



21世纪技术与工程著作系列·土木工程

结构风振控制的设计方法与应用

周云 著



科学出版社
www.sciencep.com

21 世纪技术与工程著作系列·土木工程



结构风振控制的设计 方法与应用

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统地总结和阐述了结构风振控制的理论、方法、技术和工程应用的主要研究成果。主要内容包括结构风振控制的概念与原理、风荷载特性与脉动风荷载的数值模拟、风振控制装置的类型与性能、结构风振控制分析方法、阻尼器对结构风振控制的设计、TMD 对结构风振控制的设计、TLD 结构风振控制的设计、磁流变阻尼器对结构风振控制的设计、结构风振控制实例、基于性能的结构抗风设计理论框架等。

本书可供土木工程、结构风工程、防灾减灾工程及防护工程、航空航天工程、机械设计制造与自动化、材料科学与工程의广大科技人员参考,也可作为上述专业的研究生和高年级本科生的学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

结构风振控制的设计方法与应用/周云著. —北京:科学出版社,2009
(21 世纪技术与工程著作系列·土木工程)
ISBN 978-7-03-025907-3

I. 结… II. 周… III. 风振控制-设计 IV. TU311.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 198542 号

责任编辑:童安齐 / 责任校对:王万红
责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 11 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2009 年 11 月第一次印刷 印张:16 1/2

印数:1—2 000 字数:317 000

定价:48.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62137026(BA08)

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

随着建筑功能多样化的需要,以及新材料、新结构与新体系的不断发展和应用,高层建筑的层数不断增多,高度不断增高,结构变得越来越柔,这种发展趋势,给高层和超高层结构设计提出了新的要求和挑战。结构抗风设计起着越来越重要的作用,传统的抗风设计方法越来越难以满足设计的要求,即便满足要求,也是不经济的。有效、安全、可靠、经济的方法是采用风振控制技术和方法,即在结构中设置控制装置,通过调整或改变结构动力特性的途径,减小结构的振动反应,有效地保护结构在强风中的安全和正常风荷载下的舒适性。

近 30 年来,国内外学者对结构风振控制技术及相关的理论、方法进行了大量的研究和应用,取得了丰硕成果。为了使这些成果能尽早应用于我国高层和超高层建筑中,有效解决高层和超高层结构的抗风设计,作者结合自己的研究,较系统地总结和阐述了结构风振控制的理论、方法和技术,以及工程应用的主要研究成果。

本书共 10 章。第 1 章为结构风振控制的概念与原理,第 2 章为风荷载特性与脉动风荷载的数值模拟,第 3 章为风振控制装置的类型与性能,第 4 章为结构风振控制分析方法,第 5 章为阻尼器对结构风振控制的设计,第 6 章为 TMD 对结构风振控制的设计,第 7 章为 TLD 对结构风振控制的设计,第 8 章为磁流变阻尼器对结构风振控制的设计,第 9 章为结构风振控制实例,第 10 章为基于性能的结构抗风设计理论框架。

本书在编写过程中,参阅了国内外许多学者的著作、论文和研究报告,一些学者、工程技术人员主动提供了有关资料,特在此表示衷心的感谢。作者的研究生汪大洋、吴从晓、刘纯、陈小兵等协助进行了资料收集和书稿录入等大量工作,作者对他们的工作表示衷心的感谢。

由于结构风振控制的内容十分丰富,且处在不断发展中,书中难免挂一漏万,我们将在今后的研究和教学中逐步完善,同时,由于作者水平有限,书中难免有不足之处,衷心希望读者批评指正。

周 云

2009 年 3 月于广州大学城

目 录

第 1 章 结构风振控制的概念与原理	1
1.1 结构的风致灾害	1
1.2 风对结构的作用	5
1.3 结构风振控制概念与原理	6
1.3.1 结构控制的概念	6
1.3.2 结构风振控制的概念与原理	8
1.4 结构风振控制的应用	10
1.4.1 台北 101 大厦	10
1.4.2 纽约世界贸易中心	11
1.4.3 湖南洞庭湖大桥	12
参考文献	14
第 2 章 风荷载特性与脉动风荷载的数值模拟	16
2.1 风的基本概念	16
2.2 平均风速剖面	17
2.3 基本风速与基本风压	19
2.3.1 基本风速	19
2.3.2 基本风压	21
2.3.3 非标准条件下风速或风压的换算方法	22
2.4 结构顺风向风荷载特性	23
2.4.1 平均风特性	23
2.4.2 脉动风特性	25
2.5 结构横风向风荷载特性	29
2.5.1 涡激振动	29
2.5.2 驰振	35
2.5.3 颤振	37
2.5.4 抖振	39
2.5.5 风雨激振	39

