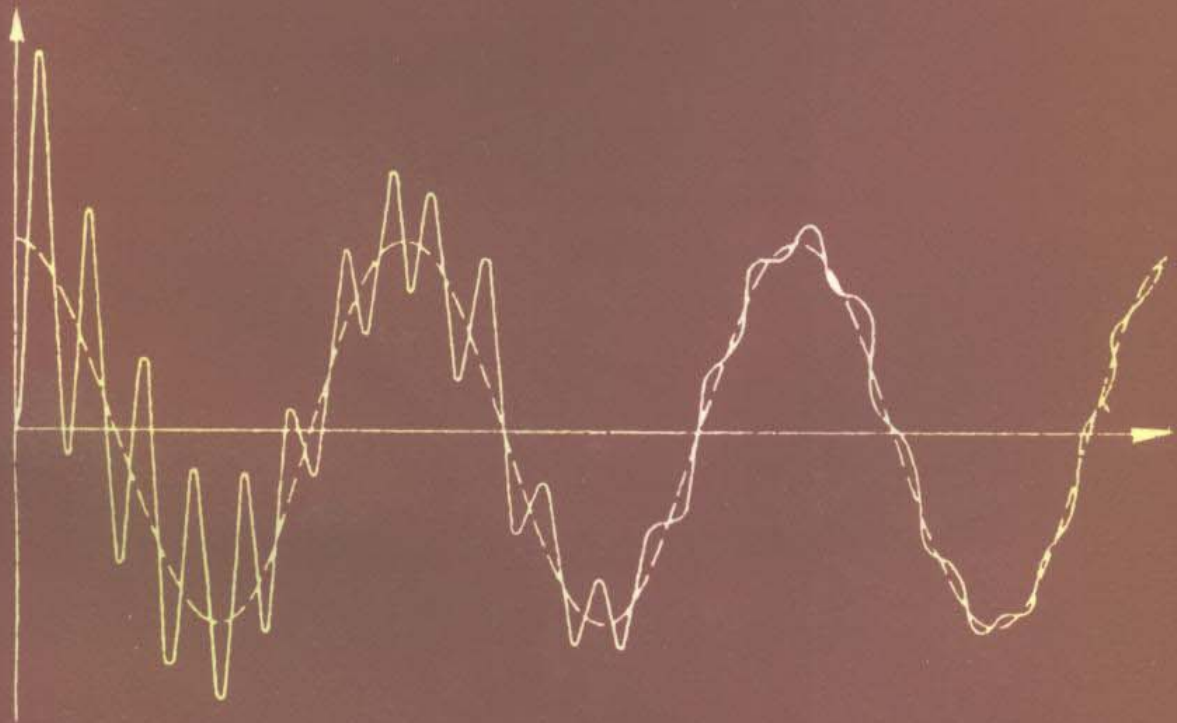


实用振动工程

(2)

振动控制与设计

主编 张阿舟 诸德超 姚起杭 顾松年
主审 赵今诚 朱德懋 张克荣 杨学勤



航空工业出版社

TB123

Z10

2

实用振动工程

(2)

振动控制与设计

主编 张阿舟 诸德超 姚起杭 顾松年
主审 赵令诚 朱德懋 张克荣 杨学勤



航空工业出版社

1997

0270/21

内 容 提 要

本书着重从振动理论和实际应用技术相结合的角度系统地阐述了当代各种工程实用的振动技术方法,包括振动分析方法和软件介绍、振动控制与设计技术、振动测量、数据处理分析和各种试验技术。全书分为三册,第一册为振动理论与分析,第二册为振动控制与设计,第三册为振动测量与试验。本书主要适合各工业部门从事振动分析、测量和试验工作的工程技术人员应用,同时也可供从事振动技术研究的科研人员以及工科大专院校教师和高年级学生、研究生作为掌握振动工程技术方法的重要参考书。

图书在版编目(CIP)数据

实用振动工程 第2册:振动控制与设计/张阿舟主编.
北京:航空工业出版社,1997.1
ISBN 7-80134-113-9

I.实… II.张… III.①工程力学-振动理论②工程力学-振动分析
③工程力学-振动控制 IV.TB123

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 00001 号

航空工业出版社出版发行
(北京市安定门外小关东里 14 号 100029)
航空工业出版社印刷厂印刷 全国各地新华书店经售
1997 年 7 月第 1 版 1997 年 7 月第 1 次印刷
开本:787×1092 1/16 印张:39.875 字数:995 千字
印数:1-1000 定价:60.00 元

