

阻尼减振降噪技术

戴德沛 编



ZUNI JIANZHEN JIANGZAO JISHU

西安交通大学出版社



PDG

内 容 提 要

本书系统地阐述了阻尼减振降噪技术的理论问题和应用技术。书中首先阐明了阻尼技术的概念、特点和应用范围，进而分别介绍阻尼的数学描述方法；阻尼材料及材料性能；附加阻尼结构的理论、计算、设计和设计优化问题；各类阻尼减振器和阻尼动力消振器；干摩擦阻尼及接合面阻尼等，通过对结构损耗因子相关因素的分析研究，着重讨论了提高阻尼减振降噪效果的理论及技术。

本书可供各行各业从事振动与噪声控制工作的研究人员及工程技术人员参考。也可作为高等学校研究生及大学本科生的教学参考书。

阻 尼 减 振 降 噪 技 术

戴德沛 编著

西安交通大学出版社出版

(西安市咸宁路28号)

西安交通大学出版社印刷厂印装

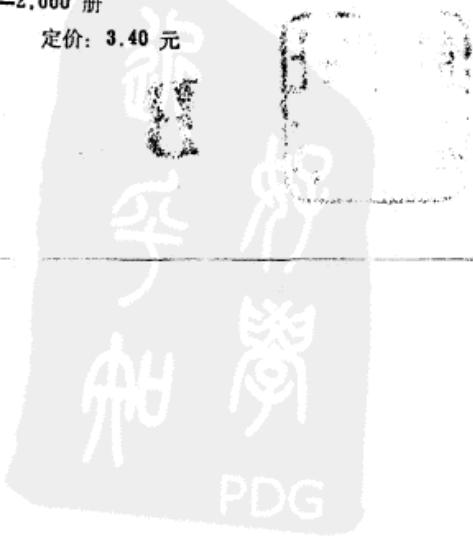
陕西省新华书店发行·各地新华书店经售

开本 787×1092 1/16 印张 18 字数: 435 千字

1986年6月第1版 1986年6月第1次印刷

印数: 1—2,000 册

统一书号: 15340·054 定价: 3.40 元



序 言

阻尼减振降噪技术是随着航天工程发展起来的一项新技术。后来迅速向民用工业扩展，几乎在所有经济部门的各个领域里都得到广泛而有效的应用。例如空间技术中各类飞行器的减振；飞机机舱的减振与降噪；降低各种地面交通工具的振动与噪声；降低舰艇，特别是潜水艇的噪声使其免被敌方的声纳仪器所发现；降低水面交通工具如气垫船的振动和噪声等等。阻尼技术不仅可以降低各类机械如轻纺机械、木工机械、食品机械以至家用电器的振动和噪声，提高产品质量，减少噪声污染，而且还可以提高各种土木建筑结构的抗振性和稳定性。由于阻尼技术产生了巨大的经济效益和社会效益，它在国内、国外的发展都是十分迅速的。

应用阻尼技术，对某些产品例如耐用日用品、音响设备、运动器械等甚至可起到更新换代的突出作用。使许多产品在国际国内市场上，提高竞争能力。同时，随着阻尼技术的推广应用，还发展了阻尼材料和阻尼器件的工业，形成了一个新的材料工业部门。

西安交通大学机械工程研究所阻尼技术和减振降噪研究组多年来从事阻尼技术的理论与应用研究工作，将这项技术应用于航天工程、仪器仪表、纺机织机、木工机械、家用电器以及切削机床等方面，取得了一定的成果。作者根据国外、国内的资料以及近年来的科研实践写成本书，目的是希望有更多的同志一起来开发和应用阻尼减振降噪新技术，为国家经济建设服务，也使从事于这项工作的同志有一本系统的参考书。由于本书的理论部分曾经多次作为研究生和高年级学生的教材和主要参考书，所以本书也可作为研究生专业课、本科生选修课、或对工程师进行继续工程教育的教材。基于以上原因，本书在编写过程中，力求照顾到理论上的系统性以及应用技术的实用性。

书成之后，西安交通大学杨延麓教授审阅了全书，并提出了许多宝贵意见，黄协清讲师校核了公式，图表及符号，作者表示深切的感谢。

作者受水平限制，书中难免存在缺点错误，热诚希望读者批评指正。

目 录

第一章 阻尼减振降噪技术的基本问题

- § 1. 振动与噪声的危害.....(1)
- § 2. 振动与噪声控制的主要方法.....(3)
- § 3. 阻尼减振降噪技术的定义、实例及研究范围.....(6)
- § 4. 阻尼技术的现状及发展.....(12)

第二章 阻尼的特征值和数学描述

- § 1. 阻尼的产生机理.....(16)
- § 2. 阻尼特征值的数学描述及测量方法.....(21)
- § 3. 各种阻尼特征值的相互关系及其评价.....(43)

第三章 阻尼材料的物理机械性能及其测定方法

- § 1. 阻尼材料的物理机械性能.....(48)
- § 2. 阻尼材料.....(54)
- § 3. 阻尼材料物理机械性能的测定方法及仪器.....(62)
- § 4. 试验数据处理.....(80)

第四章 附加阻尼结构的理论和计算

- § 1. 概述.....(88)
- § 2. 自由阻尼结构的理论分析与计算.....(90)
- § 3. 自由阻尼结构的应用举例.....(100)
- § 4. 约束阻尼结构的理论分析.....(105)
- § 5. 约束阻尼结构的参数及其优化.....(116)
- § 6. 插入阻尼结构的理论分析与计算.....(123)
- § 7. 附加阻尼结构的模态变形能分析法.....(130)
- § 8. 适应各种边界条件的理论式及实际计算.....(133)

第五章 附加阻尼结构的设计和应用

- § 1. 附加阻尼结构理论算式的推广.....(145)
- § 2. 多弹性层组合结构的参数设计、优化及实例.....(155)
- § 3. 工作温度对设计的影响——地毯图.....(178)
- § 4. 附加阻尼结构的结构设计与设计优化.....(180)

§ 5. 附加阻尼结构的新设计·····	(193)
§ 6. 附加阻尼结构的应用·····	(196)

第六章 振动的隔离与阻尼动力消振器

§ 1. 振动隔离目的及原理·····	(205)
§ 2. 减振器参数设计及与阻尼有关的基本问题·····	(208)
§ 3. 典型的减振器结构及应用实例·····	(213)
§ 4. 减振器在降低噪声上的应用·····	(219)
§ 5. 阻尼动力消振器的作用及参数优化·····	(221)
§ 6. 集中参数型阻尼动力消振器·····	(227)
§ 7. 弹性体型阻尼动力消振器·····	(230)

