

# 船舶结构设计概念

[美] J. H. 伊万斯 主编

陈穗康 王兴飞  
桑国光 陈伯真 夏永年 译

国防工业出版社

U662  
Y39

· 227470

# 船舶结构设计概念

[美] J. H. 伊万斯 主编  
陈穗康 王兴飞  
桑国光 陈伯真 夏永年 译



国防工业出版社

## 内 容 简 介

本书为美国和英国一些造船界知名学者编写的船舶结构分析和设计方面的论著。全书共25章，内容遍及结构设计概念、原理、方法、环境和工艺，以及材料选择、经济分析等，内容广泛，概括性强。对船体结构设计的发展方向也作了较深入的介绍。书中提供有船舶结构设计中所需的标准、公式、数据和图表等，并有大量的参考文献。

本书可供造船设计工作者、科技人员以及高等院校师生参考。

SHIP STRUCTURAL DESIGN CONCEPTS  
J. Henry Evans  
CORNELIUS MARITIME PRESS, INC. 1975

### 船舶结构设计概念

〔美〕J. H. 伊万斯 主编

陈穗康 王兴飞 译  
桑国光 陈伯真 夏永年

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 × 1092<sup>1/16</sup> 印张 32<sup>3/4</sup> 769千字

1985年8月第一版 1985年8月第一次印刷 印数：0,001—1,400册

统一书号：15034·2808 定价：6.00元

## 译 序

本书为美国麻省理工学院与美国海军船舶工程中心签订的“船舶结构设计准则”任务的最终研究报告，由麻省理工学院 J. H. 伊万斯教授主编，是当前船舶结构设计方面的重要著作。

本书详尽地阐述了船舶结构的观点和方法，论证了船舶建造规范的有关规定，提供了结构设计中实用的公式、数据、标准和图表，还着重介绍了船舶结构设计的新方向，例如船舶结构的可靠性分析及计算机自动结构综合和最优化方法的应用等。书中并附有大量的参考文献，因此是一本对造船设计工作者极有参考价值和指导意义的书。

由于原书涉及面广，概括性强，书中内容遍及结构设计的概念、原理、方法以及工艺、腐蚀、焊接和经济分析等方面，因此全书二十五章分别由十位作者撰写。各作者的内容编排，章节符号等并不统一，主编人看来亦尊重了各作者的原稿，并未在文字和格式上加以修饰。所以在翻译时亦只能尽量忠于原著作的特点，保留了各章的原来风格，不能做到全书文风和格式统一，希读者鉴谅。

本书翻译的分工如下：序言、第二、三、十五、十七至二十、二十四、二十五章由陈穗康译；第一、七至九、十一、十三、十四章由桑国光译；第二十一至二十三章由陈伯真译；第四至六章由王兴飞译；第十、十二、十六章由夏永年译，并经相互校稿。全书最后由桑国光、陈伯真统稿。

在翻译中得到杨代盛、裘晓星等同志的关心和帮助，特致谢意。

译 者

## 目 录

|       |                          |     |
|-------|--------------------------|-----|
| 第一章   | 船舶结构设计展望 .....           | 5   |
| 第二章   | 结构分析和综合的概念性模型 .....      | 11  |
| 第三章   | 载荷源和设计载荷 .....           | 21  |
| 第四章   | 船舶摇摆力 .....              | 34  |
| 第五章   | 船体的载荷状态 .....            | 43  |
| 第六章   | 纵弯曲的确定性计算方法 .....        | 50  |
| 第七章   | 求波浪弯矩的统计方法 .....         | 96  |
| 第八章   | 船体梁损坏模式 .....            | 112 |
| 第九章   | 材料选择 .....               | 125 |
| 第十章   | 船舶的脆性断裂 .....            | 128 |
| 第十一章  | 设计基本原理 I ——材料选择 .....    | 134 |
| 第十二章  | 船舶结构的断裂控制方案 .....        | 137 |
| 第十三章  | 安全裕度 .....               | 143 |
| 第十四章  | 船体梁的可靠性 .....            | 167 |
| 第十五章  | 设计基本原理 II ——结构设计衡准 ..... | 212 |
| 第十六章  | 腐蚀机理、腐蚀防护和损耗裕量 .....     | 237 |
| 第十七章  | 船舶主要结构的综合 .....          | 267 |
| 第十八章  | 结构综合和优化方法的应用 .....       | 301 |
| 第十九章  | 利用剖面法进行自动船中剖面综合 .....    | 310 |
| 第二十章  | 用板架结构综合法进行自动船中剖面综合 ..... | 338 |
| 第二十一章 | 焊接板架的压缩强度 .....          | 385 |
| 第二十二章 | 焊接板架在复合载荷下的强度 .....      | 436 |
| 第二十三章 | 梁与板的塑性性质 .....           | 457 |
| 第二十四章 | 总体最优化准则 .....            | 476 |
| 第二十五章 | 结构设计中寿命周期内的初步费用预估 .....  | 500 |

