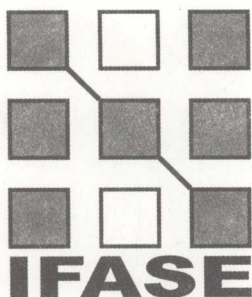


结构防灾、监测与控制

Structural Disaster Prevention, Monitoring and Control

李宏男 伊廷华 主编

Editors in Chief: Hongnan LI & Tinghua YI



结构防灾、监测与控制

Structural Disaster Prevention, Monitoring and Control

李宏男 伊廷华 主编

Editors in Chief: Hongnan LI & Tinghua YI

中国建筑工业出版社
CHINA ARCHITECTURE & BUILDING PRESS

图书在版编目 (CIP) 数据

结构防灾、监测与控制/李宏男, 伊廷华主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2008

ISBN 978-7-112-10301-0

I. 结… II. ①李…②伊… III. ①结构工程-防灾-文集②结构工程-监测系统-文集③结构工程-控制系统-文集 IV. TU3-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 131061 号

责任编辑: 赵梦梅 刘婷婷

责任设计: 赵明霞

责任校对: 兰曼利 陈晶晶

结构防灾、监测与控制

Structural Disaster Prevention, Monitoring and Control

李宏男 伊廷华 主编

Editors in Chief: Hong nan LI & Ting hua YI

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京蓝海印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 18 字数: 576 千字

2008 年 10 月第一版 2008 年 10 月第一次印刷

定价: 58.00 元

ISBN 978-7-112-10301-0

(17104)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前言 Preface

当前,中国正在从事世界上最大规模的土木工程建设,而这一建设高潮还会随着我国全面建设小康社会进程的推进而持续相当一段时间。持续的、大规模的土木工程建设,为结构工程技术的发展、学科的建设、人才的培养、队伍的壮健,特别是创新能力的提升,提供了历史性的机遇。中国土木工程(包括结构工程)事业取得的巨大成就引起了世人的关注。可以预期,在新的世纪里,结构工程事业必将得到更加迅猛的发展。

正是基于这种时代背景,在住房和城乡建设部的支持下,由中国建筑工业出版社、同济大学《建筑钢结构进展》编辑部、香港理工大学《结构工程进展》(Advances in Structural Engineering)编委会联合主办,大连理工大学土木水利学院承办的第二届“结构工程新进展国际论坛(The 2nd International Forum on Advances in Structural Engineering)”在大连举行。

本届论坛的主题是“结构防灾、监测与控制”。我们荣幸地邀请到了10位特邀报告人,他们的报告主题涵盖了大跨空间结构、钢结构、混凝土结构、输电塔线体系结构、结构振动控制、结构健康监测、结构抗震分析与计算等领域。

我们感谢论坛特邀报告人,他们不仅在大会上做了精彩的主题报告,而且还奉献了精心准备的章节(论文),使得本书顺利出版。

感谢参加本次论坛的所有代表,正是大家的热心参与和帮助,才使得本次论坛能够如期顺利举行。

感谢住房和城乡建设部、中国建筑工业出版社、同济大学《建筑钢结构进展》编辑部、香港理工大学《结构工程进展》编辑部、高等学校学科创新引智计划资助项目(B08014)、教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT0518)、国家自然科学基金国际(地区)合作交流项目、国家自然科学基金重点项目(50638010)、国家自然科学基金青年基金(50708013)以及王宽诚教育基金会的资助和支持。

目录 Contents

前言

Preface

第1章 Chapter 1 1

大跨空间结构理论研究若干新进展 (沈世钊) 2

Progress of Theoretical research for spatial structures 2

1.1 网壳结构弹塑性稳定性 2

1.2 网壳结构的动力稳定性及其在强震下的失效机理 7

1.3 考虑流固耦合效应的索膜结构风致动力响应研究 13

参考文献 20

第2章 Chapter 2 21

中国结构震动控制的研究与应用进展 (周福霖、谭平) 22

Progress of Research & Application on Seismic Control for Structures in China 22

2.1 Development of techniques for seismic resistance of structures (结构抗震技术的进展) 22

2.2 Seismic isolation (隔震) 24

2.3 Energy dissipation (消能减震) 32

2.4 Passive control (被动控制) 36

2.5 Semi-active control system (半主动控制系统) 37

References (参考文献) 39

第3章 Chapter 3 41

结构健康监测集成系统及其在基础设施中的应用 (欧进萍、李惠) 42

Structural Health Monitoring Integrated Systems and Their Implementation In Infrastructures 42

