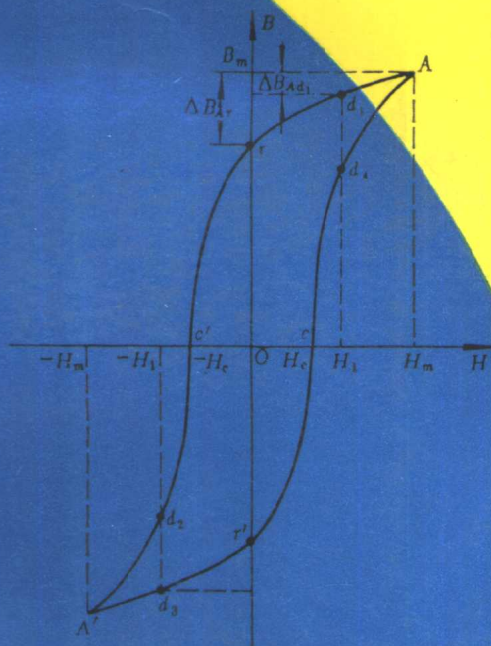


普通物理实验 指导

电磁学

谢慧媛 梁秀慧 主编
朱世嘉 严隽珏



● 北京大学出版社

普通物理实验指导(电磁学)

谢慧媛 梁秀慧 朱世嘉 严隽珏 主编

责任编辑: 周月梅

*

北京大学出版社出版

(北京大学校内)

北京大学印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

850×1168毫米 32开本 11.5 印张 290千字

1989年5月第一版 1989年5月第一次印刷

印数: 0001—5,000册

ISBN 7-301-00520-2/O·105

定价: 4.95元

内 容 简 介

本书是北京大学物理系普通物理实验教师多年教学实践经验的集成。全书共分三册：力学、热学和分子物理学实验；电磁学实验；光学实验。每个实验题目除了简明地介绍必要的实验原理、基本的仪器装置、实验内容、实验结果、数据处理和设计思想外，还对实验中出现的各种有关问题及教学重点和难点进行了详尽的讨论、分析。并附有思考题及考试题，为教学工作 and 学生学习提供了方便。

本书可作为全日制高等院校、电视大学和职工大学普通物理教师和学生的参考书，也可作为专科学校和普通中学物理教学参考书，亦可供其他从事物理实验的科技工作者参考。

前 言

普通物理实验是物理教学中的一个重要环节。长期以来，为了提高教学质量，我们教研室的实验教师和实验技术人员，深入钻研和讨论实验中的有关问题，不断更新和充实实验内容，作了大量的工作。我们认为，如果能把我们的教学经验和心得体会总结出来，不仅能提高我们的教学水平，也有助于与兄弟院校的同行们交流切磋，对青年教师和学生也有指导作用，为此我们编写了这本书。

书中所列的实验题目，除了简明地介绍必要的实验原理、基本的仪器装置、实验内容、实验结果和数据处理外，还着重分析讨论了与实验有关的问题。例如，实验的设计安排，仪器的调节，元件参数的选择，实验现象的分析，主要的误差等。本书还选编了我校历年所用的思考题、选作题和考试题。

