

SIMPLIFIED SERIES OF
CIVIL ENGINEERING

清华大学土木工程系组编

丛书主编 崔京浩

陈道政 著

简明土木工程系列专辑

高楼顶钢塔动力性能与 减振控制

中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

知识产权出版社
www.cnpr.com



TU973

49

2006

ified Series of Civil Engineering

清华大学土木工程系组编

丛书主编 崔京浩

陈道政 著

简明土木工程系列专辑

高楼顶钢塔动力性能与 减振控制

中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



知识产权出版社
www.cnipr.com



内容提要

本书系“简明土木工程系列专辑”中的一本。本书在介绍工程结构减振控制的基本理论及减振设计方法的基础上,结合我国规范,针对我国近年来出现的高楼顶加钢塔这一结构形式的动力特性进行了研究,并以弹性动力分析法为基础,在分析影响高楼顶钢塔地震作用的因素,并将其转化为可供分析使用的参数——质量、刚度和高度,进而找出这些参数对地震作用放大系数影响规律,提出了高楼顶加钢塔结构体系的简化计算方法。在工程应用方面,选取两个工程实例,对组合结构体系的整体阻尼比、减振计算及设计、鞭梢效应等都给出了详细的计算方法。

本书可供土木工程专业研究生及大学教师参考,也可供结构设计人员及从事抗震减振的研究人员使用和参考。

选题策划: 阳 森 张宝林 E-mail: yangsanshui@vip.sina.com; z_baolin@263.net

责任编辑: 阳 森 张宝林

文字编辑: 彭天放 曹 鹏

图书在版编目(CIP)数据

高楼顶钢塔动力性能与减振控制 / 陈道政著. —北京:

中国水利水电出版社: 知识产权出版社, 2006

(简明土木工程系列专辑 / 崔京浩主编)

ISBN 7-5084-4187-7

I. 高... II. 陈... III. 高层建筑—钢结构—抗震设计 IV. TU973

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 152189 号

简明土木工程系列专辑

高楼顶钢塔动力性能与减振控制

陈道政 著

中国水利水电出版社 出版发行 (北京市西城区三里河路 6 号; 电话: 010-68331835 68357319)
知识产权出版社 (北京市海淀区马甸南村 1 号; 电话、传真: 010-82000893)

北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643

全国各地新华书店和相关出版物销售网点经销

北京市兴怀印刷厂印刷

850mm×1168mm 32 开 6.875 印张 185 千字

2006 年 12 月第 1 版 2006 年 12 月第 1 次印刷

印数: 0001—3500 册

定价: 15.00 元

ISBN 7-5084-4187-7

版权所有 侵权必究

如有印装质量问题, 可寄中国水利水电出版社营销中心调换

(邮政编码 100044, 电子邮件: sales@waterpub.com.cn)

土木工程是一个历史悠久、生命力强、投入巨大、对国民经济具有拉动作用、专业覆盖面和行业涉及面极广的一级学科和大型综合性产业，为它编一套集新颖性、实用性和科学性为一体的“简明系列专辑”，既是社会的召唤和需求，也是我们的责任和义务。

新颖性——反映新标准、新规程、新规范、新理论、新技术、新材料、新工艺、新方法

实用性——深入浅出，让人一看就懂，一懂能用，不是手册，胜似手册

科学性——编写内容均有出处

——摘自《简明土木工程系列专辑》总序

清华大学土木工程系组编

简明土木工程系列专辑

编 委 会

名誉主编 陈肇元 袁 驷

主 编 崔京浩

副主编 石永久 宋二祥

编 委 (按汉语拼音排序)

陈永灿 胡和平 金 峰 李庆斌

刘洪玉 钱稼茹 王志浩 王忠静

武晓峰 辛克贵 阳 森 杨 强

余锡平 张建民 张建平

编 辑 办 公 室

主 任 阳 森

成 员 张宝林 董拯民 彭天赦 莫 莉

张 冰 邹艳芳

总 序

国务院学位委员会在学科简介中为土木工程所下的定义是：“土木工程（Civil Engineering）是建造各类工程设施的科学技术的统称。它既指工程建设的对象，即建造在地上、地下、水中的各种工程设施，也指所应用的材料、设备和所进行的勘测、设计、施工、保养、维修等专业技术”。土木工程是一个专业覆盖面极广的一级学科。

