

电气工程实验技术

(专业技术基础部分)

主 编 王雷 章艺
副主编 孙怡 于静

山东大学出版社

231364

2

TM-33/28

电气工程实验技术

主 编:王雷 章艺
副主编:孙怡 于静



00231364



23450843



山东大学出版社

288188

图书在版编目(CIP)数据

电气工程实验技术/王雷, 章艺主编. — 济南: 山东大学出版社, 2001.8
ISBN 7-5607-2300-4

I. 电…

II. ①王…②章…

III. 电气工程-实验-高等学校-教材

IV. TM-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 060691 号

山东大学出版社出版发行

(山东省济南市山大南路 27 号 邮政编码: 250100)

山东省新华书店经销

山东山大科苑印刷厂印刷

787×1092 毫米 1/16 8.75 印张 185 千字

2001 年 8 月第 1 版 2001 年 8 月第 1 次印刷

印数: 1-1100

定价: 16.00 元

版权所有, 盗印必究

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部负责调换

录 序 目

《电气工程实验技术》一书是由山东大学几位中青年教师,在积累了多年实验教学经验的基础上,共同编写的一本实验教学用书。这本书脱稿后,作者将书稿送交给我并请代为作序。我在阅读了全书内容后,欣然同意。我认为这本书作为实验教材出版问世,无论对于电气工程专业的在校学生,还是对于目前多渠道教学途径中多层次的求知者都会从中得到很大的教益。所以,这本书是值得向社会推荐的。

新世纪对人才的需求,更加注重对学生素质的全面培养。而高等学校实验教学的核心是加强学生的实践动手能力的锻炼,并用以印证所学过的书本理论知识、训练操作技能和培养工作能力。作为学生培养过程中的一个重要环节,实验教学具有理论教学不能替代的作用,现在已经越来越受到人们的普遍重视。因此,从 21 世纪对人才培养的需要考虑,在课程体系和教学内容上都必须加强实验教学的改革力度,而本书的出版,正好满足了这样一种要求。

目前高等学校中的确存在着实验教材不够规范的现象,尤其在电气工程专业课实验教学中更为突出,而且内容陈旧,有些已不能适应新世纪对人才培养的要求。因此,本书作者依照新的教学大纲以及将来对人才的新要求,首先从电气参量最基本的测量技术入手,讨论了测量方法和测量误差,然后将电气工程专业的技术基础课《微型计算机原理实验》和《自动控制理论实验》以及专业课的《电力电子变流技术实验》等三门课程的实验内容汇集到一本书,不仅方便了学生的使用和阅读,而且有利于读者系统领会和深刻理解电气工程专业各门课程之间的内在联系,这正是本书的一个特点。对全面掌握基本的科学实验方法和了解科学研究的过程也是相当重要和必不可少的。

本书内容简明扼要,深入浅出,层次分明,条理清晰、逻辑严谨,文字也较流畅,因而通俗易懂,符合当前多层次的读者需要。由于电气工程专业覆盖的范围较宽,所涉及的课程和专业实验内容也非常多,要想用一本书将所有内容都包容在内,是十分困难的,但本书仍不失具有较高的实用价值。

赵建国

于山东大学电气工程学院

2001 年 5 月 18 日

内 容 提 要

本书是在 21 世纪高等院校要培养高素质人才的新形势下,依据新的教学大纲编写的。其目的是加强实验教学环节,提高学生的创新能力和综合能力。全书共分两部分,第一部分介绍了基本电气测量知识和基本实验技能;第二部分是《微型计算机原理》、《自动控制理论》、《电力电子技术》三门课程的实验教程。

本书可作为高等院校电类专业的实验技术教材,也可作为实验技术人员和其他工程技术人员参考用书。

前 言

要 录 容 内

新世纪对人才的要求是:理论基础厚,知识覆盖面广,实践能力强,三点皆备人才。特别对高等院校工科专业的学生更应注重创新意识和综合能力的培养。而实验教学是培养学生创新意识和综合能力的重要手段,是理论与实践的桥梁。为适应新形势的要求,必须对实验教学进行全面改革。

本教材就是在新形势下,针对目前学生的状况依照新的教学大纲而编写的。全书共分两部分:第一部分是基础部分,介绍了基本实验技能,包括常用仪器仪表的使用常识、测量方法、数据处理及误差分析等等。第二部分是应用部分,即《微型计算机原理》、《自动控制理论》、《电力电子技术》三门专业技术基础课的实验教程。

