

电机工程手册

第43篇 电工仪器仪表

(试 用 本)

机械工程手册
电机工程手册

编辑委员会



机械工业出版社

73.21073

73.21073
210
43:2

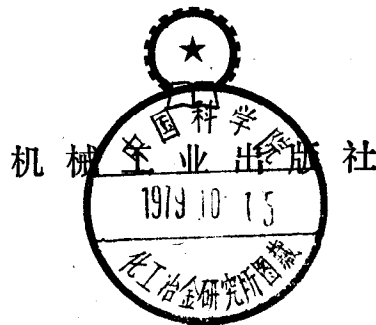
电机工程手册

第43篇 电工仪器仪表

(试 用 本)

机械工程手册
电机工程手册

编辑委员会



本篇主要介绍测量电量所常用的电工仪器和仪表。书中重点阐述这类仪器仪表的基本原理、结构特点、技术数据、常用公式、主要用途以及在使用中注意的问题。对于某些新技术、新发展,也作了概要介绍。

电机工程手册

第43篇 电工仪器仪表

(试用本)

上海市电工仪器研究所 主编

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)
(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

上海商务印刷厂印刷

新华书店上海发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $8 \frac{1}{2}$ · 字数 233 千字
1979 年 4 月上海第一版 · 1979 年 4 月上海第一次印刷
印数 00,001—70,000 · 定价 0.66 元

*

统一书号:15033·4607

编 辑 说 明

(一)我国自建国以来,机械工业在毛主席的革命路线指引下,贯彻“独立自主、自力更生”和“洋为中用”的方针,取得了巨大的成就。为了总结广大群众在生产和科学研究方面的经验,同时采用国外先进技术,加强机械工业科学技术的基础建设,适应实现“四个现代化”的需要,我们组织编写了《机械工程手册》和《电机工程手册》。

(二)这两部手册主要供广大机电工人、工程技术人员和干部在设计、制造和技术革新中查阅使用,也可供教学及其他有关人员参考。

(三)这两部手册是综合性技术工具书,着重介绍各专业的理论基础,常用计算公式,数据、资料,关键问题以及发展趋向。在编写中,力求做到立足全局,勾划概貌,反映共性,突出重点。在内容和表达方式上,力求做到深入浅出,简明扼要,直观易懂,归类便查。读者在综合研究和处理技术问题时,《手册》可起备查、提示和启发的作用。它与各类专业技术手册相辅相成,构成一套比较完整的技术工具书。《机械工程手册》包括基础理论、机械工程材料、机械设计、机械制造工艺、机械制造过程的机械化与自动化、机械产品六个部分,共七十九篇;《电机工程手册》包括基础理论、电工材料、电力系统与电源、电机、输变电设备、工业电气设备、仪器仪表与自动化七个部分,共五十篇。

(四)参加这两部手册编写工作的,有全国许多地区和部门的工厂、科研单位、大专院校等五百多个单位、两千多人。提供资料和参加审定稿件的单位和人员,更为广泛。许多地区的科技交流部门,为审定稿件做了大量的工作。各篇在编写、协调、

审查、定稿各个环节中,广泛征求意见,发挥了广大群众的智慧和力量。

(五)为了使手册早日与读者见面,广泛征求意见,先分篇出版试用本。由于我们缺乏编辑出版综合性技术工具书的经验,试用本在内容和形式方面,一定会存在不少遗漏、缺点和错误。我们热忱希望读者在试用中进一步审查、验证,提出批评和建议,以便今后出版合订本时加以修订。

(六)本篇是《电机工程手册》第43篇,由上海市电工仪器研究所主编,参加编写的有哈尔滨电工仪表研究所、上海电表厂、上海电工仪器厂、上海交流仪器厂、天津互感器厂研究室、浙江大学等单位。许多有关单位对编审工作给予大力支持和帮助,在此一并致谢。

机械工程手册
电机工程手册 编辑委员会编辑组

常用符号表

A ——能量	U_n ——标准电压
a ——准确度等级	U_{sc} ——输出电压
b ——固定误差项系数	U_{sr} ——输入电压
C_I ——电流常数	U_x ——被测电压
C_Q ——电量常数	W ——反作用力矩系数
C_U ——电压常数	α_t ——电阻温度系数
C_ϕ ——磁通常数	γ ——相对误差
E_0 ——零电势	γ_m ——引用误差
E_n ——标准电势	Δ ——绝对误差
I_n ——标准电流	ΔR ——最小步进电阻值
I_{sc} ——输出电流	ΔU ——最小步进电压值
I_{sr} ——输入电流	δ ——角差
IN ——磁势	e ——比差
M_a ——反作用力矩	E_ϕ ——相角误差
R_J ——绝缘电阻	ξ_R ——阻值误差
R_n ——标准电阻	ξ_Z ——阻抗误差
R_{sc} ——输出电阻	ρ ——阻尼系数
R_{sr} ——输入电阻	

目 录

编辑说明 常用符号表

第1章 电测量指示仪表

1 概述	43-1
1.1 用途	43-1
1.2 分类	43-1
1.3 指示仪表的发展	43-1
2 主要技术要求	43-3
2.1 仪表的误差	43-3
2.2 仪表的灵敏度和仪表常数	43-4
2.3 仪表的功率消耗	43-4
2.4 仪表的绝缘和耐过载性能	43-6
3 一般原理和结构	43-6
3.1 转动力矩、反作用力矩和产生力矩的装置	43-6
3.2 阻尼力矩及阻尼器	43-8
3.3 摩擦力矩及可动部分支承装置	43-8
3.4 指示装置	43-10
3.5 屏蔽	43-11
4 常用指示仪表的原理和特性	43-11
4.1 磁电系仪表	43-11
4.2 电动系仪表	43-13
4.3 铁磁电动系仪表	43-15
4.4 电磁系仪表	43-16
4.5 静电系仪表	43-19
4.6 感应系仪表	43-21
4.7 整流系仪表	43-23
4.8 热电系仪表	43-26
4.9 电子系仪表	43-26

