

335276

振动控制工程

张阿舟
姚起杭 等编著



航空工业出版社

1989

前 言

振动控制工程是一门与许多工业产品使用安全密切相关的应用学科。所谓振动控制就是在设计或安装中采取措施,以控制产品所经受的振动,把产品及所在系统的振动条件限制在允许的范围内,使之能够保持产品的正常使用功能。众所周知,振动在许多情况下是有害的,在航空、航天、船舶、建筑、机械、化工等工程中普遍发生的振动,会影响结构、设备及整个系统的工作性能和寿命,严重时会使产品或系统功能失效甚至造成破坏事故。本书全面介绍了各种振动控制设计技术,以供各工业部门从事产品振动控制设计和振动应用研究的工程技术人员参考。

从振动控制的机理分,主要有下述几类振动控制方法:

减振是一种通过消耗振动能量来减弱系统振动的控制方法。

隔振是一种通过控制振动的传递来减弱系统振动的控制方法。

吸振是一种通过转移振动系统的能量来减弱系统振动的控制方法。

主动控制是一种利用有源闭环控制系统,引进外部能量来抑制系统振动能量,以减弱系统振动的控制方法。

本书介绍各类振动控制技术对各工业部门均具有通用性。编写中力求总结振动控制设计的实践经验,并尽量引用各种新技术,着重于向读者介绍工程实用方法,为此,较大篇幅引入了各类计算公式和设计步骤并列举了应用实例,以便于从事实际工作的工程技术人员参考。

全书共分十二章,第一章,振动基本理论。阐明以下各章所需的振动基础知识,主要介绍了单自由度系统、多自由度系统和连续系统的振动及冲击的理论概念,阻尼的基本知识,并列出了简单元件的振动计算表。第二至五章,分别为隔振器、减振器、缓冲

器、动力吸振器。这四章主要介绍振动常用的被动控制技术，其中着重介绍设计应用的一般原理、结构型式、设计方法、计算公式和实例。第六章，粘弹性阻尼材料减振。这是最近20年发展起来的一种新技术，本章论述了粘弹性阻尼减振的特点、类型、力学特性、结构设计计算和分析及实际应用方法，最后还列出了国内外已生产的部分阻尼材料的性能供读者选用。第七章，空气弹簧，介绍空气弹簧的分类及应用，空气弹簧隔振设计原则、方法及计算实例。第八章，涡流振荡与管道振动。介绍涡流引起的振动及其消减，输送流体的管道振动及其控制。第九章，建筑物的抗震设计。介绍建筑物抗震设计的原则方法和规范。第十章，有关标准。介绍隔振器生产与使用的关系，设备的振动与冲击环境试验标准及其制订方法等内容。第十一章，振动与冲击隔离器的特性测试。介绍隔离器特性测试的基本参数、测试技术、测试设备。第十二章，振动主动控制。介绍主动控制理论和有关方法，各种作动机构，动不稳定的主动控制及振动响应的主动控制等内容。

本书由张阿舟教授任主编，研究员级高工姚起杭任副主编，并由秦桂骧、龚庆祥、毛志祥、张俊钧、潘树祥、朱善庆、申仲翰、郭天德、顾仲权等八个单位的十一位同志共同编写而成。在编写过程中，航空工业部科技局杨学勤同志给予很大支持，编著者谨向他们以及其他支持本书编写出版工作的同志表示衷心感谢。

编写一部以总结工程应用方法为主的振动控制专著，我们还是首次尝试，尽管有在厂、所、高校从事本专业工作多年的教授和高级工程师，但仍不免具有一定的局限性，书中不妥之处敬请读者指正。

