

# 潛艦基本構想設計

顏君強 先生、楊洪儒 先生

提 要：

- 一、目前已有許多文件針對潛艦作出各種探討，但對於潛艦的基本設計仍是相對較少。
- 二、本文件探討潛艦基本設計過程時之所有狀況，然而在潛艦狹小的空間中去討論各種狀況是有相當侷限性。
- 三、本文為對基本設計所提出之可行性研究方案，所有設計項目須根據作戰需求及戰系方案確定後建立基本構型，並凍結基本設計之雛型，作為後續系統設計及驗證之依據。

關鍵詞：基本設計、構想設計、初步設計、船形、螺槳、平衡多邊形、排水量、固定壓載、變動壓載

## 壹、前言

1970年代，美海軍按「設計要花費的金額、集中化的設計管理」(design to cost, centralized design management)策略，將潛艦設計四階段：

- 一、構想設計(Concept Design)。
- 二、初步設計(Preliminary Design)。
- 三、合約設計(Contract Design)。
- 四、細部設計(Detailed Design)。

1990年后，美海軍(NAVSEA)為改善軍艦設計及建造程序，導入同步工程(Concurrent Engineering)、系統工程(System Engineering)、模組化(Modeling and Simulation, M&S)。

執行構想設計之前，通常會先行完成基

本構想設計及戰系可行性分析，簡稱可行性研究(Feasibility Study)，俾確定基本構型，予以設計凍結(Design Frozen)，作為未來系統設計、驗證之準則。

美潛艦籌獲過程，重視理論、實驗、經驗…，麻省理工學院(MIT)早在20/30年前，已將基本構想設計，運用造船原理(PNA)內基本數學公式(Elementary Mathematic Equation)及個人電腦暨軟體等，納入學生課程，按附件1可行性研究項目及流程，迅速完成基本構想設計，本文即摘錄SNAME Transactions刊載MIT設計程序，暨相關資料分項說明，提供國內相關人士研讀及參考運用。

潛艦基本構想設計，最重要、最基本項目應該是船型(Hull Shape)的發展，依序才

能完成：排水量、主要尺寸、水下動力平衡 (Polygon)、船速、馬力、螺槳、流體動力 (Hydrodynamic)、主要結構及一般佈置等選擇、估算，且該等項目設計時，數據相互關連及相互作用 (Interrelation and Interaction)，評估時必須作妥協性選擇最佳方案。

據SNAME Transactions刊載，本程序理論設計與Taylor 58 Series估算相符 (Matched)。惟下列項目於設計凍結 (Design Frozen) 前，仍應詳細討論，是否列入考量。

- 一、噸位限制對設計之影響。
- 二、低訊跡對改善隱形能力對設計之影響。
- 三、重量/體積/穩度/平衡能力裕量成長考量。
- 四、單層壓力殼vs雙層壓力殼構型。
- 五、在淺水深度時高張力鋼板對壓力殼重量的影響。
- 六、安全因素對不同破壞模式的影響。
- 七、呼吸管航行時水下流體動力分析。
- 八、傳統十字型舵vs X型舵的影響。
- 九、絕氣式推進系統。
- 十、引進先進戰系對儀台的影響。

## 貳、船型 (Weight and Volume)

潛艦執行構想設計之前，宜按”附件1”項目及流程，以理論基礎，進行可行性研究，經取舍研究 (Trade of Studies)，發展出船型可行性方案；同時，也需要委託戰系整合商，完成戰系可行性分析方案，依美軍族群結構碼提供Group 4 Electronics及

Group 7 Weapons兩項可行性研究，納入載台可行性方案內運用，作為構想設計之依據。

本章謹就「船型」項目，基本設計理論與方法，以設計實務程序簡介，供國內相關業者瞭解及參考運用。

海軍潛艦籌獲政策係採由國內自行設計與建造，海軍授予臺船公司簽署設計合約，啟動國艦國造程序。

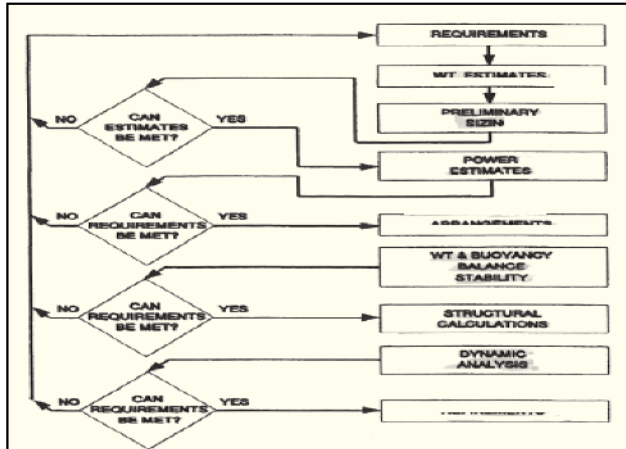
參考德國HDW型潛艦論壇 (subcon)，概知現代化潛艦設計理念及國際發展之新趨勢暨國內現況，綜整國造潛艦涉及有關的關鍵技術及趨勢，詳如”附件2及附件2-1”，供政府、國防部、海軍、業界參考，俾能共同承擔責任，努力解決，期能順利依合約完成潛艦設計。

### 一、基本船型設計實務發展

(一) 潛艦基本設計係按需求，以潛艦性能諸元，歸納其基本物理特性，設計一些有意義的參數，顯示：船長、直徑、排水量，馬力與船速、穩度…等之間的關係，在造船原理教材書內，諸多有關數學公式、曲線等運用、分析計算，算出一個船型其幾何外型 (Geometry of a Submarine)，再演算幾何圖形之體積 (Volume)、排水量 (Displacement)，任何船型計算方法均相同。

(二) 其概念係以水下基本性能考量，詳如附件1內項目，經多年修正 (tailor-made)，概以船長/直徑 (L/D) 比值在“6”左右及最大直徑在0.4L時，旋轉成一個幾何實體，其在水下基本性能最佳。

(三) 引用數學公式



附件1 可行性研究流程圖

資料來源：摘自 Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), Vol.100.1992.

- New generation of submarine design concepts
- A balance, future-orientation concepts
    - The massive growth of Chinese navy.
    - Scenarios.
    - Mission profiles.
    - Technology trends in submarine design.
  - The design focused on the follow main characteristics:
    - hydrodynamics
    - Low overall signature
    - Extended underwater endurance
    - effective sensors and combat system
  - Technolog approach
    - Key technologies
      - overall design and construction of compact, low signature submarine
      - pressure hull of high-strength non-magnetic Steel
      - Fuel cell system
      - Permanent magnet propulsion motor
      - Integrated sonar system
      - optical system
      - torpedo weapon system
    - The command and weapons control System(CWCS)
    - personal training
    - Fundamentals of submarine concept design
    - Data bank
    - Know how
    - Installation control data, ICD
    - Technical assistance
  - New submarine designs are ready

附件2 關鍵技術

資料來源：摘自 Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), Vol.100.1992.

$$y_f = \left(\frac{D}{2}\right) \left[ 1 - \left(\frac{x_f}{L_f}\right)^{nf} \right]^{1/nf} \quad \text{〔公式1〕}$$

$$y_a = \left(\frac{D}{2}\right) \left[ 1 - \left(\frac{x_a}{L_a}\right)^{na} \right] \quad \text{〔公式2〕}$$

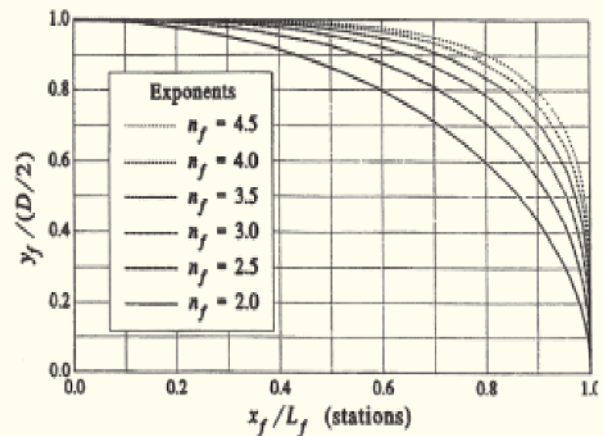
其中 $y_f$ 為計算船艏段(Entrance)橢圓形(Ellipsoid)在船長等分線(Station)船線座標(offsets)詳如”附件3”，連接各船線座標成船艏段平面示意圖詳如”附件4”。

同理

- 藉增加電瓶儲存量、性能及絕氣式推進系統增加潛航續航力
- 降低浮昇率
- 訊跡管理，增強隱形功能
- 增加裝備可靠性，降低維修需求
- 高度自動化
- 引進先進偵蒐、潛射武器(2/3維)高速與大容量電腦，整合指揮與武器控管系統
- 增加艇員居住生活環境標準
- 發展深海救難系統

附件2-1 傳統潛艦發展趨勢

資料來源：摘自 Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), Vol.100.1992.

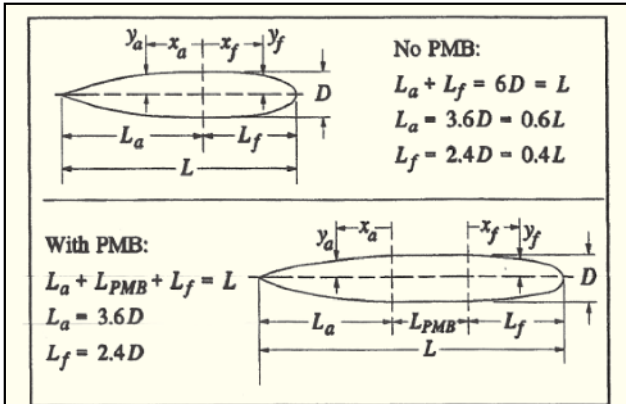


附件3 船艏船線座標圖(Equation (1))

資料來源：摘自 Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), Vol.100.1992.

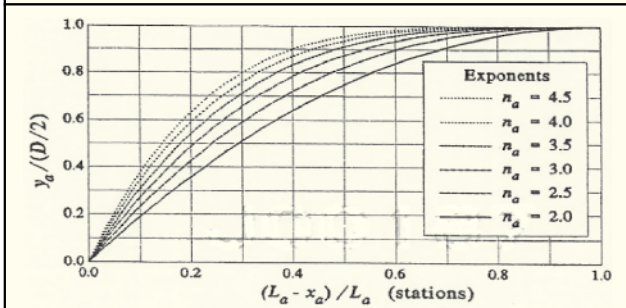
$y_a$ 為計算船艏段(run)拋物線(Parabola)方式，算出船艏船線座標(Offsets)詳如”附件5”，船艏段平面示意圖詳如”附件4”。

(四)平行同心軸準線(Directrix)，分別旋轉橢圓形船艏及拋物線形船艏圖，形成一個三維空間幾何實體(Geometry of a Submarine)。



附件4 潛艦外形幾何圖

資料來源：摘自Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), Vol.100.1992.



