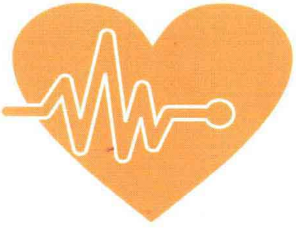
医学物理学实验

曾碧新 黄　敏 陈付毅 邵和鸿 主编



科学出版社

医学物理学实验

医学物理学实验

曾碧新　黄　敏
陈付毅　邵和鸿　主　编

科学出版社
北　京

内 容 简 介

本书是依据医学物理学实验教学大纲，并总结作者长期从事医学物理学实验教学的实践经验编写而成的。书中除了介绍力学、热学、声学、电磁学、光学和近代物理实验外，还根据医学院校专业的特点，增加了包括人耳听阈曲线测定、角膜曲率半径测定等医学物理量测定的实验。

本书适合高等医药院校五年制和七年制临床、基础、口腔、预防、医学检验、卫生检验、护理、麻醉、影像、药学等专业学生使用，也可供医药院校其他专业和生命科学相关专业学生使用。

图书在版编目(CIP)数据

医学物理学实验/曾碧新等主编. —北京：科学出版社，2012
ISBN 978-7-03-033471-8

Ⅰ.①医… Ⅱ.①曾… Ⅲ.①医用物理学-实验-医学院校-教材
Ⅳ.①R312-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 017407 号

责任编辑：胡云志 石 悦 唐保军 / 责任校对：张小霞
责任印制：张克忠 / 封面设计：华路天然设计工作室

科学出版社 出版
北京东黄城根北街 16 号
邮政编码：100717
http://www.sciencep.com
北京九天志诚印刷有限公司 印刷
科学出版社发行 各地新华书店经销
*
2012 年 2 月第 一 版 开本：720×1000 1/16
2012 年 2 月第一次印刷 印张：7 1/4
字数：140 000

定价：24.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

前　言

医学物理学是高等医学教育中的一门基础课程，它的任务是比较系统地教授学生物理学知识，使他们能够掌握物理学中的基本概念、基本规律和基本方法，为学习后续课程以及将来从事医疗卫生工作打下物理基础。医学物理学实验是对学生进行科学实验基础训练的一门重要课程，它不仅可以加深学生对医学物理学理论的理解，更重要的是使学生获得基本实验知识，在实验方法和实验技能方面得到较为系统、严格的训练，培养他们进行科学工作的能力和良好的工作作风。本书是依据医学物理学实验教学大纲，并总结作者长期从事医学物理学实验教学的实践经验编写而成的。

书中除了介绍力学、热学、声学、电磁学、光学和近代物理实验外，还根据医学院校专业的特点，增加了包括人耳听阈曲线测定、角膜曲率半径测定等医学物理量测定的实验。

本书由曾碧新、黄敏、陈付毅、邵和鸿任主编。全书共 27 个实验，其中曾碧新编写绪论、实验 16、实验 18、实验 22、附录 B、附录 C；黄敏编写实验 5、实验 11、实验 15、实验 17、实验 19、实验 21；陈付毅编写实验 3、实验 4、实验 6、实验 10、附录 A；邵和鸿编写实验 1、实验 8、实验 9、实验 12、实验 13、实验 23、实验 24；另外，孙俭与曾碧新合编实验 2、实验 20；陈亮亮与陈付毅合编实验 7、实验 14；蔡双双与邵和鸿合编实验 25、实验 26、实验 27。

本书适合高等医药院校五年制和七年制临床、基础、口腔、预防、医学检验、卫生检验、护理、麻醉、影像、药学等专业学生使用，也可供医药院校其他专业和生命科学相关专业学生使用。

陈式苏教授审阅了全书，一些从事医学物理学实验教学多年的教师为本书的编写做了很多工作，胡晞同志绘制了大部分插图。在此一并表示衷心感谢！

本书的出版得到科学出版社的大力支持，在此表示衷心感谢！

由于作者水平有限，书中难免有不当之处，敬请使用本书的师生批评指正。

作　者

2011 年 9 月

目　　录

绪　论

1. 测量的误差

由于我们所使用仪器的缺陷和我们感觉器官的不完善等，任何物理量的测量，都有一定误差。因此，我们必须对误差的性质进行分析，对测量所得的结果进行合理的处理，有个恰当的评价，既不对它的精确性估计过高，也不致估计过低，不敢相信。

