

美国麻省理工学院

中级物理实验讲义

北京工业大学应用物理系译

一九八〇年六月

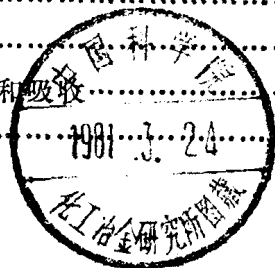
115

美国麻省理工学院物理系中级物理实验讲义

1977.9.

目 录

麻省理工学院中级物理实验一览表	(1)
概 论	(3)
安 全	(9)
误差分析	(22)
统计涨落	(29)
实验 1: γ 射线谱	(38)
实验 2: 密立根油滴实验	(52)
实验 3: 霍尔效应和电导率	(58)
实验 4: 钨丝的光子和电子发射	(70)
实验 5: α 质点的电离作用和射程	(84)
实验 7: 弗兰克——赫兹效应和冉邵尔 (Ramsauer) 效应	(95)
实验 8: 法拉第效应	(101)
实验 9: 电子的 $\beta - \beta\gamma$ 的关系和 e/m_0	(112)
实验 10: 光速和 μ 子速度	(116)
实验 11: 光 泵	(128)
实验 12: 核磁共振	(142)
实验 13: 穆斯堡尔 (Mossbauer) 效应	(156)
实验 14: 塞曼效应	(168)
实验 15: 卢瑟福散射	(181)
实验 16: 氦——氖激光器的侧光	(189)
实验 17: 氢和类氢的发射光谱	(194)
实验 18: 斯特恩——盖拉赫实验	(202)
实验 19: 等离子体物理	(212)
实验 20: μ 子寿命	(216)
实验 22: 超导电性	(234)
实验 23: 约瑟夫森 (Josephson) 效应	(240)
实验 24: 液氦中的第二声	(246)
实验 27: 带状光谱	(251)
实验 29: 等离子体波动力学	(254)
实验 31: x 射线: 标识光谱和吸收	(264)
实验 37: 太阳光谱	(274)



麻省理工学院中级物理实验

一 览 表

序号	实 验	房 号	设备编号	以三学时为单 元的持续时间	专门的工艺技术	被 测 的 基 本 量	与之有关的 另一些实验
1	γ 射线谱	4—304	1	4	γ 和 β 源; NaI 闪烁器; 脉冲高度分析器	$h/m, c$ m, c^2	13 15 31
2	密立根油滴实验	4—345A	2	3	光学测量	e	3
3	霍尔效应和电导率	4—345A 4—310	2 2	2 } 5 3 }	高真空; 蒸发; 微量天平; 电位计; 埃米表(A° 表)	e	2
4	钨丝的光子和电子发射	4—351 4—304	4 2	2 } 5 3 }	高真空; 点焊; 电流计; 温差电偶; 高温计	$e/m, \sigma$	7
5	α —质点的电离作用和射程	4—344 4—310	4 2	2 } 4 2 }	机加工车间; α 源; 电离室; 微电流测量; 脉冲计数		
7	弗兰克—赫兹效应和肖尔效应	4—310	2	3	烘箱; 偏振仪	e^2/a_0	4 17
8	法拉第效应	4—342	1	3	示 波 器	e/m	14
9	电子的 β 与 $\beta\gamma$ 的关系和荷质比	4—304	2	3	盖革计数器; 匀强空心磁坊	e/m_0	1
10	光速和 μ 子速度	4—312	1	4	快速脉冲电路; 固体电子设备; 塑料闪烁器		1 20 37

续上表

11	光 泵	4—312	2	3	光 电 池；赫 姆 霍 兹 线 圈	μ_{Rb}	12 17
12	核磁共振	4—310	2	3	临界振荡器	$\mu_p; \mu_D$	11, 18
13	穆斯堡尔效 应	4—304	1	4	正比计数器	K	1, 31
14	塞曼效应	4—345 _c	1	4	法布里—珀洛干 涉 仪； x 、 y 记 录 仪。	$\mu_e, e/m$	8
15	卢瑟福散射	4—304	2	3	α 源；固态 电 离 室	Ze^2	5
16	氦—氖激光 器的侧光	4—304	1	3	激光；相敏 检 测		11
17	氢和类氢的 发射光谱	4—345	3	4	光栅分光计；摄 影 术，放电管	a^2/a_0 m_D/m_H I_N	7 11 27 31 37
18	斯特恩—盖 拉赫实验	4—345 _A	1	3	高真空；热线原 子 探 测 器	μ_K	12
19	等离子 体物理	4—345 _A	1	3	速调管；CHF 泵	e/m	29
20	μ 子寿命	4—312	1	2	塑料闪烁器；偏 光显微镜	τ_μ	10
22	超导电性	4—304	1	4	低 温	e/h	23 24
23	约瑟夫森效 应	4—304	1	3	低温；微波	e/h	
24	液氮中的 第二声	4—304	1	4	低 温		
27	带状光谱	4—304	1	2	阶梯光栅摄谱 仪；放电管	m_D/m_{H_2} I_N	17 37
29	等离子体 波动力学	4—345 _A	1	4	函数发生器	e/m	19

续上表

31	x 射线: 标识 光谱和吸收	43—04	1	4	正比计数器	Ze^3	17
37	太阳光谱	大楼顶 6	1	2	全反射鏡; 光柵 摄谱仪	R_0, μ_0 GM_0, C	17, 27

概 论

1. 课 程 的 说 明

课程富有启发性地揭示一些物理实验的理论和实践两个方面。实验课程每周安排 6 学时, 有时也组织一个实验小组或一个专门的实验组对实验数据作口报告或讨论, 但这些活动是不定期举行的。