第2章 直流仪器

1 标准电池	43-28
1.1 结构	43-28
1.2 主要特性	43-28
1.3 技术性能与使用	43-29
2 直流标准电阻	43-30
2.1 结构	43-30
2.2 使用及维护	43-30

3 直流电阻箱	43-30
3.1 结构	43-31
3.2 技术性能与使用	43-31
4 直流电桥	43-32
4.1 工作原理	43-32
4.2 技术性能与使用	43-33
5 直流电位差计	43-34
5.1 电阻式电位差计	43-34
5.2 匝数比式电位差计	43-40
6 直流分压箱	43-42
6.1 工作原理	43-42
6.2 技术性能与使用	43-42
7 直流检流计	43-43
7.1 指针式和光点式检流计	43-43
7.2 光电放大检流计	43-48
7.3 晶体管检流计	43-49
8 直流标准电压发生器	43-49
8.1 基本原理	43-50
8.2 电阻分压式直流标准电压发生器线路举例	43-51
8.3 主要单元	43-51
9 直流标准电流发生器	43-52
9.1 基本原理	43-52
9.2 主要单元	43-52

第3章 交流仪器

1 交流电阻器	43-53
1.1 等效电路	43-53
1.2 主要特性	43-53
1.3 结构	43-54
1.4 交流电阻箱	43-55
2 标准电容器	43-55
2.1 用途及技术要求	43-55
2.2 等效电路	43-55
2.3 类型	43-56
2.4 使用及维护	43-56
3 标准电感器	43-58
3.1 用途及技术要求	43-58

3.2 等效电路	43-58
3.3 类型	43-58
3.4 使用及维护	43-58
4 感应分压器	43-60
4.1 用途	43-60
4.2 特性	43-60
4.3 工作原理	43-60
4.4 类型	43-60
4.5 绕制	43-60
4.6 应用	43-61
4.7 校验	43-62
5 交流电位差计	43-63
6 交流电桥	43-64
6.1 阻抗比电桥	43-64
6.2 电感耦合比率臂电桥	43-69
6.3 交流电桥新发展	43-72
6.4 交流电桥的信号源	43-73
6.5 交流电桥的平衡指示器	43-74
7 交流标准电压发生器	43-75
8 交流标准电流发生器	43-76

第4章 数字仪表

1 数字频率表	43-77
2 数字电压表	43-78
2.1 数字电压表工作原理	43-78
2.2 数字电压表主要指标	43-82
2.3 数字电压表关键部件	43-82
3 转换器	43-82
3.1 高灵敏度前置放大器	43-82
3.2 交-直流转换器	43-83
3.3 有效值转换器	43-83
3.4 欧姆转换器	43-84
3.5 温度转换器	34-84
3.6 功率转换器	43-84
3.7 电流-电压转换器	43-85
3.8 相位转换器	43-85

第5章 电工记录仪表

1 记录方式与记录工具	43-86
2 记录纸的驱动与固定装置	43-89
2.1 记录纸的驱动机构	43-89
2.2 记录纸的固定装置	43-91

3 自动平衡式记录仪表	43-92
3.1 基本原理	43-92
3.2 主要单元	43-93
3.3 线路的屏蔽	43-97
4 笔式记录仪表	43-99
4.1 表头式	43-99
4.2 反馈式	43-101
4.3 喷射式	43-101
5 光线示波器	43-101
5.1 基本原理	43-101
5.2 主要组成部分	43-102
5.3 主要技术指标	43-105
5.4 技术参量及误差分析	43-105
5.5 几种感光方式比较	43-107
6 磁带记录仪	43-107
6.1 特点	43-107
6.2 类型与结构	43-108
6.3 模拟磁带记录仪的工作原理	43-108
6.4 磁头和磁带	43-111
6.5 磁带传动机构	43-111
6.6 磁带记录仪的技术指标	43-112

第6章 仪用互感器

1 仪用电压互感器	43-112
1.1 结构	43-112
1.2 工作原理	43-113
1.3 误差及其特性	43-114
1.4 双级电压互感器	43-116
2 仪用电流互感器	43-117
2.1 结构	43-118
2.2 工作原理	43-118
2.3 误差及其特性	43-119
2.4 电流比较仪的工作原理	43-121
3 仪用互感器的选择	43-123
4 仪用互感器使用中应注意的问题	43-123
5 互感器校验仪	43-123
5.1 校验仪的分类	43-123
5.2 校验仪的主要部件	43-123
5.3 校验仪的工作原理	43-124
5.4 校验仪线路举例	43-125
参考文献	43-126

第1章 电测量指示仪表

1 概述

电测量指示仪表用来测定电量数值。其特点是直接将被测电量转换为可动部分的偏转角位移,并通过指示器在标尺上示出被测量(电流、电压、功率、频率、电阻等)的大小。

1.1 用途

由于指示仪表具有结构简单、稳定可靠、适于大批生产和价格低廉等优点,在电力工业、工矿企业、学校和科研部门都广泛地应用。

大量的安装式仪表被装在各种形状的安装板、小型移动设备和电子仪器的面板上,用来监控和指示。

多种类型的可携式仪表用于科研和生产单位的实验室及现场进行精密测量和一般测量。

工农业各部门及居民用户,需用电度表计算电能,作为经济核算的工具。

电测量指示仪表不仅能直接测量电磁量,还可与变换装置配合,将非电量(温度、压力、流量、速度、照度等)变换为电量加以测量。扩大了指示仪表的使用范围。

1.2 分类

电测量指示仪表的种类繁多,分类方法也很多,现列举几种方法如下:

(1) 按使用方式分为安装式仪表和可携式仪表。

安装式仪表,装在安装板或电气设备的面板上使用。根据测量的不同需要,采用不同形状和尺寸

的仪表进行排列和组合,要求安装式仪表外形尺寸系列化,如图 43-1-1 所示。

可携式仪表,是可以携带和移动的仪表。如在生产现场使用的 0.5 级以下的仪表,各种专用仪表(万用表、兆欧表、钳形表等),以及在实验室中用作精密测量的仪表。

(2) 根据国家标准 GB776-76,将指示仪表按准确度等级分为七级,即 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 5.0。

(3) 按指示仪表的工作原理分类,见表 43-1-1。

1.3 指示仪表的发展

由于新材料、新元件、新工艺的发展和应用,仪表的性能得到不断的改进。具体表现在下面几个方面。

(1) 提高仪表的准确度 测量技术的发展要求测量结果具有更高的准确性,因此要求提高指示仪表的准确度。安装式仪表要求在现有的基础上将准确度提高一级,达到 1.0 级和 1.5 级。在安装式仪表中采用齐纳二极管的磁电系仪表,可制成扩展标度尺的额定值电压表、频率表及过载电流表,从而提高测量准确度。0.05 级的可携式电动系功率表及静电系电压表,经过直流校验后作为交流功率与电压的精密测量用,或交流标准仪表。

(2) 提高灵敏度降低功率消耗 仪表的灵敏度高消耗功率小,测量过程中产生的测量误差也小。可从多方面改进:采用静电系仪表,因为它几乎不消耗功率,使用频率范围宽;采用带晶体管放大线路的磁电系仪表,可得到较高的输入阻抗,如 50 mV、 10^8 Hz 时为 3~5 MΩ 以上;在仪表中采用张丝结构可显著降低功率消耗。

(3) 扩大仪表的测量范围与使用范围 在电参数测量中要求尽量扩大各类型仪表的最大上量限和最小上量限。例如采用光电放大的静电系仪表,可制成最小上量限交流电流为 $10 \mu\text{A}$, 电压为 10 mV, 准确度 1.0 级, 额定频率范围 20~ 10^4 Hz。采用霍尔元件的磁电系仪表可以进行数万安培的直流大电

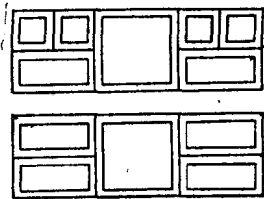


图 43-1-1 不同尺寸的安装式仪表靠紧安装

表 43.1-1 指示仪表按工作原理分类

分类名称		磁电系	电磁系	电动系	铁磁电动系	静电系	感应系	热电系	整流系	电子系
性能	标志符号									
型号符号	型号符号	G	T	D	D	Q	G	E	L	Z
应用范围	应用范围	直流电表且与多种变换器配合扩大使用范围; 作比率表	安装式电表及一般实验室用交(直)流表	作交直流标准表及一般实验室用表	作安装式电表	在高压测量方面应用	计算交流电路中电能	在高频线路中应用	作万用表	在弱电线路中应用
工作电压	工作电压	直流	交直流	交直流	交直流	交直流	交流	交流(直)流	交流	交直流
测量范围	测量范围	电流 A $10^{-11} \sim 10^3$ 电压 V $10^{-3} \sim 10^3$ 频率 Hz	$10^{-8} \sim 10^2$ $1 \sim 10^3$ 一般用于工频, 可扩频(补偿)到 5kHz	$10^{-3} \sim 10^3$ $1 \sim 10^3$ 一般用于工频, 有的可达 10kHz	$10^{-7} \sim 10^2$ $10^{-1} \sim 10^3$ 一般工频	达 10^8	$10^{-1} \sim 10^2$ $10 \sim 10^3$ 用于工频	$10^{-3} \sim 10$ $10 \sim 10^3$ $< 10^8$	$10^{-5} \sim 10$ $10^{-3} \sim 10^3$ 一般工频有的高达 5kHz	$5 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^3$ 一般为 $10^3 < 10^8$
消耗功率	消耗功率	小(< 100 毫瓦)	较小	较大	较小	几乎不消耗	较小	小	小	较小
最高准确度等级	最高准确度等级	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.5	0.2	1.0	1.0~5.0
分度特性	分度特性	均匀	不均匀	不均匀	不均匀	不均匀		不均匀	接近均匀	
过载能力	过载能力	小	大	小	小	大	大	小	小	
制成仪表类型	制成仪表类型	A、V、Q、MQ 检流计钳形表	A、V、Hz $\cos \varphi$ 同步步钳形表	A、V、W、Hz、 $\cos \varphi$ 同步表	A、V、W、Hz、 $\cos \varphi$	V 象限计	主要用于电度表	A、V、W	A、V、Q、 $\cos \varphi$ Hz 万用表	V, 阻抗

流的测量。采用新元件组成的磁电系仪表用于非电量的测量方面也在日益发展,如利用霍尔元件制成测量范围为 $50 \sim 2 \times 10^4$ 奥斯特,误差 $\pm 1.5\%$ 的磁强计。