## 序 言

在一切竭力探求的领域里，“分析”（或鉴定）的理论知识和手段已得到充分地发展。但对建设性的、反演的“综合”概念却理解得很不够。不想对它们作重要性方面的评判，因为两者对于创造性的“设计”过程是相互补充和必不可少的。当然，把它们彼此分离开来实际上是不可能的。

在船舶结构设计范围内更好地理解总的过程，特别是综合阶段，已成为我们这个有着海军和商业背景的作者小组的目标。现在，在持续一段时间的评论、研究和应用之后，在此用一些明确的指示确定出运用它们的主体思想。希望对概念能引起广泛的推敲，能征求到各种评论，见识能得以分享，以及在整个设计企业内部着重相互关系的论述是有指导性的。正如一切“初等的”系统设计一样，初始的（并且经常是决定性的）综合功能很少得以实现，以致综合本身的独特要求没有广泛地被领会。但是，综合对理解结构设计的所有环节中包含的原理、进而认识由此带来的价值是很有意义的。

必需时，为了不破坏过程的流程图，优先表达仍有争论的问题，或者作出看来是最合理的设计假定。但是注意阐述这些问题的分歧点。由于力求把往往是不相关的知识汇总统一起来，一些细微不协调的地方在所难免。不过总是作出努力，以最可靠的办法把它们消除。设计过程中的矛盾意见，除了根据这些意见的技术完善性进行检验外，还要根据它们在可行性、有效性或方便性方面的相对价值进行检验。在任何情况下，似乎更有成效的是首先探索设计路线，然后再铺路基。所作的评论和所持的态度不是最终的见解，而是一种初步的、相互联系的评价方法的主体。目的是使其在每一情况下澄清：大部分概括性的估算只用于第一循环，最终要以不断提高的精度直接从发展中的设计得到的确实数据来代替。

对熟悉这领域知识的人们来说，叙述某些研究成果似乎是多余的。但是获悉在类似方面没有初步的论述，并且要为未入门者的需要提供必要的条件。因此讨论中包括所有的基本步骤。

为了首先达到一个能实现的近期目标而确定了这个很艰巨任务的范围。因此，明确规定只涉及船中处纵向连续的主要构件和载荷，并明确地删去诸如考虑剪应力的内容，这对于本设计规定并非绝对必不可少的。另外，正如前面指出的，几乎全都注重于整个设计过程的第一阶段或综合阶段，这时尽可能依靠采用相当严格的结构力学方法，尽可能用接近于封闭解的形式选择初始尺寸，就可以和直接求解的要求以及每一特定阶段必要精度的容许偏差相适应。尽管压缩了选用的范围，但所包含的领域仍然很广泛，为了保持是一个易控制规模的方案，看来必须对论述经常作这样的精简，使得形成概述多于全面深入讲解的结果。不过，这应当有助于保持推理的主要途径不混乱，并指望精选的文献能消除某些存在的缺陷。

以非常专门的术语讨论题材（如在第十七章）归根结底打算用作说明、突出重点和把程序性的建议付诸检验。运用也暴露出有疑问的地方，并且直接指出需要研究的项

目。不过，最终的目标常常是更为长远和广泛的，即除了结构本身，人们怎样考虑设计呢？什么样的概念是有用的？什么是合格评价的基础呢？

前二十章以设计环境和设计载荷开始，进而从材料的选择到第十七章的船中剖面结构综合的解说性例题，勾画出一条设计路线。当求解是以板架模型为基础而不是以逐个剖面模型为基础时，对计算机求解方法作了详细的阐述。

第二十一章至第二十二章中的内容事实上最适合于进一步的设计循环，不过有些部分的确是对早先导出的第一循环综合法的详细叙述。第十四章的内容可能已经安排得后了些，不过为了充实考德威尔教授关于安全裕度的讨论而没有作更动。

结束的几章企图把结构设计再次与整条船的设计联系起来，并提供在船舶使用期内总体系统优化所必需的那种定量的资料。

尽管全书公用统一的题目，可是事实上每一章都保持它自身的题目。结果就有一点重复，甚至建议会有稍为不同的见解。在某些情况下也会发现各章之间术语有点不同。为了避免附加的符号体系过分复杂，感到值得冒所包含不一致的危险。为了统一各作者的风格只做了极微小的努力。