每个学生可选择在四个实验室中的一个实验室里工作, 通常是两个学生为一小组进行实验, 但要求每个学生对每个实验的所有部分都完全负责。严禁将一个小组的学生拆散去做不同的实验或做同一实验的不同部分。

每一个实验室都独立地由一位教授带着已毕业和未毕业的助教负责。这三个指导教师对所有四个实验室的实验都要负责指导 (实际上他们是管理着全部实验室)。

2. 目 的

本课 (8, 13~8, 14) 有多重目的。它们的重要性就在于能满足学生训练的一些特殊的需要, 其中有:

a, 使他们能灵活地运用教科书中关于物理测量的论述, 因为能有机会亲自对诸如 e , k 和 c 这些物理量进行测量的人是不多的。

b, 使他们认识到用“安装就绪的现成仪器, 作出已知的实验结果”的机会是很少的。用韦斯可夫教授的话来比喻、实验过程就犹如不同的演奏者演奏一部大型乐曲一样是互有区别的。聪明的, 富有创造性的演奏者, 总是以很大的努力去演奏贝多芬的钢琴奏鸣曲, 尽管这种曲子在他们之前就有人演奏过, 尽管他们也想谱写自己的曲子。老是抱怨并看不起重复一些人所共知的实验的人, (通常是一些不善于计算或不熟悉专业的人), 他们甚至连停下来调整一下仪器设备或整理一下数据, 都不屑一顾。一个真正的物理学家是灵活的、富有独创性的、精力充沛地由仪器取得数据, 他在做第一千次实验时仍然象他做第一次实验那样精神振奋、如同贝多芬的一首奏鸣曲在一个音乐比赛上被第一百万次演奏那样。(实际上, 一个著名的实验、被人们重复的频繁程度要比演奏贝多芬的奏鸣曲少 $10^{3\pm 1}$ 倍)。

c, 要学会可靠地测量, 如有新鲜的经历, 要记下来, 要检验数据, 如果有了矛盾, 要

调整或更换仪器后再重做，要用基本估计来核验你的实验是否正确进行，要有条理地，简明地表达数据。同时要注意，上述方法是试验方案和命题的补充，大部分时间是花在实验的选择和最初的设计上，通常花在读取数据、整理和反复琢磨数据上的时间是不多的。实验课和课堂学习或测验可能大不相同，但在事情开头就不顺利时，实验工作和课堂学习两者都需要特殊技能，需要倾注更大的注意，需要独立思考。

懂得如何严格处理各种数据——生物的、社会的，或物理的——的人，其比例是难以置信的少，而且随着计算机广泛使用更迅速减少。可靠地测量和处理数据的本领将会是（有时甚至已经是）劳动力市场中最昂贵的商品。

d, 要训练实验技能（特别是读取数据的技能），训练各种类型设备（如示波器、扩散泵）的使用，训练有把握地运用欧姆定律及其它简单公式。

要达到上述的及其它目的，对许多学生，特别是对先前没有实验课经验的学生来说，是很高的要求。对他们来说、课程 8.13 是不同于以前课程的一门崭新的课程。因此在第一学期，往往学得很吃力。但是到了 8.14，几乎所有同学都掌握了这一新的方法，而且很感兴趣了，起码相对来说是如此。（8.14 的学分通常都很优秀，因为我们是经常按绝对等级记分法。不是按曲线法记学分的），而实验课就有这种优点，即只要你经常努力，你几乎总能成功。

3. 时 间 表

到 4—532 门外看布告牌上的开学指导一览。

实验室分配通常都在注册后第二天公布。在注册当天，每个学生选好自己希望的时间表，填入卡片留给我们，我们根据每个学生的希望安排，几乎所有的人的希望都能满足。在你被指定的第一个实验周期开始时，到 4—348 会见该室的教授。

近来实验课间隔拉大了，而学分时数都增加了，每个实验多分配到约 50% 的学分。但主要困难依然存在：真正做好一个实验并整理好结果要花很多实际时间（不是虚假的时间表上的时间）。对部分学生，课程要超学时 50 小时以上（包括听讲解或接受特别辅导的学生）。若他们因此而拉课，对此概不照顾。

实验室每星期五 9~4 点开放，以便补做实验，但无正式人员在坊，所以不能真正代替正课。记住：在所有的时间里，你的同伴必须与你一起做实验，包括补做实验。

学生参加正课以及在跟上课程有困难的，应中断课程，直到其它方面对他们的时间需要减少了为止。

4. 合 作 关 系

本课程的实验最好由两个学生一起做，并一道整理，虽然偶然也有一个人能单独做或能三个人一起做的实验。这时要找同伴并把他（她）的名字写在你的时间表卡片上，否则，我们将在第一个实验周期里就给你指定一位。两个人都要负责到坊、做完整个实验。各种实验工作，两人都要动手，不要搞专门分工。

5. 实 验 的 准 备

注释及实验讲义本身都在不断变动，是十分不完善的。对此，我们正不断做工作，但经

常引进新实验和改进老实验，是有很大的好处的，所以我们不能把什么事情都定下型来。希望你们用自己的独创性去阅读实验讲义，去修改或重写某些部分。同时还因不同的教授负责不同的实验，他们有不同的处理风格，反映他们偏爱等等。

（有一些建议用纸放在实验桌旁的桌子上，这对改写注释及修改实验讲义确有帮助，请随意使用）。

说明书的清楚程度是不同的，所以有时你应看说明书，有时又要随时试试仪器，有时又要问问工作人员。所有这三种方法都是开始接触新仪器，并学会有效地使用它们是非常重要的。一个同伴可以先抽空读一下手册，而另一个则可以例如试着读取第一轮数据。

