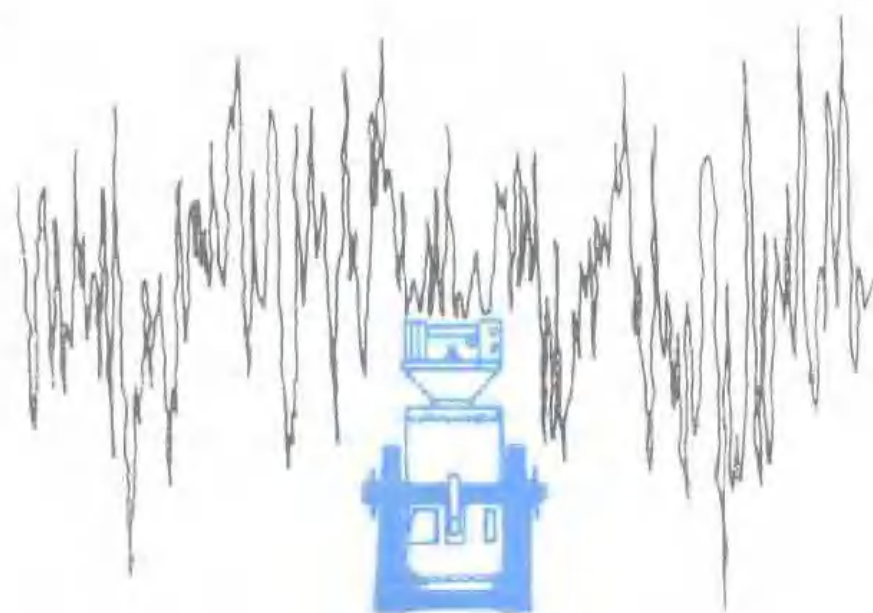


工程技术丛书

振动测试技术及其应用

编著：米惠民 杨崇学



中国仪器仪表学会实验室仪器学会

78.1131
9192533

振动测试技术及其应用

米惠民 杨崇学 编著

一九八七年六月

封面设计：赵炳盈

振动测试技术及其应用

编辑出版：中国仪器仪表学会实验室仪器学会

发 行：机械工业出版社

印 刷：湖南省洪江市美术印刷厂

定 价：每册 5.00 元

印 数：3000册

9102556

前 言

本书以十分通俗易懂的语言，阐述了振动的基本理论、振动传感器及其配套仪表的原理、特点及使用方法，内容包括测振、激振、现场动平衡、环境振动测试、振动分析和故障诊断等。书中介绍了国内外有关厂家的典型产品，把振动测量的有关知识归纳成30个问题作了简要解答，并编入了工程测试方面的几个实例，供读者选用、记忆和参考。

本书对从事振动试验研究的科技人员、厂矿企业的技术工人和大专院校的振动实验研究人员是一本实用性很强的工具书和参考书。

本书收集了清华大学徐占娣、黄世霖付教授和北京测振仪器厂薛桂荣工程师的文章并由他们审校出版。由于我们的水平所限，不妥之处欢迎读者批评指正。

编者

1987年6月

目 录

一、机械振动的基本描述	(1)
(一)振动的分类	(1)
(二)振动测量	(6)
二、振动传感器	(7)
三、磁电式速度传感器及其配套仪表	(8)
(一)原理	(8)
(二)磁电式传感器的分类	(9)
(三)磁电式传感器的特点及性能参数	(10)
(四)配套仪表	(10)
四、压电式传感器及其配套仪表	(12)
(一)原理	(12)
(二)结构及特点	(12)
(三)配套仪表	(15)
(四)压电式力传感器	(16)
(五)压电式传感器的安装	(16)
五、压阻式传感器及其配套仪表	(17)
(一)原理	(17)
(二)压阻式加速度传感器的结构特点	(18)
(三)压阻式传感器的配套	(19)
六、频率分析和滤波器	(19)
(一)频率分析	(19)
(二)滤波器	(22)
(三)模拟频谱分析仪	(25)
七、现场动平衡	(26)
(一)基本概念	(26)
(二)现场动平衡仪的简单原理	(26)
(三)现场动平衡	(27)
八、状态监测和机械故障诊断	(31)
(一)简易诊断	(31)
(二)精密诊断	(33)
九、公害振动及其测量	(35)
(一)振动对人体危害的研究	(35)

