

大跨度屋盖结构

风压特性 及风振系数研究

廖玉凤 王 伟 / 著

DAKUADU WUGAI JIEGOU
FENGYA TEXING JI FENGZHEN XISHU YANJIU



四川大学出版社

前 言

大跨度屋盖结构的发展状况是衡量一个国家建筑科学技术水平的重要指标之一，特别是近年来，以社会经济发展为需求背景，以结构分析和建造水平进步为技术支撑，大跨度屋盖结构向高、大、柔方向发展的趋势日益明显，从而导致结构风效应更加突出，风灾损失更加严重。因此，大跨度屋盖结构风工程的发展，是推动屋盖结构向超大轻柔方向发展的动力之一。目前国内外对大跨度屋盖结构的风振响应研究较少，本书研究的屋盖结构的风压分布特性及风振系数作为大跨度柔性屋盖结构的一个专题，具有重要的工程应用价值和学术研究意义。因此，本书可作为结构工程相关专业研究生学习结构抗风设计的教学用书，也可作为结构工程设计人员的参考资料。

本书采用结构风工程计算理论与实际工程相结合的研究方法，介绍了大跨度屋盖结构风工程发展概况、近地风基本特性及工程表达方法、作用在大跨度屋盖结构上风荷载的特点和作用规律、平均风压和脉动风压的确定方法、大跨度屋盖结构顺风向和横风向风效应分析的原理和方法、大跨度屋盖结构计算流体力学分析方法和风洞试验技术。全书共 6 章，具体章节为：第 1 章绪论，第 2 章近地风特性及大跨度屋盖结构风荷载，第 3 章大跨度屋盖结构风振响应分析方法，第 4 章大跨度屋盖结构风洞试验技术，第 5 章大跨度屋盖结构计算流体力学分析方法，第 6 章大跨度屋盖结构风振系数计算。

本书在撰写过程中，参考了相关规范、标准、图集及大量的著作与文献资料，并得到了同行的大力帮助和支持，在此谨向这些文献的作者表示诚挚的谢意。同时，本书的编写也得到了出版社和各位同仁的指导，在此一并表示衷心的感谢。限于作者水平，书中疏漏和不足之处在所难免，希望同行专家和广大读者批评指正。

著 者

2018 年 3 月

目 录

第1章 绪 论	(1)
1.1 大跨度屋盖结构发展概况	(1)
1.1.1 国外发展概况	(2)
1.1.2 国内发展概况	(3)
1.2 大跨度屋盖结构抗风发展历程	(3)
1.2.1 大跨度屋盖结构典型风毁事故回顾	(4)
1.2.2 大跨度屋盖结构抗风基础理论建立	(7)
1.2.3 我国大跨度屋盖结构抗风理论研究	(9)
1.3 大跨度屋盖结构抗风研究方法	(10)
1.3.1 理论分析方法	(11)
1.3.2 风洞试验方法	(12)
1.3.3 现场实测方法	(13)
1.3.4 数值模拟方法	(14)
1.4 大跨度屋盖结构风致响应研究现状	(14)
1.4.1 大跨结构风致响应计算的研究现状	(15)
1.4.2 大跨度屋盖结构等效风荷载的研究现状	(16)
第2章 近地风特性及大跨度屋盖结构风荷载	(18)
2.1 自然风特性	(18)
2.1.1 自然风的影响因素	(18)
2.1.2 自然风的分类	(19)
2.1.3 自然风的分级	(20)
2.2 近地风特性	(22)
2.2.1 平均风特性	(22)
2.2.2 脉动风特性	(25)
2.3 大跨度屋盖结构风荷载	(29)
2.3.1 大跨度屋盖结构平均风荷载	(29)
2.3.2 大跨度屋盖结构脉动风荷载	(36)
第3章 大跨度屋盖结构风振响应分析方法	(38)
3.1 大跨度屋盖结构风振响应分析	(39)
3.1.1 水平风力	(39)

3.1.2	竖向风力	(40)
3.1.3	水平和竖向风力的总响应	(40)
3.2	顺风向风振响应分析方法	(40)
3.2.1	风振响应分析时域法	(41)
3.2.2	随机振动离散分析法	(45)
3.2.3	风振响应分析频域法	(49)
3.3	横风向风振响应分析方法	(51)
3.3.1	涡激振动	(51)
3.3.2	空间结构漩涡脱落共振响应分析计算	(55)
3.3.3	横风向驰振	(57)
3.3.4	空间结构驰振失稳临界风速判别准则	(59)
3.3.5	临界风速判别式的验证	(64)
3.3.6	横风向效应与顺风向效应的组合	(65)
第4章	大跨度屋盖结构风洞试验技术	(66)
4.1	边界层风洞	(66)
4.1.1	风洞试验发展历程	(66)
4.1.2	边界层风洞的构造与特点	(67)
4.1.3	风洞试验的主要仪器设备	(69)
4.2	相似性原理	(74)
4.2.1	几何相似	(75)
4.2.2	运动相似	(75)
4.2.3	结构动力相似准则	(77)
4.2.4	决定性相似准则	(78)
4.3	建筑结构风洞试验	(79)
4.4	某大跨度屋盖结构风洞试验	(80)
4.4.1	工程背景	(80)
4.4.2	模型制作及测压点布置	(81)
4.4.3	试验设备	(86)
4.4.4	大气边界层的模拟	(87)
4.4.5	试验工况与试验方法	(90)
4.4.6	试验结果与分析	(92)
4.4.7	风洞试验小结	(101)
第5章	大跨度屋盖结构计算流体力学分析方法	(102)
5.1	计算流体力学求解步骤及控制方程	(102)
5.1.1	CFD的求解过程	(102)
5.1.2	流体控制方程(纳维—斯托克方程)及其数值模拟方法	(104)
5.2	雷诺平均纳维—斯托克方程及湍流物理模型	(108)
5.2.1	雷诺平均N—S方程	(109)

