = \frac{K_{TM}}{K_{QM}} \frac{K_Q}{K_T} = \frac{K_{TM}}{K_{TQ}})$$

(相關的潛艇自推實驗之基本原理及程序，請見附錄二)

第六章 屬具設計

潛艇通常有三組屬具如下：

- (a) 帆罩：用來裝置潛望鏡、呼吸管以及其他桅桿，以及用來在水面上作指揮的位置
- (b) 前方控制翼面：用來改變潛艇深度而不改變俯仰以及在低速下控制深度
- (c) 後方控制翼面：以改變俯仰來控制深度，並提供水平運動的縱控制

由於屬具會增加阻力，因此要小心考慮。它們通常在與水流有一角度的狀態下操作，所以會產生阻力以及相關的渦旋。必須要注意保證根部整順有被很小心的處理，特別是在船殼截面縮減的區域，此外屬具必須設計讓水流以一期望的角度流過它們。這尤其是對眉間控制面特別重要，另外對於具 X 型的後部控制面也應該是一個考量。當在潛望鏡深度有波浪時，必須有適當尺寸的控制面來控制深度。

控制面可以是全部可動的，或部分固定部分可動。固定的部分通常是用來增加方向穩定性，因此這個形狀對於在前面的控制面不

常用。

對於具有固定與可動部分之控制面，其可動部分之導緣緣(leading edge)可以直接連接到固定部分之尾緣緣(trailing edge)，或者也可以有一間隙，如圖 6.1。

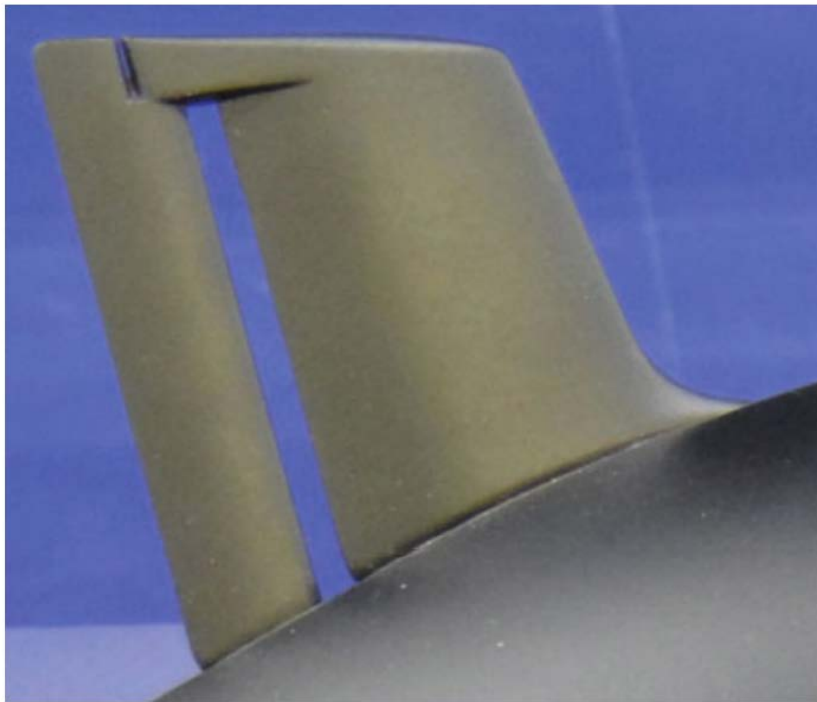


圖 6.1

前者之方式在直直向前沒有控制面變量的狀況下，會有紊流較少的優點。然而當此可動部分在它的導緣拴住時，需承受很大的轉矩。若在可動部分與固定部分之間提供了一間隙，則當潛艇在一大攻角操作時，可以有一水流通過，這樣可以較有利。另外可動部分也可以一些方式在遠離導緣的地方來拴住，以減低需承受的轉矩。

除了控制面外，有時候也需要加額外的固定屬具在後面，以增加潛

艇的方向穩定性，如圖 6.2，可增加 X 型舵之垂直穩定性。

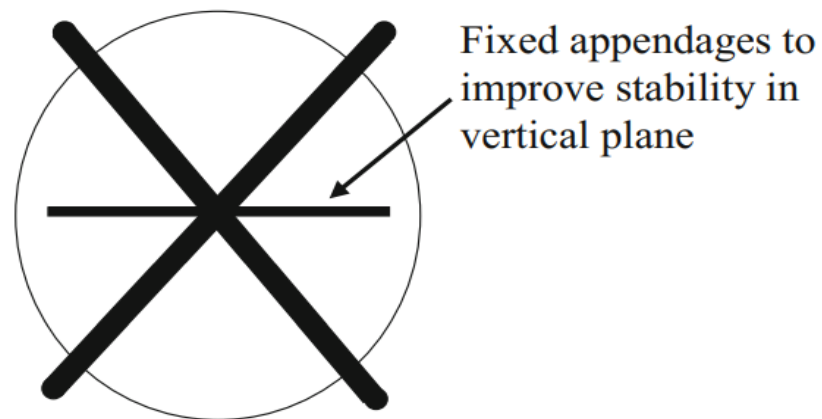


圖 6.2

要利用模型試驗來預測屬具之阻力是相當困難的，因為屬具太小以致於其模型尺度是處在非常低的雷諾數。

※帆罩

從流體動力的觀念來看，帆罩並不是受歡迎的，因為它增加了潛艇的阻力，也影響了進入推進器的水流，而且對水平運動的操縱有一不良的影響。

當帆罩放置的越前方，則它會在船殼邊界層越小的地方運作，因此其干擾阻力會降低，而且帆罩越往前，可能進入推進器的水流會變得越好。然而要注意，帆罩的位置也會影響操縱的特性。

在此介紹兩種帆罩型態

(a)翼型(foil type)帆罩 (b)混合型(blended type)帆罩，如圖 6.3 所示

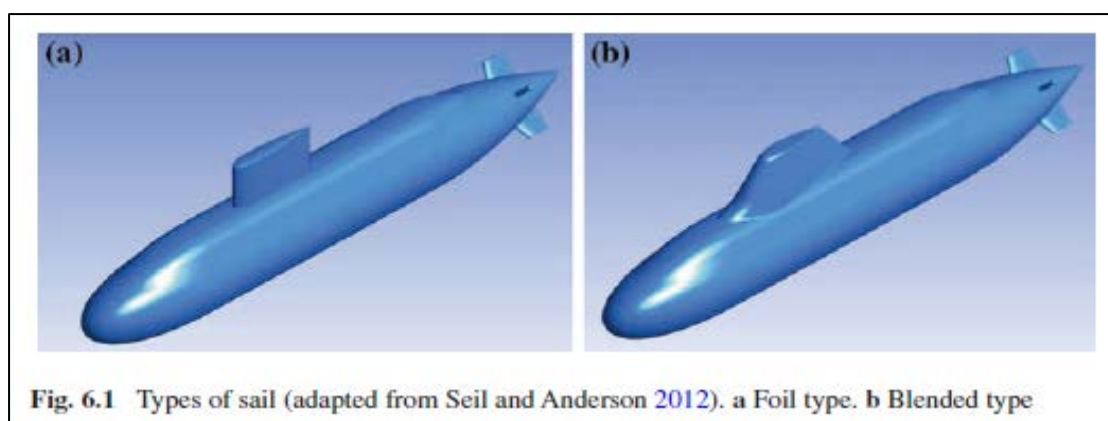


圖 6.3 (a)翼型(foil type)帆罩 (b)混合型(blended type)帆罩

翼型帆罩之策略是要盡量減小帆罩的尺寸。因此大型的美國核子潛艇之帆罩比起船殼而言是相對的小。然而最近的趨勢有用帆罩來安置設備以供特別需要使用，已包括了許多桅桿等，此代表現代潛艇的帆罩的尺寸已經有增加的趨勢。

非常重要的是帆罩與船殼相接之處要盡量的平順以減小根部渦旋的大小，它會對進入推進器的水流造成不利的影響，而且影響水平運動之操縱。對於帆罩尖端的形狀也要特別小心，以確定尖端渦旋的強度能減少。若帆罩位於距艏(FP)0.2~0.3L 處，則可以降低與船殼干擾產生所增加阻力。

混合型帆罩比翼型式的帆罩體積大，而且與船殼有較平順的接合，因此可減少根部渦旋的影響。但大體積可能增加阻力，包括近水面時之興波阻力。在出水面時之橫向穩度也可能受影響，這與帆罩內自由溢流隔間的排水口安排有關。雖然混合型帆罩的阻力增加，但有研究指出，它可以加以設計來減少總阻力，因為船殼加上帆罩的

