

力学参考资料(九)

机械振动

科学技术文献出版社重庆分社



机 械 振 动
力学参考资料 (九)

中国科学技术情报研究所重庆分所 编辑
科学技术文献出版社重庆分社 出版

重庆市市中区胜利路91号

四川省新华书店重庆发行所 发行
重 庆 嘉 陵 印 制 厂 印刷

开本: 787×1092毫米1/16 印张: 6 $\frac{3}{4}$ 字数: 17万

1978年7月第一版 1978年7月第一次印刷

印数: 9900

书号: 15176·300 定价: 0.75元

目 录

机械阻抗数据的测量与应用.....	(1)
结构频率响应测量数据的分析方法.....	(45)
振动测量以及测量仪器的选定.....	(61)
快速谐波和变换及其在振动问题中的应用.....	(70)
随机振动的功率谱分析法.....	(80)
协方差矩阵与统计线性化.....	(89)
用粘弹性材料控制振动.....	(99)

机械阻抗数据的测量与应用

D J Ewins

第一部份 绪论与基本方法

1.1 绪论

振动本是非常实际的现象。关于振动的分析和理论尽管很多,但通常发现,实践中遇到的振动问题比理论所预见和阐述的振动问题要多得多。因此,振动特性的实验测量在几乎每项关于机械和结构振动的研究中都起着重大的作用。

振动测量有两种主要类型,即:

i 对处于正常运行或使用状况下的结构或部件所受到的振级进行测量;

ii 对特定结构或部件的振动特性进行测量。

第一类测量通常包括对正在工作的机器所受到的振级作出纪录或进行实时分析。例如,对运转中的涡轮叶片的振动进行测量,或者,对沿着崎岖轨道驱驶前进的车辆的结构振动进行测量便是。在这些情况下,受到测量的机器或部件可能同时受到几个激励源的影响,而这类试验所测得的结果只能是总响应;对于引起振动的各个激励力的性质或大小则不能提供任何情况。很清楚,它只能使我们得到一些关于受测试结构的振动特性的有限知识。

第二类测量则较为全面。它用一简单的、已知的激励力,以可控的方式,使受测结构振动。在这种试验中,输入和响应都可以量出来,从而可以把所进行研究的结构的全面振动特性确定下来。这类试验一般称为“阻抗试验”。本文论述的就是当今用来进行各种必要测量并将其结果用来解决实际振动问题的某

些技术。

进行任何一项实际测量前,必须完全搞清楚为什么要进行这些测量,数据需要具有什么形式;结果取得之后将要作何处理。这些问题的答案对于怎样进行测量常常影响很大。因此,在描述阻抗测量技术之前,列出进行阻抗试验的主要理由并对通用的参数和术语规定明确的含义,那是颇为恰当的。



在船体结构的标度模型上作机械阻抗测量。

现代阻抗测量技术的发展有很大一部份要归功于对船上机器隔音、隔振问题所作的研究。本图表示在机器四个安装点中的两点之间进行传递阻抗测量。

1.2 机械阻抗数据的概念

“阻抗数据”一词经常出现,我们将首先解释它是什么意思。大多数有关振动的问题可以说是稳态振动问题,并且在许多情况下,是周期性振动问题。基于这个理由,绝大多数用来解释和预测振动现象的分析方法都是以稳态假定和周期性假定为基础的。就是对于那些非周期性的振动,如冲击或随机振动等情

况,也可通过把周期振动的分析法加以引伸来
进行研究。

这一理论的基础在于列出周期激励(或
干扰)和由它引起的周期响应之间的比式。
一般说来,一个周期性的作用力,如方形波、锯
齿波等,会使一典型结构以与该力相同的基本
频率发生振动,但波形并不完全相同(即响应
不会是一个完全的方形波或锯齿波等)。因
此,力和响应之间的任何关系必然会是一个相
当复杂的关系。

然而,对于线性系统来说,则有一种特殊
情况:谐和激励能产生一个相似的谐和响应。
要把谐和力与谐和响应之间的关系完全表示
出来,只需两个参数就行了;这两个参数是:
两个谐和变量的振幅比以及这两个变量之间
的相角。因此,任何一个特定的结构,其动态特
性都可用这两个随着谐和振动频率而变化的
参数完全描述出来。由这两个参数表达的信息
通常叫做“机械阻抗数据”,或者,有时叫做
“频率响应数据”。实际上,有许多不同的用
来描述阻抗数据的各种特定形式的参数。这些
参数的含义将在下面予以规定。但是,要记住,
所有这些参数基本上都包含着相同的信息。

除了能简明地表示出谐和激励与谐和响
应之间的关系外,还有另外几个理由可以说明
阻抗数据是很有用的。从分析上来说,含有简
单三角项的方程较容易求解。从实验上来说,
产生谐和振动比较简单。对于前面提到的较复
杂的形式的周期振动,则可分解为若干个谐和
分量,而对每个分量又可分别进行分析。

1.3 为什么要测量机械阻抗数据?

测量机械阻抗数据的理由(其中有些是
阻抗数据为什么应该测量的理由)是很多的。
我们可把它分为四类:

- i. 识别固有频率和振型;
- ii. 测定特定的动态特性,如阻尼、刚度等;
- iii. 核对理论估算的阻抗数据,以便用来
检验某一分析方法是否正确;
- iv. 列出试件的数学模型,以便作进一步

的分析。

这四类分法大体上表明了机械阻抗试验
的历史。阻抗测量最先是作为测量固有频率的
一种手段而使用的,因为在测试精度不高时,
利用它也常可得出合理的估算值(虽然这并非
总是如此,下文我们就会看到)。后来,由于
传感器、各种仪器和技术有了改进,推断试件
的某些参数,如阻尼、动态刚度等,便有了实
际的可能,尽管这种推断的数据常常与估算值
并无多大的不同。近年来,测量技术的进一步
发展已使我们有可能得到更为准确的阻抗试
验数据,这样,这种数据现今便有效地用来与
理论上的估算进行比较,并有效地用于某些高
精度设计与分析方法中。

我们将在下一节讨论主要试验技术的某
些方面,但看来没有必要详细解释,为什么要
用试验来确定固有频率和振型,以至阻尼特
性。求出这些数据通常是用来核实估算值的,
而这些估算值对于防止发生谐振是必需的。为
避免发生谐振可用两种方法:(a)审慎选择激
励与固有频率;(b)审慎选择激励力与各潜藏
麻烦振型节之间的相对位置。当谐振完全不能
避免时,将会出现最大振级,为确定这些振级
则须求出阻尼值。

然而,较为深入地讨论一下上述三、四项
理由颇有必要,因为,那些必要的实验方法只
是近来才发展起来的,如何充分利用这些方法
还尚未为人们完全认识。为验证某一理论分
析。一般采用将实验测得的固有频率与估算
的固有频率进行比较的方法。而这种比较方法
必然导致为对实际阻抗数据进行比较。这就在理
论与实验之间提供了一种连续的比较(这点恰
与孤立频率相反),从而有可能较充分精确地
指明理论模型何时和因何原因不准确。对复杂
结构进行振动分析的困难之一,在于确定哪些
运动(或坐标)必须包括进去、哪些运动可以
省去不计。因此,测出适当的阻抗数据来与理
论估算值相比较,有助于解决这一困难。

