

Health Monitoring and
Evaluation Methods
for Spatial Grid Structures

空间网格结构 健康监测 与安全性评价

● 金恩平 著 ●

Health Monitoring and
Evaluation Methods
for Spatial Grid Structures

空间网格结构 健康监测 与安全性评价

● 金恩平 著 ●

图书在版编目 (CIP) 数据

空间网格结构健康监测与安全性评价 / 金恩平著. —北京:
中国财政经济出版社, 2016. 8

ISBN 978 - 7 - 5095 - 6959 - 7

I. ①空… II. ①金… III. ①空间结构 - 网格结构 - 研究
IV. ①TU399

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 207134 号

责任编辑: 段 钢

责任校对: 张 凡

责任印制: 杨 军

中国财政经济出版社出版

URL: <http://www.cfeph.cn>

E-mail: cfeph@cfeph.cn

(版权所有 翻印必究)

社址: 北京市海淀区阜成路甲 28 号 邮政编码: 100142

营销中心电话: 88190406 北京财经书店电话: 64033436 84041336

北京厚诚则铭印刷科技有限公司印刷 各地新华书店经销

710 × 1000 毫米 16 开 12.25 印张 250000 字

2016 年 8 月第 1 版 2016 年 8 月北京第 1 次印刷

定价: 48.00 元

ISBN 978 - 7 - 5095 - 6959 - 7/TU · 0041

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

质量投诉电话: 88190744

反盗版举报热线: 88190492、88190446

前

言

空间网格结构是空间结构 (Space Structure or Spatial Structure) 的一种基本形式, 主要包括空间网架结构和空间网壳结构。三十年来, 空间网格结构在国内外得到迅速发展, 广泛地应用于各类公共建筑领域, 成为国家或地区建筑科技进步水平高低的象征。当然, 在空间网格结构兴盛的背后也存在着安全隐患。诸多工程事故表明, 构建一套适宜于在役空间网格结构的安全性评价方法与标准, 已经成为人们关注的焦点和亟待解决的课题。然而, 在役的结构安全性评价研究与应用成果多针对砖混结构、混凝土结构, 空间网格结构尚处于起步阶段, 很多方面有待于进一步深化研究。

本书基于空间网格结构受力特点及其基本理论、损伤识别理论、结构健康监测技术和 FUZZY 数学综合评价原理, 采用理论分析、数值模拟和实例论证方法, 对在役空间网格结构的损伤识别及其安全性评价方法进行了较为系统的研究。

本书主要研究内容如下:

(1) 基于在役空间网格结构的结构特点、损伤类型与破坏形式的分析, 给出了空间网格结构安全性控制的数学模型, 以及空间网格结构安全性控制的主要对象、安全性控制参数与计算方法。

(2) 基于既有传感器优化布置方法和空间网格结构内力分布规律、结构损伤特征及其结构健康监测工作方式, 提出了适宜于在役

空间网格结构传感器布置方法、损伤参数及其识别方法。

(3) 建立了在役空间网格结构不同类型构件截面积与结构荷载因子之间的计算模型,提出了确定此类结构杆件的权重计算方法,以及在役空间网格结构稳定性与结构构件之间权重分配方案和量化标准。

(4) 基于 FUZZY 数学综合评价原理,对既有模糊综合评价方法涉及的隶属函数和权重指标、综合评价数学模型、评判指标等问题的研究,结合空间网格结构特点,给出了在役空间网格结构的安全性评价程序、评价等级划分标准以及综合评价方法。

研究结果表明:

第一,在役空间网格结构安全性评价的结构抗力模型主要考虑几何参数和计算模式因素的影响。

第二,在役空间网格结构安全性从结构杆件、节点、结构稳定性三个方面加以控制,结构杆件用构件内力作为控制参数,结构稳定性用承载力作为控制参数。

第三,对在役空间网格结构和杆件进行损伤识别时,传感器的布置及其方案优化,可以分别采用静态应变分析法和基于动能原理的有效节点法。

第四,选用结构杆件损伤前后应变差值确定空间网格结构杆单元的损伤位置与损伤程度;选用连接域面积为变量,杆件内力变化差为损伤参数,识别杆件节点的损伤位置与损伤程度;选用结构损伤前后的节点位移与结构承载力之积的比值作为损伤参数,识别结构整体的损伤程度。

