

大跨屋盖结构

实用抗风设计

李方慧 著



黑龙江大学出版社
HEILONGJIANG UNIVERSITY PRESS

大跨屋盖结构

实用抗风设计

李方慧 著

图书在版编目(CIP)数据

大跨屋盖结构实用抗风设计/李方慧著. —哈尔滨:黑龙江大学出版社, 2008. 8

(黑龙江大学学术文库)

ISBN 978 - 7 - 81129 - 085 - 1

I. 大… II. 李… III. 屋顶 - 大跨屋结构 - 抗风结构 - 结构设计 IV. TU231 TU352.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 121537 号

责任编辑 陈雪峰

封面设计 集云观止

大跨屋盖结构实用抗风设计

DAKUAWUCAI JIEGOU SHIYONG KANGFENG SHEJI

李方慧 著

出版发行 黑龙江大学出版社

地 址 哈尔滨市南岗区学府路 74 号 邮编 150080

电 话 0451 - 86608666

经 销 新华书店

印 刷 黑龙江省委党校印刷厂

版 次 2008 年 8 月 第 1 版

印 次 2008 年 8 月 第 1 次印刷

开 本 880 × 1230 毫米 1/32

印 张 6.375

字 数 176 千字

书 号 ISBN 978 - 7 - 81129 - 085 - 1/T · 7

定 价 25.00 元

凡购买黑龙江大学出版社图书,如有质量问题请与本社发行部联系调换
版权所有 侵权必究

前 言

大跨屋盖结构的发展状况代表了一个国家建筑技术水平,在体育馆、会展中心、工业厂房、飞机库等建筑上得到了广泛应用。近年来,其形式日趋多样、新型结构体系不断涌现,跨度的不断增加及新材料的使用导致屋盖结构对风荷载非常敏感,常常为设计的控制荷载。相比高层结构而言,大跨屋盖结构实用抗风设计理论及方法仍处于探讨阶段,因此有必要利用现有的手段全面地对大跨屋盖结构的风荷载、风致响应及用于工程设计的等效静风荷载进行细致研究。

基于这一宗旨,作者以几个典型大跨屋盖为例对上述几方面进行分析,为土木专业的相关人士提供参考。

从抗风实用设计方法出发系统介绍了国内外风工程研究的现状,使读者对大跨度屋盖结构抗风设计研究的重要性及复杂性有全面了解,并提出了风致响应高效计算方法及等效静风荷载确定方法,为工程设计人员提供了解决随机动力风荷载确定的有效手段。在力求保持基本理论的清晰和完整前提下,尽量避免冗长理论推导。在叙述内容上力求做到深入浅出,着重基本概念的阐述,并使得必要的理论公式推导浅显易懂。在涉及复杂计算理论分析时,配以相应的算例,使得读者对计算过程和方法能够直观的掌握。

全书共分5章。第1章为总论,介绍了研究背景及风荷载、

风致响应、等效静风荷载的发展概况。第2章包括本征正交分解法基本原理及在结构风工程中应用,该方法是确定随机风压场的统计分析方法。第3章阐述风洞中大气边界层风场的模拟方法及双坡、球壳及杆壳等典型屋盖的风洞试验概况,对不同地貌类型下同一屋盖上的风压系数和体型系数对比研究,利用本征正交分解法对双坡屋盖风压场重建和预测分析。第4章提出脉动风致响应分析过程中响应谱的快速算法,并给出了两种风致响应的高效计算方法—模态加速度法和块里兹向量法,保证计算精度前提下大大提高了计算效率,并通过算例验证两方法的有效性。第5章为等效静风荷载的理论及计算方法,为工程设计人员提供了确定随机风荷载的有效方法。

本书在编写过程中对国内外的研究成果进行了归纳和吸收,从研究和应用的角度对大跨屋盖结构的风工程相关问题进行阐述。

本书论述难免有疏漏之处,恳请读者批评指正。

李方慧
2008年8月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究现状	4
1.2.1 风荷载特性的研究	4
1.2.2 风致响应的计算	5
1.2.3 风荷载的确定及等效静风荷载的研究	6
1.3 研究内容	7
第 2 章 本征正交分解法	10
2.1 引言	10
2.2 本征正交分解法(POD)的基本原理	10
2.2.1 POD 方法的概述	10
2.2.2 POD 基本原理	13
2.2.3 POD 参数的性质	23
2.2.4 两种 POD 应用的推导	24
2.3 POD 法的几方面应用	26
2.3.1 风压场的重建和预测	26
2.3.2 风致响应分析中的应用	27
2.3.3 等效静风荷载确定中的应用	27
2.4 本章小结	27
第 3 章 屋盖风压特性分析及风压场重建与预测	29

