

电机工程手册

第4篇 电 磁 测 量

(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
210
4-1

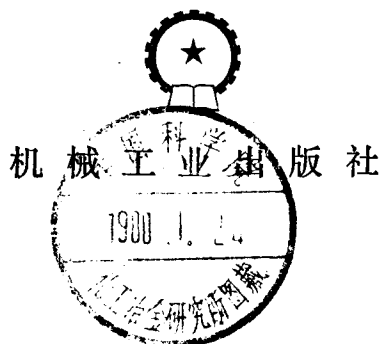
电机工程手册

第4篇 电 磁 测 量

(试 用 本)

机械工程手册
电机工程手册 编辑委员会

1.612.612



本篇主要介绍电量和磁量的测量原理、测量线路及测量中的注意事项,并说明了测量结果的数据处理方法等。本篇共分两章,第1章“电测量”还叙述了电学标准量值的传递及电测技术在非电量测量及自动化中的应用;第2章“磁测量”在介绍磁测原理的同时,还叙述了磁测仪器的工作原理和结构。

电机工程手册

第4章 电磁测量

(试用本)

一机部哈尔滨电工仪表研究所 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)

浙江新华印刷厂印刷

新华书店上海发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 · 印张 $5 \frac{5}{8}$ · 字数 155 千字
1979年9月浙江第一版·1979年9月浙江第一次印刷
印数 00,001—53,000 · 定价 0.45 元

*

统一书号: 15033 · 4629

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,有全国许多地面和部门的工厂、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4篇,由一机部哈尔滨电工仪表研究所主编,哈尔滨电表仪器厂参加编写。许多有关单位对编审工作给予大力支持,在此一并致谢。

机械工程手册 编辑委员会编辑组
电机工程手册

目 录

编辑说明

常用符号表

第1章 电 测 量

1 概述	4-1
1.1 定性认识被测量及明确测量目标	4-1
1.2 选择测量方式	4-3
1.3 选择测量方法	4-3
1.4 选用测量仪器时应考虑的问题	4-3
2 电流、电压的测量	4-4
2.1 中等量值电流和电压的测量	4-5
2.2 电流、电压的精确测量	4-5
2.3 大电流的测量	4-7
2.4 高电压的测量	4-9
2.5 小电流和低电压的测量	4-10
3 功率和电能的测量	4-11
3.1 直流功率和电能的测量	4-11
3.2 单相交流功率和电能的测量	4-12
3.3 功率和电能的精确测量	4-13
3.4 三相有功功率和有功电能的测量	4-14
3.5 三相无功功率和无功电能的测量	4-16
3.6 特殊条件下的功率测量	4-17
4 相位角和频率的测量	4-17
4.1 相位角的测量	4-17
4.2 频率的测量	4-18
5 电阻的测量	4-18
5.1 中值电阻的测量	4-18
5.2 小电阻的测量	4-19
5.3 大电阻的测量	4-20
5.4 电阻的精确测量	4-21
5.5 绝缘电阻的测量	4-23
5.6 接地电阻的测量	4-23
5.7 电阻率的测量	4-24
6 交流电参数的测量	4-25
6.1 交流电桥的应用	4-25
6.2 交流电阻的有功分量及时间常数	

的测量	4-29
6.3 电容及其介质损耗角正切的测量	4-30
6.4 电感、互感及电感线圈品质因数 的测量	4-32
7 误差的评价及测量结果的处理	4-33
7.1 误差的分类	4-33
7.2 产生系统误差的来源	4-34
7.3 消除系统误差的方法	4-34
7.4 随机误差	4-35
7.5 随机误差的分布规律	4-35
7.6 用剩余误差表示的误差公式	4-35
7.7 间接测量时误差的计算	4-37
7.8 间接测量中误差综合定律的扩展 应用	4-38
7.9 从测量结果数据求近似函数关系 式	4-39
8 电测装置的防护	4-40
8.1 干扰来源和抗干扰的一般措施	4-41
8.2 测量线路防护原理及其选择	4-41
8.3 关于电子仪器的常模和共模抑制	4-46
8.4 电测设备组合运用时的抗干扰问 题	4-47
9 电学标准量具的传递	4-47
9.1 电学基准器及其国际比对	4-47
9.2 电学标准量值的传递	4-48
10 电测技术的应用	4-48
10.1 电测技术的发展	4-48
10.2 电测技术在非电量测量中的应用	4-48
10.3 自动测量与生产过程自动化	4-53

第2章 磁 测 量

1 概述	4-54
1.1 磁性材料的基本磁特性	4-54
1.2 基本测量方法	4-58
2 磁场的测量	4-60
2.1 电磁感应法	4-60

VI 自 录

2.2 半导体磁效应法	4-60	4.2 动态磁化曲线、动态磁滞回线的测量	4-70
2.3 核磁共振吸收法	4-61	4.3 铁损的测量	4-73
2.4 磁通闸门法	4-62	4.4 复数磁导率和感应磁导率的测量	4-76
2.5 光泵法	4-63	4.5 脉冲磁特性的测量	4-77
2.6 约瑟夫逊效应法	4-63	5 磁测量技术的应用	4-78
3 静态磁特性的测量	4-64	5.1 直流电机内部空气隙磁场的测量与换向极位置的调整	4-80
3.1 试样选取、磁化、退磁	4-64	5.2 钢件及钢管无损测试和探伤	4-80
3.2 内磁场强度和磁感应强度的测量	4-65	5.3 磁栅测量装置	4-80
3.3 饱和磁化强度、磁化率、温度特性的测量	4-68	附录	4-81
3.4 磁致伸缩系数的测量	4-69	参考文献	4-82
4 动态磁特性的测量	4-69		
4.1 动态测量的一般问题	4-69		