2.6 脉动风荷载的数值模拟	40
2.6.1 谐波叠加法	40
2.6.2 线性滤波法	42
2.6.3 风荷载时程模拟的程序编制与算例	45
参考文献	49
第3章 风振控制装置的类型与性能	53
3.1 被动控制装置的类型与性能	53
3.1.1 黏滞阻尼器	53
3.1.2 黏弹性阻尼器	56
3.1.3 铅黏弹性阻尼器	58
3.1.4 调频质量阻尼器	64
3.1.5 调频液体阻尼器	65
3.2 主动控制装置的类型与性能	67
3.3 半主动控制装置的类型与性能	68
3.3.1 半主动变刚度控制系统	68
3.3.2 半主动变阻尼控制系统	70
3.4 智能控制装置的类型与性能	71
参考文献	75
第4章 结构风振控制分析方法	79
4.1 结构分析模型	79
4.1.1 普通结构分析模型	79
4.1.2 风振控制结构分析模型	83
4.2 阻尼器对结构风振控制的分析	83
4.2.1 时域分析	84
4.2.2 频域分析	86
4.3 TMD 对结构风振控制的分析	87
4.3.1 TMD 的工作原理	87
4.3.2 TMD 对结构风振控制的分析	90
4.4 TLD 对结构风振控制的分析	92
4.4.1 第一类 TLD 对结构风振控制的分析	92
4.4.2 第二类 TLD 对结构风振控制的分析	95
4.5 磁流变阻尼器对结构风振控制的分析	98
4.5.1 磁流变阻尼控制系统的基本模型	98
4.5.2 风振控制算法	100

4.5.3 磁流变阻尼控制系统权矩阵的选取	102
4.5.4 磁流变阻尼器对结构风振控制的分析	104
4.6 高层结构风振控制的优化分析	106
4.6.1 基于遗传算法原理的结构优化分析	106
4.6.2 基于瑞利阻尼原理的结构优化分析	115
4.6.3 基于两种优化机制的高层钢结构算例对比分析	123
参考文献	126
第5章 阻尼器对结构风振控制的设计	129
5.1 结构抗风设计要求	129
5.1.1 高层结构的抗风设计要求	129
5.1.2 高耸结构的抗风设计要求	131
5.1.3 大跨结构的抗风设计要求	131
5.2 结构风振控制概念设计	132
5.2.1 结构风振控制的性能要求	132
5.2.2 阻尼器的选择与布置原则	133
5.3 阻尼器对结构风振控制的设计方法	136
5.3.1 等效阻尼比的确定	137
5.3.2 脉动增大系数与风振系数的确定	141
5.3.3 结构风振侧移验算	143
5.3.4 人体舒适度验算	144
5.4 阻尼器对结构风振控制的优化设计	146
5.4.1 阻尼器的参数优化	147
5.4.2 阻尼器的布置位置优化	147
5.5 阻尼器与结构的连接设计	149
5.5.1 黏滞阻尼器与结构的连接设计	149
5.5.2 黏弹性阻尼器与结构的连接设计	150
5.6 阻尼器对结构风振控制的设计算例	151
5.6.1 工程概况	151
5.6.2 阻尼器参数设计	152
5.6.3 阻尼器对结构的风振控制效果	154
参考文献	156
第6章 TMD 对结构风振控制的设计	158
6.1 TMD 参数设计	158
6.1.1 TMD 质量系统	158
6.1.2 TMD 阻尼系统	159

