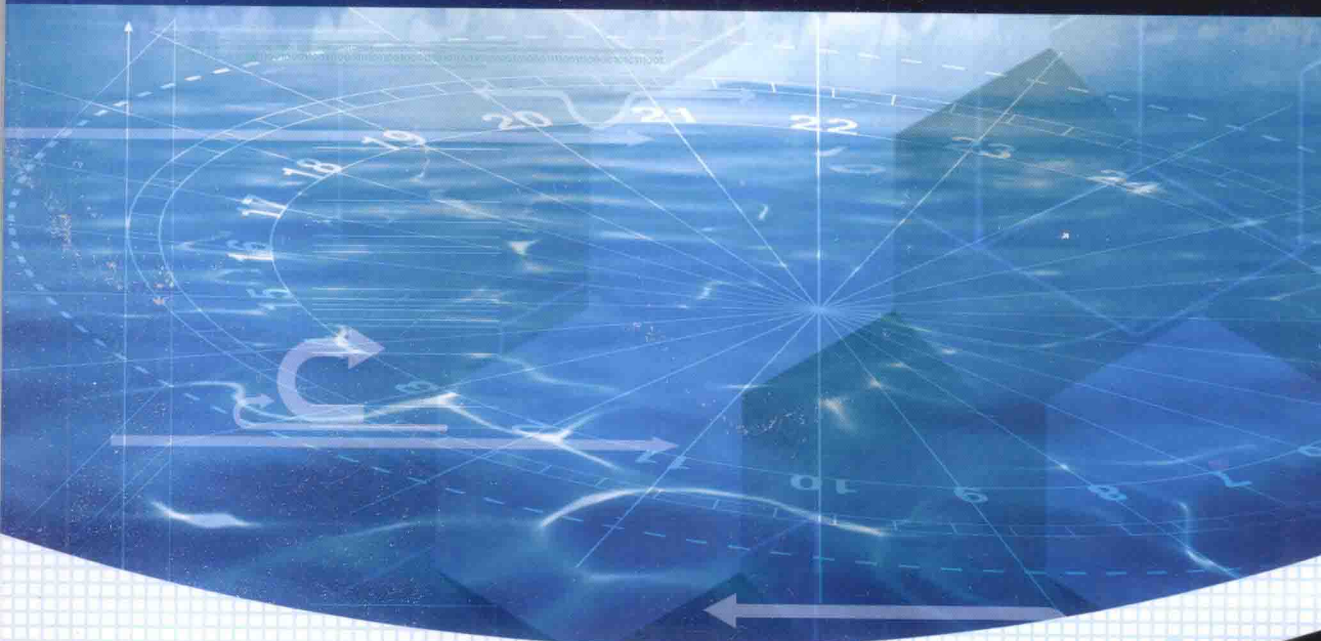


★黑龙江省精品图书出版工程

海洋结构工程

HAIYANG JIEGOU GONGCHENG

白勇著



HEUR 哈尔滨工程大学出版社

黑龙江省精品图书出版工程

介绍书

海洋工程丛书

海洋结构工程

白勇著

白勇 著

HEUP 哈尔滨工程大学出版社

内容简介

本书由结构设计原理、极限强度、疲劳断裂、结构可靠性、结构风险评估共五篇三十四章组成。有限元分析和动态/疲劳分析的广泛使用、计算机和信息技术的迅猛发展以及风险和可靠性方法的应用是本书写作的基础。

本书适用于从事结构设计的海洋结构工程师、船舶设计师、机械工程师和土木工程师使用。随着基于可靠性的极限状态设计在结构工程领域得到日益广泛的应用,本书亦可为其他领域的结构工程师提供参考,例如建筑、桥梁和航天器等领域。

图书在版编目(CIP)数据

海洋结构工程/白勇著. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社, 2016.5
ISBN 978-7-5661-1241-5