3.1 Fiber optic sensing technology (光纤传感技术) 42

3.2 Wireless sensors and sensor networks (无线传感器及无线网络) 46

3.3 A structural health monitoring system for the offshore platform CB32A (CB32A 海洋平台健康监测体系) 50

3.4 The national aquatic center for olympic games (water cube) (中国奥林匹克游泳中心 (水立方) 健康监测) 58

3.5 The harbin songhua river cable-stayed bridge (哈尔滨松花江斜拉桥健康监测)	61
3.6 Conclusions (结论)	66
References (参考文献)	67
第4章 Chapter 4	69
混凝土随机损伤力学——背景、意义与研究进展 (李杰)	70
Stochastic Damage Mechanics of Concrete Structures	70
4.1 研究背景	71
4.2 混凝土的非线性与随机性	72
4.3 细观随机损伤模型	75
4.4 弹塑性随机损伤本构关系	77
4.5 混凝土结构的随机非线性分析	81
4.6 结语	84
参考文献	84
第5章 Chapter 5	87
抗震分析与设计的改进能力谱方法 (W. D. Iwan)	88
An Extension of the Capacity Spectrum Method for Seismic Analysis and Design	88
5.1 Introduction (简介)	88
5.2 Conventional capacity spectrum method (传统的能力谱方法)	90
5.3 A new approach to specification of effective linear parameters (确定有效线性参数的新方法)	91
5.4 A simple design procedure (简化的设计步骤)	94
5.5 Examples of application of autoCSM (AutoCSM 程序应用实例)	94
5.6 Conclusions (结论)	96
References (参考文献)	96
第6章 Chapter 6	99
输电塔线体系抗震抗风(雨)研究 (李宏男、白海峰、任月明)	100
Fundamental Theoretical Study on Antiseismic and Wind-Proof of Transmission Tower-Line System	100
6.1 引言	101
6.2 输电塔体系抗震研究	102
6.3 输电塔线体系抗风(雨)研究	109
6.4 输电塔线体系风(雨)致疲劳损伤研究	122
6.5 结论	127
参考文献	128
第7章 Chapter 7	131
现代钢结构抗火设计方法与研究进展 (李国强)	132
Development and Research on Contemporary Approach for Fire-Resistant Design of Steel Structures	132

7.1 引言	133
7.2 钢结构抗火设计要求	136
7.3 传统钢结构抗火设计方法	137
7.4 传统钢结构抗火设计方法的不足	139
7.5 现代钢结构抗火设计方法	140
7.6 现代钢结构抗火设计研究进展	141
7.7 总结	154
参考文献	154
第 8 章 Chapter 8	159
充分利用结构健康监测体系: 香港的经验 (徐幼麟)	160
Making Good Use of Structural Health Monitoring Systems: Hong Kong's Experience	160
8.1 Introduction (简介)	161
8.2 Shms in tsing ma bridge (青马大桥健康监测)	162
8.3 Shms-based loading assessment (基于结构健康监测的荷载评估)	164
8.4 Shms-based system identification (基于结构健康监测的系统识别)	182
8.5 Shms-based computer simulation (基于结构健康监测的计算机仿真)	185
8.6 Shms-based damage assessment (基于结构健康监测的损伤评估)	189
8.7 Shms-based bridge rating system (基于结构健康监测的桥梁评价体系)	194
8.8 Difficulties encountered and future works needed (面临的困难及未来需要做的工作)	194
8.9 Conclusions (结论)	196
References (参考文献)	197
第 9 章 Chapter 9	199
动静态分布传感技术及结构健康监测理论与设计体系 (吴智深等)	200
Structural identification theories and SHM design methodology based on dynamic and Static distributed sensing techniques	200
9.1 引言	201
9.2 各分布式传感技术的研究和开发	204
9.3 基于分布传感技术的结构健康监测理论研究	219
9.4 结构健康监测系统设计体系	235
9.5 各分布传感技术在实际工程结构健康监测中的应用和探讨	240
9.6 结论	248
参考文献	249
第 10 章 Chapter 10	253
建筑结构强震作用下的弹塑性分析 (李云贵、聂祺)	254
The Elasto-Plastic Analysis for Building Structures Under Unusual Earthquake	254
10.1 概述	255
10.2 几种非线性分析方法	256
10.3 弹塑性分析模型	258

10.4 材料本构关系	261
10.5 地震动输入	263
10.6 非线性动力方程的求解	265
10.7 国内外非线性动力时程分析软件	267
10.8 结束语	269
参考文献	269

第二届“结构工程新进展国际论坛”简介

第二届论坛特邀报告人简介

大綱空同於野論新冊究苔干樣最

附刊

第 1 章 Chapter 1

Progress of Theoretical research
for spatial structures

W. Z. Shi

Department of Geography, Tsinghua University,
Beijing 100084, China

Abstract: Theoretical research on spatial structures has been a long-standing topic in geography. This paper reviews the progress of theoretical research on spatial structures, focusing on the development of spatial structure theory, the application of spatial structure theory in regional development, and the application of spatial structure theory in urban development. The paper also discusses the future research directions of spatial structure theory.