(4) 扩大仪表使用频率范围 交流中频电源在工业中得到日益广泛的应用,故要求仪表在较宽的频率范围内保证一定的准确度。一般用于工频的仪表应具有 1000 Hz 或 1500 Hz 的扩大频率范围。供高频使用的可携式 1.0~1.5 级仪表主要是发展整流系、热电系及静电系仪表,使用频率范围达到 $10^4 \sim 10^8$ Hz。超低频电源在工业生产中的应用,要求制造频率为 1.5~0.01 Hz,准确度为 0.5~1.5 级的可携式及安装式仪表。

(5) 扩大仪表的多用性 尽可能使用一台仪表代替数台仪表,应根据制造上的可能性,生产数量限多,测量种类多的仪表。

2 主要技术要求

要保证测量结果的准确可靠,必须对测量仪表提出一定的质量要求。

2.1 仪表的误差

2.1.1 误差的表达形式

不论仪表质量如何,它的指示值和被测量的实际值之间总是有误差的。表 43-1-2 列出绝对误差、相对误差和引用误差的概念及表达式。一般,指示仪表中的误差用引用误差表示。电度表(积算式仪表)的误差用相对误差表示。

表 43-1-2 误差及其表达式

误 差	定 义	表 达 式
绝对误差	指示值 A_x 与实际值 A_0 的代数差,用 Δ 表示	$\Delta = A_x - A_0$
相对误差	绝对误差与实际值 A_0 之比的百分数,用 γ 表示	$\gamma = \frac{\Delta}{A_0} 100\%$
引用误差	绝对误差与仪表测量上限 A_m 之比的百分数,用 γ_m 表示	$\gamma_m = \frac{\Delta}{A_m} 100\%$

2.1.2 仪表的基本误差

仪表在规定的条件下工作时(即在表 43-1-3 中所列出的各影响量的额定值及其允许偏差范围内)

表 43-1-3 影响量的额定值

影 响 量	额 定 值		额 定 值 允 许 偏 差	
	当 注 明 时	当 未 注 明 时	0.1, 0.2, 0.5 级仪表	1.0, 1.5, 2.5, 5.0 级仪表
温 度	规定值或规定范围内任一值	+20°C	$\pm 2^\circ\text{C}$	
工 作 位 置	规定位置	任 何 位 置	对倾斜角度为 1° 的;	$\pm 0.2^\circ$
			对倾斜角度为 5° 的;	$\pm 1^\circ$
			对倾斜角度为 $\geq 10^\circ$;	$\pm 2^\circ$
电 压	规定值或规定范围内任一值	—	$\pm 2\%$	
频 率		50 Hz	$\pm 2\%$	
			对单相相位表及单相乏尔表为 $\pm 0.5\%$	
交流电流或电压的波	正 弦	正 弦	波形畸变系数 $\leq 5\%$	
				对平均值整流系及电子系仪表 $\leq 1\%$
直流电流或电压的交流系数	0	0	$\leq 1\%$	$\leq 3\%$
与地磁场的方向	N←S	任 何 方 向	$\pm 5^\circ$	
外 磁 场	应无外磁场	应无外磁场	仅有地磁场存在	
铁 磁 物 质	规定的钢板	无 铁 磁 物 质	—	
外 电 场	应无外电场	应无外电场	—	
功率因数	功率表	规定值	$\cos \varphi = 1 (\pm 0.01)$ 或额定 $\cos \varphi \pm 0.01$	
	无功功率表	规定值	$\sin \varphi = 1 (\pm 0.01)$ 或额定 $\sin \varphi \pm 0.01$	
电 流	相 位 表	规定值	规定值 20% 和 100%	

表 43.1-4 仪表的基本误差

仪表准确度等级	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.5	5.0
基本误差 %	± 0.1	± 0.2	± 0.5	± 1.0	± 1.5	± 2.5	± 5.0

其标度尺工作部分所有分度线上的示数误差称为仪表的基本误差。

国家标准 GB776-76 规定, 各种准确度等级的仪表, 在标度尺工作部分的所有分度线上的基本误差不应超过表 43.1-4 规定。

基本误差的表示法:

(1) 单向标度尺仪表, 以标度尺工作部分上量限的百分数表示。

(2) 双向标度尺仪表, 以标度尺工作部分两上量限绝对值和的百分数表示。

(3) 无零位标度尺仪表, 指针式仪表以标度尺工作部分上下量限之差的百分数表示, 振簧式仪表, 以指示值的百分数表示。

(4) 标度尺特性为对数、双曲线, 以标度尺工作部分长度的百分数表示。

确定基本误差的条件:

校验仪表前, 被试仪表的温度应与环境温度相同; 仪表应按规定位置摆放; 安装式仪表要在额定负载下预热 15 分钟, 预热前调好机械零位, 以后不准再调; 采用规定的定值导线或具有一定阻值的专用导线(如果规定要用的话); 三相仪表应在对称电压和平衡负载的条件下校验; 对仪表指示值有关的所有影响量应符合表 43.1-3 规定。总之, 在遵守上述一系列条件的前提下, 才能确定仪表的基本误差。

2.1.3 仪表的升降变差和指示器不回零位

在确定仪表基本误差时, 可一同确定仪表的升降变差及指示器不回零位。这两项要求是基本误差的补充要求。

仪表的变差 在外界条件不变的情况下, 仪表指示器平稳地上升和下降时, 标尺工作部分各分度线上两次读数的实际值之差的最大值。其表示方法与基本误差相同。

指示器不回零 当指示器上升至标尺的最大分度线后, 平稳地下降至零(断开线路)时, 指示器偏离标尺零位的数值。

2.1.4 附加误差

当仪表的某个影响量(如温度、工作位置、频率、电压等)偏离所规定的额定值时, 引起仪表指示值变化的误差称为附加误差。

仪表在现场运行或在室外条件下使用时, 不能完全满足确定基本误差时所规定的条件。因此, 除仪表本身的基本误差外, 又加上影响量变化而引起的附加误差。附加误差的表示方法与基本误差相同。表 43.1-5 示出 GB776-76 中对各种影响量变化引起的附加误差的要求。