考虑到近年来相继出版了一些普通物理实验试用教材，所以对这些书中已详细论述过的问题，本书不再赘述。但在写作过程中，为使阅读方便，我们也注意了保持全书的连贯完整。

虽然书中的各个实验是由实验室的同志们分头执笔编写的，但它是集体智慧的结晶。本书还吸取了兄弟院校同行们教学研究的成果，在此表示感谢。

虞福春教授热情支持、指导本书的编写工作，提出了许多有益的、中肯的意见，我们表示深切的谢意。

由于我们水平有限，书中难免有不妥之处，恳请广大读者批评、指正。

编 者

1985年2月

于北京大学物理系普通物理教研室

目 录

绪 论	(1)
实验一 电学实验基本知识	(5)
实验二 电表的扩程和校准	(17)
实验三 用惠斯登电桥测电阻	(25)
实验四 电位计的使用	(37)
实验五 万用电表的初步使用	(54)
实验六 伏安法测电阻	(65)
实验七 用双电桥测低电阻	(77)
实验八 灵敏电流计	(90)
实验九 用电流场模拟静电场	(102)
实验十 温差电偶的校准和测温	(126)
实验十一 用冲击电流计测螺线管内磁场分布	(136)
实验十二 用冲击电流计测电容和高电阻	(159)
实验十三 测定软磁材料的磁滞回线	(166)
实验十四 用非平衡电桥方法测定电阻温度系数	(184)
实验十五 交流电表的使用	(196)
实验十六 示波器的使用	(210)
实验十七 用霍尔元件测量磁场	(225)
实验十八 弱电流放大	(235)
实验十九 交流电路功率的测量	(249)
实验二十 交流电桥	(262)
实验二十一 交流电路的谐振现象	(279)
实验二十二 $R L C$ 串联电路的稳态特性	(287)
实验二十三 $R L C$ 串联电路的暂态特性	(299)
实验二十四 电子射线的电聚焦和磁聚焦	(327)

实验二十五 电子射线的电偏转和磁偏转.....	(338)
电学实验考题选辑.....	(349)

绪 论

(一)

物理学是一门基础科学，它是在长期实践和大量实验的基础上产生、发展和逐渐完善起来的。因此，物理学是一门实验科学，物理实验是物理课的一个重要的有机组成部分。搞好物理实验教学，可以使学生在理论课上学不到的知识和技能，培养学生的动手能力，使学生养成良好的实验习惯和科学作风，所以实验课是培养学生分析问题、解决问题能力的重要教学环节。

通过普通物理电磁学实验，学生主要应当学习和掌握以下几方面内容：

1. 学习电磁学中基本物理量的测量方法

电磁学中基本物理量主要有电压、电流、电阻、磁场强度、交流元件的阻抗、功率等。这些物理量可以直接测量，也可间接测量。学习基本量的测量方法，是提高学生实验技能的基础，在学习过程中要引导学生善于比较和归纳。

此外，还要通过实验观测和记录一些电磁学中的现象，这对于加深和巩固所学的理论知识以及提高用实验技术解决科技问题的能力是很必要的。对于这一类实验，学生不应当只停留在一些数据的测量上，而要善于用所学过的理论去分析实验现象，并体会这些实验是如何实现观察现象的。

2. 学习使用电磁学实验中的基本仪器

电磁学的测量离不开仪器仪表，特别是现代科学技术的发展，许多电磁学测量仪表已经标准化、系列化，因此熟悉和了解基本的电磁学测量仪器是一个科技工作者应当具有的一种技能。通过实验，应使学生掌握电磁测量中一些基本仪器的规格、性能

及使用方法。教师在安排实验内容上应考虑让学生对这些基本仪器有重复使用的机会，也可以通过设计性实验让学生主动选择仪器，以便进一步掌握基本仪器的使用。

3. 学习分析电磁学实验中的基本电路

学生在物理课中学习了直流电路、交流电路后，对于从理论上分析电路有了一定的基础，但是怎样把各种电路运用到实验中，仍需要通过一定的实践。

学习分析电路首先要看懂电路，了解每一部分电路的作用，这样在实验时才能做到在理解的基础上接线，而不是看一条接一条。通过分析电路，还应使学生体会到各种典型电路的设计思想和巧妙之处。在这个基础上要逐步学会设计一些简单的测量电路。此外，还要学会分析故障和排除故障，这对于提高学生分析问题和解决问题的能力是十分有利的。

4. 学习分析误差来源和提高数据处理的能力

在电磁学实验中，误差教学的主要内容是有关系统误差的分析和讨论。学生应当了解产生系统误差的来源和减少误差的途径，并对实验结果作一定的修正。在数据处理方面，要进行回归法、曲线拟合的训练，在当前微处理机逐步普及的情况下，关于这方面的教学可以进一步加强。

在实验教学中，应引导学生分析判断所测量的数据及实验结果是否符合物理规律，以使学生加深对实验原理、测量方法及仪器使用的理解。

除了以上具体要求外，通过实验课还应当有意识地培养学生良好的科学作风和实验习惯，例如如何记录原始数据、安排实验仪器、保证实验条件等。

为了达到上述教学要求，作为物理实验教员，要明确实验课的教学目的，既要熟悉所有的实验内容和了解有关的知识，又要深入掌握每一个实验的设计思想，并能迅速排除和解决实验中出现的故障和问题。这是因为，提高教员本身的实验素养和实验技