1.1 網表結構與空間穩定性

1.1.1 研究背景

網表結構是空間穩定性的基礎。在空間穩定性研究中，網表結構的穩定性是研究的重點。本文將從網表結構的穩定性出發，探討空間穩定性的問題。網表結構的穩定性是空間穩定性的基礎，也是空間穩定性研究的關鍵。本文將從網表結構的穩定性出發，探討空間穩定性的問題。

大跨空间结构理论研究若干新进展

沈世钊

哈尔滨工业大学土木工程学院 哈尔滨 150090

提 要: 本文重点介绍近年来在下列三个理论研究领域的新成果或新进展: (一) 网壳结构在静力作用下的弹塑性稳定性, 并对稳定性验算中的安全度问题进行了讨论; (二) 网壳结构的动力稳定性及其在强震下的破坏机理; (三) 大跨柔性屋盖考虑流固耦合效应的风致动力响应。

关键词: 网壳结构 弹塑性稳定 动力稳定性 失效机理 索膜结构 气弹效应

本文重点汇报近年来在大跨空间结构下列三个理论研究领域取得的一些新进展。

Progress of Theoretical research for spatial structures

S. Z. Shen

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of
Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: Theoretical studies on static stability, dynamic stability and dynamic failure mechanism of reticulated shells, and studies on wind-induced response analysis of flexible tension structures including the consideration of the possible aeroelastic effect are introduced.

Keywords: Reticulated shells, Elasto-plastic stability, Dynamic stability, Failure mechanism, Tension structure, Aeroelastic effect

1.1 网壳结构弹塑性稳定性

1.1.1 研究概况

网壳结构在静力作用下的稳定性问题自 20 世纪 80 年代后期至 90 年代中期曾是一个理论研究热点课题。当时计算机条件已相对完备, 各研究者均摆脱基于连续壳假设的解析理论, 转而运用非线性有限元分析方法, 多数人自编程序, 对网壳结构进行弹性的或弹塑性的荷载一位移全过程跟踪, 从各个方面研究其稳定性能, 包括初始几何缺陷和荷载分布

形式等各种实际因素对其临界荷载(或称为稳定性承载力)的影响。可以认为,这一段研究取得的成果是具有突破意义的;当时已完全有可能对实际工程中大型复杂网壳结构的稳定性能,至少是弹性稳定性能,进行较精确的定量分析。正由于有了这一研究基础,我国于20世纪90年代后期着手编制的《网壳结构技术规程》(JGJ 61—2003)^[1]才有可能列入建议按弹性全过程分析进行稳定性验算的条文。文献[2]还对各种形式的网壳结构进行了大规模的参数分析,共计完成2800余例实际尺寸网壳的弹性全过程分析,以考察各类网壳稳定性能的变化规律,包括各种实际因素对其承载力的影响;在此基础上通过回归分析提出了各种形式网壳结构稳定性承载力的实用公式。

对于由弹性全过程分析求得的稳定性承载力(临界荷载),还应除以一个“安全系数”,以求得网壳按稳定性确定的容许承载力(或容许荷载)的标准值。这个“安全系数”应考虑下列因素:(1)荷载等外部作用和结构抗力的不确定性可能带来的不利影响;(2)计算中未考虑材料弹塑性可能带来的不利影响;(3)结构工作条件中的其他不利因素。关于这一系数的取值《网壳规程》(JGJ 61—2003)中仍沿用文献[3]提出的经验值 $K=5$,因为当时还缺少足够的统计资料作进一步论证,其中主要因素之一就是当时还没有条件进行大规模的关于网壳弹塑性稳定性能的系统分析,因而对考虑材料非线性以后网壳结构稳定性承载力可能折减多少缺乏足够的定量数据。

近几年,随着计算机条件和大型通用分析软件的进一步完备,对实际尺寸网壳结构进行系统的弹塑性全过程分析具备了较好的条件,我们就着手进行这项有意义的研究工作。我们利用ANSYS通用软件对各种形式的单层网壳进行了大规模的参数分析,例如,对K8型单层球面网壳考虑了4种跨度($L=40\text{m}, 50\text{m}, 60\text{m}, 70\text{m}$)、4种矢跨比($f/L=1/5, 1/6, 1/7, 1/8$)和4种截面尺寸,共64种不同网壳,各考虑4种初始几何缺陷值($r=0, L/1000, L/500, L/300$)和3种荷载分布形式($p/g=0, 1/4, 1/2$),部分网壳还考虑了更多的初始缺陷值;全部网壳周边固接,但部分网壳还计算了铰接支承的情形来做对比;这样共计分析了近1200个K8型单层球面网壳的算例。再加上K6型、短程线型、肋环型等各种形式,共计为单层球面网壳进行了2800余例弹塑性全过程分析。类似地,为单层柱面网壳进行了1400余例,为单层双曲椭圆抛物面网壳进行了800余例弹塑性全过程分析。除此之外,还利用ANSYS软件进行了同样多的弹性全过程分析作为对比。计算工作量十分浩大,但确实使我们对网壳结构复杂的全过程受力性能、其失稳的实际过程和各种因素的相互影响,有了一些实质性的了解[4]。