總浸水面積可以減少，如圖 6.4 所示。這是一個等帆罩高度的例子。

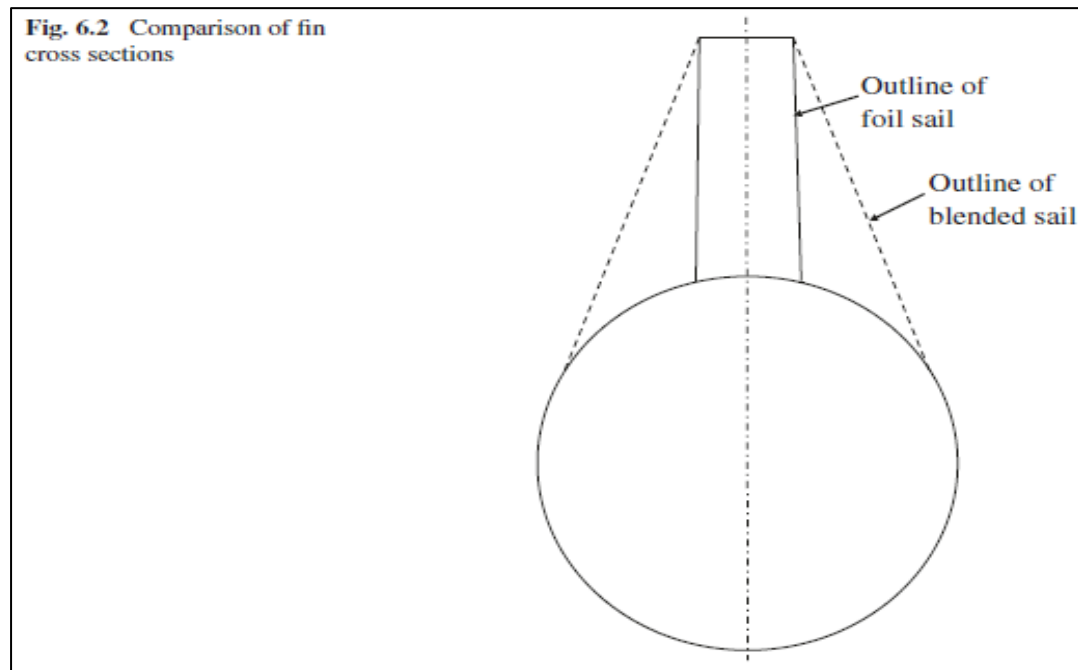


圖 6.4

雖然混合型帆罩產生之跡流對推進器影響比翼型帆罩更差，但可以靠良好的設計來改善。

帆罩對操縱有兩個主要不良的影響

- (a) 側向力的產生在上方高處，會造成在轉彎時傾斜，尤其是急翻轉
- (b) 在船殼的垂直方向產生力與力矩，造成一個艏急降後上昇的傾向

為了減小急翻轉橫搖，一個以攻角函數來作低側向力帆罩設計是較好的，例如設計一個小尺寸的混合型帆罩。而為了使垂直面的力與

力矩最小化，在與水流有一攻角時，能設計一產生較低尖端渦旋(tip-vortex)之帆罩是較佳的。因為這樣對於船殼產生的渦旋就不需作太大的修正。

因此帆罩的設計與很多因素有關，在初步設計時必須好好考慮。

前面提過將帆罩放置於樞紐點(pivot point)，則在潛艇作水平運動操縱時可以減小局部的攻角，因此可減少側向力。在過去，帆罩的縱向位置需要在控制室的上方，因為潛望鏡的位置需要，但現代化非穿透式桅桿的出現，已沒有這個限制了。

帆罩若往前放在適當位置，是可以減小迴旋半徑，而放在後方則將增加。

※前控制翼面

前控制翼面是用來使潛艇改變深度而不改變俯仰，尤其在潛望鏡深度時很重要。在時低速也必須靠它來提供垂直面的控制。

一般前控制翼面有三個可能位置如圖 6.5

- (a) 中線位置控制面(midline plane)
- (b) 眉間位置控制面(eyebrow plane)
- (c) 帆罩位置控制面(sail plane)

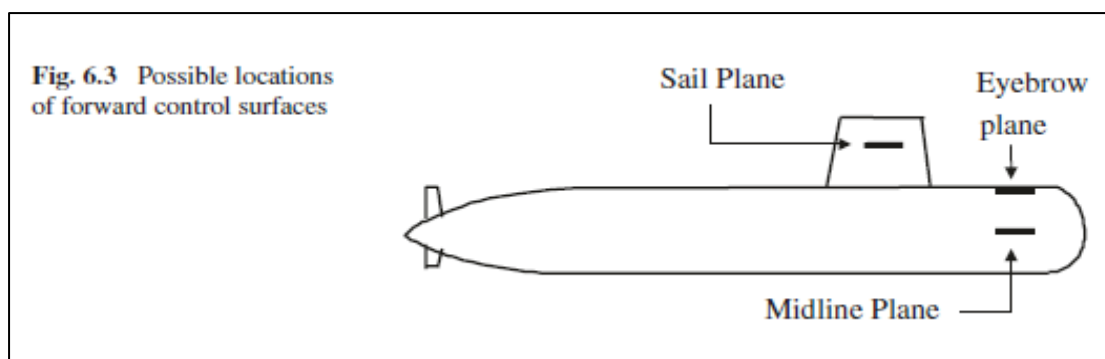


圖 6.5

※中線位置控制面

中線位置控制面是設計位在一合理沒有受干擾的流體中，船殼提供了地板效應(ground-board effect)，因此增加了它的有效展弦比，如圖 6.6 所示。

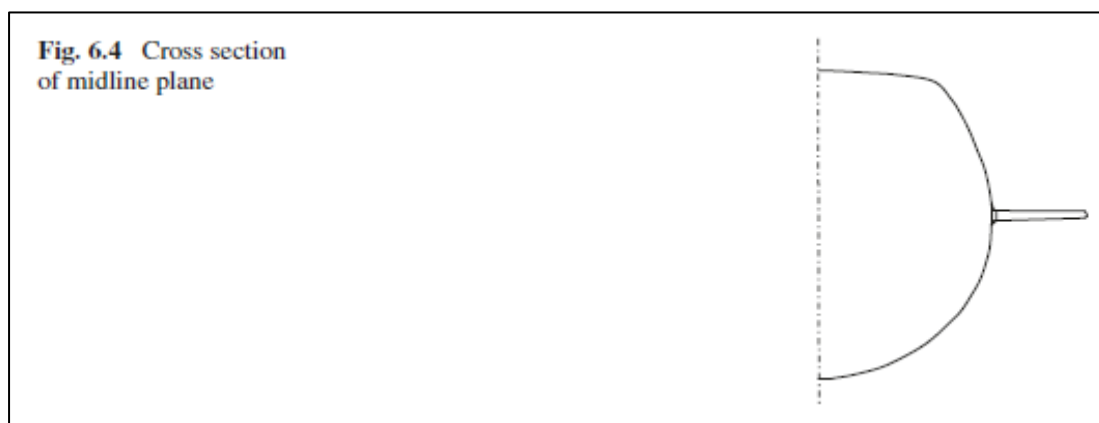


圖 6.6 中線位置控制面

然而，中線位置控制面的尾端渦旋(trailing vortex)可能降低聲納陣列的性能，它們可能被吸入推進器而增加推進器噪音。如圖 6.7

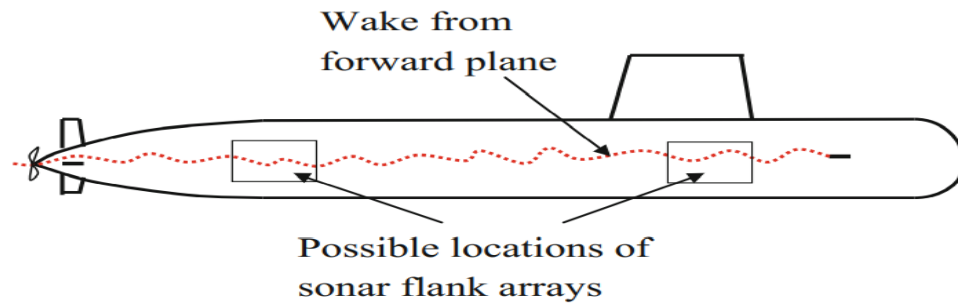


圖 6.7 中線位置控制面尾端渦旋通過聲納陣列被吸入推進器

中線位置控制面必須是可伸縮的。因位在深水高速時，不需要前方控制翼面，將它收起來就可以減阻也可以減噪音。

※眉間位置控制面

眉間位置控制面是在由船殼引起的向上水流（upward flow）中操作的。如圖 6.8 所示，此向上水流越靠近船殼越強。

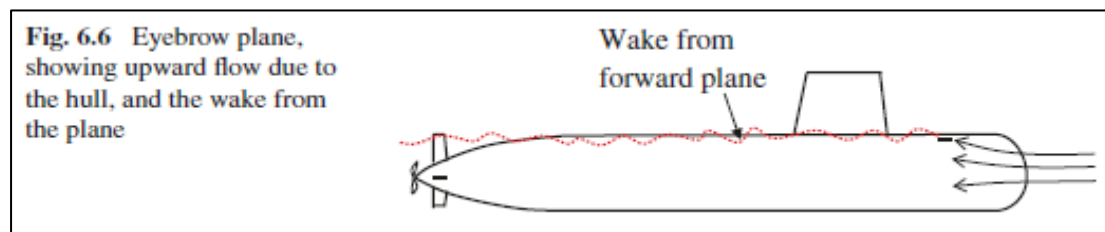


圖 6.8 眉間位置控制面在船殼引起的向上水流中操作

此代表除非此控制面在翼展方向是扭曲的，否則控制面的攻角將是翼展位置的函數。因此不可能整個控制面都在零攻角，因而都會有些誘導阻力及相關尖端渦旋。此外，也要很小心根排部(root fillet)與船殼的干擾，如圖 6.9。

