

高耸结构振动控制

王肇民 主编



同济大学出版社

高耸结构振动控制

王肇民 主编

同济大学出版社

责任编辑 方 芳
封面设计 李志云

高耸结构振动控制

王肇民 主编

同济大学出版社出版

(上海四平路 1239 号)

新华书店上海发行所发行

同济大学印刷厂印刷

开本:787×1092 1/16 印张:20.75 字数:530 千字

1997 年 5 月第 1 版 1997 年 5 月第 1 次印刷

印数:1—1500 定价:33.00 元

ISBN 7-5608-1750-5/TU·224

内 容 提 要

本书是关于高耸结构振动控制设计的教科书和参考书。书中系统地阐述了风振和地震作用、高耸结构的动力特性、高耸结构动力响应及振动控制原理、被动与主动控制方法、各种控制装置及其控制效果。本书还介绍了多种控制设备的优化选择、参数研究、模型风洞试验与振动台抗震试验以及数座电视塔振动控制实例。

本书介绍各类高耸结构振动控制设计方法,反映了国内外最新科研成果。本书可供从事高耸结构、高层建筑的振动控制教学、科研、设计、施工人员参考。

前 言

高耸结构是一种非常重要的特种结构,它的用途量大面广,已遍及广播电视、电力、邮电、冶金、石油、化工、通讯、导航、交通、气象、测绘、环保、旅游、市政建设等部门。

高耸结构主要荷载是风荷载,地震区的地震作用有时也起主要作用。这两种随机荷载和作用力,会使细长的高耸结构产生高频振动和大幅变形。

高耸结构设计需要考虑当地的最强风和地震作用,在这种荷载作用下,为了满足结构的强度、刚度和稳定要求,不得不增加建筑材料,加大结构的截面面积。特别是带塔楼的电视塔,作为观光旅游类建筑,其防振抗震要求更高——为使登塔楼旅游瞭望的人们有舒适感,大风时,结构不能有剧烈摇晃和过量变形。此类高柔结构若只靠增强自身结构来抵御风振或地震,满足结构刚度和舒适度要求,将使工程造价上升。

高耸结构振动控制的目的,就是在不特别增强结构的基础上,设置一些控制装置,当强风或地震作用时,控制装置被动或主动地施加一组控制力,减缓结构振动,减小结构变形。在同样动力荷载作用下,限制高耸结构的振动和变形,其控制装置的费用远比增加建筑材料的费用要小得多,因此,结构振动控制设计是一种非常经济合理的措施。

高耸结构振动控制是近年才发展起来的新兴学科,国外已有很多研究,亦有许多工程实例,国内也在开展这方面研究,发表了不少振动控制论文。它的核心问题是利用结构振动控制理论,改变传统的加强承重结构来抵抗风振或地震的思路,而采用某种控制装置施加控制力,抑制结构动力反应,所以讲,结构振动控制使高耸结构设计上了一个新台阶。

同济大学自 1985 年以来开始研究高耸结构振动控制,结合本校设计的几座电视塔,做了一些装置 TMD、TSD、TLD 模型风洞试验和振动台抗震试验,将研究和试验成果,用在新的电视塔工程设计中,得到了显著的经济效益和社会效益。1985 年以来历届钢结构硕士研究生和博士研究生,有许多以高耸结构振动控制作为研究课题,撰写了各个专题的学位论文,并在多种学报和杂志上发表文章,积累了大量资料。在此期间,同济大学还在国家自然科学基金和上海市自然科学基金项目的资助下,进行了高耸结构振动控制卓有成效的专项研究,其研究成果在上海市科学委员会主持下,进行了专家鉴定,得到了高度评价。与此同时,同济大学承担了国内大多数大型钢结构电视塔的设计任务,有数座电视塔已经或即将装置 TMD、TSD、TLD 等振动控制设备。高耸结构振动控制的教学、科研、设计、施工已密切结合起来了。

为了纪念同济大学 90 周年校庆(1907—1997 年),同济大学出版社出版一系列科技图书,本书为其中之一。本书是在以往科研成果的基础上,结合最新的理论研究和工程实践,参考一些国内外高耸结构振动控制的文献资料,同时也参考了与此相近的高层建筑振动控制的研究与设计,进行归纳、总结、编撰而成的,为今后高耸结构振动控制的进一步发展创造一定的条件。

本书的编委会由同济大学“高耸结构振动控制”课题组的教授、副教授、博士、博士生等 8 人组成,他们是:马人乐,王之宏,王肇民,邓洪洲,何敏娟,张旭昇、颜明忠、穆以新(以笔划

