

国际潜艇会议论文集

一九八三年五月 伦敦



中国人民解放军海军装备论证研究中心科技情报室编

U 674.76-53

H 21

235709

国际潜艇会议论文集



中国人民解放军海军装备论证研究中心科技情报资料室

国际潜艇会议论文集

编 辑 黄士清 薛竹仁 郭振开

出版发行 中国人民解放军海军装备论证研究中心科技情报资料室

封面设计 刘乃鹏

印 刷 空军第一研究所印刷厂

出 版 说 明

国际潜艇会议于一九八三年五月在英国伦敦召开。我们组织海军有关人员将会上发表的二十四篇论文译成中文，并编辑出版了这本《国际潜艇会议论文集》。

《国际潜艇会议论文集》的内容广泛，专业性较强，对有关的各级领导、科研、工程技术、教学、训练及造船等各方面都具有一定的参考价值。

在编辑出版过程中，曾得到了徐元春、宋连琪等同志的帮助和支持，特此致谢。

由于我们的水平有限，时间仓促，缺点错误在所难免，敬请读者批评指正。

海军装备论证研究中心科技情报资料室

一九八四年五月

目 录

1. 影响潜艇设计的因素.....	袁品荣译	薛竹仁校 (1)
2. 现代化潜艇建造.....	王继军译	薛竹仁校 (19)
3. 潜艇参数.....	钱治光译	杨家琨校 (39)
4. 皇家海军潜艇材料.....	吴本湘译	(52)
5. 潜艇的耐压密封舱壁.....	阎靖华译	顾世芬校 (65)
6. 潜艇的破坏强度和 Design.....	周岳译 郭日修	薛竹仁校 (81)
7. 常规潜艇的设计趋势.....	董耕译	包慎良校 (100)
8. 瑞典潜艇的发展.....	郭长栓译	张召忠校 (109)
9. 常规动力潜艇及其在德国的发展.....	方宝定译	(126)
10. 瓦伦特 (PAXMAN VALENTA) 机械增压潜艇用柴油机.....		
.....	韩天聪译	薛竹仁译校 李达仁技校 (134)
11. 废气涡轮增压潜艇柴油机.....	李达仁译	薛竹仁译校 薛亚凡技校 (146)
12. 柴—电推进装置的最新发展和未来的技术.....		
.....	于承斌译	张召忠译校 刘微五技校 (165)
13. 常规潜艇推进系统的设计技术.....	张召忠译	郭长虹校 (179)
14. 潜艇主要系统的综合后勤支援.....	何季通译	(190)
15. 潜艇空气净化设备.....	胡兴义译	姚树人校 (201)
16. 潜艇武器系统的设计.....	谢军飞 王树宗译	董化民校 (218)
17. 潜艇武器的传送和发射.....	祝恒建译	吴本湘校 (239)
18. 论皇家海军近年来在潜艇逃生与救生方面的发展.....	曲晶晶译	薛竹仁校 (246)
19. 潜艇首、尾部设计的水动力特性.....	钱治光译	杨家琨校 (260)
20. 潜艇纵向静稳性和动稳性概念的初步探讨.....	蔡云安译	张纬康校 (276)
21. 预测潜艇操纵性方法的新进展.....	张纬康译	范尚雅校 (288)
22. 潜艇吨位和排水量的定义.....	方宝定译	张召忠校 (304)
23. 水下运载器在大浪中航行时的最佳深度控制.....	严隽永译	刘海鹰校 (315)
24. MINICIN—动力调谐陀螺船用惯性导航系统.....		
.....	汪人定 翁维开译	殷立吴 薛竹仁校 (327)

影响潜艇设计的因素

R. J. Daniel (英国)

1. 引言

二十世纪五十年代以来, 潜艇在设计和工作性能方面取得了巨大的进展, 并已在世界大多数主要海军国家里被认为是一支最重要的兵力。这主要是由于引进了核动力推进系统, 从而使得较早期的可潜器可不依赖大气中的氧气助燃而获得推进动力, 并使得真正的潜艇有可能得到发展。这种真正的潜艇能以高速在水下活动几个月, 执行战术和战略任务。同时, 由于可以获得曾一度只在大型水面舰只上才有的那种推进动力, 也就能够建造与所载武器和探测设备相称的大型潜艇了。

其它获得动力的方法, 例如, 以高浓度过氧化氢 (HTP) 或燃料电池为基础的方法, 都不可能赋予潜艇以现在可以获得的那种能力。

由于潜艇能力大大提高, 潜艇建造中所使用的与结构和其他系统相关的材料及制造方法必须有相应的改进, 同时, 也就需要研究改进现行的设计方法和发展与这些潜艇应具备的性能相适应的新技术。

2. 重量、浮力和稳性

为达到水下状态的平衡, 艇艇的浮力必须同它的重量相等, 重心必须位于浮力之下。在这种水下状态下, 耐压艇体内的一些主压载水柜注满海水, 潜艇即处于纵倾平衡状态: BG 为静稳性的计量单位。将这些水排掉, 潜艇就变轻, 并回复到水面状态, 此时就可应用稳心法则。显然, 主压载水柜的布置和容积将决定潜艇的吃水和水面状态下的姿态及储备浮力。这种储备浮力, 通常超过潜艇水面排水量的 10%。这一点对潜艇, 特别是对必须浮出水面充电的潜艇的适航性十分重要, 储备浮力对诸如武器装载和储存一类的岸港操作也很重要。在较早期的潜艇上, 曾在设计方面作过努力, 使储备浮力大于任何一个主要耐压艇体舱室的排水量, 但这个方法现在不再使用了。

