



高等学校规划教材

Modern
Physics Experiments

近代物理实验

刘晓来 主编



化学工业出版社

本书是参照编者使用多年的近代物理实验讲义,结合目前高等工科院校教学的实际情况与仪器设备的现状,增加了新实验,对原讲义进行了筛选和修订而编写的。内容涉及全息、微波、原子与分子物理、光谱、核磁共振、真空、X射线衍射、薄膜等。详细阐述了每个实验的原理和操作步骤以及背景知识,特别指明了那些获得过诺贝尔奖的及在近代物理学史上有过重要影响的著名实验,以便于读者更深刻领会著名物理学家的物理思想和实验设计思路。

本书可作为普通理工科本科高年级学生和硕士研究生的近代物理实验教材或教学参考书,也可供其他相关实验工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

近代物理实验/刘晓来主编. —北京:化学工业出版社, 2011.12

高等学校规划教材

ISBN 978-7-122-12929-1

I. 近… II. 刘… III. 物理学-实验-高等学校-教材 IV. 041-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 245056 号

责任编辑:叶晶磊 唐旭华
责任校对:宋 玮

装帧设计:史利平

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印刷:北京云浩印刷有限责任公司

装订:三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 7 $\frac{3}{4}$ 字数 185 千字 2011 年 11 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:19.00 元

版权所有 违者必究

前 言

近代物理学是当今时代高新技术的基础。正因为有了 20 世纪以来以相对论和量子力学作为理论基础的近代物理学的巨大发展，才有了今天的微型计算机、激光和光通信、核能、纳米科学和技术等各种各样的高新技术。“近代物理实验”不仅能使学生生动直观地观察学习在近代物理学发展中起过重要作用的著名实验（本书中的实验项目很多是获过诺贝尔物理学奖的实验），领会著名物理学家的物理思想和实验设计思想，进一步巩固理解以前学到的理论知识，同时通过这些实验的训练，学生可了解近代物理的基本原理，学习科学实验的方法、科学仪器的使用和典型的现代实验技术，进一步培养学生的科学作风和进行科学研究的能力。

本书的特点是注重对学生科学实验素质与科学精神的培养，每个实验都有预习提示和要求，特别适合研究性学习。学生在学完普通物理实验的基础上进行本课程的学习，可进一步培养对实验的爱好和独立进行实验的能力，培养严肃认真的科学态度和细致踏实的工作作风，把做实验看成认识自然规律的创造性劳动，要多独立思考，提高自己提出问题解决问题的能力。

本书由刘晓来主编，伦秀君、侯志林、钱平参与编写。书中的大部分实验是北京化工大学物理实验教师长期共同努力的成果，特别是包含了我校前辈教职工的辛勤工作。周卓辉和李情怀为此书的打字录入付出了辛勤的劳动，编者对此深表谢意。

由于编者水平有限，书中难免存在不当和疏漏之处，诚恳欢迎读者予以指出，以便改正。

编者
2011 年 10 月

目 录

绪论	1
0.1 误差及其分类	1
0.2 误差处理	2
0.3 测量不确定度的评定与表示	3
0.4 实验注意事项	5
实验 1 全息照相及其应用	7
1.1 引言	7
1.2 预习提示和要求	7
1.3 实验目的	7
1.4 实验器材	7
1.5 实验原理	7
1.6 实验内容	10
1.7 注意事项	11
1.8 研究性题目	11
附录 1-1 全息照相实验台技术指标	12
附录 1-2 曝光定时器	12
实验 2 光电效应法测普朗克常数	14
2.1 引言	14
2.2 预习提示和要求	14
2.3 实验目的	14
2.4 实验原理	14
2.5 实验装置及使用注意事项	16
2.6 实验内容	17
2.7 思考题	17
实验 3 核磁共振法测磁场	18
3.1 引言	18
3.2 预习提示和要求	18
3.3 实验目的	18
3.4 实验原理	19
3.5 实验仪器	21
3.6 实验内容	23
3.7 数据处理要求	23
3.8 思考题	24
3.9 研究性题目	24
实验 4 用 β 粒子验证狭义相对论的动量-动能关系	26
4.1 引言	26