前 言

一般认为,振动是物体在时间过程中发生的一种往复式位形变化现象,它是物质运动的一种带有普遍意义的重要形式。从自然界到工业技术领域,振动现象屡见不鲜;特别是现代社会中所有各工业部门——各类振动机械、动力装置、电子产品、仪器仪表、各类建筑物和各种运输工具……无一不存在振动问题,也无一不需要应用振动技术。

尽管有关振动理论和应用技术方面的文献和专著已经不少,但本书编者认为,真正能够使理论和应用技术相结合、系统地反映和体现当前快速发展中的工程实用振动技术的书籍仍不多见。随着我国工业建设和国民经济的蓬勃发展,各行业工程技术界人士对于这一种著作的需求已经越来越迫切了。

本书是航空工业系统所属院校院所从事振动应用研究的专家们的集体创作。众所周知,由于现代飞行器在动力装置、使用环境以及安全要求方面的特点,飞行器结构动力学问题以及与之伴随出现的各种类型的振动问题,它们的理论分析方法及软件、控制设计技术和测量、分析、试验技术一直是各国航空工业界非常重视的研究课题。我国航空工业部门从七十年代起就组织各院校院所同行协作开展对这些技术进行发展与应用研究,并且已经积累了大量研究成果和应用技术,从而为编写本书奠定了技术基础。

本书对各类振动问题的分析和阐述着重致力于反映有关技术方法的通用性,同时也力求本书反映当前该项技术发展的国际先进水平。因而本书各部分内容对其它工业部门需要的各类振动应用技术也完全具有实际应用价值和指导意义。

为了给需要应用振动技术的有关工程技术人员提供简要的基础知识和较为详尽的实际应用方法,本书按振动基本理论、动力分析方法和软件介绍、振动控制设计和实际控制技术、结构动力学设计和修改分析、振动测量和动态数据处理方法、结构动力特性试验和参数识别技术、振动诊断及动力环境试验方法等内容分别进行介绍,并分类编为振动理论与分析、振动控制与设计、振动测量与试验共三册出版。

本书编委会全体同仁对大力支持本书编写与出版的中国航空科学技术研究院、飞机结构强度研究所、航空工业出版社和航空工业部飞机动力环境课题组以及所有为本书出版付出过辛勤劳动的人们致以衷心的感谢。

《实用振动工程》编委会

一九九五年四月

《实用振动工程》编委会

主编：张阿舟 诸德超 姚起杭 顾松年
主审：赵令诚 朱德懋 张克荣 杨学勤
编委：张阿舟 赵令诚 诸德超 朱德懋 姚起杭 张克荣
顾松年 屈见忠 周传荣 张世基 李军杰 杨学勤
张曾鋈 施荣明 龚庆祥 姜节胜 顾仲权 齐丕骞
胡丙相 朱善庆 秦桂驥 周枝伦 张 鹏 潘树祥
钟德钧 何联珠 王宝禄 张秀义 傅 博

第二册 振动控制与设计

主编：顾松年 张世基 张曾鋈
主审：朱德懋
编委：顾松年 朱德懋 张世基 张曾鋈 施荣明 齐丕骞
朱善庆 顾仲权 潘树祥 何联珠 王宝禄 张秀义

目 次

第一章 绪论	(1)
1.1 振动控制与设计的工程意义	(1)
1.2 振动被动控制的原理与方法	(3)
1.3 振动主动控制的原理与特点	(5)
1.4 振动设计的原则与方法	(6)
第二章 振动设计原则	(10)
2.1 概述.....	(10)
2.2 刚度及变形设计原则.....	(10)
2.2.1 防止颤振的刚度设计原则.....	(11)
2.2.2 防止发散与反效的刚度设计原则.....	(12)
2.2.3 相对变形设计原则.....	(12)
2.2.4 变形累积效应量值.....	(13)
2.3 频率设计原则.....	(13)
2.3.1 防止共振的频率设计原则.....	(14)
2.3.2 提高临界颤振速度的频率设计原则.....	(15)
2.4 振动响应设计原则.....	(15)
2.4.1 飞机设计中的振动响应设计原则.....	(15)
2.4.2 机械设备的振动响应设计原则.....	(19)
2.5 稳定性余度设计原则.....	(19)
参考文献	(20)
第三章 隔振吸振缓冲	(21)
3.1 引言.....	(21)
3.2 隔振器的设计和应用.....	(22)
3.2.1 隔振的基本原理.....	(22)
3.2.2 理想隔振器的类型	(25)
3.2.3 隔振器的设计原则.....	(26)
3.2.4 隔振器的设计步骤.....	(27)
3.2.5 橡胶隔振器的设计.....	(28)
3.2.6 金属弹簧隔振器的设计.....	(32)
3.2.7 弹簧和橡胶块组合隔振器.....	(36)
3.2.8 空气弹簧隔振器.....	(37)
3.2.9 各类隔振器的安装及载荷计算.....	(44)

