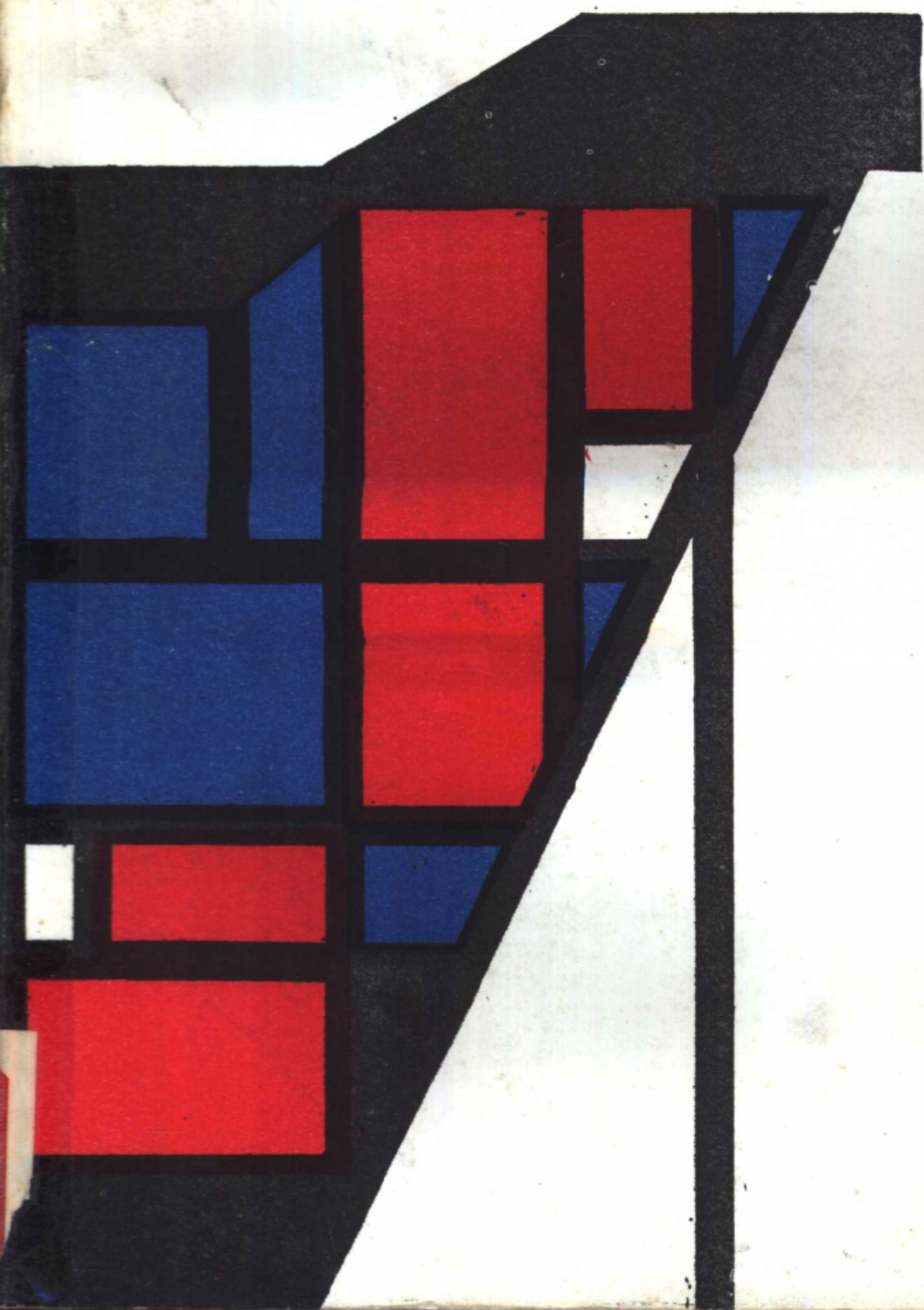


船舶结构设计

[澳] O.F.HUGHES 著

张祥孝 主译

华南理工大学出版社



CHUANANBO JIEGOU SHEJI

船舶结构设计

[澳] O.F.休斯 著

张祥孝 主译

华南理工大学出版社

内 容 提 要

本书是美国Wiley海洋工程丛书之一，著者O.F.Hughes博士现任澳大利亚新南威尔士大学造船系教授。

本书是船舶结构设计学科领域中的最新著作，内容丰富，材料新颖，包含了各国学者迄今在这个领域中所取得的大部分研究成果。

全书共十七章，系统地阐述了以响应分析和极限分析为基础，贯穿优化设计思想的船舶结构理性设计的理论和方法。书中提供了船舶结构分析和结构设计所需的大量公式、图表数据和计算程序框图。每章附有参考文献目录。

本书可作为高等院校船舶工程专业和海洋工程专业研究生和本科生的教材，也可作为船舶设计部门、研究机构和造船厂工程技术人员的参考书。

责任编辑 赵琪 方祥

SHIP STRUCTURAL DESIGN

A Rationally-Based, Computer-Aided,
Optimization Approach
O.F.Hughes

船舶结构设计

〔澳〕 O.F.休斯 著
张祥孝 主译

华南理工大学出版社出版发行
(广州 五山)
各地新华书店经销
广东韶关新华印刷厂印刷

787×1092 16开本 46.5印张 1040千字
1988年12月第1版 1988年12月第1次印刷
印数1—2000 定价9.00元
ISBN7-5623-0061-5/TB·12(课)