5.2.2 雷诺平均法的湍流模型	(109)
5.3 大涡模拟、分离涡模拟及其湍流模型	(116)
5.3.1 大涡模拟	(117)
5.3.2 分离涡模拟	(118)
5.4 数值模拟的建议	(119)
5.4.1 相关参数选取	(119)
5.4.2 数值离散的方法	(121)
5.4.3 湍流模型的选取	(121)
5.4.4 收敛性准则	(122)
5.5 算例分析	(122)
5.5.1 流体计算软件介绍	(122)
5.5.2 算例计算结果及其分析	(125)
5.5.3 风洞试验结果与 ADINA 软件计算结果的比较	(142)
5.5.4 有限体积法与有限单元法比较	(144)
5.5.5 层流有限体积法与湍流有限体积法比较	(147)
5.5.6 算例分析总结	(151)
第 6 章 大跨度屋盖结构风振系数计算	(152)
6.1 风振系数计算理论	(152)
6.1.1 风振系数的定义	(152)
6.1.2 几种简单形态空间结构的风振系数	(153)
6.1.3 关于风振系数的几点说明	(155)
6.2 算例分析	(155)
6.2.1 某大跨度体育馆屋盖结构自振特性分析	(155)
6.2.2 有限元计算结果及其分析	(158)
参考文献	(175)

第1章 绪 论

为了满足社会生活和居住环境的需要，人们对建筑物提出了要求，尽量减少内部的隔墙和柱子以提供更大的覆盖空间，如大型的集会场所、候机楼、工业厂房、体育馆、飞机库等，跨度要求很大，达几百米或更大。平面结构如梁、桁架、平面刚架、拱等，为单向受力，由于其结构形式的限制，很难跨越大的空间，从技术经济方面讲，也很难满足建筑平面和造型的要求，而解决这一难题就需要空间结构。所谓空间结构，是指建筑结构的形体具有三维空间形状，在荷载作用下具有三维受力特性、呈立体工作状态的结构。自然界中许多空间结构，如蛋壳、龟壳、蚌壳、花生壳和各种植物种子的外壳等，都是一种受力性能很好的空间结构（薄壳结构）；蜂窝也是空间结构（空间网格结构）；蜘蛛网属于索网结构；肥皂泡是典型的空间结构（充气薄膜结构）。从自然界的进化演变过程来看，以仿生原理来理解和发展空间结构形体有着特别重要的意义。人类通过观察大自然，创造了很多既经济又美观的空间结构为建造房屋所用。

对于大跨度空间的需求，促使专家学者们深入研究什么样的结构体系既能够满足建筑平面、空间和造型的要求，跨越更大的跨度，又具有更好的技术经济指标。高强材料的应用和合理的空间结构解决了超大空间形体优美和经济适用的难题。大跨度空间结构在满足人们对美观、空间需求的同时，也给结构设计带来了新的挑战。对于这类采用轻质高强建筑材料建造的大跨度屋盖结构，因其质量轻、阻尼小、振型形状复杂、自振频率分布密集的特点，再加上风荷载本身的复杂性，使其对风荷载的敏感性增强。瞬时极值风会使屋面局部产生很大的吸力，这就容易对屋盖边缘区域的覆面结构和墙体与屋面的连接结构造成破坏，从而降低结构的安全性。在这一背景环境下，对大跨度屋盖结构的风荷载进行进一步分析与研究具有重要意义。

1.1 大跨度屋盖结构发展概况

近年来，随着社会的发展和科学技术的进步，新颖的结构形式不断提出，各种轻质高强的新型建筑材料不断涌现，施工工艺也在不断地创新和完善。与之相伴的各种外形美观、结构新颖别致的大跨度柔性屋盖，广泛应用于影剧院、会展中心、机场航站楼、候机厅、体育场馆、文化广场、仓库、车站、码头、工业厂房等大型重要公共建筑中，以获得尽可能大的无内柱空间，满足功能要求。此类结构常作为所在地的标志性建筑和人文景观，可代表一个国家或地区的建筑科技水平。