目 录

第一章 绪 论	(1)
第一节 高耸结构分类及其特点.....	(1)
第二节 高耸结构荷载及作用力.....	(2)
第三节 高耸结构抗振设计要求.....	(4)
第四节 高耸结构的动力反应.....	(5)
第五节 高耸结构振动控制概念.....	(6)
第二章 风荷载及风振效应	(8)
第一节 概述.....	(8)
第二节 风的基本特性.....	(9)
第三节 空气动力学与风荷载.....	(16)
第四节 高耸结构的风振效应.....	(25)
第三章 地震作用及结构反应	(33)
第一节 概述.....	(33)
第二节 结构弹性地震反应分析.....	(39)
第三节 高耸结构在地震作用下的计算.....	(51)
第四章 高耸结构动力特性	(66)
第一节 概述.....	(66)
第二节 塔式结构动力特性计算.....	(67)
第三节 桅式结构动力特性计算.....	(76)
第四节 塔式结构自振特性实测方法.....	(91)
第五节 桅杆结构自振特性实测方法.....	(97)
第六节 塔式结构自振特性计算实例.....	(102)
第七节 桅式结构自振特性计算实例.....	(110)
第五章 高耸结构振动控制原理	(118)
第一节 概述.....	(118)
第二节 主动控制的优化理论.....	(118)
第三节 被动控制的频域分析理论.....	(120)
第四节 结构振动控制的时程分析法.....	(128)
第五节 桅杆的非线性结构控制理论.....	(130)

第六章 被动控制与主动控制	(134)
第一节 概述	(134)
第二节 主动控制的线性最优控制	(134)
第三节 主动控制的瞬时最优控制	(136)
第四节 主动控制的随机最优控制	(138)
第五节 被动控制的准最优控制	(141)
第六节 调频液体阻尼器控制设计	(144)
第七节 U型水箱控制设计	(153)
第七章 控制装置与控制方法	(161)
第一节 概述	(161)
第二节 耗能器控制	(162)
第三节 拉索控制	(167)
第四节 调频质量阻尼器	(171)
第五节 MTMD 振动控制理论	(183)
第六节 调频液体阻尼器	(188)
第七节 斜挂弹簧质量阻尼器	(192)
第八节 PTTMD 对钢塔的风振控制	(195)
第八章 桅杆结构振动控制设计	(198)
第一节 概述	(198)
第二节 桅杆结构顺风向振动响应	(200)
第三节 桅杆结构横风涡激振动响应	(220)
第四节 桅杆裹冰风振特性及驰振现象	(225)
第五节 桅杆结构的参数振动	(232)
第六节 桅杆结构风振控制	(236)
第七节 桅杆结构地震响应及其控制	(271)
第九章 高耸结构振动控制实例	(279)
第一节 概述	(279)
第二节 嘉定电视塔 TMD 风振控制设计	(279)
第三节 奉贤电视塔 TSD 风振控制设计	(286)
第四节 洛阳电视塔 TMD 地震控制设计	(288)
第五节 汕头电视塔 PTTMD 风振控制设计	(295)
第六节 上海东方明珠电视塔 TMD 风振控制的风洞试验研究	(297)
第七节 桅杆 TMD 横风涡激振动控制设计	(303)

附录	(309)
附录 1-1	蒲福风力等级表	(309)
附录 1-2	福基达龙卷风风力等级表	(310)
附录 1-3	全国基本风压标准值	(311)
附录 2-1	中国城市地震烈度区划表	(315)
附录 2-2	中国地震烈度表(1980)	(316)
附录 3-1	桅杆因风荷载、裹冰而破坏的实例	(318)
附录 3-2	我国近几年已知桅杆破坏实例	(320)
附录 4-1	复频率响应函数模的积分值	(321)
参考文献	(322)

第一章 绪 论

第一节 高耸结构分类及其特点

高耸结构(High-rise Structure)是一种高度和横向尺寸之比较大的构筑物,横向荷载起主导作用。因为高宽比较大,结构抗弯刚度相对较柔,在横向荷载作用下,容易产生较大的振动和变形。

高耸结构可分为两种结构类型,一种是自立式的塔式结构(Tower Structure),另一种是拉线式的桅式结构(Guyed Mast Structure)。前者生根于地面,计算图式相当于悬臂梁,后者中心杆身靠几个方位纤绳扶持,而保持结构的直立和稳定,计算图式相当于弹性支座连续梁(图 1-1)。因此,高耸结构又称塔桅结构。

