

STRUCTURAL MECHANICS FOR SHIPS

船舶结构力学

STRUCTURAL MECHANICS FOR SHIPS

船舶结构力学

STRUCTURAL MEC

船舶结构力学

# 船舶结构

STRUCTURAL MECHANICS FOR SHIPS

# 力学

刘 琥 编

华南理工大学出版社

# 船舶结构

STRUCTURAL MECHANICS FOR SHIPS

# 力学

刘 琥 编

华南理工大学出版社

·广州·

## 内 容 提 要

本书主要阐述了船舶结构力学的一些基本问题。从分析对象上说,本书介绍了单跨梁及梁系、平面应力板、矩形薄板这些典型的船体结构。从分析方法上说,本书介绍了经典的结构解析方法:力法、位移法、矩阵法、能量法,同时针对现代结构工程中广泛应用的有限元法进行了介绍,最后对结构的稳定性进行了阐述。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

船舶结构力学/刘焯编.—广州:华南理工大学出版社,2010.6  
ISBN 978-7-5623-3265-7

I. ①船… II. ①刘… III. ①船舶-结构力学 IV. ①U661.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 083718 号

总 发 行: 华南理工大学出版社 (广州五山华南理工大学 17 号楼, 邮编 510640)  
营销部电话: 020-87113487 87110964 87111048 (传真)  
E-mail: scutc13@scut.edu.cn http://www.scutpress.com.cn

责任编辑: 黄丽谊

印 刷 者: 广东省农垦总局印刷厂

开 本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 18.5 字数: 462 千

版 次: 2010 年 6 月第 1 版 2010 年 6 月第 1 次印刷

印 数: 1~2000 册

定 价: 36.00 元 (含光盘)

版权所有 盗版必究

# 前 言

18年——上海交通大学出版社1991年出版的《船舶结构力学》是目前中国内地高校最权威、使用最为广泛的船舶结构力学教材。

7年——编者自2002年走上讲台，一直都是使用上海交通大学教材的复印本（2008年开始使用自编讲义），原因是上海交通大学出版社已经不再出版该教材，包括上海交通大学、武汉理工大学、哈尔滨工程大学也都是使用上海交通大学教材的复印本。无奈之下，编者只能从我校图书馆残存的几本原版教材里面找一些“批注”较少的借来复印。但每次复印都是对“古董”教材的一次摧残。记得一次某单位托编者借了一本原版书拿去复印培训教材。归还的时候，编者得知那本原版书遭遇了令人发指的“野蛮复印”——被一页页拆开、复印，之后再被装订起来……呜呼哀哉！所谓不破不立，痛心之余编者决心再也不能让21世纪的同学继续使用20世纪的教材，再也不能让珍贵的原版教材被扫描、被肢解。

2年——自己动手，丰衣足食！2007年金秋，华南理工大学船海系的几十名热心同学协助编者一起完成了本书的编纂任务。这些同学是：张薇、马增骥、包叶冬、杜晓雄、冯帮顺、胡武团、黄昌杰、黄东伟、柯泰勇、李国迎、李军、李玉芬、廖攸江、刘倬玮、陆俊超、邱剑峰、时胜召、王德山、王阳刚、吴南活、薛穗锋、严贵林、杨儒维、周振威。在此对他们表示感谢！

本书的出版曾一度遇到了资金和市场的双重挑战，华南理工大学出版社和教务处为本书提供了资助，在此对以上单位表示感谢！另外，还要特别感谢华南理工大学出版社的营销总监赖淑华老师的鼎力支持！感谢华南理工大学船海系的叶家玮、吴家鸣、孙树民老师提供的帮助。同时这里还要感谢家人的支持，他们一直是编者不懈努力、辛勤工作的动力源泉。

“我之所以比别人看得更远，是因为站在巨人的肩膀上。”这里引用牛顿的名言，主要是想感谢上海交通大学教材的编者——陈伯真、陈铁云两位前辈，本书的很多原理、方法乃至算例直接源自他们开创性的工作。

以下谈谈本书的特色：

(1) 对有限元理论及程序实现进行了更为详细的介绍。

有限元方法已经在结构工程中广泛应用。不论是在船厂、设计院、船级社，还是在其他结构工程领域，都可以发现很多工程师在钻研有限元理论和使用相关软件。虽然上海交通大学出版社1991年的教材已经引入了有限元理论，但有些方面介绍得不够详细和具体，本书作了补充和完善，并附上了一个平面刚架结构分析程序供读者参考。相信有兴趣和喜欢钻研的读者在电脑上实现这些程序后一定可以对有限元方法有一个更加深入的了解，并进一步唤起更高的学习热情。