大跨度屋盖结构的发展方兴未艾，新的结构形式不断涌现。因此，大跨度屋盖结构包含

了众多不同的形式。根据屋面形状的差异,可以分为平屋面、坡屋面、球形屋面、弧形屋面等。根据屋盖下方的通风方式的差异,可以分为封闭式、半封闭式和开敞式。而最常用的分类方式是按照结构体系来进行分类,主要包括钢筋混凝土薄壳结构、平板网架结构、网壳结构、悬索结构、膜结构、索—膜结构、混合结构等。在上述各种空间结构类型中,钢筋混凝土薄壳结构由于施工比较费时费事,目前已经较少运用在工程之中。平板网架和网壳结构,包括一些特殊形式,如平面型网架结构、多层多跨框架式网格结构等,统称空间网架结构。这类结构整体刚度较大,且具有很强的活力,其合理的结构型式可使结构达到较大的跨度,因此广泛应用于各国大跨度屋盖结构中。悬索结构、膜结构和索—膜结构等柔性体系,均以张力来抵抗外荷载的作用,统称张力结构。这类结构自重小,整体刚度较小,装配便捷,具有很好的发展前景,往往运用在一些特殊建筑中,或者用于景观型建筑。

1.1.1 国外发展概况

国外大跨度空间结构起步较早,成果丰硕。图 1.1 为沙特阿拉伯吉达港市国际机场的朝觐客运大楼,是专供朝觐使用的航站楼,被称为“世界最大的屋顶”“沙漠上的帐篷城”。这个帐篷建筑由 210 顶大帐篷相连而成,覆盖面积 51 万平方米。图 1.2 为位于英国伦敦东部泰晤士河畔格林尼治半岛上的千年穹顶,被誉为“伦敦明珠”,整个建筑为穹庐形,12 根 100 m 高的钢桅杆直刺云天,张拉着直径 365 m、周长大于 1000 m 的穹面钢索网。室内最高处约为 50 m,容积约为 240 万立方米。图 1.3 为日本福冈体育馆网壳结构,其跨度约为 220 m。图 1.4 为德国慕尼黑安联球场,它以精巧的结构、壮丽的外观成为德国的荣耀。体育场的表面由透明的菱形膜结构构成,在阳光下闪烁着微光,有种魔幻的视觉效果。而在夜间,它可以由灯光打出红、蓝两色。国外这些杰出的建筑作品在设计创新,应用新结构、新材料和新技术方面做出了里程碑性的贡献,有力地推动了大跨度空间结构的发展。



图 1.1 沙特阿拉伯吉达港市国际机场的朝觐客运大楼



图 1.2 英国伦敦的千年穹顶



图 1.3 日本福冈体育馆



图 1.4 德国慕尼黑安联球场

1.1.2 国内发展概况

国内大跨度空间结构起步较晚，但随着国家经济实力的增强和社会发展的需要，工程实践的数量逐年增加。2004年8月5日投入运营的广州新白云国际机场新机场一期航站楼（见图1.5）面积为32万平方米，是国内各机场航站楼之最。2007年9月建成的国家大剧院（见图1.6）的整个壳体钢结构重达6475 t，东西向长轴跨度为212.2 m，是目前世界上最大的穹顶。图1.7为国家体育馆“鸟巢”，南北长333 m，形成编织式“鸟巢”结构。2008年1月28日建成的北京奥运会国家游泳中心“水立方”（见图1.8），设计新颖，结构独特，其膜结构已成为世界之最。随着空间结构的类型和形式趋向多样化，相应的理论研究和设计技术逐步完善，必将推动我国对大跨度空间结构的研究和实践。



图 1.5 广州新白云国际机场新机场一期航站楼



图 1.6 国家大剧院



图 1.7 国家体育馆“鸟巢”



图 1.8 国家游泳中心“水立方”

1.2 大跨度屋盖结构抗风发展历程

大跨度屋盖结构为了获得更大的无内柱大空间，会采取一些诸如张弦、悬挑等高效的 结构形式，并且采用更加高强质轻的建筑材料。因此使得这类屋盖结构大多重量轻、刚度低、外形美，属于风敏感性结构。由于结构轻柔，自振频率低，在风激作用下易产生较大的振动和变形，具有高柔性和强非线性，因此风荷载往往成为该类结构设计中的主要控制荷载。屋面覆盖层在灾害性台风作用下可能受到很大的吸力，引发屋盖掀落事故，甚至导致总体结构破坏，而长时间持续的风致振动，则可能使结构的某些部分如节点、支座等产生疲劳与损伤，进而影响其使用功能。风与结构复杂的相互作用，对大跨度屋盖结构抗风设计、防灾减灾分析提出了挑战，因此大跨度屋盖结构的风振研究越来越受到重视。

1.2.1 大跨度屋盖结构典型风毁事故回顾

国内外统计资料表明,在所有的自然灾害中,风灾造成的损失为各种灾害之首。风灾不仅持续时间长、破坏强度大,而且往往很难准确预测。风对结构的破坏往往有很多种形式,根据结构遭受风灾破坏的统计分析,风对结构产生的破坏方式主要有以下几种情况:

- (1) 结构在风的作用下产生振动(如抖振、颤振),在振动作用下产生结构破坏。
- (2) 结构局部出现裂纹或者产生了残余的变形。
- (3) 结构的围护结构出现了局部破坏。
- (4) 在风荷载的重复作用下,其构件产生疲劳破坏。

1.2.1.1 大跨度屋盖结构风毁案例

在风力作用下,对大跨度屋盖结构的损坏,特别是屋盖被风掀起的例子是屡见不鲜的。国内外的资料显示,这种对风敏感的结构即使跨度很小,仅几十米的屋盖也会受到破坏。国内外沿海台风造成屋盖损坏的则更多。

(1) 国外屋盖风毁案例。

长期以来,国外较严重的大跨度屋盖结构风载事故频有发生。在相关的文献中就描述了一座长 66.5 m、宽 53.4 m 的游泳馆金属屋盖屡次被风掀开的事例。N. J. Cook 提到英国一座体育馆的独立主看台悬挑钢屋盖,在大风中由于屋盖下部强大的压力和屋盖上部的吸力导致屋盖石棉板先在边缘固定点处被掀起,致使大片屋面石棉板被掀掉。沈世钊等人在相关文献中论述了美国 Raleigh Arena 的双曲抛物面悬索屋盖由于风致振动的振幅过大,只得在其内部增设抗风索来减小振幅。M. J. Baylay 在相关文献中提到了 9 个大跨度屋盖在风速达到 34 m/s 时屋脊被风吹而造成永久性变形损坏的例子。1989 年 9 月 21 日,美国南加利福尼亚遭受 Hugo 飓风袭击,实地调查结果表明,49% 的建筑物仅屋面受损,损害的情形各异,有的局部屋盖覆盖物或屋盖桁架被吹走或破坏,有的甚至整个屋盖结构被吹走,从破坏的部位来看,大多数屋盖受风破坏都发生在屋盖转角、边缘和屋脊等气流分离强烈及负风压大的部位。

美国国家研究委员会自 1987 年以来的统计结果显示,全球每年数百亿美元的损失是由风灾害造成的,3 万人死于风灾害。其中,2011 年 5 月 22—24 日期间,共有 46 场龙卷风袭击了美国中西部地区,拥有人口总数达到 5 万人的密苏里州乔普林市是受龙卷风影响最为严重的地区,进出该市的主要公路遭到严重毁坏,市区电力设备受损面积巨大,通话线路几乎彻底中断。龙卷风在该市造成的死亡人数超过 100 人,该市 20%~30% 的面积受灾,约 2000 座房屋建筑被毁。图 1.9 为一家当地的钢结构沃尔玛超市被龙卷风破坏后的样子,屋面板被全部吹翻,只剩下一樁刚架。2009 年,巴塞罗那一座多功能体育馆的屋顶在风速超过 100 km/h 的大风中吹落,如图 1.10 所示,大风吹倒的墙体导致正在室内进行棒球训练的 4 人死亡,15 人受伤。



图 1.9 美国密苏里州乔普林市的一家沃尔玛超市被龙卷风破坏



图 1.10 巴塞罗那某多功能体育馆

2005 年 8 月 29 日, 卡特里娜飓风登陆美国国土, 密西西比、路易斯安那和亚拉巴马等州遭到严重破坏, 此飓风被认为是迄今为止美国历史上最严重的自然灾害之一。图 1.11 为路易斯安那州的新奥尔良市超级穹顶体育馆在遭到飓风袭击前后的对比, 飓风袭击之前, 体育馆外一片繁华景象, 飓风袭击之后, 体育馆屋顶被大风毁坏, 风采不再。



(a) 风毁事故前



(b) 风毁事故后

图 1.11 新奥尔良市超级穹顶体育馆风毁事故前后对比

(2) 国内屋盖风毁案例。

在国内, 8807 号台风造成浙江杭州笕桥机场候机厅和杭州体育场屋顶严重损坏。1994 年 17 号台风在浙江温州登陆, 给该地区造成巨大损失, 灾后的调查结果表明, 此次台风使温州机场屋盖及其他房屋屋面严重受损。在最近几年的热带风暴中, 还发生了诸如机场候机楼和大型机库这种重要建筑物屋盖被强风所破坏的事故。2003 年, 上海大剧院屋盖顶部一大块钢板屋顶被大风揉成皱褶不堪的纸团一般, 其表面的覆盖材料被撕裂成如图 1.12 所示的两段, 3 cm 宽的避雷钢带被卷成了麻花状。2013 年 3 月 9 日, 北京地区迎来强风天气, 北京首都机场受到的风力较大, 中午 11 点 40 分, 机场风速已达到 30 m/s, 风力则达到 11 级左右, 11 点 46 分, T3 号航站楼国际区东北角的局部屋顶被瞬间达到的

11 级以上的强旋风掀翻,如图 1.13 所示,其保温板内的泡沫被卷入风中飘落在周边跑道和车道上,造成很大的安全隐患。据报道,2010 年 12 月 10 日和 2011 年 11 月 22 日,首都机场 T3 航站楼曾先后发生过两次屋顶局部区域保温板被强风掀翻的事件。

