

结构控制理论及其应用

李桂青 霍达 邹祖军 著

武汉工业大学出版社

PDG

序

本书是国家自然科学基金与城乡建设科学技术基金联合资助项目“结构控制与控制结构”的主要研究成果。本书初稿及其部分内容曾在湖北、云南、沈阳、武汉等省市的建筑、水利学会和我校讲授过多次，这次出版时又作了一些修改。据我的教学经验，本书作为土建专业和工程控制研究生的教材是适宜的。

结构控制分为被动、主动、半主动控制三种基本类型。它作为一门学科来说，主要研究结构控制的理论、方法和措施，重点是控制机构的设计。在结构控制的研究与应用中，发展最快、最早的是属于被动控制的隔振装置，迄今已有一个多世纪了。但作为现代结构控制，特别是主动、半主动控制的研究和应用，还只有十几年的历史。1972年，美籍华裔科学家 J. J. P. Yao 首次提出了结构控制的概念。此后，研究者才开始基于经典和现代控制理论系统地研究结构振动控制。1987年，著者首次提出了“控制结构”的概念，并开展了一些有意义的研究。本书第一章将系统介绍结构控制与控制结构的基本概念、基本组成、发展简史与研究、应用的现状以及值得进一步研究的问题。考虑到广大土建工程技术人员、土建专业研究生对于现代控制理论是不熟悉的，因而在第二章中比较通俗地介绍了一些基础知识，如状态变量法、系统可控制性与可观性以及最大(小)值原理、状态滤波器、成型滤波器等。

第三、四、五章主要结合建筑结构质量大、自由度大的特点以及所受动荷载的特点提出的最优控制与次优控制算法。第三章属于一般计算理论和算法，包括最优控制、瞬态最优控制、界限控制、极点配置和模态控制等算法。第四章是高耸和高层结构的最优控制算法。第五章是关于结构振动的次优控制，包括降阶控制以及振动控制的摄动解、参数化方法和时滞问题。

第六章是结构振动的模糊控制。在这一章里，著者首次提出使用模糊状态对结构振动进行控制，并建立了求解模糊参数控制问题的一般方法。第七章讨论线性、非线性结构的非线性控制，以及非线性结构的线性控制问题。第八章介绍我们近年来研究的一种次优状态估计和预测实时控制律，并与 J. N. Yang 教授提出的实时控制方法作了比较。

第九~十二章是结构控制理论的应用。第九章研究两相邻框架结构的被动控制和半主动控制。第十章研究抗风结构的被动控制和主动控制。第十一章研究抗震结构的控制，包括摩擦阻力层隔震体系的应用、结构顶部突出物的减震效果、以及非线性主动控制方法等。第十二章介绍质量泵的工作原理及其在抗震、抗风中的应用。

第十三章是有关结构振动控制的可靠性问题，首次提出了考虑控制机构影响的结构控制与控制结构的可靠性分析方法、基于可靠性约束的单自由度和多自由度结构的控制设计方法，以及值得进一步研究的若干问题。

参加本书工作的还有曹宏、李秋胜、徐家云、欧四媛以及徐海燕、熊火清、蒋启平、方建桥、李大望等同志。

本书由赵娟等同志抄写，谨致谢意。

我们对结构控制的研究尚不足十年的时间，对某些问题的研究还不够深入和成熟，有的还在探讨中，故书中必定存在不少缺点，甚至错误，敬请读者指正。

李桂青

1991年9月

常 用 符 号

除特别说明者以外, 各符号代表的意义如下:

- $\in$ ——表示元素与集合的属于
- $\subset, \subseteq$ ——包含于
- $\cup, \cap$ ——并、交
- $\forall$ ——对于所有的或任意的
- $\underline{A}, \underline{B}$ ——模糊集合
- $M[\cdot], E[\cdot]$ ——数学期望
- $\exists$ ——至少存在一个(或总有)
- $\wedge, \vee$ ——取小、取大运算
- supp——支集
- min, max——最小、最大
- σ ——标准差
- μ ——隶属函数
- sign——符号函数
- ξ, ω ——阻尼比、圆频率
- $m, \mathbf{M}$ ——质量、质量矩阵
- $c, \mathbf{C}$ ——阻尼、阻尼矩阵
- $k, \mathbf{K}$ ——刚度、刚度矩阵
- Sup——上确界
- $h(t), \mathbf{H}(\omega)$ ——单位脉冲响应函数、频率响应函数
- $S(\omega), \Phi(\omega)$ ——谱密度
- $u, \mathbf{U}$ ——烈度变量和控制
- $\mathbf{I}_n$ —— n 阶单位矩阵
- $\mathbf{A}_\lambda$ —— λ 水平截集
- $\otimes$ ——矩阵的Kronecker积
- $\ddot{\mathbf{X}}_g$ ——地震地面运动加速度
- $\text{tr}(\cdot)$ ——矩阵的迹运算
- $\det(\cdot)$ ——矩阵的行列式值
- $\mathbf{Q}, \mathbf{R}$ ——加权矩阵
- 0——模糊矩阵的积运算
- $\|\cdot\|$ ——范数符号
- $\mathbf{Y}_t$ ——对时间的一阶偏导数
- $\mathbf{Y}_{tt}$ ——对时间的二阶偏导数
- $\langle \cdot \rangle$ ——内积