在水面状态下, 如所预料的那样, 潜艇的纵稳心高要比横稳心高大得多。在水下状态下, 两者则相同——BG 值约为 1—2 (视潜艇的尺寸和型号而定)。因此, 潜艇的水下姿态对纵向重量平衡的变化极其敏感。潜艇必须能在密度极高的海水中活动, 在潜艇计划活动的海域内, 很可能遇到这种海水, 它的比重可能达到 1.05—1.30, 而潜艇航行时的实际重量又是随燃料、备品、粮食和武器弹药的消耗而变化的。还必须考虑到艇体的压缩性和海水的压缩性等因素, 前者可能在潜艇的水面状态和最大工作深度之间造成数吨的浮力损失, 而后者则只有在潜艇深潜的情况下才至关重要。因此, 必须在潜艇的两端和中部设置纵倾平衡水柜和补重水柜, 以供海水注、排, 使潜艇在所有这些情况下都能保持平衡。

各级潜艇上的消费品 (重量) 和水柜容积的合理配置, 可以用纵倾计算图 (或平衡多边形) 表示出来。“纵倾平衡” (Trim) 这个术语既可用来表示中性浮力状态, 也可用来表示正确的纵摇姿态。潜艇在航行过程中始终保持平衡具有压倒一切的重要性。水面状态的潜艇假如不得不紧急下

潜，则既不允许在水面磨蹭，也不允许一头扎到深处。潜艇在浅深度上发射鱼雷时突然钻出水面，其后果可能是致命的。为此，必须设法给潜艇注水，以补偿所发射的每一枚鱼雷的重量。发射弹道导弹时，补重问题就更为重要。因为，每枚导弹重达数十吨，发射间隔又短暂，而且还要使潜艇在整个发射期间始终保持一定的深度上。纵倾平衡水柜和补重水柜以及主压载水柜的典型布置如图 1

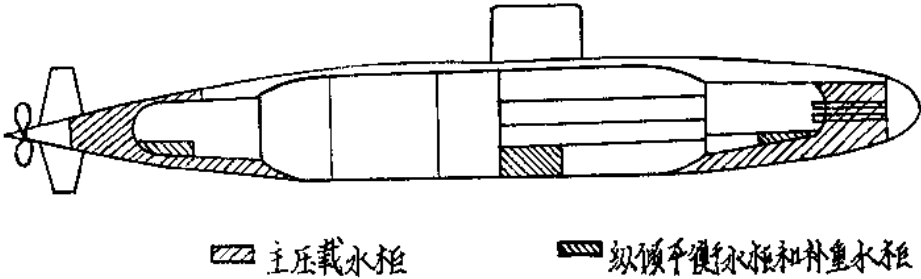


图 1 纵倾平衡水柜和补重水柜及主压载水柜布置

往往只有在艇上设置一根位置尽可能低的压载龙骨才有可能提供足够的稳性。这根龙骨的重量可能要占潜艇轻载排水量的 10%，而且，通常在两端还可以调整，这样，在潜艇整个服役寿命期间做重大改装时，可使其重量保持不变。在确定必须的初稳性要求和固定压载量时，设计者十分关注的就是这根压载龙骨是否是以：

- (a) 在主压载水柜注、排水时，为上浮或下潜的稳性过渡条件做准备；
- (b) 为航行中的重量增加做准备，因为这种增加会造成固定压载重量的减少，从而也会造成稳性的降低；
- (c) 为 BG 在水下操纵的动稳性条件下所起的基本作用做准备。

耐压艇体、压载水柜和纵倾平衡/补重水柜的精确配置系一个特定的设计函数。艇体通常有三种类型：单壳艇体、鞍形水柜艇体（又称一个半艇体——译者注）和双壳艇体，其截面如图 2 所示。

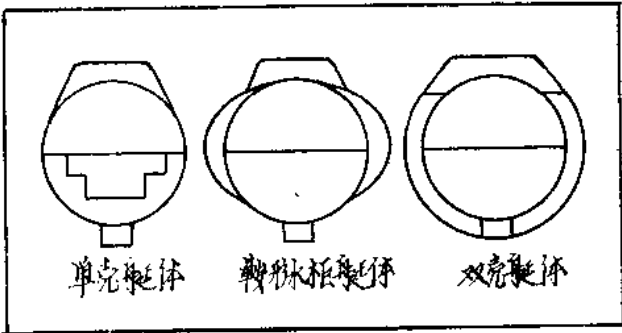


图 2 艇体截面图

单壳体潜艇的主压载水柜位于耐压壳体两端外部或耐压壳体内部。在后一种情况下，难以确定应给压载水柜设计多大承载压力，因而也给潜艇结构设计造成相应的困难。安装海水阀可使水柜压力小于适用于耐压艇体的压力，选择这种压力能预防压载水柜的水被吹除，从而使潜艇在紧急情况下能恢复机动能力。

在鞍形水柜壳体潜艇上，主压载水柜作为流线型附体布置在耐压艇体两舷。在这些水柜的底

部通常有通海孔，并由位于柜顶的排气阀控制水柜的进水。两舷和首尾的各个水柜通常装有通海阀，作为潜艇泊港时的一项安全措施。有时还作这样的布置（并将潜艇压载作相应的调整），使外部主压载水柜能用作附加的燃油柜。用这种方法，潜艇的续航力可以大大提高，但水面状态下的储备浮力却因此而要降低。战时，鉴于潜艇只在十分安全的水域才会冒风险起浮，这种降低储备浮力的做法是允许的。

