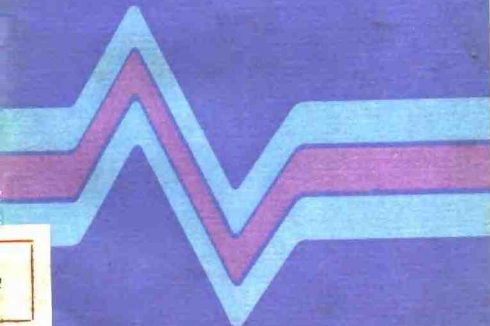


# 冲击振动 计量与测试

袁海德 编著



湖北科学技术出版社

## 冲击振动计量与测试

袁海德 编著

湖北科学技术出版社出版 新华书店湖北发行所发行

湖北省新华印刷厂印刷

787×1032毫米 22开本 30印张 235,900字

1985年12月第1版 1985年12月第1次印刷

印数：1—0,620

统一书号：15304·102 定价：1.85元

---

## 内 容 简 介

本书是在《冲击振动测试(仪器,仪表)》讲义的基础上,补充修改而成的。

全书共分四章,简要介绍从事冲击振动计量与测试技术所必须建立的基本概念。重点叙述二次仪表(系列电荷放大器、电阻应变仪)、三次仪表(磁带记录器)的工作原理、测试方法及仪器维修;还叙述了在整个计量、测试系统、传感器、二次仪表、三次仪表配套工作时,它们之间参数的合理选择和使用。

本书可供从事冲击振动计量与测试工作的工程技术人员,高等、中等院校有关专业师生以及从事研制、生产这类仪器的技术人员参考使用。

## 前 言

本书原稿《冲击振动测试(仪器, 仪表)》, 编者曾在国家计量局举办的“全国冲击振动学习班”, 以及部分高等院校、研究所和工厂讲授过。

由于传感器与计算机, 作为当代技术革命的两大技术工具已为世界各先进的工业国所认识, 为了适应这一需要, 在冲击振动测试中, 作为与传感器配套使用的主要仪器, 必须有一详细的叙述, 以便工程技术人员在从事冲击振动计量测试时, 对测试系统有较全面的掌握。从这一目的出发编写了这本书。书中除重点叙述仪器原理和维修之外, 还从实际应用出发, 详细叙述了测试系统的技术配套。

在编写过程中, 查阅了国内外许多有关书刊、学术报告和其它资料, 并适当引用了部分资料, 在此一并致谢。

航天工业部七〇二研究所高级工程师朱蓝春同志, 在百忙中审阅了本书, 在此表示谢意。

由于编者水平有限, 在编写过程中, 可能有不够全面的地方, 甚至会有错误, 欢迎读者批评指正。

袁海德

1984年6月

# 目 录

第一章 冲击振动计量测试的基本概念 .....	1
§ 1—1 计量简述 .....	1
§ 1—2 测量简述 .....	7
§ 1—3 误差及其定义 .....	8
§ 1—4 测量误差及其主要来源 .....	13
§ 1—5 误差的分类 .....	16
§ 1—6 有效数字 .....	19
第二章 冲击振动的基本理论 .....	22
§ 2—1 冲击参数 .....	22
§ 2—2 冲击响应谱 .....	25
§ 2—3 冲击响应谱与富里叶谱的关系 .....	27
§ 2—4 振动的分类 .....	29
§ 2—5 简谐振动 .....	30
§ 2—6 单自由度振动 .....	34
§ 2—7 随机振动 .....	38
§ 2—8 冲击测量 .....	44
§ 2—9 振动测量 .....	50
第三章 冲击振动的测量仪器 .....	67
§ 3—1 传感器的分类及其主要特性 .....	67
§ 3—2 系列电荷放大器 .....	69
一、系列电荷放大器工作原理 .....	69
二、系列电荷放大器举例 .....	87
三、系列电荷放大器的测试方法 .....	101
四、系列电荷放大器技术性能介绍 .....	113