附件5 船艏船線座標圖 (Equation (2))

資料來源：摘自Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), Vol.100.1992.

ENTRANCE:  $y_a/(D/2)$  [Equation (2)]

$x_a/L_a$	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5
0.000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
0.100	0.9950	0.9987	0.9997	0.9999	1.0000	1.0000
0.200	0.9798	0.9928	0.9973	0.9990	0.9996	0.9998
0.300	0.9539	0.9800	0.9909	0.9958	0.9980	0.9990
0.400	0.9162	0.9582	0.9782	0.9883	0.9935	0.9964
0.500	0.8660	0.9251	0.9565	0.9739	0.9840	0.9900
0.600	0.8000	0.8774	0.9231	0.9490	0.9650	0.9766
0.700	0.7141	0.8098	0.8693	0.9079	0.9337	0.9514
0.800	0.6000	0.7119	0.7873	0.8395	0.8756	0.9036
0.850	0.5268	0.6448	0.7280	0.7877	0.8315	0.8643
0.900	0.4359	0.5570	0.6471	0.7146	0.7658	0.8054
0.950	0.3122	0.4287	0.5225	0.5869	0.6363	0.6740
0.960	0.2850	0.3933	0.4867	0.5621	0.6230	0.6726
0.970	0.2631	0.3516	0.4437	0.5196	0.5820	0.6334
0.980	0.1990	0.2999	0.3889	0.4644	0.5278	0.5811
0.990	0.1411	0.2280	0.3097	0.3824	0.4455	0.5001
0.992	0.1262	0.2086	0.2877	0.3590	0.4217	0.4762
0.994	0.1094	0.1861	0.2615	0.3309	0.3927	0.4471
0.996	0.0894	0.1583	0.2286	0.2949	0.3531	0.4089
0.998	0.0632	0.1200	0.1816	0.2421	0.2988	0.3508
1.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
$C_{pf}$	0.6667	0.7500	0.8061	0.8455	0.8740	0.8946
$C_{pa}$	0.7854	0.8452	0.8833	0.9089	0.9270	0.9476
$LCB_a/L_a$	0.6250	0.3933	0.3725	0.3612	0.3507	0.3437

附件6 旋轉體船艏船線座標圖

資料來源：摘自Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), Vol.100.1992.

其數學計算公式如下：

$$V_f = \pi (D/2)^2 [C_{pf} \times 2.4 \times D] \quad \text{〔公式3〕}$$

$$V_a = \pi (D/2)^2 [C_{pa} \times 3.6 \times D] \quad \text{〔公式4〕}$$

$$V_{PMB} = \pi (D/2)^2 [L - 6D] \quad \text{〔公式5〕}$$

AFTER RUN:  $y_a/(D/2)$  [Equation (3)]

$x_a/L_a$	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5
0.00	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
0.10	0.9900	0.9968	0.9990	0.9997	0.9999	1.0000
0.20	0.9600	0.9821	0.9920	0.9964	0.9984	0.9993
0.30	0.9100	0.9507	0.9730	0.9852	0.9919	0.9956
0.40	0.8400	0.8988	0.9360	0.9595	0.9744	0.9838
0.50	0.7500	0.8232	0.8750	0.9116	0.9375	0.9558
0.60	0.6400	0.7211	0.7840	0.8327	0.8704	0.8996
0.70	0.5100	0.5900	0.6570	0.7130	0.7599	0.7991
0.80	0.3600	0.4276	0.4880	0.5421	0.5904	0.6336
0.90	0.1900	0.2316	0.2710	0.3084	0.3439	0.3776
1.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
$C_{pf}$	0.5333	0.5952	0.6429	0.6806	0.7111	0.7366
$C_{pa}$	0.6667	0.7143	0.7500	0.7778	0.8000	0.8359
$LCB_a/L_a$	0.3125	0.3333	0.3500	0.3636	0.3750	0.3949

附件7 旋轉體船艏船線座標圖

資料來源：摘自Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), Vol.100.1992.

(平行舳體為圓柱體，其稜形係數，prismatic coefficient,  $C_p=1$ )

$$\text{Total volume} = V_f + V_a + V_{PMB}$$

$$\text{可合併 } V = \pi D^3 / 4 [ 3.6 C_{pa} + L/D - 6 + 2.4 C_{pf} ] \quad \text{〔公式6〕}$$

其中

$V_f$  係船艏段旋轉實體船線座標 (Offsets for Bodies of Revolution) 詳如”附件6”。

$V_a$  係船艏段旋轉實體船線座標”詳如”附件7”。

上述概念，算出的幾何實體，可能會瘦長，欲符合現代化潛艦排水量需求，可增大公式1/2內的指數或插入平行舳體(PMB)，簡易方法就完成船型體積 (Volume) 的計算。

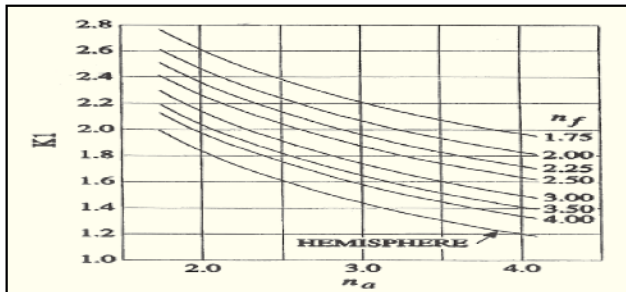
(五) 按附件4圖示船型幾何圖形，假設船艏/艏稜形係數 ( $C_{pf}$  and  $C_{pa}$ ) 選定，按附件8曲線圖以船艏/艏指數  $n_f$  and  $n_a$  為函數

$$\text{公式 } K1 = 6 - 2.4 C_{pf} - 3.6 C_{pa} \quad \text{〔公式7〕}$$

暨海水密度  $35 \text{ ft}^3/\text{ton}$

得到水下排水量 (Envelope Displacement, ENVD)

公式如下



附件8 K1 曲線

資料來源：摘自Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), Vol.100.1992.

Table 1. Weight and Buoyancy Estimating

Group#	Name	Function of	Example (Long Tons)
1	Hull	NSC	288.364
2	Mach	SHIP & NSC	507
3	Elect	SHIP & NSC	209.4
4	Electronics	Given	180.2
5	Ass Mach	NSC	579.8
6	Outfit	NSC	226.8
7	Var Items	Given	785.7
A-1	LEAD	Requirement	5807.564
A	Var Load	Requirement	945.4698
NSC	Var Load	NSC	6744.034
MBT	Var Load	NSC	581.2623
SUB D	Free Flood	Requirement	732.296
ENVD	Free Flood	ENVD	929.5501
	Free Flood	ENVD	8254.877
	Free Flood	ENVD	288.9732
	Free Flood	ENVD	8643.85

% Group 1	0.3943	Comp	0.750606
% LEAD	0.16125	Comp	0.893633
% VAR LOAD	0.07935	DRAFT FWD	31.059
% MBT	0.1269	DRAFT AFT	31.100
% FREE FL	0.045	SURFACE D	823.043
		SURFACE LCB	1531.1
n_f	3	TRIM ANGLE	0.008327
DIAM	38	Cp	0.792819
K1	1.872	(Cp in nose-up)	0.86039
K2	1.153	L/D	8.842195
LOA	336	L/D	7.01037
WS	3488.88	L/D - K1	7.689009

附件9 重量與浮力估表

資料來源：摘自Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), Vol.100.1992.

Table 2. Weight and Buoyancy Summary

Group #	Weight	L Arm	L Mass	V Arm	V Mass
Long Tons					
1	2888	138.00	308454	15.23	44042
2	507	170.00	181150	18.00	13152
3	209.4	152.00	34132	15.75	3598
4	180.2	170.00	12653	16.25	2923
5	579.8	120.00	69276	15.90	9219
6	226.8	112.00	28762	18.00	8422
7	785.7	60.00	47142	12.00	9428
A-1	5807.2	128.75	344981	14.93	86693
LEAD	1049.322	229.03	313803	13.77	16343
A	6356.522	154.42	1038784	13.06	103237
Var Items	830	135.00	96760	11.40	8902
Var Wat Ball	23.23	130.00	3019	5.00	116
Residual	2.3	122.00	412	2.00	7
NSC	7813.042	153.01	1118975	14.80	108262
MBT	890	21.41	47812	15.80	14694
SUB D	8243.042	141.53	1166787	14.92	122956
Free Flood	389	125.00	48623	14.00	3448
ENVD	8632.042	140.90	1215412	15.83	136643

DCG	1.00	GM	1.03
V Arm S	4.00	V Arm M	15.80
L Arm S	64934.43	L Arm M	110.00
Surf L	3.06		
Mar L	1046.26	456.52	130.98
			39795.6

w = 63.6	410.8133	208.23	Reference for Polygon	130
w = 64.0	456.52	-849.50		
w = 64.3	496.7999	-1632.31		
w = 65.0	342.2537	2837.62		

附件10 重量與浮力綜合表

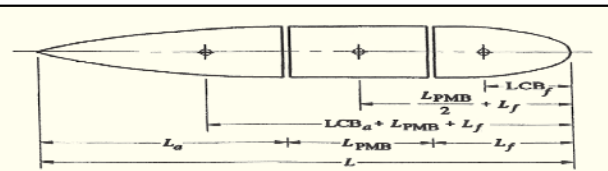
資料來源：摘自Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), Vol.100.1992.

$$ENVD = \pi D^3 / 4 \times 35 [L/D - K1] \quad \text{〔公式8〕}$$

即完成基本船型排水量(displacement)

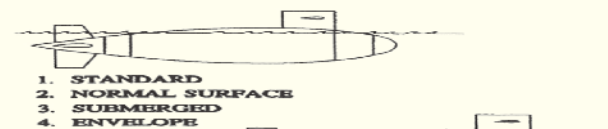
理論設計。

(六) 下一個步驟：就是找出水面排水量的吃水(Draft)及計算LCB、VCB，必須考量水線下自由液面(Surface Flood)修



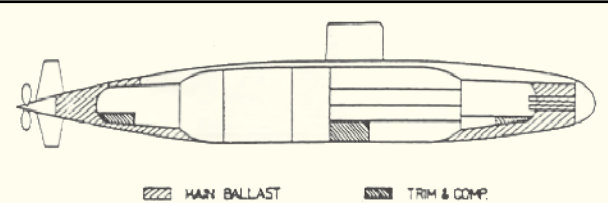
附件11 旋體各部位重心位置

資料來源：摘自Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), Vol.100.1992.