3.2.10 常用隔振器和隔振材料	(48)
3.3 动力吸振器的设计 and 应用	(50)
3.3.1 动力吸振器的一般原理	(50)
3.3.2 无阻尼动力吸振器的使用条件	(51)
3.3.3 阻尼动力吸振器	(52)
3.3.4 多自由度动力吸振器	(54)
3.3.5 动力吸振器在主系统上安装点的选择	(55)
3.3.6 动力吸振器的设计步骤和实例	(55)
3.4 缓冲器的设计 and 应用	(61)
3.4.1 缓冲的一般原理及分类	(61)
3.4.2 当冲击为速度阶跃时,缓冲器的工作特性分析	(63)
3.4.3 当冲击为加速度阶跃时,缓冲器的工作特性分析	(67)
3.4.4 力脉冲作用下缓冲器的工作特性	(70)
3.4.5 缓冲器的设计要求和设计原则	(71)
3.4.6 缓冲器的设计步骤及计算实例	(72)
参考文献	(77)
第四章 阻尼减振	(78)
4.1 质量、刚度和阻尼效应	(78)
4.2 阻尼	(79)
4.2.1 粘性阻尼	(79)
4.2.2 摩擦阻尼	(80)
4.2.3 磁滞阻尼	(80)
4.2.4 流体阻尼	(80)
4.2.5 结构阻尼	(81)
4.2.6 阻尼系数	(81)
4.3 减振器	(84)
4.3.1 减振器的基本原理及特点	(84)
4.3.2 橡胶块减振器	(88)
4.3.3 弹簧减振器	(89)
4.3.4 固体摩擦减振器	(96)
4.3.5 流体减振器	(98)
4.3.6 冲击阻尼减振器	(108)
4.3.7 电磁阻尼减振器	(109)
4.3.8 非线性减振器	(110)
4.3.9 关于减振器试验	(122)
4.4 粘弹性阻尼减振	(122)
4.4.1 粘弹性材料	(122)
4.4.2 粘弹性阻尼减振及其特点	(123)

4.4.3	粘弹性阻尼材料的基本力学特性	(125)
4.4.4	粘弹性阻尼系统的振动分析	(129)
4.4.5	粘弹性阻尼减振的结构形式	(134)
4.4.6	粘弹性阻尼减振结构的分析方法	(134)
4.4.7	振动控制中表面阻尼处理的结构设计	(148)
4.4.8	粘弹性阻尼材料的特性测试和设备	(156)
参考文献		(163)
附录 A 部分粘弹性材料性能图表		(165)
附录 B 常用粘弹性阻尼复合结构的几何参数计算图表		(169)
附录 C 国外部分粘弹性材料设计图表		(178)
第五章 振动主动控制		(211)
5.1	概述	(211)
5.1.1	振动主动控制含义	(211)
5.1.2	系统中各环节	(212)
5.1.3	两类振动主动控制问题	(212)
5.1.4	振动主动控制的优缺点	(212)
5.2	振动主动控制的数学模型	(213)
5.2.1	数学模型的两种表示方法	(213)
5.2.2	各构成环节的数学模型	(214)
5.2.3	两类振动主动控制问题的数学模型	(219)
5.3	振动主动控制的控制律设计	(221)
5.3.1	控制律设计的几种途径	(221)
5.3.2	控制律设计中要考虑的几个重要问题	(223)
5.3.3	控制律设计方法	(231)
5.4	振动主动控制在工程中的应用	(242)
5.4.1	动稳定性的主动控制	(242)
5.4.2	动力响应的主动控制	(243)
参考文献		(253)
第六章 结构动态修改		(255)
6.1	概述	(255)
6.2	结构动态修改的若干问题	(256)
6.2.1	灵敏度分析	(256)
6.2.2	可控与可观	(265)
6.2.3	摄动原理与约束条件	(267)
6.2.4	广义逆	(268)
6.2.5	结构动态修改方法的分类	(270)
6.3	矩阵摄动法	(271)