第七章 接合面阻尼与动态特性

§ 1. 概述·····	(234)
§ 2. 接合面阻尼的产生原因·····	(235)
§ 3. 建立结合面动态特性的物理数学模型·····	(243)
§ 4. 接合面动态特性的测定方法·····	(246)
§ 5. 滚动轴承动态特性的测定及分析·····	(255)
§ 6. 依靠计算机模拟识别接合面动态特性·····	(263)
§ 7. 接合面动态数据的应用·····	(273)

第一章 阻尼减振降噪技术的基本问题

§ 1 振动与噪声的危害

振动是一种普遍的物理现象，例如海浪就是海水振动所造成的现象。然而本书涉及到的振动问题主要是机械结构的振动及由此产生的物理现象，如振动产生声辐射。所以，海浪的性质并不是这里研究的对象，但是海浪如何使采油平台引起振动以及怎样加以控制，则属于本书的讨论范围。

机械结构的振动现象虽然有时可用来为生产服务，机械加工中的振动切削、上下料机构中的振动料斗、铸工车间使用的振动筛就是这类实例。但是多数情况下，机械振动会造成严重危害，必须采用各种有效方法加以控制。

振动的危害主要是：

1. 振动造成机械结构的损坏，破坏工作条件

振动对机械结构的损坏，包括共振、冲击以及疲劳造成的损坏。例如建筑物在地震时受到随机激励后，其强度承受不了共振响应造成损坏。细长的氦氖激光管在运输过程中常常会发生冲击损坏，因此，激光管在装箱后，在八个角上用弹簧与金属框架相联，以便使激光管在运输途中受到弹簧的抗冲击保护，如图1-1所示。振动还使材料产生交变的内应力而造成疲劳损坏。在频率较高的情况下，结构因振动产生疲劳损坏的问题尤为突出。

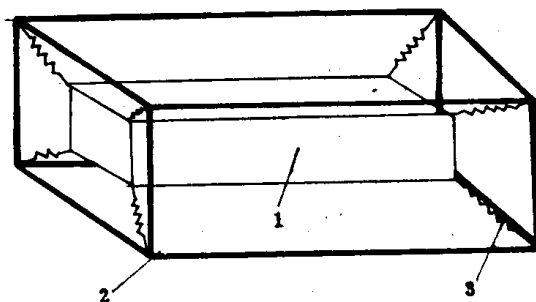


图 1-1 激光管的抗冲击保护
1. 激光管包装箱； 2. 框架； 3. 保护用弹簧

2. 振动降低机器、仪器或工具的精度

振动降低机床的加工精度，例如在轴承滚道磨床上磨削滚道时，砂轮和工件的相对振动使加工表面产生波纹度、增加粗糙度，而滚道的波纹度是轴承工作时产生振动及噪声的主要原因之一。

振动还降低机器、仪器或工具的工作精度。运载工具（如火箭）的命中精度和控制装置如仪器、计算机的抗振能力直接有关。试验证明：命中精度与主要控制装置承受振动加速度的平方成反比。

振动降低测量仪器的测量精度。它不仅降低了测量读数的稳定性，而且减小了仪器的动态测量范围。例如对于膜板式测力仪（图1-2），在膜板的不同位置上粘贴应变片，可以测量空间三个不同方向上的切削力 P_x, P_y, P_z 。如果测量的是静态力，从原理上讲不存在误差；但是测量动态力时，膜板的动态响应便会增加动态力的测量误差。

假设测量的是垂直于膜板方向的法向力 $P_y(\omega)$ ，那么 P_y 是测力仪的输入，将弹性力 Kx 作为测力仪的输出。当然 Kx 的实际值要经过电阻应变片作为传感元件，测量放大器进

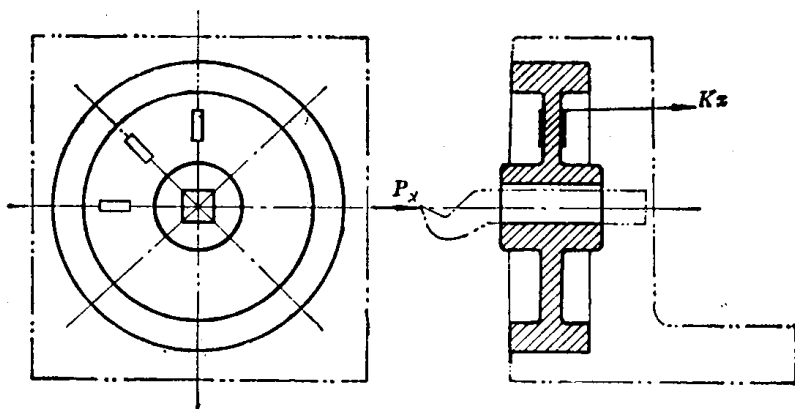


图 1-2 膜板式测力仪

行信号放大，并有读数或记录装置作读值并标定才能知道。显然测出的力 Kx 和应测的力 P_y 是不相等的。两者幅值不等且有相位差。

$$P_y = Kx \sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + 4\zeta^2 \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \quad (1-1)$$

这里

Kx ——弹性力

其中 x 为稳态振动幅值；

ω ——被测力 $P_y(\omega)$ 的角频率；

P_y ——正弦被测力 $P_y(\omega)$ 的幅值；

ω_n ——测力仪的固有频率；

ζ ——测力仪的阻尼比。

由于被测力 P_y 和仪器测量出的力 Kx 之间并不相等，这就产生了动态测量误差 δ

$$\delta = \frac{Kx - P_y}{P_y} = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + 4\zeta^2 \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} - 1 \quad (1-2)$$

当测力仪在允许的测量误差 δ 范围内工作时，其测量的频率范围为

$$0 \leq \omega \leq \omega_n \sqrt{\frac{\delta}{1+\delta}} \quad (1-3)$$

由此可见：膜板测力仪的膜板在受激产生振动以后会产生动态测量误差 δ ，并限制动态测量的频率范围。

3. 振动引起噪声，严重污染环境

各种机械设备在运转及工作过程中，因振动而产生的噪声严重地污染环境，成了危及人民健康的主要公害之一。城市噪声污染的主要来源是交通运输、工厂生产、建设施工以及其他社会活动。其中各类交通运输工具所带来的噪声占 75%。各类生产工厂在生产过程中产生的噪声虽然不危及公众健康，但是对生产工人却有直接危害，有些机器如发动机、泵、风机、各类锯、冲压机、振动筛、织布机、单机噪声即可达到 100dB(A) 左右。据对一个织布车间进行调查，车间内平均噪声为 104dB(A)，有不同程度耳聋的工人占 32%，心脏病、高血压、神经衰弱症的发病率比一般车间工人高出好几倍。

