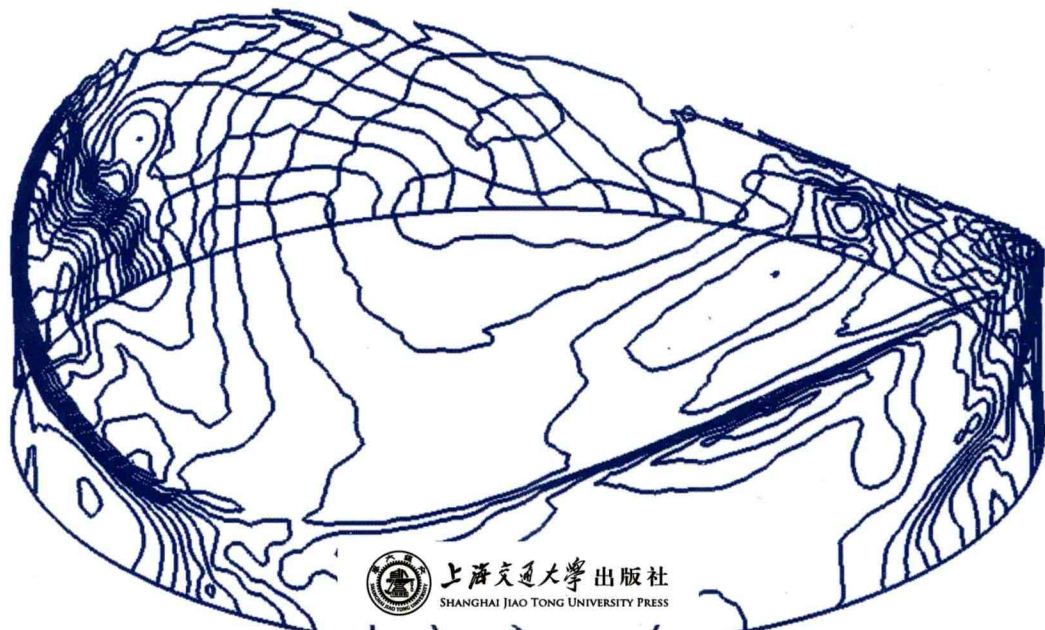




上海科技专著出版资金资助
上海交通大学学术出版基金资助

空间结构风工程

何艳丽 编著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

本书出版由上海科技专著出版资金资助
上海交通大学学术出版基金资助项目

空间结构风工程

何艳丽 编著

上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书深入浅出地阐述了空间结构风工程的基本理论、分析方法、试验技术以及风工程最新的进展和研究成果,主要内容包括:结构风的基本特征、风荷载的模拟方法、风振响应的分析方法、计算流体力学数值模拟方法以及风洞试验技术。

本书内容丰富、体系完整,注重理论与实际工程结合,既可作为结构工程相关专业的研究生教学用书,也可作为结构工程人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

空间结构风工程/何艳丽编著. —上海:上海交通大学出版社,2012

ISBN 978-7-313-08406-4

I. 空... II. 何... III. 空间结构—抗风结构
IV. TU352.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 080854 号

空间结构风工程

何艳丽 编著

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 951 号 邮政编码 200030)

电话:64071208 出版人:韩建民

浙江云广印业有限公司印刷 全国新华书店经销

开本:787mm×960mm 1/16 印张:16 字数:297千字

2012年9月第1版 2012年9月第1次印刷

ISBN 978-7-313-08406-4/TU 定价:50.00元

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系
联系电话:0573-86577317

出版说明

科学技术是第一生产力。21 世纪，科学技术和生产力必将发生新的革命性突破。

为贯彻落实“科教兴国”和“科教兴市”战略，上海市科学技术委员会和上海市新闻出版局于 2000 年设立“上海科技专著出版资金”，资助优秀科技著作在上海出版。

本书出版受“上海科技专著出版资金”资助。

上海科技专著出版资金管理委员会

前 言

大跨度空间结构的发展状况是衡量一个国家建筑科学技术水平发展的重要标志之一,而对于轻柔的空间结构,风荷载是重要的甚至是决定性的设计荷载,因此,空间结构风工程的发展,是推动空间结构向更超大轻柔方向发展的动力之一。

