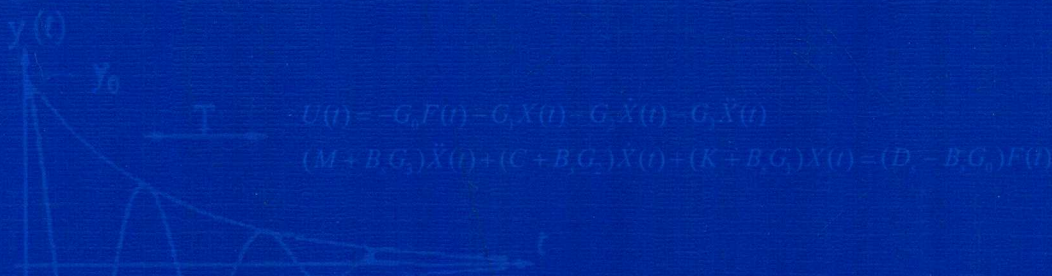




# 结构振动控制 理论和计算方法

牛林 / 著



中国科学技术出版社  
CHINA SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

# 结构振动控制理论和计算方法

牛 林 著

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

## 图书在版编目 (CIP) 数据

结构振动控制理论和计算方法 / 牛林著. —北京 :  
中国科学技术出版社, 2016.2

ISBN 978-7-5046-7054-0

I. ①结… II. ①牛… 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 (2016) 第 011910 号

---

责任编辑 高立波  
封面设计 中文天地  
责任校对 何士如  
责任印制 张建农

---

出版 中国科学技术出版社  
发行 科学普及出版社发行部  
地址 北京市海淀区中关村南大街16号  
邮编 100081  
发行电话 010-62103130  
传真 010-62179148  
网址 <http://www.cspbooks.com.cn>

---

开本 787mm × 1092mm 1/16  
字数 210千字  
印张 9.25  
版次 2016年4月第1版  
印次 2016年4月第1次印刷  
印刷 北京京华虎彩印刷有限公司

---

书号 ISBN 978-7-5046-7054-0 / TU·111  
定价 38.00元

---

(凡购买本社图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责调换)

# 内容简介

本书系统总结和阐述了结构振动控制理论、计算方法和工程应用的主要研究成果。第1章从控制工程的角度概述结构振动控制的现状，分析了结构振动控制系统各环节的特性及振动主动控制模型研究中的几个问题。第2章主要介绍目前流行的一些控制方法，包括极点配置法、线性二次型最优控制法、系统模态主动控制法、 $H_2$ 和 $H_\infty$ 控制法。第3章介绍基于模态分析的结构动态特性识别方法，主要说明了神经网络在结构损伤识别中的应用。第4章主要介绍了振动测量法，时延神经网络结构损伤的基本原理及一种快速算法。第5章针对土木工程结构的非线性和不确定性以及干扰的随机性，介绍广义预测控制自适应神经网络控制算法。第6章主要介绍结构振动中一类时变不确定非线性系统自适应控制方案。第7章针对结构控制中一类参数不确定非线性系统介绍一种自适应观测器设计方法。第8章针对结构控制中的时滞问题，介绍一种基于T-S模糊模型的预测控制策略。

本书适合结构工程、材料科学与工程、力学研究、设计与制造的科技者，也适合从事结构设计和掌握结构控制技术和工程技术人员学习参考。

## 作者简介

牛林，教授、硕士研究生导师，现为红河学院教师。云南省优势特色重点建设学科领衔人。研究方向为结构振动控制、复杂系统建模、优化理论与最优控制、混杂非线性控制等。担任国家自然科学基金委员会通讯评审专家、云南省科技计划项目管理专家、云南省科技计划项目评审专家、国家科技型中小企业技术创新基金项目地方评审专家；*International Journal of Control* 等刊物的审稿人、*IJCTE* 杂志编委。

