

网壳结构稳定性

沈世钊 陈 昕 著

科 学 出 版 社

1999

序

沈世钊教授的新著《网壳结构稳定性》即将问世；该书是他的梯队近 10 年来在网壳稳定性研究方面所取得成果的系统总结。稳定性问题对网壳结构的重要意义是众所周知的。这本关于网壳稳定性的专著有两个特点：一是在结构稳定性分析的理论和方法方面做了大量细致工作，不满足于简单算例的检验，而旨在真正实现具有大量自由度的实际网壳结构的全过程分析；二是没有停留在分析理论和方法的探讨上，而是进一步对各种类型具体网壳结构的稳定性能进行了大量分析计算，揭示结构稳定领域丰富多彩的实际过程和各种因素的复杂影响。科学是具体的，科学规律是通过对许多实际现象进行研究而逐步形成和发展起来的。仅就结构稳定问题而言，由单杆的稳定性、简单体系的稳定性过渡到复杂结构的稳定性，既存在其共性的一面，又表现出由量变到质变的过程。复杂结构全过程分析中所揭示出来的许多现象，是无法用关于单杆或简单体系的稳定性概念来概括的。该书作者共对 2800 余例不同类型、具有不同参数的实际尺寸网壳进行了全过程分析，考察其稳定性能的各个方面，对其规律性进行归纳总结，并在此基础上提出了验算各类网壳稳定性的实用公式。这些创新成果是迄今同类著作中十分少见的，确实为结构稳定学科的发展作出了贡献。这一成就得到了社会的承认，获得了多种高层次的奖励。

沈教授长期从事结构领域的研究和人才培养，80 年代初期以来在大跨空间结构领域不仅进行了卓有成效的理论研究，而且完成了很多有名的实际工程。他学术思想活跃，学风严谨求实，对具体工作一丝不苟，很值得学习。我相信，该书的出版不仅有重要的理论价值，而且必将广泛地为工程界所采用，为我国结构工

程的发展作出贡献。在该书即将付梓之际，乐为之序。

王 岩 远

1998年5月于哈尔滨建筑大学

前 言

作者近 10 年来致力于网壳结构稳定性研究,取得的一些成果可能对网壳的进一步发展有参考价值,因而试图通过写这本书对这些成果进行较系统的总结。

稳定性分析是网壳结构(尤其是单层网壳结构)设计中的关键问题。国外自 70 年代以来,国内自 80 年代中期以来,网壳结构发展异常迅速,其稳定性问题遂成为研究热点之一。

结构的稳定性可以从其荷载-位移全过程曲线中得到完整的概念。传统的线性分析方法是把结构的强度和稳定问题分开来考虑的。事实上,从非线性分析的角度来考察,结构的稳定性问题和强度问题是相互联系在一起的。结构的荷载-位移全过程曲线可以准确地把结构的强度、稳定性以至于刚度的整个变化历程表示得清清楚楚。当考察初始缺陷和荷载分布方式等因素对实际网壳结构稳定性能的影响时,也可从全过程曲线的规律性变化中进行研究。

以前,当利用计算机对复杂结构体系进行有效的非线性有限元分析尚未能充分实现的时候,要进行网壳结构的全过程分析是十分困难的。在较长一段时间内,人们不得不求助于连续化理论(“拟壳法”)将网壳转化为连续壳体结构,然后通过某些近似的非线性解析方法求出壳体结构的稳定性承载力。这种方法有较大的局限性:连续化壳体的稳定性理论本身并未完善,缺乏统一的理论模式,需要针对不同问题假定可能的失稳形态,并作出相应的近似假设;事实上仅对少数特定的壳体(例如球面壳)才能得出较实用的公式;此外,所讨论的壳体一般是等厚度的和各向同性的,无法反映实际网壳结构的不均匀构造和各向异性的特点。