目 录

第一章 结构控制与控制结构概论	1
§ 1-1 引言	1
§ 1-2 振动控制概述	1
§ 1-3 主动控制	3
§ 1-4 被动控制	5
§ 1-5 结构控制的发展简史	8
§ 1-6 值得进一步研究的问题	10
第二章 结构振动控制理论的基础知识	12
§ 2-1 概述	12
§ 2-2 状态、状态变量与状态方程	12
§ 2-3 线性系统方程的解	14
§ 2-4 连续时间状态方程的离散化	18
§ 2-5 线性定常系统的能控性与能观性	19
§ 2-6 最优控制的动态规划法	22
§ 2-7 最优控制的变分法	29
§ 2-8 最大(小)值原理	33
§ 2-9 状态滤波器	35
§ 2-10 成型滤波器	43
第三章 结构振动控制的一般计算理论和方法	47
§ 3-1 概述	47
§ 3-2 最优控制算法	47
§ 3-3 极点配置算法	54
§ 3-4 独立模态空间控制算法	51
§ 3-5 瞬态最优控制算法	59
§ 3-6 界限控制算法	62
§ 3-7 其它控制算法	63
§ 3-8 算例	63
第四章 结构振动的最优控制	70
§ 4-1 概述	70
§ 4-2 等截面高耸结构振动的最优控制	70
§ 4-3 变截面高耸结构振动的最优控制	72
§ 4-4 高层及多层结构振动的最优控制	77
§ 4-5 平板结构振动的最优控制	83
§ 4-6 算例	89
第五章 结构振动的次优控制	94
§ 5-1 概述	94

§ 5-2 结构振动的降阶控制	94
§ 5-3 结构振动控制的摄动解	97
§ 5-4 结构振动控制的参数化方法	99
§ 5-5 结构振动控制的时滞问题	100
§ 5-6 算例	105
§ 5-7 小结	106
第六章 结构振动的模糊控制	107
§ 6-1 概述	107
§ 6-2 模糊状态控制	107
§ 6-3 模糊参数控制	113
§ 6-4 算例	115
§ 6-5 小结	115
第七章 结构振动的非线性控制	116
§ 7-1 概述	116
§ 7-2 非线性结构振动的非线性控制	116
§ 7-3 线性结构振动的非线性控制	118
§ 7-4 非线性结构振动的线性控制	122
§ 7-5 算例	123
§ 7-6 小结	124
第八章 预测实时控制律	125
§ 8-1 概述	125
§ 8-2 预测实时控制律	125
§ 8-3 算例	127
§ 8-4 小结	128
第九章 相邻框架结构的振动控制	129
§ 9-1 概述	129
§ 9-2 两相邻框架结构的被动控制	129
§ 9-3 两相邻框架结构的半主动控制	138
§ 9-4 算例	142
§ 9-5 小结	143
第十章 抗风结构的振动控制	144
§ 10-1 概述	144
§ 10-2 抗风结构的被动控制	144
§ 10-3 抗风结构的主动控制	151
§ 10-4 算例	158
§ 10-5 设置多个主动TMD的高层建筑风振反应的控制	166
第十一章 抗震结构的振动控制	169
§ 11-1 概述	169
§ 11-2 摩擦阻尼层隔振体系与结构地震反应的控制	169

§ 11-3 基础滞后隔震层对建筑结构随机地震反应的控制·····	182
§ 11-4 结构顶部突出物的地震作用与减震作用·····	188
§ 11-5 抗震结构的非线性主动控制方法·····	197
第十二章 质量泵在建筑结构振动控制中的应用 ·····	201
§ 12-1 质量泵工作原理简介·····	201
§ 12-2 结构鞭梢效应的控制与分析·····	201
§ 12-3 质量泵对高层建筑结构地震反应的影响·····	212
§ 12-4 质量泵对高层建筑结构风振反应的影响·····	216
§ 12-5 结语·····	220
第十三章 结构振动控制的可靠性分析 ·····	221
§ 13-1 概述·····	221
§ 13-2 随机过程的交差问题·····	222
§ 13-3 基于首次超越机制的动力可靠性·····	225
§ 13-4 基于累积损伤的疲劳可靠性·····	227
§ 13-5 单自由度线性体系的动力可靠性分析·····	228
§ 13-6 多自由度或无限自由度线性体系的动力可靠性分析·····	230
§ 13-7 结构控制和控制结构的可靠性分析·····	232
§ 13-8 基于可靠性约束的单自由度结构的控制设计·····	233
§ 13-9 基于可靠性约束的多自由度结构的控制设计·····	234
§ 13-10 算例·····	234
§ 13-11 小结·····	234
附录一 被动TMD的参数对结构反应的影响 ·····	236
附录二 受控结构反应的计算机模拟结果 ·····	238

第一章 结构控制与控制结构概论

§ 1-1 引言

结构控制是最近十几年才发展起来的一门新兴学科，主要研究结构控制的理论、方法和措施。

结构控制分为被动控制(Passive Control，无外部能源，又称无源控制)与主动控制(Active Control，有外部能源，又称有源控制)，或二者的组合。它可以降低结构的重量，改善结构力学性能，提高结构承载能力和可靠度。因此，这门新兴学科涉及以下几个方面：

- 1、结构系统识别；
- 2、结构的静力与动力可靠度；
- 3、现代控制理论；
- 4、被动控制与主动控制以及二者的最优组合。

要想对结构反应进行有效控制，就必须首先对结构系统的模型和参数进行识别；而为了判别采取控制措施前后的结构可靠度的变化，就必须研究结构损伤、破坏机理和准则、结构随机反应及动力可靠度的分析方法；特别是为了对结构进行实时控制，提高动力可靠度，研究结构的微观损伤机理和准则是一个值得重视的方向。可见，结构控制是一门交叉学科，涉及结构理论、振动理论、控制理论、结构设计和材料科学等多门学科。

“控制结构”是一种有控制措施的结构工程学，是根据给定的控制条件将控制措施和结构作为一个整体进行优化设计。按照控制结构理论设计的结构，不仅可以控制其反应，如位移、速度、加速度等在给定的范围内，而且可以控制结构的破坏模式、塑性铰出现的部位和顺序等。

“控制结构”的概念是著者首次提出的⁽¹⁾，它与“结构控制”既有密切联系而又有所区别。“控制结构”是从控制的观点和条件来研究结构、设计结构，它不仅可以通过主动、被动控制措施来限制结构变形或变形的速度、加速度，也可以通过改变结构的刚度、质量分布和配筋来达到某种控制的目的。例如，适当调整顶部突出物的质量、刚度，增强其延性，可以大大降低主体结构的地震反应。“结构控制”则从结构的观点来研究和设计控制装置。