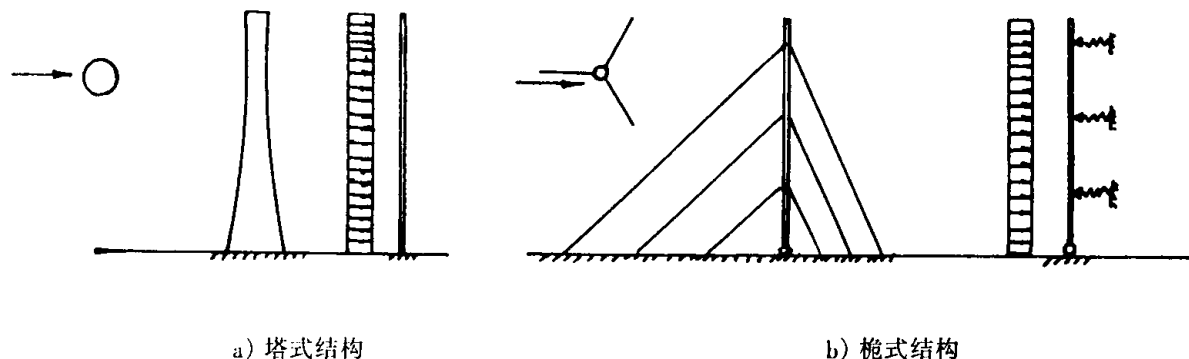


图 1-1 高耸结构的计算图式

高耸结构的应用非常广泛,它包括无线电桅杆、电视发射塔、微波塔、导航塔、输电线路塔、烟囱、水塔、灯塔、环境监测塔、火箭发射塔、交通指挥塔、石油化工塔、天文观测塔、测绘标志塔、广场照明塔、旅游瞭望塔等,此外还有塔式起重机、石油钻井架、井式升降机等。各种高耸结构尽管用途各异,特点却是相同,都是长细比较大的构筑物,其结构类型不是塔式结构,就是桅式结构。

塔式结构按材料基本上可分为钢筋混凝土结构和钢结构两种,钢筋混凝土塔绝大多数是圆筒形塔身,因为圆筒体结构风阻较小,刚度较大,容易施工,比较经济,个别电视塔因建筑艺术上要求,可能做成多边形或其他非圆形截面。钢结构塔则采用空间桁架或空间刚架,截面为三边形以上的多边形形式,单轴对称或双轴对称。构件采用钢管、圆钢、角钢或其组合形式,用焊接或螺栓进行连接。桅式结构的中心杆身有构架式或实腹式两种,构架式为三角形或四边形空间桁架,构件仍用钢管、圆钢、角钢等,构件间的连接仍为焊接或螺栓。实腹式多用等截面大型焊接钢管,很少采用笨重的钢筋混凝土管。桅式结构的纤绳则用高强度镀锌钢丝绳。

高耸结构无论用作什么用途,采用什么材料和结构形式,其特点基本相同,都是高柔结构,对风振或地震作用都是比较敏感的。

第二节 高耸结构荷载及作用力

高耸结构荷载有:风荷载,裹冰荷载,雪荷载,地震作用,安装或检修荷载,塔楼楼面或平台的活荷载,温度变化,固定的设备重,导线或线网张力,基础不均匀沉降,自重和各种偶然性的事故荷载等等。

在各类荷载中,风荷载对高耸结构是最重要的,不仅结构应力的 80% ~ 90% 是风荷载引起的,高耸结构振动控制的动力源也是风荷载。此外,在地震区可能是地震起主要作用,在裹冰区需要考虑裹冰带来的影响,这两种荷载与作用力的计算,同时还要考虑风的组合作用。

一、风 荷 载

风是空气在大气层中的运动。空气从气压大的地方流向气压小的地方,空气流动就形成了风,若遇结构阻挡,结构表面就有了风压,空气流动速度愈大,风压也愈大。风是一种动力荷载,使结构产生较大的振动和变形,对高柔的塔桅结构,风荷载是一种非常重要的设计荷载。

风荷载包括两种成份:稳定风与脉动风。稳定风是一种速度、方向基本上不随时间变化的风,周期较长,其性质相当于静力作用;脉动风是不规则运动的风,有强烈的随机性,周期较短,其性质相当于动力作用。

