

美国潜艇设计学之现况和展望

〔美国〕E. S. 艾倫曾、菲利普·孟德尔著

尤子平、閔耀元譯

內 容 簡 介

本文概述了設計近代攻击潛艇的造船学基本情况。在簡短的发展史这一节中討論到的每一艘潛艇是根据其在历史上的地位列入的。論文說明了在确定現代潛艇尺度时对容积和甲板面积的考虑甚至比重量更为重要。同时指出了单螺旋桨迴轉体潛艇在各方面，特別在改善推进性能，减小尺度和增进水下操纵性方面的优越性。对柴油机电力推进潛艇和核动力潛艇的容积和重量要求的比較，以及由于电子装备的改进和現代艙室标准对空間的大量需要分別作了討論。此外还分析了由于稳性、空間的需要、补偿設計誤差以及考虑未来改进所需的永久性固定压載的重要作用。在結構一节中作了建立对不同設計相对效率进行比較用的标准的尝试。对現代高速潛艇的稳定性和操纵性作了大量的討論，由此得出結論认为良好的运动稳性能够与迅速地进入和退出激烈运动的能力很好地协调。最后，对减小潛艇尺度和增加工作深度方面相互矛盾特征作了简单的展望。

本文譯自 Transactions the society of naval architects and marine engineers.

美国潛艇設計学之現况和展望

尤子平、閔耀元譯

國防工業出版社 出版

北京市书刊出版业营业許可證出字第074号

国防工业出版社印刷厂印装 内部发行

850×1168 $\frac{1}{32}$ 印張 $4\frac{3}{16}$ 106 千字

1965年9月第一版 1965年9月第一次印刷 印数：001—800册

統一书号：N15034·944 定价：(科七) 0.70元

目 录

符号一覽表	4
1. 导言	7
2. 发展史	7
3. 航速和功率	16
附屬体	23
船身效率对推进的影响	25
4. 主要尺度和布置	27
容积	27
空間需要量的增长	33
甲板面积	30
1/4 比例縮尺的模型	38
长度、寬度、吃水	32
5. 重量、浮力、靜稳性和重量儲备	41
重量和浮力	41
靜稳性	46
平衡多边形	44
重量儲备	49
6. 結構	52
耐压艇体壳板和肋骨	52
模型試驗和实物試驗	62
橫艙壁	61
高強度鋼	66
7. 稳定性和操纵性	68
运动稳定性	68
垂直面內稳定性和操纵性的	
設計	83
垂直面內的稳定性和操	
縱性	76
水平面內的稳定性和操纵性	87
8. 排水量和工作深度的可能趋向	92
机械裝置重量-功率比	95
大深度潛艇	98
海洋深度的探索	97
現代設計的趨勢	100
参考文献	102
討論	104
結束語	129

符号一覽表

B ——浮心位置

$$C_f = \frac{R_f}{(\rho/2) \cdot S V^2} \text{——摩擦阻力系数}$$

$$C_p = \frac{4 \nabla}{\pi D^2 L_e} \text{——整个潜艇的棱形系数}$$

$$C_{pe} = \frac{4 \nabla_e}{\pi D^2 L_e} \text{——潜艇艏艉端的棱形系数}$$

$$C_r = \frac{R_r}{(\rho/2) S V^2} \text{——剩余阻力系数}$$

$$C_s = \frac{S}{\pi D L} \text{——整个潜艇的浸水面积系数}$$

$$C_{se} = \frac{S_e}{\pi D L_e} \text{——潜艇艏艉端的浸水面积系数}$$

$$C_t = \frac{R_t}{(\rho/2) S V^2} \text{——总阻力系数}$$

d ——推进器直径

D ——潜艇外壳最大直径

DC——柴油

c_h ——艇体影响系数

c_p ——推进器效率

c_{rr} ——相对旋轉系数

E ——彈性模数

EHP——有效馬力

G_f ——重心位置(包括纵向自由液面影响)

