

机械工业知识丛书

电 测 仪 表

哈尔滨电工仪表研究所 编

机械工业出版社

电 测 仪 表
哈尔滨电工仪表研究所 编
(限国内发行)

*

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出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ · 印张 $3^{1/4}$ · 字数 82 千字
1978 年 1 月北京第一版 · 1978 年 1 月北京第一次印刷
印数 00,001—43,000 · 定价 0.50 元

*

统一书号: 15033 · (内)727

目 录

第一章 概述.....	1
一 电测仪表的出现和发展.....	1
二 电测仪表的应用特点和用途.....	3
三 电测仪表的类别.....	5
四 电测仪表的几个技术指标.....	10
五 电测仪表研制和生产的特点.....	13
第二章 电气测量指示仪表.....	16
一 电气测量指示仪表的概念和分类.....	16
二 电气测量指示仪表的结构特点和技术特性.....	20
三 电气测量指示仪表的工作原理.....	31
第三章 交直流仪器.....	41
一 交直流仪器的概念.....	41
二 直流仪器.....	42
三 交流仪器.....	49
第四章 数字仪表.....	57
一 概述.....	57
二 数字频率表.....	59
三 数字相位表.....	62
四 数字电压表.....	64
第五章 记录仪表与示波器.....	71
一 笔录式记录仪表.....	71
二 光线示波器.....	74
第六章 测磁仪器.....	77
一 磁性材料的磁特性及其测量仪器的分类.....	77
二 磁性材料静态测磁仪.....	81
三 磁性材料动态测磁仪.....	85
四 磁场测量仪器.....	94
结束语.....	98

第一章 概 述

测量是人类认识事物的一种手段。

从用尺量布和用秤称粮等常识可以看出，测量不同的对象，要用不同的测量工具。在现代生产和科学研究工作中，要测的量五花八门，如粮有多重属力学量；布有多长属机械量；温度有多高属热学量；还有电磁量等等。电磁量是电磁现象各种量值的总称。

电磁量的大小和性质是看不见摸不着的，要想知道它不用仪表是不行的。用电的方法测量电磁量值，或者通过变换器把非电磁量变成电磁量，用以间接测量非电磁量的仪表，统称电测仪表。

一、电测仪表的出现和发展

在电被广泛应用的今天，电磁现象已经不神秘了。人们通过测量仪表，不断地对电的现象和性质进行研究，对电的认识逐步深化。因此人类对电的认识过程，也就是电测仪表发展的历史。

1752年黎赫曼应用验电器原理制成了一台测量电荷的仪表，第二年用这台仪表对大气中电的现象作了定量研究。1785年库仑依据同一原理发明了扭秤，他用扭秤对带电体（即电荷）的相互作用力进行了定量测量，得到了静电学中的库仑定律，为静电学奠定了基础。

到十九世纪前半叶，电学理论有了重要的发展。1820年奥斯特发现了电流的磁效应，七年后，欧姆利用这一原理制成了第一个测量电流的仪表，利用指南针反映通电导体的磁场，相对地测出了电流的大小，用实验方法得出了著名的欧姆定律，从而揭示了电流、电压和电阻之间的关系。随着人们电学知识的增长，又

出现了很多重要的发明与发现。1831年法拉第发现电磁感应现象，了解了电与磁的内在关系，使人类大量利用电能成为可能。

十九世纪后半叶，电学开始向电工学这一新的领域发展。根据电磁感应原理制成了电磁发电机。由于电能在各方面的应用推动了各种电测仪表的研制。此外，由于电的广泛应用还出现了电磁单位的统一问题。电磁单位的统一不仅包括制定单位，而且也包括复现、维持和传递标准值的问题。为了维持基准、传递标准量值和校准仪表而研制的一批标准仪器，为现代电磁测量仪器的发展打下了基础。