作者进行复杂系统建模与控制的研究始于 1986 年。探讨基于数据的控制理论来解决复杂被控系统的在线预测、优化和控制。为解决非线性控制问题，研究融合神经网络、评价设计以及经典动态规划的自适应优化方法，并对其稳定性、收敛性等问题做了探讨。作者对结构振动控制的研究兴趣源于 1999 年，受益于教授 Prof. H. Shibata 的著作，“When I was a student in late 1950's, the lecture of automatic control was done mainly through a dynamic equation of the system. Soon after, Laplace-transformation was introduced, then automatic control and vibration were separated…… However, in the early 1980's, they were remarried. The new theories like  $H_\infty$  control,  $\mu$ -Syn and so on were developed by IEEE group, but introduced into structural control……”。作者的结构振动控制研究从较深的理论研究开始，延伸到工程应用研究，特别是应用控制理论和方法解决结构振动工程问题。主持完成国家自然科学基金项目、云南省科技厅应用基础研究项目等。在学术刊物和会议上发表论文 50 余篇。

# 前 言

结构振动控制是由结构动力学和自动控制理论相结合而产生的一门新兴学科分支。结构振动控制可以有效地减轻结构在风和地震等动力作用下的反应和损伤，有效地提高结构的抗振能力和抗灾性能，结构振动控制经过几十年的发展，已被理论和实践证明是抗震减灾积极有效的对策。本书以土木结构的动力反应特性为基础，介绍保护土木结构免遭地震和风荷载破坏的控制方法，具有工程应用价值。

结构主动控制根据实时测量的结构反应或环境干扰，采用现代控制理论的控制算法决策出最优控制力。主动控制效果好、适应性强，结构半主动控制以此为理论基础。书中阐述了结构主动控制系统理论，包括基于智能方法的结构动态特性的建立、神经网络、自适应算法、预测算法等控制理论在结构振动控制应用中的一些关键性问题。

主动控制系统的控制品质取决于广义结构的特性和控制器的控制算法。结构最优控制力是建立在结构动态特性分析的基础上的。结构的健康状况反映了结构的动态特性，将结构的损伤识别与振动的主动控制算法综合考虑实际是闭环控制系统的本质。故本书分为结构建模和控制决策两部分。

第一，大型复杂结构的自由度通常可以达到几千甚至几万，而测量信息量十分有限，说明除了测量得到的部分已知信息，还有大量的信息是未知的，通过结构损伤识别结构特性是一个典型的灰箱系统。根据神经网络软测量基本理论，分析在不完备模态参数条件下结构特性识别方法，实现对系统运行行为、演化规律的正确描述和有效监控。

考虑到在结构的所有模态参数中，固有频率是最容易获得也是精度最高的一个，本书给出一种随机激励下结构位移模态识别的方法，用结构移动质量检测法实现了由结构的低阶模态频率甚至一阶模态频率确定结构损伤的目标，书中介绍了这种工作状态下结构实际检测的简便方法。

第二，考虑到结构非线性地震响应的模型不确定性以及干扰的随机性，本书论述了基于神经网络的非线性广义预测自适应控制方法。学习率一直是人工神经网络应用中的一个瓶颈，在分析了多层前馈神经网络学习算法在学习率自调整中存在的问题基础上，书中说明了一种学习率的自适应方案。该方案能普遍提高算法的收敛速度。

对结构控制系统的实际情况而言，系统的状态变量一般不能直接测量到，大部分情况下，要求对系统的状态进行估计，这项工作往往是借助于状态观测器来完成。状态观测器以原系统的已知信息作为输入，输出是原系统真实状态在一定收敛意义下的一种估

计。这样就可用该估计状态来代替不可量测的系统状态，以达到状态反馈的目的。本书介绍的自适应观测器设计方法，通过微分同胚变换，将非线性系统转换为仅依赖原系统输入、输出的自适应观测器规范形式。利用自适应调节器估计未知参数，用构造的观测器实现状态的重构。Lyapunov 稳定性理论分析状态观测误差动态方程的稳定性。

基于 Takagi-Sugeno 模型的模糊基本理论，建立模糊预测模型。结合模糊模型与预测控制，设计多步预测控制器，该控制器具有模糊控制的优点且可以根据需要提前若干采样步预测控制力，有效地消除了结构控制中的时滞。