译 序

本书为美国近年来出版的海洋工程丛书之一。著者为澳大利亚新南威尔士大学造船系教授O.F.休斯博士。

本书系统地阐述了船舶结构设计的新的观点和方法——将船舶结构作为一个完整的系统，借助于结构分析的近代理论和结构优化设计理论，应用电子计算机，分层次地对船舶结构进行分析和设计，这就是理性设计方法。

本书着重阐述了理性设计方法的基础和组成部分，包括船体梁和船体模块的响应分析，柱、刚架、板、加筋板格和船体模块的极限分析和优化设计。书中附有大量的文献目录，其中半数以上的文献是最近十年中发表的。

本书是国外最新的船舶结构设计教材，也是一本比较系统和全面的学术著作，对于我国船舶工程和海洋工程专业师生以及船舶设计、研究和建造部门的科技工作者是一本良好的教材和有价值的参考书。

本书由华南理工大学、上海交通大学、镇江船舶学院、大连理工大学四所院校的教師合作翻译，具体分工如下：序言、第七、八、十、十六、十七章由张祥孝译；第九、十二章由徐昌文译；第三、四章由肖熙译；第六、十一章由胡毓仁译；第二、十三章由郭昌捷译；第一、五、十四、十五章分别由邢金有、俞铭华、倪小方、钟康实译。全书最后由张祥孝统稿。

华南理工大学船舶与海洋工程系倪小方、钟康实同志为本书的出版做了许多工作，研究生胡为民、瞿榕、庄鸣等同志协助校对了部分译稿，谨致谢意。

译文中不妥之处请读者指正。

译 者

1987年4月

序 言

对于像船舶这样大而复杂的结构来说，其结构设计可分为三个层次。即：概念设计、初步设计和详图设计。其中，最主要的是第二个层次——初步设计，它是本书的主题。概念设计涉及结构的拓扑，即结构的总的几何形式；初步设计确定结构的全部主要构件的尺寸；而详图设计则处理接头、开口和加强等局部的构造细节。结构的总的几何形式，通常由总体设计的要求而不是由结构的要求来确定，而详图设计则往往受到制造方法和制造要求的制约。由于局部结构具有大量的细节，而且，在不同的结构中这些细节基本上是类似的，因而，可以将这些结构细节标准化，并且按设计手册和设计规则进行设计，所以，结构设计师只是在初步设计中才需要作出大量的重要决定和选择，亦即在这个阶段中，他具有较多的机会对结构进行优化设计，使得结构最理想地符合目标并满足所有各种约束和要求。

理性设计是从基本原理出发的设计，它主要运用现代工程科学的几种工具：计算机以及借助于计算机计算才可能实现的结构分析和优化方法。因此，理性设计方法理想地适用于结构初步设计，而这种设计方法和结构设计的这个层次——初步设计正是本书的主题。如§1.3中的一些例子所表明，这种设计方法给船主、设计师、建造师和船舶操作者等有关各方均带来了巨大的利益。

从基本原理出发的结构设计要求进行两种独立和非常广泛的分析：一种是响应分析，用以确定结构对各种载荷和载荷组合的真实和完全的响应；另一种是极限状态分析，用以确定这些响应的全部可能的极限值或破坏值。到现在为止，同时进行这两种分析是理性设计的最主要的内容。本书的十七章中有十五章涉及这两种分析就反映了这一点。由于在理性设计方法中，分析的内容这样明显地占优势，因而，这种设计方法必然以计算机计算为基础，这正是这种方法具有快速、准确、详细、节约和容易调整等许多优点的关键。另外，如在§1.3中所述，这个方法所必需的计算机程序都已经是现成可用的，硬件和软件的价钱都不昂贵。

在结构初步设计的许多不同的项目和内容中，有些是理性设计的固有部分（如响应分析和极限分析中的某些内容），而另一些则是更独特的外加部分（如材料选择）或者就是优化过程中的约束（如避开某个自然频率）。理性设计方法的优点之一是它将这许多不同的方面统一和协调起来了。它甚至为更加独特的或外部的几个方面提供了一个框架，通过这个框架，可将上述每一个方面同另外的几个方面更好地协调。

因为初步设计具有这样多的内容，根本不可能在一本书中详尽地讨论全部问题，所以，著者的计划是将这些内容安排在两本书中，本书是其中的第一本。这本书涉及理性设计的方法论以及理性设计的两个主要组成部分：响应分析和极限分析。叙述这些内容时，将采用这样的方式，即使得这本书是完整的，在对内容的理解上，不依赖也不要求参阅第二本书。

学习基础、水平和时间要求:

本书的内容适合于研究生和大学生学习。学习本书的基础只是固体力学、材料力学、矩阵代数和统计学的基本知识。必要时,后两项内容可通过几堂介绍课或通过课外阅读来掌握。讲授本书的全部内容的总时数约为136学时^①。对于大学生和仅具有基本知识的学生,可略去第四、六、十、十五和十七章以及简略地介绍第八章和第十六章,总时数约为102学时。对于已学过结构分析中的某些内容(如柱、板的弯曲和屈曲、刚架分析以及有限元法)的学生,则可略去第五、七、九、十一和十二章而简略地介绍第六章和第十章,总时数约为68学时。

O.F.Hughes

于澳大利亚、悉尼

1983年6月

^①原文意为授课一学期,每周8学时。——译者注

目 录

第一章 结构理性设计	(1)
§ 1.1 引言.....	(1)
§ 1.2 结构设计的基本内容.....	(6)
§ 1.3 方法的实用性和效能.....	(31)
§ 1.4 结构安全度.....	(40)
§ 1.5 概率设计方法.....	(43)
§ 1.6 载荷系数及破坏的严重程度.....	(54)
参考文献.....	(58)
第二章 载荷、响应、极限状态和优化	(61)
§ 2.1 作用在船舶上的载荷.....	(61)
§ 2.2 结构响应分析的类型.....	(66)
§ 2.3 船体模块和主要构件分析.....	(68)
§ 2.4 结构破坏的基本类型.....	(71)
§ 2.5 总体结构的极限状态.....	(78)
§ 2.6 船体模块极限强度的分析方法.....	(80)
§ 2.7 大型结构的优化.....	(84)
§ 2.8 极限状态分析与结构优化.....	(90)
参考文献.....	(91)
第三章 作为等直梁的船体梁响应分析	(93)
§ 3.1 载荷、剪力和弯矩之间的基本关系.....	(93)
§ 3.2 重量分布的估算.....	(96)
§ 3.3 静水弯矩的计算.....	(99)
§ 3.4 对重量变化的校正.....	(100)
§ 3.5 波浪载荷的近似设计值.....	(103)
§ 3.6 船体梁的弯曲应力.....	(106)
§ 3.7 船体梁剪应力的计算.....	(137)
§ 3.8 剪切效应和其它导致偏离简单梁理论的影响.....	(148)
§ 3.9 主船体与上层建筑之间的相互作用.....	(154)
参考文献.....	(156)
第四章 波浪载荷的统计的、动力的和非线性的特性	(158)
§ 4.1 概率的基本要素.....	(159)
§ 4.2 随机过程.....	(165)
§ 4.3 极值：特征极值的估算.....	(176)

§ 4.4	波浪表面的统计表示法	(182)
§ 4.5	船舶对随机波浪的响应计算	(196)
§ 4.6	船舶响应设计值的计算	(215)
	参考文献	(224)
第五章	刚架和板架的矩阵刚度分析	(228)
§ 5.1	基本概念	(228)
§ 5.2	桁架	(238)
§ 5.3	刚架分析中的梁元	(249)
§ 5.4	在板架和侧向承载的板格分析中的应用	(268)
§ 5.5	一般的梁元	(272)
	参考文献	(279)
第六章	作为非等直梁的船体梁响应分析	(281)
§ 6.1	等直薄壁梁扭转综述	(283)
§ 6.2	等直薄壁梁元的扭转刚度矩阵	(296)
§ 6.3	船体分段单元的刚度矩阵	(300)
§ 6.4	船体梁剪切效应的实用计算方法	(303)
	参考文献	(309)
第七章	有限元法的基本内容	(311)
§ 7.1	目的、途径和范围	(311)
§ 7.2	方法的基础	(312)
§ 7.3	等应力的三角形元(CST)	(315)
§ 7.4	线性应变的矩形元(LSR)	(326)
§ 7.5	等剪应力的矩形元(CSSR)	(330)
§ 7.6	形函数和等效节点力	(337)
§ 7.7	四边形的等参元	(338)
§ 7.8	用有限元法作动力分析	(340)
	参考文献	(342)
第八章	船体模块的模型化和弹性分析	(344)
§ 8.1	关于结构模型的几点考虑	(344)
§ 8.2	结构的对称性和载荷的对称性	(347)
§ 8.3	与板相连接的梁的模型化	(360)
§ 8.4	加筋板格的模型化	(369)
§ 8.5	船体模块的结构模型化	(382)
§ 8.6	接头和肘板的表示方法	(389)
§ 8.7	超元的定义和应用	(407)
§ 8.8	双层结构的近似模型化	(414)
	参考文献	(425)
第九章	板的弯曲	(427)

