

振动计测技术

薛新法 编

(上)

北京市技术监督局

一九九〇年十月

振动计测技术

目 录

前言.....	1~2
第一章 振动基本知识.....	3~31
1.1 概述.....	3~6
1.2 简谐振动.....	6~14
1.3 简谐振动的合成.....	14~18
1.4 单自由度有阻尼自由振动.....	19~21
1.5 单自由度有阻尼强迫振动.....	21~24
1.6 随机振动.....	24~29
1.7 振动计测中的计量单位.....	29~31
第二章 振动测量.....	32~63
2.1 振动测量的意义.....	32~34
2.2 振动计测的任务.....	34~36
2.3 振动频率的测量和频谱.....	36~44
2.4 振幅的测量.....	44~54
2.5 振动速度和振动加速度的测量.....	55~56
2.6 随机振动的测量.....	57~63
第三章 振动测量仪器.....	64~140
3.1 振动测量系统.....	64~64
3.2 振动传感器的分类.....	64~65
3.3 振幅(位移)传感器.....	65~73
3.4 振动速度传感器.....	73~79

3.5	振动加速度传感器.....	79~99
3.6	测振放大器.....	99~140
第四章	测振仪器的检测.....	141~190
4.1	测振仪器的检测方法.....	141~143
4.2	振动检定系统(表).....	143~144
4.3	振动测量仪检测的主要内容.....	144~148
4.4	振动传感器的检测.....	148~173
4.5	电荷放大器的检测.....	173~175
4.6	测振仪的系统检测.....	179~182
4.7	测振仪器的选择和使用.....	182~190
第五章	振动试验和试验设备.....	191~239
5.1	可靠性和环境试验.....	191~202
5.2	振动试验设备分类.....	203~204
5.3	机械式振动试验台.....	205~219
5.4	电动式振动试验台系统.....	219~235
5.5	电液式振动试验台系统.....	235~237
5.6	其他类型振动试验台.....	237~239
第六章	振动试验台(系统)的检测.....	240~263
6.1	振动试验台的技术指标.....	240~242
6.2	振动台的检测.....	242~263
第七章	振动试验夹具.....	264~271
7.1	振动试验夹具的作用.....	264~266
7.2	夹具的种类和结构.....	266~270
7.3	夹具的选择和使用.....	270~271

附录一	振动频率、振幅、振动加速度换算表.....	272~291
附录二	部分国产机械振动台	
	型号及主要技术指标.....	292~293
	部分国产电动式振动台	
	系统型号及主要技术指标.....	294~295
	部分国产电动激振器型	
	号及主要技术指标.....	296
	部分国产电液振动台型	
	号及主要技术指标.....	297
	部分国外电动振动台型	
	号及主要技术指标.....	298~313
附录三	机械式振动试验台试行.....	314~328
	检定规程 (JJG189 - 87)	
附录四	电动式振动试验台系统.....	329~347
	试行检定规程 (JJG190 - 87)	
附录五	随机振动试验系统试行.....	348~366
	检定规程 (JJG529 - 88)	

前 言

振动计量测试在科研、设计和生产等部门已日益显得其重要性。由于空间技术、微电子技术和宇航工业的迅速发展，对产品质量的要求越来越高，对其进行性能试验也越来越严。为了保证产品质量的可靠性和良好的技术性能，振动试验和测量已成为工程技术领域里普遍需要认真研究 and 解决的重要课题。由于电子计算机的广泛应用，使振动测量和分析技术不断发展，这样使我们有可能解决远比以往更为复杂得多的实际振动问题。如今振动理论和对振动进行测量分析已成为工程技术人员正确进行产品和结构的动力特性设计不可缺少的基础知识。

要研究结构和设备的振动问题，除了进行理论分析计算外，还要作必要的测量分析和试验，例如测量环境振动和结构在一定振动环境环境下的响应；试验结构的抗震强度和经受振动环境作用下是否产生工作性能故障或失灵等，这些都离不开对振动的测试分析技术和试验控制技术。

振动参数的测试在现代科学技术中的作用逐渐被人们所重视，根据振动试验和测量的需要，测振仪器和试验设备也迅速地发展起来。这些仪器和设备种类繁多，国内外制造的都有。为了保证这些仪器和设备的技术性能，量值的统一，宣贯《机械式振动试验台》(JJG189-87)和《电动式振动试验台系统》(JJG190-87)两个国家计量检定规程，搞好振动计量检测，从而编写了本讲义，目的在于总结交流振动计量经验，提高振动计量检测技术水平。在编写本讲义过程中，得到了北京市计量科学研究所力学室振动组同