4.2	预习提示和要求	26
4.3	实验目的	26
4.4	实验仪器	26
4.5	实验原理	26
4.6	仪器描述	28
4.7	实验内容	30
4.8	研究性题目	30
4.9	注意事项	30
实验 5	扫描隧道显微镜	31
5.1	引言	31
5.2	预习提示和要求	32
5.3	实验目的	32
5.4	实验仪器	32
5.5	实验原理	32
5.6	实验装置与控制处理软件	35
5.7	实验内容	36
5.8	研究性题目	37
实验 6	真空技术	38
6.1	引言	38
6.2	预习提示和要求	38
6.3	实验目的	38
6.4	实验原理与装置	38
6.5	实验内容	42
附录 6-1	真空镀膜技术	43
实验 7	氢原子光谱的研究	45
7.1	引言	45
7.2	预习提示和要求	45
7.3	实验目的	45
7.4	实验原理	45
7.5	实验仪器	46
7.6	实验内容	46
附录 7-1	光栅摄谱仪	47
附录 7-2	映谱仪和铁光谱图	50
实验 8	电子自旋共振	52
8.1	引言	52
8.2	预习提示和要求	52
8.3	实验原理	52
8.4	实验装置	53
8.5	实验内容	54
实验 9	流体折射率的测定	56
9.1	引言	56

9.2	预习提示和要求	56
9.3	实验目的	56
9.4	实验原理	56
9.5	仪器的结构和作用	57
9.6	仪器的操作和使用	59
9.7	实验内容	61
实验 10	X 射线衍射实验	63
10.1	引言	63
10.2	预习提示和要求	63
10.3	实验原理	64
10.4	实验装置	66
10.5	实验内容	68
附录 10-1	软件 X-ray Apparatus 简介	73
实验 11	用光拍频法测量光速	75
11.1	引言	75
11.2	预习提示和要求	75
11.3	实验目的	75
11.4	实验原理	75
11.5	实验装置	77
11.6	实验内容	79
11.7	注意事项	80
附录 11-1	相位法测光速的原理	80
实验 12	真空直流溅射	83
12.1	引言	83
12.2	预习提示和要求	83
12.3	实验目的	83
12.4	实验原理	83
12.5	实验装置	85
12.6	实验内容	85
12.7	分析讨论	86
12.8	研究性题目	86
实验 13	薄膜的巨磁电阻测量	87
13.1	引言	87
13.2	预习提示和要求	88
13.3	实验目的	88
13.4	实验仪器	88
13.5	实验原理	88
13.6	实验内容	92
13.7	分析讨论	93
13.8	研究性题目	94

实验 14 弗兰克-赫兹实验	95
14.1 引言	95
14.2 预习提示和要求	95
14.3 实验目的	95
14.4 实验原理	95
14.5 实验仪器	97
14.6 实验内容	98
14.7 注意事项	99
实验 15 激光拉曼光谱	100
15.1 引言	100
15.2 预习提示和要求	100
15.3 实验目的	100
15.4 实验仪器	100
15.5 实验原理	101
15.6 实验内容	102
15.7 分析讨论	102
实验 16 微波介电常数测量	103
16.1 引言	103
16.2 预习提示和要求	103
16.3 实验目的	103
16.4 实验原理	103
16.5 实验装置	106
16.6 实验内容	107
16.7 研究性题目	107
16.8 注意事项	108
附录 16-1 用 mathematica 5 来解超越方程	108
附录	109
附录 1 物理常数表	109
附录 2 中华人民共和国法定计量单位	111

绪 论

0.1 误差及其分类

物理实验离不开对各种物理量进行测量，由测量所得的一切数据与真值比较，都毫无例外地包含有一定数量的测量误差，没有误差的测量结果是不存在的。测量误差存在于一切测量之中，贯穿于测量的全过程。随着科学技术水平的不断提高，测量误差可以被控制得越来越小，但却永远不会降低到零。

何谓真值？真值是在特定条件下被测量的客观实际值，当被测量的过程完全确定，且所有测量的不完善性完全排除时，测量值就等于真值。这就是说，真值通过完善的测量才能获得。然而，严格、完善的测量难以做到，故真值就很难确定。

在实践中，有一些物理量的真值或从相对意义上来说的真值是可以知道的，这有如下几种情况。

(1) 理论真值 如平面三角形三内角之和恒等于 180° ；某一物理量与本身之差恒为零，与本身之比值恒为 1；理论公式表达式或理论设计值等。

(2) 计量单位制中的约定真值 国际单位制所定义的七个基本单位，根据国际计量大会的共同约定，凡是满足上述定义条件而复现出的有关量值都是真值。

(3) 标（基）器相对真值 凡高一级标准器的误差是低一级或变通测量仪器误差的 $1/3 \sim 1/20$ 时，则可认为前者是后者的相对真值。如经国家级鉴定合格的标准器称为国家标准器，它在同一计量单位中精确度最高，从而作为全国核定计量单位的最高依据。国际铂铱合金千克原器的质量就作为国际千克质量的真值。