常用符号表

B ——磁感应强度	U_m ——峰值电压
B_m ——磁感应强度峰值	$\bar{U}$ ——平均峰值电压
B_r ——剩余磁感应强度	U_f ——有效值电压
B_s ——饱和磁感应强度	V ——体积
b ——宽度	v ——剩余误差
C ——电容	X_0 ——被测量的真值
C_I ——检流计电流常数	$\bar{X}$ ——有限次测量平均值
C_U ——检流计电压常数	ΔX ——绝对误差
D ——电容器的损耗因数	α ——矩形比
d ——损耗率、厚度	γ ——相对误差
E ——电动势	γ'_p ——核子旋磁比
e ——瞬时电动势	γ'_A ——原子旋磁比
f ——频率	δ ——随机误差、偶然误差、介质损耗角
f_0 ——共振频率(固有频率)	ϵ ——介电常数
H ——磁场强度	λ ——测量列的极限误差、纵向磁致伸缩系数
H_m ——磁场强度峰值	λ_x ——测量结果的极限误差
H_C ——磁感应矫顽力	μ ——绝对磁导率
H_C ——内禀矫顽力	μ_0 ——真空磁导率
I ——电流	μ_r ——相对磁导率
K ——抗干扰比	μ_i ——起始磁导率
k ——变换常数	μ_p ——感应磁导率
L ——自感	μ_m ——振幅磁导率
l ——长度	μ ——复数磁导率
$\bar{l}$ ——平均磁路长度	μ_{ps} ——脉冲磁导率
M ——互感、磁化强度	μ_{rel} ——回复磁导率
m ——质量	μ_{rev} ——可逆磁导率
N ——线圈匝数	σ ——测量时的均方根误差
P ——铁损	σ_x ——测量结果的均方根误差
Q ——无功功率、品质因数	Φ ——磁通
R ——电阻	τ ——电阻器的时间常数
r ——电阻	τ_s ——开关时间
S ——表观功率(视在功率)、面积	χ ——磁化率
T ——周期	η ——系统误差
t ——时间	ω ——角频率
U ——电压、电位差	

第1章 电 测 量

1 概 述

电测量主要指电流、电压、功率、电能、相位、频率、电阻、电感、电容以及时间常数和介质损耗角等的测量。

电测量技术是在对电磁现象及其变化规律进行定量的研究和电能的实际应用中得到不断发展的。现代科学技术对电测量不断提出新的要求,同时也以最新的成就武装了电测量技术,六十年代起,又有了新的发展,主要体现在以下几方面:

(1) 采用新原理、新技术,使测量准确度和稳定性不断提高,逐渐与自然基准建立联系。

(2) 电子技术的应用使测量范围扩大,灵敏度有所提高。

(3) 通过高速模-数变换和高速采样测量实现了多路、快速、自动化测量与电子计算机的联用,构成综合自动化测量计算控制系统。

(4) 有比较成熟的测量理论和抗干扰防护手段。

(5) 不断出现各类新型传感器,使非电量电测技术得到迅速发展。

本章主要介绍电测量基础技术及其应用,所用仪器仪表参见第43篇“电工仪器仪表”。现先将电测量技术中一些基本的概念、方法及步骤等说明如下。

首先,什么是“测量”?“测量”是指用实验方法,将被测量(未知量)与已知的标准量(已知量)进行比较,以求得被测量的值、达到定量的一个认识过程。

从理论上讲,被测量的真实值是可以求得的,但受客观及主观因素的限制,实际求得的是近似值,称它为求得值,随着测量技术的提高,求得值将不断趋近于真实值。求得值与真实值的差值就是误差。测量时应尽力减小误差,也就是把误差控制在允许范围之内。

在测量技术领域中,上述求得值与真实值的差值称为绝对误差。它与被测量具有同样的量纲,其符号可正可负。绝对误差虽能说明求得值对真实值

的偏离程度和正负方向,但不能说明在不同测量过程中所得到的测量结果哪个更准确些。为此又提出了相对误差的概念。相对误差是以绝对误差值与真实值的百分比来表示。但真实值常是不确知的,因而在实际计算中,相对误差都以绝对误差值与求得值的百分比来表示。相对误差可以说明测量的准确度。例如第一次测量的相对误差为0.1%,第二次测量的相对误差为0.5%,则第一次测量比第二次测量更为准确,也可说第一次测量的准确度高于第二次测量的准确度。

整个的测量过程,大体包括三个阶段:

a. 准备阶段 首先要明确“被测量”的性质及测量所要达到的目标,然后选定测量方式并找出测量依据的函数关系(在间接测量中更是必需的),选择合适的测量方法及相应的测量仪器设备。

b. 测量阶段 建立测量仪器所必需的测量条件,慎重地进行测量操作、认真记录测量数据。

c. 数据处理阶段 根据记录的数据,考虑测量条件的实际情况,进行数据处理,以求得测量结果和测量误差。

其中准备阶段是整个测量工作的基础。在此阶段要确定很多互相联系、互相制约的问题,因此,要根据需要和可能全面考虑,进行合理的选择。下面分别叙述有关的问题。

1.1 定性认识被测量及明确测量目标

1.1.1 按测量特点定性认识被测量

测量是定量认识,但在测量之前,应对被测量作定性认识及划分(参见表4-1-1)。

(1) 从测量角度看,电量与电参量的区别是:电量是指有源的量,具有一定的能量,可以直接用指示仪表测量;电参量是指电路元件的参量,是无源的量,测量时必须有试验电源,通常多用比较仪器测量。

(2) 电量有直流量和交流量之分,是选择测量仪器的主要依据。目前,交流测量不如直流测量准

表 4.1-1 被测量的定性划分

被 测 量	电 量							电 参 量			
	电流	电压	功率	电能	电荷	相位	频率	电阻	电容	电感	互感
被测量值的大小范围	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
被测量信号源的功率及内阻	○	○	○	○	○	○	○				
被测对象的允许功率								○	○	○	○
直流量	○	○	○	○	○			○			
交流量的频率大小范围, 波形失真大小及波形特点	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○
动态与变化速度	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
其他: 如特殊条件(防爆、高压、高温、高湿、低温、放射性、远距离、工业干扰、振动等)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

注: “○”为对被测量定性划分要考虑的项目。

确,尤其是远离工频时误差越大,交流量通常需要转换为直流量以进行精确测量。相位和频率都是交流量的特征量。电参量本身没有直流、交流之分,在标明直流和交流时,是说明它们的工作状况和测量条件。