本书的部分研究内容是作者主持的国家自然科学基金项目（批准号：61463013）的研究成果，感谢国家自然科学基金给予作者的资助。

本书许多章节的前期研究，是在作者的导师叶燎原教授指导下开展的，非常感谢叶燎原教授将作者带入结构控制领域，并且教给作者做人、做事和做学问的方法。

由于作者水平有限，书中难免存在不足之处，恳请读者不吝赐教。

作者

2015 年 7 月

# 目 录

## 前 言

<b>第1章 绪论</b> .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 结构控制技术 .....	2
1.3 结构振动主动控制中的几点问题 .....	15
1.4 研究依据和意义 .....	16
1.5 主要内容和研究特色 .....	17
1.6 本章小结 .....	19
<b>第2章 动态系统特性及结构振动的主动控制算法</b> .....	20
2.1 引言 .....	20
2.2 动态系统及其重要特性 .....	21
2.3 结构振动的主动控制算法 .....	27
2.4 本章小结 .....	42
<b>第3章 基于模态分析理论和神经网络的结构动态特性</b> .....	44
3.1 引言 .....	44
3.2 模态分析基本原理 .....	45
3.3 神经网络法 .....	48
3.4 算例仿真 .....	55
3.5 本章小结 .....	60
<b>第4章 基于振动分析的结构动态特性</b> .....	61
4.1 引言 .....	61
4.2 振动测量 .....	61
4.3 基于振动的损伤识别算法 .....	62
4.4 时延神经网络的损伤诊断 .....	62



4.5	算例仿真 .....	64
4.6	本章小结 .....	67
<b>第5章</b>	<b>随机系统针对未知扰动输入的主动自适应控制 .....</b>	<b>69</b>
5.1	引言 .....	69
5.2	自适应控制系统的分类和基本工作原理 .....	70
5.3	基于系统输出最优预报的神经网络自适应控制律 .....	72
5.4	地震作用下结构振型组合自适应控制 .....	81
5.5	本章小结 .....	86
<b>第6章</b>	<b>时变非线性系统自适应控制 .....</b>	<b>88</b>
6.1	引言 .....	88
6.2	时变非线性系统 .....	89
6.3	间接自适应控制律 .....	90
6.4	算例仿真 .....	99
6.5	本章小结 .....	102
<b>第7章</b>	<b>非线性不确定系统指数型观测器 .....</b>	<b>103</b>
7.1	引言 .....	103
7.2	指数型观测器 .....	105
7.3	算例仿真 .....	111
7.4	本章小结 .....	113
<b>第8章</b>	<b>结构主动控制时滞问题解决方案 .....</b>	<b>114</b>
8.1	引言 .....	114
8.2	模糊预测控制基本原理 .....	114
8.3	基于 T-S 模糊模型的预测控制 .....	116
8.4	算例仿真 .....	120
8.5	本章小结 .....	122
<b>参考文献</b>	.....	<b>124</b>
<b>后记</b>	.....	<b>137</b>

# 第1章 绪论

从控制工程的角度概述结构振动控制的现有成就、面临的挑战，分析了结构振动控制系统各环节的特性，并对综合振动控制的发展前景进行了展望。

## 1.1 引言

风和地震都是自然界中极具破坏力的自然现象，严重威胁人类生命财产安全，并造成过重大的人员伤亡和财产损失。例如：1976年7月我国唐山发生里氏7.8级地震，死亡24万多人；2008年四川汶川发生的里氏8.0级地震，死亡近7万人。2010年1月海地发生里氏7.0级地震造成27万人死亡，48万多人流离失所，370多万人受灾；同年2月智利中南部城市康塞普西翁一带发生里氏8.8级特大地震并引发海啸造成至少630人遇难近200万人受灾，官方估计经济损失达300亿美元。2010年4月，青海玉树发生里氏7.1级地震，受灾人口达10万人。地震灾害造成的损失是一个世界范围内的重大课题。近年来，随着经济的发展，我国城镇兴建了大量的高层建筑，对于居住者而言，结构的安全性和舒适性是基本的要求，而随着建筑结构高度的增加、轻质材料的使用，在强风和强地震作用下，结构的反应剧烈，因而风振、地震控制受到广泛的关注。

传统的抗风、抗震方法是通过增加结构自身的刚度和强度来抵御风和地震的作用，由于结构本身的动态特性以及外部扰动（风、地震）的不确定性，因而传统的方法既不经济，也未必安全。

近来发展起来的“结构控制方法”是用控制工程的思想在结构上增设控制装置，构成控制系统来抑制地震和风等动荷载对结构的负作用，以使得结构的动力响应满足人们对安全性和舒适性的要求。