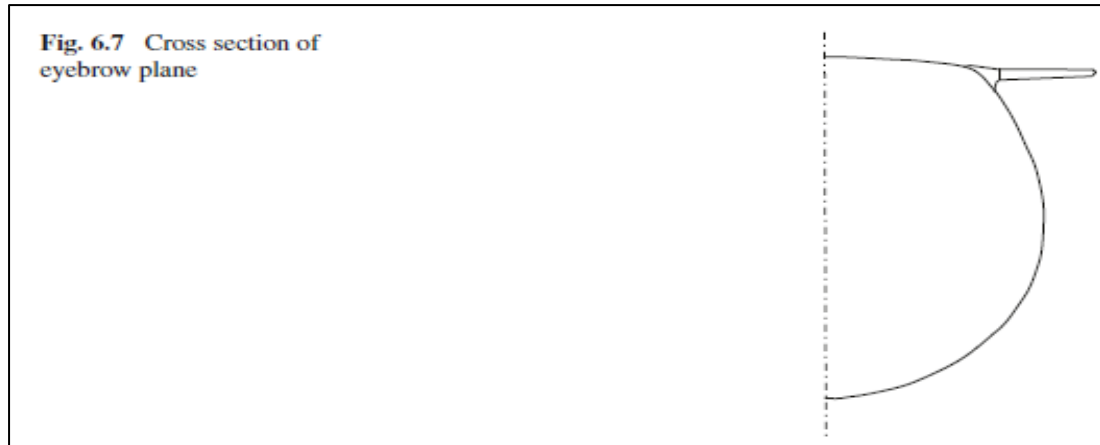


圖 6.9 眉間位置控制面根排部

在大部份的例子，當控制面在非零攻角時，轉動接觸處將有一間隙，這會引起渦旋與相關噪音。要解決這問題是可以在眉間控制面處之船殼加以整順，如圖 6.10，在控制面根部與船殼之間的連結處船殼是平的。

然而，一般眉間位置控制面的尖端渦旋(tip-vortices)不太會影響聲納陣列，也較不會被吸入推進器。眉間位置控制面需不需要設計成可伸縮式的方式，與它的形狀有關，端視它有無超出潛艇寬度而定。

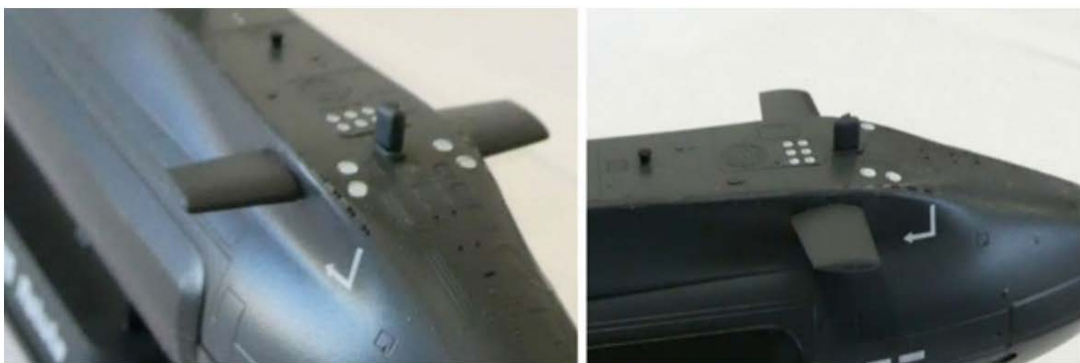


圖 6.10

※帆罩位置控制面

此控制面也位於一合理不受干擾的水流中。它產生的渦旋不影響聲納陣列，也不可能被吸入推進器，如圖 6.11。帆罩位置控制面有一個良好的地面效應，因此會增加有效展弦比，如圖 6.12。此控制面不必作可伸縮型，因為它的尺寸全含在潛艇的整個大小範圍之內。

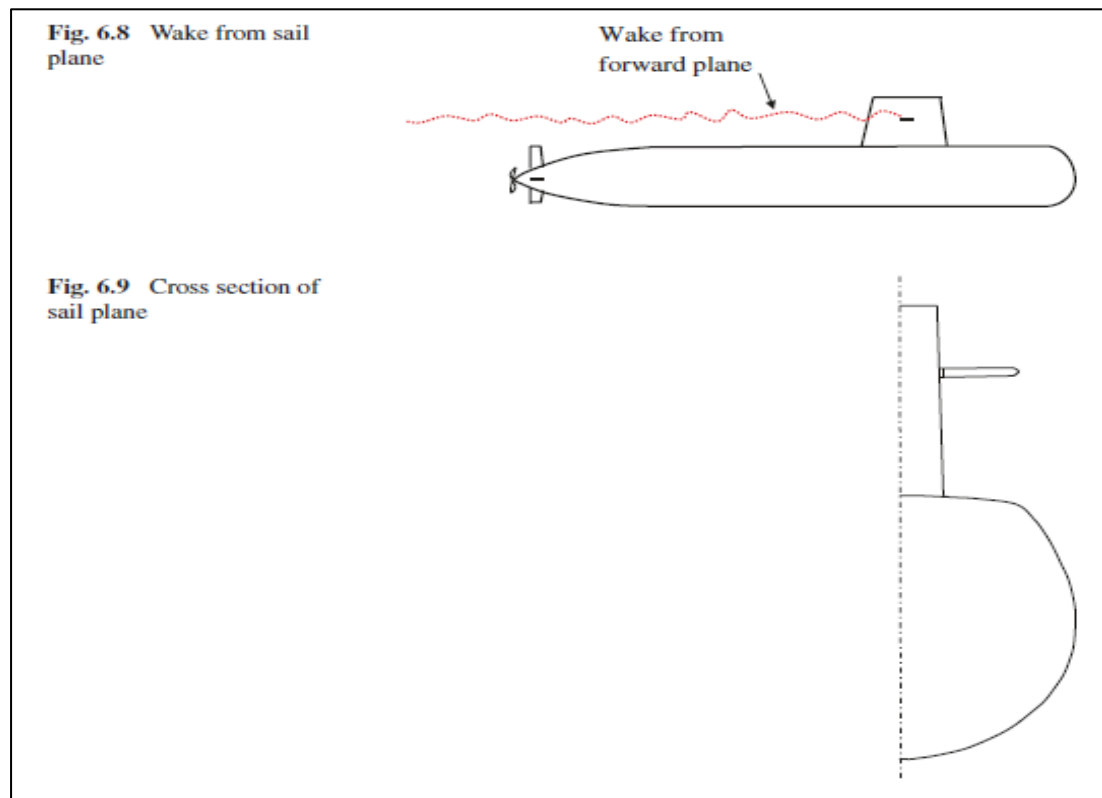


圖 6.11 & 圖 6.12

帆罩位置控制面一般安置在近中性點附近。此代表單獨操作時，它可以只改變深度不改變俯仰。但此功能在現在具有現代化控制技術的潛艇已不是那麼重要，因為此功能可以在中性點處配置兩個適當間距的控制面靠自動控制來達到。但當在呼吸管深度時，有

帆罩位置控制面可以不必操控後部控制面，可能就是一個優點。

另一方面，因為帆罩位置控制面不像中線位置控制面與眉間位置控制面那麼前面，它們比中線位置控制面與眉間位置控制面離臨界點較近，造成若潛艇必須靠俯仰來改變潛深時，效率會較差。這也造成在低速時，它們改變深度的效率不高。

因為帆罩位置控制面比船殼高很多，在呼吸管深度的相對較接近水面，易受波浪影響。

此外，帆罩位置控制面的重量及相關之機械裝置都放置在船的高處，可能造成穩度的問題。

帆罩控制面比其他船殼上的控制面不容易協助潛艇作急速下沉 (crash dive)。然而現代潛艇都正常操作下潛，已不需要急速下沉，因此這通常已不重要。但對一有破冰需求之潛艇而言，則帆罩的姿態就會造成複雜問題，假使控制面可以轉成垂直，或許就可以達成，然而，可能的話，就不要設計帆罩控制面，情況會較單純。

※後控制翼面

此控制翼面可包括固定式與可動式。可動式的控制面(艏水平翼與舵)是用來改變俯仰 (因此可作大深度的改變) 以及潛艇迴轉。它也用於在轉彎時來控制深度的變化。而固定翼可增加穩度，尤其是