(二) 公害振动的评价	(37)
(三) 测量仪器	(37)
十、稳定正弦扫频激振及机械阻抗测量	(41)
(一) 关于机械阻抗的基本概念	(41)
(二) 测试原理	(43)
(三) 测量仪器的主要组成部分	(45)
(四) 主要技术指标	(45)
(五) 应用举例	(45)
十一、大型旋转机械的振动监视和保护	(47)
(一) 概述	(47)
(二) 对监视仪的要求和应具备的特点	(47)
(三) 电涡流监视仪	(48)
十二、传感器及其测试系统的校准(标定)	(50)
(一) 绝对校准法	(50)
(二) 比较校准法	(53)
(三) 冲击校准	(56)
十三、测振仪器的使用与维修	(58)
(一) 传感器使用注意事项	(58)
(二) 测振仪器的使用	(60)
(三) 测振仪器的修理	(61)
十四、振动测试及分析应用实例	(62)
(一) 用传递函数分析仪研究机床的动态特性	(62)
(二) 相关函数与谱分析在汽车试验中的应用	(93)
(三) IDB—1 型智能化动平衡仪在风机行业中的应用	(107)
(四) HZ—8500 轴运动监视仪对发电机组的振动监视	(111)
附录: 振动测量三十问	(114)

一、机械振动的基本描述

振动和冲击现象是自然界和工程中普遍存在的现象，几乎每一种机械和结构都离不开振动问题。随着生产和科学技术的不断发展，在有些场合，人们希望更多地利用振动；而在很多其他场合，人们又希望消除振动，因为机械振动会影响设备性能和寿命，造成环境噪声。不管是利用振动还是消除振动，首先都要对振动进行研究、测量和分析。

机械振动是指物体沿着直线或弧线在某个位置附近作往复运动，简称振动。内燃机活塞在汽缸内的往复运动和钟摆摆锤的摆动都是典型的振动模型。实际上，任何一个被撞击的物体、每一台开动的机床和每一座楼房等都在振动。可以说，人就是生活在振动之中。但是，我们所接触的各种振动，其形式是不同的。那么，如何来描述机械振动呢？

振动一般用位移、速度、加速度、频率和相位等参数来描述。

如图1-1，小球受外力作用从中心位置B被拉到位置A。外力去掉后，小球在弹簧弹力的作用下，从A→B→C→A作往复运动，

形成振动。假定没有阻尼，小球将不停地振动下去。在每一时刻，小球都有一个偏离中心位置的位移，都有一个瞬时速度和一个瞬时加速度，而且位移、速度和加速度都随时间作周期性的变化。用描点的方法，可以画出小球的位移随时间的变化曲线。从曲线上可以看出，每一时刻的位移值都是不一样的。在中心线上位移为零，在曲线顶点小球位移最大，称为位移峰值。同样，小球在偏离中心位置最远点（即位移峰值处）的瞬时速度为零，瞬时加速度值最大，即加速度到达峰值。小球运动到中心位置时（位移零值处），其速度达到最大值，即速度峰值，而其加速度值为零。用描点的方法，我们也可以作出速度时间曲线和加速度时间曲线。

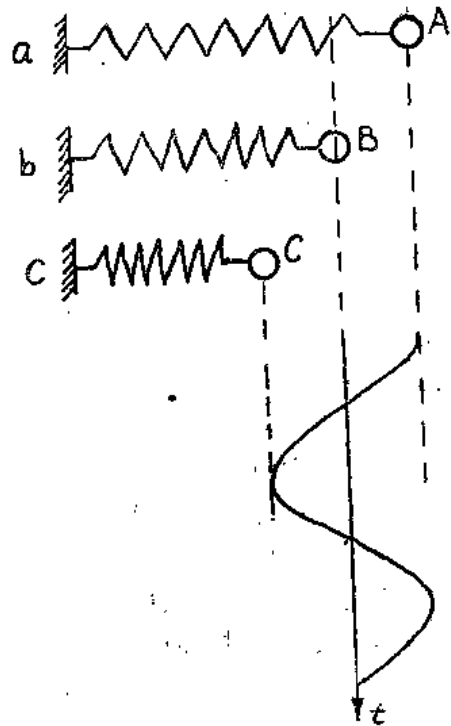


图1-1

（一）振动的分类

上述小球的振动只是振动的一个特例。一般来说，振动可分为简谐振动，周期振动、非

周期振动和随机振动等几种形式。

1. 简谐振动

简谐振动是一种最简单的振动。前面讲的小球振动在不考虑阻尼的情况下就是一个简谐振动。它的位移与时间的关系曲线是一条正弦曲线，即位移是时间的谐和函数。同样，它的速度和加速度也随时间按谐和函数变化。