编著者

1988年3月

符 号 表

A 自由振动振幅	m, cm
面积	m^2, cm^2
B 强迫振动振幅	m, cm
C 阻尼系数	$N \cdot S/m$
声速	m/s
C。 临界阻尼系数	$N \cdot S/m$
C 电容	F
D, d 直径	m', cm
e 偏心距	m, cm
电压	V
E 拉压弹性模量 (杨代弹性模量)	N/m^2
能量	$N \cdot m, J$ (焦耳)
f 频率	Hz
f_n 固有频率 (无阻尼自然频率)	Hz
f_i 多自由度系统第i阶固有频率	Hz
f_a 有阻尼自然频率	Hz
f_r 共振频率	Hz
f_f 库仑摩擦力	N
F 力	N
g 重力加速度	m/s^2
G 剪切弹性模量	N/m^2
H, h 高度	m, cm
i 电流	A
I_i 质量惯性矩, i表示轴	$kg \cdot m^2$
I_{ij} 质量惯性积	$kg \cdot m^2$
I_m 虚部	
$j = \sqrt{-1}$	

J_1	截面惯性矩	m^4
J_0	截面极惯矩	m^4
J_{11}	截面惯性积	m^4
K, k	线性弹簧刚度	N/m
k_t	扭转弹簧刚度	$N \cdot m/rad$
L, l	长度	m, cm
M, m	质量	kg
M	力矩, 弯矩	$N \cdot m$
M_t	扭矩	$N \cdot m$
n	转速	rpm
	衰减系数	
p	概率密度函数	
q	电荷	C
	广义坐标	
Q	广义力, 品质因数, 放大因子	
R, r	半径	m, cm
r	电阻	Ω
R_0	实部	
S	弧长	m, cm
t	厚度	m, cm
	时间	s
T	周期	s
	传递率	
	动能	$N \cdot m, J(\text{焦耳})$
U	位能	$N \cdot m, J(\text{焦耳})$
v	线速度	m/s
V	体积	m^3
W, w	重量	N
w	宽度	m, cm

u, v, w	位移	m, cm
x, y, z	位移 坐标	m, cm
Z	阻抗	Ω
α, β, γ	分别为x, y, z轴的转角	rad
β	放大因子	
γ	材料损耗因子	
γ	剪切应变	
	重度	N/m^3
δ	柔度	m/N
	对数衰减率	
δ_{st}	静变形	m, cm
ε	拉(或压)应变	
ξ	相对阻尼系数	
η	结构损耗因子	
θ	相位角	rad
λ	波长	m, cm
μ	摩擦系数, 质量密度 (kg/m^3)	
ν	泊桑比	
ρ	单位长度质量	kg/m
	单位体积质量	kg/m^3
ρ_i	迴转半径, i 表示轴	m, cm
σ	正应力	N/m^2
	均方根值 (rms)	
τ	剪应力	N/m^2
	时间	s
ϕ	相位角	rad
ψ	相位角	rad
ω	圆频率	rad/s

	角速度	rad/s
ω_n	固有圆频率 (无阻尼自然频率)	rad/s
ω_i	多自由度系统第 <i>i</i> 阶固有圆频率	rad/s
ω_d	有阻尼自然圆频率	rad/s
ω_r	共振圆频率	rad/s

目 录

第一章 振动基本理论	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 单自由度系统的振动	(3)
1.2.1 单自由度系统的自由振动	(3)
1.2.2 单自由度系统的强迫振动	(8)
1.2.3 能量法	(16)
1.2.4 瑞雷法	(17)
1.3 多自由度系统的振动	(19)
1.3.1 无阻尼多自由度系统的自由振动	(19)
1.3.2 比例阻尼系统的自由振动	(20)
1.3.3 比例阻尼系统的强迫振动	(21)
1.3.4 无阻尼二自由度系统的自由振动	(21)
1.4 扭转振动	(23)
1.4.1 单自由度系统扭转振动	(23)
1.4.2 二自由度系统扭转振动	(24)
1.5 连续系统的振动	(25)
1.5.1 弦振动	(25)
1.5.2 梁的横向振动	(26)
1.6 冲击的一般概念	(28)
1.6.1 冲击激励的描述	(28)
1.6.2 冲击响应	(30)
1.6.3 几种典型的冲击激励函数作用下系统的响 应分析	(31)
1.7 阻尼的基本概念	(36)
1.7.1 粘性阻尼	(37)
1.7.2 等效粘性阻尼	(38)