我们有一个图书馆在 4—348，里面有许多关于实验的书和专门阅读材料，其中有许多同样可在 Hayden 图书馆的藏书室（14N—132）中找到。

此外，可资利用的书也可在下述地方找到：

（1）学生中心图书馆；

（2）物理阅览室（26—152），或在办公室的普通书架上（如 Marton 的书），和专门的书架上，同时还有其它课程常用的书（如 Melissinos）。

在每一次新实验开始的第一天，在你的数据记录本上写下你准备测量的量，写出单位及量纲、你准备用于测量的仪器。这是一份实际上要测量的实验量的清单。但不是后来的最终物理量。

其次，写下你要用到的公式。如在 Millikan 实验中，要观测的量是计数、距离，和电压，所以从理论上说，对于电子所带电量 q ，我们要有一个如下形式的方程： $q=f$ （计数；望远镜标尺读数；电压读数），这里函数 f 要用三个观测量写出其显示式。这样做可能相当麻烦，所以你必须准备一个方程式，利用它从输入数字来计算所需要的中间量。对 Millikan 实验，你尤其要用到方程式：

$$V = \frac{K_1 (s_2 - s_1)}{K_2 C}$$

这里 s_1, s_2 是望远镜的两个读数， C 是计数数，而两个 K 是适当的常数，把观测量转换为实际距离及时间间隔，以便求出速度 V 。

带上坐标纸，在轴上写明标度，标度要复盖需要画出来的物理量的预计范围。

再说一遍，对你要读数据的每一个量，要有数量级的概念。这是十分重要的。

6. 实验的进行

象大多数旧汽车一样，一套实验装置并没有连同保证书交给你，只是给你一张过户证。所以不要假定什么东西都弄妥了。在做实验时要考验和扰动你周围的物理环境，正如你在解习题时。要考验和扰动你的知识环境一样。例如：最通常的调整工作有：摆好桌上的仪器、保持邻近地方的整洁，这样，眼睛就易于看见各种几何形状的变化，这点，在做光学实验时尤为重要。清洁仪表的表面，读数时轻拍表头，要确信它没有粘住，在看望远镜时，要坐在高矮适中的凳子上，以便舒适地观察。调整窗户、温度和光线，使观察舒适，能见度好。

没有对大多数实验都通用的正确方法。可以试试各种新方法，当你需要对实验某些部分

作专门研究，或做某些独创性工作，甚至包括新的设计和结构，那么应和你的教授商榷一下，我们热情鼓励独创性，虽然我们还要证实你的能力是否已有的长进，足以做更标准的实验，需要证实你是否掌握了基本物理学。

数据常常读取过多、而整理时间则不够。只消取少数几个点来定出一条预计的直线，参数只改变少数几次就行，除非发现它不是一根直线。这样做常常节省大量时间，但要求画出的数据要带有误差范围线。因此，在 Hall 效应实验中，取两个 B 的值，每个附带三个 i 的值就够了。在 Millikan 实验中，一个好的清晰的油滴就够了。

在要确定一些峰值位置的实验中，你可读取峰侧若干点，但不读取峰尖的点，因为这些点对确定其位置只有非常小的影响。这一点当你把数据误差范围线添加上去后就更清楚了。在实验 9 的注释中，举出了一个例子，（不知什么道理，大多数的 MIT 学生都认为需要在峰尖读取大部分数据，这依旧是一个性格上不解之谜）。

另一方面，要花相当多时间去证实实验中系统的逻辑的和几何的对称性。例如在 Hall 效应实验中，在所有 B 和 i 的组合中把 B 和 i 颠倒过来研究，至少要对一个 i 值取两个不同的 B 值。当然，一般说，数据多些比少些好，但实际的选择通常宁可数据少些，但读取时对它要充分了解，而不要加工一大堆毫无意义、因而永远不值得认真信赖的数据。

对自己的测量要有把握，或起码对每一个实验“给出”的每一个重要的量都要用估计来核验一下——如在 e/m 实验中间隔的距离（= 9）。即使一个实验都不做，也比盲目相信一个未经证明的、流传下来的“事实”好。

实验可能出问题，所以——偶然——要由你去修理仪器或组装和仪器核查的工作状况。实验室里有少量小型工具放在箱里，有两部台式计算器，大的工具则在学生实习车间、（4—336），电子仪器的简易维修和普通库房在 4—335。

说明书，不论是在注解里的或是附在仪器上的，上面的数据有些常常是过时的，或只看作是大概的约数。要由你去检验它是否有意义，如果你得不到什么结果，那就要另外换一个。例如：一个胶片的曝光时间，可能是由某一特殊的放电管规定的，而这个放电管近来已经发黑，或换掉了，或者一个粒子源已经用完。总之在一个真正的实验里，现成的东西是很少的。

有什么东西坏了，或有某些参数值与注明的数值或与仪器上标明的数值不同，请记在建议纸上相应部分，作为实验设备记录保存起来。如果你善于记录这类信息，就表明你很好掌握了研究工作的主要部分。

7. 数 据 记 录

两个同伴可以共用一个记录本，但两人都必须经常在上面记录数据，并放在手头附近。什么事都可往上記。如果有什么很平常的原因，你必须把某些数据记在零散的纸上，请用订书机或带子把它钉在你的数据本上。除非数据是直接记入的，否则通常都会使其细节受到损失，有时在誊写过去时会产生数字上的错误。初学者常常不愿意把凌乱的数据直接记入同伴的记录本上，也不敢冒昧评论读取数据的方法。他有一种错误的印象，以为科学的观测都是尽善尽美的过程，以为写在教科书里的伟大的（已去世的）人物，一开头就都是把事情办得