§ 3—3 电阻应变仪 .....	113
一、电阻应变仪工作原理 .....	120
二、电阻应变仪的基本电路 .....	123
三、国内外常用电阻应变仪介绍 .....	151
四、电阻应变仪技术指标校验 .....	174
五、国产常用电阻应变仪性能参数 .....	179
§ 3—4 磁带记录器 .....	180
一、磁带记录器的特点 .....	180
二、模拟磁带记录器的主要组成单元 .....	182
三、模拟磁带机的几种记录方式 .....	192
四、磁带记录器主要技术指标、技术性能及测试方法 .....	209
五、国内外常用磁带记录器性能参数 .....	219
第四章 冲击振动仪器的合理选择、使用及维修 .....	234
§ 4—1 仪器的合理选择和冲击振动参数的关系 .....	234
一、冲击振动参数的特性 .....	234
二、冲击振动仪器的频率选择 .....	240
三、冲击振动仪器的阻抗匹配 .....	244
§ 4—2 冲击振动仪器的合理使用 .....	249
一、传感器及应变片在配套使用时的合理安装 .....	250
二、系列电荷放大器的合理使用 .....	261
三、电阻应变仪在静、动态测量中的应用 .....	263
四、磁带记录器的选择和使用 .....	270
五、冲击振动仪器的接地 .....	275
六、冲击振动仪器系统配套使用举例 .....	280
§ 4—3 冲击振动仪器的维修 .....	289
一、系列电荷放大器维修 .....	289
二、电阻应变仪的维修 .....	298
三、磁带记录器的维修 .....	306

# 第一章 冲击振动计量测试的基本概念

## § 1—1 计量简述

从严格的科学理论来定义物理量，必须是同一物理量的各个量具及仪器所表示的单位量与所定义的单位相统一的。这样便形成和发展了“计量学”这门科学。其内容为

- (1) 计量与测量的一般理论；
- (2) 计量与测量的方法、技术及计量用的专门量具和仪器(即各种基准和标准)；
- (3) 各种物理单位的定义及各单位之间的关系(即单位制)；
- (4) 计量与测量的误差理论；
- (5) 量值的传递以及保证量值的统一而必须采取的措施、规程和法制等。

计量和测量有密切的联系。测量的精确度和统一性都要依靠计量工作来保证，但计量把测量技术和测量理论加以完善和发展，从而对测量起着推动和指导作用。例如，由于仪器仪表的技术指标的提高，使测量精度也随之大大提高。另一方面，随着测量技术及仪器的发展，又不断地涌现出各种新的计量仪器。

### 一、物理量的单位及单位制

物理量的单位，是指根据定义而令系数为1的量。例如，

安培是电流的单位，赫兹是频率的单位等。单位是表征测量结果的重要组成部分，是物理量进行比较的基础。

有的物理量单位，可以任意地、彼此无关地加以规定，这样的单位称为基本单位，如米、千克、秒等。而由各种基本单位通过定义、定律及其它函数关系派生出来的单位称为导出单位。例如，由长度及时间单位可导出速度的单位（米·秒<sup>-1</sup>）。

以一些基本单位为基础，通过各种物理量之间的联系便可组成单位制。例如，绝对单位制、静电单位制、电磁单位制等。采用不同的单位制，曾给科学技术的发展带来了种种不便。于是，在1948年第九届国际计量大会上，建议采用一种以实用单位制为基础的统一单位制。1960年第十一届国际计量大会上，正式通过了新的单位制，定名为国际单位制，符号为SI。

国际单位制的基本单位共有7个，即长度单位〔米(m)〕、质量单位〔千克(kg)〕、时间单位〔秒(s)〕、电流单位〔安培(A)〕、热力学温度单位〔开尔文(K)〕、光强度单位〔坎德拉(cd)〕、物质的量单位〔摩尔(mol)〕。此外还有两个辅助单位，即平面角单位〔弧度(rad)〕，立体角单位〔球面度(sr)〕。

表 1—1 国际单位制的基本单位

量 的 名 称	单位名称(中文)	单位符号(国际)
长 度	米	m
质 量	千克(公斤)	kg
时 间	秒	s
电 流	安(培)	A
热力学温度	开(尔文)	K
物质的量	摩(尔)	mol
发光强度	坎(德拉)	cd