高耸结构的风振影响,主要就是脉动风起的作用。

脉动风的风速和风向是随时间、空间而变化的,具有明显的紊乱性和随机性,表现得捉摸不定。风速分布也是空间性的,在某一区间,沿高度和宽度风速分布不相同,在同一高度,其平面上的风速分布也不一样。

风速沿高度变化受到地表构造的影响,地表面越是粗糙,摩擦作用越厉害,其影响就较大。在大城市中,高楼林立,对风速的影响要比广阔的海面要大得多。因此,不同地面情况,风速沿高度变化是不同的。特别粗糙的地面,受影响的高度约 400m,在这高度以上风速与地表构造无关;中等粗糙的地面(田野、乡村、丛林、丘陵、城郊)影响风速高度约为 350m,近海海面及大沙漠影响风速高度约为 300m。影响风速的高度称为梯度风高度。

在相同风速作用下,对外形不同的建筑物可引起完全不同的风压值和分布,结构迎风面会受到一定的风压力,背风面可能产生旋涡引起的吸力和横向干扰力。这对非流线型截面的可能性更大,整个结构表面的风压力、吸力与横向干扰力分布是不均匀的。随着高耸结构的高度、迎风面积、结构体型的不同,风速和风向、紊流结构的变化,风的各种压力也会随时改变。

总而言之,风包含静力和动力两部分,而且随高度而变化。风的作用与结构外形、周围环境有关,在结构物表面上,风的分布不很均匀,由于脉动风的随机性,结构风响应的性质是动力的、随机的。脉动风引起的结构振动应按随机振动理论进行分析。

二、裹冰荷载

裹冰是高耸结构,特别是有线网张拉的结构必须考虑的重要荷载。裹冰产生于空气湿度

较大的地区,结冰的条件是无风或微风,0 ~ 10℃ 的气温,空气相对湿度接近饱和。在干冷的寒冷地区,虽然气温极低,湿度不够也不会有裹冰,因此我国裹冰区集中在长江中上游一带,东北、华北、华东部分地区也有轻度裹冰现象。

高耸结构上的架空导线、线网,桅式结构的纤绳、绝缘子、甚至结构表面裹冰后,产生了裹冰重力荷载,增加了结构自重,也增加了挡风面积,相应地增加了风荷载。虽然裹冰时无风或微风,但裹冰后的大风影响必须考虑。

裹冰厚度因地区而异,一般离地面愈高,裹冰厚度愈厚,其厚度与构件直径大小也有关,直径愈小,其影响愈大。计算裹冰荷载时,伴随 1/4 最大风载,温度为 - 5℃。

桅式结构的纤绳裹冰后,可能形成非圆形截面,并产生横风向失稳式大幅振动的“驰振”(Galloping)现象,导致桅式结构的破坏。

三、地震作用

地震作用是高耸结构的另一个重要荷载来源。

地震主要是地球内部突发性构造运动的结果。某一地区所积蓄的能量达到一定限度时,产生构造上的急剧变化,通过地壳的断裂或错动引起地震。

地震时以震源为中心释放能量,向周围传播开去,地震波从震源经过基岩传播到建筑场地,再经过地表土传播到高耸结构。所以高耸结构受到地震作用是从根部开始的,与风荷载的作用有很大区别。

地震波由各种不同频率组成,当经过地表土时,与场地土自振周期一致的成份得到放大,不一致的成分则衰减,地表土起到滤波器的作用,一般地表土愈深,土质愈差,放大的作用愈显著,对结构愈不利。

地震作用使高耸结构产生位移、速度和加速度。不同周期下反应值大小大致如图 1-2 曲线所示,即反应谱(图 3-11 为 EL centro 地震波反应谱记录曲线,图 1-2 为泛指),一般情况下,随周期的延长,位移反应谱为上升曲线,速度反应谱比较恒定,而加速度反应谱除在短周期出现峰值外,大体上为下降的曲线,不同场地类型的峰值周期也不同。场地土质越差,峰值周期越长。