本书第一、二章由章艺编写,第三、四章由王雷编写,第五、六章由孙怡编写,第七章由于静编写,全书由王雷通稿。在本书的出版过程中得到了文锋、慕志恒、张卫星、王广柱、杨志坚、张莉等各位老师的大力支持,在此一并表示衷心的感谢。

编 者

2001年5月18日

目 录

第一篇 基础知识和基本技能

第一章 常用仪表和仪器	(3)
第一节 概述	(3)
第二节 仪表的分类和符号	(3)
第三节 仪表的技术要求	(4)
第四节 仪表的误差及准确度	(6)
第五节 仪表的一般结构和原理	(8)
第六节 常用仪表	(8)
第七节 常用仪器	(10)
第二章 测量技术	(11)
第一节 概述	(11)
第二节 测量方法	(11)
第三节 电流和电压的测量	(13)
第四节 功率、能量和功率因数的测量	(16)
第五节 频率的测量	(23)
第六节 示波器测量技术	(24)
第三章 基本测量误差	(27)
第一节 概述	(27)
第二节 测量误差	(27)
第三节 间接测量时系统误差的估算	(30)
第四章 实验技术	(33)
第一节 概述	(33)
第二节 实验数据处理	(33)
第三节 实验报告及论文	(40)

第二篇 基础实验

第五章 微型计算机原理实验	(45)
第六章 自动控制理论实验	(87)
第七章 电力电子变流技术实验	(99)
附录 A 键盘使用说明	(116)
附录 B DEBUG 命令及其操作	(117)
附录 C TDS 汇编器的使用说明	(120)
附录 D MD 系统与 PC 微机联机使用说明	(125)

第一篇 基础知识和基本技能

常用测量仪表和仪器按测量方式可分为直读式仪表和比较式仪表两类。前者测量结果可直接由仪表显示和读出,而后者需要将被测量与标准量进行比较并通过调节达到平衡后得到结果。直读式仪表按显示方式又可分为模拟量指示仪表和数字显示仪表。直读式仪表主要是电气机械式仪表,采用指针、光点或计数机构在仪表标尺或表盘上读出,简称指示仪表。数字显示仪表是用数字直接显示测量结果。	第一章 常用仪表和仪器	1-1	1-1
第一节 概述	1-1	1-1	1-1

常用测量仪表和仪器按测量方式可分为直读式仪表和比较式仪表两类。前者测量结果可直接由仪表显示和读出,而后者需要将被测量与标准量进行比较并通过调节达到平衡后得到结果。直读式仪表按显示方式又可分为模拟量指示仪表和数字显示仪表。直读式仪表主要是电气机械式仪表,采用指针、光点或计数机构在仪表标尺或表盘上读出,简称指示仪表。数字显示仪表是用数字直接显示测量结果。

比较式测量仪表一般是调节盘上的档位数字读出结果,也有用数字直接显示结果的。本章主要介绍了常用仪表和仪器的基本常识,叙述了仪表的误差和准确度的概念,介绍了仪表的读数方法以及一些常用仪表、仪器的工作原理和技术特性。

第二节 仪表的分类和符号

电工测量指示仪表的种类很多,分类方法也很多,常用的分类方法有:

(1)根据指示仪表测量机构的结构和作用原理,分为磁电系、电磁系、电动系、静电系、感应系等。

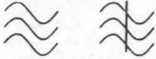
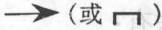
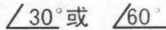
(2)根据被测对象的名称,分为电流表(安培表、毫安表、微安表等)、电压表(伏特表、毫伏表等)、功率表(瓦特表)、电能表(电度表、千瓦时表)、相位表(功率因数表)、欧姆表、高阻表(兆欧表)以及各种多用途仪表,如万用表、伏安两用表等。

(3)根据仪表所测的电流种类,有直流仪表、交流仪表、交直流两用仪表。此外尚可按准确度等级,对电场或磁场防御能力和使用条件等分类。

指示仪表的表盘上常可以看到一些标志符号,其中有表示电流种类、仪表准确度、仪表结构和作用原理的系别、仪表放置方式、防御外电场或磁场级别、使用环境条件以及绝缘水平等。对于被测对象,通常在面板标尺正中下方用较大的外文字母标出,一目了然。

