

FAILURE MECHANISM OF
RETICULATED SHELLS UNDER
EARTHQUAKE

网壳结构 强震失效机理

范 峰 支旭东 沈世钊 著



科学出版社

网壳结构强震失效机理

范 峰 支旭东 沈世钊 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书系统总结了近些年哈尔滨工业大学空间结构研究中心在网壳结构抗震领域的研究成果,展示了网壳结构动力稳定性及强震失效机理研究的最新进展。这些研究成果主要包括:①系统研究了网壳结构的动力稳定性问题,提出了基于响应的动力稳定性判别准则,并对网壳结构在地震作用、阶跃荷载及简谐荷载下的动力稳定性进行了讨论。②提出基于多重响应的荷载域动力时程分析方法,在此基础上定义了网壳结构动力失稳与动力强度破坏两种失效模式,并详细阐述其失效机理;建立了多种网壳结构的地震损伤模型,提出动力强度破坏的判别准则;以上内容形成了完整的网壳结构强震失效机理的理论框架。③详细讨论了材料损伤累积效应、地震空间变化性效应及下部支承结构效应对网壳结构强震失效的影响。

本书适合于土木工程领域的学者、技术人员,以及高等院校相关专业的高年级本科生、研究生和教师阅读。

图书在版编目(CIP)数据

网壳结构强震失效机理/范峰,支旭东,沈世钊著. —北京:科学出版社,2013
ISBN 978-7-03-039366-1

I. ①网… II. ①范… ②支… ③沈… III. ①网壳结构-强震-结构稳定性-研究 IV. ①TU356

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 308573 号

责任编辑:王 钰/责任校对:马英菊

责任印制:吕春珉/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 6 月第 一 版 开本:B5 (720×1000)

2014 年 6 月第一次印刷 印张:13 3/4

字数:265 000

定价:70.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<双青>)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62137026

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

序 言

网壳结构是大跨空间结构的一种基本形式，近 30 年来获得广泛应用；针对这种“新颖”结构体系的理论研究也相应展开。单层网壳结构的静力稳定性是设计中的关键问题，早期的理论研究大都围绕这一问题展开，且取得了完整丰硕的成果，也已在设计规程中得到充分反映。网壳结构的抗震设计理论和方法是另一个重要问题。国内外迄今关于结构抗震的研究大都针对多层、高层结构，有关抗震规范的规定也基本反映这方面的成果。网壳结构在地震等动力作用下的性能具有明显的不同特点，因此需要开展更具针对性的专门研究，系统掌握其响应特征和失效规律，在此基础上建立起合理的抗震设计方法。经过十余年的努力，国内研究者基本掌握了各种网壳结构在常遇地震下的响应特性，并提出了可行的抗震设计方法，成果也已纳入相应的设计规程。

作者及其研究团队致力于更基础性质的一些抗震理论问题，如网壳结构的动力稳定性及在强震下的失效机理问题，网壳与下部支承结构的耦合效应、地震动空间相关性对大跨度网壳地震响应的影响，等等；认为这些基础性问题对于建立起更完整更合理的抗震设计理论具有重要意义。随着非线性有限元分析方法和计算机应用技术的迅速发展，现在已完全可能更直接、更细致地考察网壳结构这样的复杂体系在地震作用下的各种宏观和微观的复杂响应，并探讨其变化规律，从而使对上述这些复杂的基础理论问题进行系统深入研究成为可能。我们为此提出称为“多重响应的全荷载域动力时程分析”的分析方法，可用以考察结构的宏观变形状态和内部塑性发展、构件损伤状况等各种微观响应随动力荷载幅值的增大而发展变化的规律，把网壳可能的动力失稳和强度破坏联系在一起进行考察，建立起统一的研究其失效机理的理论框架。以这一方法为基础，结合不同的基础理论问题，针对各种类型网壳结构在其基本参数（几何参数、构造参数、荷载参数等）的常用范围内进行大规模的全荷载域响应分析，对它们在地震作用下的响应特征和失效规律进行了系统考察，从而使我们对上述这些基础理论问题形成了较为规律性的认识。

经过十余年的持续努力，作者们认为取得的成果已较为系统完整，形成了较为完善的理论体系；并认为这些研究成果对实现“两阶段三水准”设计思想中“大震不倒”这一目标有重要意义；尤其是按照近年来基于功能的抗震设计思想，对网壳结构在强震作用下可能的损伤状况及其维持不同使用功能的能力需要有更加深入和具体的了解，我们的研究对实现这一目标提供了可能性。基