(2) 对理论的推导深入浅出。

经典的结构力学分析方法有：力法、位移法、能量法等。但是这些理论因为公式推导

繁多，曾经让很多读者望而却步。在7年的教学当中，很多同学和编者谈了在学习过程中遇到的困惑，其中很多是带有普遍性的。另外，在教与学的过程中，编者也发现老教材的某些抽象概念其实还可以表达得更加清楚了。于是趁这次修书的机会，编者将这些年的教学成果和感想写进了教材。比如，第2章给出了骨材几何要素详细的计算方法和原理，还给出了以下初参数法公式的证明：

$$\int_0^x \int_0^x \cdots \int_0^x f(x) dx^n = \frac{1}{(n-1)!} \int_0^x f(\xi) (x-\xi)^{n-1} d\xi$$

第3章力法对“三弯矩法”和“五弯矩法”作了更为详细和透彻的阐述；第4章位移法用叠加原理阐释了公式：杆端力=位移力+固端力；第5章矩阵法附上了平面刚架结构分析程序；第8章薄板的弯曲理论对形函数、几何矩阵[B]的推导等进行了更为详细的分析。

#### (3) 内容编排更为科学。

本书与上海交通大学的教材相比，在编排和内容上也有了很大改变。①将“力法”提前到第3章进行介绍，这样“力法”就和第2章“单跨梁的弯曲理论”连贯起来了。如此编排主要是希望读者能够尽早地从单跨梁过渡到梁系的学习。同时，从知识的连贯性考虑，这样的安排也显得更为合理。②第4章位移法和第5章矩阵法将y轴正方向规定为竖直向上，同时在章节安排上也把这两章安排在一起。这主要是因为本书的矩阵法是基于位移法的，两者关系十分紧密。另外，本书矩阵法的程序是面向“大土木”的，从通用性的角度出发，把y轴正方向规定为竖直向上是被更广泛的工程和科研人员所接受的。所以，编者大胆将这两章的y轴的正方向进行了竖直向上的规定。③基于通用性的考虑，本书在第8章薄板的弯曲理论中也将z轴正方向规定为竖直向上。不过在介绍板条梁时还是保持了原有的正方向竖直向下的规定。④考虑到计算机技术的普及和计算手段的不断提高，第4章位移法不再介绍“弯矩分配法”。又因为能量法里面的虚力原理没有具体的物理意义，太过抽象，在第6章能量法里面不再介绍虚力原理。

#### (4) 符号运算软件的引入。

计算机高级程序设计语言（如FORTRAN、BASIC、C等）将人们从繁重的数值计算中解放出来。如果说高级程序设计语言的问世是一场伟大的革命，那么以Maple、Mathematica为代表的符号运算软件的出现则是另外一次更加伟大的革命，它们对人类思维的解放是更深层次的。符号运算软件可以帮助科研人员进行复杂理论公式的推导，比如对于 $1/2 + 1/3$ ，高级语言程序运算的结果为0.8333，而符号运算软件运算的结果为 $5/6$ 。符号运算软件甚至懂得微积分、多项式的因式分解等。本书的配套光盘就有很多使用Maple软件的算例。

关于符号运算软件更多的介绍，请读者从别的信息渠道（图书馆、网络等）进行了解。

修书是一件长期的事业，尽管本书的编写持续了整整两年，但其中一定还会有缺点和不足，如果广大读者能够不吝赐教，编者将不胜感激！

刘 斌

2009年6月28日于华南理工大学

E-mail: matmul@21cn.com

教学网站: www.huagong chuanhai.cn

# 目 录

第 1 章 绪 论 .....	( 1 )
1.1 船舶结构力学的研究对象和任务 .....	( 1 )
1.2 船舶结构力学中的“带板” .....	( 1 )
1.3 船舶结构力学的计算模型和研究方法 .....	( 2 )
第 2 章 单跨梁的弯曲理论 .....	( 8 )
2.1 梁的弯曲微分方程式及其解 .....	( 8 )
2.1.1 基本假定 .....	( 8 )
2.1.2 弯曲要素 .....	( 8 )
2.1.3 弯曲微分方程式 .....	( 10 )
2.1.4 梁的弯曲微分方程的解 .....	( 12 )
2.2 梁的支座及边界条件 .....	( 16 )
2.2.1 自由支持 .....	( 16 )
2.2.2 刚性固定 .....	( 16 )
2.2.3 弹性支座 .....	( 16 )
2.2.4 弹性固定端 .....	( 17 )
例 2.1 .....	( 19 )
例 2.2 .....	( 20 )
例 2.3 .....	( 21 )
2.3 船体骨材几何要素的计算 .....	( 22 )
2.4 梁的弯曲要素表及应力计算 .....	( 24 )
2.4.1 单跨梁的弯曲要素表 .....	( 24 )
2.4.2 梁的应力 .....	( 26 )
2.5 剪应力对梁弯曲变形的影响 .....	( 29 )
2.5.1 基本概念 .....	( 29 )
2.5.2 剪切引起的挠度计算 .....	( 30 )
2.6 梁的复杂弯曲 .....	( 32 )
2.6.1 梁复杂弯曲的微分方程式 .....	( 32 )
2.6.2 用初参数法求解微分方程式 .....	( 33 )
2.6.3 复杂弯曲的弯曲要素表及叠加原理 .....	( 39 )
2.6.4 轴向力对梁弯曲要素的影响 .....	( 39 )
2.7 弹性基础梁的弯曲 (选学) .....	( 40 )
习题 2 .....	( 46 )