本书内容研究以国家自然科学基金项目《西北地区空间网壳-钢筋砼结构破坏机理及减震体系研究》课题为依托,通过某市体育馆大型复杂网壳结构工程实例的系统监测与安全性评价,验证了本书结论的简便性和有效性,对在役空间结构的安全性评价具有一定的借鉴作用和指导意义。

作者

2016年6月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究中主要概念界定	7
1.3 空间网格结构的特点与破坏形式	9
1.3.1 空间网格结构损伤原因	10
1.3.2 空间网格结构损伤类型与破坏形式	12
1.4 空间网格结构安全性检测与评价现状研究	13
1.4.1 结构安全性检测方法研究现状	13
1.4.2 结构安全性评价方法研究现状	24
1.4.3 结构健康监测技术应用与发展	28
1.5 研究框架与创新点	32
1.5.1 研究内容和关键问题	32
1.5.2 研究方法与技术路线	33
1.5.3 本书研究创新点	35
第2章 空间网格结构的安全性控制	36
2.1 引言	36
2.2 空间网格结构安全性控制模型	37
2.2.1 结构荷载模型及其组合效应	38
2.2.2 结构抗力模型	48
2.3 空间网格结构构件安全性控制	52

2.3.1	结构抗力系数确定	53
2.3.2	空间网格结构杆件抗力计算	54
2.4	在役空间网格结构稳定性控制	59
2.4.1	结构稳定性控制指标	59
2.4.2	在役空间网格结构最大承载力确定	60
2.5	本章小结	63

第3章 空间网格结构传感器布置方法 64

3.1	引言	64
3.2	几种既有传感器布置方法	66
3.2.1	有效独立法	66
3.2.2	模态保证标准	66
3.2.3	模态动能法	67
3.2.4	敏感性分析法	67
3.2.5	动力响应分析法	68
3.2.6	基于应变模态的布置方法	69
3.3	空间网格结构杆件损伤识别的传感器布置方法	70
3.3.1	静态应变分析法	70
3.3.2	数值模拟	72
3.4	空间网格结构整体损伤识别的传感器布置方法	78
3.4.1	有效节点法基本原理与步骤	79
3.4.2	数值模拟	79
3.5	传感设备的安装与维护	85
3.5.1	传感器安装方式的选择	85
3.5.2	传感器安装过程中的调试	86
3.5.3	传感器使用过程中的维护	86
3.6	本章小结	86

第4章 空间网格结构损伤参数的选择与识别	88
4.1 引言	88
4.2 空间网格结构杆件的损伤识别	89
4.2.1 损伤参数的选择	89
4.2.2 基于单元应变模态差的损伤识别方法	92
4.2.3 数值模拟	95
4.3 空间网格结构杆件节点损伤识别	101
4.3.1 杆件节点损伤识别基本原理	101
4.3.2 数值模拟	104
4.4 空间网格结构整体损伤识别	107
4.4.1 空间网格结构临界荷载的确定	107
4.4.2 空间网格结构整体损伤识别方法	110
4.5 本章小结	110
第5章 空间网格结构各因子的权重系数	112
5.1 引言	112
5.2 确定权重系数的几种方法	113
5.2.1 层次分析法	113
5.2.2 主成分分析法	115
5.2.3 失效单元判定法	117
5.3 空间网格结构构件权重系数	118
5.3.1 权重系数计算原理	118
5.3.2 权重系数计算	119
5.4 空间网格结构稳定性权重系数	133
5.5 本章小结	134
第6章 空间网格结构安全性评价方法	136
6.1 引言	136

