

船舶与海洋工程系列
CHUANBO YU HAIYANG GONGCHENG XILIE



潜艇强度

● 石德新 王晓天◎编 姚熊亮 吴 强◎审



内容简介

船舶与海洋工程系列
CHUANBO YU HAIYANG GONGCHENG XILIE



潜艇强度

●石德新 王晓天◎编 姚熊亮 吴 强◎审

哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

内 容 简 介

本书主要叙述潜艇耐压船体(环肋圆柱壳、圆锥壳)的应力及稳定性计算。书中不仅阐明了理论分析和数学推导,而且对若干复杂的计算提供了简化公式、图谱或附表,以适用于工程计算。通过对本书的学习,不仅可以了解潜艇耐压船体的计算理论和方法,而且可应用图谱或使用计算机进行应力及稳定性计算。

本书可作为高等院校潜艇设计与制造专业教材,也可供从事潜艇结构设计或制造的工程技术人员参考。

ISBN 978 - 7 - 81007 - 769 - 9

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451 - 82519328
传 真 0451 - 82519699
经 销 新华书店
印 刷 肇东粮食印刷厂
开 本 787 mm × 1 092 mm 1/16
印 张 7.75
字 数 160 千字
版 次 2007 年 10 月修订
印 次 2007 年 10 月第 2 次印刷
定 价 16.00 元

<http://press.hrbeu.edu.cn>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn



前 言

“船舶结构力学”和“潜艇结构”是本专业的两门主要必修课程,学生在学习本课程前,应该对杆和杆系以及板的弯曲与稳定性具有较好的基础知识,并已熟悉潜艇的船体结构。因此,本课程主要叙述潜艇结构采用的薄壳(环肋圆柱壳、圆锥壳)基本理论和计算方法,附有计算所需的各种图表,并通过一些实例计算和具体指导,使学生掌握潜艇结构的计算方法。

该书的理论分析经过了作者十几年的探索和研究,更加完善,特别是对应力特征方程解的形式及稳定性规律研究具有独到的见解。另外,数学推导严密,物理意义明了,为我国潜艇结构设计提供了理论依据。遵照国家教委关于新编教材一律采用国际单位制的规定,在本教材中采用了国际单位制,但鉴于目前国内工程单位制尚未完全消除,故在本书中也附上工程单位制计算结果,以供对照。

本书由哈尔滨工程大学石德新(第一章、第四章)、王晓天(第二章、第三章)编写,由哈尔滨工程大学姚熊亮、中国船舶工业总公司吴强审定。可供高等院校潜艇设计与制造专业用。

由于我们水平有限,本书一定有不少缺点,希望广大读者和使用本教材的兄弟院校师生提出宝贵意见。

编 者



目 录

第 1 章 潜艇的一般概念和外力计算	1
1.1 潜艇的分类	1
1.2 潜艇结构和基本要求	2
1.3 潜艇耐压结构的受力	5
1.4 耐压船体计算载荷的确定	8
第 2 章 耐压船体的应力计算	12
2.1 耐压船体结构概述	12
2.2 圆柱壳的弯曲微分方程及其通解	14
2.3 一般环肋圆柱壳的应力计算	19
2.4 带有中间支骨的圆柱壳应力计算	26
2.5 无限长弹性基础梁的解在潜艇结构计算中的应用	30
2.6 环肋圆锥壳的应力计算公式	36
第 3 章 耐压船体的稳定性计算	39
3.1 概述	39
3.2 一般环肋圆柱壳在舱段内的总稳定性	41
3.3 耐压圆柱壳的各类稳定性公式及其简化	51
3.4 圆锥壳的各类稳定性公式	57
3.5 耐压壳理论临界压力的修正	62
3.6 实例计算	64
第 4 章 耐压液舱的应力和稳定性计算	69
4.1 圆环在均匀外压下的静力特性	70
4.2 耐压液舱横向构架计算	74
4.3 托板式耐压液舱壳板应力和稳定性计算	80
4.4 实例计算	85
附录 1	90
附录 2	112
参考文献	115



第 1 章

潜艇的一般概念和外力计算

1.1 潜艇的分类

潜艇是各种水下舰艇的总称。各种潜艇由于其任务及战斗技术因素各不相同,因而分为几类。世界各国对潜艇的分类方法也各不相同,而且不同的历史阶段也有不同的分法。但这些并不影响对潜艇本质的了解。

潜艇的分类通常是按潜艇的某些特征:如排水量的大小、动力装置的类型、武备的种类、所担负的任务及结构形式等来区分。

1.1.1 按排水量的大小分类

潜艇按排水量的大小可分为三类:排水量在 2 000 t 以上的称为大型潜艇,这类潜艇一般具有较大的自持力、续航力,能携带较多的武器装备,能在远海、远洋进行长期的活动。排水量在 1 000 t ~ 1 500 t 的称为中型潜艇,它主要活动于中海、远海,其自持力、续航力比大型潜艇要小,所携带鱼雷也少些,但活动较为灵活,生产也比较方便,因而这种潜艇在目前世界各国常规潜艇中占有相当大的比例。排水量在 300 t ~ 800 t 的称为小型潜艇,它主要活动于近海及浅水区,其自持力、续航力均较小,武器装备相对也较少,这种潜艇体积小,活动灵活,使用隐蔽而且建造成本低,便于战时成批生产。

