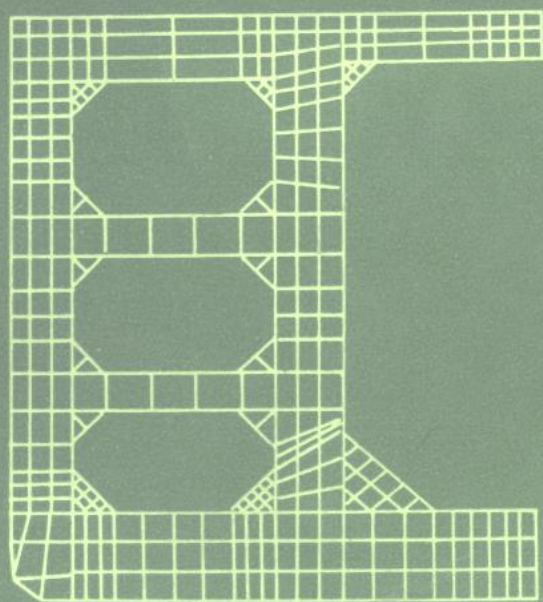


船舶结构力学

陈铁云 陈伯真 主编



上海交通大学出版社

350556

船舶结构力学

陈铁云 陈伯真 主编



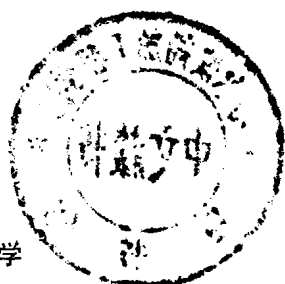
上海交通大学出版社

内 容 简 介

本书主要叙述船体结构中杆及杆系的弯曲、扭转与稳定性以及板的弯曲与稳定性问题。书中不仅阐明了结构力学的基本理论与基本方法——经典的力法、位移法及能量法，并且也比较详尽地介绍了杆系的矩阵法及弹性理论平面应力问题的有限元法和板弯曲的有限元法及其在船体结构计算中的应用。因此，通过本书的学习，不仅可了解结构力学的基本理论和方法，而且对应用电子计算机计算的有限元法也可掌握和应用。

本书为高等学校船舶设计与制造专业教材，也可供从事船舶结构计算和设计的工程技术人员使用，并可作为一般工程力学专业学生和技术人员参考。

徐 斌 编 著
1991.7



船 舶 结 构 力 学

出 版：上海交通大学出版社
(淮海中路1984弄19号)

发 行：新华书店上海发行所

印 刷：江苏太仓印刷厂

开 本：787×1092(毫米)1/16

印 张：20.75

字 数：510000

版 次：1991年7月 第一版

印 次：1991年8月 第一次

印 数：1—1220

科 目：249—301

ISBN7—313—00863—5/U·66

定 价：5.35 元

前 言

本书系根据 1978~1980 年全国造船专业统编教材会议通过的“船舶结构力学”大纲编写的,可供高等学校船舶设计与制造专业使用,计划学时为 100~120 时。

自 1960 年作者编写了船舶结构力学教材之后,结构力学领域中的“有限元法”得到了广泛应用,因此在本书中编入了有限元法的基本内容。然而,作为一本船舶结构力学教学用书,对结构分析的基本原理和方法仍不应削弱,所以书中对结构力学的基本理论即经典的方法、位移法和能量原理等仍作了必要和系统地论述。

除了教育大纲的内容以外,本书还适当编写了一些选修内容,这些内容在书中用 * 号标明,可供学生自学之用。

本书初版于 1980 年由国防工业出版社出版。初版共十二章,72 万字,顾永宁同志及朱福根同志参加了初版的编写工作,哈尔滨船舶工程学院祝修本同志及武汉水运工程学院刘应群、杨永谦、卢文芳等同志为初版主审。1983 年本书作了全面修订,字数减至 40 万,重写了能量法、矩阵法、平面应力问题的有限元法、开口薄壁杆件的约束扭转及弯矩分配法等章节,将初版的十二章合并为十章并增加了习题答案。修订工作由陈伯真同志负责进行,武汉水运工程学院杨永谦同志主审。修订版于 1984 年仍由国防工业出版社出版。1990 年本书根据修订版又作了修订:改正了原书中的印刷错误,取消了原书中保留的工程单位制,全部采用了国际单位制,并适当增加了习题。经中国船舶工业总公司船舶工程教材委员会审定通过,武汉水运工程学院杨永谦教授主审,改由上海交通大学出版社出版。

教材建设是一件长期的工作,本书经过修订虽然在质量上逐步有所提高,但仍不免有不少缺点,希望广大读者及使用本教材的兄弟院校师生继续提出宝贵意见,以期在今后的教学实践中使船舶结构力学教材不断改进和完善。

