

潜 艇 强 度

许 辑 平 等 编

国 防 工 业 出 版 社

潜 艇 强 度

许 辑 平 等 编

国防工业出版社

内 容 简 介

本书主要叙述潜艇的耐压艇体(环肋圆柱壳、圆锥壳和锥-柱结合壳),各种舱壁、耐压液舱和耐压指挥室的应力及稳定性计算,并介绍了耐压结构的开孔加强计算和初始缺陷的超差加强计算。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,不仅可以了解潜艇各种耐压结构的计算理论和方法,而且可应用图谱或使用电子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。

潜 艇 强 度

许 辑 平 等 编

*

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₁₆ 印张17¹/₄ 403千字

1980年12月第一版 1980年12月第一次印刷 印数: 0,001—1,700册

统一书号: 15034·2119 定价: 1.80元

前 言

本书系根据一九七九~一九八〇年全国造船专业统编教材会议通过的“潜艇强度”大纲编写的,可供高等院校潜艇设计与制造专业用。

“船舶结构力学”和“潜艇结构”是本课程的两门主要先修课程。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,并已熟悉潜艇的艇体结构。因此,本课程主要叙述潜艇结构采用的各类薄壳(环肋圆柱壳、圆锥壳、锥-柱结合壳、球面壳以及椭圆柱面壳等)和曲杆刚架的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。对某些难度较大,而又受学时限制不能在课堂详细讲授的内容,在书中用小号字排印,供有余力的学生在教师指导下选择自学。

遵照教育部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,但鉴于目前国际单位制尚未普及,故在本书中也附上工程单位制计算结果,以供对照。

本书由上海交通大学、华中工学院、海军工程学院和哈尔滨船舶工程学院合编。具体分工是:第一章、第八章由海军工程学院贺小型编写;第二章、第三章由哈尔滨船舶工程学院许辑平编写;第四章、第七章由上海交大李龙渊编写;第五章、第六章由华中工学院骆东平、曾广武编写。初稿完成后由许辑平作了统稿,并经海军工程学院郭日修审核。此外,在编写过程中,701研究所石亮明、719研究所梁子华、大连工学院邓可顺、镇江船舶学院王广戈和海军工程学院陈巧观等同志也对本书提出了许多宝贵意见,在此表示感谢。

由于我们的水平有限,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

主要符号	1	§ 4-3 旋转壳的有限元法	131
第一章 作用在潜艇耐压艇体上的外力	3	§ 4-4 内部球面舱壁的应力计算	145
§ 1-1 潜艇艇体的受力	3	§ 4-5 端部球面舱壁的应力计算	148
§ 1-2 耐压艇体计算载荷的确定	6	§ 4-6 球面舱壁的稳定性	151
第二章 耐压艇体的应力计算	10	第五章 耐压液舱的应力和	
§ 2-1 概述	10	稳定性计算	155
§ 2-2 圆柱壳的弯曲微分方程及其通解	11	§ 5-1 圆环在均匀外压下的静力特性	155
§ 2-3 一般环肋圆柱壳的应力计算	15	§ 5-2 耐压液舱横向构架计算	162
§ 2-4 带有中间支骨的圆柱壳应力计算	22	§ 5-3 耐压液舱壳体应力和稳定性计算	177
§ 2-5 无限长弹性基础梁的解		§ 5-4 实例计算	189
在潜艇结构计算中的应用	27	第六章 椭圆形耐压指挥室的强度和	
§ 2-6 承受轴对称载荷的旋转壳	33	稳定性计算	199
§ 2-7 环肋圆锥壳和锥-柱结合壳的		§ 6-1 耐压指挥室的结构分析	199
应力计算	45	§ 6-2 椭圆形耐压指挥室的应力计算	201
第三章 耐压艇体的稳定性计算	64	§ 6-3 椭圆形耐压指挥室的稳定性计算	214
§ 3-1 概述	64	§ 6-4 实例计算	221
§ 3-2 一般环肋圆柱壳在舱段内的		第七章 潜艇结构开孔加强计算	226
总稳定性	66	§ 7-1 平板上开孔的强度计算	226
§ 3-3 耐压圆柱壳的各类稳定性公式		§ 7-2 球面舱壁上开孔加强计算	227
及其简化	76	§ 7-3 环肋圆柱壳上开孔加强计算	229
§ 3-4 圆锥壳的各类稳定性公式	83	§ 7-4 其它部分的开口加强计算	237
§ 3-5 环肋锥-柱结合壳的稳定性概述	91	第八章 潜艇耐压艇体初始缺陷的	
§ 3-6 耐压壳理论临界压力的修正	98	超差加强	240
§ 3-7 实例计算	101	§ 8-1 耐压艇体壳体初挠度的超差加强	240
第四章 潜艇舱壁的应力和		§ 8-2 肋骨初挠度的超差加强	248
稳定性计算	113	§ 8-3 潜艇内部球面舱壁板的超差加强	262
§ 4-1 潜艇舱壁的作用与分类	113	§ 8-4 耐压指挥室初始缺陷的超差加强	268
§ 4-2 平面舱壁的计算	113		