I. ①海… II. ①白… III. ①船舶结构②海洋建筑物—建筑结构 IV. ①U663②P754

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 075989 号

选题策划 史大伟
责任编辑 叶津
封面设计 恒润设计

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451-82519328
传 真 0451-82519699
经 销 新华书店
印 刷 哈尔滨工业大学印刷厂
开 本 787mm × 1 092mm 1/16
印 张 29.25
字 数 752 千字
版 次 2016 年 5 月第 1 版
印 次 2016 年 5 月第 1 次印刷
定 价 98.00 元

<http://www.hrbeupress.com>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

本书适用于从事结构设计的海洋结构工程师、船舶设计师、机械工程师和土木工程师使用。有限元分析和动态/疲劳分析的广泛使用、计算机和信息技术的迅猛发展以及风险和可靠性方法的应用是本书写作的基础。作为斯塔凡格大学海洋工程专业的教授,我将本书用于我讲授的硕士和博士课程 TE6076“海洋结构”和 TE6541“海洋结构的风险和可靠性分析”。面向油气业工程师的 IBC/Clarion 行业培训课程“浮式生产系统的设计和建造”也使用了本书。

随着基于可靠性的极限状态设计在结构工程领域得到日益广泛的应用,本书也可为其他领域的结构工程师提供参考,如建筑、桥梁和航天器等领域。

在此要感谢曾经给予我指导和鼓励的人,他们是美国船级社(ABS)执行副总裁 Donald Liu 博士、挪威科技大学(NTNU)的 Torgeir Moan 教授、加州大学伯克利分校的 Robert Bea 教授和 Alaa Mansour 教授、丹麦技术大学的 Preben Terndrup Pedersen 教授、大阪大学的 T. Yao 教授以及广岛大学的 M. Fujikubo 教授。在整理本书所用的资料时,上述杰出科学家和工程师的友谊和技术指导起到了至关重要的作用。

在担任 JP Kenny 挪威分公司先进工程部经理和美国船级社海洋技术部经理期间,我有幸结识了石油公司、设计/咨询公司、船级社及承包公司的许多行业领导人。通过 ISSC, IBC, SNAME, OMAE, ISOPE, OTC 等学术会议及行业(ISO/API/Deepstar)委员会,我获得了行业应用和研究领域的最新进展信息。

与 Ruxin Song 博士和 Tao Xu 博士的长期合作使我在结构可靠性和疲劳领域的研究获益良多。本书涉及的极限响应、管状构件屈曲、浮式生产储卸装置船体梁强度和可靠性的内容是根据我发表在 SNAME, OMAE, ISOPE 等期刊上的论文所撰写的,论文的合著者为 Preben Terndrup Pedersen 教授、T. Yao 教授、Yung Shin 博士、C. T. Zhao 博士和 H. H. Sun 博士。

Qiang Bai 博士和博士研究生 Gang Dong 协助整理了书稿。

本书在 Rameswar Bhattacharyya 教授、Elsevier 高级出版编辑 James Sullivan 和 Nick Pinfield、ABS 高级副总裁 James Card 的不断鼓励下得以完成。

感谢我的妻子 Hua Peng、孩子 Lihua 和 Carl,为我在不同文化和工作环境中写作本书的五年多时间里营造了良好的氛围。

感谢上述所有组织和个人,以及许多未提及的朋友和作者,谢谢你们的支持和鼓励!