作者从 1986 年起参与这一研究领域,一直坚持从结构的荷载

-位移全过程分析中来考察结构的稳定性能。随着计算机的广泛应用和非线性有限元分析方法的发展,这一研究方法在当时已完全现实可行。需要解决的问题主要是针对像网壳这样具有成千自由度的大型复杂结构体系,进一步改进和完善有限元分析方法和路径跟踪技术,使其荷载-位移全过程分析得以顺利实现;在这方面我们取得了较好的成果,并编制出比较完善的分析程序。事实上,与作者同时或稍后,国内一些研究者也在着手这一问题的研究。应该说,我们已有可能对各种复杂网壳结构进行完整的全过程分析,并且较精确地确定其稳定性极限承载力。

然而,实际设计工作者并不满足于这些理论成果,他们可以购买我们的软件或委托我们进行复杂网壳的稳定性分析,但是更希望我们能提供便于设计人员使用的实用计算方法。他们仍然赞赏以前用连续化理论导出的仅适用于球面网壳稳定性验算的简单公式。他们的这种愿望和要求是可以理解的。目前网壳的应用越来越多,设计部门不可能将每个网壳的稳定性验算均委托少数研究机构去解决,至少在方案设计中希望对所设计网壳的稳定性有一个基本的判断。

基于上述理解,作者认真思考以后认为,采用大规模参数分析的方法将已有的理论成果进一步推进到便于实用的程度是切实可行的。也就是说,结合不同类型的网壳结构,在其基本参数(几何参数、构造参数、荷载参数等)的常用变化范围内,进行大规模的实际结构全过程分析,在此基础上提出网壳稳定性验算的实用方法(或公式)。这种研究方法也可称为大规模的“计算机试验”。作者从1991年开始着手这一工作,先后对球面网壳、柱面网壳、双曲扁网壳、双曲抛物面鞍形网壳等不同类型的网壳结构进行了大规模的参数分析,其间考虑了不同网格形式、不同支承条件、不同荷载分布方式和不同大小初始几何缺陷等可能因素的影响,共计进行了2800余例实际尺寸网壳结构的全过程分析。尽管这一研究工程的工作量相当浩大,但在踏踏实实做了这许多具体分析以后,对网壳结构丰富多采的全过程受力性能、其失稳的实

际过程和各种因素的复杂影响,就有了一些实质性的了解。由于计算的数量较多,取得的结果有较好的规律性,使我们有可能在此基础上进行归纳总结,提出一些较为易行的实用方法和实用公式。几年来,所取得的成果曾在有关刊物和学术会议上陆续作过介绍,引起了同行研究者的兴趣,尤其受到了广大设计部门的欢迎。正是在他们的鼓励下,作者把这些积累的成果进行归纳、总结,并进一步对有关资料进行补充研究,使其更加完整,写成了本书。

综上所述,作为研究结构稳定性的一本专著,本书没有停留在对分析理论和方法的探讨上,而是通过对大量具体结构的分析进一步揭示出实际网壳结构稳定性能中的丰富内涵;这是本书在研究过程中所形成的一个特点。这样做的确加深了对复杂结构体系稳定性问题的了解。此外,即使在探讨分析理论和方法时(如第二章),本书也尽量给出较多的实例以加强对理论内容的理解。

本书所涉及的研究课题是第一作者主持的建设部“八五”科技项目“悬索和网壳结构应用关键技术”的一个组成部分,该项目曾获1997年国家科技进步二等奖。

本书的研究工作还受到黑龙江省科技攻关项目和国家自然科学基金重大项目的支持。

由于科学是不断发展的,本书的一些论点仅代表作者当前对这些问题的认识。鉴于所探讨问题的复杂性,某些论点定会随着研究工作的深化和扩大而得到改进。作者衷心欢迎同行专家对本书提出指正意见。

本书第一作者主持整个研究工作,并执笔写成本书。第二作者负责非线性有限元分析方法和鞍形网壳稳定性两部分内容的研究,为第二、第六两章提供了大量素材;他负责编制的全过程分析程序未包括在本书之中,但对研究工作发挥了重要作用。