G_h ——重心位置(包括横向自由液面影响)

h ——耐压壳体材料厚度

h' ——計及肋骨作用的壳板修正厚度

J ——相对进程

$L = L_e + L_x$ ——潜艇总长; $L' = 1$

L ——耐压艇体肋骨間距

L_e ——艏艉部艇体长度之和; $L'_e = \frac{L_e}{L}$

- L_A ——潜艇平行舯体长度; $L_x = \frac{L_x}{L}$
 M_L ——稳心位置 (計及纵向自由液面影响)
 M_T ——稳心位置 (計及横向自由液面影响)
 n ——推进器单位时间的轉数
 ML ——重量储备压载鉛重量
 NDT ——正常下潜纵傾角
 p ——推进器螺距
 P ——海水压力, 磅/吋² (psi)
 P_c ——破坏靜压力
 $PC = c_p \times c_h \times c_r$ $\frac{EHP}{SHP}$ ——推进系数
 Q ——推进器扭矩
 R ——耐压壳体平均半径
 r_0 ——艇艏曲率半径; $r'_0 = \frac{r_0 L_e}{D^2}$
 r_1 ——艇艉曲率半径; $r'_1 = \frac{r_1 L_e}{D^2}$
 R_f ——摩擦阻力
 R_r ——剩余阻力
 $R_t = R_f + \Delta R_f + R_r$ ——总阻力
 S ——全艇浸水面积
 S_e ——潜艇艏艉端浸水面积
 $SHP = \frac{EHP}{PC}$ ——軸馬力
 SL ——稳性压载鉛重量
 SW ——海水
 T ——总推力
 TL ——压载鉛总重量
 t ——推力减额系数
 V ——潜艇航速
 V_a ——推进器平均进速
 w ——伴流系数
 W ——重量 (按其注脚分別代表某种專門重量)

x_m ——潛艇艏柱至最大截面之間的距離; $x'_m =$

$$\frac{x_m}{L}$$

∇ ——整個下潛潛艇排開水的體積，或按其注腳分別代表某種專門體積等

∇_e ——去除平行舢舨以外的潛艇艏艉端體積

Δ ——排開水的重量（按其注腳分別代表某種專門排水量）

ΔR_f ——粗糙度附加阻力

$$\Delta C_f = \frac{\Delta R_f}{(\rho/2) \cdot S V^2} \text{——粗糙度附加阻力係數}$$

$$\left[\frac{(L/2R)^2}{(h/2R)^3} \right]^{1/4} \left(\frac{\sigma_y}{E} \right)^{1/2} \text{——細長比}$$

ρ ——水的质量密度

σ_y ——材料的最大屈服强度

PR/h ——箍应力

$$\phi = P_c / \left(\frac{h'}{R} \cdot \sigma_y \right) \text{——修正压力係數}$$

ϕ ——量自鉛垂綫的又为橫傾角

$$\psi = P_c / (\sigma_y \cdot h/R) \text{——压力係數}$$

ψ ——又为偏航角

注：上述符号一般不适用于本文第7节。該节符号見“造船和輪机工程師协会”公报1~5期。

1. 导 言

潛艇已被公认为現代艦艇中最重要的一种船型。潛艇的作用不仅在軍事方面日益增长，而且供海洋研究，用在人类和平事业，甚至用于商业的可能性也日益被人們所承认。

为了节省篇幅，题目所用“造船学現狀”这一术语是从它的最狭义方面来理解的。在潛艇方面許多引人注意的发展几乎完全没有提到，因为大部分属于輪机工程和其他工程技术的范围。另外本文叙述的是目前已經实现了的发展情况，只在最后一节才略談到一些发展前景，也仅涉及到减小潛艇尺度和增加下潛深度的問題。最后，本文着重在水下状态的潛艇的設計，至于潛艇在水面状态的許多重要問題未曾提及。

本文对上述范围内的每一个項目均作了广泛的論述。凡是所引用到的确切的和例証的数据都取自模型試驗或实船試驗。在大多数情况下，設計方面的問題論述得比較充分，因为这是作者的出发点所在。然而对潛艇的結構和操纵使用与所探討的主题有密切关系时，也作了論述。