编 者
1990 年 10 月

主要符号表

| | |
|----------------|----------------------------|
| a | 板架主向梁间距, 板沿 x 方向的边长 |
| A | 断面面积, 弹性支座的柔性系数 |
| b | 梁断面的宽度, 梁的间距, 板沿 y 方向的边长 |
| $[B]$ | 几何矩阵 |
| D | 板的弯曲刚度 |
| $[D]$ | 弹性矩阵 |
| E | 弹性模数 |
| f | 剪应力流 |
| $\{F^e\}$ | 单元节点力列矩阵 |
| G | 剪切弹性模数 |
| h | 断面高度 |
| i, I | 梁断面的惯性矩 |
| J | 杆的扭转惯性矩 |
| k | 弹性基础梁的刚性系数, 曲率 |
| K | 弹性支座或弹性固定端的刚性系数、支撑系数 |
| $[K^e]$ | 单元刚度矩阵 |
| $[K]$ | 结构刚度矩阵 |
| l | 梁的长度 |
| L | 板架的长度 |
| M | 弯矩, 力矩 |
| \mathfrak{M} | 集中外力矩 |
| N | 剪力 |
| $[N]$ | 位移矩阵 |
| P | 集中力, 广义力 |
| $\{P\}$ | 结构节点载荷列矩阵 |
| q | 分布载荷 |
| Q | 分布载荷的总值 |
| R | 支座反力 |
| s | 曲线坐标 |
| S | 静矩 |
| $[S]$ | 应力矩阵 |
| t | 薄壁断面的厚度, 板的厚度 |
| T | 杆的轴向力, 板的中面力 |

| | |
|----------------|-------------------------|
| $[T]$ | 坐标转换矩阵 |
| u | x 方向的位移,复杂弯曲和弹性基础梁的参数 |
| v | y 方向的位移,梁的挠度 |
| w | z 方向的位移,板的挠度 |
| U | 力函数 |
| V | 应变能 |
| V^* | 余能 |
| W | 外力的功,断面模数 |
| W^* | 余功 |
| x, y, z | 直角坐标 |
| X | 多余约束力 |
| α | 弹性固定端的柔性系数 |
| γ | 剪切角 |
| δ | 位移 |
| $\{\delta^e\}$ | 单元节点位移列矩阵 |
| $\{\delta\}$ | 结构位移列矩阵 |
| Δ | 广义位移 |
| ϵ | 应变 |
| θ | 断面的转角 |
| χ | 固定系数 |
| λ | 分配系数,压杆的柔度 |
| μ | 泊松比 |
| Π | 总位能 |
| Π^* | 总余能 |
| ρ | 曲率半径 |
| σ | 正应力 |
| τ | 剪应力 |
| φ | 扭转角,非弹性修正系数 |
| ψ | 折减系数 |

目 录

| | |
|----------------------------|-----|
| 主要符号表 | 1 |
| 第一章 绪论 | 1 |
| §1-1 船舶结构力学的内容与任务 | 1 |
| §1-2 船舶结构力学的研究方法 | 3 |
| §1-3 船体结构的计算图形 | 4 |
| 习题 | 8 |
| 第二章 单跨梁的弯曲理论 | 9 |
| §2-1 梁的弯曲微分方程式及其积分 | 9 |
| §2-2 梁的支座及边界条件 | 14 |
| §2-3 梁的弯曲要素表及应力计算 | 18 |
| §2-4 剪切对梁弯曲变形的影响 | 23 |
| §2-5 梁的复杂弯曲 | 26 |
| §2-6 弹性基础梁的弯曲 | 32 |
| *§2-7 梁的弹塑性分析 | 38 |
| 习题 | 42 |
| 第三章 杆件的扭转理论 | 45 |
| §3-1 直杆的扭转 | 45 |
| §3-2 薄壁杆件的自由扭转 | 47 |
| *§3-3 开口薄壁杆件的约束扭转 | 53 |
| 习题 | 55 |
| 第四章 力法 | 57 |
| §4-1 力法的原理 | 57 |
| §4-2 简单刚架与简单板架计算 | 62 |
| §4-3 弹性固定端与弹性支座的实际概念 | 66 |
| §4-4 弹性支座上连续梁计算 | 69 |
| §4-5 一根交叉构件板架计算 | 72 |
| *§4-6 多根交叉构件板架计算 | 77 |
| 习题 | 83 |
| 第五章 位移法 | 88 |
| §5-1 位移法原理 | 88 |
| §5-2 位移法在杆系结构中的应用 | 97 |
| *§5-3 弯矩分配法 | 103 |
| 习题 | 110 |
| 第六章 能量法 | 113 |
| §6-1 应变能与余能 | 113 |
| §6-2 杆件的应变能计算 | 115 |
| §6-3 虚功原理 | 117 |

