

机械振动 隔离技术

严济宽 著



机械振动隔离技术

严 济 宽 编著

上海科学技术文献出版社

1985

机械振动隔离技术

严济宽 编著

*

上海科学技术文献出版社出版
(上海市武康路2号)

新华书店上海发行所发行
上海市印十二厂印刷

*

开本 787×1092 1/32 印张 13.75 字数 332,000

1986年7月第1版 1986年7月第1次印刷

印数: 1-5,500

书号: 15192-459 定价: 2.55 元

《科技新书目》120-211

内 容 简 介

本书系统地叙述了振动隔离的基本理论和计算方法,除传统的单自由度隔振技术外,对多自由度振动的隔离,双层隔振系统,非刚性系统的隔离,随机振动的隔离,以及考虑到弹性元件中驻波效应的波动传递率的计算等方面,都作了详细的阐述,力求反映最新科研成果,且结合工程实际每一章均附有计算实例,以供读者参考。

在弹性元件的隔振性能方面,除讨论了一般的粘性阻尼和摩擦阻尼隔振器外,还对弹性连接的粘性阻尼和摩擦阻尼隔振器,以及现代隔振技术中广泛应用的防振橡胶隔振器的动力特性,进行了深入的分析和讨论。

本书可用作大专院校《振动冲击噪声》、《动力机械》、《环境保护》等专业的教材或教学参考书,也可供从事机械振动与噪声控制的工程技术人员参考。

序

本书系严济宽同志多年来教学科研工作的总结, 其中有些内容曾在书刊上片断发表, 现在经过修改整理成为一本较完整的专著。

全书共分十二章。

第一章绪论讲振动的根源、危害、控制方法及隔离装置的介绍, 使读者开卷就对隔振问题初步地看到一个全貌。

第二章讲单自由度隔振系统, 其中包括基本原理、粘性阻尼、摩擦阻尼和弹性连接阻尼等等。另外单独有一节讲述了防振橡胶的动态特性, 最后介绍了近年较流行的双层隔振系统。

第三章讲多自由度隔振系统, 为全书核心内容, 主要解决弹性支承六个方向的固有频率计算问题, 其中包括平置及斜置式弹性支承, 辐射、会聚及混合式支承, 解耦方法, 并专门介绍了弹性支承作任意布置时固有频率的计算方法, 说明外接弹性元件对被隔离物体固有频率的影响。

第四章讲质量惯性矩的计算及主惯性轴位置的确定, 讨论了当主惯性轴与参考坐标轴两者位置偏离较大时, 正确布置隔振器的方法, 还介绍了几种质量惯性矩的实验求法。

第五章讲扰动力的分析及扰动频谱的绘制, 一般常见的机械设备扰动力的估算方法及资料依据, 复杂扰动激励下弹性支承固有频率的正确选择及指标范围。

第六章讲弹性支承物体的振动计算, 包括独立振动及耦合振动时的振幅、相对位移及传递力, 耦合振动模式及节轴位置

等。给出了大量数据、计算实例及计算用的表格。

第七章讲隔振装置设计的评定, 临界转速图的绘制及稳定性校验, 平衡振幅及其应用。最后提出一简便易行的机械设备振动评价标准, 在正式标准颁布之前, 可以作为判断依据。

第八章讲隔振器的设计、计算方法, 重点介绍广为应用的橡胶隔振器。

第九章为以上各章的总结, 介绍隔振设计的具体步骤, 给出了一较为复杂的多自由度隔振实例。

第十章介绍四端参数法的基本原理、具体计算和实测, 并对弹性元件中的驻波效应进行分析及举出计算实例。

第十一章讲非刚性系统的隔振, 包括振源特性及隔振效果、非刚性基础、双层隔振器及装置、设计与实例。

第十二章介绍随机振动的隔振, 讨论了线性系统在白噪声激励下的各种响应, 如均值、自相关函数、功率谱密度、均方值、响应的概率密度函数以及峰值的概率分布等等, 并附有实例。