指示仪表表盘上的标志符号如表 1-1 所示。

表 1-1 表盘上的标志符号

按仪表的结构和工作原理的标志符号	标志符号	型号	仪表系列	应用范围及仪表用途
		C	磁电系	直流电表;流比表等。A, V/ Ω , M Ω , 检流计等
		T	电磁系	一般交(直)流实验室用表;盘式表等。A, V, Hz, $\cos\varphi$ 等
		D	电动系	一般工频交流(直流)实验室用表。A, V, W, Hz, $\cos\varphi$, 同步表
		Q	静电系	高电压测量用表(交直流电压), V, 象限表等
		G	感应系	工频交流电能计量, 交流电能表
按仪表的使用条件和保护性能的标志符号	标志符号	代 表 的 意 义		
		直流仪表		
		交流仪表(一般指正弦交流)		
		交流直流两用仪表		
		对称三相制和非对称三相制		
		仪表水平放置		
		仪表垂直放置		
		表盘或仪表本身与水平成 30° 或 60° 放置		
	0.5; 1.5 或  	仪表准确度级为 0.5 级; 1.5 级(即 0.5%: 1.5%)		
	 或 	按仪表标尺长度百分数表示准确度为 1.5% 或 2.5%		

第三节 仪表的技术要求

对使用者来说,希望指示仪表测量准确、操作简单、显示清晰、易读、自身功耗少、过载时不易损坏以及对环境要求较低等。因此通常对指示仪表的主要技术要求除包括准确度、灵敏度、标尺特性、仪表功耗、过载能力等外,还要求频率范围、波形条件及其他环境使用条件等。

1. 准确度

所谓仪表准确度,通常就是指仪表的准确度级别,如 1.0 级,2.5 级等。准确度级别表示

仪表在正常使用条件下所能达到的最小相对误差,由相对额定误差来决定。选用仪表的准确度要与测量所要求的准确度相适应。根据国家标准将指示仪表分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 七级。通常 0.1 级和 0.2 级仪表多用作标准仪表以校准其他工作仪表或仪器;0.5 级~1.5 级可作为一般实验室用表。

2. 灵敏度

仪表指针或光点偏转角的变化量与被测量的变化量之比称为仪表的灵敏度,其表达式为:

$$S = \frac{d\alpha}{dx} \quad (1-1)$$

式中 S ——仪表灵敏度;
 α ——偏转角;
 x ——被测量。

由此可见,灵敏度取决于仪表的偏转性能,并与被测量性质有关,它是单位被测量的偏转角。例如将 $1\mu\text{A}$ 的电流通入微安表,若该表偏转 10 格,则其灵敏度 S 为 10 格/ μA 。仪表的偏转角一般为 $90^\circ \sim 110^\circ$,有的仪表可达 270° 左右。在有限的偏转范围内,灵敏度越高就意味着量限越小。不同类型仪表其灵敏度相差很大。仪表灵敏度反映了仪表所能测量的最小被测量。对于测同一被测量(如测电压)的不同型式仪表,其结构不同,即使有相同的电压灵敏度但可能有不同的电流灵敏度,反之亦然。因此选用仪表时不要顾此失彼,应综合考虑,相互兼顾。

3. 仪表的功耗

当仪表接入被测电路时,其自身会消耗一些功率,这称为仪表的功耗。功耗大小取决于仪表的内阻抗数值。为了尽可能减少功耗,对于电压表应有尽可能大的内阻抗;对于电流表应有尽可能小的内阻抗;而功率表应具有以上两者的有利因素,才能使功耗尽可能小。关于仪表功耗的考虑也要视实际被测电路而定,有时可以不予考虑,而有时就必须考虑。例如用电压表测稳压电源或大容量电源电压时,无论电压表的内阻抗值大小(或功耗大小),该电源的电压都不会因仪表功耗大小而有所改变;相反,若被测电路本身是高内阻抗小容量的,即使仪表功耗很小,也会导致被测电路工作状态的变化,从而引起测量方法误差。当然,小容量的被测电路和大功耗的仪表将会引起更大的误差。