| | | |
|---------|-----------------|-----|
| § 6-4 | 虚位移原理的应用 | 120 |
| § 6-5 | 位能驻值原理的近似解法 | 122 |
| * § 6-6 | 虚力原理的应用 | 126 |
| 习题 | | 131 |
| 第七章 | 矩阵法 | 134 |
| § 7-1 | 基本概念 | 134 |
| § 7-2 | 杆元的基本类型 | 136 |
| § 7-3 | 杆元的刚度矩阵 | 137 |
| § 7-4 | 结构刚度矩阵 | 140 |
| § 7-5 | 约束处理及例题 | 143 |
| § 7-6 | 坐标转换 | 149 |
| * § 7-7 | 空间杆系结构分析 | 156 |
| 习题 | | 159 |
| 第八章 | 平面应力问题的有限元法 | 163 |
| § 8-1 | 弹性体的应力、位移与应变 | 163 |
| § 8-2 | 平面应力问题及其基本方程式 | 165 |
| § 8-3 | 解题方法及有限元法的概念 | 169 |
| § 8-4 | 三角形单元的位移函数与刚度矩阵 | 171 |
| § 8-5 | 结构刚度矩阵 | 175 |
| § 8-6 | 外载荷处理 | 177 |
| § 8-7 | 解题过程与例题 | 178 |
| § 8-8 | 矩形单元的分析和应用 | 184 |
| 习题 | | 193 |
| 第九章 | 矩形板的弯曲理论 | 196 |
| § 9-1 | 概述 | 196 |
| § 9-2 | 板的筒形弯曲 | 197 |
| § 9-3 | 刚性板的弯曲微分方程式 | 205 |
| § 9-4 | 刚性板弯曲的解 | 211 |
| § 9-5 | 正交异性板的弯曲 | 218 |
| § 9-6 | 刚性板弯曲的能量解法 | 224 |
| * § 9-7 | 板弯曲的有限元法 | 227 |
| 习题 | | 236 |
| 第十章 | 杆及板的稳定性 | 238 |
| § 10-1 | 概述 | 238 |
| § 10-2 | 单跨杆的稳定性 | 239 |
| § 10-3 | 多跨杆的稳定性 | 245 |
| § 10-4 | 甲板板架的稳定性 | 251 |
| § 10-5 | 板的中性平衡微分方程式及其解 | 257 |
| § 10-6 | 板稳定性的能量解法 | 263 |
| § 10-7 | 板的后屈曲性能 | 270 |
| 习题 | | 275 |
| 附录 | | 278 |
| 附录 A | 单跨梁的弯曲要素表 | 278 |

| | | |
|------|--------------------------|-----|
| 附录 B | 单跨梁复杂弯曲的弯曲要素表及辅助函数..... | 287 |
| 附录 C | 弹性基础梁的弯曲要素表及辅助函数..... | 292 |
| 附录 D | 船用球扁钢断面要素 | 303 |
| 附录 E | 矩形平板的弯曲要素 | 304 |
| 附录 F | 压杆的临界应力曲线及修正系数 | 305 |
| 附录 G | 在中间弹性支座上连续压杆的稳定性曲线 | 308 |
| 附录 H | 矩形板的稳定性计算公式 | 309 |
| 习题答案 | | 310 |
| 参考书目 | | 319 |

第一章 绪 论

§ 1-1 船舶结构力学的内容与任务

船舶是一个复杂的水上工程建筑物。它航行于江河湖海，担负着运输、生产、战斗及其他各种任务。我国有漫长的海岸线，无数的内河湖泊，还有广阔富饶的海疆，为此就需要大量的、各种类型的船舶来从事各方面的工作，为社会主义革命和建设服务。

为了保证船舶能很好地完成上述任务，船舶应具有良好的航行性能、工作性能和具有一定的强度。

船舶具有一定的强度，是指船体结构在正常的使用过程和一定的使用年限中具有不破坏或不发生过大的变形的能力，以保证船舶能正常地工作。由于一般船舶的经常工作状态是航行状态，因此设计人员应首先保证船舶在航行状态有足够的强度。

船在海洋中航行，它所受到的外力是相当复杂的。这个外力除了船的载重和装备等重量以外，主要就是水作用于船体的力。除非船是静置于水中，否则船上受到的力总是动力。动力包括水动压力、冲击力以及船在运动中的惯性力等等。这些力显然取决于海面的情况，波浪的大小(即所谓环境条件)，并且还是随机性的，这样就使得船体外力的确定显得相当复杂了。

尽管如此，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，认为在考虑船体强度问题时，首先把船整体当作一根梁来研究是合理的。这时将船——或者如一些文献中所说，将“船体梁”(ship hull girder) 静置于静水中或波浪上，计算在船纵向(船长方向)分布的重力与浮力作用下的弯曲变形与应力。这种将船作为一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，如图 1-1，图中 (a) 称为“中拱状态”(hogging condition)；(b) 称为“中垂状态”(sagging condition)。长期以来，总强度一直是船体强度校核的主要方面。

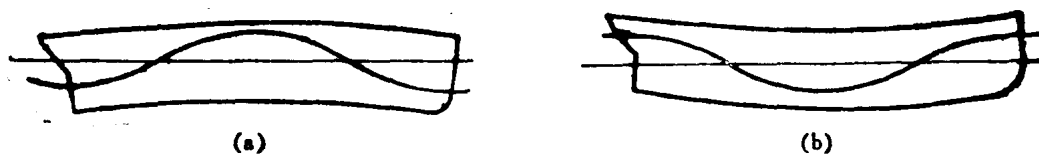


图 1-1

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，因此亦需研究这些横向构件或局部构件的强度问题。这类问题通常称为“横向强度”问题或“局部强度”问题，如图 1-2 及图 1-3，以便与前述的总纵强度问题有所区别。

把船舶静置于波浪上或静水中，按简单梁的弯曲理论来研究总纵强度当然是初步的。因此随着时间的推移，人们的认识在总强度的基础上逐步提高，从而使船体强度的计算更接近于实际。首先提出出来的是稳定性问题。十九世纪后期，由于船舶尺度的增加，发现船在总弯