振动现象自古有之, 但它越来越引起人们的注意还是近代的事。由于科技的发展和随之而来的生活水平的提高, 人们就越重视安全和安静。振动的隔离已成为人们日益关心的核心问题之一。因为仔细说来, 今日人们每时每刻不论是谁都同振动发生直接或间接关系。严济宽同志此书的发表, 将对解决隔振问题作出贡献。

李漱仲

1984年8月于上海交通大学

目 录

序	1
第一章 绪论	1
1.1 振动的危害	1
1.2 引起振动的原因	3
1.3 减小及控制振动的方法	9
1.4 隔振装置构造简介	12
第二章 单自由度隔振系统	21
2.1 粘性阻尼系统	21
2.2 摩擦阻尼系统	38
2.3 弹性连接粘性阻尼系统	47
2.4 弹性连接摩擦阻尼系统	61
2.5 防振橡胶隔振系统	70
2.6 双层隔振系统	79
第三章 多自由度隔振系统	94
3.1 弹性支承物体的振动型式	94
3.2 弹性支承任意布置的隔离体的固有频率	98
3.3 弹性支承规则布置的隔离体的固有频率	112
3.4 去耦方法和常用的计算公式	125
第四章 隔离物体重心位置的确定及质量惯性矩的计算	139
4.1 刚性机架及惯性块	139
4.2 重心位置的确定	140
4.3 质量惯性矩的求算	144
第五章 扰动力分析及扰动频谱	159

5.1	往复机械的扰动力分析	159
5.2	回转机械的扰动力分析	180
5.3	船舶航行振动及摇摆振动	184
5.4	扰动频谱图及弹性支承固有频率的选择	187
第六章	弹性支承物体的振动计算	193
6.1	单自由度隔振系统的振动计算	193
6.2	多自由度隔振系统的振动计算	213
第七章	隔振装置的技术评定	237
7.1	临界转速图	237
7.2	稳定性校验	240
7.3	平衡振幅	244
7.4	机械设备的振动评定标准	251
第八章	弹性支承元件的设计计算	265
8.1	弹性支承元件的选择	265
8.2	弹簧隔振器的设计计算	267
8.3	橡胶隔振器的设计计算	275
第九章	隔振设计步骤及工程实例	291
9.1	隔振设计步骤	291
9.2	工程实例	295
第十章	振动隔离中的四端参数法	328
10.1	基本概念	328
10.2	基本元件的四端参数及其联结方法	333
10.3	质量连续分布系统的四端参数	346
10.4	四端参数的测量及振源的描述	359
第十一章	非刚性系统的振动隔离	365
11.1	非刚性基础的振动隔离	365
11.2	非刚性物体的振动隔离	380
11.3	振源特性对隔振效果的影响	386
11.4	工程实例	391

第十二章 随机振动的隔离	397
12.1 简单隔振系统对随机激励的响应	397
12.2 双层隔振系统对随机激励的响应	408
参考文献	424

第一章 绪 论

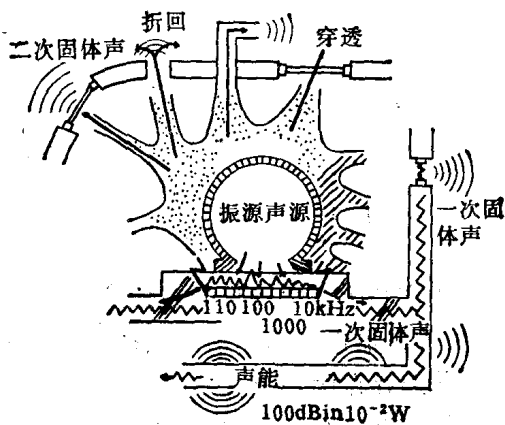
1.1 振动的危害

振动是在生产和生活中常见的一种现象。随着科学技术的发展,人们使用的机器设备功率增大、转速加快,在现代工程技术中振动这一普遍存在的现象日益受到人们的关注。它不仅影响到机器设备的使用寿命,仪表器械的使用性能,操作人员的正常工作,造成建筑结构的损坏。而且还影响到舰船、飞机的生命力及其战斗技术性能,乃至影响到人的健康。