(3) 波形影响是交流测量中的重要问题之一,在使用有电子器件的仪表如整流式万用表,晶体管和电子管电压表时更要注意。标准波形是正弦波。波形偏离正弦波时叫波形失真。工业电网的波形失真度不大于5%;测量专用试验电源的波形失真度不大于2%,要求严格时应小于0.2%。对波形失真的被测电量要选择特殊的仪表,如选择有效值电压表、峰值电压表、平均值电压表等来测量。

(4) 被测量的数值范围很宽,从测量角度考虑,

表 4.1-2 几种被测量的数值范围

种 类	小	中	大
直流电流 A	$10^{-17} \sim 10^{-6} \sim 10^2 \sim 10^5$		
交流电流 A	$10^{-7} \sim 10^{-3} \sim 10^3 \sim 10^5$		
直流电压 V	$10^{-9} \sim 10^{-4} \sim 10^2 \sim 10^6$		
交流电压 V	$10^{-7} \sim 10^{-3} \sim 10^3 \sim 10^5$		
电 阻 Ω	$10^{-9} \sim 10^{-1} \sim 10^6 \sim 10^{20}$		
电 容 F	$10^{-18} \sim 10^{-10} \sim 10^{-4} \sim 10^2$		
电 感 H	$10^{-5} \sim 10^0$		

常分为大、中、小三段,见表4.1-2。

中量值是经常遇到的,其测量技术比较成熟。小量值的测量由于受测量仪器灵敏度及各种干扰的限制,大量值的测量则受绝缘、防护、测量仪器灵敏度及传感器性能等限制,因此小量值和大量值均较难于测量得很准确。

(5) 按被测量与时间的函数关系,测量可分为如下三种:

分 类	被测量与时间的函数关系	使用测量仪器仪表
静态测量	认为被测量在测量时不变,测量结果用单一读数来表示	如用指示仪表测量功率:读取一个读数
动态测量	被测量随时间(或其他量)而变,测量结果用图线描绘出其动态过程	如用记录仪,示波器记录功率随时间的变化曲线
积算测量	测量结果是在整个测量的这段时间内每一个单位时间的被测量的累加值	如用电度表测电能,实际是每单位时间功率的总和

1.1.2 明确测量目标

测量目标主要是明确测量的允许误差,以便按此目标选择合理的方式方法及相应的测量仪器。

测量结果的误差受多种因素的影响,一般都大于所用测量仪器的误差,为此,所选用的主要测量仪器的误差应小于测量允许误差的 $1/3 \sim 1/5$,以便保证在数据处理阶段求得测量结果的误差符合要求。

1.2 选择测量方式

1.2.1 直接测量

将被测量与标准量直接比较,或用事先刻度好的测量仪表进行测量,从而求得被测量的数值,这种测量方式称为直接测量。例如,用电流表测量电流即属于直接测量。

1.2.2 间接测量

未知被测量按某种函数关系与几个便于测量的量相联系,先分别直接测量这几个量的数值,再通过函数关系求得未知的被测量,这种测量方式称为间接测量。例如利用 $R=U/I$ 的关系式,直接测出 U 、 I 后,即可间接求得 R 。

1.2.3 组合测量

如被测量有多个,而且能以某些可测量的不同组合形式表示(或者改变测量条件来获得某一可测量的不同组合)时,可先通过直接或间接地测量这些组合的数值,再通过解出联立方程组而求得未知的被测量数值,这种测量方式称为组合测量。例如,要求测量电阻温度系数 α 、 β 及 20°C 的电阻值 r_{20} 时,可先测出不同温度的电阻 r_{t1} 、 r_{t2} 、 r_{t3} ,再通过求解下述联立方程组而求得 α 、 β 及 r_{20} 。

$$r_{t1} = r_{20} - [1 + \alpha(t_1 - 20) + \beta(t_1 - 20)^2]$$

$$r_{t2} = r_{20} - [1 + \alpha(t_2 - 20) + \beta(t_2 - 20)^2]$$

$$r_{t3} = r_{20} - [1 + \alpha(t_3 - 20) + \beta(t_3 - 20)^2]$$

1.3 选择测量方法

在测量方式选定之后,即可根据对准确度的要求、实验条件和仪器设备的特点,选择以下合适的测量方法。

1.3.1 直读法

用直接指示的仪器仪表读取被测量数值的方法称直读法。这种方法比较简便。

1.3.2 比较法

将被测量与标准量通过比较仪器进行比较,从而求得被测量数值的方法称为比较法。此法一般适用于高准确度的测量,测量时需要较准确的测量仪器,对实验条件如温度、湿度、振动、防电磁干扰有较高的要求。

根据被测量与标准量进行比较时的具体特点。比较法又分为三种。

a. 差值法 测出被测量与标准量的差值,从而求得被测量的方法称差值法。差值法的测量误差取决于标准量的误差及测量差值的误差,差值越小,则测差值的误差对测量误差的影响越小,如差值为千分之一,测差值的误差为百分之一时,则测差值的误差反映在测量误差中仅为十万分之一。差值法特别适用于标准电池的互相比对,参见本章7.2。

b. 零值法(平衡法) 在测量过程中,连续改变标准量,使之与被测量相等,亦即差值为零,从而确定被测量的方法称零值法。由于比较时测量电路处于平衡状态,故又称平衡法。电位差计就是一种零值法测量仪器。

c. 替代法 将被测量与标准量先后替代接入同一测量装置,在保持测量装置工作状态不变的情况下,用标准量值来确定被测量的方法称为替代法。当标准量为可调时,用调标准量的方法保持测量装置工作状态不变,则称为完全替代法;事实上标准量多为不可调的,测量装置此时允许有微小的调整,这种方式称为不完全替代法。

在替代法测量中,由于测量装置的工作状态不变或只有微小变动,装置的内部特性及各种外界因素对测量所产生的影响是完全或绝大部分相同的,在替代时可互相抵消,因而测量误差极小,所以准确度就取决于标准量的误差。替代法常用于同名义值标准量具,如标准电阻的测量,参见本章5.2。

