

# 结构 振动控制

(日) 背户一登 著  
马立新 李孜 译

構造物  
の振動制御



 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

# 结构振动控制

(日)背户一登 著  
马立新 李 孜 译

机械工业出版社

本书主要介绍了结构振动控制、减振方法和减振装置、多自由度体系的模态分析与减振适用于结构控制的理论以及低元化模型的建立、主动型动力吸振器、土木结构的控制；建筑结构的控制。书中还涉及建筑物的抗震等内容。

本书适用于建筑、桥梁工程中结构设计的工程技术人员，以及与结构有关的其他工程技术人员参考。

Copyright © 2006 by Kazuto Seto & Corona Publishing Co., Ltd.  
All rights reserved. Chinese translation rights arranged with Corona Publishing Co., Ltd. Tokyo, Japan through TOHAN CORPORATION Tokyo, Japan.

本书的中文简体字版由机械工业出版社出版，未经出版者书面允许，本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有，翻印必究。

· 本书版权登记号：图字 01-2009-5474 号

书名原文：構造物の振動制御

英文书名：Vibration Control of Structure

## 图书在版编目 (CIP) 数据

结构振动控制/ (日) 背户一登著; 马立新, 李孜译. —北京: 机械工业出版社, 2010. 12

ISBN 978-7-111-32514-7

I. ①结… II. ①背…②马…③李… III. ①建筑结构-结构振动-振动控制 IV. ①TU311. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字·(2010) 第 226456 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 张沪光 牛新国 责任编辑: 张沪光

版式设计: 张世琴 责任校对: 申春香

封面设计: 马精明 责任印制: 杨 曦

北京中兴印刷有限公司印刷

2011 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm · 13 印张 · 251 千字

0 001—3 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-32514-7

定价: 58.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010)88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010)68326294

销售二部: (010)88379649

教材网: <http://www.cmpedu.com>

读者服务部: (010)68993821

封面防伪标均为盗版

# 译者序

作为振动工程领域里的一个重要的组成部分,振动控制技术的研究开始于20世纪50年代末期,在80年代得到蓬勃的发展。常用的控制方法可以分为被动控制、主动控制与混合控制。被动控制由于实现方法、装置结构都比较简单,而且无需外部提供能源,因此早已被广泛应用。但是随着科学技术的日益发展以及人们对结构的功能、居住性、便利性、舒适性等性能的要求越来越高,以及现代结构趋于轻量化的特点,使得主动控制和混合控制应运而生,并且越来越受到重视。多年来,各国研究者在该领域所取得的研究成果已被成功地应用于建筑、土木、航天以及车辆等结构的振动控制。

日本在振动控制技术上已经走到世界的前列,尤其是在超高层大楼、超长大桥的桥梁振动控制的设计中,更是总结出了值得我们借鉴的丰富经验。本书系统地论述了结构振动控制的主要技术,尤其是针对适用于不同的结构的各种控制技术作了详细介绍。

本书列举的具体工程问题,涵盖了从控制装置设计到参数优化和工程应用,以及实现控制装置在工程应用中的关键问题及其解决途径,重点论述了各种结构控制技术的装置机理、分类、关键技术、优化设计方法,应用结构振动控制技术解决具体构造抗震和抗强风工程问题的装置方案、分析方法和优化设计实例,为结构振动控制的普及、应用起到推动作用。本书还重点讲述可以广泛应用于一般结构振动控制的方法论,它的特征是利用集中质量的构造体系为具有无限的固有振动频率的连续结构建立模型并进行控制,也就是“基于模型的振动控制方法”。本书为了使该方法能让土木结构、建筑结构、机械结构等领域的读者都能深刻理解而下了很多工夫。书中还讲述了利用结构之间反作用力的振动控制方法(称之为“连接控制法”),并介绍了在超高层大楼中的使用实例。