于上述考虑，特将这些研究成果总结成册，与同行交流，并希望能为后续研究提供一定的借鉴。

作者们的许多研究生参与了课题研究及数据整理工作，正是他们的辛勤劳动为本书成稿提供了丰富的素材，我们向他们表示感谢。同时也感谢国家自然科学基金在“九五”重大项目、“十五”重点项目、重大研究计划及一批面上项目上对本研究方向的持续资助。

最后，我们真诚欢迎读者对本书提出宝贵意见。

作 者

2013 年 10 月

目 录

序言	
绪论	1
参考文献	5
第 1 章 网壳结构动力稳定性	6
1.1 结构动力稳定性的判别准则和分析方法	6
1.2 单层球面网壳在三维地震作用下的动力稳定性	9
1.3 在阶跃荷载作用下网壳结构的动力稳定性	12
1.4 网壳结构频谱特性及简谐荷载作用下的动力稳定性	16
1.5 结语	18
参考文献	19
第 2 章 网壳结构的两种失效模式及其判别	21
2.1 多重响应的全荷载域动力时程分析方法	21
2.2 网壳结构模型及参数分析方案	22
2.2.1 有限元分析模型及网壳结构编号	22
2.2.2 时程分析中的基本设置	24
2.2.3 参数分析方案	25
2.3 两种典型的失效模式	26
2.3.1 动力失稳算例	26
2.3.2 动力强度破坏算例	29
2.4 基于统计经验的失效模式判别	36
2.5 结语	44
第 3 章 网壳结构地震作用下的结构损伤模型	46
3.1 强度破坏极限荷载的讨论	46
3.2 极限状态的结构响应	47
3.2.1 单层球面网壳	48
3.2.2 单层柱面网壳	55
3.2.3 单层鞍形网壳	57
3.3 网壳结构地震损伤模型	62
3.3.1 单层球面网壳	63
3.3.2 单层柱面网壳	69
3.3.3 单层鞍形网壳	76

3.4	网壳结构强震损伤模型应用与强震失效机理的理论框架·····	77
第4章	网壳结构地震模拟振动台试验 ·····	79
4.1	引言·····	79
4.2	试验模型加工及数据采集系统·····	79
4.2.1	试验模型设计加工·····	79
4.2.2	试验数据采集系统·····	82
4.2.3	试验加载方案·····	85
4.3	动力失稳试验·····	88
4.3.1	试验过程及现象·····	88
4.3.2	试验结果·····	89
4.3.3	失效模式分析·····	98
4.4	动力强度破坏试验·····	103
4.4.1	试验过程及现象·····	103
4.4.2	试验结果·····	104
4.4.3	失效模式分析·····	115
4.5	结语·····	118
第5章	钢材考虑损伤累积的本构模型及应用 ·····	119
5.1	引言·····	119
5.2	圆钢管空间滞回试验设计·····	120
5.2.1	试件设计·····	120
5.2.2	加载装置设计·····	122
5.2.3	加载方案·····	123
5.2.4	测点布置及数据采集·····	125
5.2.5	试验装置可靠性验证·····	126
5.3	试验现象及分析·····	127
5.4	材料本构模型·····	130
5.4.1	接口子程序开发·····	130
5.4.2	本构模型的形式·····	131
5.4.3	待定系数的确定·····	132
5.5	材料损伤累积效应分析·····	134
5.6	结语·····	136
	参考文献·····	136
第6章	地震空间变化性模型及对网壳失效影响 ·····	137
6.1	引言·····	137
6.2	地震动相干函数模型的建立·····	139
6.2.1	密集台阵地震记录选取·····	139

6.2.2	相干函数的计算方法	142
6.2.3	基本假定及数据处理	143
6.2.4	地震动场空间变化性讨论	143
6.2.5	建立相干函数模型	146
6.3	空间相关非平稳地震动场模拟	150
6.3.1	功率谱模型与相位差谱模型选择	151
6.3.2	地震动场模拟	157
6.4	多点输入对网壳结构强震失效影响	161
6.4.1	一维多点输入	162
6.4.2	三维多点输入	165
6.5	结语	166
	参考文献	166
第7章	支承结构对网壳结构强震失效影响	168
7.1	引言	168
7.2	支承结构刚度的影响	168
7.2.1	分析模型及研究方法	168
7.2.2	两种动力强度失效模式	170
7.2.3	失效规律讨论	175
7.3	钢筋混凝土柱支承时的强震失效机理	181
7.3.1	支承结构的数值建模	181
7.3.2	失效机理分析	187
7.4	钢柱支承时的强震失效机理	199
7.4.1	失效模式	201
7.4.2	极限荷载判定方法	202
7.5	结语	204
	参考文献	204
附录		206