1.7.3	粘弹性阻尼理论.....	(40)
1.7.4	阻尼比容和损耗因子.....	(48)
	附录 简单元件的振动计算	(49)
第二章	隔振器	(91)
2.1	引言	(92)
2.2	隔振的基本原理.....	(92)
2.2.1	隔振的分类.....	(92)
2.2.2	振动的传递.....	(93)
2.2.3	隔振效率, 幅降倍数与隔振系数.....	(98)
2.2.4	理想隔振器类型.....	(99)
2.3	隔振器设计.....	(104)
2.3.1	隔振器设计原则.....	(104)
2.3.2	橡胶隔振器的设计.....	(105)
2.3.3	金属弹簧隔振器.....	(112)
2.3.4	弹簧与橡胶块组合隔振器设计.....	(122)
2.3.5	动力反共振隔振器.....	(123)
2.4	隔振器的布置.....	(126)
2.4.1	隔振器的支承形式.....	(126)
2.4.2	隔振器的布置原则.....	(127)
2.4.3	各种隔振器布置方式及其载荷计算.....	(128)
2.5	常用隔振器.....	(132)
2.5.1	常用隔振器及隔振材料的类型.....	(132)
2.5.2	承剪橡胶隔振器的常用型号规格.....	(132)
2.5.3	橡胶通用隔振垫.....	(138)
2.6	隔振器的设计步骤.....	(144)
第三章	减振器	(148)
3.1	减振器的基本原理.....	(148)
3.2	固体摩擦减振器.....	(152)
3.2.1	结构型式.....	(152)

3.2.2	计算实例	(157)
3.3	流体减振器	(161)
3.3.1	结构型式	(161)
3.3.2	油液减振器阻尼与结构参数的计算	(172)
3.4	冲击阻尼减振器	(185)
3.5	电磁阻尼减振器	(187)
第四章	缓冲器	(190)
4.1	引言	(190)
4.2	缓冲	(190)
4.2.1	缓冲的一般原理	(190)
4.2.2	冲击传递系数	(193)
4.2.3	两类缓冲问题	(193)
4.3	缓冲器的工作原理	(198)
4.3.1	冲击激振为速度阶跃时, 缓冲器的工作特性	(198)
4.3.2	冲击激振为加速度脉冲时, 缓冲器的特性分析	(207)
4.4	缓冲器设计	(214)
4.4.1	第一类缓冲问题中缓冲器设计	(214)
4.4.2	第二类缓冲	(220)
4.4.3	弹性限位器的设计	(230)
4.4.4	双刚度隔振器	(231)
4.5	缓冲器的设计原则	(232)
4.6	缓冲器的设计步骤及计算实例	(234)
第五章	动力吸振器	(248)
5.1	引言	(248)
5.2	动力吸振器的一般原理	(248)
5.3	无阻尼动力吸振器的使用条件	(251)
5.4	阻尼动力吸振器	(254)

5.5	辅助质量弹簧系统的型式	(258)
5.6	关于动力吸振器的几个问题	(261)
5.6.1	多自由度系统与动力吸振器	(261)
5.6.2	多自由度吸振器	(261)
5.6.3	动力吸振器与主系统的连接点选择	(263)
5.6.4	动力吸振器中弹簧非线性的影响	(264)
5.7	动力吸振器的设计步骤与实例	(267)
5.7.1	无阻尼动力吸振器的设计步骤与实例	(267)
5.7.2	具有粘性阻尼的阻尼动力吸振器的设计步 骤与实例	(274)
第六章	粘弹性阻尼材料减振	(282)
6.1	引言	(284)
6.2	粘弹性阻尼减振及其特点	(285)
6.3	粘弹性阻尼材料的基本力学特性	(290)
6.3.1	复刚度与复模量	(291)
6.3.2	损耗因子与温度和频率的关系	(293)
6.4	粘弹性层的类型比较	(296)
6.4.1	粘弹性阻尼层的类型	(296)
6.4.2	各种阻尼层的比较	(297)
6.5	阻尼结构在一般工程中的应用	(297)
6.5.1	自由阻尼层的应用	(298)
6.5.2	约束阻尼层的应用	(299)
6.6	阻尼结构的分析	(302)
6.6.1	典型的约束阻尼元件	(302)
6.6.2	粘弹性阻尼减振结构分析方法	(307)
6.7	粘弹性阻尼减振结构设计	(321)
6.7.1	自由阻尼层设计	(321)
6.7.2	约束阻尼层设计	(330)
6.8	粘弹性阻尼材料的测试方法和设备	(362)

