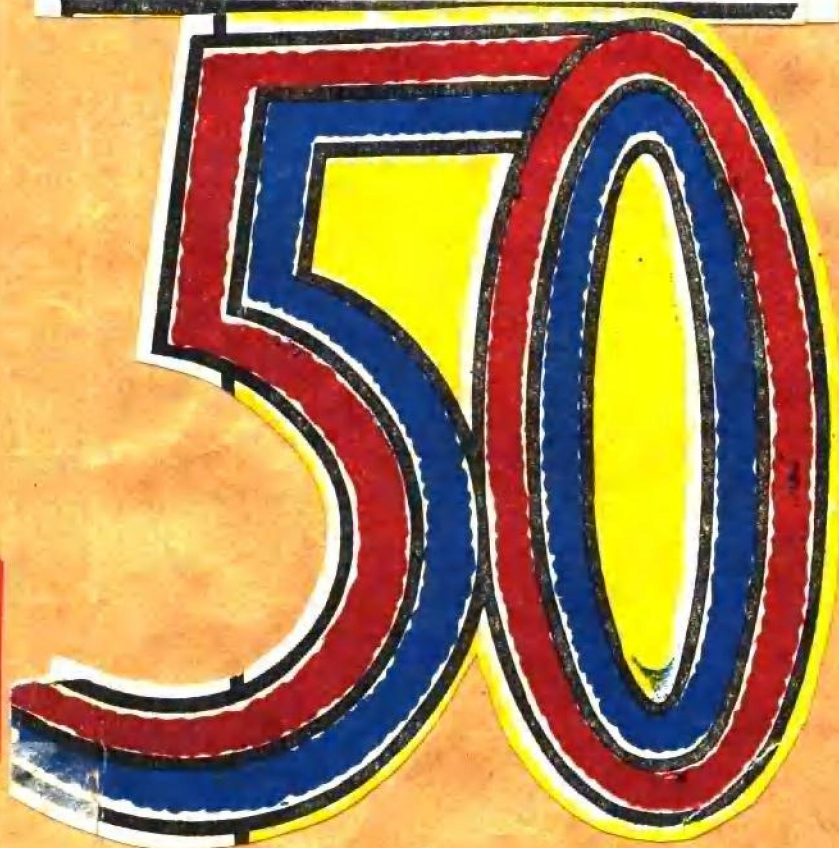


PU TONG WU LI XUAN TI SHI YAN 50 LI

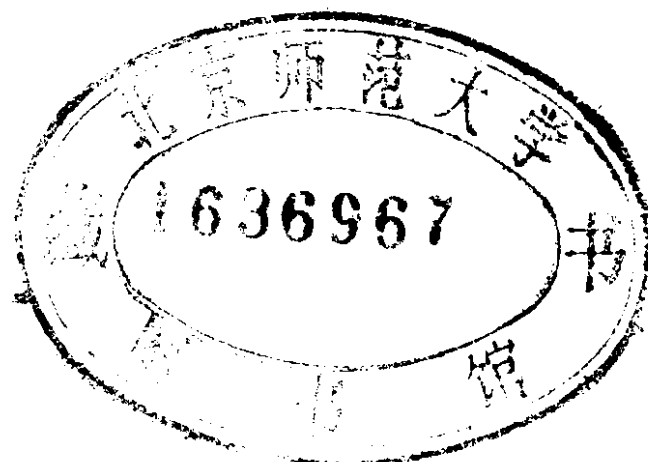
普通物理选题实验



大学物理选题实验50例

5911101/24

马葭生 陈国英 江一德 等编



华东师范大学出版社

(沪)新登字第(201)号

大学物理选题实验50例

马葭生 陈国英 江一德 等编

华东师范大学出版社出版发行

(上海中山北路3663号)

新华书店上海发行所经销 华东师范大学印刷厂印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 9.125 字数: 233千字