绪 论

网壳结构是大跨空间结构的一种基本形式，具有优美的造型和空间受力性能，近 30 年来在国内外的重大工程中获得了广泛应用。很多网壳结构已经成为一个城市或区域的地标性建筑，并代表了这一时代的建筑科技水平。例如，我国为 1996 年亚冬会建设的黑龙江省速滑馆（跨度 86m，长度 195m），采用了圆柱面和两个 1/4 球面组合的四角锥网壳体系，建成之后是当时亚洲的最大室内空间（图 0-1）。2005 年完成的国家大剧院（图 0-2），覆盖 $212\text{m} \times 144\text{m}$ 的空间，目前已经成为北京市区的地标性建筑。1997 年建成的名古屋穹顶，是目前跨度最大（187m）的单层球面网壳结构（图 0-3）。其三向网格形式构成了一个简洁通透的室内空间，充分体现出单层网壳结构的优势。



图 0-1 黑龙江省速滑馆

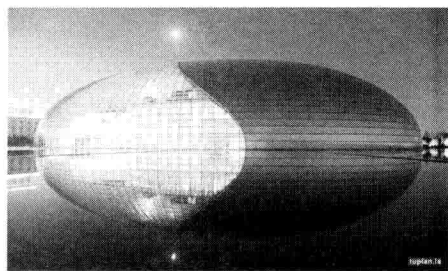


图 0-2 国家大剧院

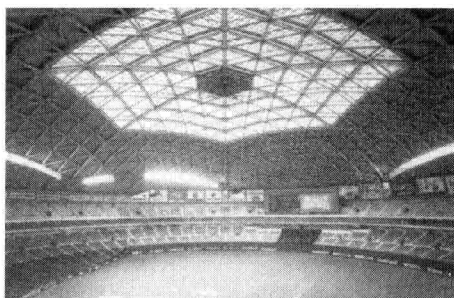


图 0-3 名古屋体育馆外景与内景

然而，与网壳结构的这种蓬勃发展势头相对应，关于其结构性能及设计理论的研究显得相对滞后。由于我国处于地震多发区，对于这种新颖结构体系的

抗震性能尤其需要开展深入的研究。

国内外关于结构抗震的研究大多针对多层、高层和高耸结构,有关抗震设计方法和规定也基本反映了这方面的研究成果。但网壳结构的动力性能与上述结构相比具有明显不同的特点:其频谱分布密集,各振型间耦合作用明显,常用的以振型分解为基础的分析方法受到局限;竖向地震作用与水平地震作用处在同一个量级,多维地震响应分析不可避免;对于超大跨度的网壳结构,还必须考虑地震的空间相关性,即多点输入问题;强震作用下,这类大跨空间结构不仅会发生强度破坏,还可能存在动力失稳问题;等等。这些特点都要求我们对网壳结构的抗震性能开展更具针对性的研究,系统掌握其响应特征及失效规律,在此基础上才能为这类结构建立起合理的抗震设计方法。

经过近 20 年的努力,国内外研究人员在网壳结构抗震研究领域已经取得了一些重要成果。早期的研究多是集中在揭示网壳结构的动力特性和动力作用下的分析方法上。例如,文献 [1~4] 对不同类型网壳结构的动力特性进行分析,除获得上述的一些共性结论外,还从定量的角度揭示了各种网壳形式的振型特点、频谱特征以及弹性动力响应规律等。文献 [5~12] 则是对网壳这种复杂结构体系在动力荷载下的分析方法进行了探讨。尽管振型分解反应谱法相对较为成熟且在设计中被广泛采用,但由于它主要适用于多高层结构等各阶振型差异较大的结构,且不能考虑非线性的影响,因此学者们尝试用其他方法来分析网壳结构的地震作用,以得到准确的结论。

随机振动方法较充分地考虑了地震发生的统计概率特性,被广泛认为是一种较为合理的分析工具。随机振动的功率谱法,即由给定的激励功率谱求出各种响应功率谱,在工程应用中占有很重要的位置,吸引了许多学者的关注。但当结构复杂、自由度很大时,由传统的随机振动功率谱方法推导的 CQC 表达式计算量巨大,很难用于工程实践。文献 [5, 6] 提出了一种新的随机响应分析方法——虚拟激励法,自动包含所有参振振型间的相关性以及激励之间的相关性,在数学上与传统的 CQC 方法完全等价,是一种精确、快速的 CQC 方法。文献 [7, 8] 进一步发展了虚拟激励算法的理论,逐步推导出结构受多维、多点、非平稳地震激励虚拟激励法的计算公式,并对多种网壳结构进行了随机地震响应分析,提出了较为实用的多维反应谱法计算公式。

