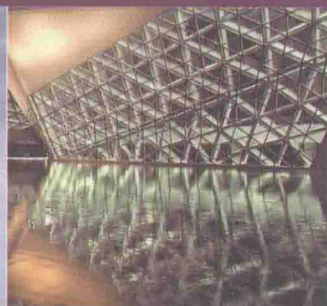
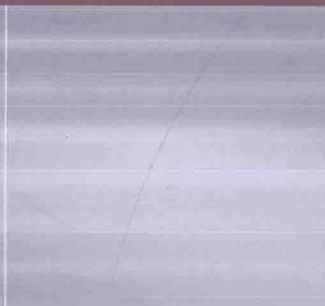


# 大跨度空间网格结构抗震性能与可靠度

柳春光 殷志祥 李会军 柳英洲 编著



科学出版社

# 大跨度空间网格结构抗震 性能与可靠度

柳春光 殷志祥 李会军 柳英洲 编著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书以大跨度空间结构地震响应分析、敏感性和可靠度为研究内容,对大跨度空间结构的抗震设计原理、震害特点、地震可靠性及抗震性能等内容进行阐述,并以实例形式详细介绍了大跨度空间结构抗震理论与计算方法、大跨度空间结构的非线性可靠度分析方法、大跨度空间结构的损伤破坏评定方法及双层球面网壳结构的失效机理和破坏过程等。本书将抗震分析理论和工程应用相结合,具有很强的先进性和实用性。

本书可供土木、建筑专业的工程技术人员阅读,也可作为高等学校相关专业本科生及研究生的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

---

大跨度空间网格结构抗震性能与可靠度/柳春光等编著. —北京:科学出版社,2014. 1

ISBN 978-7-03-038871-1

I. ①大… II. ①柳… III. ①大跨度结构-空间结构-网格结构-抗震性能-研究②大跨度结构-空间结构-网格结构-结构可靠性-研究 IV. ①TU311②TU399

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 243982 号

---

责任编辑:周 炜 / 责任校对:刘小梅  
责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

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>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2014 年 1 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2014 年 1 月第一次印刷 印张: 26

字数: 504 000

定价: 108.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

大跨度空间结构的发展已成为衡量一个国家建筑科学技术水平的重要标志之一。与平面结构体系相比,大跨度空间结构具有受力合理、自重轻、抗震性能好、工期短等优点,且结构形式丰富多样,具有很强的艺术表现力。对位于地震区的大跨度空间结构,跨度的增大和结构形式的复杂化必然会带来一些不利因素,一旦倒塌,后果严重,因此对其进行抗震性能的研究具有重大意义。目前,大跨度空间结构在进行设计时,均将其物理参数和几何参数等视为确定性量来考虑,而实质上这些量均为随机变量,因此本书引入最新的可靠度和敏感性计算方法,着重阐述各种方法在大跨度空间结构中的适用性和优缺点。

本书结合国内外大跨度空间结构的最新研究进展,力求把这方面的最新研究成果纳入在内,全面、系统地介绍大跨度空间结构的抗震问题。但由于篇幅所限,对于有些问题不能进行详细阐述,在此只做简要介绍。本书共 13 章,第 1 章为绪论,阐述各种空间结构形式的发展趋势及需解决的问题,并介绍空间结构的震害、抗震设防及其构造措施。第 2 章对大跨度空间结构的分类问题和划分原则进行总结和归纳,并对最新的分类方法进行详尽的介绍和阐述。第 3 章介绍网架结构的分类和选型,阐述网架结构设计的一般原则。第 4 章阐述网架结构的计算方法,介绍空间杆系有限元法。第 5 章介绍网壳结构的分类和选型,阐述网壳结构设计的一般原则。第 6 章阐述网壳结构的计算方法,通过四个算例阐明其分析过程。第 7 章阐述空间网格结构抗震理论与计算方法,通过算例对一网壳结构进行动力失效分析。第 8 章阐述大跨度空间结构考虑多维多点输入的三种抗震计算方法,给出网壳结构虚拟激励多维多点随机振动分析的理论推导。第 9 章介绍几种常规的结构可靠度计算方法,通过算例阐述这些算法各自的优缺点。第 10 章给出响应敏感性方程,推导材料参数的位移敏感性方程、节点坐标的位移敏感性、荷载参数的位移敏感性方程,并通过实例说明。第 11 章将两种光滑材料模型、四种改进算法引入大跨度空间网格结构的非线性可靠度分析中,通过网壳结构的算例,讨论几种算法的优缺点及注意事项。第 12 章将功能度量法引入大跨度空间钢结构的可靠度计算中,通过算例表明功能度量法具有更高效、更稳定和较少依赖于随机变量的概率分布类型的特点。第 13 章将不同矢跨比的双层球面网壳作为研究对象,分析四种矢跨比网壳破坏的异同之处,通过最大变形、总应变能、塑性应变能、最大塑性应变、总塑性应变等多项指标对网壳结构的损伤破坏进行综合评定,揭示双层球面网壳在静、动力荷载作用下的失效机理和破坏过程。