<b>第3章 力法</b> .....	(49)
3.1 力法原理 .....	(49)
3.1.1 引例 .....	(49)
3.1.2 力法的一般原理与三弯矩方程式 .....	(52)
3.1.3 例题 .....	(53)
例 3.1 .....	(53)
例 3.2 .....	(55)
3.2 简单刚架与简单板架计算 .....	(57)
3.2.1 简单刚架计算 .....	(57)
3.2.2 简单板架计算 .....	(61)
3.3 弹性固定端与弹性支座的实际概念 .....	(62)
3.3.1 弹性固定端 .....	(63)
3.3.2 弹性支座 .....	(64)
3.4 弹性支座上连续梁的计算 .....	(65)
3.4.1 具有弹性支座的简支梁的弯曲 .....	(65)
3.4.2 弹性支座上连续梁的计算 .....	(66)
3.4.3 阶梯形变断面梁的计算 .....	(70)
3.4.4 甲板板架的计算 .....	(71)
习题 3 .....	(73)
<b>第4章 位移法</b> .....	(78)
4.1 位移法原理 .....	(78)
4.1.1 基本概念 .....	(78)
4.1.2 位移法的符号规定与基本方程式 .....	(78)
4.1.3 梁元节点位移引起的梁端力 (位移力) .....	(79)
4.1.4 梁元跨中载荷引起的梁端力 (固端力) .....	(80)
例 4.1 .....	(81)
4.1.5 位移法的计算步骤 (不可动节点) .....	(84)
4.1.6 例题 .....	(85)
例 4.2 .....	(85)
例 4.3 .....	(86)
4.2 位移法在杆系结构中的应用 .....	(89)
例 4.4 .....	(89)
例 4.5 .....	(92)
例 4.6 .....	(94)
习题 4 .....	(95)
<b>第5章 矩阵法</b> .....	(98)
5.1 基本概念 .....	(98)
5.1.1 术语与概念 .....	(99)
5.1.2 正方向约定 .....	(100)

5.2 杆元的基本类型 .....	(100)
5.3 杆单元刚度矩阵 .....	(103)
5.3.1 基本杆单元的刚度矩阵 .....	(104)
5.3.2 单刚元素的物理意义 .....	(106)
5.3.3 单刚的性质与分块子矩阵 .....	(106)
5.4 结构刚度矩阵 .....	(106)
5.4.1 节点载荷 .....	(106)
5.4.2 节点力平衡方程 .....	(109)
5.4.3 结构刚度矩阵的性质 .....	(112)
5.4.4 半带宽存储法 .....	(112)
5.5 节点载荷 .....	(114)
5.6 约束处理 .....	(115)
5.6.1 常规约束处理 .....	(117)
5.6.2 弹性约束处理 .....	(119)
5.6.3 对称条件的运用及其他 .....	(120)
5.6.4 例题 .....	(121)
例 5.1 .....	(121)
例 5.2 .....	(122)
5.7 坐标变换 .....	(125)
5.7.1 坐标转换关系 .....	(126)
5.7.2 力与位移的坐标转换 .....	(127)
5.7.3 杆元刚度矩阵的坐标转换 .....	(128)
5.7.4 线弹簧单刚及其坐标转换 .....	(128)
5.8 矩阵法的程序实现 .....	(130)
5.8.1 变量词典 .....	(130)
5.8.2 程序结构 .....	(134)
例 5.3 .....	(134)
5.8.3 前处理模块 .....	(134)
5.8.4 计算模块 .....	(140)
5.8.5 后处理模块 .....	(141)
例 5.4 .....	(141)
习题 5 .....	(144)
<b>第 6 章 能量法</b> .....	<b>(146)</b>
6.1 应变能 .....	(146)
6.1.1 杆件的应变能计算 .....	(147)
6.1.2 弹性支座与弹性固定端的应变能 .....	(149)
6.2 虚位移原理 .....	(150)
6.2.1 最小势能原理 .....	(154)
例 6.1 .....	(155)