紧接在本节后一部分的发展史，可以說是导言的一部分，其中按年代先后叙述了影响潛艇設計的重大事件，詳情随后闡述。

2. 发 展 史

在十九世紀的最后十年，荷兰魚雷艇公司开始建造一艘潛艇，

它綜合了公司所认为重要的性能，而且成为美国第一艘成功的軍用潛艇。此艇建成于 1898 年，命名为“荷兰号”。在許多文献和出版物中已有詳細的介紹，此处之所以再次提到，不仅因为它实际上綜合了現代常規动力潛艇的所有原理，而且具有許多适宜于水下状态航行的特点。这些特点在 1950 年研究“大青花魚号”过程中被重新发现。

从图 1 中可見“荷兰号”的长寬比 5.26 和图 6 中所示的最佳值相差不多。“荷兰号”基本上也是一迴轉体，具有最小的貯备浮力，很小的上层建筑，也沒有指揮台圍壳，所有这些均使潛艇水下阻力趋于最小。“荷兰号”有一大直徑慢轉速的推进器，布置在迴轉軸綫上以增加其推进效率。此外，“荷兰号”还具有位于垂直中綫面上的艏鳍，而沒有使用前部水平舵。所有这些“先进的概念”，除了仍保留有指揮台圍壳以及前部水平舵外，今天在美国潛艇上都在采用。人們可以預期“大青花魚号”经过将来的改进以后，在指揮台圍壳与前部水平舵方面最終会与“荷兰号”相似。

在第一次世界大战以前，軍用潛艇的发展趋势是提高水上性能。回顾以往，可以明显看出，当时很少注意水下航速或水下机动性。德国在第一次世界大战中使用的著名的 U 型潛艇的主要尺度和一般性能与美国的 S 型潛艇基本相同。

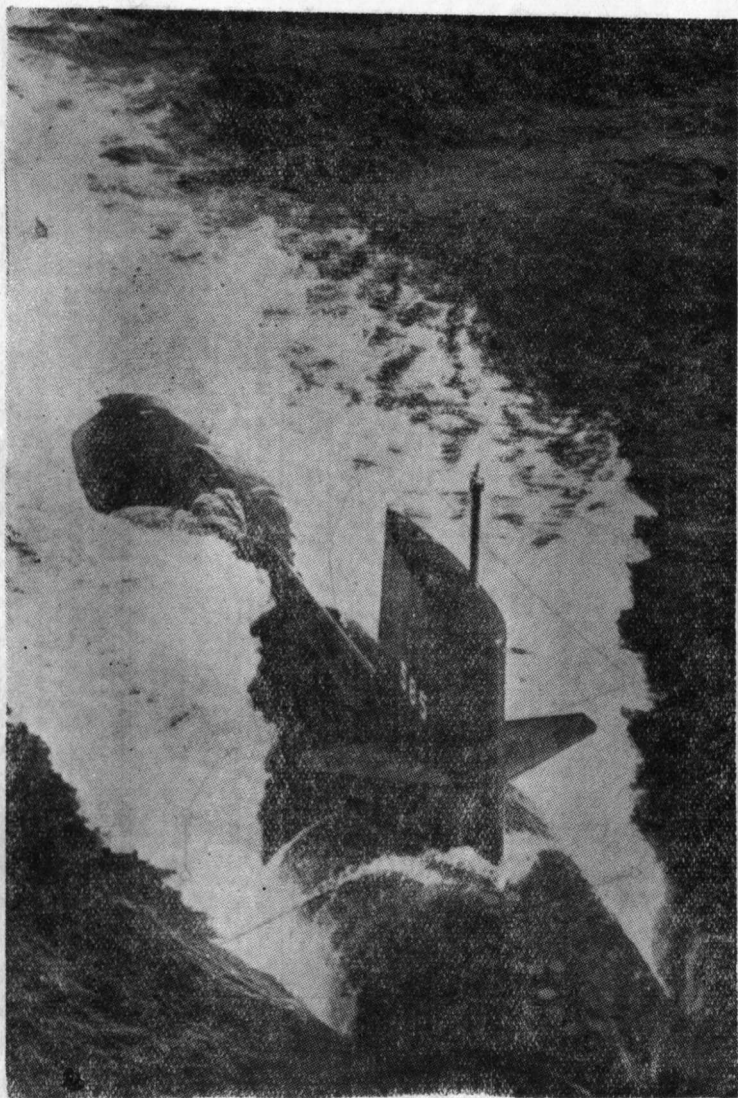
从图 1 可見 S 型艇型的长寬比增加到 10.7，这比大多数高速水面舰艇的长寬比还要瘦长些。

