

圆柱薄壳容器 的振动与屈曲

YUANZHU
BOQIAO
RONGQI
DE ZHENDONG
YU QUQU

翁智远

主编

钱江鲁亮

沈成康 顾绍德

编著

上海科学技术出版社

圆柱薄壳容器的振动与屈曲

翁智远 主编
钱江 鲁亮 编著
沈成康 顾绍德

上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

圆柱薄壳容器的振动与屈曲/翁智远主编. —上海: 上海科学技术出版社, 2007. 5

ISBN 978-7-5323-8898-1

I. 圆... II. 翁... III. ①薄壳结构—容器—振动②薄壳结构—容器—屈曲 IV. TB30

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 043539 号

上海世纪出版股份有限公司
上海科学技术出版社 出版、发行

(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235)

新华书店上海发行所经销

苏州望电印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 23.5

字数: 300 千字

2007 年 5 月第 1 版 2007 年 5 月第 1 次印刷

印数: 1—1 050

定价: 55.00 元

本书如有缺页、错装或损坏等严重质量问题,
请向工厂联系调换

谨以此书献给母校

同濟大學

百年华诞

前 言

本书是以核动力工程中的反应堆容器,石油化工、给水工程中的贮液容器,近海工程中的油罐等的建造为工程背景,以长期从事板与壳体结构静、动力学领域中的教学工作(主要指导研究生)、科学研究工作成果为依据,并参考国内外同行专家的近期成就,分两部分内容编写而成的一部学术专著。第一部分,即上篇,名为“圆柱薄壳容器的振动”,主要内容包括:圆柱薄壳贮液容器的自振特性;在地震地面运动激励下的响应(如液动压力、壳体位移、壳壁应力、基底剪力、倾覆力矩等);具有内部构件的圆柱薄壳贮液容器的自振特性;地震响应;液面晃动;具有环形的同轴两层圆柱壳的液动压力;容器的基底脱离等。第二部分,即下篇,名为“圆柱薄壳容器的屈曲”,其主要内容有:壳体屈曲的基本理论;屈曲准则;圆柱薄壳在地震地面运动激励下的屈曲行为;复杂组合旋转薄壳和开孔补强旋转薄壳的屈曲强度;贮液或潜浸于液体中的圆柱薄壳地震屈曲行为;短圆柱薄壳抗屈曲实验分析原理;座式快堆堆本体结构模拟试验等。

本专著的特点在于:内容十分丰富,既包含复杂结构的流固耦联振动分析,又包含复杂结构的抗屈曲理论研究与应用;在基本假设的引进,合理的力学模型的建立,理论分析计算公式的推导,流固耦联模型试验中相似关系的确定,非接触光测实验方法的应用等方面,均有不少创新之处。

本书可作为工程力学、结构工程等专业高年级本科生、硕士生、博士生的学习资料,高校力学教师、有关科研单位、设计院的研究人员、设计者、工程师的参考之用。

本书包含上、下两篇共 19 章。上篇从第 1 章至第 8 章由钱江编写,从第 9 章至第 12 章由鲁亮编写;下篇从第 13 章至第 17 章由沈成康编写,第 18 章和第 19 章由顾绍德编写。全书各章由翁智远汇总。圆柱薄壳容器在工业和工程上应用广泛,在动载作用下其动力响应和屈曲问题

较多且十分复杂,本书所述只包含此学科领域中的部分内容,具有一定的局限性。由于编者的水平和经验不足,书中难免有欠缺之处,希望同行和读者批评指正。

同济大学 翁智远

2006 年 12 月

目 录

上篇 圆柱薄壳容器的振动

第 1 章 薄壳贮液容器振动问题的基本方程	3
1.1 壳体基本方程	3
1.1.1 正交曲线坐标系	3
1.1.2 正交曲线坐标系中的弹性力学几何关系	5
1.1.3 薄壳的基本假设	6
1.1.4 薄壳的正交曲线坐标	6
1.1.5 薄壳的几何方程	8
1.1.6 薄壳的物理方程	10
1.1.7 壳体的平衡微分方程	13
1.1.8 壳体的边界条件	14
1.1.9 圆柱薄壳基本控制方程及在法向荷载下的弯曲	16
1.2 流体运动基本方程	18
1.2.1 连续性方程	18
1.2.2 运动方程	20
1.2.3 势流问题	21
1.2.4 初始条件	22
1.2.5 边界条件	22
第 2 章 圆柱薄壳振动问题的级数解法	23
2.1 圆柱薄壳振动问题的基本方程	23
2.2 正交函数系	24
2.3 正交函数展开法解圆柱薄壳振动特征值问题	26