主要符号

x, y, z	直角坐标
θ, φ	旋转面的曲线坐标
x, φ	圆柱或椭圆柱面的曲线坐标
s, φ	圆锥面的曲线坐标
E	材料的弹性模数
E_t, E_s	分别为切线模数与割线模数
μ	材料的泊松比
σ_s	材料的屈服点
p	均匀外压力
q	单位长度的分布载荷
P	集中载荷
t	板、壳的厚度
D	板、壳的抗弯刚度
R	柱壳、球壳半径或锥壳的平行圆半径
ρ_1, ρ_2	旋转壳主曲率半径
a, b	椭圆的长半轴、短半轴或矩形平板的长边、短边
L	舱段长度或平面舱壁水平桁材的跨长
l	肋骨间距或平面舱壁垂直加强材的跨长
F	肋骨剖面积
I	肋骨或舱壁加强材计及带板的惯性矩
W	肋骨或加强材的剖面模数
w	肋骨或加强材的相当剪切面积
I_0	型材自身惯性矩
y_0	型材的中和轴到壳板接触面的距离
u, v, w	沿 $x(s, \theta), y(\varphi), z$ 轴的位移分量
σ_1, σ_2	沿 $x(s, \theta), y(\varphi)$ 轴的正应力
$\varepsilon_1, \varepsilon_2$	沿 $x(s, \theta), y(\varphi)$ 轴的线应变
τ	剪应力
γ	剪应变, 或圆锥壳的半锥角, 或水的比重
χ_1, χ_2	壳母向(经向)、周向(纬向)的曲率变化
χ_{12}	扭率
δ	转角
T_1, T_2	壳横剖面(纬线剖面)、纵剖面(经线剖面)上的中面力

M_1 、 M_2	壳横剖面（纬线剖面）、纵剖面（经线剖面）上的弯矩
M_{12} 、 M_{21}	扭矩
N_1 、 N_2	壳横剖面、纵剖面上的剪力
N_{12} 、 N_{21}	壳中面内的剪力
U	外力所作的功
V	应变能
Π	总位能

由于全书符号太多，以上所列仅主要代表符号，还有许多没有列入，以后在各章内再另行介绍。

第一章 作用在潜艇耐压艇体上的外力

§ 1-1 潜艇艇体的受力

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,潜艇艇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——艇体及各种设备的重力、静水压力和坞墩木反力等。

(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座力、爆炸冲击波压力及碰撞等。

在潜艇结构设计中,主要以静力作用作为结构强度计算的依据。至于动力强度只是在静力强度计算的基础上作某些校核。因此,下面主要介绍潜艇艇体受静力作用的一些特点。

一、潜艇在水面状态的受力情况

潜艇在水面包括静水与波浪中两种情况。虽然这两种情况艇体受力的大小不同,但力的作用特点却是相同的。

当潜艇漂浮于静水中时,作用于艇体上的力有两种:即重力与浮力。重力由艇体的重量、机械、武备、装置系统、燃油和供给品等重量组成。其分布沿艇长不等如图 1-1(a) 所示。浮力即静水压力的垂直分力,其分布如图 1-1(b) 所示。