1.4 选用测量仪器时应考虑的问题

选用测量仪器时要全面考虑上述各项要求,并根据需要和可能进行合理选择。在实际测量中,还有如下几个应予考虑的问题。

1.4.1 仪器仪表准确度等级

将仪器仪表准确度等级数除以100或以准确度

等级规定的公式来表明其基本误差的最大允许值。例如仪表的准确度等级为0.1级时,就表示其基本误差的最大允许值为上量限 $\pm 0.1\%$,仪器仪表用更高等级的标准表进行校验时,可以确定全量限中误差值的大小,并列出差错表,可作为实际测量时校正测量结果之用。

用仪器仪表进行测量时,除由准确度等级所表示的基本误差以外,还要考虑测量时其他因素的影响,例如在偏离规定的工作条件时所产生的附加误差、线路热电势的存在、测量者的人为因素……等等。

1.4.2 工作条件

测量仪器仪表只有在规定的正常工作条件下使用才能保证对基本误差的要求,当用于不符合规定的正常工作条件时,会出现附加误差。以温度影响为例,每超出规定的正常工作温度 10°C 时,指示仪表和电桥的温度附加误差都将接近于其基本误差值。

产生附加误差的因素很多,如温度、位置、外磁场、供电电压及频率的波动、振动、外电场、波形失真等等,在产品说明书上都有规定,应予以充分注意。

1.4.3 仪表量程的选择

在选择仪表量程时不仅要使量程复盖被测量值,而且应使被测量值与仪表的上量限接近。一般来说,指示仪表的基本误差都是用“引用误差”表示的,在标尺的工作部分都能保证不超过基本误差,而其“相对误差”却随着被测值的减小而成比例地增大。如量程为150伏的0.1级电压表,在测150伏时,相对误差为 $\pm 0.1\%$,在测15伏时的相对误差可能增大到 $\pm 1\%$;又如量程为30伏的0.2级电压表,在测15伏时,相对误差可能增大到 $\pm 0.4\%$ 。由此可见合理选择仪表量程的重要性。比较法测量仪器也有类似问题。

1.4.4 配套测量器具的选择

a. 扩大量程器具 配合测量时,要求扩大限量器具(分流器、分压器、附加电阻、互感器等)的准确度等级应优于仪器仪表准确度等级的一个等级以上。由测量仪器与扩大限量器具及标准电池、电阻、试验电源等配合而组成测量装置时,要按对总体测量误差的要求,合理地进行误差分配(见本章7.8)。

一般来说,测量误差主要是取决于测量仪器和标准量具的误差,其他辅助设备和器具所产生的误差应更小。

b. 选配试验电源 电源的稳定性直接影响测量结果,而稳定性又和电源容量有关。如指示电表校验台配蓄电池时,一般选其容量不小于400安培小时,电子稳压器、稳流器应使用在其负载额定值的一半。直流电位差计对电源的稳定性要求较高,在选配电源时,其稳定性应比电位差计准确度高一个数量级,而直流电桥对电源稳定性则没有过高的要求。在进行精确测量时,为消除测量线路热电势的影响,常要进行换向操作,所以试验电源应能允许开路。选用交流电源时,要注意波形质量。

c. 选配平衡检示器(检流计、指零仪) 选配平衡检示器灵敏度要合适,如过低将影响测量准确度,过高将难于平衡。一般来说,当测量仪器的调节盘改变了相当于测量误差值的五分之一时,检示器就应有明显的偏差指示(如1毫米)。使用检流计时还要注意电阻匹配,检流计应工作在临界阻尼或略欠阻尼状态。使用交流检示器时除灵敏度外还要注意其频率特性。

2 电流、电压的测量

电流和电压都是基本的电量,在测量中等量值时准确度较高,测量高、低量值时,现有测量仪器仪表准确度较低。应根据电流、电压量值大小、误差要求来选用测量仪器仪表,可参看表4.1-3和4.1-4。

表 4.1-3 测量电流用仪器仪表的范围和误差

仪器仪表	测量范围 A	误差范围 %
动电容放大器	直流 $10^{-15} \sim 10^{-5}$	5~2
电子测量放大器	直流 $10^{-12} \sim 10^{-4}$	2~0.1
	交流 $10^{-10} \sim 10^{-4}$	0.5~0.1
检流计	直流 $10^{-11} \sim 10^{-6}$	根据定标
指示仪表	直流 $10^{-7} \sim 10^2$	2.5~0.1
	交流 $10^{-4} \sim 10^2$	2.5~0.1
直流电位差计	直流 $10^{-7} \sim 10^4$ ②	0.1~0.005
分流器	直流 $10 \sim 10^4$ ①	0.5~0.02
霍尔效应大电流仪	直流 $10^3 \sim 10^4$	2~0.2
直流互感器	直流 $10^3 \sim 10^5$ ①	2~0.2
交流互感器	直流 $10^{-1} \sim 10^4$ ①	0.2~0.005
磁总加器	直流 $10^4 \sim 10^5$	0.5

① 指扩大量程器具性能。

② 根据选用的辅助设备而定。

表 4-1-4 测量电压用仪器仪表的范围和误差

仪 器 仪 表	测量范围 V	误差范围 %
电子测量放大器	直流 $10^{-7} \sim 10^{-8}$	2.5~0.1
	交流 $10^{-7} \sim 10^{-2}$	0.5~0.1
检 流 计	直流 $10^{-9} \sim 10^{-7}$	根据定标
	直流 $10^{-3} \sim 5 \cdot 10^5$ ②	2.5~0.1
指示仪表	交流 $10^{-3} \sim 5 \cdot 10^5$	2.5~0.1
	直流 $10^{-4} \sim 2$	0.1~0.001
直流电位差计	交流 $10^{-4} \sim 2$	0.5~0.1
交流电位差计	直流 $10^{-4} \sim 10^3$	0.1~0.002
数字电压表	交流 $10^{-4} \sim 10^3$	0.1~0.05
附加电阻	直、交流 $10 \sim 10^3$ ①	0.5~0.01
分 压 器	直交流 $10 \sim 10^3$ ①	0.2~0.001
电流互感器	交流 $10^2 \sim 10^5$ ①	0.5~0.005