6.2.2 近似解法 .....	(157)
例 6.2 .....	(158)
例 6.3 .....	(160)
习题 6 .....	(161)
<b>第 7 章 平面应力问题的有限元法</b> .....	(164)
7.1 弹性体的应力、位移与应变 .....	(164)
7.1.1 应力分量 .....	(164)
7.1.2 位移分量 .....	(165)
7.1.3 应变分量 .....	(166)
7.2 平面应力问题及基本方程 .....	(166)
7.2.1 平面应力问题 .....	(166)
7.2.2 平衡微分方程 .....	(167)
7.2.3 几何方程 .....	(168)
7.2.4 物理方程 .....	(169)
7.2.5 边界条件 .....	(170)
7.2.6 圣维南原理 .....	(171)
7.3 经典解题方法与有限元法 .....	(173)
7.4 三角形单元的位移函数 .....	(174)
7.4.1 节点位移 .....	(174)
7.4.2 单元位移函数与形函数性质 .....	(174)
7.4.3 单元应变与应力 .....	(176)
7.4.4 位移函数与收敛准则 .....	(177)
7.5 单元平衡方程 .....	(178)
7.5.1 单元的应变能 .....	(178)
7.5.2 单元的外力势能与等效节点力 .....	(178)
7.5.3 单元的总势能泛函和最小势能原理 .....	(179)
7.5.4 单元刚度矩阵 .....	(179)
7.5.5 单元刚度矩阵的性质 .....	(180)
例 7.1 .....	(180)
7.5.6 等效节点力计算 .....	(182)
7.6 结构刚度矩阵 .....	(183)
7.7 位移边界条件的引入 .....	(186)
7.8 解题过程与例题 .....	(186)
例 7.2 .....	(187)
习题 7 .....	(193)
<b>第 8 章 薄板的弯曲理论</b> .....	(196)
8.1 概述 .....	(196)
8.2 三维弹性体基本方程 .....	(196)
8.3 小挠度薄板弯曲微分方程 .....	(197)

8.3.1	基本假定 .....	(197)
8.3.2	弹性曲面弯曲微分方程 .....	(198)
8.3.3	边界条件 .....	(204)
8.4	小挠度薄板弯曲的解 .....	(206)
8.4.1	应用双三角级数解四边自由支持板的弯曲 .....	(206)
8.4.2	应用单三角级数解一对边自由支持板的弯曲 .....	(208)
例 8.1	.....	(209)
8.4.3	四周刚性固定的板的解 .....	(210)
例 8.2	.....	(213)
8.5	小挠度薄板弯曲的有限元法 .....	(213)
8.5.1	节点位移与节点力 .....	(213)
8.5.2	位移模式 .....	(214)
8.5.3	单元应变与应力 .....	(218)
8.5.4	单元刚度矩阵与结构刚度矩阵 .....	(219)
8.5.5	载荷处理 .....	(222)
例 8.3	.....	(223)
8.6	小挠度薄板弯曲的能量解法 .....	(224)
8.6.1	小挠度薄板的弯曲应变能 .....	(224)
8.6.2	用李兹法解小挠度薄板的弯曲问题 .....	(225)
例 8.4	.....	(226)
例 8.5	.....	(227)
8.7	薄板的筒形弯曲 .....	(228)
8.7.1	筒形板的横弯曲 .....	(228)
8.7.2	筒形板的复杂弯曲 .....	(230)
例 8.6	.....	(232)
8.7.3	筒形板的大挠度弯曲 .....	(233)
例 8.7	.....	(236)
习题 8	.....	(237)
<b>第 9 章</b>	<b>杆及板的稳定性</b> .....	<b>(240)</b>
9.1	概述 .....	(240)
9.2	有限自由度体系的稳定性计算 .....	(242)
9.2.1	静力法 .....	(242)
9.2.2	能量法 .....	(242)
9.3	单跨梁的稳定性 .....	(244)
9.3.1	静力法 .....	(244)
例 9.1	.....	(244)
9.3.2	能量法 .....	(246)
例 9.2	.....	(249)
例 9.3	.....	(252)

例 9.4 .....	(253)
9.3.3 高阶微分法 .....	(253)
例 9.5 .....	(254)
9.4 板的中性平衡微分方程及其解 .....	(255)
9.4.1 板的中性平衡微分方程 .....	(255)
9.4.2 四边自由支持单向受压板的解 .....	(257)
习题 9 .....	(260)
<b>附录 A 单跨梁的弯曲要素表</b> .....	(261)
表 A-1 悬臂梁的弯曲要素表 .....	(262)
表 A-2 两端自由支持梁的弯曲要素表 .....	(263)
表 A-3 一端自由支持、一端刚性固定梁的弯曲要素表 .....	(265)
表 A-4 两端刚性固定梁的弯曲要素表 .....	(266)
<b>附录 B 单跨梁复杂弯曲的弯曲要素表及辅助函数</b> .....	(267)
表 B-1 复杂弯曲(轴向拉力)的弯曲要素表 .....	(268)
表 B-2 复杂弯曲(轴向压力)的弯曲要素表 .....	(270)
表 B-3 复杂弯曲的辅助函数(轴向拉力) .....	(272)
表 B-4 复杂弯曲的辅助函数(轴向压力) .....	(273)
<b>附录 C 弹性基础梁的弯曲要素表及辅助函数</b> .....	(274)
表 C-1 弹性基础梁的弯曲要素表 .....	(274)
表 C-2 弹性基础梁的普日列夫斯基函数 .....	(275)
表 C-3 两端刚性固定均布荷重的弹性基础梁的辅助函数 .....	(279)
<b>附录 D 船用球扁钢断面要素表</b> .....	(281)
<b>附录 E 矩形薄板的弯曲要素表</b> .....	(282)
表 E-1 四边自由支持的矩形薄板在均布荷重作用下的挠度、弯矩、剪力与反力 .....	(283)
表 E-2 四边刚性固定的矩形薄板在均布荷重作用下的挠度、弯矩、剪力与反力 .....	(284)
表 E-3 一对边自由支持另一对边刚性固定的矩形薄板在均布荷重作用下的挠度与弯矩 .....	(285)
<b>参考文献</b> .....	(286)