本书采用理论基础知识和实际算例相结合的方式,全面、系统介绍了大跨度空间结构地震敏感性、可靠度和抗震性能分析等研究内容。

感谢大连市出版基金的资助。

限于作者水平,书中难免有疏漏及不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2013年6月

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 大跨度空间结构的发展前景 .....	1
1.3 大跨度空间结构的发展趋势 .....	2
1.3.1 网架结构研究的发展趋势 .....	3
1.3.2 网壳结构研究的发展趋势 .....	4
1.3.3 悬索结构研究的发展趋势 .....	5
1.3.4 薄膜结构研究的发展趋势 .....	6
1.3.5 索穹顶结构的发展趋势 .....	6
1.4 大跨度空间结构震害与经验 .....	7
1.4.1 1976 年唐山地震 .....	7
1.4.2 1985 年新疆乌恰地震 .....	7
1.4.3 1995 年日本阪神地震 .....	8
1.5 大跨度空间结构抗震构造和措施 .....	10
1.5.1 合理的支座构造 .....	10
1.5.2 合理的结构体系 .....	11
1.5.3 结构减震控制 .....	11
1.6 抗震设防 .....	12
1.6.1 三水准设防目标 .....	12
1.6.2 两阶段设计方法 .....	12
1.7 大跨度空间结构抗震验算中尚需解决的问题 .....	13
1.7.1 多点输入尚需解决的问题 .....	13
1.7.2 多维多点输入尚需解决的问题 .....	14
1.7.3 多点地震输入反应谱分析方法尚需进一步研究的问题 .....	15
参考文献 .....	16
<b>第 2 章 大跨度空间结构的分类</b> .....	18
2.1 基于刚性差异分类 .....	19
2.2 基于主要受力构件分类 .....	19
2.3 基于有限元方法分类 .....	20
2.4 基于大跨度空间结构骨架类型的分类方法 .....	26

2.5 空间结构新分类	27
参考文献	31
<b>第3章 网架结构</b>	<b>33</b>
3.1 网架结构概述	33
3.1.1 网架结构的优越性	33
3.1.2 国内外网架结构应用概况	34
3.2 网架结构的形式与选型	35
3.2.1 网架结构的形式和分类	35
3.2.2 三层网架	38
3.2.3 常见的圆形边界网架	38
3.2.4 我国首次采用各种形式网架的工程实例	40
3.2.5 网架结构的选型	40
3.3 网架结构设计的一般原则	41
3.3.1 网架的高跨比和格跨比	41
3.3.2 起拱与找坡	41
3.3.3 柱帽	42
3.3.4 悬臂长度	42
3.3.5 网架支撑方式	42
3.3.6 网架水平支撑	43
3.3.7 再分杆	43
3.3.8 网架自重估算	44
3.3.9 网架挠度限值	44
3.3.10 杆件设计	44
3.3.11 焊接钢板节点	45
3.3.12 焊接空心球节点	45
3.3.13 螺栓球节点	46
3.4 各类派生的新型网架结构	48
3.4.1 组合网架结构	48
3.4.2 杂交网架结构	48
3.4.3 网架结构的其他新形式	50
参考文献	52
<b>第4章 网架的设计和计算</b>	<b>54</b>
4.1 基本假定	54
4.2 网架结构分析计算方法概述	54
4.3 网架结构各种计算方法的比较	54
4.4 网架的设计	55