6.2	Fuzzy 综合评价理论	137
6.2.1	Fuzzy 综合评价数学模型	137
6.2.2	Fuzzy 综合评价方法存在的问题	139
6.3	空间网格结构安全性综合评价	141
6.3.1	结构安全性评价程序	141
6.3.2	结构安全性评价等级	142
6.3.3	结构安全性评价方法	144
6.4	工程实例评价	146
6.4.1	初始结构设计验算	151
6.4.2	结构施工阶段的质量控制与监测	153
6.4.3	新建期间的结构监测与质量控制	161
6.4.4	结构服役期间安全评价	164
6.5	本章小结	168
 第7章 结论与展望		170
7.1	研究工作及结论	170
7.2	展望	171
 参考文献		173
 后记		186

第1章

绪 论

1.1

研究背景

随着社会和科技的进步、国民经济的发展以及人们活动场所的变化,建筑结构日新月异,各种大型复杂的结构不断出现,土木工程结构不断地向着大型化、复杂化方向发迈进。多年来,基于新材料和新技术的应用、空间结构分析理论的日臻完善、计算机的应用以及设计理念和构思的更新,各种新颖别致的空间结构形式不断涌现,空间结构的跨度和规模越来越大,成为现代结构形式中发展最快的一种结构形式。目前,这些美观大方的空间结构建筑不但广泛地应用于体育馆、展览会馆、飞机场、车库、电厂干煤棚等各类建筑领域^[1],为所在地域增光添彩,而且也象征着国家或地区建筑科技进步水平的高低^[2],如北京奥运会主场馆鸟巢(见图1.1)、日本名古屋体育馆(见图1.2)、美国新奥尔良超级穹顶(见图1.3)、法国巴黎国家工业与技术中心陈列展厅(见图1.4)等。

自21世纪初期起,现代空间网格结构的发展规模基本上呈直线上升趋势。以中国为例,中国最早的网格结构建筑是1931年建成的广州中山纪念堂刚穹顶;1956年第一个有影响的大跨度圆柱面网壳结构建筑天津体育馆(52m×68m,矢高8.7m)落成;1964年第一个钢网架结构建筑上海师范学院球类房(31.5m×40.5m)落成;随后代表性的建筑有:1966年的天津科学宫(14.8m×



图 1.1 北京奥运会主场馆鸟巢

资料来源：根据文献 [2] 的书稿资料整理而成。



图 1.2 日本名古屋体育馆

资料来源：根据文献 [2] 的书稿资料整理而成。

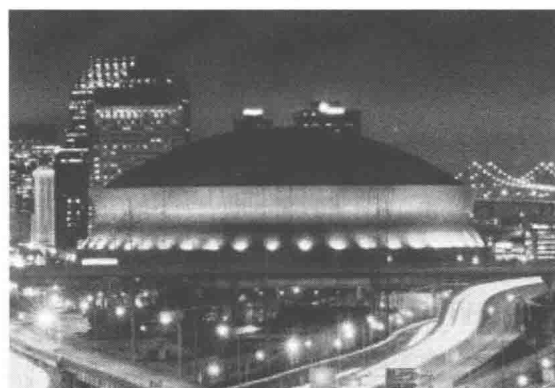


图 1.3 美国新奥尔良超级穹顶体育馆

资料来源：根据文献 [2] 的书稿资料整理而成。



图 1.4 法国巴黎国家工业与技术中心

资料来源：根据文献 [2] 的书稿资料整理而成。

23.3m，第一次采用了焊接空心球网架），1967 年的郑州体育馆（球径 64m，矢高 9.14m，采用单层肋环形穹顶网壳），1968 年的首都体育馆（99m × 112m，采用了型钢杆件和钢板节点），1973 年的上海体育馆（球径 110m）等。1990 年第十一届亚运会后，以石景山体育馆和北京体育大学体育馆的网壳结构为起点，全国掀起了网壳结构的研究与发展热潮，此后重要的标志性的的大跨度公共建筑几乎都采用网壳结构^[3]（见图 1.5 和图 1.6）。目前，中国已是空间结构大国，拥有多项世界之最，如空间结构工程项目最多、覆盖建筑面积最大、世界首次建成最多、多种具体形式空间结构跨度最大、首次提出分析方法最多、加工制作安装企业最多等^[4]。