可惜这个版本全都按英语原始资料写成。国际船舶结构会议的几个技术委员会，对它们分工范围内研究工作所作的评论是有很大帮助的，可以保证任何外国重大进展的遗漏保持在最低程度。但是，今后应更深入、更仔细地研究非英语的文献。

处理初始循环以外的设计过程，以及在设计意义上评价各种先进分析方法的工作仍然要做。例如有限元法没有汇集到设计过程中，因为它的恰当位置是在后一类事件之中<sup>●</sup>。但是，或许更为迫切的，应研究其它的状态和结构构件，例如除了船中以外的船体梁，在该处剪切变得重要了；以及船首、船尾结构，该处侧向横载荷比梁平面内载荷重要，而且属于复杂而极为独特的一类载荷。人们怎样才会最明智地对骨架式或船体刚度衡准、对特定的动力载荷因子作出初步的选择呢？正如国际船舶结构会议报告阐明的，简单横骨架、大型宽肋骨、纵向和横向舱壁、上层建筑和甲板室或船底板架的综合方法正在受到重视。

应该深表谢意。我们每一位投稿人都有多方面的原因值得给予高度的重视。由霍夫加德 (W. Hovgaard) 教授开创，并通过罗塞尔 (H. E. Rosell) 教授和哈伦特纳 (Harlan Turner) 教授保持下来，具有广泛影响的传统至少对我是熟悉的。我也不能忘记我二十五个年头磨练的有益影响，主要是在研究生方面。他们中有些人已经成为作者。

这个计划始于道格拉斯·福克纳 (Douglas Faulkner) 的决断。他是英国国防部皇家海军建造师 (现为格拉斯哥大学造船系约翰埃尔德教授<sup>●</sup>)，他和其它所有作者有一个时候曾在麻省理工学院造船与轮机工程系 (现为海洋工程系) 渡过几段有意义的时期，使得相互谅解扩大，加上从本质上说的共同观点，不断累积起本著作的组成部分。

经济上的支持主要来自船舶结构委员会，包括奥布赖恩 (J. B. O'Brien) 提供的最有帮助和谅解的协议。维特尔 (M. F. Vetter) 参加工作是使得目标成为可能的最有利因素之一。美国海军答应过海军船舶工程中心斯奈德 (G. J. Snyder) 一年时间的援助，

● 指上句所述，在设计意义上评价先进分析方法。——译注

● 以英国十九世纪著名工程师约翰埃尔德 (John Ellier) 名字命名的教授席位。——译注

以及海军船舶研究与发展中心亚丹查克 (J. C. Adamchak) 博士的援助。德阿坎吉洛 (A. M. d' Arcangelo) 教授领导下的船舶与轮机工程协会船体结构委员会的 SH-4 小组，作为评论小组曾工作得很有成效。

所有上面未提及名字的作者都以令人惊奇的诚意免费贡献了自己的力量。应十分感谢所有这些个人和团体。感谢埃莉诺·贝克 (Eleanor Baker)，他担当了全部的打字工作。感谢阿瑟·乔达尼 (Arthur J. Giordani) 绘制了大部分插图。我希望船舶结构设计的学生们在适当的课程中增加他们的东西。

出于我的经验，所有的作者大概都想对妻子们巨大的谅解、耐心、甚至良好的情绪表示敬意。除了公职包含的时间和职务以外，没有巨大的努力，像这种集中的和具体的意图是不可能达到的。

J. H. 伊万斯

1973年5月28日





# 第一章 船舶结构设计展望

## I. 结构设计问题

- A. 足够的强度
- B. 有效船系统

## II. 极限吃水

## III. 有效船的定义

- A. 对于特定任务—“装完货后达到最大吃水、且满足所有限定性条件”
- B. 总系统法

### 1. 计算机辅助设计

## IV. 优化结构设计

## V. 结构性能的度量

## VI. 计算应力的意义

- A. 确定性的解
- B. 根据过去经验外插
- C. 缩尺模型
- D. 足尺(模型)试验
- E. 概率法的解

## VII. 综合与分析

## VIII. 局部和名义应力分量

## 结构设计问题

排水型的水面船，不过是运输企业的一种海上运输工具，它在形状、内部结构布置和使用上，是高度专业化的航行器。一些人仅仅把它看作是一种工程装置。而另外的人看它是一种独特的社会财产，一种政治工具，一种事业手段，或者甚至作为一种带有诗意的创作。在这里，我们只讨论它的结构设计，这诚然是一个范围很狭窄的方面，但是包括了所有这些成分。虽然受到船的功能的限制，受到来自其管理者且无法预料的反应以及严峻的环境的限制，结构设计还是有助于实现已作出的初步设计决策的，这个决策将规定好结构型式及其内部的划分。