我的一些已毕业的研究生,如博士生王娜进行了弹塑性全过程分析方法的研究,硕士生汤建南、范卓、林友军、张峰、吴铁、

刘鹏远完成了大量计算工作，他们均对本书作出了贡献，特借此机会对他们表示诚挚的谢意。

沈世钊

1998年5月于哈尔滨建筑大学

目 录

序

前言

第一章 绪论	1
1.1 网壳结构稳定性分析方法回顾	1
1.2 本书的目的、研究方法和主要内容	7
第二章 网壳结构的非线性全过程分析	11
2.1 理论表达式的精确化	11
2.1.1 单元刚度矩阵的精确化	11
2.1.2 结点角位移的修正	23
2.1.3 单元的转换矩阵	25
2.2 平衡路径的跟踪	27
2.2.1 全过程路径跟踪的计算方法及迭代策略	27
2.2.2 临界点的判别准则	32
2.2.3 分枝路径的跟踪——扰动荷载法	34
2.3 SNAP 非线性分析程序	37
2.3.1 典型算例及文献比较	37
2.3.2 大型网壳结构的全过程分析	40
2.4 有缺陷网壳结构的稳定性分析	52
2.4.1 随机缺陷模态法	53
2.4.2 一致缺陷模态法	56
2.5 网壳结构的弹塑性大位移分析	60
2.5.1 分析方法	61
2.5.2 典型算例	67
第三章 单层球面网壳的稳定性	78
3.1 K8 型单层球面网壳	79

3.1.1	参数分析方案	79
3.1.2	全过程曲线、极限荷载和屈曲模态	82
3.1.3	初始缺陷的影响	88
3.1.4	荷载不对称分布的影响	93
3.1.5	网壳承载力拟合公式	97
3.1.6	支承条件的影响	100
3.2	K6 型单层球面网壳	102
3.2.1	参数分析方案	103
3.2.2	K6 型网壳全过程分析的基本结果	104
3.2.3	网壳承载力拟合公式	109
3.3	短程线型单层球面网壳	110
3.3.1	参数分析方案	111
3.3.2	短程线型网壳全过程分析的基本结果	112
3.3.3	网壳承载力拟合公式	116
3.4	肋环斜杆型单层球面网壳	117
3.4.1	参数分析方案	117
3.4.2	肋环斜杆型网壳全过程分析的基本结果	119
3.4.3	网壳承载力拟合公式	124
3.5	本章小结及网壳等效刚度的计算方法	126
3.5.1	单层球面网壳稳定性能及其实用计算方法	126
3.5.2	网壳等效刚度计算公式	128
第四章	单层圆柱面网壳的稳定性	131
4.1	四边支承的圆柱面网壳	132
4.1.1	参数分析方案	132
4.1.2	全过程曲线、极限荷载和屈曲模态	134
4.1.3	初始缺陷的影响	138
4.1.4	荷载不对称分布的影响	141
4.1.5	网壳长宽比的影响	144
4.1.6	网壳承载力拟合公式	145
4.2	两纵边支承的圆柱面网壳	148
4.3	两端支承的圆柱面网壳	150

4.3.1	参数分析方案	150
4.3.2	全过程曲线、极限荷载和屈曲模态	153
4.3.3	初始缺陷的影响	156
4.3.4	荷载不对称分布的影响	161
4.3.5	横向加劲肋的作用	165
4.3.6	网壳承载力拟合公式	166
第五章	单层椭圆抛物面网壳(双曲扁网壳)的稳定性	170
5.1	参数分析方案	171
5.1.1	结构尺寸及网格形式	171
5.1.2	杆件截面尺寸	171
5.1.3	荷载分布形式	172
5.1.4	初始缺陷	172
5.1.5	支承条件	173
5.2	全过程曲线、极限荷载及屈曲模态	174
5.3	初始几何缺陷的影响	180
5.4	荷载不对称分布的影响	188
5.5	支承条件的影响	195
5.6	网壳承载力拟合公式	196
第六章	单层双曲抛物面鞍形网壳的稳定性	204
6.1	负高斯曲率形空间杆系结构的稳定性	205
6.1.1	四杆空间体系	205
6.1.2	受拉杆约束的两铰拱	206
6.1.3	33 单元的鞍形网壳	209
6.2	网格布置形式对鞍形网壳刚度及稳定性的影响	210
6.3	鞍形网壳稳定性的参数分析	221
6.3.1	矢跨比(高跨比)的影响	221
6.3.2	边梁侧向刚度的影响	226
6.4	单层鞍形网壳稳定性试验研究	231
6.4.1	试验方案及装置	231
6.4.2	试验结果及分析	237
	参考文献	242