① 指扩大量程器具性能。

② 静电系电压表可直接测量交、直流线路中的高电压。

2.1 中等量值电流和电压的测量

2.1.1 测量线路

测量电流时安培表应与负载串联连接、测量电压时伏特表应与负载并联连接。测量线路如图 4-1-1 和 4-1-2。

测电流时，串入测量线路的仪表内部电阻 r 应远小于负载电阻 R ，最不利时，串入的电阻与负载电阻之比应不大于允许相对误差($\gamma\%$)的 $\frac{1}{5}$ ，即 $\frac{r}{R} \leq \frac{1}{5} \left(\frac{\gamma}{100} \right)$ 。否则仪表串入后将改变被测电流值。

测电压时，并入测量线路的仪表内部电阻 r 应远大于负载电阻 R ，最不利时，负载电阻与并入的电

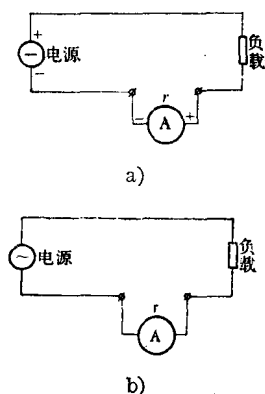


图 4-1-1 测量电流

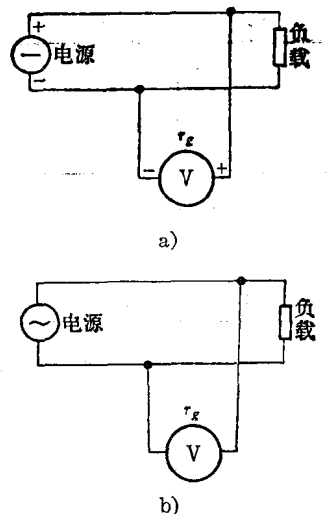


图 4-1-2 测量电压

阻之比应不大于允许相对误差($\gamma\%$)的 $\frac{1}{5}$ ，即

$$\frac{R}{r_g} \leq \frac{1}{5} \frac{\gamma}{100}。$$

2.1.2 用指示仪表测量

测量线路参见图 4-1-1 和 4-1-2。测量误差主要取决于所选用指示仪表的误差。仪表的选型可参见本手册第 43 篇第 1 章 1~4 节。

如被测线路有接地时，应把电流表接在低电位端，原则上，电压表的负端或公用端钮应接低电位端。有些电压表端子上有接地标志，接线时尤应注意。

2.2 电流、电压的精确测量

电流、电压的精确测量主要采用比较法进行。在直流量的精确测量中，由于有电势和电阻标准量具，所以用比较法测量电流、电压，可达到很高的准确度。在交流量的精确测量中，是由交直流比较仪先把交流量与直流量进行比较，再通过直流量的精确测量而达到精确测量交流量的目的。高准确度数字电压表也用于电流、电压的精确测量，其测量速度比用比较法快得多。

2.2.1 用直流电位差计测量直流电压(电势)

测量线路如图 4-1-3。

检流计开关 K ，接 1 侧，调 R_p 改变 I ，使检流计指零，则工作电流 I 被调定。

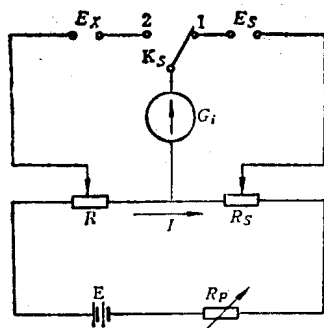


图 4-1-3 用电位差计测直流电压的线路

E_x —被测电压(电势) E_s —标准电池电势 E —供电电源 G_i —检流计 R_s —确定工作电流及温度补偿盘电阻 I —工作电流 K_s —转换开关(位置1确定 I 、位置2测量) R —测量盘电阻 R_P —工作电流调节盘电阻

$$I = \frac{E_s}{R_s}$$

检流计开关 K_s 接2侧,调 R 使检流计指零,则得

$$E_x = RI = \frac{R}{R_s} E_s$$

测量误差取决于 E_s 的误差及 R 与 R_s 的比率误差。其误差范围为 $10^{-3} \sim 10^{-6}$ 。用电位差计测量时,不消耗被测电路的能量,故可以测量电势。电位差计的测量范围为10毫伏~2伏,最小分度值为0.1~1微伏。

当被测电压的数值大于电位差计的量限时,可采用电阻分压器扩大量限。最高可达1500伏。关于直流电位差计详见第43篇第1章第1节。

2.2.2 用直流电位差计测直流电流

测量线路如图4-1-4。

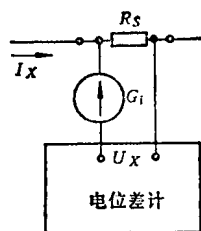


图 4-1-4 用电位差计测量直流电流的线路

R_s —标准电阻 I_x —被测电流 G_i —检流计 U_x —电位差计测得的位置差

被测电流 I_x 流经标准电阻 R_s , 在其上产生电势差 U_x , 用电位差计测此电势差, 即可求得被测电流。

$$I_x = \frac{U_x}{R_s}$$

测量时应注意:

- (1) 通过标准电阻的电流值不应超过其允许值;
- (2) 标准电阻的电流端接被测电流, 而电位端接电位差计。

由上述可见, 测电流的误差比测电压的误差多了一个误差因素 γ_{R_s} 。测得范围为 $10^{-7} \sim 10^4$ 安培。

2.2.3 交直流比较仪测量交流电压、电流

能把交流电流、电压变换为直流量的比较仪有

表 4-1-5 交直流比较仪类型表

名 称	热电势比较仪	电动式比较仪	静电式比较仪	电子变换器
原 理	交直流量加于热电变换器, 当热偶热电势相等时, 交直流的有效值相等	当电动系机构与磁电系机构力矩相等时, 交直流有效值相等	当交流机构与直流机构力矩相等时, 交直流有效值相等	基于电子器件的整流原理, 交流量的平均值等于直流量
变换误差 %	0.1~0.01	0.1~0.02	0.01~0.001	0.5~0.05
频 带 Hz	较宽(0~10 ⁴)	较窄(0~10 ³)	宽(0~10 ⁷)	较窄(0~10 ³)
交直流量作用次序	异时(同时)	同 时	同时(异时)	同 时
变 换 时 间	长	短	较 长	最 短
过 载 能 力	差	好	较 差	好
适 用 范 围	电流、电压、功率	电流、电压、功率	电流、电压、功率	电流、电压
是否能自动化	手 动	手动、半自动	手 动	自 动

