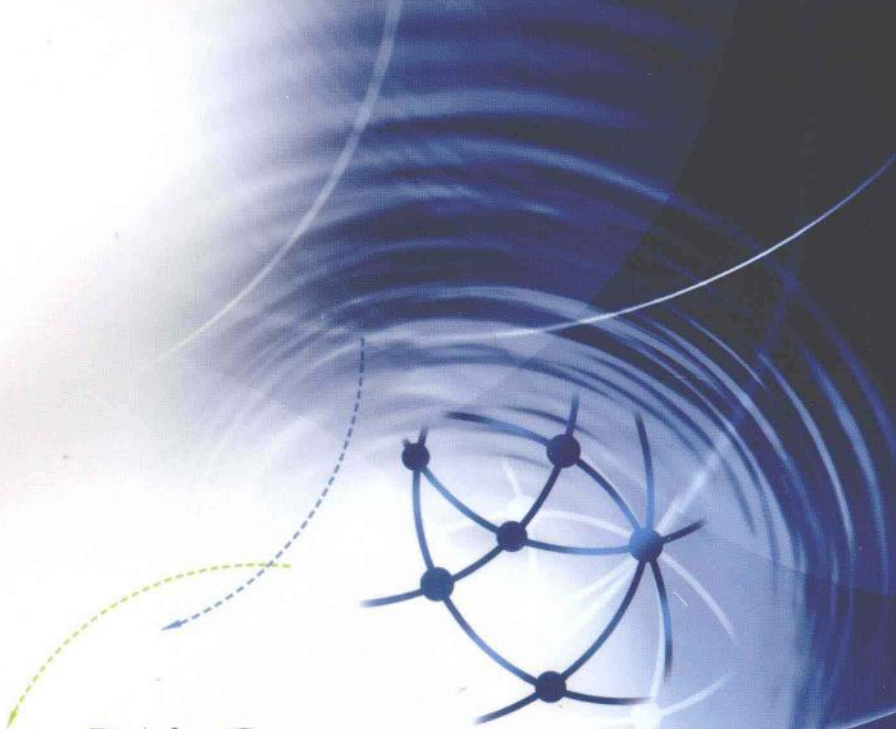




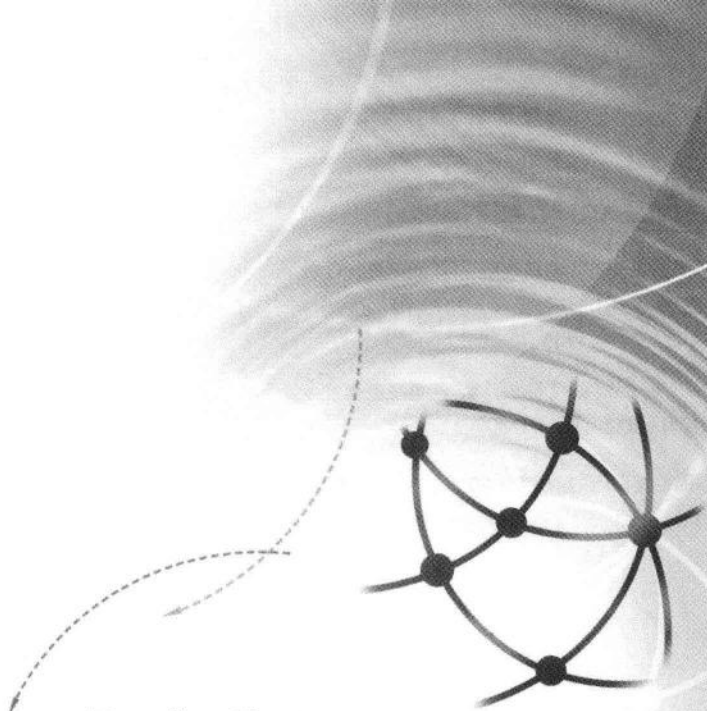
Basic Course of
Electrical & Electronic
Measurements and Experiments