2.2 仪表的灵敏度和仪表常数

在测量过程中, 如果被测量变化一个很小的 Δx 值, 引起仪表可动部分偏转角改变一个 $\Delta \alpha$, 则 $\Delta \alpha$ 与 Δx 的比值称为该仪表的灵敏度, 用 S 表示, 即

$$S = \frac{\Delta \alpha}{\Delta x}$$

当 $\Delta x \rightarrow 0$ 时,

$$S = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta \alpha}{\Delta x} = \frac{d\alpha}{dx}$$

若仪表为均匀刻度, 则

$$S = \frac{\alpha}{x}$$

这时灵敏度表示一个单位的被测量输入仪表所引起的偏转格数。

灵敏度的倒数称为“仪表常数”, 并用符号 C 表示, 即

$$C = \frac{1}{S}$$

灵敏度是仪表的重要技术指标之一, 它反映出仪表能够测量的最小被测量。

2.3 仪表的功率消耗

当仪表接入线路测量时, 必然消耗一部分能量。若被测电路功率小, 而仪表消耗的功率大, 将改变被测电路工作情况, 引起误差。因此, 要求仪表本身消耗的功率越小越好。

表 43-1-5 影响量变化引起的附加误差

影 响 量	影 响	量 变 化 的 规 定	附 加 误 差
工作位置倾斜影响	自规定的工作位置向任一倾斜的角度	光指示器式仪表, 0.1, 0.2 级仪表, 可携式张丝仪表为 5° 上述以外, 其它仪表为 10°	指示值改变的误差与基本误差规定同
	耐机械力作用的仪表	可携式仪表 0.5~1.0 级 20° 1.5~5.0 级 30°	
	能耐机械力作用的仪表	安装式仪表 0.5~1.0 级 30° 1.5~5.0 级 45°	
温度影响	当环境温度自额定温度改变至 GB776-76 规定的温度范围内的任一温度时, 换算为温度每改变 10°C 引起仪表指示值的改变之值		允许的指示值改变 % 组别 A, A ₁ 组 ±0.1 ±0.2 ±0.5 ±1.0 ±1.5 ±2.5 ±5.0 B, B ₁ 组 ±0.1 ±0.15 ±0.4 ±0.8 ±1.2 ±2.0 ±4.0 C 组 — ±0.15 ±0.3 ±0.5 ±0.8 ±1.2 ±2.5
频率影响	频率自额定值偏离为 ±10% (对单相相位表为 ±2% 单相无功功率表为 ±5%)		指示值改变的误差与基本误差规定同
电压影响	电压自额定值偏离 ±10% (对比率表)、±15% (对整流系表) 或 20% (对其它仪表)		同上
辅助电源的电压和频率影响	电压自额定值偏离 ±10% 或其频率自额定值偏离 ±2% 时		指示值改变的误差为基本误差规定值的一半
外磁场影响	直流仪表, 加强度为 400 A/m 的直流均匀外磁场, 且在最不利方向的情况下交流仪表, 加与被测量同频率的, 随时间正弦变化的交流均匀外磁场, 且在最不利方向和相位情况下, 其磁场强度: 当仪表最大额定频率 $f_k \leq f$ 时为 400 A/m, $f > f_k$ 时为 $400 \frac{f_k}{f}$ A/m (未注明时 $f_k = 1000$ Hz, f_k 为外磁场极限频率)		允许的仪表指示值改变 % 仪表准确度等级 I 级 ±0.5 II 级 ±1.0 III 级 ±2.5 IV 级 — — ±5.0
外电场影响 (对静电系仪表)	加频率均为 50 Hz 的被测量与外电场, 在最不利方向和相位的情况下, 其电场强度: 当仪表额定电压 U 小于 40 kV 时为 (10+U) kV, 大于 40 kV 时为 50 kV		
并置仪表影响	将一台与被试表完全相同的仪表, 先放置在离被试表至少一米处, 然后再与之靠并置		
钢板影响	安装式仪表装于 3 mm 厚钢板开关板上, 可携式仪表放置于 3 mm 厚的钢底板上时		
功率因数影响	在电压、电流、频率均为额定值, 对功率表 $\cos \phi = 0$ (感性负载) 对无功功率表 $\sin \phi = 0$ (感性或容性负载) 同时电流自额定值的 50% 变至 100%		指示器偏离零位不应超过基本误差规定值
不平衡负载影响 (对多元件功率表和和无功率表)	在电压、频率及功率因数皆为额定值时, 当负载平衡并使指示器指示值偏转至标度尺几何中心附近分度线上时, 当任一元件中切断电流, 其它元件同时增加电流使指示器偏转至原分度线上时		指示值改变误差与基本误差规定同

2.4 仪表的绝缘和耐过载性能

仪表应具有足够高的绝缘电阻和绝缘强度,以保证使用上的安全。仪表的绝缘电阻是指仪表及其附件中所有线路与它的外壳间的绝缘电阻值。绝缘强度是指这一绝缘电阻应能耐受住规定数值的试验电压(正弦波)历时1分钟而不被击穿。

除特殊型式的仪表外,所有仪表应能耐受住长时间和短时间的过载(即外加电压或电流之值超过仪表的额定电压或额定电流值)。仪表的过载能力在相应的标准中都有规定。一般可携式仪表较安装式仪表过载能力小得多,同时应注意。