很多种,其主要类型如表4.1-5所列四类。

a. 热电势交直流比较仪 线路原理之一,如图4.1-5所示。交流量接入热电比较仪,产生的热电势用记忆电位差计记忆。然后将交流量断开,接入直流量,改变直流量使其产生的热电势等于交流量产生的热电势,则交流量的有效值即相当于直流量的数值,直流量用直流电位差计测得。

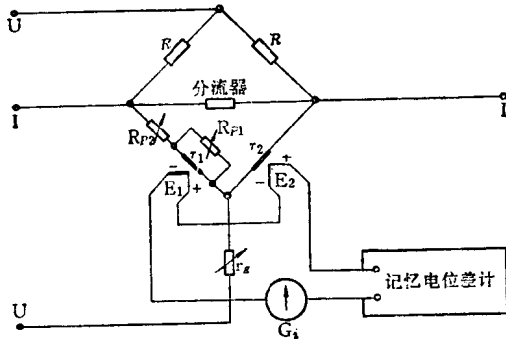


图 4.1-5 热电势比较仪的原理线路图

U—U 端—接被测交流电压或直流比较电压
I—I 端—接被测交流电流或直流比较电流
R—分流电阻 r_1, r_2 —热电变换器加热丝电阻
 E_1, E_2 —热电变换器输出电势 G_i —检流计
 R_P, R_N —调整电阻 r_g —附加电阻

b. 电动式比较仪 线路原理之一,如图4.1-6所示。电动式比较仪由电动系测量机构及磁电系测量机构两部分构成。交流量 $I_{\sim}$ 或 $V_{\sim}$ 按电动系电流表或电压表线路接法接入机构,同时直流电流 I 接入磁电系机构,两个机构产生的力矩方向相反,调

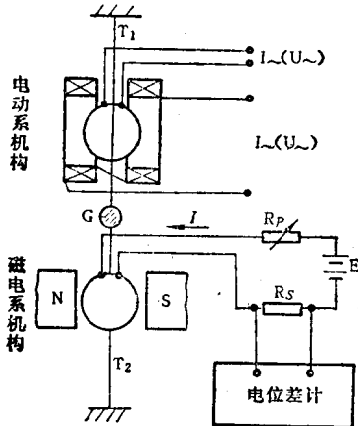


图 4.1-6 电动式比较仪的原理线路图

$I_{\sim}(U_{\sim})$ —接入被测交流电流(或电压) I —直流平衡电流 R_P —调节电阻 E —直流稳压电源 R_S —标准电阻 G —光反射镜 T_1, T_2 —上下张丝

整直流电流 I , 当光标指零时, 两力矩相等, 此时交流量有效值即等于相当的直流量。直流电压从标准电阻 R_s 取出用直流电位差计或数字电压表测得。

c. 静电式比较仪 线路之一, 原理如图4.1-7所示。主要采用象限式静电计, 在相对的两象限固定片 I、III 与动片 n 间接入交流电压 $U_{\sim}$, 而在另两象限固定片 II、IV 与动片 n 间接入直流电压 U_{-} , 交流电压与直流电压所产生的力矩 $M_{I III}$ 和 $M_{II IV}$ 方向相反。调节直流电压, 当指零时, 两力矩相等。交流电压有效值即等于直流电压值, 此时直流电压值即可用直流电位差计来测量。在比较交流电流时, 需用交流标准电阻取出电位差, 再加到象限式静电计电压端钮上。

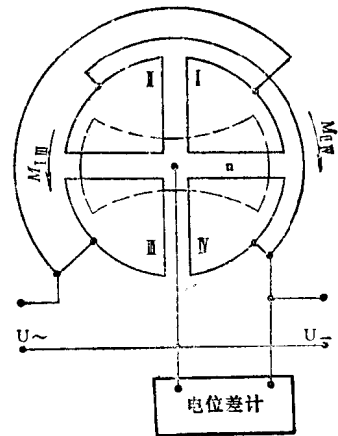


图 4.1-7 静电式比较仪的原理线路图

$U_{\sim}$ —被测交流电压 U_{-} —直流平衡电压 n —动片
I、II、III、IV—象限固定片 $M_{I III}$ — $U_{\sim}$ 在象限固定片 I、III 与动片间产生的转动力矩 $M_{II IV}$ — U_{-} 在象限固定片 II、IV 与动片间产生的转动力矩

2.2.4 用数字电压表测量交直流电流、电压

数字电压表能快速又比较准确地测量直流电压, 误差可小于 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ 。测直流电流时, 需将被测电流通过标准电阻, 取出其电位差, 再用数字电压表测量。测交流量时, 需配用交直流变换器将交流量变换为直流电压再行测量。此时误差需加上变换器的误差。测量接线时, 要注意高、低电位端。

2.3 大电流的测量

测直流大电流, 可用扩大量程器具来扩大指示仪表的量限, 或用专门的大电流测量仪来测量。近来又出现了测量直流大电流的激光仪器。

测交流大电流常用电流互感器, 扩大指示仪表量限来测量。

2.3.1 用外附分流器扩大指示仪表量限

标准外附分流器的额定电流从几十安培到一万安培。在分流器电流端通过额定电流时, 在电压端将产生 75 毫伏额定电位差。接线如图 4-1-8 所示, 将相应电压值的毫伏表经规定电阻值的导线接入电位端, 则所测电位差的大小反映被测电流之数值即