英语中“Civil”一词的意义是民间的和民用的。“Civil Engineering”一词最初是对应于军事工程（Military Engineering）而诞生的，它是指除了服务于战争设施以外的一切为了生活和生产所需要的民用工程设施的总称，后来这个界定就不那么明确了。按照学科划分，地下防护工程、航天发射塔架等设施也都属于土木工程的范畴。

土木工程是国家的基础产业和支柱产业，是开发和吸纳我国劳动力资源的一个重要平台，由于它投入大、带动的行业多，对国民经济的消长具有举足轻重的作用。改革开放后，我国国民经济持续高涨，土建行业的贡献率达到 1/3；近年来，我国固定资产的投入接近甚至超过 GDP 总量的 50%，其中绝大多数都与土建行业有关。随着城市化的发展，这一趋势还将继续呈现增长的势头。

相对于机械工程等传统学科而言，土木工程诞生得更早，其发展及演变历史更为古老。同时，它又是一个生命力极强的学科，它强大的生命力源于人类生活乃至生存对它的依赖，甚至可以毫不夸张地说，只要有人类存在，土木工程就有着强大的社会需求和广阔的发展空间。

随着技术的进步和时代的发展，土木工程不断注入新鲜血液，呈现出勃勃生机。其中工程材料的变革和力学理论的发展起

着最为重要的推动作用。现代土木工程早已不是传统意义上的砖瓦灰砂石，而是由新理论、新技术、新材料、新工艺、新方法武装起来的为众多领域和行业不可或缺的大型综合性学科，一个古老而又年轻的学科。

综上所述，土木工程是一个历史悠久、生命力强、投入巨大、对国民经济具有拉动作用、专业覆盖面和行业涉及面极广的一级学科和大型综合性产业，为它编写一套集新颖性、实用性和科学性为一体的“简明系列专辑”，既是社会的召唤和需求，也是我们的责任和义务。

清华大学土木工程系是清华大学建校后成立最早的科系之一，历史悠久，实力也比较雄厚，有较强的社会影响和较广泛的社会联系，组编一套“简明土木工程系列专辑”，既是应尽的责任也是一份贡献，但面对土木工程这样一个覆盖面极广的一级学科，我们组编实际起两个作用：其一是组织工作，组织广大兄弟院校及设计施工部门的专家和学者们编写；其二是保证质量的作用，我们有一个较为完善的专家库，必要时请专家审阅、定稿。

简明土木工程系列专辑包括以下几层含义：简明，就是避免不必要的理论证明和繁琐的公式推导，采用简洁明快的表述方法，图文并茂，深入浅出，浅显易懂；系列，指不是一本书而是一套书，这套书力争囊括土木工程涵盖的各个次级学科和专业；专辑，就是以某个特定内容编辑成册的图书，每本书的内容可以是某种结构的分析与计算，某个设计施工方法，一种安装工艺流程，某种监测判定手段，一个特定的行业标准，等等，均可独立成册。

这套丛书不称其为“手册”而命名为“系列专辑”，原因之一是一些特定专题不易用手册的方法编写；原因之二是传统的手册往往“大而全”，书厚且涉及的技术领域多，而任何一个工程技术人员在某一个阶段所从事的具体工作又是针对性很强的，将几个专业甚至一个项目的某个阶段集中在一本“大而全”的手册势必造成携带、查阅上的不方便，加之图书的成本过高，编写机构臃肿，组织协调困难，出书及再版周期过长，以致很难反映现

代技术飞速发展、标准规范规程更新速度太快的现实。考虑到这些弊端，这套系列专辑采用小开本，在选题上尽量划分得细一些，视专业、行业、工种甚至流程的不同，能独立成册的绝不合二为一，每本书原则上只讨论一个专题，根据专题的性质和特点有的书名仍冠以“手册”两字。