限于篇幅,下面以单层球面网壳为例作一扼要介绍。

1.1.2 单层球面网壳的弹塑性稳定性能

与弹性失稳的状况类似,单层球面网壳的弹塑性失稳也均从某些节点的跳跃屈曲开始,逐渐形成一个或若干个越来越大的壳面凹陷。由于塑性变形的发展,全过程曲线在越过临界点以后呈持续弱化倾向,但会经历较长的位移发展过程而始终维持一定的承载力;当初始缺陷较大时,全过程曲线可能不出现明显的极值点,而表现为在比较稳定的承载力下位移持续发展的形式(参看图2、图3)。

对于无缺陷的K8或K6型理想网壳,当矢跨比较小时($f/L=1/7, 1/8$),失稳多数

从主肋节点开始,一般发生在从外圈算起第三个节点,最后在该处形成凹陷(图 1a),这与弹性网壳的情形十分类似。但对于矢跨比为 $1/5$ 和 $1/6$ 的网壳,失稳均从由中心算起第二环上各面上节点开始,并且各节点的凹陷逐渐连成一体,最后形成十分明显的环形凹槽(图 1b);部分 $f/L=1/7$ 的网壳和少数 $1/8$ 的网壳也表现出这种失稳形态。究其原因,这些网壳在加荷过程中,中央第二环杆受压且受力较大,应力首先达到屈服点且全截面进入塑性,因而该环杆已无力承载进一步的荷载增量,导致杆上各节点纷纷内陷。这是弹塑性网壳由于局部区域塑性发展过于集中而提前丧失承载力的一种特殊现象。我们曾尝试把中央第二环杆的截面适当加强,再进行计算,果然不再出现这种顶部环形凹槽式的失稳形态,而恢复图 1 所示的常见失稳形态,其临界荷载也相应提高。

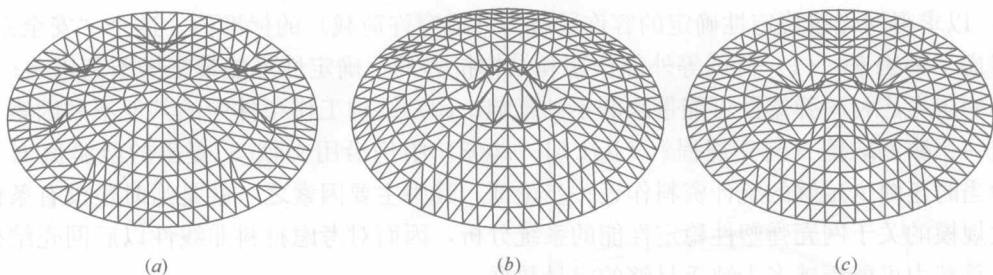


图 1 K8 型单层球面网壳弹塑性失稳后位移形态 (比例放大 30 倍)

(a) $L=60\text{m}$, $f/L=1/8$, $r=0$; (b) $L=60\text{m}$, $f/L=1/5$, $r=0$; (c) $L=60\text{m}$, $f/L=1/8$, $r=6\text{cm}$

对于有缺陷的实际网壳,计算时均取结构的最低阶特征模态作为初始缺陷分布形式;分析结果表明,当最大初始缺陷取 $L/1000$ 及以上时,多数网壳的失稳形态与所采用的缺陷分布模态一致,壳面上发生多处凹陷,但最大凹陷发生在以中央第二环或第三环处的主肋节点为中心的区域(图 1c)。但也有少部分 $f/L=1/5$ 的网壳(其中中央第二环杆未特意加强)仍然表现出顶部环形凹槽的失稳形态,相应的临界荷载也偏低。

单层球面网壳的弹塑性稳定性能对初始几何缺陷也比较敏感。作为例子,图 2 给出矢跨比分别为 $1/5$ 和 $1/8$ 的两个 K8 型网壳当具有不同大小初始缺陷时的全过程曲线及其临界荷载随初始缺陷值变化的规律;作为对比,图中也给出了弹性临界荷载的变化曲线;临界荷载曲线的纵坐标取相对值 q_{cr}/q_{cr0} (q_{cr0} 为理想弹性网壳的临界荷载)。

由图 2 可以看出,初始缺陷对单层球面网壳弹塑性稳定性能的影响规律与弹性网壳的情形类似。网壳的临界荷载随初始缺陷值的增大而降低,但当缺陷值达到 $L/300$ 时趋于稳定。《网壳规程》(JGJ 61—2003)在建议按弹性全过程分析方法进行稳定性验算时,还建议按跨度的 $1/300\text{m}$ 确定初始缺陷的取值;看来这一建议对弹塑性稳定性验算仍然适用。

与弹性网壳的情形类似,荷载的不对称分布对单层球面网壳弹塑性稳定性能的影响也不明显。作为例子,图 3 给出两个 K8 型网壳分别在三种不同荷载分布下的全过程曲线,且分别考察了完整网壳和具有 $L/1000$ 缺陷两种情形。在绘制这些全过程曲线时,一律以总荷载 ($p+g$) 作为纵坐标。可以看出,三种荷载分布下的全过程曲线几乎重合在一起;也就是说,以总荷载作为衡量指标时,不对称荷载作用对网壳的弹塑性临界荷载值几乎没有影响。