志们的协助，在此表示感谢。由于水平有限，编写中难免有不当之处，敬请批评指正。

第一章 振动基本概念

1.1 概 述

这里所讨论的振动,是指的机械振动,即机械系统中运动量的振荡现象。所谓振荡,就是指相对给定的参考系,一个随时间变化的量值与其平均值相比,时大时小交替变化的现象。机械振动是一种特殊形式的运动,它通常由于机械转动部分的不平衡质量所引起,是机械结构内产生的振荡过程。在日常生活和生产实践中,都普遍可以看到或感觉到振动运动的存在,如行驶中的各种车辆;航行中的舰艇、船舶;飞行中的卫星、炮弹;高速运转的发电机;运转中的金属切削机床以及刮风时的高大建筑等等都存在着不同程度的振动,只不过有的较明显,用肉眼就能观察得到或用手摸得出来,而有的只能用仪器测量出来。这种振动运动虽然也被人们用来制成混凝土振捣器、打桩机和振动筛等,但在大多数情况下它都是有害的,如影响机械加工的精度、增加机械零件的磨损和降低使用寿命、影响生产效率的提高、危及设备和人身安全,以及给精密测试带来误差等等。因此测量和分析研究产生振动的原因,研究隔振措施和设计隔振设备,定期对测振仪器进行计量检测,保证其量值的统一等,对保证人们的身体健康,搞好工农业生产,加强国防建设和科学研究,促进国民经济的发展,实现四个现代化,有着重要意义。

振动运动可以分为各种不同的类型,从振动波形来看,它可以分为周期振动和非周期振动两大类。每经相同的时间间隔,其运动量值能重复出现的振动叫做周期振动,如图1-1。周期振动中,又可以分为定周期振动和不定周期振动两种形式。周期确定的振动

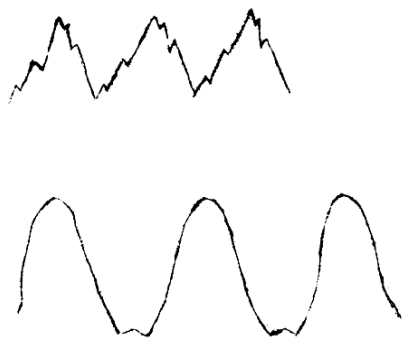


图 1-1 周期振动波形

为定周期振动，周期不确定的振动叫不定周期振动。周期振动中的一种特殊形式叫简谐振动或谐和振动，也叫正弦振动，其特点是它的瞬时量值随时间按正弦函数变化，如图 1-2。在振动测量中，大多数振动测量仪器都是用来测量正弦振动的，如果不是正弦振动，

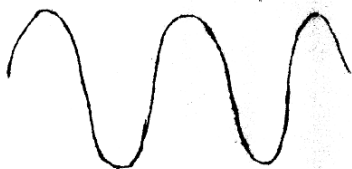


图 1-2 简谐振动波形

通常采用滤波后进行测量或进行频谱分析。计量部门检定校验测振

仪器时也是建立在对正弦振动测量的基础之上的。另一类振动是非周期性的，即不是周期性的振动，其波形随时间的变化显示不出一定的规律性。非周期性振动中有一种振动波形杂乱，对未来任何一个给定时刻，其瞬时值不能预先确定的振动，叫做随机振动，如图 1-3。



图 1-3 随机振动波形

实际的振动波形中，纯正弦振动是很少遇见的，大多数振动都是周期振动或随机振动。

从振动产生的原因来看，振动可以分为自由振动和强迫振动（也叫受迫振动）两种。自由振动就是被激励的振动系统，当被除激励后所产生的振动，如车辆过桥后，使桥梁产生的振动。由于振动过程中一般都存在着阻尼，因此这种振动是逐渐衰减的。强迫振动就是振动系统受外部周期性激励所产生的振动，如各种旋转机械所产生的振动，即电机、发动机的振动，各种车床的振动等。

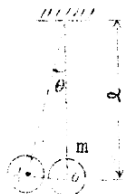
从振动过程持续时间的长短看，振动可以分为瞬态振动和稳态振动两种，瞬态振动是不稳定的、非随机的短暂性振动，也就是在某一瞬间出现的非随机性的振动，其特点是能量释放的过程持续时间短，而且往往是突然发生，如打枪时枪身所受到的振动。稳态振动就是持续的周期振动，日常生活中大量遇到的是这种振动，如车辆行驶过程中的振动，各种旋转机械的振动等。另外，振动还可以

分为线性振动和非线性振动；直线振动、扭转振动和弯曲振动等。

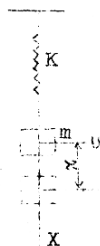
1.2 简谐振动

振动物体的位移随时间按正弦或余弦规律变化的运动称为简谐振动或正弦振动，它是振动中的一种特殊形式。例如单摆和弹簧悬挂重物（质量——弹簧系统，也叫 $m-k$ 系统）的振动，如图