能是上好实验课的关键。

另外，由于实验课教学的特点，教员和学生能面对面地进行思想交流。课上，学生正处于积极思维状态，教员要巡回教学，引导学生发现问题、解决问题，并对学生进行个别的辅导和帮助。

(二)

误差教学贯穿在整个普通物理实验中，但不同阶段有不同的重点。在电学实验阶段，有关误差教学主要有以下几方面内容：

1. 仪器的基本误差

在电学实验中所使用的各种电学仪器，例如电阻箱、电表、电桥、电位计等都有各自的基本误差。可以根据对实验结果误差大小的要求来选择合适的实验仪器。

2. 电表内阻对测量的影响——方法误差

电学实验离不开测量电压和电流，为此要用到各种电表，由于电表内阻的存在，对测量结果或多或少会产生影响，这就是电表的方法误差。不同的测量线路，电表内阻引起的误差不同。

3. 灵敏度引起的误差

使用不同仪器测量电流或电压时，有的反应明显，有的反应不明显，这就是灵敏度引起的现象。仪器反应越明显，也就是灵敏度越高，造成的测量误差就越小。通过对灵敏度的分析，可以看到影响测量灵敏度的因素是多种多样的，理论计算比较复杂，实验时可以不要求学生作理论计算，但应当让他们了解提高测量精确度、改进实验的途径。

电学实验中的误差不仅于此，还有一些其它的系统误差和偶然误差。在每个电学实验中，对于实验误差的教学有不同的侧重点。在学习中，我们一般不要求对每个实验作全面的误差分析，因而也不要求把实验结果写成 $x \pm \Delta x$ 形式，若是写成这种形式，

务必要注明是什么因素引起的误差。

在电学实验阶段，数据处理方面还要进一步运用最小二乘法，用回归法进行曲线拟合。随着微处理机的普及使用，一些复杂的数据处理也就有可能进行了。

(三)

物理学是一门基础科学，不但物理系，其它理科、工科各系，甚至一些文科系也都开设了物理课和物理实验课。针对不同的要求，安排的实验学时也不同。大体说来，对物理类系（如物理系、无线电系、技术物理系和地球物理系），电磁学实验课一般为70—80学时，对非物理类系（如生物系、化学系、力学系等）一般为60—70学时，对某些非物理类系（如地质系、地理系、数学系等）约为30—40学时。在学完电磁学实验后，一般都有有一次总结或考查，对物理系学生，除了笔试外，还进行操作考试。

关于学生成绩的评定，我们是从四个方面来考虑的：一是预习，实验前要求每个学生写预习报告，内容包括电路图、测量内容和数据表；二是课堂操作，这是了解学生实际能力的一个重要方面，其中包括线路的连接、数据的测量和记录、仪器的使用、课后仪器的归整等科学作风；三是实验报告，内容包括实验目的、主要仪器及其主要规格、实验原理（即实验电路图、计算公式）、数据表及数据处理、作业题、实验中有关问题的分析和讨论；四是阶段考核，包括笔试或操作。

由于各系学生的情况不同，对他们的学习要求也不同，因此一定要适当安排实验内容，既不要给学生造成过重的负担，又要使学生通过实验有所收获、有所提高。

实验一 电学实验基本知识

谢 慧 璇

【教学要求】

- 一、了解电学实验的要求、学习重点、操作规程和安全知识；
- 二、学习电学实验中常用基本仪器的规格和使用方法；
- 三、学习连接电路的一般方法。学习用变阻器连成制流电路和分压电路的方法。

电学实验中常用的基本仪器集中在本实验里学习，学生掌握了这些内容，将有助于以后实验的顺利进行。所以，这个实验安排在第一个，以后再分4—6个实验为一个循环来进行教学。

本实验我们通常是这样进行的，讲解两学时，操作两学时。
讲解的内容是：

- 一、电学实验学习哪些内容；
- 二、介绍常用仪表——直流电表（检流计、电流表、电压表）、电阻箱和变阻器的基本结构、规格、使用方法和注意事项；
- 三、电学实验的操作规程，连线方法等。

操作的内容是：

- 一、正确记录所用仪表的规格；
- 二、按照操作规程练习连接变阻器的制流和分压电路，了解变阻器的使用方法；
- 三、练习电流表和电压表的读数，正确列表记录数据等。