结构控制的概念最早由Kobori和Minai在1960年提出的，自从20世纪70年代初美籍华裔学者姚冶平（J. P. Yao）将现代控制理论应用到结构控制以来，世界各国的学者对这一新兴科学领域产生了极大地兴趣，并在结构控制理论的研究、结构模型实验以及工程应用等方面展开了研究。结构控制技术得益于如机械、电子、计算机等方面技术的发展，取得了长足的进步。2015年在澳大利亚悉尼大学召开的第11届世界结构和多学科优化大会（WCSMO-11）会议上，共有中国、韩国、日本、美国、丹麦、法国、澳大利亚等

国家 340 余名代表参加，共发表了论文 200 多篇。这些论文涉及优化控制、混合控制、传感器和作动器、新材料等多个专题。在第十五届世界地震工程会议上，工程抗震、地震减灾、地震工程中的数值方法等成为各国代表热议的主题。

## 1.2 结构控制技术

结构振动控制是探讨如何利用设置在结构上的一些控制机构，在结构振动时主动或被动地施加一组控制力，以减少结构振动反应的学科。结构振动控制理论改变了传统的用承重结构来抵御动荷载的设计思想，而采用非承重的控制装置施加的控制力来减少结构本身的振动反应，以实现满足抗风抗震设计要求的目的。

结构控制涉及振动理论、控制理论、结构设计、材料科学等多门学科，是一门交叉学科。结构反应的有效控制，基于结构动态特性的掌握，然后决定采用何种控制策略，运用何种控制设施对结构施加控制。这其中还包含设计者对工程整体的把握以及经济等因素的考虑。

依据控制方式的不同，结构控制分为以下三类：开环控制，仅由外界荷载变化调整，被动控制多为开环控制（图 1.1）；闭环控制（反馈控制），依据结构当前反应值和估计值调整，主动和半主动控制是闭环系统（图 1.2）；开—闭环控制混合控制，同时感受外界荷载和结构反应的变化，能够理想地控制结构振动。

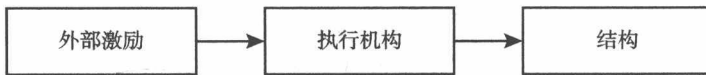


图 1.1 开环控制系统

Fig. 1.1 Open-loop control system

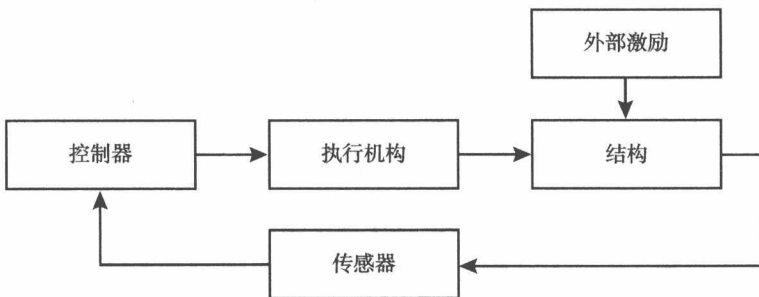


图 1.2 闭环控制系统

Fig. 1.2 Closed-loop control system

结构振动控制是在结构上装有传感器和控制器，它们在有外部激励（地震和风等）作用时立刻反应，以保证结构的安全舒适。结构控制系统的主要任务是寻求一控制策略，

该控制策略能根据所测量到的结构响应而计算出控制信号的大小并送给执行机构，从而对结构响应加以控制。

### 1.2.1 结构控制系统

结构振动控制从控制方式上可分为被动控制、主动控制、半主动控制和混合控制四种控制方案。

#### 1.2.1.1 被动控制系统

被动控制系统主要分为基础隔震和被动耗能减震。

##### (1) 基础隔震。

基础隔震指在上部结构与基础之间设置某种隔震消能装置，以减小地震能量向上部传递，从而达到减小上部结构振动的目的。早在1890年，德国人Bechtold就提出采用滚球作为隔震基础，并申请了美国专利。近二三十年来，随着大量地震记录的积累，结构非弹性动力分析方法的趋于成熟，特别是实用隔震元件的开发取得重大进展，基础隔震技术已经从理论探索、试验研究阶段发展到了推广使用的阶段。20世纪60年代末，新西兰、日本、美国等多地震国家对隔震技术投入大量的人力物力，开展了深入地研究，取得了卓有成效的成果。70年代初，新西兰的科研技术人员开发了可靠、经济实用的隔震元件叠层橡胶支座，大大推动了隔震技术的实用化进程。从80年代以来，国内周锡元、周福霖、唐家祥等一批学者对隔震技术进行了研究和推广。由于基础隔震技术发展时间比较长，因此是目前应用最广泛，也是最成熟的一项控制技术。在我国，汕头市博物馆是目前国内采用基础隔震技术的最高公共建筑，共12层，42米高。