正确无误。

不好的或可疑的数据，不能擦掉或毁掉，可以打上记号，而取代的数据应该标明。

写入的一切数据都要记下日期和时间。按公布的各个实验次序规定来做实验。

照你读取的数据，把结果画成曲线，把你的实验照片展示在数据本上，就本子上详细地写上标题，写出数据结果及说明。有些量是你在最后计算过程中引入的，是你必须补充进来的有物理意义的量，这些量的数值也要写出来。一张好的图或照片抵得上你写 10^2 个字以上的导言。

同类的许多图都要画在一张纸上，用明显不同的形状和颜色的点和线来画，例如，在 Hall 效应实验中，画 V 对 i 的图时，圆圈，十字，三角形表示不同磁场的数值，并用不同颜色的曲线把它们连接起来。要指出，你是顺着曲线的哪一个方向连续地记取读数的，这便于我们沿相反方向取几个间隔更大的点走回来，以核查其重复性。

首先把数据画在线性坐标纸上，即使在最后你还准备用对数或对数——对数坐标纸来画，因为通常你不能说，一条用对数——对数坐标纸画出来的曲线，才是十足的物理曲线（或生物曲线）。热离子发射（*4实验）是一个例子，那里你学到许多线性图解的知识，只是线性图解可能要把若干张坐标纸接起来才能在整个数据范围内获得很好的分辨率。

8. 数 据 处 理

一边读取数据，一边就要把它计算成最后的物理数值，例如在法拉第实验里，要算出 e/m ，或在密立根实验中算出 e 。这在你继续读取数据时使你能及时地发现有什么错误或计算中有什么错误，以便明智地重新测量。通常在规定时间结束前三小时，你应算出试验性结果的数值。

在你的计算中，列出代数的和算术的运算步骤，你会发现、这使你在冗长的计算中节省大量时间、因为这便于你找出许多错误，而在你算完所有数据之前，你是不知道自己要犯多少小错误的。

找峰值位置的办法可以沿中心线把纸对折起来，透过坐标纸看去，使其两侧重叠。在你确定峰值时，要注意用两侧陡峭的斜线而不用峰尖。独立地重基数次，推敲其可靠性。一条曲线的形状反映了接受讯号的形状及背景* 的形状，而你需要获得关于这些形状的各自的信息，或者需要获得这些形状的各自的样板，以便最佳地定出峰的位置。如果其预计效果很好，那么这一研究或理论处理就值得做。在你首次要精确定出一个峰值时，可请教授帮助。

注意，不论是这种模拟式（“用眼”）的近似方法或用数字式的近似方法，都要对背景以及讯号的接收效率有所了解，为什么用眼睛近似比用解析法近似更合适，这是另一个问题。通常，对费用精度的限制不是来自近似方法，而是来自对系统的了解。眼睛是一个计算机的输入端，这个计算机的软件和硬件已发展了 10^8 年，具有 10^4 个验算器，有声频和打印输出，有巨大的数据记忆容量，（有关的书藏在 4—348，26—152（物理阅览室）及 Hayden），所以，一个新的过程一经眼睛核准，它就很难推翻了。而精密的数值分析，通

注：* 背景，background，看来是指仪器带来的因素，不包括讯号原有的。

常把许多时间花在了了解系统的校正上。在 8、13 课程里，也象在其它课程中一样，坏的数据和用计算机分析是有很大连带关系的。

要把自己的思绪沉浸在数据里。在它上面花更多的时间，比大多数人想象的还要多地用手来计算。例如，在 Hall 效应实验中，把线条外推，看看他们能否相遇，在通过零点的情况和不通过零点的情况下画 e/m 的逼近线。调查局一位前主任把这比喻为“在数据的海洋中航行”。

9. 结 果 的 表 示

这里面有许多东西要学，特别是对许多 *M. I. T.* 学生，可以学习书写和口头表达一个完成了的实验。为了避免例行公事，希望只有少数几个实验要书面报告，一个或两个要口头报告，确切的要求由各实验室主管教授负责。

开始做第一个实验时，很可能要求你们对每一个实验都交一份书面报告，除非明确指明免交。对你报告中的数据及你对数据的说明是要打分的。这些报告将尽快地发给你们，使你在做后面的报告时，能从前面的报告批语中吸取教益。如果你懂得如何分析数据及表达数据、实验室工作人员对此感到满意，就可免去你写以后的实验报告，你的数据及数据整理将被口头检查所代替。口头检查是在实验室里当你要做下一个实验前进行。

在 4—348 的书架上，有一份在本实验室完成的实验报告的样本，同时在一份《*Phys. Rev. Letters*》上面载有的附加注解，都可以作为一份写得好的报告的粗略范本。

我们希望通过这一办法来减低对评分的强调，但你必须马上讨论和了解你的新数据，以便趁热打铁，有了错误可以及时回去改正。这就要求取得数据后，能够图解数据，添上标题，给予说明。你要认真地尽早地把你对数据的分析向指导教师试加说明，好让他指出不妥当的地方，使你能及时补救——没有比陈旧的数据更使人莫名其妙的了。

下文是威廉—詹姆斯的一段铭言

“一个印象，简单地飘进小学生的眼睛或耳朵，一点也不变更他眼前的生活，这是一个不牢固的印象。从心理学上说，它是不完备的。它在增长智能方面不会留下任何结果。哪怕仅仅作为印象，也不能在记忆产生它应有的效果，因为，要能完整地保存在记忆里的东西，就必须深入到我们活动的整个循环中去。正是它的运动所产生的后果决定了它自身。它的某些能动的效果必须以作用于感觉的形式返回思想中去，并与印象联系起来。大多数经久的印象是一些我们曾谈过、曾做过或其它在我们身心内引起过巨大震动的印象……。