产生噪声的振动包括气体振动、液体振动和固体振动三类。其中气体振动产生噪声如内燃机的排气噪声、鼓风机叶片与空气扰动产生的噪声、锻压机锤与砧在撞击空气时的噪声、皮带对空气的拍击声、以及某些机器空腔的共鸣声；液体噪声如液压机构的换向噪声、液体流动噪声以及液体管道的自激振动产生的噪声等；固体振动产生的噪声如齿轮啮合噪声、因机构运转不平稳受冲击力或其他激励力而产生的噪声、结构共振产生的固体声以及受其他能量如声能激励产生的二次声辐射等。

振动和噪声常常是伴随着产生的，因此，减振和降噪也往往是密不可分的。

4. 振动增加机械磨损、降低机器寿命

机械振动使相互配合表面，包括活动配合表面及静止配合表面增加因相对运动产生的磨损。因而降低了机器的使用寿命。各类交通工具在高级路面上行驶或在高低不平的路面上行驶，其大修周期（或相隔两次大修期间的行驶里程数）可以相差3—5倍，以至10倍。使用寿命也相应地存在很大差距。所以，工业发达国家很重视修筑高标准公路的替代一般水平的公路，除了着眼于提高运输效率以外，还从延长交通工具的寿命取得相应经济效益方面考虑。这就是减少振动对机器寿命影响的一个实例。

§ 2 振动与噪声控制的主要方法

振动的控制方法很多，目前已发展到实时控制，在线控制以至自动的主动控制的程度。但是就机械产品设计和结构改进的角度上作分析和研究，振动和噪声控制主要是从消除振源或噪声源；隔离振源（及声源）与受影响机构（及环境）之间的传递与联系；以及减少结构本身的响应这三个方面采取措施的。阻尼减振降噪技术和这三者都有密切的联系。

1. 消除振源或噪声源

消除振源或噪声源以及降低它们的能量当然是最根本的减振及降噪方法。由于振动按其性质分有强迫振动和自激振动，因此消除振源也要按其性质的不同采用不同的方法。强迫振动的振源有旋转部件不平衡产生的离心力；有啮合运动不均衡所产生的脉冲力，如齿轮的啮合振动与噪声；有机构运转所产生的惯性力，如凸轮与连杆运转产生的强迫力。也有其他原因产生的各种强迫力，例如图1-3中洗衣机的电动机1因磁场不平衡所产生的频率为100Hz的强迫振动及哼叫声。所有这些振源都可以通过诸如旋转部件的动平衡，齿轮的合理修缘，凸轮的合理设计等措施来加以控制。自激振动是由振动系统内部的特性所决定的，在一定的条件下，例如系统内部存在负阻尼的情况，系统可以从不变能源中取得能量产生自激振动。

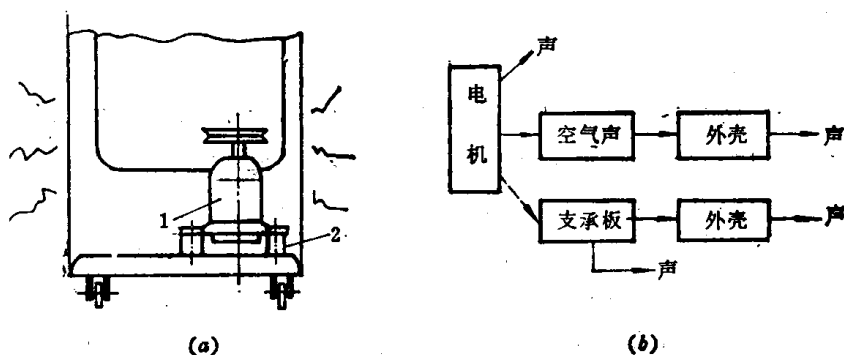


图 1-3 洗衣机振动与噪声的控制

为了消除自激振动，就必须破坏产生自激振动条件，如排除负阻尼。金属切削加工过程中产生的切削颤振是一种自激振动，用带有负刀刃的刀具进行切削加工以抑制颤振的发生，就是通过改变产生颤振的条件，避免自激振动的产生，从而消除振源。

阻尼技术在消除振源和声源方面有重要作用。例如各种家用电器上使用的定时器，当其运转时簧片的振动成为振源及声源，通过阻尼处理可以消除或降低其机械振动能量。冰箱启动时电器设备的接触噪声也可用同样方法来消除。

2. 隔离振源（或声源）与受影响机构（或环境）之间的联系及能量传输

如图 1-3(a) 所示的洗衣机，它的电动机是主要的振源和声源。按图 1-3(b) 电机可以直接向空气发声；也可以因空气声振，激励外壳振动，产生二次声辐射；电机振动还可以传给支承板，又传给外壳，使支承板及外壳因振动发声；最后，电机作为噪声源，它的固体声传给支承板及外壳，然后在界面上向空气辐射发声。实验证明：电机的振动及由它产生的固体声传给洗衣机外壳后的发声，能量最大，产生的噪声比重最大。所以，在传递路线的电机与支承板之间或支承板与外壳之间设置粘弹材料制成的隔振器 2，就可以有效地消除振动和噪声。

从上述实例可见：振动在振源和工作执行机构之间传输时，或者噪声在声源和接收器（人耳或传声器）之间传播时，其能量传输方式有直接的，也有间接的；能量传输的介质有固体的、液体的也有气体的。

振动或声波的直接传输，是指不经其他介质的中介作用，直接传给执行机构或接收器；相反，在不同的介质中经过转换，甚至多次转换，就是振动或声波的间接传输。对于噪声，它的直接传播是声源产生的空气声，直接传给接收器。它的间接传播是声源产生的声音，以固体声、液体声或气体声的形式，在系统中传输，然后从一个有适当辐射条件的受激构件上，以空气声辐射出来，传给接收器。

阻尼技术在振动及噪声隔离中也有重要作用。对机械结构的振动（包括位移、速度、加速度）隔离和固体声的隔离，阻尼值的合理选择是一项十分重要的因素。在传递路线上插入高阻尼材料，可以明显地降低振动及固体声能量的传输。此外，对空气的屏蔽和吸收以及减少因声的反射所产生的混响声，也必须研究阻尼技术。

3. 结构的抗振及抗噪设计

振动控制的另一个重要途径和方法是控制振动的响应，使机械结构在受到激励以后有较小的振动响应，即设计成抗振结构；或者有较小的噪声辐射，即设计成抗噪结构（或称寂静结构）。图 1-4 中的变速箱结构，制成方箱容易产生振动并由振动发声，而制成大圆角的结构，则有较好的抗振和抗噪性能。所以图 1-4 (b) 那样的变速箱结构比起图 1-4(a) 的结构，从抗振及抗噪设计来说，是一种优良设计。