第一次世界大战将結束时，德国人发展了一种所謂大型巡洋潛艇，到停战时建成了四艘。它的主要性能如下：

长 = 302 呎	寬 = $29\frac{1}{2}$ 呎
水下排水量 = 2500 吨	水上航速 = 15.8 节
水下航速 = 7.7 节	

这种潛艇在当时是有史以来建造的最大的潛艇。在两次世界大战之間的时期內，它对战胜国潛艇的发展有相当的影响。虽然在企图生产一种比德国巡洋潛艇更佳的潛艇方面，美国較英国和法

附 图



美国潜艇“飞鱼号”SS(N)-585。

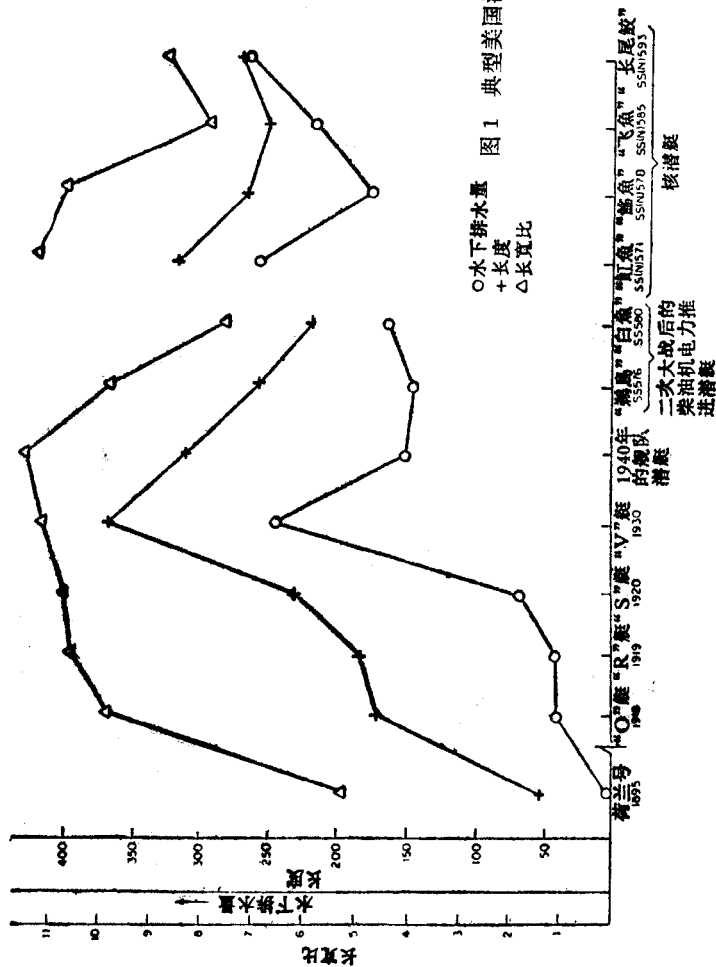


图 1 典型美国潜艇主要尺度的演变。

国为慢，但依然建成了四艘长 371 呎的 V 型潜艇，如图 1 所示。这些潜艇由于长度长，贮备浮力大，以及合理的水上动力而具有良好的水上性能。然而由于蓄电池容量不足，它们的水下功率是很低的。水下功率小，加以艇体庞大，水下阻力高，这种潜艇的水下性能和机动性就反不如过去的潜艇了。