1992年11月第一版

1992年11月第一次印刷

印数: 001—5000本

ISBN7-5617-0814-9/O·029 定价: 2.85元

序

普通物理实验是物理专业基础教学中的一门极为重要的课程,是培养学生独立工作能力的一个极好的手段。一段时期以来,在物理实验教学中出现了一些弊端,实验方法比较单一,教师讲述过于详细,学生往往只要按照教师规定的步骤,依样画葫芦,而不必究其所以然,就可完成实验,这就在很大程度上影响了实验教学的效果。

物理实验工作是在一定的物理条件下,利用某些仪器设备,检验某种物理思想、寻求某种物理规律或测定某些物理量。实验训练也就在于如何选择这些物理条件、如何选用适当的仪器设备、如何进行恰当的组合、如何选择合理的测量范围、如何正确地调整仪器,最后如何分析判断所得到的结果。而在目前的实验课程教学中,学生在教学实验室里所接触的,一般是上述过程的最后阶段,教师已选定仪器,一般都经过教师预先精心地调试,对学生给定了测量范围;学生在离开实验室之前,还由教师审定他们测量的结果。这样的训练,使物理实验过程索然无味,当测量结果不理想时,又往往诿诸仪器性能不好,其后果是使学生对实验丧失信心。

1979年以来,华东师范大学普通物理实验室的同志们有感于上述种种不足,在教学实验中增加了设计性的选题实验。这种实验的内容并不超过普物实验的水平,但只提出实验要求,在教师指导下,从选择仪器开始,由学生独立地进行一次比较完整的实验过程。这样做,虽然学生做一个实验所花费的时间数倍于做一次教师安排好的实验,但对他们独立工作能力的培养,却超过后者数倍。经过几年的试验,在普物实验的各个部门都有了一定的

经验。我曾多次希望他们把他们的经验介绍出来，这次他们精选了选题实验50例，即将付梓，我想本书的出版对普物实验教学的改革会起一定的推动作用，对于想进一步在实验物理中有所提高的学生们，一定也会有所裨益的。

邬学文

1987年2月

前 言

本书共收集了50例普物选题实验,内容按力学、热学、电磁学和光学的顺序编排,但也不排斥各部份内容的相互渗透,因为这正是物理现象本身内在联系的需要。本书所收集的选题实验,一般是在学生完成一定数量的普通物理实验基础上,为进一步调动学生学习的积极性,启发学生思考,培养学生学会用实验的手段解决实际问题的能力而开设的。它既可穿插在普物实验中供学生作为选做实验,也可挑选其中某些实验作为一门实验选修课程开设。根据我们多年来的教学实践,无论采用何种形式开设,都收到较好的教学效果,并受到学生们的好评,感到做这些实验更有收获。为此,我们认为本书作为综合性大学、高等师范院校及工科院校的普物实验参考教材是合适的,同时,本书也可给从事普物实验教学的老师作为教学参考书之用。

本书在内容的选择上,力求加强对学生科学实验能力的培养,使学生有更多的机会运用普物实验方法来解决实际问题。为此,编写中着重讲清实验的原理和方法,而在具体的实验方案、步骤及仪器的使用方面则作较简要的介绍,其目的是为了给学生留有更多的独立思考的余地 and 有利于独立工作能力的培养。收入本书的多数实验都经过多次教学实践,并提供了测量实例及有关的数据,有的还提供必要的背景参考资料,其目的是为了采用本书开设选题实验的教师提供方便。

本书承邬学文教授撰写序言;而这本总结历年开设选题实验教学经验的参考书的编写,又始终离不开教研室的全体同志(包括已经离开本室的某些同志)的共同努力,故特在此一并致谢。

本书编写的具体分工如下：力学、热学由马葭生、薛士平、徐力平编写，电磁学由陈国英、宦强编写，光学由江一德、吴振德编写。最后由马葭生、陈国英、江一德负责统稿成书工作。