在科学实验中，真值就是指在无系统误差的情况下，观测次数无限多时所求得平均值。但是，实际测量总是有限的，故用有限测量所求得平均值作为近似真值（或称最可信值）。

0.1.1 误差

误差即观察值与真值之间的差异，没有误差的测量结果是不存在的。

(1) 绝对误差 某物理量的测量值与其真值之差称为绝对误差，它是测量值偏离真值大小的反映，有时又称真误差。即

$$\text{绝对误差} = \text{测量值} - \text{真值}$$

(2) 相对误差 绝对误差与真值的比值所表示的误差大小称为相对误差或误差率。有时，两组测量的绝对误差相同，但真值不同，即此时实际为两种不同的准确度。所以，采用相对误差就能够清楚地表示出测量的准确程度。

按定义有

$$\text{相对误差} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{真值}} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{测量值} - \text{绝对误差}}$$

相对误差还有一种简便实用的形式——引用误差。它在多挡或连续刻度的仪表中得到广泛应用。为了减少误差计算中的麻烦和划分仪表准确度等级的方便，一律取仪表的量程或测

量范围上限值作为误差计算的分子（即基准值），而分子一律取用仪表量程范围内可能出现的最大绝对误差值。于是，定义引用误差为

$$\text{引用误差} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{代表量程}} \times 100\%$$

在热工、电工仪表中，正确度等级一般都是用引用误差来表示的，通常分成 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5 和 5.0 七级。上述数值表示该仪表最大引用误差的大小，但不能认为仪表在各个刻度上的测量都具有如此大的误差。例如某仪表正确度等级为 R 级（即引用误差为 $R\%$ ），满量程的刻度值为 X ，实际使用时的测量值为 x （一般 $x \leq X$ ），则

$$\begin{cases} \text{测量值的绝对误差} \leq XR/100 \\ \text{测量值的相对误差} \leq \frac{XR}{x}\% \end{cases} \quad (0-1)$$

通过上面的分析，可知为了减少仪表测量的误差，提高正确度，应该使仪表尽可能在靠近满量程刻度的区域内使用。这正是人们利用或选用仪表时，尽可能在满刻度量程的 $2/3$ 以上区域内使用的原因。

0.1.2 误差的分类

根据误差产生的原因和性质将误差分为系统误差和随机误差两大类。

(1) 系统误差 在相同条件下多次测量同一物理量时，测量值对真值的偏离（包括大小和方向）总是相同的，这类误差称为系统误差。

系统误差的特点是恒定性，不能用增加测量次数的方法使它减小。在实验中发现和消除系统误差是很重要的，因为它常常是影响实验结果准确度的主要因素，能否用恰当的方法发现和消除系统误差，是测量者实验水平高低的反映，但是又没有一种普遍适用的方法去消除系统误差，主要是靠对具体问题作具体的分析与处理，要靠实践经验的积累。如果能够确定系统误差的数值，就应该把它从实验结果中扣除，消除它的影响，或者说，把系统误差的影响减小到偶然误差（又称随机误差）的范围以内。这种数值已知的系统误差称为“已定系统误差”。还有一类系统误差，只知道它存在于某个大致范围，而不知它的具体数值，称之为“未定系统误差”。例如仪器的允差就属于这一类。

(2) 随机误差 在相同情况下，多次测量同一物理量时，即使已经精心排除了系统误差的影响，也会发现每次测量结果都不一样。测量误差时大时小、时正时负，完全是随机的。在测量次数少时，显得毫无规律，但是当测量次数足够多时，可以发现误差的大小以及正负都服从某种统计规律。这种误差称为随机误差。随机误差的特征是它的不确定性，它是由测量过程中一些随机的或不确定的因素引起的。例如，人的感受（视觉、听觉、触觉），仪器的灵敏度和稳定性，实验环境中的温度、湿度、气流变化，电源电压起伏、微小振动以及杂散电磁场等都会导致随机误差。

除系统误差和随机误差外，还有过失误差。过失误差是由于实验者操作不当或粗心大意造成的，例如看错刻度、读错数字、记错单位或计算错误等。过失误差又称粗大误差。含有过失误差的测量结果称为“坏值”，被判定为坏值的测量结果应剔除不用。实验中的过失误差不属于正常测量的范畴，应该严格避免。