此后，美国潜艇发展的结果建成了有名的舰队潜艇，在太平洋中进行了战斗。从图 1 可以看到这一设计与德国巡洋潜艇的尺度相接近。除了水上航速有显著增加外，早期舰队潜艇的其他主要性能几乎和德国的巡洋潜艇完全相同。麦克基氏(McKee)[1]●曾经相当详尽地阐述了这一设计，并且指出任何时候水上性能和水下性能都是矛盾的，而舰队潜艇的水上性能则优于水下性能。由于对水下航速考虑得很少，因而水下阻力非常大。对美国潜水艇员来说幸亏日本从来没有发展持续有效的反潜攻击，否则舰队潜艇不良的水下性能将会导致巨大的损失。

在第二次世界大战中，德国人遭遇到非常强大的反潜兵力，以致在战争后期他们的潜艇受到致命的损失。德国人在 1943 年就承认大部分时间停留在水面的潜艇不再是有效的了，因而设计了第 XXI 型潜艇，采用了柴油机水下工作装置。同时在华尔特领导下设计了试验性的以过氧化氢作为氧化剂的封闭循环动力装置。

第 XXI 型潜艇如[2]所述从未参加战斗，像第一次世界大战时的德国巡洋潜艇那样，在第二次世界大战后，XXI 型潜艇又立即被作为美国潜艇发展的母型。美国所采取的第一个步骤是将许多舰队潜艇改装为如[1]中所述的“格贝”型潜艇（水下推进功率较大）。