近年，在中等教育中所见到的最大改进、乃是手工训练学校的引进，不是因为它们将给我们造就一批使国内生活更便利、更实用、在贸易技能上更优秀的人材，而是因为它将给我们造就一个知识结构全然不同的市民阶层，实验课和工艺课使人养成观察的习惯，认识到精确与含混的差别，并洞察自然的复杂性，看到一切抽象的言词不适于描述现实的现象，而这种现象一旦深入到我们的思想里，它就呆在那里，终身难忘。它们产生了精确的概念，因为，如果你正在做一件事，你只能肯定地做对、或肯定地做错。它们使人诚实，因为，当你用制作物品，而不是用言词来表达自己时，用模稜两可来掩饰你的含混无知就成为不可能了”。

William James (1899)

王 治 蔡峰怡译 余祖誉校

安 全

人们常常看到了危险的事，可是出于礼貌、谦虚，或由于懒惰等原因而没有去管它。在安全问题上你们应该多多关心，因为许多你们认为“主管人应当清楚”的事，事先可能并没有考虑得很周到。假如你看到某些你认为不安全的事情请告诉我们。（如果你是在 *M. I. T.* 作独立研究工作，有关危险工作的安全问题请向工业卫生科、职业病科、幅射安全科咨询。）

在下面简单的介绍中，所举的例子是从一位科学家和他的同事的经验中得来的。

1. 机械：

当金属尖端被压向一长胶木棒时，该棒的滑动划伤了操作人员而需要去医治。为了防止这种危险发生，在机械加工中应牢固地夹紧所有的部件，特别是在车床、钻床和冲床上工作时。还要使带子、袖子、裤腿、头发等等离开旋转的机械，特别要注意三角皮带。在车床上干活要戴上眼镜或护目镜，因为刀具、金属屑等物有可能折断和抛出尖碎片，将带锯上的保护罩尽量放低。当你推的工件很薄时，你的手与工件中要放一木块或金属块，用它来推工件前进。

2. 压力和真空：

一个在临界点工作的用蒸汽的切伦科夫计数器其蒸汽把该计数器的玻璃窗口炸碎了，玻璃碎片飞过，险些击中一个物理学家。为了防止上述事故发生，需在任何可能发生炸碎的地方放置沉重的挡板。这些事故是不易觉察的，因为大的力并不需要很大的压力。例如：超过10个大气压的气柜当气体放出时，对6吋的接头产生超过两吨的反推力。不要在压缩空气管周围活动。

3. 超低温：

这是一个在接触液体氢或氧之前，需要认真学习的独立科目。这里使用的液氮和液氧其主要危险仅来自于积存的液体（trapping liquid），它受热使容器炸裂，还有温度降低时玻璃容器以及一些金属容器会裂缝，由于内部真空而压破，抛出碎片。液氧或氮，能使你的肌肉冻伤，但这种可能性很少，因为液氧或氮碰上温暖的表面时会形成气体层，所以液体的数量不多的时候，它很长一段直接接触不到肌肉，不会发生严重冻伤。

4. 热：

一位工作人员在加热石蜡时被叫去听电话，他回来时，救火车也来了。为了防止这类事件，在加热过程中，不要离开人，除非炉子是可控的，但最好也不要离开。即使是停一小会儿，也要将火苗扭小，或将它灭掉。在一切使用敞开的火焰的工作中，要戴上眼镜。石蜡以及另外有些物质不需点燃就会突然着起火来。当高于一定的温度时，它们会在空气内突然燃烧。

5. 重力:

有轮的桌上用铅砖砌成放射保护墙,随着试验愈精确,墙越增厚,数月后,正在移动桌子到新的位置时,墙就倒塌了。大声发出警告,蹲在它下面的人才赶快跳开。为了防止这种情况,复验和查看每个试验的布置,它的部件是否都坚实地放在一起,建筑上是否平衡,使重物离开桌子的边缘。移动重物时,使用完备的绳索固定,而且要尽可能站在背面远离它们。决不要单独移动重物,即使你有动力设备。

6. 电:

在热天一件大的电子设备外框严重短路,草率拉过去的空中的电缆将110伏特电从一根电缆的“地”连到另一根。电流通过汗湿的手;穿过工作人员的胸,使他完全瘫痪不能移动。这时,一位同事赶快用扫帚把将电缆从他手中打掉,切断了电流。为了防止这类事情,将所有部件确切地联接到公共地线上。任何高压线接地都要小心,拿高压电缆时,要用绝缘杆。储能电容放电时间要长,要再次通地检查。高压电源周围不要放东西,要将它屏蔽起来使任何人碰不着它。开口处要加盖,让任何人都碰不着里面。当你接触高压的开关时,一只手要放在口代里。

无线电频率(RF)电磁波能够通过小电容器耦合,接触高电压的任何部分时,高频电流都是危险的。即使你不接通电路也能被电击,这点与直流或低频不同,因为人的身体起了一个接地电容器的一个极板的作用。100微微法拉电容器在16兆赫兹下产生100欧姆阻抗。例如,在试验17中,用来做强放电的 RF 发生器的频率为20兆赫兹。你的身体对地电容的作用几乎象一根电线连到水管上一样。

最重要的是,你在工作时至少有一个其它人在坊,最好的是与一个合作者做同一试验。最近就在这座楼里一个学生被激光电源电死了,假如有人在坊的话是可能得救的。

7. 磁:

一人从一畸角将一个重20磅的铁的空心圆柱拿出来,拿到一个大的电磁铁(~ 100 吨)正在开着的地方(没有设置应有的标记和障碍),这个铁圆柱被平拉过去,在空中飞过了三呎,在电磁铁一极的边上打出 $\frac{1}{2}$ 吋深的槽来,刚刚这人一直拿着这个铁圆柱,前臂穿在里面。为了防止上述现象发生,要在工作的磁铁周围设立路障,还要有看得见,听得到的警报装置,在接通磁铁之前即要发出信号。在大磁铁旁要拿走衣代里的铁东西以及脱去安全鞋等。