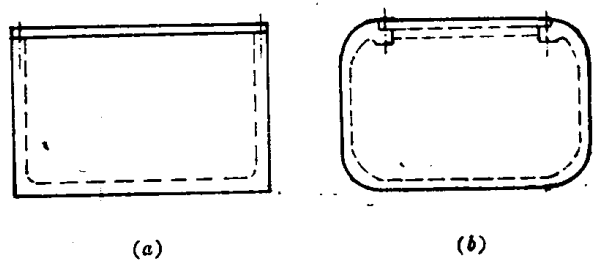


图 1-4 变速箱体的不同结构设计

结构的抗振及抗噪设计，要注意以下一些问题：

1) 结构刚度的合理设计。即加强结构刚度的薄弱环节，进行刚度的合理分配与平衡。尽可能加强机械结构的总刚度，包括提高机械零件、部件与系统的刚度，以提高结构的共振频率和降低振动响应。然而，提高刚度有可能改变局部的质量分配而产生新的共振峰，还可能使结构增加重量和体积。所以刚度的提高是有限度的，更重要的是要进行刚度的平衡。以便最大限度地发挥在限定重量的条件下结构的抗振潜力。

2) 解谐与解耦。机械结构作为一个复杂的振动系统具有非常多的共振峰，为了防止过量

的振动，尤其是被保护对象的过量振动，必须使被保护对象的固有频率与结构零、部件的固有频率分开，结构的共振频率与激励源的主频率分开，这就是解谐。共振频率的分配应该实施最优化处理。

例如电子仪器箱在振动环境里工作时，电子元器件及印刷线路板是被保护对象(图 1-5)。如应用于航天、航空上的电子仪表，动力、化工或其他机械上使用的控制仪表等，它们经常处于强大的机械振动和声振的环境之中。为了防止被保护对象的过量振动，有时甚至将电子元器件的引线加长，以降低它们的固有频率，使其和底板、盖板、机架的一系列共振频率分开。这样做，和结构必须增加刚度以提高抗振性的概念甚至是相反的。

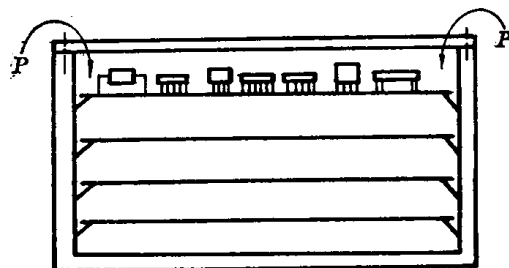


图 1-5 电子仪器箱的解谐与解耦

振动的耦合是将振动的能量通过振动系统传输给产生响应的零、部件。解耦的目的是改变振动系统的参数，以便破坏能量传输的条件，达到减振降噪的效果。

如图 1-5 所示的电子仪器箱，如果注入液态的发泡塑料 P ，那么在发泡塑料固化以后，原来仪器箱组成的振动系统将为一个新的系统所代替，它破坏了原系统的能量耦合条件，从而达到了消振、减振的目的。

3) 增加结构阻尼。在进行抗振及抗噪结构设计中，增加结构阻尼是最为有效的。诸如在多种多样的机械结构设计中，包括选用阻尼值较高的材料；在机械结构的各个环节采用增加阻尼的附加结构——阻尼涂层及夹层结构、阻尼插入结构、附加阻尼消振器及阻尼动力消振器等；提高接合面阻尼；以至对结构进行动态设计的优化处理。

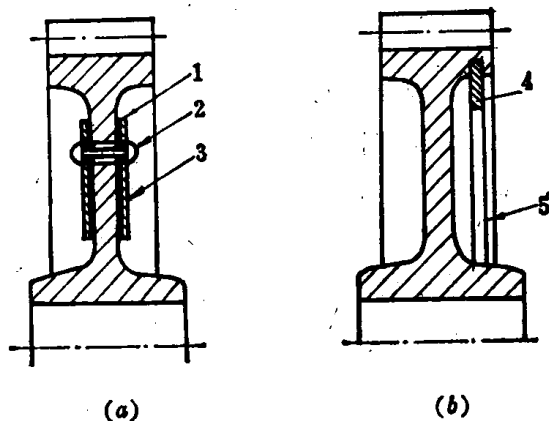


图 1-6 大型齿轮的两种消振、消声结构设计

举大型内燃机齿轮为例。如果在齿轮的轮辐上附加环形的约束阻尼层，即在齿轮表面首先粘贴大阻尼材料 1，然后粘贴金属的约束层 3 (如图 1-6(a))，齿轮的阻尼衰减率可从未加处理的 80 dB/sec，增加至处理后的 2000 dB/sec。图中的机械加固 (铆钉 2) 是为了防止运转中阻尼约束层脱落，仅仅是为安全的目的。敲击经阻尼处理后的齿轮，其发声类似于敲击铅块。将这种齿轮装入齿轮箱，机械噪声可下降 8 dB。另一种提高齿轮结构阻尼的

方法是在齿轮轮缘内侧加工一个环形槽 5 (图 1-6(b))，内装一弹簧环 4，构成具有库仑摩擦阻尼的阻尼动力消振器，它可以使齿轮的衰减率从未加处理的 80 dB/sec，增加至处理后的 300 dB/sec，设计时的重要参数是弹簧环的弹力和固有频率。如果设计正确，用这种齿轮装入齿轮箱，噪声可下降 5 dB。

由此可见，由于在齿轮的设计中增加了附加的结构，使齿轮的结构阻尼有了大幅度提高，这种齿轮的新结构成为一种抗振及降噪的结构。

§ 3 阻尼减振降噪技术的定义、实例及研究范围

1. 阻尼技术的定义

阻尼的产生机理是正在探求的一个力学课题。但是这并不妨碍人们研究和应用阻尼技术。

从减振降噪的角度上看,阻尼是指耗损振动能量的能力,也就是将机械振动及声振的能量,转变成热能或其他可以耗损的能量,从而起到减振及降噪的目的。

阻尼减振、降噪技术就是充分运用阻尼耗能的一般规律,从材料、测量、工艺、设计等各项技术问题上发挥阻尼在消振、消声的潜力,以提高机械结构的抗振性,降低机械产品的噪声,增强机械与机械系统的动态稳定性。

2. 阻尼技术的实例

为了进一步阐明阻尼技术的有关问题,按照阻尼产生的作用,分别举出一批实例,以期对阻尼技术有个概貌的了解。

1)阻尼有助于降低共振振幅(位移、速度、加速度),因而,各类结构在增加阻尼以后可以避免因应力达到极限所造成的破坏。

对于任何一种结构,当激励的频率 ω 等于共振频率 ω_n 时,其位移响应的幅值 X 与各阶模态的结构损耗因子 η_n 成反比,即:当

$$\omega = \omega_n \quad (n=1, 2, 3, \dots)$$
$$X \propto \frac{1}{\eta_n} \quad (1-4)$$