测量误差按其性质可分为两大类。

一类误差称为系统误差，产生它的主要原因是校正不够完善，或者仪器本身有缺陷。例如，一根标尺的所有刻度，如果间隔太大或太小，那么用此标尺量出的长度，就会太小或太大。又如，由于假定电流计指针的偏转格数与电流强度成正比，而把电流计的标尺按线性关系来刻度，但实际往往并非如此，这样指示的数和真实电流间就有了差异。这类误差具有确定的性质，可以通过对仪器的校正、对测量本身的批判等来修正，原则上可以达到当时测量技术所能达到的最低限度。但是，在实际工作中，这种修正是不能常做到的，对于我们的实验，做到的可能性更小。因此，在对我们测量结果的准确性进行判断时，自然不可能把这种总是存在着的系统误差一同考虑在内。

另一类误差称为偶然误差，产生它的主要原因之一在于观察者本身，而且主要是读数时受到感觉器官分辨本领的限制。例如，用一根米尺来测量某一物体的长度，在确定物体两端读数时，只能估计到米尺的最小刻度(1mm)的几分之一，有时估计得多些，有时估计得少些。因此这类误差具有不确定的性质。在一系列的测量中，各个测量结果都将分散在其平均值附近。离平均值越远，出现的次数越少。在不考虑系统误差的情况下，我们可以说，所要测量的物理量的真值在各次测量值分散的范围以内，而且比较靠近平均值，但平均值并不是真值，如增加测量次数，平均值通常有所变动，而真值是不变的。误差理论及计算的目的是确定怎样的值最接近于真值及其偏离真值的程度如何。

2. 最近真值与平均误差

对一个物理量进行重复测量，根据概率论可以证明：各次测量的算术平均值最接近真值，算术平均值 $\bar{x}$ 为

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} x_k \tag{0-1}$$

式中，n 为测量次数，x_k 为第 k 次测量所得的值。因为其真值是不知道的，或根本不

存在。因此，我们就以 $\bar{x}$ 来代表真值，而将 $U_k = x_k - \bar{x}$ 称为各次测量的偏差。但从式(0-1)可以看出 $\sum U_k = 0$，因此 U_k 本身尚不足以表示测量数据的离散程度，所以我们用 $(U_k)^2$ 来度量误差的大小，将

$$S = \sqrt{\frac{\sum (U_k)^2}{n-1}} \tag{0-2}$$

称为各次测量值 x_k 的均方差，也称标准差。

显然，平均值比个别测量值更接近真值，它应具有更小的误差。理论证明，平均值的误差是标准差的 $1/\sqrt{n}$，即

$$S_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum (U_k)^2}{n(n-1)}} \tag{0-3}$$

因为偶然误差具有不确定的性质，故 $S_{\bar{x}}$ 应冠以±号，测量的最后结果则写成

$$\bar{x} \pm S_{\bar{x}} \tag{0-4}$$

式中，$S_{\bar{x}}$ 称为平均值的标准误差，我们实验中将它写成 Δx。

例 1 某一长度，测量 10 次，结果如下表所示，求平均值及其标准误差，并表示出最后结果。

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x_i/cm	63.57	63.58	63.51	63.52	63.54	63.59	63.51	63.57	63.55	63.59

参考附录 B，我们可以用计算器直接算出平均值 $\bar{x}$ 和标准差 S，再求 $S/\sqrt{n}$ 得 Δx。平均值位数按有效数字规则选取，得 $\bar{x} = 63.55$cm。误差是根据概率论的一些假定而求得的，它不是一个严格的结果，只是从数量级上来评定实验结果，因此把它计算得十分精确是没有意义的，而且误差总是以测量的平均值末位为标准四舍五入取一位有效数字，至多取两位。因此可得误差 $\Delta x = \pm 0.01$cm，最后的结果表示为

$$x = (63.55 \pm 0.01)\text{cm}$$

3. 绝对误差与相对误差

上面所讨论的误差，称为绝对误差，但单由绝对误差还不能十分清楚地评定实验结果的好坏，如在测量 1cm 的长度时，其误差为±0.1cm，而在测量 1000cm 的长度时，其误差也为±0.1cm，前者误差占结果的±10%，后者只占±0.01%，两者的差别显然很大，但绝对误差都是 0.1cm。因此还需用误差与实验结果的比值来评定测量精度，这就是相对误差，写成 $\Delta x/\bar{x}$。相对误差用%表示，所以也称百分误差。如上例中，其相对误差为