本书作者具有多年的结构振动控制的研究经验,书中所论述的内容对读者的工作、学习都能起到很大的帮助。

本书的译者多年来从事智能控制技术的研究、应用、信息处理、管理以及翻译工作,对控制技术在该领域的应用和发展有着深刻的认识。本书的翻

#### IV 结构振动控制

译工作得到了许多本领域专家的大力支持与协助，特别是中国建筑科学研究院张自平研究员对本书的专业名词进行了审核，在此表示真诚的感谢。由于译者的水平有限，如有错误与不妥之处，敬请批评指正。

译者

2010年6月

# 原 书 序

有过试图尽可能快地、并以更低价位生产出更好产品的人，大概都有一种欲罢不能的感受。在生产第一线，几乎是日益增长永无止境地追求着这个目标，而控制工程领域为了实现此目标作出了贡献。作为实现上述目标的直接方法，Automation（自动装置）是第二次世界大战以后在欧洲诞生的术语，控制技术则是占据了其核心的关键技术（Key Technology）。说到 Automation，让人联想到自动化，但是现代控制技术并不仅仅是自动化，还会结合系统化、最佳化和智能化，为了以更快、更低成本地做出更好的产品，在各个产业领域中不断地突破极限。

控制技术并不只是在制造产品过程中，在产品的使用中也被灵活地应用。为了提高汽车、照相机、空调器等消费品的功能，内置了先进的控制技术，使其附加价值得以提高。适用于制造技术的控制产品技术方面的应用范围也在快速扩大。而且在制造业范畴之外，控制技术也在日新月异地发展。

例如，飞机、火车、船舶等交通工具的控制是现代技术的一个重点，在环境产业中控制技术也发挥了关键技术的作用，而且通过家庭自动化，控制技术在提高个人生活方面也作出了巨大贡献。

最近，控制技术的显著发展在很多情况下负有推进各工业领域具体技术进步的责任。控制技术的基础是传感器和传动装置，如果没有与之相关的信号处理技术的进步，以及包含通信或图形接口的软件、硬件这两项计算机技术的进步，是根本得不到发展。另一方面，控制技术也是与各工业生产共通而且普遍的技术，就是所谓的跨学科技术，是具有跨越了各行业具体技术的通用性技术。

这种情景类似于材料。材料在自然科学（力学物理或化学等）中有着普遍性，对控制而言，控制理论就充当了这个角色。控制理论和其他工程理论相比较，不仅具有非常古老的历史，最近也取得了令人瞩目的发展。控制作为普遍性学科，其控制理论与产业现场的控制技术之间的关系并不是直接的，但是却有很强的关联性。控制技术在近年来的发展中，控制理论发挥着至关重要的作用。

本系列专著中<sup>⊖</sup>，工业界控制技术的最新发展，以控制理论的贡献为主

⊖ 日文原书为系列专著。

线来介绍各领域中的成熟技术。基于控制理论的控制系统设计追求合理性，就是在基本成型的产品生产现场可以达成怎样的控制效果，作为这个系列专著的中心课题。到目前为止，已经出版过大量控制理论方面教科书、手册和专业书，有限领域或对象的控制技术方面的手册类书籍也不在少数。但是到目前为止至少在日本还没有出版过像本系列专著这样覆盖各个产业领域，从理论观点讲述与技术相关的控制方面书籍。我们相信这个系列专著会给在制造或开发现场兢兢业业工作的控制技术人员、希望了解控制理论应用现状的研究人员，以及学习控制相关知识的大学学生们提供一个十分有用的参考书。

本书中，变形后的瓦特离心调速器的封套设计图样是由北神由子提供的（译本封面未采用此图）。并借此机会对向本系列专著提供了相应作品的各位表示衷心感谢。

策划、编辑委员长 木村 英纪



# 前 言

建筑、土木、机械、航空航天等工程领域里的结构要求是不同的，其具体形式是受功能、性能、居住性、便利性、舒适性等参数决定的重要设计对象。迄今为止，结构的设计一般都着眼于刚性构造，因而倾向于设计大型、笨重的结构。近年来，节能化、节省资源化、大规模化、高性能化等各种各样的与结构形式相反的设计要求，不得不在结构的设计中考虑各个环节的要求。最近，刚性结构的设计中，已经不再允许重量增长。例如，要建造跨越宽阔海峡的吊桥，就需要建造十分高大的主塔结构，然而建造费用受到结构重量的左右，因此主塔结构必须尽可能轻量化。但是，1928年塔科马大桥的重大事故，就是单纯地追求轻量化而引起了风致振动，从而导致了大桥的振动破坏。一般来讲，轻量化的设计，很容易引起结构的振动。设计不发生振动的结构，是上述工程领域的重要课题。因此，结构的振动控制作为解决上述课题的有效方法而被提出来。