所以,在频率远离共振区时,动态位移受弹性项与惯性项的影响,而在接近或等于共振频率时,位移主要受阻尼项的影响,按公式(1-4),增大阻尼的损耗因子值 η_n ,可大幅度降低共振的位移幅值 X (或速度、加速度幅值)。

例如美国的世界贸易中心大楼,楼高110层,为了保持大楼的稳定,安装了10,000个阻尼器。阻尼器有两种:一种是在桁架的拉伸杆端部安装的(图1-7(a)),阻尼器3内部的阻尼粘弹材料承受剪切应力及剪切应变;另一种阻尼器设置在各大楼的屋角处,结构如图1-7(b)所示,当大楼受风力激励产生低频振动时,阻尼器的设置部位产生相对位移,同样使阻尼材料4产生剪切应变。阻尼材料因剪切应变所耗损的机械振动能量,使整个大楼因装置了这两类阻尼器而大幅度增加了阻尼值。大楼的基频为3.69Hz的阻尼比由0.02增至0.06,由于

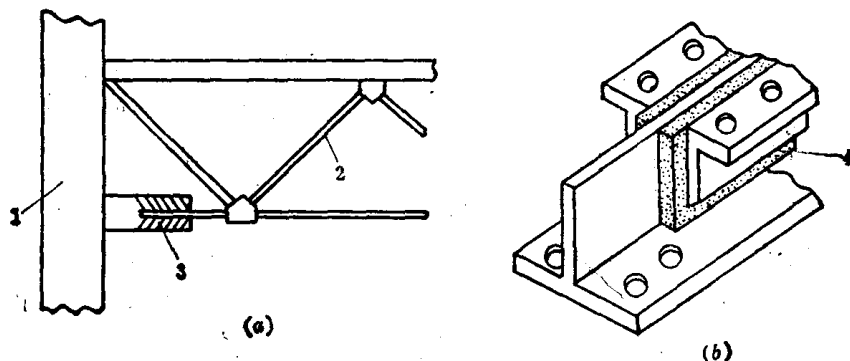


图 1-7 高层建筑中使用的两种阻尼器
1.墙面; 2.桁架; 3.阻尼器; 4.阻尼材料

楼基频的振型是一阶弯曲振型，因此，在风力激励下，顶层的振幅有大幅度下降，从而保证了高层楼的安全。由于阻尼材料有老化问题，阻尼器要定期进行检查和更换。

另一个实例是电视铁塔，铁塔高100余米，四周用钢索拉紧，以保证铁塔的稳定(图1-8)。可是钢索受风力激励以后，由于共振损坏产生断裂而使铁塔的稳定性受到威胁。经过研究，在钢索2上装上如图1-8所示的阻尼动力消振器1。这种消振器用阻尼橡胶4作为弹簧及阻尼器，外面固定上有一定质量的两只半环状钢套3作为消振质量，用螺钉5来调节阻尼橡胶的预压力以改变弹簧常数，按照钢索的长度、张力、固有频率等参数来设计阻尼动力消振器的参数，使阻尼动力消振器处

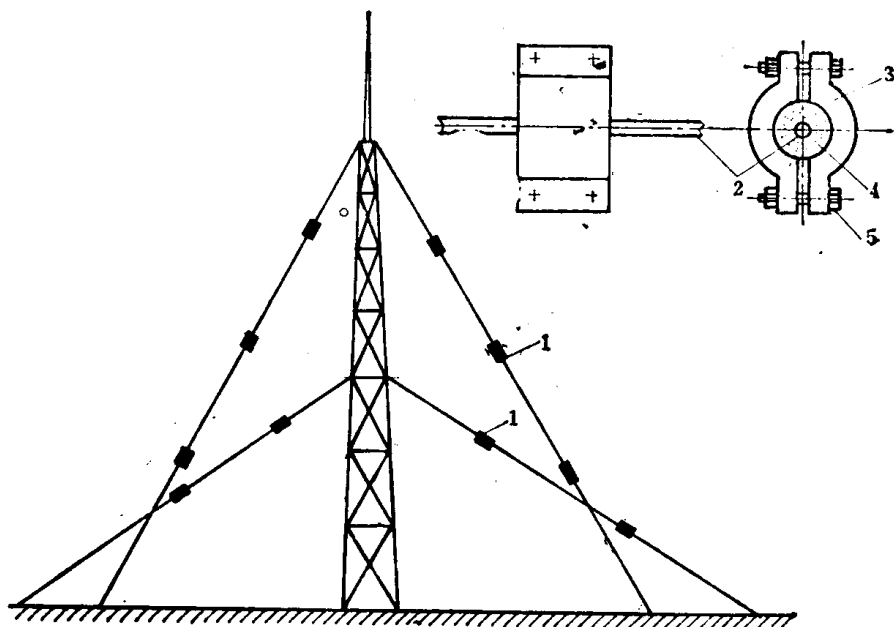


图 1-8 电视铁塔的阻尼动力消振器

于有效的工作状态。结果保证了钢索免受风力激励后的共振损坏，也保证了电视铁塔的安全。

2) 阻尼有助于机械结构受到冲击以后，于最短时间内恢复到稳定状态。

机械结构受冲击后的振动水平可表示为

$$L_x = 10 \lg \left(\frac{X^2}{X_{ref}^2} \right) \text{ dB} \quad (1-5)$$

其中 X ——受冲击瞬时达到的位移值(m)

X_{ref} ——位移参考值(m)

以 Δ_i 表示振动水平 L_x 的降低率

$$\Delta_i = -\frac{dL_x}{dt} = 8.69\xi\omega_n = 54.6\xi f_n \text{ dB/sec} \quad (1-6)$$

可见，受冲击后产生自由振动时，要使振动水平迅速下降，即增加降低率。或者，将振动水平降到一个参考水平时，能缩短下降的时间，按公式(1-6)，必须提高结构的阻尼比 ξ 。

对于一架连续发射的机关炮，为了准确地打中目标，在发出一个炮弹之后，炮身及其支架应该在极短的时间内将振幅降到很低的水平，否则，就会影响到下一发炮弹射出的准确性。同样，网球拍或羽毛球拍在击球以后会产生自由振动，如果球拍不能在回球到达之前停止振动，那么就会影响到再次打球的角度，运动员打击的球就会受到影响。所以，这类实际结构在受冲击以后，迅速恢复到稳定状态是十分重要的。

高质量的网球拍或羽毛球拍，正是为上述目的进行了阻尼处理。处理方法是在钛合金管

1 外面绕上石墨纤维 2 (图 1-9 (b)), 然后在石墨纤维外面用塑料 3 捆扎住。当球拍受击振动, 众多的石墨纤维的外表面因相对运动而产生库仑摩擦阻尼。捆扎过紧或过松都会使阻尼耗能降低, 阻尼值下降, 扎紧的程度适当, 阻尼值达到最大值, 球拍将在受打击后, 以最短的时间稳定下来。