双壳体潜艇在其大部分耐压艇体周围有一个完整的或者接近完整的外壳。两个壳体之间的空间用来设置主压载水柜和外燃油柜，固定压载龙骨位于壳体之间的底部。两个壳体之间的距离主要取决于对出入和结构以及平衡等方面的考虑，以便在敌方武器对着外壳爆炸时，内耐压壳体不致遭到严重的损坏。

此外，要检查损坏状态（包括潜艇失去机动能力和艇底部分浸水的状态）下的稳性，还应研究累进进水对稳性的影响，以便潜艇脱险。

潜艇重量出现异常时，除作一般的故障指示外，难以提供别的检测方法，因为分配给潜艇各个重量组的百分比是随设计特性（如下潜深度和装机功率）的不同而明显地不同，而且还有一个问题是各个重量组包括那些特殊装置和系统。但是，尽管存在这些不利因素，有关现代潜艇水面排水量的各类百分比还是可以表示出来的（见图 3）。其中，耐压艇体约占艇体结构重量的 50% 以上。

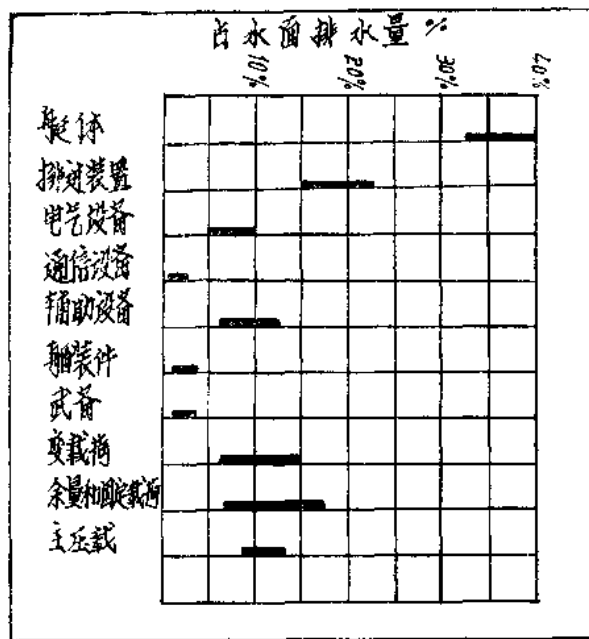


图 3 水面排水量的百分比分配

3. 布置

潜艇是唯一能在敌方空中和水面兵力控制的水域中有效地进行活动的军舰。潜艇要获得成功和求得生存，就必须不被对方用音响、水动力、电场、辐射等手段探测到。在潜艇设计方面，不仅要使这些辐射源减到最小，而且要为潜艇提供发现潜在目标或免遭发现的探测设备，这是至关重要的。遭到探测的主要风险来自水动力辐射噪声或机械辐射噪声，前者是因海水流过艇体表面并穿过推进器而引起的，后者则是由机械方面的某种不平衡所造成的。这两种噪声源都在潜艇的

后半部，因而，潜艇的主要探测设备必须装于艇首。此外，将武器发射系统装于单桨潜艇的尾部显然也是有困难的（但不是不可能）；考虑到武器的横向应力，潜艇在大于一或二节航速时，以不只是一个相对于艇体表面水流方向的小角度进行发射是有困难的。

这就形成了典型的现代潜艇的总布置（见插图1）（图不清，略）。探测设备和鱼雷发射管位于首部，备用鱼雷紧靠之，推进器和主操纵面同推进机械一起位于尾端；中段是艇与武器控制中心、住舱和其它生命支持系统、蓄电池组、反应堆舱，以及辅机系统。由于反应堆舱载荷集中并存在辐射所引起的潜在的生物学问题。反应堆舱的位置需要特殊对待。从潜艇指挥室围壳的位置可以清楚地判明操纵室的位置。

大功率和高航速使潜艇能够在水平面和垂直面上进行快速机动。深度的迅速变化，要求有一个很大的机动区域，从而，也要求有更大的下潜深度。核动力装置及其生物屏蔽的重量大，其中有些组件还不易装进柴油机—电力推进潜艇的五、六米直径的耐压壳体中。因此，核潜艇的直径要大，再加上设计下潜深度增加，就导致艇体重量的增加；其它系统的重量也因此而增加。这样，潜艇的尺寸必须增大，才能提供支撑这些重量的浮力。为使阻力最小，为获得足够的推动力和水下机动性，潜艇的总体线形就必须是个水滴形的回转体，长与直径之比以六、七或八为好，回转体里面为耐压壳体。耐压壳体约占潜艇水下浮力的90%—94%。其结果，就要求直径大大超过五、六米。

艇上设备安装得十分紧凑，其中许多还要求容易够得到。空间是非常宝贵的，高明的设计者并不欢迎过大的甲板高度。因此，艇内甲板间距在允许的前提下设计得相当窄，一般选用一层、二层、三层或四层甲板布置（加底柜），如图4所示。

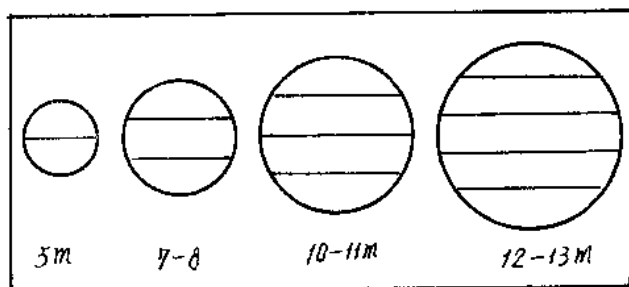


图4 典型的耐压艇体直径

不应忽略这样的一点：有几个实际问题限制了设计者选择潜艇尺寸的自由，而进坞吃水和操纵面的尺寸也不是无关紧要的。

通讯设备、雷达、电子设备和导航传感器都安装在升降装置上。该装置同攻击和搜索潜望镜一样，不用时可缩进围壳内。别的传感器主要是音响探测装置，位于艇首，那里远离尾端的机械噪声和水动力噪声，但可能存在由中速航行所引起的层流。通常将主要声纳设备装于艇首——或呈圆柱形基阵，或呈保角形基阵，其主要工作方式被动式，但也具有很强的主动搜索能力。在对声纳位置和鱼雷武器位置的要求之间通常有矛盾。其它声纳基阵则装于沿艇体的别的位置。