日本国内，普遍使用被称做伺服阻尼器的装置来防止机床引起的颤振，它作为一种主动控制装置在20世纪60年代提出。这是本书作者的恩师富城襄的研究创意，通过控制液压缸上附加的辅助质量来提高控制能力，是一种主动型动力吸振器。这种装置如果安装在持续振动的机床上，由于附加了主动吸振装置，使得机床在选定的最佳切削速度下，正常工作时产生的颤振也被控制，但还未被实用化。另一方面，在建筑工程领域中，20世纪70年代，小堀鐸二提出了高层建筑的主动控制方法，也是利用液压或电力使附加的辅助质量动作，从而抑制建筑物的振动。这种方法和伺服阻尼器在原理上是相同的。由于超高层建筑物会因强风引起风致振动而导致居住舒适性恶化，使得上述方法成为实用化技术。1993年，在顶部附加了两台减振控制装置的横滨地标塔竣工，并以此为契机，规定此后建设的超高层建筑上必须搭载主动型减振装置。在土木工程领域，这种技术也较早地被应用，成为超长大桥主塔结构建设中不可缺少的技术。基于该背景，可以推测附加了主动减振装置的主塔结构也可以防止因强风引起的摇摆。之后在建造来岛海峡大桥主塔结构中应用了此项技术，实现了结构大幅度的轻量化。

结构振动控制技术的采用，使传统结构的本体形式可能会发生一些改变。然而，具有主动减振功能的结构又会出现新的问题，比如溢出问题。因为结构是连续体，严格地讲它存在着无限个固有频率。在轻量化的情况下，固有频率趋于较低的频率范围，更容易出现振动问题。为了实现控制，控制器的设计限制在有限的固有频率，从受控对象漏掉的固有频率就会形成不稳定振动，这就是所说的溢



出。为解决该问题而出现了鲁棒控制，可以通过创建良好的控制模型来有效地回避溢出问题。

本书主要讲述可以广泛应用于一般结构的振动控制的方法论，它的特征是利用集中质量体系为具有无限的固有频率的连续结构建立模型并进行控制，也就是基于模型的振动控制方法。复杂结构的动力特性如果用简单的模型正确表达，即可与已被确立的控制理论相结合，实现和模拟结果一致的振动控制。这个模型作成方法称为低元化物理模型建立法。由于可以在物理坐标上指定集中质量体系的质量点，就能实现防止溢出的结构滤波功能。本书为了使该方法能让土木结构、建筑结构、机械结构等领域的读者深刻理解而下了很多工夫。

书中还讲述了利用结构之间反作用力的振动控制方法，称为连接控制法，并介绍了在超高层大楼中的使用实例。本书的内容如果能对读者的工作起到一定的帮助，作者将会感到十分欣慰。

本书的作者从 20 世纪 60 年代开始从事被动和主动振动控制的研究，而提议并给予机会将研究成果综合起来编纂成册的是木村英纪先生（当时为东京大学的教授）。作者却历时 8 年的时间才将书稿完成提交，在此向一直耐心等待书稿完成的木村先生和コロナ出版社的各位表示感谢。

作者在大学工作时，在主塔结构和高层建筑控制等方面积累了大量的实际经验，这主要得益于在共和合金·振动控制研究所（当时）担任副所长。并得到了主任研究员土井文夫博士、任明章博士、松本幸人（现就职于 OILES 工业）、瀧手雄次在模拟结果的验证试验方面所给予的重要协助。低元化物理模型建立法，是作者在防卫大学工作时，与在校作研究员的“KOMATSU 制作所”的光田慎治共同开发的。转职到日本大学后，得到了很多优秀学生们帮助，使结构振动控制的研究广泛展开。如都罗列出来的话就过于冗长了，他们的名字将在参考文献里介绍。