由此可知，电测仪表的出现和发展是人类对电的应用和研究的结果，它反过来又促进了理论的和实用的电工学的发展。

随着电的广泛应用和科学技术的不断发展，电测仪表的应用范围已扩展到国民经济各个部门和科学技术的各个领域。电测仪表本身也由于不断的改进，为满足灵敏、准确、可靠的要求，出现了一批又一批新型仪表。

1956年，在交流测量方面，出现计算电容理论，利用当时已有较高精度的长度测量的成果，确定出电容的基准。为了传递这一量值，变压器电桥的性能得到了很快提高，从而完成了电容基准值的建立及传递手段，精度大为提高，使交流精密测量技术前进了一大步。

五十年代初，利用自动化技术的成果，制成了数字仪表，实现了测量自动化。之后，电子技术的出现及其在测量技术中的应用，推动了数字仪表的发展，使其在测量精度、速度等方面达到了较高的技术水平。

巡回检测装置是在快速数字电压表的基础上出现的，实现了多点自动测量，并为人类实现生产自动化提供了条件。

近几年又有一批新型仪表问世，其中包括与变压器电桥原理相仿的磁比较仪式的仪器，以及根据脉冲调宽原理构成的仪器。

我国对电磁现象的研究早在春秋战国时期就有记载，用天然永磁制成了“指南车”，这是我国古代的重大发明之一。

然而，在以后的两千年中，封建帝王和国民党的反动统治，严重地阻碍了对电磁科学的进一步研究。这种一穷二白的状况直到新中国成立时才告结束。

解放后，我国电测仪表制造业在中国共产党和毛主席的英明领导下取得了飞速的发展。建国初期的经济恢复时期有了第一个国营仪表厂。这个厂在原来生产小型安装式仪表的基础上，又生产了电度表和精密指示电表。第一个五年计划期间，先后建成几个专业仪表厂，为我国电测仪表制造业打下了基础。大跃进时期，在党的建设社会主义总路线的光辉照耀下，一大批中小规模的仪表制造厂建立起来了，我国电测仪表专业队伍迅速扩大，产品品种大大增加，技术水平提高很快。无产阶级文化大革命以来，我国电测仪表工业沿着毛主席革命路线不断前进，又取得了很大发展，为我国社会主义革命和社会主义建设作出了积极的贡献。

二、电测仪表的应用特点和用途

电之所以被广泛地应用，主要在于它的性质优异。它不仅经济地得到巨大的能量；可以方便地通过导线、大地甚至空间高效率地进行传输；还可以通过电的多种效应把电能转换成其他能量，或者反过来把其他能量转换成电能（见图1-1）。电测仪表是用电的方法实现测量的，因而它也不同程度地具备上述这些特性。由于现代科学技术迅速发展的要求，电测仪表在现代工业和科学技术中占有极为重要的地位。

1) 电的广泛应用是电测仪表广泛应用的前提，这不但表现在发展数量上，也反映在对品种和质量的要求上。如对电能的测量，过去一般误差小到百分之一，而现在对大电厂来说，为了精确计算经济指标要求误差小到千分之二。目前一些工业发达的国家，都很重视对电能的精密测量仪表的研究，在这方面已有更高水平的仪表出现。