潜艇在静水中处于平衡状态时,艇的全部重力与浮力的合力必然是大小相等,方向相反并作用在同一铅垂线上。但是,这种平衡仅仅对整个潜艇而言才是正确的。如果我们在船长方向上单独取出一段来看,由于重力和浮力在艇长方向上分布不一致,这种平衡就不存在了。因此,在艇长方向上,有些部分可能重力大于浮力,有的则相反。这种过剩的重力或浮力就成为作用于艇体上的载荷 $q(x)$ 。

潜艇在水面状态时,可以把整个潜艇艇体看作自由漂浮于水面的变断面空心梁,在载荷 $q(x)$ 作用下,作用于艇体上各个断面的剪力、弯矩为:

$$\left. \begin{aligned} N(x) &= \int_0^x q(x) dx \\ M(x) &= \int_0^x \int_0^x q(x) dx^2 \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

显然,剪力、弯矩的大小决定于载荷的分布。潜艇在波浪中,虽然重力分布不变,但由于波浪的影响而引起浮力分布改变,因而载荷改变,从而剪力、弯矩亦改变。由计算表明,若潜艇处于波浪中,当波长(λ)接近于艇长时,所产生的剪力、弯矩最大。图 1-1(c) 表示某艇在波浪中的弯矩分布。