“结构控制”与“控制结构”学科是工程结构的一种新的设计理论。

§ 1-2 振动控制概述

振动控制包括振动利用和振动抑制，本书所讲的振动控制是指后者而言的。具体地说，结构振动控制是对结构的动力反应和动力不稳定性(自激振动)等振动现象加以控制，使其在规定的范围内工作。这里所讲的规定的范围，即控制条件，可以是结构关键部位(例如顶点)或层间位移、速度、加速度、延伸率，也可以是关键部位的裂缝宽度、内力等。控制值随控

制对象而异。振动控制措施大致可以分为五种类型:

1、消振

消振就是减弱振源,减小结构所受的动力荷载。这当然是一种治本的控制措施。

但是,除了一些与制造工艺有关的机械扰力可以减弱或控制外,工程结构所受的振源一般是与结构无关,或关系不大的外界因素,要将它减到预定的范围是困难的。例如,工程结构所受的风、地震、洪水等自然灾害作用,至今还没有将振源减到预定水平的可行措施。

2、隔振

隔振是振动隔离的简称。隔振装置是振源与结构(或者说隔振对象)之间的子系统,其作用是减弱或改变振源对结构的动力作用。隔振技术是振动控制中应用最广的一项减振技术。

振源通常分为力(或力矩)激振和运动激振。减小力激振的传递,称为第一类隔振或隔力;减小运动激振的传递,称为第二类隔振或隔隔。第一、二类隔振,过去常称为积极、消极隔振。我们建议不采用这种术语,以免与主动隔振(即需要外部能源的隔振)相混淆。

根据振源频谱特性的不同,可分为单频隔振,多频隔振和随机激励隔振;根据隔振对象自由度的不同,可分为单自由度系统隔振,多自由度系统隔振和无限自由度系统隔振;根据隔振对象力学性能的不同,可分为线性系统隔振和非线性系统隔振。

隔振技术的研究包括正过程与逆过程两个方面。所谓正过程,就是根据已知的振源特性及参数,试选隔振器特性参数及布置方式,然后计算隔振效果,直至满足要求为止。所谓逆过程,就是根据已知的振源特性、参数及预定的隔振要求直接确定隔振器特性参数及布置方式,利用优化方法求得隔振器的优化设计。以往的研究多属正过程,而逆过程则研究较少。

3、吸振

吸振技术是通过振动转移而达到抑制结构振动的一项减振技术。通常是在结构上附加一个子系统(称为吸振器),并尽可能多地将结构振动转移给这个子系统,从而实现对结构振动控制的要求。

例如,结构顶部突出物可以视为结构的子系统,如设计适当,则其突出物就是一个较好的吸振器。

4、阻尼减振

如所知,增大结构阻尼一般将减小结构的动力反应,特别是在共振区,阻尼对抑制结构反应的作用是很突出的。

对于复杂的结构体系来说,由于频谱较密,因而当承受宽带激励时,要完全避免共振状态是不可能的。在这种情况下,增大阻尼就是一种有效的振动控制措施。

结构阻尼的主要组成部分是材料阻尼。材料阻尼取决于材料本身的性质,其机理比较复杂,通常用其粘弹性性质来解释。所谓材料的粘弹性,系指它所具有的弹性与粘性的双重性质。其弹性表现为瞬时应力产生瞬时应变,并可贮存机械能。它的粘性使应力与应变是时变的,且应力不仅与当时的应变有关,而且还与应变的时程有关,并损耗机械能。这就是产生阻尼的原因。粘弹性力学的发展为建立粘弹性阻尼理论提供了理论基础。

阻尼减振结构的设计通常包括阻尼材料选择,结构形式与损耗因子的确定,共振频率估算及结构参数优化设计等。阻尼材料的选择依据是其工作环境、温度范围以及结构固有频率的分布和动力荷载的频带宽度等因素。一般说来,所选材料在给定的环境、温度及频带内应具有较高的损耗因子值。对于具有腐蚀、辐射的环境,则要求所选的阻尼材料具有耐腐蚀、

抗幅射的性能。致于阻尼减振结构的形式，则主要取决于原结构形式及减振结构的 空间 位置、重量、造价、施工条件等。当靠材料性能本身无法获得必须的损耗因子时，改进结构形式就具有突出的作用。

5、控制结构的优化设计

将结构与控制措施作为一个整体进行优化设计，或者仅从结构自身的优化设计来达到控制目标，是控制结构学的主要发展方向^{〔2〕}，国内近年来已经做了不少研究。

6、依靠外部能源提供控制作用，即主动控制(详见下节)。

上述的振动控制措施(1-4)可用图 1-1 表示。图中的隔振装置相当于一个滤波器，滤掉使结构产生较大振动的输入量；吸振器与结构构成一个新系统，从而改变原结构的动力特性，以实现控制目的；阻尼减振结构是直接增大结构阻尼以达到减振目的。在某些情况下，综合应用这些控制措施，可能会收到更好的效果。

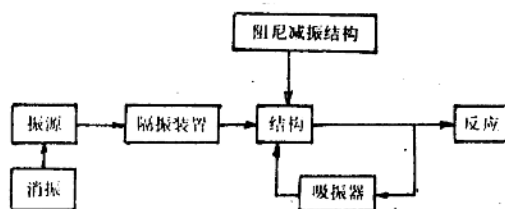


图 1-1 振动控制框图

§ 1-3 主动控制

主动控制是振动控制的现代方法，可分为开环控制、闭环控制和开闭环控制三种类型。开环控制是基于某种控制算法，仅由测得的输入(激励)信息来确定控制力，从而控制结构的振动。闭环控制是基于某种控制算法，仅由测得的输出(结构反应)信息来确定控制力，从而控制结构的振动。开闭环控制是以上两种控制的组合，同时使用输入输出信息来确定控制力。目前研究得较多的是闭环控制，可用图 1-2 表示。