垂直平面的穩度。

對一具單螺槳之軸對稱潛體，其後控制翼面通常放在推進器前面，這表示它們無法得到推進器加速流的好處，而且它們會產生跡流干擾進入螺槳造成噪音。因此在考慮聲音訊號時，後控制翼面的數目以及來自帆罩跡流的交互影響，都必須與螺槳葉片數目一起考慮。

若螺槳的葉片數與跡流區的數目相同時，將會引起很大的噪音，因為每片葉片在同時間都會通過一個跡流。因此應避免與螺槳葉片數目與跡流數目相同或呈倍數關係。若在螺槳前方有裝設定子(stator)，則其產生的跡流也要考慮。

理想上，後控制翼面應盡量向前移，遠離螺槳。但這將減少控制翼面可用的翼展，因為越向前移，尾錐直徑越大的緣故。而且要避免它們超出了潛艇的尺寸之外，另一方面也要避免在靠舷(coming alongside)時造成很大的複雜性。如圖 6.13。但有很多潛艇為了提供適當的垂向穩定度而使艉水平翼超出此範圍。

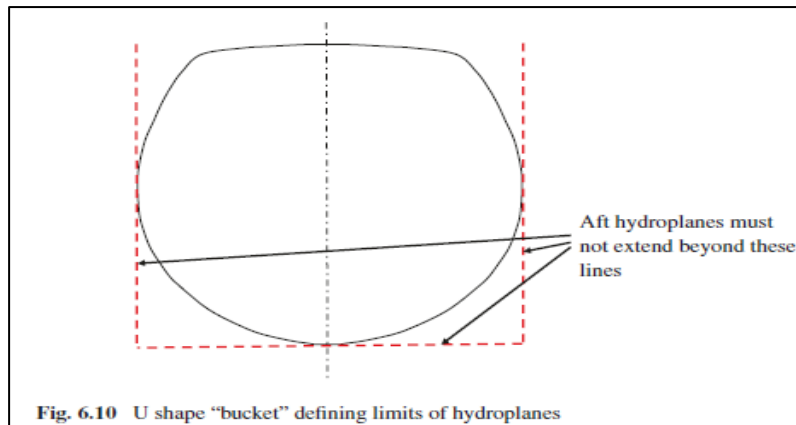


圖 6.13 艏水平翼尺寸限制範圍

由於潛艇在 $x-z$ 平面是對稱的，因此在垂直方向之操縱只需要後控制翼面提供一垂直力，但其 $x-y$ 平面並非對稱，故在水平方面之操縱，需要同時有一水平力與一垂向力來維持定深。因此後控制翼面的尺寸與外形必須考慮這些因素。當在最大迴旋速率的迴旋時，若可用之垂直力無法維持定深時，那後控制翼面也幾乎沒有一個具有可提供大水平力能力的控制點。

※十字型的後控制翼面

傳統的單螺槳潛艇後控制翼面大都是十字形，如圖 6.14。垂直控制面(舵-rudder)之安排是用來控制水平運動之操縱，而水平控制面(艏控制面-stern planes)是用來控制垂直運動之操縱。因為潛艇在 $x-z$ 平面是對稱，在垂直運動的操縱只需要操作艏控制面。但在 $x-y$ 平面是不對稱的，水平的運動操縱需要用到舵及艏控制面(及艏控制面)來維持深度。

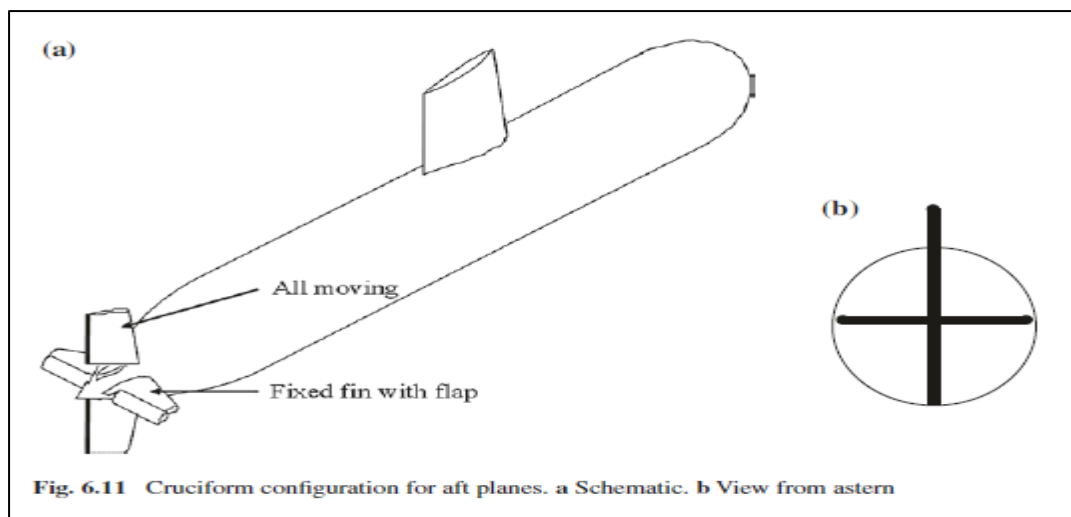


圖 6.14 十字型的後控制翼面

在垂直平面有高的穩定度，在水平平面有好的操縱性(i. e. 低穩定度)，這是一般潛艇正常的基本需求，而十字型控制翼面之安排可達成此需求。例如，可利用一具有襟翼的固定翼當艏控制面，搭配一全可動的舵，如圖 6.14(a)。但這不是重要的，很多潛艇的舵與水平控制翼面也都採固定翼以及襟翼的方式。

十字型控制翼面之下舵通常較小而且展弦比較小，因為它不允許延伸到潛艇龍骨下方。這可能使在水面上的操縱有困難。另一方面，上舵可以大一點，這樣有助於減少在潛航時產生急翻轉的橫搖，但當上舵在帆罩的跡流中操作時，效率將減低。另水平艏控制面之翼展亦受限，不能超出潛艇的寬度及如圖 6.13。然而為了達到垂直平面所需的穩定度(G_v)及艏控制面之效率(如表 3.8)，這不是全然可能的(i. e. 如表 3.8 理想的艏控制面之翼展會超過潛艇的寬度)，如圖 6.15，

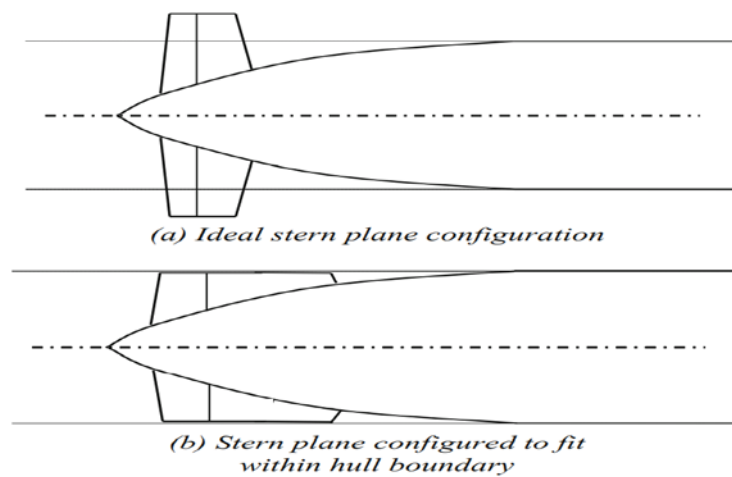


圖 6.15

假如艉控制面允許超出船殼邊界，那就可以有一合理的高展弦比的翼面，如圖 6.15a。然而若必須限制在船殼邊界內時，那展弦比就可能很低，如圖 6.15b。

另外亦有在艉控制面之兩端加上垂直端板，如圖 6.16，這樣可增加後面的垂直面積，因此可增加水平面的穩定度及艉控制面之效率(因為地面效應使得有效翼展比增加)但是這樣會增加浸水面積而增加阻力而且增加艉的質量與複雜性。

對十字型控制翼面而言，當將上下兩個舵連結在一起及左右兩個艉控制面也連結在一起時，這樣雖可減少艉部機器系統的複雜性及重量，但會存在一個主要的缺點。因為若在艉控制面有一個卡住時，則無法操控另一個來復原。因此若控制面可獨立運作，則可避免上述的缺點。

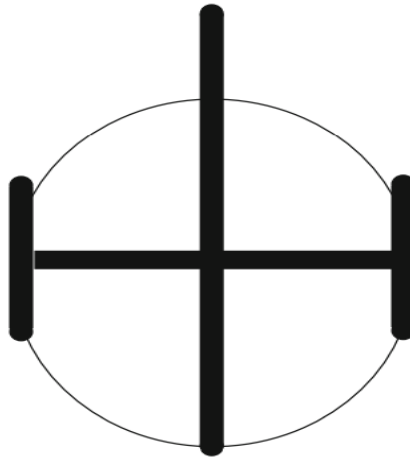


圖 6.16

※X 型控制翼面

後控制翼面的另一種替代方式為 X 型，如圖 6.17 與 6.18 所示。由於此型態的每一控制面都是相同的，它不太容易去符合垂直面良好的穩定度以及水平面良好的操縱性的一般可接受的需求。對於低速的傳統潛艇(SSKs)而言，垂直面的高水平程度穩定性的需求不像高速核子潛艦(SSNs)那樣重要。一般是可以用控制策略來克服潛艇流體動力的限制，然而若採 X 型之控制面時，則控制策略就一定必須要考慮。