3.1	引言	29
3.2	风洞试验设备及流场模拟	30
3.2.1	风洞测量设备	30
3.2.2	风洞流场模拟的有关指标	32
3.2.3	国内外一些风洞流场的模拟概况	35
3.2.4	本书试验风洞流场模拟	40
3.3	屋盖的风洞试验概况	46
3.4	试验有关参数的确定及脉动信号的修正	49
3.4.1	试验风速及采样频率	49
3.4.2	采样时间的选择	50
3.4.3	脉动信号畸变的修正	50
3.5	风压系数和体型系数的确定	52
3.5.1	风压系数的定义	53
3.5.2	风压系数和体型系数的换算	53
3.6	不同地貌下的风压特性分析	56
3.6.1	双坡屋盖	56
3.6.2	0.1 和 0.2 矢跨比球壳屋盖	61
3.6.3	柱壳屋盖	63
3.7	不同地貌下体型系数分析	67
3.7.1	双坡屋盖	67
3.7.2	0.1 和 0.2 矢跨比球壳屋盖	72
3.7.3	柱壳屋盖	75
3.8	风向角的影响	79
3.8.1	双坡屋盖	79
3.8.2	柱壳屋盖	82
3.9	双坡屋盖的风压场重建与预测	84

3.9.1	本征值分析	85
3.9.2	重建分析	88
3.9.3	预测分析	93
3.10	本章小结	103
第4章	大跨屋盖风致响应计算方法研究	105
4.1	引言	105
4.2	传统模态叠加法响应功率谱的两快速算法	106
4.2.1	CQC 快速算法矩阵形式的推导	106
4.2.2	POD 技术的谱分析	108
4.3	脉动风致位移均方根响应	110
4.4	模态耦合项分析(SRSS 和 CQC 的对比分析)	111
4.4.1	SRSS 法位移响应谱及均方根响应计算	111
4.4.2	CQC 法的位移响应谱及均方根响应	112
4.5	传统模态叠加法算例分析	113
4.5.1	0.1 矢跨比单层球面网壳分析	113
4.5.2	0.2 矢跨比单层球面网壳分析	118
4.5.3	模态耦合项的影响	121
4.6	块里兹向量法基本原理	122
4.6.1	研究背景	122
4.6.2	块里兹向量法在风致响应分析中的应用	124
4.7	块里兹向量的生成	125
4.7.1	矩阵形式推导	125
4.7.2	考虑荷载模式频率的块里兹向量推导	127
4.7.3	里兹向量终止程序	128
4.8	块里兹向量法算例分析	129
4.8.1	POD 技术提取荷载空间分布模式	129

4.8.2	参与因子的计算	130
4.8.3	模态叠加法计算结果对比	131
4.9	模态加速度法的基本原理及应用	133
4.10	模态加速度法算例分析	137
4.10.1	0.1 矢跨比单层球面网壳	137
4.10.2	0.2 矢跨比单层球面网壳	139
4.11	本章小结	140
第 5 章	大跨屋盖结构的等效静风荷载研究	141
5.1	引言	141
5.2	模态惯性力组合法	145
5.2.1	矩阵形式推导	145
5.2.2	耦合项分析	147
5.3	背景、共振等效静风荷载的组合法	152
5.3.1	背景响应及背景等效静风荷载	152
5.3.2	共振等效静风荷载	155
5.3.3	背景和共振等效静风荷载的组合	155
5.4	等效原则的确定	156
5.5	柱壳算例	157
5.5.1	风致响应计算结果	159
5.5.2	模态惯性力组合法	160
5.5.3	不同等效原则确定等效静风荷载	166
5.5.4	背景和共振等效静风荷载组合法	167
5.6	本章小结	169
结 论		171
参考文献		174

第1章 绪论

1.1 研究背景

屋盖结构空间体型复杂多样,随着跨度的增大以及轻质屋面的使用,导致对风荷载较为敏感。从国内外的风灾害调查表明屋盖的破坏很严重如图 1-1 所示,造成了巨大的经济损失^[1],因此对屋盖结构的风荷载及动力响应的研究是很有意义的。相对高层建筑,屋盖结构的风荷载确定、风压特性及风致响应分析体现出复杂且较难统一的特性,很多问题仍在探讨阶段。因此需要利用风洞试验同步测量的风压数据对屋盖的风荷载特性进行研究并探询屋盖结构适用的响应计算高效方法,最后给出方便工程设计应用的等效静风荷载。