整个系统由五个部分组成。

其工作过程是：结构(受控对象)在动力荷载作用下产生振动；安装其上的传感器实时发出输出讯号(经调制、放大后)传至控制器；控制器实现所需的控制律，其输出为驱动机构的指令；驱动机构所需的能量由外部能源提供，驱动力有时通过一个辅助子结构作用到受控结构上。上述几个部分构成一个闭环控制系统。

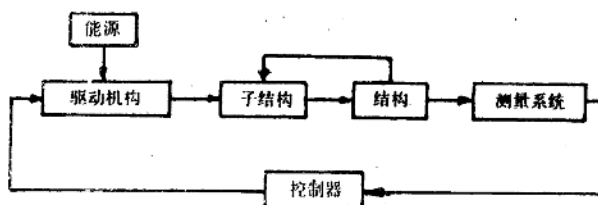


图 1-2 结构闭环控制框图

近十余年来，主动控制有以下发展：

1、脉冲控制

即控制力是脉冲函数，其优点是易于实现，可靠性高，便于受计算机控制。

2、数字控制

随着数字计算机的发展，数字控制占越来越重要的地位。其优点是易实现较复杂的控制律，且修改方便，易适应新的控制方案。

3、自适应控制

这是一种可实时识别结构参数和荷载参数并实时确定控制律的系统，可自动适应结构与荷载的变化，对于有可能受到自然灾害和人为灾害荷载的结构是很适当的。

4、半主动控制

所谓半主动控制，是一种主动改变结构参数(如阻尼)而并非提供控制力的系统。其优点是能耗小，但又可收到与主动控制相近的效果。

5、主动与被动的组合控制

主动与被动的组合控制往往比纯被动控制，有时甚至比纯主动控制的效果更好。它显然比纯主动控制能耗小，而且若与增加阻尼的被动控制措施相结合，则可补偿因“溢出”产生的不利影响，从而提高控制的可靠性和稳定性，也给控制律的设计带来方便。

近十余年来，虽然在结构主动控制方面进行了大量的研究，但实际应用还不是很多，且研究工作主要集中在求解最优控制力的方法上。预计在今后的若干年内，将主要研究能耗少、成本低的控制机构及其实施的最优化问题。以下主动控制机构可能是在结构控制中最有应用前景的：

1、调频质量阻尼器控制(Tuned Mass Damper Control，以下简称为TMD)

TMD是一个小的振动系统，由质量块、弹簧、阻尼延迟器组成。它是Frahm在1909年发明的。但直到现在，它主要被用于机械工程系统中。在过去十年里，TMD才逐渐用于对风敏感的结构中。这种机构主要依赖它与结构作相对运动，凭惯性对结构产生作用力来抵消干扰力，从而达到减振的作用。图1-3表示高耸结构顶部的TMD装置，其中 u 是主动控制力， K_d 、 C_d 分别为阻尼器的弹簧刚度和阻尼。 $d_1 + d_2$ 是质量阻尼器活动间距， A 为安全装置(Fail-safe Device)，它阻止质量块过大运行。当结构振动时，传感器在控制点处拾起结构的反应，接受传感器信息并进行加工的小型计算机控制驱动施力设备，使之推动质量块，同时对结构产生控制力，减小结构反应。

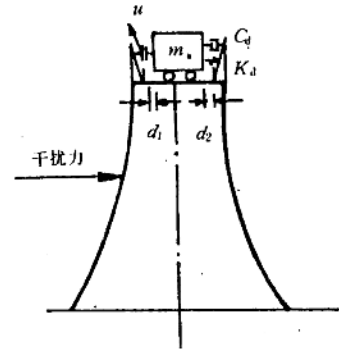


图1-3 高耸结构顶部的TMD装置

澳大利亚的悉尼Center Point Tower 是第一个在顶部安置大型TMD以减振的建筑(1971)，并把水箱包括在TMD设计中。在加拿大多伦多的National Tower 上安置了两个较小型的TMD，以减小其第二和第四振型的振动，使天线杆所受荷载最小。我们的理论分析表明，当TMD频率接近原结构的频率时减振效果最好，这时质量块相对于结构的位移也最大；质量块的质量与结构的质量之比愈大，减振效果愈好。

2、锚索控制(Tendon Control)

1960年，预应力的创始者Engene Freysinet 提出：在结构的有关部位设置预应力索(或预应力斜支承)，有可能对结构起到主动控制作用，就象人的四肢里的筋一样。几年以后，Lev Zetlin 采用这种方法设计了几幢高层建筑。他在框架上设置交叉锚索(图1-4)，使其在侧移很小时，呈松弛状态，而当侧移很大时，起斜支承作用，这就可以大大减小结构的侧移。具有这种锚索控制的结构表现出双线性的恢复力特性。这种控制方案既可用于控制

地震反应,也可用于控制风载反应。这个控制装置的组成是:在锚索上安装一些液压伺服机系统,并在横梁上安装一些传感器,当外力作用时,传感器把拾起的框架反应传给液压伺服机系统。此系统对锚索施加力,产生控制力 $u(t)$,使框架反应减小。最近Roorda, Schorn, Yang和Giannopoulos, Abdel-Rohman和Leipholtz研究了各种类型的锚索控制,并提出了分析这些锚索控制的方法,考虑了外部激励的不确定性因素。得出的结论是:这种控制方案可以大大减小结构的反应以及人的不舒适感。

3、主动空气动力挡风板控制 (Active Aerodynamic Appendages Control)