§ 9.1	小挠度理论	(427)
§ 9.2	弹性范围内弯曲应力和薄膜应力的合成	(435)
§ 9.3	超过弹性极限的承载板	(441)
§ 9.4	以容许永久变形为基准的板的设计	(450)
§ 9.5	大挠度分析	(464)
	参考文献	(471)
第十章	正交异性板的弯曲理论及其在双层板格分析中的应用	(473)
§ 10.1	正交异性板计算方法的精确度和适用性	(473)
§ 10.2	考虑剪切挠度的正交异性板的弯曲分析	(475)
§ 10.3	几种方法的计算结果同试验结果的比较	(497)
	参考文献	(502)
第十一章	柱子的屈曲和极限强度	(504)
§ 11.1	基本理论综述	(504)
§ 11.2	柱子的设计公式	(512)
§ 11.3	梁柱: 侧向载荷的影响	(516)
	参考文献	(521)
第十二章	板的屈曲和极限强度	(522)
§ 12.1	承受单向压缩的弹性板	(522)
§ 12.2	其他边界条件	(526)
§ 12.3	承受双向压缩的弹性板	(531)
§ 12.4	其他类型的面内载荷	(533)
§ 12.5	面内压力与侧向载荷的组合	(539)
§ 12.6	板的极限强度	(551)
	参考文献	(566)
第十三章	加筋板格的弹性屈曲	(570)
§ 13.1	纵向加筋板格	(571)
§ 13.2	横向加筋板格	(583)
§ 13.3	由剪切引起的屈曲	(584)
§ 13.4	在压力和剪力联合作用下纵向加筋板格的屈曲	(586)
§ 13.5	交叉加筋板格的屈曲	(588)
§ 13.6	用于进行板格总体屈曲分析的离散梁方法	(596)
	参考文献	(602)
第十四章	加筋板格的极限强度	(604)
§ 14.1	边界条件、载荷类型和崩溃模式	(604)
§ 14.2	崩溃模式	(610)
§ 14.3	加筋板格的极限应变	(620)
§ 14.4	理论分析与试验结果的比较	(621)
	参考文献	(632)

第十五章	结构的不稳定性：非线性刚架分析和非线性有限元分析	(634)
§ 15.1	载荷与挠度之间的相互作用：几何刚度矩阵.....	(634)
§ 15.2	迭代有限元分析.....	(638)
§ 15.3	一般梁元的几何刚度矩阵.....	(639)
§ 15.4	分叉型屈曲：特征值方法.....	(643)
§ 15.5	与板相连接的梁.....	(654)
§ 15.6	非分叉型屈曲：非线性有限元分析.....	(659)
	参考文献.....	(662)
第十六章	塑性刚架分析	(663)
§ 16.1	塑性理论及其在梁中的应用.....	(663)
§ 16.2	梁或承受横向载荷的加筋板格的崩溃.....	(668)
§ 16.3	增量的塑性刚架分析.....	(677)
§ 16.4	直接塑性刚架分析.....	(696)
	参考文献.....	(706)
第十七章	船体模块的极限强度	(708)
§ 17.1	船体强度分析的基本特点.....	(708)
§ 17.2	纵向极限强度分析.....	(710)
§ 17.3	横向极限强度分析.....	(719)
	参考文献.....	(732)

第一章 结构理性设计

§ 1.1 引言

当前,我们正面临船舶结构设计原理与实践发生逐渐的然而又是意义深远的变革。由于对更有效的船舶运输的需求日益增长,已经使船舶尺度、类型和建造方法产生了重大变化。例如,1960年以后出现了许多新型船舶,像液化天然气船、多体船、载驳船、滚装船、气垫船和水翼船。几乎可以肯定,这一变革进程将继续进行下去,因为有许多因素引起并促进着这种变革。其中有:

运输危险货物,需要相应的防止污染的措施和足够的安全性。

新的贸易方式、货物或任务提出了特殊问题,或导致非常规的船舶形状或尺度。

由于标准船舶设计的发展,造船批量大,所以要求船舶具有更高的经济性能。

为了开发海洋资源和对海洋其它方面的利用,需要发展各种类型的浮式结构。

现代船舶的复杂性以及对船舶的可靠性、效率和经济性的更高要求,需要有一个科学的、强有力的和通用的船舶结构设计方法。在过去,船舶结构设计主要是经验性的设计,它以所积累的经验 and 船舶的特性为基础,而设计方法则以各船级社颁布的结构设计规则或规范的形式表示出来。这些规范为计算船舶结构尺寸提供了许多简单方便的公式。这种方法节省了设计时间,而且因为船舶必须获得船级社的认可,所以也节省了审查的时间。

然而,完全按规范进行设计的方法存在着一些缺点。首先,由于结构破坏模式多种多样、复杂而又互相关联,而使用规范中的简化公式时,抵抗破坏的安全裕度仍是未知数。因而,设计者就分不清结构是恰当的还是保守的。所以,这些公式不能给出真正有效的设计,而且在某些情况下,额外增加的钢材会明显地提高船舶的寿命期中的营运成本。

第二,这些公式的目的只是避免结构破坏,但是为了达到这个目的,通常有几种方法。因而采用隐含在规范公式中的特殊方法,对于船主的特定目标,或者船舶的特殊用途和经济环境,可能不是最合适的。一个好的设计方法应能确定一个目标,能动地趋近这个目标,并且尽可能达到它。

第三,也是最重要的一点,这些公式中包含了大量的简化假设,因而只能在一定的范围内应用。超出这些范围,它们就可能不准确。在结构设计(如船舶、桥梁和飞机)的历史中有大量的结构破坏实例,它们都是采用标准的、久经考验的方法或公式设计的,却因没注意到已超出其有效范围而破坏了。

正是由于这些原因,出现了采用“理性”结构设计(“rationally-based” structural design)的一般趋势,结构理性设计可定义如下:

直接地和完全地基于结构理论以及采用以计算机为基础的结构分析和优化方法,并

按照设计者选定的价值衡量标准，获得一个最优的结构。

因而，理性设计包括对结构的寿命期中影响结构安全与性能的全部因素进行彻底的和精确的分析，并且结合结构要达到的目标综合这些信息，产生既保证足够安全又达到最优目标的设计。虽然这个过程要涉及到大量的计算，但是可以通过应用计算机来弥补。由于这个缘故，结构理性设计必然是以计算机为基础的、半自动化的设计。

这种类型的设计首先在航空和航天结构中得到发展和应用，并且在这些领域中继续得到广泛的应用。其原因是这些结构的重要经济指标是结构重量，也就是结构效率；此外它们还明显地要求结构有高度的可靠性。对于陆上结构，由于一系列钢质箱形梁式桥梁结构的破坏，在七十年代向着这种方法发展的设计曾得到强有力的推动，因为那些破坏说明了，对于较大和较细长的桥梁，现有的以经验为基础的设计规范是不合适的。在海洋环境中，这种方法的初步形式已经用于近海结构的设计中，一部分原因是这里很少或根本没有先前的经验可循，另一部分原因是它涉及到很大的经济风险。在这个领域内以及在船舶结构领域中，船级社已在鼓励和大力资助发展理性设计方法。

毫无疑问，理性设计不是完全自动的设计即“黑箱”过程，也就是说在理性设计过程中，设计者的作用并非只是提供输入数据，然后这个过程就给他一个完美的设计。完全自动的设计要求所有的设计决策——目标、准则、重点、约束等等，必须在设计开始前做出，并且必须将其中许多决策编入程序中。这样设计者甚至难以了解这些决策过程，更不用说控制它们了。很自然，理性设计应当是人机交互的。设计者必须保持“监视”的状态，而且根据中间的结果能改变他的目标、准则、约束、重点等等。因此，一个理性设计过程应当允许设计者在必要时中断计算、返回前面的步骤、改变计算顺序、调出更多的信息、越过几步计算等等。

从前面的所有讨论中我们清楚看到，与过去的设计方法相比，理性设计给予设计者以更大的创造余地、能力和效率。但是我们也清楚地看到，这种方法较之规范设计方法需要更大型更复杂的计算设备。因此，对于常规类型的船舶，在很多情况下比较简单的规范方法将继续得到应用^①。何况随着各种新的应用越来越为人们所熟悉和彻底了解，有可能发现简化和捷径，从而逐渐发展成为一部新规范——一组新的规范条款，它产生的设计可充分接近由理性方法所得到的设计。这样，两种方法互为补充，而且优秀的设计者可根据给定条件采用二者中更适宜的方法。

§ 1.1.1 初步设计与详图设计

在船舶结构中，如同在许多结构中一样，主要尺度通常不是由结构因素所决定，而是由更一般的条件，象船宽和吃水限制、必需的货舱容积等等所决定。由于这个原因，通常在结构设计开始时就已经知道主要尺度，因而设计者只须确定出全部的构件尺寸，使得在最低成本(或者所选择的其它目标)的条件下有足够的强度和安全性。结构设计由显著不同的两个阶段组成：

(1) 初步设计^②，它确定主要构件的位置、间距和尺寸。

^① 特别是对于小船(例如船长小于50m的船)，在许多情况下理性设计方法的计算量和困难超过它所带来的效益。

^② 对于军舰则称为“合同设计”。

(2) 详图设计, 它确定局部结构(肘板、连接、开口、加强等)的几何形状和尺寸。

在这两个阶段中, 理性设计方法对于初步设计更为适宜, 因而更有潜在效益, 因为:

(1) 这个阶段对结构设计影响最大, 因此节约的潜力很大。

(2) 这个阶段为详图设计提供输入数据, 而后的效益受到这些输入数据的强烈影响。

事实上, 理性的初步设计可提供几种潜在的效益。§ 1.3中所引用的油船设计实例说明了这种经济效益。这里, 理性设计方法的设计较之通常的标准设计, 可节省6%的船舶结构成本(即对于大型油船, 可节省一百多万美元), 而且由于船体重量减少而使载货能力增加, 可带来数量更大的额外收入。由于船体重量减少和(或)重心高度降低, 军舰可以获得更大的战斗力。由于船舶设计者可大大地提高其设计能力和效率, 从而能把更多的精力集中在设计概念与创造性方面(也是影响、收效更大的方面)。最后, 在船舶结构安全与可靠性方面也可得到相当的益处。

但这并不意味着详图设计与初步设计相比不太重要, 对于要获得高效、安全和可靠的船舶来说, 两者是同等重要的。这里, 应用工程科学的现代方法同样可获得许多效益, 但是这些应用与初步设计是不相同的, 因而效益也不相同。因为要设计的构件相对很小, 有可能做实尺试验, 又因为它们重复率较高, 有可能由批量生产、标准化、工艺方法等获得效益。事实上, 在详图设计中制造方面的因素是首要的。