6.1.3	TMD 弹簧系统	160
6.1.4	TMD 系统振动频率	160
6.1.5	TMD 支撑系统	161
6.2	TMD 对结构风振控制的设计方法	161
6.3	TMD 对结构风振控制的优化设计	163
6.4	TMD 对结构风振控制的设计算例	164
6.4.1	工程概况	164
6.4.2	结构动力特性分析	165
6.4.3	TMD 系统技术参数确定	165
6.4.4	结构顺风向减振效果分析	167
参考文献		167
第 7 章	TLD 对结构风振控制的设计	169
7.1	TLD 控制力设计	169
7.1.1	TLD 控制力设计	169
7.1.2	TLCD 控制力设计	173
7.2	TLD 参数设计	175
7.2.1	TLD 参数设计	175
7.2.2	TLCD 参数设计	176
7.3	TLD 对结构风振控制的设计	177
7.4	TLD 对结构风振控制的优化设计	178
7.4.1	TLD 对结构风振控制的优化设计	178
7.4.2	TLCD 对结构风振控制的优化设计	179
参考文献		181
第 8 章	磁流变阻尼器对结构风振控制的设计	182
8.1	磁流变阻尼器设计	182
8.1.1	磁流变阻尼器的参数设计	182
8.1.2	磁流变阻尼器的磁路设计	183
8.2	磁流变阻尼器对结构风振控制的设计	187
8.2.1	最优控制系统的性能指标	188
8.2.2	性能指标对控制装置位置矩阵的灵敏度	188
8.2.3	性能指标增量计算及控制装置的最优分布	190
参考文献		191
第 9 章	结构风振控制实例	192
9.1	某 288m 超高层结构风振控制实例	192
9.1.1	工程概况	192

9.1.2	结构风振控制方案设计	193
9.1.3	结构脉动风荷载的数值模拟	195
9.1.4	结构风振控制对比分析	196
9.2	某 456m 超高层结构风振控制实例	199
9.2.1	工程概况	199
9.2.2	结构脉动风荷载的数值模拟	201
9.2.3	结构无控风振反应分析	203
9.2.4	结构风振控制方案	206
9.2.5	TMD 参数优化及其选取	207
9.2.6	结构风振控制对比分析	211
9.3	某 177m 带突出物的高层结构风振控制实例	226
9.3.1	工程概况	226
9.3.2	结构脉动风荷载模拟	227
9.3.3	结构无控风振反应分析	229
9.3.4	结构减振方案	230
9.3.5	结构减振方案对比分析	231
	参考文献	241
第 10 章	基于性能的结构抗风设计理论框架	242
10.1	基于性能的结构抗风设计理论框架	242
10.2	设计风压等级	243
10.3	结构风振性能水准	245
10.3.1	人体振动舒适度	245
10.3.2	结构风振性能水准	246
10.4	结构性能目标	248
10.5	结构抗风概念设计	249
10.6	结构抗风计算分析	249
10.7	结构抗风性能的安全评价与社会经济评价	250
	参考文献	251

第 1 章 结构风振控制的概念与原理

1.1 结构的风致灾害

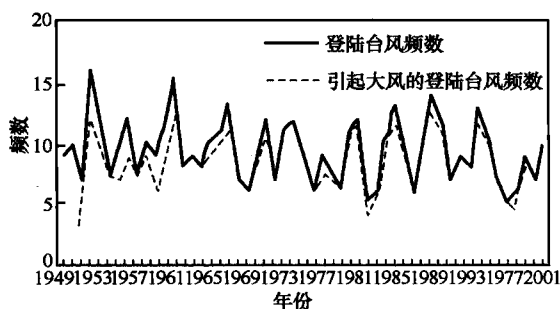
在所有自然灾害中,风灾造成的损失为各种灾害之最。根据国外资料的统计,风灾损失占总的自然灾害损失的一半左右,而且随着生产和建设的发展,风灾损失和其他灾害损失一样,逐年递增。表 1.1 列出了部分特大风灾害情况^[1],可以看出,台风、飓风和龙卷风造成了巨大的人员伤亡和财产损失。图 1.1 为 1949~2001 年我国登陆台风的频数分布。由图 1.1 可见,在 1949~2001 年,我国每年平均登陆的台风次数有 9~10 次,且常发生在 6~10 月,以 7~9 月最为频繁。