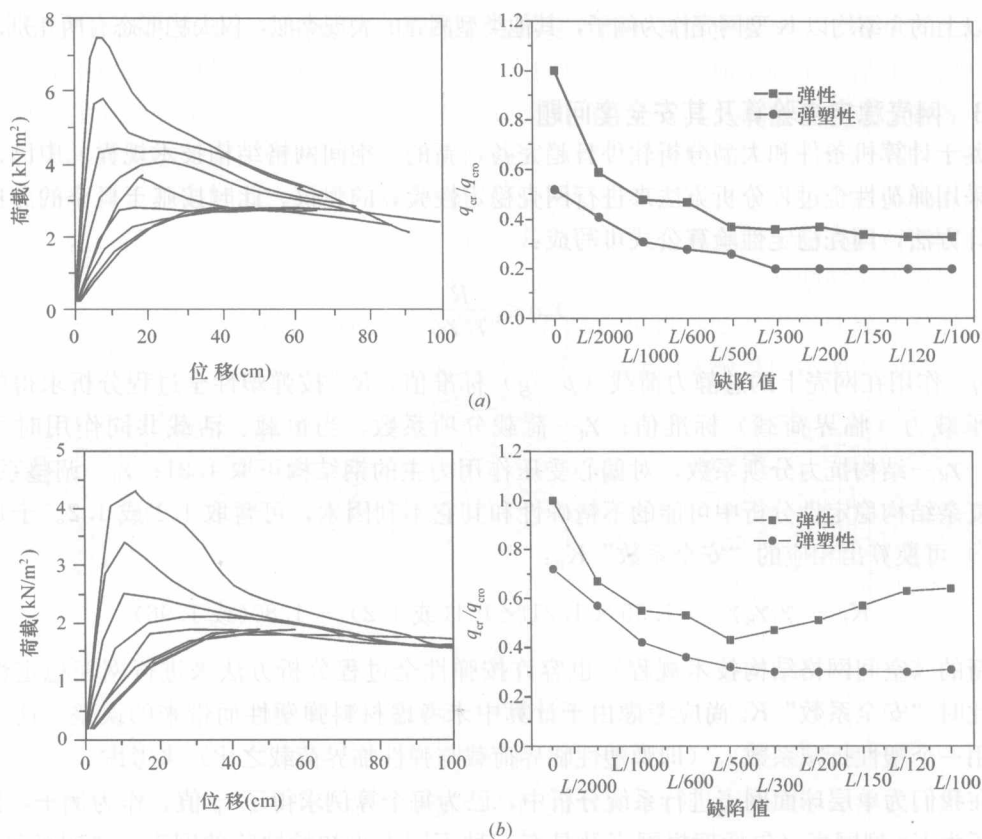


图2 不同初始缺陷时的全过程曲线及临界荷载变化曲线

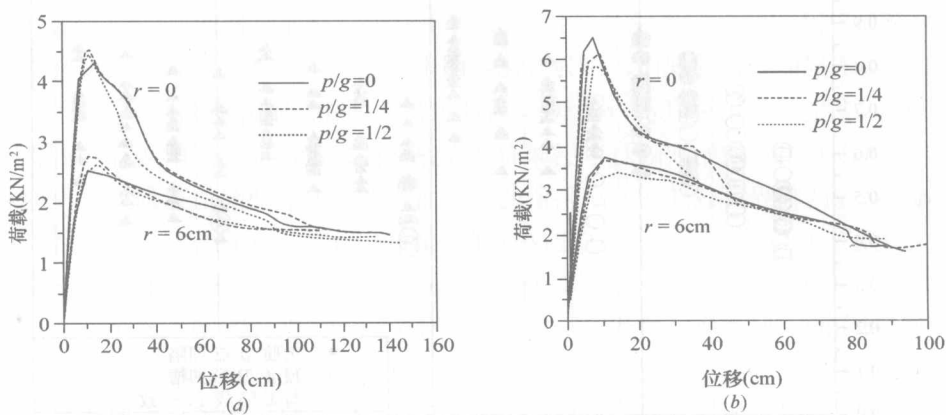
(a) K8型网壳 $L=60\text{m}$, $f/L=1/5$, 2号截面(b) K8型网壳 $L=60\text{m}$, $f/L=1/8$, 2号截面 $(r=0、3、6、10、20、30、40、50、60\text{cm})$ 