6.8.1	阻尼材料的动态特性测试	(363)
6.8.2	粘弹性材料 β 值和 G' 值的换算	(366)
附录A	部分常用粘弹性结构材料的损耗因子	(368)
附录B	部分粘弹性材料的损耗因子 β 值	(369)
附录C	部分国产粘弹性阻尼材料特性	(370)
附录D	粘弹性剪切阻尼复合结构的几何参数	(375)
附录E	两层和三层弹性元件约束阻尼结构的损耗因子和频率比	(386)
第七章	空气弹簧	(420)
7.1	引言	(420)
7.2	空气弹簧的分类及应用	(420)
7.2.1	空气弹簧隔振的优点	(420)
7.2.2	空气弹簧的结构和分类	(422)
7.2.3	空气弹簧的应用	(424)
7.3	空气弹簧隔振设计的原则	(424)
7.3.1	隔振体和振源的分析	(424)
7.3.2	对地基基础的分析	(425)
7.3.3	隔振措施的选择	(425)
7.3.4	空气弹簧形式的选择	(426)
7.4	空气弹簧隔振设计	(426)
7.4.1	空气弹簧工作压力的计算	(426)
7.4.2	空气弹簧刚度的计算	(429)
7.4.3	空气弹簧固有频率的计算	(437)
7.4.4	系统振动传递率的计算	(438)
7.4.5	计算实例	(438)
第八章	涡流振荡与管道振动	(444)
8.1	引言	(444)
8.2	涡流引起的振动	(445)
8.2.1	静止园柱体的涡动尾流	(446)

8.2.2	司脱罗哈(STROUHAL)数	(448)
8.2.3	涡流与园柱振动的相互影响.....	(449)
8.2.4	对涡流激发振动的消减	(453)
8.2.5	实例.....	(455)
8.3	输送流体的管道的振动.....	(467)
8.3.1	流体管道的运动方程.....	(467)
8.3.2	管道振动与流体脉动的关系.....	(474)
8.3.3	管道系统的气柱共振.....	(475)
8.3.4	管道系统气柱固有频率与共振管长的计算	(476)
8.3.5	管道系统压力脉动的分析.....	(479)
8.3.6	管道系统的结构振动分析.....	(486)
8.3.7	大型压力管道的振动分析.....	(496)
8.3.8	管道结构振动和固有频率的测量.....	(498)
8.3.9	管道系统的振动控制.....	(501)
第九章	建筑结构抗震计算	(518)
9.1	引言	(518)
9.2	地震特性及有关术语.....	(520)
9.2.1	震源.....	(520)
9.2.2	震中、震中距.....	(521)
9.2.3	震级.....	(521)
9.2.4	地震烈度.....	(522)
9.3	建筑结构地震荷载的计算方法.....	(524)
9.3.1	竖向地震荷载.....	(525)
9.3.2	弹性结构水平地震荷载计算.....	(527)
9.4	建筑结构固有频率的近似计算.....	(545)
9.4.1	集中质量法.....	(545)
9.4.2	换算质量法.....	(548)
9.4.3	单层刚架水平固有频率.....	(549)