2) 目前电测仪表虽已达到相当完善的程度，但随着科学技术、工艺技巧及元件、材料的发展与改善，电测仪表正迅速地

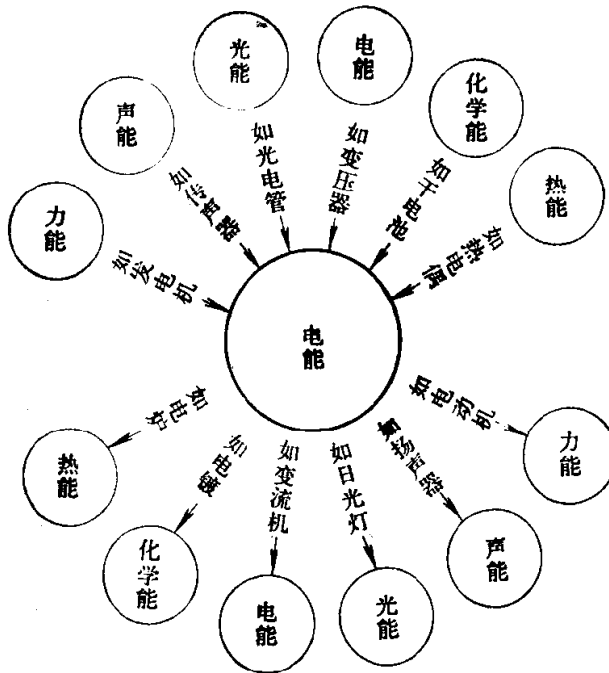


图1-1 电能与其它能量的互相转换

更高的阶段发展。

3) 电测仪表便于与变换器结合, 把非电量变换为电量, 以电测法实现对非电量的高精度测量。

4) 有些仪表不但可以接受来自各方面的信号, 而且对于测量结果也能方便地输出。这个特点决定了它在自动化技术中的地位。自动化技术就是自动测量、计算和控制的全面综合, 而其中测量则是基础。

由上可见, 电测仪表是现代科学技术和工业中的重要测量仪表, 各工业发达的国家都很重视这类仪表的研制与生产。

现代电测仪表的使用有三个方面:

1. 用作监视与定位测量

这类仪表固定安置在使用位置, 测量对象和仪表的规范一致。譬如说, 对于交流发电机组就要测电流、电压、功率、电能、频率、相位、同步、绝缘电阻等几个量。其中电压和频率反映发电质量; 电流和功率反映机组的负荷状态; 电能则为核算发电的经

济指标和标准。属于这类的仪表有安装式仪表（指示式、数字式和记录式）和电度表。这类仪表用量较大，因而在满足既定的测量要求下，应进一步做到简化结构，降低成本。巡回检测装置也是在这种条件下使用的。不过它只用一台装置对几十个甚至更多的测量点实现自动循环测量和记录。

2. 用于试验和检测

通常大量用于电气试验及现场检测的都属这类仪表。一般来说，它比前一类有较高的技术指标，准确度要高些，测量的对象要齐全，测量范围要广阔，使用要方便，要更能适合在各种条件下测量，因而要求这类仪表能做到一机多能。这类仪表品种繁多，属于这一类的有便携式仪表、低精度交直流仪器、记录仪表示波器以及通用数字仪表等。

3. 用于精密测量和计量

属于这一类的主要是高精度的仪表、仪器和各种测量装置。对这一类仪表来说，测量的高精度是主要的设计目标。

三、电测仪表的类别

前面讲过电测仪表是以电测方法实现对各种量的测量的仪表。电测仪表的直接测量对象是在工业频率范围（大体上是直流到每秒两万赫的交流）内的电学量和磁学量。

电学量包括表明电自身特性的量，也包括表明电路元件以及这些元件所起的作用的量，还包括其他一些量。有关磁学量将在后面介绍。

表明电自身特性的量有：电荷、电流、电压、功率、电能、频率、相位等；

表明电路元件性质的量有：电阻、电感、互感、电容等；

表明电路元件所起的作用的量有：电阻、电抗（包括感抗和容抗）和阻抗（即电阻、电感、电容所起的综合作用）。

由于现代工业和科学技术发展的需要，电测仪表类的基本品种已有几百种，规格数量更多，约为品种数的四、五倍。

电测仪表的分类方法很多，如按测量电学量和磁学量的测量对象不同，可分成电量表、电流表、电压表等。还可以按测量方法、测量结果的给出方式和读数方式、工作原理、对外界条件的防护性能、使用方式、准确度等级、尺寸等特征来划分。在不断采用新技术（如电子技术）的条件下，还将出现一些新的分类项目，这里不再一一叙述。