由于本书是几位作者共同编写，加之我们水平有限，一定存在不少缺点和不足，我们诚恳希望使用本书的读者给予批评指正。

编 者

1987.11.20

目 录

第一章 力学实验	(1)
实验1.1 正态分布的实验研究	(1)
实验1.2 弹簧振子周期公式的总结	(10)
实验1.3 用优化法及多元线性回归方法寻求弹簧振子 周期经验公式	(14)
实验1.4 用火花记录法研究落体的运动	(20)
实验1.5 用光电计时法研究落体运动	(28)
实验1.6 势能曲线的模拟研究	(33)
实验1.7 粘滞性阻尼常数的测定	(37)
实验1.8 气垫导轨平直度的测量	(44)
实验1.9 气垫导轨上测重力加速度及系统误差的修正	(50)
实验1.10 滑动摩擦系数的测定	(56)
实验1.11 二维碰撞	(63)
实验1.12 刚体回转半径的测定	(68)
实验1.13 万有引力常数的测定	(74)
实验1.14 傅科摆	(81)
实验1.15 切变弹性模量和温度的关系	(85)
实验1.16 有心力场中的角动量守恒	(91)
实验1.17 用振动法测杨氏弹性模量	(96)
第二章 热学实验	(102)
实验2.1 定点的获得及测温仪器的定标检验	(102)
实验2.2 气体温度计	(108)
实验2.3 用电测法测定冰的比熔解热	(112)
实验2.4 用电测法测定水的比汽化热	(116)
实验2.5 用称衡法测定液氮的比汽化热	(119)
实验2.6 气体导热系数的测定	(122)
第三章 电磁学实验	(128)

实验3.1	用示波器测量阻抗·····	(128)
实验3.2	电感和互感的测量·····	(132)
实验3.3	铁磁物质动态磁滞回线的测试·····	(136)
实验3.4	软磁材料在音频磁场下的磁特性·····	(143)
实验3.5	安培环路定律的验证·····	(147)
实验3.6	运算放大器的特性研究·····	(154)
实验3.7	用运算放大器组装万用电表·····	(159)
实验3.8	长度量的电测法(电感式位移测量)·····	(168)
实验3.9	示波器的应用·····	(171)
实验3.10	用冲击电流计测地球的磁感应强度·····	(176)
实验3.11	相对介电常数的测定·····	(181)
实验3.12	测定平行电流间的磁场力·····	(185)
第四章 光学实验·····		(190)
实验4.1	用棱镜分光计测定里德伯常数·····	(190)
实验4.2	用棱镜单色仪测定普朗克常数·····	(194)
实验4.3	用迈克尔孙干涉仪测量白光光源的相干长度 和玻璃薄片的折射率·····	(199)
实验4.4	用迈克尔孙干涉仪测量压电陶瓷的电致伸长系数··	(204)
实验4.5	利用分光计测反射光的偏振特性·····	(209)
实验4.6	用光栅单色仪测定固体或液体样品的透过率·····	(213)
实验4.7	用光栅单色仪测定白炽灯的光谱能量分布·····	(219)
实验4.8	用CIE标准色度系统测定物体的颜色·····	(225)
实验4.9	全息光栅的制作·····	(232)
实验4.10	用两次曝光法测量物体的微小位移·····	(238)
实验4.11	彩虹全息图的摄制·····	(243)
实验4.12	光学图像识别·····	(247)
实验4.13	显微全息图的摄制·····	(254)
实验4.14	全息图的复制·····	(260)
实验4.15	用空间滤波原理使透明位相物成像·····	(263)
附录1	弹簧质量对振子振动频率的贡献·····	(269)
附录2	毫秒计 S_1 档测速误差的讨论·····	(274)

附录3	公式 $Q = \frac{2l}{G\pi R^4} \cdot M$ 的推导·····	(275)
附录4	气体导热系数与温度的关系·····	(277)
附录5	长度电测法的原理、指示和特性·····	(278)
附录6	位移与电感变化的关系的推导·····	(279)

第一章 力学实验

实验1.1 正态分布的实验研究

一、目的

1. 学习绘制统计直方图和正态分布曲线,了解等精度测量中随机误差的正态分布规律。
2. 学习统计检验法,用正态概率纸图线法验证等精度测量值及其随机误差的分布规律。
3. 通过统计计算,进一步明确算术平均值 $\bar{x}$ 、标准误差 σ 以及算术平均误差 η 的统计意义。

