

薄壳 计算与理论

〔英〕 J.E. 吉布森 编
徐家礼 孙孝纯 译

国防工业出版社

薄壳 计算与理论

〔英〕 J.E. 吉布森 编

徐家礼 孙孝纯 译

国防工业出版社

内 容 简 介

目前,应用计算机程序可对各种壳体结构进行分析计算,本书则专门介绍壳体的弹性分析和为此编制程序的方法。

其主要内容有:壳体的基本理论;FORTRAN程序简介;闭合或开口圆筒形壳体、球形或任意形状的旋转壳体的薄膜理论和弯曲理论;同时对一些复杂的壳体,如多筒形壳体、隔板结构、多夹芯板结构、波纹板壳体也进行了有限元分析。书中除了对每种壳体进行理论分析而外,均给出具体的计算机程序,以供实际工作者使用。此外,本书还介绍了壳体的试验研究。

本书可供机械、交通运输、土木建筑、石油化工、航空航天等部门从事结构设计、生产的工程技术人员使用,也可供理工科院校有关专业师生参考。

THIN SHELLS
Computing and Theory
J. E. GIBSON
PERGAMON PRESS 1988

*

薄 壳 计 算 与 理 论

〔英〕 J. E. 吉布森 编
徐家礼 孙孝纯 译

*

国防工业出版社出版、发行

(北京市车公庄西路老虎庙七号)

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

787×1092¹/₃₂ 印张 9 195千字

1989年1月第一版 1989年1月 第一次印刷 印数: 0,001—2,080册

ISBN 7-118-00074-4/V·7 定价: 4.50元

译 者 的 话

薄壳结构广泛地应用于日常生活和工业技术各个方面。目前，对薄壳结构有比较完整的理论和方法进行受力分析和计算，尤其是电子计算机的出现，更提供了迅速而可靠的手段，从而促进了力学领域的发展。

经典力学和近代力学的理论和计算方法是密切相关、相互促进的，并且在很多方面难以分开。今天，这些理论和方法仍然是力学工作者的基础，因而受到人们的重视。将现代化的计算手段应用于工程实际，是近二十年才开始的，但是已为人们在解决复杂的力学问题方面开辟了新的途径，并日臻完善。

本书是作者应用有限元方法和计算机程序对各种薄壳结构进行弹性分析和受力计算的经验总结。书中阐述了壳体的薄膜理论和弯曲理论，以及应用有限元法和通用的FORTRAN语言对工程中常用的各种典型壳体所做的分析计算；给出的通用计算机程序，有利于科研和设计、生产等单位的力学工作者实际应用。因此，本书对于从事结构设计、生产的各类工程技术人员和理工科院校有关师生均有裨益。

在本书翻译过程中得到刘国骏同志的帮助，在此表示感谢。由于译者水平有限，错误在所难免，敬请读者批评指正。

前 言

在最近几年,应用计算机程序已可相当容易地对壳体应力进行分析计算。本书专门介绍壳体的弹性分析和为此编制程序的方法。本书是作者根据伦敦都市大学高年级工程专业学生和研究生所讲授的部分课程编写的,从壳体薄膜理论到弯曲理论逐步进行了分析,并使用那些容易为高年级学生所接受和理解的数学模型,在必要的地方给出完整的数学推导,因此,读者只要具备微积分的基础知识,便可阅读。

为了介绍计算技术,第二章主要介绍 FORTRAN 语言程序的编制,并全面研究壳体单元的程序。此外,在各章的(具体壳体分析中的)最后部分,还给出一种程序及其该程序运算的结果。根据本书的这种安排,对于不愿意纠缠在具体计算中的读者们,完全可以避开第二章及各章末尾的程序研究。