Fig. 6.12 X-form configuration for aft planes (courtesy of DSTO)

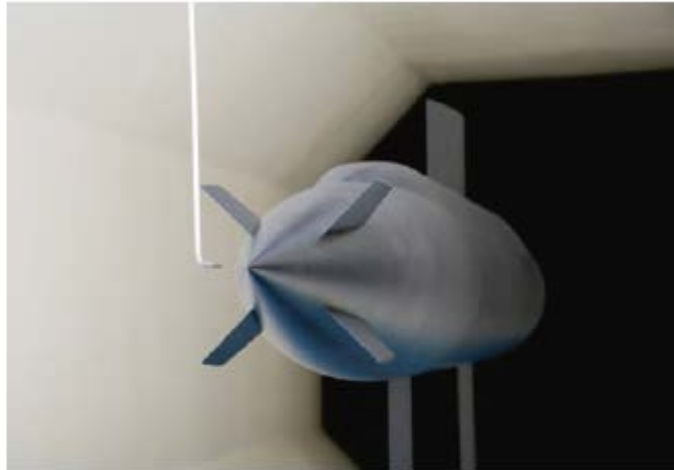


圖 6.17

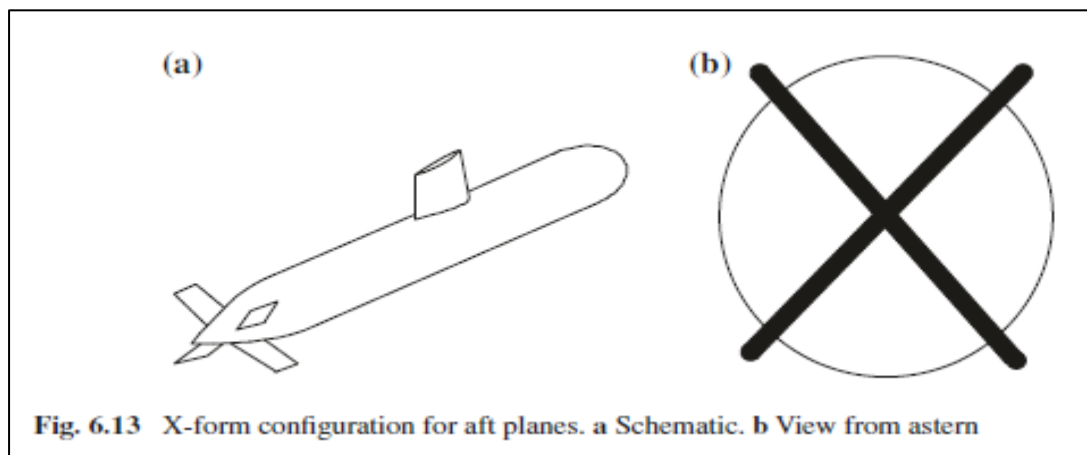


Fig. 6.13 X-form configuration for aft planes. a Schematic. b View from astern

圖 6.18

如果將每個控制面彼此之夾角不放置成 90° ，或加裝一水平固定穩定翼，則也有可能在垂直面與水平面達到不同程度的穩度需求。

X 型態的一個優點是在它們超過圖 6.10 虛線限制範圍之前，它的每個控制面就有比十字型較長的翼展。這代表以相同的展弦比來看 X 型整個控制面的面積比十字型大，換言之，對一相同的控制面積其展弦比是可增加的。不管是哪種方式，X 型產生較大控制力

的機會是比十字型大。因此 X 型在水面航行時可產生較好的操縱性，尤其在十字型的下舵不可超出龍骨線的狀況下。

對 X 型而言，每個控制面都是可動且完全獨立的。這就需要一自動裝置來控制潛艦，因為對每一種操縱方式都需要不同控制面的混合作動。這可由圖 6.19a 來看，當要產生一向左舷的力以使船身轉向右舷，每個控制面都需要運作，其垂直力可上下抵消。因此要由 X 型控制面產生的有效力必須比十字型產生較大的總力。而要產生一垂向力時，可參考圖 6.19b。

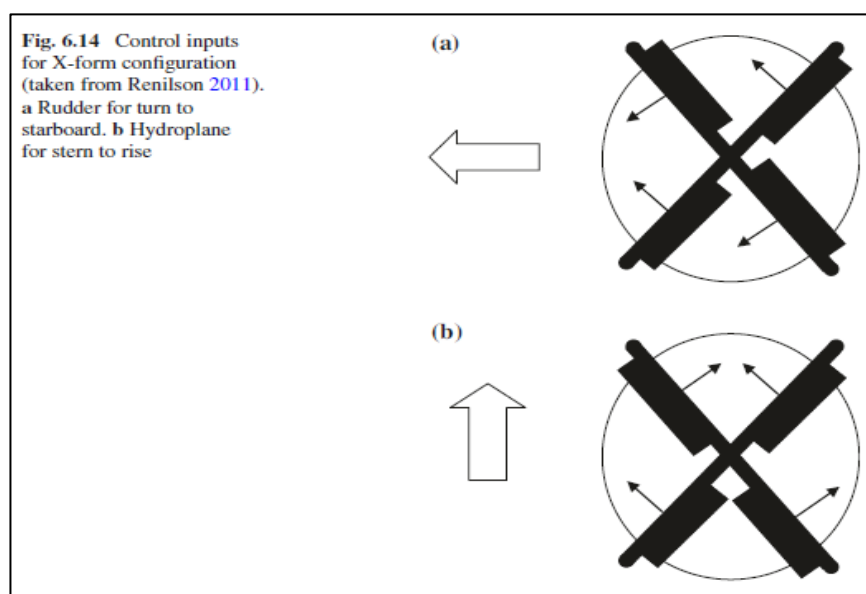


圖 6.19

因此 X 型的控制面需較大的總力，這將會引起較大的渦旋而對推進器造成不良影響及增加噪音，而且也會引起較大的誘導阻力使得所需要的馬力比十字型舵增加。

然而因為大部分的潛艦在 x-y 平面是不對稱的，在作迴旋時經

常需要一垂直力以維持定深。利用十字型控制翼面之佈置時，代表除了舵之外，還需要同時利用艏控制翼面來維持一水平面迴旋以維持定深。然而 X 型的每一個控制面已提供了垂直力，因此其總力可不必太大，但也要依不對稱的程度而定。如圖 6.20 所示。對一特殊的操縱來說，對十字型或 X 型的總力是否太大，與潛艇所具有的不對稱的程度有關。

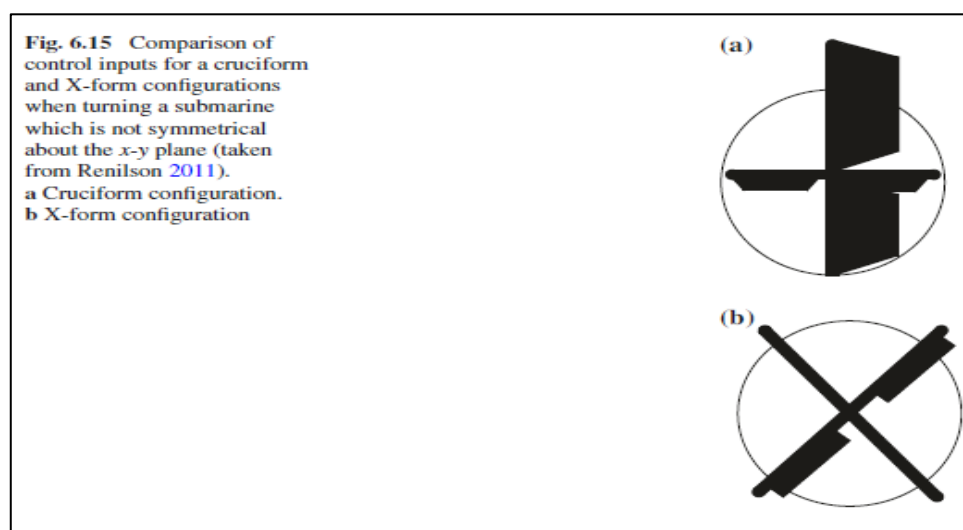


圖 6.20

因為潛艇需要一垂向力來補償迴旋時的垂向不對稱性，而來自後控制面之可用的垂向力大小可能就會是潛艇迴旋速率實際上的限制，而反而不是水平力的大小。例如 X 型控制面的最大有效舵角約為 25° ，因為可用的垂直力是有限制，要較大之舵角是不可能的。