##### (2) 被动耗能减震。

被动耗能减震是一种不需要外部能源的结构控制技术，一般是指在结构的某些部位附加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。

目前，研究和应用于土木工程结构中的耗能阻尼器主要有黏滞、黏弹、金属屈服和摩擦型四类。现在国内外已有许多的被动阻尼减振装置安装在结构工程中，作为提高新建工程抗震能力或已有结构抗震加固的措施。1985年在美国洛杉矶的两幢公寓中安装了带螺旋状软钢弹簧和黏滞流体阻尼器的隔震装置。1994年，日本静冈市的一座高78.6m的14层办公楼安装了黏性阻尼墙。以及在“9·11”事件中被撞倒的纽约世界贸易中心，其顶楼上安装了1万只黏弹性阻尼器。

#### 1.2.1.2 主动控制系统

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，再按照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，使结构在地震和其他动力作用下的响应控制在允许的范围以内，以达到保护结构和设备免遭损伤的目的。主动控制系统包括：传感器、计算机和执行机构，其主要工作机理为：利用传感

器监测结构的动力响应和外部激励，将监测的信息送入计算机内，计算机根据给定的算法计算出施加的控制力的大小，最后由外部能源驱动，控制系统产生所需要的力。目前常用的控制系统主要有主动拉索（筋）系统、主动支撑系统、主动质量阻尼和主动质量驱动系统、主动空气动力发生器系统、气体脉冲发生器系统。主动控制的算法主要有最优控制线性控制算法、瞬时最优控制算法、独立模态控制算法、界限控制算法、非线性控制算法等。

主动控制的研究始于 W. Zuk (1968) 首先提出的动态结构 (kinetic structures) 的概念，他将主动控制划分为两类：一类是减小或抑制结构运动的控制；另一类是使结构产生运动（从一种位形变到另一种位形）的控制。现代的结构主动控制概念属于前者，通过主动控制构件来减小或抑制结构在可变环境荷载作用下的运动与变形。早在 1960 年，Freyssinet 曾建议使用预应力锚筋来控制高层建筑或高耸结构的稳定性。Zetlin (1965) 提出在高层建筑上安装主动拉筋，拉筋一端与结构框架相连，另一端与液压泵连接并固定在结构物的基础上，通过传感器来探测结构顶部的运动与变形并反馈到控制装置，由控制装置来调节液压泵的运动。T. Nobori (1960) 提出在强震作用下能自动调节其地震反应的“动态智能建筑”的概念。Murata (1970) 研究应用回转装置来控制悬挂式桥梁的振动反应。直到 1972 年，基于现代控制理论的结构主动控制概念才由美籍华裔学者姚治平 (J. P. Yao) 加以明确阐述，现已公认姚治平是现代控制理论在土木工程结构方面的研究与应用的奠基者。在姚治平的带动下，T. T. Soong, J. N. Yang 以及 J. Roorda 等在 1974—1976 年发表了一系列现代控制理论在土木工程中应用的文章。1976 年以后开展了主动控制其他算法的研究，并进行了结构主动控制的可行性与实用性研究。

### 1.2.1.3 半主动控制系统

半主动控制是以被动控制为基础，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。半主动控制不直接提供驱动力，控制过程依赖于结构反应信息或外界激励信息。与被动控制相比，半主动控制的特点是能够随着结构反应或外界激励的变化及时调整控制装置的工作状态，使控制装置的减振作用更好地发挥出来；与主动控制相比，其优点是不需要大的外界能量输入，缺点是不如主动控制精确。较为典型的半自动控制装置有：可变刚度系统、可变阻尼系统、主动调谐参数质量阻尼系统、可控摩擦式隔震系统。