图3 不同比例不对称荷载作用下的全过程曲线

(a) $L=60\text{m}$, $f/L=1/8$, 2号截面; (b) $L=60\text{m}$, $f/L=1/5$, 2号截面

以上的介绍均以 K 型网壳作为例子, 其他类型网壳的表现类似, 仅失稳形态有所差别。

1.1.3 网壳稳定性验算及其安全度问题

鉴于计算机条件和大型分析软件日趋完备, 新的《空间网格结构技术规程》中已列入直接采用弹塑性全过程分析方法来进行网壳稳定性验算的建议。此时按基于概率的分项系数设计方法, 网壳稳定性验算公式可写成:

$$\gamma_q q \leq \frac{R}{\gamma_0 \gamma_R} \quad (1)$$

式中 q —作用在网壳上的总静力荷载 ($p+g$) 标准值; R —按弹塑性全过程分析求得的稳定性承载力 (临界荷载) 标准值; γ_q —荷载分项系数, 当恒载、活载共同作用时可取 1.35; γ_R —结构抗力分项系数, 对偏心受压作用为主的钢结构可取 1.21; γ_0 —调整系数, 考虑复杂结构稳定性分析中可能的不精确性和其它不利因素, 可暂取 1.1 或 1.2。于是由式 (1) 可换算出相应的“安全系数” K_p :

$$K_p = \gamma_q \gamma_R \gamma_0 = 1.35 \times 1.21 \times 1.1 (\text{或 } 1.2) = 1.80 (\text{或 } 1.96) \quad (2)$$

新的《空间网格结构技术规程》也容许按弹性全过程分析方法来进行网壳稳定性验算, 此时“安全系数” K_e 尚应考虑由于计算中未考虑材料弹塑性而带来的误差。这一误差可用一个塑性折减系数 c_p (即弹塑性临界荷载与弹性临界荷载之比) 来考虑。

在我们为单层球面网壳进行系统分析中, 已为每个算例求得了 c_p 值。作为例子, 图 4 给出了为 K8 型网壳 (包括理想网壳及具有三种不同大小初始缺陷的网壳) 算得的结果, 共计 256 个数据。图中还用符号分别表示不同的失稳形态。

按照规程的建议, 在进行网壳的弹性全过程分析时, 初始缺陷应按跨度的 1/300 取

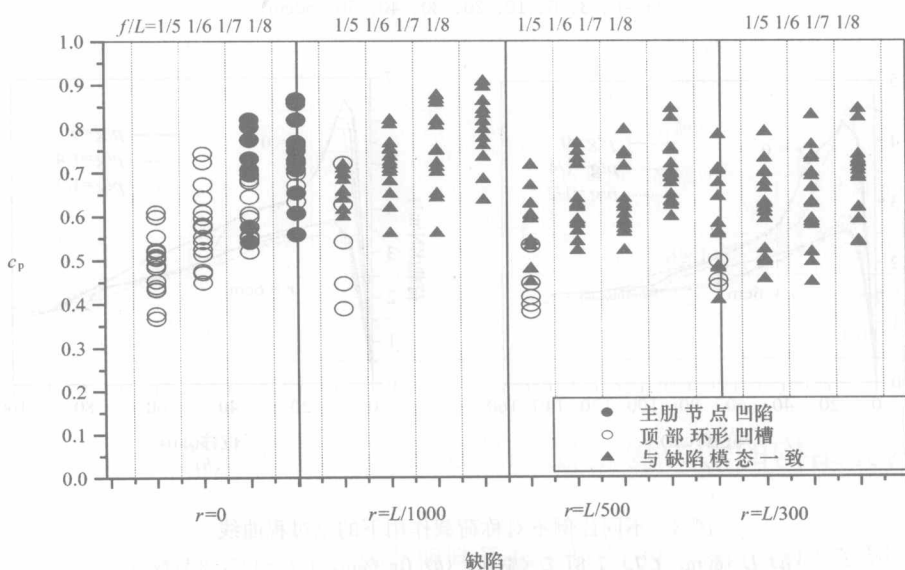


图 4 K8 型网壳弹塑性稳定性折减系数 c_p

值。按照这一思路,图 4 中最右一栏,即为 $r=L/300$ 的网壳算得的 c_p 数据可作为我们进行统计的依据。从图中可以看到,有少数 $f/L=1/5$ 的网壳表现出顶部环形凹槽的失稳形态,其临界荷载均偏低;如上文所述,可以通过对中央第二环杆的截面适当加强的办法来消除这种提前失稳现象,所以在统计中应该剔除这几个特殊数据。据此求得 C_p 的平均值和均方差为: $\overline{c_p}=0.641$, $\delta_{cp}=0.0992$;如果按 95% 的保证率,可求得建议的折减系数为:

$$c_p=c_p-1.645\delta_{cp}=0.478 \tag{3}$$

于是当采用弹性全过程分析方法来计算网壳临界荷载时,相应的“安全系数”应取为:

$$K_e=\frac{K_p}{c_p}=\frac{1.80(\text{或 } 1.96)}{0.478}=3.77(\text{或 } 4.10) \tag{4}$$