1.1.2 按动力装置类型分类

潜艇按动力装置类型通常分为常规动力潜艇与核动力潜艇两种。目前常规动力潜艇原动机主要采用柴油机——蓄电池系统的混合动力装置。核动力潜艇就是由核裂变反应产生热,由热蒸汽推动蒸汽透平机带动推进器,因此它实际上是属于单一发动机。核动力的出现使潜艇真正做到了不依赖大气而能在水下进行长期活动,实现了人们多年来所寻求的目标,因此发展迅速。但由于核动力技术复杂、价格昂贵以及受排水量的限制。因此,尽管有很多无可争辩的优点仍不能完全代替常规动力潜艇。

1.1.3 按武器种类分类

潜艇上通常装备有多种武器,而且随着武器装备的发展,所装备的武器亦在不断的改变。第一次世界大战前后建造的潜艇主要的武器是鱼雷和火炮,到二次大战火炮的作用逐渐减少,二次大战后,各国潜艇相继拆除了火炮。随着导弹武器的发展,潜艇上逐步装上了导弹。因此就目前来说按主要武器来分,一般分为两种,以鱼雷作为主要攻击武器的称之为鱼雷潜艇,以导弹作为主要攻击武器的称之为导弹潜艇。装备在潜艇上的导弹一般有两种:

即飞航导弹与弹道导弹。这里要说明的是,现在潜艇分类趋向于把动力装置与武备相结合的观点:如常规攻击潜艇指的是装备鱼雷或飞航式导弹的常规动力潜艇,攻击型核潜艇指的是装备鱼雷或飞航式导弹的核动力潜艇,而导弹核潜艇则指装备弹道导弹的核动力潜艇。