0.2 误差处理

0.2.1 以算术平均值代表测量结果

前已说过，由于测量误差的存在，在计量性测量中，真值总是不能确切知道的；对于某

一物理量 X 进行多次测量的结果不会完全一样。那么怎样最好地表示测量结果,使它最合理地代表真值呢?常用的是,在测量条件不变的情况下,以多次 (n 次) 测量的算术平均值作为测量结果,是真值的最好近似,即测量结果

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{n} (x_1 + x_2 + \cdots + x_n) \quad (0-2)$$

式中, x_i 是第 i 次测量的值。

0.2.2 多次测量结果偶然误差的估计

根据 $\Delta x = x - \bar{x}$ 误差的定义可知,由于真值不能确定,那么误差也只能估计。估计偶然误差的方法有许多种,最通用的是以标准偏差来表示偶然误差。有限次 (n 次) 观测中的某一次测量结果的标准偏差用 S 表示

$$S(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (0-3)$$

n 次测量结果的平均值 $\bar{x}$ 的标准偏差 $S(\bar{x})$ 为

$$S(\bar{x}) = \frac{S(x)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (0-4)$$

如式 (0-4) 所示,增加测量次数可减少偶然误差。

0.3 测量不确定度的评定与表示

0.3.1 测量不确定度评定方法的分类

测量不确定度的评定方法分为 A、B 两类。由于不确定度由多个分量组成,对某些分量可用测量列结果的统计分布进行统计分析的评定方法,称为不确定度的 A 类评定;对另一些分量可用基于经验或其他信息的假定概率分布进行估算,也就是说用不同于对观测列进行统计分析的评定方法,称为不确定度的 B 类评定。

值得注意的是 A、B 分类旨在指出不确定度评定的方法不同,只是为了便于理解和讨论,并不意味着两类分量之间存在本质上的区别。它们都基于概率分布,并都用方差和标准差定量表示,为了方便起见称为 A 类标准不确定度 $[u_A(x)]$ 和 B 类标准不确定度 $[u_B(x)]$ 。

各标准不确定度分量的合成称为合成标准不确定度,以 u_c 表示,它是测量结果标准差的估计值。

不确定度的表示形式有绝对、相对两种,绝对形式表示的不确定度与被测量的量纲相同,相对形式无量纲。

0.3.2 测量不确定度的评定

(1) 标准不确定度的 A 类评定 设对被测量的 X 进行 n 次独立重复观测,观测值为 x_i ($i=1, 2, \cdots, n$)。算术平均值 $\bar{x}$ 为

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (0-5)$$

通常以平均值 $\bar{x}$ 作为被测量的估计值（即测量结果），以平均值的实验标准差 $s(\bar{x})$ 作为测量结果的 A 类标准不确定度，则 A 类标准不确定度为

$$u_A(\bar{x}) = s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (0-6)$$

观测次数 n 充分多，才能使 A 类不确定度的评定可靠（ n 至少应大于等于 5）。

(2) 标准不确定度的 B 类评定 当被测量 X 的估计值 x 不是由重复观测得到，其 B 类标准不确定度 $u(x)$ [$u_B(\bar{x})$] 可用 x 的可能变化的有关信息或资料来评定，其方法如下。

① 已知扩展不确定度 U 和包含因子 k 。如估计值 x 来源于制造部门的说明书、校准证书、手册或其他资料，其中同时还明确给出了其扩展不确定度 $U(x)$ 和包含因子 k 的大小，则标准不确定度 $u(x)$ 为

$$u(x) = \frac{U(x)}{k} \quad (0-7)$$

如 x 的扩展不确定度不是按标准差的 k 倍给出，而是给出了置信概率 p 和置信区间的半宽 U_p ，一般应按正态分布考虑，评定其标准不确定度 $u(x)$ 为

$$u(x) = \frac{U_p}{k_p} \quad (0-8)$$

式中， k_p 为置信概率为 p 时的包含因子。正态分布的置信概率 p 与包含因子 k_p 存在如表 0-1 所示的关系。

表 0-1 正态分布情况下置信概率 p 与包含因子 k_p 间的关系

$p/\%$	50	68.27	90	95	95.45	99	99.73
k_p	0.67	1	1.645	1.960	2	2.576	3

② 其他几种常见的分布。除正态分布以外，其他常见的分布有均匀分布、三角分布、梯形分布等。如已知信息表明 X 之值 x 分散区间的半宽为 a ，且 x 落于 $x \pm a$ 区间的概率 p 为 100%。通过对其分布的估计可以得出标准不确定度 $u(x)$ 为

$$u(x) = \frac{a}{k} \quad (0-9)$$

因为 k 与分布状态有关，如表 0-2 所示为常见分布与 k 、 $u(x)$ 的关系。

表 0-2 常见分布与 k 、 $u(x)$ 的关系

分布类别	$p/\%$	k	$u(x)$
正态	99.73	3	$a/3$
三角	100	$\sqrt{6}$	$a/\sqrt{6}$
梯形 $\beta=0.71$	100	2	$a/2$
矩形(均匀)	100	$\sqrt{3}$	$a/\sqrt{3}$