作者一直以来都致力于空间结构风工程的教学、理论研究和实际应用工作,在工程应用与指导研究生学习的过程中感觉到,虽然新型空间结构风工程的理论体系已基本建立,但空间结构风工程的基本理论与研究方法仍零星散布于一些文献中,缺乏一本系统介绍它们的书籍。本书的编著中系统地考虑了空间结构的特性,可作为在读的研究生学习教材或参考书,同时也可作为结构工程师提供空间结构抗风设计方面的指导。

本书在内容编排上,注重讲述较为成熟的国内外最新研究成果,同时也介绍了作者研究团队及其研究生们的研究成果(第5章中引用了研究生李燕、张丽梅和任涛的学位论文的部分内容)。同时,本书在各有关章节列入了大量计算例题,包括对一些大型工程实例的分析,以帮助读者更好地理解方法的应用。

全书共分8章和两个附录,第1章绪论深入浅出地介绍了空间结构风工程的基本内容;然后依次介绍了结构风工程必要的基础知识、结构风的基本特性、风荷载的模拟方法、空间结构顺风向响应的分析方法、空间结构横风向涡激振动与驰振、复杂空间结构的计算流体力学分析方法,以及空间结构的风洞试验技术。附录A列出了全国基本风压标准值表、附录B列出了常见形体结构的体型系数,这样读者拿到这本书,就可以很方便地进行各项实际工程的风工程研究和抗风设计工作。

收入本书的部分研究成果是在作者承担的中国博士后基金和国家自然科学基金项目(项目号:50808122)下完成的,感谢这些基金的资助。书中引用了大量国内外公开发表的文献资料,在引用这些资料时均有注明,并谨在此表示感谢。

由于作者才疏学浅,疏漏之处恳请读者提出宝贵意见,批评指正。

何艳丽

2012年9月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 空间结构风毁的案例	1
1.2 风振理论研究	3
1.3 我国的空间结构风工程研究	7
第 2 章 结构风工程基础知识	11
2.1 结构动力学基础知识	11
2.1.1 结构振动方程	11
2.1.2 结构动力特性	11
2.1.3 结构的强迫振动	12
2.2 随机振动基础知识	14
2.2.1 随机变量	14
2.2.2 随机变量的数值特性	17
2.2.3 随机过程	18
2.2.4 线性单自由度系统的随机响应	27
2.3 流体力学基本知识	28
2.3.1 常用的无量纲参数	28
2.3.2 理想流体与黏性流体	30
2.3.3 可压流体与不可压流体	30
2.3.4 定常与非定常流动	30
2.3.5 拉格朗日描述法与欧拉描述法	30
2.3.6 边界层	31
2.3.7 层流与湍流	32
2.3.8 流体力学基本方程	32
第 3 章 结构风的基本特性	35
3.1 自然风	35
3.1.1 概述	35

3.1.2 自然风强度分级	37
3.2 风轴坐标描述	39
3.3 基本风速	40
3.4 近地风特性	45
3.4.1 大气边界层气流	45
3.4.2 平均风特性	46
3.4.3 脉动风特性	49
3.5 风速与风压的关系	54
3.6 结构上的风荷载	55
3.6.1 结构上的平均风荷载	55
3.6.2 结构上的脉动风荷载	57
第4章 风荷载模拟	60
4.1 谐波合成法	60
4.2 线性滤波方法	62
4.3 算例分析	64
第5章 空间结构顺风向风振响应分析方法	70
5.1 概述	70
5.2 风振响应分析时域法	71
5.3 随机振动离散分析法	73
5.4 风振响应分析频域法	78
5.5 模态补偿的频域分析法	79
5.5.1 基本假定	80
5.5.2 模态对系统结构应变能的贡献及模态补偿	81
5.5.3 背景响应计算	83
5.6 空间结构顺风向风振系数	84
5.6.1 风振系数的定义	85
5.6.2 几种简单形态空间结构的风振系数	85
5.6.3 关于风振系数的几点说明	88
5.7 阵风系数	89
5.8 算例分析	91