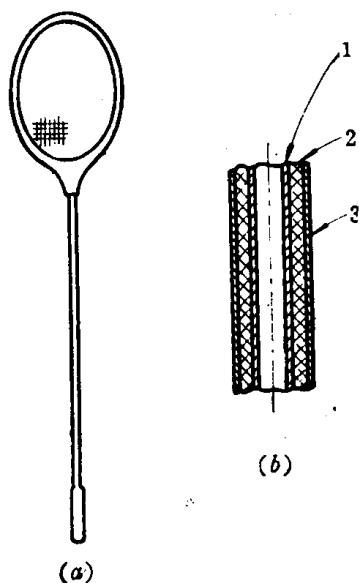


图 1-9 球拍的阻尼处理

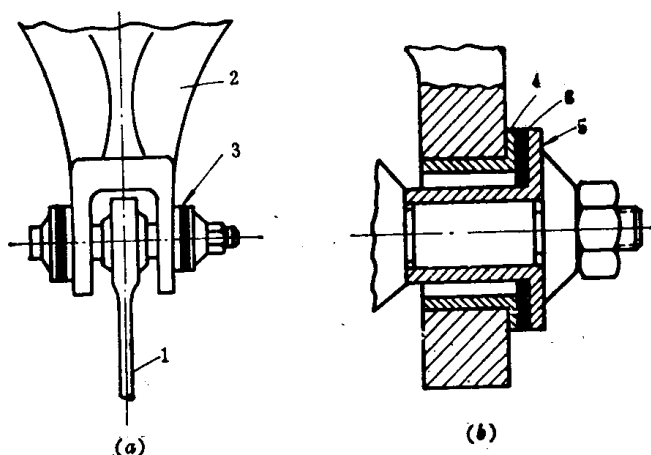


图 1-10 外层空间探测器伸杆摆动控制

图 1-10 表示外层空间探测器的伸杆 1, 和它相连的是电视摄影仪 2, 摄影仪受控伸出飞行器工作时, 由于长的伸杆在力激励下长时间振动, 破坏了摄影条件。为此, 必须对杆的摆动加以控制。可以在伸杆及摄影仪之间插入阻尼元件 3, 即在伸杆的铰接支座设置内、外衬套 4、5 之间安装承受剪切应变的由大阻尼粘弹材料制成的垫圈 3 (图 1-10(b) 为局部放大图), 由于加大了结构阻尼, 使伸杆的长时间摆动得到了控制。

美国宇航局研制的地球轨道望远镜也有类似问题, 它的镜架长 7 米, 结构阻尼小, 为了增大阻尼, 将镜架的石墨环氧复合材料制成有细微裂纹的结构, 使阻尼值提高了二个数量级, 望远镜在受力激发后能迅速稳定下来, 达到正常瞄准目标的工作状态。

3) 阻尼有助于减少因机械振动所产生的声辐射, 降低机械噪声。

噪声的产生原因很多, 就机械噪声的性质可分为空气动力性噪声和机械性噪声, 有时将电磁性应力作用形成的噪声单独列为电磁噪声。但实际也是一种机械性噪声。从广义上讲, 某些抑制空气动力性噪声的消声器, 也是通过阻尼效应的耗能作用消声的。但是, 这里介绍的阻尼消声主要是指消除机械性噪声。

纺机、织机、木工机械、印刷机械以及冷作车间的铆接、冲剪等工序所产生的巨大噪声, 主要是机械性噪声。例如切割木材、花岗石、钢材等材料的圆锯, 就是在切割过程中因锯齿和材料产生连续冲击而使锯片振动发声的。噪声可高达 105 dB(A)。如果在锯片的两侧面涂以大阻尼的涂层 1 (约 0.2mm), 再贴附铝片制的约束层 2 (约 0.1mm), 锯片在切割过程中的噪声可下降 12-18 dB(A)。其结构如图 1-11(a)。在国际市场上已有低噪声锯片出售, 结构如图 1-11(b)。它是在两层锯片 3 中夹以大阻尼粘弹材料 4, 使锯片互为约束层, 产品样本说明, 降低噪声 10-15 dB(A)。

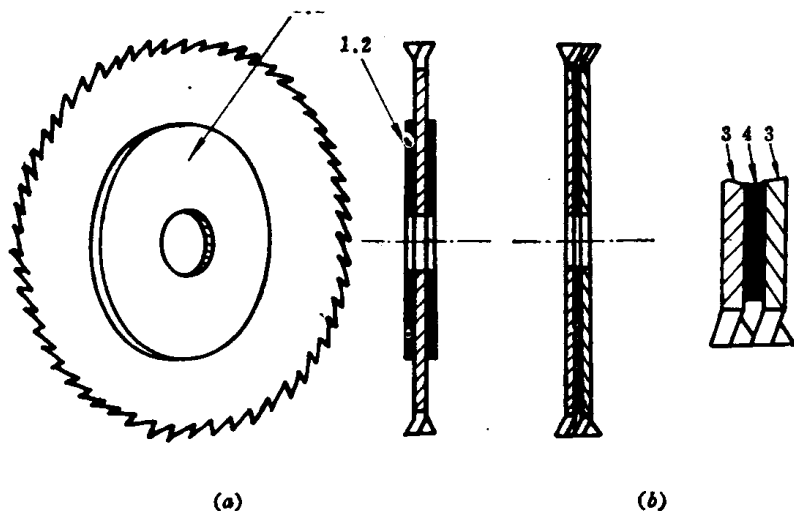


图 1-11 圆锯片的消声处理

对于薄壁构件，例如交通运输工具——气垫船、地铁、汽车、拖拉机的外壳及承力构件；各种家用电器设备——电冰箱、洗衣机、录音机、空调器的内外壁或装置各种电子元件的板壳件，在机器运转过程中的发声，多数是由薄壁件的共振所产生的二次声辐射，加上这些构件声辐射的面积大，就成了这些机器的主要噪声源。阻尼处理以后，能有效地抑制声辐射，降低噪声。对音箱作阻尼处理，由于抑制了音箱本身的共振发音，使播出的音乐减少了杂音的干扰。

阻尼还可以使脉冲噪声的脉冲持续时间延长，因而降低峰值噪声强度。同时也能有效地抑制脉冲噪声。产生织机噪声的主要原因之一是脉冲噪声，使用阻尼方法对织机噪声进行综合治理以后，其噪声可以下降 10—15 dB(A)。