附件12 排水量定義型式

資料來源：摘自Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), Vol.100.1992.



附件12-1 潛艦主壓、俯仰、補償櫃示意圖

資料來源：摘自顏君強，《潛艦設計與建造》

正問題...等；另艦儀(Lead)在穩度(Stability)及裕量(Margin)範疇考量等，詳如後述。

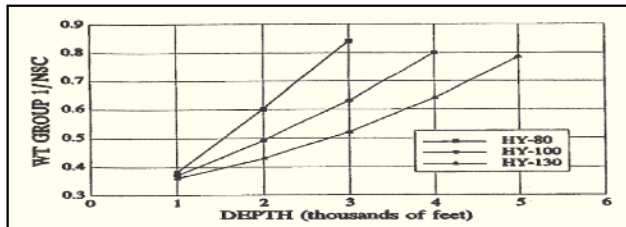
## 二、研討

(一) 船型體積(Volume)理論發展，必須與重量分類(Weight Groups)估算之數據吻合，才能吻合阿基米德造船(Naval Architecture)原理。

(二) 潛艦有水面、水下不同類型排水量的定義，示意圖如附件12。

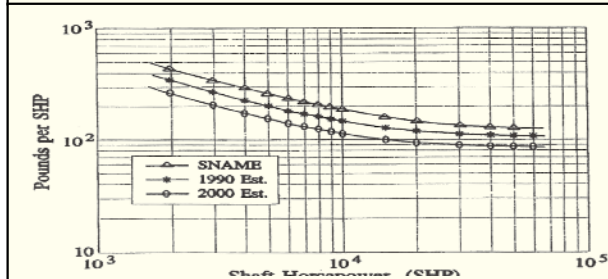
1. 與分類重量(Group Weights)關係，構想設計階段，其估算方法如下：

(1) Normal Surface Displacement, NSC



附件13 Gr1重量/水面排水量vs水深

資料來源：摘自Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), Vol.100.1992.



附件14 輪機裝備重量估算表

資料來源：摘自Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), Vol.100.1992.

$$NSC = A + \sum VL$$

(2) Submerged displacement, SuBD

$$SuBD = \sum NSC + MBT$$

(3) Envelope displacement, ENVD

$$ENVD = \sum SuBD + FF \text{ (Free flood)}$$

其中計算ENVD重量時，因附屬物結構重量與壓力殼重量比值甚微，故構想設計階段，予以忽略不計。

2. 同型潛艦，其分類重量與NSC比值，有趨向一致性，故可運用此特性，估算其分類重量。

(1) 不同結構材料(HY-80/100/130)及操作下潛深度，其船體結構重量可按Group 1/NSC與下潛深度之關係詳如附件13方式計算。

(2) 輪機裝備Group 2/3，可藉軸馬力 Shaft horsepower (SHP)與單位重量比之曲線關係估算，詳如附件14。

(3) Group 4/7 可摘錄戰系可行性分析，提供實際重量(Given)。

(4) Group 5/6 可運用同型船比例值運用。

(5) 其他估算重量方法：

LEAD 係設計未知及穩度需求，其方法如下：

LEAD / A-1 比值 0.1~0.125

MBT/NSC 比值 0.1~0.15

比值 0.04~0.05 for single hull

比值 0.07~0.09 for double hull

綜整上述，NSC重量估算公式如下

$$NSC = \frac{[1+\%LEAD] \times \sum [2 \sim 7]}{1 - \%VL - [\%GR1 \times (1 + \%LEAD)]} \quad \text{〔公式9〕}$$

【上述縮寫英文字母，請參考附件9內容】

(三) 運用公式8算出的排水量(ENVD)及運用附件9重量分類(按SWBS)分析統計表，如選擇直徑/船長、二項指數以及可調整之常數，即可設計潛艦船型主要尺寸。

(四) 重量的佈置位置(Location)就跟其重量的數據一樣，有其造船原理重要的意義，須與潛艦內系統、裝備、管路……等一般佈置(General Arrangement)研究，相關重量與位置妥協(Compromise)；算出旋轉體船線座標，才能得到排水量(ENVD)，按附件10計算方式，才可以計算船型體積浮力(buoyancy)、LCB、VCB，詳如附件11示意圖。潛艦排水量按不同裝載及水面、水下狀況，有不同定義，詳如附件12示意圖，上述及附件10內的分類重量包括：水面排水量(NSC)、吃水、LEAD、MBT的重心、浮心值均需分別

計算，俾確定BG值(height of LCB above LCG，潛航規定值1~1.25ft)，供穩度、水下流體運動…等評估。

(五)完成重量與體積(weight and volume)可行性分析後，即可再回到附件1可行性項目及流程，完成潛艦船型理論基本設計。

(六)美國Taylor船模試驗中心，完成一系列的潛艦船型理論計算資料，再經設計驗證，製成船模資料庫(Data Bank)稱Taylor 58 Series，供設計參考運用。

(七)據SNAME TRANSACTIONS刊載；本船型理論設計與Taylor 58 Series數據相符(matched)。

(八)本報告可透過電腦軟體運算，修正迅速，但純屬理論，須實際驗證，謹供參考！

(九)本報告結構材料，係以HY-80系列及配合下潛深度要求考量，因結構材不同，結構寸法及涉及可行性分析項目，須研究更新設計方法。

(十)Lead 裕量策略

設計艦載lead，並不是穩度或傾側平衡考量，而是下列因素：

1. 設計裕量，估算與設計差異
2. 船廠裕量，建造及裝備製造商與設計差異
3. 未來服勤成長裕量。

### 參、平衡多邊形(Polygon)

潛艦可行性研究，設計者完成船型之重量(Weight)與體積(Volume)估算后，按附件1項目及流程，如何利用” Polygon” 工具，決定變動壓載櫃(Variable Ballast Tanks)

的尺寸(Size)及位置(Location)，暨決定潛艦不同裝載重量與浮力(Buoyancy)，在水中達成平衡狀態(Equilibrium)。潛艦可行性研究階段，為掌握已發展船型，確保潛航平衡(Balancing)能力，在任何裝載船況及不同海域之海水密度情況下，均應該有足夠的下潛、上浮，保持平衡的能力。

#### 一、Polygon設計流程

(一)潛艦建造完成，其水面排水量(The Normal Surface Condition-NSC)的體積(Volume)就固定了，但是不同海域，就有不同海水密度，因此浮力(Buoyancy)，就會改變。

1. 海水密度：

輕海水密度	63.6 lb/ft <sup>3</sup>
標準海水密度	64.0 lb/ft <sup>3</sup>
重海水密度	64.3 lb/ft <sup>3</sup>

為保持其平衡能力，就須設計變動壓載(Variable Load ,VL)。

2. 分類意義如下：

- (1)航行中，時刻因消耗，會變動項目。
- (2)保持平衡船況，須打入海水壓載重量。
- (3)變動壓載櫃(MBT)內剩餘(Residual)海水重量。

3. 實際變動項目載重項目(Variable items)，分類如下：

- (1)固定重量(Fixed Weight)。
- (2)淡水(Fresh Water)。
- (3)糧秣(Provision)。
- (4)滑油(Lubrication Oil)。
- (5)燃油及補償水(Fuel Oil and Com-

pensation water)。

(6) 武器(Weapon)。

(7) 人員(Passengers)。

(8) 電瓶(Battery electrical)。

(9) 魚雷調整水櫃、魚雷充水櫃、魚雷管(Water in WRT(Water Round torpedo) tanks, torpedo drain tanks, and torpedo tubes)。各類項目，可按需求估算重量。

按下列公式及重量與浮力統計表詳如附件10，估算變動裝載的重量

$Var\ load = \sum Var\ items + water\ to\ balance$  [公式1]

Water to balance =

$NSC \times W / 64 - Cond\ A - \sum Var\ items$  [公式2]

海水密度 64.0 lb/ft<sup>3</sup>

(二) 剩下的問題，就是設計變動櫃(Variable Tanks)的位置(Location)及尺寸(Size)，提供下潛、上浮時，海水的壓載/排出，重量及適當俯/仰所須的平衡力矩。

$VL = NSC - Cond\ A$  [公式3]

$Mom\ VL = Mom\ NSC - Mom\ Cond\ A$  [公式4]

1. 可行性階段，以五種極端裝載船況：

(1) 正常裝載(Normal)。

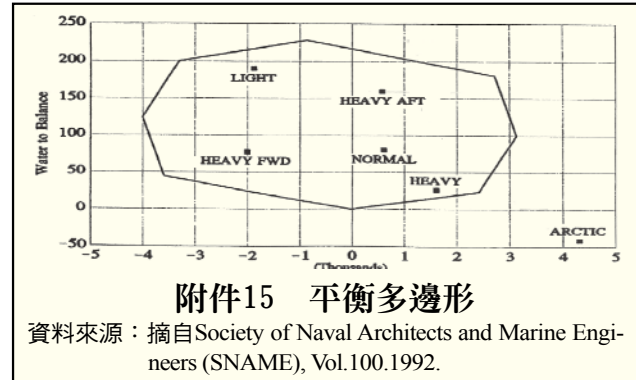
(2) 重裝載(Heavy)。

(3) 輕裝載(Light)。

(4) 艏重裝載(Heavy FWD)。

(5) 艉重裝載(Heavy AFT)。

通常艦艏/艉俯仰櫃(The Forward and After Trim Tanks)接近艏/艉端，主要調整



俯仰平衡，並兼做調整上浮、下潛，該位置未來被設計成俯仰櫃、燃油變櫃。

輔助櫃(Auxiliary Tanks)接近排水量(The Envelope displacement (ENVD))的縱向浮心(LCB)位置，主要調整下潛、上浮，該位置未來被設計成輔櫃、重量補償櫃、負櫃、安全櫃、...等，以上示意圖如附件12-1。

2. 假如將艏俯仰櫃(FWD Trim Tanks)慢慢充滿海水，至平衡狀況，取海水重量，噸為縱軸，海水重量，產生之力矩(ft-tons)為橫軸，依此順序，不同重量、力矩值，將可劃出近乎一條直線。

同樣方式，處理輔助櫃也可以劃出一條直線，且接到上述直線之末端。

然後艉俯仰櫃(After Trim Tanks)依充滿海水程序，按同樣參考面，則形成負力矩直線，此為下潛模式。

假如海水被抽出艇外，相反程序，前述直線就在鏡面影像(a mirror image of the lines)形成另組直線，即構成平衡多邊形(Polygon)的邊界線，詳如附件15。