8. 化学:

过去是汞蒸气而现在更有可能的是铀和钚这样一些重元素的中毒,这是危险的,铍中毒也是。但更常见的是有机蒸气的中毒。为了防止中毒,要在具有良好通风条件的室内工作,不用的瓶子要盖好。除了很普通材料之外,除非问明化学危险性质,不要加工任何其它的材料。防尘面具要随时准备好。

9. 辐射:

a. 大多数激光辐射的生物学效应是细胞加热而造成的。对皮肤过度的照射将产生灼伤,其严重程度取决于辐射波长、强度和照射时间。而更重要的是对眼睛可能发生损害,眼睛能够把近紫外、近红外和可见的激光聚集到视网膜上,这就导致了视网膜上的能密度比入射到眼睛角膜上的辐射强度大若干数量级。因此,在这些波长上入射到视网膜上的较低辐射

强度也能使视网膜受到损害,随之带来视力的减弱。对在远红外或微波波谱范围内的激光辐射来说,眼睛的其它部分如虹膜和晶状体可被局部的热辐射所伤害。随着热辐射总量和持续时间造成虹膜炎和白内障的可能都是存在的。(实验6附录有详细介绍)。为了防止辐射,如有可能的话应在很亮的地方搞激光辐射,以便收缩瞳孔,这样可减少能量聚集在视网膜上。激光束照射的材料应是漫反射的,不要用镜面材料,而且必须是耐火的。在工作前应先确定各种来自反射镜和窗的反射线的位置,以保护自己的眼睛避开它们所在的平面。

b. 在使用 α 射线和放射性物质时,必须格外小心。因为我们不能感觉到电离辐射的存在,常常在长时间照射之后,出现放射性损伤等后果,还有很多电离辐射的生物学效应。* 激光电源和所有其它超过15000伏电压的电源,应测量可能的 α 射线放射。未防护的闪光灯和石英放电管也应测量其紫外辐射放射。

测量放射源的放射强度单位为居里(3.7×10^{10} 次衰变/秒)这是放射源的强度的量度。若每一个原子核裂变辐射出一个 γ 射线,放射强度就会告诉我们每秒放射多少 γ 射线。“放射剂量”用来表示有多少辐射被材料吸收,它通常以伦琴(r)或毫伦琴(mr)为单位来度量。对 γ 射线伦琴规定为这样的一个辐射密度,它可在标准条件下,通过一毫升干燥空气而产生一静电单位离子偶。因为在空气中32.5电子伏特产生一离子偶,1伦琴相当于每克空气大约有88尔格的能量吸收[校核一下这个计算]。

没有简单的公式可用来描述所有类型的放射源的放射性剂量率。不过对 γ 射线放射剂量率倒容易从放射源的放射性来计算。首先计算从源发射到给定距离处的能通量(尔格/ $\text{cm}^2 \cdot \text{秒}$),然后乘以材料的质量吸收系数。距源一定处的能通量等于每秒裂变的总量乘以经裂变的全部光子能,再被 $4\pi r^2$ 除。侥幸的是对轻物质(如空气)核的射线的能量的范围内质量吸收系数仅有微小变化,所以我们可以方便的使用一个比较粗略的公式:放射剂量率($\text{mr}/h\nu$ 每毫居里) $=0.55 \Sigma(h\nu)$ 在1米处,其中 $\Sigma(h\nu)$ 是每次裂变的全部光子能(兆电子伏)。

注意,放射剂量率在2米处将为以上值的 $\frac{1}{4}$,因为它和 $\frac{1}{r^2}$ 成比例的关系。大多数 γ 射线能约为1兆电子伏特,所以1居里 γ 的放射在1米处1小时约产生1伦琴。作为对比,宇宙射线的放射剂量率大约是每星期2毫伦琴。下面有一些标准的 γ 发射体的放射剂量率的例子:

Na ²²	1.29	mr/h γ 每毫居里(mci)在1米处
Co ⁶⁰	1.35	
Cs ¹³⁷	0.32	

一般说来,不同种类的辐射的相同吸收剂量不产生相同的生物学效应。如快中子的生物学效应大约比 γ 射线大10倍。因此引入了被称为雷姆的新单位。这个单位校正不同辐射的不同的生物相对有效性,以使1雷姆的任何类型辐射大约有相同的生物学效应,雷姆的定义是生物上相当于1 α 射线伦琴的剂量。

应当保持尽可能的低照射。原子能委员会已确定了最大容许放射剂量标准。对个人的最大允许计量的叙述用处并不大,它是“从一个长时期或从一次照射得到的剂量,这个剂量,

* 辐射的生物学效应,请看参考文献1。

从现有知识说来，产生身体上或遗传上的严重损害的可能性是可以忽略的……”至少对于一些生物效果来说，没有证据表明存在一个出现损伤的辐射的阈值，所以，不存在一个类似于绝对“安全”辐射照射之类的东西。

但是，我们还是可以在原则上将辐射损伤（为了小心，采取悲观的办法，即用观察的辐射高剂量效果的线性外插值）与其它生活上的危险性较小的辐射比较，而作出一个判断。在实践上，外插和其它危险辐射的计算可以避免，只要和地球辐射以及宇宙辐射的本底值比较就行了。在这个地方，这个本底值 100 毫雷姆/年。在 Denver 总本底辐射总量约是 125m 雷姆/年。25 毫雷姆/年的差别，来自较强的宇宙射线，但大部分来自 Denver 的火山土壤。