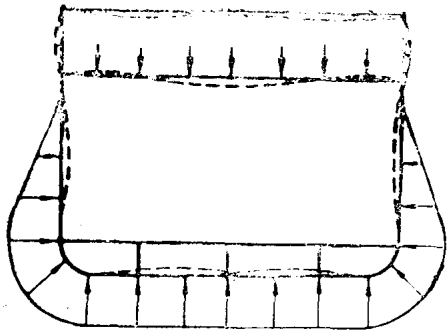


图 1-2

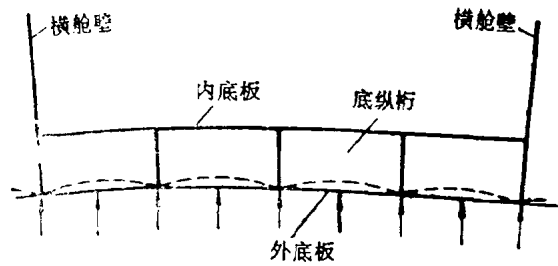


图 1-3

曲时船体受压的构件（主要是中垂状态时的上层甲板）常常会因为受压过度而丧失稳定性，这样就大大减低了船体抵抗总弯曲的能力。因此在总强度计算的同时，稳定性问题就被提了出来。亦就是说，我们在研究船体总强度的时候，必须要考虑受压构件是否有失稳现象，并要分析构件失稳后的应力再分配问题，这样才能正确地反映船体总强度的承载能力。

另外，船在航行时，并不总是正对着波浪的运动方向，经常会有船与波浪斜交的情况。船在斜浪上航行，就导致船体发生扭转，因此也就存在船体的扭转强度问题。近年来世界各国大量建造的集装箱船，因其舱口特别大，船体的抗扭刚度相对较低，因此其扭转强度的研究就显得十分必要。此外如大开口驳船，也有同样的现象。

多年来发生的船舶海损事故又告诉人们，大多数海损事故都是因为船上舱口角隅等处的应力集中而引起的。应力集中引起裂缝，可蔓延到甲板甚至舷侧，严重的可以导致整条船折断，因而如何减少应力集中问题又是船体强度中的另一个重要问题。应力集中是船体结构不连续而引起的。除了舱口角隅以外，船体上层建筑的端部以及内河船舷侧开的波门及其它结构不连续的地方也都会发生应力集中。所以应力集中问题及上层建筑问题（又称间断构件问题），都是船体强度中的内容。

由于将船静置于波浪上来研究总强度是忽略一系列动的因素的结果，因此多年来人们又对船在波浪上运动时的受力情况进行分析研究，包括对波浪本身的研究，波浪中动压力及波浪冲击力的研究，以及考虑船在波浪上运动时各种惯性力等等，并力图寻找出能确定船在波浪中所受外力的正确规律及其计算方法。目前随着对海况资料的积累以及电子计算机的应用，船在波浪上所受的外力的计算已逐渐成为可能。以上这些研究，再加上船体振动、造船材料强度及船体低周疲劳等问题的研究，使得船体强度包含的内容就相当广泛了。

这样，随着造船实践经验的积累和对船体强度问题研究的日益深入，并且为了满足今后设计建造更大更新的船舶的需要，就逐渐地形成了一个专门研究船体强度的科学，即“船体强度”和“船舶结构力学”。通常，“船体强度”是泛指研究船体结构强度的科学，它包括外力、结构在外力作用下的反应即内力研究和许用应力的确定等一系列问题。而“船舶结构力学”则是专指研究船体结构内力的问题，不包括外力及许用应力等方面的问题。

近年来，人们常把结构在外力作用下产生的应力与变形等称为结构的“响应”(response)，如下：

外力→结构(或系统)→响应 $\left\{ \begin{array}{l} \text{静力的} \\ \text{动力的} \end{array} \right.$

这样,船舶结构力学就是研究船体结构静力响应的一门课程^①。学习船舶结构力学就是要掌握在给定的外力作用下如何确定船体结构中的应力与变形,包括研究受压构件的稳定性问题。或者如通常所说,“船舶结构力学”是研究船体结构中板与骨架的强度与稳定性的科学。学习了“船舶结构力学”,我们可以达到下面两个目的:

1) 具有对船体结构进行强度校核的能力,即对于已经设计好的或建造好的船舶,在船体结构尺寸已知的条件下,在给定的外载荷或工况下,算出结构的应力与变形,并与许用值比较,从而判断船体结构的强度是否足够。

2) 具有进行船舶结构设计的能力,即对于将要设计建造的船舶,在已知结构的外力及许用应力(或变形)的情况下,根据结构中算得的应力(或变形)的大小,定出结构的尺寸。

然而,由于一个船舶的结构设计要考虑到的实际因素还有很多,不能单靠理论计算来完成,所以大家知道目前一般民用船舶的结构设计大都依照国家船舶检验局(或船级社)所颁布的“船舶建造规范”来进行。尽管如此,船舶结构力学仍是结构设计的基础。因为规范虽然是造船实践的总结,但其中不少规定仍来源于结构力学的基本理论,并且目前规范亦有越来越多地用结构力学理论来表达的趋势。因此掌握了船舶结构力学无疑对规范会有更深的理解。

此外对于目前还没有建造规范可依据的船舶——如工程船及其他特种船舶,在其结构设计时还是需要用到结构力学的知识。因此,学习船舶结构力学就更为必要了。

最后,学习“船舶结构力学”将为“船体强度和结构设计”及“船体振动学”两门课程打下基础。

§ 1-2 船舶结构力学的研究方法

为了进行结构计算,分析结构的应力与变形,一般都要将实际结构进行一些简化,然后选用适当的计算方案和方法进行计算,得出计算结果,并在实践中检验计算结果的准确性。这是一般结构力学所采用的共同的方法。