电工电子测量方法 与实验基础教程

韩春娟 主编



中国市场出版社
China Market Press



Basic Course of
Electrical & Electronic
Measurements and Experiments

电工电子测量方法 与实验基础教程

刘彦昌 韩春娟 主编



中国市场出版社
China Market Press

图书在版编目 (CIP) 数据

电工电子测量方法与实验基础教程 / 刘彦昌, 韩春娟主编. —北京: 中国市场出版社, 2013.10

ISBN 978-7-5092-1149-6

I. ①电… II. ①刘… ②韩… III. ①电子测量技术—高等教育—教材 IV. ①TM93

中国版本图书馆CIP数据核字 (2013) 第243020号

电工电子测量方法与实验基础教程

刘彦昌 韩春娟 主编

特约审稿: 刘 声

责任编辑: 白 琼 (qiongbaiace@126.com)

出版发行:  中国市场出版社
China Market Press

地 址: 北京市西城区月坛北小街2号院3号楼 (100837)

电 话: 编辑部 (010) 68032104 读者服务部 (010) 68022950

发行部 (010) 68021338 68020340 68053489

68024335 68033577 68033539

经 销: 新华书店

印 刷: 河北省高碑店市鑫宏源印刷包装有限责任公司

规 格: 720毫米×1020毫米 1/16 14印张 220千字

版 本: 2013年10月第1版

版 次: 2013年10月第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-5092-1149-6

定 价: 36.00元

前 言

近年来高职教育在我国取得了长足的发展，以就业为导向、以提高学生的实际工作能力为目标的办学思想得到了广大高职教育工作者的支持，因此实验教学环节在整个教学计划中的作用更加重要。实验基础课是在第一学年开设的实验课，目的在于一开始就为学生奠定良好的实验基础，为他们完成整个专业培养目标作好准备。

本书主要是针对高等职业技术学院的电子类专业学生编写的。为了更好地调动学生学习的积极性、主动性，我们以理论适度够用、突出实际工作能力并适当照顾到发展为原则，适当地减少了对实验原理的阐述。实验项目的难度和分量，都给予了适当减轻。全书共分三章，第一章是数据的测量和误差处理；第二章是常见物理量的测量；第三章是实验项目。全书共收集 17 项实验，附录介绍了 SI 和常用物理常数。

在编写过程中，笔者考虑到学生的实际情况，以及时代性和基础性，力争使本书达到如下目标：

1. 可读性强，让学生无师自通，基本可以自己动手作实验；
2. 采用不确定度这一于国内外科技接轨的新概念和数据处理方法；
3. 突出实验的工程使用性，涉及的实验基本方法包含了学生日后工作中将遇到的大多数测试方法；
4. 实验原理的阐述深入浅出，严格而简明。

刘彦昌和韩春娟承担了前言、绪论、第一章、第二章、第三章中实验 1 到实验 13 的编写内容；芮法成承担了第三章实验 14 到实验 17、附录、参考文献等的编写内容；全书由刘声、杨振东、单立群、宋晓毓审稿。

本书的编写得到了主持教学的院系领导的关心和支持，凝聚了老一辈教学专家的心血和希望，更有年轻一代教师的辛勤劳动和帮助。在此，对他们的劳动和努力表示衷心的感谢。

限于编者的水平，书中可能还有很多错误和不当之处，敬请各位专家和读者不吝指教。

编 者

2013 年 10 月

东北石油大学秦皇岛分校

目 录

绪 论	1
第一章 数据的测量和误差处理	3
第一节 测量	3
第二节 标准差	11
第三节 不确定度	16
第四节 有效数字及其运算	25
第五节 数据处理方法	31
第二章 常见物理量的测量	39
第一节 长度测量	39
第二节 质量测量	48
第三节 时间测量	50
第四节 温度测量	51
第五节 电磁学实验所用基本仪器	52
第六节 光强度测量	66
第七节 湿度测定	66
第八节 气压计	68
第九节 常用光源	72
第十节 实验基本方法	74