---

4.4.1	荷载和作用	55
4.4.2	网架的计算	58
4.5	网架结构的抗震分析	69
4.5.1	网架结构的振动方程和动力特性	69
4.5.2	网架结构的地震反应分析	71
4.6	算例	74
	参考文献	79
<b>第5章</b>	<b>网壳结构</b>	<b>80</b>
5.1	引言	80
5.1.1	网壳基本概念	80
5.1.2	国内外网壳结构应用概况	80
5.2	网壳结构的形式与选型	83
5.2.1	网壳结构的形式与分类	83
5.2.2	我国代表性的网壳结构工程实例	88
5.2.3	网壳结构的选型	91
5.3	网壳结构设计的一般原则	91
5.3.1	网壳的矢跨比和厚跨比	91
5.3.2	网壳的网格尺寸和网格数	92
5.3.3	网壳的边缘构件	92
5.3.4	挠度限值	92
5.3.5	杆件设计	93
5.3.6	网壳节点	93
5.4	各类派生的新型网壳结构	94
5.4.1	组合网壳结构	94
5.4.2	杂交网壳结构	94
5.4.3	网壳结构的其他新形式	97
	参考文献	98
<b>第6章</b>	<b>网壳的设计和计算</b>	<b>100</b>
6.1	引言	100
6.1.1	网壳结构分析设计的主要内容	100
6.1.2	网壳结构的荷载和作用	100
6.1.3	网壳结构分析的计算模型	100
6.2	荷载的作用及效应组合	101
6.2.1	荷载的作用和类型	101
6.2.2	荷载效应组合	104
6.3	网壳结构分析的计算方法及其分类	105



6.4	网壳结构分析的有限单元法——空间刚架位移法	105
6.4.1	基本假定	105
6.4.2	空间梁单元的坐标系定义及坐标变换矩阵	106
6.4.3	两端刚接空间梁单元的单元刚度矩阵	109
6.4.4	基本方程式的建立及结构总刚度矩阵	113
6.4.5	边界条件支座沉降及施工安装荷载	114
6.4.6	温度变化和温度应力的计算	114
6.5	网壳的抗震计算	115
6.5.1	地震作用	115
6.5.2	网壳的振动方程	115
6.5.3	抗震分析	116
6.6	网壳结构的稳定性分析	116
6.6.1	概述	116
6.6.2	影响网壳结构稳定性的主要因素	119
6.6.3	网壳结构稳定性分析的连续化方法	120
6.6.4	网壳结构稳定性分析的有限单元法	120
6.6.5	网壳结构的稳定设计	121
6.7	算例	123
6.7.1	算例1——星形网壳	123
6.7.2	算例2——七杆件桁架	125
6.7.3	算例3——拱桁架	126
6.7.4	算例4——凯威特网壳	127
	参考文献	128
<b>第7章</b>	<b>大跨度空间网格结构的抗震分析</b>	<b>129</b>
7.1	大跨度空间网格结构的动力矩阵	129
7.1.1	质量矩阵	129
7.1.2	阻尼矩阵	131
7.1.3	刚度矩阵	132
7.2	大跨度空间网格结构自振特性	134
7.2.1	邓克利法	134
7.2.2	矩阵迭代法	134
7.2.3	瑞利法	134
7.2.4	瑞利-里茨法	135
7.2.5	子空间迭代法	135
7.3	地震响应振型分解法与振型分解反应谱法	135
7.3.1	振型分解法	135