第一章 绪 论

1.1 网壳结构稳定性分析方法回顾

网壳结构是将杆件沿着某个曲面有规律地布置而组成的空间结构体系,其受力特点与薄壳结构类似,是以“薄膜”作用为主要受力特征的,即大部分荷载由网壳杆件的轴向力承受。由于它具有自重轻、结构刚度好等一系列特点,这种结构可以覆盖较大的空间。不同曲面的网壳可以提供各种新颖的建筑造型,因此也是建筑师非常乐意采用的一种结构形式。

网壳的发展与建筑材料和计算理论的发展紧密相连,其总的趋势是跨度越来越大,厚度越来越薄。国外尺寸超过 150m 的网壳已非个别。跨度大、厚度薄、重量轻可以看作是结构优化的成果;但与此同时,结构稳定性问题也变得突出起来。1963 年布加勒斯特一个 93.5m 跨度的单层穹顶网壳屋盖在一场大雪后彻底坍塌就属于网壳丧失了整体稳定,这一事故使工程师进一步认识到网壳结构稳定性问题的重要性。稳定性验算已成为网壳结构尤其是单层网壳结构设计中的关键问题。

结构的稳定性能可以从其荷载-位移全过程曲线中得到完整的概念,这种全过程曲线要由较精确的非线性分析得出来。传统的线性分析方法是把结构的强度问题和稳定性问题分开考虑的。事实上,从非线性分析的角度来考察,结构的稳定性问题和强度问题始终相互联系在一起。结构的荷载-位移全过程曲线可以把结构的强度、稳定性以至于刚度的整个变化历程表示得清清楚楚。目前,随着计算机的广泛应用和非线性有限元分析方法的发展,已完全可能较精确地跟踪结构的全过程工作性能。

就结构屈曲后的特点来说,其荷载-位移全过程曲线主要有三

种可能的类型,如图 1.1(a,b,c)所示。图中实线表示稳定的平衡路径,虚线表示不稳定的平衡路径, P_c 是临界荷载。对于极限屈曲的情况[图 1.1(a)],过临界点之后只有唯一的一条平衡路径,该路径的曲线是下降的,结构的平衡是不稳定的。对于分枝屈曲的情况,当到达临界点时曲线将分出两条或两条以上的平衡路径,其中沿着初始位移形态变化的一条平衡路径称作“基本路径”,结构在该路径上的平衡是不稳定的;其他的平衡路径称作“分枝路径”。在分枝路径上如果荷载呈上升的形式称为稳定的分枝屈曲[图 1.1(b)];如果荷载呈减小的形式则成为不稳定的分枝屈曲[图 1.1(c)]。