1.1.4 按船体结构形式来分类

1.1.4.1 单舰体潜艇

它只有一层耐压船体(图 1-1(a)),这种船体过去一般用于小型潜艇。但现在有的中型潜艇甚至核潜艇也有采用单舰体的。

1.1.4.2 一个半舰体潜艇

这种潜艇除了耐压船体以外,在它的周围还布置非耐压船体,但非耐压船体只包覆耐压船体一部分(图 1-1(b))。这种结构型式过去通常用于中型潜艇,现在已很少采用。

1.1.4.3 双舰体潜艇

这种潜艇在耐压船体之外有一层非耐压船体(图 1-1(c)),由于非耐压船体可以做成良好的流线形,从而减少水下航行阻力,因此现代中、大型潜艇广泛采用这种形式。

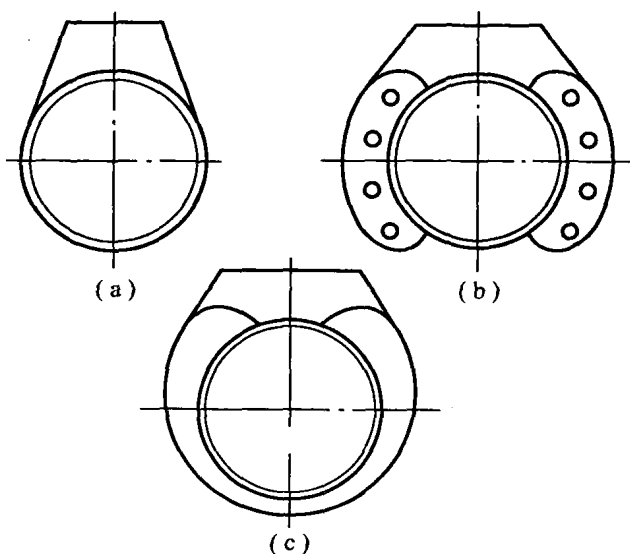


图 1-1 单、一个半、双舰体潜艇横剖面示意图

1.2 潜艇结构和基本要求

潜艇是一种既能在水面又能潜到深水中航行与战斗的特殊舰艇,它的特殊使命和受力特性决定了潜艇的结构型式与水面舰船大不相同。通常把它划分为基本结构和专门结构两大部分。

1.2.1 基本结构

1.2.1.1 耐压结构

现代潜艇一般可下潜到几百米甚至上千米的深水中,能够承受相应的巨大水压力的结构

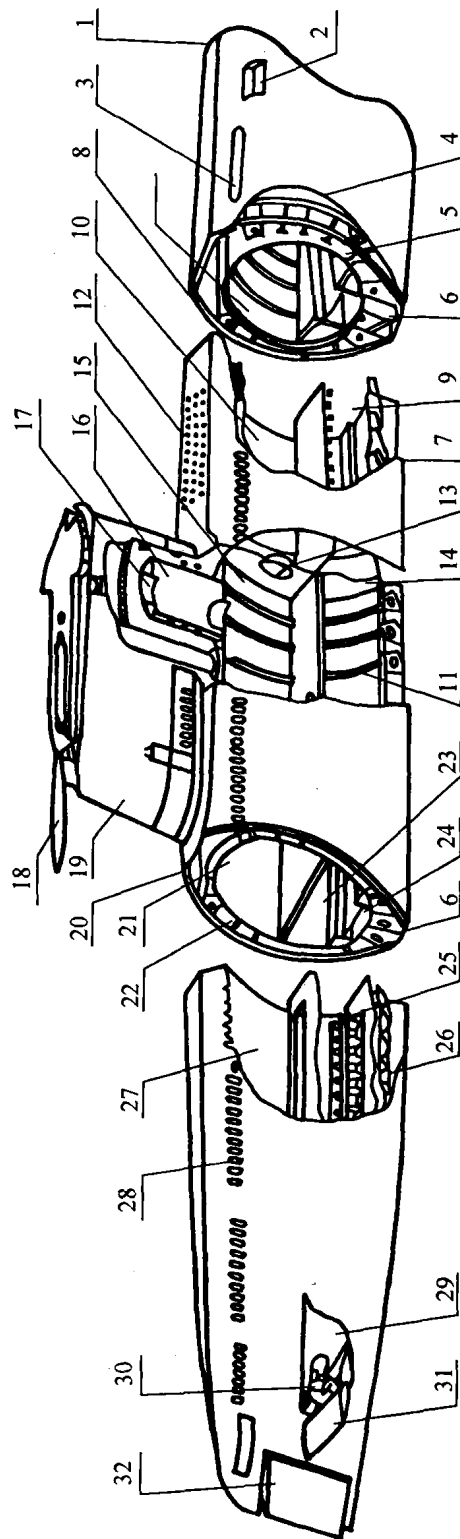


图1-2 潜艇结构分布图

1—拖船孔；2—锚孔；3—艏升降舵；4—外壳板；5—耐压壳体；6—龙骨立板；7—艏鱼雷舱；8—主压载水舱；9—舰首蓄电池舱；10—居住舱；11—肋骨；12—上甲板；13—圆形水密门；14—耐压舱壁；15—中央舱；16—耐压指挥室；17—升降口；18—燃油机水下排气管；19—指挥室围壳；20—上层建筑；21—舰尾蓄电池舱；22—主压载水舱；23—居住舱；24—燃油舱；25—燃油机基座；26—主压载水舱；27—柴油舱；28—上层建筑流水孔；29—稳定翼；30—螺旋桨；31—尾升降舵；32—方向舵

称为耐压结构。它包括耐压船体、耐压液舱和耐压指挥室,以及耐压船体前后两端的耐压舱壁。耐压结构是潜艇上最主要的部分,是本课程研究的主要对象,后面我们还要详细地讨论。

1.2.1.2 非耐压结构

非耐压结构包括非耐压水密结构,主要指舷侧压载水舱或燃油舱外壳结构。当潜艇在水面航行、停泊时,它是水密船体,能承受较小的水压力。当潜艇下潜时灌注了舷外海水,并始终与舷外水相连通,内外水压力平衡,因此它是非耐压的。另外,上层建筑,艏艉端结构和指挥室围壳属于非水密结构,在非水密结构开有大量的流水洞和通气孔,使潜艇在潜浮过程迅速自动排水和灌水,并始终与结构外海水连通,内外水压力平衡。潜艇上设置非耐压结构的用途是:构成潜艇光滑的外形以减小阻力,提高航速与改善机动性;构成耐压船体之外的空间,用于布设各种油、水舱柜,武备和水声装置系统等,以解决耐压船体内部容积与布置的矛盾;增加贮备浮力改善潜艇的水面不沉性。

1.2.1.3 耐压船体的内部舱壁

耐压船体内部舱壁包括非耐压舱壁和耐压舱壁。非耐压舱壁的功用与水面舰艇舱壁功用相同。主要作用是保证潜艇在水面状态的不沉性,提高潜艇的生命力;增强潜艇耐压船体的强度;把耐压船体内的空间分隔成各个不同用途的舱室;防止火灾与毒气的蔓延等。耐压舱壁除了同样具有上述功用外,还可以组成失事救生舱事,使艇员在潜艇水下破损坐沉海底后,只要在一定深度之内,还能进行抢修自救或待机脱险。非耐压舱壁能承受略高于潜望镜航行深度的水压力,而耐压舱壁承载能力则由艇内人员可以自救脱险的深度决定。

1.2.2 专门结构

专门结构是指潜艇上为某些专门用途而设置的结构。专门结构种类很多,在潜艇上分布很广,归纳起来有下列三类:

1.2.2.1 耐压船体上开孔加强结构

如出入舱口、耐压可拆板等。

1.2.2.2 非耐压船体上的凹穴和凸出品结构

如鱼雷发射管前的减阻板、水声仪器导流罩、锚穴及稳定翼等。

1.2.2.3 各种基座结构

如主机座、电机座等。

1.2.3 基本要求

潜艇船体结构之所以要采取这样或那样的型式,这种或那种的构造方法,是由多方面因素所决定的。这些因素都对结构提出了要求,这些要求主要有以下几方面:

1.2.3.1 结构应具有足够的强度和刚度

潜艇在使用过程中,船体各部分结构受到各种外力的作用。各种结构在一定的外力条件下应该不被破坏,不超过允许的变形或丧失稳定。这是结构赖以长期工作并发挥其作用的基础,因而也是最基本的要求。

1.2.3.2 结构应力求重量轻、尺寸小

从某些意义上说,要满足结构的强度和刚度(稳定性)这是比较容易做到的,因为只要加大结构构件的尺寸就能达到目的,但这并不是人们所希望寻求的目标。一个优良的结构设计,其中一项重要的指标,就是在满足强度和刚度的条件下,结构重量最轻、尺寸最小,这就

要求选择合适的结构型式及构造方法。例如耐压船体采用带肋圆柱壳结构比其它型式的结构,在同等强度条件下,能使结构的重量最轻。

1.2.3.3 流体动力性能和整体布置的要求

结构型式及外形的选择,应充分考虑艇体的流体动力性能和总体布置的要求。潜艇上采用这样或那样型式、形状的结构,在很大程度上与艇体的流体动力性能(如快速性、操纵性等)和总体设计布置有关。有时为了减少阻力、改善操纵性以及满足布置上的要求,不得不牺牲某些重量、尺寸以及增加一些制造工艺上的困难。例如,做成各种复杂形状的艏艉形,主要是为了减少阻力及改善操纵性。又如耐压指挥室从强度或工艺观点来看,做成圆柱形的最为有利,但是为了不增加指挥室围壳的宽度(这里主要是考虑水下航行的阻力),而又能布置必要的设备(如潜望镜等),很多潜艇都做成椭圆形的。

1.2.3.4 生产技术水平的要求

结构应符合现代造船工艺的要求,同时也要考虑现有的工业生产水平和技术条件(人员的技术水平,生产设备的能力)。现代潜艇建造普遍采用“分段”或“总段”建造法。这种建造方法就是首先将船体结构建造成一个一个的分段,然后合拢成整体。这样不仅能有效地保证质量,而且能够大大地提高劳动生产率,缩短船台周期,达到高速优质生产的目的。为了适应分段(总段)建造的特点,每一分段的结构应该具有相对独立性,能维持(分段)结构自身的强度和刚度。此外,每一分段、总段的重量还要和船厂的起重、运输能力相适应。现代潜艇建造的另一特点是广泛地采用自动切割、自动焊接或半自动焊接,这就要求结构构件尺寸及排列上尽量做到整齐统一。

1.2.3.5 平时管理保养、设备装拆的要求

结构应充分考虑平时管理保养、设备装拆方便等因素。例如双舰体或一个半舰体潜艇的舷间空间宽度应不小于 800 mm ~ 1 200 mm。在主机舱、电机舱、蓄电池舱顶部耐压船体应设有可拆钢板,以便修理时吊放主机、电机、电池之用。

1.2.3.6 结构应力求经济节约

过去有一种误解,认为军用舰船可以不考虑经济性,因而设计或修理时,为了追求某些指标,常常不计成本,显然这是片面的。对于军用舰船,在保证一定的战术、战术指标下,力求经济节约同样是非常重要的,因为这样可将节省下来的材料、经费用于制造更多更新的舰船,这一点对于我国目前情况更有重要意义。当然,结构上的经济节约与前面所述的各项要求有密切联系。例如,当结构满足经度条件又使重量最轻,自然就能节约材料,当结构最大限度地满足自动化、半自动化产生要求,就能提高劳动生产率、缩短周期,因而也就节约了建造经费。

此外,结构还应注意美观大方,布置排列整齐,符合国家标准的有关规定。

综上所述,潜艇结构的优劣由多方面的因素构成,这些因素既有联系又有矛盾。因此,当认识某一结构的构造原理和构造方法时,应该有全面的观点,根据具体情况分析决定结构的主要因素,从而达到正确设计结构,正确理解结构的目的。

1.3 潜艇耐压结构的受力

潜艇在服役过程中,总要经历下水、停泊、航行、战斗以及检修等过程。在这些过程中,潜艇和船体会受到各种外力的作用,这些外力按其性质可分为两类:

(1)静力——船体以及各种设备的重力、静水压力和坞墩木反作用力等。

(2)动力——波浪冲击力、机械工作时由于不平衡而产生的惯性力,各种武备发射时的后坐力、炸弹冲击波压力及碰撞等。

在潜艇结构设计中,主要以静力作为强度计算的依据。至于动力强度只是在静力强度计算的基础上做某些校核,是辅助性的。因此,下面主要介绍潜艇受静力作用的一些特性。

1.3.1 潜艇在水面状态的受力情况

潜艇在水面状态包括静水中与波浪中两种情况,作用在船体上的力主要是重力与浮力。船体上全部重力与浮力总是大小相等、方向相反并作用在同一铅垂线上处于平衡。但由于重力和浮力在船长方向上分布不均匀,单独取出一段来看是不平衡的,或重力过剩,或浮力过剩,这些每一段局部的不平衡力就成为作用在船体上的载荷,把整个潜艇看作漂浮在水面的变断面空心梁,在上述载荷作用下产生剪力与弯矩。潜艇在波浪中重力分布不变,但由于波浪的影响引起浮力分布的改变,因而载荷、剪力与弯矩也相应改变。这种纵向总弯曲力矩的计算方法与水面舰船完全一样,这里不再详述。

1.3.2 潜艇在深水中的受力情况

潜艇下潜到深水中,作用在船体上的外力主要是深水静压力,压力分布沿高度方向成线性变化。我们可以将此压力分为两部分,如图 1-3 所示。这两部分分别是:

1.3.2.1 均布载荷 P_0

$$P_0 = \gamma h$$

式中 γ ——水的密度, MPa/m^3 ;

h ——自由水面到耐压船体轴线的距离,即下潜深度, m 。

1.3.2.2 三角形分布载荷 P_1

$$P_1 = \gamma R \cos \alpha$$

式中 R ——耐压船体半径, m ;

α ——决定耐压船体各点位置的角度,度。

因此,作用在耐压船体上的载荷为

$$P = P_0 + P_1 = \gamma h + \gamma R \cos \alpha$$

比较上述两部分载荷可知: P_1/P_0 的最大比值为 R/h , 对于现代潜艇耐压船体半径一般为 $2\text{ m} \sim 4\text{ m}$, 而下潜深度达 $200\text{ m} \sim 400\text{ m}$, R/h 在 1% 左右, 在强度计算中可以忽略 P_1 不计, 误差很小。

另外, 潜艇下潜时可能产生纵倾, 因此耐压艇体的各个断面所处的深度是不同的, 如图 1-4 所示。

$$h_x = h + \psi x$$

式中 x ——耐压船体艏艉端离船中的距离, 通常取耐压船体长度一半;

ψ ——可能产生的纵倾角, 一般为 $6^\circ \sim 9^\circ$ 。

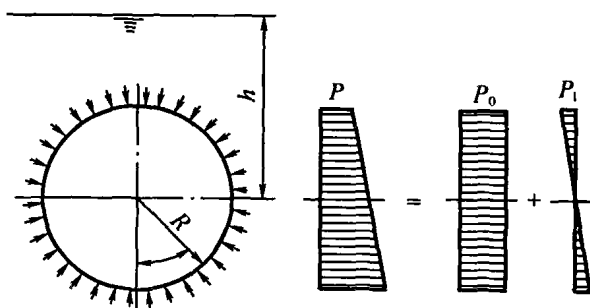


图 1-3 潜艇在水下受力

对于现代潜艇耐压船体长度一般为 50 m ~ 80 m, 因此 $\varphi x/h < 2\% \sim 3\%$, 同样, 为了计算方便忽略了纵倾的影响。

由此可见, 潜艇在深水中受力, 相当于耐压船体受到一个均匀载荷, 其值等于耐压船体轴线的船中处至自由水面高度的水柱压力。即

$$P = \gamma h$$

在潜艇强度计算中, 水的密度 γ 常用每米水柱压力 0.009 8 MPa/m 即 0.1 kgf/cm²·m 来表示, 而将上式改写为

$$P = 0.009\ 8h\ \text{MPa} = 0.1h\ \text{kgf/cm}^2$$

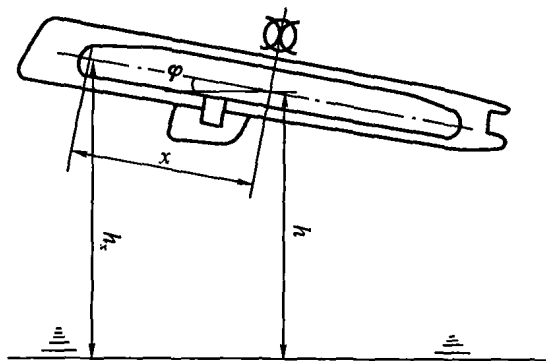


图 1-4 潜艇在深水中纵倾

1.3.3 决定耐压船体强度的主要载荷

由上面分析可以看出, 纵向总弯曲力矩的作用与深水压力的作用对船体破坏是不同的。前者力图使船体沿纵向破坏, 而后者将使船体沿横向破坏。但使用实践及计算表明, 如果耐压船体在深水压力作用下横向强度有保证, 那么, 在纵向总弯力矩作用下强度也一定有保证。下表列举了某艇在水面(波浪中)、深水中结构内部的最大应力。