7.3.2	振型分解反应谱法	137
7.4	地震响应时程分析	139
7.4.1	基本思路与步骤	139
7.4.2	线性加速度法	139
7.4.3	Wilson- $\theta$ 法	141
7.4.4	地震波的选取与调整	142
7.5	算例	143
7.5.1	算例1——拉索预应力局部带肋单层球面网壳模态分析	143
7.5.2	算例2——单层球面网壳动力失效	145
	参考文献	149
<b>第8章</b>	<b>多维多点地震作用下结构随机响应分析</b>	<b>150</b>
8.1	多维地震作用下结构响应分析方法回顾	150
8.1.1	引言	150
8.1.2	多维多点输入下结构地震反应分析方法	151
8.2	多维平稳随机地震响应分析理论与方法	155
8.2.1	虚拟激励法	155
8.2.2	多维虚拟激励随机振动分析理论与方法	156
8.2.3	多维地震动的随机模型及相关性	159
8.3	网壳结构多维多点非平稳随机地震响应分析方法	160
8.3.1	多维多点非平稳虚拟激励法的理论公式	160
8.3.2	峰值反应的估计	163
8.4	结构动力可靠度及 PDEM 在大跨度空间结构中的应用	164
8.4.1	基本概念	164
8.4.2	PDEM 在非线形随机单层球面网壳结构中的应用	164
8.4.3	随机大跨度空间结构动力反应的极值分布	165
8.4.4	求取随机大跨度结构动力反应极值分布的步骤	165
8.5	算例	166
8.5.1	算例1——多维地震动激励下单层球面网壳动力响应	166
8.5.2	算例2——多维多点地震荷载激励下大跨度空间结构的可靠度计算	168
8.6	建议与展望	174
	参考文献	174
<b>第9章</b>	<b>结构可靠度基本理论</b>	<b>179</b>
9.1	结构设计方法的发展	179
9.2	结构可靠性与可靠度	179
9.2.1	结构功能函数与极限状态	180

9.2.2	结构的空问状态 .....	180
9.2.3	结构可靠度与可靠度指标 .....	181
9.3	常规可靠度方法 .....	183
9.3.1	一次可靠度方法 .....	183
9.3.2	二次可靠度方法 .....	198
9.3.3	结构可靠度分析的蒙特卡罗法 .....	203
9.3.4	统计矩法 .....	205
9.4	结构动力可靠度理论基础 .....	207
9.4.1	概述 .....	207
9.4.2	基于极值分布的动力可靠性 .....	209
9.4.3	基于累积损伤破坏机制的疲劳可靠性 .....	211
	参考文献 .....	212
<b>第 10 章</b>	<b>大跨度空间结构的非线性敏感性分析 .....</b>	<b>216</b>
10.1	由直接微分法推导广义响应敏感性方程 .....	216
10.1.1	回顾有限元响应方程 .....	217
10.1.2	高级响应敏感性方程 .....	222
10.1.3	关于材料参数的位移敏感性 .....	223
10.1.4	非线性敏感性方程 .....	225
10.1.5	关于节点坐标的位移敏感性 .....	226
10.1.6	关于荷载参数的位移敏感性 .....	229
10.2	单轴 Bouc-Wen 模型 .....	230
10.2.1	基本模型假设 .....	230
10.2.2	增量响应方程 .....	231
10.3	单轴光滑双线性材料 .....	232
10.3.1	基本模型假定 .....	232
10.3.2	光滑圆弧段的尺寸 .....	233
10.3.3	修正圆弧段 .....	234
10.4	敏感性结果的不连续性 .....	236
10.5	参数重要性量度 .....	239
10.6	算例 .....	241
10.6.1	算例 1——简单非线性功能函数 .....	241
10.6.2	算例 2——含三个变量的非线性功能函数 .....	241
10.6.3	算例 3——11 弦杆平面桁架结构 .....	242
10.6.4	算例 4——双层柱面网壳的敏感性分析 .....	246
10.6.5	算例 5——输电塔 .....	252
10.6.6	算例 6——平板网架结构 .....	260

参考文献	270
<b>第 11 章 大跨空间结构的非线性有限元可靠度分析</b>	<b>273</b>
11.1 基于性能的地震工程中的可靠度分析	273
11.2 随机模型	275
11.2.1 边缘分布函数的种类	275
11.2.2 自定义分布	275
11.2.3 相关性结构	276
11.2.4 联合概率分布	277
11.3 功能函数	280
11.3.1 构件和系统可靠度问题	280
11.3.2 功能函数的一般特点	280
11.3.3 基于性能的地震工程的功能函数	281
11.4 计算功能函数概率和响应统计	281
11.4.1 二阶矩响应统计	282
11.4.2 一次可靠度方法	283
11.4.3 重要抽样分析	284
11.4.4 参数可靠度分析	285
11.4.5 系统可靠度分析	286
11.5 搜索设计点	287
11.5.1 一般的搜索方法	288
11.5.2 收敛准则	288
11.5.3 子步大小的选取和限制搜索至可靠域	290
11.5.4 梯度投影法	291
11.5.5 iHLRF 算法	293
11.5.6 Polak-He 算法	295
11.5.7 连续二次规划法	296
11.6 算例	298
11.6.1 算例 1——简单非线性功能函数	298
11.6.2 算例 2——简单桁架结构	298
11.6.3 算例 3——11 弦杆平面桁架结构	300
11.6.4 算例 4——双层柱面网壳结构	301
11.6.5 算例 5——网架结构的可靠度研究	306
参考文献	311
<b>第 12 章 基于功能度量法的空间网格结构的可靠度分析</b>	<b>315</b>
12.1 引言	315
12.2 可靠度指标法与功能度量法	315