今后阻抗数据主要可能应用的方面,我们
认为,存在于第IV类之中,即列出试件的数学

模型。这种模型可以用于各种各样的分析和设计过程。现将其中四种论述如后。

a. **对于由若干相连部件装配起来的结构，作关于其振动特性的估算。**采用导纳或阻抗的耦合法，便可将在各个部件（例如，涡轮叶片和与之相连的涡轮盘等）上测量的数据用来估算其总体（即整个叶盘）的振动。对于复杂结构，其之某些部件能依照理论分析来检验，而另外一些部件则不能。在这种情况下，上述技术就特别有用。它可以把理论数据和实验数据结合起来解决问题。例如，对于从公路与轮胎分界面发源的、经过动力运载结构、通过悬架装置与车身而进入乘客车厢的振动与噪音的传输情况，可能需要作出分析。这里，悬架装置可以直接进行分析，但轮胎和车身的振动特性就只能从实验中得到。而阻抗测量则提供了一种手段，使我们能以适合于分析整个系统的形式来描述这些不同部件的振动特性。

b. **估算各种不同激励的响应。**根据阻抗测量得出的关于某一结构的数学模型、可用来预测该结构对于各种不同的激励（如周期激励、瞬变激励或同时有几个输入的激励）有怎样的响应。同一数学模型还可以反过来使用，即通过测量使用中结构所承受的振动大小（见1.1），可推导出激励条件，从而推导出引起振动的实际作用力。

c. **可用来进行现场振动试验。**关于冲击与振动的耐久性试验结果，往往给人以错误的印象，原因是受测部件与结构（即运行时正常地安装着该部件的底座）之间的相互作用没有规定公差。“恒振幅”和“恒加速度”试验的条件是假定底座具有无穷大的刚度，而这往往是很不符合实际的。根据阻抗测量则可以把底座的特性模型化，然后把它结合到试验程序中去，这就可使假定的刚度与实际相符得多。

d. **预计修正方案的效果。**这种数学模型将来最有效的应用之一，恐怕就在于设计一项结构时用它来实现关于振动特性的最优化。原则上说，阻抗测量是在结构上进行的（这结构可能是汽车车身，而注重点则是发动机要安

装的位置），然后根据所测数据确定其振动状况。接着，便需要改变质量、刚度等等来对结构作出修正，以使其振动特性得到改进。但是，结构应该如何修改才能得到理想的改进，这点通常并不是那么易于知道的。因此，办法之一势必就是作些实际上的修改（如把加强刚性的支柱焊接到车身上去等等）并再进行试验。这一办法当然是很不够的。另一办法便是根据原先的阻抗测量数据得出一个该结构的适当的数学模型，然后用这个模型，通过计算，来研究多种可能的修改方案。这种技术尚处于初期阶段，但正在普遍发展中。

上述各项中的任何一项能否成功极大地取决于实验数据的准确性。一般说来，我们越向先进（和越具高精度）的应用前进，我们就越需要准确性高。因此必须重视实验技术。

1.4 阻抗数据的推导

用图1所示典型单自由度系统颇便于说明阻抗数据的理论推导方法，同时便于说明所用的各种形式的数学表达式。这是一个常常用来确定抗振底座动态特性的系统，其中受试验底座以（未知）刚度和阻尼（ K 和 C ）支撑着辅助质量（ m ）。

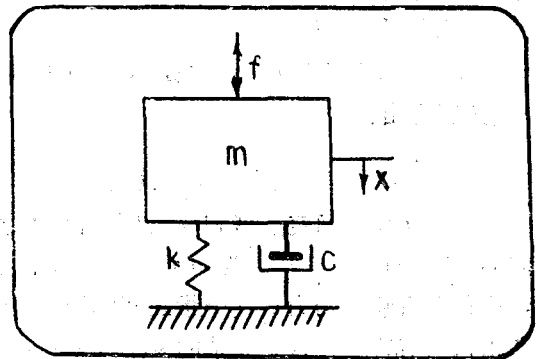


图1 典型单自由度振子

只需要有一个坐标（ x ）来描述这振子的运动； f 是作用于质量上的力。这系统的一般运动方程为：

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f \quad (1)$$

其中 $\dot{x} = \frac{dx}{dt}$, $\ddot{x} = \frac{d^2x}{dt^2}$

现在, 假定该作用力是幅值为 $|f|$ 、频率为 ω 的谐和力, 并相对于某一基准信号有相角 ϕ_f 。那么, 我们就可以利用复代数所提供的便利来用一个参数描述两个量, 记为:

$$f = \operatorname{Re}(f e^{i\omega t}) \text{ 或}$$

$$f = f e^{i\omega t} \quad (2)$$

其中, f 是一个复量, 既包括谐和力的振幅 ($|f|$), 又包括它的相位 ($\phi_f = \angle f$)。

因此,

$$f = (|f| e^{i\phi_f}) e^{i\omega t} = |f| e^{i(\omega t + \phi_f)} \quad (3)$$

现在, 假定该系统有与 f 同样频率 ω 的谐和位移响应, 其幅值为 $|x|$, 而 (相对于同一基准信号的) 相角为 ϕ_x 。那么, 我们可把这响应表示如下:

$$x = x e^{i\omega t} = |x| e^{i(\omega t + \phi_x)} \quad (4)$$

消去运动方程 (1) 中的 f 和 x , 得:

$$(-m\omega^2 + i\omega c + k)x e^{i\omega t} = f e^{i\omega t} \quad (5)$$

或

$$\frac{x}{f} = \alpha = \left(\frac{1}{k - \omega^2 m + i\omega c} \right) \quad (6)$$

[附注: 应当注意, 如分析的是迟滞 (或结构) 阻尼, 而不是粘性阻尼, 也会得到一个相似的式子。这时, 用一个复刚度项 k^* 就能容易地把刚性和阻尼都表示出来:

$$k^* = k(1 + i\eta)$$

其中, k 是静态刚度, η 是迟滞阻尼因子。这就得出:

$$\frac{x}{f} = \alpha = \frac{1}{(k - \omega^2 m + i k \eta)} \quad (6A)$$

复量 α 完全确定了谐和响应与谐和力之间的关系。通常把它称之为动柔度。在这个复量中包含有响应与力这两个量之间的振幅比和相角 (前曾称作这一关系的两个成分):

$$\alpha = \frac{x}{f} = \left(\frac{|x|}{|f|} \right) \frac{e^{i\phi_x}}{e^{i\phi_f}}$$

$$= \left(\frac{|x|}{|f|} \right) e^{i(\phi_x - \phi_f)} = |\alpha| e^{i\phi_\alpha}$$

所以, $|\alpha| = \frac{|x|}{|f|}$ (位移与力的振幅比) 及: $\phi_\alpha = \angle \alpha = (\phi_x - \phi_f)$ (位移与力之间的相角)。

1.5 阻抗数据的图示法

第二步我们考虑怎样才能以最好的方式把这种数据表示或展现出来。变量基本上有三个, 即: 模量 ($|\alpha|$), 相位 (ϕ_α) 和频率 (ω)。这就是说, 单独一个 $x-y$ 坐标图是不够的。广为使用的展示这些数据的形式有二:

(i) 一对曲线—模量与频率以及相位与频率的关系曲线; (ii) 单独一个模量—相位极坐标曲线。

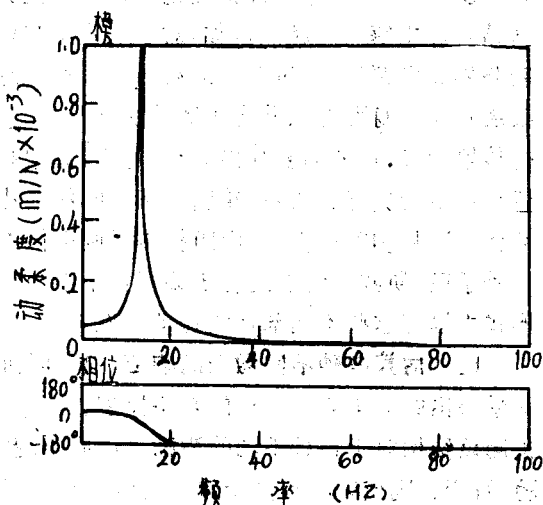


图2 单自由度系统动柔度

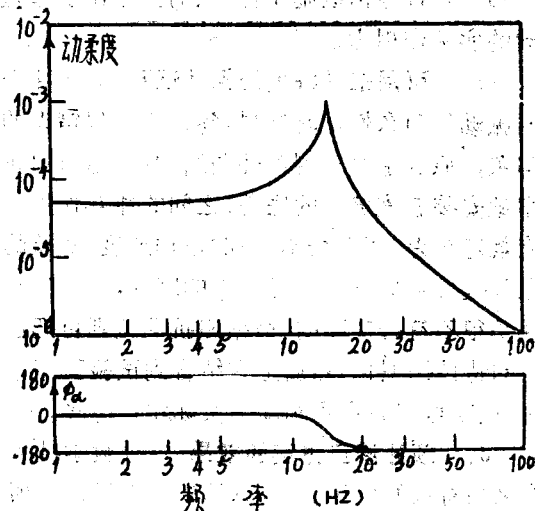


图3 单自由度系统动柔度的对数坐标图

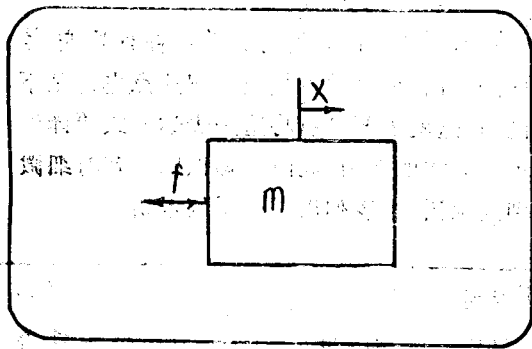


图4 单质量元件

如果我们用图示出上述单自由度系统在特殊情况 $m = 2.5\text{kg}$, $k = 2 \times 10^4 \text{N/m}$, $c = 11 \text{N} \cdot \text{s/m}$ 下的动柔度, (其中 kg —千克, N —牛顿, m —米, s —秒), 那末首先就得到图2所示的一对曲线。

如果我们在对数刻度图上标绘这对曲线 (特别是上面一条), 如图3所示, 那就方便得多。这样说, 理由很多。

第一个重要理由是: 大多数的振动响应参数具有很宽的数值范围, 为把图2(a)中的谐振峰值包括进去, 我们所用标度就不能同时把高频状态也描述出来。从图3(a)可以看出, 对数标度能使谐振峰值的尖锐性不显得那么突出, 同时却能把较高频段内低得多的响应振级清楚地描绘出来。

第二个重要理由是: 在图3(a)那样的坐标图上, 单个质量或单个弹簧的阻抗特性就可表示为直线。例如考虑图4所示单个质量 m 的动柔度。

$$\text{运动方程: } m\ddot{x} = f$$

如是谐和振动, 此方程就成为:

$$-\omega^2 m x = f$$

所以,

$$\alpha_m = \frac{x}{f} = \frac{-1}{\omega^2 m}$$

或

$$|\alpha_m| = \left(\frac{1}{\omega^2 m} \right), \quad \Phi_{\alpha_m} = 180^\circ$$

现在, 我们看出,

$$\log(|\alpha_m|) = -\log(m) - 2\log(\omega)$$

在以 $\log(|\alpha|)$ 和 $\log(\omega)$ 为坐标的图上, 上式显然是一条斜率为 -2 的直线。对于单个弹簧, 也可得到类似结果。于是, 可以把不变质量与不变刚度的直线在上述动柔度对数坐标图上, 重叠地画出来这时如图5所示。

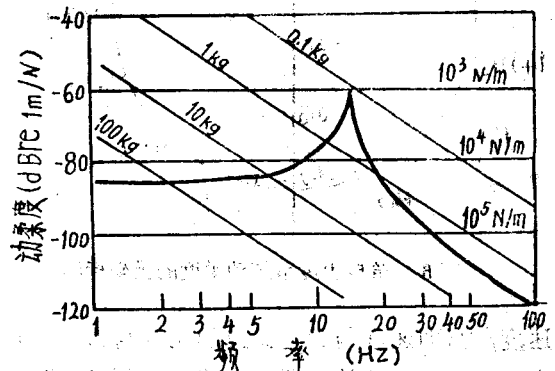


图5 单自由度系统动柔度对数曲线的注释图

从这坐标图看出: 在远离谐振的频率处, 动柔度曲线几乎是一条直线; 在低频处, 则相当于 $2 \times 10^4 (\text{N/m})$ 刚度直线; 在高频处, 则相当于 $2.5 (\text{kg})$ 的质量直线。至此, 这种坐标图——Bode坐标图——的优点就不言自明了。

这种标绘方式提供了一个完整地展示阻抗或动柔度曲线的最好手段。然而, 有时我们需要把注意力集中在紧邻谐振处的狭窄频带上。理由之一是: 在这个区间上阻尼效应最关重要、也最容易测量。这时, 则以使用第二种坐标图 (即 $|\alpha|$ 对 ϕ 的极坐标图) 为宜, 因为, 这样做可把曲线中远离谐振的部分省去, 从而显著地放大谐振峰值。前述单自由度系统在此情况下的这种极坐标曲线如图6所示。曲线上加有频率标记, 以便表明坐标图的主要部分如何集中在谐振附近的狭窄频带内。

1.6 阻抗数据的其他形式

到目前为止, 我们只讨论了现今通用的几种表述阻抗数据的参数之一: 动柔度 (α), 即位移响应与激励力之比, 在分析中用得普遍, 因为运动方程通常都是以位移形式列出并求解的。但我们同样可以用速度/力或加