表 0-2 中的 β 为梯形的上底与下底之比，对于梯形分布来说， $k = \sqrt{6/(1+\beta)^2}$ ，特别当 $\beta=0$ 时，变为三角分布；当 $\beta=1$ 时，变为矩形分布。在缺乏任何其他信息的情况下，一般估计为矩形分布是较合理的。

③ 以“级”使用仪器的不确定度计算。当测量仪器鉴定证书上给出准确度级别时，可

按该级别的最大允许误差进行评定。假定最大允许误差为 $\pm A$ ，一般采用均匀分布，得到示值允差引起的标准不确定度分量

$$u(x) = \frac{A}{\sqrt{3}} \quad (0-10)$$

对于数字显示式测量仪器，如其分辨率为 δx ，则由此带来的标准不确定度为

$$u(x) = 0.29\delta x$$

(3) 合成标准不确定度的评定 设间接被测量（也称为输出值） Y 的估计值为 y ，直接被测量（也称为输入值） X_i 的估计值为 x_i 通过函数关系 f 确定

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (0-11)$$

Y 的标准不确定度是由 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 的标准不确定度适当合成求得的，称为 y 的合成标准不确定度，记为 $u_c(y)$ ，它表征合理赋予被测量估计值 y 的分散性。

当全部输入量 X_i 是彼此独立或不相关时，合成标准不确定度 $u_c(y)$ 可由下面两式得出。

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)} \quad (0-12)$$

$$\frac{u_c(y)}{y} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \ln f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)} \quad (0-13)$$

式(0-12)适用于和差形式的函数，式(0-13)适用于积商形式的函数。式中，标准不确定度 $u(x_i)$ 既可以按A类或B类方法评定，也可以按二者的方和根法合成。此两公式也称为不确定度的传播公式。

0.3.3 测量不确定度的报告与表示

完整的测量结果含有两个基本量，一个是被测量 Y 的最佳估计值 y ，另一个是描述该测量结果分散性的量，即测量不确定度。一般以合成标准不确定度 $u_c(y)$ ，扩展不确定度 $U(y)$ 或它们的相对形式 $u_{rel}(y)$ 、 $U_{rel}(y)$ 给出。

(1) 当用合成标准不确定度报告测量结果的不确定度时，可用如下的形式。例如，标准砝码的质量为 m_s ，测量结果为100.02147g，合成标准不确定度 $u_c(m_s)$ 为0.35mg，则

$$m_s = (100.02147 \pm 0.00035) \text{g}$$

(2) 当用 U 或 U_p 报告测量扩展不确定度时，对 U 应给出 k 值。对 U_p 应明确 p 值。如 $U = k u_c(y)$ 的报告可表示如下，还以上例为例， $u_c(y) = 0.35 \text{mg}$ ，取包含因子 $k = 2$ ， $U = 2 \times 0.35 \text{mg} = 0.70 \text{mg}$ ，则

$$m_s = (100.02147 \pm 0.00070) \text{g}$$

应该注意，估计值 y 的数值和它的合成标准不确定度 $u_c(y)$ 或扩展不确定度 U 的数值都不应给出过多的位数，通常 $u_c(y)$ 和 U [以及输入估计量 x_i 的标准不确定度 $u(x_i)$]最多为两位有效数字。当采用同一测量单位来表述测量结果和其不确定度时，它们的末位应对齐的。

0.4 实验注意事项

(1) 实验前必须认真预习，写出预习报告，在预习报告上完成预习提示和要求中的思考

题，锻炼自己探究性学习的能力。

(2) 准时到实验室上课，做实验时态度要严肃认真，积极思考，并注意保持实验室安静、整洁。遇到仪器发生故障应及时报告指导老师。

(3) 操作仪器时必须按照实验步骤和注意事项进行。数据测量完毕，应交给指导老师检查，并由指导老师在原始数据记录上签字，方可整理仪器，离开实验室。

(4) 指导老师签字的原始数据记录纸不得丢失，如丢失则需补做该实验。

实验 1 全息照相及其应用

1.1 引言

早在 1948 年英国科学家伽博就提出了全息照相的原理，直到 20 世纪 60 年代初，相干性能极好的激光问世以后，全息照相才得以实现，全息照相迅猛发展起来，伽博也因此于 1971 年获得诺贝尔物理学奖。