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 船舶结构力学的研究对象和任务

水，覆盖了地球表面 71% 的面积。为了跨越江河湖海，人类发明了船舶。作为漂浮在水上的“移动建筑”，船舶结构和其他陆上建筑结构一样承担载荷，起到了骨架的作用。从几何形态上看，船舶结构可分为杆件结构和薄板结构。本书将首先从杆件结构入手，介绍结构力学的基本方法和原理，然后再讲述薄板结构。

一个合理的船舶结构既能保证船舶在营运过程中安全地承担载荷，又能经济有效地使用材料。船舶结构力学正是研究船舶结构载荷与承载能力的一门学科。基本任务如下：

(1) 研究船舶结构在载荷作用下内力的计算方法，即强度问题。

(2) 研究船舶结构在载荷作用下变形的计算方法，即刚度问题。

为了保证船舶及其设备的正常使用，除了满足强度要求，还必须将结构的变形控制在一定范围内。例如：船舶整体的变形过大，将引起人员的恐慌；驾驶甲板的变形过大，势必影响仪表设备的正常运转。

(3) 研究船舶结构的稳定性问题。

船舶结构中的甲板纵骨、船底纵骨以及支柱等杆件如果比较细长，在受到轴向的压力载荷时，有可能无法维持原来的直线形式的平衡状态而突然弯曲，从而导致结构的破坏，这种现象叫做“失稳”。和杆件结构类似，甲板、船底板等薄板结构在受到沿板面的压力载荷时，也有可能发生“失稳”破坏。

结构失稳具有“突然性”；破坏发生时，压力载荷往往并没有超过其强度允许值，因此失稳还具有“隐蔽性”；很多时候失稳破坏还具有“灾难性”。有鉴于此，研究船舶结构的稳定性问题也是本书的重要任务。

## 1.2 船舶结构力学中的“带板”

实践证明，船体中的骨架在受力变形时，和它相连的一部分板始终与骨架一起作用，不可分割。因此在研究骨架时，必须把与之相邻的一部分板一起考虑。船体结构力学中的骨架剖面形状如图 1.1 所示，其中与骨架相连的那部分板叫做骨架的“带板”（attached plating）。各国船级社钢船建造规范中对带板的宽度都有规定。

根据中国船级社 2006 年颁布的《钢质海船入级规范》，次要构件（在本书中次要构件

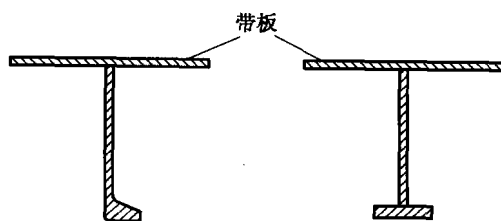


图 1.1 骨架剖面

指尺寸较小的普通骨材，如甲板纵骨、舷侧纵骨、外底纵骨甲板横梁、肋骨等)的带板宽度取为 1 个骨材间距。主要构件(在本书中主要构件指尺寸较大的强骨材，如甲板纵桁、舷侧纵桁、龙骨、甲板强横梁、强肋骨、肋板等)带板如果安装在平板上，其有效剖面积  $A$  应按公式 (1.1) 确定，但取值不小于面板剖面积。

$$A = 10fbt_p(\text{cm}^2) \quad (1.1)$$

式中  $f$ ——系数，等于  $0.3\left(\frac{l}{b}\right)^{\frac{2}{3}}$ ，但不大于 1 (如果计算得到的  $f$  值比 1 大，则认为  $f=1$ )；

$b$ ——主要构件所支承的面积的平均宽度，m；

$l$ ——主要构件的长度，m；

$t_p$ ——带板的平均厚度，mm。

根据中国船级社 2006 年颁布的《内河小型船舶建造规范》，普通骨材的带板宽度取骨材间距；强骨材带板宽度取强骨材跨距的 1/6，但不大于负荷平均宽度，亦不小于普通骨材间距。若骨材仅一侧有带板时，则带板宽度取上述规定值的 50%。

### 1.3 船舶结构力学的计算模型和研究方法

任何结构在进行力学计算时都会根据实际的载荷和变形规律对实际结构进行简化，然后选用恰当的方法进行计算分析，并在实践中对计算结果进行检验。船舶结构力学常用的计算模型分为 3 类：板模型、骨架模型和板梁组合模型。其中板模型又分为薄板弯曲模型和平面应力模型；骨架模型分为船体梁模型、平面刚架模型和板架模型。