第三章 实验项目	80
实验 1 固体密度测量	80
实验 2 用替代法测定 $50\mu\text{A}$ 表头的内阻	82
实验 3 改装电流表	85
实验 4 改装电压表	89
实验 5 改装欧姆表	93
实验 6 用伏安法测电阻	97
实验 7 用惠斯通电桥（单臂桥）测中阻	102
实验 8 自组惠斯通电桥测中阻	106
实验 9 用开尔文桥（双臂桥）测低阻	108
实验 10 MF47 型万用表的原理和使用	113
实验 11 电路故障分析	117
实验 12 示波器的使用 训练一	123
实验 13 示波器的使用 训练二	146
实验 14 用热电偶传感器测温	148
实验 15 霍尔传感器测量磁场的分布	158
实验 16 非平衡电桥与应用	169
实验 17 万用表、色环电阻及焊接技术	173
附 录	206
参考文献	218

绪 论

在高职教育中，以就业为导向、以提高学生的实际工作能力为目标的办学思想已被社会所认同。而实验教学对完成整个专业培养目标至关重要，对于电子类专业的学生，实验基础课是在第一学年开设的实验课，目的在于一开始就为学生奠定良好的实验基础，为他们完成整个专业培养目标作好准备。

一、实验基础课的目的

(1) 通过对实验现象进行观测和分析，学习运用理论指导实验、分析和解决实验问题的方法，加深对理论的理解，掌握数据的正确记录和处理，并撰写规范的实验报告。

(2) 培养学生学习使用常用的实验仪器，并重点学会用万用表和示波器这两种工具测量电压、电流、电阻的基本方法。

(3) 培养学生具备运用基本焊接工具、焊接电路板和识别基本电子元器件的能力。

(4) 培养学生实事求是、严谨踏实的工作作风。勇于探索和思考，敢于“碰钉子”、敢于“拔钉子”的精神，培养学生敢于创新、团结互助、爱护公物的品德。

二、实验基础课的主要环节

1. 作好实验预习

课前必须认真阅读教材和有关资料；对实验原理和所用的实验基本方法，

特别是对作好实验的关键环节要有自己的见解；必须写出包括记录表格在内的预习报告。

2. 实验操作

学生一进入实验室，对于先做什么后做什么一定要做到心中有数。我们强调观察是基础，测量是第二位。如果观察现象不正确，测量便失去意义。作为学生，千万不要认为测了几个数据就算大功告成，就心满意足。

做原始记录是很严肃的。原始记录纸要正规，字迹要清晰。数据错了，在其上轻轻划上一杠，将正确数据写在旁边，决不允许乱涂乱抹。

实验结束后，将原始记录交给任课教师，待教师签字后方可生效。

3. 撰写一份简洁、清楚、工整和富有见解的报告

在实验报告中，班级、组号、姓名、所用仪器台号以及其规格型号与实验名称都要写清楚，并且将实验时的温度、相对湿度和大气压强注明；实验原理要写得简单明了，不许照抄教材；回答思考题；在实验中感到最深刻和最有收获的地方，写出总结。

三、实验守则

(1) 学生按照自己的学号对号入座，将预习报告放在桌上等待教师的检查。

(2) 严格遵守实验室有关规定，未经许可，禁止擅自动用其他台（套）仪器。

(3) 不许大声喧哗、吵闹。

(4) 不要伪造数据，一旦发现，该次报告以零分计算。

(5) 如有仪器、元件损失，及时报告任课教师。

(6) 实验完成后，数据交教师签字。在仪器使用情况登记本上登记，所用物品要整理好，清洁擦拭自己所用的桌椅、仪器，值日生要打扫室内地面卫生。

第一章 数据的测量和误差处理

本章的主要目的是要弄清不确定度的概念及其计算方法。任何一项测量结果、任何一项实验结果、任何一项工程项目最终的合格与不合格，或者对它优、良、美、劣质量的评定，唯一的办法是计算其不确定度大小。为实现上述目的，须先将有关概念和计算方法加以详细论述，如测量、误差、标准差、标准差的合成、置信概率等。论述中，始终以实验实例为中心，逐步使概念深化，使计算具体化。