现在，一般根据结构、用途等几方面的特性，把电测仪表分为以下几类：

1. 安装式指示仪表

这是指固定安装于开关板及其他控制盘上的仪表。这类仪表的用途是监视电气设备的运行情况，对接入线路的被测量实行经常性测量。这类仪表多为成套使用，可测各种被测量。每一套通用一种外形尺寸，这类仪表以尺寸作为分类的一个因素。

2. 实验室及便携式指示仪表

这类仪表包括 0.5 级以上比较精密的仪表，也包括在现场测试用的各种电表，如万用表、兆欧表等。

3. 电度表（积算仪表）

凡测量与时间有关的量，并在测量时间内对被测值进行累计时，都要用积算式仪表，最明显的是测量电能的电度表，也包括测量电荷量的安时表。

4. 直流仪器

属于这一类的有电桥、电位差计及标准电阻、电阻箱等附件，它是用于直流精密测量的仪器和标准量具。标准电池也属这一类。直流电位差计是这类仪器的代表，图 1-2 为 UJ32 型高电势直流电位差计外形。

5. 交流仪器

与直流仪器的产品相似，因为是用于交流的，还有很多在交流下工作的量具，如标准电容、标准电感等。交流仪器中电桥是代表性产品。

6. 数字仪表和巡回检测装置

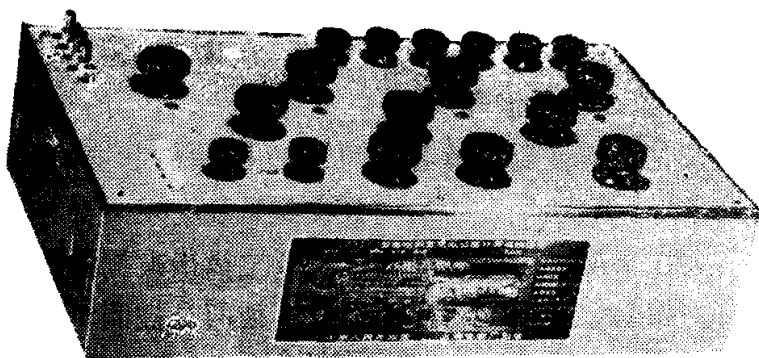


图1-2 UJ32 型高电势直流电位差计

这是指能以自身逻辑控制实现自动测量，并能以数码形式显现被测值的仪表。近年来这类仪表发展很快，结构形式不断改进，技术指标大幅度提高，可靠性日益改善，随着新型高效元件的采用，体积和成本有可能大大降低。已有安装型、通用型和精密型等类别，还有一系列快速测量用仪表。它的出现也带来了其他测量仪表的数字化，非电量的测量也转向数字化。