同样,当潜艇停放在坞内时,由于各段艇体的重力与墩木反力不等,艇体亦受到剪力

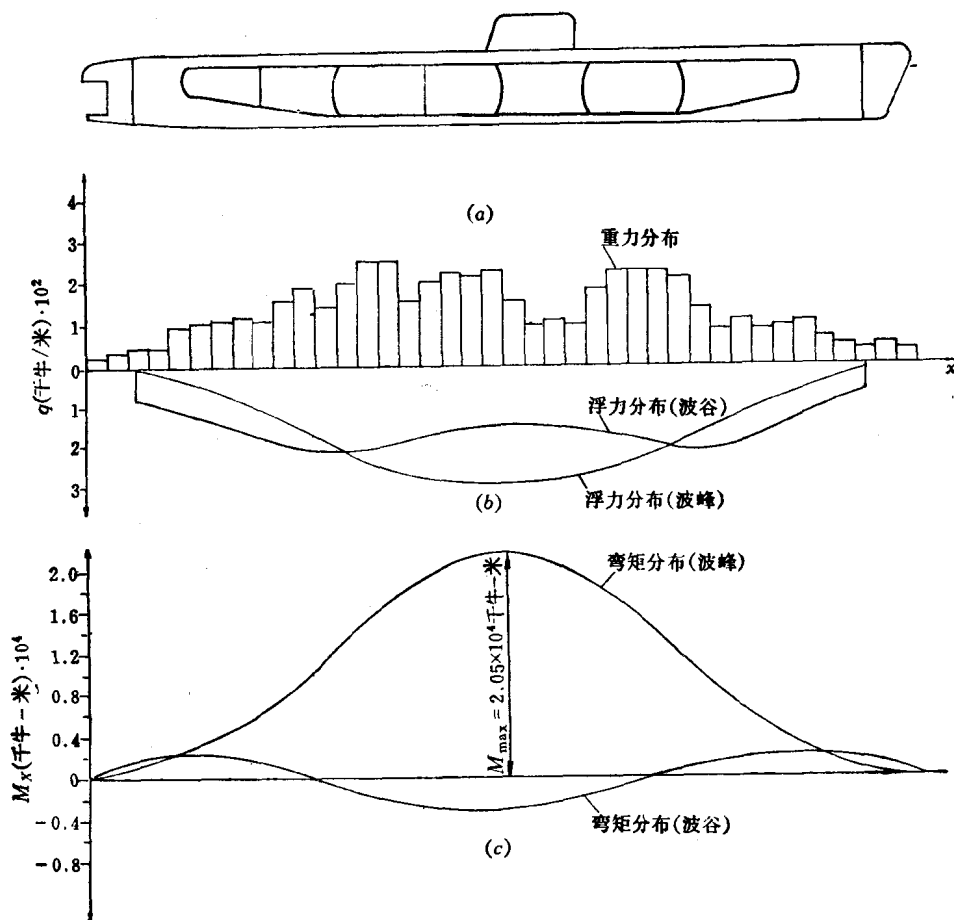


图 1-1

和纵向总弯曲力矩的作用。

纵向总弯曲力矩一般认为只由耐压艇体来承受而忽略非耐压艇体纵向构件的作用，显然这是偏于安全的。因此，耐压艇体上的最大应力为：

$$\sigma_{\max} = \pm \frac{M_{\max}}{W} \quad (1-2)$$

式中 $W = \pi R^2 t$ —— 耐压艇体剖面模数；

R —— 耐压艇体半径；

t —— 耐压艇体壳体厚度。

二、潜艇在深水中的受力情况

潜艇处于水下状态时，作用在艇体上的外力是深水静压力，其次是由于各段上重力和浮力不一致而产生的剪力、弯矩。然而这些剪力和弯矩所决定的应力相对于由深水压力所决定的应力是很小的，因此可以忽略不计。

静水压力是由耐压艇体来承受的。从耐压艇体横截面来看，压力分布沿高度方向成线性变化，其作用压力可分为二部分，如图 1-2 所示。

(1) 均布载荷 p_0 :

$$p_0 = \gamma h \quad (1-3a)$$

式中 γ ——水的重度, 在潜艇强度计算中通常取 $\gamma = 9.8$ 千牛/米³;

h ——自由水面至耐压艇体轴线距离, 即下潜深度, 单位为米。

(2) 按三角形分布的载荷 p_1 :

$$p_1 = \gamma R \cos \alpha \quad (1-3b)$$

式中

R ——耐压艇体半径 (米);

α ——决定于耐压艇体各点位置的角度。

因此, 作用在耐压艇体上的载荷为:

$$p = p_0 + p_1 = \gamma h + \gamma R \cos \alpha \quad (1-4)$$

比较上述二部分载荷可以看出, p_1/p_0

的最大比值为 R/h , 对于现代潜艇, 耐压艇体半径一般为 2~4 米, 而极限深度一般为 200~400 米, R/h 比值一般 $< 2\%$,

因此, 为了计算方便通常忽略 p_1 的影响。

另外, 考虑到潜艇下潜时可能产生纵倾, 因此从纵向来看耐压艇体各断面处的深度是不同的, 如图 1-3 所示, 其表达式为:

$$h_x = h + \psi x \quad (1-5)$$

式中 x ——耐压艇体艏、艉端离船舯的距离, 通常取耐压艇体长度的一半;

ψ ——可能产生的纵倾角, 一般为 $6^\circ \sim 9^\circ$, 对于现代潜艇耐压艇体长度一般为 50~80 米, 因此 $\psi x/h < 2 \sim 3\%$, 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, 相当于耐压艇体受到一个均匀载荷, 其值等于耐压艇体轴线至自由水面高度的水柱压力, 即

$$p = \gamma h = 0.0098 h \text{ 兆帕 (} 0.1 h \text{ 千克力/厘米}^2 \text{)} \quad (1-6)$$

在此载荷作用下, 耐压艇体壳板周向和纵向的膜应力近似的为:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_2 &\approx \frac{pR}{t} \\ \sigma_1 &\approx \frac{pR}{2t} \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

三、决定耐压艇体强度的主要载荷

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艇体破坏是不同的, 前者力图使艇体沿纵向破坏, 而后者将使艇体沿横向破坏。但使用实践及计算表明, 如果