白 勇

2015 年 11 月 12 日

目 录

第一部分 结构设计原理

第1章 概述	3
1.1 结构设计准则	3
1.2 强度和疲劳分析	5
1.3 结构可靠性应用	8
1.4 风险评估	10
1.5 本书的布局	11
1.6 怎样使用本书	12
参考文献	13
第2章 船舶设计中波浪载荷和分类	14
2.1 概述	14
2.2 波浪和波浪统计	14
2.3 随机波浪中的船舶响应	19
2.4 船舶设计规范	24
参考文献	26
第3章 海洋结构物载荷和动态响应	28
3.1 概述	28
3.2 环境影响	28
3.3 环境载荷和漂浮动力学分析	33
3.4 结构响应分析	35
3.5 极限分析	39
3.6 小结	47
3.7 附录 A: 弹性梁的振动	48
参考文献	49
第4章 根据规范确定船体尺寸	51
4.1 概述	51
4.2 船舶稳定和强度的基本概念	51
4.3 纵向强度的初始船材尺寸标准	55
4.4 横向强度的初始船材尺寸标准	57
4.5 局部强度的初始船材尺寸标准	58
参考文献	63
第5章 船体设计分析	64
5.1 概述	64
5.2 载荷设计	64

5.3 有限元法强度分析	65
参考文献	70
第6章 海洋结构分析	71
6.1 引言	71
6.2 项目规划	73
6.3 有限元分析的使用	76
6.4 设计载荷与载荷校验	81
6.5 结构模型	82
参考文献	91
第7章 海洋结构极限状态设计	92
7.1 引言	92
7.2 极限状态设计	92
7.3 疲劳极限状态设计	98
参考文献	101
第二部分 极限强度	
第8章 柱和梁-柱的屈曲/失稳	105
8.1 圆柱的屈曲和极限强度	105
8.2 梁-柱的屈曲和极限强度	108
8.3 梁-柱的塑性设计	111
8.4 实例	113
参考文献	115
第9章 圆管的屈曲和局部屈曲	116
9.1 引言	116
9.2 实验	117
9.3 理论分析	126
9.4 计算结果	139
9.5 结论	145
9.6 例子	146
参考文献	146
第10章 板和加筋板的极限强度	148
10.1 引言	148
10.2 复合载荷	153
10.3 板的屈曲强度	154
10.4 非加筋板的极限强度	155
10.5 加筋板的极限强度	156
10.6 加筋板的总屈曲(包括所有板格屈曲)	157
参考文献	157

第 11 章 圆柱壳的极限强度	158
11.1 引言	158
11.2 非加强圆柱壳的弹性屈曲	159
11.3 环向加强壳的屈曲	162
11.4 纵向和环向加强下壳的屈曲	164
参考文献	166
第 12 章 非线性有限元分析理论	167
12.1 概述	167
12.2 大位移下的弹性梁柱单元	168
12.3 塑性节点法	169
12.4 转换矩阵	173
12.5 附录 A: 基于应力的塑性本构方程	174
12.6 附录 B: 变形矩阵	181
参考文献	182
第 13 章 船体极限强度分析	184
13.1 引言	184
13.2 基于塑性节点法的船体结构分析	185
13.3 船体梁极限强度的分析方程	191
13.4 用改进的史密斯方法考虑疲劳腐蚀影响	193
13.5 船体梁强度方程和史密斯方法的比较	196
13.6 使用塑性节点法实例	198
13.7 结论	204
参考文献	205
第 14 章 撞击载荷下的海洋结构物	208
14.1 概述	208
14.2 有限元公式	208
14.3 碰撞结构	211
14.4 举例	212
14.5 结论	222
参考文献	222
第 15 章 地震载荷作用下的海洋结构	224
15.1 概述	224
15.2 按照 API RP2A 进行的地震设计	224
15.3 方程和运动	225
15.4 举例	227
15.5 结论	231
参考文献	232