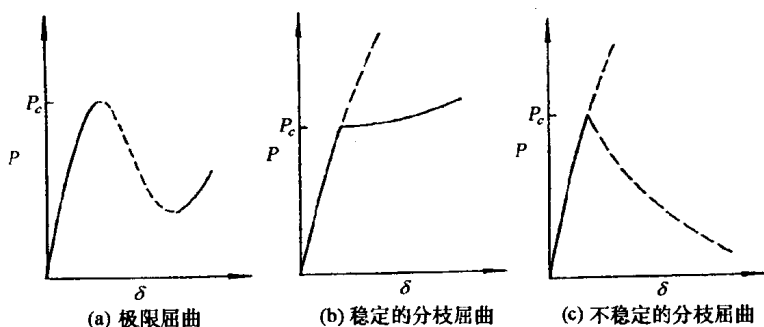


图 1.1 不同的屈曲后性能

如果结构存在初始缺陷,则临界荷载会有所降低。初始缺陷对结构临界荷载有多大影响,主要取决于结构对缺陷的敏感性。这里所谓的缺陷敏感性可以从荷载-位移曲线上来理解:假设两个结构具有相同的临界荷载并赋予同样大小的初始缺陷,其荷载-位移曲线如图 1.2 所示,其中粗线和细线分别表示理想结构和有缺陷结构的情形。由此可以看出,两个结构屈曲后的性能差异导致了缺陷结构具有完全不同的稳定性能:缺陷敏感性结构,临界荷载降低得多;缺陷不敏感的结构,临界荷载降低得少,甚至不存在屈曲问题。同时还可以看到,初始缺陷通常还使分枝问题转化为极限问题。因此,只有研究结构的全过程曲线,才能得到关于结构受力性能(包括其稳定性能在内)的完整概念。

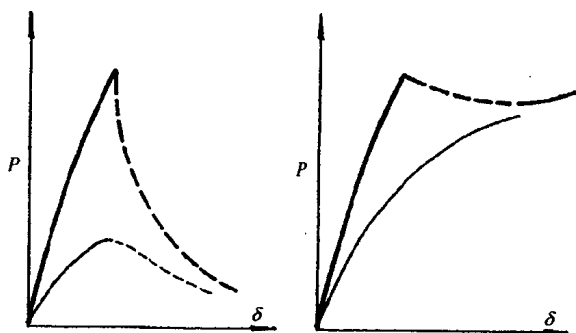


图 1.2 不同的缺陷敏感性

由此也可以看到,早期的通过分析结构特征值估算稳定临界力的线性分析方法与结构实际受力状况之间是有相当大差距的。由于网壳结构具有很高的几何非线性,尤其是正高斯曲率网壳,如球面穹顶网壳,其结构刚度随着荷载的增加而减小。对于这类结构,线性分析方法通常会过高估计结构的稳定承载力;为了安全,设计者往往采用加大安全系数的办法来保证结构的稳定承载力。线性分析方法也无法描绘结构的荷载-位移全过程工作性能,尤其是无法描绘结构的屈曲后性能。而许多结构的稳定承载力恰恰是由结构的屈曲后性能所决定的,对缺陷敏感的网壳结构更是如此。

但以前,当利用计算机对具有大量自由度的复杂体系进行有效的非线性有限元分析尚不能充分实现的时候,要进行网壳结构的全过程分析是十分困难的。在较长一段时间内,人们不得不求助于连续化理论(“拟壳法”)将网壳转化为连续壳体结构,然后通过某些非线性解析方法来求出壳体结构的稳定承载力。众所周知,早在 1939 年,Karman 和钱学森^[1]首次通过非线性分析求得了球面壳体稳定性承载力的较正确结果,并指出薄壳结构线性理论与试验结果之间的巨大差异是由于这类结构的不稳定的屈曲后性能决定的。在以后几十年中,人们沿着这一方向在壳体稳定性方面作了许多理论探索。

在稳定性的一般理论方面, Koiter^[2]在 1945 年提出了由势能渐近展开的方法建立弹性系统的稳定基本理论, 但是直到 1963 年, 在 Thompson^[3]系统地发展了结构弹性稳定的基本概念之后, Koiter 理论才得到广泛重视。Thompson 将总势能方程作为幂级数进行展开, 用 N 个广义坐标和一个荷载变量参数描述结构的弹性稳定问题, 并讨论了结构的“分枝”和“跳跃”这两个临界状态。

1965 年 Sewell^[5]将数学、物理和工程中广泛采用的摄动法应用到 Koiter 和 Thompson 稳定理论中, 所形成的方法成为固体力学中稳定问题的有效研究工具。