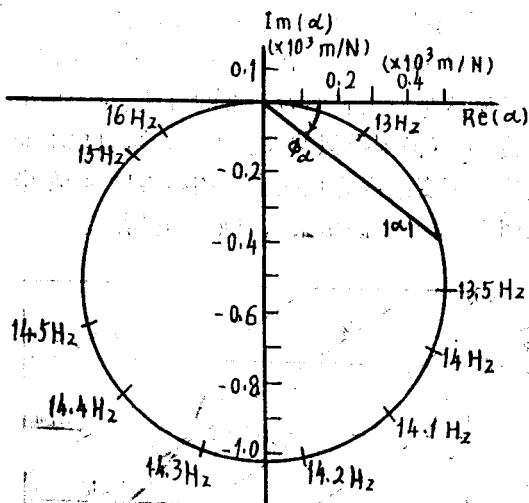


图6 单自由度系统动柔度的极坐标图

速度/力(即速度与力之比或加速度与力之比)来表达上面论及的各项响应特性,而且,这种可供选用的方式事实上常为人们所使用。

回到方程(1)至(6),我们可将速度记为 $v = \dot{x}$;对于谐和运动,可记 $v = i\omega x$

这样,我们便可定义另一谐和响应参数($\frac{v}{f}$)通常将它称之为导纳,记为:

$$M = \left(\frac{v}{f} \right) = \frac{i\omega x}{f} = i\omega \alpha$$

所以: $|M| = \omega |\alpha|$; $\Phi_m = \Phi_a + 90^\circ$

类似的论证可以导出第三个参数,即加速度与力之比或称惯性率(inertance)(In)。惯性率与前述动柔度的关系为:

$$|I_n| = \omega^2 |\alpha|; \Phi_{I_n} = \Phi_a + 180^\circ$$

除了这三个参数(都包含完全相同的信息),还有另外三个;有时我们发现,将这三个参数倒过来表示很有用处,这样所得的结果便是三个反参数,即:动刚度(K_D),机械阻抗(Z),和表观质量(AM)。它们与上述原来三个参数的关系为:

$$K_D = 1/q; |K_D| = 1/|\alpha|;$$

$$\Phi_{KD} = -\Phi_\alpha$$

$$Z = 1/M; |Z| = 1/\omega |\alpha|;$$

$$\Phi_Z = -\Phi_a - 90^\circ$$

$$AM = 1/I_n; |AM| = 1/\omega^2 |\alpha|;$$

$$\phi_{AM} = -\phi_a - 180^\circ$$

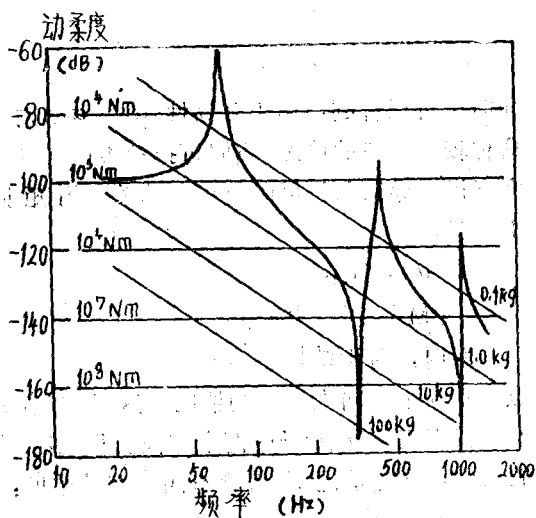
这六个不同的表达方式并不各有其总是相同的叫法,但都用得相当普遍这点也许是不幸的事,这就需要具有将这一表达方式“译”成另一方式的能力,同时能够识别一套有细微差别的术语。下表列出了通用的术语*1。

响应参数	位 移	速 度	加 速 度
响应/力	动柔度	导 纳	惯 性 率
力/响应	动刚度	机械阻抗	表观质量

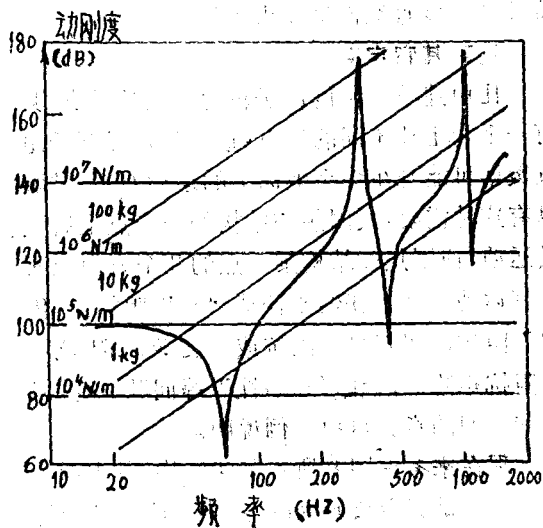
这三个基本的替换方式——动柔度、导纳和惯性率(以及它们的倒数)*2——虽然基本上都描述相同的特征,但每一种方式都各有其自己的用途,并在各自特定的情况下都是最适当的表达方式,一般说来,如上所述,动柔度(或刚度)便于用来进行分析。因为通常都是测量加速度和力,所以惯性率(或表观质量)最便于用来直接标绘实验结果。导纳(或阻抗)则介于二者之间,但它有两个属性使它最适合于一般的用途。它的这两个属性是:一、其质量与刚度直线的斜率分别为-1和+1;二、大多数梁状和板状结构往往表现出这样的特征,即:在很宽的频率范围内有一大体平直的导纳线(并从而给出一条大体上是下降的动柔度曲线和一条大体上是上升的惯性率曲线)。图7所示的一组图表能最好地说明这一点。该组图形表示的是在一悬臂梁末端测得的阻抗数据(简单的梁状结构是提高测量技术的最好试件,因为对于它可以很快得到“正确的”答案。)所有六种标绘图都列了出来(尽管它们都是根据一组测量数据绘制出来的),而且,在每一图上,悬臂梁的静刚度可根据其低频

*1 原文中,表的上一行术语皆为一个英文为单词,而下一行术语则皆为两个英文单词构成,因此参数与反参数很易于区别开。

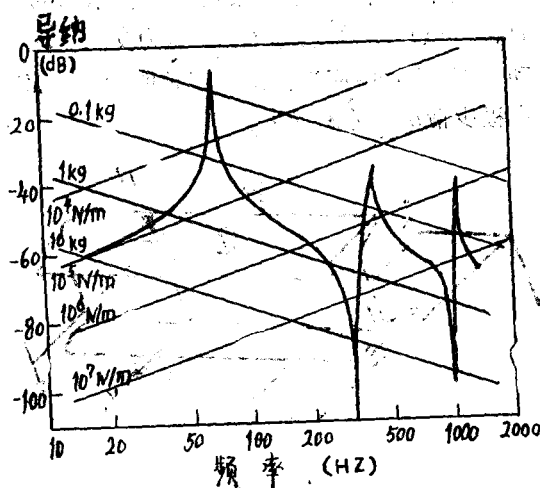
*2 叫法不统一,如前三个又分别称之为位移导纳,速度导纳,加速度导纳,后三个称为位移阻抗,速度阻抗,加速度阻抗。也有称表观质量为动质量,视在质量,惯性率为动反质量等等。