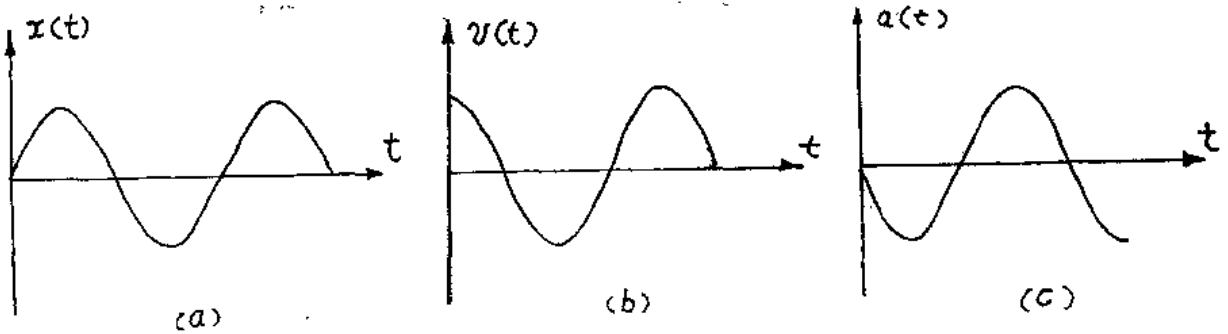


图 1-2

小球在任一时刻的位移为：

$$X(t) = X \sin \omega t = X \sin 2\pi f t = X \sin \frac{2\pi}{T} t$$

其中：X为位移峰值，T为振动周期，它表示小球从A→B→C→B→A，或从B→A→B→C→B即完成一次全振动所需要的时间。f称为频率，它表示小球在1秒钟时间里完成全振动的次数。显然，频率和周期成倒数关系，即 $f = \frac{1}{T}$ 。ω称为圆频率或角频率。ω和f的关系可以这样理解：一个小球在圆周上以角速度ω作圆周运动，它的投影对应一个频率为f的振动。小球的投影完成一次全振动就对应于圆周上小球转动一周，即转过 2π 弧度。所以振动频率与角频率的关系为 $\omega = 2\pi f$ 。ωt是到t时刻小球在圆周上转过的角度，称为振动的相角或相位。

在振动过程中任一时刻t，小球的瞬时速度v(t)等于位移对时间的微分，即 $v(t) = \frac{dx(t)}{dt}$ 。由此得到

$$v(t) = \frac{dx(t)}{dt} = \omega x \cos \omega t = \omega x \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) \text{ 或写成}$$

$$v(t) = V \cos \omega t = V \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

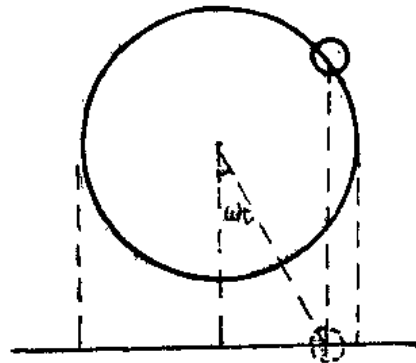


图 1-3

式中， $V = \omega X$ 称为速度峰值。和位移函数式比较可以看出，速度相位超前位移相位 $\frac{\pi}{2}$ 。它的物理含义是位移值最大时速度值为零，位移值为零时速度达到最大值。

在 t 时刻，小球的瞬时加速度值 $a(t)$ 等于速度对时间的微分，或位移对时间的两次微分，即

$$\begin{aligned} a(t) &= \frac{dv(t)}{dt} = \frac{d^2x(t)}{dt^2} \\ &= -\omega V \sin \omega t = -\omega^2 x \sin \omega t \end{aligned}$$

或写成

$$a(t) = -A \sin \omega t = A \sin(\omega t + \pi)$$

式中， $A = \omega V = \omega^2 x$ 称为加速度峰值。它的相位超前位移相位 π ，超前速度相位 $\frac{\pi}{2}$ 。它的物理意义是，加速度和位移总是同时达到零值和峰值，但它们的方向总是相反的。三条曲线的比较如图1-4所示。

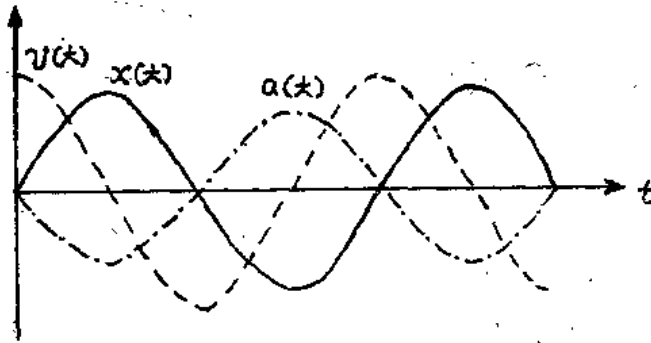


图1-4

简谐振动的位移、速度和加速度随时间的变化曲线均为正弦曲线或余弦曲线，所以，简振动也可称为正弦振动或余弦振动。测量简谐振动的位移、速度和加速度，主要就是测量这几个量的峰值和有效值。我们平时所说的振动的位移，速度和加速度的大小就是指这几个量的峰值或有效值。有效值又称均方根值(r.m.s)。

$$\begin{aligned} X_{\text{有效}} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \\ &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2 \sin^2 \omega t dt} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} X \end{aligned}$$