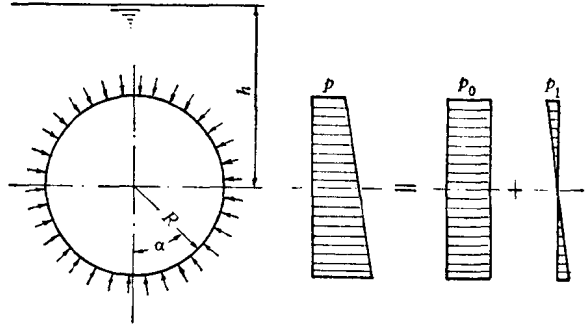


图 1-2

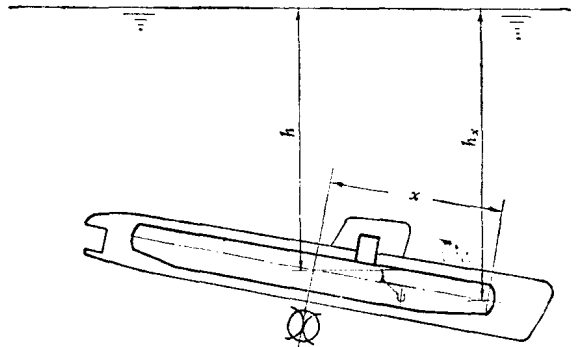


图 1-3

耐压艇体在深水压力作用下横向强度有保证, 那么, 在纵向总弯曲力矩作用下强度也一定有保证。表1-1列举了某艇在水面(波浪中)、深水中结构内部的最大应力。

表1-1 某艇结构中最大应力

工作状态	纵向应力 σ_1 兆帕 (千克力/厘米 ²)	周向应力 σ_2 兆帕 (千克力/厘米 ²)	壳体失稳理论临界应力 σ_e 兆帕 (千克力/厘米 ²)
深水中	168 (1710)	336 (3420)	$\sigma_e = \frac{p_E R}{t} = 608$ (6200)
水面波浪中 (舢拱)	74.1 (755)		$\sigma_e = \frac{Et}{R\sqrt{3(1-\mu^2)}} = 1050$ (10700)
水面波浪中 (舢垂)	11.1 (113)		$\sigma_e = \frac{Et}{R\sqrt{3(1-\mu^2)}} = 1050$ (10700)

由上表可以看出, 纵向弯曲应力比周向应力小的多。因此, 潜艇设计中都以深水压力作为耐压艇体强度计算的依据。

§ 1-2 耐压艇体计算载荷的确定

一、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, 潜艇能作任意的、长期的停留而不引起耐压艇体永久变形。此深度通常为极限深度的0.8~0.9倍。

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)停留而不引起耐压艇体永久变形。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艇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

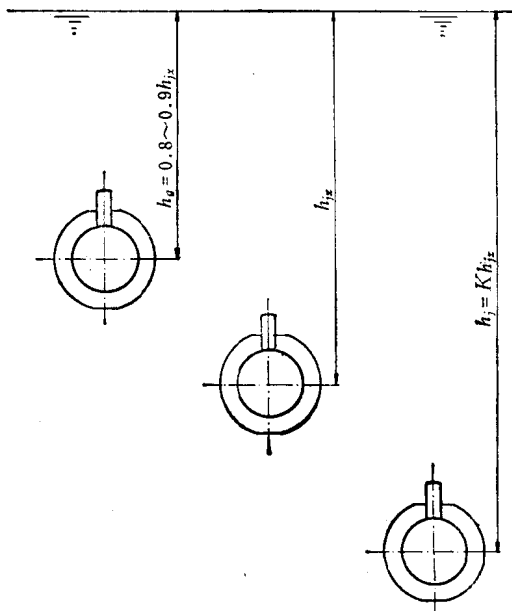


图 1-4

系为:

$$h_j = K h_{jx} \quad (1-8)$$

图 1-4 表示了工作深度、极限深度与计算深度之间的关系。

二、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, 如:

(1) 许用应力法——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 $[\sigma]$, 并按 $\sigma_{\max} < [\sigma]$ 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快, 那末按许用应力法计算的结果将导致实际强度

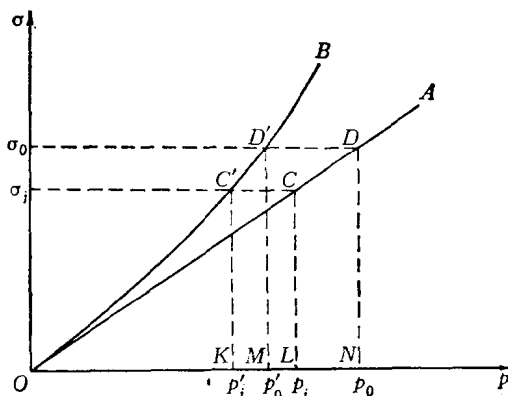


图 1-5

储备之不足。如图 1-5 所示。当应力与载荷成线性关系时 (直线 OA), 名义强度储备为:

$$K_0 = \frac{\sigma_0}{\sigma_j} \quad (1-9)$$

式中 σ_0 ——危险应力;