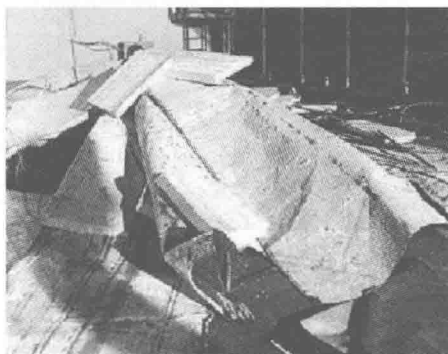


图 1.12 上海大剧院被吹落的屋顶



图 1.13 北京首都机场 T3 航站楼被吹落的泡沫

2004 年 6 月 16 日,河南郑州遭遇突来的飓风袭击,严重破坏了河南体育馆,其东侧罩棚最高点被撕裂近 1200 m^2 ,三副 30 m^2 的大型采光天窗被整体吹落,雨篷吊顶被风吹坏,幸无人员伤亡,由图 1.14 可以看出,破坏相当严重,大部分破坏都是由于负压风引起的,可见对于屋面和外廊吊顶之类的构件而言,负压风是其主要控制因素,结构设计人员在进行研究时应慎重考虑。

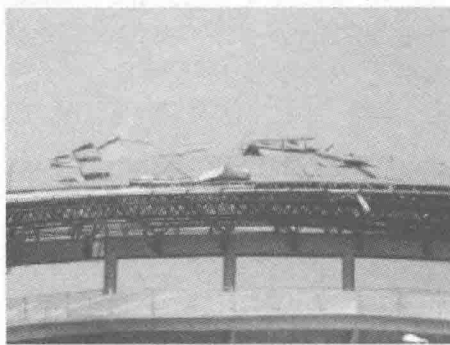


图 1.14 河南体育馆看台顶被风掀翻

这些风载事故表明,对于空间大而低矮的建筑物,其屋盖结构相比于主体结构更容易发生风致破坏。这类作为城市人文景观和标志性建筑的公共建筑,是社会经济文化的载体,也是社会文明的象征,其风毁破坏不仅造成了建筑本身的破坏和巨大的财产损失,而且会造成不良的社会影响。

1.2.1.2 风毁事故原因浅析

工程中大量风毁事故从侧面反映了抗风设计的重要性,结合风毁事故及理论分析,在风荷载作用下,导致大跨度空间结构破坏的原因众多,但总的来说主要有以下三点:

(1) 流动分离。

风荷载作用下,屋面常承受很大的负压。特别是在屋檐、屋脊、屋面边缘和转角等几何外形突变的部位,常产生流动的分离和再附着。因此,屋盖几何外形的突变而引起的流动分离是导致屋盖破坏的最普遍原因。

(2) 内外压力共同作用。

屋面的风压计算应同时考虑上、下表面风压值。一般来说,大跨度空间结构上表面常受负压,而下表面受正风压,净风载应大于上表面风压的计算荷载。尤其是内外压力共同作用在悬臂屋檐时风荷载受力特性最为明显,屋檐上表面因流动分离而产生负压,下表面由于风被墙体阻挡在屋檐下产生正压,净风压为两者绝对值之和,因此屋檐较易受风破坏。

(3) 屋面结构在风荷载作用下的动力效应。

现代大跨度屋面结构均具有质量轻、柔性大、阻尼小等特点,屋面结构自振周期与风速的长卓越周期较为接近,因此风荷载成为控制屋面设计的主要荷载。屋面结构在风荷载作用下的动态响应是一个十分复杂的问题。屋面相对于建筑物主体而言柔度较大,易产生弹性风致振动。由于屋面的柔性可降低其 Helmholtz 频率,同时引起较小的附加阻尼,这样内压紊流易产生 Helmholtz 共振,而附加阻尼不足以显著降低振动响应。在台风多发地区,屋面结构常发生共振破坏。

由上可见,风荷载是大跨屋盖结构的一种主要侧向荷载,过强的风速和风载(如台风、龙卷风等)都会造成大跨度屋盖的外表、局部或整体屋盖结构的损伤甚至破坏。因此,风对大跨度屋盖结构的威胁越来越大,其威力已经逐渐从“要考虑”变为了“必须考虑”,风荷载也成为大跨度屋盖结构设计的控制荷载之一。如何准确预测大跨度屋盖结构的风荷载对建筑设计、结构计算以及人民生命财产安全的影响显得至关重要,大跨度屋盖结构局部和整体风荷载的研究日益迫切,越来越多的工程技术人员和研究者都已参与到这项工作中来。

1.2.2 大跨度屋盖结构抗风基础理论建立

大跨度屋盖结构在风激作用下的反应分析是全面地了解这类结构的工作性能,进一步提高设计水平的重要基础性工作,过去这方面的研究较少,尤其是关于大跨度柔性屋盖在风作用下的气弹性能的研究就更少。