對於十字型或 X 型後控制翼面所產生的流體動力係數項，如表 6.1 所示，其中 X_i 的下標代表 X 型的第 “i” 個控制面。

表 6.1

Table 6.1 Comparison of cruciform and X-form appendage coefficients (taken from Crossland et al. 2011)	<i>(a) Cruciform configuration</i>	
	Rudder	Stern Plane
	$X'_{\delta R \delta R}$	$X'_{\delta S \delta S}$
	$Y'_{\delta R}$	—
	—	$Z'_{\delta S}$
	$K'_{\delta R}$	—
	—	$M'_{\delta S}$
	$N'_{\delta R}$	—
	<i>(b) X-form configuration</i>	
	$X'_{\delta X \delta X_i}$	
	$Y'_{\delta X_i}$	
	$Z'_{\delta X_i}$	
	$K'_{\delta X_i}$	
	$M'_{\delta X_i}$	
	$N'_{\delta X_i}$	

若省略每個控制面之相互干擾之影響，則 X 型後控制翼面每個控制面產生之相對應之力與力矩之方程式如(6.1)-(6.6)所示

$$X = \frac{1}{2} \rho L^2 \left[X'_{\delta 1 \delta 1} u^2 \delta_1^2 + X'_{\delta 2 \delta 2} u^2 \delta_2^2 + X'_{\delta 3 \delta 3} u^2 \delta_3^2 + X'_{\delta 4 \delta 4} u^2 \delta_4^2 + \left(X'_{\delta 1 \delta 1 \eta} u^2 \delta_1^2 + X'_{\delta 2 \delta 2 \eta} u^2 \delta_2^2 + X'_{\delta 3 \delta 3 \eta} u^2 \delta_3^2 + X'_{\delta 4 \delta 4 \eta} u^2 \delta_4^2 \right) (\eta - 1) \right] \quad (6.1)$$

$$Y = \frac{1}{2} \rho L^3 \left[Y'_{|r| \delta 1} u |r| \delta_1 + Y'_{|r| \delta 2} u |r| \delta_2 + Y'_{|r| \delta 3} u |r| \delta_3 + Y'_{|r| \delta 4} u |r| \delta_4 + Y'_{|q| \delta 1} u |q| \delta_1 + Y'_{|q| \delta 2} u |q| \delta_2 + Y'_{|q| \delta 3} u |q| \delta_3 + Y'_{|q| \delta 4} u |q| \delta_4 \right] + \frac{1}{2} \rho L^2 \left[Y'_{\delta 1} u^2 \delta_1 + Y'_{\delta 2} u^2 \delta_2 + Y'_{\delta 3} u^2 \delta_3 + Y'_{\delta 4} u^2 \delta_4 + (Y'_{\delta 1 \eta} u^2 \delta_1 + Y'_{\delta 2 \eta} u^2 \delta_2 + Y'_{\delta 3 \eta} u^2 \delta_3 + Y'_{\delta 4 \eta} u^2 \delta_4) (\eta - 1) \right] \quad (6.2)$$

$$Z = \frac{1}{2} \rho L^3 \left[Z'_{|r| \delta 1} u |r| \delta_1 + Z'_{|r| \delta 2} u |r| \delta_2 + Z'_{|r| \delta 3} u |r| \delta_3 + Z'_{|r| \delta 4} u |r| \delta_4 + Z'_{|q| \delta 1} u |q| \delta_1 + Z'_{|q| \delta 2} u |q| \delta_2 + Z'_{|q| \delta 3} u |q| \delta_3 + Z'_{|q| \delta 4} u |q| \delta_4 \right] + \frac{1}{2} \rho L^2 \left[Z'_{\delta 1} u^2 \delta_1 + Z'_{\delta 2} u^2 \delta_2 + Z'_{\delta 3} u^2 \delta_3 + Z'_{\delta 4} u^2 \delta_4 + \left(Z'_{\delta 1 \eta} u^2 \delta_1 + Z'_{\delta 2 \eta} u^2 \delta_2 + Z'_{\delta 3 \eta} u^2 \delta_3 + Z'_{\delta 4 \eta} u^2 \delta_4 \right) (\eta - 1) \right] \quad (6.3)$$

$$K = \frac{1}{2} \rho L^3 \left[K'_{\delta 1} u^2 \delta_1 + K'_{\delta 2} u^2 \delta_2 + K'_{\delta 3} u^2 \delta_3 + K'_{\delta 4} u^2 \delta_4 \right. \\ \left. + \left(K'_{\delta 1 \eta} u^2 \delta_1 + K'_{\delta 2 \eta} u^2 \delta_2 + K'_{\delta 3 \eta} u^2 \delta_3 + K'_{\delta 4 \eta} u^2 \delta_4 \right) (\eta - 1) \right] \quad (6.4)$$

$$M = \frac{1}{2} \rho L^4 \left[M'_{|r|\delta 1} u |r| \delta_1 + M'_{|r|\delta 2} u |r| \delta_2 + M'_{|r|\delta 3} u |r| \delta_3 + M'_{|r|\delta 4} u |r| \delta_4 \right. \\ \left. + M'_{|q|\delta 1} u |q| \delta_1 + M'_{|q|\delta 2} u |q| \delta_2 + M'_{|q|\delta 3} u |q| \delta_3 + M'_{|q|\delta 4} u |q| \delta_4 \right] \\ + \frac{1}{2} \rho L^3 \left[M'_{\delta 1} u^2 \delta_1 + M'_{\delta 2} u^2 \delta_2 + M'_{\delta 3} u^2 \delta_3 + M'_{\delta 4} u^2 \delta_4 \right. \\ \left. + \left(M'_{\delta 1 \eta} u^2 \delta_1 + M'_{\delta 2 \eta} u^2 \delta_2 + M'_{\delta 3 \eta} u^2 \delta_3 + M'_{\delta 4 \eta} u^2 \delta_4 \right) (\eta - 1) \right] \quad (6.5)$$

$$N = \frac{1}{2} \rho L^4 \left[N'_{|r|\delta 1} u |r| \delta_1 + N'_{|r|\delta 2} u |r| \delta_2 + N'_{|r|\delta 3} u |r| \delta_3 + N'_{|r|\delta 4} u |r| \delta_4 \right. \\ \left. + N'_{|q|\delta 1} u |q| \delta_1 + N'_{|q|\delta 2} u |q| \delta_2 + N'_{|q|\delta 3} u |q| \delta_3 + N'_{|q|\delta 4} u |q| \delta_4 \right] \\ + \frac{1}{2} \rho L^3 \left[N'_{\delta 1} u^2 \delta_1 + N'_{\delta 2} u^2 \delta_2 + N'_{\delta 3} u^2 \delta_3 + N'_{\delta 4} u^2 \delta_4 \right. \\ \left. + \left(N'_{\delta 1 \eta} u^2 \delta_1 + N'_{\delta 2 \eta} u^2 \delta_2 + N'_{\delta 3 \eta} u^2 \delta_3 + N'_{\delta 4 \eta} u^2 \delta_4 \right) (\eta - 1) \right] \quad (6.6)$$

以上必須要能取得每一個別控制面的係數，不可能假設每個係數均相同，應就個別控制面的變動角度來計算方程式(6.1)-(6.6)之受力與力矩的結果，然而也盡可能地去檢視它們之間的干擾，尤其是潛艇在與水流成一攻角前進時。

要注意的是在下方的一對控制面稍為比上方的一對控制面更有效率，這可能是由於帆罩及外罩的出現對上方的控制面造成影響。而且在低的控制角度，各控制面之間的干擾可忽略，但在高於 15° 時則變得非常顯著。

在使用 X 型控制翼的另一個問題是流入控制翼面的水流會受船身後

半部不對稱形狀的影響，包括帆罩及外罩。這表示若沒有小心對中校準，則會造成控制面在零度時仍有一攻角。雖然在十字型舵控制翼也有類似問題，但較不重要。

在中等程度的角度，單一控制面卡住時，利用其他三個控制面仍可以很容易處理操縱。然而在較高角度卡住時，可能需要將潛艦慢下來，以便同時控制航向與縱搖角。這對操縱限制圖(MLD)來說，需要一個不同的處理方式。

※其他不同型態的控制翼面

另一個可能的型態為倒Y字型，如圖 6.21。這種型態之潛艦在水平面的操縱，只靠一個上方的單舵。在垂直面的操縱，則靠兩個下方的控制面。然而在**水面上**時，則**靠下方的控制面**來作水平面之操縱。