另外，本书中包括了有很多的图表，这些图使用 MATLAB 制作，主要的程序请参考コロナ出版社的主页（[http://www.coronasha.co.jp/np/detail.do?goods\\_id=2115](http://www.coronasha.co.jp/np/detail.do?goods_id=2115)）。

本书的内容是在以上各位的鼎力协助下，对作者独立进行的研究内容总结而成。借本书出版的机会，向相关各位表示深深的谢意，并且发自内心深处向照顾我不规则生活的夫人表示感谢。

背户 一登

2006 年 2 月

# 目 录

译者序  
原书序  
前言

## 第1章 序 章

1.1 概述 .....	1
1.2 关于振动控制 .....	1
1.3 什么是结构振动控制 .....	2
1.4 建筑结构的控制状况 .....	4
1.4.1 从被动控制到主动控制 .....	4
1.4.2 建筑结构控制方式的 分类及特征 .....	5
1.4.3 建筑物主动控制的实 施状况 .....	7
1.5 土木结构的控制状况 .....	10
1.6 机械结构的控制状况 .....	14
1.7 宇航结构的控制状况 .....	14
1.8 振动控制的课题 .....	15
1.8.1 低元化模型和溢出问题 .....	15
1.8.2 考虑到防止溢出的集中 质量体系模型的作成 方法 .....	16
1.8.3 鲁棒控制 .....	17
参考文献 .....	18

## 第2章 减振方法和减振装置

2.1 概述 .....	20
2.2 振动控制方法的分类 .....	20
2.2.1 利用固定面的减振装置 .....	21
2.2.2 利用辅助质量的减振 装置 .....	22

2.2.3 利用结构相互作用的 减振方法 .....	22
2.3 减振装置的构成元件 和构成法 .....	23
2.3.1 减振装置质量(重物) 的支撑方式 .....	23
2.3.2 阻尼元件 .....	24
2.3.3 弹簧元件 .....	25
2.3.4 动能元件(作动器) .....	26
2.4 定点理论 .....	28
2.5 1.5 自由度体系 .....	29
2.6 动力吸振器 .....	32
2.6.1 幅度系数 .....	32
2.6.2 最佳设计公式 .....	34
2.6.3 动力吸振器的减振 效果和问题点 .....	36
2.7 复合动力吸振器的最 佳设计 .....	36
2.7.1 位移幅度系数 .....	36
2.7.2 最佳调整条件 .....	37
2.7.3 复合动力吸振器的减 振性能 .....	38
2.8 连接阻尼器 .....	39
2.8.1 振动模型 .....	39
2.8.2 理论分析 .....	40
2.8.3 最佳调整条件 .....	42
2.9 小结 .....	43
参考文献 .....	44

## 第3章 多自由度体系的模态 分析和减振

3.1 概述 .....	45
--------------	----

3.2 单自由度体系的响应	
要点	45
3.2.1 阻尼自由振动的响应	45
3.2.2 受迫振动的响应	47
3.2.3 等效阻尼和减振设计	48
3.3 多自由度体系的运动	
方程式	49
3.4 特征值分析	50
3.4.1 特征值和特征向量	50
3.4.2 特征向量的正交性	50
3.5 模态坐标	51
3.6 受迫振动的响应	52
3.7 等效质量的辨识	54
3.7.1 等效质量的概念	54
3.7.2 特征向量法	54
3.7.3 质量感应法	56
3.8 非耦联模型的编成	
方法	57
3.9 多自由度体系的模态减振理论	58
3.10 利用动力吸振器多自由度体系的振动控制方法	61
3.10.1 动力吸振器的设置场所	61
3.10.2 各模态动力吸振器的最佳设计	62
3.11 建筑结构的减振设计	63
3.11.1 4层住宅楼的减振设计	63
3.11.2 10层高楼的减振控制	66
3.12 符合分布质量体系结构的减振	70
3.12.1 一端固定的横梁结构	70
3.12.2 桥梁的多模态减振	71
3.13 小结	73