还有, 由于详图设计中的大多数结构项目对各船都相似, 所以营运经验可为详图设计提供合理的基础。事实上, 因为这些项目的数量很大, 所以企图按着基本原理来设计它们将是低效的。相反地, 使用由经验得到的设计规范和设计标准, 一般会更有效。换句话说, 详图设计非常适于使用规范方法, 而各船级社颁布的规范就包括了大量有关局部结构、构件连接和其它结构细节设计的有用资料。

§ 1.1.2 本书的宗旨和范围

正如在序言中所指出的, 本书是关于船舶结构设计的两本书中的第一本, 它描述了理性设计的方法论并且分析了这种设计的各个方面。由于我们已经定义了“理性”这个词, 而且还指出了初步设计与详图设计的区别, 我们可以对这两本书的宗旨和范围作更具体的介绍。第一本书的宗旨是双重的:

(1) 给出理性的船舶结构初步设计的基本的和必要的方面, 在讨论中按着完整和统一的方式, 假定读者仅学过工程学科的基本课程, 如理论力学和材料力学。

(2) 给出理性设计的方法论, 而这个方法是实用的、有效的、通用的, 而且据此编制的计算机程序已经过了考核和验证。

第二本书的宗旨和大概的范围是:

提供有关船舶结构设计的其它基本方面的资料, 如结构形式的选择、特殊子结构设计、结构优化(特别是实用的、面向设计的各个方面)、材料选择、振动、生产设计、焊接和一些详细设计方面(特别是疲劳)的研究, 并且在所有这些方面中, 特别注重计算机辅助设计。

上述第一本书自成体系，它包括了设计者所必需的理性设计的全部基本知识，甚至象刚架分析和有限元方法这样的基本知识。这样做有两方面的原因：首先，因为这本书主要打算成为一本教科书，而在船舶结构方面这样的书太少了。长期以来，这个方面的学生不得不参考大量的各种书籍和资料，以便获得他们需要的理论和方法，但是这些书刊往往又不适合船舶方面的应用。因为理性设计非常复杂和深奥，所以缺乏一本统一和综合的教科书会相应地给学生们造成巨大困难和成为在这个领域中发展的障碍。

第二个原因是，这里所讨论的无论是一般还是特殊的理性设计方法都与传统的规范设计法有着根本的不同，虽然它的许多特征为设计者所熟悉(例如，刚架分析、有限元分析以及弹性屈曲)，但其它一些特征中，既有比较新的(例如，非线性有限元理论和波浪载荷统计预报)，也有全新的(例如，采用船体模块作为设计的基础或对象、结构模型化的一些新技术以及船体模块极限强度的分析方法)。

由于这个原因，本书也打算写得适合于从事实际设计的人员阅读，因为他们非常想了解截然不同的另外一种设计方法。实际上，在这里书的作用特别重要，因为很自然，学习理性设计至少需要了解这种设计的理论和方法的基本知识。一旦把这些知识学到手，这个方法的巨大能力(其中一些在§1.3中和该处引用的参考文献中得到证明)就能为设计者所利用。何况，这个方法应用的广度和从中获得收益的增加与对该方法的理解深度成正比。作者希望，本书所提供的基础理论和分析方法，将帮助设计者从这个新方法中获得尽可能多的好处。

作者还要强调，这里介绍的设计方法并非唯一满意的方法，至少对那些为完成基本任务而采用的具体方法来说是这样的，例如，结构模型化技术和构件极限分析方法。虽然，这里介绍的方法是因为适合理性设计才选择和推导出来的，但是，这种类型的设计涉及到许多不同领域，而那里势必会出现一些特殊的方法和技术，它们同样是好用的，甚至比这里介绍的更好。何况，随着一些方面的进展，象结构理论，数值方法以及计算机软硬件，将会产生更好的方法。但重要的是，由于多年来船舶结构领域内外许多人和组织的努力，使得理性设计中所包含的各个组成部份都成为可实用的了。

§1.1.3 对军舰设计的适用性

这里介绍的理性设计方法的另一个重要特征是，它对军舰和商船同样适用。由于入级规范只适合于商船，不适合于军舰，所以各国海军和军舰设计部门都已经制订了自己的结构设计方法。象入级规范一样，这些方法已经形成很长时间了，而且其中许多已经被综合和规范化成为设计手册的形式——一种与规范相当的海军用的技术文件。但是因为要求高效结构和其它特殊条件，军舰设计方法比起规范设计，一般是更完备更严格的，因而表现出更强的倾向于理性设计方法的趋势。除了设计手册以外，许多现行的军舰设计方法已经包括了理性设计的一些基本特征，虽然还未能成为一种完整的设计方法。

§1.2概述了理性设计方法的基本特点，其中包括讨论商船和军舰的不同目的、衡量标准和设计准则。§1.3讨论了理性设计方法的能力、应用以及一些实例。在讨论了这个方法的各个方面以后，就能清楚地看到，这里给出的方法用于两种船舶其效果同样

好，并且它特别适合军舰设计的要求。由于商船非常普遍，本书中许多说明和插图都涉及到这种船舶。所以尽管全面的评价只有在读完§ 1.2和§ 1.3之后才能得到，看来在这里有必要先做一个扼要的说明，阐述一下为什么这种理性设计方法特别适合军舰设计。