前七章是专门研究圆筒形壳体、球形壳体的薄膜理论和弯曲理论以及任意形状壳体的薄膜理论。在适当的地方,提供必要的数值计算实例,并给出完整的计算机程序。

第八章中研究了更复杂的壳体结构,诸如多壳体的分析。然而,因为计算机程序长而复杂,所以不予深入叙述,而对分析复杂壳体结构所使用的方法,则给予详细地探讨。这样的结构包括有边缘梁或没有边缘梁的多柱面壳体、隔板结构、双曲度壳体、纵梁桥、盒形桥和高大建筑物的芯体。例如伦敦国家威斯敏斯特银行 (National Westminster Bank) 以

11/89/09

及用于北海石油设备的混凝土重力平台的多柱面壳体。

到此为止，我们还只是研究了连续体的弹性分析法，而第九章讨论了有限元法，在这种方法中，壳体被认为是由一系列离散单元组成的，为此，我们选择了环状单元，并研究了环状单元的完整理论，而且把理论用于前面研究的高压容器分析之中，同时还与计算机的输出作了比较。

第十章专门用来阐述理论上的计算应力和由试验大、小壳体结构模型所得实际实验应力间的吻合情况，上述模型的研究包括多柱面壳体、摺板结构、柱形容器和盒形桥。

最后一章是作者最近对于波纹状钢板的研究工作总结，波纹状钢板大大地减少从小规模到中等规模跨度的结构上的静载荷。书中还给出一种分析方法并就平面波纹状壳体的理论应力、试验应力和挠度之间作了比较。

目 录

第一章 壳体理论概述	1
1.1 引言	1
1.2 壳曲面的参考坐标系	2
1.3 薄膜内力	2
1.4 弯曲内力	3
1.5 圆筒壳的薄膜理论	4
1.6 两端简支的筒形容器	8
1.7 充满液体的筒形容器	11
1.8 承受重力载荷的悬臂圆筒壳	12
第二章 FORTRAN 程序	15
2.1 引言	15
2.2 计算机的操作	15
2.3 FORTRAN 运算	17
2.4 程序代码	18
2.5 常数和变量	18
2.6 数组	19
2.7 算术运算	20
2.8 算术语句	20
2.9 标准函数	20
2.10 控制语句	21
2.11 “GO TO” 语句	21
2.12 “IF” 语句	22
2.13 “DO” 语句	22
2.14 输入/输出操作	23

2.15	“READ” 语句	24
2.16	“WRITE” 语句	24
2.17	F 格式说明	25
2.18	I 格式说明	25
2.19	H 格式说明	25
2.20	关于容器应力的程序结构	26
2.21	程序运算	28
2.22	程序修改	31
2.23	英制和 SI 单位输入数据转换	34

第三章 闭合圆筒壳在轴对称载荷作用下的

弯曲理论	39
------	----

3.1	引言	39
3.2	平衡方程	41
3.3	薄膜应变	42
3.4	弯曲应变	43
3.5	“ z 曲面”的复合应变	45
3.6	应变-内力方程	46
3.7	应变-位移方程	48
3.8	屈曲-位移方程	50
3.9	内力-位移方程	51
3.10	协调方程的简化	52
3.11	协调方程的解法	53
3.12	充满液体的筒形容器	55
3.13	具有厚端板的筒形高压容器	58
3.14	充满液体的容器(数值计算实例)	60
3.15	高压容器(数值计算实例)	63
3.16	高压容器的程序分析	65
3.17	高压容器的程序编目	66
3.18	高压容器的输出	68
3.19	充满液体的容器的应力分析程序	70

3.20	充满液体的容器的应力程序编目	71
3.21	容器应力输出	72
第四章 开口圆筒形壳体的弯曲理论		75
4.1	引言	75
4.2	平衡方程	77
4.3	中面的应变位移方程	79
4.4	中面的屈曲位移方程	80
4.5	应变-内力方程	82
4.6	协调方程	82
4.7	简支开口圆筒形壳体的方程解	83
4.8	对称加载的解法 (余函数)	85
4.9	表格形式的余函数	88
4.10	均匀载荷的特别积分	90
4.11	自由边缘上的边界条件	93
4.12	数值计算实例	94
4.13	开口筒形壳体的Schorer程序	99
4.14	Schorer程序输出	101
第五章 旋转壳体的薄膜理论		104
5.1	引言	104
5.2	平衡方程	106
5.3	旋转壳体在轴对称载荷下的薄膜理论	109
5.4	在轴对称载荷作用下简支的球形拱顶	112
5.5	球形贮罐	113
5.6	锥形壳体	115
5.7	数值计算实例	116
5.8	球形结构中的应力程序	117
5.9	球形结构中的应力程序编目	118
5.10	输出	119
第六章 旋转壳在轴对称载荷作用下的弯曲理论		121
6.1	引言	121