参考文献	73
------	----

## 第4章 结构的控制理论

4.1 概述	75
4.2 古典控制理论	75
4.2.1 设计要点	76
4.2.2 古典控制中的补偿	77
4.2.3 串联补偿	77
4.2.4 陷波滤波器	79
4.2.5 反馈补偿	80
4.3 现代控制理论	81
4.3.1 多自由度体系的运动方程式和状态方程式	81
4.3.2 传递函数和状态方程式	82
4.3.3 可控制性和可观测性	83
4.3.4 状态反馈和稳定性	85
4.3.5 极点配置理论	85
4.3.6 最佳控制理论(LQ控制理论)	87
4.3.7 准最佳控制	88
4.3.8 含滤波器的LQ控制(简易鲁棒控制)	89
4.3.9 LQI控制	90
4.4 $H_\infty$ 控制理论	91
4.4.1 $H$ 范数和设计规范	92
4.4.2 鲁棒稳定问题	93
4.4.3 降低灵敏度的问题	95
4.4.4 混合灵敏度问题	96
4.4.5 $H_\infty$ 控制问题的解答	97
4.5 小结	99
参考文献	100

## 第5章 结构的低元化模型的建立方法

5.1 概述	101
5.2 低元化模型的建立方法	102

5.2.1	分布质量体系结构的运动方程式	102
5.2.2	各种模型的建立方法	102
5.3	结构低元化物理模型的建立方法	104
5.3.1	结构中振动模态形式与可控制性、可观测性的对应	104
5.3.2	能够防止溢出的集中质量体系模型的建立方法	105
5.3.3	低元化运动方程式的导出	106
5.4	塔状结构的建模	108
5.4.1	2质点模型	108
5.4.2	塔状结构的形状	109
5.4.3	2自由度体系物理模型	110
5.4.4	计算结果的比较	112
5.5	平板结构扭转弯曲模态的低元化模型	113
5.5.1	3质点模型	113
5.6	吊桥主塔模型结构的4质点模型	115
5.6.1	主塔模型结构的形状和振动特性	115
5.6.2	4质点模型的建立方法	116
5.7	弹性支撑的平板结构的建模	119
5.7.1	构造尺寸和振动特性	119
5.7.2	5质点模型	120
5.7.3	5质点模型的验证	121
5.8	小结	122
	参考文献	122

## 第6章 主动型动力吸振器

6.1	概述	124
6.2	利用一阶模态主动型	

## 动力吸振器对一般结

### 构的减振

6.2.1	设置场所和单自由度模型	124
6.2.2	主动型动力吸振器的构造	125
6.2.3	状态方程式的描述方法和控制系统的设计	126
6.2.4	加权系数对减振效果的影响	129
6.2.5	作动器的动力特性的影响	131
6.2.6	因次体系的响应	132
6.2.7	根据极点配置理论的主动型动力吸振器的设计	133
6.3	塔状结构的振动控制	136
6.3.1	塔状结构及其低元化模型	136
6.3.2	主动型动力吸振器的构造	136
6.3.3	控制系统的设计	137
6.3.4	模拟	138
6.3.5	控制系统的构成	140
6.4	平板结构的弯曲和扭转模态的振动控制	140
6.4.1	控制对象和状态方程式	140
6.4.2	利用LQ控制理论的振动控制	142
6.4.3	利用 $H_\infty$ 控制的控制系统设计	145
6.5	小结	149
	参考文献	149