在典型地（即仔细）完成实验 #1 过程中，你将得到（数量级）不多于 1 毫雷姆；粗略的等于在海平面上几天或在喷气飞机中飞行几小时，或在 Denver 多呆两星期所附加的辐射。如果这给你带来忧虑，干脆跳过实验 #1。对于非放射工作者（包括 8.13 的学生）目前原子能委员会规定的水平要求，稳态辐射照射，对全身来说每星期不超过 100 毫雷姆，而手和脚每星期不超过 1000 毫雷姆。这个实验如果进行恰当，因此产生的剂量只是你的原子能委员会规定值的 $\leq 0.02\%$ 。如果你在其它工作中也受到显著大于此值的辐射照射剂量，你应该去麻省理工学院辐射防护办公室登记。

两个应遵守的重要规则：

- 1) 不在实验室内吃东西，特别是放射源附近。
- 2) 操作放射源后洗手。

重要!!

如果你不满十八岁，请告诉秘书，我们就会给辐射防护办公室一个必需的特别通知。

文 献：

1. “正确理解辐射事故”。World Health Organization Technical Report Series No. 248, Geneva, 1962
2. Robley D. Evans, The Atomic Nucleus, (Mc Graw-Hill, N. V. 1955) pp. 719—723.
3. M.I.T. Required Procedures for Radiation Protection. 麻省理工学院辐射防护必需措施 (1963, June)
4. Radiation Exposures and Biologic Effects, etc., M.I. T. Environmental Medical Service Charts. 麻省理工学院环境医学服务部图表。
5. W.F. Lilly, 天然放射性和宇宙线的剂量, Science July 8, 1953

曲线拟合法

引言

本节是数据分析中曲线拟合法的导论，讨论了它的最一般的方法和应用。所有的例子都取自中级实验室的实际数据，它们代表了一些能够在实验室中得到的结果。但这并不是说在分析所有的实验的过程中，要用到甚至必须用到这里所讲的全部方法。借助一台计算机做简单的最小二乘法或 χ^2 法的曲线拟合并不要花费过多的时间。不过，在得到 χ^2 等值线的过程中需要重复上百次的计算机计算，这里只是举例说明 χ^2 方法的广泛应用。如果你在计算平均偏差方面有过一些实践，那么就有可能用眼睛相当准确地估计 χ^2 。在许多情况下，实验讲义上提出一些捷径，使误差估计更为迅速。在本节曲线拟合法的末尾我们将简单的提到一个这类捷径。如能熟悉下述的全部内容当然是好的，但你可以舍去一些对于任何分析都过于深的，过于花时间的，或不太合适的内容。

I：最小二乘法原理

任何测量量的集合由于统计涨落或噪声具有一定的散布，根据**最小二乘法原理**一个数量 x 的最好的估计值，应使测量值和估计值的差的平方和为最小，即应使 $\sum_{i=1}^N (x - x_i)^2$ 的数值为最小。值得注意的是，这个原理等效于平均值是最好的估计值的假设。求上式的极小值：

$$\frac{d}{dx} \sum_{i=1}^N (x - x_i)^2 = 0 \quad 2Nx - 2 \sum_{i=1}^N x_i = 0 \quad x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

如果我们认为 N 次测量的平均值是最好的选择，那么我们会得出最小二乘法原理。不过其它的选择是可能的而且常常更为合适。例如，假设不使偏差的平方和为最小，而使偏差本身的绝对值为最小。

$$\sum_{i=1}^N |x - x_i|$$

容易看出这样就应选择各 x_i 的中间值。还有一种可能性是使最大偏差为最小。这导致得到

$$\frac{x_{\max} + x_{\min}}{2}, \text{ 即通常的中列估计值 (midrange estimate) }$$

为什么减少偏差的平方和至最小是合适的，在什么条件下这个公式成立？最小二乘法原理不能被“证明”，我们只能指出在一定的情况下，看起来它能够精确的反映事实。不过，假如误差遵循高斯分布的话，最小二乘法能够从**最大可能原理**推演出，根据高斯误差分布，

在 x_i 的 dx 区间内的所测的数值的概率为:

$$P_i = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(x-x_i)^2/2\sigma^2} dx$$

式中 $\bar{x}$ 是许多测量值的平均值, σ 是标准偏差。我们的测量值集与我们实际得到的值相符合这一事实的概率, 就等于各分离的概率的乘积。

$$P = P_1 P_2 \dots P_N = \left(\frac{dx}{\sigma\sqrt{2\pi}} \right)^N e^{-\left[\sum_{i=1}^N (x-x_i)^2/2\sigma^2 \right]} \quad (1)$$

我们现在做最大可能原理的基本假设。即假设我们已做出的特定测量分布实际上是测量数值最可机集合。换言之, 我们已得到我们最可能获得的结果。显然, 对我们的 N 次测量的集合来说我们要使 P 达到最大值。方法是: 在方程 (1) 中使指数为最小, 这个指数项中的和被称为最小乘方和

$$M(x) = \sum_{i=1}^N \frac{(x-x_i)^2}{2\sigma^2} \quad (2)$$

使上式为最小当然与使 $\sum (x-x_i)^2$ 为最小相等, 因此对于遵循高斯分布的测量结果, 最小二乘方法可用来找最可机值。

有了 N 次测量值 (x_i, y_i) 的集合, 要用一个多项式去近似地表示此集合, 多项式的次数 M 小于 N , 此时最小二乘方法常常很有用。到目前为止, 我们的最小二乘方原理的讨论限于一维的情况, 但处理 m 次多项式的系数 $a_0, a_1, \dots, a_m$ 的时候, 没有基本的改变。 $y(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_m x^m$ 只要把这些系数看成 $(m+1)$ 维空间一点的坐标就行了。和以前一样, 这些参数项的最可机值可通过使差数的乘方和为最小而得到, 所谓差数即观察的测量值对于假定的拟合多项式值的偏差, 即使 $f(a_0, a_1, \dots, a_m)$ 为最小。