6.2	平衡方程	123
6.3	中面的应变-位移方程	126
6.4	中面的屈曲-位移方程	128
6.5	内力-位移方程	131
6.6	轴对称载荷作用下的球形壳体	133
6.7	球形壳体在轴对称载荷作用下的简化理论	137
6.8	刚性固支边的球形拱顶	140
6.9	简支边的球形拱顶	142
6.10	精确理论和近似理论的比较	143
6.11	数值计算实例	145
6.12	固支边球形壳体的应力程序	146
6.13	固支边球形壳体的应力程序编目	147
6.14	程序输出	148
6.15	简支边的球形壳体的应力程序	151
6.16	简支边的球形壳体的应力程序编目	151
6.17	程序输出	153
第七章	一般形状壳体的薄膜理论	156
7.1	引言	156
7.2	一般形状表面的几何特性	156
7.3	薄膜平衡方程	158
7.4	平衡方程式的变换	160
7.5	变换平衡方程的解	161
7.6	双曲抛物面	162
7.6.1	垂直的均匀载荷	163
7.6.2	双曲抛物面上的均匀重力载荷	167
7.7	抛物劈锥曲面	170
7.7.1	抛物劈锥曲面在均匀重力载荷作用下的薄膜分析	171
7.7.2	边界条件	172
7.7.3	求解方法	173
7.8	抛物劈锥曲面薄膜应力程序	175

7.9	程序编目	176
7.10	程序输出	178
第八章 用计算机程序分析多筒形壳体结构的弯曲和薄膜应力		
		182
8.1	引言	182
8.2	无边梁开口多筒形壳体的边界条件	183
8.3	边界条件的解	186
8.4	开口多筒形壳体通用程序	188
8.5	“薄边”多筒形壳体通用程序实例	189
8.6	板状结构的“简化理论”	193
8.7	用“简化理论”分析风载荷下的槽板屋顶	195
8.8	槽板结构“简化理论”的收敛性	197
8.9	具有边梁的多筒形壳体	199
8.10	按“简化理论”分析三通道纵梁桥	202
8.11	闭合多筒形悬臂壳体	203
8.12	程序结构	206
8.13	多夹芯板结构风压应力	207
8.14	多环形板外部芯体结构风压应力	209
8.15	高大办公楼建筑芯体的风压应力	210
第九章 闭合圆形壳体的有限元分析		214
9.1	引言	214
9.2	节点力位移方程	214
9.3	轴对称的筒面单元段	217
9.4	应变-位移关系	220
9.5	应力-应变矩阵	222
9.6	应用虚功推导刚度矩阵	223
9.7	筒形有限元的刚度矩阵	225
9.8	全刚度矩阵	228
9.9	总刚度矩阵	229
9.10	内力的输出	231

9.11 具有厚端板的筒形高压容器的有限元程序	233
9.12 程序输出	235
第十章 壳体的试验研究	240
10.1 引言	240
10.2 开口筒形壳体的研究	241
10.3 带有小边梁的大型筒形壳体的试验研究	244
10.4 小型多筒形壳体的研究	250
10.5 褶皱板结构的研究	254
10.6 铰支并承受静液压的闭合筒形容器的研究	257
10.7 盒形桥应力和挠度的研究	259
10.8 结论	263
第十一章 波纹状壳体	264
11.1 引言	264
11.2 波纹板壳体	268
11.3 波纹褶皱板	270
11.4 波纹状的筒形壳体	271
11.5 对用标准波纹板构成的壳体的试验和理论研究	272
参考文献	276