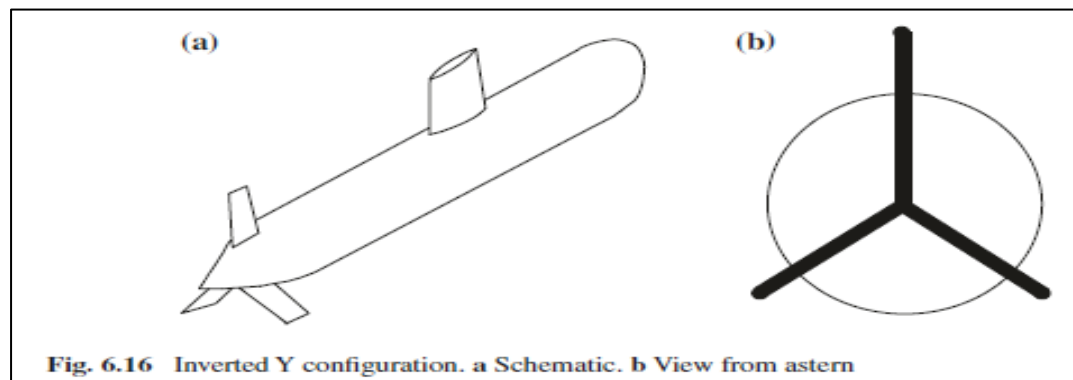


圖 6.21

此型態的舵，其翼展上沒有限制，而舵的位置將可用於減少急

翻轉橫搖，但其效率可能受到帆罩跡流的影響。

若要在垂直平面上有好的穩定性以及在水平平面有好的操作性，可以加大舵及下方控制翼面來達成。也可以將下方控制翼面以一固定翼及襟翼的設計方式，來取代完全作動的方式。這樣將可以增加垂直平面上的穩定性，如同圖 6.14。但倒 Y 字型的方式會引起三種不同的跡流進入推進器，因而影響到其噪音。而調整下方控制面的水平夾角可用來設定最好的垂直穩定性與水平操縱性的平衡。

一種更進一步的替代方式，為五面型(pentaform)的控制翼面，如圖 6.22 所示。

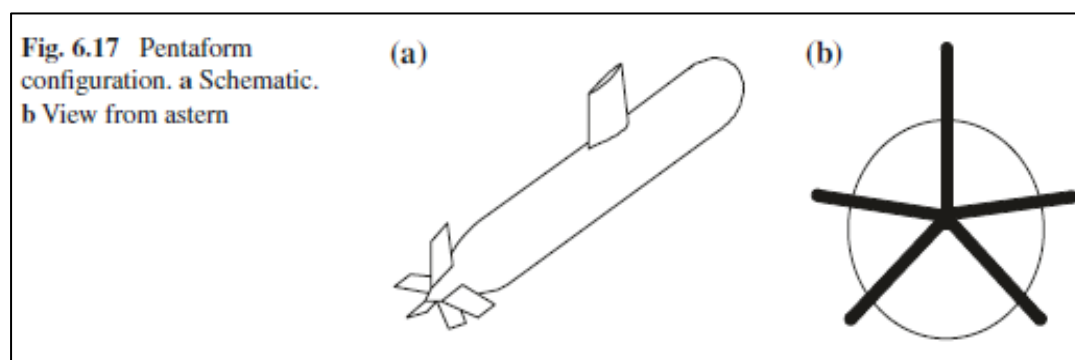


圖 6.22 五面型的控制翼面

這種五面型的控制翼面在深潛狀態的平面運動控制，是靠上方的垂直舵。而要控制垂直平面運動，則靠下方的控制翼面，就像一倒 Y 字型。其餘的兩個翼面可以固定，用來提供在垂直平面上較大的穩定性，這通常是設計的需求。這五個控制翼面的角度，可以設

計在符合此項需求的最佳方式。

在這種五面型的**控制翼面**，會有五種很顯著的跡流體系影響到推進器，因此一個五葉的推進器將產生很大的額外流體噪音。另一方面，具有較多葉片的螺槳，就可能可以由五個跡流體系得到好處，比起傳統十字型的四個跡流來得好。

最後，也可以在 X 型態的方式加入水平穩定翼，使其便成六面型，則就變成了有六個明顯的跡流體系來影響推進器了。

第七章 流體聲音性能

推進器是最重要的流體動力噪音源，因為噪音的產生與速度有關，而螺槳或轉子的葉片通常是與水接觸轉動最快的部份，亦即此部份速度很快。因此降低轉子轉速(rpm)與減小螺槳直徑通常可以視為對流體噪音的降低是有利的。

由推進器直接產生的流體噪音可以分為下列三項

- (a) 空泡噪音(Cavitation noise)
- (b) 窄頻噪音(narrowband or tonal noise)
- (c) 寬頻噪音(broadband noise)

空泡現象是由於水壓低於蒸汽氣壓產生。當空泡破裂時會引起明顯的噪音，如果這發生了，則會主導了整個噪音源。空泡發生的速度(CIS)是空泡會發生的最小速度。對一潛艦而言，CIS 與潛深有關，潛深越深，CIS 越高。

一般潛艦的推進器都會設計來避免空泡，而對深潛的潛艦而言，都沒有問題，因為螺槳承受的額外水頭壓力夠。然而當潛艦近水面操作或處於設計狀況外時，空泡可能會發生。

一般，空泡的容許量可以由以下各項的發生來定義：

- (a) 吸入邊空泡(Suction-side Cavitation)
- (b) 吸入邊尖端渦旋空泡(Suction-side tip-vortex Cavitation)

- (c) 壓力邊空泡(Pressure-side Cavitation)
- (d) 壓力邊尖端渦旋空泡(Pressure-side tip-vortex Cavitation)
- (e) 轂渦旋高泡(Hub-vortex Cavitation)

要保證不發生空泡機制的策略，在螺槳設計時就要注意。包括適當的葉片面積，較厚的葉片以及減少葉尖與轂的負荷。此外葉尖速度盡可能減少，而且對噴射泵轉子葉尖與導罩之間隙越小越好。

窄頻噪音發生在葉片通過的速率產生共振時，此時之能量集中在幾個離散的頻率。它是由於葉片通過由螺槳前方的船殼與屬具引起的非均勻跡流所造成的。因此在螺槳前方的船殼與屬具的設計對於此窄頻噪音有很大的影響，例如轉子葉片數目。

寬頻噪音是由紊流交互干擾直接產生，能量分佈在一寬廣的頻率範圍，它無法由目前的數值技巧來預測，因為正確的流體模式都尚無法模擬。寬頻噪音是由葉片的邊界層紊流擾動造成，而且比窄頻噪音更直接與流體的紊流度有關。

除了由螺槳直接產生的噪音外，在螺槳上的振盪擾動力在潛艦中也可產生共振，它會反覆地產生輻射聲學噪音。

低頻噪音比高頻噪音傳遞得更長遠，因此對潛艦的偵測，低頻噪音更顯重要。

在低速時幾乎沒有流體動力噪音會產生。機器噪音可能就變成

主要的了。此時空泡非常不可能產生。

在中速時，流體動力噪音將變得重要，包括寬頻與低頻兩者。
在高速尤其是近水面時，空泡可能就會產生，此時它就主導了所有噪音的來源。

因此，很清楚地，不同噪音源的相對重要性是與潛艦的操作深度以及速度有關。然而詳細的資訊均不公開，故很難有參考資訊。

有四個操作狀態可以用來確認

- (a) 低速超靜音操作
- (b) 巡航速度的正常操作
- (c) 高速操作
- (d) 呼吸管深度近水面的操作

以下分項說明

狀態(a)：低速超靜音操作

在超靜音狀態，潛艦將以低於四節的速度航行。在此速度，流體動力噪音是最小的。主要是機器噪音。

狀態(b)：巡航速度的正常操作

此速度約在八節到十五節，此時流體動力噪音將為主要的。對於一良好設計的深潛潛艦，將不會有空泡噪音，因此由推進器產生的寬頻與窄頻噪音將是主要的問題。

狀態(c)：高速操作

因為流體動力噪音與速度的 6 次方成正比，高於 15 節以上時，由潛艦推進器產生的流體動力噪音將變得非常顯著。潛艦在此速度操作將比在低於此速時的噪音大許多，因此流體動力噪音變得非常重要。

在這些較高速狀態，螺槳上的振盪擾動力有可能與船殼結構振動模式相吻合而增加了潛艦本身的輻射聲學噪音。例如第一手風琴模式(accordion mode)是艏與艉的振動模式，這在低於 15 節時，很少是一個問題。

對於一深潛之潛艦，除非其速度達到 20~25 節，否則空泡噪音不會是問題。

除此之外，當速度超過 15 節，流體動力噪音對船殼上的聲納也會造成操作上的困難。

狀態(d)：呼吸管深度近水面的操作

當在呼吸管深度操航時，由於水面的出現，所產生的流體聲學噪音的幅射性就會很重要。也會增加機械噪音(如 SSK)

可能產生空泡噪音，因為靜水壓減少，也由於增加興波阻力與桅桿阻力，因而增加所需的推力。而且由於波浪影響也加重了控制翼面的操控而也會產生空泡。

在呼吸管深度操航時，流體動力噪音就不是一重要問題。

因為重要的噪音源與其操作的狀態有關，因此對一特殊潛艦如何減少噪音的減噪程序與它在哪一種狀態下操作有關。例如 SSK 級潛艦通常不會在大於 15 節操作，因此設計時，不會考慮在高速時的減噪衡量。同樣地，SSN 級(核子潛艦)不需要近水面作換氣動作，故也不需要考慮此近水面狀態之減噪衡量。