3 一般原理和结构

电测量指示仪表由测量机构和测量线路两部分组成。测量机构接受被测电路或经测量线路转换后的电磁能量,使可动部分产生偏转,并将此偏转反映在指示器上。

测量机构包括固定部分和可动部分。

3.1 转动力矩、反作用力矩和产生力矩的装置

3.1.1 转动力矩和反作用力矩

转动力矩是驱动仪表偏转的力矩。用 M 表示。指示仪表中转动力矩的公式为

$$M = \frac{\partial A}{\partial \alpha} \quad (43-1-1)$$

式中 A ——使测量机构发生偏转的能量

α ——偏转角位移

指示仪表中,若只有转动力矩,它只能反映被测量的有无,而看不出其大小,为此,在可动部分上要

加一反作用力矩。

反作用力矩,与转动力矩方向相反,并随可动部分的偏转角的增大而增加。用 M_a 表示。在指示仪表中一般用游丝、张丝和悬丝等弹性元件产生反作用力矩,

$$M_a = W\alpha$$

式中 W ——反作用力矩系数

当仪表接入被测量,指示装置处于平衡位置时,作用于可动部分的全部力矩之和等于零。即平衡条件为:

$$M - M_a = 0$$

当可动部分平衡破坏时(即 $M - M_a = M_c$),力矩差 M_c 称为仪表的定位力矩。可动部分依靠这个定位力矩稳定在新的平衡位置上。

3.1.2 产生转动力矩和反作用力矩的机构

由于产生转动力矩的方法和机构不同,构成了各种不同系列的仪表,如:磁电系、电动系、铁磁电动系、电磁系、静电系、感应系等。将在第4节中详述。

游丝、张丝、悬丝是一种弹性元件,在指示仪表中主要用以产生反作用力矩,在磁电系、电动系及静电系仪表中也起导流作用。它必须满足下列要求:

- (1) 产生的力矩必须与扭转角成正比;
- (2) 弹性稳定且弹性温度系数较小;
- (3) 弹性极限和抗拉强度要高,残余变形要小;
- (4) 电阻率及电阻温度系数小,抗腐蚀性高,焊接性能好;
- (5) 无磁性及弱磁性;
- (6) 所用的弹性材料应具有优良的压延性能,最低能压至1微米。

表43.1-6列出常用弹性材料的机械性能和物理性能。

表 43.1-6 常用弹性材料性能

材料名称	弹性模量 E kgf/mm ²	切变弹性 模量 G kgf/mm ²	拉伸强度 σ_B kgf/mm ²	弹性极限 σ_e kgf/mm ²	电阻率 ρ $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$	弹性后效 β %	电阻温度 系数 α_t $\times 10^{-4}/^\circ\text{C}$	对铜热电势 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
锡 锌 青 铜	11500	4500	115	80	0.09	0.1	9.5	2.0
铍 青 铜	13500	5000	160	100	0.06	0.2	15.5	1.0
铂 银 合 金	17500	7000	220	160	0.3	0.05	10.5	8.0
磷 青 铜	10000	—	120	—	0.18	0.1	4	—
镍 36	22000	8000	200	160	1.1	0.02	—	—
钴 40	21000	8000	300	190	1.0	0.02	3.0	1.0

a. 游丝 游丝的形状为阿基米德螺旋线形,如图43-1-2。图中 R_1 为外半径, R_2 为内半径, B 为游丝宽度。游丝的宽厚比一般为10~12, 游丝的各圈应均匀的在垂直于螺旋中心线的平面上, 表面光洁度不低于 $\nabla 10$ 。

游丝型号表示方法为外径 $\times$ 力矩。例如: 3×45 , 即说明游丝的外径为3毫米, 力矩为45 mgf $\cdot$ cm/90°。

游丝材料常用锡锌青铜和铍青铜制造。

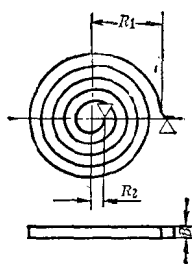


图43-1-2 游丝

b. 张丝与悬丝 张丝与悬丝是产生反作用力矩、导流和支承可动部分的元件。张丝、悬丝支承仪表的可动部分, 由于不存在轴尖和轴承的摩擦, 故摩擦力矩等于零。

(1) 张丝的计算 常用的矩形截面张丝, 其反作用力矩计算式为:

$$M_a = \frac{bh^3Ga}{3L} + \frac{b^2Fa}{12L} + \frac{b^5hEa^2}{360L} \quad (43-1-2)$$

式中 M_a ——张丝反作用力矩 mgf $\cdot$ cm/90°

G ——材料的切变模量 mgf/cm²

b, h, L ——分别为张丝宽度、厚度和长度 cm

F ——工作张力 mgf

α ——扭转角度 Rad

E ——弹性模量 mgf/cm²

(2) 张丝的尺寸 设 $k = \frac{b}{h}$ 则

$$b = kh \quad (43-1-3)$$

k 为张丝的宽厚比, 一般取 $k=10\sim 20$ 。

因为 $F = \sigma_F \cdot S = \sigma_F \cdot kh^2 \quad (43-1-4)$

式中 σ_F ——张丝的拉应力 mgf/cm², 一般取拉伸强度 σ_B 的20~25%

将(43-1-3)和(43-1-4)代入公式(43-1-2)中, 得

$$M_a = \frac{kh^4Ga}{3L} + \frac{k^3h^4\sigma_F\alpha}{12L} - \frac{k^5h^6Ea^2}{360L} \quad (43-1-5)$$