随机振动方法虽然比反应谱法更精确,但同样不能考虑材料非线性的影响,更不能揭示结构在地震激励下的损伤过程,于是一些学者采用时程分析法进行计算。从理论研究的角度,时程分析法直接给出网壳结构在强震作用下的各种响应,并能充分考虑塑性变形及内力重分布等效应,因而比反应谱法和随机振动法具有更强的适用性;但受到有限元技术发展与计算条件的限制,早期的时程分析程序还主要是由各研究人员自行编写,要充分考虑单元形式及其适用范

围、非线性求解策略、阻尼理论等多方面因素^[9~13],煞费心力。在进入 21 世纪后,随着有限元技术的发展,一些商业化大型通用有限元软件逐渐被应用于网壳结构的地震分析,通过针对性的二次开发工作,这些通用软件具备了更强的适用性,使得研究人员可以投入更多的精力面对结构的响应研究,摆脱了编制大规模程序的繁琐工作,研究工作的效率大为提高。

在基本动力特性及分析方法研究的基础上,国内学者对各种网壳结构的抗震性能开展了较为系统的研究,基本掌握了网壳结构在常遇地震下的响应特性,并提出了可行的抗震设计方法,成果已纳入我国网壳结构设计规程^[14],可为实际网壳结构的工程实践提供指导。与此同时,对于某些更具基础性质的理论问题,如网壳结构的动力稳定性及其在强震下的失效机理,研究得还很少。这些基本问题对于建立起更完整、更合理的网壳结构抗震设计理论和方法具有重要意义,因而逐渐成为大跨空间结构理论研究领域的热点问题。作者及其研究团队近十余年来在该方向开展了较为系统的研究工作,从研究内容上大致可分为三个阶段:①由于网壳结构在动力荷载下可能失稳的特点,其动力稳定性问题首先受到关注;②在动力稳定性研究的基础上进一步深入和展开,提出采用多种响应的全荷载域动力时程分析方法,开展系统研究,揭示出网壳结构多种可能的失效模式,逐渐形成强震失效机理研究的理论框架;③进一步开展多项复杂效应的研究,如考虑材料损伤累积的精细化分析方法、地震动的空间相关性、网壳与下部支承结构的耦合效应等,使得关于强震失效机理的研究更全面、准确。

结构的动力失稳从普遍意义上讲是系统的运动稳定性问题,这是一个经典的力学命题。早期的研究大多是从俄国数学家李雅普诺夫(Lyapunov)关于运动稳定性的一般定义及其判别准则^[15,16]出发,提出不同的判别网壳结构动力失稳的理论方法。例如,文献[17]中通过对李雅普诺夫函数进行推导,提出了通过结构刚度矩阵的性质来判别网壳是否失稳的方法,具有重要的理论意义;但由于实际网壳结构动力响应的复杂性,刚度矩阵的性质并非判别动力失稳的充分条件,这种方法还不能很好地解决实际问题。文献[18]编制了空间杆系结构双重非线性动力时程分析程序,对网壳结构振动过程中结构刚度矩阵性质的变化进行了考察,并结合位移响应时程提出了结构动力稳定性的实用判别方法;文献[19]则在此基础上明确提出基于位移响应的网壳结构动力稳定性判别准则。利用该方法,对网壳结构在地震作用、简谐荷载以及突加阶跃荷载下的动力稳定性规律进行了详细讨论,可以说对网壳结构动力稳定性这一命题作出了较完善的概括,并能有效解决实际问题。