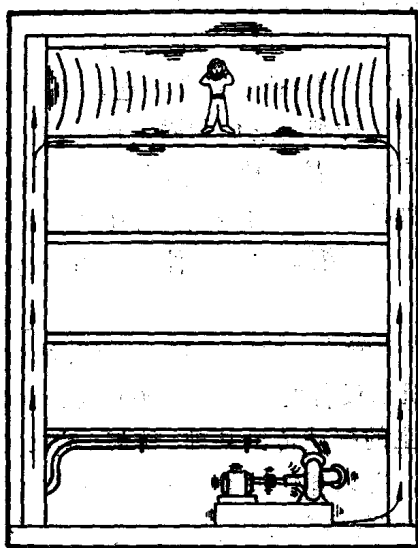
由振动引起的危害,可以分成下列几方面:

1. 破坏结构强度,特别是各种连接处,如焊缝、铆接等;破坏各种机械设备,特别是它们和固定构件的连接处,如机脚、底座、管路支架、轴承连接螺栓等;损害各种机械零件,如轴和轴承的磨损,装配部件气密性的丧失,电机电刷的破裂和出现火花,各种管路的折断等;缩短电气元件的使用寿命,特别是灯泡、电子管等。

2. 引起结构噪声。在民用建筑方面,结构设计现在变得越来越轻巧,而机器设备的功率却越来越大,种类越来越多样化,当机器设备产生的振动传给基础、楼板、墙壁或其他结构后,就引起它们振动,并以弹性波的形式沿着建筑结构传到其他房间去,接着就使相邻的空气发生振动。这样,物体的振动就以声波的形式被空气传播到四面八方,产生所谓结构噪声或固体噪声[图 1-1(a)]。它不仅使相邻的房间受到骚扰,甚至还会使相当



(a)



(b)

图 1-1 结构噪声的产生及传播

远的房间也受到影响[图 1-1(b)]。钢筋混凝土、金属等虽然是隔绝空气噪声的良好材料,但是对固体噪声却没有多大程度的减弱作用,往往一个小小的泵的激励就可以使整幢大楼不得安宁。

在舰船建造方面,结构噪声影响到航行的舒适性,增添了旅途的疲劳。更重要的是影响了军用舰船的战斗性能。舰船能把噪声通过船体辐射给水,这就使得在很远的距离就能通过声纳设备发现舰船,从而暴露了目标,破坏了隐蔽性,妨碍了战斗勤务的执行。对于潜艇来说,则妨碍了本身工作。因为最好的潜艇也发现不了比它“静”的敌人。

3. 破坏了仪器仪表的正常工作条件,降低了测量精度;破坏了很多自动控制设备,特别是各种继电器的正常工作;促使各种仪表,特别是电气仪表的工作失灵;降低了火炮武器的瞄准度;增加了航空、航海仪表的读数误差。

4. 恶化了操作、管理人员的工作条件,使人易疲劳、注意力减弱,容易出现误动作,引起技术事故,长久下去会使人反应迟钝,造成生理疾病。

1.2 引起振动的原因

引起机械振动的原因是多方面的,下面列举一些为人们所熟悉的典型的振动根源。

1. 运转机械的不平衡。根据运动特性,一般机械可以分为回转式机械和往复式机械两大类。通常回转式机械,如泵、电机等的静、动平衡比较容易做到;而往复式机械,如柴油机、压气机的完全平衡几乎是不可能的。因此在机器运转时或多或少地存在着周期性的扰动力,特别是缸数不多的柴油机常成为振动的

主要根源。由运转机械的不平衡所引起的振动具有明显的规律性,其频率常等于机械的转数或其倍数。

2. 传动轴系的振动。按照振动的特性又可分成以下三类

① 由原动机的转矩不均匀引起的扭转振动; ② 由轴承间距和转速的不利配合引起的横向振动; ③ 由螺旋桨不均匀推力引起的纵向振动。

3. 管路振动。包括高压流体的动力冲击以及排气管压力波脉动等。

4. 螺旋桨扰动。一般推进用的螺旋桨常成为船舶,特别是艉部振动的主要根源。按振动的性质可分两种: 一种是其扰动频率和螺旋桨的转数相等,称为一次扰动或轴频扰动,它主要是由螺旋桨的制造、安装误差引起,如平衡不好、安装偏心以及各叶片的螺距不均匀等等。一种其扰动频率等于螺旋桨的转数与其叶片数的乘积,称为高次扰动或叶频扰动,它主要是由于螺旋桨工作在船体艉部的不均匀伴流中,因此产生了周期性变化的