## 第7章 土木结构的控制

7.1	概述	150
7.2	大桥主塔结构的风致	

振动和振动控制 .....	150
7.3 主塔结构的建模 .....	151
7.3.1 2 质点模型和 4 质点模型 .....	152
7.3.2 6 质点模型 .....	153
7.4 主塔模型结构的四阶以内的模态控制 .....	154
7.4.1 利用含滤波的 LQ 控制法对主塔结构的振动控制 .....	154
7.4.2 模拟 .....	156
7.4.3 振动控制试验 .....	157
7.5 组合了起重吊车塔的主塔模型结构的振动控制 .....	159
7.5.1 吊车塔和主塔的耦联振动问题 .....	159
7.5.2 振动模态和 5 质点模型 .....	159
7.5.3 主塔模型结构的状态方程式 .....	160
7.5.4 含滤波的准最佳控制 .....	162
7.5.5 $H_{\infty}$ 鲁棒控制 .....	166
7.6 小结 .....	169
参考文献 .....	169
<b>第 8 章 建筑结构的控制</b>	
8.1 概述 .....	171
8.2 高层结构的建模 .....	171
8.2.1 正方形平面高层结构 .....	171
8.2.2 长方形平面高层结构 .....	172
8.2.3 多塔结构的互连 .....	173
8.3 20 层楼结构的基准问题 .....	174
8.3.1 什么是基准问题 .....	174
8.3.2 基准高层建筑物的构造以及振动特性 .....	174
8.3.3 20 层楼的低元化模型 .....	176
8.3.4 状态方程式的表示和控制系统的设计 .....	177
8.3.5 模拟结果 .....	179
8.4 高层建筑的连接控制 .....	181
8.4.1 关于高层建筑的连接控制方法 .....	181
8.4.2 以 4 栋高层建筑为控制对象的振动特性 .....	182
8.4.3 低元化物理模型的建立 .....	183
8.4.4 状态方程式 .....	184
8.4.5 控制试验 .....	185
8.5 Triton 塔的风致振动 .....	187
8.5.1 Triton 塔的风致振动问题 .....	187
8.5.2 Triton 塔的建模 .....	187
8.5.3 控制系统的设计 .....	188
8.5.4 模拟 .....	190
8.5.5 高层建筑连接控制法的实现 .....	191
8.6 具有居住舒适性、便利性、安全性的未来都市 .....	193
参考文献 .....	193

# 第 1 章 序 章

## 1.1 概述

结构振动控制是构筑大规模系统的关键技术，在各种工程领域中很早就研究开发了此项技术并发展至今，到了 20 世纪 90 年代开始快速地向实用化方向发展。特别是在建筑、土木工程领域的发展尤为显著。在本章，首先介绍结构振动控制的具体使用实例。其次，讨论了在机械、航天工程领域大规模系统中，未来结构振动控制的例子。在最后，指出了结构振动控制中应该特别注意的问题，并对其相应的对策进行概述。

## 1.2 关于振动控制<sup>[1]</sup>

振动会对结构的可靠性、精度、品质、寿命等造成损害，以致影响其安全性、居住舒适性，并给人体造成振动伤害以及产生噪声公害等。由此可见，结构的振动会引发各种各样的问题。从古至今，为了解决或减轻结构振动而引发的问题采取了各种不同的方法。比如，给易发生振动的结构加上沙袋、用油灰接合剂固定、附加防振橡胶或液压阻尼器等。至于采用哪种方法，一般凭借直觉和经验来判断，称之为防振法。

要有效地抑制振动，就必须正确理解振动对象的表现行为和振动特性。而且，对于新设计的结构来说，在设计每个阶段都进行振动特性分析也是必要的。20 世纪 70 年代被开发，80 年代被迅速普及的快速傅里叶变换法（Fast Fourier Transformer），以及应用该方法的试验模型分析装置成为解决上述问题的有效手段。另外，有限元法分析通用软件的普及使掌握设计各阶段振动对象的振动特性成为可能。最近各类机械、装置以及结构向更轻量化、柔软化的趋势发展，这就要求对更复杂的振动进行控制。

振动控制，在这里并不是指以前为了防止振动而采取的应对和补救办法那样所谓的抑制振动，而是新提出的以振动分析和控制系统设计理论为基础的振动控制新概念。振动的发生是由于机械、装置等系统的阻尼不足引起的，因此振动控制也会有效地给系统附加阻尼。后面讲述的超高层建筑或主塔结构等的风致振动就是这种阻尼不足引起的，因此利用振动控制就可以防止风致振动的发生。