表 1.1 部分特大风灾情况

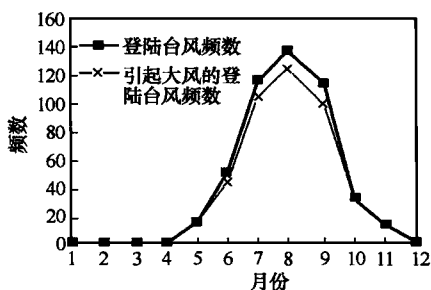
年份	地 点	风类型	受灾情况
20 世纪特大风灾情况			
1900	美国加尔维斯顿岛	飓风	6000 多人死亡
1906	中国香港	台风	1 万多人死亡,经济损失 2000 万美元
1918	日本东京	强烈台风	13.9 万人死亡,20 万间房屋倒塌
1935	美国佛罗里达	飓风	279 人死亡
1937	中国香港	台风	1.1 万人死亡,数十万人受伤
1957	美国得克萨斯	飓风	数千人死亡,数座城市被毁
1959	日本名古屋	超级台风	2000 多人失踪,经济损失 20 多亿美元
1963	加勒比海	飓风	5000 多人死亡,10 万人无家可归
1970	孟加拉国	热带风暴	30 万人死亡,100 万人无家可归
1974	美国 12 大州	龙卷风	315 人死亡,经济损失超过 5 亿美元
1985	加拿大、美国	龙卷风	200 余人死亡,直接经济损失 3 亿美元
1988	美洲大陆加勒比海	飓风	数百人死亡,32 万 m ² 农田被毁
1989	中国海南岛	台风	105 人死亡,1156 人受伤,40 多万间房屋倒塌,直接经济损失高达 27.48 亿元
1991	孟加拉湾	热带风暴	13 万余人死亡,数百万人无家可归
1991	中国海南岛	台风	32 人死亡,受灾人口达 50 多万,直接经济损失 6.3 亿多元
1992	美国佛罗里达	飓风	经济损失 300 多亿美元

续表

年份	地 点	风类型	受灾情况
20 世纪特大风灾情况			
1994	中国浙江	台风	40 个县市受灾, 受灾人口 1392.9 万, 直接经济损失高达 177.6 亿元
1998	印度内陆地区	热带风暴	1000 多人死亡, 直接经济损失 4 亿美元
1999	印度东部奥里萨邦	热带风暴	1 万人死亡
21 世纪特大风灾情况			
2004	海地	热带风暴	超过 2000 人死亡
2005	美国新奥尔良	飓风	1200 多人死亡, 经济损失 1000 多亿美元
2006	中国浙江	台风	1956 年来登陆中国内地最强的台风, 温州造成 81 人死亡, 11 人失踪, 福建省转移人员 56.9 万人
2007	中国广东	台风	2.3 万人受浸, 37 个乡镇 116.5 万人受灾, 倒塌房屋 3665 间
2007	孟加拉国	热带风暴	超过 4400 人死亡
2008	缅甸	热带风暴	风灾致 84 537 人丧生, 53 836 人失踪
2008	美洲大陆加勒比海	飓风	横扫加勒比海各国, 造成 94 人死亡, 转移安置路易斯安那州沿岸近 200 万人, 包括泛新奥尔良范围 32.7 万人, 疏散行动是美国历来规模最大的一次
2008	中国	台风	广东多个沿海城市出现百年一遇的风暴潮。广西受灾人口达 653.91 万人, 紧急转移安置 67.84 万人, 因灾死亡 17 人、失踪 6 人



(a) 年际变化



(b) 季节变化

图 1.1 1919~2001 年我国登陆台风频数分布

我国及世界其他国家每年都会遭受不同程度强风作用的影响, 这种影响不仅仅体现在巨大的财产损失与人员伤亡上, 而且还体现在对结构(如高层、高耸或大跨结构)造成的损伤与破坏上。以高层结构为例, 由于高层结构的整体抗侧刚度相对较小, 结构柔性大, 这使得高层结构的固有频率与强风的卓越频率越来越接近,

结构的风敏感性也越来越强,导致结构在强风作用下容易产生共振效应,轻则影响人们正常生产、生活的振动舒适性要求,重则造成结构的严重损伤或破坏。本节将从高层结构、高耸结构和大跨结构三个方面简要介绍实际工程的风致灾害情况。