6.3.1	一阶矩阵摄动法	(271)
6.3.2	矩阵小参数法	(276)
6.4	以实测模态参数进行动态修改的方法	(280)
6.4.1	数学准备	(280)
6.4.2	加权范数优化法	(281)
6.4.3	质量矩阵的修改法	(283)
6.4.4	刚度矩阵的修改法	(283)
6.5	局部物理参数修改法	(284)
6.6	元素型方法	(289)
6.6.1	限定带宽法	(289)
6.6.2	元素型修改法	(290)
6.6.3	精细修改法	(294)
6.6.4	再正交迭代法	(300)
6.7	参数修正法	(302)
6.7.1	通过模态参数的摄动法	(302)
6.7.2	通过设计变量的修正法	(306)
6.8	具有复模态的结构动态修改	(309)
6.9	物理参数识别的工程实用方法	(311)
6.10	结构动态修改软件 SDM3.0	(316)
参考文献		(319)
第七章 结构动力学设计基础		(321)
7.1	引言	(321)
7.2	结构动力学特性分析	(322)
7.2.1	结构系统的有限元模型	(322)
7.2.2	结构动力学的数学模型	(323)
7.2.3	结构的振动特性	(324)
7.2.4	结构的动力响应	(327)
7.3	结构动力学的灵敏度分析	(329)
7.3.1	特征解的导数	(329)
7.3.2	特征解的摄动公式	(333)
7.3.3	耦合模态的灵敏度分析	(336)
7.4	最优化求解器	(337)
7.4.1	基本概念	(337)
7.4.2	无约束极小化方法	(340)
7.4.3	约束非线性规化方法	(344)
7.5	多频优化的结构动力学设计方法	(348)
7.5.1	多频优化的数学提法	(348)
7.5.2	多频优化方法	(349)

7.5.3	多频优化设计程序	(350)
7.6	频响优化的结构动力学设计方法	(353)
7.6.1	频响优化的数学提法	(353)
7.6.2	频响优化设计方法	(354)
7.6.3	频响优化设计程序	(355)
第八章	结构共振与振动疲劳	(358)
8.1	引言	(358)
8.2	结构共振分析	(358)
8.2.1	外界干扰源的频率分析	(358)
8.2.2	结构共振分析实例	(359)
8.3	随机振动疲劳强度研究	(361)
8.3.1	问题来源	(361)
8.3.2	随机振动疲劳特点及研究方法	(362)
8.3.3	随机振动疲劳破坏假设	(363)
8.3.4	随机振动疲劳寿命的估算公式	(364)
8.3.5	飞机结构随机振动应力研究	(369)
8.3.6	随机振动疲劳寿命计算实例	(375)
参考文献	(379)
第九章	颤振设计	(380)
9.1	引言	(380)
9.2	颤振的物理现象	(381)
9.2.1	简谐振动系统受与运动有关的干扰力作用时的能量关系	(381)
9.2.2	气流中振动的二元翼段的气动力特性	(382)
9.3	二元翼段颤振分析	(399)
9.3.1	翼段只有平移(弯曲)自由度时的运动方程	(399)
9.3.2	翼段只有扭转自由度时的运动特性	(399)
9.3.3	弯曲—扭转二自由度耦合运动的特性	(401)
9.3.4	二元翼段的颤振分析方法	(405)
9.3.5	影响二元翼段颤振临界速度的因素	(410)
9.4	操纵面颤振及质量平衡	(412)
9.5	颤振的工程分析方法	(414)
9.5.1	常用非定常气动力理论	(414)
9.5.2	颤振方程的建立	(428)
9.5.3	颤振方程的求解	(434)
9.6	飞机颤振设计的一般工作程序	(442)
9.6.1	飞机颤振设计的任务和要求	(442)
9.6.2	飞机颤振设计的工作程序	(443)

9.6.3 操纵面颤振设计	(445)
9.6.4 机翼外挂颤振设计	(445)
参考文献	(446)

第十章 航炮射击振动分析..... (448)

10.1 引言	(448)
10.2 航炮动载荷的研究	(449)
10.2.1 航炮动载荷的类型	(449)
10.2.2 炮击载荷的特点	(451)
10.2.3 航炮载荷获得的方法	(453)
10.3 结构抗炮击设计	(460)
10.3.1 结构抗炮击设计应考虑的因素	(460)
10.3.2 结构抗炮击设计的实例	(464)
10.3.3 设计中的响应控制	(473)
10.3.4 匹配设计的工作流程	(477)
10.4 设备抗炮击设计	(478)
10.4.1 炮击振动环境测量	(479)
10.4.2 炮击振动环境预估	(483)
10.4.3 设备抗炮击设计应考虑的原则	(489)
10.4.4 设备抗炮击试验及其方法	(489)
参考文献	(490)