火控计算机同声纳和其它探测设备显示器一起装于潜艇操纵室内或附近。从这里可以选择和发射武器并将武器导向目标。鱼雷系统通常包括若干首尾方向排列或与艇首成一个小角度的发射管、位于艇尾的备用鱼雷的上载、储存和装填设备，以及鱼雷发射系统。鱼雷、导弹或水雷即通

过该发射系统靠空气或水从管中射出，或者“游出”。鱼雷发射管使用时，构成潜艇耐压壳体的一部分，因而，要有相应的尺寸。管内外装有相当数目的联锁装置和安全开关，以保证操作的安全。在整个发射周期内，必须保持好艇的重量与浮力。方法是：注入适量的海水以补偿发射出去的武器的重量。弹道导弹潜艇要求有精确的导航和供导弹瞄准目标的精确的火控数据，还应有灵敏的补偿系统和悬停系统，以便发射导弹时，特别在大风浪中，保持纵倾平衡和深度不变。

4. 线型、速度和功率

尽管潜艇存在的理由是因为它能在敌方水域活动而不被发现，尽管潜艇在二次大战中取得了赫赫战果，其水下航行和机动能力却极受限制。潜艇的流线型与其说是取决于对水下高航速的要求，还不如说是取决于对水面快速、安全航渡的要求。蓄电池组的功率相对有限是个直接的原因。因此，潜艇要想在反潜兵力密集的环境中活动，它的尺寸必须要小。艇长与直径之比一般大于10。此外，应更多地注意减少兴波阻力而不是表面摩擦阻力或附体。在这样的潜艇上，附体、翼片、上外壳、操纵面、推进轴等的阻力往往大大超过裸艇体的阻力。

完全在流体中活动的运载工具，如飞艇或潜艇，不产生波，并可最大限度地减少表面摩擦阻力。对于回转体线型来说，零平行中体同最小剩余阻力有关，而降低长与直径之比的结果是使艇的表面积减少，从而也使表面摩擦阻力减小到最佳比（约6），棱形系数则为0.60左右。现代潜艇设计已经朝着这个方向迈出了一大步。海水有粘性，会在潜艇周围产生一个边界层，因此，潜艇线形以冲压式或喷气发动机形或“水滴形”为佳，以避免大的反压力梯度，减少边界层的生长，延迟边界层的破裂。

水下状态潜艇的总阻力有三部分：表面摩擦阻力、形状阻力（即压力梯度）和附体。

$$C_T = C_{FV} + C_F + C_{\text{附体}}$$

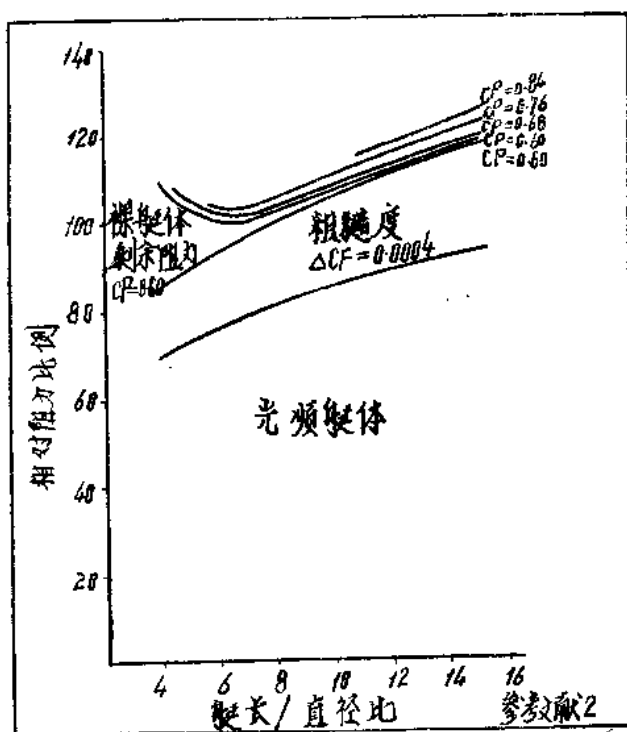


图5 相对阻力与艇长/直径比的关系

下列事实应予注意:

- (1) 现代潜艇裸回转壳体的表面摩擦阻力不到老式潜艇的 80%;
- (2) 形状阻力只占这种线型的总阻力的 2 - 4 %;
- (3) 艇体粗糙会大大影响阻力。对一个加工和油漆得差的艇体 (注水口的位置和形状也很糟), 其“粗糙度裕度”要比一个具有最佳光顺性的艇体大几十倍。
- (4) 不管附体是怎样流线型化和制造得怎样精细, 其阻力总是接近或者可能超过裸艇体阻力的 50%。唯一实际的解决办法就是去掉附体。