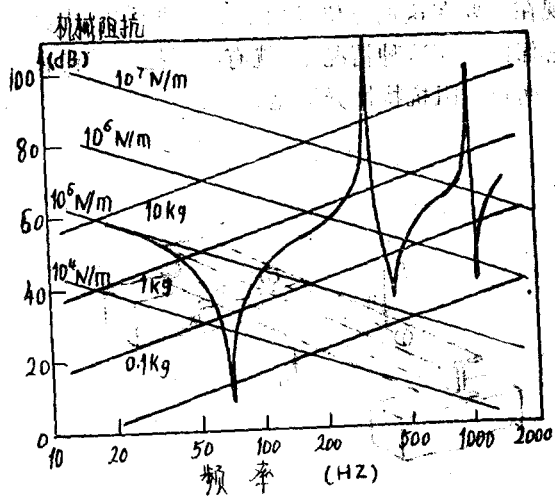
(a) 动柔度



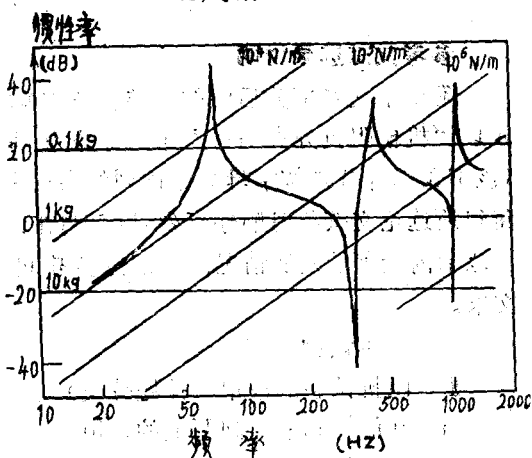
(b) 动刚度



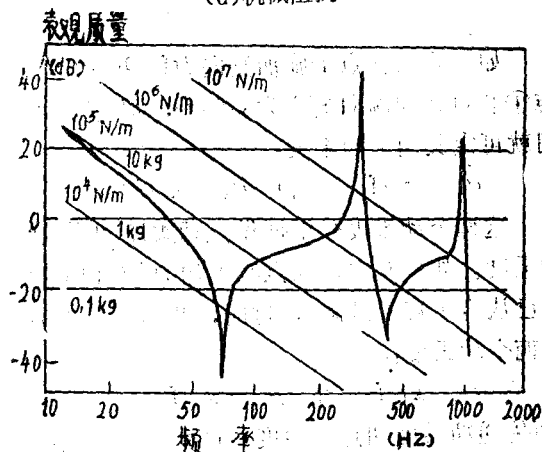
(c) 导纳



(d) 机械阻抗



(e) 惯性率



(f) 表观质量

图7 悬臂梁端阻抗数据各种可供选用的形式

特性和刚度直线而推断出来。

1.7 其它定义

比前述单自由度例子较为复杂的系统只有一个与上述不同的特点,这便是:需要的阻抗数据可能与在多个坐标上的运动有关。其所以有这种需要,或因想在结构的几个点上研究其运动,或因想在结构某一点的几个方向上研究其运动。现在我们来谈谈“点”阻抗或“传递”阻抗,“直接”阻抗或“交叉”阻抗,“阻抗矩阵”,和“互易性”等问题。这些术语和它们的意义可由下例说明。

现在来考虑图8所示梁状结构,其中两个点①和②是我们研究的。此梁可能是某一较大结构的一部分(例如某一运载工具的主体)。现在需要在这两点位置加上某根或某几根其它部件。在这种情况下,就有必要把这结构在这两点的阻抗特性弄清楚。

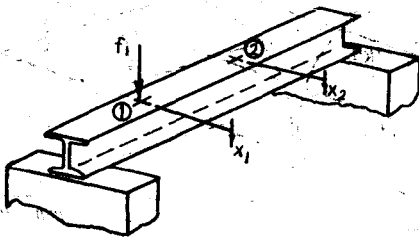


图8 点动柔度和传递动柔度的基本单元

如果我们在点①施加侧向力 f_1 ,并确定在点①和点②的侧向响应为 x_1 和 x_2 ,那末,我们就可定义两个动柔度:

$$\alpha_{11} = x_1 / f_1 \quad \text{和} \quad \alpha_{21} = x_2 / f_1$$

这两个动柔度分别叫做点动柔度和传递动柔度。如果我们再在点②施加力 f_2 (此时激励已从点①移了过来),这时,我们就得到另外两个动柔度:

$$\alpha_{12} = x_1 / f_2 \quad \text{和} \quad \alpha_{22} = x_2 / f_2$$

(即传递动柔度和点动柔度),这样,就研究两点而言,我们可用一个动柔度矩阵来对这个系统作出完整的描述,

$$[\alpha] = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{bmatrix}$$

同时,可以看到:由于互易性, $\alpha_{12} = \alpha_{21}$ 。对于这种较为一般的情况,我们可把动柔度与动刚度(机械导纳与机械阻抗等)的关系用矩阵来表示:

$$[\alpha] = [K_D]^{-1}$$

$$[M] = [Z]^{-1} \text{等等。}$$

有时,对于结构运动的研究只限于一个点,在几个方向上运动的情况。这时,在点①处,我们就可能在 x 与 y 两个方向上得到有关的响应。在此情况下,就会有四个点动柔度:

$$\alpha_{xx}, \alpha_{xy}, \alpha_{yx}, \alpha_{yy}$$

为了把它们区别开来,我们称 α_{xx} 与 α_{yy} 为直接(点)动柔度,称 α_{xy} 和 α_{yx} 为交叉(点)动柔度。不过,应当指出,这种明确的定义只在极少情况下才有必要。

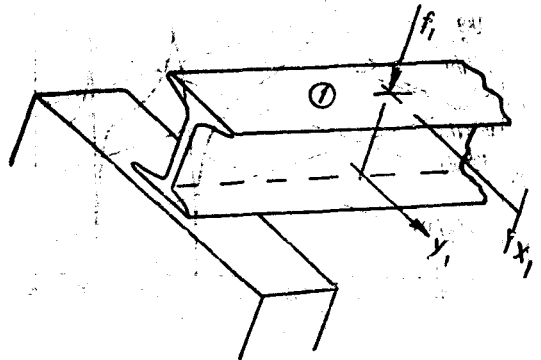


图9 直接和交叉动柔度

参考文献选录说明

附于本文各部分后面的分类参考文献选录以“机械阻抗分类书目”第一部分为基础(该书第二部分是按字母顺序排列的书目表)。每组所选论文按年月顺序排列,以表明在该题目范围内论著的发展情况。本部份参考可见文末。

I 基本读物

II 阻抗试验的应用(按题分类)

i 在航空和航天问题上的应用

ii 在船用问题上的应用

iii 在汽车问题上的应用

iv 在机床问题上的应用

v 在隔振问题上的应用

vi 在振动与环境试验上的应用

vii 动态特性测量

viii 在生物力学上的应用

ix 梁、板与标度模型

第二部分 测量技术

A 设备要求

2.1 基本测量方法

通过试验来测量机械阻抗数据的方法有好几种。最直截了当的办法，是在受试验的结构（试件）上施加一个正弦变化的力，并测量其相似的正弦响应，然后，在一定的频率范围内重复使用这一基本方法，以得出完整的阻抗曲线。近来还出现了一些采用非周期性激励的其他可供选择的方法——例如，冲击激励、短暂时变激励、或随机激励波群等等——这些方法，在试验振动的持续时间必须受到限制的情况下，是很有用的。例如，可以用来使造成损坏的危险性减少到最低限度。然而，用这些方法时，一般都需要使用复杂的检测仪表，以及（或者）还需要数字计算才能够求得所需的阻抗数据，尤其不利的是，对于进行阻抗测量时的各项条件，这些方法都不能〔象正弦激励一样〕提供同等程度的控制。

鉴于这些可供选用的方法具有一定的专业性，本文只对基本的正弦激励作详细的论述。而这些可供选用的测量方法的细节可在所列文献Ⅱ的有关参考资料上找到。然而，本篇往后关于换能器的论述以及第三篇关于测量数据的解释，其中许多对于各种类型的阻抗试验都是适用的。