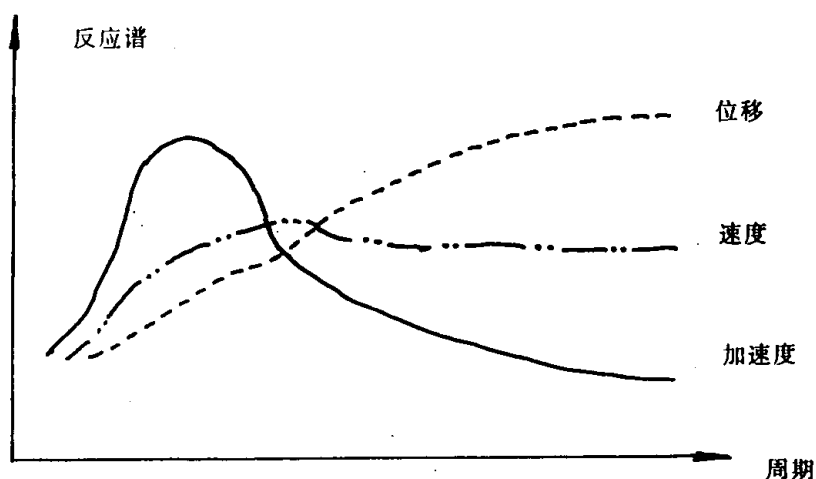


图 1-2 地震反应谱示意图

地震作用的强烈程度,常用地震加速度反应谱作为标准。在地震过程中,高耸结构基础输入的最大加速度大致为:

地震烈度为 7 度时,相当于最大加速度 100gal;

地震烈度为 8 度时,相当于最大加速度 200gal;

地震烈度为 9 度时,相当于最大加速度 400gal。

$1\text{gal} = 10\text{mm/s}^2$, $1g$ (重力加速度) = 9.81m/s^2 , 因此 $1g = 981\text{gal}$ 。

地震是非常复杂的三维运动,不仅在平面上有互相垂直的双向水平运动,而且还有竖向运动,竖向地震最大加速度大约取水平分量的 30% ~ 50%。

地震也是一种随机荷载,有许多不确定性。地震产生的地面运动,同一地震点的真实反应结果也非常离散,规范采用的反应谱曲线,是很多互不相同的真实反应谱的平均值,不同地点的地震波形也是完全不同的。

风荷载对高耸结构的作用与结构自重基本无关,与结构刚度间接有关,而地震作用与结构自重、刚度有密切关系,结构自重、刚度越大,受到的地震力也越大,所以结构设计必须考虑,并处理好相互关系。

计算地震作用时,也应该考虑同时有 1/4 最大风的作用。

第三节 高耸结构抗振设计要求

高耸结构是高柔结构,与其他类型的结构比较,特点是明显的,高层建筑虽然也很高,水平荷载起主要作用,其刚度总体上要大于高耸结构。因此,高耸结构的水平荷载引起的结构反应特别强烈,在强风或地震作用下,结构产生剧烈振荡,引起构件断裂或留下残余变形,整个结构也有可能被风吹倒或地震震倒。

一、风灾和地震灾害

高耸结构两种主要荷载和作用力中,风荷载比较频繁,但风力不是很大,真正强风次数不多。我国东南沿海常受台风袭击,多发生于每年的夏秋之季,使地动山摇的特大台风,要几十年才有一次。一次强台风吹过,结构剧烈摇晃,导线拉断,甚至被吹倒不乏其例,我国输电线路铁塔被吹倒之事,几乎每年都有发生,烟囱被吹歪或吹倒则更多。所以,风灾事故的频繁,经济损失的惨重已引起人们的高度重视。高耸结构的抗风设计是非常有必要的。

强风引起灾害显而易见,但长期的、频繁的弱风作用也不能忽视,它使高耸结构某些部位产生疲劳,久而久之导致破坏,失稳,甚至倒塌。

地震灾害对高耸结构来讲略好一些,首先仅局限于某些地带,其次没有像风那样频繁,尽管大地震的破坏性很大,损失更为惨重,但是风灾的破坏总体上还是占多数。

二、结构设计的要求

高耸结构设计时要求在强风或地震作用下不会发生破坏,倒塌,结构开裂,局部失稳,存在残余变形。为了保证结构安全,在设计风荷载或地震加 1/4 风荷载作用下,整体结构或构件都要满足强度、刚度、稳定要求。

高耸结构设计时还应注意微风或横风共振、风振下的结构疲劳现象。

对带有塔楼的电视塔、瞭望塔等,人们上塔旅游瞭望,这类塔的设计要求是限制结构振动加速度,以满足人们感觉上的舒适度。

风荷载与地震作用都是动力荷载,都会使结构产生振动,振动频率、振动加速度和振动持续时间,都会影响人体感觉,根据国外资料及国内学者意见,人体感觉上的舒适度界限标准为:

使人们烦恼的界限为 15gal

非常烦恼的界限为 50gal

不能忍受的界限为 150gal

因此,对人们能够上去旅游、瞭望的高耸结构设计,还必须满足舒适度要求,设计中要求对结构进行振动控制。

三、风振控制的重要性

风荷载与地震作用都是高耸结构的主要动力荷载,风荷载对高耸结构的影响更大。

风荷载的影响可从风速功率谱分析中得到,风的卓越周期一般在 20 ~ 60s 之间,当高耸结构自振频率靠近风的卓越频率时,风振的影响就越显著,高耸结构的自振频率范围在 0.05 ~ 1Hz 之间,即自振周期为 20 ~ 1s 之间,风振的影响非常显著。

地震谱密度的扩展范围为周期若干秒到 0.08s 之间,卓越周期为 0.5s 左右,与风速功率谱比较相差很多。低矮的建筑物刚度相对较大,其周期约在 0.5 ~ 0.1s 之间,比较靠近地震卓越周期,地震作用影响较大,而风荷载影响较小。高耸结构越是高大而柔,受风控制机会愈大,因此,现代高耸结构,特别是电视塔越造越高,刚度相对减小,风振控制更加迫切,也更加重要。

第四节 高耸结构的动力反应

高耸结构有两种基本类型:塔式结构和桅式结构。有两种主要动荷载:风荷载与地震作用。不同荷载作用下,不同类型的结构,其动力反应也是不同的。

脉动风荷载作用下(包括顺风向、横风向旋涡干扰力),引起高耸结构的振动反应(包括动内力、动位移、振动加速度)。地震作用下(包括两个方向水平地震和竖向地震),也会引起结构动内力、动位移、振动加速度等振动反应。风荷载作用是以外荷载形式沿结构高度方向分布,地震作用是通过地面运动加速度使结构产生惯性力,两种不同方式的动力源,结构动力响应也不相同。

高耸结构振动反应与结构本身的动力特性有关,结构的材料性质、质量分布、结构刚度和结构形式都将影响结构的动力特性。风荷载与地震作用的计算也离不开高耸结构的自振频率(周期)、各阶振型等。对于塔式结构,构件截面和各部分尺寸确定后,根据其质量分布、阻尼系数、结构刚度,比较容易求得结构自振频率(周期)、各阶振型。对于桅式结构,因其非线性因素特别强,没有固定的自振频率(周期),同一个桅式结构,在不同强度等级、不同作用方向的风荷载或地震作用下,其动力特征是不一样的。桅式结构振动事实上是非线性振动。

研究高耸结构振动控制,既要研究动力源风荷载和地震作用,也要研究高耸结构的动力特性,以及在荷载作用下的动力响应,使结构振动得到有效控制。

第五节 高耸结构振动控制概念

高耸结构设计目前正朝着日益增高、轻质高强的方向发展。由于结构高度上升,刚度、阻尼下降,在横向荷载作用下,结构摆动加大,影响正常使用。

高耸结构抗风振、抗地震设计,采用增加结构自身刚度的方法不是经济合理的,这将大大增加工程造价,于是结构振动控制方法应运而生。结构振动控制的概念是:在高耸结构上,某个部位设置一些控制装置,在结构振动时,被动或主动地施加一组控制力,减小或抑制了结构振动反应,满足了结构变形和舒适度要求。结构振动控制装置的造价要比增加结构刚度的造价小很多,应该说是一种低花费、高效益的方法,结构振动控制设计改变了传统的以结构自身刚度抗振的设计方法,有划时代的意义。

高耸结构振动控制主要分为被动控制(Passive Control),主动控制(Active Control),以及介于两者之间的半主动控制(Semi-Active Control)三种。被动控制不需要外加能源,结构振动时带动控制装置运动,从而产生一组控制力抑制结构的振动,因控制力是被动产生的,故称被动控制。图 1-3 为被动控制的工作简图,当高耸结构受到外力 $P(t)$ 作用引起结构响应 $S(t)$ (位移、速度、加速度、变形)时,依靠质量的惯性对结构施加控制力。

主动控制需要外加能源,图 1-4 为主动控制的工作简图,当高耸结构受到荷载随机过程向量 $P(t)$ 作用时,控制机构内的传感器将结构响应 $S(t)$ (位移、速度、加速度、变形)拾起,计算机接受此信息,加工后传给驱动设备,受电脑控制的设备选择最优控制力施加给结构,控制结构的振动,因控制装置按最优控制规律,由外加能源主动施加控制力,故称主动控制。