第一章 壳体理论概述

1.1 引言

事实上壳体结构是大家早就熟悉的，但把这种结构用于各种容器、飞机机身、潜水艇的壳体、屋顶结构只是近来才开始的。在过去，壳体的固有强度满足结构要求的情况并不多，这主要是因为获得建造壳体的合适材料比较困难，而这种困难现在已不存在了。一般说来，现代的薄壳结构都是用各种不同的材料做成的，如钢、轻合金、塑料、木材和钢筋混凝土。

笼统地说，可以把薄壳结构定义为在两个具有小间距的双曲面之间的密闭式壳体。这两个曲面间的距离就是壳体的厚度。如果厚度与结合面的外廓尺寸相比很小的话，那么这个壳体就定义为“薄壳”，反之就定义为“厚壳”。本书主要是研究“薄”壳结构，因此，我们就可以恰当地设计上述结构。

为了简化分析，假设构成壳体的材料是均质、各向同性和完全弹性的。如果用具有这样物理性能的材料制造薄壳结构，那么在开始设计时就要考虑这种假设，并只能严格地应用，钢就是一个典型的例子。然而，虽然钢筋混凝土只能在较低的应力范围内、以合理的弹性方式工作，但是，实际上把大多数钢筋混凝土薄壳屋顶都设计为弹性结构。

1.2 壳曲面的参考坐标系

为了确定壳体曲面上各点的位置，选择曲面的两个界面之间的“中面”作为参考面。在此面内，利用相互垂直的坐标轴就能确定中面上任何一点。图 1.1 中示出了壳体单元中面坐标系 x 、 y 和 z 。这个单元的边分别与 xz 和 yz 平面平行。

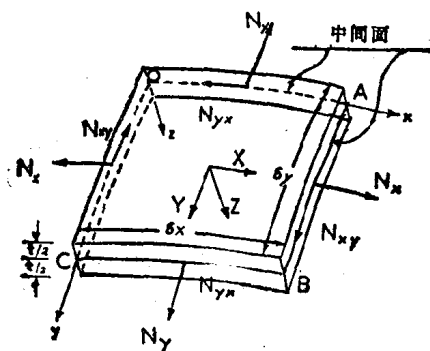


图1.1 薄膜内力

1.3 薄膜内力

为了研究壳体在外力作用下引起的应力，并便于区别两种类型的作用力，我们将力分为“薄膜”和“弯曲”作用力。

对于薄膜作用力，我们假设这个壳体不能承受任何弯矩，外载荷只由壳体曲面内产生的内力承担。如承受内压气球的张力就是一个典型的例子。那么在壳体理论中，常常把作用在壳体单元边上的力定义为单位边长上的力，这些力叫做“内力”。图1.1中示出了作用在边长为 δx 和 δy 的单元上的一组

薄膜内力。 N_x 、 N_y 为每单位长度上的薄膜力，通常是分别垂直作用在 δx 、 δy 边上。而 N_{xy} 、 N_{yx} 是单位长度上的剪力，分别作用于以 δy 、 δx 为边的平面内。在全书使用的符号中，如果指定这些内力的方向如图1.1中所示，那么，我们就把这些内力称之为正内力，所以 N_x 、 N_y 的正值表示为拉力。

同样，常常把作用在壳体表面上的外力分解为沿坐标轴方向上的分量 X 、 Y 和 Z ，并把这些分量定义为单位面积上的力。如果作用在坐标轴的正向，那么就指定为正。

在本章后面将阐明推导只包括静力学基本定律的壳体薄膜理论。

1.4 弯曲内力

薄膜内力是不能充分表示壳体单元的真实弹性性能，因为外载荷不可避免地要导致壳体的挠曲或弯曲，而这样弯曲只能由壳体内引起的内力矩和内力承受。图1.2则表示了这样一组力和力矩。