屋盖周围流动分离及再附等复杂的湍流变化导致了随机风压场研究的困难。影响屋盖表面的风压场主要有两大类因素:一类是屋盖自身的几何参数如空间形状、围墙高度、平面尺寸、屋盖高度等;另一类就是外部因素如来流风向、地貌类型、周围环境干扰等。通常简单体型屋盖的风荷载可根据我国荷载规范的有关条款估算,而对于周围环境及体型复杂的屋盖结构风压场则要利用风洞试验来分析,即使对于简单体型的屋盖,要详细的分析风压特性也同样需要利用风洞试验。时空变化的随机风压场使得人们对其理解与认识存在一定困难,仅对平均风压



图 1-1 屋盖风荷载破坏图

Fig. 1-1 Damage of roof by wind loads

场的研究是不能很好的了解风压分布特性的,而每个测点处的脉动风压特性不仅与测点的空间位置有关而且与时间有关。因此,对于屋盖表面的风压场简化描述,提取本质特征是非常重要的。本征正交分解法(Proper Orthogonal Decomposition—POD)是描述随机场的有效工具,将随机风压场描述为与时间相关的主坐标和与空间位置相关的本征模态的级数组合形式。POD使用少量的本征模态和主坐标就可以很好的重现风压场的本质特征。POD技术对风压场重建分析简化了对风压场的描述,为后期风致响应计算及等效静风荷载确定等提供了简化手段。

因受到试验设备的限制(主要是电子扫描阀压力模块数和同步采集通道数的限制),风洞试验屋盖模型测压点布置不可能很密集,屋盖上的测压点数远小于结构有限元分析结点数,面临如何利用采集的离散测压点上的风压数据预测出结点处的脉

动风压时间序列,实现对结构风致响应的有限元分析。通常直接对风压时程插值的方法由于大量的风压样本点导致计算较为繁琐。POD 技术不仅可对平均风压场预测,也能对脉动风压时程预测。利用对与空间位置相关的本征模态进行插值并结合与时间相关的主坐标就可以预测出未布测点处的风压时程,计算过程选用的本征模态数量较少。大多数屋盖结构的自振及风致响应特性与高层建筑有较大的区别。屋盖结构的自振频率分布密集,风致响应计算表现出多模态的共同参与及模态耦合作用不能忽略。因此,在屋盖结构风致响应计算不宜采用平方-总和-开方法(Square Root Sum of Square—SRSS),而应采用考虑模态耦合项效应的完全二次型组合法(Complete Quadratic Combination—CQC)。响应计算由于选用的模态数较多导致计算位移响应谱时效率低,因此需要采用 CQC 快速算法。此外可研究屋盖结构的风致响应计算的非传统方法来提高计算效率。传统的模态叠加法的不足是无法保证参与叠加计算的每一模态都对响应有贡献,换言之,无法保证对响应有较大贡献都能够参与叠加计算中,需要考虑高阶模态贡献的补偿途径以及非传统计算方法。

脉动风荷载对结构的动力响应的计算应采用随机振动理论分析,可是在屋盖结构的工程设计中进行动力分析是不太现实的,计算繁琐而耗时。通常结构上动力风荷载等效处理为静风荷载作用,设计人员可方便的进行荷载组合。对于规则体型的屋盖结构可以利用荷载规范的有关条款和图表计算结构的风荷载,利用风振系数来考虑脉动风荷载对结构振动的放大作用。通常根据近似公式和设计经验来估计风振系数,为了具有足够的安全保证可能导致过于保守的设计。对于简单体型的屋盖如何准确的确定风振系数也是值得探讨的。对于复杂的空间体形的屋盖结构如体育场、体育馆和会展中心等大跨空间结构,即使

借助刚性模型的风洞试验合理准确获得风振系数也是较困难的,而气弹试验由于设计复杂,加工制作耗时且造价较高,虽然可以获得结构的振动特性,但是应用还没有普及。此外,对于屋盖结构可能存在某些区域的平均风荷载很小,这样会导致很大的风振系数,使得在应用过程中很难理解和接受。而等效静风荷载却很好的解决了上述问题,等效静风荷载考虑脉了动风荷载的动力放大作用,从而避开了确定风振系数的难题,可以直接用于结构的工程设计中。实际上,计算等效静风荷载仍然是结构动力学的分析方法,给出静力荷载形式。