9.4.4	能量法	(552)
9.4.5	建筑结构基本周期的近似计算公式	(555)
9.4.6	储液罐的固有频率	(559)
9.4.7	直立式园筒设备的基本自振周期	(561)
9.5	房屋结构的抗震计算	(561)
9.5.1	力学模型及振动方程	(562)
9.5.2	空间结构地震反应分析的步骤	(563)
9.5.3	内框架房屋的简化抗震计算	(564)
9.6	高层建筑的抗震计算	(568)
9.6.1	高层建筑的结构体系	(568)
9.6.2	高层建筑抗震初步设计	(569)
9.7	烟囱结构的抗震计算	(575)
9.7.1	烟囱结构底部地震设计内力	(575)
9.7.2	独立烟囱的地震内力分布	(577)
9.7.3	独立烟囱的竖向地震作用	(578)
9.8	建筑结构的振动试验	(579)
9.8.1	主振源探测	(580)
9.8.2	结构动力特性测试	(581)
9.9	建筑结构基础的隔振与减震	(587)
9.9.1	积极隔振	(588)
9.9.2	消极隔振	(593)
9.9.3	建筑结构基础减震	(595)
附录一	某些精密仪表及设备的允许振动分级 (按 振幅)	(596)
附录二	某些精密仪表及设备的允许振动分级 (按 速度)	(597)
第十章	有关标准	(599)
10.1	引言	(599)
10.2	隔振器生产与使用的关系	(600)

10.2.1	用户应提供的资料	(600)
10.2.2	隔振器生产厂应提供的资料	(602)
10.3	设备的振动环境试验标准	(604)
10.3.2	振动与冲击对人的作用与评价标准	(605)
10.3.3	振动环境试验标准的分类	(607)
10.3.4	振动和冲击环境试验标准的内容	(609)
10.4	振动与冲击标准的制订	(611)
10.5	机器的机械振动强度级别	(612)
附录10-1	我国国家标准、部标准代号	(614)
附录10-2	常用国际和国外标准代号	(616)
第十一章	振动与冲击隔离器的特性测试	(618)
11.1	引言	(619)
11.2	特性测试的基本参数	(621)
11.2.1	隔离器的刚度测量	(621)
11.2.2	隔离器的阻尼测量	(623)
11.2.3	隔离效果的测量	(635)
11.3	机械阻抗测试技术	(637)
11.3.1	机械阻抗概念	(637)
11.3.2	振动分析中的机械阻抗法	(639)
11.3.3	机械阻抗测量	(640)
11.4	测试设备	(659)
11.4.1	常用测振传感器	(659)
11.4.2	放大器	(674)
11.4.3	记存器	(678)
11.4.4	激振器和振动台	(682)
11.4.5	分析器和数据处理设备	(692)
11.5	正弦振动试验	(702)
附录	隔振器生产与使用特性规程	(707)
第十二章	振动主动控制	(715)

12.1	引言	(715)
12.2	控制理论的有关知识与基本成果	(717)
12.2.1	状态空间与状态方程	(717)
12.2.2	能控性与能观性	(720)
12.2.3	稳定性	(721)
12.2.4	反馈控制	(723)
12.2.5	最优反馈控制	(725)
12.2.6	观测器	(730)
12.2.7	次最优反馈控制	(732)
12.2.8	极点配置法	(734)
12.3	作动机构	(737)
12.3.1	伺服液压式执行机构	(738)
12.3.2	电磁式执行机构	(739)
12.3.3	压电式执行机构	(741)
12.4	动不稳定的主动控制	(742)
12.4.1	动不稳定的主动控制的频域设计法	(743)
12.4.2	动不稳定的主动控制的时域设计法	(745)
12.5	振动响应的主动控制	(766)
12.5.1	主动吸振	(766)
12.5.2	主动隔振	(771)
12.5.3	主动阻振	(781)
12.5.4	主动结构参数修改	(784)

第一章 振动基本理论

1.1 引言

振动是一种物体位形随时间而往复变化的运动现象。这种现象如果是确定的，则可以用函数关系描述其运动：

$$x = x(t) \quad (1-1)$$

如果是非确定性的，则只能用概率和统计方法来描述其运动规律，称为随机振动。

振动问题是工程技术领域里普遍存在而且需要认真研究解决的应用课题之一。

振动理论是各行业工程技术人员必须掌握的基础知识，它对于正确进行产品结构的动力学设计、试验及其减振隔振系统的设计至关重要。工程中常见的机械振动问题有：防止系统产生共振、避免系统的自振、平衡系统中的不平衡惯性力、减振隔振和吸振、提高产品的抗振能力、振动的利用等。在研究和解决这些问题时，既要进行理论上的分析计算，也需要进行振动测量和试验。

机械振动的分类见表1-1。