图2.1展示了标准阻抗测量系统的基本组件。其中正弦波振荡器以所需频率和振级，通过功率放大器，向激励器（或激励器），供给指令信号。这就产生了一个具有指令频率的机

械力，该力通过测力传感器（即测力计）而作用于受试验结构上，再采用适当的传感器（现今几乎总是用压电式加速度计），就可检测出结构的响应。所有的传感器信号经过放大而馈送到分析器；该分析器先把测量系统中各级产生的任何杂波与谐波滤掉，然后便相应于指令信号的振幅与相位测出每一〔传感器〕信号的振幅与相位。根据各个参数的这些测量结果，通过电子式数据处理或直接计算，便可得出所需的各个比。最后，尽管并非必不可少，为慎重起见，还要用示波器来监视测量中的全部信号，以便识别可能发生的任何疑难情况，如与馈线拾波相重合的情况或阻抗数据中可能不易立即被发现的断续电子误差等。

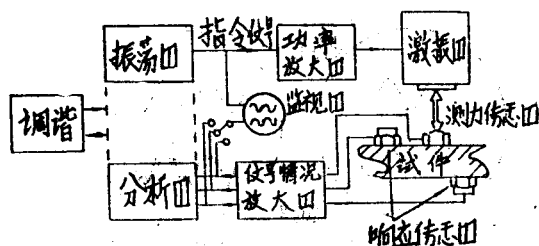


图2.1 标准的阻抗测量系统

现在，我们将较为详细地叙述这一测量系统中的主要器件，即振荡器与分析器，激励器与功率放大器，以及压电传感器。

2.2 振荡器与分析器

振荡器。作为指令信号源，振荡器在决定测量质量方面显然起着重要的作用。振荡器输出信号的频率要极其稳定，这一点恐怕是它

最重要的条件。这一条件之所以必要，理由是：输出振级的微小变化虽然只会引起响应的类似的微小变化，但在谐振附近测量时，频率变化(即使是非常微小的频率变化，)却能使响应振级产生很大的起伏。

输出还必须是一个保持规定频率的纯正弦波，因为，由于受试验结构和测量系统各部件的频率响应特性的影响，整个谐波(同样，那怕是很小的分量)都会给响应造成非常不纯的信号。

信号频率的绝对值也是很重要的，特别是需要重复测量，或是需要仔细比较两次类似的测量结果时，更是如此。不过，进行此种比较时应该记住：工程结构的固有频率可能随周围的温度与其他的环境条件而变化，温度每变化 1°C 造成频率有 1.07% 的变化，这是不足为奇的。因此，只有适当考虑了振荡器的准确度和受试验结构的响应特性在频率刻度上可能造成的差异时，才能对谐振频率附近的两条阻抗曲线进行细致的比较。

振荡器的另一重要特征涉及它(缓慢地但连续地)扫描或(离散)步进通过一特定频率范围的能力。对于这一点将在2.9节作详细讨论。

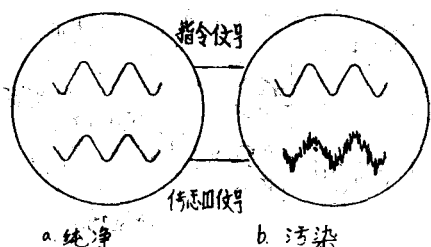


图2.2 典型传感器信号(a)纯净信号(b)污染信号

分析器。在测量过程中，分析器在测量系统的另一端起着与振荡器同等重要的作用。它的功能是，根据每一输入的传感器信号来选取具有指令频率的信号分量的大小与相位。因此，为了确保频率实现同步，把分析器与振荡器紧密相连这一点很重要；如果所用振荡器属于扫描式，这点尤其重要。因此，进行这

种测量时，以使用振荡器与分析器合在一起的组件为好；现今可以买到的这种组件有好几种，用其中之一即可。用来复盖一给定频率范围的“连续扫描”和“离散步进”法之间有一基本的区别。连续扫描时，所有传感器的波道是同时被测量的，因此，有多少传感器就需要多少个分析器波道。然而，如在离散频率处进行测量，就有可能只用一个单独的分析器相继测量任何数目的信号。从分析器性能的角度来看，上述每一方法的优缺点一方面取决于所用各个同牌号分析器的特性是否一致，另一方面取决于有没有可能使稳定振动和稳态振动保持足够长的时间，以便一次一个地测量若干个信号。

前面提到过，到达分析器的传感器信号可能不是纯正弦波。发生这种情况的原因是，测量系统每一级都会发生一定程度的信号失真或劣化现象。此外，杂乱噪声也会逐渐积累起来。受试验结构本身还会从下列两个方面加剧这些影响：第一，在某些频率处，结构由于自身特有的响应特性，它对指令频率的谐波所作的响应比对其基本频率本身所作的响应要灵敏得多。第二，又在某些频率处，有些信号有一种变得很小的倾向，例如，谐振附近的激励力，反谐振附近的响应等，就会小得使真正的信号淹没在背景噪声之中，为了准确测出谐振尖峰的锐度(这点确实值得特别注意)，就必须使“真正”的正弦波分量能从传感器信号中还原出来。图2.2表示了几个典型的信号，图2.3表示了两次测量反谐振波谷的详情，其中(a)表示分析器未作充分的滤波，(b)表示分析器作了充分的滤波。

2.3 激振器与功率放大器

适于用来进行阻抗测量的激振器或摇动器有两种类型，即电磁式和电液式；其操作方法从其名称便可看出。一般说来，激振器以及与之相连的放大器是一并供应的，对于测量方法来说，他们的性能不如其它几项测量器具的性能那样重要。其基本的要求是，它们工作特性必须包括所要求的频段，以及有足够

宽的力和位移范围。

电磁式激振器可给出一定范围大小的力，并且一直到相当高的频率上都可使用。然而，它们体积大，不轻便，并有一个频率下限，低于那个界限，它们就不起作用。电液式激振器也能给出一定范围大小的激振力，并有体积相当小和达到零值频率的优点（即既可施加动态力，也可施加静态力）。电液式激振器的缺点是有一个频率上限和一个最低位移，低于这个位移就会发生内摩擦的问题。与同等的电磁组件比较起来，这种激振器也较贵、较复杂。

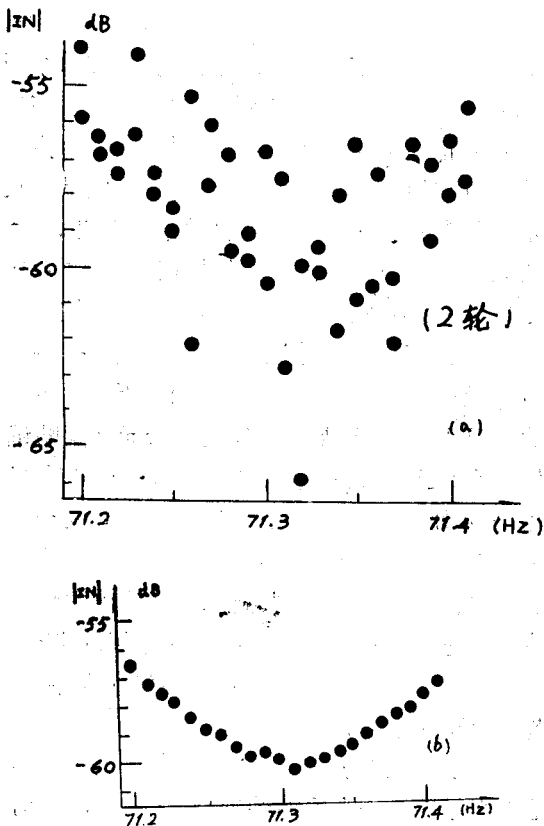


图2.3 分析器滤波对所测曲线的影响
(a) 未充分滤波 (b) 充分滤波

2.4 压电传感器

压电式传感器是在阻抗测量中用来测量有关数据的最普及而又广为使用的仪器。只有在特殊情况下，才用其它型式的传感器。因此，我们关于传感器的论述将只限于这些压电式

装置。

有三种压电式传感器可用来进行阻抗测量，即测力计、加速度计和阻抗器（阻抗器实际上是一组件，它是由对力和加速度敏感的元素组成的）。它们的工作原理以下列事实为基础，即：一个压电材料（天然晶体或合成晶体）的元素，受到机械应力时，就在它的两端产生电荷。采用适当的设计，可将这一晶体并到一个特定装置中去，而该装置就产生一个与所要测的物理量（即力或加速度）成比例的应力。