第一节 测量

一、测量

测量过程，是指获得与给定目标有关的设备、方法、操作、环境、数据等全部信息。通俗地说，即把作为标准的仪器、仪表或量具同被测对象加以比较的过程。在此过程中，要获得所用仪器、仪表、量具的规格、型号、等级，以及测定的时间，环境的温度、湿度，大气压强，操作情况，测量方法和测量数据等全部信息。

测量分为直接测量和间接测量，由直接测量得到的值，称为直接测量值；由间接测量得到的值，称为间接测量值。例如：（如图 1—1）用伏安法测电阻 R_x ，毫安表的内阻为 R_I ，电压表的内阻为 R_V ，则待测电阻 R_x 的大小，可

由下式求出。

$$R_x = \frac{V}{I} - R_I$$

式中 I 、 V 是从毫安表和电压表上直接读到的, 则 I 、 V 称为直接测量值, R_I 是实验室给出的, 为已知值。

R_x 是由公式 $R_x = \frac{V}{I} -$

R_I 计算出来的, 叫间接测量值。又如: 一个

矩形面积 S , 应为 $S = a \times b$, a 为矩形的一个边长, 即长度, b 为矩形的另一个边长, 即宽度, a 、 b 皆为直接测量值, 而 S 则为间接测量值。

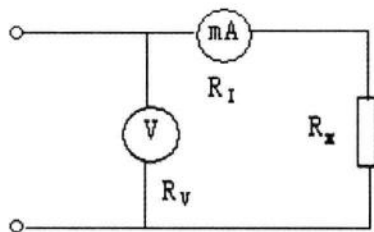


图 1-1 伏安法测电阻

二、误差

笼统地说, 客观存在的真实值, 叫真值。真值的确切定义应为: 当物理量与测量过程完全确定, 且所有测量不完善性可以排除时, 由测量所获得的一个值, 称为真值。

误差的定义为: 误差 = 真值 - 测量值, 用符号表示为 $\Delta x_i = \bar{x} - x_i$ 。

由于在所有的测量中, 测量的不完善性是决不可能完全排除的, 因此真值是不能测得的。某些情况下, 真值是知道的, 例如: 三角形内角和是 180° , 这是理论值, 但实际测量时, 此值是无法测得的, 实际测量总是比真值 180° 少一点或多一点。

对某一物理量 x , 测量 n 次, 得到 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, 其算术平均值为 $\bar{x}$

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

算术平均值 $\bar{x}$ 比任何一次测量值 x_i 都更接近真值, 所以将算术平均值叫作最佳值或近真值。

我们只能用近真值来代替真值, 于是有: 偏差 = 算术平均值 - 测量值。由此可见, 偏差和误差是不同的概念, 在我们的实验中, 为了方便, 今后不

把这两种概念加以严格区分，当说误差时，实际上说的是偏差。

三、误差的分类

误差自始至终存在于一切实验的整个过程中，这是客观的反映。

误差按其产生的原因和性质分为以下两大类。

1. 系统误差

系统误差是在相同条件下多次测量同一个物理量时，误差的绝对值和符号保持恒定，或者在条件改变时，按其确定的规律变化的误差。

如一块手表，当每日以确定的时刻从广播或电视上对表（每日对表条件是相同的），发现该表“总是”比北京时间“慢”30s。“慢”或“快”是符号（以“-”或“+”来表示），30s是大小。“总是”意味着恒定。还有，如分光计的度盘偏心所引起的角度测量误差是按正弦规律变化的，此乃定义中所说的“按某一确定规律变化的”系统误差。