按照上述思路和统计方法,对 8 种单层球面网壳、3 种单层柱面网壳和 2 种单层双曲椭圆抛物面网壳的“塑性折减系数” C_p 与“安全系数” K_e 的取值均进行了统计,结果如表 1 所示。可以看到,对于多数球面网壳, K_e 取 4.5 即可基本覆盖。对于结构刚度较弱的肋环型球面网壳,几何非线性起主要作用,其弹性稳定承载力较低,而材料非线性的影响反而很小, K_e 与 K_p 的差别较小。对于两端支承柱面网壳结构,由于材料非线性的影响较大, K_e 取 5.4 才能保证结构的安全性。看来,网壳结构稳定性验算方法中“安全系数”的取值应该按照具体的网壳形式来确定,本文的结果可以提供一定的参考。

单层网壳结构“安全系数”值 表 1

结构类型	结构形式	塑性折减系数	安全系数	安全系数归并
单层球面网壳	K8 型	0.478	4.10	4.5
	K6 型	0.460	4.26	
	短程线型	0.430	4.56	
	肋环双斜杆型	0.491	3.99	
	肋环单斜杆型	0.440	4.45	
	联方型	0.430	4.56	
	葵花型	0.528	3.71	2.5
	肋环型	0.800	2.45	
单层柱面网壳	三向网格(四边支承)	0.453	4.33	4.5
	三向网格(两纵边支承)	0.578	3.39	
	三向网格(两端支承)	0.362	5.41	5.4
单层双曲椭圆抛物面网壳	正交单斜网格	0.420	4.67	5
	三向网格	0.386	5.08	

1.2 网壳结构的动力稳定性及其在强震下的失效机理

1.2.1 网壳结构动力稳定性的分析方法及判别准则

网壳结构具有极好的抗震性能,1994 年北岭地震和 1995 年阪神地震中许多网壳的优

良表现给人以深刻印象；这种结构形式在强震下的抗震性能和失效机理问题也因此吸引了不少研究者的兴趣。单层网壳结构具有明显的几何非线性特征，无论在静力或动力作用下，都有易于失稳的倾向性；因而关于其失效机理的研究是从动力稳定性问题开始的。文献[5]对近十年来关于网壳动力稳定性的研究作了概括性的回顾，并明确提出，鉴于现在对网壳等复杂系统进行双重非线性动力响应分析已非难事，今后应该以直接基于响应分析的方法来研究网壳的动力稳定性，这样不仅使动力稳定性的判别准则更加直观，而且对于复杂的实际工程问题可以得出定量的可供实用的结果。具体操作方法是：针对某一特定的动力荷载（例如某一地震波），以逐步增大的荷载幅值为参数，对应每一荷载幅值做非线性动力时程分析，记录结构的某些特征响应（例如最大节点位移），绘制出这些特征响应随荷载幅值变化的完整曲线（可称之为该响应的荷载域全程曲线）；通过该曲线可全面了解结构随动力荷载幅值逐渐增大其动力性状不断变化乃至失稳的全过程。相应的动力失稳判别准则可表述为：当荷载幅值的微小增量导致网壳结构特征响应指标异常增大时，结构可视为动力失稳，所对应的荷载幅值定义为结构动力失稳临界荷载（或叫极限荷载）。此临界荷载值通常可根据上述荷载域全程曲线并参照有关计算点的时程响应变化来定量地确定。

作为说明例子，可参考下面算例一中图6所示的一K8型单层球面网壳（ $L=40\text{m}$ ， $f/L=1/3$ ）在水平简谐荷载（频率 2.6Hz ）作用下的全程分析结果。图6b表示不同荷载幅值（用加速度表示）下特征节点位移的时程曲线，可以看到，当荷载幅值为 97Gal 时，该特征节点仍在作平稳振动，而且最大位移仅为 0.06m ；当荷载幅值增至 100Gal 时，特征节点的运动发散，出现动力失稳。反映在图6a的荷载幅值—特征节点位移全程曲线上，表现为荷载幅值由 97Gal 增至 100Gal 时，特征节点位移异常增大。图6d表示网壳的变形图，可以看到，荷载幅值为 97Gal 时，网壳变形还很小，而在 100Gal 时，突然发生严重的局部凹陷而倒塌。该系统的动力失稳临界荷载位于 $97\sim 100\text{Gal}$ 之间。

我们运用这一方法对单层球面网壳在突加荷载、简谐荷载和地震荷载作用下的动力稳定性进行了系统分析，得出了具有良好规律性的结果，其中部分成果在文献[5]中作了介绍。

1.2.2 网壳结构两种可能的失效机理

对网壳结构进行全过程动力响应分析的大量算例表明，随着动力荷载幅值的不断增大，绝大多数网壳结构最后都会发生倒塌破坏；但在有些算例中，网壳结构破坏时的位移并不大，内部塑性发展也不严重，结构破坏比较突然；而在另外一些算例中，结构要经历较长的塑性变形发展、结构刚度严重削弱以后才会发生倒塌破坏，结构临倒塌前节点振动平衡位置的偏移已相当大，即网壳形状已发生较大畸变，事实上应认为结构已达到了某种强度承载力的极限；也就是说，后一类算例可以认为属于强度破坏的范畴。