第 6 章 空间结构横风向风振	112
6.1 涡激振动	112
6.1.1 涡振基本机理	112
6.1.2 涡激力模型	114
6.2 空间结构旋涡脱落共振响应分析计算	116
6.3 斯托罗哈数的选取	119
6.4 涡激振动时程分析算例介绍	121
6.5 横风向驰振	122
6.6 空间结构驰振失稳临界风速判别准则	124
6.7 临界风速判别式的验证	129
6.8 横风向效应与顺风向效应的组合	131
6.9 驰振临界风速算例分析	131
第 7 章 空间结构的计算流体力学分析方法	137
7.1 概述	137
7.2 CFD 的求解过程	139
7.3 流体控制方程(纳维-斯托克方程)及其数值模拟方法	140
7.4 雷诺平均纳维-斯托克方程及湍流物理模型	144
7.4.1 雷诺平均 N-S 方程	145
7.4.2 雷诺平均法的湍流模型	146
7.5 大涡模拟、分离涡模拟及其湍流模型	154
7.6 基于 SIMPLE 算法的流场数值计算	156
7.6.1 流场非线性方程计算的 SIMPLE 算法	157
7.6.2 离散方程组的基本解法	157
7.7 流固耦合	159
7.7.1 运动学和动力学条件	159
7.7.2 耦合系统中的有限元方程	160
7.7.3 迭代法求解双向耦合	160
7.7.4 直接法计算双向耦合	161
7.8 钝体绕流数值模拟的建议	162
7.9 算例分析	165

第 8 章 风洞试验技术	176
8.1 边界层风洞	176
8.1.1 边界层风洞的构造与特点	177
8.1.2 风洞试验的主要仪器设备	180
8.2 相似性理论	183
8.3 建筑模型风洞试验	188
8.3.1 大气边界层的模拟	188
8.3.2 建筑模型风洞试验的类型与用途	192
8.3.3 建筑模型表面压力测试	193
8.3.4 同步压力测试法	194
8.3.5 气动弹性模型风效应试验	195
8.4 大跨屋盖刚性模型风压实验实例介绍	195
8.5 空间结构气弹模型风洞试验实例介绍	201
附录 A 全国各城市的风压值	205
附录 B 风荷载体型系数	231

第 1 章 概 论

空间结构一直是倍受瞩目的一种结构形式,由于它能够充分利用不同材料的特性,以适应各种变化的建筑造型需要,具有结构受力合理,造型优美新颖,制作安装简便等特点,近年来得到了迅速的发展。其结构形式有网架结构、网壳结构、悬索结构、薄膜结构等各种形式,广泛应用于展览馆、体育场馆、车站、机场航站楼等建筑物。

大跨柔性屋盖结构大都重量轻、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,具有高度柔性和强非线性,风荷载往往是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,甚至导致主体结构破坏,而长时间持续的风致振动则可能使结构某些部分如节点、支座等产生疲劳与损伤。如我国 2003 年苏州体育场遭遇风灾,损坏严重,相当部分悬挑屋盖的维护结构被大风掀起;8807 号台风造成杭州机场候机楼、市体育馆屋顶严重损坏;9417 号台风在浙江温州登陆,造成温州机场严重受损。风与结构复杂的相互作用对大跨空间结构抗风设计、防灾减灾分析提出了挑战,因此,空间结构的风振研究日益受到重视。

1.1 空间结构风毁的案例

在风力作用下,对大跨空间结构损坏,特别是屋顶被风掀起的例子是屡见不鲜的。这种对风敏感的结构在国内外的资料中,即使跨度很小,仅几十米的屋盖也能受到破坏,我国沿海台风造成屋盖损坏的则更多。

(1) 2004 年,河南省体育中心体育场屋盖在 9 级风作用下,屋盖的覆面层和固定槽钢被风撕裂并吹落 100 平方米^[1],3 副 30 平方米的大型采光窗被整体吹落,雨篷吊顶被吹坏,破坏情况见图 1-1。

(2) 2005 年 9 月 28 日,海南三亚遭受台风“达维”重创,三亚美丽之冠顶冠被撕裂^[2],冠体其他部位膜结构完好(见图 1-2)。在此次台风中,在海滨、公园等旅游场所修建的用于遮阳的半开放式膜结构也有很多被撕破(见图 1-3)。

(3) 2007 年 1 月 5 日中午,位于温哥华市中心的卑诗省体育馆(BC Place Stadium)圆顶突然塌陷^[3]。卑诗省体育馆建于温哥华举办 1986 年世界博览会之时,是温哥华标志性建筑之一。体育馆圆顶材料是玻璃纤维,只有 1/30 英寸的厚