第十一章 起落架动力分析..... (491)

11.1 引言	(491)
11.2 飞机地面滑行动力分析	(491)
11.2.1 跑道不平度准则	(492)
11.2.2 滑行动力响应分析方法	(496)
11.2.3 滑行随行谱的推导	(497)
11.3 着陆时机轮起转回弹动力分析	(499)
11.3.1 分析模型的建立	(499)
11.3.2 系统动力方程的建立	(500)
11.3.3 算例	(504)
11.4 缓冲器参数对缓冲性能的影响分析	(507)
11.4.1 主要参数求解	(507)
11.4.2 主要参数的影响分析	(511)
11.4.3 缓冲器参数调整的实例分析	(513)
11.5 缓冲性能校核计算	(513)
11.5.1 摇臂式起落架的校核计算	(514)
11.5.2 半摇臂式起落架的校核计算	(527)

11.5.3	支柱式(双气室油液缓冲器)起落架的校核计算	(530)
11.5.4	车架式起落架的校核计算方法	(536)
11.6	摆振理论	(546)
11.6.1	简化理论	(546)
11.6.2	影响摆振的因素	(548)
11.6.3	实例分析	(550)
11.7	飞机滑跑方向稳定性	(551)
11.7.1	基本假设	(551)
11.7.2	飞机滑跑小扰动运动方程组	(551)
11.7.3	微分方程组的特征方程式	(553)
11.7.4	计算实例	(553)
11.8	减摆器载荷计算	(554)
11.8.1	减摆器传动机构的载荷	(555)
11.8.2	减摆器壳体压力和拨杆载荷	(556)
参考文献		(556)
第十二章 复合材料结构的动力分析		(558)
12.1	复合材料的一般介绍	(558)
12.1.1	复合材料的特点与分类	(558)
12.1.2	复合材料铺层	(559)
12.2	复合材料结构的有限元分析	(562)
12.2.1	基本原理	(562)
12.2.2	动力分析的基本步骤	(563)
12.3	复合材料层压板的特性分析	(567)
12.3.1	层压板的铺层分析	(567)
12.3.2	层压板的振动特性分析	(570)
12.4	复合材料层压板的响应分析	(579)
12.4.1	动载荷的分类及其确定	(579)
12.4.2	确定性载荷下的动响应分析	(580)
12.4.3	随机性载荷下的动响应分析	(586)
12.4.4	复合材料机翼的动响应分析(例)	(588)
12.5	复合材料的声疲劳分析	(591)
12.5.1	声疲劳分析的基本假设	(591)
12.5.2	声疲劳设计图表的制定	(592)
12.5.3	例	(594)
参考文献		(596)
第十三章 直升机振动分析		(597)
13.1	直升机振动的基本问题	(597)

13.2	直升机振源·····	(597)
13.3	孤立旋翼桨叶固有特性·····	(599)
13.3.1	旋转桨叶固有特性·····	(599)
13.3.2	旋翼桨叶气动弹性响应分析·····	(602)
13.3.3	旋翼桨叶气动弹性稳定性分析·····	(603)
13.4	旋翼/机体耦合系统动不稳定性分析·····	(613)
13.5	旋翼/机体耦合系统气动弹性响应——直升机全机振动分析·····	(616)
13.6	旋翼/动力/传动系统扭转振动·····	(621)
附录 A	·····	(622)
A1	直升机形式·····	(622)
A2	旋翼形式·····	(622)
附录 B	旋翼整体模态 ·····	(623)
B1	自由度变换关系·····	(623)
B2	旋翼振动模态·····	(624)
B3	结论·····	(625)
参考文献	·····	(626)

第二册 振动控制与设计

第一章 绪论

工程结构的设计,受诸多因素制约,很难做到“规范”化,因而常被人们视为一种“艺术”而不认为是一种技术。几乎所有的工程设计都离不开技术人员的经验,而经验则很难或者说无法定量地予以描述。长期以来,人们一直希望将工程设计从“艺术”领域“拉”到技术领地中来,使设计的“科学”性尽量提高,减少对经验的依赖程度。本书编写的目的,正是这种“拉”的一种尝试;将就振动控制与设计的有关问题,向工程师们提供一些理论、方法、资料与建议。