主动空气动力减振器成功地用于减小机翼的颤振。在土木工程方面, Klein等人首先考虑了使用类似百叶窗的空气动力挡风板来主动控制风导致的高层建筑反应。Klein提出的操作挡风板的控制系统是一个简单的开关控制系统 (on-off Control)。当建筑物顶部速度与风速度相反时,挡风板张开以扩大迎风面积。当与风向相同时,挡风板则完全叠合。在最近Soong⁽¹⁾进行的研究中,用最优控制方法设计挡风板运动,建筑物反应要比Klein设计的建筑物反应要小。不过,最优控制方法要求确定风的统计特性。挡风板引起某些来自风本身的控制力,使建筑物振动减小,如图1-5。控制挡风板的绝大部分能量来自风本身,只需要提供一小部分额外能量。正是这种节能的优点,使得人们对它愈来愈感兴趣,且易于被工程界接受。其缺点是它增大了总的迎面风压,使结构静位移增大。

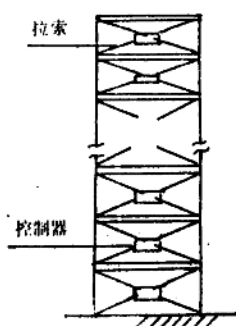


图 1-4 框架锚索装置

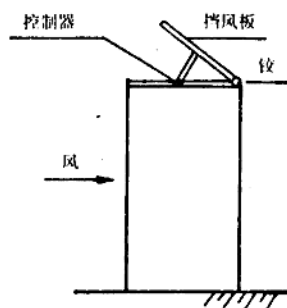


图 1-5 主动空气动力挡风板

§ 1-4 被动控制

被动控制是振动控制的经典方法,包括隔振、吸振、阻尼减振等控制措施,目前仍是一种广泛应用的方法。从控制角度看,它是一个开环控制。在结构控制中常用的被动控制措施有以下几种:

1、基底隔震控制

基底隔震系统通常由基底柔性装置和滞变阻尼器组成。基底柔性装置主要有三种:(1)具有从狭窄基底上设置的“跷板”侧向摇摆形式;(2)水平向柔性的橡胶支座,它带有钢片而有较高的竖向承载能力;(3)高柔的桩基和桥墩。滞变阻尼器主要有三种钢梁阻尼器和两种铅塞阻尼器。钢梁阻尼器利用实体钢梁的大塑性变形来耗散能量,它们之间的区别在于加载方式和保证其塑性变形均匀性的方式不同。铅塞阻尼器利用了铅的循环挤压,另外的一种是层状的橡胶支座。

层状橡胶支座是较为有效的隔震装置。所采用的橡胶一般有天然橡胶和氯丁胶。橡胶垫块对任何水平方向的运动均为柔性约束。对于小震来说,结构似同连在刚性基础上。对于强震来说,基底隔震系统将屈服,可吸收的能量相当于临界粘滞阻尼吸收能量的35%。橡胶轴承

提供剪切阻抗,使基础产生抵抗地震力的时变水平力(即被动控制力)。基底隔震结构具有以下一些特性:(1)基底隔震导致剪力沿结构下部有较均匀的分布;(2)滞变阻尼的引入,大大减小了基底位移、地震作用和结构变形;(3)高柔基底使二阶共振振型有较小的振型参与系数;(4)基底隔震装置的柔性使第一振型周期加长,它与大阻尼一起,通常给出较低的地震反应谱系数。基底隔震最适合于较短周期的结构,它能显著减小第一振型的反应。对于比较柔性的场地,应采用小的基底柔性。图1-6为几种基底隔震系统。

基底隔震装置还有两种较为常用的类型。一是滚子隔震,即在基底放置滚珠或滚柱作为隔震装置。因滚子的摩擦力极小,故能有效地隔离水平地震动作用。另一种是基底滑移隔振,它利用滑移摩擦层抗剪强度小的特点,来隔离水平地震动的作用,同时,又利用摩擦来耗散能量。对于这两种基底隔振装置都必须有限制建筑物基底可能产生的过大滑移或有复位装置,使结构在震后能恢复到原位。

2、摆式质量控制

当图1-3中的 $u=0$ 时,主动的TMD控制便转化为被动的TMD控制。当 d_1+d_2 较小且 $K_d=C_d=0$ 时,TMD便转化为碰撞阻尼器的形式。摆式质量减振器(图1-7)既具有与TMD(被动)类似的特性,又具有碰撞阻尼器的性质,它不需要输入外部能量,便能减小结构的振动。1950年苏联在一个100m高、50t重的钢电视塔(自振圆频率为5.047)的顶部安置4个各重250kg的摆锤,在撞击点装有橡胶皮垫层,以免局部撞坏。实测自由振动表明,由于安装摆式减振器,电视塔的对数衰减率由0.12增为0.56。次年又在—个80m高、330t重(包括衬砌)的钢烟囱(自振圆频率为2.417)顶部安置了8个各种650kg重的摆锤,在撞击点装有固结于烟囱壁的特制钢环。实测表明,对数衰减率由0.13增加为0.40,并能使风作用下的振幅减小到

1/3。原苏联建筑结构中央科学院进行了一系列试验和理论研究,结果表明:摆锤总重量愈大,减振效果愈好,而最适当的质量比为0.01至0.02;原结构的阻尼越小,减振器的效果越佳;采用几个球体碰撞不如采用具有相同质量的一个球体的减振效果好,而摆式减振器比用