图 1-3 为数字电压表，从上面的数字管上读出测量结果。

自动巡回检测装置即为数字化仪表加上选测控制系统及打印输出设备构成的整体。

巡回检测基本上都是把被测量经过变换之后，输送到装置中

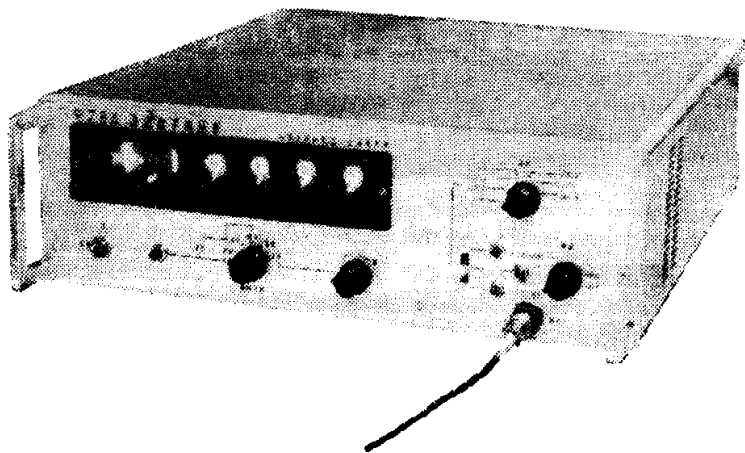


图1-3 PZ8A型直流数字电压表

来实现远距离测量的，所以到目前，除个别情况外，专门用作遥测的装置已比较少见。

7. 记录仪表和示波器

记录仪表是把被测量随着时间的变化(快的和慢的变化过程)连续记录下来。记录仪表的结构分成测量和记录两部分。测量部分驱动笔尖在以规定速度移动的记录纸上描出被测量随着时间变化的情况。如果记录纸不动，而记录笔被两个被测量沿纵横两个方向驱动时，所记图形是被测量 x 与另一个被测量 y 的函数关系，便叫做 $X-Y$ 记录仪。

当被测量变化很快，依靠笔式记录不行时，常用示波器来观测。观测的同时可用感光纸记下波形。示波器有电子示波器和电磁示波器两大类，前者为电子仪器，后者为电测仪表。它是通过振子在电量作用下的振动，经过一定的光学系统来反映波形的。

习惯上记录仪表和示波器常划为一类，因为它们都有一套精密的传动系统以驱动记录纸、笔或者是光学波形显示系统。

图 1-4 为 SC10 型示波器外形。

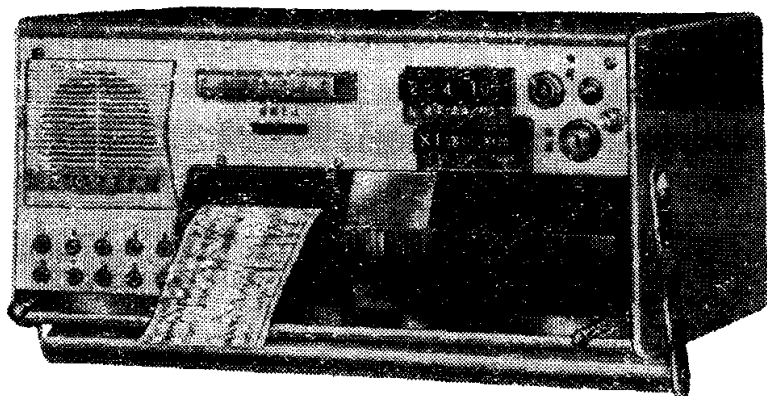


图1-4 SC10 型示波器

8. 扩大量程装置和变换器

属于这类的有分流器、附加电阻、电流互感器、电压互感器、放大器及各种变换器等。目前属于这一类的都是实现电量与电量转换的仪器。将非电量转换为电量的仪器称为变换器，为实现各种非电量的测量，这类变换器应该大力发展。

9. 电源装置

属于这一类的有稳压器、稳流器、各种稳压电源、标准电压发生器和标准电流发生器，见图1-5。这类仪器，现在都是用电子技术装备起来的，虽然大多作为附件，但是对测量的影响是很大的。