如上阐述内容是本书研究的出发点,基于上述的研究思路具体的分析过程见后面各章节。

1.2 研究现状

下面分别对风荷载特性、风致响应及等效静风荷载等几个方面的研究现状及存在不足逐一进行阐述。

1.2.1 风荷载特性的研究

国外对屋盖的风压特性进行了较为深入的研究,借助于风洞试验、实测及数值模拟等手段对屋盖结构的风压场及风压分布特性研究。实测对象包括了低矮屋盖和高层建筑、桥梁结构等,其中典型建筑是 TTU 的低矮屋盖、帝王大厦和 Sydney 塔,并把实测结果与风洞试验测量数据对比研究。利用风洞试验对平屋盖、双坡屋盖等常用体型屋盖的平均风压场和脉动风压场研究,探讨了峰值压力特性及空间不同区域、几何参数对风压特性的影响^[2-9]。在复杂地形情况下采用数值模拟方法确定的风压场与试验测量的结果对比,对结构的局部风压特性研究包括风压时程的统计值、Non-Gaussian 特性等^[10-12]。

国内早期对风荷载的研究主要借助于航空风洞,并且受到测量设备和试验技术的限制获得的结果具有一定的局限性。与国外一些荷载规范对比,表明我国荷载规范对规则几何屋盖表面风压场的考虑不够细致,并没有充分体现出局部区域的风压特性。比如双坡屋盖的每个坡面仅给出了同一个体型系数,并没有考虑角部、屋脊附近与中部区域的区别。而屋盖角部等区域风荷载往往是很大,如果不加以详细的考虑,在结构设计中很可能会引起屋面覆层的破坏。因此,需要利用风洞试验测量的风压数据详细的考察地貌、风向角等因素对屋盖局部区域风压特性的影响。随着我国建筑业风洞近些年的不断兴起,对屋盖的风压特性的研究也在多方面展开。同济大学、汕头大学、湖南大学等风洞试验室进行大量大跨屋盖结构的风洞试验并对风压特性研究,把风洞试验分析结果用于结构设计。这方面的工程实例很多不展开说明。研究常常是针对于某一工程实例在指定地貌情况,利用刚性模型同步测压获得的风压数据分析。研究的对象较为分散,很难总结出具有共性的结论。即使对于简单体型的屋盖结构,系统研究结构几何参数及地貌类型、风向角等因素对风压场影响也较少。鉴于同步多点压力扫描设备的快速发展,屋盖上布置测压点数的不断增多,为屋盖表面风压特性的详细研究提供了有利条件。

1.2.2 风致响应的计算

屋盖结构风致响应特性导致计算过程中选取的模态数较多并且需要采用考虑模态耦合效应的CQC法,导致了很大的计算量。为了高效而准确的计算屋盖结构的风致响应,可以从以下几个途径解决。一种途径是采用位移响应谱的快速算法如虚拟激励法^[13]等来提高计算效率。此外,研究一些非传统的屋盖结构响应计算的方法,如里兹向量法^[15],但是其计算仅考虑的脉

动风荷载的单荷载模式,并且生成的初始向量采用的是平均风荷载的静变形,没有充分体现出脉动风荷载的特性。也可使用构造主要贡献模态的补偿法^[14]考虑被截断的高阶模态的贡献。研究初期集中在基于传统的模态叠加法采用一些快速算法来提高计算效率,而补偿高阶模态对响应的贡献途径各异,研究较为分散没有形成系统的理论。对屋盖风致响应计算的非传统方法缺少共识性的结论及统一的理论框架。因此需进一步研究屋盖结构适用的非传统计算方法,作为对模态叠加法的有益补充。

1.2.3 风荷载的确定及等效静风荷载的研究

我国《建筑结构荷载规范》和国外一些建筑规范以平均风荷载乘以风振系数或阵风因子的方式确定结构设计风荷载。这种方式对于确定建筑表面的水平荷载是合适的。但是对屋盖结构,重要的风荷载是竖向风荷载。许多设计部门也反映我国现有规范中的风振系数及阵风系数对于大跨屋盖较难应用。