$$I_x = \frac{I_s}{U_s} U$$

式中 I_s ——分流器额定电流

U_s ——分流器额定电压

U ——毫伏表指示值

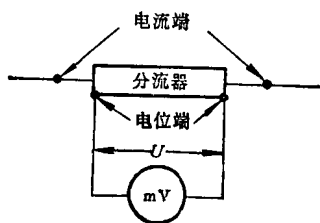


图 4-1-8 用外附分流器扩大指示仪表量限

2.3.2 用磁总加器测量直流大电流

磁总加器用于测量多路电流的总和, 目前可测 20 路, 每路电流可达 6000 A, 即可测 120 kA 的直流

大电流, 误差为 0.5%, 线路如图 4-1-9 所示。磁总加器的核心是倍频调制器, 由三个环形高导磁率铁心(其中 A_1 、 A_2 作总加用、B 作输出用)和输入、激磁、输出、反馈绕组 n_I 、 n_ω 、 $n_{2\omega}$ 、 n 构成。先将各大电流电路各分流器的输出直流电压 U 经过输入回路变换成与之成正比例的直流电流 I , 再将这电流 $I_1 \cdots I_{20}$ 分别加于绕在二总加铁心上的相应绕组中, 它们相加的总值决定着铁心的直流激磁状态。当接入频率为 ω 的交流激磁电流 I_ω 时, 利用倍频调制原理, 在对接的两个检测绕组 $n_{2\omega}$ 中可得二倍于激磁电流频率的电势 $U_{2\omega}$, 测此电势即得 20 路分流器电流的总和。为提高测量的准确度及稳定度, 在输出回路中又通过反馈绕组 n 输入反馈电流 I_ϕ 。输出回路包括选频放大、解调相敏整流、功率放大三个部分。激磁频率一般采用 400 Hz。

2.3.3 霍尔大电流测量仪

用霍尔大电流测量仪可测量集中于母线的大电流, 它由围绕着母线的磁轭及在磁轭间隙中的霍尔片组成, 如图 4-1-10。霍尔片是一种半导体元件。当在磁轭中由被测母线电流产生磁场 H 时, 则在霍尔片的一对边上产生霍尔电势 $E = KHI_0$, 式中 I_0 为在另一对边上加入的恒定电流, K 为霍尔常数。 E 与 H 有单值函数关系, 测量霍尔电势即可测得磁场强度 H , 进而求得母线电流的大小。这种测量仪的误差约为 2~0.2%。

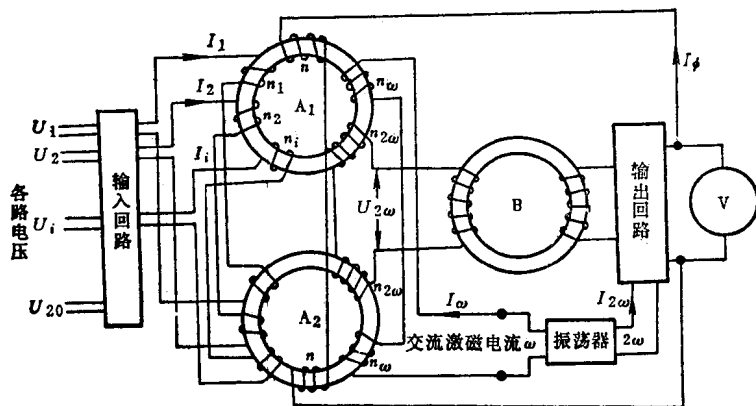


图 4-1-9 用磁总加器测大电流线路图

$U_1 \cdots U_i \cdots U_{20}$ ——分别为各分流器取出的直流电压 $I_1 \cdots I_i \cdots I_{20}$ ——与 $U_1 \cdots U_i \cdots U_{20}$ 成正比的直流电流 $n_1 \cdots n_i \cdots n_{20}$ ——对应于 $I_1 \cdots I_i \cdots I_{20}$ 的激磁绕组 A_1 、 A_2 ——总加铁心 n ——反馈绕组 n_ω ——交流激磁绕组 $n_{2\omega}$ ——倍频检测绕组 $U_{2\omega}$ ——倍频电压 I_ω ——交流调制激磁电流 $I_{2\omega}$ ——解调电流 I_ϕ ——直流反馈电流 B ——输出铁心

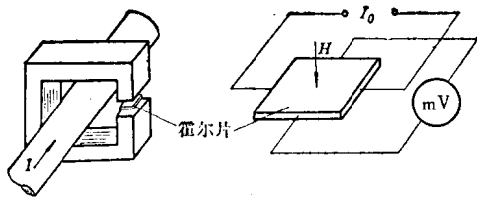


图 4-1-10 霍尔大电流测量仪原理图

I —被测直流大电流 H —由 I 产生的磁轭空隙中的磁场 I_0 —恒定电流 mV —毫伏表

2.3.4 用直流互感器测量大电流

测量 10000 A 以上的直流电流时,如用分流器,不但很重,同时误差也大,所以采用直流互感器进行测量,同时还可实现与二次电路的隔离。直流互感器是由两个铁心及四个绕组构成,如图 4-1-11。铁心需用高磁导率的材料制造。两个二次绕组是反向串联的,在二次回路中接入辅助交流电压。当铁心磁滞回线矩形特性比较理想,并且二次回路电阻很小时,则二次交流电流随一次电流的增加而增加,直到两铁心分别处于饱和与非饱和状态,对一个铁心来说,则上半周处于饱和状态,下半周处于非饱和状态,此时一次回路电流 I_1 与二次回路电流 I_2 有如下关系: $I_1 = \frac{n_2}{n_1} I_2$, 式中 n_1 为一次回路的绕组匝数, n_2 为二次回路的绕组匝数。 I_2 经桥式整流电路用直流安培表进行指示。由于上述条件不能完全实现,所以直流互感器存在的误差约为 0.5~1%。

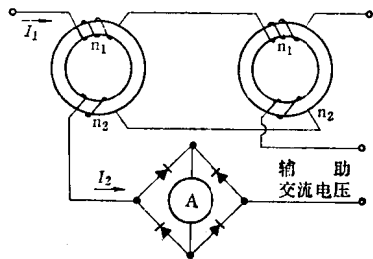


图 4-1-11 用直流互感器扩大指示仪表量限

I_1 —被测直流电流 n_1 —两个相同的串联一次绕组
 n_2 —两个相同的反相串联二次绕组 I_2 —交流电流
 A—直流安培表

2.3.5 用交流电流互感器扩大指示仪表量限

交流电流互感器一方面可以扩大量限,另外还起到主线路与测量线路间的隔离作用,对测量高压

下的电流尤为重要。互感器的变比误差由千分之几至万分之几,二次电流的额定值根据国家标准规定为 5A,选用仪表很方便。在用交流互感器测大电流时,为防止感应高电压,二次回路绝对不允许开路。另外,为防止一旦互感器被击穿而发生人身危险,在使用时,二次回路的接地端钮必须接地。