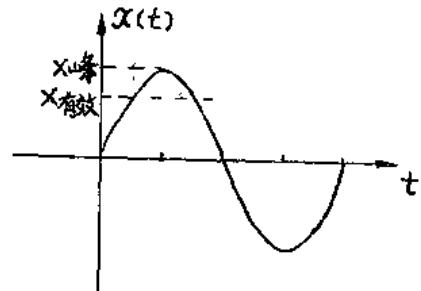
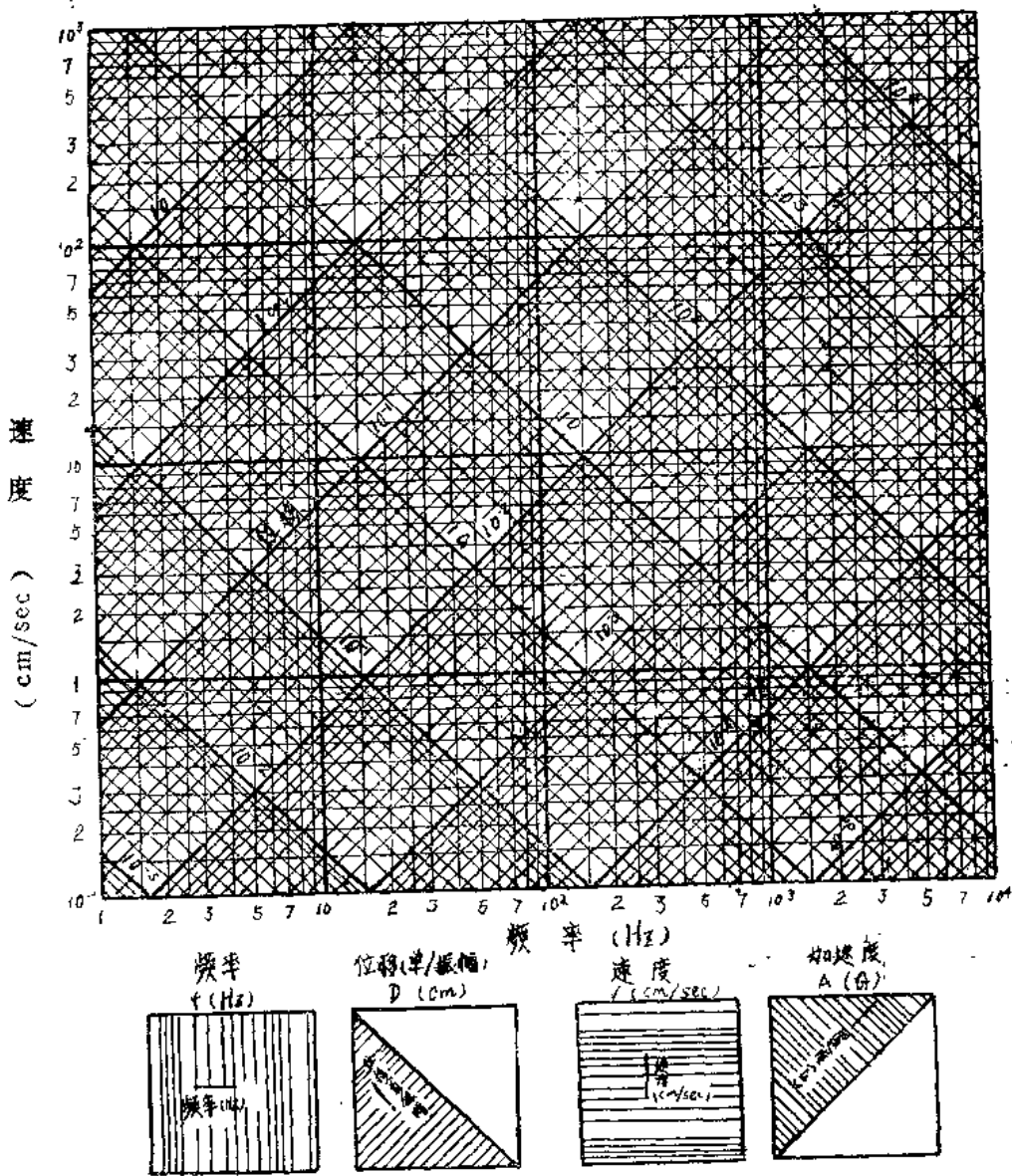