$$\frac{\Delta x}{\bar{x}}=\frac{\pm 0.01}{63.55}\times 100\%=\pm 0.02\%$$

注意：相对误差也只取一位有效数字。

4. 复合量的误差

在大多数物理实验中，往往必须用一个或几个直接测量的量来求得一个待测的物理量，因此它是一个复合量。例如，从测量一矩形物体的长与宽来求其面积，面积就是复合量。每一个互不相关的直接测量的量，都有自己的误差，它们对最后的复合量的影响如何呢？这里仅列出我们实验中最常用到的两种情况的公式[①]。

(1) 如复合量 R 是各直接测量量 $x,y,z,\cdots$ 的和或差，即 $R=x\pm y\pm z\pm\cdots$，则复合量 R 的最大绝对误差 ΔR 为各直接测量量绝对误差绝对值之和。即

$$\Delta R=|\Delta x|+|\Delta y|+|\Delta z|+\cdots \tag{0-5}$$

ΔR 在结果中也要冠以±号。

(2) 如复合量 R 为各直接测量量之积或商，即 $R=x\times y\times z\cdots$ 或 $R=x/y/z/\cdots$，则

$$\left|\frac{\Delta R}{\bar{R}}\right|=\left|\frac{\Delta x}{\bar{x}}\right|+\left|\frac{\Delta y}{\bar{y}}\right|+\left|\frac{\Delta z}{\bar{z}}\right|+\cdots \tag{0-6}$$

推广开来，如果 $R=x^a\cdot y^b\cdot z^c\cdots(a,b,c\cdots$为任意实常数$)$，则

$$\left|\frac{\Delta R}{\bar{R}}\right|=\left|a\frac{\Delta x}{\bar{x}}\right|+\left|b\frac{\Delta y}{\bar{y}}\right|+\left|c\frac{\Delta z}{\bar{z}}\right|+\cdots \tag{0-7}$$

运算中经常遇到的常数，则可看成是一个没有误差的量（一些数字常数应按计算的要求取足够的位数）。

例 2　用伏安法测量一电阻，测得电阻两端的电压和流过电阻的电流分别为

$$V=(220\pm 1)\text{V},\quad I=(0.945\pm 0.005)\text{A}$$

求电阻 R 及其误差。

解　因为 $R=V/I$，所以

$$\bar{R}=\frac{\bar{V}}{\bar{I}}=\frac{220}{0.945}=233(\Omega)$$

---

① 按照严格的理论，若复合量为 $R=R(x,y,z,\cdots)$，则其绝对误差应表示为

$$\Delta R=\sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial x}\Delta x\right)^2+\left(\frac{\partial R}{\partial y}\Delta y\right)^2+\left(\frac{\partial R}{\partial z}\Delta z\right)^2+\cdots}$$

式中，$\frac{\partial R}{\partial x},\frac{\partial R}{\partial y},\frac{\partial R}{\partial z},\cdots$是 R 分别对 $x,y,z,\cdots$ 的偏导数。鉴于我们还未学习偏导数，而且按该式计算也太繁琐，我们仍用式(0-5)～式(0-7)等式来求复合量误差。诚然，这样求得的误差要比实际的大些，但考虑到一些我们没有估计到的误差，这样或许更好些。

先计算相对误差

$$\left|\frac{\Delta R}{R}\right| = \left|\frac{\Delta V}{V}\right| + \left|\frac{\Delta I}{I}\right| = \frac{1}{220} + \frac{0.005}{0.945} = 0.5\% + 0.5\% = 1\%$$