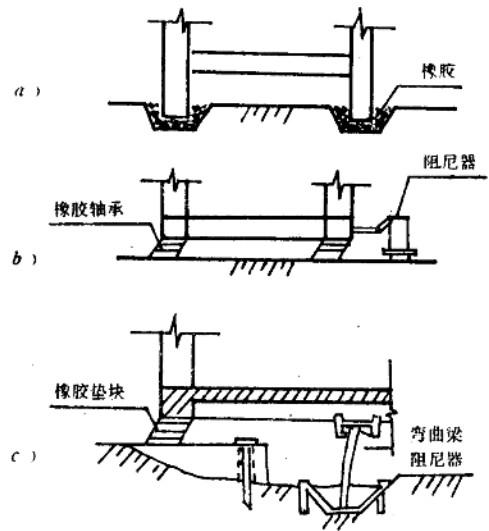


图1-6 几种基底隔震系统

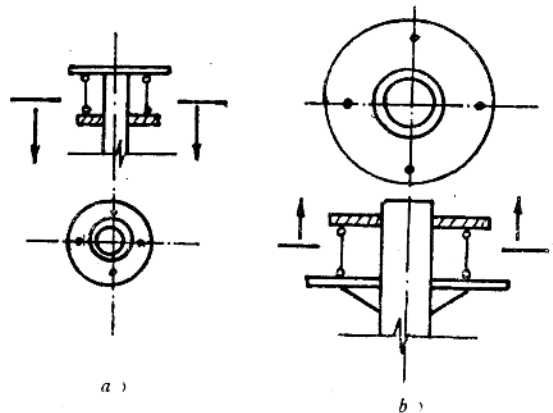


图1-7 摆式质量减振器

球体碰撞减振器有利。

3、耗能控制

耗能装置主要是在结构上安装的一些耗能材料制成的部件。当结构强烈振动时，这些部件产生很大的塑性变形，耗散能量，可以减小结构的振动。例如，在纽约世界贸易中心的双塔建筑结构中，安装了近两万个小型耗能器，即粘弹性材料(聚丙烯聚合物)。耗能器的一端(两根T钢)与柱连接，另一端(一块钢板)与桁架下弦连接。在强干扰作用下，结构产生变形，夹在T钢板间的粘弹性材料受剪而耗能，从而减小建筑物的振动和侧移。

4、利用结构构造的减振措施。

(1)利用结构自相碰撞而消能

例如，可以将防震缝适当缩小，而使其在地震时发生不大的自相碰撞而消耗地震能量。

(2)利用柔性底层减振

利用柔性底层减振的原理如同将底层作为隔振装置。从理论上讲，这种隔振措施对于水平地震动应有较好的隔振效果。但实际上却并非如此，主要原因是由于底层太柔，从而易于导致底层以及底层与上部结构连接部位发生破坏。今后应根据这种震害特点改善设计，适当提高底层，特别是底层与上部结构连接部位的强度和变形能力。

(3)设置消能缝

在建筑结构的承重墙或剪力墙中设置一些横向、竖向摩擦缝，或在底层设置水平消能缝，通过摩擦耗能而达到减振的目的。

(4)悬吊隔振

对一些有可能产生强烈振动的设备或者对振动特别敏感的设备，采用悬吊方法是一种常用的隔振措施。例如，火力发电厂的锅炉，特别精密的仪器厂的设备等，均常采用悬吊方法隔振。1971年以来，这种方法已发展到将整个结构悬挂在支承构件上。这种体系称为悬挂式结构，支承构件一般为钢筋混凝土结构，耗钢量少，能发挥多种材料各自的优越性能，有效使用面积大，抗震性能和隔振效果都比较好。

5、被动空气动力控制

它首先用于减轻圆柱体结构的横风向共振，办法是在圆柱体表面上安装一些干扰物，以扰乱涡流脱离激振的规律。这些干扰物可以是缠绕螺旋索圈或螺旋性刚肋或开孔套管。被动空气动力减振器遮板还用来减小桥面的振动。这类被动空气动力减振器的优点是形式简单，易于实现和维护；缺点是增加了顺风向的风压，使结构造价提高。

6、质量泵(MP)

质量泵(Mass Pump, 简称MP)的构造如图1-8所示，它由两个可伸缩的波纹管及其上、下隔板和柔性导管组成。两个波纹管用柔性导管连通，其内充满液体。如果波纹管的上隔板交替地受到拉力与压力作用，则导管内的液体将由于导管两端的压力差而发生振动。这种装置相当于增大了结构的阻尼，增长了结构的自振周期，减少了地震输入，从而能达到减低地震反应的目的。

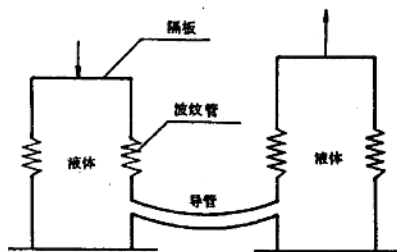


图1-8 质量泵构造

7、调谐液体阻尼器(TLD)

调谐液体阻尼器 (Tuned Liquid Damper, 简称TLD)是通过结构上固定容器中液体的运动来消耗和吸收振动能量,从而达到控制结构振动的目的。

TLD最早应用在太空飞行器和海洋轮船上,近年来被用于土木工程结构的振动控制中。这种方法的优点是成本较低,安装简便,并易于维护。国外已在这方面进行了大量研究和模型试验,对影响TLD减振效果的诸因素:如液体频率与结构频率比、液体质量与结构质量比、液体粘性、容器底部的粗糙度等,都作了理论和实验分析。

8、其它被动控制

除了上述控制机构外,还有控制悬索结构的扭转振动的回转仪;在框架上安装预应力斜支撑或锚索;两相邻建筑之间安装吸振器等。

§ 1-5 结构控制的发展简史

在结构控制的研究与应用中,发展最快、最早的是属于被动控制的隔振(震)装置,迄今已有一个多世纪的历史了。早在19世纪时,日本就开始采用隔振基础来建造抗震房屋。1906年,德国人J. Bechtold首次提出用滚球作为隔振基础,并申请美国专利。1909年,英国医生Calantarients提出采用滑石粉层把房屋与基础隔开作为重要抗震措施,并申请英国专利。1921年,由F. L. Wright设计的东京帝国饭店,把房屋的桩基落在地基上部的软泥层上,即利用软泥层作为柔软隔震层,曾经受到1923年东京发生的7.9级大地震的严重考验。1929年,新西兰B. W. de Montalk提出在结构物底部与基础顶面之间设置隔震层以减弱结构振动,并申请新西兰专利。1929~1938年,结构工程师Martel, Badnarak, Green, Jacobsen等相继提出柔性底层的抗震设计。1941~1970年, Ryniti, Caspe等提出用滚珠、滚轴作为隔震装置,并进行了试验研究,申请了专利。1969年,南斯拉夫在Skopje地区建成了一幢用天然橡胶垫块(无钢板夹层)隔震的三层钢筋混凝土框架教学楼。现在至少有十余个国家直接将隔震装置用于抗震结构,并已建成200余项工程。新西兰还在结构设计规范中首次写入隔震条文。法国目前正致力于把隔震橡胶垫(钢板夹层)标准化并应用于一般抗震建筑物,以及制订更完善的用于核电站反应堆隔震标准设计。