1.1 振动控制与设计的工程意义

结构动力学问题,包含有激励、结构与响应三要素。按控制理论的说法,则上述要素分别称之为:输入;系统;输出。对于这两种术语,今后我们将不加区分地予以引用。

振动控制的工程含义有两层:振动利用;振动抑制。前者指利用系统的振动以实现某种工程目的,例如各种振动机械,本书不讨论这方面的问题;后者则指抑制系统的振动以保证系统正常工作,延长其使用寿命。本书所用的振动控制一词,实际上还包含有振动分析在内。所谓振动分析是指,在结构的数学模型与激励已知的情况下去寻求响应,包括强迫振动下的响应分析与自激振动下动不稳定性的分析。

随着生产与工业技术的进步,人们对结构的要求越来越高,新的高强度材料不断被采用,新的结构形式不断出现,工作环境越来越复杂甚至严酷,导致振动问题日益突出。统计资料表明,飞行器所发生的重大事故中,有40%与振动有关。振动问题不仅出现在航空、航天、机械、土木建筑等部门,在核工程、水陆运输等几乎所有的工程领域,都普遍存在。这也是结构动力学成为近几十年来发展得最为迅速的学科之一的原因。

受控结构多为弹性体,它可离散化为具有质量、刚度与阻尼的有限自由度系统,今后如不特别申明,则所讨论的结构或系统均指这种离散化了的系统。这类系统在受到振源的激励后,将会产生强迫振动。若激励频率与系统固有频率重合,系统将产生剧烈的共振,从而导致系统破坏,必须设法加以控制。强迫振动下系统的动态响应一般呈交变状(交变位移,交变应力,等等),可导致系统发生疲劳破坏。系统内部安装的各类设备,在振动环境中必须能正常而又可靠地工作;系统内若有乘员,则还需考虑乘员的舒适性问题。所有这些都要求人们设法降低振动水平。

系统还可能产生自激振动。由于空气动力与结构弹性、惯性间的耦合,导致飞机机翼发生颤振,这就是自激振动的一个典型例子。自激振动一旦出现,振动将迅速扩大,产生动不稳定现象,导致灾难性破坏,必须加以避免。

振动控制的方法可分为两大类：振动的被动控制；振动的主动控制。被动控制是振动控制中的经典方法，目前仍被广泛采用，并有一些新的进展。主动控制是振动控制中的新方法，是正在发展中的一种方法。

从强度的角度来看，以往的结构设计大都是按静力准则进行的。以飞机结构为例，其静力准则是：在实用载荷下，结构不得产生永久变形；在设计载荷下，结构不得破坏。所谓实用载荷即飞机在飞行中实际可能遇到的载荷，而设计载荷则是实用载荷乘以安全系数所得的载荷值。一般的工程设计，大都以设计应力不超过材料的弹性极限为静力设计准则。材料的静强度有其明确的含义，弹性极限与破坏强度皆可定量表达。

静力设计准则在早期的工程设计中，获得了很大的成功。因为早期的工程结构，对结构本身的重量没有严格的要求，高强度材料还未被采用；结构的运行速度不高；工作环境的严酷性远没有现在严重，对刚度与动态特性的要求还未显现出来。随着时间的推移，静力设计准则遇到了越来越大的困难，静力不稳定现象(刚度不足导致)和各式各样的振动问题(动态特性不良导致)屡屡发生；人们不得不在按静力准则设计的结构上，采取各种补救措施。实践业已表明，这种办法耗费巨大，效果却并不理想。

在结构设计中，如能将静强度、动强度、热强度、疲劳与断裂强度统一考虑，并能提出一个满足上述各项强度要求的综合性准则，则从强度角度来看，设计将进入一个比较理想的境界。但是，科学技术的发展，还未为人们准备好进入这一境界的条件，人们不得不另觅蹊径。振动设计正是在这样的背景下产生的。

所谓振动设计，就是以结构的动态性能指标作为设计准则来设计结构。不言而喻，由振动设计得到的结构，具有满足设计要求的动态特性，工作中无需采取振动控制措施。或者是，振动控制措施已在设计中被周密考虑，并作为结构的一个有机组成部分了。振动设计主要满足的是对刚度的某些要求。在一般的情况下，满足刚度要求的结构大都可以满足静强度的要求，但不能期望它能满足各种强度对它的要求。

飞机设计曾经出现过无限寿命、安全寿命、损伤容限等疲劳设计思想，以保证飞机在使用过程中不发生疲劳破坏。尔后又有一种着眼于抗疲劳开裂、抗腐蚀、抗磨损、抗退化的所谓耐久性设计思想出现。但由于人们对疲劳的机理还不甚清楚，疲劳设计还有不少问题亟待研究。更应强调指出的是，传统的疲劳强度，不研究低振动水平的振动引起的振动疲劳；故振动疲劳是一个亟待开发的领域。当前，飞机设计正向完整性大纲设计思想过渡，动力学问题已成为飞机从设计开始直至退役这一全过程中必须予以高度关注的问题，振动设计因而引起了人们极大的兴趣，吸引了众多的研究者。