这套系列专辑的编写严格贯彻“新颖性、实用性、科学性”三大原则。

新颖性，就是充分反映有关新标准、新规程、新规范、新理论、新技术、新材料、新工艺、新方法，老的、过时的、已退出市场的一律不要。体现强劲的时代风貌。

实用性，就是避免不必要的说理和冗长的论述，尽可能从实用的角度用简洁的语言以及数据、表格、曲线图形来表述；深入浅出，让人一看就懂，一懂能用；不是手册，胜似手册。

科学性，就是编写内容均有出处，参考文献除国家标准、行业标准、地方标准必须列出以外，尚包括引用的论文、专著、手册及教科书。

这套系列专辑的读者对象是比较宽泛的，它包括大专院校师生，土木工程领域的管理、设计、施工人员，以及具有一定阅读能力的建筑工人。它既可作为土建技术人员随身携带及时查阅的手册，又可选作大专院校、高职高专的教材及专题性教辅材料。

崔京浩

2005年10月于清华园

崔京浩，男，山东淄博人。1960年清华大学土建系毕业，1964年清华大学结构力学研究生毕业，1986~1988年赴挪威皇家科学技术委员会做博士后，从事围岩应力分析的研究。先后发表论文150多篇，编著专业书4本，参加并组织编写巨著《中国土木工程指南》，任编辑办公室主任，并为该书撰写绪论；主持编写由清华大学土木工程系组编的“土木工程新技术丛书”和“简明土木工程系列专辑”，并任主编。曾任清华大学土木系副系主任，现为中国力学学会理事，《工程力学》学报主编，享受国务院特殊津贴。

前 言

工程结构减振控制，是工程结构抗震抗风的一个新领域，包括隔震、消能减振以及各种被动控制、主动控制、混合控制等。该控制方法不是采用加强结构的传统抗震方法来提高结构的抗震抗风能力，而是通过调整或改变结构动力参数的途径，使结构的振动反应明显衰减，并能有效地保护结构及内部设施在强地震中的安全，或在其他外干扰力作用下使结构满足更高的减震（振）要求。该方法已被越来越广泛地应用于工程结构的抗震抗风和减振降噪等领域中，并显示出明显的减震（振）效果，取得了显著的社会效益、技术进步效益和经济效益，引起了国内外学术界、工程界的广泛关注。这种方法为工程结构的减振提供了一条崭新的途径。在很多情况下，该方法比传统抗震抗风方法更加有效、合理和经济。随着社会的发展，人们对抗震减振抗风的要求日益提高，工程结构减振控制技术的应用将会越来越广泛。可预言，未来的世纪将是工程结构减振控制技术被广泛应用的世纪，也是工程结构抗震抗风技术步入更高水平的世纪！

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

高耸结构的主要荷载为风荷载，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，在这两种荷载作用下，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——为保证登塔楼观光瞭望的人们的舒适感，结构在大风时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，那么将会使工程造价大大增加。

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技术措施。

高耸结构振动控制是近年来才发展起来的新兴学科，国外已有很多研究和工程实例，国内也在开展这方面研究，并发表了不少与振动控制相关的论文。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。可以说，结构振动控制使高耸结构设计上了一个新台阶。

近年来，各地相继出现了一些建造在高层建筑上作装饰用或作某些特殊用途的钢结构塔楼，它属于高耸结构的一种特殊结构形式。国内外关于高楼顶加钢塔结构体系的研究很少，更缺少系统性的研究，也无设计规范可供参考。因此，研究高楼顶加钢塔结构体系，并给出高楼顶钢塔在地震作用下的简化计算方法，是工程设计实践不断提出的迫切要求。本书正是应这种要求，在总结了自己研究成果的基础上提出了一些理论、方法。其主要内容如下：