1. 高层结构

1926 年的一次大风使美国一座叫 Meyer-Kiser 的 10 多层的钢框架大楼发生塑性变形,造成围护结构严重破坏,大楼在风暴中严重摇晃,如图 1.2 所示。1971 年 9 月完成的美国波士顿约翰汉考克大楼(John Hancock building),高 60 层,241m,自 1972 年夏天至 1973 年的 1 月,由于大风的作用,大约有 16 块窗玻璃破碎,49 块严重损坏,100 块开裂,后来不得不调换了所有的 10 348 块玻璃,价值 700 万美元以上,超过了原玻璃的价值;同时,还采取了其他措施,增加了造价。该建筑的使用不仅耽误了 3.5 年,而且造价从预算的 7500 万美元上升到了 15 800 万美元。纽约一幢 55 层的塔楼建筑,在东北向大风作用下,由于建筑物的摆动,使人不能在顶部几层房间的写字台上进行工作和学习,建筑物的风作用使人体产生了不舒适感。2005 年,飓风“卡特里娜”也造成美国部分高层建筑的风致破坏,建筑的维护结构(玻璃幕墙)严重受损,不得不在灾后替换所有的玻璃幕墙以继续使用,如图 1.3 所示。

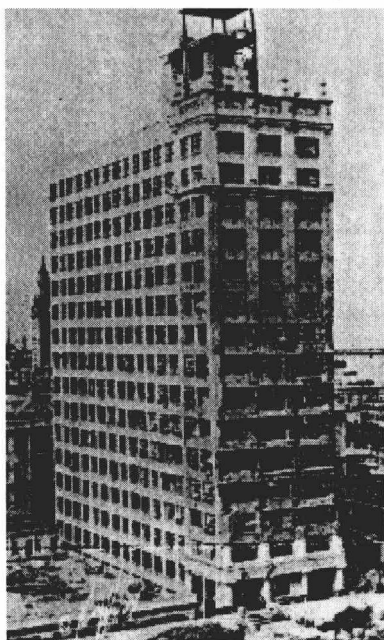


图 1.2 变形的 Meyer-Kiser 大楼



图 1.3 玻璃幕墙在飓风作用下严重受损

2. 高耸结构

高耸结构主要涉及一些桅杆和电视塔,其中桅杆结构更容易遭受风灾害。桅杆结构具有经济实用和美观的特点,但它的刚度小,在风荷载作用下容易产生较大幅度的振动,从而导致桅杆的疲劳损伤或破坏,结构的安全可靠度降低。近50年来,世界范围内发生了数十起桅杆倒塌事故。例如,1955年11月,捷克一桅杆在风速达30m/s时因失稳而破坏;1963年,英国约克郡(EndeyMorr)高386m的钢管电视桅杆被风吹倒;1985年,联邦德国Bielstein一座高298m的无线电视桅杆受强风作用而倒塌;1988年,美国Missouri一座高610m的电视桅杆受阵风作用倒塌,造成3人死亡。

3. 大跨结构

1940年11月7日,美国华盛顿州塔科马(Tacoma)海峡建造的塔科马悬索桥,主跨853m,建好不到4个月,就在一场风速不到20m/s的八级大风作用下发生强烈的风致振动,桥面经历了70min振幅不断增大的反对称扭转振动,当桥面的1/4点达到 $\pm 35^\circ$ 的扭转角时,吊索被逐根拉断,并最终导致桥面折断坠入峡谷中,如图1.4所示。