在船舶结构力学中,由于船体结构的复杂性以及船体受力的复杂性,因此在电子计算机应用之前,要人工把船体受力后各个组成部分的应力与变形全部计算出来是不可能的。所以长期以来,人们在进行船体结构计算的时候,也总是根据需要与可能,把实际结构进行简化后再作结构分析。通常传统的做法是:

1) 将船体的总强度问题与横向强度或局部强度问题分开考虑,必要的时候再把它们的结果叠加起来。

2) 在横向强度或局部强度问题中,常把空间结构拆成平面结构来考虑。因此通常考虑的是船体中一个隔舱内的甲板部分、舷侧部分、船底部分和舱壁部分,并把它们都当作是平面结构。

3) 在计算中又把组成船体的骨架和板分开考虑,将船体板认为是支持在骨架上的板,骨架则作为板的支持结构。但实践证明船体中的骨架在受力后变形时,和它相连的一部分板始终

^① 动力响应将在“船体振动学”中研究。

与骨架一起作用,不可分割。这样在研究骨架时,就把它和它相邻的一部分板一起考虑,于是在船体结构计算中的骨架将有图 1-4 所示的剖面形状,其中与骨架相连的那部分板叫做骨架的“带板”(attached plating),过去亦称为骨架的“附连翼板”,各国钢船建造规范中对带板的宽度都有规定^①。

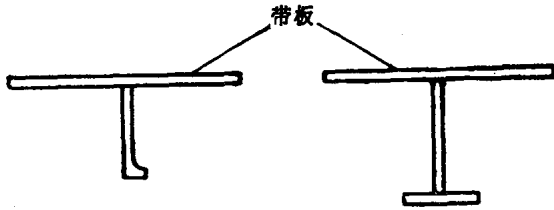


图 1-4

强度计算问题,或研究甲板、舷侧、船底及舱壁等结构的强度计算问题,其中亦包括稳定性问题。

事实上,船体的总强度与局部强度问题是同时存在的,船体中的板和骨架亦是连在一起的,将它们人为地分开考虑,主要是由于受到计算方法和计算技术上的限制,具有一定的近似性。廿世纪五十年代开始,随着电子计算机的发展,在计算方法上有了一个相应的改进,许多用人工无法计算的问题都可以用电子计算机来解决。这样原来因计算方法和技术上的原因而作的各种限制都可以逐渐去除了,从而可使得结构计算更加精确,更为切合实际了。

因此,在电子计算机应用之后,我们可以突破过去长期以来的做法,而采用新的计算方案和方法。针对前述的传统方法的三个方面,今后船体结构的计算方法将是:

- 1) 可以将总强度问题与横向强度及局部强度问题一起考虑,即在确定了船体整个受力情况的前提下,可将船体各组成结构中的应力与变形一起计算出来。
- 2) 完全可以计算空间结构,无须一定要将空间结构化为平面结构。
- 3) 可以不将骨架和板分开,而将骨架和板一起考虑。

目前,在船舶结构力学领域中,人们正是在这三个方面进行了大量工作,发展很快。特别是用了电子计算机后,对空间结构的计算最容易做到,读者在学了本课程之后就可以做到这一步。而其他两个方面的工作在国内还有待于进一步深入研究和进一步发展,最后达到结构计算更为合理,更为现代化的目的。

虽然如此,一个结构的计算方案的选择还是不能脱离计算的实际需要,因此在实际工作中,如何正确地确定计算图形和选定计算方案,还应根据不同任务的具体要求来考虑,这一点在下节中还将进一步予以说明。

§ 1-3 船体结构的计算图形

在船体结构计算中,不论是用传统的计算方法还是用电子计算机计算,都必须对实际结构加以简化。简化后的结构常称为结构的“理想化图形”或“计算图形”、“计算模型”,亦有叫做结构的“力学模型”的。

^① 根据中国钢船建造规范,若 b 为骨架的平均间距, l 为骨架的跨距,则带板宽度 b_0 的取法如下:对于小骨材,即次要构件,如肋骨、纵骨、扶强材等, $b_0 = b$ 。对于大骨材,即主要构件,如强肋骨、甲板纵桁、船底骨材等,当 $l \geq 6b$ 时, $b_0 = b$; 当 $l < 6b$ 时, $b_0 = 0.3\sqrt{l^2 b}$, 但带板的剖面面积不得小于骨材的面板的剖面面积。

结构的计算图形系根据实际结构的受力特征、结构相互之间的影响和计算要求等因素来确定的,因此它不是固定的、一成不变的东西。下面我们把今后在船体结构计算中一些常见的、典型的、亦是本书中主要研究的结构计算对象及其计算图形作一简要的介绍。

先谈船体中的板。船体中的板是连续的板,它构成船体的外形,所以总的说是具有曲度

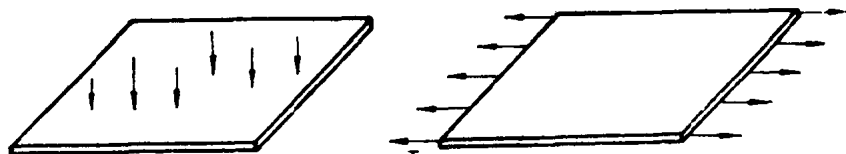


图 1-5

的板,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那一部分板作为对象。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:

一类是垂直于板面的荷重,如作用于板上的水压力;另一类是位于板平面的荷重,如在船体总弯曲时作用于船体板平面内的应力,在图1-5中表示了矩形平板上的这两类荷重。

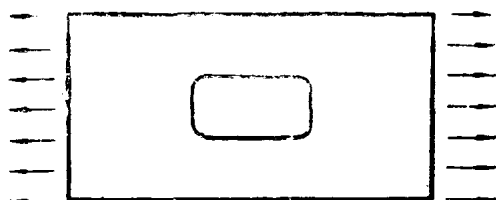


图 1-6

以后可以看到,除非是考虑船体板上开口的应力集中问题,见图1-6,这时远离开口处的板的周界支承情况不是主要的,主要的是板上开口的大小和形状;或者是在研究双层底结构时把双层底当作是夹层板来考虑,我们在计算中总是讨论受骨架支持的矩形平板问题。

再来看船体中的骨架。由于船体中的骨架——横梁、肋骨、肋板、纵骨、纵桁等大多是细长的型钢或组合型材,所以这种骨架被称为“杆件”,简称“杆”。而相互连接的骨架系统就叫做“杆件系统”,简称“杆系”。就整个船体而言,船体的杆系是一个复杂的空间系统。而在实际计算时则常把它划分为一些形状比较规则的、比较简单的计算图形来考虑^①。下面以一般的远洋干货船为例(图1-7),将典型的杆系介绍如下:

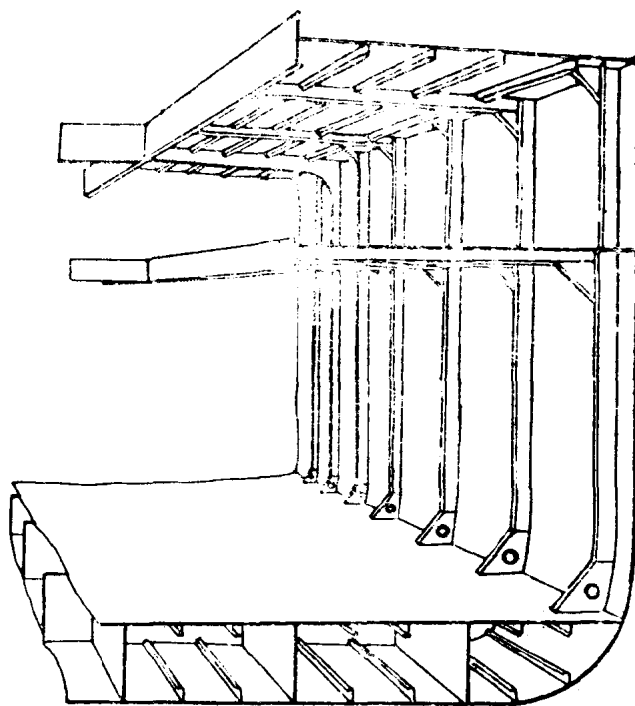


图 1-7

^① 在个别情况下,可以将某些骨架当作单独的杆来处理,如支柱。

我们从甲板部分看起。先看上甲板纵骨,在上甲板的骨架中,纵骨的尺寸最小,它穿过强横梁并通过横舱壁在纵向保持连续。在计算纵骨时认为强横梁有足够的刚性支持纵骨,从而可作为纵骨的刚性支座。纵骨在横舱壁处则作为刚性固定端,这样就得到图 1-8 中的计算图形,即连续梁^①。

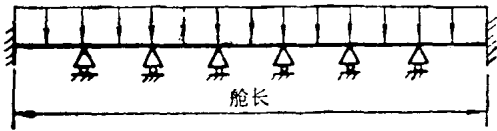
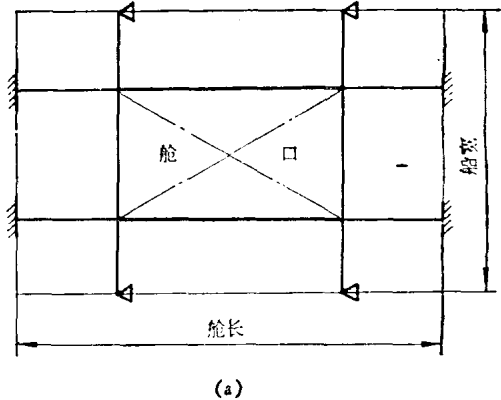


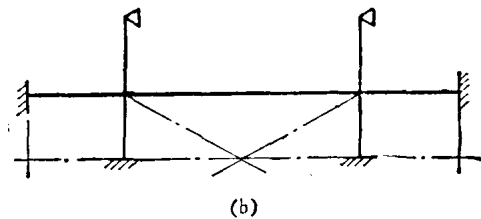
图 1-8

(或下甲板)的骨架中,甲板纵桁与舱口端横梁尺寸最大,在计算时常可略去其他骨架对它们的影响,于是在研究甲板纵桁与舱口端横梁时就得到了一个井字形的平面杆系,如图 1-9 (a)。此种杆系因外载荷垂直于杆系平面而发生弯曲,称为“交叉梁系”(grillage)或“板架”^②。如果舱口端横梁中有支柱或半舱壁,就可化为图 1-9 (b)中的板架。



(a)