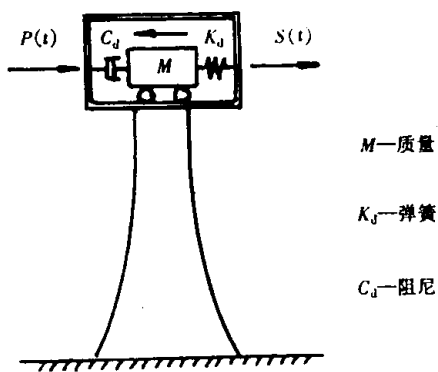


图 1-3 被动控制工作简图

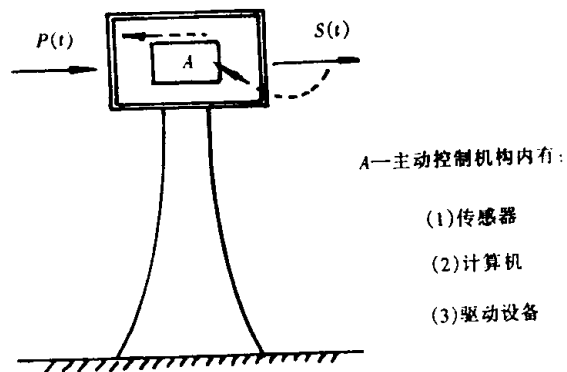


图 1-4 主动控制工作简图

半主动控制基本上是被动控制,但控制过程中,由外加能源调整控制机构的参数,从而调节控制力的作用。

在这三种控制中,主动控制需要外加能源,控制机构比较复杂,理论上主动控制效果最好,实践上尚未在高耸结构中实现,目前国内外所采用的结构振动控制,大多数还是被动控制。

我国目前对高耸结构振动控制的理论与工程实践,多数为被动控制,有几座电视塔

已经装设了被动控制机构,还有几座即将装设这种机构,至于主动控制研究尚在理论分析和试验阶段,不久可望突破。

被动控制机构有很多种类型,其中研究和应用最多的有下列三种控制方式:

- (1) 调频质量阻尼器(Tuned Mass Damper 简称 TMD)
- (2) 调频液体阻尼器(Tuned Liquid Damper 简称 TLD)
- (3) 调频弹簧阻尼器(Tuned Spring Damper 简称 TSD)

同济大学的研究人员对这三种控制方式作了大量研究,包括理论分析,参数研究,风洞试验和振动台模拟试验,并且将在或已经在 138m 嘉定电视塔,158m 奉贤电视塔,168m 青浦电视塔,212m 汕头电视塔和 260m 洛阳电视塔、272m 开封电视塔设计中应用。

在 TMD 的研究中,用水箱作为控制器的质量块,振动时也应考虑水的振荡作用,于是出现了 TMD 和 TLD 联合作用的控制装置 TMLD。为了减少 TMD 在振动过程中的摩阻力,于是衍化出悬挂水箱的 TMD(Pendulous Tank as TMD 简称 PTTMD)。

此外,拉索(Tendon)控制方式,摆式减振器(Pendular Mass Damper 简称 PMD)控制方式,耗能器(Dissipators)控制方式,U 形水箱——第二类调频液体阻尼器(Tuned Liquid Column Damper 简称 TLCD)等也在研究或部分工程实践中。

第二章 风荷载及风振效应

第一节 概 述

风是地球表面的空气运动,由于在地球表面不同地区的大气层所吸收的太阳能量不同,造成了同一海拔高度处大气压的不同,空气从气压大的地方向气压小的地方流动,于是就形成了风。

工程结构中涉及到的风主要有两类:一类是大尺度风(温带及热带气旋);另一类是小尺度的局部强风(龙卷风,雷暴风,焚风,布拉风及类似喷气效应的风等)。

一、大尺度风

温带气旋(Extratropical Cyclone)是由于高山阻碍对大尺度气流的影响,或者由于具有相对均匀物理特性的空气团在大范围内相互作用所引起的,温带气旋常发生于纬度 35° 到 70° ,其宽度可达1500km。

热带气旋(Tropical Cyclone)通常在纬度 5° 到 20° 的热带海洋中生成,其能量主要来自水蒸汽凝结时所释放的潜热,其直径可达几百公里,旋涡中心可达数十公里,最强风多发生于风眼附近。风速超过120km/h的热带气旋又称为飓风(Hurricane),飓风在远东称为台风(Typhoon),在澳洲及印度洋地区则称为气旋(Cyclone)。

台风对我国东南沿海一带影响比较大,每年形成台风(8~11级大风)和强台风(12级以上的大风)的次数平均有20多次,大部分在7,8,9月份。在我国登陆的台风路线大致有两条,一条从菲律宾以东洋面向西进入南海,在海南岛登陆,严重影响华南沿海地区;另一条在菲岛以东洋面向西北方向移动,有时在台湾、福建登陆,有时在辽宁南部登陆,严重影响华东沿海地区。