图1-5

由上式可以看出，简谐信号的有效值等于峰值的 $1/\sqrt{2}$ 倍。因此，在峰值和有效值两个量中只要测出其中一个量的大小即可换算出另一个量的大小。在位移、速度和加速度三个参数中，如果测出其中的一个参数，也可根据 $V = \omega x$ 、 $A = \omega v = \omega^2 x$ 在已知振动频率的情况下突出其它两个参数的大小。但需要强调的是，这里介绍的峰值和有效值的换算以及位移、速度和加速度的换算都只适用于简谐振动，非简谐振动是不能这样简单计算的。

为方便起见，我们印出频率、位移、速度和加速度的关系表，见表1—1。它的使用方法如下：在下方横坐标上找到振动频率，向上找到已知参数值，就可查出另外的参数值。例如，已知某简谐振动频率为100Hz，测出振动速度（峰值或有效值）为10cm/sec，在表下方找

表1—1 频率、位移（单/振幅）、速度和加速度的关系曲线



到 10^2Hz ，左侧找到 10cm/sec ，找到两者的交点，通过此交点的左上斜线为 $1.5 \times 10^{-2}\text{cm}$ ，这就是它的位移值，通过它的右上斜线约为 6.6G ，就是它的加速度值。这里应该注意的是，如果测得的量是峰值，查出的值也是峰值；如果测出的量是有效值，查出来的量也是有效值。

在这里，我们顺便给出振动测量中经常使用的单位及换算关系。

位移单位：毫米（mm），微米（ μm ）

$$1\text{米}(\text{m}) = 1000\text{毫米}(\text{mm})$$

$$1\text{毫米}(\text{mm}) = 1000\text{微米}(\mu\text{m})$$

速度单位：厘米/秒（ cm/s ）

加速度单位：米/秒²（ m/s^2 ）、g

$$1\text{g} = 9.8\text{m/s}^2 \approx 10\text{m/s}^2$$

一般说来，只有一些标准的振动体，为振动台和振动筛等，才能作简谐振动。

2. 周期振动

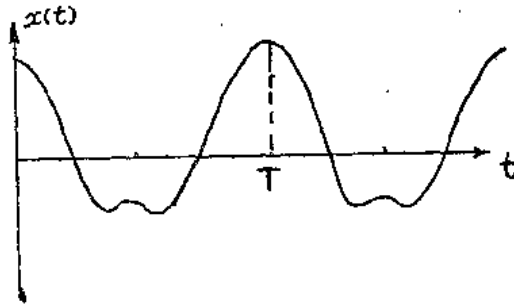


图1-6

图1-6表示某一柴油机曲轴的扭转振动曲线。它的特点是，振动波形每经过时间间隔 T 就重复一次。我们称这种振动为周期振动。前面所述的简谐振动也属于周期振动，而且是最简单的周期振动。

周期振动的一般函数式为：

$$X(t) = X(t + nT)$$

其中， T 为周期。一般的稳态振动，即宏观上不随时间变化的振动，如鼓风机在某一转速下的振动和楼房的自然振动等，都属于周期振动。

对周期振动而言，其振动加速度、速度和位移的峰值仍然是人们最关心的物理量。周期振动的正峰和负峰可能是不一样的，所以有时人们要测出正峰值，负峰值，最大峰值和峰峰值。这里应注意的是，峰值仅反映信号在某一瞬时的大小，不能反映振动的总体能量情况。如果想反映后者，就应该测量有效值。