动力稳定性研究的是结构在动力作用下的宏观表现,具体来说,它重点考察结构位移响应随动力荷载幅值增大而发展变化的情况。在这一理论框架中,

网壳结构在动力荷载作用下达到某种宏观极限状态,如产生异常大的振幅、过大的整体偏移,甚至倒塌,均称之为动力失稳。然而,如果从更精细的层面来考察,网壳结构发生这种动力失稳现象是由多种因素综合促成的,包括体系的几何非线性性质、材料塑性的发展、可能的共振效应,等等;在针对不同研究对象的不同算例中,哪种因素起主导作用各不相同。所以,从深入研究结构失效机理的角度,单纯考察结构在动力作用下的宏观位移响应看来是不够的,还需要对多种更微观响应(例如,各构件的塑性变形、它们的损伤累积程度、结构总应变能等)的发展变化情况做深入细致的考察。鉴于此,文献[20]明确提出采用多种响应的全荷载域动力时程分析方法,并借助通用有限元软件强大的分析能力,详细讨论了单层球面网壳在强震作用下的失效机理,指出在一些算例中,网壳结构在倒塌前塑性发展已经相当深入,有些构件的损伤已很严重,材料非线性对结构刚度的影响十分显著;这些算例中网壳结构的失效模式实质上更应归结为动力强度破坏。文献[21]对单层柱面网壳的分析与振动台试验均表明,单层柱面网壳的强震倒塌是几何非线性与材料非线性共同作用的结果,而且后者的影响十分明显。在此基础上,文献[22]和文献[23]对单层球面网壳、柱面网壳及鞍形网壳的失效机理进行了更为系统、深入的研究;明确区分了动力失稳和动力强度破坏两种不同的失效模式;为了建立动力强度破坏的判别准则,提出了结构损伤模型的概念(它是多种宏观、微观响应的函数,用以综合评价结构的损伤程度),并根据大规模算例的分析结果为不同形式的网壳建立了各自的结构损伤模型,据此可判定强度破坏这一失效模式,并给出相应的极限荷载。以上成果建立了较为完整的研究网壳结构强震失效机理的理论框架。在此框架下文献[22]还对网壳结构的抗震设计理论进行了探讨。

以该理论框架为基础,作者及其团队进一步开展了一些复杂效应的研究。由于网壳结构在临倒塌时材料可能经历严重塑性发展与累积过程,文献[24]着重对圆钢管钢材的损伤累积模型进行了研究,通过试验拟合了材料考虑损伤累积效应的本构方程,并据此对网壳结构进行了系统的精细化动力分析,研究其失效机理。研究表明,在有限元分析中若考虑材料损伤累积效应,网壳结构的极限承载力最多可能降低20%。对于大跨空间结构的地震动空间变化性问题也逐渐引起关注,文献[25]从研究失效机理的角度出发,首先拟合了一个适用于三维输入、小支座距离的地震动相干函数模型;并对单层球面网壳进行了考虑地震空间相关性的全荷载域动力时程分析。结果表明,该效应对结构承载能力的影响相当明显。文献[26]则研究网壳结构与下部支承结构的耦合作用,详细研究了不同材料、不同刚度的下部支承结构对网壳结构强震失效机理的影响。

理论研究没有尽头,关于网壳结构强震失效机理的研究仍在持续推进;但

作者们认为迄今取得的成果已较为系统完整, 并形成较完善的理论体系, 特总结成册, 抛砖引玉, 与同行交流, 并希望能对后续开展的研究起到借鉴作用。

参 考 文 献

- [1] 郭小农, 陈扬骥. 短程线型单层球面网壳抗震分析 [J]. 空间结构, 1999 (2): 3-9.
- [2] 曹资, 张毅刚. 单层球面网壳地震反应特征分析 [J]. 建筑结构, 1998 (8): 40-43.
- [3] 张毅刚. 单层双曲抛物面网壳的抗震性能 [J]. 北京工业大学学报, 2001 (1): 31-34.
- [4] Cao Z, Zhang Y G. A study on the seismic response of lattice shells [J]. International Journal of Space Structures, 2000, (3&4): 243-248.
- [5] 林家浩, 等. 大跨度结构抗震分析方法及近期进展 [J]. 力学进展, 2001, (3): 350-360.
- [6] 林家浩, 钟万勰. 关于虚拟激励法与结构随机响应的注记 [J]. 计算力学学报, 1998, (2): 217-223.
- [7] 薛素铎, 等. 多维地震作用下网壳结构的随机分析方法 [J]. 空间结构, 2002, (1): 44-51.
- [8] 曹资, 王雪生, 薛素铎. 双层柱面网壳结构多维多点非平稳随机地震反应研究 [C] // 第十届空间结构学术会议论文集. 北京, 2002, (12): 180-188.
- [9] 范峰. 网壳结构抗震性能、振动控制的理论与试验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨建筑大学, 1999.
- [10] 崔航宇. 单层球面网壳弹塑性抗震性能分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨建筑大学, 2000.
- [11] 邢估慧. 单层柱面网壳弹塑性抗震性能分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨建筑大学, 2000.
- [12] 薛素铎, 曹资, 王健宁. 单层柱面网壳弹塑性地震反应特征 [J]. 地震工程与工程震动, 2002, (1): 56-60.
- [13] 陈军明, 陈应波, 吴代华. 单层球面网壳结构抗震性能研究 [J]. 空间结构, 2001, (4): 30-36.
- [14] JGJ 7—2010, 空间网格结构技术规程 [S]. 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2010.
- [15] 朱因远, 周纪卿. 非线性振动和运动稳定性 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1992: 87-122.
- [16] 舒仲周. 运动稳定性 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1989: 1-30.
- [17] 叶继红. 单层网壳结构的动力稳定性 [D]. 上海: 同济大学, 1995.
- [18] 王策. 单层球面网壳动力稳定性 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨建筑大学, 1997.
- [19] 郭海山. 单层球面网壳结构动力稳定性及抗震性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2002.
- [20] 范峰, 等. 强震作用下球面网壳动力强度破坏研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36 (6): 722-725.
- [21] 邢估慧. 网壳结构抗震性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2004.
- [22] 支旭东. 网壳结构在强震下的失效机理 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [23] 支旭东, 等. 正交正放单层鞍形网壳在强震下的失效研究 [J]. 土木工程学报, 2011, 44 (11): 34-42.
- [24] 聂桂波. 网壳结构基于损伤累积本构强震失效机理及抗震性能评估 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [25] 曾庆龙. 地震空间相干函数模型及对单层球面网壳影响研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [26] 于志伟. 网壳结构考虑下部支承影响的强震失效机理及灾变控制研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.