(1) 从结构阻尼理论出发，根据能量守恒原理推导出高楼顶加钢塔这一由两种不同材料组成的组合结构体系的整体阻尼比。

(2) 从结构动力学的角度出发，研究高楼顶加钢塔结构体系振动时产生鞭梢效应的原因，并且提出了消除或减轻鞭梢效应的措施。

(3) 在前人研究的基础上，提出了从系统（钢塔）的地震反应谱分析方法，考虑了主（高层建筑）从系统的交互作用，提出了预测主从系统最大响应的方法。考虑了地震无限作用时间和瞬

态响应情况,在本方法中,假设地面运动为静态过程,主从复合系统的最大绝对或相对加速度响应可以获得;使用所得结果,提出了从系统最大响应的模态复合规则,本书所述方法建立在模态叠加原理基础上,可以用来确定从系统的相对加速度和输入加速度的最大值。

(4) 以弹性动力分析法为基础,在分析影响高楼顶钢塔地震作用的因素,并将其转化为可供分析使用的参数——质量、刚度和高度,进而找出这些参数对放大系数影响规律的基础上,提出了高楼顶加钢塔结构体系这类建筑的简化计算方法。该方法便于工程应用,可供高楼顶钢塔计算和设计时参考。

(5) 在工程应用方面,本书选取两工程实例,分别用精确方法与本书提出的简化计算方法计算高楼顶钢塔的地震作用,通过对比计算结果,验证了简化方法的适用性。并且以西安某科研楼钢结构塔楼工程为背景,研究了高楼上钢塔风荷载及地震作用的计算,讨论了高楼上钢塔的振动特性以及安装粘滞流体阻尼器对钢塔风荷载和地震作用振动响应的影响。计算结果表明,在地震和风作用下,安装粘滞流体阻尼器可以有效地减小高塔在风荷载和强震作用下的振动响应,使其能满足规范和正常使用的要求。

本书的很多研究工作是作者在东南大学攻读博士学位时所做,在此向我的导师李爱群教授表示感谢;同时书中一些研究成果已在刊物上发表,在此对于合作者所作的工作表示感谢;叶正强博士、丁幼亮博士提供了部分资料,在此表示谢意。研究生李兰、江莉在本书的编写过程中做了部分校改工作,在此表示感谢。最后,感谢丛书主编崔京浩教授、编辑办公室主任阳淼女士和编辑彭天赦先生的大力帮助。