1-4。用手将质量块 m 推或拉至某一位置，然后放手，则质量块



(a) 单摆振动系统



(b) 弹簧——质量振动系统

图 1-4 简谐振动

m 将在其平衡位置的两侧做往复运动，对弹簧——质量振动系统，其运动方程为：

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + Kx(t) = 0 \quad (1-1)$$

式中第一项为惯性力，第二项为弹性恢复力。

设 $\omega^2 = \frac{K}{m}$ ，则上式可改写为

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \omega^2 x(t) = 0 \quad (1-2)$$

此方程的解为

$$x(t) = x_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (1-3)$$

运动规律为正弦波形，如图 1-5。

式中：

x_m —— 物体振动时最大位移值，也叫位移幅值或振幅 A ，单位为 cm 、 mm 或 μm ， $A = x_m$ ；

φ —— 初始相位角。相位角是指相对于某一参考值，所测得的正弦量超前或滞后的角度，单位为 rad 。

ω —— 振动角频率，单位时间内转过的角度， $\omega = 2\pi f$ ，它的单位为 rad/s 。

f —— 振动频率，单位时间内振动的次数，单位为 Hz ， $f = 1/T$ 。

T —— 振动周期，振动一次所需要的时间， $T = 1/f$ ，单位为 s 。

式 (1-3) 中，当 $\varphi = 0$ 时，该式可改写为

$$x(t) = A \sin \omega t \quad (1-4)$$

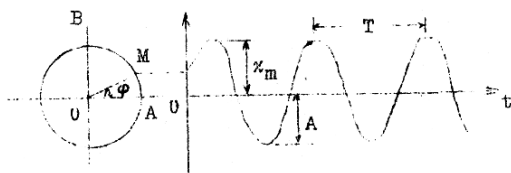


图 1-5 简谐振动波形

根据位移和速度、加速度的关系，便可得到简谐振动的速度和

加速度的表达式

$$U(t) = \frac{dx}{dt} = \omega A \cos \omega t = \omega A \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \quad (1-5)$$

$$a(t) = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 A \sin \omega t = \omega^2 A \sin(\omega t + \pi) \quad (1-6)$$

如果只考虑幅值大小，而不考虑相位，则

$$A = X_m \quad (1-7)$$

$$v = A\omega = 2\pi f A \quad (1-8)$$

$$a = A\omega^2 = (2\pi f)^2 A \quad (1-9)$$

式(1-8)和(1-9)中有A、f、v、a四个未知数中，如果能知道其中任意两个的大小，就能很快确定另外两个未知数的大小，因此，这两个公式是开展振动计量的基础。

从式(1-4)、(1-5)、(1-6)可以看出，简谐振动的位移、速度和加速度具有相同的正弦波形和周期(频率)，但它们的相位和幅值不同，然而相互间有着固定的关系。相位上，速度超前位移 $\pi/2$ ，加速度超前速度 $\pi/2$ ，或超前位移 π ，即为反相，如图1-6。它们在幅值大小关系上，如式(1-8)、(1-9)。

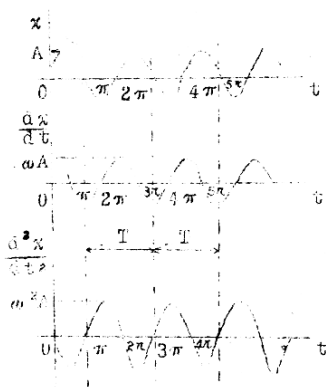


图 1 - 6 振动位移、速度和加速度之间的相位关系

由于定义的不同，振幅可以分别用峰-峰值 (A_{p-p})、峰值 (A_p)、有效值也叫均方根值 (ARMS) 及平均值 (A_{cp}) 来表示，如图 1-7 所示。

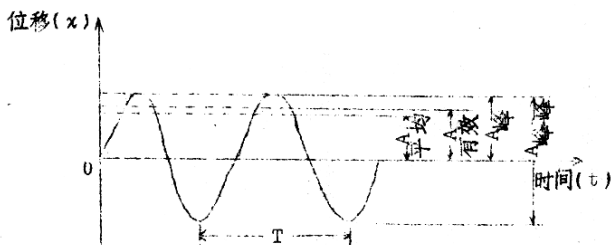


图 1 - 7 正弦波形振幅的峰-峰值、峰值、有效值和平均值

$$X_{\text{峰}} = X_m = A_p$$

$$(1-10)$$

位移是指振动物体在振动过程中相对于某一参考位置的变化量，振动位移的最大值就是振幅。从波形的基线到波峰的距离为振幅峰值（ $A_{\text{峰}}$ ）。从正峰到负峰之间的距离叫做振幅峰-峰值（ $A_{\text{峰-峰}}$ ）。因为峰值只能描述振动量的瞬时值，不反映产生振动的过程，故采取有效值（或均方根值， A_{RMS} ）来表示振幅，它描述了产生振动的过程，并与振动能量直接有关，所以使用价值大，特别是对随机振动的研究意义更大。有效值的定义如下：

$$X_{\text{有效}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T X^2(t) dt} \quad (1-11)$$