大跨度屋盖结构风致效应属于流体与固体相互作用的范畴。因此,风效应研究自然包括3个要素:风环境、风荷载与结构响应。

风环境包括从气象学、微气象学和气候学中导出的一些基本内容。气象学提供对大气流动基本特征的描述与解释,那些对结构的响应影响很大的特征自然是设计者应当了解的。但微气象学与空间结构风工程关系更大一些,如平均风速随高度而增加的关系、脉动风的湍流强度与积分尺度和地面粗糙度的关系等,都是必不可少的风环境资料。气候学是指结构物特定选址处的风况预测,如50年一遇的极值风速和风向的预测、选址处风速风向玫瑰图等。

风荷载就是风对结构的作用力,这种作用力实质上是风与结构相互作用的结果。随机

变化的风流过本身也在振动的空间结构物时,使得围绕结构物表面的大气压力形成一种特定的分布状态,并且在不断的变化之中。为了研究方便,现将随机变化的风分为平均风(不随时间变化的定常流)和脉动风(非定常流,又称湍流)两部分。根据空间结构的特点,将风荷载与风致响应的分类列表,见表 1.1。

表 1.1 风荷载与风致响应的分类

自然风的分量	风荷载类型	结构响应类型与特征
平均风(定常流)	平均风力	静变形与静力失稳
	涡激力	涡振(介于强迫振动与自激振动之间)
	自激力	驰振、颤振(自激振动)
脉动风(非定常流)	脉动风力	强迫振动

由表 1.1 可以看出,涡振、驰振以及脉动风下的强迫振动是大跨度空间结构风致振动的主要形态。

涡振是由于气流经过结构后产生漩涡并脱落引起的,介于强迫振动与自激振动之间。当风速位于某一区段,横风向旋涡脱落频率与结构频率一致时将产生共振。涡振是在低风速下容易出现的一种风致振动现象,涡振带有自激性质,但振动的结构反过来会对涡脱形成某种反馈作用,使得涡振振幅受到限制。尽管涡振不像驰振一样是发散的毁灭性的振动,但由于是低风速下常易发生的振动,且振幅之大足以影响使用和施工的安全,因此在抗风设计时应引起足够的重视。涡振至今尚未有可接受的数学分析方法,主要是靠风洞试验或者是数值风洞的结果来判定。

驰振是一种气动力不稳定现象,一切气动不稳定现象都必含有因物体运动而作用在物体上的气动力,这种气动力就是自激力。当风力方向与结构主轴方向不一致时,可有一微小夹角。当基本风速达到某一临界值时,结构的总阻尼为负值,此时振动将逐渐无限增大,便可产生横风向失稳式振动,在工程上必须加以防止。大跨度柔性屋盖结构薄且覆盖面积大,因此竖向刚度相应很小,竖向风荷载对结构的动力响应可能影响较大。驰振可归结为求解动力学失稳临界状态的问题,一般应用复数特征值求解方法。

脉动风下的强迫振动是一种随机振动,因此需要采用随机振动的分析方法,求得表征随机响应的特征量。研究脉动风作用下的结构响应,在理论上已发展了一些在频域和时域内的求解方法。目前工程上经常采用并已被写入有关规范的方法,是以振型分解法为基础的频域分析方法。该方法的特点是概念清晰,但是这种方法是线性化假定为前提的,因此仅可作为一种近似方法应用于一些以钢结构为主要受力构件的屋盖结构。时程分析法根据风荷载的统计特性进行计算机模拟,人工生成具有特定频谱密度和空间相关性的风速时程曲线,该方法能很好地考虑结构的非线性;当用于索膜体系的屋盖结构时,有一些学者采取了一些改进措施,在运动方程中考虑结构的运动对风压的修正,尽管这些改进方法考虑了一些结构与风之间的相互作用,但仍不能很好地模拟大跨度柔性屋盖结构与风的耦合作用。因此,传统的以实测风速时程或模拟风速时程作为外加时变动荷载为基础的时域分析方法已很难有效考虑风与结构的流固耦合作用。

张拉索膜形式的大跨度柔性空间结构在风荷载的作用下通常会产生较大的变形和振

动,这种大幅度的变形又会影响其表面风压分布,产生“流固耦合”效应。因此,考虑风与结构相互作用的流固耦合分析方法是求解大跨度柔性屋盖风振响应的最好方法。大跨度柔性空间结构在风荷载作用下的耦合振动问题,在理论上可描述为不可压缩黏性流体和几何非线性弹性体之间的非定常耦联振动问题。对这一问题的求解包括流体域、结构域和网格域3个计算模块:①流体域主要是模拟近地面大气边界层风场,属于钝体空间动力学范畴;②结构域主要是模拟柔性大空间结构的风致动力效应,属于几何非线性弹性体的大位移、小应变受迫振动问题;③网格域主要是模拟以任意拉格朗日欧拉(Arbitrary Lagrange Euler, ALE)描述为基础的动态网络计算问题以及流体与结构网络之间的数据传递问题。