### 1.2.1.4 混合控制系统

混合控制是主动控制和被动控制的联合应用，使其协调起来共同工作。这种系统利用被动控制和主动控制的各自优点，它可以通过被动控制系统大量耗散能量，又可以利用主动控制系统来保证控制效果，有着良好的应用前景。结构智能控制是国际振动控制研究的前沿领域。由智能材料制成的智能可调阻尼和智能材料驱动器构造简单、耗能小、反应迅速、几乎无时滞，在结构主动控制、半主动控制、被动控制中有着广阔的应用前景。

### 1.2.2 结构动态特性

结构控制顾名思义是对结构本身受到外扰时的控制,要得到满意的控制效果必须依据结构的动态特性,也就是结构的动力学模型。

任何结构都可看作是由刚度、质量、阻尼矩阵组成的动力学系统。结构在正式使用前有一个基本的动态特性,在使用过程中由于受到各种突发性外在因素的影响以及随着服役时间增长系统的响应和模态参数(频率和振型)等动态特性将发生改变,改变的程度表示结构损伤的大小,也就说明了结构的健康状况。

结构健康状况的检测技术根据使用的测量数据类型可以分为基于静态测量数据的结构检测方法和基于动态测量数据的结构检测方法。基于静态测量数据的结构检测方法是以静态测量数据(如静态位移、静态应变等)对结构进行识别;而基于动态测量数据的结构检测方法则是运用动态测量数据(如固有频率、模态振型、柔度等)对结构进行识别。因此,可以通过结构的静态参数和动态参数的改变对结构进行检测,即通常所说的结构损伤识别。

结构的静态特性参数主要有结构的刚度、结构静态位移、应变、材料的特性参数(如材料的弹性模量截面的面积)等。结构发生变化(损伤)时会引起结构单元刚度的变化,从而使结构的位移、应变等参数发生相应的变化,通过对结构的位移、应变等的测量,利用上述参数在发生损伤时计算值与测量值的残差分析来实现对结构特性的检测。

1991年 M. Sanayei 提出了一种迭代优化方法,运用缩减技术来测量位移,利用测量的静态数据识别结构的单元参数,其局限性在于它要求对于一组载荷,每次载荷作用下测量的位移自由度必须相同。L. H. Yam 等通过有限元模型对板类结构的挠度、挠度斜率及挠度曲率构造的损伤因子进行敏感性分析,实现结构损伤的识别。X. Wang 等研究了利用静态测量数据及频率变化,运用损伤指标对结构损伤进行定位,再运用迭代计算求解非线性优化问题,对结构的损伤大小进行识别。K. D. Hjemstad 等利用结构的静态响应,通过待识别参数组的自适应算法对结构损伤进行识别,将未知数分为单元的基本参数和未测量的位移两部分,未测量的位移作为未知变量导致了算法的稳定性的减小。M. R. Banan 等运用静态测量数据将结构的损伤识别问题转化为以残余力误差和位移误差最小为优化目标函数的优化问题,并且研究了一种迭代算法求解该优化方程。

目前基于静态测量数据的结构损伤识别方法主要存在以下两个方面的问题:①相对于基于动态测量数据的损伤识别技术而言,基于静态测试数据的损伤识别方法由于可利用的测量信息量少,而难于得到理想的识别结果;②对于一个确定的结构而言,由于加载工况有限而导致在某个载荷工况作用下,对结构变形影响很小的那些损伤构件难于被识别出来。

基于动态测量数据的结构损伤识别在结构状况识别中具备远程在线检测的潜在优点。可以利用环境激励引起的结构振动来对结构进行检测,从而实现实时监测。因此以振动模态分析为核心的整体结构检测技术在过去近 20 多年里得以快速发展和广泛应用。

常用的基于结构动态试验参数的损伤识别指标主要有：固有频率、位移模态振型、位移/加速度频响函数、曲率模态振型、应变模态振型和应变频响函数等。在损伤识别方法的研究方面，除了传统的灵敏度法以及优化算法，近年来还引入了小波分析、遗传算法、人工神经网络等方法，这些都为动力损伤识别的推广起到了积极的作用。

### 1.2.3 主动控制算法的理论研究

从原理上来说，主动控制是依靠外加能量来抵消结构的动态响应，从而达到控制结构运动的目的。主动控制系统的框图如图 1.2。①在结构的适当部位安放测量外部激励或结构反应的传感器，或者同时测量激励与结构反应的传感器；②处理测得的信息和根据控制算法要求计算必需的控制力的计算机中央处理系统；③产生所需的主动控制力的作动器。