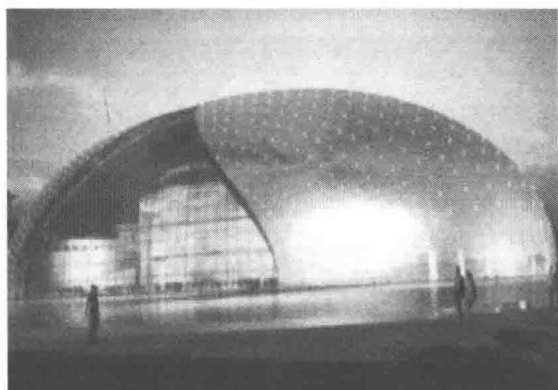


图 1.5 中国国家大剧院

资料来源：根据文献 [2] 的书稿资料整理而成。

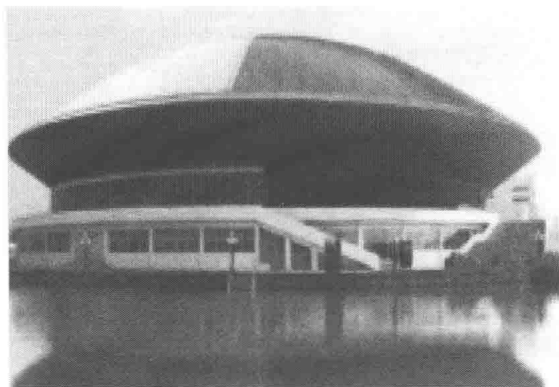


图 1.6 天津体育馆

资料来源：根据文献 [2] 的书稿资料整理而成。

然而，在空间网格结构兴盛背后也存在着一定程度的安全性风险。空间网格结构建筑多为关系到国计民生的公共建筑或区域标志性建筑，其使用期往往长达几十年甚至上百年。在自然环境中，其不可避免地会遭受到环境侵蚀、材料老化、地基不均匀沉降、复杂荷载的长期效应与疲劳效应、突变效应以及几种因素耦合作用的影响，必然产生损伤累积，导致结构抗力衰减，极端情况下还可能会引发出灾难性突发事件^[5]。

多年来，国内外空间网格结构建筑发生的安全事故很多。例如，1963 年罗马尼亚布加勒斯特市的一个 93.5m 跨度的单层穹顶网壳结构建筑在一场大雪后彻底坍塌^[6]，其主要原因是部分构件破坏导致结构的整体失稳（见图 1.7）。

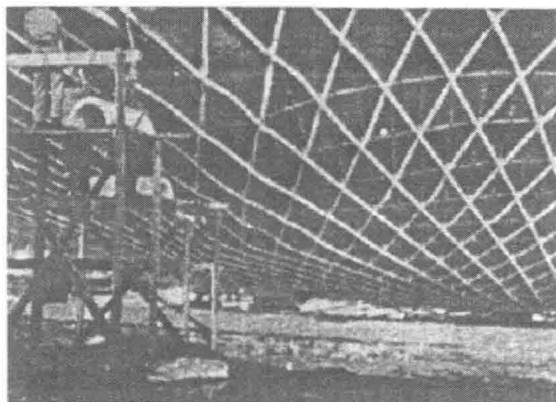


图 1.7 罗马尼亚布加勒斯特单层穹顶

资料来源：根据文献 [2] 的书稿资料整理而成。

1978年1月,美国纽约州布鲁库维尔市会堂被大雪压垮坍塌。这座会堂为空间网架穹顶,直径52m,网架高0.61m。

1978年1月,美国康涅狄格州哈特福特中心体育馆在雪荷载作用下,由于一些杆件压曲破坏引起连锁反应,导致整个屋顶突然倒塌^[7]。该体育馆屋盖尺寸为91.4m×109.7m,总面积1万多平方米,能容纳1.2万余名观众。这是一个非常典型的网架倒塌实例,在工程界引起了极大的震动。