作为现代结构控制,特别是主动、半主动控制的研究和应用,可以追溯到60年代。如所知,预应力的创始者Eugene Freyssinet在六十年代提出用预应力锚索作为控制装置,以使高层建筑稳定。Lev Zetlin在1965年提出了设计高层建筑的独特思想,即把缆绳固定在建筑框架上,在底部设液压千斤顶,使用传感器测量建筑物顶部的运动,给控制装置发出信号,控制装置按控制律驱动千斤顶,从而达到控制结构振动的目的。Zuk提出了动态结构的思想,他认为各种各样的建筑物都应能改变形式、方式和结构,以便适应各种各样难以预知的环境干扰和功能要求。

1972年,美籍华裔科学家J. T. P. Yao (姚治平)⁽³¹⁾首次提出了结构控制的概念。此后,研究者才开始基于经典和现代控制理论系统地研究结构振动控制问题。Yao和Tang⁽⁴⁾为保证结构安全,设计了一个脉冲反馈控制器控制结构的反应。对于单自由度体系,控制力选为

$$F = \sum_{i=1}^n a_i H[|X| - \xi_i] \text{sign}(X) H(X \cdot \dot{X})$$

式中: a_i 是第 i 控制水平处的控制力增量, ξ_i 表示第 i 控制水平处的指定位移, $H[\cdot]$ 是Heaviside单位阶跃函数, $\text{sign}(\cdot)$ 是符号函数。他们还建议在设计中用一系列的Heaviside函

数来控制结构以保证高层建筑中居住者的舒适。此种脉冲控制不仅适用于多自由度线性体系,也适用于时变非线性体系,简单又易实施,系统可靠性高。Roorda⁽²³⁾应用液压伺服机油缸研究了高层建筑结构反应的锚索控制。Schorn, Yang和Leipholtz⁽⁴⁾等人研究了各种类型的锚索控制,并提出了分析这些锚索控制的方法。Martin和Soong⁽¹³⁾应用模态控制直接改变特殊振型和系统刚度,对多层建筑结构的控制进行了分析。Chang, Soong⁽²²⁾和Oren Vilnay⁽²⁰⁾也研究了模态控制设计。M. Abdel-Rohman和Leipholtz⁽¹⁵⁾研究了极点配置法在土木工程中的应用,以及状态反馈和输出反馈的设计,并把它们应用到一单跨梁中,结果表明:通过引进主动刚度和阻尼,可以大大减小受迫反应。Davorin Hrorat⁽¹⁶⁾等人研究了半主动和被动TMD的控制。William Le Messurier⁽⁴⁾用半主动控制系统建造了两幢高层建筑:一幢是波士顿的John Hancock大楼,它的TMD包括有两个300t重的质量块;另一幢是纽约的Citicorp大楼,这幢楼高914英尺,在顶部安装了近400t重的TMD,来减少大风时居民的不舒适感。这个装置具有两个弹簧阻尼机构和一个控制系统,它被用来收集信息并控制质量块的运动。这样使得结构的有效阻尼从0.01提高到0.03~0.04,从而使屋顶侧移大约减小一半。1975年, Sae-Vng和Yao使用Monte-Carlo法研究了满足居住者舒适度要求的结构控制。1977年,澳大利亚的悉尼Center Point Tower是第一个在顶部安装大型TMD以减振的建筑,并把水箱包括在TMD的设计中,在加拿大的多伦多National Tower上安置了两个较小型的TMD,以减少其第一和第四振型的振动,使天线杆所受的荷载最小。

1978年9月,在苏格兰爱丁堡大学举行了欧洲的结构振动控制学术讨论会。1979年和1981年,国际理论与应用力学协会(IUTAM)在加拿大召开了第一、二次“结构振动控制”的国际会议。在第一次会议上就宣读了43篇论文,全面展示了这方面的研究成果。会议得出结论:可以立即有效地将最优控制用于以下土木工程结构:

(1)控制桥梁抗御移动荷载和风荷载所引起的过大变形和加速度;

(2)控制高柔构筑物的地震反应和风振反应;

(3)控制建筑物基础适应土质条件的改变。这次大会还讨论了结构控制理论,控制措施,最优控制模式,主动控制的实现等方面的问题。Yao将系统识别技术用于土木工程中,阐述了结构识别、控制和可靠性的相互关系。

80年代, Yang, Abdel-Rohman^(12, 29, 60)等,对高层建筑在随机风荷载和地震荷载作用下主动TMD和主动锚索控制系统的适用性和可行性进行了广泛的研究。Yang和Lin⁽³⁰⁾对结构起主要作用的重要振型的优化控制进行了探讨,并对非控制振型的影响作了说明,对结构的优化开环控制也作了尝试。Bashashkiah和Yao⁽²⁴⁾研究了高层建筑等柔性结构的控制设备的增益和时滞的影响,并且发现增益越大,时滞越小,则控制系统越有效。传递矩阵也被用于求解结构反应的统计特性,它不需要计算机在线工作,控制参数一旦确定,控制系统属于半主动控制系统。Yao⁽¹⁸⁾等人研究了主动控制的可靠性,指出其可靠性在很大程度上取决于控制器的时间常数和电器的可靠性。Wang和Yao应用模型跟踪作为超前过滤器并将其视为控制系统的一部分产生窄带随机过程,对结构疲劳问题进行检测和控制。Abdel-Rohman研究了具有分布参数系统的优化控制问题,他提出使用函数分析法代替模态方法,以系统的封闭解作为设计基础。