第 3 章 短圆柱形弹性贮液容器的自振特性分析及基频近似计算	32
3.1 概述	32
3.2 基于剪切梁变形理论的圆柱形贮液容器的自由振动方程	33
3.2.1 无液体时的自振频率与振型	33
3.2.2 有液体时的自振频率与振型	35
3.3 数值算例	38
3.4 关于流固耦合效应的讨论	45
3.5 圆柱形弹性贮液容器基频的近似计算	45
3.5.1 未含液体时的基频计算	46
3.5.2 含液体时的基频计算	47
第 4 章 考虑提高效应的非锚固圆柱形贮液容器摆动分析	49
4.1 概述	49
4.2 刚性圆柱形容器中液体的响应	50
4.3 刚性容器的基底荷载和等效的力学模型	53
4.4 等效力学体系的运动方程	56
4.5 数值算例	58
第 5 章 复杂组合壳体结构——快增殖反应堆堆本体系统的地震 响应计算分析	61
5.1 结构概述	61
5.2 计算模型简介	64
5.3 堆本体主系统的动力特性分析结果	66
5.3.1 结构动力特性	66
5.3.2 温度及加工偏差对结构动力特性的影响	67
5.4 堆本体主系统的地震响应时程结果	67
5.5 结果分析及结论	71
第 6 章 快增殖反应堆主容器内流固耦合问题计算分析	72
6.1 概述	72
6.2 计算模型简介	73

6.3 主容器流固耦合系统的动力特性计算结果	74
6.3.1 流固耦合效应对结构动力特性的影响	74
6.3.2 温度及加工偏差对结构动力特性的影响	75
6.4 堆内液体晃动问题计算分析	75
第7章 快堆试验模型流体晃动问题的简化分析模型及动强度	
简化计算	79
7.1 概述	79
7.2 试验模型的计算简图	79
7.3 基本假设	82
7.4 在水平地震作用下的运动方程	83
7.5 容器的动力特性分析	86
7.5.1 计算等效质量 M_w^*	86
7.5.2 计算刚度系数及自振频率	87
7.5.3 几种特殊情况	88
7.6 几点结论	89
7.7 地震地面运动在结构中引起的作用力	89
7.8 最大基底剪力和最大倾覆力矩	91
7.9 强度校核	92
7.9.1 最大剪应力	92
7.9.2 最大弯曲应力(产生在基底横截面上)	93
7.9.3 模型轴向静压应力	93
第8章 在水平地震激励下快堆主容器及热屏蔽最大液动压力计算 ...	94
8.1 概述	94
8.2 计算模型	94
8.3 刚性内池壁的液动压力	95
8.4 刚性环池外壁的液动压力	96
8.5 柔性圆筒壁的液动压力	98
8.6 内、外池壁均为柔性的环形容器	100
8.7 内壁为刚性、外壁为柔性的环形容器	103

8.8	两道热屏蔽形成的环形容器	106
8.9	结论	108
第9章	圆柱薄壳贮液容器振动的试验研究方法	109
9.1	常用试验研究方法	109
9.2	相似理论的基本定理	110
9.2.1	相似第一定理	110
9.2.2	相似第二定理	110
9.2.3	相似第三定理	111
9.2.4	确定相似准则的方法	111
9.3	流体动力模型试验的相似关系	112
9.4	圆柱薄壳贮液容器动力试验的动力相似关系	114
9.4.1	结构动力相似关系分析	115
9.4.2	圆柱薄壳容器结构动力相似关系的修正	116
9.4.3	圆柱薄壳容器结构中流体参数的动力相似关系	117
9.5	模型试验的主要步骤	119
9.6	圆柱薄壳贮液容器振动试验的设备和仪器介绍	120
9.6.1	圆柱薄壳贮液容器振动试验的设备	120
9.6.2	地震模拟振动台试验	121
9.6.3	圆柱薄壳贮液容器振动试验的数据采集和测量仪器	124
9.7	圆柱薄壳贮液容器动力特性测试和抗震试验一般步骤	125
第10章	快堆容器流固耦合模型动力相似关系研究	127
10.1	概述	127
10.2	反应堆容器模型试验的基本动力相似关系	128
10.2.1	重力失真动力模型的建立	128
10.2.2	数值模拟法评估流固耦合模型重力失真效应影响的方法	129
10.2.3	某25MWe快堆容器1:6,25动力试验模型示例	130
10.3	几何变态的流固耦合动力试验模型	133
10.3.1	几何变态动力模型的建立	133
10.3.2	某1340MWe快中子增殖反应堆1:10振动台试验模型示例	135