首先，军舰结构受到许多特殊要求和约束的限制。例如，它必须能够承受一定程度的爆炸和冲击以及其它特殊载荷。而且它还必须有安全裕度，即能经受得起某种结构损伤而不至于丧失主要功能。正如在§ 1.2中要讨论的那样，军舰作战任务的要求使得在各种约束(例如，造价、足够的强度和安全性、抵抗损伤的能力)允许的范围内，尽量降低结构的重量和重心垂向位置显得极其重要。因此，这里非常需要结构优化，这也正是理性设计的基本特点之一。

当然，为了获得真正的最优结构，还需要考虑理性设计的其它方面。特别是，理性设计明确地计算每一载荷效应及其极限值，而且把规定的安全裕度加在每一个单独的极限状态上。相比之下，目前的军舰设计方法使用了特别定义的“设计载荷”和一些典型的或象征性的极限状态(为了保持一般性和方便计算已做了简化)，再加上一些一般的要求，象最大许用应力之类。因为没有计算出真正的具体载荷效应和极限值，就不能准确地知道真正的安全裕度。所以，在象征性极限状态中必须使用较大的安全裕度，以便使在真正极限状态中安全裕度不为零或负值的概率足够大。这样就不可避免地要消耗过多的材料。相反，理性设计明确地考虑各种极限状态，它不必消耗过多的材料就可以达到相同的安全度。

最后，值得注意的是，理性设计方法既可处理商船又可处理军舰的能力，将有助于统一船舶结构设计这一领域，因为到目前为止，这一领域一直明显地分成独立的两个部分。

§ 1.1.4 对其它类型结构的适用性

在这本书中，理性设计方法的论述纯粹针对船舶进行。然而，因为这个方法代表了最基本最一般类型的工程设计，所以这里发表的材料同样适用于其它方面的多种钢结构，包括固定式结构和浮动式结构^①。用于分析其它钢结构的全部基本原理和绝大部分分析方法都和用于分析船舶的相同，因而本书的适用范围可以扩展到这些类型的结构，而不需要对方法作任何根本性的变动。不过，这样做需要再考虑一些载荷类型和破坏模式，还得增加一些新例子来说明对这些结构的应用，因而会过分地增加本书的篇幅。

§ 1.1.5 方法的实用性

理性设计必然要以计算机为基础，因此这就引起很多实际问题，诸如计算机程序、精度、经济性、可用性、使用方便性、文件编制等等。这些都是重要的问题，因而在§ 1.3中详细讨论。但是因为实用性对一个设计方法来说非常必要，所以应当在这里指出，这个方法已发展十几年了，在这个期间内，根据这个方法同时开发了计算机程序。这个程序称为MAESTRO^②，而它的雏型曾称为SHIPOPT。MAESTRO曾被彻底地

① 例如，在文献[1]中曾把这里发表的方法用于大型钢质箱形桥梁的结构优化。

② Method for Analysis, Evaluation and Structural Optimization (分析、评价和结构优化的方法)

考核和验证其基本特性,其结果已经载入技术文献中,表明MAESTRO是极其有效、通用、经济、易于使用的。已发表的船舶设计应用实例有14000吨普通货船、96000吨油轮、140000吨散货船和一艘驱逐舰。在所有的情况下,用该程序计算一个最优结构设计只需要几分钟,而且计算成本很低。除了用于优化设计外,MAESTRO的分析部分用来评价一个给定的设计,评估一个设计和一艘实船的修改,或估算一艘船遭受损伤的严重程度。该程序对于船舶结构的研究和船舶结构设计的教学也是一种有价值的工具。它的全部细节将在§1.3和该节所引用的参考文献中给出。

§1.2 结构设计的基本内容

工程中最常见和最重要的概念之一就是系统,从简单的装置到巨大的由多个子系统组成的多级复杂工程都可称为系统。

船舶是相对较大和较复杂的系统的一个显著的例子,而且在大多数情况下,船舶本身又是更大的系统的一部分。船舶由许多子系统组成,每个部分对整个系统都是不可缺少的,例如,推进子系统、装卸货子系统等。船舶结构可看作是一个子系统,它提供了一个实际的空间,借此其它子系统可以结合成一个整体,并且在航运中得到足够的安全和适当的基础。

一般来说,一个工程系统的设计可以定义为:

为了分析系统对其环境的响应(内部的和外部的),用精确的模型来表达该系统,而且使用优化方法来确定该系统的特征,使之理想地达到规定的目标,同时还要满足指定的对该系统的特征和响应的约束条件。

将这个定义应用于船舶结构初步设计,则可将理性设计程序描述如下:

- (1) 用适当的统计方法尽可能精确地预测外载荷。
- (2) 对整个结构和全部载荷工况精确地计算载荷效应和载荷效应的极限值。
- (3) 载荷效应及其极限值之间所需要的最小安全裕度全部根据所要求的安全度来选择。
- (4) 将总的强度要求表达为关于设计变量的数学约束方程(大多数情况下是非线性约束)。
- (5) 设计者可自由地指定对结构评价的指标,即用来衡量最优结构的准则,以及各设计变量对评价指标的影响。除了与强度有关的约束外,设计者同样还能够指定任意数量的其它设计约束,不管什么形式都可以。
- (6) 用优化方法自动而且有效地求出各设计变量值,并使评价指标达到极大值,同时还满足全部约束。