假定骨架限定在正交方向上布置，结构设计中的主要变量不但有骨架系统的对偶度，而且有主要构件的方向。自木船的横骨架以来，是否就用了绝对纯粹的、单一的骨架系统是有疑问的。两个子系统中每一子系统各自的骨架间距，也许在围长上从一舱变化到邻舱，或者自一板架变化到另一板架。一大批相同或不同的构件或许会一起工作。由于还要考虑很多次要的变量，在力求得到可靠而有效的船体结构，对总体优化的船舶设计作出的贡献中，显然是有充分的活动余地的。

## 极限吃水

商船和军舰一样，必须拥有不大于对它们的营运来说已完全足够的强度，这点包括未知的和正常损耗所要求的裕度在内。对它们装载的限制，意味着对吃水的限制。或许应该是诸如干舷、或者丧失船体完整性之后的浮力或稳性储备等其它的考虑，是更具有限制性的因素。无论根据什么来确定它的选择，船体强度最好不要比恰好与极限吃水所相称的更大。船体包含多余的重量时，产生存在微小的过剩强度的效果。军用船同样敏感地关心它们的生命力，而且必须预先防止由于超重导致速度的致命损失，以及在可能情况下活动半径的致命损失。因此，在船舷上正式刻上预定的最大吃水，在商业营运中是强制性的，在海军实践中是经常找得到的。在假定所有其它的都不变的情况下，结构强度与它（最大吃水）要求的强度相等。

## 有效船的定义

特定用途的最成功的商船，必须定义为其总收益与总支出之比是最大的船。在计算中，假定整个寿命周期包括自获得它到报废时的期限。作为首阶近似，业主在订购一艘新船，至少要规定船预期装载的重量和容积、速度以及航程距离等的时候，应能够在心中用收益/成本比对航程统计作仔细的研究。简而言之，在可能的范围内，造船工程师的课题应是确定船的尺度和形状，使得在建造完成并装完规定的载重量进入海中的时候，船到达它的最大吃水，并且同时恰好满足它的所有限定性条件，所有的货舱和储物间等都完全装满了，带足正好满足以规定速度航行时所需的燃料和消耗品，而且航行和维护保养费用也最少。如果货舱都不满，就提供了一个过大的舱容，而种种类别的费用也将是过大的，至少暂时是如此。一般设计最优化要求最小（结构）尺寸的船（具有寿命周期增长的裕度），使得以最低的初始和维护费用保证它是最小抗力和最轻船体重量的船。如果船不到它的极限吃水，就白白地提供了适用于更深吃水的多余结构强度以及伴生的多余结构重量。

面对这些矛盾的要求，很明显几乎不可能达到这样一种绝对理想化的境地。但是，

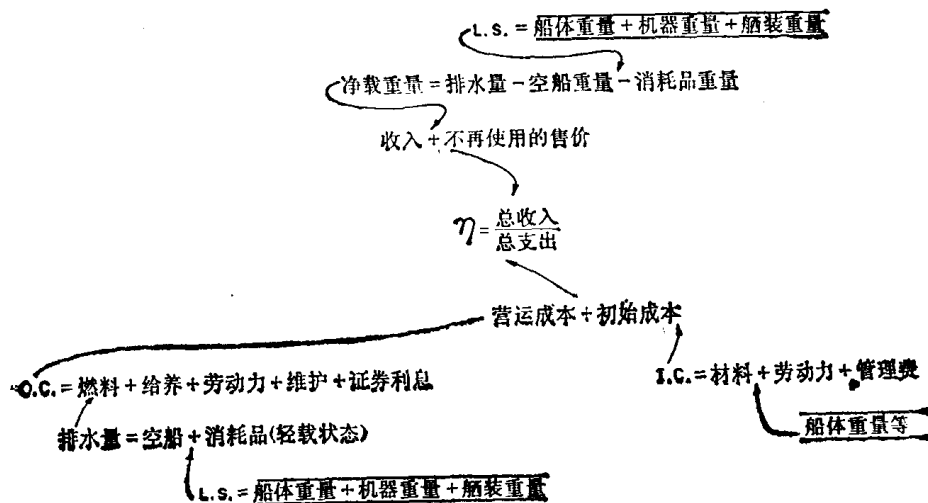


图 1

应强调在其中达到妥协的方法是极其重要的。借助于图 1 可明显地看到，极小化的船体结构重量在减少支出和增加收入总目中的几个方面都是有利的。对于某艘给定船而言，虽然在极限吃水时重量的节省不会减少燃料费用，而当船在轻载条件下的回程中就会做到这点。而且在一更为根本的水准上衡量，即使在极限吃水时，重量节省总是会减少燃料费用，因为没有重量节省整个船将更大一些。