全息技术是当代引人注目的新技术之一，它已成为近代光学领域里的一个重要分支。全息技术已广泛应用于信息存储、精密计量、无损检测等方面，并已渗透到军事、医学、商业、艺术等各领域，随着知识经济时代的到来，全息技术的应用前景将更加宽广。

1.2 预习提示和要求

- (1) 反射式全息图和透射式全息图的异同？
- (2) 全息干涉计量法摄得微小形变的原理是什么？
- (3) 白光再现全息图的光路如何安排？光源和底板有何不同？

1.3 实验目的

- (1) 了解全息照相的基本原理和特点。
- (2) 初步掌握拍摄全息图的必要条件和基本技术。
- (3) 学习白光再现和全息干涉计量的方法。

1.4 实验器材

减震全息台、氦氖激光器、曝光定时器及光快门、分束镜、扩束镜、反射镜、全息感光底板、被摄物、定影液及其他暗室冲洗设备。

1.5 实验原理

全息照相是以光的干涉为基础的。一个实际物体发射或反射的光波比较复杂，但是一般可以看成是许多不同频率的单色光波的叠加，可用波方程表示为

$$X = \sum_{i=1}^n A_i \cos\left(\omega_i t + \phi_i - \frac{2\pi r_i}{\lambda_i}\right)$$

此式所包含的振幅、频率和相位三大信息与一般物体的明暗、颜色和形状相对应。普通黑白照相只能记录物体的明暗即物光的强度，即使是彩色照相，也只比黑白照相多记录了物光的频率，只能是二维平面像，丧失了物体的三维特征。全息照相却不同，不仅记录了物体

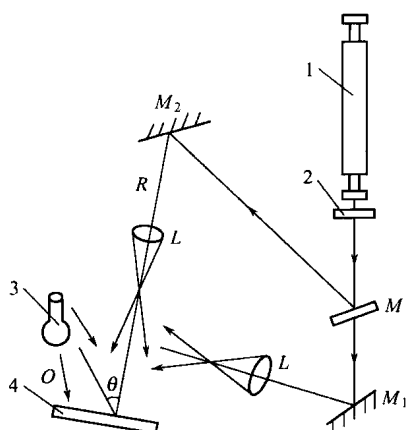


图 1-1 透射全息拍摄光路示意图

1—He-Ne 激光器；2—光开关；3—待摄物体；
4—感光底板；M—分束镜；M₁、M₂—反射镜；
L—扩束镜；O—物光；R—参考光

发出或反射的光波的强度，而且也记录了光波的相位。并且在同一条件下，能将所记录的物光波的全部信息完全再现出来，再现的物像是一个逼真的三维立体像。

全息照相包含两个过程：第一，利用光的干涉现象把物体光波的全部信息记录在感光材料上，称为记录（拍摄）过程；第二，利用相干光照射此感光材料再现原来物体的光波，称为再现过程。

下面就全息照相的两种形式即透射式和反射式分别叙述它们的记录与再现过程和原理。

1.5.1 透射全息图

在记录全息图时，物光和参考光位于全息感光底板的同一侧，再现像是由透过全息图的衍射光所形成的。这种全息图叫做透射全息图。

（1）透射全息图的记录 为了记录位相信息，

须应用光的干涉原理，具体的拍摄光路如图 1-1 所示。由激光管射出的激光束通过分束镜 M 分成两束，一束经 M ，反射改变方向，经扩束镜 L 扩束后均匀地照亮被摄物，并使被摄物表面漫反射的光波能射到感光底板上，这部分光称为物光（ O ）；另一束经 M_2 反射改变方向，再经 L 扩束后直接投射到感光底板上，这部分光称为参考光（ R ）。由于激光是相干性极好的单色光，所以，物光和参考光在感光底板上相遇时产生干涉，记录在感光底板上的的是复杂的干涉条纹，包含着物光的振幅和位相等全部信息，称它为全息图。

（2）透射全息地再现 图 1-2 是透射式全息照相的再现光路图。当一束与参考光的波长和传播方向完全相同的激光束照射此感光底板即全息照片时，将被照片上的干涉图样所衍射，即干涉图样类似一个反差不同、间距不等、弯弯曲曲的产生了畸变的“光栅”。经过再现光的照射，在照射光后面的透射光出现一系列零级、一级、二级等衍射光。零级光可看成是衰减后的入射光束，两列一级衍射光构成了物体的两个再现像。其正一级衍射光是发散光，与物体在原来位置时发出的光波完全一样，将形成一个虚像，与原物体完全对应，称为原始像。因此，朝原被摄物的方位观察时，可看到一个完全逼真的三维立体图像。其负一级衍射光是会聚光，将形成一个共轭实像。