二、原理和方法

随机误差服从正态分布规律的理论依据是概率统计中的中心极限定理。设在消除系统误差并在一定实验条件下,对某物理量 X 进行 N 次等精度测量,得到一系列测定值 $x_1, x_2, \dots, x_N$, 则当测量次数趋向无穷大时,各个测定值出现的概率密度分布用正态分布密度函数表示

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp[-(x - \mu)^2 / 2\sigma^2], \quad (1.1-1)$$

式中 μ 为测定值的真值, σ 是以误差 $\Delta_i = x_i - \mu$ 表示的上述测量列的标准误差,即

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N}}. \quad (1.1-2)$$

$f(x) \sim x$ 图线为一单峰、对称的分布曲线,称为正态分布曲线或高斯分布曲线。图 1.1-1 表示不同参数 (μ, σ) 值时正态

密度曲线。

μ 和 σ 是正态分布中的两个重要参数, μ 表示分布的位置, σ 表示分布的分散性。 μ 和 σ 确定了, 这个正态分布也就完全被确定了。 μ 是曲线最高点的横坐标, 曲线又以 μ 为对称; σ 的大小表示曲线胖瘦的程度, σ 越大, 曲线越胖, 即越平坦, 数据越分散; σ 越小, 曲线越尖锐, 数据越集中。

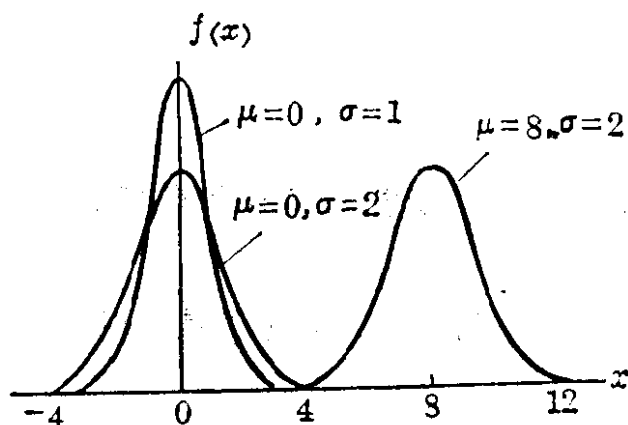


图 1.1-1

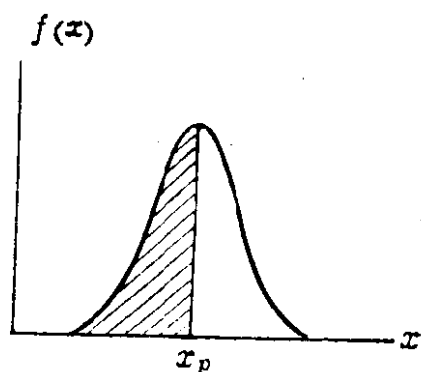


图 1.1-2

相应于 (1.1-1) 式的正态分布函数为

$$F(x) = \int_{-\infty}^{x_p} f(x) dx, \quad (1.1-3)$$

它的意义可参阅图 1.1-2。表示概率密度函数在横轴上任一点 x_p 左侧曲线下的影形面积。

对于服从 (1.1-1) 式表示的正态分布的变量 x , 作变换

$$u = \frac{x - \mu}{\sigma}. \quad (1.1-4)$$

我们得到 u 的密度函数和分布函数分别为

$$f(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-u^2/2), \quad (1.1-5)$$

$$F(u) = \int_{-\infty}^u f(u) du. \quad (1.1-6)$$

于是称 u 为服从 $\mu=0$ 、 $\sigma^2=1$ 的标准正态分布。对于标准正态分布的分布函数 $F(u)$ 的值有现成的数值表可查。

显然，整个正态密度曲线下的面积为 1，即

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(u) du = 1。$$

对于正态分布，测定值落在任意区间 $[a, b]$ 内的概率为

$$P(a \leq x \leq b) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_a^b \exp[-(x-\mu)^2/2\sigma^2] dx。 \quad (1.1-7)$$