在早期的结构非线性稳定性分析中, 摄动法占有极其重要的地位。Morin 和 Connor^[7]采用摄动法不仅得到了壳体的临界荷载和屈曲前的结构位移, 而且还追踪到结构的屈曲后平衡路径。Lang 和 Hartz^[8]则利用总势能摄动法提出了一个矩阵公式, 并利用这个公式去研究平板和扁壳的屈曲后路径及缺陷敏感性等问题。

这一时期网壳结构的稳定性分析大都引用关于连续薄壳的研究成果。值得指出的是, Wright^[9], Buchert^[10], Del. Pozo^[11]和我国的胡学仁^[12]等都提出了关于球面穹顶网壳稳定性的计算公式。

在较长一段时期内, 这种“拟壳”方法对估算某些特定形式网壳的稳定性承载力起过重要作用。但这种方法有很大的局限性: 连续化壳体稳定性理论本身并不完善, 缺乏统一的理论模式, 需要针对不同问题假定可能的失稳形态, 并作出相应的近似假设; 事实上仅对少数特定形式的壳体(例如球面网壳)才能得出较实用的公式; 此外, 所讨论的壳体一般是等厚度的, 无法反映实际网壳在不同部位采用不同规格杆件的真实情况; 同样, 也无法反映许多网格形式各向异性的实际情况。鉴于“拟壳”方法的上述粗糙性质, 因而在进行理论验算的同时, 在很多场合还必须依赖通过测试来确定网壳稳定性承载力的试验方法。这样的试验研究一般可分为两种类型: 一类是通过一系列精确加工的小模型(所谓“力学模型”), 考虑壳体几何参数的适当变化, 采用尽可能精密的试验方法, 求出壳

体的稳定性承载力及其变化规律,并同理论公式相互印证。这类试验具有理论研究性质。但由于试验工作的复杂性,所试验模型的数量究属有限,实际上难于得到规律性的结果;此外,由于影响试验精度的因素较多,得到的一些试验结果往往比较分散。另一类试验是针对某一特定工程进行较大比例的模型试验,如果模型加工仔细和试验方案正确,可以做得比较精确,其结果主要对所探讨的工程有意义,在理论上也可提供一定的参考价值。但是,做这种试验是相当费时费钱的。

直到进入 70 年代,随着计算机的日益发展和广泛应用,非线性有限元分析方法兴起,并逐渐成为结构稳定性分析中的强有力工具。从那时以来,这一领域的研究工作一直相当活跃,在几何非线性问题的理论表达式和平衡路径跟踪的计算技术两个方面都做了不少工作。由于结构体系的非线性迭代计算在某些奇异点和某些特殊路径段不容易收敛,所以尤其在计算技术方面作了更多的探索。

屈曲前的结构非线性有限元分析通常都采用牛顿荷载增量法 (Incremental Newton-Raphson Method),该方法通过线性逼近和反复迭代使计算收敛于平衡路径。但由于在临界点附近结构刚度矩阵接近奇异,迭代不易收敛,因此无法计算屈曲后的荷载反应。

关于屈曲后的反应分析,Sharifi 和 Popov^[13]曾提出用人工弹簧法(Artificial Spring Method),即在结构中人为地加入一个线性弹簧,使结构强化,从而使结构刚度矩阵在整个加荷过程中始终保持正定,这样就可以用通常的荷载增量法进行结构的全过程分析。对于简单结构,如果仅需要一个弹簧,且当屈曲前后结构的刚度变化不是特别大时,这种方法是很有有效的。然而,从数学观点来看,对于多自由度体系,当需要多个弹簧时这种方法就不适用了。

后来,Batoz 和 Dhett^[14]又提出了用位移增量来控制荷载步长,即位移增量法(Incremental Displacement Algorithm)。在该方法中,选取 N 维位移向量中的某一分量作为已知量,而荷载作为变量,用位移变化来控制荷载步长。在此之前,曾有一些学者也提