除去幅值测量外，有时还需测量振动的主频率和其它频率成分。关于这一点，我们将在频率分析一节中介绍。

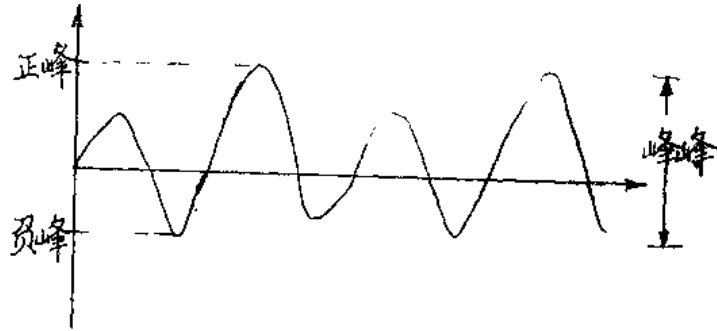


图1-7

3. 非周期振动

在非周期振动中，振动参数随时间变化的曲线是非周期性的。冲击振动信号或瞬态变化信号都属于非周期振动信号。非周期信号一般是测量其冲击振动的加速度峰值。

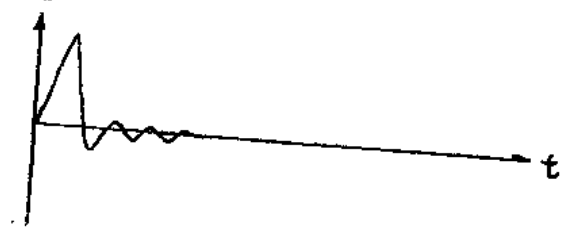


图1-8

4. 随机振动

随机振动指的是没有确定的周期、振动波形杂乱无章、任何一个时刻的瞬时值都不能预先确定的振动。这种振动的研究只能采用统计分析法。

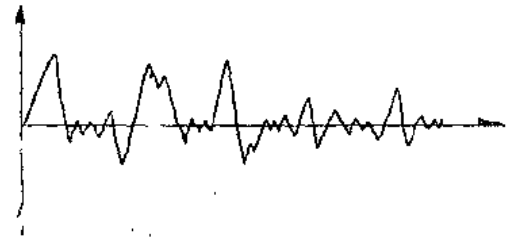


图1-9

(二) 振动测量

1 测量内容

振动测量主要是指如下5个方面。

- a. 测量稳态振动体的振动位移、速度和加速度的峰值、有效值及振动频率、频谱图等，
- b. 测量冲击振动的峰值，记录振动波形，
- c. 机械结构振动特性参数的试验研究，
- d. 旋转体动平衡测试，
- e. 测量振动对人体的影响程度。

2 测量系统的基本组成

测量系统主要是由传感器、放大器、滤波器、显示器和分析装置等部分组成。系统方框图如下：

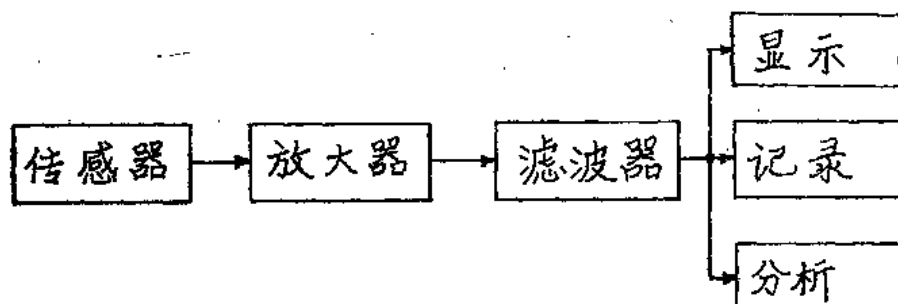


图1-10

一般我们把传感器称为一次仪表，传感器之后的仪器称为二次仪表。

二、振动传感器

机械振动量是非电量，测量时要把机械量转换成电量送至电子仪器中放大、显示和分析。能够把非电量信号转换成电量信号的装置称为传感器。具体地说，能够把机械振动信号转换成电信号的装置称为振动传感器。

振动传感器种类很多，它可按以下几种方法分类。

1. 按测量对象分类：如位移传感器、速度传感器、加速度传感器和力传感器等。

2. 按传感器结构原理分类：如磁电式传感器、压电式传感器、电涡流式传感器和压阻式传感器等。

也可把二者结合起来，构成一只传感器，如磁电式速度传感器、压电式加速度传感器和电涡流式位移传感器等。

传感器是整个测量系统的输入环节，它的性能和可靠性将直接影响整个测量装置系统。在当今分析仪器，特别是计算机高速发展的时期，人们对传感器的测量精度和测量范围等的要求越来越高。

传感器的主要技术指标如下：

1. 灵敏度 传感器的灵敏度是它的输出电信号（电压、电荷等）同输入振动信号（位移、速度、加速度）的比值。例如，某只传感器灵敏度为 100mV/cm/s （峰），表示当振动速度峰值为 1cm/s 时，传感器输出 100mV 电压信号。

测量弱振动时，传感器的灵敏度应高一些，因为灵敏度越高，可以测量的下限值越低。

2. 横向灵敏度 横向灵敏度是指传感器对横向振动与轴向振动的响应之比值。

$$S_{\text{横}} = \frac{\text{输出/单位横向振动}}{\text{输出/单位轴向振动}} \times 100\%$$

在振动测量中，传感器的横向灵敏度越小越好。

3. 测量范围 它表示输出信号与输入信号保持线性关系的输入信号幅度变化范围，即传感器可测量的最小振动与最大振动之间的范围。

传感器测量范围的大小受它的结构形状和材料性能等因素限制。传感器信号不能超过其测量范围，否则会造成传感器的损坏或造成很大的测量误差。测量微振时，要考虑传感器和二次仪表所组成的系统能分辨的最小输入信号值，使信号和噪声之比大于10。