系统误差的产生原因有很多种，但主要是以下三种：

- （1）所用仪器、仪表、量具的不完善性，这是系统误差产生的主要原因；
- （2）实验条件没有或不可能满足理论上的要求；
- （3）操作者养成的心理（如性急）和不正常的生理状态所造成的。

一般情况下，系统误差在测量中都占较大比重，减少系统误差是应该的，也是可能的，但完全消除系统误差是办不到的。例如，由仪器、仪表、量具等不完善性所引起的系统误差，仪器、仪表、量具可以做到当代条件下的尽善尽美（这是要付出相当大的代价的），但不可能做到十全十美。对系统误差，在所有的实验中都要引起足够的注意。如图 1-1 中，待测电阻 $R_x = \frac{V}{I} - R_l$ ，最后一项减去 R_l ，这是为了减少系统误差；在改装电表实验中采用指针、刻度线、镜子里的弧影三线重合法读数，都是为了减小系统误差而采取的措施。尽管消除系统误差不可能，但要采取可能的一切措施，把系统误差降到最低程度。

2. 随机误差

随机误差是在相同条件下多次测量同一物理量时，误差的绝对值和符号

不恒定。即误差的大小和符号没有确定的规律，呈时大时小、时正时负的现象。它的最大特点是具有随机性。

随机误差的产生原因也有很多种，但主要是以下两种：

(1) 实验者感观器官的分辨本领有限。分辨本领主要指实验者的眼、耳、口、鼻以及触摸感觉。

(2) 环境中的一些随机和不确定性因素。

对任何一次测量的随机误差，是大是小、是正是负，毫无规律可循，但对同一量在相同条件下测量很多次时，可以发现，随机误差遵守统计规律。统计规律有以下三项特点：一是绝对值相等的正、负误差出现的几率相同；二是绝对值较小的误差出现的几率较大，绝对值较大的误差出现的几率较小；三是绝对值很大的误差一般不会出现，这一规律是正态分布律中的一种典型的分布特征。

通常减少随机误差的办法，就是增加测量次数，求平均值。理论和实践都可以证明，当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时，随机误差的代数和为 0。

至于观察者由于粗心大意，或因疲劳过度将数据读错、记错，一些人将由此得到的误差称为过失误差。而我们只能视其为过失或错误，不能称之为过失误差。产生这样的过失，只能重做，或视之为坏值，在处理数据时，将其剔除。

四、关于准确度、精密度、精确度以及精度的解析

准确度、精密度、精确度以及精度，在各种科技书刊上，甚至教科书上，释义大不一样，国内外学者对此也颇有争论。外语中，特别是英语中为多义词，也没有确切的解释。下面仅根据比较多的说法归纳总结，作如下解释。

准确度是衡量测量值接近真值程度的物理量，主要是指系统误差，与随机误差大小无关。

精密度是衡量测量数值之间相互接近程度的物理量，与系统误差大小无关。测量、数值的精密程度高，说明测量数值彼此之间很接近，即比较集中，

测量的随机误差小。

精确度是衡量所测数值的准确度与精密度的综合情况的物理量。

我们以打靶为例来说明以上三个物理量的意义和差别。a) 说明准确度高(平均而言), 但精密度低。b) 说明精密度高, 但准确度高。c) 说明准确度和精密度都高, 即精确度高。有时也把精确度简称为精度。如图 1-2。

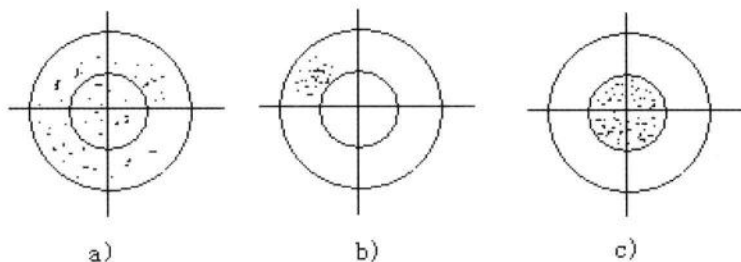


图 1-2 打靶图形

一些厂家的仪器说明书上, 甚至把仪器、量具的最小分格, 即最小分度值也叫准确度, 这样做, 甚为不妥, 因为准确度、精密度、精确度都是相对于测量值而言的。对仪器、仪表、量具的最小分度值, 叫精度, 这种说法, 还可以理解, 但为了不致将概念混淆, 最好把最小分格就叫最小分度值, 不要再用别的名称。