从对理性设计过程的这个描述中,可以看出共有六项基本任务:

- (1) 环境载荷计算。
- (2) 总体响应分析。
- (3) 子结构响应分析。
- (4) 极限状态分析。

- (5) 结构可靠性约束的表达。
- (6) 大型非线性优化问题的求解。

图1.1说明了由这六项任务组成的全部设计过程。它们都是很艰巨的工作，特别是对于象船舶这样的大型结构。因此在开发性设计的过程中，主要困难或挑战是开发一种方法，它在许可的总工作量和总计量成本内，能以所要求的精度和彻底性完成这些任务。为了更准确地定义和概略解释它们的任务，现在简要地考察上述每一项任务。

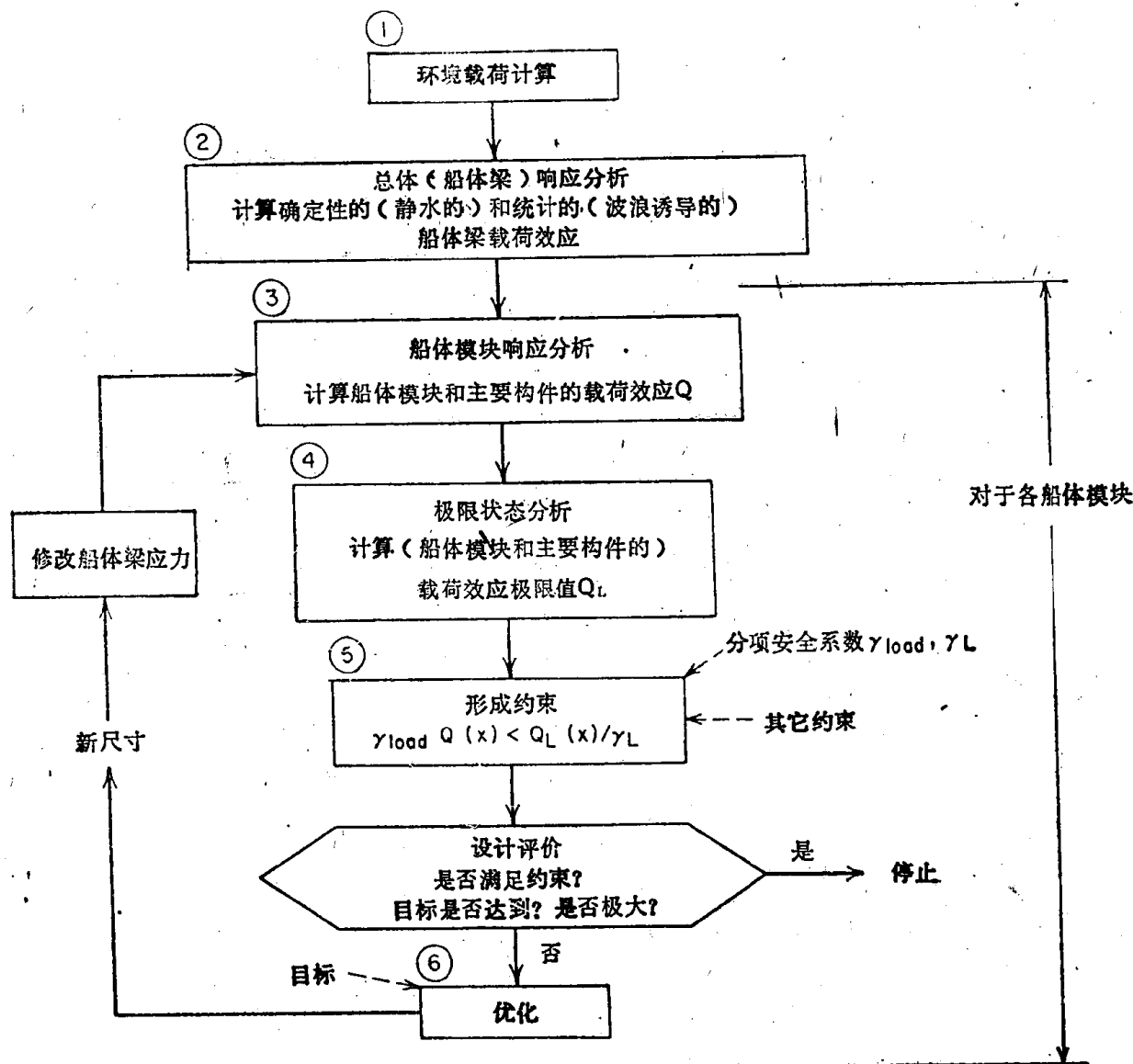


图1.1 结构理性设计

§1.2.1 环境载荷计算

环境载荷既有静载荷也有动载荷，它们来自船舶环境(主要由于重力和流体压力)和船舶运动。这些载荷中的大多数与结构设计相对独立，即它们受结构布局或尺寸的影响不太大，主要受船体形状、货物的种类和分布以及其它非结构因素的影响。所以，虽然计算这些载荷是结构设计的第一步，而且也是整个过程中最重要的方面之一，但是它基