(43-1-5)式中第三项数值很小, 只占 M_a 的

0.3%, 可以忽略不计, 可求出张丝的厚度

$$h = \sqrt[4]{\frac{M_a}{\frac{kGa}{3L} + \frac{k^3\sigma_F\alpha}{12L}}}$$

将 h 代入(43-1-3)式便可求出张丝的宽度 b 。

(3) 应力核算 张丝总的正应力

$$\sigma = \frac{Ea^2b^2}{12L^2} + \frac{F+g}{bh}$$

式中 g ——可动部分重量 mg

张丝的最大应力应满足 $\sigma_{\max} \leq \frac{1}{4}\sigma_B$

$$\sigma_{\max} = \frac{1}{2}(\sigma_F + \sqrt{\sigma_F^2 + 4\tau^2})$$

式中 σ_B ——拉伸强度(参见表43-1-6)

τ ——张丝的扭应力

对矩形截面张丝的扭应力 τ 可用下式计算:

$$\tau = hG\frac{\alpha}{L} \quad \text{kgf/mm}^2$$

核算结果如不能满足(43-1-8)式的要求, 说明张丝的应力大, 超过允许范围, 因此对张丝的尺寸必须重新计算。

c. 弹片 张丝的外端通常固定在弹片上, 以提高仪表的机械性能。弹片材料要求弹性好, 耐腐蚀性强, 无磁性, 至少在两倍的张力作用后无残余变形。

制造弹片的材料通常有磷青铜, 锡锌青铜等。

3.1.3 比率表的反作用力矩

在比率表中, 不是靠游丝而是靠电磁力产生反作用力矩。可动部分有两个元件装在同一转轴上(图43-1-3), 其中动圈1产生转动力矩, 动圈2产生反作用力矩, 这个反作用力矩也随转角而变。其平衡点取决于两个元件之间的电流比。

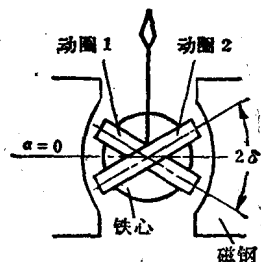


图43-1-3 磁电系比率表结构示意图

比率表在测量技术中常用于测量电参量。如对电阻、电感、电容、频率及各种非电量的测量。此时,

驱动测量机构偏转的能量由外面特殊的辅助电源供给。在比率表中可消除电源电压变化对仪表的影响。

在实际应用中,还有电磁系、电动系、感应系、静电系及整流系比率表。

3.2 阻尼力矩及阻尼器

3.2.1 阻尼力矩

仪表的活动部分由于存在惯性力矩,接入被测量后,指示器不能迅速停在平衡位置,而在其平衡位置附近振动。为了较快的得到测量结果,仪表采用阻尼器吸收可动部分振动能量。阻尼器只在可动部分运动时产生阻尼力矩,且仅与可动部分运动速度成线性关系,与偏转角无关。

阻尼力矩 M_p 为:

$$M_p = P \cdot \frac{d\alpha}{dt}$$

式中 P ——阻尼系数

图 43.1-4 示出在不同阻尼力矩时可动部分运动曲线。

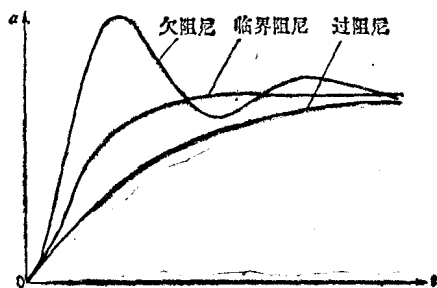


图 43.1-4 不同阻尼力矩时可动部分运动曲线

3.2.2 阻尼器

常用的阻尼器有空气式和磁感应式两种。

a. 空气式阻尼器 空气阻尼器分翼片式和活塞式。前者转动惯量小,机械强度大,目前广泛应用。如图 43.1-5 所示,翼片与可动部分固定在一起,它在阻尼盒中运动,翼片与阻尼盒壁之间空隙很小。当翼片运动时,在它的两侧形成不同的压力,此压力阻碍着翼片的运动,形成阻尼力矩。空气阻尼器多用在精密仪表中。