测力计。 测力计是最简单型式的压电传感器。传送过来的力 F （见图2.4），或此力的已知部分，横向直接作用于晶体，晶体即产生一个与力 F 或比例的相应电荷 q 。这种敏感晶体通常成对使用；两块晶体的负极面附着于测力计的盒子上，正极面则在接合处互相结合。这种排列使得测力计盒子的两端无须实行电绝缘。此种测力计的一个重要特点，就是晶体与盒体的轴向有较大刚度，经过晶体传来的力 F 的部分直接取决于这一刚度比。此外，还可能发生不希望有的横向灵敏性（这是指当 F 为 0 但却存在例如横向或切力载荷时所产生的电荷输出）。这种灵敏性也是受盒体影响的结果。

晶体电荷输出所表示的力，与激振器所施加的力、同样与传递到结构（试件）的力，总有微小的差别。这是因为有小量的材料存在于晶体与结构（试件）之间，晶体检测的力有一部分要用来推移此项材料。这一效应的影响在后面关于质量的省略一节（2.7节）中讨论。在这里只须说明一下：每一测力计，一端的质量会比另一端小，其较轻的一端应是接至受试验的结构上。

加速度计。 在加速度计中，传感作用是间接的，且是用一个辅助或感震质量（见图2.5(a)）来完成的。在这种构形中，施加在晶体上的力是感震质量的惯性力（即 $m\ddot{z}$ ）。因此，只要基座与感震质量一同移动（即 z 与 x 完全相等），传感器的输出就会与传感器基座

的加速度($\propto$)成比例,于是也就与装有此传感器的结构的加速度成比例。对这一装置的简单动力学模型进行的分析表明,从零直到接近传感器第一次谐振频率的一个很宽的频率范围内,比值 x/z 实际上为一。在第一谐振频率的百分之二十处其差(或比值 x/z 的误差)为百分之四;在此谐振频率的百分之三十三处此差则升至百分之十二。因此,要确定加速度计的工作范围,就得把它的最低谐振频率弄清楚。然而,这一特性在某种程度上取决于受试验结构(加速度计固定在它上面)的特征,同时,也着实取决于夹具本身。加速度计制造厂商供给的资料中,通常都有一个“安装谐振频率”值,这个值就是加速度计基座固定在刚性底座时晶体上面的感震质量的固有频率。在上述简单的动力学模型中,这一频率是用 $\sqrt{k/m}$ 来给出的。这个值视为上限(因而不是一个保守的界限),因为,在大多数实际应用中,加速度计基座都是固连在非完全刚性的物体上,这样,传感器也就具有比标用为低的谐振频率。任何时候,试件上加速度计的安装应尽可能稳固牢靠,制造厂商就此所提出的建议应予遵守。

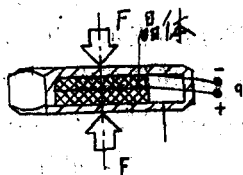


图2.4 典型测力计的构造

和测力传感器一样,加速度计也有横向灵敏性的问题,这可起因于晶体几何形状的某些缺陷,也可起因于通过计盒的相互作用,现今加速度计的各种设计,目的在于把这些影响减至最低限度。有一种加速度计的构造在实现这一目的方面显得较好,那便是剪切式加速度计,见图2.6示意图。

加速度计的选择。加速度计的灵敏度,低的低到 $1\mu\text{c/g}$,高的高到 $10,000\mu\text{c/g}$ 。实际

进行特定的测量时,我们应怎样选择最合适一种呢?一般说来,灵敏度越高越好,但必须注意:灵敏度越高,传感器就越重、越大(因而,也就越会干扰试件(结构));尤其重要的是,传感器的谐振频率就越低(从而,传感器的最高工作频率也就越低)。这几方面的考虑,加上特定环境条件的具体要求,往往使我们只能在一个小的选择范围内挑选其中的某一个。进行准确测量时,特别是在(易于在几个方向同时振动的)复杂结构上进行准确测量时,更只能选用横向灵敏度低(低于1—2%)的传感器。

阻抗器。现已发现,将测力计元件和加速度测量元件结合在一个箱体内,组成一个阻抗器,对于某些应用来说,颇为方便。使用这种装置的主要理由是,它有利于在一个点上测得力和加速度这两个参数。这一特定试验技术所包含的意义,后面将要讨论,这里,我们只准备谈谈阻抗器的性能特征。图2.7示出了典型(尽管不能说是独一无二的)阻抗器的结构。两个元件最好都尽可能紧贴试件——测力计元件紧贴试件,目的在于使“晶体下面的”质量尽可能减少;加速度计元件紧贴试件,则在于确保底座具有尽可能高的刚度。显然,图示阻抗器的设计必定是这两者之间的一种折衷方案,因此,对这种阻抗器的规格我们必须仔细查阅。此外,还应该把测力计元件与加速度测量元件之间的横向连接的程度确定下来。因为,这在某些频率和(或)阻抗范围上可能引起误差。

调节放大器。压电传感器的优点之一,是它本身就是一个有源装置,它无须供给动力就能发生作用。然而,这却意味着,它不能测量真正的静量,因此,它有一个频率下限;低于这个下限,测量就不切合实际。这一下限不仅由传感器本身的性能来决定,并且,通常也由放大器的性能来决定,而这种放大器是不可少的,因为它能把晶体所产生的极小电荷升高至足以分析器可测得的强信号。

有两种放大器——电压放大器和电荷放

大器——可以起这种作用。这两种放大器，不论那一种，都必须有一个很高的输入阻抗，这是它们不可缺少的特性。关于这两种放大器的详细比较，可在制造厂商所提供的资料中找到。

然而，可在此将它们的主要特点概括一下：与电荷放大器相比，电压放大器在电子方面可以更为简单，其信噪比特性也较佳。但它不能在同电荷放大器一样的低频率范围内使用；同时，其总放大系数，即灵敏度，要受传感器电缆的长度与特性的影响，而电荷放大器的总放大系数则实际上与电缆无关。

辅助放大器。除了上述不可缺少的调节放大器以外，有时使用辅助放大器才便于求加速度信号的积分（从而得到速度信号，或者，经过两次积分之后，得到位移信号）。如果需要的话，还可用类似的放大器来求若干个信号的和、差或平均值。

B 测量技术

现在，我们将讨论测量技术的若干个方面，目的在于确保上述设备能得到最佳的使用。讨论中，我们自始至终最关心的是准确度，因为，低劣的技术非常容易引起大的误差；其次我们考虑的便是试验的效率和经济性。