4) 阻尼可以降低结构振动，提高各类机器仪器的加工精度、测量精度和工作精度。

关于提高加工精度问题，对各类机床，特别是精密机床是很有意义的。对加工有色金属的镜面车床（用于加工计算机磁盘），加工轴和轴承的镜面磨床，整台机床应该有良好的抗振性。为了做到这一点，现在有些机床已改用阻尼值比较大的环氧混凝土来代替铸铁做机床的床身或构件，它用环氧树脂作粘结剂，以石子为基体，经搅拌后注入模子以制成床身、立柱或其他大型构件。这种材料材料损耗因子比铸铁高 6—10 倍，比花岗石高 3 倍。用模型复制，精度可达 $0.5 \mu\text{m}/\text{m}$ ，试验时将它制成 $400 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$ 的试样（图 1-12），支撑在支座上达 6 年之久，精度保持稳定。

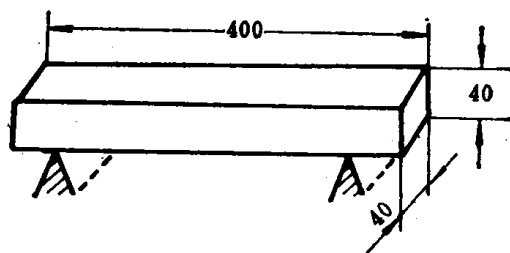


图 1-12 环氧混凝土试样的稳定性试验

关于仪器、仪表的测量精度和工作精度问题，在叙述振动危害时已提及，洲际导弹的命中率或命中精度与仪表的振动量（加速度）的平方成反比。所以导弹上的陀螺仪、检测仪表、计算机都必须给以抗振保护。如导弹上使用的惯性平台必须采取良好的隔振措施。但是近年

来则改用阻尼结构替代隔振结构，因为它可以减轻重量，缩小体积而同样有良好的减振作用。图 1-13 是一种使用阻尼夹层结构的惯性平台外壳，在金属层外壳上先附加一层称为充填层的扩变层 4，然后粘上粘弹材料阻尼层 2，阻尼层的外面是金属制成的约束层 3，它使

惯性平台的总重量降低 20%，动态放大系数由 40 降为 8，整个仪器在随机激励环境下降低了振动量，从而提高导弹的命中精度。

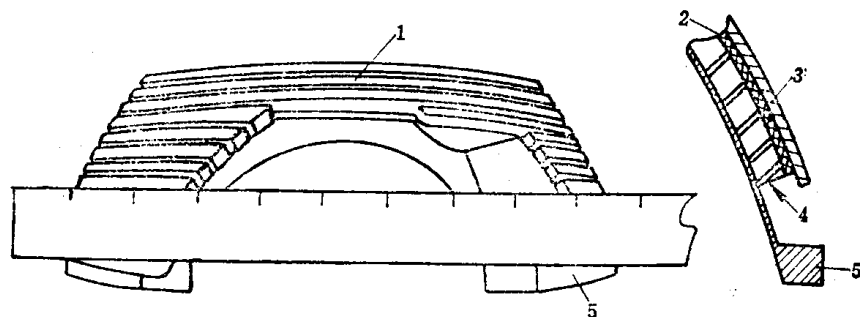


图 1-13 惯性平台外壳的阻尼结构
1. 惯性平台外壳；2. 阻尼层；3. 约束层；4. 扩变层；5. 壳体

测量精度的最普遍问题是读值的精度。振动使指示器摆动，使数字式仪表显示出读数跳动。显然，阻尼有助于读值的稳定，有助于精度的提高。图 1-2 所示的膜板式测力仪上，如果粘附阻尼夹层结构，或用阻尼合金制造膜板，那么，中等尺寸的测力仪，如固有频率为 1200Hz，测量范围就可从 240 Hz 增加至 600—700Hz。

5) 阻尼有助于结构减少传递振动或声能的能力，用于隔振、隔声及阻断能量的传递。

隔振设计或称为减振器结构设计，包括参数设计和结构设计。在多自由度情况下，如考虑支承或结构的非刚性效应，问题将变得十分复杂。但是，对于防止象地震这样的随机振动对建筑物的破坏，隔离具有宽频域的地震波，增大阻尼往往是有效的。对于重要的具有危险性的工业设施，如原子能电站的反应堆，高压输电线电杆，均可以用高阻尼材料进行隔振保护。对于贮油罐的保护，设计了如图 1-14 所示的减振结构，这种重为 560 吨，直径 10.2 米的燃油贮罐 1，用三个固定在地基上的阻尼器 2 相连，对于从各个方向传来的地震波均有隔振及阻尼作用。

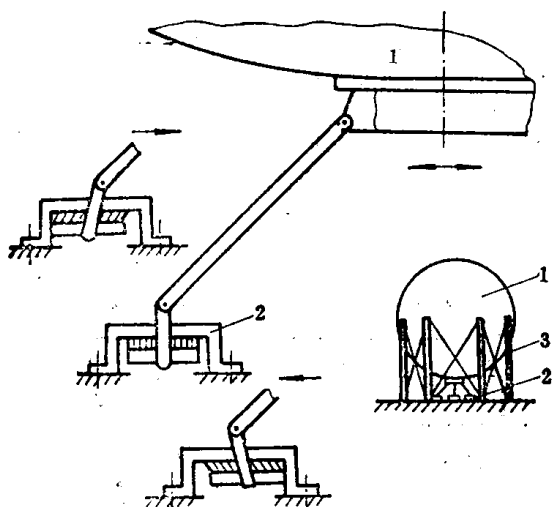


图 1-14 燃油贮罐的阻尼减振结构
1. 球罐；2. 阻尼减振器；3. 支架

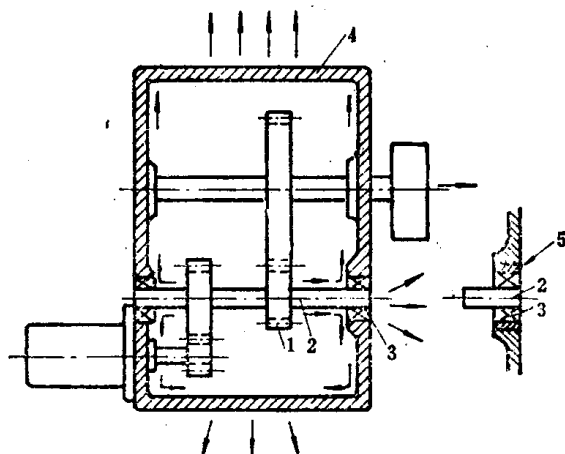


图 1-15 齿轮箱的振动和固体声传递

对于象齿轮箱这类部件，齿轮的啮合噪声以及啮合过程中由齿轮轮辐的共振所产生的固有声是主要的噪声源。这些噪声一部分形成空气噪声，另一部分形成固体噪声。而固体声则通过齿轮 1 与齿轮 1 相联的轴 2，轴承 3 直至箱体 4，由箱壁向空气辐射噪声。或由啮合过程中产生振动，通过同样途径传递，其传递路线如图 1-15 所示。为了切断上述传递路线，