五、随机误差的计算

(一) 直接测量值误差的计算——算术平均误差计算

欲求算术平均误差, 须按以下四步进行。

1. 求算术平均值

对某一物理量 x , 在相同条件下测量 n 次后, 得到的测量值为 x_1 、 x_2 、 $x_3 \cdots x_n$ 。

所以, 算术平均值 $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$

2. 求平均绝对误差

第一次测量的绝对误差为 $\Delta x_1 = |\bar{x} - x_1|$

第二次测量的绝对误差为 $\Delta x_2 = |\bar{x} - x_2|$

第 n 次测量的绝对误差为 $\Delta x_n = |\bar{x} - x_n|$

$$\text{平均绝对误差为 } \overline{\Delta x} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i}{n}$$

3. 相对误差以符号 E 表示, 相对误差亦叫百分误差

相对误差是评价测量结果好坏的最重要指标。

$$E_x = \frac{\overline{\Delta x}}{\bar{x}} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i / n}{\sum_{i=1}^n x_i / n} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i}{\sum_{i=1}^n x_i} \times 100\%$$

4. 结果表达式

$$x = (\bar{x} \pm \overline{\Delta x}) (\text{单位})$$

上式说明, x 的真值在由 $(\bar{x} - \overline{\Delta x})$ 到 $(\bar{x} + \overline{\Delta x})$ 的区间内的几率 (即置信概率) 为 57.5%。这样的概率太低了。所以算术平均误差仅在简单的测量中或作一些粗略估算时用一下, 在作数据处理时一般是不用的。但它涉及的概念和思想还是重要的。

(二) 间接测量值的算术平均误差计算——间接测量值的误差的传递

$\Delta x_i = |\bar{x} - x_i|$, Δx_i 叫绝对误差, 其物理实质乃是一增量, 求增量是很繁杂的。但将增量用泰勒级数展开, 略去二次项、三次项以及余项后, 只剩第一项, 即线性主部 dx , 故有 $\Delta x = dx$ 。

如此, 计算增量便变成求微分了。求微分比求增量要简单得多, 如下。

1. $N = A + B$

间接测量值 N 是直接测量值 A 和直接测量值 B 的函数, 根据上述办法, 则有 $\Delta N = \Delta(A + B)$, $dN = d(A + B)$, $dN = dA + dB$

即绝对、相对误差分别为

$$\Delta N = \Delta A + \Delta B \quad E_N = \frac{\Delta A + \Delta B}{A + B}$$

若 A、B 皆为多次直接测量值，则有

$$\overline{\Delta N} = \overline{\Delta A} + \overline{\Delta B} \quad E_N = \frac{\overline{\Delta N}}{\overline{N}} = \frac{\overline{\Delta A} + \overline{\Delta B}}{\overline{A} + \overline{B}}$$

2. $N = A - B$

$\Delta N = \Delta A - \Delta B$ 或 $\overline{\Delta N} = \overline{\Delta A} - \overline{\Delta B}$ ，请务必注意，物理学中有一重要物理思想，即认为不同类项的误差是相加的。即是对 $N = A - B$ ，而 $\Delta N = \Delta A + \Delta B$ 或 $\overline{\Delta N} = \overline{\Delta A} + \overline{\Delta B}$ ， ΔA 和 ΔB 中间是“+”，不是“-”。

$$E_N = \frac{\Delta N}{N} = \frac{\Delta A + \Delta B}{A - B} \quad \text{或} \quad E_N = \frac{\overline{\Delta N}}{\overline{N}} = \frac{\overline{\Delta A} + \overline{\Delta B}}{\overline{A} - \overline{B}}$$