虽然它是有启发的，但是必须判定这个“装完货后达到最大吃水，且满足所有限定性条件”<sup>●</sup>的设计模型不足以描述造船工程师的全部任务。事实上，如果象“定期班轮”类型船的运行那样提供同一货物的稳定流量，回头航程完全可能装不同的货，或者甚至是空载。不定期船既没有典型的货物，也没有平均标准的航程距离。后一种情况同样适用于军用船的设计。因此每艘船必须设计得执行一组规定的功能，或者要以最大的适应性来履行活动范围内的特定任务。任务的多样性（很多相互关连的）和繁重的续航要求（只是用补给船的方法才做到可行）促使描绘由系列船舶（Ship Systems）组成的船舶网系（System of Ships）。在商业背景中提出同样明确的观点，能否形成集成的运输网有几分取决于那些专门化的船型，如各种种类的滚装船、集装箱船、载驳船、散装货船以及利用三段航程、在每一段航程中运输不同的矿石、散装货或油货的“OBO”船。

这样的整个系统的严密优化，或者单一船主规划中船队的严密优化，现在把造船工程师和其它的人，包括在一个比近几年前通常做法更高级的可选择的梯队之内。对于在一特定情况下规定的运输流量，是少量大而慢的船还是很多小而快的船更可取呢？或者，更确切地说，无限个中间可能性中哪一个是最好的呢？不管最后的决定是否局限于排水型的水面船，都可能需要更详细地制订运输工具特征曲线族，以得出重量和费用图的趋势。此外，设计环境很可能要求它们很快就可应用。当设计状态中存在着某种程度的新事物时，连续的总数学函数不是仅仅一经要求就有了的。因此，看来只宜于作出结论：计算机辅助设计设备简直成了代理人。这种特定方式的指导原则的主体，以及支持在结构设计中早期计算机程序编制的理论阐述，从早先就致力于在合理的理论基础上对现有经验的整理中，以及对超出原有经验所作的外插中得到了好处。

### 优化结构设计

结构每一部分的设计，都必须考虑它直接承受或它作为船的组成部分附带承受的载荷，或者这两种模式的载荷。为了使寿命周期内的利润最大，导致船应用最佳配备的最好材料组合来建造，使它体现恰好是具有足够强度的最小船。要求结构设计要么是最小重量的、要么是最低初始成本的是不可能的，而宁可在这两者之间作出某种协调。在这点上船舶结构似乎介于飞机结构与陆上建筑工程结构之间，前者的注意力在节省重量，而后者往往更强调节约成本。甚至在军用船和民用船之间，利弊的权衡也是不同的。高营运性能的要求，最明显的是在那些快速护卫舰和深潜潜艇等军用船中的要求，具有强调在某种附加成本上节省重量的作用。

● 原文在此用的是“full and down”一词，是对前段中“简而言之，……，而且航行和维护保养费用也最少。”一般的概括，为便于理解起见，改译成如文中所示。——译注

## 结构性能的度量

在过大的程度上，在很多人的心目中“应力”几乎成为“强度”的同义词了。这是不恰当的。它势必掩盖在结构性能中会存在多方面不足的事实，而其中没有那一个应该被忽视。应力对某些性能是一个适当的衡准，但不是全部。例如，在板架设计的一章中就说得非常明显。

很自然，最先想到的是材料承受拉伸、压缩或剪切力的物理本质。当然，老早也证明了适宜通过应力来求解压缩和剪切失稳现象。虽然由于几何非线性和超出应力-应变的比例极限的非线性特性而使问题复杂化了，但是塑性范围和弹性范围一样，也能包括在概念上的构架 (Conceptual frame work) 之内。只要强调这些基本关系以及处理它们的技巧的普遍性，这些事实就都是相当明显的。甚至继续坚持这点，在涉及疲劳和热残余影响方面，应力的概念也是有用的。

这些评论的目的，是为了目前至少短暂地把注意力转向精确预报简单结构或者它们的部件在动力载荷下的瞬时或永久变形的能量法的表现能力。立即会想起的有砰击、冰冲击、爆炸和碰撞。在微观的水平上，还可加上脆性断裂的开始。而能量吸收模型试验，在结构零件竞争设计之间进行甄别已取得效果。