于是有

$$\Delta R = \bar{R}\,\frac{\Delta R}{R} = 233 \times 1\% = 2(\Omega)$$

最后结果表示为

$$R = (233 \pm 2)\Omega$$

5. 有效数字及其运算简则

用天平去称一个物体，得重1734g。由于末位数4是通过游码标尺估计而来，因而是不可靠的（即是可疑的），而1、7、3直接从砝码数读出，则是可靠的（即是可信的）。直接从刻度尺上的标度读出的可靠数和一位从刻度尺上估读的可疑数统称为有效数字。在实验中物理量值均用有效数字表示。上面的例子可将其质量写成 173.4×10g 或 1.734×10^3g，有效数字从自左边第一个不为0的数算起，如0.001374和1374都是4位有效数字，而130或103则都是3位有效数字。有效数字常采用科学计数法表示，上面例子可表示为 1.734×10^3g。利用有效数字，很容易就知道末位是估计的，是有误差的。因此有效数字的位数和该量的误差密切地关连着。有效数字多的，其相对误差一般较小，反之则大。因此，在写一物理量值时，就要按照测量误差正确地写出有效数字。例如，1734g和 173×10g 两数所表示的质量相同，但前者为4位有效数字，其误差为千分之几，后者为3位有效数字，其误差为百分之几，是不相同的。有效数字不因所用的单位不同而不同，如 1.734×10^3g、1.734×10^6mg、1.734kg、0.001734t 都是4位有效数字。

复合量的有效数字由各直接量的有效数字决定，通常有如下法则：

（1）复合量是几个量相加或相减而得时，其有效数字保留到诸量中最高可疑位为标准。例 $10.1\text{g} - 4.178\text{g} \approx 14.3\text{g}$。

（2）复合量是由几个量相乘除而得时，其有效数字的位数和诸量中有效数字的位数最小者相同。例 $12.34 \times 0.0234 \approx 0.289$。

这两条法则从复合量的误差计算是很容易理解的。这两条法则给计算带来很大方便，但它们并不十分严格，复合量的准确有效数字应按复合量的误差确定，即其最后一位有效数字就是误差位。

6. 关于作图的一些规则

在许多实验中，要将实验数据画成图线，以便更直观地观察各量之间的关系。作图时要注意以下几个问题：

(1) 选取合理的比例关系。这要照顾到两个方面：一是比例关系应尽量简单易算，如选取 1∶1，1∶2，1∶5(包括 1∶10，1∶100，1∶20，1∶200，…)，这样在作图时就不至于因换算而花费太多时间；二是要使图线在图中占据显著的位置和合适的大小，既不局限于一隅，又不能画到图的外面去。如果是一条直线，应尽可能使它有接近 45°的倾斜角。下面举几种不恰当的作图与正确的作图相对照，如图 0-1 所示。