2.5 测试系统的定标

使用传感器，目的在于使我们能够测得试验所要求的某些物理参数。分析器实际上测量的是电压，因此，每一波道都需要有一个校准因子才能给出它的总灵敏度，例如，每单位加速度 $\times \times \times$ 伏，或每单位力 $\times \times \times$ 伏。这一总灵敏度事实上是几个个别的灵敏度——传感器、电缆、放大器等等的灵敏度——复合起来的结果。要想求得一个适当的值，试验人员面临着要在两个方法中进行选择。第一方法是，采用制造厂商给每一器件所标明的灵敏度或增益，然后根据这些标用值算出总灵敏度。第二方法是，依次直接测出每个部件的灵敏度，或者，一次直接测出整个波道的灵敏度。当测量的准确度关系重大时，以用第

二方法较为慎重；且不论是哪种情况，都应经常采用第二种方法进行测量标定，因为，灵敏度和增益是会随时间或环境条件而变化的。然而，这一方法可能很难进行得令人满意，因为它总需要某种其它手段来对我们所关心的物理量（即加速度与力）进行一次再测量。这类的测量方法尽管很多，但对当前的应用来说都显得不太实用。

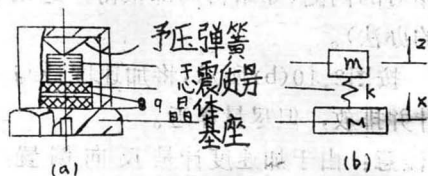


图2.5 典型压缩式加速度计

(a) 构造； (b) 动态模型

所幸的是，有一种较简单的技术能使我们方便地解决这一问题。在阻抗试验中，我们经常关心的是两个量的比——例如，加速度与力之比——而对于任何个别参数的绝对值则远不是如此关心。这样，我们只要把两个波道的灵敏度的比率标定出来就够了。这就产生了一个标定因子，其形式为： $\times \times \times$ 伏/伏/每单位（例如说）加速度/力。这一方法需要单独测量加速度/力这个量，这个量（就此例而言），由于是 $1/\text{质量}$ ，故便于用其它手段来予以确定。这样，测出其重量为已知的刚性质量的阻抗或惯性就是一个同时标定响应波道与激励力波道的相当好的方法。图2.8示出了进行此项定标的典型装置，试验所得的某些相应结果由图2.9示出。关于这一试验，我们可以得出这样的结论：测力计（包括电缆与放大器在内）与加速度计（包括电缆与放大器在内）的总灵敏度为 0.804 （伏/伏）/每单位 $(m/s^2/N)$ 。

2.6 点与传递阻抗测量

测量不是点阻抗测量（即在同一点作激励与响应测量），就是传递阻抗测量（即在结构上的不同点作激励与响应测量）。两者之中，以点阻抗测量较为普遍，但此项测量有时会出现

值得在此一提的试验技术问题。要测出真正的点阻抗，测力传感器与加速度传感器就得放在结构的同一点上，这是很显然的；而同样显然的是，这一点可能很难做到。可能采用的办法有三，即：

- i 使用阻抗器（详见2.4节）；
- ii 按图2.10(a)所示，将测力传感器与加速度传感器放在一条直线上对准，但却位于结构相对的两侧（如结构局部很薄，这是唯一可行的办法）。

iii 按图2.10(b)所示，将加速度计与测力计并排放，但尽量靠近。

（注意：由于加速度计是反向倒置的，在(ii)、(iii)两项办法测出的加速度之间会有180°的相位差。）

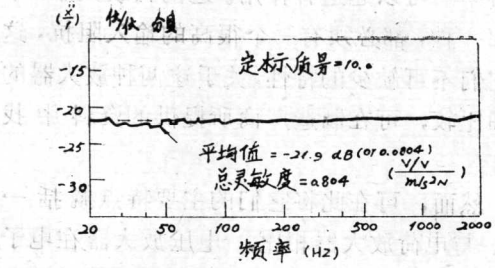


图2.9 典型质量定标结果

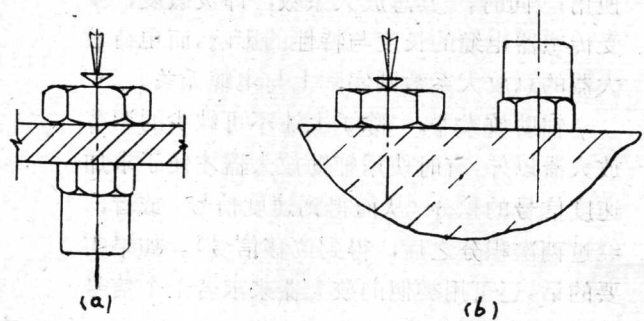


图2.10 点阻抗测量时加速度计的定位
(a) 直线对准定位； (b) 并列定位

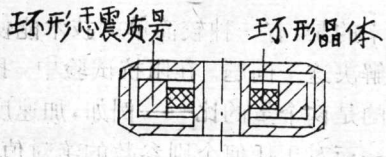


图2.6 典型剪式加速度计

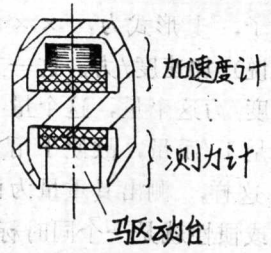


图2.7 质量标定装置

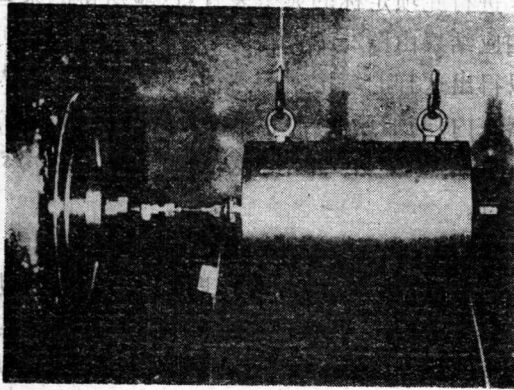


图2.8 典型阻抗器的构造

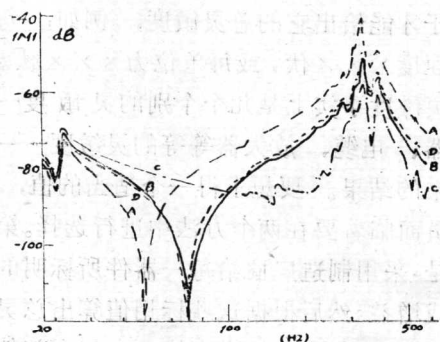
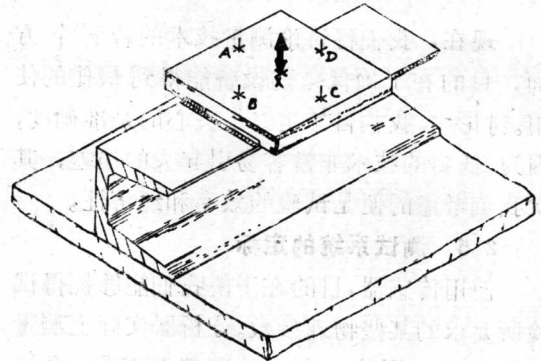


图2.11 求准确点阻抗测量的疑难情况
(a) 传感器的安装位置； (b) 测得的结果