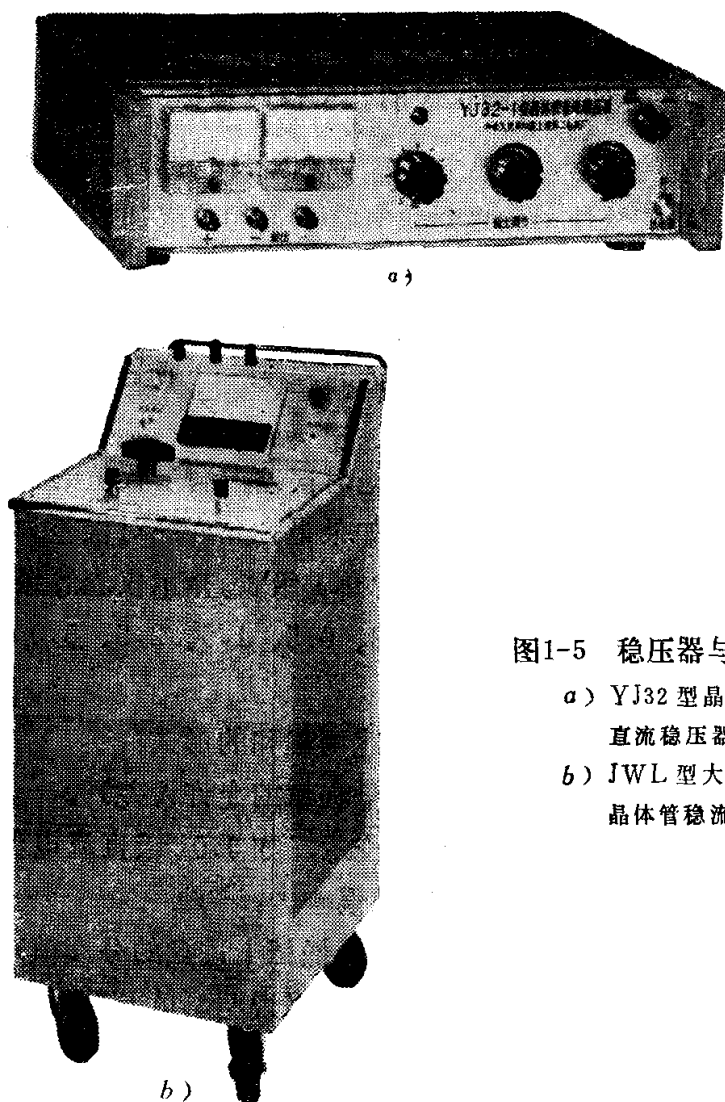


图1-5 稳压器与稳流器

a) YJ32 型晶体管
直流稳压器

b) JWL 型大电流
晶体管稳流器

10. 校验装置

按既定测量方法和电路，将一些测量仪器、度量标准和附属设备组合而成的整体，称为校验装置，有电位差计装置、电桥装

置、互感器校验装置、电度表校验装置等。

11. 测磁仪器

用于测量基本磁学量及磁性材料磁参数的仪器。在电测仪表中除了测磁仪器之外，大都用于电学量的测量。由于电与磁有密切的内在联系，测量方法和测量仪器都有共同之处，所以磁和电的测量是不可分的。

四、电测仪表的几个技术指标

一种仪表的优劣可以从技术指标和经济指标两个方面来进行评价。下面我们从使用角度对仪表技术上的要求加以说明。

1. 准确度（精度）

这是仪表的一个基本指标，它表示仪表在规定的测量条件下测量的结果与被测量的实际值接近的程度。一般是以误差的多少来表示。

对指示仪表，常以最大允许绝对误差占满量程值的百分数来表示。如一台 100 伏的电压表，如果最大允许绝对误差为 0.1 伏，那么引用误差为 $\pm 0.1\%$ ，即称为 0.1 级表。指示仪表等级由最高的 0.1 级，排列下去有 0.1、0.2、0.5、1.5、2.5、5.0 七个等级。

对比较仪器的误差常采用下述两项和的形式：

$\pm$ （被测值的允许误差 + 满量程值的允许误差）。

仪器的等级以前项百分数来表示，如 0.01 级直流电位差计（即通常所说的一级电位差计）的误差为：

$\pm$ （ $0.0001 \times$ 被测值 + $0.2 \times$ 最低档十进盘的分度值）。

关于准确度的概念，还有一点应当说明，就是前面表示的准确度是在规定的测量条件下所得到的测量结果。当这些条件不能满足时，测量结果将产生较大的误差。由于这些条件很难满足，所以有些仪表就给出偏离规定条件时引起的误差，叫作附加误差，如温度附加误差等。

2. 稳定性

对精密的仪器仪表，特别是用作标准的仪器仪表，其准确度可由更高级的仪器或校验方法来得到保证。稳定性就是表明仪表保持其校验时特性的能力。稳定性有对温度的稳定性和对时间的稳定性之分。由于我们可以在人为条件下求得仪表对温度的关系，所以解决温度稳定性的问题比较容易。时间的稳定性，是指仪表在没有受到明显的外界因素（温度、外力等）作用下，随着时间的推移而引起的变化。