## 2 结构振动控制

振动控制中,大致分为由无需注入能量的无源元件构成的被动型振动控制和由需要能量注入的有源元件、传感器及控制器构成的主动型振动控制。前者是以定点理论为代表设计理论,后者在设计中主要使用最佳调整器理论,通称线性二次(Linear Quadratic, LQ)控制理论为代表的最佳控制理论。最近, LQ 理论的补充——鲁棒控制理论开始被应用。振动控制被简称为减振,与其相应的方法论称作振动控制方法或减振法,利用振动控制方法的装置称作减振装置或减振器。

振动控制的概念如图 1-1 所示。利用控制理论设计控制系统时,减振对象必须用运动方程式或状态方程式这样的数学模型来表示,我们称之为建模。如果减振对象是分布质量体系结构,因为拥有无限自由度,在利用上述的控制理论时,需对其进行有限自由度的低元化处理,称之为低元化模型。这个低元化模型可以用传递函数模型和集中质量模型来表示。如果利用集中质量体系模型表示的话,因为该模型是物理模型,若与减振装置的力学模型相结合就能够简单地导出运动方程式或状态方程式。本书将在后面的章节针对这个集中质量模型进行详细讲述。

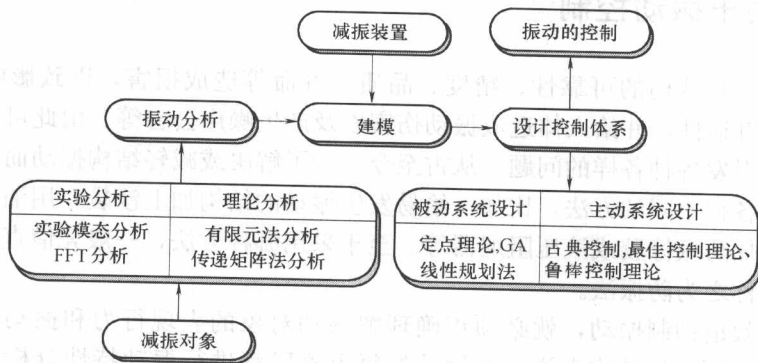


图 1-1 振动控制的概念

### 1.3 什么是结构振动控制

结构是在机械工程、建筑、土木工程、航空航天工程等领域中被具体化的形式基干,是受功能、性能、居住性、便利性、舒适性等因素左右的重要设计对象。过去的结构都着眼于刚性结构的设计,因此倾向于设计大型的、笨重的结构。然而,近来又肩负起节能化、节省资源化、大规模化、高性能化等各种各样与结构设计相悖的需求。这可以说是近期伴随着结构控制技术的进步开始提出的



新要求。

例如,在1998年竣工的爱媛县来岛大桥的建设中,为了节约建设费用,力求将主塔的质量减少一半。来岛大桥是在从濑户内海的大岛到四国的松山之间立起6个巨大的主塔,用其上的缆绳架起的一座吊桥。详细的数据在后面讲述,平均高200m的主塔的质量如果能减半的话,作为节省资源的效果,主塔建设费用也能减半。可是,主塔质量的减少会导致固有频率的降低,建设中如果有接近台风的强风袭击时,就会使多数固有频率出现风致振动,从而会提高导致破坏的危险性。

作为一个实例,1928年美国西雅图市郊外的塔科马大桥的毁坏,就是因扭转模态振动引发风致振动现象而导致了大桥的崩塌。当时,在建设中需要克服的问题就是大桥主塔的多模态振动控制,在这个背景下,逐渐形成了现在所有的主塔扭曲一阶模态的主动型振动控制技术。由于该技术不断地发展,且克服了所有的问题,因而在1998年成功地建成了来岛大桥。理解了这个例子,在结构的设计中引入控制技术,并使新型结构的建设成为可能。

在建筑工程领域,大规模化持续发展,其中超高层建筑的建设非常盛行。超高层建筑也会因强风引起风致振动从而使其居住舒适性恶化,为解决这个问题,建设中引入主动型振动控制技术的方法被普及。在航空航天领域,目前国际空间站正在建设中,它是典型的大规模轻型的结构,也可以预见建设中一定会出现结构控制方面的难题。