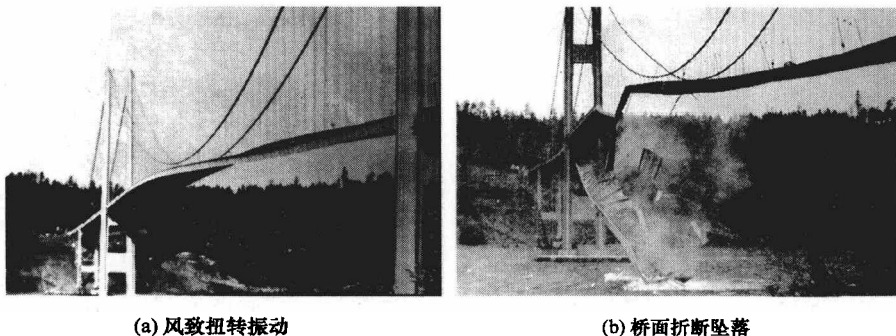
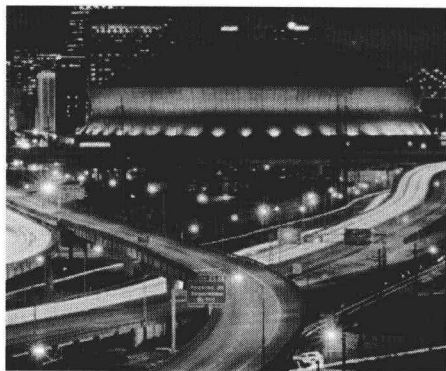
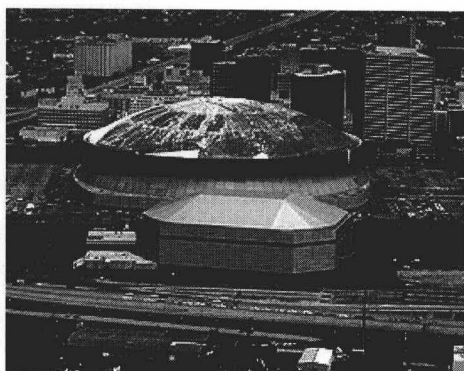


图 1.4 塔科马悬索桥的风致破坏

2005年8月,飓风“卡特里娜”在美国路易斯安娜、密西西比等地区登陆后,给当地的建筑结构造成了巨大的损坏。图1.5为新奥尔良市“超级穹顶”体育馆在遭受“卡特里娜”飓风袭击前后的对比图片,可见飓风来袭之前,体育馆四周车水马龙,流光溢彩,一片繁华的景象。但在遭遇飓风之后,体育馆四周陷于黑暗之中,没有丝毫的昔日胜景,穹顶上部已被完全破坏。图1.6为上海大剧院外观图,该建筑屋顶面板于2003年8月2日下午被风掀起的照片,在暴风雨过程中,其东侧顶部中间约250m²的一大块钢板屋面被风卷起并撕裂成两段,移动约20m后砸落在剧院屋面中部的高平台上。



(a) 飓风来袭前



(b) 飓风袭击后

图 1.5 “超级穹顶”体育馆遭受飓风前后的对比图

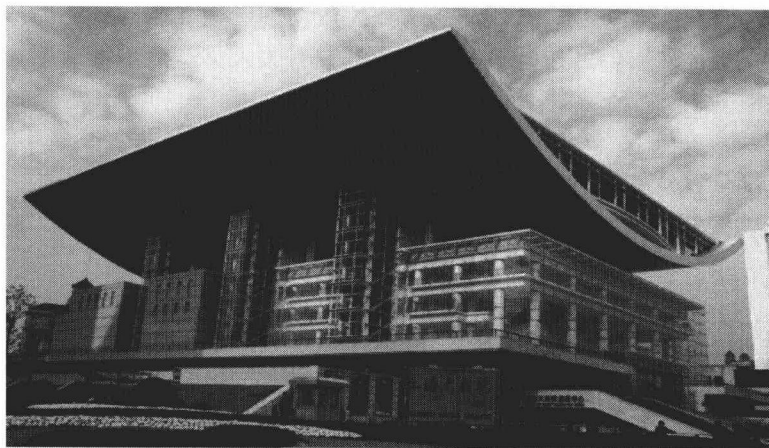


图 1.6 上海大剧院

1.2 风对结构的作用

高层结构和高耸结构的主要特点是高度较高和水平方向的刚度较小,水平风荷载会引起结构较大的反应。风对结构物的作用具有如下特点:

(1) 作用于建筑物上的风分为平均风和脉动风,其中脉动风会引起结构物的顺风向振动。

(2) 风对建筑物的作用与建筑物的外形直接有关。例如,结构物背后的旋涡会引起结构物的横风向的振动,对高耸、高层建筑等一些自立式细长柱体结构物,其发生横风向振动都比较常见。