由下表可以看出, 纵向弯曲应力比周向应力小得多。此外, 潜艇停放在坞中, 由于各段船体的重力与墩木反力不平衡, 船体也受到纵向总弯曲力矩, 只要墩木布置适当, 船体强度也能得到保证。

表 某艇结构中最大应力

工作状态	纵向应力 σ_1 MPa(kgf/cm ²)	周向应力 σ_2 MPa(kgf/cm ²)	壳板失稳理论临界力 σ_E MPa(kgf/cm ²)
深水中	168 (1 710)	336 (3 420)	$\sigma_E = \frac{P_E R}{t} = 608$ (620)
水面波浪中 (中拱)	74.1 (755)		$\sigma_E = \frac{Et}{R \sqrt{3(1-\mu^2)}} = 1\ 050$ (10 700)
水面波浪中 (中垂)	11.1 (113)		$\sigma_E = \frac{Et}{R \sqrt{3(1-\mu^2)}} = 1\ 050$ (10 700)

因此, 潜艇在设计计算中都以深水压力作为强度计算的依据。

1.4 耐压船体计算载荷的确定

1.4.1 计算深度、计算载荷的概念

在潜艇设计时,按潜艇的战术技术要求通常规定了潜艇的工作深度和极限深度。

工作深度是指潜艇在正常使用过程中所能达到的最大深度。在此深度上,潜艇能作任意次的、长期的停留而不引起耐压船体永久变形。此深度与极限深度的关系为

$$h_0 = (0.8 \sim 0.9) h_c$$

极限深度是指潜艇下潜的最大深度。在此深度上,潜艇只能作短时的、有限次的(在整个服役中一般不超过 300 ~ 500 次)停留而不引起耐压船体永久变形。潜艇下潜至极限深度通常为了回避攻击或由于操纵偏差造成,因此,相应于极限深度的静水压力是偶然的。

潜艇在服役过程中既然允许它有限次的在极限深度上作短时停留,说明极限深度不是它的破坏深度。这是因为在设计计算耐压船体强度时考虑了一定的强度储备,以比极限深度更大的深度作为计算依据,此深度称为计算深度。相应于计算深度下的静水压力称为计算载荷。结构强度储备通常用安全系数 K 来表示,因此计算深度与极限深度的关系为

$$h_c = K h_0$$

图 1-5 表示了工作深度、极限深度与计算深度之间的关系。

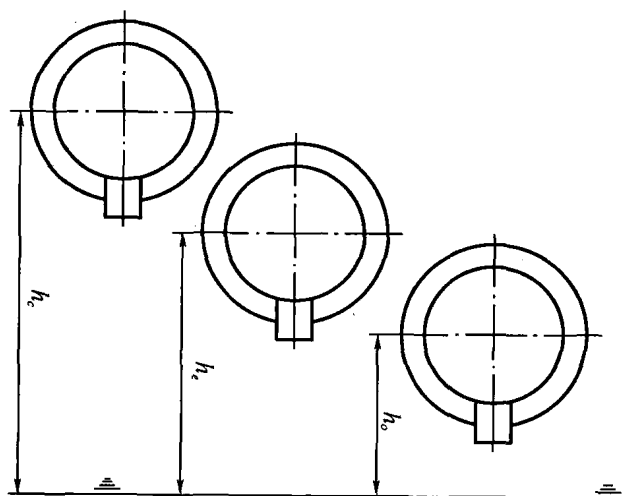


图 1-5 潜艇的潜水深度

1.4.2 结构强度计算中对安全系数处理的基本方式

结构强度储备通常用安全系数来表示。根据结构破坏的不同形式及工作特点、安全系数的处理有不同的方式。

1.4.2.1 许用应力法

这种方法是将安全系数考虑在许用应力中。用这种方式进行强度计算时,首先根据外

载荷计算出结构中最大应力 $\sigma_{\max}$, 根据材料的危险应力 (一般取 σ_s), 以适当的安全系数确定材料的许用应力 $[\sigma]$, 按 $\sigma_{\max} < [\sigma]$ 条件进行检验。

这种方法只有当结构中的应力与载荷成线性关系时, 结构才具有所要求的强度储备。如果结构中应力的增加比载荷增加得快, 那么按许用应力法计算的结构将导致实际强度储备不足。如图 1-6 所示, 当应力与载荷成线性关系时 (直线 OA), 名义强度储备为

$$K_0 = \frac{\sigma_0}{\sigma_j}$$

式中 σ_0 ——危险应力, MPa;

σ_j ——计算应力, MPa。

实际强度储备为

$$K_1 = \frac{P_0}{P_j}$$

式中 P_0 ——破坏载荷, MPa;