表 1—2 国际单位制的辅助单位

量的名称	单位名称(中文)	单位符号(国际)
平面角	弧度	rad
立体角	球面度	sr

表 1—3 国际单位制中具有专门名称的导出单位

量的名称	单位名称	单位符号	其它表示式例
频率	赫(兹)	Hz	$s^{-1}$
力、重力	牛(顿)	N	$kg \cdot m/s^2$
压力、压强、应力	帕(斯卡)	Pa	$N/m^2$
能量、功、热	焦(耳)	J	$N \cdot m$
功率、辐射通量	瓦(特)	W	$J/s$
电荷量	库(仑)	C	$A \cdot s$
电位、电压、电动势	伏(特)	V	$W/A$
电 容	法(拉)	F	$Q/V$
电 阻	欧(姆)	$\Omega$	$V/A$
电 导	西(门子)	S	$A/V$
磁 通 量	韦(伯)	Wb	$V \cdot s$
磁通量密度、磁感应强度	特(斯拉)	T	$Wb/m^2$
电 感	亨(利)	H	$Wb/A$
摄氏温度	摄氏度	$^{\circ}C$	

续表

量的名称	单位名称	单位符号	其它表示式例
光通量	流(明)	lm	cd·sr
光照度	勒(克斯)	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射性活度	贝可(勒尔)	Bq	s <sup>-1</sup>
吸收剂量	戈(瑞)	Gy	J/kg
剂量当量	希(沃特)	Sv	J/kg

表 J-4 国家选定的非国际单位制单位

量的名称	单位名称	单位符号	换算关系和说明
时 间	分	min	1min = 60s
	[小]时	h	1h = 60min = 3600s
	天(日)	d	1d = 24h = 86400s
平 面 角	(角)秒	( <sup>''</sup> )	1 <sup>''</sup> = (π/64800) rad π为 <sup>①</sup> 周率
	(角)分	( <sup>'</sup> )	1 <sup>'</sup> = 60 <sup>''</sup> = (π/10800) rad
	度	( <sup>°</sup> )	1 <sup>°</sup> = 60 <sup>'</sup> = (π/180) rad
旋转速度	转/每分	r/min	1r/min ≈ (1/60) s <sup>-1</sup>
长 度	海 里	nmile	1nmile = 1852m
速 度	节	Kn	1Kn = 1n mile/h = (1852/3600) m/s
质 量	吨	t	1t = 10 <sup>3</sup> kg
	原子质量单位	u	1u ≈ 1.6605653 × 10 <sup>-27</sup> kg

续表

量的名称	单位名称	单位符号	换算关系和说明
体 积	升	L, (l)	$1L = 1(dm)^3 = 10^{-3}m^3$
能	电子伏	eV	$1eV \approx 1.6021892 \times 10^{-19}J$
级 差	分贝	dB	
线 密 度	特(克斯)	tex	$1tex = 1g/km$

表 1—5 用于构成十进倍数和分数单位的词头

所表示的因数	词头名称	词头符号
$10^{18}$	艾(可萨)	E
$10^{15}$	拍(它)	P
$10^{12}$	太(拉)	T
$10^9$	吉(咖)	G
$10^6$	兆	M
$10^3$	千	K
$10^2$	百	h
$10^1$	十	da
$10^{-1}$	分	d
$10^{-2}$	厘	c
$10^{-3}$	毫	m
$10^{-6}$	微	$\mu$

续表

所表示的因数	词头名称	词头符号
$10^{-9}$	纳〔诺〕	n
$10^{-12}$	皮〔可〕	p
$10^{-15}$	飞〔母托〕	f
$10^{-18}$	阿〔托〕	a

〔附〕 1. 周、月、年(年的符号为 a)为一般常用时间单位。

2. 升的符号中, 小写字母 l 为备用符号。

3. r 为“转”的符号。

4. ( ) 内的字为前者的同义语。

5. [ ] 内的字, 是在不致混淆的情况下, 可以省略的字。

我国和世界上许多国家及国际组织都决定采用上表所列国际单位制。

## 二、基准和标准

所谓基准, 是用当代最先进的科学技术及最高精确度和专门用以规定、保持和复现某种物理单位的特殊量具或仪器。

通常定义把直接按物理量单位的定义复现的, 具有最高水平的基准叫做主基准或原器。经过严格的法定手续, 主基准可定为国家基准。为了保证国家基准的精确度不致因经常使用和其它原因而降低指标, 同时制定了各种专门用途的若干副基准或次级基准。它的量值根据主基准来确定, 平时可代替主基准向下级传递量值。