(3) 风对建筑物的作用受周围环境影响较大,位于建筑群中的建筑有时会出现更不利的风力作用,即由别的建筑物尾流引起的振动。

(4) 风力作用在建筑物上分布很不均匀,在角区和立面内收区域会产生较大的风力。

(5) 相对于地震来说,风力作用持续时间较长,往往达到几十分钟甚至几小时。

风对结构的作用,会使建筑物产生以下损伤或破坏:

(1) 使结构物或结构构件不稳定或失稳破坏。

(2) 使结构开裂或留下较大的残余变形,甚至导致塔桅、烟囱等高耸结构吹坏或倒塌。

(3) 使结构物或结构构件产生过大的挠度或变形,引起外墙、外装修材料的损坏。

(4) 反复的风振动作用,会引起结构或结构构件的疲劳破坏。

(5) 气动弹性的不稳定,致使结构物在风运动中产生加剧的气动力。

(6) 由于过大的振动,使建筑物的居住者或有关人员产生不舒适感。

1.3 结构风振控制概念与原理

1.3.1 结构控制的概念

结构控制就是通过在结构上安装控制装置来减轻或抑制结构由于动力荷载作用引起的反应,该技术最初应用于机械、宇航、船舶等工业领域。1972年,美籍华裔学者姚治平首次将结构控制技术引入土木工程中。随后,结构振动控制技术在建筑工程中得到迅猛发展,目前已成为一个十分活跃的研究领域,近三十年的理论和实践研究表明:结构振动控制可以有效减轻结构在风荷载作用下所引起的反应和损伤,有效提高结构的抗风能力和防灾性能。

结构振动控制根据是否需要外部能量输入可分为被动控制、主动控制、半主动控制、智能控制和混合控制^[2~5],如图1.7所示。

被动控制是在结构的某些部位安装隔震或耗能装置或子结构系统,或对结构自身的某些构件做构造上的处理以改变结构体系的动力特性。被动控制不需要外部能量输入提供控制力,控制过程不依赖于结构反应和外界干扰信息,而且因其具有构造简单、造价低、易于维护等诸多优点,成为目前研究和应用较多的技术。

主动控制是指应用现代控制技术,对输入的外部激励和结构反应实现联机实时监测,再按分析计算结果应用伺服加力装置对结构施加控制力,实现自动调节,使结构在风振和其他动力作用下的响应控制在允许的范围内,以达到缓解结构振