附錄一

(一)潛艇阻力實驗之基本原理

※潛艇在深潛時，其阻力包括平板表面摩擦阻力、摩擦形狀阻力、形狀阻力(黏性壓差組力)、誘導阻力(由於升力引起)，前兩者為總表面摩擦阻力，後兩者為總壓差阻力

※誘導阻力一般很小可省略，因此一般總壓差阻力即指形狀阻力及黏性壓差阻力，因此在深潛潛體而言，此項可將其定義為剩餘阻力(Residual resistance) C_R

※對一深潛潛艇而言，在整個船速範圍內， C_R 為常數

※在實驗中，儘管我們使用了紊流器，但在低速實驗不可能完全達到完全紊流狀態，因此總阻力在低速時是低估的

※而在高速實驗時，由於潛深無法避免自由液面影響，仍會有興波阻力產生，因此總阻力在高速時是高估的

※在中速時，上述兩項影響就可有機會避免。因此 C_{Tm} 與

C_{Fm} (ITTC' 57)之差值，即 C_R ，在中速時，可趨近於一常數，

此一般發生在速長比(speed-length ratio) 0.5~1.9 範圍。在此範圍內找出之常數 可適用於整個船速範圍之應用

實船馬力：

$$C_T = C_{F_S} + C_R + C_A$$

$$R = 0.5\rho S V^2 \times C_T$$

$$\text{EHP} = R \times V$$

※阻力試驗速率之選擇，應以模型大小(越大越好)以及是否有達到需求的雷諾數來決定

(二)潛艇阻力實驗之程序與注意要點

1. 有一金屬通道來做為阻力推進實驗之基底
2. 保證所有表面平滑，包括屬具接觸處
3. 阻力動力計放置在支柱進入帆罩之位置下方處，而支柱與帆罩之間隙約 1/8~1/4 吋
4. 在沒有支柱的狀況下，船模放在水中壓載至平浮但具有負浮力約 15~20lb
5. a. 將船模裝上支柱，當在台車下下潛時會俯仰，力用俯仰計使其平浮。通常一中空金屬銷插在艏中心，有一量規用銷子插在艏，若為單螺槳，則另一量規放置在潛艇軸上。若艏軸之安排無法達到此要求，則必須要在模型的艏部建立一可量測潛深的精確方法。縱搖角調整在拖航支架上方的圓盤，利用一 5 吋轉輪來控制。

b. 檢查橫擺角(0°) 可以一鉛錘球由支柱中心(與艏中心一線一體)，另一鉛錘球則是到艉胴架中心，在模型上這些區域的中心位置必須事先安排好以便將模型正確放置在台車下。橫擺角之調整亦在支架上方。

6. 封閉模型，浸下幾英尺，在離開乾塢前檢查阻力計。每次回到乾塢，置於支架上。每次回到實驗前，應再檢查縱傾角、橫擺角及儀器。

7. 阻力量測間距通常以一節速度量測。若有另外的需求速率另外再做。

8. 有紊流器與無紊流器的阻力量測要分別為之。出 R_t 與模型速度關係圖。此外， C_R 與 V/L 之關係圖亦要給出。在等 C_R 值之速長比範圍內要有足夠的數據點(約 10 點)要能量測到(有紊流之船模實驗，對深潛潛艇)。

通常發生在速長比 0.9~1.5 之間，此區域之曲線在 C_R 值在較高速長比之前會上揚(因為自由液面之影響)

紊流器產生之阻力通常建立在阻力試驗最高速的區域，即

在 C_R 曲線的最高速長比區域。在 C_R 最高速長比適當間距分佈(0.6 速長比範圍約 10 點)比較有紊流器與無紊流器的狀況，就可以定義出紊流器產生之阻力。

9. 假使是執行一新潛艇模型的初次實驗，應該對每種型態的屬具透過 stripping test 建立 C_R 係數。同樣地找出屬具的等 C_R 之範圍(通常約 0.9~1.5)

裸船阻力實驗(含有紊流器與無紊流器)執行後，紊流器之 C_R 可以在較高之速長比範圍找到，再由全配屬具模型(有紊流器)之 C_R 扣掉上述紊流器 C_R 值，則可得到全配屬具狀況計算有效馬力所需之 C_R 值。

附錄二

(一)潛艇自推試驗之基本原理

1. 模型與實船在深潛狀態不存在有 Froude no. 相等之關係，因此
自推試驗之船模在實船自航點與實船僅有 C_T 相等之關係($C_{Tm}=C_T$)
2. 因此當 $C_{Tm}=C_T$ 時，即船模對應至實船之自航狀態，故基本上只
用一個適當之船模航速即可。而利用不同之 C_R 來進行，涵蓋整個
實船速度域之自推實驗
3. 所謂適當之船模速，應位於決定 C_R 值之船模速度區段中，且越
高越佳，以降低螺槳尺度效應
4. 自推試驗之螺槳之雷諾數應大於 5×10^5

$$Rn = C_{0.7} \times \sqrt{V_A^2 + (0.7\pi nD)^2} / \nu$$

$C_{0.7}$: 螺槳 0.7 半徑處之弦長

(二)潛艇自推試驗程序（不排除激紊裝置影響）

1. 擬定實船船速對應區段，如 10 節～24 節，每 2 節為一推算點。
2. 依上述船速分別計算實船之 C_F ，而後再加上 C_R 和 C_A 以得到各船速下之 C_T 。
3. 利用下式計算以船模航速 V_m 執行自推試驗時之對應實船各船速之船模實際總阻力 R_i ：

$$R_i = 0.5 \rho_m S_m V_m^2 \times C_T$$
$$C_T = C_{Fs} + C_R + C_A$$

（ $C_T = C_{Tm}$ C_{Fs} 由公式計算 C_R 由模型試驗 C_A 實船經驗得到）

4. 利用下式計算對應實船各船速應扣除之 FD（船模在航速由於 V_m 雷諾數比實船低而多出的摩擦阻力以及與實船表面差異應有之修正值）

$$FD = 0.5 \rho_m S_m V_m^2 \times (C_{Fm} + C_R) - R_i$$
$$= 0.5 \rho_m S_m V_m^2 \times (C_{Fm} - C_{Fs} - C_A)$$

其中

（ $C_{Fm} + C_R$ ）為 C_{Tm} 由模型試驗得到 R_i 由實船計算得到

C_{Fm} 為船模之摩擦係數（低雷諾數）

C_{Fs} 為實船摩擦係數（高雷諾數）

(三)潛艇自推試驗程序（排除激紊裝置影響- 有額外之阻力）

1. 若要排除激紊裝置之阻力影響，則實船之 C_R 為使用已排除激紊裝置之阻力係數者，但船模之 C_{Rm} 則為含有激紊裝置影響者（因為船模有激紊裝置）。
2. 擬定實船船速對應區段，如 10 節～24 節，每 2 節為一推算點。
3. 依上述船速分別計算實船之 C_F ，而後再加上 C_R 和 C_A 以得到各船速下之 C_T 。
4. 利用下式計算以船模航速 V_m 執行自推試驗時之對應實船各船速之船模實際總阻力 R_i ：

$$R_i = 0.5 \rho_m S_m V_m^2 \times C_T$$
$$C_T = C_{Fs} + C_R + C_A$$

5. 利用下式計算對應實船各船速之 FD：

$$FD = 0.5 \rho_m S_m V_m^2 \times (C_{Fm} + C_{Rm}) - R_i$$
$$= 0.5 \rho_m S_m V_m^2 \times (C_{Fm} + C_{Rm} - C_{Fs} - C_R - C_A)$$

(四)自推試驗程序及結果計算

1. 以等速法（變動負荷法）在船模航速皆為 V_m 之下，逐次以不同之螺槳轉速進行自推試驗，並紀錄轉速 n 、由動力計量測之推力 T 與轉矩 Q ，以及阻力計測得之 ΔR 。
2. 注意 n 和 ΔR 之變化，需確保 ΔR 之範圍可涵蓋前述對應實船各船速之 FD 範圍（亦即 FD 要在測試 ΔR 之範圍內以便內插）。
DTNSRDC（1971）稱此方法為「Over and under propelled powering technique」
3. 以 ΔR 為基準，分別整理 n 、 T 、 Q 對應 ΔR 之變化關係式。
4. 使用各 FD 分別於 n 、 T 、 Q 對應 ΔR 之變化關係中，以 $\Delta R=FD$ 值內插 n 、 T 、 Q 值，其即為對應實船各船速之轉速 n 、推力 T 及轉矩 Q 。
5. 利用試驗之 V_m 和前述所得之對應實船各船速之 R_i 、 n 、 T 、 Q ，再搭配螺槳單獨性能數據，即可參照一般水面船舶之計算方法，求算對應實船各船速之推進係數（ t 、 w 及 ETA_R ）及各式效率等性能參數。

注意：深潛潛體之螺槳轉速不適用/存在此關係式：

$$n_s = \frac{n_m}{\sqrt{\lambda}}$$