【问题讨论】

本实验所讲的基本仪器在一般实验教材中均有详细介绍，在此不再多述。现仅就教学中经常遇到的问题进行讨论，并介绍一些有关资料供教师参考。

一、电表

1. 电表的准确度等级和基本误差

电表的 r_m 是电表标尺工作部分所出现的最大绝对误差 Δx_m 与量程 x_m 之比,通常用百分数表示:

$$r_m = \frac{\Delta x_m}{x_m} 100\% . \quad (1-1)$$

我国国家标准规定,对单向标尺电表以最大引用误差表示电表的基本误差,并以电表的基本误差确定电表的准确度等级。若以 a 表示电表的准确度等级,则有

$$\frac{\Delta x_m}{x_m} 100\% = \pm a\% . \quad (1-2)$$

由电表的准确度等级 a 及量程 x_m 可算出最大绝对误差 Δx_m ,电表标尺工作部分所有分度值的误差不允许超过最大绝对误差,因此 Δx_m 又叫电表的 Δx_m 最大允许误差。

目前我国生产的电气测量指示电表,其准确度等级分为七级,即0.1,0.2,0.5,1.0,1.5,2.5,5.0。我国旧标准中,准确度等级的最后一级为4.0级,因此目前产品目录中5.0和4.0级都有。

2. 电表测量结果的准确度

在用指示电表进行直接测量时,可以根据电表的准确度等级来估计测量结果的误差。

先求出最大绝对误差:

$$\Delta x_m = \pm a\% \cdot x_m .$$

再根据电表测量结果算出可能出现的最大相对误差 r 。

若电表测量时,指示值为 x ,则

$$r = \frac{\Delta x_m}{x} = \pm a\% \frac{x_m}{x} . \quad (1-3)$$

例 用一电流表测电流,电表的准确度为0.5级,量程为15mA,测量指示为5mA,求测量结果的误差。

解 最大绝对误差 $\Delta I_m = \pm 15\text{mA} \times 0.5\% = 0.075\text{mA}$,

测量结果的相对误差 $r = \Delta I_m / I = \pm \frac{15}{5} \times 0.5\% = \pm 1.5\%$ 。

由此可以看出,电表的准确度等级对测量结果的准确度影响很大,但是电表的准确度并不就是测量结果的准确度,后者还与被测量的大小有关。只有当待测量在满量程时,测量结果的准确度才与电表的准确度相等。因此绝不能把测量结果的准确度与电表的准确度混为一谈。

3. 如何选择合适量程的电表

为了充分利用电表的准确度,应选择合适量程的电表,被测量应大于电表量程的三分之二,这时可能出现的最大相对误差为

$$\frac{\Delta x_m}{x} = \pm a\% \frac{x_m}{2x_m/3} = \pm 1.5a\%,$$

即测量结果不会超过电表准确度等级百分数的1.5倍。

在选择电表时要根据被测量的大小及对测量结果准确度的要求,兼顾电表的量程和级别,进行合理的选择,而不要片面认为电表的级别愈高愈好。

例 被测电压为1V,用0.5级、0—3V和1.0级、0—1V两块电压表分别测量,问测量结果的相对误差各是多少?

解 用0.5级,0—3V电压表测量1V电压时

$$r_1 = \frac{\Delta U_m}{U} = \pm 0.5\% \times \frac{3}{1} = \pm 1.5\%;$$

用1.0级,0—1V电压表测量1V电压时

$$r_2 = \pm 1.0\% \times \frac{1}{1} = \pm 1.0\%.$$

由此例可以看出,如果量程选择合适,用1.0级表测量比用0.5级表测量还要准确。

4. 电表读数时的有效数字

电表读数时要求读至电表标尺上最小分格的1/10—1/2,

如果正好指在刻度线上，应统观其它处读数为几位，以决定在此整数值后面加几个零。如图 1-1 所示，指针指在①处应读为 4.85V；指在②处应读为 1.50V；指在③处应读为 3.00V。

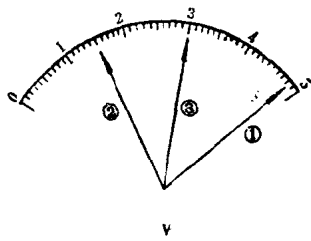


图 1-1

5. 数字电表

数字电表是一种新型的电测仪表，在测量原理、仪器结构和操作方法上都与指针式电表不同，数字电表具有准确度高、灵敏度高、测量速度快的优点，并可以和计算机配合给出一定形式的编码输出等特点。目前数字化测量技术已发展成为电测技术中一个非常重要的方面。因此在电学实验中向学生讲授一些有关数字电表的基本知识，并在实验中让学生使用数字电表是很必要的。