为了保证量值的统一, 需要通过各级基准、标准, 以及相应的辅助设备把一个物理量单位准确地一直传递到数量众多的测量仪器或量具。因此, 必须以法定的形式规定一套检定规程。其中包括检定方法, 检定设备, 检定步骤, 以及对受检仪器给出误差的方式等。

各种基准、标准以及工作仪器和量具，必须按规定的检定规程，交上级计量部门进行检定，并发给检定合格证书。如没有检定合格证书或证书有效期已超过者，其原有说明书或检定记录上所标明的精度指标，不再可信，只能作参考使用。

## § 1—2 测量简述

测量，是测量工程师或从事这方面工作的工作人员，借助于专门设备，通过实验方法对客观事物取得数量观念的认识过程。

测量的结果，可能表现为一定的数字、或曲线、或某种图形、频率谱。不论是那种形式，测量结果总包含了一定的数值（大小或符号），以及相应的单位。

在测量过程中，不可避免地存在着误差。故在表示测量结果时，必须把测量的实际误差同时表示出来，以便掌握测量结果可信赖的程度。

测量是一种比较过程，体现测量单位的器具称为量具。多数量具在参与比较时，都要借助于专门的比较设备。如利用标准电阻来测量未知电阻时，需要借助于电桥；利用标准电池来测量未知直流电动势时，需要借助于电位差计。这些用作比较的设备，称为比较仪。但这些比较仪仅能测量简单的参数，而在工程测量过程中，很少使用量具，广泛使用的是各种直读式测量仪器。直读式仪器不用量具即可完成测量任务，并可在仪器的读数机构上直接得到测量结果。如三用表、失真度测量仪、示波器、数字电压表等。这些仪器使用方便，为测量准确起见，需预先进行标定。

通常，测量仪器是泛指一切参与测量工作的设备，包括各

种直读和非直读仪器、比较仪器、量具、测试信号源、电源设备等。

在冲击振动计量与测试中，从六十年代至今仍以系列电荷放大器或应变仪、磁带记录仪、小型计算机为主。

目前在测量中，大致分有线测量和无线测量（即遥控测量）两种。有线测量测量数据可靠，抗干扰性好；无线测量用途较广，多用于有线测量无法测试的地方。如测量物体入水、旋转、运输等参数中，缺点是抗干扰性差。

### § 1—3 误差及其定义

任何计量和测量不可能完全准确地等于被测量的真值，即不可避免地存在误差。所谓真值，是指在一定的时间及空间条件下，某物理量的真实数值。这个真实数值是利用理想的、无误差引入的测量仪器或量具得到的。很明显，真值是无法实际得到的，总会有误差。误差的原因，是由于计量、实验、测量所用仪器设备，不可能绝对灵敏、准确；温度、压力、湿度、振动等环境条件的不断变化，对测量过程及被测对象存在着影响；操作人员技术水平；计量、测量方法不可能达到完善理想的程度等都会引入误差。因此，我们必须了解误差的性质，产生的原因以及它对计量、测量结果的影响规律。以利于正确地进行计量和测量，合理地选用仪器，测量方法和数据处理，以使误差减少到最小，得到最为接近实际的计量和测量值。

计量、测量的误差常用绝对误差、相对误差来表示。

#### 一、绝对误差

设真值为  $A_0$ ，仪器的示值或量具的标称值为  $x$ ，则绝对误差为

$$\Delta x = x - A_0 \quad (1.1)$$

在实际测量中，通过把测量仪器或量具与上级标准相比较，得出实际值  $A$  来代替真值  $A_0$ 。由于上一级标准也存在误差，因此  $A$  并不等于  $A_0$ ，但一般而言  $A$  总比  $x$  更接近  $A_0$ ， $x$  与  $A$  之差称为仪器的示值绝对误差或量具的标称绝对误差（或称实际绝对误差），即