测定值 x 落在区间 $[\mu-\sigma, \mu+\sigma]$ 内的概率为

$$\begin{aligned} P(\mu-\sigma \leq x \leq \mu+\sigma) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{\mu-\sigma}^{\mu+\sigma} \exp[-(x-\mu)^2/2\sigma^2] dx \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-1}^1 \exp(-u^2/2) du = 0.6827。 \end{aligned} \quad (1.1-8)$$

所以正态分布在真值 μ 左右一倍标准误差范围内概率含量为 0.6827，或者说测定值落入 $[\mu-\sigma, \mu+\sigma]$ 内的概率为 68.27%。

如图 1.1-3 所示，在该区间内密度曲线下的面积(影形部分)占曲线下全部面积的 68.27%。

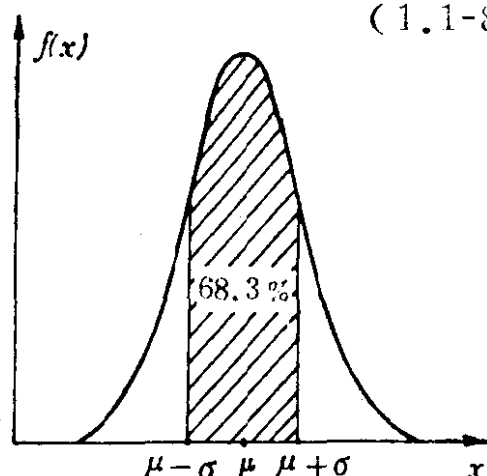


图 1.1-3

同样可求测定值 x 在 $[\mu-$

$2\sigma, \mu+2\sigma]$ 和 $[\mu-3\sigma, \mu+3\sigma]$ 区间内的概率含量分别为

$$P(\mu-2\sigma \leq x \leq \mu+2\sigma) = 0.9545,$$

$$P(\mu-3\sigma \leq x \leq \mu+3\sigma) = 0.9973。$$

在物理实验的误差讨论中，称 3σ 为极限误差。

同样可求测定值落入 $[\mu-\eta, \mu+\eta]$ 内的概率含量为

$$P(\mu-\eta \leq x \leq \mu+\eta) = 0.575,$$

式中， η 称为测量列的算术平均误差，其表示式为

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^N |x_i - \mu|}{N}, \quad (1.1-9)$$

它与 σ 的关系是

$$\eta = 0.7979\sigma。$$

由于在实验中真值无法求得, 实际计算时常用算术平均值 $\bar{x}$ 代替真值 μ , 用以残差 $v_i = |x_i - \bar{x}|$ 表示的测量列的标准偏差代替 (1.1-2) 式中的 σ , 它们的表达式为

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}, \quad (1.1-10)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}}, \quad (1.1-11)$$

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^N |x_i - \bar{x}|}{\sqrt{N(N-1)}}。 \quad (1.1-12)$$

于是得到实验中常用来计算概率密度的函数式

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp[-(x - \bar{x})^2 / 2\sigma^2]。 \quad (1.1-13)$$

大量实验证明, 对某一物理量进行重复多次等精度测量, 其结果大多数服从正态分布。但正态分布并不能适用于实验中的一切情况。要确定某一等精度测量中的随机误差是否服从正态分布, 最好的方法是用统计检验方法。常用的统计检验方法有正态图线法、正态概率纸法和 χ^2 检验法。 χ^2 检验法虽然较精确, 但数学计算麻烦, 读者可参阅有关参考书。

1. 统计直方图和概率密度分布曲线

将测量数据由小到大按顺序排列, 求出它们的最小值 $x_{\min}$ 和最大值 $x_{\max}$, 并按下式划分为 K 个区间

$$K = 1.87(N-1)^{\frac{2}{5}}, \quad (1.1-14)$$

式中 N 为测量数据个数, 于是每个区间间隔大小为

$$\Delta x = (x_{\max} - x_{\min}) / K。 \quad (1.1-15)$$

统计落在第 i 个区间内的实验数据个数 n_i , 称为频数, 相对频

数 $\frac{n_i}{N}$ 叫做测定值在该区间内出现的频率，相应地把 $\sum \frac{n_i}{N}$ 叫做累计频率，而把 $\frac{n_i}{N \cdot \Delta x}$ 叫做频率密度。若以 $\frac{n_i}{N \cdot \Delta x}$ (或 n_i ，