第 1 章 网壳结构动力稳定性

1.1 结构动力稳定性的判别准则和分析方法

网壳结构在静力荷载下的验算一般是由稳定性控制的。这类壳体结构在动力荷载作用下也存在稳定问题。所以,当对网壳结构强震失效机理这一基本理论问题开展研究时,首先想到的自然就是它的动力稳定性问题。

结构体系的动力稳定性作为一个经典的力学命题可以上推到俄国数学家李雅普诺夫 (Lyapunov) 于 1893 年给出的关于运动稳定性的一般定义及其判别准则,其实质是研究初始条件的扰动对一般运动方程解的稳定性的影响^[1]。其后, H. M. 别辽耶夫于 1924 年首先研究了周期荷载作用下的动力稳定性问题 (即所谓参数共振问题); 符华·鲍络金于 1956 年对该类问题进行了系统的总结和发展^[2], 其实质是将系统运动表达为 Mathieu-Hill 方程, 研究简谐荷载频率变化对方程解的稳定性影响。此后, 国内外一些学者对结构在阶跃荷载或冲击荷载作用下的运动稳定性问题进行了较多研究, 提出了这样或那样的动力稳定性判别方法^[3,4]。

应该说, 上述这些研究构成了相对完整的动力稳定性理论体系。但迄今为止, 只有一些简单问题直接依据这些理论应用解析方法得到了成功的解决, 如周期激励下的柱、梁和拱等简单结构的动力稳定问题。对于工程中感兴趣的问题, 如在地震等复杂荷载作用下的非线性、多自由度复杂结构的动力稳定问题, 直接应用解析方法来解决是相当困难的。以这些理论为基础, 也提出过一些简化或近似的理论或方法, 但它们解决实际问题的能力仍然有限。例如, 李雅普诺夫的扰动运动微分方程理论上十分严格, 但求解就相当困难。因此他提出了一种不需直接求解扰动运动微分方程的判别稳定性的方法叫 V 函数法, 也称李雅普诺夫直接法, 其基本思想是: 对于扰动运动微分方程 $\dot{x} = X(t, x)$, 寻求一个满足一定条件的函数 $V(t, x)$ (也称李雅普诺夫函数), 然后通过 V 函数及其对 t 的导数 $\dot{V}(t, x(t))$ 的符号来判别系统运动的稳定性。遗憾的是, 不存在一般的构造 V 函数的方法, 仅对于某些定常系统, 有一些特定的构造方法可供参考; 但对于一般的结构系统, 尤其是对于非定常、非线性系统, 寻求 (或构造出) 符合要求的 V 函数是很困难的。对于定常的非线性系统, 其扰动运动方程一般可表示为 $\dot{x} = X(x)$, 由于用直接法求解非线性系统比较困难, 李雅普诺夫将上