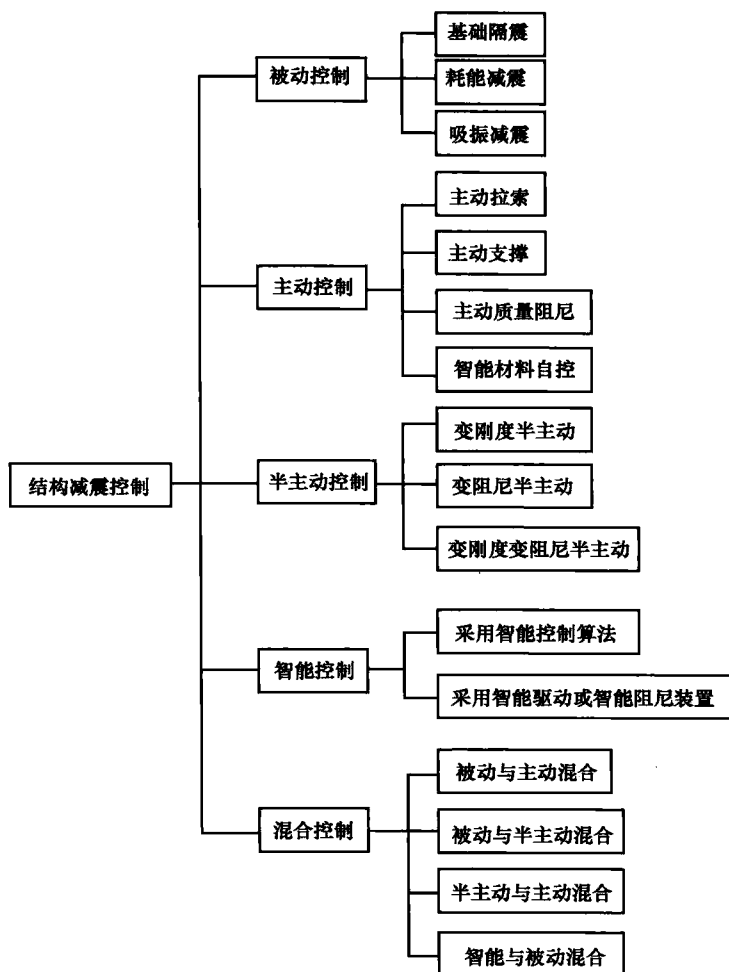


图 1.7 结构振动控制分类

动进而保护结构构件和设备免遭损伤的目的。主动控制需要外部能量输入提供控制力,控制过程依赖于结构反应和外界干扰信息。

半主动控制以被动控制为基础,利用控制机构来主动调节系统内部的参数,对被动控制系统的工作状态进行切换,使结构控制处于最优状态。半主动控制仅需要少量外部能量输入提供控制力,控制过程依赖于结构反应和外界干扰信息的控制方法。与主动控制相比,半主动控制既具有被动控制系统的可靠性,又具有主动控制系统的强适应性,且通过一定的控制可以达到主动控制系统的控制效果,因此半主动控制具有很好的工程应用潜力。

智能控制是国际振动控制研究的前沿领域,由于智能材料制成的智能可

调阻尼器和智能材料驱动器构造简单、调节驱动容易、耗能小、反应迅速、几乎无时滞,因而具有广泛的应用前景。智能控制采用智能控制算法,与主动控制的区别主要表现在不需要精确的结构模型,仅采用智能控制算法确定输入或输出反馈与控制增益的关系,但控制力仍然需要很大外部能量作用下的作动器来实现。智能控制实施控制力的作动器是智能材料制作的智能驱动器或智能阻尼器。

混合控制是主动控制或半主动控制、智能控制和被动控制的联合应用,使其协调起来共同工作。混合控制系统充分利用了被动控制和主动控制的优点,既可以通过被动控制系统大量耗散振动能量,又可利用主动控制系统保证控制效果,比单纯的主动控制节省大量的能量,因此具有良好的工程应用价值。

1.3.2 结构风振控制的概念与原理

传统结构抗风是通过增强结构本身的抗风性能来抵御风荷载的作用,即由结构本身储存和消耗风振能量,这是被动消极的抗风对策。然而,由于强风作用的随机性,按照传统抗风方法设计的结构往往不具备自我调节能力,结构很可能不满足舒适性和安全性的要求,轻则引起居住者或使用人员的不舒适感,降低生活质量或生产效率,重则造成结构的局部破坏、甚至整体坍塌,导致巨大的经济损失和人员伤亡。

合理有效的抗风途径是对结构施加控制装置(系统),由控制装置与结构共同承受外界强风荷载的作用,即共同储存和耗散风振能量,以调谐和减轻结构的风振反应^[3~6]。为了满足结构舒适度和安全性要求,常用的风振控制措施有被动控制(如安装黏滞阻尼器、黏弹性阻尼器、调频质量阻尼器、调频液体阻尼器)、智能控制和主动控制等。图 1.8 和图 1.9 分别为被动控制中的阻尼器对结构风振控制和调频液体阻尼器(tuned liquid damper, TLD)对结构风振控制的示意图。

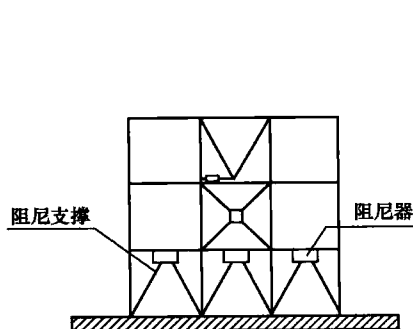


图 1.8 阻尼器对结构风振控制示意图

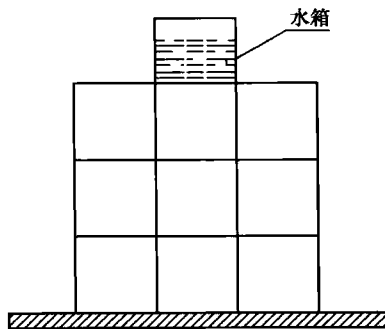


图 1.9 TLD 对结构风振控制示意图