棱形系数与艇长/直径比的变化关系如图 5 所示。(摘自参考文献 2)。

早期的潜艇 (如 1977 年建造的英国皇家海军的 R 级潜艇) 只有一个推进器, 但是, 对于多数柴——电潜艇来说, 由于存在有关机器功率、造船学以及水面推进设计最优化等方面的实际问题, 几乎普遍采用双轴布置, 轴和推进器位于艇轴线以下, 推进系数与水面舰艇相似。回转体的线型不适于水面推进而最适于水下推进。由于重新采用了这种线型, 在艇轴线上使用单推进器并加大推进器的直径就不仅需要而且可能了。这样可获得较高的推进系数 (可达 0.8), 并使位于附近的方向舵和水平舵的效率也得到提高。影响推进系数的主要因素是推进器直径, 而推进器直径在很大程度上又取决于推进器转数。

有效功率同排水量的三分之二与速度的三次方的乘积成正比。以典型的回转体线型为例, 两者的关系如图 6 所示。有关其它一些类型潜艇的功率可参看参考文献 3。

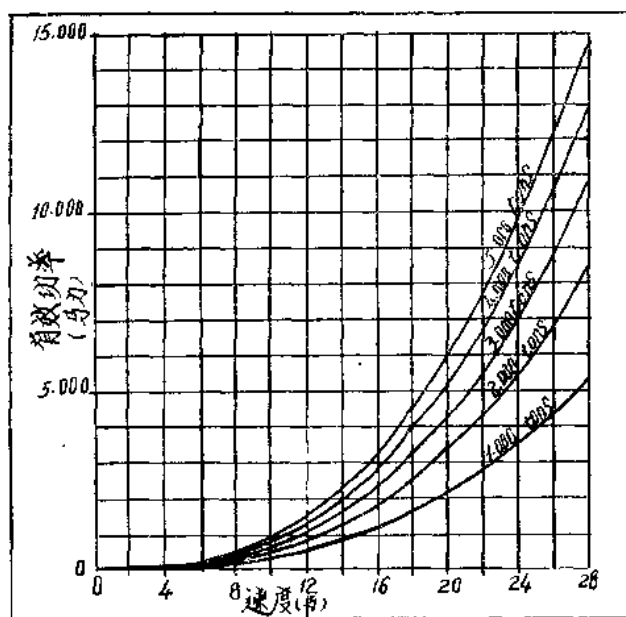


图 6 速度和有效功率的关系

“水滴形”潜艇因棱形系数高、艇首肥, 不适于水面推进, 在水面状态下的速度大大低于相同功率的水下速度。要在水面状态下获得高速, 通常要克服棱形体峰, 艇首还往往要翘起一个相当的角度。

柴——电潜艇需要获得最大可能的高速和最大限度地减少水面暴露, 这就导致通气管装置的发展。通气管上装有一个浮阀, 潜艇在潜望深度时, 柴油机所需的助燃空气可通过该阀门被吸收

进来。在这一深度，兴波阻力相当大，但潜艇有可能达到持续的中速（假定水平舵操纵适度）。水下推进和通气管状态推进所需的相对功率如图 7 所示。

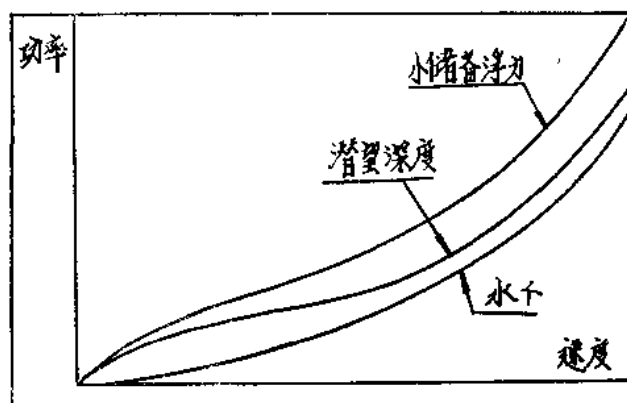


图 7 相对推进功率

5. 操纵性与控制

为了作战与安全，水下状态潜艇必须有良好的航行动稳性，必须能保持规定的航向和深度而不发生偏差，或者说，在操纵面的作用下，能在需要时，迅速改变深度或方向，并安全而迅速地回到定常稳定状态，以及在遇到随机扰动后，必须能在不修正操纵面动作的情况下回到规定状态。

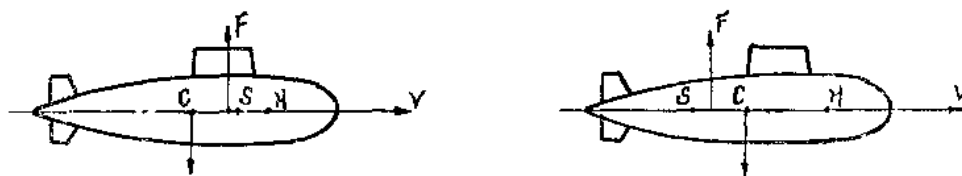
用以为潜艇确定水动力稳性和控制导数的技术得到了发展——由主要采用自由船模试验发展到了采用约束船模拖曳试验。这一技术的主要优点是使用了精密强度越来越高的平面运动机构（PMM）。该机构可通过试验来测定 6 度自由度中的水下艇体运动方程中要求的各种水动力稳性和控制导数，测定时使用的是一种可直接用于计算和计算机模拟分析的方式。在鉴定为某一特定型号或级别的潜艇所必需的合格性（或者说稳性和控制特性）时，要进行与潜艇通常采取的机动动作相似的若干起决定作用的机动试验。这些机动动作有“开回路”和“闭回路”两种，前者靠潜艇的固有的水动力性能，后者则依赖控制系统的反应并确定全艇操纵系统的性能（参考文献 4、5、6 和 7）。