再看横梁。由于在船体横剖面内,横梁、肋骨及船底肋板共同组成一个平面杆系。因此常把它们一起考虑作为船体横向强度的研究对象。这种杆系中各杆的联接点是刚性的,并受到作用于杆系平面内的载荷作用,故称为“刚架”(rigid frame),见图 1-10 (a)。图中肋骨与横梁及肋板的相交点因相应位于船侧板与甲板及底板的交界处,在实际情况中不会发生线位移,故在该处加上支座表示不可移动。横梁在舱口处的支座表示舱口纵梁的支持作用。



(b)

图 1-9

考虑到实际船舶中肋板的尺寸远较肋骨为大,所以计算时亦可将肋骨下端作为刚性固定端。而把肋板放到船底骨架中研究,这样就得到了仅由横梁与肋骨组成的刚架,如图 1-10 (b)。

板架和刚架这两种平面杆系虽然形式上相同,但它们所受的外载荷的作用方向并不相同,因而变形特征亦就不同,所以将分别予以研究。

最后看船底。船上的双层底是一个比较特殊的结构。整个双层底可以看作是一个夹层板,常称为“组合板”,亦可以看作是杆系结构。当把它当作杆系结构时,则将双层底视为由底纵桁和肋板组成的交叉梁系,即船底板架,这时内底板和外底板作为底纵桁和肋板的带板,如图 1-11 所示。而内底纵骨和外底纵骨则和甲板纵骨相似,在计算时可作为支持在肋板上的连续梁。

① 对于甲板纵骨,它还受到船体总纵弯曲产生的纵向力,但是我们在 §2-5 中将要指明,同时受到甲板荷重与纵向力作用的甲板纵骨,计算其应力时可以分别计算甲板荷重及纵向力作用下的结果后相加。这就是上节所述的将船体总强度问题与局部强度问题分开来考虑。这里我们仅考虑局部弯曲。

② 板架一词原译自俄文 Перекрытий,是指船体结构中板与纵、横骨架组成的结构,如甲板板架、船底板架等。由于过去这种板架大都按交叉梁系来进行计算,所以在船舶结构力学中常把板架理解为交叉梁系。因此,确切地说,板架和交叉梁系的意义是不同的。

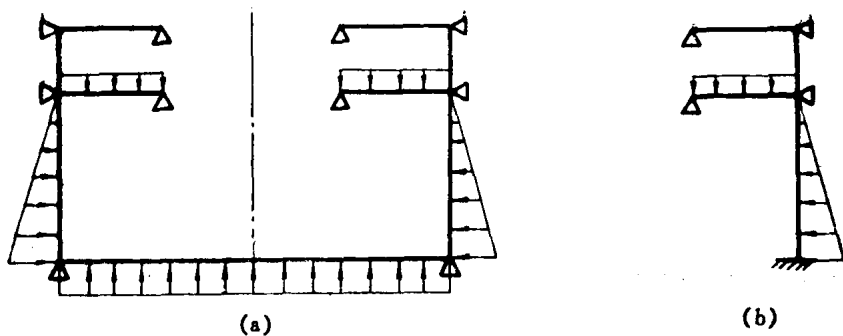


图 1-10

以上所述的连续梁、刚架和板架就是船体结构中三种典型的杆系。

在电子计算机得到应用之前，矩形平板及上述三种杆系一直是船舶结构力学研究的主要对象^①。随着电子计算机的应用，目前对空间结构和复杂结构的计算已成为可能。因此就出现有空间结构、板梁结构、船体立体舱段结构等的计算图形，图 1-12 就是大舱口货船悬臂梁结构的计算图形，图 1-13 为大型油轮肋骨刚架离散化的计算图形。目前也已经对整条船进行分析的结构计算图形。

在本书中，我们就将对以上所述的船体结构中的板、杆系及其他结构进行分析研究。在以后的教学中，本着由简到繁，由特殊到一般的认识规律，将先讨论杆及杆系的强度问题，再讲板的强度问题，最后讨论杆系和板的稳定性问题。在具体方法上，先讲结构力学中基本的“力法” (Force method) 和“位移