表 1-1 常见的舰船振动环境阶次分析

螺旋桨激励		发动机激励	
$1 \times n_p$	螺旋桨不平衡 各桨叶螺距不等 安装不好	$1 \times n_m$	一次惯力及一次惯力矩 减速齿轮不平衡 轴线不对中
$3 \times n_p$	三叶螺旋桨	$2 \times n_m$	二次惯力及二次惯力矩
$4 \times n_p$	四叶螺旋桨		
$5 \times n_p$	五叶螺旋桨	$\frac{i}{2} \times n_m$	四冲程柴油机爆发次数
$6 \times n_p$	三叶、六叶螺旋桨	$i \times n_m$	二冲程柴油机爆发次数

注: n_p —螺旋桨旋转速度(r/min);

n_m —发动机旋转速度(r/min);

i —发动机气缸数。

表 1-2 常见的机械振动判断表

振 动 频 率	主 要 原 因	次 要 原 因
$1 \times r/min$	不平衡	1. 轴颈、齿轮等偏心 2. 轴不对中或弯曲 3. 皮带坏了(r/min 为皮带转速) 4. 共振 5. 往复惯力 6. 电气问题
$2 \times r/min$	机械松动不对中	1. 如有大的轴向振动, 则为不对中 2. 往复惯力 3. 共振 4. 皮带坏了
$3 \times r/min$	不对中	通常是不对中和过分的轴向间隙相结合造成, 轴向振动严重
小于 $1 \times r/min$	油膜振动 (一般为 $0.43 r/min$)	1. 皮带传动损坏 2. 背景振动 3. 低次谐波共振 4. 拍振
交流电的同步频率	电气问题	通常的电气问题包括: 转子皮带损坏, 转子偏心, 相位不平衡, 空气间隙不相等等。属于电气问题的振动当断电后即不产生振动
$2 \times$ 交流电的同步频率	转矩脉冲	1. 变压器的振动 2. 除非激励起共振, 一般不作为问题

(续表)

振 动 频 率	主 要 原 因	次 要 原 因
r/min 的很多倍(简谐倍数)	1. 齿轮损坏 2. 皮带传动不良 3. 空气动力作用 4. 水或流体作用 5. 空气压力脉动 6. 电气问题 7. 滚动轴承损坏 8. 机械松动 9. 往复惯性力 10. 燃烧力	1. 坏齿轮的齿数 $\times r/min$ 2. 皮带传动不良为 1, 2, 3, 4 $\times r/min$ 3. 风扇叶数 $\times r/min$ 4. 叶轮叶片数 $\times r/min$ 5. 罗茨鼓风机的两倍瓣数 $\times r/min$ 6. 电动机的极对数 $\times r/min$ 7. $\frac{1}{2} \times$ 滚珠数目 $\times r/min$ 8. 当有严重松动时, 可能发生 2, 3, 4 和其他的高次谐波 9. 高次不平衡惯性力和惯性力矩 10. 四冲程为 $0.5 \times i \times r/min$, 二冲程为 $i \times r/min$ (i —气缸数)
与 r/min 无明确关系的非简谐倍数的高频	滑动轴承坏了	1. 不稳定的轴承振动(振幅及频率不稳定) 2. 润滑不良的滑动轴承, 由摩擦引起振动 3. 空泡; 喘流, 回流所引起的高频随机振动 4. 摩擦振动

水动力,通过轴承支架或船体外板引起振动。

5. 其他。如冲压设备(冲床、锻床等)引起的冲击力振动;运载工具(车辆、船舶)的颠簸、摇摆;以及大型建筑物的随机振动等。

表 1-1 给出了常见的船舶振动的阶次分析。表中 n_p 代表螺旋桨的转速, n_m 代表发动机的转速,当直接传动时, $n_p = n_m$; i 代表发动机的气缸数。此表对于查明振动根源及设计弹性支承是非常重要的。表 1-2 为常见的机械振动判断表。