出过位移增量法,但都不够完善,或者是刚阵不对称,或者是没有迭代的一步近似求解。Batoz 和 Dhett 则提出了用两个位移向量的同时求解技术,从而可以在迭代过程中保持原来刚度矩阵的对称性。实践证明,这种方法对结构的荷载位移全过程分析是非常有效的,能够很顺利地通过极限点,但在计算中所选择的控制位移必须一直增大,如果出现减小的情况,则迭代不收敛,计算终止。对于某些复杂结构,要想选择好控制位移分量并不容易,因此这种方法也有其局限性。

Wempner 和 Riks^[16]同时分别提出了一个非常新颖的非线性求解方法,叫做弧长法(Arc-Length Method)。该方法将荷载系数和未知位移同时作为变量,引入一个包括荷载系数的约束方程,用曲线弧长来控制荷载步长。该方法对于处理结构屈曲后的荷载反应分析更为有效。而 Crisfield^[18~20]和 Ramn^[17]则巧妙地把上述两种方法结合起来,用球面弧长代替 Riks 的切面弧长,并利用 Batoz 和 Dhett 的两个位移向量的同时求解技术,提出了便于有限元计算的球面弧长法(Spherical Arc-Length Method)。在此基础上, Cridfield 又进一步提出了柱面弧长法(Cylindrical Arc-Length Method),该方法似乎更简洁、更有效。在极限点附近, Bathe 引入了功的增量方程,使极限点附近的求解更容易收敛。

实际上,上述各方法都有不同程度的局限性。相比之下,各种弧长法,尤其是柱面弧长法具有较强的适应性。但是,即使对一些简单的算例,如果该方法中的一些计算参数不能很好选择的话,仍然可能出现计算难于收敛的状况。

近十余年来,我国网壳结构的发展十分迅速,相应的理论研究工作也开展了起来。关于网壳稳定性分析问题,在总结国外有关成果的基础上,也积极开展了自己的研究工作,除了早期还对连续化计算公式作了一定探讨之外^[12],大部分精力投放在以非线性有限元分析为基础的全过程分析方面^[36~45],并编制出一些有效的分析程序。在研究理论分析方法的同时,也进行了一些模型试验研究^[21~24];这些试验作得比较精细,对理论分析结果可起到很好的

验证作用。作者认为,虽然理论分析方法目前已发展得比较完善,而精确的试验研究比较费钱费力,但在整个研究领域范围内适当组织一定数量的试验仍然是必要的。从更广泛的意义上说,这样做对保证研究路线的完整性和所提出理论方法的可信赖性具有基本意义。

本书作者近 10 年来对这一研究领域也投入较多精力,尤其在将具有较大理论难度的网壳稳定性分析方法推进到实用化程度,以便广大工程设计人员应用作了较细致的工作,对各种形式的单层球面网壳、柱面网壳、椭圆抛物面扁网壳的稳定性提出了较简便的实用验算公式。对单层鞍形网壳的稳定性也进行了较细致的理论和试验研究。本书实际上就是作者在这一领域内有关研究成果的一份较系统的总结。

1.2 本书的目的、研究方法和主要内容

网壳结构受力合理,用料经济,造型美观多样,能覆盖较大空间,是发展前景广阔的一种空间结构形式。随着我国经济和建设事业的迅猛发展,近十余年来网壳结构的应用日益增多,且结构形式逐渐多样化,跨度也越来越大,发展速度之快惊人。于是其稳定性计算问题遂日益凸显出来,成为迫切需要解决的理论研究热点课题。从广大设计部门的角度,不仅希望这一问题在理论上取得较透彻的解决,而且更希望能进一步提供便于工程设计人员使用的实用验算方法。要把这一复杂理论问题解决到实用化的程度确实具有较大难度,但这一要求是可以理解的,是合理的;目前网壳的应用越来越多,设计部门不可能将每个网壳的稳定性验算均委托少数研究机构去解决,至少在方案设计中,他们希望对所设计网壳结构的稳定性有一个基本判断。从研究者的角度来说,在工程技术领域从事理论研究,其终极目的也应该是更好地为实际应用服务。按照这一指导思想,作者当时制定了分两阶段的研究计划:一是进一步改进和完善非线性全过程分析的理论和方法,使具有大量自由