3. $N = A \cdot B$

$dN = B dA + A dB$ ，其绝对误差和相对误差分别为 $\Delta N = B \Delta A + A \Delta B$ 或 $\overline{\Delta N} = \overline{B} \Delta A + \overline{A} \Delta B$

$$E_N = \frac{B \Delta A + A \Delta B}{A \cdot B} = \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B} \quad \text{或} \quad E_N = \frac{\overline{\Delta A}}{\overline{A}} + \frac{\overline{\Delta B}}{\overline{B}}$$

4. $N = A/B$

$dN = \frac{B dA - A dB}{B^2}$ ，其绝对误差和相对误差分别为

$$\Delta N = \frac{B \Delta A + A \Delta B}{B^2} \quad \text{或} \quad \overline{\Delta N} = \frac{\overline{B} \Delta A + \overline{A} \Delta B}{\overline{B}^2}$$

$$E_N = \frac{\frac{B \Delta A + A \Delta B}{B^2}}{\frac{A}{B}} = \frac{B \Delta A + A \Delta B}{B^2} \times \frac{B}{A} = \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B}$$

或
$$E_N = \frac{\overline{\Delta A}}{\overline{A}} + \frac{\overline{\Delta B}}{\overline{B}}$$

由以上四个函数式的绝对误差、相对误差，可以看出：

(1) 以求微分代替求增量，是很方便的。

(2) 对“认为不同类项的误差（不是微分）是相加的”，这一物理思想要从客观的事实中去思考和认识。

(3) “加法”和“减法”的间接测量值的绝对误差计算方法一样——函数（间接测量值）的绝对误差等于参与运算的每一个直接测量量的绝对误差之和。所以，遇到“加、减”函数式为了方便，先求函数的绝对误差，而后根据相对误差的定义，即可求相对误差。

(4) “乘、除”函数式（间接测量值）的相对误差计算方法一样——函数的相对误差等于参与运算的每一直接测量量的相对误差之和。所以遇到“乘、除”函数式，为了方便，宜先求函数的相对误差，而后根据绝对误差的定义，即 $\Delta N = E_N \cdot N$ 求绝对误差。

(5) 在一般情况下，有函数为 $N=f(A, B, C, \dots)$ ，应先求其全微分，

$$dN = \frac{\partial f(A, B, C, \dots)}{\partial A} dA + \frac{\partial f(A, B, C, \dots)}{\partial B} dB + \frac{\partial f(A, B, C, \dots)}{\partial C} dC$$

将此式改写为误差公式，即：

$$\Delta N = \left| \frac{\partial f(A, B, C, \dots)}{\partial A} \Delta A \right| + \left| \frac{\partial f(A, B, C, \dots)}{\partial B} \Delta B \right| + \left| \frac{\partial f(A, B, C, \dots)}{\partial C} \Delta C \right| + \dots$$

有了 ΔN ，根据相对误差的定义，可求相对误差 $E_N = \frac{\Delta N}{N}$ 。

思考题

1. 按照误差产生的原因和性质误差可分为几类？绝对误差、相对误差是误差的种类吗？

2. 为什么系统误差只可减少，不可消除？为什么随机误差大小与测量次数有关，当测量次数 n 越大，随机误差越小？

3. 用米尺测量一物体的长度，测得值分别为 $L_1 = 98.98\text{cm}$ ， $L_2 = 98.94\text{cm}$ ， $L_3 = 98.96\text{cm}$ ， $L_4 = 98.97\text{cm}$ ， $L_5 = 99.00\text{cm}$ ， $L_6 = 98.95\text{cm}$ ， $L_7 = 98.97\text{cm}$ 。求 $\bar{L}$ ， $\overline{\Delta L}$ ， E_L 和 $L = (\bar{L} \pm \overline{\Delta L})$ 。