刚度是另一个不应轻视的性能。不受欢迎的振动响应是一种担心，因为它对结构疲劳循环和应力幅值、设备失灵、人员不舒适和不自在，或者其它的方面起作用。特别在船级社内，也还存在某种（过度挠曲的）担心，以致必须限制船体梁的静力挠曲，才有可能避免烧坏螺旋桨轴主轴承；或者因为某方面的过度挠曲，或许会形成灾难性的船体损坏。这样，刚度受到了控制，而且有时刚度特性会主宰整个结构设计。

大家都知道，虽然热的间断性（除了作为焊接的结果）不是经常发生的，但是它们是令人讨厌的。鉴于残余焊接应力表现为在塑性区域内延伸的、高度局部化的应力增量，并且沿连接接头线性分布，在此地提到的是一种由不太激烈的温度差引起的、更普遍分布的瞬态应力状态。从食物至液化石油产品或液化天然气之类的冷藏货，加热货也同样，会是引起麻烦的根源。在钢质甲板横梁上的铝铺板，由于膨胀系数不同引起的问题，是另一个恰当的例子。

无疑这种分类是不完备的，但是是有前途的，要点在于强度或结构性能的衡准会有好几种。可是，显然可以感觉到在设计中要首先满足最可能主宰设计的哪一个衡准（或许是一族极限应力），事情还不会到此为止。

## 计算应力的意义

关于应力这个主题，或许应该提到计算值的意义。在最近几年，尽管对于载荷的估计以及在详细的结构分析方面有了较大的进展，总是需要将计算应力与临界客观现实一起进行考察。只有在相对简单的结构中，在极为理想的情况下制造并对绝对已知的边界条件作最精确地加载，这样才能信赖计算应力是真实状况的精确表达。“许用”或“设计”应力都是绕过困境的方法，是作过样板的类似结构长期经验的结果。它们被认为是一个基于过去经验的外插法。最多是现实的不完备的形象。甚至在最适当的母型情况下，还会存在着已知或未知的缺陷，过份依赖这样的母型船，不但包含了由这些极限应力目前

所不知不觉地反映的效能，而且也包含了永存缺点的内在危害。

缩尺模型试验提供了可以仔细控制载荷和边界条件的优点，以致可以按照显示它们真实意义的方式来排除、固定、或独立地处理某些设计状态中的参量。因缩小了比例而降低了费用，这就鼓励采用改进模型作比较试验，以达到尽可能地除去多余构件或更好地配备结构材料的目的。也更有实际可能把模型做到破坏的试验（破坏性试验）。

遗憾的是无论对建造应力或变形必须做到的缩尺定律，还是除尺度不同而其它方面都相同的模型的物理性能，都是极少完全协同的。实尺度试验看来不顾费用的负担，至少对关键的子结构是如此，只要能够可靠地再现结构的载荷和边界条件。但是，对于整个船体结构，缺点是明显而巨大的，因为缺少可派遣到海上去的设备完备的船，以致在遇到一次随机选择海况的机会中，只会得到有限的测量样本。用船上的设备在极端的海况中进行试验的可能性总是回避的。因此结论仍然只能是：与实际值有关，或者与“测量”应力有关的计算应力充满不确定的因素，特别是它们声称是可能发生的最不利的合理应力值的时候。

缩尺模型和实尺模型分析的结合，并与营运经验的统计评论一起（全部用合理的理论知识整理），比起所有不完善部分的简单求和所指出的强度来，有着更大的强度。海洋海况的选择性描绘，船舶运动的计算机辅助预报和详细的逐点应力分析，损坏现象的解释，完善的焊接应力分布知识等等，这些都是近来的进展大大增进了了解的领域。

然而毕竟还必须承认，即使从结构分析方法中排除掉所有的不确定因素，在应力预报（或者能量水平，或者是刚度）和损坏预报之间，仍保留着很大的鸿沟。建造的结构不会与设计者的希望或理想一致。它将有很多的冗余度。板格既不会是数学上那样的平整，也不是用完全均匀的材料做成的。连续构件在接头处会没有对准，接头本身会有缺陷。营运中的损耗将耗去它的那部分，而平均船舶（损耗）标准的轮廓尚待问世。自然，所有的偏离总是变化而不规则的。在方程的另一端，至今记录到的最不利海况，不能保证在任何时候都不会被超过。

因此必须承认结构损坏肯定不会永远地完全避免，即使为此目的可能牺牲所有别的要求，那么也就在处理中失掉了鼓励航海的全部动机。一个必然的事实在于：事件的某种极端的组合，迟早将给某人带来灾难。