1992年9月,中国深圳国际展览中心,由于暴雨造成屋面积水过多荷载加大,造成展厅整体倒塌。该展厅面积7200m²,为螺栓球节点网架结构,1989年5月建成。

2002年4月,中国湖南耒阳电厂大型空间结构储煤库发生破坏,该厂房建成后已经5年,由于使用和环境腐蚀等原因造成倒塌(见图1.8)。



图1.8 湖南耒阳电厂储煤库

资料来源:根据文献[2]的书稿资料整理而成。

2004年2月,莫斯科德兰士瓦水上乐园玻璃屋顶突然坍塌(见图1.9)。该工程事故造成40多人死亡,110多人受伤。事故分析可能是由于屋顶上面堆积冰雪过重、玻璃幕屋顶结构强度不够、室内外温差太大(室内零上25度,室外零下15度)等原因造成。

2004年5月,巴黎戴高乐机场2E候机厅发生屋顶坍塌事故(见图1.10),造成包括两名中国公民在内的6人不幸遇难,多名旅客和机场人员受伤。根据事故调查委员会的正式报告,原因有三条:(1)出事候机厅的水泥顶棚与圆柱形金属支柱连接处出现穿孔,由于大厦的混凝土材料不足以支撑用



图 1.9 莫斯科水上乐园

资料来源：根据文献 [2] 的书稿资料整理而成。

来巩固大厦玻璃外壳的钢铁支架，最终支柱刺破了房顶导致顶棚坍塌；（2）由于在新建航站正中央开辟一条通往机场主楼的衔接走道，大厦的部分建筑结构被掏空，进一步增加了压力；（3）玻璃外壳极易导致温度变化，温度变化使外部构架每天变形 1~2 厘米，使混凝土构架逐渐磨损。

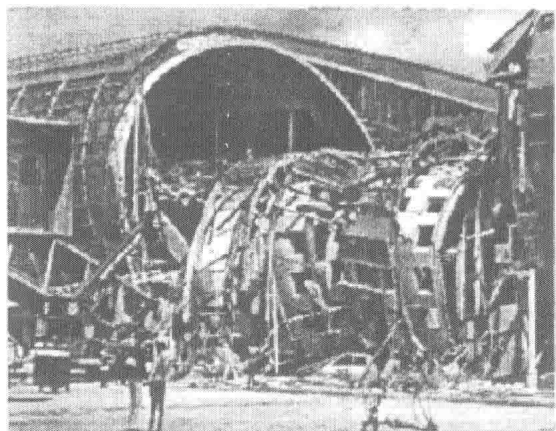


图 1.10 法国巴黎戴高乐机场候机厅

资料来源：根据文献 [2] 的书稿资料整理而成。

重大工程和标志性建筑多为人员聚集的地方，一旦发生倒塌事故，将造成不可设想的人民生命和财产损失，并产生恶劣的社会影响。因此，在设计年限

及其后续若干使用年限内,必须保证空间网格结构拥有不发生失效或至少发生失效危险性非常小的最大安全度。同时,应积极采用先进的检测技术,对其运营状态进行科学检测和安全性评定,及时预警,对受损结构及时维修加固,减轻结构可能因人为因素和自然因素造成的损伤,减少工程设施的破坏程度,尽可能地提高结构防灾能力及其使用寿命。