下面将从控制算法现有的研究工作加以评述。

#### 1.2.3.1 最优线性控制律

最优线性控制律是将自动化领域中的最优控制理论借鉴来用于结构主动控制领域的一种控制算法。

系统状态控制的任务是，当系统状态由于某种原因偏离平衡状态（定义为零状态）时，施加控制输入并在不消耗过多能量的情况下，使系统趋于零状态。系统状态最优控制问题就是在无限时间区间内，寻找最优控制，将系统从初始状态转移到零状态附近，并使性能泛函取极小值。

#### 1.2.3.2 瞬时最优控制算法

经典最优线性控制律由于在确定反馈增益矩阵时无法考虑外部激励的影响，这对主要是由于地震引起结构振动的结构地震反应主动控制问题来说，其应用就受到限制。另一方面，作为空间非平稳随机过程的未来地震动尽管不可先验预知，但可以通过布置在结构物基底处的传感器来实时测量地震动历程。基于上述事实，J. N. Yang 等通过采用时变的关于当前反应状态与控制力的二次性能指标，导出了瞬时最优控制算法，包括瞬时最优闭环控制算法、瞬时最优开环控制算法以及瞬时最优开—闭环控制算法。J. N. Yang 的瞬时最优控制算法较经典最优控制律具有下述优点：其一，反馈增益矩阵的确定不需解矩阵 Riccati 微分方程，因而在实际应用及模拟实验方面容易实施。其二，瞬时最优闭环控制律中的增益矩阵与结构系统特性无关，因此其控制系统的鲁棒性能较好。其三，瞬时最优控制律的反馈增益矩阵具有时间步进性质，可推广应用于非线性结构系统及弹塑性结构系统的主动控制。

#### 1.2.3.3 独立模态空间控制

从结构动力分析理论我们知道，对于采用 Rayleigh 比例阻尼的线性结构，采用模态解耦技术可将物理空间结构动力响应问题转化为模态空间非耦合的独立模态响应分析问题，然后按模态反应来叠加可得物理空间结构的响应值。基于上述原理，自然引申出经模态变换将物理空间的结构控制转化为模态空间来控制各个模态响应，但这要求控制力由各

个单独的模态反应值来反馈确定。

L. Meirovitch 系统地研究了独立模态空间控制算法在结构主动控制中的应用, 同样由于结构的地震反应仅由少数几个低阶振型反应所控制, 因此独立模态空间控制算法在计算、存贮及实施可行性方面均具有较好的优势。另一方面, 通过引入关于模态响应状态与模态控制力的性能指标泛函, 那么可以优化确定模态反应反馈增益、得到最优模态控制力, 然后通过模态叠加解得空间的控制力大小。

#### 1.2.3.4 界限状态控制

从原理上来说, 结构主动控制的实用控制目标有两个: 其一是满足结构使用性能及居住者舒适性; 其二是控制结构在恶劣环境荷载作用下不倒塌。而另一方面无论是使用性能控制目标或者是抗倒塌控制目标均可通过控制结构物的位移、速度与加速度反应在一定的范围内来实现。这样, 主动控制的目标是控制结构的反应状态向量在事先预定的取值范围内, 这就是界限状态控制。界限状态控制由于控制目标直接、明确, 因而在结构主动控制中有重要的实用价值。在界限状态控制中, 研究较多的是主动脉冲控制算法。主动脉冲控制通过脉冲控制机构, 对结构施加一系列脉冲力, 使结构在这些脉冲作用下的反应抵消结构在环境动荷载作用下的动力反应。F. E. Udwadia 通过布置在结构上的传感器不断跟踪结构的反应状态, 当某一反应状态超出预先指定的阈值时, 控制系统启动脉冲机构产生相应的脉冲力使结构的反应状态返回到预定的阈值范围内。S. K. Lee 则通过采用线性状态反馈控制律及 Lyapunov 函数法来达到界限状态的控制目标。界限状态控制的主要优点是控制目标直接明确, 实施简单, 在线计算工作量少。另外的优点是它可直接用于非线性结构系统的主动控制。