时间稳定性的优劣，与设计 and 工艺是否合理关系极大。为了得到较高的稳定性，除了有较好的设计及合理的加工工艺外，还要加以特殊的工艺处理，通常称为“老化”，即时效处理。有些精密仪器仪表老化时间长达几个月甚至更长。即使这样，有些品种仍不能达到预期的稳定性，还要经过不断校验、比较和从大批的产品中挑选的过程。标准电池和标准电阻也都要经过这样的挑选过程，根据不同的量值及稳定性来确定其等级。

稳定性的优劣常以一定时间的变化量大小来衡量。

3. 灵敏度与分辨率

灵敏度与分辨率都是表示仪表对下限测量值的反应能力，但表示方法有所区别。

指示仪表常用灵敏度来表示单位被测量引起的指针在刻度盘上的位移。对于多数指示仪表来说，灵敏度就是满量程值除以标尺全长所得之商。对于满量程为通常大小值的仪表来说，灵敏度并不是一个重要的指标，而对于检流计等来说，却是第一位的指标，并常以每毫米标度尺长表示多大电流（或电压）来定义。如一个 10^{-9} 安培/毫米的检流计比 10^{-7} 安培/毫米的检流计灵敏度高 100 倍。万用表是从消耗这一角度来确定灵敏度的，常用直流电压档每伏多少欧姆来表示。

对于仪器和数字仪表，常用分辨率来表示对下限被测值的反应能力。如分辨率为 10^{-6} 伏，即表示 1 微伏的电压变化可有明确的反应。

指示仪表也好，仪器也好，它的灵敏度（或分辨率）与测量

范围有关，并与它的准确度相适应。譬如一台 1 伏的电位差计，如果有万分之一的精度等级，那么它的分辨率必须起码优于万分之一伏，否则准确度将失去意义。

4. 可靠性

可靠性是指仪表保持原来工作能力的指标，常以正常工作直至出现故障的时间来衡量其优劣。可靠性和稳定性不同，稳定性差是指仪表在仍能工作的条件下经过长时间而产生的缓慢的变化较大；而可靠性差是指仪表在短时间内即出现很大误差而不能工作的问题。稳定性差的仪表测出的结果仍有参考价值，而可靠性差的仪表测出的结果则可能是毫无意义的。

一般来说，结构越复杂的仪表，可靠性越不容易得到保证。对于大量应用电子线路的仪表可靠性是很重要的。对于复杂的电子仪器，其可靠性的优劣是决定它能否应用的重要问题。为了提高可靠性，有时要采用各种措施，如在使用中，用可靠性高而其他指标差的仪表辅助工作加以监视。

5. 使用方便

仪表还必须考虑使用方便，这也是反映仪表性能的一个方面。仪表要求使用前调整简便，能够立即使用而不需或稍需预热，接入电路及量程转换方便，要有多种测量对象并换接简便，读数不必运算就能直接得到或只需简单计算即可，以及不需要很高的保存条件等。从使用角度来看，人们喜爱万用表这样常用的产品。目前国内外都在大力发展，特别是向较高的精度等级迈进。

6. 测量时间

测量时间一般希望越短越好，但是由于测量原理和仪表结构的不同，测量时间的长短相差悬殊。例如，指示仪表接入被测值后只要几秒钟就能读数，而比较仪器就要很长的时间。有些测量时间慢些影响不大；有些测量则必须分秒必争。由于需要，近年来快速测量的仪表不断出现，如快速数字仪表等。”