b. 磁感应阻尼器 图 43.1-6 是常见的磁感应阻尼器。与转轴相连的铝片在永久磁钢构成的磁场

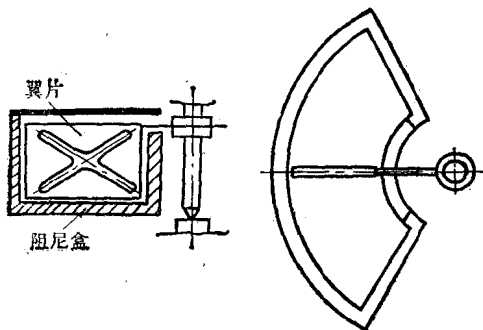


图 43.1-5 空气式阻尼器

中运动,产生涡流。此涡流与磁场相互作用产生阻尼力矩。

在磁电系仪表中,动圈导线绕在铝质框架上或在动圈上绕以短路匝;在感应系仪表中,铝盘在永久磁钢构成的磁场中运动。这些均属磁感应阻尼。

磁感应阻尼器制造和调节方便,效果也较空气式好,但永久磁钢的磁场对某些仪表会引起误差。

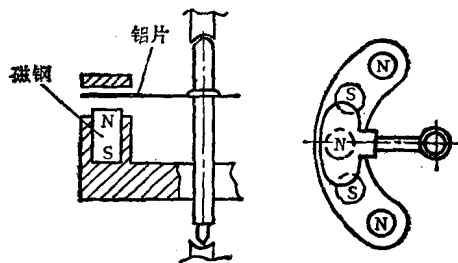


图 43.1-6 磁感应阻尼器

另外还有油阻尼。利用一定浓度的中性矿物油(如硅油)对可动部分产生阻尼。如有的检流计采用油阻尼形式。

3.3 摩擦力矩及可动部分支承装置

3.3.1 摩擦力矩和品质系数

在轴尖-宝石支承的仪表中,当可动部分运动时,在支承处产生一摩擦力矩 M_f 。

$$M_f = M - M_a = M_c = M'_c \cdot \Delta\alpha$$

$$\Delta\alpha = \frac{M_f}{M'_c}$$

式中 M ——转动力矩

M_a ——反作用力矩

M_c ——定位力矩

M'_c ——定位力矩系数, $M'_c = \frac{dM_c}{d\alpha}$

在一般指示仪表中, 可动部分的摩擦力矩 M_f 与可动部分重量 G 的 1.5 次方成比例, 即

$$M_f = CG^{1.5}$$

若仪表偏转 90° 时的转动力矩为 M_{90} , 摩擦误差 γ_f 为

$$\gamma_f = \frac{M_f}{M_{90}} = C \frac{G^{1.5}}{M_{90}}$$

在生产与使用仪表的过程中, 常以实用品质系数来衡量仪表的机械性能, 则

$$K_{pm} = 10 \frac{M'_{90} \alpha_n}{G^{1.5}}$$

式中 K_{pm} ——品质系数

M'_{90} ——定位力矩系数

α_n ——全偏转角

G ——可动部分重量

对于偏转角为 90° 的仪表其品质系数为:

$$K_{pm} = 10 \frac{M_{90}}{G^{1.5}}$$

式中 M_{90} ——转动力矩

在同一种质量的轴尖和轴承的情况下, 实用品质系数可在一定程度上反应仪表的质量, 即品质系数越大, 其摩擦误差和变差越小。但在提高仪表的机械性能的同时还要兼顾电气性能。

张丝支承的仪表中, 不存在摩擦误差, 在设计时不考虑品质系数, 而是引用平衡系数 $K_p = \frac{M_{90}}{G}$ 的概念进行设计计算。

3.3.2 可动部分的支承装置

a. 轴尖-宝石支承 轴尖、宝石的质量直接影响仪表的摩擦误差、变差和寿命。

仪表的可动部分虽然很轻 (一般为几分之一克到几克重), 但由于轴尖的曲率半径很小, 作用于宝石轴承上的压力很大 (可达每平方厘米几十吨重), 为此, 对轴尖、宝石轴承要提出较高的要求。

图 43-1-7 为轴尖-宝石轴承示意图

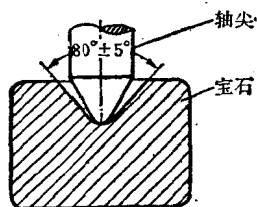


图 43-1-7 轴尖-宝石轴承

轴尖材料应具有较大的硬度, 而且无磁性和不易腐蚀。轴尖-宝石工作部分加工质量要求高, 工作部分表面光洁度达 $\nabla 12 \sim \nabla 14$ 。制造轴尖的材料通常有银亮钢和钴钨合金等。

宝石轴承有很多种类, 在电测量指示仪表中只使用锥形轴承和球形轴承两种。在可动部分重量较轻的指示仪表中采用锥形轴承, 在电度表中, 可动部分很重, 采用球形轴承。固定在安装板上的较低等级的仪表, 将宝石直接嵌在轴承座内 (如图 43-1-8a)。而可携式仪表和在振动条件下工作的仪表, 为避免轴尖和宝石轴承的损坏, 常在宝石下装有起缓冲作用的弹簧 (如图 43-1-8b) 所示。

轴尖和宝石应按标准选用。

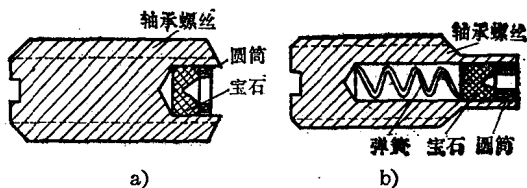


图 43-1-8 宝石轴承的结构

宝石轴承要有较高的硬度和耐磨性, 质料均匀, 无杂质、气孔和裂纹, 易加工, 耐腐蚀, 摩擦系数小等。宝石轴承一般都采用玛瑙和刚玉 (人造宝石) 来制造, 玛瑙的硬度低于刚玉, 但加工容易, 故刚玉轴承只用在精密仪表和电度表中。

为提高电度表的寿命, 在一些电度表中采用倒宝石、双宝石轴承及磁力悬挂轴承。

倒宝石轴承结构将宝石穴朝下放置并与可动部分一起转动, 达到防止灰尘进入或改变摩擦点的目的, 又不增加成本。

双宝石结构是在两个宝石中间放入一颗自由状态的钢珠, 两宝石与钢珠是滚动摩擦, 摩擦力矩小, 钢珠转数只有铝盘转数的一半, 而且钢珠和宝石的接触面不断变化, 使之自行调节在较好的位置上工作, 延长了使用寿命。

磁力悬挂轴承又分磁吸力轴承和磁推力轴承。磁力轴承的制造工艺复杂, 难度大, 磁吸力轴承又较磁推力轴承有较高的同心度要求。由于各向异性铁氧体磁性材料的出现, 使磁推力轴承应用得到推广。图 43-1-9 为磁推力轴承结构。两块磁性相同的磁钢分别固定在可动部分与基架上, 两块磁钢依同性相斥的作用使可动部分悬起来, 并用轴销和石墨承