数字电压表和电流表的主要规格是：量程、内阻和精确度。数字电压表内阻很高，一般在 $M\Omega$ 以上，要注意的是其内阻不能用统一的每伏欧姆数表示，说明书上会标明各量程的内阻。数字电流表具有内阻低的特点。

下面着重介绍数字电表的误差表示方法以及在测量时如何选用数字电表的量程。

数字电压表常用的误差表示方法是：

$$\Delta = \pm (a\% U_x + b\% U_m), \quad (1-4)$$

式中 Δ 为绝对误差值， U_x 为测量指示值， U_m 为满度值， a 为误差的相对项系数， b 为误差的固定项系数。

从公式(1-4)可以看出数字电压表的绝对误差分为两部分，式中第一项为可变误差部分；式中第二项为固定误差部分，与被测值无关。

由(1-4)式还可得到测量值的相对误差：

$$r = \frac{\Delta}{U_x} = \pm \left(a\% + b\% \frac{U_m}{U_x} \right). \quad (1-5)$$

(1-5)式说明满量程时 r 最小, 随着 U_x 的减小 r 逐渐增大, 当 U_x 略大于 $0.1U_m$ 时, r 最大。当 $U_x \leq 0.1U_m$ 时, 应该换下一个量程使用, 这是因为数字电压表量程是 10 进位的。

例如, 一个数字电压表在使用 $2.0000V$ 量程时, 若 $a = 0.02$, $b = 0.01$, 其绝对误差为

$$\Delta = \pm (0.02\% U_x + 0.01\% U_m);$$

当 $U_x = 0.1U_m = 0.2000V$ 时, 相对误差为

$$r = \pm (0.02\% + 10 \times 0.01\%) = \pm 0.12\%,$$

而满度时 r 值只有 $\pm 0.03\%$ 。所以, 在使用数字电压表时, 应选择合适的量程, 使其略大于被测量, 以减小测量值的相对误差。

数字电表的数字部分误差很小, 一般为最后 1 个字 ± 1 。

二、电阻箱

1. 实验室中常用电阻箱的结构

实验室中常用的 ZX2-5 型旋扭式电阻箱和 ZX21 型旋扭式电阻箱, 它们都是开关式的。这种电阻箱是将阻值相同的电阻串联焊接在转换开关上, 依靠转动开关而变化阻值。有的电阻箱每一个开关上连接 9 个或 10 个相同阻值的标准电阻(例如 0.1Ω , 或 1Ω , 或 10Ω ...) 串联而成, 见图 1-2(a); 也有的是 5 个标准电阻(首位数为 1 的 1 个, 首位数为 2 的 4 个), 按照图 1-2(b) 的连接方式构成; 还有的是首位数为 1 的 4 个, 首位数为 5 的 1 个, 按照图 1-2(c) 的连接方式构成。以上三种连接方式达到同样的目的, 即拨动电阻箱上每一个开关(旋扭)都能从 1—9 变化, 如 $\times 10$ 挡, 阻值由 $10\Omega, 20\Omega, \dots, 90\Omega$ 。