1940 年末美国发展了 SS563（唐格）型，如图 2 所示。它的一般性能基本上和第 XXI 型潜艇相同。如图 1 所示，这种潜艇

● 括号内数字系指文后所列参考文献序号。

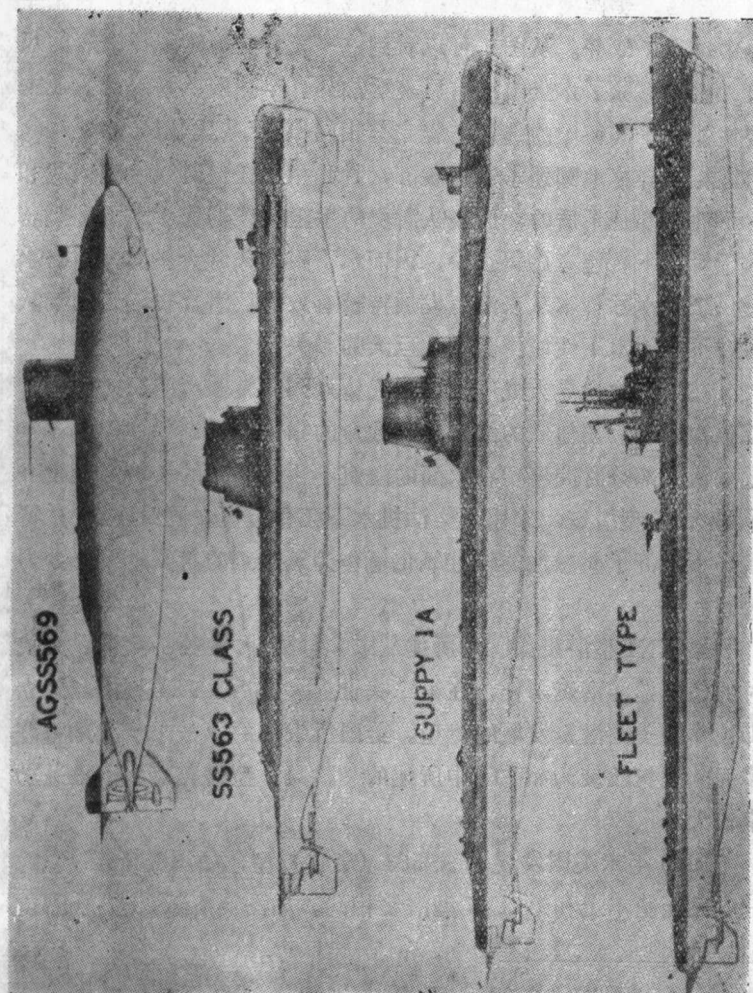


图2 四艘美国潜艇
的外形图。

的最后一艘“鵜鳥号”(SS576)在原設計基础上經過了綜合改进，其长度較舰队潛艇短了很多。

从唐格型潛艇开始，着手注意提高水下性能。然而它的长寬比近于10，几乎和高速水面艦艇一样。而且像舰队潛艇一样，推进器仍然裝置在艇中心綫之下，艏水平舵也在相似的位置上。方向稳定性，特别是在垂直平面內的方向稳定性虽然比以前的潛艇有所改善，但以現代标准来衡量仍有不足之处。

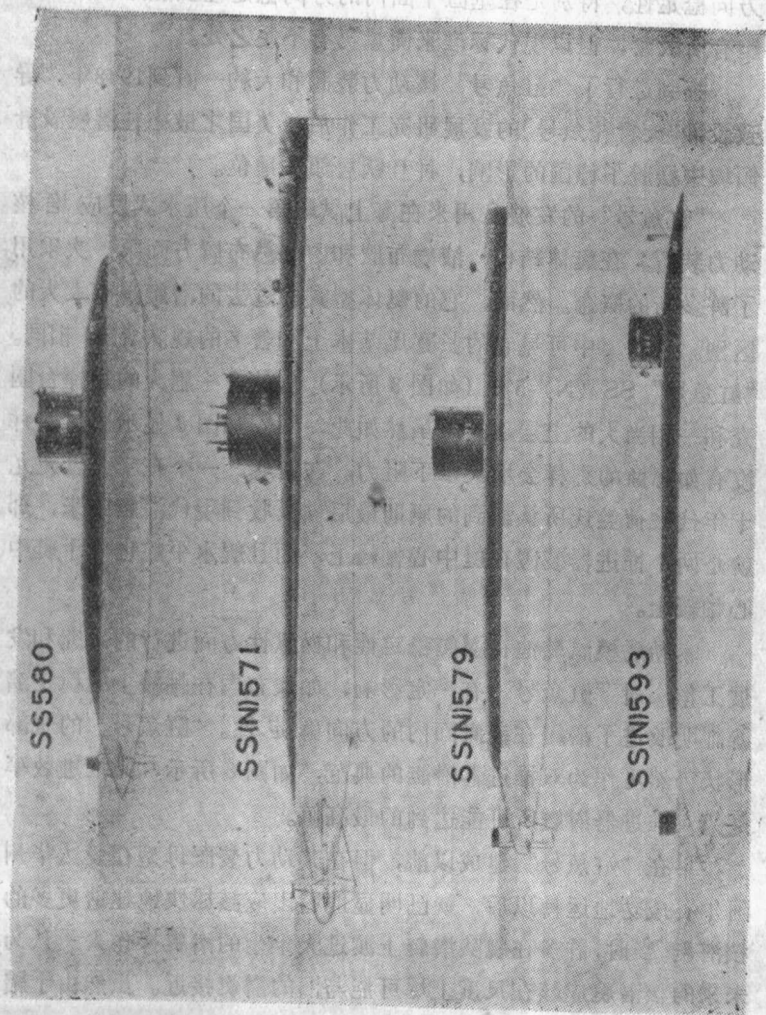
直到进行了“紅魚号”核动力装置和大約一直到1948年，导致設計“大青花魚号”的发展研究工作后，美国才最終在潛艇設計領域中摆脱了德国的影响，并且跃居領先地位。

“紅魚号”的发展是用来在海上試驗第一个压水式反应堆核动力装置。在艇体結構、液艙布置和內部总布置方面第一次采用了許多新的概念。然而，它的艇体型式和过去的潛艇沒有太大的区别。从图1中可見它的长寬比基本上和著名的舰队潛艇相同。“紅魚号”SS(N)571(如图3所示)仍然有一龐大的指挥台圍壳和一相当大的上层建筑。虽然如此，图6和图8显示出这些沒有如想像的那样会增大水下阻力。在艇艏，一个在十九世紀九十年代被荷兰氏所認識到的原則最后被吸收到現代潛艇中来，那就是两个推进器裝置在艇中心軸綫上，而且艏水平舵也位于艇中心軸綫上。