为了逐一介绍这些模型，下面以某远洋干货船为例(图 1.2)进行说明。船的参数如下：船长  $L=148\text{ m}$ ，船宽  $B=21.2\text{ m}$ ，型深  $D=12.5\text{ m}$ ，吃水  $d=9.2\text{ m}$ ，双底高  $h=1.4\text{ m}$ ；上甲板厚 22 mm (以下如无特别说明，长度单位均为 mm)，舷侧板厚 18，外底板厚 18，内底板厚 16；上甲板纵骨为 No.20a 球扁钢，间距同肋距为  $s=650\text{ mm}$ ；上甲板强横梁为  $\perp \frac{12 \times 470}{22 \times 200}$ ，间距  $3s$ ；货舱肋骨为  $\perp \frac{12 \times 300}{16 \times 160}$ ，间距  $s$ ；实肋板厚 12，间距  $3s$ ；中桁材厚 16，旁桁材厚 12；内底纵骨为 No.22b 球扁钢，外底纵骨为 No.24a 球扁钢，内、外底纵骨间距  $s$ ；货舱长 24 m；舱口范围内强横梁跨长 6.6 m，其余的强横梁跨长 21.2 m；货舱肋骨长 8.1 m。

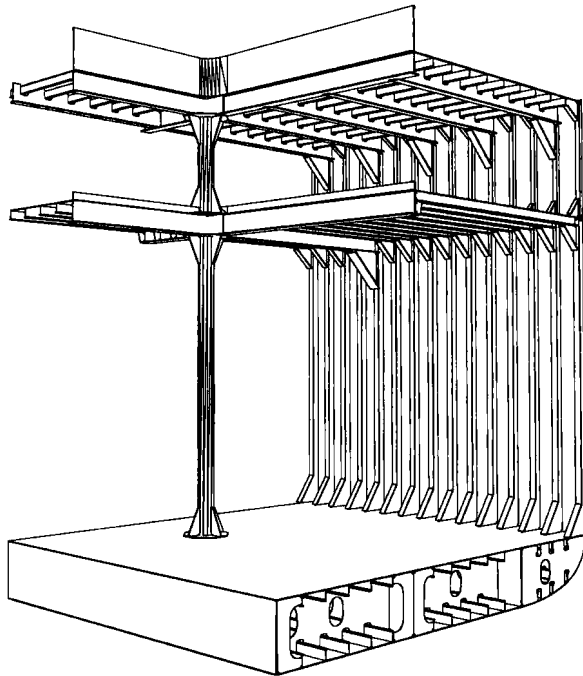


图 1.2 某货船的立体结构图

### 1. “薄板弯曲模型”和“平面应力模型”

首先看这艘远洋干货船的板，它包括船底板、内底板、舳列板、舷侧板、舷顶列板、下甲板、甲板边板和甲板板。船体中的板是光滑具有双向曲度的曲面，受到纵横骨架的支持。在研究船体板的问题时，通常把四周由纵横骨架支持的板格作为研究对象。这样，船体中的板就可简化为具有矩形周界的平板。板上的荷重可分为两类（图 1.3）：一类是垂直于板面的载荷，比如作用于板上的水压力；另一类是位于板平面的载荷。对于这两种载荷，可以分别采用矩形板的弯曲理论（参考本书第 8 章）和平面应力理论（参考本书第 7 章）来解决。根据载荷作用方向的不同，可以将前者称为“薄板弯曲模型”，后者称为“平面应力模型”。

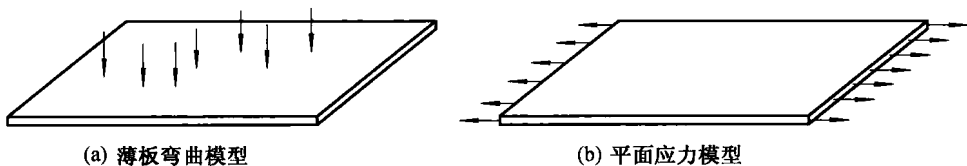


图 1.3 板的两种受力方式

### 2. 船体梁模型

从原始的独木舟、舢板、帆船，到现代 25 万吨以上的超级油轮；从民用的集装箱船、散货轮、液化天然气船、滚装船，到军用的巡洋舰、驱逐舰、护卫舰、航空母舰，船舶的形态和功能千差万别。尽管如此，也还是可以将船舶抽象为一根变断面的梁，称作“船体梁”（ship hull girder）。

人们通过长期的生产实践，分析了船体受力和变形的主要特征后，认为在考虑船体强度问题时，首先把船当作一根梁来研究是合理的。如果船舶静止于平静的水中或船速等于波速（这时可以认为船体被“搁置”在波浪上），此时可以计算船舶沿纵向（船长方向）分布的重力与浮力，然后计算船体梁在这两种载荷作用下的变形与应力。这种将船作为一个整体来研究的强度问题就叫做船体的“总纵强度”或简称为“总强度”问题。

“总纵强度”问题中，通常研究“船体梁”的两种受力状态：

(1) 中拱状态 (hogging condition)

如图 1.4a 所示，波峰在船体中部，中部浮力增加，两端浮力减小，船体梁中部拱起。

(2) 中垂状态 (sagging condition)