12.2.1	可靠度指标法 .....	315
12.2.2	功能度量法 .....	317
12.3	算例 1——四种矢跨比下双层柱面网壳的可靠度研究 .....	320
12.3.1	模型参数 .....	320
12.3.2	不同矢跨比下双层柱面网壳结构的可靠度对比分析 .....	324
12.3.3	双层柱面网壳的可靠度分析 .....	325
12.3.4	双层柱面网壳的敏感性分析 .....	326
12.3.5	双层柱面网壳的可靠度及敏感性分析 .....	329
12.3.6	双层柱面网壳的可靠度及敏感性分析 .....	331
12.3.7	双层柱面网壳的可靠度及敏感性分析 .....	334
12.4	算例 2——四种矢跨比下双层凯威特型球面网壳的可靠度及敏感性研究 .....	337
12.4.1	竖向荷载、杆件横截面面积、屈服强度和弹性模量四个随机变量 .....	339
12.4.2	双层球面网壳的可靠度及敏感性分析 .....	351
12.5	结论 .....	360
	参考文献 .....	361
<b>第 13 章</b>	<b>双层球面网壳的静动力失效分析 .....</b>	<b>363</b>
13.1	引言 .....	363
13.2	网壳结构能量平衡方程及单元介绍 .....	364
13.2.1	结构耗能机理及动力失效指标 .....	364
13.2.2	Link8 单元 .....	366
13.3	静力荷载作用下双层球面网壳失效分析 .....	368
13.3.1	双层球面网壳结构模型 .....	368
13.3.2	矢跨比 1/3~1/6 .....	371
13.3.3	矢跨比 1/3 .....	375
13.3.4	矢跨比 1/4 .....	379
13.3.5	矢跨比 1/5 .....	381
13.3.6	矢跨比 1/6 .....	384
13.4	双层球面网壳结构动力失效分析 .....	386
13.4.1	矢跨比 1/3 .....	386
13.4.2	矢跨比 1/4 .....	395
13.4.3	矢跨比 1/5 .....	396
13.4.4	矢跨比 1/6 .....	398
	参考文献 .....	400

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 引 言

远古时代,人类或挖洞穴居或构木为巢,仅是为了争取一个生存的空间。随着人类社会的发展和社会文明的提高,人们对生存环境有了更多的要求,对大跨度大面积的公共空间需求日益增加。在过去,大多采用木材、砖石等作为建筑材料,跨度可达 30 多米;随着水泥、钢材和膜材等新型材料的出现,动辄上百米的大跨度空间结构比比皆是。

大跨度空间结构是衡量一个国家或地区建筑技术水平的重要标志,其结构形式主要包括薄壳结构、网架结构、网壳结构、悬索结构、膜结构及各类组合空间结构。形态各异的空间结构在体育场馆、会展中心、影剧院、大型商场、工厂车间等建筑中得到广泛应用。在人类社会的发展历程中,更大跨度和空间的结构常常是人们的梦想和追求目标,空间结构的发展在很大程度上反映了人类建筑史的发展。

作为 20 世纪土建结构领域的一个重大进展,空间结构发展为解决人类社会生产和生活的需要提供了一条极为有效的途径。相对而言,较之平面结构体系,空间结构具有受力合理、刚度大、自重轻、抗震性能好、工期短、造价低等优点,且结构形式丰富多样、造型生动活泼,具有很强的艺术表现力。