泰勒船模試驗池在潛艇稳定性和操纵性方面进行的研究和发展工作，对“紅魚号”有一定影响，如像布置在軸綫上的稳定鰭就証明改进了潛艇在垂直面內的方向稳定性。“紅魚号”的艏部形状仍然可作为双推进器潛艇的典范，如图8所示，其推进效率是为双推进器潛艇所可能达到的最高值。

早在“紅魚号”建成以前，但在其动力装置母型在爱达华州阿尔谷成功地运轉以后，就已明显地看出應該尽快地建造更多的核潛艇。当时，許多在舰队潛艇上渡过大半生的潛艇操作人員认为未来的核潛艇應該在尺度上尽可能与旧的潛艇接近。虽然由于縮

图 3 四艘美国潜艇的外形图。



小尺度将减少动力装置的输出功率并降低水下航速，但是为了减小尺度和成本，这样做还是值得的。图3以SS(N)579代表的“红鱼号”级潜艇，就是按这一要求设计和建造的。从图1可见其长度和排水量都减小得很多。同时长宽比也有较小的缩减。它的外部艇体形状和附属体合理地相似于“红鱼号”，从以后的图8所示，其单位排水量所消耗的总功率亦是有利的。

“大青花鱼号”，AGSS569，如图2所示，是与“红鱼号”在同时，但又分别各自发展起来的。“红鱼号”的主要目的在于在海上试验第一个核动力装置，而“大青花鱼号”则在于向操纵人员显示借牺牲水面性能以提高水下特色的单轴、迴轉体艇体设计所获得的水下性能的改进。“大青花鱼号”在海上的操作中证实了设计论断，其中很多是以泰勒船模试验池的扩大船模试验方案为基础的。

“红鱼号”已经完全成功，它向操作人员表明了随着水下高航速而显示出的许多优点。由于“红鱼号”和“大青花鱼号”操作方面的成功，潜艇操作人员放弃了舰队潜艇的概念，并且迅速主张建造注意水下高航速和机动性好的单推进器核动力潜艇。据此而发展了“飞鱼号”潜艇（见附图）。如图1所示，它的长宽比接近于最佳值。它的排水量比“红鱼号”为小，虽然两者的功率相同。关于排水量减小的问题在以后章节中将加以探讨。

在发展“飞鱼号”的同时，一艘单推进器柴油机电力推进潜艇“白鱼号”SS580（见图3）也建造了起来。仍如图1和图6所示，它的长宽比也接近于最佳值。它的排水量比以往常规的柴油机电力推进潜艇要稍大一些，主要是因为提高了它执行自己使命的能力而增加了特点。正像“飞鱼号”较之“红鱼号”有好得多的水下性能一样。“白鱼号”与“鸕鶿号”相比亦然如此。

图3中显示的最新潜艇“长尾鲛号”，SS(N)593，是在朴茨茅斯海军船厂建造的。它有着“飞鱼号”所没有的一些附加能力，这就需要在耐压壳内部增加容积。为了安排这个增加的容

积，最好的解决办法是增加它的长度，而保持与“飞鱼号”相同的直径，如图 1 所示。

必须指出，发展史这一章以及本文全部的论述仅限于主要用途大致相同的潜艇，亦即攻击潜艇。特种用途潜艇如携带“北极星”导弹的潜艇或装载大型水面雷达的潜艇 USS，“海神号”没有包括在内，因为这些潜艇的用途提出了一些特殊的要求，若与攻击潜艇混为一谈，将不能真实地反映出潜艇设计的发展趋势。

3. 航速和功率

本文接着就论述航速和功率的问题，并非暗示这个问题超乎一切地重要。在确定潜艇尺度和各种比例时，容积、布置和重量方面的考虑与航速和功率同样重要，甚至更重要。然而，接着就讨论这个问题是适宜的，因为由航速和功率所决定的限制将提供一定的实际范围，在此范围内才能进行其他方面的考虑。