4. 仪表的标尺特性

由于各种系列的仪表结构和工作原理不同,指示仪表的标尺刻度特性也不相同。图 1-1 所示为几种标尺特性。标尺刻度有线性与非线性(或均匀和不均匀)两大类。非线性标尺刻度尚有正向和反向刻度之分,其不均匀性有按平方律的,也有按双曲线函数规律的。标尺刻度的不均匀性,使得某些仪表刻度的起始部分无法准确读数,这些部分往往成了无效区,有些仪表标尺在有效区与无效区的分界处分格线上方打一个小圆点以示分界。

指示仪表的标尺读数精度(即能够读得的有效数位数)是有规律的,以图 1-2 均匀标尺为例,从起始线到第 2 条线以内(不包括第 2 条线),可以读得 1 位有效数;从第 2 条线到第 10 分格以内可读得 2 位有效数;从第 11 条线到第 100 分格以内可读得 3 位有效数;从第 101 条线到第 1000 分格以内可读得 4 位有效数。依次类推可得规律,分格数每增加至 10 倍,将使读数精

度增加 1 位,即“增 10 倍加 1 位”。这一规律仅与标尺分格疏密程度有关,而与仪表指示所代表的量值和测量单位无关。一般来说,指示仪表准确度越高要求标尺读数精度也越高。

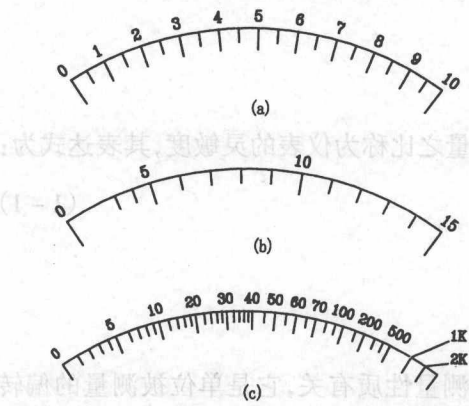


图 1-1

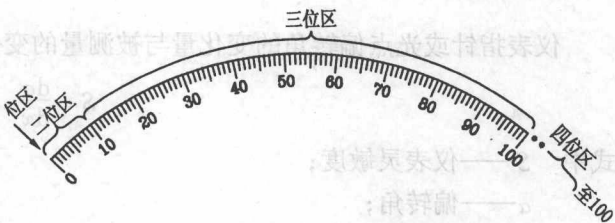


图 1-2

5. 仪表的阻尼时间

阻尼时间是指仪表的指针或光点从被测量加入或去掉时的初始位置到最终距离稳定位置小于标尺全长 1% 时所需的时间。一般仪表为了读数迅速,其阻尼时间越短越好,通常规定不超过 4s,较好的仪表约为 1.5s 左右。

总之,指示仪表的技术要求,归结起来应具有:足够的准确度;适当的灵敏度;良好的标尺特性;较小的阻尼时间;较小的功耗。除此以外,对于交流仪表还应具有较宽的频率范围。对于各种指示仪表都应具有抗外界环境干扰因素能力强,并具有较强的过载能力和足够的绝缘耐压能力,以保证人身和仪表本身的安全。

第四节 仪表误差及准确度

(一) 仪表误差的分类

根据误差产生的原因,仪表误差可分为两类:

1. 基本误差

仪表在正常条件(规定温度、压力、放置方式等)下使用,由于结构和工艺等原因而产生的误差称为基本误差。基本误差是仪表本身固有的。

2. 附加误差

仪表偏离正常使用条件,如温度、湿度、波形、频率、放置方式以及周围杂散电磁场等超出

仪表允许的范围,这些均属于外界因素的影响,使仪表产生附加误差。

(二)误差的表达式

1. 绝对误差

测量值(仪表的指示值,有时简称读数)与被测量的真值(有时也称实际值)之间的差值称为仪表的绝对误差。若用 α_x 表示测量值,用 α_0 表示实际值,则绝对误差可定义为:

$$\delta = \alpha_x - \alpha_0 \quad (1-2)$$

绝对误差有正负之分,正值表示测量值大于实际值,负值则相反。在指示仪表的标尺刻度分度线各处的绝对误差不一定相同,在全标尺某一分度线上可能出现最大绝对误差,通常用来决定仪表的准确度级别。在正常使用条件下,仪表标尺各点的绝对误差不会超过这个值,即

$$|\delta| = |\alpha_x - \alpha_0| \leq \delta_m \quad (1-3)$$

2. 相对误差

相对误差是绝对误差 δ 与被测量的真值(实际值) α_0 之比值,通常用百分数来表示,即

$$\beta = \frac{\delta}{\alpha_0} 100\% = \frac{\alpha_x - \alpha_0}{\alpha_0} 100\% \quad (1-4)$$