## 1.2 大跨度空间结构的发展前景

大跨度结构的建造及其所采用的技术反映了一个国家的建筑技术水平,规模宏大、形式新颖、技术先进的大型空间结构已成为一个国家经济实力和建设技术水平的重要标志。

结构的“杂交”将是今后空间钢结构发展和创新的重要途径,它将不同类型的结构加以组合从而形成新的结构体系。例如,悬索、索网或膜利于受拉,拱、壳体或网壳利于受压,而梁、桁架或网架则利于受弯,如果利用其中某种类型结构的长处来避免或抵消另一种与之组合的结构的短处,就能大大改进结构的受力性能。杂交结构可采用多种多样的方法,其中主要的有刚性支撑与柔性支撑两种。所谓刚性支撑就是在建筑物中设置强大的支撑结构,并与周围的屋盖相组合。而柔性支

撑是指以悬挂或斜拉的钢索作为屋盖的支点。

人类对建筑围护的使用要求越来越高,大跨度的空间被封闭起来以后,又期望一个接近大自然的露天环境。例如,体育场或人工海洋馆要求在晴好天气条件下屋盖能打开成为露天的,而遇到阴冷的天气,屋盖又能闭合成为室内的。这就要求从静止的结构变为可动的结构,这给大跨度结构带来了新的挑战,开闭结构便应运而生。这种结构基本分为以下两种形式:一种以钢骨架作为承重结构,以金属板、玻璃、塑料或膜材围护,屋盖以平移、旋转或上下叠合来进行开闭;另一种开闭结构采用可折叠膜材为屋盖,其折叠的方式视建筑物形状而定,如果为方形或矩形,膜材可平行或沿四周展开或收缩,如果为圆形,则可自中心支点或沿圆周伸缩。

在空间结构发展的过程中,不断有学者提出要建造超大跨度的建筑物,例如,富勒曾考虑建造直径 3200m 的穹顶将纽约的曼哈顿岛覆盖起来。日本巴组铁工所曾研究过建造以钢网壳穹顶作为大跨度围护结构,直径 1000m 的新都市空间为人们提供清洁而舒适的生活与工作环境。因此,一旦空间钢结构跨越了传统的建筑功能,步入巨型结构的行列,则跨度与面积就会有新的突破,跨度达到上千米、面积达到几千平方米。

预应力空间钢结构具有很多特点和优势,是空间结构发展的新趋势。未来预应力空间钢结构将会发挥其特色和活力,获得更广阔的应用和发展。

### 1.3 大跨度空间结构的发展趋势

早期研究更多偏重于静力作用下的结构形状和分析方法,如拟板法、差分法等。之后,逐渐从静力拓展到动力,从线性到非线性,以及网壳结构的静、动力稳定性,索膜结构找形分析,柔性结构的风振响应等。上述关键理论问题得到了深入研究,取得了大量的研究成果。

大跨度空间结构大多为关系国计民生的公共性建筑,同时也是标志性建筑,大量采用钢材、膜材、高强钢束等新型材料。环境的侵蚀、材料的老化、地基的不均匀沉降和复杂荷载、疲劳效应与突变效应等因素的耦合作用将不可避免地导致结构系统的损伤积累、抗力衰减,以及极端情况下的灾难性突发事件。重大工程和标志性建筑的倒塌对整个社会的影响是极大的,重大工程和城市安全是国家公共安全体系最重要的组成部分。

对大跨度空间结构工程施工全过程和使用运行情况进行现场实时健康监测,可以实现大型空间结构工程灾变现象的预测、预报,为提前采取防灾、减灾措施,避免或减少人民生命财产损失提供科学依据。综合以上分析,为进一步促进我国大跨度空间结构的发展应用,下面几个方面需进一步研究:

- (1) 空间结构风致效应、风振系数和流固耦合问题。
- (2) 空间结构抗震和控制、多维多点输入的抗震分析。
- (3) 空间结构的形体优化和创新。
- (4) 节点的破坏机理和极限承载力。
- (5) 各种形式空间结构的静、动力稳定性。
- (6) 索穹顶结构的开发、研究,重点面向索穹顶的施工,建造更大跨度的索穹顶结构。
- (7) 空间结构检测、诊断、评估和加固。