P_j ——计算载荷, MPa。

由图中可以看出:

因为

$$\frac{\overline{OD}}{\overline{OC}} = \frac{\overline{ON}}{\overline{OL}}$$

所以

$$\frac{\sigma_0}{\sigma_j} = \frac{P_0}{P_j}$$

即

$$K_0 = K_1$$

因此, 结构的名义强度储备为实际强度储备。当应力与载荷不成线性关系时 (曲线 OB), 由图 1-6 中可以看出:

$$K_0 = \frac{\sigma_0}{\sigma_j} = \frac{\overline{OD}}{\overline{OC}}$$

$$K_1 = \frac{P_0}{P_j} = \frac{\overline{OM}}{\overline{OK}}$$

因为

$$\frac{\overline{OD}}{\overline{OC}} > \frac{\overline{OM}}{\overline{OK}}$$

所以

$$K_0 > K_1$$

即实际强度储备小于名义强度储备。

1.4.2.2 危险应力法

这种方法将安全系数考虑在载荷中。用这种方法进行强度计算时, 首先根据作用于结构上的载荷, 以适当的安全系数确定计算载荷。按计算载荷计算出结构中的最大应力小于材料的危险应力作为检验标准。

按这种方法计算的结构, 不论应力与载荷是否成线性关系, 都可以保证结构具有所需要

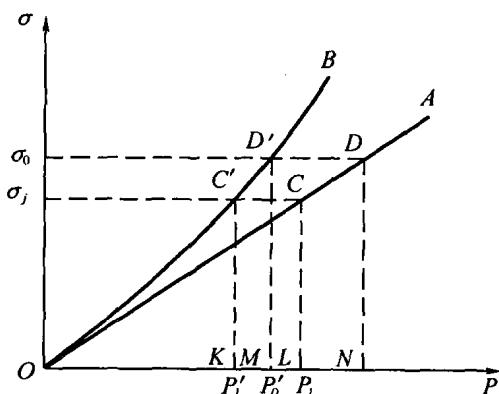


图 1-6 结构中应力与载荷的关系

的强度储备。

1.4.2.3 混合法

潜艇耐压船体强度计算中安全系数处理的一般原则:潜艇耐压船体结构主要承受深水压力。在正常工作条件下,其最大载荷 $P_e = \gamma h_e$ 。在事故状态下,潜艇可能超过极限深度甚至接近破坏深度,而耐压船体结构强度基本上是以壳板稳定条件作为控制破坏的基础,其应力的增加远比载荷增加快,因此,主要的是将安全系数计入到载荷中。但是,由于结构中各个构件在抵抗外力中所起的作用不同,结构的重要性及各部位应力的性质不同,因此,目前潜艇强度计算中,一部分强度储备统一考虑在载荷中,一部分强度储备分别考虑在应力中,并根据不同的结构制定不同的许用应力标准。统一考虑在载荷中的强度储备即为安全系数 K 。

1.4.3 构成安全系数 K 的一些主要因素

安全系数 K 的确定,要考虑可能影响结构强度的各种因素。主要的有下列几方面:

1.4.3.1 材料方面的影响

材料方面的影响通常包括:

(1)材料几何尺寸的偏差主要是指轧钢厂提供的船用钢材,按国家标准允许材料实际的几何尺寸与名义尺寸之间有一定的偏差。目前潜艇计算规则中,计算厚度一般按最大负偏差考虑(通常将名义厚度减去 $0.75\text{ mm} \sim 1.0\text{ mm}$),因此,在安全系数中不再考虑由材料几何偏差引起的影响。

(2)机械性能方面影响通常包括弹性模数 E 、泊松比 μ 、屈服点 σ_s 及屈服比 σ_s/σ_b 等。在强度计算中, σ_s 、 E 一般都取材料试验的最低值,因此是偏于安全的。但随着潜艇下潜深度增大,高强度钢材的采用, σ_s/σ_b 要提高,这对结构的抗爆能力及低周疲劳是不利的,因此在安全系数中应该考虑这些不利因素。

1.4.3.2 所采用设计计算公式的可靠性

在《潜艇强度计算规则》中所采用的强度和稳定性计算公式,一般都是经过大量的实物和模型试验证明是可靠的,因此安全系数中一般可以不考虑这方面的影响。

1.4.3.3 生产建造方面的影响

生产建造方面的影响因素是很复杂的,但主要的是结构的残余应力和几何形状的偏差。

(1)残余应力的影响从材料加工到船体装配焊接,在结构内部不可避免将会产生残余应力。残余应力对结构强度的影响,目前还不能用计算方法来确定。但是由于强度计算公式都是建立在实物和模型试验的基础上,而试验的模型本身亦具有残余应力,因此这种影响一定程度上可以认为在计算公式中已经作了考虑。