述方程右端的函数在零点处展开为泰勒多项式,并略去了二次以上项,得到方程的一次近似式;然后通过一系列的推导证明,可以根据一次近似式的特征根的性质来确定原方程解的稳定性,称为李雅普诺夫一次近似理论。网壳结构在地震作用下的动力稳定性问题属于多自由度复杂体系的非定常、非线性问题,文献[5]将非定常系统的运动过程划分为许多微小的时段 Δt ,假定在此 Δt 范围内可以按定常问题来处理,并由李雅普诺夫一次近似理论导出十分简明的判别准则:如果在某一微小时段($\Delta t \rightarrow 0$)内结构的刚度矩阵负定,则结构的运动不稳定。这一判别准则对单自由度体系是严格的,但在理论上显然只适用于运动过程中的某一特定时刻。对于多自由度体系,要假设在所研究时刻邻域 Δt 内系统为线性,此时多自由度系统的运动可解耦为按振型分解的一系列广义单自由度系统的运动的叠加;于是问题变成:如果由于其中个别单自由度系统的刚度为负而导致整个刚度矩阵负定,能断定整个系统的运动不稳定吗?大量关于网壳结构在不同幅值动力荷载作用下的响应时程分析结果表明,当荷载幅值不大时,在整个运动过程中结构的刚度矩阵恒为正定;荷载幅值较大时,在结构运动的某些时段可能出现刚度矩阵负定的情形,但结构的振动在宏观上是稳定的,即并没有出现过大的振幅或运动发散的情形;最后,当荷载幅值超过一特定数值时,结构运动才会出现上述不稳定情形,此时在很多时段内的刚度矩阵负定。看起来,对于多自由度复杂系统来说,在动力荷载幅值依次增大的过程中,从结构刚度开始出现负定,到结构最后动力失稳,存在一个具有一定宽度的荷载区域,在这个区域内,结构刚度矩阵的正定或负定在整个运动过程中是不断变化的。也就是说,刚度矩阵正定或负定的变化有其特定的征兆意义,但难以成为具有决定意义的定性指标。由以上讨论可见,以李雅普诺夫运动稳定性理论为基础的各种理论判别方法对于深入理解结构动力稳定性的实质是有帮助的,对一些简单问题也可能得到解析解,但用它们来解决实际工程问题的可能性是相当有限的。

于是直接根据结构的响应来判别其动力稳定性的办法就显得更为有效和直观。事实上,由于非线性有限元分析方法和计算机应用技术的迅速发展,对网壳结构等复杂系统进行非线性动力响应分析已非难事;所以,现在来讨论网壳结构的动力稳定性问题,除了在概念上应当继承并深入理解那些经典理论关于运动稳定性所下的严格定义,在方法上已完全可能更为直接、更为深入地研究网壳结构在地震等动力作用下的复杂响应,并探讨其变化规律。其实,早在1962年Budiansky和Roth当研究球面扁壳在阶跃荷载下的动力屈曲时即已采用直接基于响应的研究方法^[6,7],并提出了著名的Budiansky-Roth准则。近年来国内外一些研究者也已采用这种方法来研究网壳结构的动力稳定性^[8~13]。文献[14]参照Budiansky-Roth准则提出了适用于网壳结构的判别方法:当荷载幅值

的微小增量导致网壳结构特征响应指标的异常变化时,结构可视为动力失稳,此时所对应的荷载定义为结构的动力稳定性临界荷载。同时还提出了相应的“全荷载域动力时程分析”方法。具体操作是:以逐步加大的荷载幅值为参数,对应每一荷载幅值作一次非线性动力时程分析,记录结构特征响应。然后绘制荷载幅值与结构特征响应之间的关系曲线;通过该曲线可全面了解结构随荷载幅值增大其动力性状不断变化乃至失稳的全过程。结构的动力稳定性临界荷载也可在这一全过程曲线的基础上参照各计算点的时程响应变化来确定。至于结构特征响应,对网壳结构来说,一般可取其运动过程中位移包络面上的最大位移(也就是整个网壳结构的最大位移幅值),也可取某一选定的特征节点的位移幅值。图 1-1 和图 1-2 表示一个 40m 跨度的单层 K8 型球面网壳(图 1-3)在竖向阶跃荷载(用加速度方式表示)作用下的动力稳定性分析结果。由图 1-2 看到,荷载幅值为 $1.7g$ 时,所选择的网壳特征节点(节点 3)偏离原来平衡位置,但位移不大,且继续做稳定振动,宏观运动是稳定的;但当荷载幅值增大至 $1.8g$ 时,特征节点的运动发散,出现动力失稳。反映在图 1-1 的荷载幅值(加速度峰值)-结构最大位移全荷载域曲线上,表现为荷载幅值由 $1.7g$ 增至 $1.8g$ 时,特征位移响应异常增大。所以,该系统的动力失稳临界荷载应位于 $1.7 \sim 1.8g$,从实用角度可取其平均值 $1.75g$ 。也可以采用逐步逼近的方法来求得更为精确的临界荷载,即在计算上述全荷载域曲线时,在接近临界荷载处适当增加计算点,因而总是可能得到满足所需精度的稳定性临界荷载值。