10.4 结论	136
第 11 章 地震作用下座式快堆钠池液面晃动的试验研究	138
11.1 概述	138
11.2 快堆模型振动台试验	139
11.2.1 试验模型及试验设备	139
11.2.2 模型试验的动力相似关系	140
11.2.3 模型试验的测点布置	141
11.2.4 模型振动台试验的加载顺序	141
11.3 环形储液结构中液体自振频率的解析解	142
11.4 试验结果及分析	143
11.4.1 结构及环境液体晃动的动力特性	143
11.4.2 液面晃动波高	144
11.5 结论	145
第 12 章 中国实验快堆堆本体地震响应振动台试验研究	146
12.1 概述	146
12.2 试验方案	147
12.2.1 振动台试验内容简介	147
12.2.2 模型试验动力相似关系	150
12.2.3 台面输入和测点布置	151
12.3 中国实验快堆堆本体模型地震响应	154
12.3.1 整体结构梁式振动基频	154
12.3.2 试验模型地震响应	154
12.4 中国实验快堆堆本体抗震性能试验研究主要结果	156

下篇 圆柱薄壳容器的屈曲

第 13 章 壳体屈曲的基本概念和基本理论	161
13.1 概述	161
13.2 屈曲问题的分类	162

13.2.1 按结构的承载形式分类	162
13.2.2 按结构屈曲时的材料性质分类	164
13.2.3 按临界状态的特性分类	164
13.3 弹性屈曲和塑性屈曲	166
13.3.1 临界荷载值概念上的区别	166
13.3.2 计算理论方面的区别	167
13.4 动态屈曲问题的特点	170
13.5 壳体屈曲基本理论	171
13.5.1 壳体小挠度屈曲理论	171
13.5.2 前屈曲一致理论	175
13.5.3 非线性大挠度屈曲理论	175
13.5.4 非线性缺陷理论	179
第 14 章 屈曲准则	184
14.1 概述	184
14.2 结构静力屈曲准则	184
14.2.1 静力准则	185
14.2.2 动力准则	185
14.2.3 能量准则	186
14.2.4 初缺陷准则	188
14.3 结构第一类动力屈曲问题的屈曲准则——参数共振准则	188
14.4 结构第二类动力屈曲问题的屈曲准则	195
14.4.1 B-R 运动准则	195
14.4.2 变形发散准则	196
14.4.3 能量准则	197
14.4.4 初缺陷放大准则	202
14.4.5 拟静力冲击屈曲准则	203
14.4.6 分叉准则	203
14.4.7 不确定性准则	204

第 15 章 薄壁圆柱壳在地震地面运动激励下的屈曲行为	206
15.1 薄壁圆柱壳在静水平剪切力作用下的屈曲行为	206
15.1.1 前屈曲边界条件和薄膜应力	207
15.1.2 屈曲的基本方程	208
15.1.3 屈曲荷载及屈曲模态	211
15.2 薄壁圆柱壳在水平周期荷载作用下的屈曲行为	218
15.2.1 动力屈曲的基本方程	218
15.2.2 动力屈曲的马丢-希拉方程	221
15.2.3 动力屈曲的数值分析	224
15.3 短圆柱薄壳抗震屈曲的设计方法	231
15.3.1 薄壁圆柱壳同时受到水平与竖直地震作用时的设计方法	231
15.3.2 考虑温度效应对薄壁圆柱壳屈曲强度影响时的设计方法	235
15.3.3 日本快堆主容器抗震屈曲设计规程	236
 第 16 章 复杂组合旋转壳和开孔补强旋转薄壳的屈曲强度	246
16.1 实验模型的有限元计算与分析	247
16.1.1 室温条件下实验模型的抗屈曲有限元计算与分析	247
16.1.2 高温条件下实验模型的抗屈曲理论计算与分析	252
16.2 完善结构形式的主容器的抗屈曲有限元计算与分析	256
16.2.1 反应堆堆本体计算模型	256
16.2.2 计算结果与分析	257
16.2.3 结论	258
16.3 非完善结构形式的主容器的抗屈曲有限元计算与分析	259
16.3.1 初始缺陷位于裙座时的屈曲分析	260
16.3.2 初始缺陷位于主圆柱壳时的屈曲分析	262
16.4 开孔补强旋转薄壳在水平和垂直地震共同作用下的屈曲 分析	264
16.4.1 荷载与计算模型	264
16.4.2 对不开孔的堆本体结构的计算结果	267
16.4.3 对开孔并用套筒补强的堆本体结构的计算结果	269