振动设计正处在成长的过程之中，很多问题有待研究，有些还不清楚。举例来说，动态响应(不论它是位移、速度、加速度、或者是应力、应变)应不应有一个控制标准？这个标准在数值上应该有多大？前一问题的答案是肯定的，但后一问题至今还未找到合适的答案，从而使前一问题的答案显得苍白无力。又如，动强度或振动强度的确切含义是什么？它与疲劳强度究竟存在什么异同？这是一个常常引起争论、需要进一步讨论以求得共识的问题。因此，给振动设计以科学的内涵或是确切的定义，看来条件尚未成熟。但我们还得借用这些含义不确切的名词来阐述有关问题。

近年来，逆特征值问题引起了应用数学界与工程界的极大兴趣。国际上已出现了专门讨论、研究逆问题的学术刊物。在我国，全国性的逆特征值学术会议已召开过两届，吸引了许

多的应用数学工作者、力学工作者和其他工程技术人员，不少学者还建议将会议研讨的内容扩大到自然与社会现象中的所有逆问题。所谓逆特征值问题，在数学上就是已知矩阵的特征对(特征值与特征向量)去构造(寻求)相应的矩阵。当前，解决得最好的只限于简单的雅可比矩阵，且由于反问题的不唯一性，尚需人为地增加一定的约束条件。在工程上，按照给定的特征对，采用优化算法来设计结构的工作还刚刚开始，仅限于比较简单的问题。所以，振动设计还未从研究室与实验里走出来，离工程应用还有很长很长的艰苦道路要走。

综上所述可知，振动设计远未达到系统、成熟的阶段，当然不可能产生阐述得很完满的书籍。本书仅仅在这一方面提出一些设计的原则，介绍一些理论与方法，提供一些资料，希望它能有助于工程师们进行结构设计。如果读者能从中得到一些有益的启迪，则编著者于愿足矣！

1.2 振动被动控制的原理与方法

我们所讨论的振动控制是指，对系统的动态响应或/和动不稳定性加以控制，使系统的振动水平处在可以接受的范围，并保证在使用中(工作条件限定)不出现自激振动。

振动被动控制可从能量观点加以阐述。振源是系统产生过度振动的根源，如果能减小振源产生的激励能量(例如，减小安装在结构上的旋转机械的偏心度)，则系统的过度振动就不会出现。这种减小振源激励能量的技术措施，称之为消振。振源通常是外部因素，不是结构的组成部分，但却安装在结构之中，通常难以使激励能量减弱到比较理想的水平；深入的研究已不属于本书的范围了。

改变振源对需减振系统激励能量的频谱结构，减小能够传递到系统的所谓通过频率的激励能量，从而使系统的振动受到抑制，这种措施称为隔振。它要在振源与需减振的系统之间安装附加子系统，将振源与系统分隔开来，从而达到减振目的。振源分产生激励力与产生运动激励两类。对于前者，隔振作用在于减小振源激励力向基础的传递；对于后者，隔振的作用在于减小作为基础的振源的运动激励向隔振对象的运动传递。

隔振设计的途径有二，姑且称之为正方法与逆方法。当振源特性及其参数已知时，选定隔振器的布置方式及特性参数，计算隔振的效果；如不满足系统对隔振的要求，则重新选取隔振器的布置方式并修改其特性参数，再计算隔振效果，如此反复进行，直至满足隔振要求为止，这就是所谓正方法。正方法是采用得最多的方法，也就是在过去的常规设计中时常采用的所谓试凑法。计算机科学的发展，促使各种优化计算技术长足进步，采用比较成熟的优化算法，可在振源特性及其参数已知的条件下，直接确定满足预定要求的隔振器布置方式与特性参数，称它为逆方法。

从控制理论的观点来看，在振源与需减振系统之间安装一辅助子系统，就是在传递路线中串联了一环节，于是整个系统的传递函数由 $H(s)$ 改变为 $G(s)H(s)$ ，参见图 1-1。图中 $G(s)$ 为附加子系统的传递函数， $H(s)$ 为需减振系统的传递函数， $f(t)$ 为激励力。不言而喻，消振即设法直接减小输入 $f(t)$ ，从而减小激励能量。