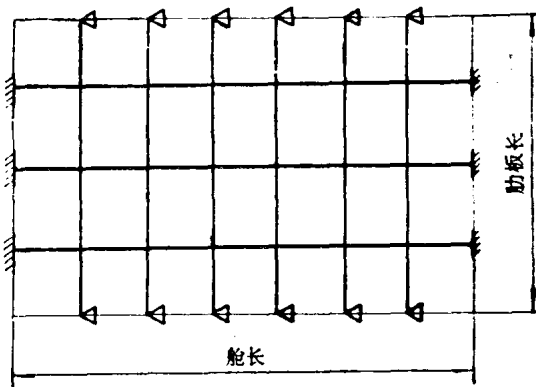


图 1-11

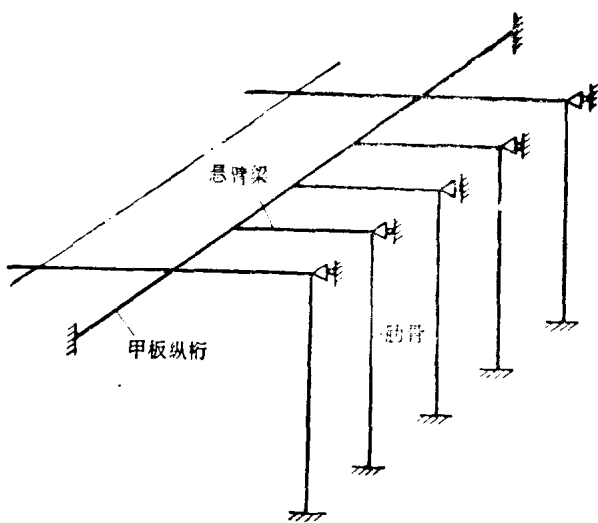


图 1-12

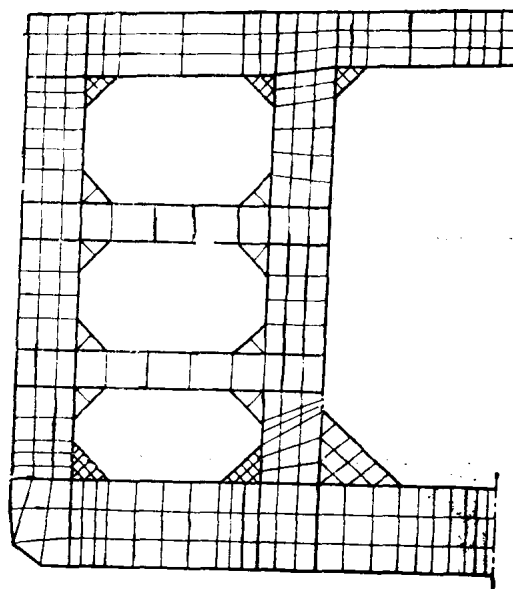


图 1-13

① 在内河驳船和工程船舶还有少量的桁架结构。

法”(Displacement method), 再讲利用结构应变能的“能量法”(Energy method), 最后则介绍用电子计算机计算的方法, 即“矩阵法”(Matrix method) 和“有限元法”(Finite element method)。

习 题


1.1 船体结构中, 哪些构件是承受总纵弯曲的? 哪些构件是承受横弯曲和局部弯曲的? 哪些构件是既承受总纵弯曲又承受局部弯曲的?

1.2 试考虑船体结构中甲板板, 舷侧外板, 内底板, 外底板及舱壁壁板各受到什么荷重?

1.3 图 1-7 为我国自行设计建造的“庆阳”型干货船的结构图。已知: 船长 148 m, 船宽 21.2 m, 型深 12.5 m, 吃水 9.2 m, 双底高 1.4 m; 上甲板厚 22 (mm, 下同), 外板厚 18, 内底板厚 16, 外底板厚 18; 上甲板纵骨为 No. 20a 球扁钢, 间距同肋距为 $s=750$; 上甲板强横梁为 $\perp \frac{12 \times 320}{22 \times 200}$, 间距 $3s$; 货舱肋骨为

$\perp \frac{12 \times 300}{16 \times 100}$, 间距 s ; 肋板厚 12, 间距 $3s$; 中桁材厚 16, 旁桁材厚 12; 内底纵骨为 No. 22 b 球扁钢, 外底纵骨为 No. 24a 球扁钢, 底纵骨间距 s ; 货舱长 24 m; 横梁长 6.6 m, 货舱肋骨长 8.1 m。试画出上甲板纵骨, 上甲板强横梁, 货舱肋骨, 底纵桁及肋板的计算剖面图形, 并算出上甲板纵骨, 货舱肋骨及肋板的剖面惯性矩。计算时带板宽度按中国钢船规范取。

1.4 一单甲板货船, 横剖面结构见图 1.1, 肋距为 620 mm, 试画出此剖面肋骨刚架(由甲板横梁、肋骨、肋板组成之刚架)的计算图形。计算时假定舱内装满货物, 计算舷外水压力时考虑波浪的影响, 计算时骨架的带板宽度取为肋距。已知: 海水重度 $\gamma_w = 10.05 \text{ kN/m}^3$, 舱内货物比重度 $\gamma = 6 \text{ kN/m}^3$, 半波高为 2.1 m 及角钢的下列断面要素:

| 断面及尺寸 (mm) | 断面面积 (cm ²) | 形心位置 y_0 (cm) | 断面惯性矩 I_x (cm ⁴) |
|--|----------------------------|--------------------|-----------------------------------|
|  120×80×8 | 15.6 | 8.15 | 229 |
| 130×90×10 | 21.3 | 8.84 | 3.62 |

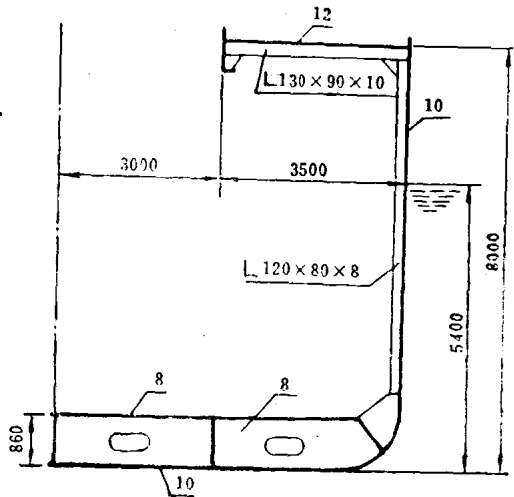


图 1.1

1.5 支持在舱壁处的骨架, 在计算时舱壁对骨架的作用是否总是可以当作刚性固定端?