#### 1.2.3.5 非线性控制算法

理论的发展总是遵循由简单到复杂的科学发展规律。目前, 结构控制也正在向非线性时变结构的振动控制研究方向发展。根据人们目前公认的抗震设计原则及结构控制发展水平看, 非线性地震反应控制的研究有着下述两个方面的起因。首先, 既然主动控制是作为未来超高层结构与大跨度结构在恶劣环境作用下结构安全可靠性的保证措施而提出的, 那么从经济性及能源消耗方面出发, 含控制机构的结构只需在地震作用下不发生倒塌或危及生命安全的破坏, 即应允许结构在非线性阶段工作。其二, 理论与实验表明, 主被动混合控制系统对结构的地震振动控制相当有效, 而作为被动控制元件的耗能与隔振元件在地震作用下是通过非弹性大变形来消耗地震能量, 因此, 主被动混合控制系统在本质上就是一个非线性系统。另外, 对于钢筋混凝土结构来说, 由于混凝土材料的本构关系即使在小应力状态下也是非线性的, 因此, 钢筋混凝土主动控制结构系统本质上也是非线性的。

目前研究非线性结构动力反应的主动控制的工作尚不多见。S. F. Masri 采用主动脉冲来控制结构的非线性地震反应, 当结构的反应值超出某一限定的阈值时, 控制系统启动脉冲发生器产生相应的脉冲力使结构的响应值返回到指定的阈值范围内。脉冲力的大小由结构的速度响应值来确定, 这是一种非最优的界限控制法。S. F. Masri 等假设结构的响



应是一确定性过程与随机过程的叠加，然后极小化脉冲力发出一段时间内结构的确定性响应值来确定脉冲力的大小。A. M. Reinbom 等通过跟踪单自由度结构当前的响应状态来估计下步结构的响应状态，当预估的未来响应值超出指定的阈值时，脉冲控制系统启动工作，使结构的未来响应值返回到限定的阈值范围内。J. N. Yang 采用关于控制力向量与反应状态向量的瞬时性能指标，在每一时刻极小化该瞬时性能指标导出了非线性结构的瞬时最优控制算法。J. N. Yang 与李再明将这一算法广泛用于主被动混合控制系统，由于主被动混合控制系统的非线性仅局限在隔振与消能元件等局部范围内，因而效果较好，但计算量比较大。

### 1.2.3.6 自适应控制

土木工程领域存在着强烈的非线性和不确定性，由此而产生的自适应控制问题一直备受关注。

自适应控制系统根据系统参数、结构和环境的不确定性来调节控制器，使之能达到期望的系统参数。它的三个功能是：①在线辨识：不断在线检测受控结构的当前状态，并加以处理，即识别结构对象。②决策过程：将当前系统的性能与期望的或者最优的性能相比较，并做出使系统趋向期望或最优性能的决策。③在线修正：对控制器进行适当的修正，以驱使整个闭环系统走向最优状态。

自适应控制系统的主要形式有两类：

第一类，模型参考自适应控制系统（MRAC），见图 1.3。

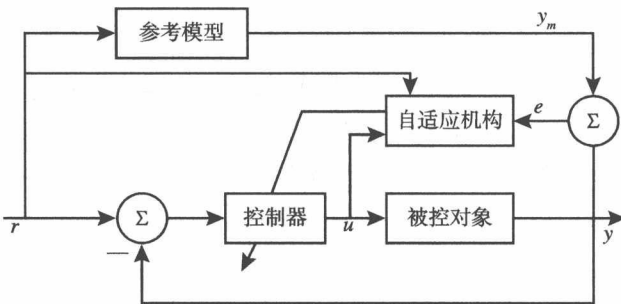


图 1.3 模型参考自适应控制系统

Fig. 1.3 Model reference adaptive system

模型参考自适应控制设计的目的是使受控对象的输出跟踪给定的理想参考模型的输出轨迹，并且能达到闭环稳定。闭环控制系统能够调节系统变化和不确定性，并获得较好的工作性能。

第二类，自校正控制系统（图 1.4）。

自校正控制技术是参数的在线估计与参数自动整定相结合的一种自适应控制技术。自校正控制的基本思想是将参数估计递推算法与各种不同类型的控制算法结合起来，形成一个能自动校正控制器参数的实时计算机系统。

未知参数用递推估计方法在线估计，估计出的参数就看作是真实参数，即不考虑估计