如果把式（1-3）和（1-10）代入式（1-11）

则：

$$X_{\text{有效}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T X_m^2 \sin^2\left(\frac{2\pi}{T}t\right) dt}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2}} X_{\text{峰}}$$

$$\text{即 } A_{\text{有效}} = \frac{\sqrt{2}}{2} A_{\text{峰}}$$

有时振幅也用平均值（ A_{CP} ）来表示，其定义为：

$$X_{\text{平均}} = \frac{1}{T} \int_0^T |X(t)| dt \quad (1-12)$$

如果把式（1-3）和（1-10）代入式（1-12）

则：

$$\begin{aligned}
 X_{\text{平均}} &= \frac{1}{T} \int_0^T \left| X_m \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right) \right| dt \\
 &= \frac{2}{\pi} X_{\text{峰}}
 \end{aligned}$$

$$\text{即 } A_{\text{平均}} = \frac{2}{\pi} A_{\text{峰}} \quad (1-13)$$

振幅平均值 (A_{cp}) 也就是振幅平均绝对值, 通常使用价值较小。习惯上把振幅有效值和振幅平均值之比叫做波形因数 (F_f), 把振幅峰值和振幅有效值之比叫做波峰因数 (F_c)。

$$\text{即: } F_f = \frac{A_{RMS}}{A_{cp}}$$

$$F_c = \frac{A_p}{A_{RMS}}$$

对正弦振动,

$$F_f = \frac{A_{RMS}}{A_{cp}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1.11 \approx 1 \text{ 分贝}$$

$$F_c = \frac{A_p}{A_{RMS}} = \sqrt{2} = 1.414 \approx 3 \text{ 分贝}$$

对于正弦振动, 振幅峰值、有效值和平均值之间的关系, 见表 (1-1)。

表 1-1

项 比 值	峰 值 (P)	有效值 (RMS)	平均值 (CP)
峰 值 (P)	1	$\sqrt{2}$	$\frac{\pi}{2}$
有效值 (RMS)	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	1	$\frac{\pi}{2\sqrt{2}}$
平均值 (CP)	$\frac{2}{\pi}$	$\frac{2\sqrt{2}}{\pi}$	1

振动速度 (V) :

物体振动的速度,是指单位时间内的位移变化率,即位移对时间的一次导数,常用字符 V 表示。其单位为厘米/秒 (cm / s) 或毫米/秒 (mm / s)。

根据振动速度的定义,

$$\begin{aligned}
 V &= \frac{dX}{dt} = \omega X_m \cos(\omega t) \\
 &= V_m \cos(\omega t) \\
 &= V_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})
 \end{aligned}$$

即 $V_m = \omega X_m = 2\pi f X_m$

也就是

$$V = 2\pi f A$$

式中:

f — 振动频率

A —— 振幅;

V —— 振动速度。

振动加速度 (a) :

单位时间内振动速度的变化率, 即位移对时间的二次导数称为振动加速度, 常以字符 a 表示, 单位为米/秒² (m/s²) 或厘米/秒² (cm/s²)。

根据振动加速度的定义:

$$\begin{aligned} a &= \frac{dV}{dt} = \frac{d^2 X}{dt^2} = -\omega^2 X_m \sin(\omega t) \\ &= -a_m \sin(\omega t) \\ &= a_m \sin(\omega t + \pi) \end{aligned}$$

即

$$a_m = \omega^2 X_m = (2\pi f)^2 X_m$$

也就是

$$a = (2\pi f)^2 A$$

式中:

f —— 振动频率;

A —— 振幅;

a —— 振动加速度。

前面已讲过, 正弦振动的位移、速度和加速度的振动波形是一样的, 周期也完全相同, 差别是幅值和相位角不同。它们的幅值 X_m 、 V_m 、和 a_m 表征着振动量的大小, 并且 $\frac{V_m}{X_m} = \omega$, $\frac{a_m}{V_m} = \omega$, 或 $\frac{a_m}{X_m} = \omega^2$ 。振动速度和振动加速度同样都可以用峰值 (V_p 和 a_p)、