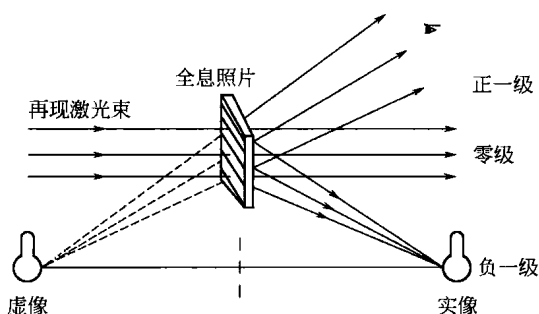


图 1-2 透射全息再现光路示意图

1.5.2 反射全息图

在记录全息图时，物光与参考光分居在全息感光底板的两侧，再现像是由照明全息图的反射光形成的，这种全息图叫做反射全息图。

（1）反射全息图的纪录 图 1-3 中， A 、 B 为两相干点光源， A 为参考点光源。二者在感光底板 H 上相遇产生干涉，物光的全部信息被记录在感光底板的乳胶层的干涉图样上。

（2）反射全息图的再现 如图 1-4（a）所示，当用与参考光同方向的再现光照射全息图时，记录在乳胶层中的干涉图样类似于一个反射“光栅”，被反射的光的延长线正好交于物

点 B ，这就是物的再现虚像。而当再现光与参考光的方向相反时，由乳胶层反射的光便会交于 B 点，这就是再现实像，如图 1-4 (b) 所示。

(3) 白光的反射全息图 又称为白光再现全息图。这种全息图在记录时用的是相干光，但可在普通白光照明下再现，所以得到普及推广。它的实际拍摄光路如图 1-5 所示。激光经透镜 L 扩束后入射到感光底板乳胶层后面的物体上，这就是参考光。由物体反射的光为物光。参考光和物光在乳胶层相干涉，物光的全部信息便被记录下来。

当白光为再现光以某一角度从与参考光相同的方向入射全息图时，如图 1-6 (a) 所示，根据布拉格条件，只有波长 $\lambda = 2d \cos i$ 的光才有衍射极大值。此反射光的反向延长线会交的位置就是再现虚像的位置，可知此像一定是单色像，随 i 的增大，反射光的波长变短。当再现白光从与参考光相反的方向入射全息图时，反射光即形成单色实像，如图 1-6 (b) 所示。