最后,机械工程领域比起其他的领域,结构的体形小、存在形式简单。而且,轨道车辆与汽车、机床、机器人等结构中很早就引入了运动和振动的控制,现在主要致力于控制性能的提高。

作者希望读者能够充分理解上述各例,随着各工程领域中结构的控制技术不断发展,今后肯定对各项技术会有更高的要求。比较重要的是,在结构里组合加入控制装置,用以前的刚度结构的设计方法不可能完成,要利用一种叫做动态设计的新型设计方法来完成。结构的设计参数有静态刚度、固有频率、振动阻尼比等。以前的构造设计中,无法提供阻尼设计,利用了结构的控制技术使阻尼设计成为可能,也就是使动态刚度设计成为可能,并称之为动态设计。前面提到的主塔结构的控制,就是把一个混合动力吸振器方式的减振装置附加在主塔构造上来抑制风致振动,这是一个实施阻尼设计的具体实例。

在本书中,以这种动态设计为基础重点讨论实施阻尼设计的结构控制方法。现在,从外部实施阻尼的减振装置成为动力减振器方式的主流,用该方式的设计方法作为重点讲述。并对有望实现柔软结构控制的连接减振方式也做了简述。

接下来,首先对各工程领域实施的结构控制情况做一个概述。

### 1.4 建筑结构的控制状况

#### 1.4.1 从被动控制到主动控制

高层建筑的固有频率随着超高层化而降低,由强风在高层建筑物里侧引起的涡流,其频率(周期的倒数)与风速形成的比例也会变大,两种频率接近的话,高层建筑就开始摇晃,这叫做风致振动。这种现象会使居住舒适性严重恶化,因此在20世纪70年代,美国首先开始建筑减振大楼。纽约市的Citicorp大厦就是这样一个超高层建筑,采取了被动型减振方式,该方式采用的是动力吸振器的原理<sup>[2]</sup>。这以后,在波士顿等城市一个接一个地出现采用该方式建起的超高层建筑。这种被动方式从后面叙述的理由可以知道,它并不能完全抑制大楼的摇晃,因此在美国,减振大楼的构想也就中断了。

另一方面,日本从20世纪70年代初开始,结构主动减振方面的研究就开始不断发展,大学和企业研究者之间的研究交流也很活跃,到80年代,主要是该方式实用化的探讨和建设试验型的减振大楼,1993年在横滨市建成了地标塔<sup>[3]</sup>。这是一座高76层296m的超高层建筑,靠近楼顶处搭载了2台主动型控制装置,这是世界上最早的真正的超高层建筑。以此为契机,连续出现了主动减振的高层建筑<sup>[4]</sup>,现在已经超过60栋。这些都采用了动力吸振器方式的减振装置,通称为主动型质量阻尼器(Active Mass Damper)或混合型质量阻尼器(Hybrid Mass Damper)。

然而,如果要建设超过300m的超高层建筑,利用动力吸振器方式抑制风致振动是有限的。超高层化建筑的固有频率会更低,利用质量惯性作用力的动力减振器方式得不到更大的减振力度。大楼连接减振方式被提出作为替代方式。2002年3月,采用这种方式的主动型连接减振大楼在东京晴海地区的Triton广场诞生了<sup>[5]</sup>。3栋分别高185m、165m、130m的高层大楼利用2台主动控制天桥实现连接减振,目标在于减轻由风引起的摇晃。这种控制方式类似把高层大楼成捆来进行振动控制,因此不仅节省了控制装置,控制天桥还可以作为大楼间的连接通路。将来也可能会出现具有立体交通系统且安全性高、居住舒适性好的超高层楼群。而且,耗能低、可靠性高的半主动型控制在中高层和防震建筑物中开始使用<sup>[6]</sup>。

综上所述,在建筑物控制领域中,日本已经走到世界的最前列,并已经进入更新的建筑物控制时代。借本书出版的机会,对最近的建筑物控制技术以及其实施的实例做一介绍。