二、小尺度的局部强风

属于小尺度局部强风的有龙卷风,雷暴风,焚风,布拉风及类似喷气效应的风等。

龙卷风(Tornado)是由直径可达300m的空气旋涡所组成,它是在强烈的雷暴风中产生的,相对地面的时风速可达30~100km,它的水平尺度在地面处的直径一般在几米到几百米之间,最大可达1000m,垂直尺度差别很大。龙卷风持续时间不长,只有几分钟到几十分钟,但破坏力很大,是一种破坏力最强的小尺度风(附表1-2)。

雷暴风(Thunderstorm)也是由于水蒸汽在高空的冷凝所引起的,其瞬时风速一般为54~90km/h,风速极大时甚至可达144km/h,其发生时还伴有闪电雷鸣和阵雨。

焚风(Foehn)也称热燥风,是由于下沉运动使空气温度升高、湿度降低的风,常出现在山脉的背风面。

布拉风(Bora)是常发生于由陡峭斜坡隔开的高地与平地之间的风,另外还有由于地形的影响,使气流收敛,类似喷气效应的风(Jet-Effect)。

三、我国的风气候形势

我国的地理位置和气候条件造成的大风为：夏季东南沿海多台风，内陆多雷暴风，冬季北部地区多寒潮大风。其中沿海地区的台风造成的风灾事故较多，影响范围也较大，雷暴风可能引起小范围的风灾事故。

我国的风气候形势简单归纳为：

(1) 台湾、海南和南海诸岛，地处海洋，每年都会受到台风的直接影响，是我国最大风区。

(2) 东南沿海是我国大陆上的大风区，这里也经常受到台风影响，风速梯度由沿海指向内陆，但削弱很快，在离海岸 100km 处，风速减弱一半。

(3) 我国东北、华北和西北地区是次大风区，风速梯度由北向南，与寒潮入侵路线一致。华北地区夏天受季风影响，风速有可能超过寒潮风，大风时多伴雷雨，但时间短、影响范围小。

(4) 青藏高原地势高，平均海拔达 4 ~ 5km，也属较大风区。

(5) 长江中下游、黄河中下游是小风区，一般台风到此地区已大为减弱，寒潮风到此一线也是强弩之末。但个别地区在夏天雨季常伴有大风，尤其在雹线处的大风，其势更猛。

(6) 云贵高原处于东亚大气环流的“死水区”，空气经常近于“静止状态”。加之地形闭塞，形成我国最小的风区。

第二节 风的基本特性

一、大气边界层气流

大气流过地面时，地面上的各种粗糙元，如草，沙粒，树木，房屋等会使大气流动受阻，这种摩擦阻力由于大气中的湍流而向上传递，并随高度的增加而逐渐减弱，达到某一高度后便可忽略。在此高度下，靠近地球表面、受地面摩擦阻力影响的大气层区域，称为大气边界层 (Atmospheric Boundary Layer)，又称摩擦层，而此高度称为大气边界层厚度。这个高度随气象条件、地形、地面粗糙度而变化，大致为 300 ~ 1000m。

在大气边界层厚度以上，风才不受地表之影响，能够在气压梯度作用下自由流动，这个风速叫梯度风速，因此大气边界层厚度也称梯度风高度。

在高耸结构研究设计中，人们主要感兴趣的是大气边界层内的气流(风)，图 2-1 是 Van der Hoven 在美国纽约附近的 Brookhaven 100m 高度处，测得的水平风速能量谱。尽管这个测量结果严格说来仅适合于某个特定地点、特定高度，但它对风速变化特性提供了非常有用的信息。

此能量谱反映了湍流能量在各个频率成份所占的比重，其中 f 为涡旋频率， T 为相应的周期。从图中可以明显看到，各频率成份所对应的周期，在约 16min 到 2h 这一时段出现所谓的谱谷 (Spectral Gap)，谷底在 1h 左右。故一般规定以周期 1h 处分界，左边为宏观气象带 (Macrometeorological)，又称候风带，右边为微观气象带 (Micrometeorological)，又称阵风带。对于候风带，其能谱有三个能量集中的峰值，对应周期分别为一年、四天和一天左右。由于建筑物的自振周期至多也只有几秒这样的数量级，比风速候风带中三个峰值的频率成份所对应