4. 频率特性范围（频率响应范围） 在这个频率范围内，输入信号频率的变化不会使传感器的灵敏度超过它的误差范围。例如，某只压电传感器给出的灵敏度指标为 100pc/g ，规

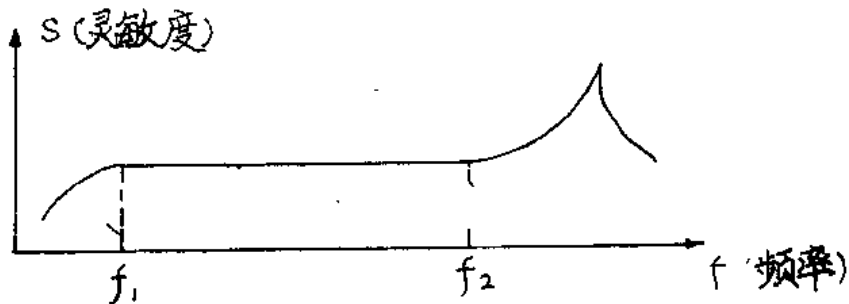


图 3-1

定误差为 $\pm 5\%$ ，那么，在 f_1 和 f_2 之间的任意频率点上，其灵敏度在 95pc/g 至 105pc/g 的范围内。在 f_1 和 f_2 之外的频率点上，灵敏度的误差值将超过 5% 。所以按照定义，该传感器的频响范围为 $f_1 \sim f_2$ (Hz)。从曲线上还可以看到 f_1 后面有一个峰，这是传感器的共振峰，其对应频率为传感器的共振频率 f_0 。一般选取 $f_2 = (\frac{1}{3} \sim \frac{1}{5})f_0$ 。

频率特性范围是一个很重要的技术指标。被测量信号频率超过传感器（或系统）的使用频率范围时，将产生很大的测量误差。

5. 温度范围 传感器一般是工作在常温条件下，即 $0^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$ 左右。如果温度超过这个范围就要参看给定的传感器工作范围。环境温度超过给定的温度范围就会引起传感器的损坏或造成较大的测量误差。

6. 重量 我们要求被测物体的重量大于传感器重量的10倍，否则由于附加了传感器的重量被测物体的振动状态将发生改变。

以上只列举了几个经常要考虑的技术指标。不同种类的传感器还会有一些特定的技术指标，在这就不一一叙述了。

三、磁电式速度传感器及其配套仪表

(一) 原理

磁电式传感器的工作原理是电磁感应。当传感器承受振动时，它的线圈在磁场中运动而

切割磁力线，产生感生电动势，形成电压输出。

$$e = BLV \times 10^{-3} \text{ (V)}$$

式中 B——磁感应强度（高斯）

L——线圈导线的有效长度（cm）

V——线圈切割磁力线的速度，即被测振动速度（cm/s）。

可见，当B和L确定后，传感器的输出电压正比于被测物体的速度。所以，这种类型的传感器称为磁电式速度传感器。

（二）磁电传感器的分类

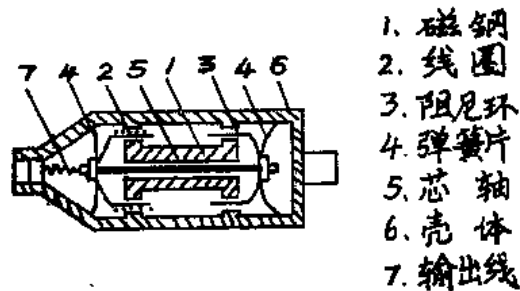


图 8-1 CD-1 型磁电式传感器

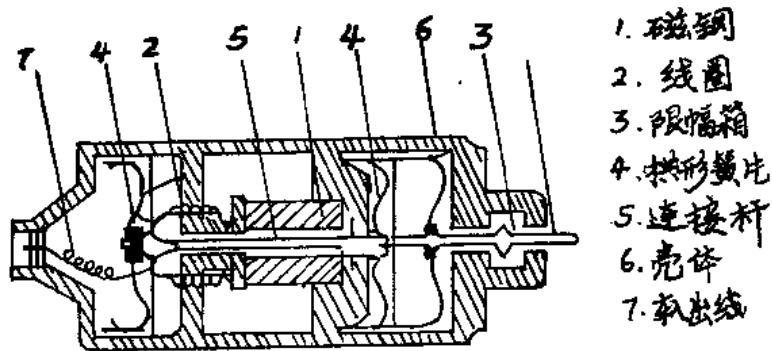


图 8-2 CD-2 型磁电式传感器

磁电式传感器分为绝对式，相对式和非接触式三种。

使用时，把绝对式传感器紧固在振动物体上或手持传感器与被测物体接触，即可测出物体的振动。

相对式传感器可用来测两个相对振动物体的振动，如车床架与工件之间、磨床砂轮架与工件之间的振动。使用时，传感器壳体固定在其中的一个物体上，顶杆和另一物体接触。如果把壳体固定在基础上，相对式传感器也可用来测量物体的绝对振动。