陈道政

2006年9月

目 录

总序

前言

第 1 章 工程结构减振控制的基本概念 1

第 1 节 减振控制技术的概念及发展 / 1

第 2 节 基础隔震 / 3

第 3 节 结构的被动控制减振体系 / 5

第 4 节 结构的主动控制减振体系 / 7

第 5 节 半主动控制和混合控制 / 8

第 6 节 结构消能减振体系的分类 / 10

第 7 节 消能器的分类 / 12

第 8 节 国外的研究和应用现状 / 13

第 9 节 国内的研究和应用现状 / 18

第 2 章 高楼顶加钢塔结构体系的振动分析 20

第 1 节 高楼顶加钢塔结构体系的研究与应用现状 / 21

第 2 节 高楼顶钢塔结构的动力特性 / 25

第 3 节 高楼顶加钢塔结构体系的地震响应分析 / 28

第 4 节 高楼顶钢塔风振响应简化计算 / 41

第 5 节 本章小结 / 44

第 3 章 高楼顶钢塔地震响应的鞭梢效应 45

第 1 节 突出屋面小塔楼的地震作用和规范方法分析 / 45

第 2 节 高楼顶钢塔鞭梢效应产生原因的理论分析 / 48

第 3 节 高楼顶钢塔鞭梢效应的算例分析 / 54

第 4 节 本章小结 / 56

第 4 章 高楼顶加钢塔结构体系整体阻尼比的分析与研究 ... 58

第 1 节 概述 / 58

第 2 节	阻尼模型/ 59
第 3 节	瑞雷阻尼及其在弹塑性动力分析中的拓展形式/ 63
第 4 节	阻尼比/ 66
第 5 节	阻尼研究的若干关键问题分析/ 68
第 6 节	高楼顶加钢塔整体结构阻尼比的计算/ 72
第 7 节	本章小结/ 77
第 5 章	高楼顶加高塔结构体系的简化抗震计算方法 79
第 1 节	简化计算公式的构思/ 80
第 2 节	计算实例分析/ 81
第 3 节	高楼顶钢塔结构体系简化计算公式的推导/ 99
第 4 节	计算方法的比较/ 100
第 5 节	本章的计算方法与两个试验数据的对比/ 102
第 6 节	本章小结/ 107
第 6 章	高楼顶加钢塔结构体系的减振控制研究与应用 108
第 1 节	采用粘滞流体阻尼器的建筑结构消能减振 设计原理/ 109
第 2 节	采用粘滞流体阻尼器的建筑结构消能减振 设计方法/ 112
第 3 节	阻尼器的构造及安放位置确定/ 116
第 4 节	微波发射塔在风荷载作用下的振动和控制分析/ 125
第 5 节	微波发射塔在地震作用下振动和控制分析/ 132
第 6 节	钢塔楼与主体建筑连接处的非线性有限元分析/ 135
第 7 节	宿迁市某综合楼采用粘滞流体阻尼器的消能 减振设计/ 146
第 8 节	北京某过街天桥采用 TMD 系统的消能减振设计/ 157
第 9 节	本章小结/ 170
附录 1	集成化通用的结构分析与设计软件 SAP2000 的 介绍 172
第 1 节	一般特性/ 173
第 2 节	绘图功能/ 174

第 3 节	单元库/	174
第 4 节	绘图命令/	176
第 5 节	编辑特点/	177
第 6 节	分析选项/	178
第 7 节	设计选项/	179
第 8 节	显示和输出功能/	181
第 9 节	导入和导出格式/	182
第 10 节	其他特性/	183

附录 2	国际领先的建筑结构分析与设计软件 ETABS 的	
	介绍	184
第 1 节	概述/	184
第 2 节	CSI 与 ETABS/	184
第 3 节	ETABS 主要功能介绍/	186
第 4 节	ETABS 的分析功能/	189
第 5 节	ETABS 的设计功能/	191
参考文献		193

第 1 章 工程结构减振控制的基本概念

第 1 节 减振控制技术的概念及发展

地震发生时，地面振动引起结构的地震响应，建筑物就会发生振动。我国是世界上地震灾害严重的国家之一，20 世纪以来发生的破坏性地震达数千次，这给人民的生命财产带来了巨大的损失，30 年前震惊中外的唐山地震的教训尤为沉痛。为了减轻地震灾害，我国的地震工程工作者长期致力于提高建筑抗震能力的研究，形成了一套较完整的抗震理论并应用于工程实践。这种传统的建筑抗震设计致力于保证结构本身具有足够的强度、刚度和延性，使所设计的建筑做到“小震不坏，中震可修，大震不倒”，以达到减轻地震灾害的目的，这种设计所付出的代价是很大的，这种传统抗震方法在工程实践中被证明是有效的，但也存在以下问题：

(1) 结构的安全性难以保证。传统抗震方法以既定的“设防烈度”作为设计依据，由于地震的随机性，建筑结构的破损程度及倒塌的可能性难以控制，当发生突发性超烈度地震时，房屋可能遭到严重破坏。

(2) 建筑费用和成本大幅度增加。传统方法是在设计时提高材料强度、加大构件（结构）刚度，其结果是断面越大，刚度越大，而使用面积减少，建筑物自重增大，地震作用亦随之增大，所需的断面及配筋也就越大，这一做法在大大增加结构造价的同时，结构的地震响应却未能得到有效抑制。