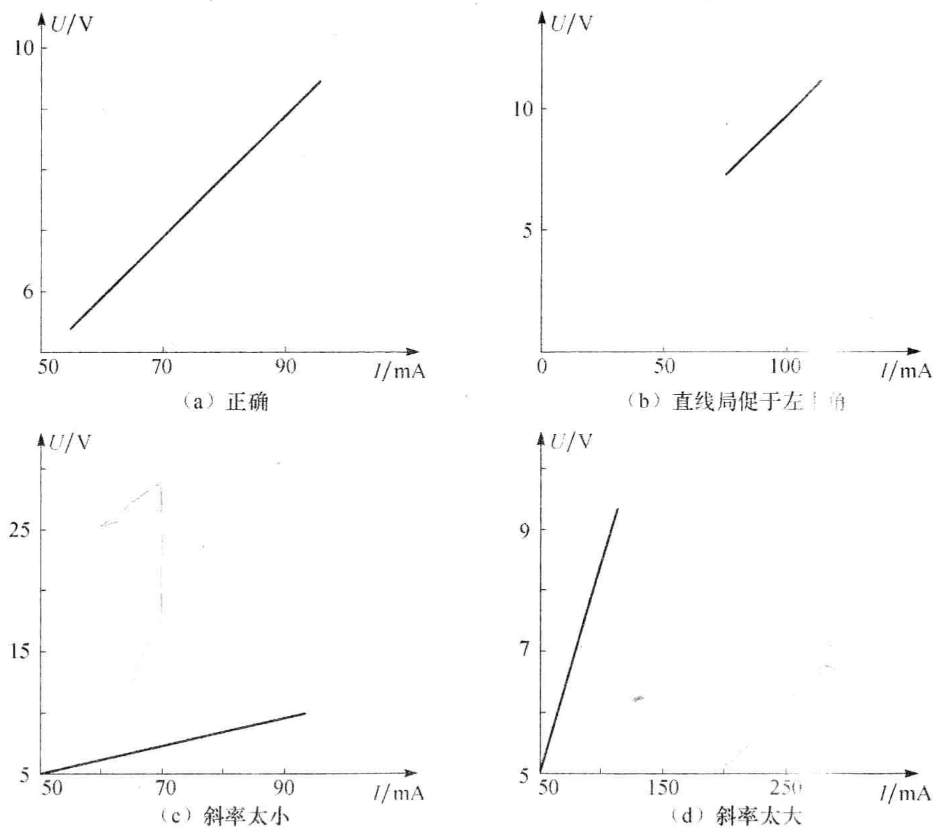


图 0-1　几种作图

(2) 线须尽量画得细，并有光滑的趋势，使测量值的各个点大致均等地分布在曲线的两旁。坐标轴应标明名称和单位，图上要标出图名。

有时，用一个坐标或两个坐标都是以 10 为底的对数标度的坐标纸(分别称为单对数坐标纸、双对数坐标纸)作图，往往要比用普通的坐标纸作图方便。

例如，γ 射线的吸收规律为

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

$$\ln I = -\mu x + \ln I_0$$

用普通坐标纸作图，是一根指数曲线，若用单对数坐标纸(纵轴为对数)，可以将其函数曲线表示成一条直线。单对数坐标纸通常一坐标取等间隔，另一坐标取对数

间隔。对数坐标大的间隔按级划分，每“级”可以容纳一个数量级的数值。对数坐标的标度为 1，2，3，…，9，对应坐标间隔长度为 ln1，ln2，ln3，…，ln9 的比例标出数值。因此，只要标出轴名、标度，曲线即为 $\ln I$-x 图(图 0-2)。斜率 μ 由曲线上两点的坐标进行计算求得。

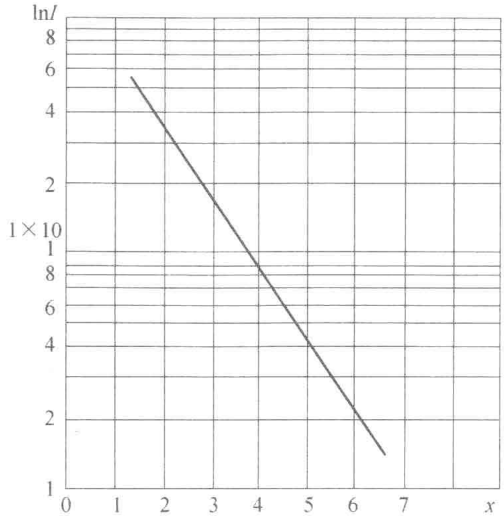


图 0-2　$\ln I$-x 图

练　习　题

(1) 用弹簧秤测量某一固体的密度。a 表示挂上该物体时弹簧的伸长，a' 表示将物体放入水中时，弹簧伸长的减少量，ρ、ρ' 分别表示待测固体和水的密度，它们之间有关系 $\rho=\rho'\dfrac{a}{a'}$，现测得 a、a' 的数据如下表，已知水温为 25℃时，$\rho'=0.997\text{g/cm}^3$。试求 25℃时待测物体的平均密度 $\bar{\rho}\pm\Delta\rho$。

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
a/cm	10.16	10.17	10.18	10.16	10.19	10.18	10.17	10.19	10.22	10.22
a'/cm	3.69	3.69	3.71	3.71	3.74	3.72	3.75	3.74	3.77	3.74

(2) 利用测定物距 a 和像距 b 来测定透镜的焦距 f，得下列数据(测量 5 次)，试计算平均值 $\bar{f}$ 及 Δf，并将结果写成 $f=\bar{f}\pm\Delta f$。

a/cm	97.34	105.84	113.21	120.13	126.63
b/cm	67.16	64.16	61.79	59.87	58.37
f/cm					

计算 f 的公式为 $f=\frac{ab}{a+b}$（提示：这里每次的 a 及 b 都是不同的，因此应先计算相应各次的 f，然后再求 $\bar{f}$ 及 Δf）。

(3) 用滑线式惠斯通电桥测量电阻。滑线全长为 $L=100.00\text{cm}$。今测得电桥平衡时，R_x 侧滑线长 x 的值如下表。由平均值 $R_x=R_0\frac{x}{L-x}$，$R_0=100\Omega$（常数），求 $\bar{R}_x$ 及 ΔR_x，并将结果写成 $R_x=\bar{R}_x\pm\Delta R_x$。

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x/cm	57.80	57.77	57.78	57.80	57.80	57.79	57.78	57.80	57.80	57.80

$$\bar{x}=\underline{\quad\quad},\quad \Delta x=\underline{\quad\quad}$$
$$R_x=\bar{R}_x\pm\Delta R_x=\underline{\quad\quad}$$