电流互感器的一次回路电流 I_1 , 匝数 n_1 与二次回路的感应电流 I_2 、匝数 n_2 有如下关系: $I_1 = \frac{n_2}{n_1} I_2 = K I_2$, 式中 $K = \frac{n_2}{n_1} = \frac{I_1}{I_2}$, 通常称为电流互感器的变比。用交流安培表测出 I_2 , 即可测得 I_1 。原理线路如图 4-1-12 所示 (参见第 43 篇第 6 章第 2 节)。

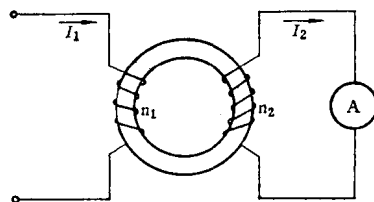


图 4-1-12 用交流电流互感器扩大指示仪表量限

2.4 高电压的测量

测量高电压时,交直流电路可用附加电阻或电阻分压器、交流电路可用电容分压器或电压互感器来扩大电压测量范围。若用静电系电压表可直接测量直流或交流 250 kV 的高电压。

2.4.1 用附加电阻测量

用附加电阻测量高电压,适用于直流及低频 (0~1000 Hz) 交流电路,电压一般不超过 1500 V。测量线路见图 4-1-13。指示仪表选用全偏转电流

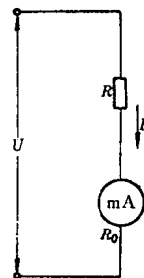


图 4-1-13 用附加电阻扩大指示仪表量限

U —被测电压 R —附加电阻 I —电流
 mA —毫安表(测直流时为磁系,测交流时为整流系) R_0 —毫安表内阻

很小的毫安表(1~15mA),通过的电流为 $I = \frac{U}{R+R_0}$ 。当电压较高时 $R_0 \ll R$,则 $I = \frac{U}{R}$ 。因工作在高压下,故选择附加电阻时要有足够的允许功率和绝缘强度。

在交流电压测量电路中,附加电阻的电抗分量要小,以减少频率误差。

2.4.2 用电阻分压器测量

当将两个电阻串联接入被测电压时,在两个电阻上的电压分配与其电阻值成正比, U_1 与 U_2 的关系为: $U_1 = \frac{R_1+R_2}{R_2} U_2$,如图4-1-14。用电压表测出 U_2 ,即可求得 U_1 。但要求电压表的内阻 R_0 远大于 R_2 ,否则 R_0 对 R_2 的分流作用将使 U_1 与 U_2 的关系发生变化。如用电位差计测 U_2 ,当电位差计平衡时,可以满足 R_0 极大的条件,故电阻分压器常用于扩大电位差计的量限。

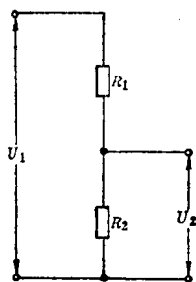


图 4-1-14 用电阻分压器扩大指示仪表量限

U_1 —被测电压 U_2 —分压电压 R_1 、 R_2 —分压电阻

2.4.3 用电容分压器测量

电容分压器原理与电阻分压器相同,主要用来扩大静电系电压表的量限。线路如图4-1-15。要求静电系电压表的阻抗 Z_0 远大于分压器的阻抗 Z_2 ,即 $C_0 \ll C_2$ 。应选漏电小的电容器作分压器,否则在低频时将产生电阻分压效应造成误差。

2.4.4 用交流电压互感器测量

电压互感器主要用来扩大交流电压表的量限,线路如图4-1-16。通常电压互感器二次额定电压为100伏。电压互感器一次回路并联于被测线路电压 U_1 ,其匝数为 N_1 ,二次回路的电压 U_2 接电压表,匝数 n_1 与 n_2 有如下关系: $U_1 = \frac{n_1}{n_2} U_2 = K U_2$,式中

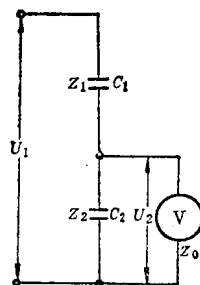


图 4-1-15 用电容分压器扩大指示仪表量限

U_1 —被测电压 U_2 —分压电压 C_1 、 C_2 —分压电容 Z_1 、 Z_2 —分压阻抗 Z_0 —静电系电压表内阻抗 V —静电系电压表

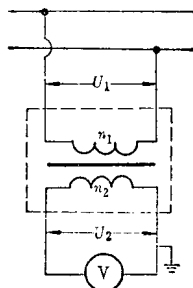


图 4-1-16 用交流电压互感器扩大指示仪表量限

U_1 —一次回路的线圈电压 n_1 —一次绕组的匝数 U_2 —二次回路线圈的电压 n_2 —二次绕组的匝数 V —交流电压表

$K = \frac{n_1}{n_2} = \frac{U_1}{U_2}$ 称为电压互感器的变比。用交流电压表 V 测得 U_2 ,即可求得 U_1 。

在使用时,二次回路不允许短路。电压互感器对仪表阻抗有一定匹配要求(参见第43篇第1章)。

2.5 小电流和低电压的测量

小电流和低电压的测量,由于外界电磁干扰的影响,常产生很大的测量误差,为了消除干扰,对所选用仪表的要求,要有相当高的灵敏度,通常采用检流计及各类放大器来达到所需的灵敏度。

2.5.1 用检流计测小电流和低电压

检流计用于测量时需先经过定标,确定电流或电压常数,然后才可进行测量。

检流计的规格很多,可以适应不同需要,其灵敏度通常用电流常数或电压常数表示。目前可以做到的电流常数 K_I 为 10^{-11} A/mm;电压常数 K_U 为 10^{-8} V/mm。