当 δ 已知时,很容易求得 β ,由于 α_0 较难测得,有时可用 α_x 代替 α_0 ,则相对误差可近似写为

$$\beta = \frac{\delta}{\alpha_x} 100\% \quad (1-5)$$

由此可见,仪表指示值越大,其测量准确度越高。

3. 引用误差

绝对误差 δ 与仪表的量限(标尺满偏值) α_m 之比值称为引用误差,一般也用百分数表示,即

$$\beta_n = \frac{\delta}{\alpha_m} 100\% \quad (1-6)$$

式(1-6)是绝对误差与量程之间的关系式,可以评价仪表的准确度性能。

4. 相对额定误差(最大引用误差)

由于标尺各处的绝对误差不同,因此标尺各处的引用误差也不同。用最大引用误差(即全标尺上绝对误差最大的点)作为衡量仪表准确度更为合适,其定义为

$$\beta_m = \frac{\delta_m}{\alpha_m} 100\% \quad (1-7)$$

相对额定误差常用来确定指示仪表的准确度级别,其值规定为小于或等于仪表准确度级别的百分值。

根据国家标准,指示仪表分为7个级别。在校准仪表时最常用的方法是将被校表和标准

表同时去测量同一个量(电压、电流等)。标准表的准确级所对应的百分值应小于或等于被校表的 $1/3$ 。例如校准 0.5 级表必须用 0.1 级表作为标准表;被校表是 1.0 级时须用 0.2 级仪表作为标准表;0.5 级表可校准 1.5 级仪表等等。

第五节 仪表的一般结构和原理

在常用的电工仪表中,除了数字显示的仪表之外,多数是电气机械式指示仪表。这种仪表靠指针或光点在标尺上的位置直接读取数据,故也称为直读指示仪表。直读指示仪表常见的有磁电系、电磁系、电动系、静电系、带有变换器的磁电系所组成的整流系、电子系和热电系以及感应系等。感应系中的电能表是靠计数器累计显示,也可属于直读仪表范围。以上各系列仪表的具体结构和工作原理各不相同,但它们的测量机构和基本原理的依据仍然有其共性方面的内容。

直读指示仪表的测量机构从结构特点来说主要是由固定部分(磁铁或线圈)和可动部分(磁铁或线圈或软铁片等)组成。这两个部分通过电磁力的相互作用来产生力矩,给出偏转指示,构成所谓驱动机构。为了和这个电磁力矩取得平衡从而得到稳定偏转而在可动部分上必须有反作用力矩。(一般用游丝、张丝、吊丝等产生,有些特殊仪表也有用另一个通电流的线圈来产生,反作用力矩用于控制可动部分的偏转,故也称为控制力矩。)从结构上说除了上述基本部件外尚有轴与轴承(有些仪表采用张丝或吊丝)、指针、标尺、阻尼器、调零器、支架和表箱等,所有以上部件组成了仪表的测量机构。

从工作原理上说,最基本的两个力矩是由电磁力矩产生的作用力矩和游丝等产生的反作用力矩。这两个力矩构成稳定偏转的基本依据。至于阻尼力矩,除感应系电能表需要利用它参与工作之外,其他系列仪表利用阻尼力矩的目的是为了消除或减少可动部分达到稳定偏转前所出现的振荡现象,这一力矩只与可动部分的运动速度有关而与最终偏转值无关,因此它和工作原理无关,轴与轴承间的摩擦力矩只影响误差而不影响工作原理。

第六节 常用仪表

1. 万用表

万用表也称为繁用表和多用表,是一种多种用途的测量仪表。用万用表可以测量交流或直流电压、电流以及电阻;有些还可测量电容、电感、音频功率增益或衰减量(分贝)和晶体管的静态参数等。特别是近几年出现的数字式万用电表,不仅重量轻、体积小,而且精度高,功能多,有的还能测量频率和温度。两种万用表如图 1-3(a),(b)所示。