从某些方面说，深水下潜潜艇的航速和功率问题较之水面舰艇要简单得多。影响剩余阻力最重要的因素是佛氏数，这对水面舰艇来说是典型的，可是对深水潜体来说就完全不存在了。实际上，深水潜体的无因次剩余阻力几乎完全由形状决定。理论上讲，雷诺数的影响很小，小到在潜艇阻力计算中一般可以略去不计。因此，有可能用简单的形式来表达完善的潜艇水下总阻力，它的普遍性只是因摩擦阻力系数 C_f 稍许受到航速和长度的影响而有所减损。

现代潜艇利用良好的流线形迴转体进一步简化了阻力的表达形式。迴转体的形状参数中对阻力有重要影响的为数很少。对潜艇尺度、艇体成本和布置有重大影响的两个参数，即长度直径比与棱形系数亦为对阻力的两个最重要的参数。再者，因为迴转体潜艇上的大部分附属体便于与主艇体分开进行模型试验，因此单独处理主裸艇体的阻力既是可能的也是合理的。

若干現代潛艇的形狀與〔3〕中所描述的迴轉體形狀近似。在該文獻中使用了一個六次多項式來表達常見的潛艇流綫形體。利用這些多項式就可以單獨選擇或改變這種形狀參數，如艇艏半徑、艇艉半徑、最大截面位置、棱形系數以及長度直徑比。蓋脫勒氏（Gertler）發表了按單個參數變化的幾個迴轉體模型系列的水下裸艇體阻力試驗數據。其後拉遜氏（Larson）又發表了從若干原始模型的最大截面處加入不同長度平行艏體的阻力試驗數據。後一工作成為模型系列的極有用的延伸，使有可能對橫截面曲綫形狀所起的影响進行比較，這點以後將提到。

本文中所引用的迴轉體模型的形狀參數見表 1。這些模型的相對剩餘阻力數據見圖 4。所使用的符號含義如本文開頭的符號一覽表中所示。按此含義，可得下列常用的關係式：

$$L/D = L_s/D + (1 - L'_x) \quad (1)$$

$$C_p = C_{pe}(1 - L'_x) + L'_x \quad (2)$$

$$C_s = C_{se}(1 - L'_x) + L'_x \quad (3)$$

$$L = (L/D)^{2/3} (4\nabla/\pi C_p)^{1/3} = 1.08 (L/D)^{2/3} (\nabla/C_p)^{1/3} \quad (4)$$

$$S = C_s (\pi L/D)^{1/3} (4\nabla/C_p)^{2/3} = 3.69 C_s (L/D)^{1/3} (\nabla/C_p)^{2/3} \quad (5)$$

圖 4 中在 $C_p = 0.65$ 處的粗黑綫條表示所試驗的 x'_m 、 r'_0 和 r'_1 最大變化時的剩餘阻力系數的範圍。粗黑綫條的長度表明在所試驗的實用數值範圍內 x'_m 、 r'_0 和 r'_1 的最大變化對剩餘阻力的影响並不像 C_p 和 L/D 那樣重要。從圖 4 中又可見到 C_r 隨 L/D 之增大而減小，而且到 $L/D = 10$ 和 $C_p = 0.60$ 時，剩餘阻力幾乎消失了。如果在其他 C_p 值上進一步增加 L/D 並不能對減小 C_r 起更多的作用。

圖 4 上特別有意義的是 C_p 和 L'_x 與剩餘阻力的關係。圖中清楚地表明了對所有 L/D 值來說，在別的最佳形式中加入平行中體而使 C_p 增大到超過 0.60 時，其對 C_r 的不利將比增大 C_p 而不使用平行中體時為小。舉例來說，從〔3〕中直接發展得來的 $L/D = 7$ 、 $C_p = 0.70$ 的 $L'_x = 0$ 型體（表 1 第 15 項），其剩餘阻力要比