σ_j ——计算应力。

实际强度储备为:

$$K_1 = \frac{p_0}{p_j} \quad (1-10)$$

式中 p_0 ——破坏载荷;

p_j ——计算载荷。

由图中可以看出:

$$\frac{\overline{OD}}{\overline{OC}} = \frac{\overline{ON}}{\overline{OL}} \quad (1-11)$$

$$\therefore K_0 = \frac{\sigma_0}{\sigma_j} = K_1 = \frac{p_0}{p_j} \quad (1-12)$$

因此, 名义强度储备即为结构的实际强度储备。

当应力与载荷不成线性关系时 (曲线 OB) 由图 1-5 中可以看出:

$$K_0 = \frac{\sigma_0}{\sigma_j} = \frac{\overline{OD}}{\overline{OC}} > K_1 = \frac{p'_0}{p'_j} = \frac{\overline{OM}}{\overline{OK}} \quad (1-13)$$

即实际强度储备小于名义强度储备。

(2) 危险应力法——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的强度储备。

(3) 潜艇耐压艇体强度计算中安全系数处理的一般原则: 潜艇耐压艇体结构主要承受深水压力。在正常工作条件下,其最大载荷 $p_{jz} = \gamma h_{jz}$ 。在事故状态下,潜艇可能超过极限深度甚至接近破坏深度。而耐压艇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 。

三、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. 材料方面的影响

材料方面的影响通常包括二方面:

(1) 材料几何尺寸的偏差。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 0.75~1.0 毫米),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) 机械性能方面的影响,通常包括弹性模数 E 、泊桑比 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。

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。

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,潜艇在建造过程中不可避免的会产生各种偏差(壳板与肋骨不圆度,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)。其中壳板与肋骨的初挠度对耐压艇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 $0.25R\%$,壳板初挠度一般不大于 $0.2t$ 。在此范围内的偏差对强度和稳定的影响,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。

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) 艇体腐蚀的影响。潜艇在使用过程中, 由于各种原因耐压艇体受到腐蚀。耐压艇体腐蚀大小与材料的性能、海区的自然条件及平时的维修保养有关。根据统计, 潜艇耐压艇体壳板腐蚀量一般为0.1~0.125毫米/年, 一般潜艇服役期限20~30年, 因此在服役期中可能出现2~3毫米的腐蚀量。为了保证潜艇在一定的服役期内极限下潜深度保持不变, 有的在强度计算的基础上把壳板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限有关, 因此对于极限深度大、耐压艇体尺寸大的潜艇, 由于壳板厚度大, 考虑腐蚀的安全系数时相对可以取小些, 反之则应取大些。

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到的一些不利因素。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 $K=1.4\sim1.6$, 因此潜艇的计算载荷为:

$$p_i = (1.4 \sim 1.6) p_{ix} \quad (1-14)$$

第二章 耐压艇体的应力计算

§ 2-1 概 述

由于潜艇耐压艇体的主要受力状态是承受非常大的深水静压力, 这一受力特性决定了耐压艇体采用横剖面为圆形的薄壳结构。这时, 在壳板内主要产生均匀膜应力, 材料得到充分利用。虽然圆形剖面对内部布置不利, 但鉴于现代潜艇下潜深度很大, 其它形状的剖面, 如过去曾采用过的椭圆形剖面等等都是不合适的。有时为了布置上的需要, 在耐压艇体局部长度上采用“8”字形剖面, 但它的受力特性与圆形剖面是相同的。

耐压艇体的纵剖面形状, 一般有以下几种:

(1) 直线形——在耐压艇体中部采用平行柱体, 艏艉两端部分采用截头圆锥形。如图 2-1(a) 所示。

(2) 直线局部扩大形——在某些情况下, 为了布置上的需要, 在圆柱体的局部长度上, 采用扩大圆柱形或“8”字形。另外在艏艉部, 还可能采用不同锥度的圆锥形组合。如图 2-1(b) 所示。