1.2.3 我国大跨度屋盖结构抗风理论研究

对于空间结构在顺风向下的响应,无论是采用时域法、频域法还是随机离散分析法,国内许多学者都进行了大量的理论和实际工程的分析工作。哈尔滨工业大学的学者把随机振动离散分析方法应用于悬索结构体系的风振响应分析,并在大量数据的基础上统计风振响应与荷载之间的关系,从而拟合了悬索结构体系响应的风振系数。在频域内,很多学者都采用以振型分解法为基础的频域分析方法——补偿模态法,即根据不同模态对整个结构在脉动风作用下应变能的贡献多少来定义模态对结构风振响应的贡献,并对截断模态补偿后再进行风振响应分析;当结构的非线性程度较高时,大多采用时域分析方法来解决。

空间结构往往由钢结构构件与索、膜等结构构件组合形成,国外的很多资料都表明,大跨屋盖结构在风力作用下会导致较明显的气弹反应和气动力不稳定现象,因此研究这类结构在风荷载作用下的响应及空气动力稳定性十分重要,但国内对于大跨空间结构横向的涡振、空气动力失稳方面的风振机理的理论和实际分析工作仍然很少。

另外,对于大型柔性空间结构,需要考虑流固耦合的影响来研究其在风作用下的响应及气弹性能,这方面的研究还处于起步阶段。目前,国内研究大跨度柔性空间结构与风环境流固耦合作用的方法可分为三类:第一类为采用时变的风荷载,通过风与结构的相对速度不断修正风荷载,并在时域内求解结构动力方程,求解过程中以此来考虑膜结构与风环境的“耦合作用”;第二类为在结构运动方程中,通过引入耦合参数(附加质量、气动阻尼、气动刚度等)修正运动方程,来考虑膜结构与风环境的耦合作用,耦合参数一般由经验解析公式或风洞实验确定;第三类为基于计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)和计算固体动力学(Computational Solid Dynamics, CSD)建立一种数值风洞模型,通过中间数据交换平台传递CFD和CSD耦合数据,间接地实现了膜结构与风环境的数值耦合作用。随着CFD理论及计算机的发展,该方法无疑具有良好的研究前景。目前,这种方法正在为众多研究人员所认识,成为一种前沿的研究领域。运用CFD数值模拟方法,为研究大型空间结构屋盖表面的静态风压分布规律提供了一种较为简单、快捷的途径,而且可以基本满足工程进度的要求,但是对于像大跨度空间结构这种复杂结构,目前的湍流模拟技术尚不成熟,计算结果的精确性仅限于一些平均物理量的模拟上,对于流动中高频脉动成分的模拟结果在工程应用上多采取谨慎的态度,与实验结果尚有出入。因此,对于前景十分看好的CFD数值模拟技术,要成熟、有效地应用于大跨

空间结构的流固耦合风工程研究，还有很艰巨的路要走。

风洞试验是空气动力学研究的一个十分重要且不可替代的手段，进行空间结构风工程研究所要求的风洞试验是边界层风洞。如今刚性模型的风洞试验理论和技术手段都很成熟，且已有很多实际工程进行了类似的试验，主要是为了确定空间结构屋盖的体型系数分布；但是弹性模型的风洞试验，由于要求满足各种相似比的要求，而这些要求很难或无法同时满足，只有依据试验目的适当放松某些相似比的要求，因此对模型的设计者提出了很高的要求，只有精心设计的模型，才能测出结构准确的风致现象和各种响应。因此，现阶段大跨度空间结构弹性模型的风洞试验还处于起步阶段，这势必也是今后要进一步发展的领域。另外，由于风洞试验存在着弹性模型试验和风场模拟方面的局限和误差，因此实测的结果比风洞试验的结果更可靠，但在国内，对结构进行风振实测的案例是凤毛麟角，这也是国内风工程需要发展的一个重点方向。

综上所述，近年来我国在空间结构风工程方面所积累的理论及试验研究成果，可以说是相当丰富的，取得了较为丰硕的成果；空间结构所采用的结构形式丰富多彩，所进行的理论研究也是多方位的。目前关于这些基本理论问题的研究仍在继续，这将为今后空间结构的进一步发展奠定坚实的基础。

1.3 大跨度屋盖结构抗风研究方法

大跨度屋盖结构的表面流场最大的特点在于气流的分离和再附着作用显著，因此屋盖不同位置的风压呈现出极大的不均匀性。目前研究大跨度屋盖结构表面风压的手段主要有理论分析方法、风洞试验方法、现场实测方法和数值模拟方法。这4种方法之间相互关联，其关系如图1.15所示。

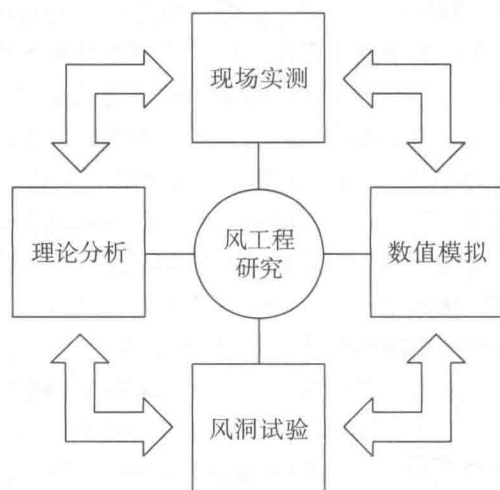


图 1.15 风工程研究方法相互关联图

1.3.1 理论分析方法

理论分析方法主要应用于结构风工程领域的一些基础理论研究,如圆柱体的涡激振动等。对于具有复杂几何形状和复杂流动现象的问题,在数学上进行解析分析还比较困难。一般是先通过理论分析给出关于某种现象的解析表达式(即理论模型),然后借助风洞试验确定解析表达式中的待定参数。尽管理论分析方法的适用范围有限,但是对于揭示某些流动机理、构建结构抗风设计理论体系是十分重要的。结构的抗风分析方法一般可分为频域范围和时域范围两个方面。