## 二、研討

(一) 完成基本船型後，按本報告



” Polygon” 的方法計算，即可得到該船型水下平衡能力，是典型的平行多邊形圖。

(二) 假設五種裝載船況，潛航時均在平行多邊形內，就是安全設計。

(三) 附件10重量與浮力統計表內，可變動載重(Variable Load)與壓載(Lead)是可以互相調整並藉由改變” Lead” 的重量及位置，調整各種船況，在” Polygon” 內的位置。

(四) 五種裝載船況，其位置與平行多邊形邊界之區域，可視為該艦型潛航平衡能力之裕量。此裕量愈大，則說明該船型有較佳的平衡調整能力。惟此將浪費可用空間和重量，潛艦緊密設計(Compact Design)，故一般裕量均不大。反之，愈小則有危險。

五種裝載船況，在平衡多邊形中，分佈趨勢，整體偏右時，說明該船型輕船重量有偏後移趨勢，而應藉壓載(LEAD)前移改善；反之則後移改善。

若整體偏上時，則說明輕載重量有偏輕之趨勢，應藉增加壓載(LEAD)改善；反之，則減輕壓載(LEAD)改善。

### 肆、船速與動力(Speed and Power)

潛艦可行性研究項目及流程，詳如附件1示意圖，此刻已選定船型主要尺寸(Principal Dimensions)及合理的潛航平衡能力(Polygon)后，必須運用相關的理論，估算船型的動力(Power)，俾獲得指定的船速(The Specified Speed)。

水面船(Surface Ships)及造船原理

(Naval Architecture )教科書有許多估算動力的方法(Method)，可以運用到潛艦。

下列公式，運用參數關係，於可行性研究階段，計算有效馬力(The Effective Horse Power)

$$EHP=0.00872 V_k^3 [WS(C_f+\square C_f+C_r)+AsC_{DS}+\Sigma(A_A+C_{DA})] \quad \text{〔公式1〕}$$

#### 一、船速與動力計算簡介

前述有效馬力計算公式說明如下：

(一)  $V_k$  代表船速，每小時浬數(Knots)

(二)  $W_s$  代表裸船殼，浸水面積(Wetted Surface Area)

計算浸水面積公式

$$W_s = \pi D^2 [L/D - K_2] \quad \text{〔公式2〕 } K_2$$

$$= 6 - 2.4 C_{wsf} - 3.6 C_{wsa} \quad \text{〔公式3〕 } K_2 \text{係}$$

$n_a$  及  $n_f$  函數，詳如附件16。

(三)  $A_s$  帆罩(Sail)浸水面積

(四)  $A_A$  船殼外附屬物(Appendages)浸水面積

(五)  $C_{DS}$  帆罩曳力係數

(六)  $C_{DA}$  附屬物曳力係數

(七)  $C_f$  摩擦阻力係數

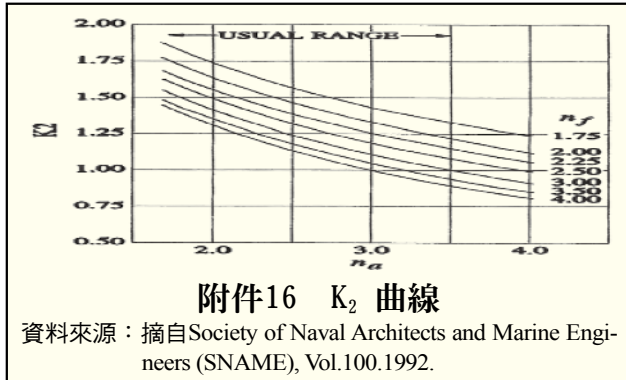
按國際船模試驗槽會議(The International Towing Tank Conference, ITTC)設計公式

$$C_f = \frac{0.075}{\log_{10}(RE-2)^2} \quad \text{〔公式4〕}$$

RE 雷諾數  $RE=VL/\nu$

基本上  $C_f$  係與船長、速率及海水黏性係數相關。未來可由船模試驗決定。

(八)  $\square C_f$  粗糙係數(The Roughness Coefficient) 或稱修正裕量，與船殼建造工



藝、表面積垢及開口等等相關。

該數據範圍 0.0003~0.0012 SNAME 建議值 0.0004

(九) $C_r$  船型阻力係數

計算航行時沿船殼壓差的變化詳如附件17，柏努力能量交換定理(Bernoulli's Conservation of Energy)，熱能項目較小可以忽略，大部分係跡流(Wake)損耗。附件3圖示：理論、實際及納入螺槳考量，顯示沿船殼，相對大氣壓力，壓差差異變化。

由於船艏波(Bow Wake)形成初低壓力(Initial Low Pressure)對船殼形成曳力(Drag)阻力，凡此均需螺槳的推力克服，俾達指定船速。

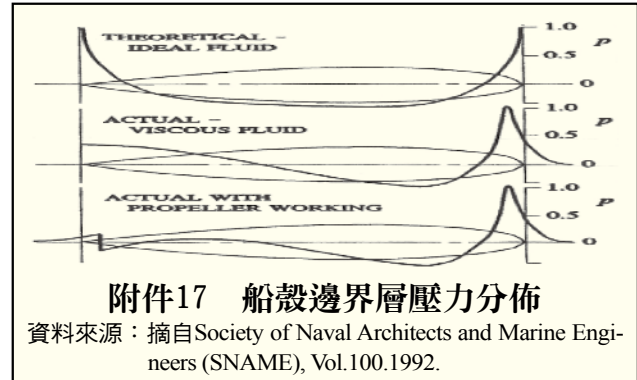
計算經過船殼附屬物產生水流紊流的損耗

$$C_r = \frac{0.00789}{L/D - K_2} \quad \text{〔公式5〕}$$

$C_r$  最大剖面積及浸水面積函數。

二、研討

(一)計算浸水面積(Wetted Surface Area)時，須參考本文基本構想設計船型內公式8及附件8，得到排水量(The Envelope Displacement, ENVD)后，以同樣理論求得公式2/3。



(二)公式1應納入水面行波阻力(The Wave Making Coefficient)，但現代化潛艦均以潛航為主，故未納入計算。

(三)呼吸管航行(Snorkeling)所須馬力介於水面及水下情況之間。

(四)水下附屬物控制翼板(Control Surface)及帆罩(Sail)，佔船殼曳力(Hull Drag)很大的百分比，其馬力計算與主船殼(Main Hull)方法相同的重要。其中

1. 控制翼板平衡翼之尺寸(Size)及外形(Shape)納入水下流體(Hydrodynamic)項目考量，曳力係數整合成 $C_{DA}$ ，以 $\Sigma A_A \times C_{DA}$ 計算，併入公式1。

2. 帆罩亦同理，唯構想設計階段計算公式如下：

$$A_A \times C_{DA} = L \times D/1000 \text{ 併公式1運算。}$$

(五)按上述說明方式，就可以計算並劃出有效馬力(Effective Horsepower, EHP)對船速(Speed in Knots)的有效馬力曲線圖。

伍、螺槳(Propellers)

螺槳設計改變引擎扭矩，克服船殼阻力，提供須要推力。

分

可變螺矩螺槳(Controllable Pitch Propellers)

對流旋轉螺槳(Counter Rotation Propellers)

導罩式螺槳(Ducted Propellers)

成為現代潛艦經常設計。

每種構型均有優缺點，現代化潛艦螺槳設計單螺槳；位於船殼旋轉軸心(a body of revolution hull)之後，控制翼板(Control Surfaces)后方，考量效率、噪音、強度，目前最多採用七片葉片(Blades)，設計低轉進、大直徑螺槳，提高推進效率。

螺槳設計數據，可從船模試驗槽(Towing-scale models in the towing tank)或螺槳實驗槽(Propellers tunnel)得到沒有受船殼干擾時，螺槳單獨試驗(Open Water Tests)數據。

主要4項有效參數如下：

$$K_t = \frac{T}{\rho a^4 n^2} \quad \text{[公式1]}$$

$$K_q = \frac{Q}{\rho a^5 n^3} \quad \text{[公式2]}$$

$$J = \frac{V_a}{a n} \quad \text{[公式3]}$$

$$\eta_o = \frac{K_t J}{2\pi K_q} \quad \text{[公式4]}$$

說明如下：

$K_t$  = 推力係數(thrust coefficient)

$K_q$  = 扭矩係數(torque coefficient)

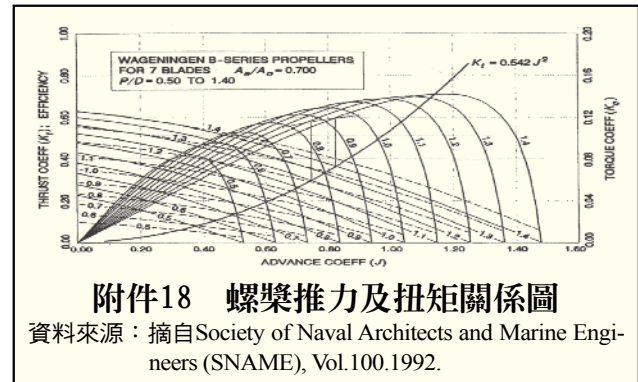
$J$  = 前進係數(advance coefficient)

$\eta_o$  = 螺槳單獨效率(open-water efficiently)

$T$  = 推力(thrusts (lbs))

$Q$  = 扭矩(torque (ft-lbs))

$d_p$  = 螺槳直徑(propeller diameter (ft))



附件18 螺槳推力及扭矩關係圖

資料來源：摘自Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), Vol.100.1992.