图 1-1 河南体育馆屋盖被风吹坏



图 1-2 三亚美丽之冠顶冠被撕坏



图 1-3 公园小品膜被撕毁

度,却比钢还要坚固。通常情况下,电力驱动的风扇会保持体育馆内的气压始终高于外界,而即使风扇停止,大门关闭,也要4~6个小时屋顶才会塌陷。卑诗省体育馆的倒塌与恶劣天气有关,一个月来,温哥华地区连遭大雨大风大雪袭击,但当时屋顶上积下的雪和雨水并不是很多,在该体育馆的天顶塌下时,有关的系统并未处于融雪的状态,天顶的排水也正常,所以不需要启动融雪系统。当时有一潭半融的雪和水在屋顶积聚,在强风的吹动下,其中一块三角形的天顶布幕突然出现裂痕,并且迅速被强风撕开一个大洞(见图1-4)。当局及时放下天顶,成功地将破洞处局限在其中一块布幕上,并没有造成结构性的损坏。

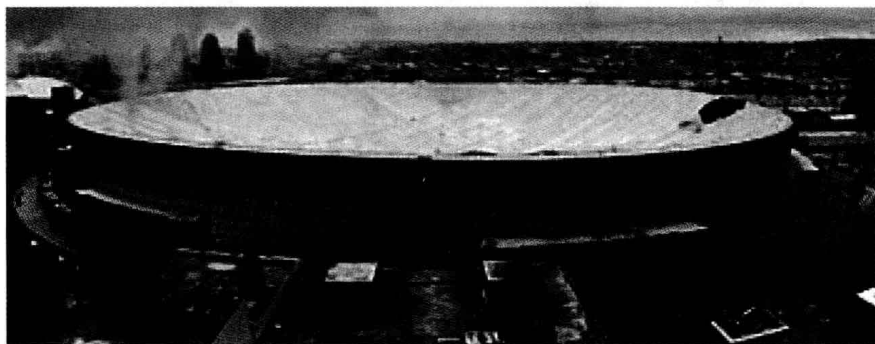


图1-4 加拿大温哥华卑诗省体育馆破坏图

(4) 甬台温高速公路枫桥收费站建于2002年,工程为双向8车道设计,钢结构为相贯桁架体系,用钢量42吨,膜展开面积约1300平方米。膜材设计使用法拉利1202T,实际工程用米乐FR-1000型,两种膜材受力指标接近。工程距离海边约20公里,并且经受住了过去三年台风的袭击,在2005年8月遭遇“麦莎”强台风时受到损坏(见图1-5)。

(5) 高速公路嘉兴收费站建于2002年,在2006年的一次局部大风(类似龙卷风)中膜片被撕裂一道缝(见图1-6)。然后在大风中破坏范围逐渐加大,导致整个结构的损坏(见图1-7)。

1.2 风振理论研究

空间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更少。近年来国内外一些研究者开创了较系统的关于风振反应的研究,取得了可喜的成果。



图 1-5 高速公路枫桥收费站破坏图

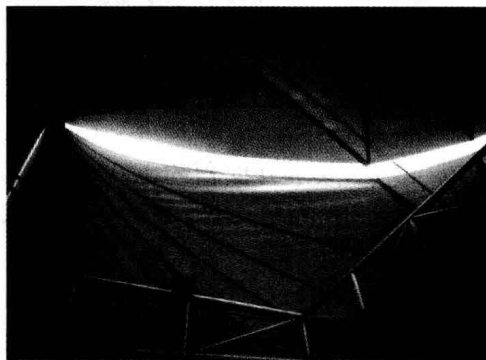


图 1-6 高速公路嘉兴收费站局部破坏图

空间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三个要素:风环境、风荷载与结构响应。

风环境包括从气象学、微气象学与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,例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以及与地面粗糙度的关系等,都是必不可少的风环境资料。气候学指结构物特定选址处的风况预测,如五十年一