或 $\frac{n_i}{N}$ 为纵坐标，测定值 x 为横坐标，可画出如图 1.1-4 所示的统计直方图。统计直方图具有明显的对称性，其上边缘能够形成一条连续的对称的单峰曲线。

利用公式 (1.1-13) 求出各区间中点的正态概率密度值 $f(x)$ ，在同一图上作 $f(x) \sim x$ 图线(图中所示曲线)。若此概率密度曲线和统计直方图上端接近得比较好，可以认为测定值是大体上符合正态分布的。

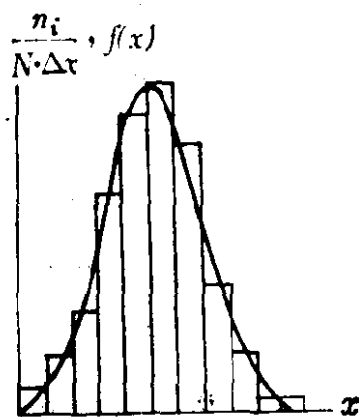


图 1.1-4

2. 正态概率纸法

这是用来检验测定值是否服从正态分布最简单直观和有效的方法，由此法还能十分容易地估算出 μ 和 σ 的数值。

为了说清楚正态概率纸的构造原理，考虑 (1.1-4) 式 $u = \frac{x - \mu}{\sigma}$ ，在 (x, u) 平面上，这是一条通过点 $(\mu, 0)$ ，斜率为 $\frac{1}{\sigma}$ 的直线。为方便起见，在平面上不标出点 (x_i, u_i) ，而直接标出 $(x_i, F(u_i))$ 。我们在横轴上用均匀刻度表示测定值 x ，在纵轴上不是刻 u 的值，而是根据 u 值，从标准正态分布表中查出或通过近似计算得出对应的分布函数 $F(u)$ 值，刻在 u 的位置上，见图 1.1-5。例如在 $u = 0$ 的位置上刻上 50(%), 在 $u = \pm 1$ 的位置上分别刻上 84.13(%) 和 15.87(%), 在 $u = \pm 2$ 的位置上分别刻上 97.72(%) 和 2.28(%), 在 $u = \pm 3$ 的位置上分别刻上 99.87(%) 和 0.13(%), 然后把 u 的刻度抹去，留下 x 和 $F(u)$

的刻度，就构成了一张正态概率纸图，于是 $x \sim F(u)$ 曲线在该图纸上就被拉成一条直线了。由于正态分布在 $-\infty$ 到 $+\infty$ 连续的缘故，所以正态概率纸纵轴刻度从 0.01(%) 到 99.99(%)。