等效静风荷载是风工程领域研究的热点,为工程设计确定动力风荷载提供了很好的处理手段。自从 60 年代初 Davenport^[16-18]开创性的提出阵风荷载因子方法开始,对等效静风荷载的研究一直是热点。相继有其它计算方法被提出如等效风谱技术(EWST—Equivalent Wind Spectrum Technique)^[19-22],基于高层结构基底弯矩确定的阵风因子法^[23-26],及阵风荷载包络法(GLE—Gust Loading Envelope)、动力响应因子(DRF—Dynamic Response Factor)等^[27-30]。背景(准静力)和共振分量的组合形式提供脉动风致响应及等效静风荷载确定的框架^[31]。背景等效静风荷载可采用荷载响应相关法(LRC—Load Response Correlation)方法计算,共振等效静风荷载根据模态惯性力荷载形式

获得,依赖于结构的质量分布和振型^[27]。之后使用 CQC 方法或 SRSS 来对背景和共振等效静风荷载的组合获得脉动等效静风荷载。2001 年 Chen 采用模态惯性力叠加法和背景、共振等效风荷载组合法计算桥梁的等效静风荷载^[29]。

国内关于等效静风荷载的研究从最初对高层结构适用的忽略模态耦合效应的惯性力法开始,到逐渐背景、共振等效静风荷载组合的方法通过一些措施来考虑模态耦合项的影响^[32]。此外,也有采用考虑模态耦合项影响的模态惯性力法来确定等效静风荷载^[33]。关于等效静风荷载的研究方法得到了一定共识,目前研究的关键问题是等效原则及等效位置的确定,等效原则决定了等效静风荷载的分布。此外,等效静风荷载计算的结点位移及杆件内力等荷载效应与动力风荷载作用结果对比分析较少。通常以最大位移为等效原则的最大位移结点位置的确定也值得探讨,如果简单的选结构跨中结点有些不妥,因为往往风荷载作用下结点位移响应最大值不是出现在跨中。因此,为了保证确定的静风荷载在工程设计中计算的结构位移和杆件内力的合理性,应该探索工程设计适用的等效原则及对等效位置给出初步的估计。

1.3 研究内容

对双坡、0.1 和 0.2 矢跨比球壳和柱壳屋盖在均匀流、B 类和 D 类地貌进行风洞试验。利用同步测量的风压数据对风压场特性、风致响应计算方法及等效静风荷载确定几方面展开了相应的研究工作。图 1-2 给出了本书主要研究内容的框图。

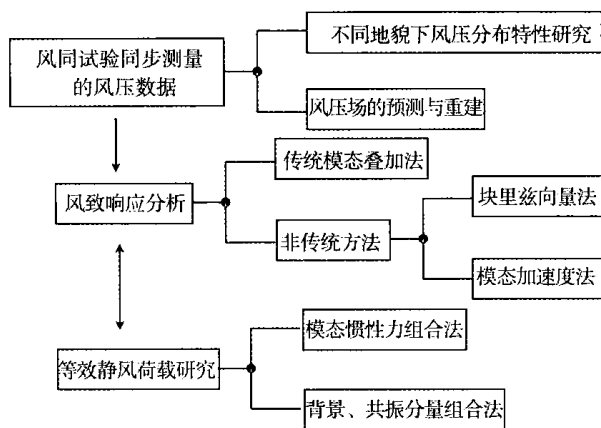


图 1-2 本书研究主要内容框图

Fig. 1-2 Research flow chart

1. 几种典型屋盖的风压场特性分析

对双坡屋盖、0.1 和 0.2 矢跨比的球壳、柱壳几种典型屋盖在 B 类、D 类和均匀流场的风荷载特性研究。风洞试验采用 DSM3200 同步多通道压力扫描系统分别对上述几种典型屋盖的风压数据采集,借助风洞试验测量的数据对比分析不同地貌下典型屋盖的风压系数和体型系数的变化规律,详细考察了结构的局部风压特性,总结出风向、地貌及屋盖不同区域的风压变化规律。并把试验获得的体型系数与我国及国外荷载规范相关条款对比,总结出有意义的结论。

2. 屋盖风压场的重建与预测

首先阐述 POD 的原理及其分析过程的有关变量的物理含义,对双坡屋盖的平均风压场和脉动风压场重建,也就是采用少量的本征模态和主坐标就可以描述风压场,再现了平均风压及脉动风压时程的特征。POD 展开式中的本征模态仅与空间位置有关,因此可插值等办法来获得预测点处的本征模态,与时间相关的主坐标的级数组合从而实现对风压场的预测。以双坡屋