(2)几何形状偏差的影响是指潜艇在建造过程中不可避免地会产生各种偏差(壳体与肋骨不圆度,板壁差异,肋骨位置偏差,肋骨腹板不垂直度及焊缝的局部变形等)。其中壳体与肋骨的初挠度对耐压船体的强度和稳定性有明显的影响。根据对实艇建造实测统计分析,肋骨初挠度一般不大于 $0.25R\%$,壳体初挠度一般不大于 0.2 t 。在此范围内的偏差对强度和稳定性的影响,已在计算公式中考虑了几何非线性的修正。至于个别超过上述范围的偏差则由超差加强给予弥补。

1.4.3.4 管理使用方面的影响

(1)潜艇在服役过程中,由于种种原因常有失事超深的可能。现代潜艇水下航速增大,对高速航行的潜艇因失操应急挽回而引起的附加深度必将增大,根据对某些工况的计算,认

为取极限下潜深度的 25% ~ 35% 比较合适。

(2) 潜艇在使用过程中, 由于各种原因耐压船体受到腐蚀。耐压船体腐蚀量的大小与材料的性能、海区的自然条件及平时的维修保养有关。根据统计, 潜艇耐压船体壳体腐蚀量一般为 $(0.1 \sim 0.125)$ mm/年, 而一般潜艇服役期限为 20 年 ~ 30 年, 因此在服役期中可能出现蚀量。为了保证潜艇在一定的服役期内极限下潜度保持不变, 有的在强度计算的基础上把壳体厚度额外增厚几毫米, 也有的把腐蚀对强度的影响计入到安全系数中。由于腐蚀量只与材料的腐蚀率及服役期有关, 因此对于极限深度大、耐压船体尺寸大的潜艇, 由于壳体厚度大, 考虑腐蚀的安全系数时相对可以取小些, 反之则大些。

由上述分析可以看出, 安全系数的确定是很复杂的, 主要是考虑潜艇的失事超深及腐蚀的影响。当然也要考虑由于实艇与模型试验差别而又不能通过理论分析所能估计的一些不利因素。因此, 安全系数的确定除了根据试验、分析的结果, 还必须根据以往建造潜艇的使用实践经验来综合确定。对于现代潜艇, 安全系数 $K = 1.4 \sim 1.6$, 因此潜艇的计算载荷为

$$P_c = (1.4 \sim 1.6) P_e$$



第 2 章

耐压船体的应力计算

2.1 耐压船体结构概述

潜艇为了能在深水中航行、战斗,必须设有坚固的船体以承受巨大的深水压力。耐压船体的主要功能就在于承受深水压力,保证舱室内部人员和各种设备的正常工作。同时组成一个水密空间,给潜艇提供 80% ~ 85% 的固定浮容积,为潜艇在水下维持重力等于浮力的平衡条件提供基础。为了保证耐压船体具有上述功能,就应该合理地选择其结构型式,使耐压船体具有足够的强度和稳定性。

2.1.1 耐压船体横剖面形状

历史上耐压船体横剖面形状多种多样,曾出现过圆形、椭圆形、矩形以及圆柱截剖体等形状。但从抵抗深水压力的观点来看,以圆形最为有利。因此圆形剖面的耐压船体从一开始就被广泛地采用,并且一直沿用到今天。圆形剖面的耐压船体,其受力之所以最好,是因为它在均匀外压作用下只产生均匀收缩变形,这样壳体内部只有均匀压缩应力而无弯曲应力,材料能得到充分利用,从而能做到结构重量轻、材料省。椭圆形、矩形等其它横剖面形状,由于它们不是一个纯圆,在深水压力作用下除了产生压缩应力外,还有弯曲应力,这样为了达到同样的强度,势必要增大结构的尺寸,增大船体重量。现代潜艇下潜深度日益加大,因此绝大多数潜艇的耐压船体横剖面采用圆形。但有时为了满足舱室设备布置的需要,也有采用圆形组合体“8”字形横剖面结构。其组合形状的类型是多种多样的。“8”字形结构在上下两圆相交处要承受巨大的侧向力,为了保证其强度和紧密性,相交处必须有专门的加强措施来保障,这给施工装配、焊接带来许多不便。此外,“8”字形的存在也影响了潜艇外形的光顺。因此这种横剖面的结构型式只能用于耐压船体的某一局部区域(如蓄电池舱、导弹舱等)而不可能用于整个耐压船体上。目前在潜艇的设计制造中,很少采用这种横剖面的结构型式。

2.1.2 耐压船体纵剖面形状

耐压船体的纵剖面形状,一般有以下几种:

2.1.2.1 直线形

在耐压船体中部采用平行柱体,艏艉两部分采用截头圆锥形,如图 2-1(a)所示。现代潜艇由于下潜度增大,耐压船体壳体厚度增大,材料机械性能提高,再做成双曲率的壳体加工困难增大。特别是随着潜艇排水量增大双舰体结构形式被广泛地采用,因此目前广泛地采用“直线形”耐压船体。