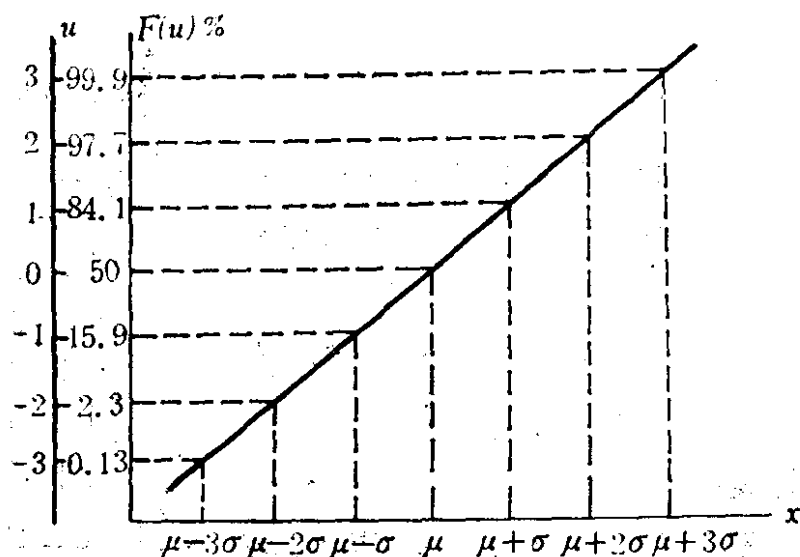


图 1.1-5

在正态概率纸上，我们以测定值为横坐标，累计频率 $\sum \frac{n_i}{N}$ 为纵坐标，把描绘在正态概率纸上的实验点连接起来将是一条直线。如果实验确实得一条直线，就断定测定值服从正态分布。当然实验点并不恰好在一一直线上，允许有不大的偏差，两端的点可能偏差大些。

若过纵坐标 50(%) 的水平线与该直线的交点对应的横坐标应是 $\bar{x}$ ，纵坐标的 84.1(%) 和 15.9(%) 对应的 x 值与 $\bar{x}$ 之差应是 σ 的绝对值。据此，可由绘制的正态概率纸图估算 $\bar{x}$ 和 σ 值，应当和实际计算得到的值相符合。

三、仪器

计时器，例如电子秒表、数字毫秒计(机控)等；PB-2 频率计或某种振动装置(提供恒定的时间间隔信号)。

四、实验内容

1. 在无系统误差条件下对某一物理量进行多次等精度测量。通常用计时器测 PB-2 频率计发出的信号间隔时间；若测摆的周

期, 须维持摆幅一定, 测量个数在 100 个以上。

2. 整理数据, 确定区间数和各区间的频数、频率、频率密度及累计频率, 并计算 $f(x)$ 值, x 取各区间中点值。

3. 在同一图上绘制统计直方图 $\left(\frac{n_i}{N \cdot \Delta x} \sim x\right)$ 和概率密度曲线图 $f(x) \sim x$ 。检验测量值的分布是否服从正态分布?

4. 用正态概率纸法检验测定值及其误差是否服从正态分布。并估算一下 $\bar{x}$ 和 σ 值, 和统计计算结果比较。

5. 统计计算 $\bar{x}$ 、 σ 和 η 。并验证测量值的误差 ($v_i = |x_i - \bar{x}|$) 在 $(-\sigma, \sigma)$ 内概率含量为 68.3%, 在 $(-3\sigma, 3\sigma)$ 内概率含量为 99.7%, 在 $(-\eta, \eta)$ 内概率含量为 57.5%。

五、结果与分析

用电子秒表测定可逆摆的摆动周期。

数据个数 $N=250$, $x_{\min}=1.82\text{s}$, $x_{\max}=2.09\text{s}$,

区间宽度 $\Delta x=0.01588\text{s}$, 区间数 $K=17$ 。

频数、频率、频率密度、累计频率及 $f(x)$ 值列于下页表中。
由表中的数据, 我们得到:

1. 如图 1.1-6 所示的统计直方图和 $f(x) \sim x$ 密度分布曲线。实验说明了测定值的分布和正态分布的规律基本相符。

2. 经统计计算得到

算术平均值 $\bar{x}=1.9577\text{s}$,

标准偏差 $\sigma=0.04538\text{s}$,

算术平均偏差 $\eta=0.03582\text{s}$,

测定值的误差在 $(-\sigma, \sigma)$ 范围内概率含量为 66.8%,

测定值的误差在 $(-3\sigma, 3\sigma)$ 范围内概率含量为 99.6%,

测定值的误差在 $(-\eta, \eta)$ 范围内概率含量为 58.8%。

因此在实验误差范围内, 实验得到的概率含量值和相应的正态分

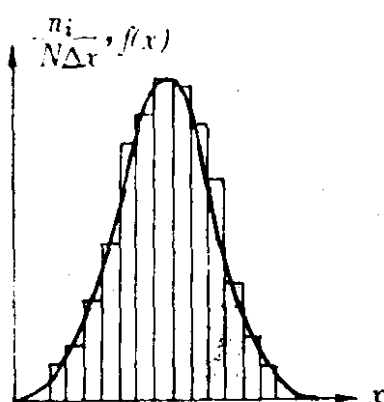


图 1.1-6