$$\Delta x = x - A \quad (1.2)$$

绝对值与  $\Delta x$  相等，但符号相反的值称为修正值  $C$ ，即  $C = -\Delta x = A - x$

通过检定，可以由上一级标准（或基准）给出受检仪器或量具的修正值。利用修正值，可以求得该仪器或量具的实际值为

$$A = x + C \quad (1.3)$$

根据不同仪器的特点，修正值可能由数字、曲线、公式或表格等形式给出。在有些自动测试仪器中，可预先将修正值贮存起来，然后在测量中自动进行修正。

在实际计量和测量中，应当注意把仪器的读数和示值区别开。读数是从仪器的刻度盘、显示器等读数装置上直接读到的数字，而示值则是该读数所代表的被测量的数值。有时读数就是示值，但一般而言，二者是不同的。通常需把读数经过简单计算、查表或查曲线等才能获得示值。例如，一只线性刻度为  $0 \sim 50$  的  $5\text{mA}$  量程的电流表，若指针指到  $25$  的分度位置，则读数就是  $25$ ，而示值为  $\frac{25}{50} \times 5 = 2.5\text{mA}$ 。在记录测量结果时，为了避免差错和便于查对，应同时记下测量时的读数及相应的示值。

由于绝对误差往往不能说明计量、测量的精确度，故普遍应用的是相对误差。

## 二、相对误差

相对误差的形式很多，常用的有下列几种：

(1) 实际相对误差。它是用绝对误差与被测量实际值之比来表示的相对误差，记为

$$r_A = \frac{\Delta x}{A} \times 100\% \quad (1.4)$$

(2) 示值相对误差。它是用绝对误差与仪器的示值（或量具的标称值）之比表示的相对误差，记为

$$r_x = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (1.5)$$

(3) 满度相对误差。它是用绝对误差与仪器示值的上限（即满度值） $x_m$  之比来表示的相对误差，记为

$$r_m = \frac{\Delta x}{x_m} \times 100\% \quad (1.6)$$

(4) 用分贝 (dB) 表示的相对误差。

电压、电流等电参数用 dB 表示的相对误差为

$$r_{dB} = 20 \lg \left( 1 + \frac{\Delta x}{x} \right) \quad (1.7)$$

功率等电参数用 dB 表示的相对误差为

$$r_{dB} = 10 \lg \left( 1 + \frac{\Delta x}{x} \right) \quad (1.8)$$

在以上的几种误差表示中，一般采用  $r_x$  表示。因为通常在仪器出厂检验时，都是把受检仪器调到某一整刻度上，然后从标准仪器或其它检定装置上读出实际值或直接读出误差  $\Delta x$ ，而相对误差则是  $\Delta x$  与受检仪器示值之比。另外，在某些检定结果的表示式中，修正值是用受检仪器在某检定点上的相对值给出的，即给出的不是  $c$ ，而是  $c/x$ 。故以  $r_x$  表示相对误差更方便，且很容易求得受检仪器在该检定点的实际值为



$$A = x + c = x \left( 1 + \frac{c}{x} \right) \quad (1.9)$$

由于满度相对误差  $r_m$  的分母量程上限为  $x_m$ ，因此  $r_m$  的数值总是小于或等于示值相对误差  $r_x$ 。对同一量程来说， $x_m$  是一个常数，故  $r_m$  提供的实际上只是绝对误差。电工仪表的准确度就是按正常条件下的满度相对误差来分级的。把 1.5 级的电表，就表示其满度相对误差为  $\pm 1.5\%$ ，并直接在面板上标上  $\overline{1.5}$  的符号。根据国家标准 GB776—65《电气测量指示仪表通用技术条件》规定，电工仪表共分七级：0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5 及 5.0

表 1—6 正常条件

规定条件	数值或范围及其它要求
环境温度	(20 ± 5) °C
相对湿度	(65 ± 15) %
大气压强	750 ± 30 mmHg
交流供电电压	额定值 ± 2% (额定值)

为了减小示值误差，在选择指针式电表的量程时，应尽可能使指针接近于满偏转（例如，靠近满度值的 2/3 区域）。

通常，准确度劣于 0.2 级的磁电式电表，当指针偏转到不同位置时，由于表头环形磁场、机械摩擦及游丝扭矩的不均匀性均可忽略，因而可以认为在不同偏转角下的读数误差都一样，即在一千量程内的示值误差  $\Delta x$  为常数。这说明，从减小相对误差的角度来看，在选择电表量程时，应尽可能使  $x_m$  接近于  $x$ ，以保证指针尽可能接近满偏转。