(三) 磁电式传感器的特点及性能参数

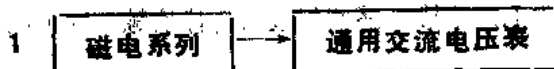
磁电式传感器灵敏度高，使用方便，适用于一般机械设备的振动测量，特别是振动量微小的高精度机械振动的测量，也可用作对相位误差要求较高的动平衡机或现场动平衡仪的迅号传感器。磁电式传感器输出阻抗低，直接输出电压量，无需转换就可直接连接电压表及一般二次仪表。

磁电传感器的缺点是体积较大，重量在100克至1500克的范围内，不适宜测量小设备的振动。它的频率范围窄，测量范围也比较小，所以它不适宜测量冲击，只适宜作一般稳态振动的测量。由于结构较复杂，磁电传感器受到强烈撞击容易损坏。

表3-1 国内外部分速度传感器性能

型 号	生 产 厂 家	灵敏度	频 响	重 量	备 注
		mv/cm/s	(Hz)	(kg)	
CD-1	北京测振仪器厂	600	10~500	0.7	绝对式
CD-2	"	300	2~500	0.8	相对式
CD-7	"	6000	0.5~20	1.5	低频测试
CD-21	"	>200	5~1000	0.39	振动监视、测量
SZQ-4	航空部六二五所	40~60	45~2000	0.23	
4-113	Bell & Howell(英)	40	50~500	0.062	
PR9266	Philips (荷兰)	300	10~1K	0.5	
MB-25	苏 联	80~100	20~500	0.4	

(四) 配套仪表



此种连接方式只能测量振动速度的大小。

$$V = \frac{E}{S_r}$$

式中 V ——振动速度 (cm/s, mm/s)

E ——电压表读数 (毫伏 mV)

S_r ——传感器灵敏度 (mV/cm/s 或 mV/mm/s)



CD系列磁电式传感器和GZ—1、2、4、5型测振仪是北京测振仪器厂生产的系统配套仪器。测振仪器内除一般放大电路和指示电路之外，还配有微分和积分电路。通过仪器的微积分转换，就可以把速度传感器输出的正比于振动速度的信号转换成正比于振动加速度和振动位移的电压信号，从而实现了对振动位移、速度和加速度三个参数的测量。

位移、速度和加速度之间的转换关系是：

加速度等于速度对时间的微分

$$a(t) = \frac{dv(t)}{dt}$$

位移等于速度对时间的积分

$$X(t) = \int v(t) dt$$

在测振仪中，可采用电路来实现上述微积分关系，简介如下。

(1) 微分电路

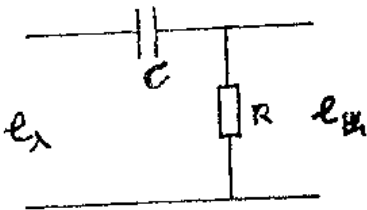


图 8-3

$$e_{出} = RC \frac{de_{\lambda}}{dt}$$

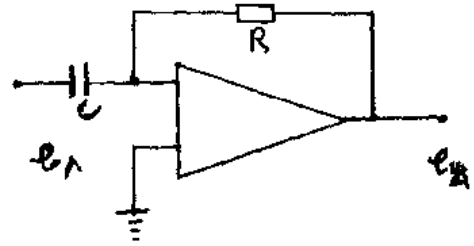


图 8-4

$$e_{出} = -RC \frac{de_{\lambda}}{dt}$$

(2) 积分电路

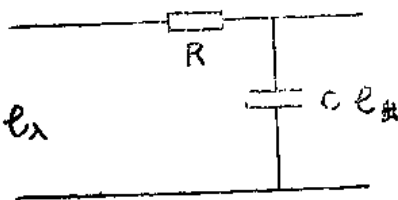


图 8-5 无源电路

$$e_{出} = \frac{1}{RC} \int e_{\lambda} dt$$

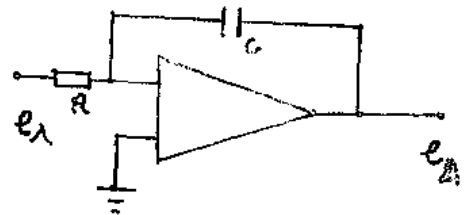


图 8-6 有源电路

$$e_{出} = -\frac{1}{RC} \int e_{\lambda} dt$$