在轴承和箱体之间可插入一只由阻尼合金制成的隔振隔声环⁵，这样就可以减少由齿轮至箱壁的振动和固体声传递，大幅度降低由此而在箱壁上产生的二次声辐射。

由于工作机械自动化程度的提高，有可能对这类工作机械作整机的隔声处理，或对发声较大又不影响操作的部件如液压部件作局部隔声处理。用于隔声的结构，同样要考虑提高它的结构阻尼。

最近，出现一种结构新颖的车床或计算机数控车床，它们的床头箱分离为两个部件——传动部件和主轴部件。由于车床的转速提高到 2000 r/min 以上，中等规格车床的功率比原来增长一倍以上。床头箱内的齿轮即使经过修缘和磨削，噪声仍然偏大，超过允许标准。因此，可以在传动部件及主轴部件的外面，制成一个兼有阻尼、隔声和吸声作用的隔声罩，它由玻璃纤维的塑料板制成。采用这种结构的车床，即使转速及功率都比普通车床高出一倍，整机噪声仍然低于 80 dB(A)，达到八十年代的新水平。

3. 阻尼技术的研究范围

从基础理论、应用技术到产品开发（及工艺应用）三个环节，阻尼技术属于应用技术，但是它的研究范围则往往和前后两个环节密切相联，无法把它们区分得过于清楚。

阻尼技术的实际内涵及研究内容大致在下述范围之内：

1) 阻尼技术的理论基础

阻尼的产生机理是力学界尚未探明而需要深入研究的课题，但这是指微观的机理。从应用技术的角度上看，阻尼的产生机理是从宏观上即从能量耗损、转换、传输等方面进行研究的，将机械能转换成可以耗散的能量，从而产生阻尼作用。例如接合面阻尼的产生机理，对于象机床这样一种固定接合面和可动接合面非常多的机器，能否逐步加以认识是十分重要的，机床的阻尼有 90% 来自接合面阻尼。

阻尼技术的理论基础当然不是仅仅指阻尼的产生机理，而是指这项技术的基础理论，包括物理现象的说明即物理学基础，数学力学基础尤其是动力学基础。例如用一种合理的数学力学模型来描述阻尼与各相关因素之间的联系；化学基础，如材料的物理机械性能与材料结构联系等等。研究阻尼技术理论基础的目的是改善这项技术的工程应用；或者反过来讲，是在工程应用中能更有效地掌握和运用物理上的一般规律。

2) 阻尼的动力学特性及阻尼特性的测定

研究阻尼，必须给阻尼以合理的衡量指标，这种指标应该比较全面地体现阻尼的物理本质；灵敏地反应阻尼的数量关系；准确地体现各相关因素的联系。

阻尼的特性是指它的动力学特性，主要是指频域和时域内的特性。阻尼特性的研究是为了取得最好的减振降噪效果。为了探明各种不同条件下结构的阻尼特性，同时还要研究各种阻尼特性值的测定方法。

3) 阻尼材料及材料的性能

从阻尼技术的角度上研究材料有两个方面：一方面是研究材料的物理机械性能，以便按照材料的实际性能充分发挥它的消振消声潜力。另一方面从阻尼技术本身，按工程应用的要求对材料提出性能指标，以便研制适用的材料。

阻尼材料物理机械性能的标准和测定方法的研究也是十分重要的工作。

4) 研究和探讨提高阻尼减振降噪效果的规律

提高阻尼消振消声的效果是阻尼技术需要解决的最主要问题。这就需要探讨阻尼作为一

种物理现象与各相关因素之间的联系和规律。主要的是和振动环境的联系；和运动响应之间的联系；和工程结构的联系。

一般的研究方法是在一定的假设条件下建立一种合理的物理数学模型，或者建立有阻尼参与的运动方程，用以描述阻尼和各相关因素之间的联系。然后以最小的运动输出（振动或发声）或最好的阻尼配置为目标，进行参数优化和结构优化。

5) 阻尼技术的工程应用

为了使阻尼技术得到实际应用，还要解决材料、设计、工艺、测量、实验等一系列技术问题。例如材料的老化和寿命问题；工程设计中的合理简化问题；粘弹材料的粘贴工艺问题；减少测量误差问题；从实验室实验到工业性实验的过渡问题等等。

本书力图以上述问题为分类方法，系统地对阻尼技术所应涉及的范围作较为详尽的阐述。

§ 4 阻尼技术的现状及发展

阻尼技术的开发工作虽然已有三、四十年的历史，但是到最近十年，理论上才形成新的学科，实践上才形成新的技术，并获得迅速发展和广泛应用。

推动阻尼技术在近年来飞跃发展的主要原因是：

第一、生产发展和技术进步的实际需要是促进阻尼技术发展的动力。阻尼技术最初发展于航天及空间技术部门；海军、空军等军事部门和航空、交通部门。因为导弹、卫星的仪器仪表有极其严格的抗振要求，载人飞船、潜艇和其他水上舰艇有严格的低噪声要求。而阻尼技术在解决这类问题时具有效果显著，结构简单，使用方便等一系列优点，因此，新兴技术的需要促进了阻尼技术的发展。另一方面，近年来各国重视环境保护和劳动保护以后，制订了“环境保护法”或“防止公害法”，严格控制噪声。各种机械产品相应地制订了噪声控制标准，将噪声水平作为一项重要的质量指标。这使某些机械产品甚至不得不改变工作原理，或者干脆被淘汰，某些冲压设备和纺织机械的情况就是这样。技术的进步证明了阻尼技术在消除噪声方面的重大作用，因而发展极为迅速。

第二、化学工业特别是材料工业的发展为阻尼技术提供了适用于各种场合的阻尼材料，这是阻尼技术发展的物质基础。

第三、理论研究和实际应用相辅相成互相促进，阻尼技术的力学基础，特别是先于实践的力学基础理论的研究，对阻尼技术的开发起到了先导性的作用。另一方面，在减振及降噪措施方面，刚度的改善（包括加强薄弱环节，实行刚度平衡，设计高刚度结构等）曾经起过重要作用，相对地讲，阻尼技术由于它的复杂性，起步较晚。也正因为如此，阻尼技术的潜力尚未得到充分发挥。把理论研究和应用技术结合起来，将具有良好的发展前景。

下面介绍阻尼减振降噪技术的现状和发展：

1. 多种多样的技术方法

阻尼减振降噪技术经过多年来的发展，已经形成一种门类广泛、内容丰富的新技术，它的多种多样的技术方法是由下述原因产生的：

首先是阻尼产生机理的不同产生了不同的技术方法。例如由于材料的内摩擦、表面的库仑摩擦、能量的传输、能量的转换，不同的阻尼效应等所产生的阻尼消振、消声作用，都有相应的技术方法作为它的实现手段和背景。