在役结构的事故分析、检测鉴定、安全性评定、加固设计、寿命评估和长期监测理论与技术的研究及开发,在国内外已经成为一门研究学科。混凝土结构因其应用历史长久、既有结构量大面广,在国内外均有较多的研究与应用成果^[8~15];桥梁结构因其特殊的重要性,其监测技术和安全性评价等方面研究也广泛开展开来^[16~17]。空间结构作为一种新型结构体系,近三十年来在国内外才得到迅速发展,虽然国内外专家学者在这些方面进行了针对性的研究,成绩斐然,但是迄今为止,这些可喜的成果多处于试验与研究阶段,实际应用中尚有诸多问题需要解决^[18]。至于空间网格结构,国内许多方面尚处于起步阶段,国外也未见较系统的研究成果和工程应用,很多工作有待开展^[19]。

1.2

研究中主要概念界定

在建筑结构检测、诊断及其安全评价研究领域中,国内外既有文献涉及许多概念,由于各种原因,不同作者甚至同一作者在不同时期对其理解存在着差异,这势必影响到对问题理解的准确程度。根据《建筑结构设计术语和符号标准》(GB/T50083-97)、《建筑结构检测技术标准》(GB/T50344-2004)等现有规范,并参考其他文献,本书对相关概念加以说明。

(1) 空间结构:指承受不位于同一平面内的外力且在计算时必须进行空间受力分析计算的屋盖结构。空间网格结构是屋盖空间结构的一种结构形式,带有支承结构体系(如框架结构等)的网格结构称为空间组合网格结构。

(2) 在役空间网格结构:指已建成两年以上且投入使用的屋盖结构。

(3) 结构缺陷:指自然或人为因素引起的结构实际状态与足够精确的理论分析模型之间存在的不利于结构正常服役的差异。主要包括结构材料的先天性瑕疵、结构设计造成的缺失(如理论分析模型中的不合理简化等)和施工

过程中形成的失误（如焊接接头中存在的气孔、夹渣、咬边、结构杆件不合理代换等）。对于在役结构而言，结构缺陷统称为结构的“初始缺陷”。

（4）结构损伤：指由于荷载、环境侵蚀、灾害和人为因素等造成了结构或结构构件发生非正常的位移、变形、开裂以及材料的破损和劣化等损坏。这些损坏是不可恢复的且在不同程度上影响到结构的安全性能。本书所言的“结构损伤”特指结构或构件在服役期间发生的损坏。

（5）结构检测：为评定新建结构工程质量或鉴定在役结构工程性能等所实施的测试工作，是现场测量和室内试验的总称。根据检测手段的不同，建筑结构检测可分为结构量测和结构监测。

（6）偶然/突发作用：指在结构使用期内（设计基准期内）不一定出现，一旦发生，其量值很大且持续时间很短的荷载，如地震、爆炸、撞击等。为了与结构设计中所考虑的正常作用即永久作用和可变作用加以区分，本书以现行设计规范规定为基准，将结构设计中未考虑的或高于超越地区设防等级的作用，统称为偶然/突发作用，反之均属于正常作用。

（7）损伤识别：指利用结构检测获取结构或结构构件工作状态的性能参数，以一定的分析方法判断在役结构整体或结构中被检测部位有无损伤及损伤程度的过程。

（8）结构健康监测（SHM）：Housner 把结构健康监测定义为^[20]：The use of in-situ, non-destructive sensing and analysis of structural characteristics, including the structural response for detecting changes that may indicate damage or degradation. Ton-Lo Wang 等^[21] 定义为：The use of in-situ, non-destructive sensing and analysis of structural characteristics, including the structural response for the purpose of identifying if damage has occurred, determining the location of damage, estimating the severity of damage. And evaluating the consequences of damage on the structures。

本书把结构健康监测定义为：以结构安全性评价及其使用寿命的预测为目标，是利用无损传感技术和对结构系统的特性分析（包括结构的响应），以达到检测结构损伤或抗力退化的一些变化，其涉及结构检测、结构损伤识别、结构安全评定、结构寿命预测和结构维护决策等方面。结构健康监测包括结构量测与结构监测，是传统结构检测的继承与发展。

（9）安全性评价：通过对所测结构或构件当前状态的数据分析与处理，