= 螺槳轉速(propeller rate (Rev per Sec))

$\rho$  = 海水密度(water density (lbs/ft<sup>3</sup>))

單獨螺槳試驗數據，製成螺槳函數圖表詳如附件18。

水流沿船殼往後流動，會產生流線跡流，到後控制翼板(Control Surfaces)會變的更紊亂，產生非均等跡流(Non-Uniform Wake)，需降低螺槳效率，造成噪音及振動。

設計低轉速、大直徑螺槳、改革船型、延遲跡流、降低阻力、提高推進效率，為螺槳設計考慮因素。

## 陸、船體與螺槳相互作用(Hull and Propellers Interaction)

沿船殼水流速度變化，因受阻力影響，稱之跡流(Fraction Wake)，與船型有關，至船艏螺槳時速度為  $v(1-w)$ ，其中  $v$  為船速， $w$  為跡流係數。

螺槳另外一項重要關係，即其輸出推力必須大於船殼阻力，延船殼水流，因跡流壓降消耗，增加推力，推力係數為  $t$ 。

推力 $R/(1-t)$ ，其中 $R$ 為船殼阻力。

該兩項因素不易從船模實驗(Model Basin)或全尺寸船模中獲得，從實船海測中，可摘錄可靠資料。

構想設計階段，即可正確計算該兩項因素，詳如附件19、20，即 $(1-w)$  and  $(1-t)$ 對 $(L/D-K_2)$ 曲線。

船殼效率(Hull Efficiency)被定義 $(1-t)/(1-w)$ ，有關跡流能量消耗及螺旋槳推力須求，附件21係船殼效率 $(1-t)/(1-w)$ 對 $(L/D-K_2)$ 曲線圖。

船殼配置螺旋槳，推力係數( $K_t$ )合併使用下列公式

$$K_t = \frac{EHP}{V^3} \left[ \frac{550}{\rho D^2 (1-t)(1-w)^2} \right] J^2 \quad \text{[公式1]}$$

式中

$V$  的單位為feet/sec，550係馬力轉換因素。

當EHP對 $V_r$ 確定， $(1-t)$  and  $(1-w)$ 即可從附件19、20讀取，另推力係數( $K_t$ )與前進係數( $J^2$ )計算及列入螺旋槳單獨效率曲線內，詳如附件18，該曲線內亦插入不同 $K_t$ 曲線及不同 $P/D$ 比值(Pitch/Diameter)，螺旋槳的效率在上述兩曲線相交時，而獲得螺旋槳曲線，而可決定螺旋槳類型了。

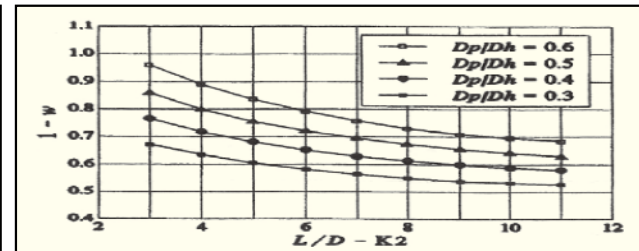
導罩螺旋槳(Kort nozzles)被安裝在拖船，可以增加螺旋槳推力，但噪音較大。

PC被定義為EHP/SHP的比值，運用上述資料，可以計算推進係數

$$PC = \eta_{0hr} \quad \text{[公式2]}$$

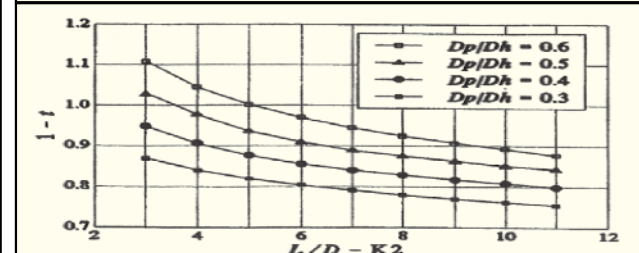
式中  $\eta_0$  = open water efficiency

$$\eta_h = (1-t)/(1-w)$$



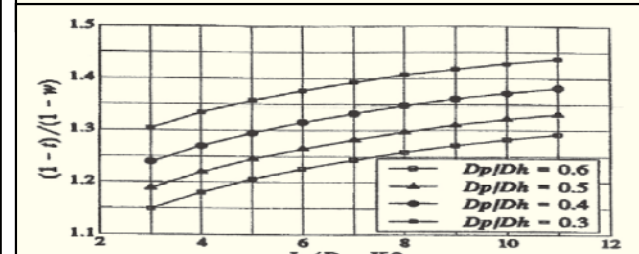
附件19  $(1-w)$  vs  $(L/D-K_2)$

資料來源：摘自Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), Vol.100.1992.



附件20  $(1-t)$  vs  $(L/D-K_2)$

資料來源：摘自Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), Vol.100.1992.



附件21  $(1-t)/(1-w)$  vs  $(L/D-K_2)$

資料來源：摘自Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), Vol.100.1992.

$\eta_{rr}$  = the relative rotation efficiency factor 說明螺旋槳在船殼後，紊亂跡流中運作計算。

當推進係數(PC)決定後，可藉EHP曲線計算並劃出軸馬力(SHP)曲線，螺旋槳轉速計算公式

$$J = \frac{V(1-w)}{nD} \quad \text{[公式3]}$$

$$RPM = 60 \frac{V(1-w)}{J D_p} \quad \text{[公式4]}$$

這是最重要決定螺槳每分鐘轉數 RPM(Revolutions Per Minute)的步驟。

完成船體與螺槳相互作用(Interaction)估算，才可吻合(Match)輪機設置特性。

### 柒、結構(Structures)

潛艦結構就像其他結構設計一樣，經得起外來的壓力(Uniform Pressure)。

包括壓力殼…等主體結構，設計水密並承受海水靜壓力、動壓力、爆震及疲勞負荷等所需強度；次結構設計，承受局部性負荷與壓力(不在此文討論)，其他重要結構組成，詳如附件22及附件22-1。

德國人創造數學公式(fourth-order differential equation)，解決壓力殼(Shell)及無限長度(Infinite length)圓柱體環狀加強肋骨的變形(Deflection)問題，也消除靜水壓力艏/艉端負荷，該基本公式，讓結構問題能較容易解決了。

加強肋骨即為保持壓力殼圓度，能讓壓力殼部分負荷剪切(Shear)到環形肋骨承受。

附件23顯示壓力殼與肋骨典型關係，k代表壓力殼負荷轉移到肋骨係數。

$$\text{肋骨負荷(Frame load)} = kPRL_f$$

P = 外部壓力(External Pressure)

R = 壓力殼半徑(Shell Radius)

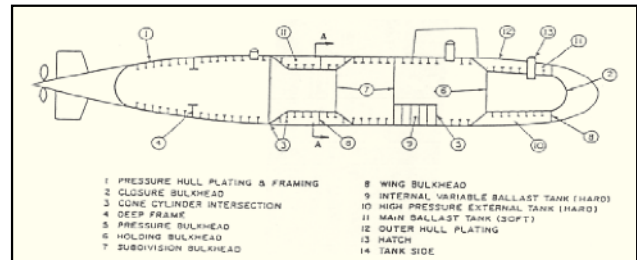
$L_f$  = 肋骨間距(Frame Spacing)

$A_f$  = 肋骨面積(Area of Frame)

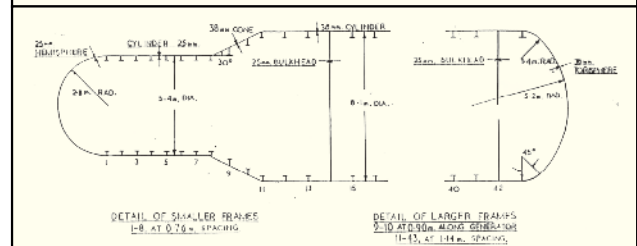
$\sigma_t$  = 肋骨應力(Stress in Frame)

$\sigma_y$  = 降伏應力(Yield Stress)

t = 壓力殼厚度(Shell Thickness)



附件22 潛艦結構組成示意圖  
資料來源：摘自顏君強，《潛艦設計與建造》



附件22-1 潛艦典型壓力殼結構  
資料來源：摘自顏君強，《潛艦設計與建造》

Then 
$$\sigma_f = \frac{\text{load}}{A_f} = \frac{kPRL_f}{A_f}$$

and 
$$\frac{kPR}{A_f} = \sigma_y t$$

Let 
$$\sigma_y = \sigma_f$$

Combining, 
$$\sigma_f = \frac{k\sigma_y t L_f}{A_f}$$

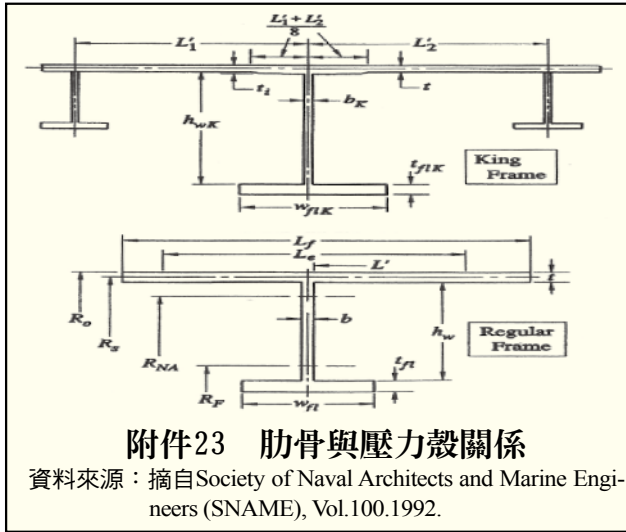
But 
$$t L_f = A_s$$

Therefore 
$$k = \frac{A_f}{A_s}$$

一般潛艦設計肋骨與壓力殼面積比範圍約0.375~0.400。

Arentzen and Mandel(1960)已經知道潛艦壓力殼三種不同破壞模式(Fail Modes):

1. 壓力殼降伏破壞模式(Shell Yielding)
2. 壓力殼與肋骨間環形突物挫曲破壞模式(Lobar Buckling)
3. 肋骨、壓力殼、隔艙壁或大形加強



附件23 肋骨與壓力殼關係

資料來源：摘自Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), Vol.100.1992.

材(King Frames)一般不穩定破壞模式(General Instability)

崩潰壓力(Failure Pressure)造成壓力殼降伏破壞模式，可由Hoop Stress Formula決定及證實，容許應力可以稍高於降伏應力，軸向應力正好是環向應力的一半，因為在潛艦的容許應力是1.16 x 降伏應力。

這是理論關係，潛艦在較高壓力狀況及軸向應力增加時，結構變形是無法繼續控制的。

較安全的數字約1.06，無論如何實際崩潰壓力必須分別計算。結構崩潰壓力降伏可由公式求得：

$$PDL = 2t\sigma_y L \quad \text{or} \quad P_y = \frac{2t\sigma_y}{D} \quad (21)$$

環形突物挫曲(Lobar buckling)被定義為壓力殼與肋骨之間挫曲破壞模式，經常有偶數環形突物(Lobes)，數量與肋骨間距有關。

愈小肋骨間距，愈多環形突物，Vom Mises(1933)發展彈性變形(Elastic Deflection)曲線公式解決，結果公式雖經簡

化，仍然相當複雜。

$$P_{cr} = \frac{2.6E(t/D)^{5/2}}{L_f/D - 0.45(t/D)^{1/2}} \quad (22)$$

$P_{cr}$ 代表崩潰壓力〔(Collapse Pressure(P))〕，並假設周圍環形突物(Lobes)數量， $n = (\pi R)/L_f$ 當 $L_f/R$ 變較小時， $n$ 必須變較大。