这并不意味着必定要整个地改变目前原有的，但是是不明确和未知的安全裕度。它仅仅表明为了以更明确的方式考察问题，只要设计过程对载荷型式、结构作用、材料类型、建造公差、建造和使用过程的环境条件，以及对尽可能的其它因素，作更加区别的对待。当面临这样的考虑的时候，结果只能承认某个可以求得损坏发生概率水平的最小损坏率。确定和平衡大量船级社所关切的最小损坏率是个艰巨的任务。但是，这是可接受危险率的根本。很难更简单地预先提出考虑设计者的期望在其中会不满足的方法，也很难更简单地从统计上对偏离进行衡量。这些仍旧是概率方法的最终目标。但是，在这些方面还没有这样做的情况下，长久以来结构工程师就直觉地表演了技艺，并把他们的结论表达成“安全因数”、“许用应力”和它们的同类。现在，更新的数学工具（方法和机器两者）和附加的统计资料，正开始促使提供更为独立而有辨别力的方法。

## 综合与分析

如同在刚刚讨论过的情况中所暗示的那样，设计过程的初期综合阶段，是一个其要点和已经存在的实物所涉及的要点相反的阶段。这种评论的基础在于：综合与分析虽然是互补的，但是在根本上是对立的。再者，一个必须在另一个能够开始之前就完成。在特性上，分析方法都是不可逆的。分析方法越精细，就越不适宜用封闭形式来直接求解结构尺寸和构造。因而很自然地在初步探索给定结构的最佳性能时，事实上宁可采用基本而粗糙的表达式去求实际、临界应力以及极限损坏应力。方程组可以转换以及它们简易可行是节约时间的。面临大量设计迭代的首次循环大幅度摆动的特征，它们虽缺乏完备的严密性但却是无害的。它们也不是一概与在结构钢板和型材生产中所遵循的尺寸增量的粗糙性不协调。“设计”应力的缺点已经提到过，但是它们在名义上，在比较的意义上是极为有用的。何况在任何完整的设计过程中，它们到底只是一种手段。在分析与优化调整之间接着发生的相互作用中，期望有附加而累进的精密设计数据和约束的输入，以及其它与它们有关的设计衡准的分析技巧的输入。

## 局部和名义分量

鉴于船舶结构经受着经常变化着的应力-应变状态，为了进行综合和分析，把这些结构响应归类为“局部的”或“名义的”是方便的。在这种应用中，局部应变和响应是那些直接在相对集中的力、载荷或反作用力邻近区得到的应变分量。例如对于船体梁就是那些由于锅炉、反应堆或机器装置重量，螺旋桨推力，波浪冲击、砰击，货物装载牵引力，铲车的轮压，坞墩木等等引起的应变分量。另一方面，名义应变是那些就总体来看由加在结构上的载荷所引起的应变分量。例如它们引起（船体）梁的弯曲和剪切。十分清楚，甚至一个简单的集中载荷系，如在图 2 中所示的最基本或理想化情况，实际上同时引起两种类型的应变分量。在集中力部位任意定义的局部范围之内（在图中表示得很清楚），完全不适宜仅仅用普通的、简单梁的应力分布图来定义（该处的）应力和应变。更接近于满意的描述，是将局部应力叠加在这些名义应力上而得到的。按照这种推理，名义应力仅仅作为首阶估计值出现，并且在一定的部位它们是不可容忍地粗糙。而且就此而论，应记住对基础（座）、连接、相互作用和形状改变等处进行细节设计时最主要的原则之一，就是减轻这种应力集中的效应，在数量上减小它们，在空间上扩散它们。

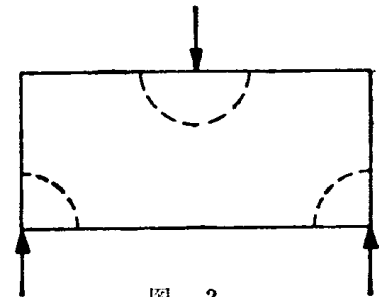


图 2

主体结构上的局部加强仍然是需要的，不过作为空间上的有限增大罢了。

随后的各章基本上限制在船体的主要（或名义）特性的研究以及结构设计的综合阶段上。即使如此，它们不可能比求解的第一阶段，且在某些情况下比开始的阶段包括更多的东西。

J. H. 伊万斯

1971年5月5日

## 第二章 结构分析和综合的概念性模型

- I. 等值梁 (#1)
  - A. 纵向弯曲
  - B. 侧向水平弯曲
  - C. 横向弯曲
- II. 应力级别
  - A. 船体弯曲应力
  - B. 交叉梁系弯曲应力
  - C. 扶强材弯曲应力
  - D. 板弯曲应力
- III. 载荷传递
  - A. 单跨梁
  - B. 连续梁
  - C. 交叉梁
- IV. 有效宽度或阔度
- V. 分析概念杂例
  - A. 有限元
  - B. 分块集中参数
  - C. 载荷作用的叠加
  - D. 等值梁 (#2)
- VI. 船体综合的剖面法
- VII. 船体综合的板架法
- VIII. 设计螺形线
- IX. 参考文献选