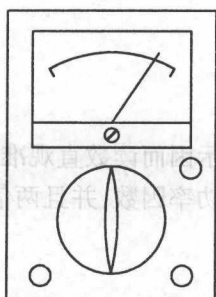
一般万用表由测量机构、测量电路和转换开关组成。通过转换开关切换内部的测量电路,来完成对不同电量的测量。

万用表使用非常方便,但由于它的功能太多,以至于人们常常将档位打错,而烧坏仪表。特别是它的电流档和电阻档绝对经不住高电压的介入,因而使用时务必仔细正确地选择档位,

用完后应将档位放到“空档”或交流电压的最高档,以免再用时发生错档烧坏仪表。

2. 电流表和电压表

电流表和电压表从结构和原理上讲有电动系和电磁系等之分,从功能上可分为直流电流表、电压表和交流电流表、电压表。直流电流表的测量范围为 $10^{-7} \sim 10^2 \text{A}$; 直流电压表的测量范围为 $10^{-5} \sim 10^5 \text{V}$; 交流电流表的测量范围为 $10^{-4} \sim 10^2 \text{A}$; 交流电压表的测量范围为 $10^{-3} \sim 10^5 \text{V}$ 。这类仪表的误差一般在 $2.5\% \sim 0.1\%$, 可见已能满足一般工程和实验的需要。



(a) 指针式万用表



(b) 数字式万用表

图 1-3

测量时电流表要与被测电路串联;而电压表则需与被测电路并联。因而要求电流表的内阻要相当小;而电压表的内阻要相当的大,这样才不会影响电路的原有状态。接法如图 1-4(a), (b) 所示。量程的选择非常重要,量程太小容易烧毁仪表,量程太大又会造成测量误差,应根据估算确定仪表的量程,从大到小逐步减小,以获得准确的测量数据。为保证电流表和电压表的通电线圈与外壳之间不致有太高电压,电流表应串接在被测电路的低电位端,电压表的负端也应接在低电位端。

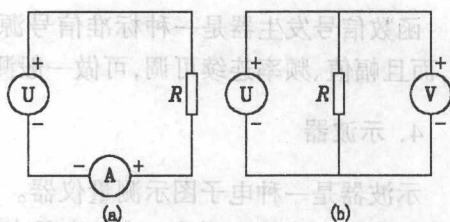


图 1-4

3. 功率表

功率表有电动系的也有磁电系的很多种类。从功能上又有直流功率表、交流单相功率表等。

使用中的量程选择是关键,它的量程包括功率、电压、电流三个因素。功率量程表示负载功率因数 $\cos \varphi = 1$, 电压和电流均为额定值时的乘积。若 $\cos \varphi < 1$, 即使电压与电流均达到额定值,功率也不会达到额定值。由此可见功率表量程的选择,实际上就是选择电流和电压的额定值。通常在被测电路中分别接入电流表和电压表来进行量程监视。

4. 电能表

电能表是用于测量电源送给负载的电能量,它等于负载消耗的功率与时间的乘积。其结

构多为感应系仪表,有单相的电表也有三相的,接线方式与单相或三相功率表基本相同。

5. 相位表

相位表在测量原理上与功率因数表并无差异,只是显示表盘上所代表的量不同。相位表是测量同一频率下电压与电流之间的相位差角,大多为电动系、电磁系和变换式仪表,有单相和三相之分。其接线方式和量程选择都与功率表方法相同,可参阅功率表的使用方法。

第七节 常用仪器

1. 数字相位计

数字相位计是一种目前常用的相位测量仪器,采用数字显示因而读数直观准确,既可测量电压与电压、电流与电流、电压与电流之间的相角差,又能测量功率因数,并且两信号的输入端量程可自动切换。

2. 频率计

采用数字显示电路的频率计,具有读数准确直观的特点。既可作为数字计数器,又可测量周期,只是在低频测量时误差相对大了许多。

3. 函数信号发生器

函数信号发生器是一种标准信号源。它可产生正弦波、三角波、方波三种波形的标准信号,而且幅值、频率连续可调,可做一般测量的标准信号源。

4. 示波器

示波器是一种电子图示测量仪器。它能显示任何两个参数相互关联的 $x-y$ 坐标图形,是电压表的一种特殊形式。由于它具有输入阻抗高、灵敏度高、测量频域宽以及过载能力强的特点,并且能对多种电参量进行测量,因而它应用极其广泛。