如图 1.4b 所示，波谷在船体中部，中部浮力减小，两端浮力增加，船体梁两端翘起。

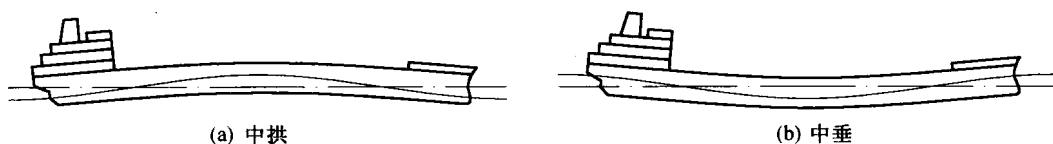


图 1.4 船体梁的总纵弯曲

除了“总纵强度”以外，船体的横向构件（如横梁、肋骨、肋板等）及船体的局部构件（如船底板及底纵桁等）也会因局部荷重而发生变形或受到破坏，这类问题通常称为“局部强度”问题（图 1.5 及图 1.6）。下面介绍的“刚架”和“板架”模型就是用来分析局部强度问题的。

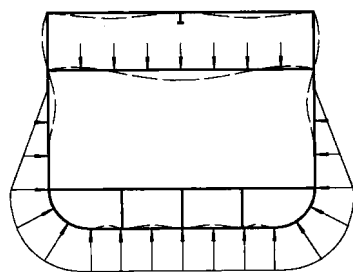


图 1.5 横向局部强度问题

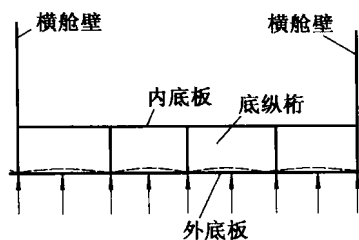


图 1.6 纵向局部强度问题

### 3. 平面刚架模型

在局部强度问题中，可以将空间结构简化为平面结构。图 1.7 所示为船的舷侧结构，在船体横剖面内，横梁、肋骨及船底肋板共同组成一个平面杆系。肋骨与横梁的交点位于舷侧板与甲板交接处，肋骨与肋板的交点位于舷侧板与内底板的交接处。在这种杆系结构中，各杆的连接点是刚性的（不同于铰接形式），受到的荷载作用于杆系平面内。这种计算模型称为平面“刚架” (rigid frame)。

在实际情况中，这些杆件的交点不会发生线位移，故在该处加上刚性支座（限制固定点处的线自由度）表示不可移动。横梁在舱口处也有一个刚性支座，表示舱口纵桁的支持作用（图 1.8a）。

船舶中肋板的尺寸往往比肋骨大很多,所以计算时可将肋骨下端看作刚性固定端(限制固定点处的线自由度和转角自由度)。这样就得到了仅由横梁与肋骨组成的刚架(图1.8b)。

在船的上甲板结构(图1.9)中,纵骨的尺寸较小,刚度也较小,而强横梁则正好相反。纵骨穿过强横梁在纵向保持连续。在计算纵骨强度时,由于强横梁对纵骨有足够的刚性支持,因此强横梁可看作纵骨的刚性支座。同理,横舱壁的刚度也很大,可看作纵骨的刚性固定端。这样就得到图1.10所示的计算模型,这也是一种特殊的平面刚架模型,称为“连续梁”模型。

内底纵骨、外底纵骨(图1.12)和甲板纵骨相似,在计算时也可看作是刚性支持在肋板上的“连续梁”。

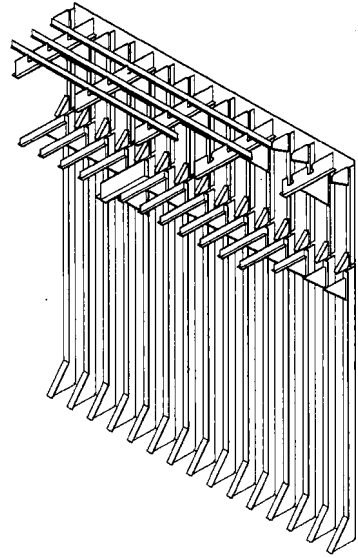
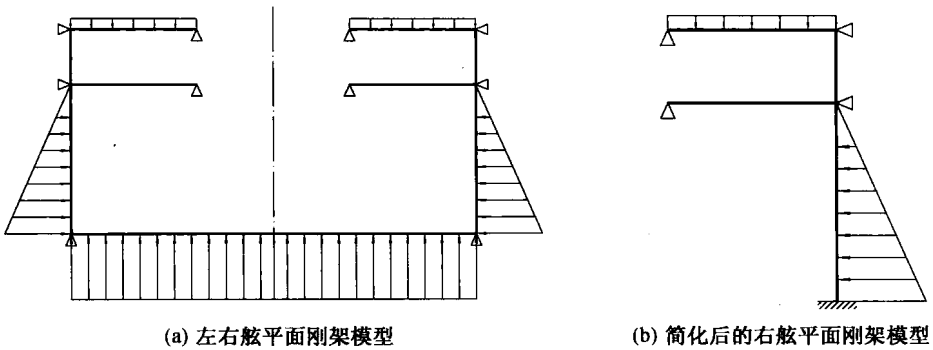