虽然天才也许能够产生巨大的飞跃，并且无需利用熟悉的东西领悟深奥的原理，但是几乎没有人能够不借助于类比、譬喻、隐喻或模型作模仿。因此，这些就是对真实不够完美的表达，然而，聪明地运用它，还是能够帮助发展更多方面的理解。善于发现一个即使是在陈旧领域中的新见解，也能够引导出根本不同的观念和革命性的解决办法。不言而喻，如果模型是错误的，那么数学上也不会正确。判断对创造性来说是可喜的，对难以捉摸的性质来说则是必需的。

### 等 值 梁

首先把波浪上的船体视为梁的是皮兹克 (Pietzker)[1]或其它可能未被历史记载



的人，但一个并非那么早就使用这种模型的阿特伍德 (Attwood)[2]把复杂的船体箱形梁变换为具有几个翼板的工字梁。

图1不仅可阐明甲板、船底、内底和船侧板中的应力形式，而且它还分离出主要不是承担纵弯曲和剪切作用的横向骨架和横舱壁。

尽管船体梁有着非矩形断面梁的特点，但是简单梁的应力分布模型一般被完全用作船体从头到尾的初步计算。船体侧向弯曲（应用同样概念），相信没有补充的应变，只不过是把船侧板由腹板转换为翼板，把船底、内底和甲板转换为腹板而已。

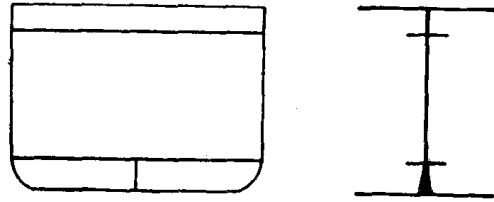


图 1

根据图2，似乎在横向弯曲下横舱壁将起腹板构件的作用，甲板和船底又将再次作为翼板，不过它们眼下具有指向横向的面内应力。然而，这个模型不大可用，事实上会完全引入歧途，因为根据图2船的宽深比不大（把横舱壁附近的一段船体取出来作为沿船宽延伸的工字梁），对应的跨深比就显得太小，以致简单梁的应力分布对表达真实的整个面貌就不那么占主要地位了，即使作近似表达亦如此。

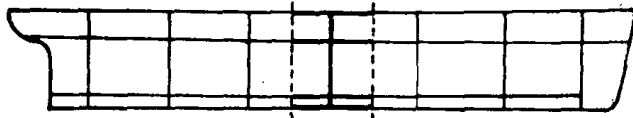


图 2

## 应力级别

与前面的叙述相比，弯曲应力（或挠度）特定等级的概念并不十分平淡无味，它似乎起始于塞伦廷 (Sellentin)[3]、皮兹克[1]和利诺 (Lienau)[4]。当船体结构还原成它的构件时，一个结构部件就支撑在另一个上面。

在利诺的模型中，除刚才讨论的（在图3再次作了说明的）船体纵向弯曲类型之外，还有交叉梁系（前面未作说明的）弯曲，其中例如由一对横舱壁和两层甲板围起来的板架承受侧向横载荷的作用而弯曲。对于扶强材单向布置的板架来说，这种类型的弯曲不容易和下面一种类型的弯曲区别。

此后，在支点间（例如由宽肋骨构成的）挠曲的各个扶强材存在着扶强材的弯曲和板的弯曲，在那里，各个板格自它们边界的平面起挠曲，板的边界由于扶强材和宽肋骨的较大刚性保持不变。

在这个自板架到扶强材再到板格的进程中，边界的刚性是相对的。一个构件，例如一根扶强材，在一种水准上它弯曲是理所当然的，而在下一水准上可以假定基本上是刚性的。因此，正如图上企图说明的，一个构件，例如外壳板格可以同时产生所有类型的应力分量。在同一时间内，作为扶强材-板组合梁的一个翼板、并且始终经受着自身弯曲的外板，对船体剖面模数会作出贡献。像这样一种处理方法，利诺将它应用于横骨架式、纵骨架式或两种骨架式混合的船舶中，为粗略地估计总的应力状况提供了一个简单而方便的方法，但是它忽略了交互耦合作用及其它细节。