水下航行的动稳性是由尾部的水平稳定装置和方向舵提供的。操纵面就是指首尾水平舵和方向舵，尾部的水平稳定装置（尾水平舵固定于此）通常伸出最大艇体直径线。首部水平舵在不用时或在潜艇停泊时通常缩回折迭起来。尾部的结构也可成“x”形，以使各种操纵面既能起到控制垂直面的作用，又能起到控制水平面的作用。1962 年，在美国海军的“大青花鱼”号潜艇上曾对这种结构进行过实尺度试验。

中速到高速时，垂直面的操纵可完全由尾水平舵来实施，而低速操纵和在中到强浪下保持潜望深度时，则须使用首水平舵。速度十分低时，水平舵的控制作用则相反——即所谓的“中国式”效应（Chinese Effect）。

从临界点和中性点的概念看，水平舵在潜艇操纵方面的作用是明显的，如图 8 所示。

艇首位置和指挥室围壳位置对首水平舵的相对作用是能够判断的。高航速和有效的操纵系统相结合，可使潜艇获得可观的机动性——能在 20—30 度的纵倾平衡角上，在不到一分钟的时间里将深度改变数百英尺，而在水平面上，战术回转直径小于四倍艇长亦属平常。潜艇回转时，



- S. 临界点, 潜起时前移, 减速时后移。
 C. 重量中心, 固定不变。
 H. 中性点, 仅轻微位移。
 F. 向上合力, 如果作用于中心点, 不产生纵倾平衡变化; 如果作用于临界点, 不产生深度变化。

图8 临界点与中性点概念

偏航角增大, 使翼 (或指挥室围壳) 与水流成一角度, 并产生一个力矩, 使潜艇转向。初横摇 (突然横摇) 可以大到 45 度, 定常横倾角根据航速可由 7 度增大到 15 度。回转期间, 需要控制深度的变化。为减小突然横摇, 曾在“大青花鱼”号上的翼 (或指挥室围壳) 的末端安装了一个舵, 但现在已不再使用这种方式了。

6. 强度

水面航行的潜艇, 因波浪作用而遇到和水面舰船同类型的载荷。在三十年代建造的某些长而水面航速高的可潜器上, 对这类载荷的检测是设计方面的一个重要考虑因素, 但是, 在多数类型的潜艇上, 由于水静压力所引起的水下载荷则是更紧要的条件。

人们早先就注意到, 下潜深度增加, 使在垂直面上的机动能力增大, 从而可以充分利用水下高速。下潜深度的增加, 还可以:

- (1) 使潜艇能在反射和折射声波的温跃层以下活动;
- (2) 使潜艇能利用可进行远距离探测音响信号的深声道;
- (3) 使潜艇难以被探测和遭攻击, 更加安全;
- (4) 提高潜艇在小于设计深度上的抗击能力。

典型的潜艇结构布置见图9。

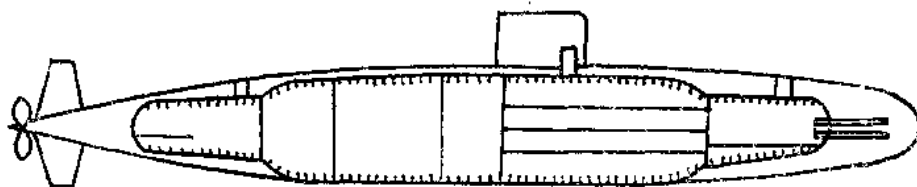


图9 典型的结构布置

耐压艇体通常是个由高强度钢板制成的薄筒形壳体, 以内或外环形肋骨为加强结构, 以主横舱壁为支撑结构。对艇体起某种支撑作用的还有横向环形加强肋骨, 甲板, 以及双壳潜艇上内外壳体之间的舱壁。

潜艇壳体呈流线型, 耐压艇体的直径随艇形状的不同而不同。直径略有差异的耐压艇体, 各分段之间靠锥形段过渡; 在直径相差很大的艇段之间, 直径大的一边应该用准球形的大锥度锥体

来过渡，直径小的一边则应该用舱壁或重加强筋来过渡。

许多中等下潜深度的潜艇，曾在耐压艇体的首尾端安装有平面舱壁。这种舱壁重量重，易在其与筒形壳体的连接处产生疲劳裂缝。现代深潜潜艇有球面端部隔壁。这种隔壁最好应呈球形，但是，为避免受压时在顶部产生大的曲率变化，由球面隔壁构成的，有准球形过渡段连接艇体的球面也是符合要求的。

进行潜艇强度预测的一个好处是可以很好地确定耐压艇体上的水静力载荷。在静力条件下，一个有环形肋骨的薄筒形壳体可能出现下列一个或几个问题：

- (a) 由总体失稳造成的总体破坏；
- (b) 肋骨间外板皱折；
- (c) 肋骨间外板屈服。

舱壁间总体失稳破坏（“啤酒桶”式）是由于与舱室长度有关联的肋骨强度不够而造成的一种低位皱折现象。圆度十分重要（参考文献9）。减少舱室有效长度和（或）采用强度大的环形肋骨，皱折压力就能明显增加。

肋骨间壳板皱折是一种高位失稳现象，其表现形式是：一对对耐压艇体肋骨之间的外板在艇周围的许许多多节点处发生皱折。发生肋骨间壳板皱折的压力因失去圆度和残余应力而降低，但受艇体外板的原局部压痕的影响不大。（参考文献11、12和13）。

肋骨间外板屈服会在肋骨之间沿筒形壳周围产生一个或多个褶。发生肋骨间（或肋骨间距中点）外壳破坏的压力并不过多地受原局部压痕的影响。这种压痕会造成局部屈服，但是，造成轴对称破坏的形式和压力实际上是不变的。