第 17 章 贮液或潜浸于液体中的圆柱薄壳在地震激励下的屈曲	
行为	272
17.1 在水平激励下的充液壳体的动力稳定性	272
17.2 非固定支撑贮液罐在横向荷载作用下的后屈曲	274
17.3 潜浸于液体中的同轴圆柱薄壳在地震激励下的动屈曲	279
17.3.1 确定 FBR 原型的液压分布特性和屈曲压力	280
17.3.2 动力屈曲实验	281
17.3.3 试验结果	282
17.3.4 屈曲开始时刻(屈曲门槛)压力分布的估算	284
17.3.5 动态屈曲压力与静态屈曲压力的比较及次谐波振动的影响	284
第 18 章 短圆柱薄壳抗屈曲性能实验分析原理	286
18.1 短圆柱薄壳失稳临界荷载的理论解析分析概述	286
18.2 短圆柱壳屈曲强度工程估算方法和近似分析方法	289
18.2.1 剪切屈曲强度估算公式	290
18.2.2 弯曲屈曲强度估算公式	291
18.2.3 轴向屈曲强度估算公式	291
18.2.4 剪切屈曲和弯曲屈曲间的相互作用及轴向荷载对它们的附加 影响	291
18.2.5 实验模型静态屈曲的估算分析实例	292
18.2.6 短圆柱薄壳抗横切力弹-塑性屈曲强度值近似分析法 (φ 方法)	292
18.3 短圆柱薄壳抗横切力屈曲性能试验	293
18.3.1 概述	293
18.3.2 屈曲性能试验内容和试验模型	294
18.3.3 模型屈曲强度预分析	296
18.3.4 试验简介	297
18.3.5 实验分析和小结	301
18.4 实验-数值、近似解析混合分析方法	302
18.4.1 概述	302
18.4.2 混合分析方法的折合系数 η 和结构屈曲强度值 Q_{cr} 的确定	303

18.5	模型屈曲强度试验及其相似性原理	304
18.5.1	屈曲强度检测	304
18.5.2	弹塑性屈曲模型实验相似条件	304
18.5.3	模型与结构原型的屈曲强度值相似换算	305
18.6	模型初始曲面和屈曲模态的光力学检测方法	306
18.6.1	物理原理和相移技术	306
18.6.2	模型初始曲面的检测	308
18.6.3	实测屈曲模态	309
18.6.4	系统精度分析	311
第 19 章	座式快堆堆本体结构模拟试验	314
19.1	短圆柱壳屈曲强度实验综述	314
19.2	形状测量光力学方法应用于屈曲实验	317
19.2.1	应用云纹法检测该模型的初始曲面	317
19.2.2	应用云纹法测量模型的屈曲模态	323
19.3	测定座式快堆堆本体模拟体试验模型(第二类试验模型) 的静态屈曲荷载	326
19.3.1	简化力学模型	326
19.3.2	加载系统和试验台架	327
19.3.3	屈曲强度预分析	327
19.3.4	试验简介	329
19.3.5	小结	333
19.4	堆本体整体结构原型屈曲强度推算	334
19.4.1	修正的工程近似分析(准则法)(折合系数 η)	334
19.4.2	修正的线弹性有限元法(折合系数 η')	335
19.4.3	修正的 φ 方法(折合系数 η'')	335
19.4.4	屈曲强度的模拟试验值换算	336
19.4.5	小结	337
19.5	座式快堆堆本体整体结构剪-弯屈曲模型振动台试验 分析	337
19.5.1	模拟体模型振动台试验	338

19.5.2	试验组织与实施	340
19.5.3	试验结果	343
19.5.4	综合分析	351
19.5.5	小结	352
19.6	结论	352
参考文献		354

上 篇
圆柱薄壳容器的振动