1.3.1.1 频域分析法

由通用风速谱,或由风洞试验测得的风压时程通过傅立叶变化直接转化为风压谱,通过频域传递函数得到动力反应谱,由随机理论通过反应谱积分得到结构的动力响应。传递函数反映了系统输入与输出量之间的一般关系。频域分析法主要包括振型分解法、响应谱法、特征值法、随机振动离散分析法和虚拟激励法等。

1.3.1.2 时域分析法

线性系统的动力响应在频域内表现为系统能量在各频段内的分布,在时域内则表现为振幅反应时程随时间的变化。频域分析的基本思路是将频域离散化,针对每个小频段内的动力问题运用频域传递函数求解,然后迭加得到总体反应。时域分析方法的基本思路是将时间过程离散化,在每个小时段内把动力问题化为拟静力问题求解,然后迭加得到总体反应。

时域分析法直接运用风洞试验的风压时程或计算机模拟的风压时程作用于屋面结构进行风振响应时程分析,然后通过动力计算得到结构的动力响应,统计结构动力响应,从而计算出结构的风振系数。主要分析方法有线性加速度法、Newmark- β 法和Wilson- θ 法。采用时域分析法,可以考虑自然风的时间相关性和结构非线性影响,更精确地反映结构的耦合风振情况。

为了得到风速时程,可采用人工模拟生成的方法。目前,人工模拟风速曲线的方法主要有谐波叠加法、线性滤波法和小波分析法等。谐波叠加法基于三角级数求和,也称为频谱表示法,如Constant Amplitude Wave Superposition (CAWS)法、Weighted Amplitude Wave Superposition (WAWS)法等。线性滤波法基于线性滤波技术,也称为时间系列法,如状态空间法、自回归(Auto Regressive, AR)法、滑动平均(Moving Average, MA)法、自回归滑动平均(Auto Regressive Moving Average, ARMA)法等。小波分析法是Fourier分析思想的发展与延拓,能够快速、准确地提取样本的局部谱密度特征。作为处理平稳或非平稳随机信号时频特性的有效工具,小波变换已应用于风振分析,模拟非平稳随机风荷载、处理局部效应。

1.3.2 风洞试验方法

风洞试验是开展风振研究与抗风设计的重要基础。风洞试验的理论基础是相似准则。在模型与实物几何外形相似的基础上,若风洞模拟试验的对数衰减数、弹性数、密度比数、重力数、Reynold 数与实际情形相同,则满足一定的长度缩尺比、速度缩尺比、密度缩尺比条件下的试验模型的响应与实际结构的响应相同或成比例。在常规试验条件下,一般采用如图 1.16 所示的尖塔和粗糙元来模拟自然界的风场,当不能完全复现真实条件下气流的运动状况时,可根据不同的试验目的,对上述参数近似、取舍,采用气动弹性模型或刚性模型。前者直接测量动态风荷载和结构响应;后者借助高频动态天平测量风荷载,再根据结构固有特性,计算结构动态响应。



图 1.16 尖塔和粗糙元模拟的风场环境

大跨度屋盖结构风洞试验主要采用刚性模型和气动弹性模型。刚性模型一般只须满足与原结构外型尺寸和雷诺数相似,通过测量仪器获得建筑物表面各测点的表面风压随时间变化的情况,再通过表面积分确定作用在屋盖上的风荷载。刚性模型试验不能获得风荷载作用下的结构响应。这种方法假设各测点从属面积内的风压应完全相关,合理选择测点数目和位置是影响试验结果的关键因素。气动弹性模型在满足刚性模型中各参数相似的基础上,还须满足动力学各参数的相似结构的质量、刚度、阻尼等。气动弹性模型试验能直接测量结构在风荷载作用下的位移响应与加速度响应。对于大跨度屋盖结构,按照其刚度的大小,大致可分为刚性屋盖、大变形柔性屋盖、非大变形柔性屋盖 3 种。对于刚性屋盖,惯性力可以忽略,风荷载可以由刚性模型试验来确定;对于大变形柔性屋盖,由于结构与来流的耦合作用,除了要进行刚性模型试验外,还要进行气弹模型试验来确定惯性力;对于非大变形柔性屋盖,忽略结构与来流的耦合作用,则风荷载可以由刚性模型试验得出,惯性力可根据刚性模型试验结果结合有关理论分析方法确定,也可根据气弹模型试验确