當分母接近零時，公式(22)是不適用，故須確認適用有效範圍。在 $L_f/D$ 比較大時，適用 Euler's公式

$$P_{cr} = 2.2 E \left[ \frac{t}{D} \right]^3 \quad (23)$$

該三項厚徑比方程式在相同坐標中，繪出很有意義的崩潰壓力曲線圖表，詳如附件24。

Kendrick(1953)一個肋骨間距結構，組成：一組為壓力殼，另一組為肋骨及肋骨間距的壓力殼，肋骨的應力(Stress)為負荷除以面積，代表挫曲強度(Buckling Strength)導至方程式如下：

$$P_{cr} = E \frac{t}{R} \frac{m^4}{(n^2 - 1 + \frac{m^2}{2})(n^2 + m^2)^2} + \frac{(n^2 - 1)E I_e}{R_f^3 L_f} \quad (24a)$$

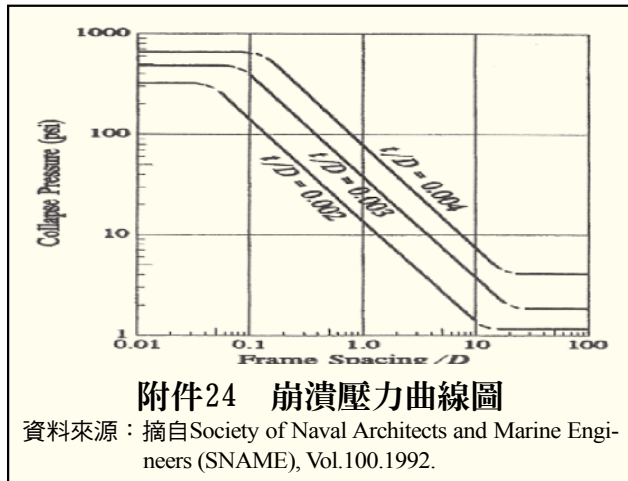
$$\text{where} \quad m = \frac{\pi R}{L_B} \quad (24b)$$

$m$ ，代表縱向環形突物(Lobes)數量，總是接近1。

$L_B$ 代表艙壁或 king frames 間距。公式(24a)計算有效慣性力矩( $I_e$ )，有效壓力殼長度( $L_e$ )，可用公式(31)獲得。

壓力殼降伏(Shell Yielding)

圓柱體軸向應力，與環向應力關係，Van Sanden and Gunther(1952)從變形曲線(Deflection Curve)，發展出92、92A方程



式，理由係肋骨及壓力殼外側變曲時，最大應力發生在壓力殼內側面。

方程式92A 計算切線應力(Tangential Stress)

方程式92 則為軸向應力(Axial Stress)，基本參數如下：

$R_s$  = 壓力殼半徑均值(Mean Radius of the Shell)

$t$  = 壓力殼厚度(Shell Thickness)

$\sigma_x$  = 軸向應力(Axial Stress)

$\sigma_\phi$  = 切線應力(Tangential Stress)

$$\theta = \frac{18.2L_f/D}{(100t/D)^{1/2}}$$

$$\beta = \frac{1.555N(R_s t^3)^{1/2}}{A_f + bt}$$

$$B = \frac{bt}{A_f + bt}$$

$$N = \frac{\cosh\theta - \cos\theta}{\sinh\theta + \sin\theta}$$

Equation 92 of von Sanden and Gunther is :

$$P = \frac{2\sigma_x(t/D)}{0.5 + 1.815K \left[ \frac{0.85 - B}{1 + \beta} \right]} \quad (25)$$

where  $K = \frac{\sinh\theta - \sin\theta}{\sinh\theta + \sin\theta}$

There Equation 92a is :

$$P = \frac{2\sigma_\phi(t/D)}{1 + H \left[ \frac{0.85 - B}{1 + \beta} \right]} \quad (26)$$

where  $H = - \frac{3 \sinh(\theta/2) \cos(\theta/2) + \cosh(\theta/2) \sin(\theta/2)}{\sinh\theta + \sin\theta}$

K, H, 及N代表超越函數(Transcendental Functions)，定義局部肋骨系統(Local Framing)在壓力殼的彎曲影響(Bending Effect)。

N，代表肋骨的變形影響

H，代表舢跨距(Midspan)壓力殼彎曲影響

K，代表肋骨壓力殼變曲影響

von Sanden and Guenther 92及92A 公式，兩肋骨中間應力公式計算：

$\sigma(X_m)$  = 肋骨間距中點軸向應力

$\sigma(X_f)$  = 肋骨軸向應力

$\sigma(\phi_m)$  = 肋骨間距中點切線應力

$\sigma(\phi_f)$  = 肋骨切線應力

其中 o 及 i 符號分別代表外殼之外側及內側，計算如下：

$$\sigma_i^o(X_m) = \frac{PR}{t} [0.5 \pm aF_4] \quad (27)$$

$$\sigma_i^o(X_f) = \frac{PR}{t} [0.5 \pm aF_3] \quad (28)$$

$$\sigma_i^o(\phi_m) = \frac{PR}{t} [1 - a(F_2 \pm 0.3F_4)] \quad (29)$$

$$\sigma_i^o(\phi_f) = \frac{PR}{t} [1 - a(1 \pm 0.3F_3)] \quad (30)$$

$$L_{eff} = L_f F_1 + b \quad (31)$$

$$a = \frac{(1-\nu/2)}{1 + (b^t/A^*) + L_f t F_1 / A^*}$$

$$A^*_{external} = \left| \frac{R_o}{R_{ca}} \right|^2 A_f$$

$$A^*_{\text{internal}} = \left| \frac{R_0}{R_{cg}} \right| A_f$$

$$F_1 = \frac{4}{\theta} \left| \frac{\cosh^2 n_1 \theta - \cos^2 n_2 \theta}{\frac{\cosh n_1 \theta \sinh n_1 \theta}{n_1} + \frac{\cos n_2 \theta \sin n_2 \theta}{n_2}} \right|$$

$$F_2 = \left| \frac{\frac{\cosh n_1 \theta \sin n_2 \theta}{n_2} + \frac{\sinh n_1 \theta \cos n_2 \theta}{n_1}}{\frac{\cosh n_1 \theta \sinh n_1 \theta}{n_1} + \frac{\cos n_2 \theta \sin n_2 \theta}{n_2}} \right|$$

$$F_3 = \left[ \frac{3}{1-v^2} \right]^{1/2} \left| \frac{\frac{\cosh n_1 \theta \sin n_2 \theta}{n_2} - \frac{\sinh n_1 \theta \cos n_2 \theta}{n_1}}{\frac{\cosh n_1 \theta \sinh n_1 \theta}{n_1} + \frac{\cos n_2 \theta \sin n_2 \theta}{n_2}} \right|$$

$$F_4 = \left[ \frac{3}{1-v^2} \right]^{1/2} \left| \frac{\frac{\cosh n_1 \theta \sin n_2 \theta}{n_2} - \frac{\sinh n_1 \theta \cos n_2 \theta}{n_1}}{\frac{\cosh n_1 \theta \sinh n_1 \theta}{n_1} + \frac{\cos n_2 \theta \sin n_2 \theta}{n_2}} \right|$$

$$n_1 = 1/2(1 - \gamma)^{1/2}; \quad n_2 = 1/2(1 + \gamma)^{1/2}$$

$$\gamma = \frac{P}{2E} \left| \frac{R}{t} \right| \left[ \frac{3}{1-v^2} \right]^{1/2}$$

$v$ ，代表蒲松氏比(Poisson's ratio)  
 $\sigma_h$ ，可替代 $PR/t$ ， $P$ =操作深度海水壓力  
 $R=R_0$ ，外部半徑。

無論如何 $\sigma_h$ 必須小於0.75 x金屬材料降伏應力，這是提供安全因素(Factor of Safety)個別方法。

各國海軍適用操作水深壓力，安全因素通常採用：

- 1.5 on yield
- 2.25 on labor bucking
- 3.75 on general instability

較高安全因素，會影響建造缺陷及焊接殘留應力。

疲勞因素應是主要考量，但疲勞與lobes buckling 及general instability安全因素是無關的。

失圓度影響(Effect of Out of Roundness)

上述公式係假設壓力殼完全圓，現代潛艦建造技術，須維持極度的圓形。對船廠實務考量，是不可能的，下列方程式說明壓力

殼平均圓度(Mean Circle)的偏差 $e_0$ ，內向變形值為正，外向變形值為負，並假設  $v = 0.3$

$$\frac{\sigma_i^0(x_m)}{\sigma_u} = \frac{1}{2} \pm aF_1 \left[ 1 + \frac{4Re_0(\alpha+1)}{0.85L_f^2 \alpha} \right] \quad (32)$$

$$\frac{\sigma_i^0(\theta_m)}{\sigma_u} = \left[ -aF_2 + \frac{4Re_0}{L_f^2} \left[ 1 - \frac{(\alpha+1)F_2}{\beta+(1+\beta)F_1} \right] \right] \pm 0.3aF_4 \left[ 1 + \frac{4Re_0(\alpha+1)}{0.85L_f^2} \right] \quad (33)$$

$$\frac{\sigma_i^0(x_f)}{\sigma_u} = \frac{1}{2} \pm aF_1 \left[ 1 + \frac{4Re_0(\alpha+1)}{0.85L_f^2} \right] \quad (34)$$

$$\frac{\sigma_i^0(\theta_f)}{\sigma_u} = \left[ -a \left[ 1 + \frac{4Re_0(1-\beta)(1-F_1)}{0.85L_f^2 \alpha} \right] \right] \pm 0.3aF_3 \left[ 1 + \frac{4Re_0(\alpha+1)}{0.85L_f^2} \right] \quad (35)$$

$$\alpha = \frac{A^*}{L_f t} \quad \beta = \frac{b}{L_f} \quad \sigma_u = \frac{PR_s}{t} \quad w_{max} = \frac{\sigma_u R_s}{E} \left[ 1 - \frac{v}{2} - aF_2 \right]$$

$w$  = deflection along the curve of the shell

肋骨強度 (Frame Strength)

肋骨強度太弱，船殼會過早地崩潰，假如過強，則船殼就會過重，肋骨設計不當，因而變得更有可能是發生挫曲，甚至在某些低壓力時，都有可造成船殼崩潰。

肋骨承受壓縮應力及彎曲應力等兩種力，von Sanden and Guenther 計算壓縮應力  $q=FP_c$ ， $q$  = load per inch of radius of the frame.

$P_c$  = design pressure.