$\Big($提示：由于 x 和 $(L-x)$ 不是相互独立的量，ΔR_x 不能表示为 $\frac{\Delta x}{\bar{x}}+\frac{\Delta(L-\bar{x})}{L-\bar{x}}$，而根据误差传播理论，它可表示为 $\frac{\Delta R_x}{\bar{R}_x}=\frac{L\Delta x}{\bar{x}(L-\bar{x})}\Big)$。

实验 1　液体黏滞系数的测定

【实验目的】

（1）掌握毛细管黏滞计的原理。

（2）测定乙醇的黏滞系数。

【实验原理】

当液体通过毛细管且做稳定层流时，如果管的半径为 R，管长为 L，管两端的压强差为 Δp，t 秒内流过液体的体积为 V，则根据泊肃叶定律，该液体的黏滞系数 η 为

$$\eta = \frac{\pi \Delta p t R^4}{8VL} \tag{1-1}$$

若相同体积的两种不同液体在同样条件下通过同一毛细管，第一种液体流过的时间为 t_1，其密度为 ρ_1；第二种液体流过的时间为 t_2，其密度为 ρ_2，则由式(1-1)可知

$$\eta_1 = \frac{\pi \Delta p_1 t_1 R^4}{8VL} = \frac{\pi \rho_1 g h t_1 R^4}{8VL} \tag{1-2}$$

$$\eta_2 = \frac{\pi \Delta p_2 t_2 R^4}{8VL} = \frac{\pi \rho_2 g h t_2 R^4}{8VL} \tag{1-3}$$

式(1-2)、式(1-3)相除，消去 V、R、L、h 得到

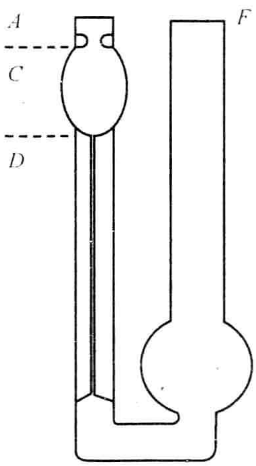


图 1-1　毛细管黏滞计

$$\eta_2 = \eta_1 \frac{\rho_2 t_2}{\rho_1 t_1} \tag{1-4}$$

用这种比较测量法，只要知道某一标准溶液的 η 和 ρ（此处设为 η_1，ρ_1）及待测液体的密度 ρ_2，可以无需知道 R、V 和 L 的值，就能方便地求出 η_2。

【实验仪器】

毛细管黏滞计、万用支架、乙醇、蒸馏水、温度计、移液管、吸气球、秒表。

【实验步骤】

（1）将蒸馏水注入毛细管黏滞计（黏滞计见图 1-1），进行洗涤。

(2) 保持毛细管黏滞计竖直位置，用清洁的移液管将一定体积($6cm^3$)的蒸馏水自 F 端注入。

(3) 用吸气球在 A 端吸液，使液面上升到 C 刻度线以上约半厘米左右(图 1-1)，然后让液体自然下降。

(4) 当 A 端液面降到 C 时，开动秒表，记录蒸馏水自 C 流至 D 的时间 t_1。

(5) 重复上面步骤(3)、(4)共五次，算出 $\overline{t_1}$ 及 Δt_1。

(6) 将水倒出，用乙醇洗涤黏滞计(洗过的乙醇不要倒入原瓶中，应倒在另一个容器中)。

(7) 用移液管把与蒸馏水同体积的乙醇移入黏滞计，重复步骤(3)、(4)共五次，算出 $\overline{t_2}$ 及 Δt_2。

(8) 将乙醇倒出，用蒸馏水清洗仪器。

(9) 计算乙醇的黏滞系数 $\eta_2=\overline{\eta_2}\pm\Delta\eta_2$。由 $t_1=\overline{t_1}\pm\Delta t_1$、$t_2=\overline{t_2}\pm\Delta t_2$ 及式(1-4)并利用误差理论可得 $\Delta\eta_2$，从而算出 $\eta_2=\overline{\eta_2}\pm\Delta\eta_2$。

【实验记录及结果】

表 1-1　实验数据记录表

$t=0.0$℃时，$\rho_{10}=0.999\ 87 g/cm^3$，$\rho_{20}=0.806\ 25 g/cm^3$

次　数	水流过 CD 的时间 t_1/s	乙醇流过 CD 的时间 t_2/s
1		
2		
3		
4		
5		
平均		

$\Delta t_1=$____(s)　　$\Delta t_2=$____(s)

水的密度 $\rho_1=$____(g/cm^3)　　乙醇密度 $\rho_2=$____(g/cm^3)

温度=____(℃)　　水的黏滞系数 $\eta_1=$____(Pa · s)

乙醇的黏滞系数：$\eta_2=\overline{\eta_2}\pm\Delta\eta_2=$____(Pa · s)

【思考题】

(1) 为什么水与乙醇的体积必须相同?