第三部分 疲劳断裂

第 16 章 疲劳和断裂机理	235
16.1 引言	235
16.2 疲劳概述	235
16.3 应力疲劳	236
16.4 变幅值负荷的累计损伤	238
16.5 应变疲劳	238
16.6 疲劳分析中的断裂力学	240
16.7 例子	241
参考文献	242
第 17 章 疲劳性能	244
17.1 $S-N$ 曲线	244
17.2 应力范围估计	250
17.3 应力集中系数	252
17.4 例子	255
参考文献	256
第 18 章 疲劳载荷和应力	258
18.1 引言	258
18.2 远洋船舶的疲劳载荷	258
18.3 疲劳应力	260
18.4 由散点图确定的疲劳载荷	263
18.5 疲劳载荷组合	264
18.6 例子	266
18.7 小结	268
参考文献	269
第 19 章 简化疲劳评估	271
19.1 引言	271
19.2 确定性疲劳分析	271
19.3 简化疲劳评估	272
19.4 双线性 $S-N$ 曲线简化疲劳	273
19.5 许用应力范围	274
19.6 切口周围连接处的设计标准	274
19.7 例子	276
参考文献	277
第 20 章 疲劳谱分析和设计	278
20.1 引言	278
20.2 疲劳谱分析	279
20.3 疲劳的时域估算方法	281

20.4	结构分析	282
20.5	疲劳分析和设计	284
20.6	船级社的审图	290
	参考文献	290
第 21 章	断裂力学的应用	292
21.1	引言	292
21.2	水准 1:CTOD 设计曲线	293
21.3	水准 2:CEGB R6 图	294
21.4	水准 3:失效估算图(FAD)	295
21.5	基于断裂力学的疲劳评估	296
21.6	使用断裂力学和 $S-N$ 曲线方法进行疲劳评估的对比	297
21.7	断裂力学在航天、发电领域的应用	297
21.8	例子	298
	参考文献	298
第 22 章	材料选择和标准	300
22.1	引言	300
22.2	材料选择和断裂预防	300
22.3	焊接的改进和修补	302
22.4	损伤容限标准	304
22.5	无损检测	305
	参考文献	306

第四部分 结构可靠性

第 23 章	结构可靠性理论基础	309
23.1	引言	309
23.2	不确定性和不确定性模型	309
23.3	基本概念	310
23.4	构件可靠性	315
23.5	可靠性分析	315
23.6	统计组合	315
23.7	时变可靠性	317
23.8	可靠性更新	318
23.9	目标概率	319
23.10	可靠性计算的软件	320
23.11	举例	320
	参考文献	322
第 24 章	随机变量和不确定性分析	324
24.1	引言	324
24.2	随机变量	324

24.3	不确定性分析	326
24.4	分布函数的选择	327
24.5	船舶结构设计中的不确定性	328
	参考文献	330
第 25 章	船舶结构可靠性	331
25.1	引言	331
25.2	船体梁可靠性的闭合法	331
25.3	载荷效应和载荷组合	333
25.4	船舶结构可靠性分析的步骤	334
25.5	FPSO 船体梁时变可靠性的分析	336
	参考文献	342
第 26 章	基于可靠性的设计和规范校核	345
26.1	概述	345
26.2	一般的设计原则	345
26.3	可靠性设计	348
26.4	基于可靠性的规范校核	349
26.5	管状结构的数字模型	351
26.6	FPSO 的船体梁崩塌的数值算例	355
	参考文献	358
第 27 章	疲劳可靠性	360
27.1	引言	360
27.2	疲劳应力模型的不确定性	360
27.3	疲劳可靠性模型	362
27.4	S-N 方法校核断裂力学模型	365
27.5	疲劳可靠性应用——疲劳安全检查	366
27.6	数值算例	367
	参考文献	372
第 28 章	基于概率和风险的检测规划	373
28.1	引言	373
28.2	风险检测规划概念	373
28.3	概率的检测规划可靠性更新理论	375
28.4	风险检测的案例	376
28.5	风险最优化检测	379
	参考文献	383