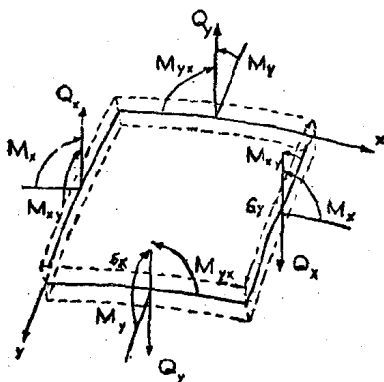


图1.2 弯曲内力

此外, 当分析这样一组应力系时, 宜于用作用在边缘上的单位长度的力和力矩表示。在图1.2中, M_x 和 M_y 分别是作用在边长为 δy 、 δx 单位长度上的力矩; 而 M_{xy} 和 M_{yx} 分别是作用在单元边长为 δy 、 δx 上单位长度上的扭矩; Q_x 、 Q_y 是单位长度上的横向剪力。如果, 力矩和横向剪力的方向如图1.2所示, 那么就定义它们是正的。从而, 可以推导出求解这些力矩和剪力值的理论, 并称之为壳体的“弯曲理论”。在这种情况下, 人们发现要求出这些内力, 仅用静力学方程是不够的, 还必须考虑解更多的方程, 其中包括应变和位移方程。

若把薄膜理论和弯曲理论分开, 将“薄膜作用”或“弯曲作用”分别视作单独发生的, 这虽然在数学上是不恰当的, 但是, 在某些情况下, 这种方法也能得到相当精确的结果。因此, 在一个壳体中极为详细地研究这些应力还是合适的。为了简单起见, 在圆筒形壳中, 我们只考虑其薄膜应力。

1.5 圆筒壳的薄膜理论

在讨论圆筒形壳中, 假设壳体母线是水平的, 并平行于 x 轴。这个曲面单元是由两个相邻的母线和两个垂直于 x 轴的横截面构成的。于是, 单元曲面上任意点的位置就是由坐标轴 x 和 $y = R\phi$ 确定, 这里的角 ϕ 是从固定的纵坐标轴量起 (图1.3); R 是壳体的半径。

因为筒形壳的半径 R 是常数, 所以 $dy = R d\phi$, 偏微分的形式是 $\partial / \partial y = \partial / R \partial \phi$ 。

现在来研究图1.3所示的曲面单元, 该单元的边长分别为 dx 、 $R d\phi$ 。如图所示, 作用在这个单元上的 x 和 $y = R\phi$ 方向上的薄膜内力是 N_x 和 N_ϕ ; 而在 x 和 y 方向上的剪力是

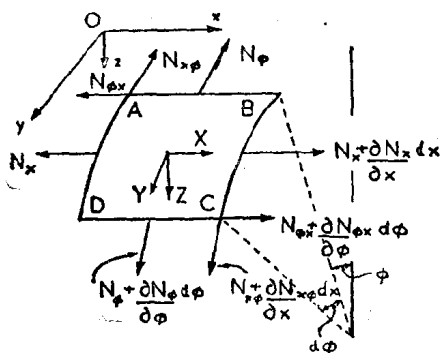


图1.3 在筒形壳中薄膜内力

$N_{\phi x}$ 和 $N_{x\phi}$ 。把所有这些内力定义为作用在这条边上的单位长度力。

作用在单元上的外力在各坐标轴的方向上的分量为 X 、 Y 和 Z ，并把它们规定为单位面积力。

在 AD 边上内力 N_x ，一般是沿 x 方向垂直作用在该边上，把 AD 边扩展到 BC ，其内力值增加到

$$N_x + \frac{\partial N_x}{\partial x} dx$$

同样，在 AB 边上内力 N_ϕ ，一般是沿 y 方向垂直作用在该边上，把 AB 边扩展到 CD ，其内力值增加到

$$N_\phi + \frac{\partial N_\phi}{\partial \phi} d\phi$$

再来研究 AB 边上的剪切力，剪切内力 $N_{\phi x}$ 的作用方向是平行于 AB 边（在 x 方向上），把边 AB 扩展到边 CD ，其剪切内力值增加到

$$N_{\phi x} + \frac{\partial N_{\phi x}}{\partial \phi} d\phi$$