这些破坏形式如图10所示。

在潜艇设计中，要求建造重量最轻的结构，这个结构能在战役战术任务书中所规定的下潜工作深度上不受限制地活动。要达到这一结构设计要求，设计者应该意识到，必须考虑到材料特性的轻微变化；还必须考虑到不可避免的圆度偏差和在建造中或服役期间可能发生的其它结构的偏差；特别是肋骨中的残余应力的作用；应力集中的作用和超静定系统计算中的误差，以及在值勤中由于操纵失灵或为了规避攻击有意机动所造成的超过潜艇工作深度的可能性。这些误差合成一

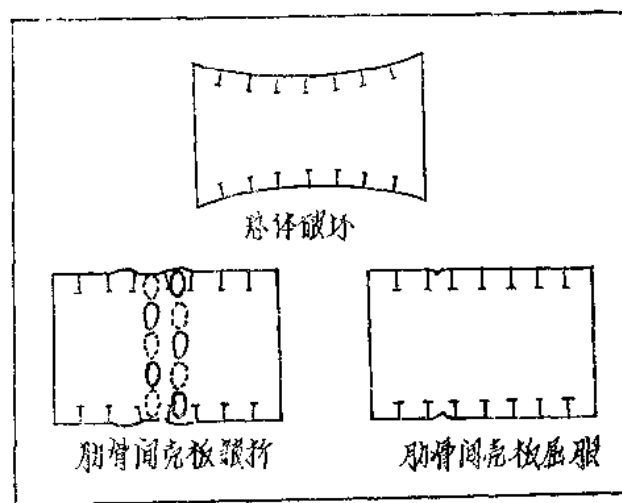


图10 环形加强薄圆柱壳体的破坏形式

个因数，将该因数与工作深度相乘，即得到潜艇的设计深度，于是：

计算深度（或设计深度）= 安全因数 × 工作深度。

在大多数的军用潜艇上，用这种简单方法计算的安全因数都在 1.5 至 2.0 之间，但趋向于向 1.5 的那个低数发展，因为，设计方法的改进。结构船模试验的更加广泛和新的建造技术的应用，将会消除某些误差。可是，在选择安全因数时，必须考虑到在纵向高应变部位产生交变应力循环的可能性。

谢门斯基认为（参考文献 14），该安全因数同潜艇长度应有某种关联，因而，也与可能的纵倾平衡角有关。在他发明的一个公式中，艇长与计算深度有关，并与极限深度（大于工作深度）有关；潜艇在其服役寿命期间，有可能在有限的次数内下潜到这个深度，因此：

计算深度 = 1.4 极限深度 + 0.28 艇长。

耐压艇体外板厚度、肋骨尺寸和肋骨间距、舱壁之间或加强筋之间的舱室长度的选择及材料特性，都会决定一个已知结构最初将倾向于弹性失稳还是屈服破坏。

通常将耐压艇体结构设计成：出现因肋骨间屈服而造成破坏的压力，比因弹性失稳造成破坏的压力要低。在英国标准 BS5500 中，就采用这种方法，即：环形加强薄筒壳体、锥体和球面体的设计破坏曲线表明，因弹性皱折造成的计算压力约是无支撑壳体的计算压力的 1.5 倍（参考文献 15）。肯德里克等人所做的研究工作，使人们对耐压艇体破坏的力学原理有了广泛的了解（参考文献 16、17 和 18）。然而，各种破坏形式之间的相互作用是相当大的，对数百次船模试验和实船试验所作的分析都证明了这一点。因此，设计就是以使用从具有现有残余应力和几何形状的结构中推导出来的这些经验数据为依据的。

图 11 表示加强筋间计算压力 p_c 和锅炉压力 p_b 之比与薄度比的变化关系，其中（参考文献 19）：

$$\lambda = \sqrt{\frac{4}{\left(\frac{I}{2R}\right)^2} \cdot \frac{2}{\left(\frac{h}{2R}\right)^3} \times \sqrt{\frac{\sigma}{E}}}$$

λ = 薄度比

I = 肋骨间距

h = 耐压艇体厚度

R = 耐压艇体半径

E = 杨氏模数

σ = 材料屈服强度或 0.2% 验证应力

肯德里克认为（参考文献 12），比较一般的情况是以 p_{cs} （肋骨间距中点的最大外板膜应力）来代替 p_c （锅炉压力）。但还提醒人们注意图 12 中表示 p_c/p_{cs} 和 p_m/p_{cs} 关系的普通曲线，其中：