(3) 光顺曲线形——在一些单艇体潜艇上, 为了改善航海性能, 常常采用更接近流线型的光顺曲线形状, 如图 2-1(c) 所示为几种艇体纵剖面形状。但对所研究的某一舱段, 可以近似地按圆柱形或圆锥形壳计算。

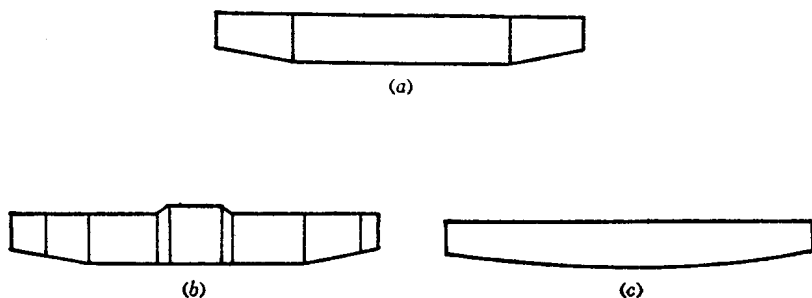


图 2-1

由于深水压力是外压力, 为了有效地提高耐压艇体在外水压力作用下的稳定性, 还必须在壳板上设置一系列横向加强筋。这些加强筋按其大小和作用的不同, 分别称为耐压艇体的肋骨、框架肋骨或中间支骨。

从结构力学的观点来看, 潜艇耐压艇体中部是以一系列横向加强筋加强的圆柱壳, 其结构型式一般有以下两种:

(1) 在横舱壁之间设置一系列等间距同刚度的肋骨, 如图 2-2(a) 所示。

(2) 在横舱壁之间除设置一系列等间距同刚度的肋骨外, 在每一肋骨跨度中间还安置一根剖面较小的中间支骨, 如图 2-2(b) 所示。

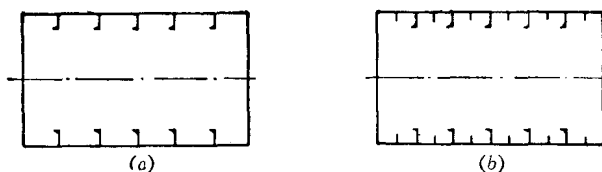


图 2-2

由上所述, 潜艇耐压艇体中部的强度计算, 可以归结为这两种结构型式的圆柱壳在均匀外压力作用下的应力计算和稳定性计算。耐压艇体的艏艉部, 则是同类结构型式的圆锥壳和锥-柱结合壳的计算。下面, 我们首先讨论这些壳体的应力计算, 并在第三章中讨论它们的稳定性计算。

§ 2-2 圆柱壳的弯曲微分方程及其通解

一、基本概念和假设

以两个曲面作为界限的物体, 且其曲面之间的距离远小于物体的其它尺寸者, 称为壳体。

与壳体的两个界限曲面等距离的各点轨迹所组成的曲面, 称为壳的中面。

如果壳体除了它的两个界限曲面以外, 不再有任何其它边界, 这样的壳体称为封闭壳。否则则称为非封闭壳。非封闭壳也可以看作是从封闭壳上截割下来的一部分。切割总是靠移动一根垂直于中面的直线来完成的, 因此非封闭壳的边界总是一个与壳体中面正交的曲面。

在壳体中面任意点作垂线, 垂线被两个界限曲面所截割的线段长度, 称为壳的厚度。一般说来壳厚度可以是变量, 但工程上应用最广泛的是等厚度壳。在下面的研究中, 除非特殊说明 (在圆柱壳, 球面壳边界上局部加厚, 在圆锥壳上分段改变厚度, 都加以注明), 一般都是等厚壳。

如果壳体厚度与其中面的曲率半径之比的最大值, 与 1 相比可以忽略不计时, 这种壳体称为薄壳。如果按通常工程计算容许的相对误差为 5%, 则所有厚度不超过中面曲率半径 $1/20$ 的壳体, 均归之于薄壳一类。在潜艇上所用的壳体, 其厚度一般不大于壳中面曲率半径的百分之一, 因而下面研究的壳体, 全部是薄壳。

薄壳理论和薄板理论一样, 是以克希霍夫的直法线假设作为基础的。这个假设可以归结为下列两点:

- (1) 变形前垂直于壳中面的直线, 在壳变形后仍保持为直线并垂直于挠曲了的中面。
- (2) 平行于中面的面积上的正应力与其它应力相比为微量, 可以忽略不计。

于是所研究薄壳的应力状态, 与结构力学中研究板弯曲的应力状态相似。

在研究薄壳的变形时, 采用曲线坐标系最为适宜。在这种坐标系中, 壳中面上任一点的位置, 仅须用两个坐标来确定。在圆柱壳的研究中, 我们采用圆柱坐标系, 如图 2-3 所示。

壳中面上任一点 M 的位置, 可以用两个坐标 x 和 φ 来表示。其中:

x ——所研究点与垂直于圆柱中心轴的某一给定平面之间的距离;

φ ——经过所研究点作直径面, 与给定直径面之间的夹角。

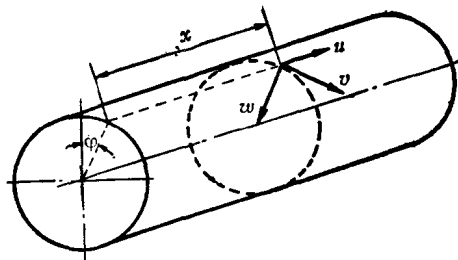


图 2-3

令坐标 φ 不变, 变化坐标 x , 在圆柱面(壳的中面)上划出的直线称为母线。如令坐标 x 不变, 变化坐标 φ , 则在圆柱面上划出的曲线(圆)称为子线。母线和子线就是圆柱坐标系的坐标线。

令符号 u 、 v 、 w 分别代表所研究点沿母线方向, 子线的切线方向以及中面法线方向上的位移, 并分别以向坐标 x 、 φ 增大的方向和向圆柱中心轴方向取为正号。

其它代表符号:

p ——作用在圆柱壳上的均匀水压力, 以外压力为正号, 单位兆帕。

R 、 t 、 l ——圆柱壳中面的曲率半径, 壳板厚度及肋骨间距, 单位厘米。

F 、 f ——肋骨与中间支骨的型材剖面积(不含带板), 单位厘米²。

I 、 i ——肋骨与中间支骨(计及带板)之惯性矩, 单位厘米⁴。

所采用的坐标系和代表符号, 同样也适用于第三章。

二、受力分析

当圆柱壳受均匀正压力作用时, 由于结构和载荷对称于中心轴, 在失稳之前, 壳的变形也必然对称于中心轴。即壳体仅产生均匀拉伸或均匀压缩(由壳上所受的力是内压力还是外压力而定)。壳上任意点的应力和位移与坐标 φ 无关。因此, 对圆柱壳变形的研究, 可以通过两个假想的直径面切出一条单位宽度($ds = Rd\varphi = 1$)的梁带来研究。整个壳体可以看作是许许多多梁带所组成, 所有梁带的应力和位移都是相同的, 仅须研究其中的任意一根梁带。

如图 2-4 所示, 作用于梁带上的力有:

(1) 作用在梁带外表面上的均匀正压力 p 。

(2) 由于均匀正压力作用在壳两端的横舱壁上而在梁带内引起纵向(母线方向)压缩力 T_1 。由平衡条件不难求得:

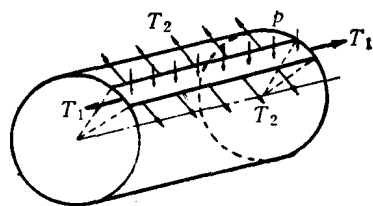
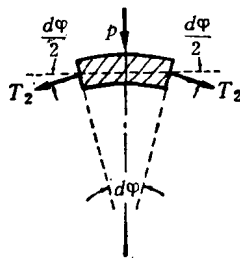


图 2-4

$$T_1 = -\frac{\pi R^2 p}{2\pi R} = -\frac{1}{2}pR \quad (a)$$

(3) 作用在梁带两侧边界上的力(即梁带之间的相互作用力) T_2 , 其合力的方向与法向外压力一致, 因此应该将这个合力也包括在所讨论的横载荷中去。由于单位宽度梁带经