(3) 适用范围受到限制。传统抗震方法采用的是延性结构体系，允许结构部件在强震时发生比较大的塑性变形，以消耗地震

能量,减轻地震响应,这种方法对于某些不容许在地震中出现破坏的结构,或内部有贵重装饰、重要仪器设备的结构是不适用的。

(4) 施工难度大。结构构件和节点的钢筋配置过密,9度区钢筋甚至无法放置。

(5) 建筑物的高度受到限制。

随着社会的发展,对建筑物抗震设计的安全性和适用性提出了更为严格的要求,特别是工业向高精度技术发展,采用传统的工程抗震设计方法有时不能适应工程的实际需要。为此采取经济、高效、可靠的措施来减少地震和风荷载造成的损失,已经成为科学家和工程师们热衷研究的课题。现在及未来的建筑物正向高层、大跨度、高柔(例如电视塔越建越高)等方向发展,而对结构物进行振动控制就显得尤为重要。

自1972年美籍华裔学者姚治平(J. T. P. Yao)教授明确提出土木工程结构控制的概念以来,国内外很多学者在结构控制的方法、理论、试验和应用等方面取得了大量研究成果。隔震消能和各种减振控制体系具有传统抗震体系所难以比拟的优越性,即明显有效减震(能使结构地震响应减到10%或更低),其中已有多项技术成功地应用于工程实践。国际上,美国、日本、澳大利亚、新西兰和法国等国家在这方面走在前列。国内学者自20世纪80年代初期以来,紧跟国际上的研究步伐,对夹层橡胶垫隔震结构、粘弹性阻尼器、TMD和TLD、耗能支撑、层间隔震、主动控制等方面的研究取得了一系列成果。经过20多年的发展,结构控制现在正朝着研制高效的被动控制装置、发展以参数控制为主的半主动控制和探索结构智能控制的方向发展。结构控制的概念几经完善,具体可表述为:在工程结构的特定部位装设某种装置(例如隔震垫等)或某种机构(例如消能支撑、消能剪力墙、消能节点、消能器等)或某种子结构(例如调频质量等)或施加外力(外部能量输入)或调整结构的动力特性,使工程结构在地震(或风)的作用下,其结构的动力响应(加速度、速度、

位移)得到合理的控制,从而确保结构本身及结构中的人、仪器设备、装修等的安全或处于正常的使用状态。简言之,通过对结构施加控制机构,由控制机构与结构共同承受振动作用,以调谐和减轻结构的振动响应,使结构在外界干扰作用下的各项响应值被控制在允许范围内,可简单地用一个结构动力方程予以说明:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = F(t) - MI\ddot{x}_g(t) \quad (1.1)$$

式中: M 、 C 和 K 分别为结构的质量、阻尼和刚度矩阵; I 为单位列向量; $F(t)$ 为外部作用(包括地震、风或可能施加的其他外力)列向量; $\ddot{x}(t)$ 、 $\dot{x}(t)$ 和 $x(t)$ 分别为结构在外部作用(或荷载)下的加速度、速度和位移反应列向量; $\ddot{x}_g$ 为地面的地震加速度反应。

结构控制就是通过调整结构的自振频率 ω 或自振周期 T (通过改变 K 和 M), 或增大阻尼 C , 或施加外力 $F(t)$, 来大大减少结构在地震(或风)作用下的反应。设 $\ddot{x}_{\max}$ 、 $\dot{x}_{\max}$ 和 $x_{\max}$ 分别为确保结构及结构中的人、设备及装修设施等的安全和处于正常使用状态所允许的结构加速度、速度和位移反应值, 则求解公式(1.1), 只要满足式(1.2), 即能确保结构及结构中的人、设备及装修设施等的安全和处于正常使用状态:

$$\ddot{x} \leq \ddot{x}_{\max}, \quad \dot{x} \leq \dot{x}_{\max}, \quad x \leq x_{\max} \quad (1.2)$$

工程结构减振控制新体系包括隔震体系、结构被动控制体系、结构主动控制体系及混合控制技术。

第2节 基础隔震

基础隔震是指在建筑物与基础之间设置一层具有足够可靠度的“隔震层”(又称为“隔震系统”), 以控制地面运动向上部结构的传递; 它包括上部结构、隔震装置和下部结构三部分。基础隔震装置具有橡胶垫和滑动支座。

基础隔震技术是建筑物结构减振防灾的有效手段, 它不需要