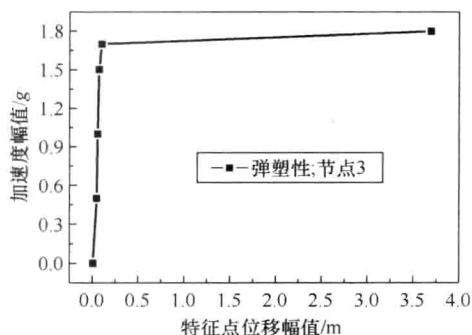


图 1-1 加速度幅值-特征点最大位移曲线

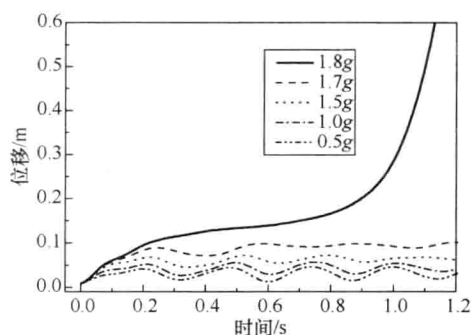


图 1-2 结构特征点的位移时程曲线

下面几节以单层球面网壳为例,讨论其在不同类型动力荷载作用下的动力稳定性。从实用角度出发,研究者自然对地震作用下的稳定性问题最感兴趣。但简谐荷载、阶跃荷载等相对简单但比较典型的动力作用下的稳定性问题具有其独立的理论意义,对研究地震等复杂动力荷载作用下的稳定性问题有重要参考价值。例如,研究简谐荷载作用下的动力响应特征对于探讨不同地震波的频

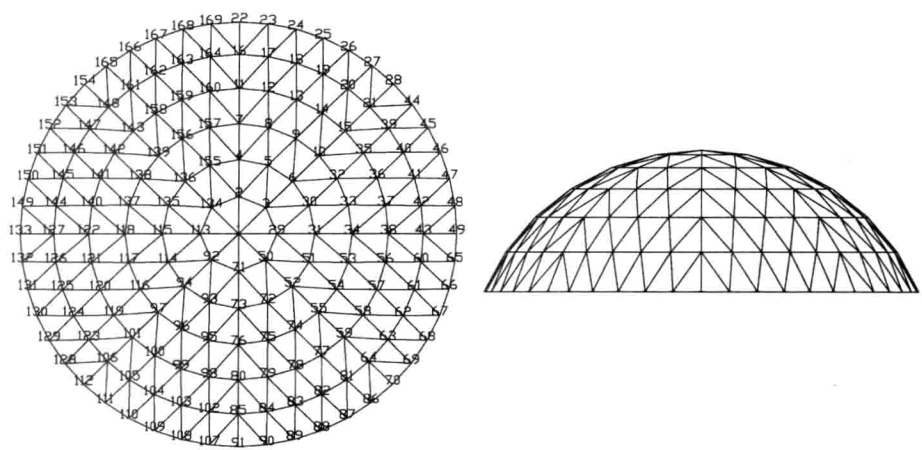


图 1-3 单层球面网壳结构示意图（数字为节点编号）

谱特性对结构动力稳定性的影响有重要的指导意义；结构在阶跃荷载作用下的稳定性还可与其静力稳定性直接联系起来。

1.2 单层球面网壳在三维地震作用下的动力稳定性

本章以跨度为 40m 的 K8 型单层球面网壳（图 1-3）为例研究其动力稳定性。网壳矢跨比采用常用的 1/3、1/5、1/7；支座假定为三向不动铰支；均布质量为 200kg/m^2 ，集中作用于节点上；在动力计算中，与此质量相应的重力即作为恒定的静载作用在网壳上。材料为 Q235 钢，假定为理想弹塑性材料；采用瑞利（Rayleigh）阻尼，阻尼比取 0.02。考虑初始几何缺陷影响时，取网壳在均布竖向静载作用下屈曲模态作为缺陷分布模式，按文献 [15]，其最大缺陷位移取为跨度的 1/300。三种矢跨比网壳的杆件截面及其静力稳定性临界荷载如表 1-1 所示。

表 1-1 网壳结构参数和静力稳定性临界荷载（单位：g）

矢跨比	杆件截面 /(mm×mm)	弹性静力稳定临界荷载		弹塑性静力稳定临界荷载	
		无缺陷	有缺陷	无缺陷	有缺陷
1/3	114×3.0	6.60	4.62	3.55	2.29
1/5	127×3.5	8.00	3.01	3.60	2.07
1/7	140×4.5	6.33	3.54	3.79	2.31

采用通用有限元分析软件 ANSYS 进行动力时程分析，杆件采用梁单元（Beam 189 单元），计算中考虑梁单元的大变形、大转角。