$$f(a_0, a_1, \dots, a_m) = \sum_{i=1}^N [y(x_i) - y_i]^2$$

式中 (x_i, y_i) 是观察量, $Y(x_i)$ 是拟合的多项式值, 步骤是直截了当的。我们使 f 对于每一参量均为最小, 得到 $n+1$ 个未知数的 $m+1$ 个方程。

$$\frac{\partial f}{\partial a_k} = \partial \sum_{i=1}^N [y(x_i) - y_i]^2 = 0$$

这些是所谓的正态方程, 是 $n+1$ 个变量 $a_0, a_1, \dots, a_m$ 的 $(m+1)$ 线性方程。是这些方程确定最小二乘方拟合多项式。在以下一节中, 我们从中级实验室获得的数据中提出最小二乘方拟合的若干例子, 包括被称为 χ^2 拟合的最小二乘方的推广。

I: 最小二乘方线性拟合

首先我们将说明一种最小二乘方拟合的最简单情形, 常称为简单线性回归。我们将使直线 $y = a_0 + a_1 x$ 拟合实验 11 (光抽运) 中的数据。铷原子跃迁的谐振频率做出的曲线是外加磁场的函数 (图 1)。用曲线的斜率 a_1 可以计算铷 87 的原子和核的组合 g 因数。另外, x —— 截距, $\left(-\frac{a_0}{a_1}\right)$ 是地球磁场强度的水平分量。在下面的方法中, 最小二乘方系数取决

于 N 个数据点 (x_i, y_i) 的集合。要求得最小的函数是：

$$f(a_0, a_1) = \sum_{i=1}^N [y(x_i) - y_i]^2 = \sum_{i=1}^N [a_0 + a_1 x_i - y_i]^2$$

求导数，我们得到两个正态方程：

$$\frac{\partial f}{\partial a_0} = \sum_i 2 (a_0 + a_1 x_i - y_i) = 0$$

$$\frac{\partial f}{\partial a_1} = \sum_i 2 (a_0 + a_1 x_i - y_i) x_i = 0$$

$$\text{或 } a_0 N + a_1 \sum x_i = \sum y_i$$

$$a_0 \sum x_i + a_1 \sum x_i^2 = \sum x_i y_i$$

用 Cramer 法则：

$$a_0 = \frac{\begin{vmatrix} \sum y_i & \sum x_i \\ \sum x_i y_i & \sum x_i^2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} N & \sum x_i \\ \sum x_i & \sum x_i^2 \end{vmatrix}} \quad (3)$$

$$a_1 = \frac{\begin{vmatrix} N & \sum y_i \\ \sum x_i & \sum x_i y_i \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} N & \sum x_i \\ \sum x_i & \sum x_i^2 \end{vmatrix}} \quad (4)$$

最后，我们得到用 x_i 和 y_i 表示的最小二乘法系数表达式：

$$a_0 = \frac{\sum y_i \sum x_i^2 - \sum x_i y_i \sum x_i}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

$$a_1 = \frac{N \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

对光抽运的一些抽样数据（对应于图 1 中的点）列于表 I，从方程(3)和(4)用手摇计算机计算的最小二乘法拟合也列在表中。根据 a_1 的值我们可按式计算 g_F

$$\begin{aligned} g_F &= \frac{h\nu}{\mu_B B} = \frac{h \cdot a_1}{\mu_B} \\ &= \frac{6.63 \times 10^{-27} \text{ 尔格} \cdot \text{秒} \times 0.707 \times 10^6 / \text{秒} \cdot \text{高斯}}{9.27 \times 10^{-21} \text{ 尔格/高斯}} \end{aligned} \quad (5)$$

$$g_F = .505$$

除了计算最小二乘法系数之外，我们也可以计算各种误差。特别地，我们能够估计我们的数据点对于拟合线的标准误差，而且还能够对回归系数 $(\sigma a_0, \sigma a_1)$ 本身给出标准偏差。

S 由下式给出：
$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(a_0 + a_1 x_i - y_i)^2}{N-2}}$$
 这样 S^2 就恰是差数的平方平均值乘以因

子 $(N/(N-2))$ 。这是因为确定直线的参数时减去了两个自由度。计算 S 的更方便的形式是：

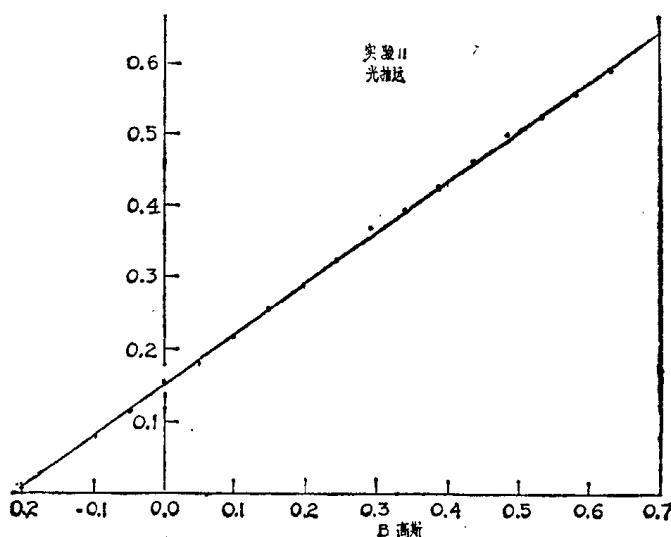


图 1