在需要减振的结构上附加辅助子系统，使振源的激励能量分配到结构与辅助子系统上，并使分配到结构上的能量最小，这样就可达到结构减振的目的。这种方法称为吸振，相应的辅助子系统称为动力吸振器。吸振器给系统提供抵消激励力的所谓吸振力，从而减小了系统

本身的动响应。吸振技术的研究途径与隔振类似，当前正在发展的优化设计方法值得重视。

图 1-2 是从控制理论的观点来阐述吸振的原理图。从图 1-2(a)中可清晰地看出，由于辅助子系统产生一个吸振力 $p(t)$ ，使得系统的输入减小为 $f(t) - p(t)$ ，从而达到减振目的。图 1-2 (b)与图 1-2 (c)表示附加子系统与主结构的两种不同连接方式。图 1-2 (b)的方式是：激振力 $f(t)$ 作用于主结构的同时还通过辅助子结构作用于主结构。若子结构的传递函数为 $G(s)$ ，则整个系统的传递函数将由 $H(s)$ 改变为 $(1 - G(s))H(s)$ 。这是控制中的开环模式。图 1-2(c)的方式是： $f(t)$ 不通过子结构，吸振力完全由子结构本身的运动来提供，子结构之所以运动是因为它连接在主结构上，而连接点又有位移 $\bar{x}(t)$ 之故。这是控制中的一种典型负反馈问题，形成一闭环控制系统。若子结构的传递函数仍为 $G(s)$ ，则整个系统的传递函数由 $H(s)$ 改变为 $H(s)/(1 + H(s)G(s))$ 。

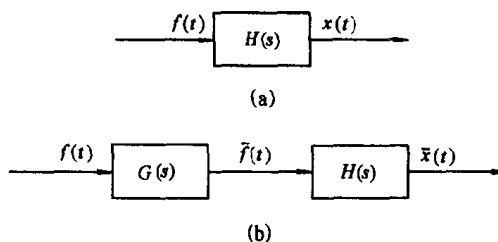


图 1-1

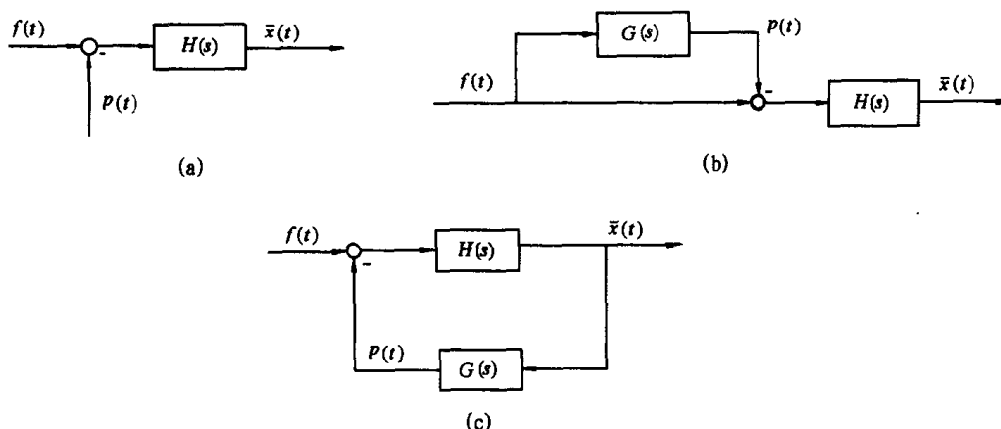


图 1-2

缓冲与隔振很相似，与隔振不同的是，缓冲要将冲击动能很快地转化为势能，贮存于缓冲器内，再缓慢释放，从而减小主结构所承受的瞬时冲击。与两类隔振相对应，第一类冲击隔离是隔离冲击源产生的冲击力；第二类冲击隔离是隔离作为基础的振源的突发运动。缓冲器仍可视为一辅助子系统，由于它的出现，使得整个系统的传递函数不再是原结构的传递函数了。

动力学系统的动态特性取决于系统的刚度、质量与阻尼的分布情况，改变阻尼会显著影响系统的响应。一般说来，增大阻尼可抑制系统的响应，尤其是在共振区附近，抑制效果特别明显。所谓阻尼减振，就是利用各种形式的阻尼来耗散结构的振动动能。通常，这种能量转换大多呈现出机械能转换为热能的形式，后者则由结构周围的空气吸收。阻尼减振可以象隔振、吸振一样，采用附加子系统(阻尼减振器)的形式，也可以将粘弹性阻尼材料直接涂覆或粘贴于受控结构表面。