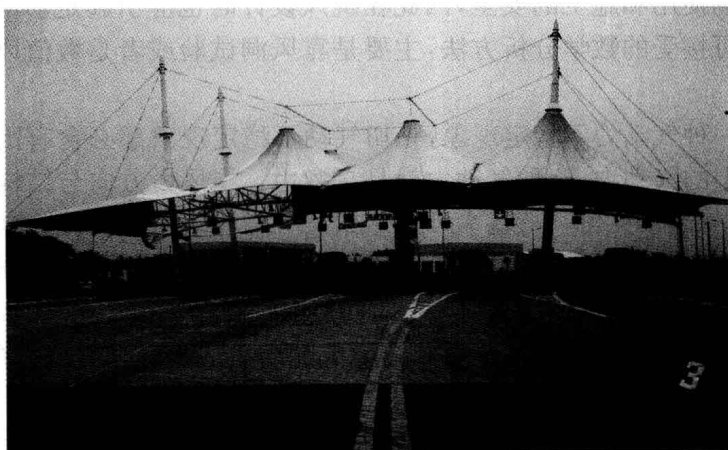


图 1-7 高速公路嘉兴收费站破坏图

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。为了研究的方便,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,如表 1-1 所示。

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)
脉动分量(非定常流)	脉动风力	强迫限幅振动

从表 1-1 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旋涡并脱落引起的,介于强迫振动与自激振动之间。当风速位于某一区段时,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,因此在抗风设计时也应引起足够的重视。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^[4-5]。

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。大跨柔性屋盖结构面薄且覆盖面积大,因而竖向刚度相应很小,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^[6-7]。

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,因而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,有一些学者又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,尽管这些改进方法能考虑一些结构与风之间的相互作用,但仍不能很好地模拟大跨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柔性空间结构在风荷载的作用下通常会生成较大的变形和振动,这种大幅的变形和振动反过来也会影响到其表面风压分布,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的方法^[8]。大跨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与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、结构域和网格域三个计算模块:①流体域主要是模拟近地面大气边界层风场,属于钝体空气动力学范畴;②结构域主要是模拟柔性大跨空间结构的风致动力响应,属于几何非线性弹性体的大位移、小应变受迫振动问题;③网格域主要是以任意拉格朗日欧拉(Arbitrary Lagrange Euler, ALE)描述为基础的动态网格计算问题以及流体与结构网格之间的数据传递问题^[9-12]。

1.3 我国的空间结构风工程研究

对于空间结构在顺风向下的响应,无论是在时域法、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^[13-15],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法对大跨空间结构进行了风振响应分析^[16-21],并提出了空间结构风振响应分析方法——补偿模态法^[22-23],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^[24-25]。

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,因而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风向的涡振、空气动力失稳方面的风振机理、理论和实际分析工作仍然很少^[26-27]。

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^[28]。这一方面的研究,也还是属于起步阶段。目前,国内研究大跨柔性空间结构与风环境流固耦合作用的方法可分为三类。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”^[29-30];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、气承刚度等)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^[31];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 与 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^[32-35],成为一种前沿的研究领域。目前,应用 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精度要求^[36-38],但是对于像大跨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^[39-43];但是弹性模型的风洞试验^[44-45],由于要求满足各种相似比的要求,而这些要求很多是难以或无法同时满足的,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要方向。

如上所述,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,相应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方兴未艾,这将为今后空间结构的进一步发展奠定坚实的基础。

参考文献

- [1] <http://210.51.25.156/forum/viewthread.php?tid=62317>.
- [2] <http://news.sohu.com/20051011/n227170193.shtml>.
- [3] <http://news.sohu.com/20070106/n247453004.shtml>.
- [4] Goswami I, Scanlan R H, Jones N P. Vortex-induced vibration of circular cylinders[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1993,119(11):2271-2287.
- [5] Larsen A. A generalized model for assessment of vortex-induced vibrations of flexible structures[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1995, 57: 281-294.
- [6] Scanlan R H. The action of flexible bridges under wind, I: flutter theory[J]. *J. Sound and Vibration*, 1978,60(2):187~199.
- [7] Nakamura Y. Recent research into bluff-body flutter[J]. *J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn.*, 1990,33:1-9.
- [8] 钱若军,董石麟,袁行飞. 流固耦合理论和应用述评[C]. 第十二届空间结构学术会议论文集,北京,2008:399-403.
- [9] Bathe K J, Zhang H, Ji S. Finite element analysis of fluid flows fully coupled with