图 1-2 中只画出 $\times 1$ 和 $\times 10$ 两挡, 其它各挡结构与此相同, 三个图中电阻值指示数均在 38 Ω 处。

ZX 2-5 型旋扭电阻箱内部结构原理如图 1-2(c) 所示的连接方式, ZX 21 型旋扭电阻箱内部结构为图 1-2(b) 所示的连接方式。

2. 电阻箱各转换开关上电阻的额定电流

电阻箱的同一开关上不论指示何值均与以 1 为首位数的电阻

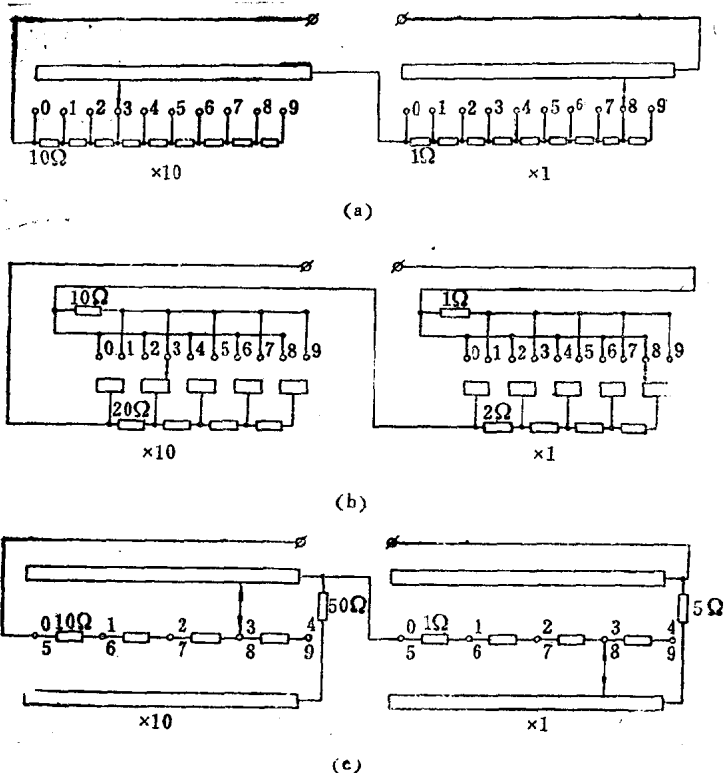


图 1-2

允许通过的电流相同。以 ZX21 为例，每个以 1 为首位数的电阻，其额定功率为 0.25W ，以 2 为首位数的电阻，其额定功率为 $(0.25 \times 2)\text{W}$ 。

当几挡联用时，额定电流按阻值最大挡来计算。如指示数为 817Ω ，允许通过的电流按 100Ω 挡来计算，即 0.05A 。

3. 电阻箱的误差

(1) 电阻箱在额定电流范围内其基本误差应符合下式要求：

$$\Delta = \pm (a\%R + b), \quad (1-6)$$

式中， Δ 为基本误差值 (Ω)， a 为准确度等级， R 为电阻箱接入电阻值， b 为常数，当 $a \leq 0.05$ 级时， $b = 0.002\Omega$ ；当 $a \geq 0.1$ 级

时, $b = 0.005\Omega$.

(2) 电阻箱的零电阻应符合下式要求:

$$R_0 = N r_0, \quad (1-7)$$

式中 R_0 为零电阻(Ω), N 为电阻箱上旋钮数, r_0 为每一旋钮允许的平均零电阻, 当 $a \leq 0.05$ 级时, $r_0 = 0.002\Omega$; 当 $a = 0.1$ 或 0.2 级时, $r_0 = 0.005\Omega$; 当 $a = 0.5$ 级时, $r_0 = 0.01\Omega$.

(3) 电阻箱的误差

电阻箱的基本误差和零电阻之和为电阻箱的主要误差来源, 根据公式(1-6)和(1-7)算出绝对误差为

$$\Delta R = \Delta + R_0 = \pm (a\% R + b) + R_0.$$

相对误差为

$$\frac{\Delta R}{R} = \pm \left(a\% + \frac{b}{R} \right) + \frac{R_0}{R}.$$

以 ZX 21 型电阻箱为例, 它的阻值范围为 $0.1-10^5\Omega$, 准确度等级为 0.1 级, 外形如图 1-3 所示。

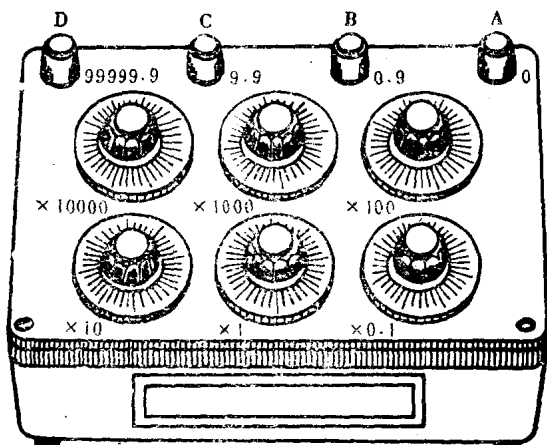


图 1-3

当 A, D 两接头接入电路时, 电阻箱的最大电阻值为 99999.9 Ω ; 当 A, C 两接头接入电路时, 最大电阻值为 9.9 Ω ; 当 A, B 两