第五部分 结构风险评估

第 29 章	风险评估方法	387
29.1	引言	387
29.2	风险估计	391
29.3	风险承受标准	392

29.4	用风险评估确定性能标准	395
	参考文献	396
第 30 章	海洋结构的风险评估	397
30.1	概述	397
30.2	碰撞风险	397
30.3	爆炸风险	400
30.4	火灾风险	404
30.5	坠落物	406
30.6	案例研究——浮式生产系统的风险分析	409
30.7	环境影响评估	414
	参考文献	415
第 31 章	船舶工业标准安全评估(FSA)	417
31.1	引言	417
31.2	标准安全评定的综述	417
31.3	标准安全评定的功能模块	419
31.4	标准安全评定的人员和组织因素	424
31.5	船舶燃油系统的实例	425
31.6	海运中的 FSA 的使用问题	425
	参考文献	426
第 32 章	油田开发的经济风险评估	427
32.1	引言	427
32.2	决策标准和极限状态函数	429
32.3	经济风险模拟	430
32.4	结果评估	432
32.5	附录 A 净现值和内部收益率	433
	参考文献	434
第 33 章	人员可靠性评估	435
33.1	引言	435
33.2	人为失误鉴定	435
33.3	人为失误分析	437
33.4	人为失误降低	438
33.5	用于海洋系统设计的工效学	438
33.6	质量保证和质量控制(QA/QC)	439
33.7	海洋结构的人为因素和组织因素	439
	参考文献	441
第 34 章	基于风险评估的维护	443
34.1	引言	443
34.2	初步风险分析(PRA)	445
34.3	RCM 过程	447
	参考文献	453



第一部分 结构设计原理

第 1 章 概 述

1.1 结构设计准则

1.1.1 介绍

本书内容涉及海洋结构物设计与研究的现代理论。海洋结构物包括船舶和近海结构物(Ships and offshore structures)等。本书不但总结了当前最新的设计理念、工程应用和研究成果,并且涉及有限元分析、风险可靠性评估方法的应用等内容。

海洋结构物设计的第一个阶段是波浪载荷和组合载荷的计算。在结构设计和分析中,结构工程师需要了解波浪、运动和设计载荷等基本概念。动态系统的极值问题属于另一个领域,在过去的十多年中取得了很大的进展,其对于确定浮式海洋结构物、立管、锚泊系统以及张力腿平台的张紧系统等的运动和强度的设计值起到了非常重要的作用。

功能要求和载荷确定后,初始结构的尺寸就可通过船级社的规定以及设计准则进行确定。通过分析梁及板壳单元在静水压、弯矩及集中载荷下的应力,可以对结构进行初步基础设计。

海洋结构物的设计包括以下三个层次:

- (1) 规范设计;
- (2) 分析设计;
- (3) 性能指标设计。

直到 20 世纪 70 年代,结构设计的规则才根据规范里现有的经验绘制表格和进行公式设计。这些基于公式的设计大部分是直接对动载荷和有限元分析的计算。当前有限元(FEM)研究方法已经得到充分的发展,它非常适用于船舶和近海结构物的设计。基于有限元的结构分析法已经提供了相应的结果,能帮助设计者进行最优化设计。此分析设计方法现已应用于整个设计过程。

目前,有限元分析普遍应用于海洋结构物的强度和疲劳分析。在结构设计过程中,结构的形状和尺寸都要加强、优化,并且附带进行结构分析,直到强度和疲劳指标达到所需要求。由于计算机和信息技术的飞速发展,FEM 方法的使用也得到了快速的推广。船舶与近海结构物中,信息技术已经广泛地应用于结构分析、数据收集、进程管理、拟合以及设计、操作和维修等领域。计算机和信息技术的运用,使我们能进行复杂的结构分析和结果处理。为了进行有限元的辅助设计,人们开发了各种类型的软件工具,例如:用于制图的 CAD 软件,用于结构设计和分析的 CAE 软件,以及用于辅助制造的 CAM 软件。

1.1.2 极限状态设计

在极限状态设计中,设计要验证结构在受到各种极限载荷的情况下,确保结构在最

大载荷和结构的最小承载能力足够大时,能够承受极限载荷及疲劳破坏。

基于设计理念,极限设计标准中包括各种破损模式,例如:

- (1)可维护性的极限状态;
- (2)材料的极限状态(包括屈曲/坍塌和断裂);
- (3)疲劳极限状态;
- (4)偶然发生的极限状态(逐步崩溃极限状态)。

每一种破损都可以通过一系列的设计标准得到有效的控制。极限设计标准的应用,主要基于极限强度和疲劳分析,以及利用风险可靠性评估的方法。

设计标准向来是以设计工作应力(WSD)或容许应力设计(ASD)来表达的,其中只有一个安全系数是用来确定许用极限的。近年来,越来越多地使用载荷和抗力因素的设计(LRFD),通过这些载荷因素和承载能力因素来反映结构的不确定性和安全要求。

一般地,LRFD 格式表示为下面的关系:

$$S_d \leq R_d \tag{1.1}$$

式中 S_d ——表示设计载荷影响, $S_d = \sum S_k \cdot \gamma_f$;

R_d ——表示设计阻力, $R_d = \sum R_k / \gamma_m$;

S_k ——特征载荷效应;

R_k ——特征反力效应;

γ_f ——载荷系数,主要指不确定载荷;

γ_m ——材料系数,即逆阻力系数。

图 1.1 中描述了载荷系数和承载系数。为了方便起见,图中只用一个载荷系数和一个承载系数来描述。为了说明强度参数的不确定性,设计承载 R_d 定义为特征反力 R_k 与材料系数的乘积。此外,特征载荷效应 S_k 与 γ_f 成正比。

载荷系数 γ_f 与材料系数 γ_m 在设计规范中给出定义,而且已被校准能够满足规范中的设计工作压力的标准和固有安全水平。安全校准可以使用结构可靠性的方法进行,这允许我们将可靠性水平 LRFD 标准和 WSD 标准进行相互矫正,并保证可靠性水平高于或等于可靠性目标。尽管 LRFD 方法是在不确定性载荷和结构能力的基础上进行的一种研究结构可靠性的方法,但其优势是简便易行(相对于直接使用结构可靠性的方法而言),LRFD 也称为部分安全系数的设计方法。

虽然部分安全系数方法是利用结构可靠度方法来校核的,但是失效结果也可能是由选择目标可靠性水平导致的。当失效后果发生的可能性较高时,安全系数还应该取更高。根据同一种设计规范,使用 LRFD 标准,可以为整体结构或局部结构提供统一的安全水平。

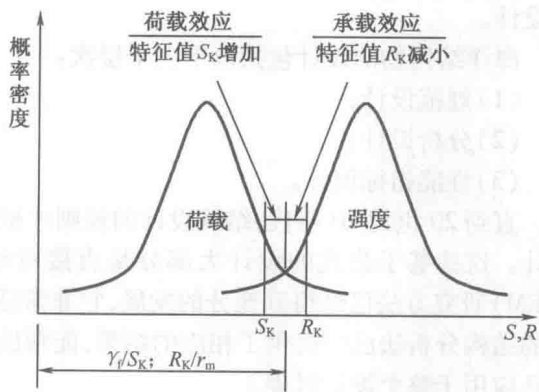


图 1.1 阻力系数和载荷系数曲线

1.2 强度和疲劳分析

在海洋结构设计中,考虑的主要因素包括:

- (1) 静水和波浪载荷,以及其可能的组合;
- (2) 结构单元和系统的极限强度;
- (3) 关键结构节点的疲劳/断裂。

理解流体力学、屈曲/塑性破坏、疲劳/断裂是分析结构工程的关键。

1.2.1 极限强度标准

在设计规范中,极限强度标准通常包括多种基本结构单元,例如:

- (1) 圆柱或圆柱梁;
- (2) 板和加筋板;
- (3) 壳体和加筋壳体;
- (4) 结构连接物;
- (5) 船体梁。

图 1.2 是固定柱压缩的欧拉屈曲强度图。由于轴压和初始挠度的合成,当轴向压缩接近临界值时,该柱可能发生屈曲,即

$$P_{CR} = \frac{\pi^2 EI}{l^2} \quad (1.2)$$

式中 l ——柱体的长度;