(2) 为什么要记录液体的温度? 在测量过程中为什么必须保持温度不变?

【附表】

表 1-2　各种温度下水的黏滞系数

t/℃	η_1/(Pa · s)	t/℃	η_1/(Pa · s)
0	0.001 79	19	0.001 03
1	0.001 73	20	0.001 00
2	0.001 67	21	0.000 98
3	0.001 62	22	0.000 96
4	0.001 57	23	0.000 94
5	0.001 52	24	0.000 91
6	0.001 47	25	0.000 89
7	0.001 43	26	0.000 87
8	0.001 39	27	0.000 85
9	0.001 35	28	0.000 84
10	0.001 31	29	0.000 82
11	0.001 27	30	0.000 80
12	0.001 24	31	0.000 78
13	0.001 20	32	0.000 77
14	0.001 17	33	0.000 75
15	0.001 14	34	0.000 74
16	0.001 11	35	0.000 72
17	0.001 08	36	0.000 71
18	0.001 06	37	0.000 69

提示：$\rho_t=\rho_0(1-\beta t)$；$\beta_1=0.000\ 21℃^{-1}$；$\beta_2=0.001\ 10℃^{-1}$。

实验2　人耳听阈曲线的测定

【实验目的】

(1) 掌握听觉实验仪的使用方法。

(2) 测定人耳的听阈曲线。

(3) 了解测定听阈曲线的原理和方法。

【实验原理】

能够在听觉器官引起声音感觉的波动称为声波。通常声波的可闻频率范围为20～20 000Hz。描述声波能量的大小常用声强和声强级两个物理量。声强是单位时间内通过垂直于声波传播方向的单位面积的声波能量，用I来表示。声强级是声强的对数标度，它是根据人耳对声音强弱变化的分辨能力来定义的，用L来表示。L与I的关系为

$$L = \lg \frac{I}{I_0}(B) = 10\lg \frac{I}{I_0}(\mathrm{dB})$$

式中，$I_0 = 10^{-12}\,\mathrm{W/m^2}$。

引起听觉的声音，不仅在频率上有一范围，而且在声强上也有一定范围。就是说，对于任一在声波范围内(20～20 000Hz)的频率来说，声强还必须达到某一数值才能引起人耳听觉。能引起听觉的最小声强称为听阈。对于不同频率的声波，听阈不同，听阈与频率的关系曲线称为听阈曲线。随着声强的增大，人耳感到声音的响度也提高了，当声强超过某一最大值时，声音在人耳中会引起痛觉，这个最大声强称为痛阈。对于不同频率的声波，痛阈也不同，痛阈与频率的关系曲线称为痛阈曲线。由图2-1可知，听阈

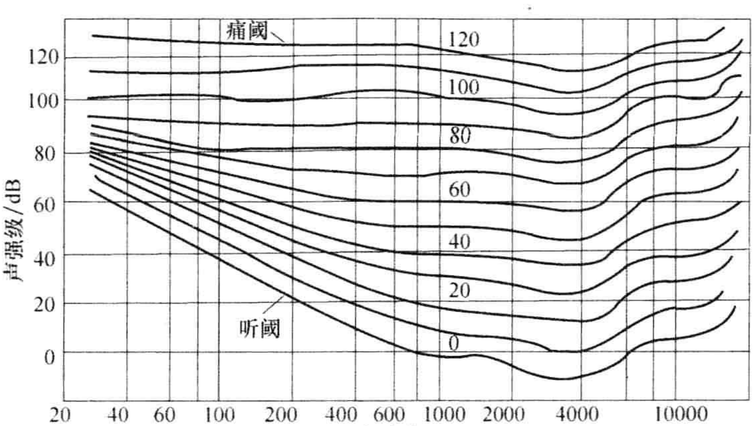


图2-1　听觉区域和等响曲线