图 1-2 给出了一般舰船的典型振动频谱。它清楚地表明了各种不同机械的振动的大致频率范围。图 1-3 为空调设备的振动频谱结构实例。由图可以看出,一般机械设备的振动频率大约分布在 $10 \sim 1000 \text{ Hz}$ 之间,其中主要的是 $100 \sim 1000 \text{ Hz}$ 的声频范围,而由轴转速引起的振动(一般为 $10 \sim 50 \text{ Hz}$)却次要的。由

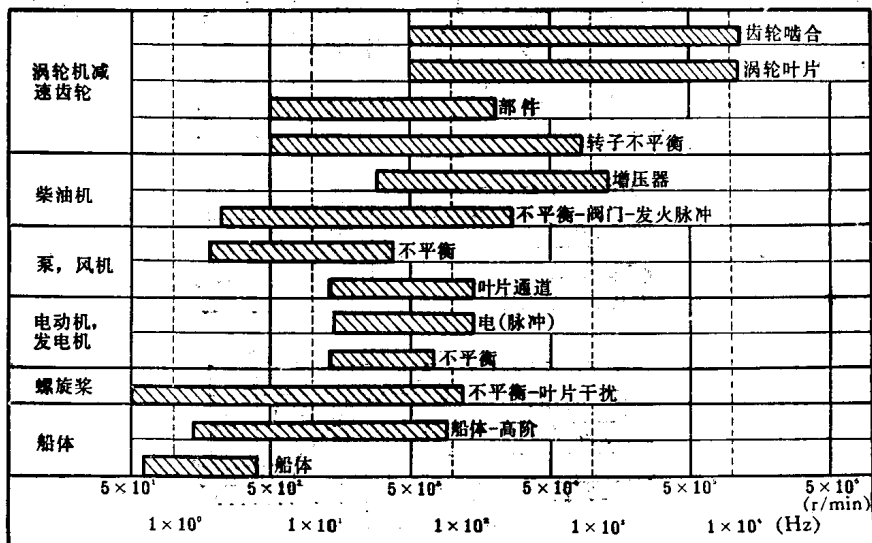


图 1-2 常见的机械振动典型频谱

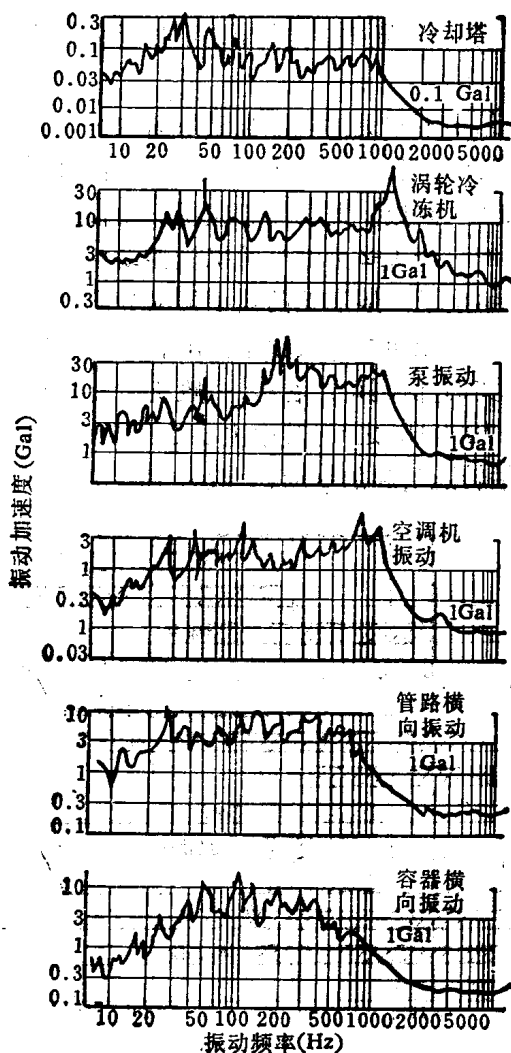


图 1-3 空调设备的振动频谱分析实例