假設  $v = 0.3$

$$F = b \frac{1 + 0.85 (\beta/B)}{1 + \beta}$$

$$\sigma_c = \frac{FPR_{cg}}{A_f + bt} \quad (36)$$

Kendick (1953)發展下列公式，決定肋骨彎曲應力(Bending Stress)

$$\sigma_b = \frac{Ece_0(n^2-1)}{R_{NA}^2} \frac{P_c}{P_{cr} - P_c}$$



c 代表中性軸(Neutral axis (NA)) 到肋骨表面距離， $P_c$ 代表設計崩潰壓力(Collapse Pressure)， $P_{cr}$ 代表一般非穩定性(General Instability)崩潰壓力，E代表楊氏係數(Young's Modulus)，肋骨總壓力等於壓應力及彎曲壓力總合。

$$\sigma_T = \sigma_c \pm \sigma_b \leq \sigma_Y \quad (37)$$

另肋骨偏移之影響，環狀肋骨產生其垂直圓柱體，軸向垂直平面之偏差量，將會隨負荷作用而變大，因此一些控制是必須的，否則影響肋骨強度。

大肋骨強度(King-Frame Strength)

大肋骨或深肋骨強度，計算方法與肋骨相同，唯一差別在公式中，壓力殼長度、大肋骨破壞模式與一般非穩定性破壞模式相同。大肋骨因為很堅固，嵌進環狀肋骨及壓力殼位置，其長度約環狀肋骨一半長度。

大肋骨 $t_i$ 厚度為壓力殼厚度的1.3倍， $D_k$ 代表大肋骨重心直徑， $L_b$ 代表兩大肋骨間外殼長度，值約為  $\pi R_s$  (or  $\pi D_s/2$ )。

$P_{cr}$  = lobar buckling failure

$$\sigma_c = \frac{F_{KF} P_{R_{KF} c g}}{A_{KF} + b_{KF} t_i}$$

$$F_{KF} = b_{KF} \frac{1 + 0.85 \beta_{KF} / B_{KF}}{1 + \beta_{KF}}$$

$$B_{KF} = \frac{b_{KF} t_i}{A_{KF} + b_{KF} t_i}$$

$$\beta_{KF} = \frac{1.555 (R_0 t_i^3)^{1/2}}{A_{KF} + b_{KF} t_i}$$

$$\sigma_b = \frac{E c e_o (n^2 - 1)}{R_{NA}^2} \frac{P_c}{P_{cr} - P_c}$$

大肋骨(King Frame)總應力等於壓應力及彎曲應力總合，如下：

$$\sigma_T = \sigma_c + \sigma_b \quad (38)$$

半球形體結構(End Closures)

為結構物艏/艉端，有很多類型半球形體，如半球體、半拋物線，以平板加強材或無須加強。配合圓錐體結構與較大圓柱體船殼直徑接合。

因半球體有須要穿孔，使得結構計算困難，厚度計算由理論實驗公式決定。有壓縮、彎曲或挫曲破壞模式。

半球體公式如下：

$$\sigma_c = \frac{P R_0^2}{2 t R_1} \quad (39)$$

where  $R_1$  = radius to midplane over a critical length, which, for steel, is  $L = (2.42 R_1 t^{1/2})$

$$\sigma_{avg} = 0.84 E \left[ \frac{t}{R_0} \right]^2 \quad (40)$$

兩項應力計算時，應等於或小於鋼材降伏應力(Yield Stress)，取鋼板厚度較大者公式。

艙壁(Bulkheads)

艙壁結構為增強壓力殼組合中之一種，但船殼遇崩潰時，尚須阻擋泛水設計(Flooding)，可由平板加強材或球形材加強。

考量逃生艙間設計，艙壁受壓面，能有足夠強度，將艙壁負荷轉移至壓力殼，剪應力確是壓力殼弱點，有限元素分析法(Finite Element Analysis)是最佳處理方法。構想設計在決定艙壁數量及強度。

撓曲(Deflection)

結構因應力增加產生撓曲現象，會引起艙間管路系統、構件、各型基座及其他許

多相關位置，產生位置及應力集中，須列入設計考量，不然會造成潛艦致命危險。應力 (Stress) 與撓曲 (Deflection) 關係：

$$\frac{\delta R}{R} = \frac{\sigma}{E} \quad (41)$$

潛艦原則上沒有縱向結構材，除非設計特別補強，如在壓力殼直徑變化處，需將應力傳遞，避免應力集中。

## 捌、流體動力 (Hydrodynamics)

潛艦流體動力學，分成幾項重要部分：

1. 動穩度 (Dynamics Stability)。
2. 控制度 (Controllability)。
3. 控制翼度的位置、尺寸。

它們相互有關，但可分別考量。

潛航時，潛艦必須操作在地球幾何 (Earth' s Geometry) 座標及固定潛艦本身的另一組座標。這些關係相當複雜，但是預測潛艦在水下的軌線 (Trajectories) 是必要的。

構想設計，僅考量垂直面與水平面。大部分潛艦航行路徑 (Path)，包括直線、水平轉向及垂直等運動。

流體力學基本公式，柏努力定理 (Bernoulli' s Conservation of Energy Equation)

力與力矩分量：

$$F = C_{( )} \frac{1}{2} \rho A V^2$$

$$M = C_{( )} \frac{1}{2} \rho A V^2 X$$

$C_{( )}$  代表不同力與力矩分量 (Component) 有不同的係數。

例如升力 (Lift) 及曳力 (Drag)

有些案例，A 代表浸水面積 (Wetted Surface Area)，有時可能代表最大截面積 (Cross Sectional Area)

避免不明確

$A = L^2$  代表力分量

$AX = L^3$  代表力矩分量

牛頓運動定律 (Newton' s Laws of Motion)

$F = ma = \text{mass} \times \text{acceleration}$

$M = I\alpha = \text{moment of inertia} \times \text{angular acceleration}$

6 項公式，可由三組平面，每一平面由上述二公式而來。

力與力矩是流體力學基本原理，當然與 Mass and Geometry 物性有關，直線與旋轉加速度係流體力學「力」導致。

兩種潛艦控制情況，航行中可能發生，且相互有關係。

一、控制翼板固定在零角度時 (Zero angle of Rotation)，被稱為控制固定狀況 (Controls Fixed Condition)，順水流 (Steaming) 直線航行。

二、起動控制翼板，改變控制固定狀態，操作航行。

潛艦穩度簡單非複雜的解說，直線航行，沒有橫向外力時，如果受到直線、旋轉或兩者均有干擾 (Disturbance) 時，潛艦與水流之間，就會呈現攻角 (Angle of Attack) 姿態，此時船體就受到「力與力矩」的作用。

前述第一種狀況 (水平面) 船體外 1/4 船長處，受到船體流體動力作用 (Hull Dynamic Force)，該力乘以到重心 (C. G.) 距離

，將造成力矩，該力與力矩依次造成潛艦線性及旋轉加速度。

水流及潛艦慣性(Inertia Effects)影響，對潛艦產生反向的力與力矩，假如慣性產生的反向力與力矩，大於干擾的力與力矩時，潛艦就會回到直線方向去，此種情形發生，潛艦穩度將被視為流體動力平衡(Stable)；否則力與力矩將造成潛艦一種狀況穩度崩潰，視為不平衡(Unstable)。

此時潛艦形成正舷曲線航徑(Sinusoidal Path)，靜穩度(Static Stability)會縮小或增大該曲線航徑。

為確保在垂直平面，保持潛艦有效平衡，後控制翼板(Control Surfaces)的位置、尺寸須按附件25圖示控制固定狀況(Fixed-Planes Forces)達平衡。

為達最大效率，舵與艉翼板應設計較高的展弦比(Aspect Ratio)。

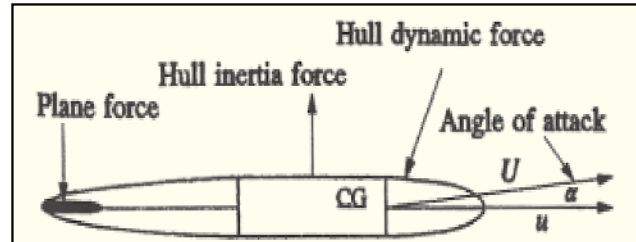
當控制翼板啟動(Moved)，改變潛艦控制操作，艉控制翼板尺寸、位置、形狀均須滿足前述兩種情況，附件26代表潛艦旋轉時，流體動力平衡情形，基本上是物理原理，船殼旋轉時的離心力。

$F = ma = mv^2/R$  (旋轉半徑)，船舶攻角產生的升力及船艉力及力矩的平衡。

垂直面航行時，因浮心與重量BG值，及潛艦靜穩度關係，因俯仰角會產生穩度力矩，被稱之極限安全因素(Ultimate Safety Factor)，係低速航行時，最有效益的控制。

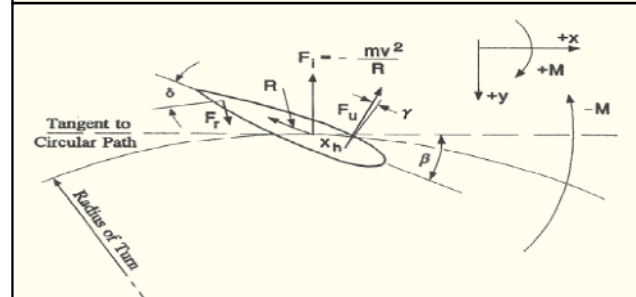
高速( $v^2$ )航行時，因旋轉平衡狀態，說明亦詳如附件26圖示。

如果動力喪失，過度的傾斜角度時，重



附件25 固定翼受力示意圖

資料來源：摘自Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), Vol.100.1992.



附件26 旋轉流體動力分佈圖

資料來源：摘自Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), Vol.100.1992.

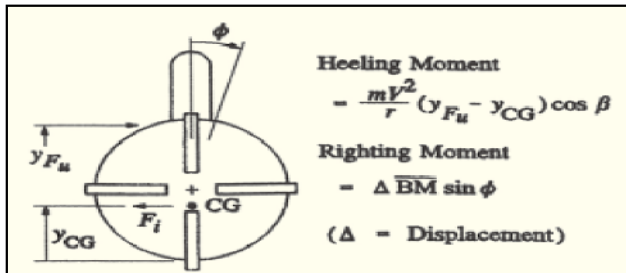
力大於浮力時，潛艦危機將發生。

高速旋轉初階段，潛艦有往內傾側現象，並產生流體動力作用，產生力矩，造成潛艦朝向旋轉中心，左右搖擺現象。

持續旋轉航行時，受到橫向與前進速度向量降低，船舶攻角角度相對也降低左右搖擺力矩，漸達穩定搖擺狀態，附件26說明此現象，其中扶正力矩必須大於傾側力矩。

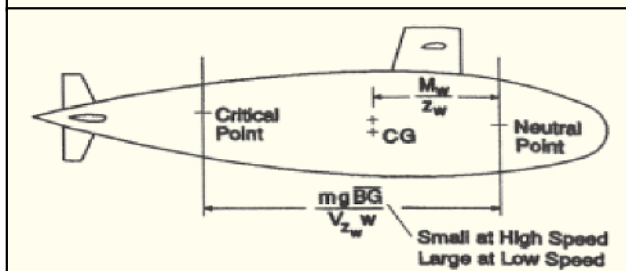
帆罩(Sail)在縱向位置，對潛艦左右搖擺，有很大的影響，旋轉初期，由於有利內部一般佈置，帆罩接近船舶部位，會形成水流越流(Cross Over)船舶段上層，會產生較大負攻角，會造成艏俯角度過大，宜迅速改正此種狀況。

潛艦以流體力學觀，有二個重要位置：一為平衡點(Neutral Point)；另一為俯仰



附件27 旋轉傾側示意圖

資料來源：摘自 Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), Vol.100.1992.