$$p_b = \text{锅炉公式} = \frac{\sigma h}{R}$$

p_{cs} = 肋骨间距中点膜应力

p_m = 冯·迈西斯失稳压力

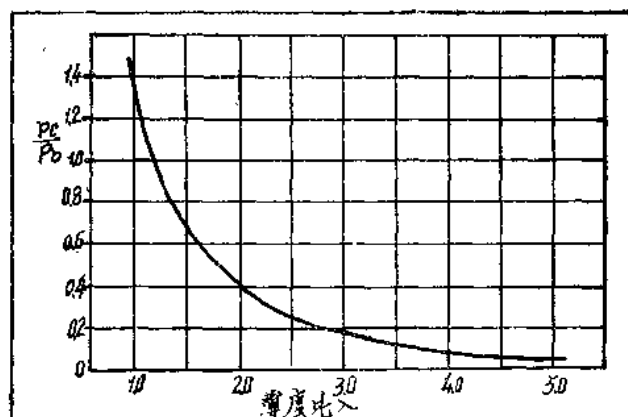


图11 计算压力/锅炉压力比与厚度比的关系

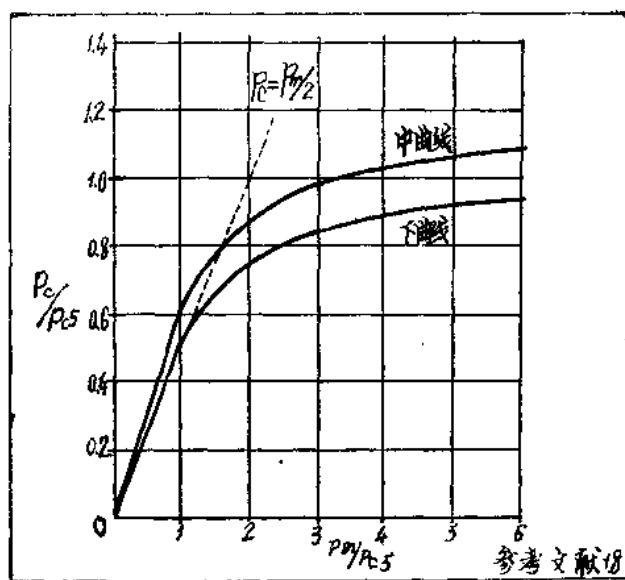


图12 肋骨间盖板破坏结果

人们将看到，对于某些几何形状，由于肋骨效应等原因，耐压艇体各纵段可能遇到超过材料屈服应力的应力而不遭破坏。业已证明因数可达15%甚至20%。

弹性模数、屈服强度和极限抗拉强度在决定破坏结构中的相关作用是明显的。虽然，为潜艇壳体所选择的设计条件通常是肋骨间外板的屈服，虽然材料屈服强度的增加会提高计算压力（或保证较薄材料的使用），但因模数不变，随着钢强度的增加，屈服强度的更加接近于极限强度；以及屈服强度同疲劳强度的联系，都使得屈服强度的增加实际上得不到充分的利用。

这些考虑因素已导致人们去研究是否有可能不用钢而用其它材料来建造耐压艇体，特别是深潜潜艇的艇体，顺便提一句，深潜潜艇的耐压壳体可以厚至使皱折不再成为问题，也可以不要肋骨。对铝、钛或玻璃都已作了考虑。最近，考虑的重点则是屈服强度分别可达200000磅/平方英寸和110000磅/平方英寸的钢和钛。这两种材料对典型潜艇的特性和相对成本的影响在参考文献8中做了论述。至于用这些材料来制造的实际问题还很严重。

在理论预测计算压力时产生误差的那些难以计算的因素包括：圆度误差、焊接变形、肋骨弯曲、

残余应力、焊接不理想和应力集中。不管是因为舱壁的原因还是由于挤压、弯曲、焊接或别的原因，应力集中都能导致在大大小于设计深度(有时小于工作深度)的深度上，局部地达到的压力下的屈服应力。材料的屈服会在潜艇上浮期间压力降低时造成拉应力，而拉应力又会造成具有变化迹象的载荷循环。在潜艇服役寿命期间，这种循环数可高达 30000，从而引起高应变——低循环疲劳问题。通常是直接减小毗邻主横向舱壁的肋骨间距和(或)把这种肋骨制造得更重，以便在出现高弯曲应力的区域内提供更大的结构稳定性和更高的强度。

外焊肋骨比内肋骨稳定性好，又能得以更好地利用内部容积，还能支撑双壳潜艇的外部结构。然而，外焊肋骨会在腐蚀性环境中受到拉应力，在动载荷下，它们比内肋骨更有可能从外板脱开。

球面舱壁的双曲率会产生一种加强效应，从而使人们能使用较薄的材料制造筒形壳体而获得相同的计算压力。球面舱壁试验得到的典型曲线如图 13 所示。然而，球面舱壁的强度对真圆体偏差十分敏感(参考文献 20 和 21)。实际上，是不能达到标准计算压力的(根据温·德·纽特，参考文献 22)。

$$P_{CL} = \frac{2Eh^2}{R^2\sqrt{3(1-\nu^2)}}$$

式中 P_{CL} : 线性标准计算压力

P_S : 根据简单薄膜理论 $\frac{2h}{R} \cdot \sigma_y$ 造成球体屈服的压力

ν : 泊松比

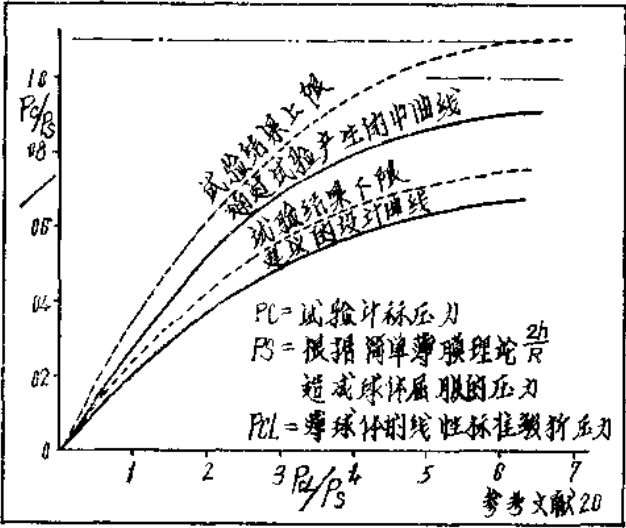


图13 球面舱壁的计算压力

耐压艇体上的开口是个潜在的薄弱环节，因而应该控制在最小的基本数目上。需要加固开口，以保持强度和圆度，诸如导弹发射管一类的开口所引起的问题是很明显的。与艇体开口相连的系统是潜在的薄弱环节源——在其与艇体连接的部分(特别是在震动情况下)是这样，在艇内的部分(当系统的某个组件发生故障或渗漏时)也是这样。因此，在艇体连接处要求安装速闭阀。