EI ——柱体的截面抗弯刚度。

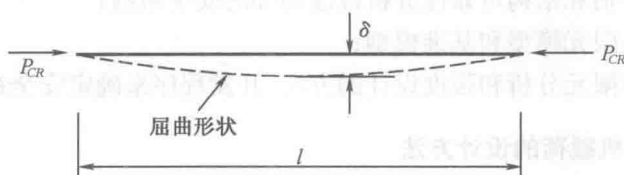


图 1.2 两端固定圆柱的屈曲强度图

失稳通常发生在构件的最大承载部位。伴随极限屈服传播,结构的弯曲刚度下降,进而导致屈曲。对于结构单元以外的其他无加强的薄壁,当弹性屈曲达到极限强度时,该结构将发生屈曲。

船舶和海洋结构物的单元设计,主要是基于相关船级社规范和 API, ISO 规范。船级社规范适用于远洋船舶、移动式海上钻井单位(模块)和浮式结构。对于海洋结构设计,API 和 ISO 更加适用。

应该指出,极限强度分析应该包括最终的断裂情形。评估的最后断裂主要是基于断裂力学的标准,如英国标准 PD6493(或 BS7910)和美国石油学会代码 API579。事实上,屈曲强度分析和断裂强度分析有很多相似之处,其比较见表 1.1。

表 1.1 屈曲强度分析和断裂强度分析的比较

项目	屈曲强度分析	断裂强度分析
载荷	压缩/剪切力	拉伸载荷
缺陷	几何和焊接残余应力等	制造缺陷和疲劳载荷
线性解	弹性屈曲	线性断裂机制
设计标准	曲线拟合理论方程	曲线拟合理论方程

一般来说,强度标准规范的开发可使用下列办法:

- (1) 得出基于塑性、弹性和弹性稳定理论的分析方程;
- (2) 对单元强度进行非线性有限元分析;
- (3) 收集力学试验结果;
- (4) 利用有限元分析和力学测试,比较分析方程的结果;
- (5) 基于有限元的结果修改分析方程;
- (6) 通过最终数值和力学测试的比较,进行公式优化;
- (7) 根据设计标准进一步校准,导出强度方程。

根据以上结论,显然,理论知识和实际设计经验对于极限强度标准研发的成败至关重要。作为规范的可选择标准,力学测试和有限元分析可用于确定结构单元极限强度。对于简单的结构单元,有限元分析和规范的标准通常与力学测试结果很接近。因此,力学测试可以作为这些经验和知识的积累。

今后的课题中,值得研究的极限强度分析包括以下几点:

- (1) 给出混合载荷的强度方程;
- (2) 利用风险评估和结构可靠性分析校准局部的安全系数;
- (3) 标准化的有限元模型和基准模型;
- (4) 基于测试有限元分析和强度设计的方法,开发程序来确定安全系数。

1.2.2 基于随机载荷的设计方法

船舶和近海结构的设计中应考虑以下随机载荷:

- (1) 船舶碰撞和近海下降物体的影响;
- (2) 船舶搁浅;
- (3) 火灾/爆炸;
- (4) 畸形波。

随机载荷是指意外载荷,可能导致一场灾难,造成经济、环境等一系列后果,甚至造成人员伤亡。从某种意义上说,极限载荷和随机载荷是不同的,极限载荷规模和频率可以影响到一个小范围的结构设计,而积极控制则可能影响到意外载荷的频率和程度。随机载荷设计包括在考虑风险的情况下确定设计载荷、使用刚/塑性分析或非线性有限元分析预测结构响应和基于风险的验收标准。传统的刚/塑性分析在设计随机载荷时得到普遍应用,因为在事故发生时,随机载荷导致材料大塑性变形通常是吸收能量的结果。近年来,非线性有限元分析已应用于模拟结构在意外情况下的反应和设计结构的性能标准。使用有限元分析,我们能够处理复杂的意外情况,并更好地预测结构的反应。