附件28 俯仰點與平衡點示意圖

資料來源：摘自 Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), Vol.100.1992.

點(Critical Point)，配合艏艉翼板及舵，控制潛艦操作，平衡點受垂向作用力會改變潛艦深度，但不影響俯仰角度；俯仰點受力會改變潛艦俯仰角度，但不會改變深度。

平衡點的位置靠近重心的前方，對船速影響不大。另俯仰點的位置距離平衡點與船速平方成反比。在低速時，俯仰點位置靠近控制艏翼位置；高速時則靠近重心位置，多數現代化潛艦，高速時，俯仰點則位重心與後控制翼面中間位置，詳如附件28。

艏翼板的效能與船速的平方( $v^2$ )成比例，在低速時，無法提供大於靜穩度足夠的力矩，此時增加翼板角度，反造成向下淨力，致使潛艦下潛。對小型潛艦而言，經常航行在合理船速範圍是很重要的。

翼板的位置、尺寸，對潛艦至為重要，

TABLE 3

SUB TYPE	R			
SLOW ATTACK	.07	.03	.16	.04
FAST ATTACK	.07	.03	.10	.04
MISSILE	.09	.05	.10	.06

附件29 潛艦類型係數

資料來源：摘自 Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), Vol.100.1992.

因須水面及水下潛航，故增加設計困難，例如潛航時，船底側(Bottom Side)及上舷側(top Side)舵型，當水面航行時，水線上舵(top Side Rudder)就會露出水面，成為無效設計。

固定翼面航行時，舵型設計，其慣性力(Inertia Force)，須大於反向流體動力，符合此準則，就足夠控制潛艦操作。

構想設計階段，運用適當流體動力係數(Hydrodynamic Coefficients)，就可選擇位置及尺寸，後續設計再經船模實驗測試驗證。

控制翼板的投影面積(Projected Area)等於翼面數量乘排水量ENVD容積( $v^{2/3}$ )再乘上如附件29潛艦不同類型有關係數，即完成流體動力設計有關控制翼板尺寸大小的初步估算。

## 玖、一般佈置(General Arrangements)

潛艦內系統、構件、貯藏及人員…等，一般佈置，因為重量密度接近 $1,025 \text{ kg/M}^3$ ，與水面艦 $500 \text{ kg/M}^3$ 比較，顯示潛艦艙間容積擁擠、緊密(Compact)，每項裝備與安裝

設計，涉及重量、重心、面/容積及操作空間之研究；另潛艦係圓形結構，最佳化直徑/排水量設計如前述，其一般佈置發展趨勢，詳如附件30、31，充分的艙間內容積/面積均須妥協(Compromise)考量。

潛艦內油水、壓載、補償…櫃(Tanks)、甲板(Deck)及主要艙間(Main Compartment，潛艦稱Room)的一般佈置，其系統定義、功能、術語(Terminology)可參考NAVAL Ships Technical Manual Chapter 9006。

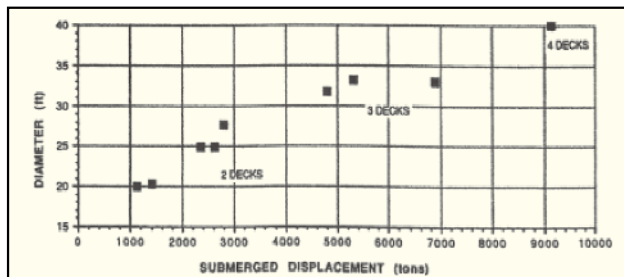
增加容積須求，唯一方法就是設計較大排水量，假如相同馬力，要達到此條件，就必須減低船速，增加LEAD重量；為符合船速須求，增加馬力，潛艦可能變得更龐大了，要完成合理的設計，設計者的技術、經驗必須通過嚴厲的驗證，無論如何附件10，重量與浮力(Weights and Buoyancy)須吻合(Match)，同樣LCG和LCB、VCG、VCB不論水面或下潛都須設計在指定的位置。

潛艦內系統組成包括：

各裝備系統及管路、構件、電纜、電機、電子裝備、武器裝備、人員住艙、倉庫、…等，較重重量裝備應靠近LCG附近，必須佈置聲納偵測裝備，武器(魚雷)發射器於艦艏端，主推進及其他輪機裝備的佈置，儘量遠離聲納，故此類裝備設計安裝於艦艉端，凡此必須妥協性(Compromise)佈置，均應考量保養與維修空間。

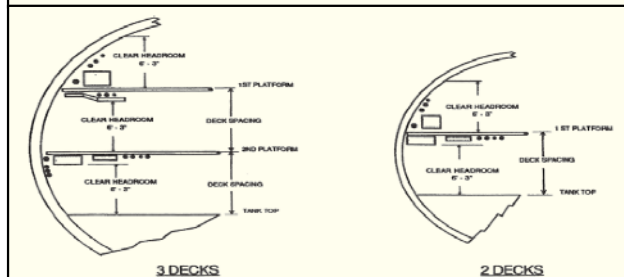
空調裝備必須隔絕及靜音，風管(送風/回風)至遙遠的住艙安裝空間困難重重，設計須盡其所能改善。

潛望鏡(Periscopes)位置研究，多年來



附件30 典型潛艦直徑趨勢圖

資料來源：摘自顏君強，《潛艦設計與建造》



附件31 典型潛艦一般佈置截面圖

資料來源：摘自顏君強，《潛艦設計與建造》

成為佈置考量的關鍵(Key Consideration)，因穿越壓力殼、甲板，以及周邊控制室、通訊裝備等一般佈置的整合，近期潛艦的設計，世界各國對電子式潛望鏡的接受度愈來愈高，因為設計，同時改善了配置及內部通訊的問題。

艦內構件佈置安裝，須與壓力殼縱向軸平行，以頭尾相接(End to End)及儲架疊層(Stack Length)方式在有限船長空間內完成佈設。

另儲藏物、武器、配件裝載通道(Access for the loading)及壓力殼開口以及人員逃生通道、水密門的數量…等須求亦應納入最低須求取舍考量。

潛艦基本構想設計階段，一般佈置研究與發展，按本文前述船型設計匡架下，依次由船段(艏段、魚雷段、中段、機艙段、

主馬達段、艙段)檢查長度與住艙、控制艙及其他重要裝備空間，如聲納、輪機等裝備是否滿足，以及帆罩、上構及舵翼，同時檢查排水量、浮力、重量以及垂向及縱向中心，還有油櫃及補償櫃…等，比起水面艦較複雜，但邏輯差異不大，只是先後順序會有點不同，先用歸納與統計法，初略選擇與決定再進行概略計算、檢查是否與高階層需求(TLR)相符。

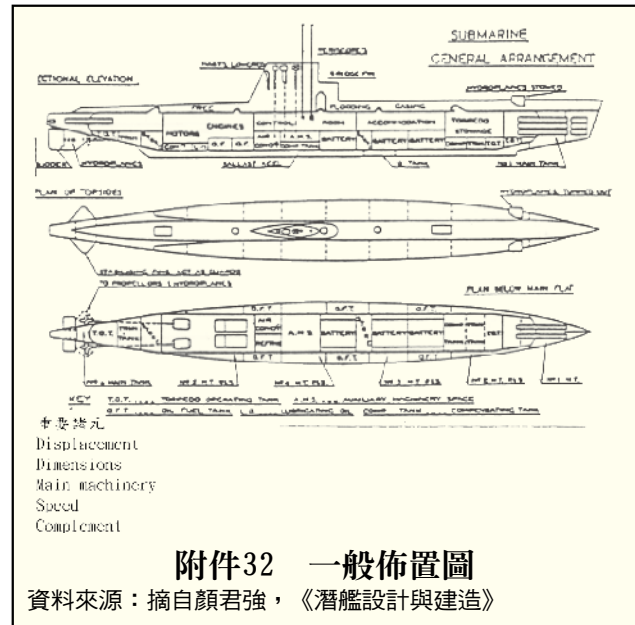
總之，長期潛航，人員擁擠在緊密的壓力殼艙間內，傳統及過去一般設計經驗，均可以妥協性的方式，納入可接收的潛艦一般佈置，參考圖詳如附件32，任何潛艦設計與建造，必須製作實體模型俾能確認未來各項裝備其適當之位置及安裝有關之運作程序以及操作與維修所須空間。

### 拾、結語(Conclusions)

按潛艦國造委託規劃設計需求規範，設計合約應交文件(contract Delivery Requirement List、CDRL)，內含計算、研究報告、建造/採購規範、藍圖、測試程序書、品保、會議記錄…等龐大文件，據文獻稱，其堆疊紙張的體積/重量，可跟船艦大小比擬，專案管理項下是重要負荷之一。

俗語，萬丈高樓平地起，潛艦國造，萬般皆需按高階層次需求(Top Level Requirements、TRL)為依歸，先從基本構型設計(本文內容)著手，俾確定「構型」基準，實施設計凍結，依序再執行數量龐大的系統設計及驗證。

本人才疏學淺，不自量力，但在長官及



老師、好友等協助下，努力數月搜集資訊編撰本文，期能提供有效文件供本軍及業界參考運用，並祝潛艦國造順利成功。

#### <參考資料>

1. 潛艦國造委託規劃設計需求規範(公開閱覽文件)。
2. 海軍學術月刊，第34卷，第4期，海軍學術月刊，第36卷，第9期。
3. 顏君強，潛艦設計與建造。
4. SNAME Transactions , Vol. 100. 1992. PP. 419-448.
5. NAVAL FORCE Subcon 95/2011/2015.
6. NAVAL Ships Technical Manual Chapter 9006-submarines.

#### 作者簡介：

顏君強先生，備役上校，中正理工學院造船系62年班，曾任海發中心設計處長、副主任。  
楊洪儒先生，備役中校，中正理工學院機械科73年班，曾任潛艦修護處場主任。