### 1.3.1 网架结构研究的发展趋势

相对于其他种类的空间结构,网架结构的理论研究和工程应用都已经比较成熟,但仍仍然存在一些重要问题亟待解决。

#### 1. 水平抗震性能研究

平面杆系屋盖结构体系上受到的水平地震作用主要由屋盖的支撑系统承受,所以抗震设计主要针对竖向地震作用的计算。而网架结构多用于高大空旷的房屋,支撑系统要和网架共同承受水平地震作用,网架良好的空间刚度正好提供了这种可能,因此对网架结构体系在水平地震作用下的反应应给予足够重视。一般认为对网架结构的抗震设计主要应考虑竖向地震作用,这是针对网架结构本身而言的,对于整个结构体系来说,水平地震作用仍是不可忽视的。

在新疆乌恰影剧院 1985 年遭受强烈地震后,对其所进行的震害分析表明,由于在结构布置时,将舞台屋面大梁与网架同时放在由台口大梁支撑的圈梁之上,而造成舞台屋面与网架上的大部分荷载都集中在同一水平位置上,但没有抗侧力支撑构件。在地面运动水平分量作用下,由于有钢筋混凝土板构成的舞台屋面有很大的质量,而其支撑结构却没有足够的抗侧刚度,只有通过网架上弦来传递强大的惯性力。而门厅一端是刚性较大的框架结构,不能相应地发生振动,致使网架上弦杆普遍产生较大的内力,尤其是靠近舞台口的上弦内力急剧增加。而网架端部上弦是静内力较小之处,按静力设计的原杆件截面也是较小的。因此,造成这部分杆件产生失稳破坏,导致杆件屈曲与支座脱落。

#### 2. 疲劳性能研究

工业厂房中的网架结构一般设置悬挂吊车作为起重运输设备,因此,在悬挂吊车作用下网架结构的疲劳问题应予以重视。如何进行网架结构疲劳设计,国内现行规范及规程中尚无规定。



### 3. 网架结构的新体系

根据杆件布置方式的不同,网架结构有多种常用类型。在工程实践和理论研究中,应提倡新型网架形式的创新,并对其几何拓扑关系和基本力学性能展开研究,使网架结构得以不断丰富和发展,并增强网架结构的生命力。

将预应力技术引入网架结构,为网架的发展提供了又一片广阔空间。预应力网架结构是一种新型大跨结构,预应力的施加能够有效减小结构的挠度,降低内力峰值和用钢量。此类预应力网架结构的静、动力力学性能和不同预应力度对网架的卸荷效果、极限承载力和破坏形态的影响等问题值得进一步研究。

### 4. 网架结构的塑性设计

目前对网架结构静、动力受力分析仅限于弹性分析范围内。在一些荷载确定、跨度不大的网架中,可以尝试考虑塑性设计,应允许在一定条件下,网架杆件可以部分进入塑性。尤其在罕遇地震作用下,应进行网架结构的弹塑性动力分析。

## 1.3.2 网壳结构研究的发展趋势

### 1. 抗震性能研究

#### 1) 结构多维随机振动分析方法与网壳结构多维地震响应研究

对于大跨网壳结构这类频率密集的复杂体系,传统的振型分解反应谱难以应用,因为不仅在参振振型的选取方面有困难,所采用的平方和开方法(square root of sum of squares, SRSS)也无法考虑各振型之间的相关性,虚拟激励法与完全平方根法(complete quadratic combination, CQC)等价,且计算远较 CQC 法快速。一些学者通过引用虚拟激励法思路,经过发展和改进,推广到多维地震作用的情形,推导出多维随机振动分析的虚拟激励理论方法。

#### 2) 应用时程分析法研究网壳结构地震响应规律

时程分析法是研究网壳结构体系多维地震响应的有效方法。一些学者对单层球面网壳、柱面网壳和鞍形网壳的自振特性及地震荷载作用下的弹性响应规律进行了系统的参数分析,获得了规律性的结果。作为阶段性成果,最初对杆件由轴力引起的应力进行统计,得出了各类网壳不同参数变化下地震内力系数的分布规律,并给出了可供设计参考的地震内力系数建议取值。另外,应用时程分析法对网壳结构弹塑抗震性能进行研究是一个重要的研究内容。对更大跨度的网壳结构进行抗震分析,还应考虑地震的空间相关性。

#### 3) 网壳结构强震下的延性及破坏机理研究

如何全面清晰地掌握网壳结构塑性发展的全过程,了解随着构件和结构的延性变化导致结构性能发生的根本改变,是研究网壳结构在高烈度强震作用下性能