图 1.7 舷侧结构 (左舷)



(a) 左右舷平面刚架模型

(b) 简化后的右舷平面刚架模型

图 1.8 平面刚架结构

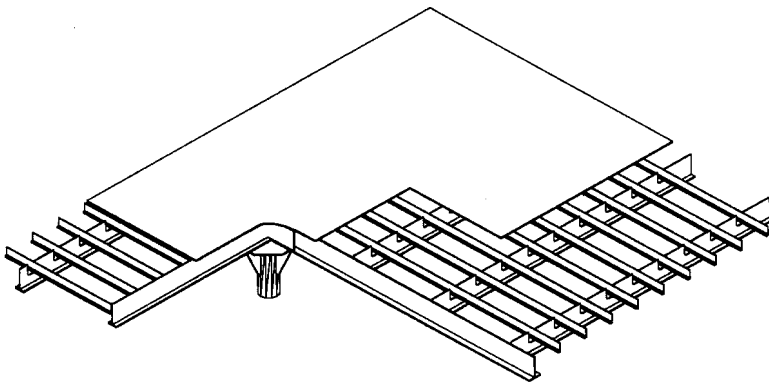
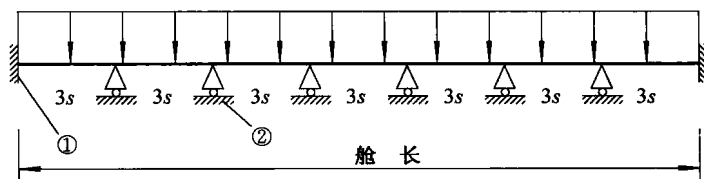


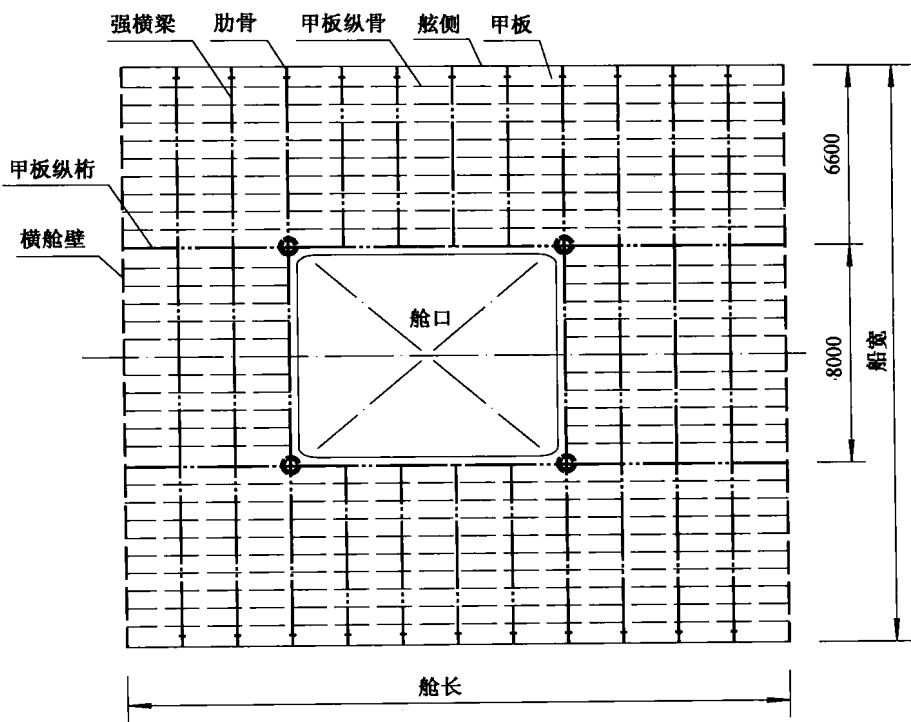
图 1.9 纵骨架式甲板结构 (左舷)



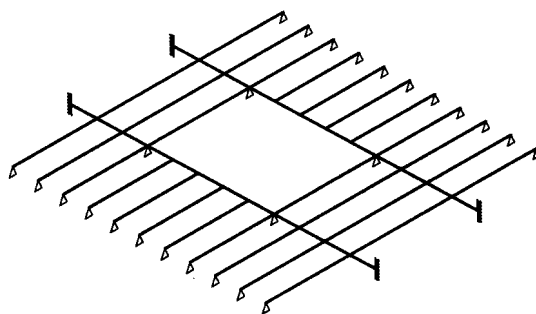


- ① 横舱壁提供刚性支持并限制转角位移（刚性固定端）；
- ② 甲板强横梁提供刚性支持（刚性支座）

图 1.10 用连续梁模型计算甲板纵骨



(a) 上甲板实际结构



(b) 上甲板“板架”模型

图 1.11 板架结构