五、电测仪表研制和生产的特点

在机电产品中，电测仪表的研制与生产有它自己的特点，归纳起来有以下几个方面：

1. 电测仪表是科学技术新成就的结晶

科学技术的不断发展提出了新的测量要求，并为研制新型仪表创造了条件，而新的测量方法和新型仪表的出现，又促进了科学技术的新发展。

往往电测仪表原理的创立、结构的改进和工艺的革新等，都是不断采用最新科学技术成果得来的。利用新原理构成新型仪表，测量水平可以飞跃提高，利用新技术改造旧式仪表效果也很明显。在核磁共振原理应用于测磁之前，磁场测量的精度只限于百分之一、二，应用核磁共振原理的磁场强度测量仪的误差，仅为十万分之几甚至更小。利用电子学和数字技术的新成就制成的数字仪表，不但精度可以达到十万分之几，而且也为实现每秒钟几千次（甚至更高）的高速测量创造条件，数字仪表是自动控制技术不可缺少的。过去一向被认为只能制造低精度仪表的电磁系原理，由于新型高导磁合金的出现而一跃进入 0.2 级甚至 0.1 级仪表的行列。

上述这些例子足以说明电测仪表的新品种是科学技术新成就的结晶。采用科学技术新成就不仅可提高仪表的技术指标，而且也可提高其经济效益。因而不断地采用科学技术的最新成果是发展电测仪表的一个重要方面。

2. 品种、规格繁多

由于现代工业和科学技术的要求，被测值的范围越来越广。以直流电流而论，在绝缘材料的超高阻测量及其他微电流测量中，电流的量值是很小的，仅为 10^{-14} 安培，即百万亿分之一安培，而强电流测量却在十万安培以上，可见其范围之广。这样广阔的测量范围绝不是一两种测量仪表所能够完成的。不考虑对仪表精度等方面的要求，仅从测量范围来看，就需要采用不同工作原理

的下述各种仪表来测量：动电容式仪表（ $10^{-17} \sim 10^{-9}$ 安培）；放大器式仪表（ $10^{-10} \sim 10^{-6}$ 安培）；光标式仪表（ $10^{-7} \sim 10^{-1}$ 安培）；指针式仪表（ $10^{-1} \sim 10$ 安培）；带外附分流器的仪表（ $10^2 \sim 10^4$ ）；霍尔效应或磁放大器式大电流测试仪（最大可达 10^5 安培）等。

上述这些，仅是直流电流的测量，如果同时考虑其他方面的测量，则可想见电测仪表的品种何等繁多。而每一品种为了制造方便又可分成很多规格，因此电测仪表品种、规格繁多是其显著特点之一。根据电测仪表的上述特点和国民经济发展的需要和可能，合理安排品种，划分规格，是大力发展电测仪表工业的重要问题。我国1962年制定了“电工仪表系列型谱”，对仪表产品做出了一些规定，今后这一工作仍应有计划地进行。

3. 需要特殊的元件、材料和工艺

仪表所需要的元件、材料品种多，用量少，还需要各种特殊的加工工艺，这是电测仪表的又一个特点。譬如说，一台铁磁电动系三相瓦特表就需要21种材料，其中有些是特殊材料。轴尖是用一种高级合金钢制成，它的工作部分的表面要抛光到 $\nabla 12 \sim \nabla 13$ 级（这是一种特殊工艺）。一个仪表用两个轴尖，其体积不大于一个火柴头。仪表上所用的导线最细的直径只有几个微米，眼睛看不清，要放在放大镜下绕线，出一口气都会把它吹断。电度表上用的润滑油，要求高于手表上用的表油，油的质量好坏直接影响到仪表的质量。

仪表生产上要求有较高的工艺卫生条件。精密仪表的生产还要求在恒温下进行，如校验时，要求温度变化在一、二度之内。

4. 仪表生产中需要校验与老化

仪表需要校验，这不同于一般机电产品出厂前的性能检验，而是仪表通过这一过程才能得到它的基本特性。这是仪表生产、特别是电测仪表生产的特点之一。

校验是保证仪表准确度的过程；老化则是取得稳定性的过程。

一般来说标准仪器的误差要小于被校仪表误差的五分之一。对于开关板仪表（误差为 $\pm 1.0 \sim 2.5\%$ ）要用0.2级或0.5级标