日本是一个多强风多地震的国家,在结构振动控制方面进行了不少研究,其研究主要在隔振和吸振这两种控制措施方面。他们做了大量的实验研究,不断改良吸振器的效能。在理

论计算方面,他们主要采用定点理论,即多自由度体系在外干扰作用下,分别求解反应谱 $X_i(\omega)$ 在阻尼比 $\omega=0$, $\omega=\infty$ 时的交点 P_i 点即为第 i 个定点,在“所有定点等高”的优化调整条件下,求各控制器参数的理论。此理论应用简便,但自由度越多,计算难度就越大,一般适用于低阶系统。他们还将定点理论与振动测定法联合应用于结构振动控制问题。他们采用的质量感应理论的方法是:先求结构的振型(正规化后),确定控制器的优化位置,进而求相应位置上需要的单自由度体系的换算质量,最后用一般控制器的设计理论求控制器的各种参数。80年代以来,日本对被动TMD进行了大量的理论,试验研究和开发利用。1986年在Chiba Port Tower 125米高上设置支承式被动TMD,并在1987年12月17日近海地震(5级)中经受了考验。经分析,由于设置了TMD,使顶层位移减少了15%,而加速度则仅减少了2%,其原因是该TMD的设计未考虑高振型的影响。日本157m高的办公楼Crystal Tower利用顶层的蓄水箱(约1000吨)做成悬吊式TMD体系,Shibaura Square Building也装设了被动TMD。在主动控制方面,Takenaka公司正在为一幢高层建筑设计主动TMD系统。现已完成一个具有10kg重的主动TMD的6层结构模型的地震模拟试验,能使结构地震位移反应衰减至1/6。日本鹿岛(株)公司正开发主动拉索控制体系。东京大学、Nihon大学等均参与了主动TMD的开发研究。日本与美国合作,已完成了一个具有200kg重的主动TMD的6层(5.4m高)结构模型的地震模拟试验。美国已完成几个具有主动TMD的3层、6层结构模型的地震模拟试验。

在我国土木工程界进行结构振动控制的研究是从80年代初开始的。王光远教授对高耸结构风振控制的研究现状作了综合评述^[5]。1984年以来,本书作者们一直从事于在随机荷载作用下结构振动的主动控制与被动控制的研究工作。在文献[1]中,系统地介绍了结构振动控制的基本概念、基本原理、发展简史、计算方法及有待进一步研究的问题,给我国工程界展示了崭新的研究领域。之后,首次提出了控制结构这一概念,并着手进行研究^[2]。在文献[6]中,首次使用卡尔曼最优滤波和“分离定理”研究了高层建筑结构关键振型的控制,分析了非关键振型对结构反应的影响。研究了质量泵的工作原理,各参数变化对结构的影响,质量泵的参数优化理论^[7],以及质量泵对鞭梢效应的控制等。用等价值线性化方法,研究了基底隔振系统的参数优化问题^[8],用优化理论提出了在梁端设置人工滞后铰的高层框架结构的减振控制方法,使结构在小烈度下保持在弹性状态正常工作,在大烈度下,使梁端人工滞后铰进入塑性而柱仍处于弹性状态^[9,10]。另外,用最优化控制理论提出了高耸结构模糊随机风振反应振型控制的一般设计方法。除此之外,哈尔滨建筑工程学院、国家地震局工程力学研究所、西安交通大学、西北工业大学、南京航空学院等单位就隔振、脉冲控制、吸振器的最优设计等方面作了不少有益的工作。

§ 1-6 值得进一步研究的问题

结构控制在近年来虽然发展很快,但毕竟还是一门发展中的学科,诸多问题的研究尚处于起步阶段。在最近十余年内,我们认为应着重开展以下研究:

- 1、寻求能耗少、造价低、施工简便、稳定性好、可靠性大的主动控制与被动控制。
- 2、主动与被动的最优组合控制。
- 3、半主动控制。

- 4、控制力的大小、作用点、控制规律以及实施的最优化问题。
- 5、结构控制与控制结构的实用计算理论、方法和设计专家系统。
- 6、在随机荷载作用下的线性、非线性离散系统和分布参数系统的控制。
- 7、结构扭转振动的控制。
- 8、能量法、有限元法在结构控制中的应用。
- 9、结构控制的稳定性和可靠性。
- 10、模糊数学、系统识别在结构控制中的应用。
- 11、成本低、性能好的隔振、消能材料、元件和装置。
- 12、利用结构构造来减弱、控制结构振动的方法。

随着轻质、高强的新型材料的广泛应用和高层、高耸、大跨结构的发展，以及建筑装饰标准的提高和居民对避免风振不适感的要求，控制结构将可能逐步取代传统结构。但土木、建筑工程是体积庞大，且重量达千、万吨级，因而无需外部能源的被动控制，调整结构刚度、质量、强度分布的控制和改善结构构造的减振措施，以及耗能较少的主动与被动的最优组合控制和半主动控制将是近期的主要发展方向。

根据已有的研究和实践经验来看，对单、多层建筑来说，应着重开展隔震研究和应用隔震控制；对一般高层建筑来说，应着重开展耗能减震、TMD、TLD、质量泵等的研究；对超高层建筑、超高耸结构以及超大跨结构来说，应着重开展主动与被动，或半主动与被动的组合控制。

最后还应指出，为了确保结构在任何情况下，包括遭受人为灾害和特殊自然灾害时的可靠性，只有采取控制措施，才是最经济和最有效的设计。