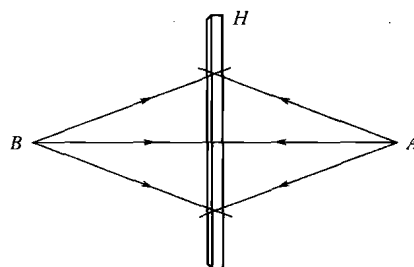


图 1-3 记录反射全息示意图

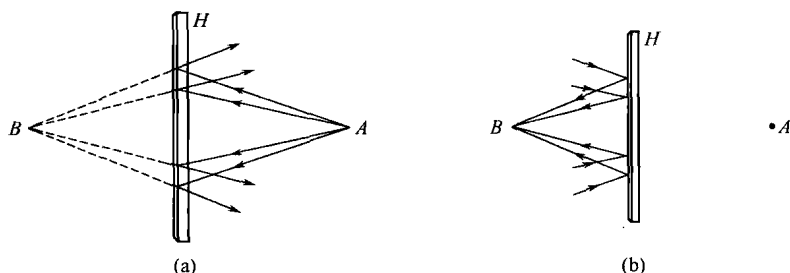


图 1-4 反射全息的再现

白光再现全息图，不仅能拍摄在全息感光底板上，而且还能用模压的方式大量复制，这就为其应用开辟了广阔前景。

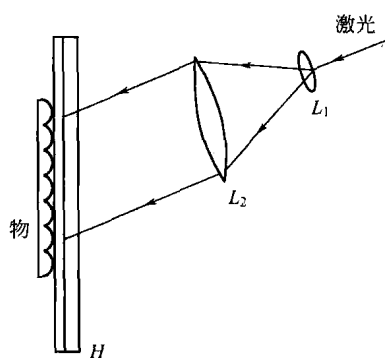


图 1-5 白光全息拍摄示意图

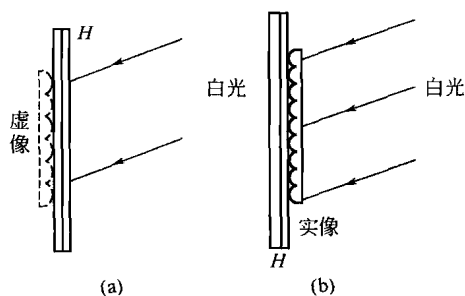


图 1-6 白光全息再现光路示意图

1.5.3 全息干涉计量——测物体的微小变化

利用全息技术测量物体微小形变是全息照相的应用之一。自从光的波动性被普遍接受以来，干涉计量技术可用来精确测量工件表面平整度、粗糙度、微小角度等，但它只能适用于形状较简单并高度抛光的表面。全息干涉计量技术能够对粗糙表面的三维形变进行测量，常用的方法是二次曝光法。

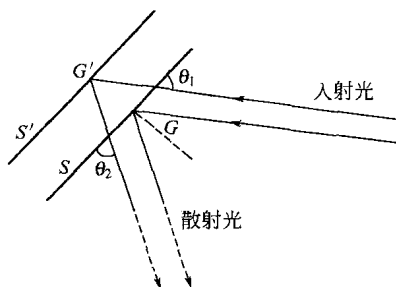


图 1-7 全息干涉计量光路图

全息照相的特点之一即对同一张感光底板可进行多次曝光记录而不会发生重叠,并可无干扰地再现。二次曝光法就是在同一感光片上记录物体表面形变前后的两个全息图。用再现光照射,在看到原始像的同时,还会在像的表面看到由于物体的微小形变而产生的干涉条纹。根据此干涉条纹可定量计算微小形变。

如图 1-7 所示,设物体形变前后的两个表面为 S 和 S' ,入射光与 S 表面的夹角为 θ_1 ,散射光与 S' 面的夹角为 θ_2 。 G 和 G' 为对应点,形变后所产生的位移

$|GG'| = d$ 。因为位移很小,可忽略,认为 G 与 G' 点处平行。图 1-7 中的散射光有光程差

$$\delta = d(\sin\theta_1 + \sin\theta_2) \quad (1-1)$$

$$\begin{cases} \delta = m\lambda & \text{明纹, } m=1,2,\dots \\ \delta = (m + \frac{1}{2})\lambda & \text{暗纹, } m=0,1,2,\dots \end{cases}$$

如果知道物体上任一位置相应的条纹级次 m ,即可由上式得出该位置对应的位移量 d 。式中 θ_1 和 θ_2 通过目测可估算(入射光波长 $\lambda = 6328\text{\AA}$ ^①)。

实验中待测的形变物体是耳机的圆形膜片,形变是由于加上直流电压造成的。由于膜片周围固定不变, $\delta=0$,故此处为零级条纹。由于膜片的形变是圆对称的,所以观察到的干涉条纹与牛顿环类似。

1.5.4 全息照相的工作条件

(1) 对于全息照相的光学系统要求有特别高的机械稳定性 如果物光和参考光的光程稍有不规则的变化,就会使干涉图像模糊不清。即使像地面震动而引起工作台面的震动,光学元件及感光底板和物体夹的不牢固而引起抖动,强烈声波而引起空气密度的变化等,都会引起干涉条纹的不规则飘移而使图像模糊。因此,拍摄系统必须要装在具有防震装置的平台上,系统中光学元件和各种支架都要用磁钢牢固地吸在钢板上。在曝光过程中人们不要走动,不要高声说话,以保证干涉条纹无漂移。

(2) 要有好的相干光源 一般实验中采用氦氖激光器作为光源。同时物光和参考光的光程差要符合相干条件。一般常使两者光程差大致相等,可用米尺测量。

(3) 全息照相要求的感光底板的分辨率比普通感光底板要高很多 除了要按照实验室提供的曝光时间和显影时间操作外,物光和参考光的光强比例要合适,一般以 1:4 到 1:10 为宜;两者间的夹角以 $30^\circ \sim 40^\circ$ 为合适。因为夹角越大,干涉条纹间距越小,条纹越密,对感光材料分辨率的要求也越高。

1.6 实验内容

1.6.1 透射全息图的拍摄

(1) 光路的调整 按图 1-1 摆放各元器件,并作如下调整(切记调节过程中严禁触及防震台):①使物光和参考光的光程大致相等(用米尺量);②目测各元件等高共轴;③使参考

① $1\text{\AA} = 10^{-10}\text{m}$ 。