下面考察几个典型算例。在这些算例中，为了全面了解结构的塑性发展过程，按照文献[6]提出的综合考察多个响应指标变化规律的研究方法，在对网壳结构的动力响应进行荷载域的全程跟踪时，不仅记录下各特征节点的位移响应，而且全面记录下各杆件逐步进入塑性并且塑性变形不断发展的全过程；为此定义了最大相对应变、不同屈服程度的杆件

比例、结构平均应变（所有杆件最大应变的平均值）等特征响应指标，并绘制了它们的荷载域全程曲线；还记录了结构在不同荷载幅值时的塑性分布范围。限于篇幅，下面各算例中只能给出部分结果来作说明。各算例均采用通用有限元分析软件 ANSYS 进行动力时程分析，杆件采用可实时输出应力应变的梁单元（Pipe20 单元），截面上共有 8 个积分点。为说明杆件截面的塑性发展程度，定义 1P 表示有 1 个积分点进入塑性，8P 则表示全截面进入塑性，余类推（见图 5）。

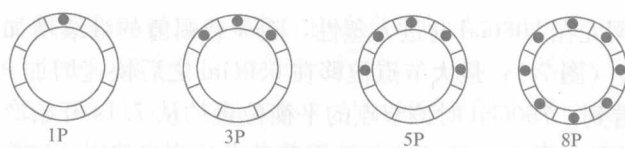


图 5 Pipe20 单元截面塑性发展定义

【算例一】 在水平简谐荷载（频率 2.6Hz）作用下的 K8 型单层球面网壳（ $L=40\text{m}$ ， $f/L=1/3$ ）

此算例在前面已略作介绍，为了说明网壳内部的塑性发展过程，在图 6c 中还给出了

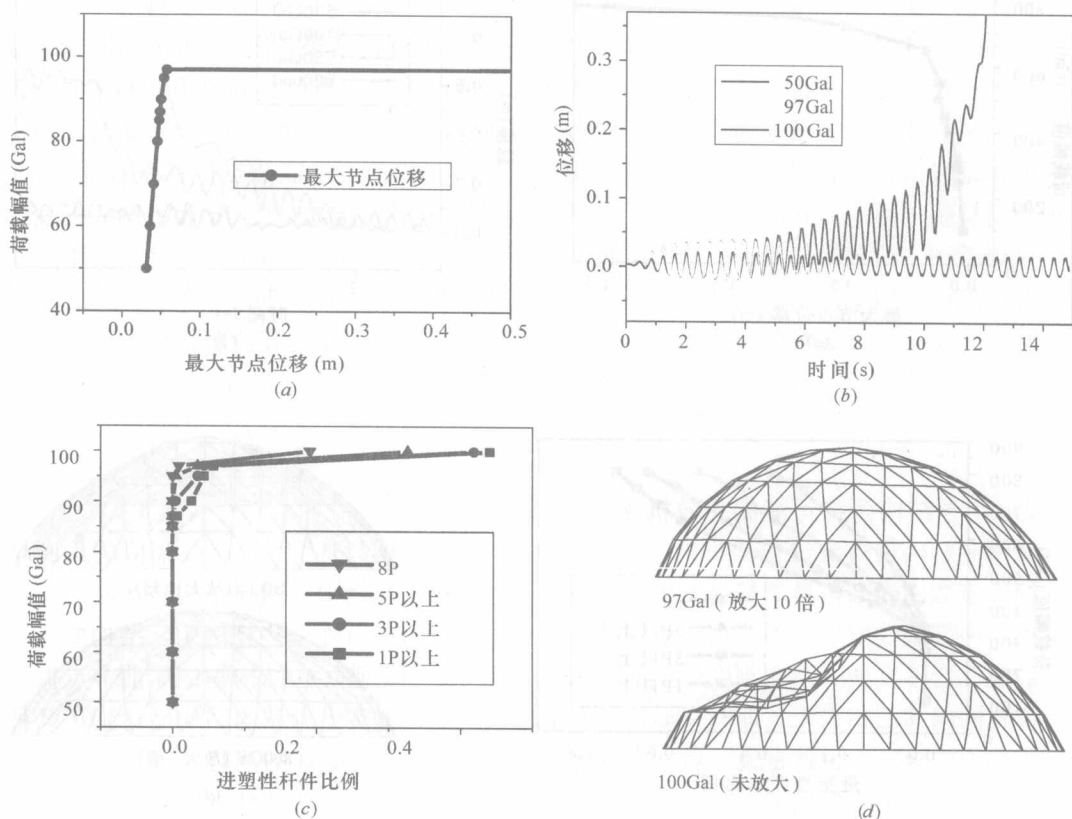


图 6 算例一动力全过程分析结果

(a) 荷载幅值—结构最大节点位移全过程曲线；(b) 最大节点位移时程曲线
 (c) 荷载幅值—屈服杆件比例全过程曲线；(d) 网壳最大位移时刻变形图