

# 近代物理 实验教程

羊 亿 彭跃华 主编



上海交通大学出版社  
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

湖南师范大学出版基金资助



上海交通大学出版社  
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

## 内容提要

本教程依据近代物理实验教学大纲的规划,对实验室所开设的近代物理实验项目做了相应的调整与组合,在综合性、设计性、研究性方面有所侧重,一改以往的实验教学中由教师言传身教的模式,而采取以学生为主导的模式。所有实验环节全部由学生负责,在实验过程中出现的问题尽量由学生自己分析解决,以激发学生动手参与实验研究的兴趣,并锻炼学生的动手能力。

本教程可供高等学校物理专业本科生和研究生使用。

## 图书在版编目(CIP)数据

近代物理实验教程 / 羊亿,彭跃华主编. —上海:  
上海交通大学出版社, 2017  
ISBN 978-7-313-16134-5

I. ①近… II. ①羊… ②彭… III. ①物理学—实验  
—高等学校—教材 IV. ①041-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 268158 号

## 近代物理实验教程

主 编: 羊 亿 彭跃华

出版发行: 上海交通大学出版社

邮政编码: 200030

出 版 人: 郑益慧

印 制: 当纳利(上海)信息技术有限公司

开 本: 710 mm×1000 mm 1/16

字 数: 216 千字

版 次: 2017 年 2 月第 1 版

书 号: ISBN 978-7-313-16134-5/O

定 价: 38.00 元

地 址: 上海市番禺路 951 号

电 话: 021-64071208

经 销: 全国新华书店

印 张: 14.75

印 次: 2017 年 2 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 021-31011198

# 前 言

近代物理实验作为物理专业本科生必修、研究生选修的专业课程,一方面介绍一些对物理学各领域发展起举足轻重作用的著名经典实验,另一方面介绍各种新技术及其在各学科领域中的应用。因此本书内容涉及物理、材料、化学、生物、电子及计算机技术等学科,具有很强的知识性、技术性和综合性,可以丰富和活跃学生的物理思想,培养学生敏锐的观察、分析、归纳和综合能力。

根据学科发展和现代科技对人才素养的要求,近代物理实验一方面需要丰富和拓展实验内容;另一方面需要不断探索实验教学的改革创新,结合实验教师科研课题有目的地开设一些开放型、研究型实验,培养学生创新意识和综合素质,使他们具备良好的科研素养、严谨的科学作风、求实的科学精神,并具备一定的独立工作与科学研究能力。

本教程依据近代物理实验教学大纲的规划,在参考吸收其他院校经验的基础上,对实验室所开设的近代物理实验项目作了相应的调整与组合,在综合性、设计性、研究性方面有所侧重,一改以往的实验教学中由教师言传身教的模式,采取以学生为主导的模式,学生根据教程上该实验项目列出的参考文献与实验指导先行查阅文献资料与实验指导,做到对该实验有一定的了解;在实验开始之前由指导老师与学生共同探讨预习中出现的问题,由学生给出实验方案,实验室提供相应的实验设备与设备使用说明书。所有实验环节全部由学生负责,在实验过程中出现的问题尽量由学生自己分析解决,包括部分设备故障的排除与维修、方案的修正、对实验原理的验证以及相应问题的提出。

近代物理实验课程中综合性、设计性、研究性实验的提出,极大地激发了

学生动手参与实验研究的兴趣,也锻炼了学生的动手能力。本教程共改编了17个实验项目,在近几年的教学实践中,反映良好。

本教程中实验一、实验六、实验七、实验九、实验十、实验十一与实验十七由羊亿编写,实验二、实验三、实验四、实验五、实验八、实验十二、实验十三、实验十四、实验十五、实验十六由彭跃华编写。

本教程在编写过程中,参考了诸多院校所编的实验教材及仪器生产厂家的说明书,在此深表谢意。本教程的出版得到了湖南师范大学出版基金及湖南省基础课示范实验室建设经费的资助,在此一并表示感谢!

由于编者水平有限,书中存在的缺点与错误,敬请读者批评指正。

# 目 录

实 验 一	电荷耦合器件的基本工作原理及其应用 .....	1
实 验 二	X 射线在晶体中的衍射 .....	18
实 验 三	电子衍射实验 .....	33
实 验 四	光泵磁共振 .....	50
实 验 五	光谱感光板的特性曲线 .....	67
实 验 六	霍尔传感器实验 .....	80
实 验 七	激光椭圆偏振仪测薄膜厚度及折射率 .....	90
实 验 八	塞曼效应 .....	103
实 验 九	扫描隧道显微镜实验 .....	115
实 验 十	声光效应 .....	135
实验十一	真空态的获得与测量及真空镀膜 .....	152
实验十二	用油滴仪测电子电荷 .....	167
实验十三	夫兰克-赫兹实验 .....	177
实验十四	激光拉曼光谱 .....	187
实验十五	阿贝成像原理和空间滤波 .....	202
实验十六	微波电子顺磁共振 .....	209
实验十七	四探针法测半导体薄膜面电阻 .....	220

# 实验一

## 电荷耦合器件的基本 工作原理及其应用

### 一、实验课题意义及要求

电荷耦合器件(CCD)线阵光电传感器具有灵敏度高、性能稳定、抗干扰能力强、便于计算机处理等特点,在工业生产中广泛应用于各类产品的尺寸检测控制,如管线、轧制材料、光/电缆、机械零件等。

了解 CCD 的基本工作原理;掌握 CCD 的应用之一:实时在线、非接触高精度测量方法应用之二:单缝衍射光谱图形与光强分布的分析;了解利用计算机采集 CCD 数据的方法,并利用分析软件对所获的数据进行分析处理。

### 二、参考文献

[1] 张晓华,张认成,等. CCD 的应用现状及其发展前景[J]. 仪器仪表用户,2005,12(5): 7-9.

[2] 范子坤. CCD 图像传感器及其最新进展[J]. 系统工程与电子技术,1989(11): 34-38.

[3] 武利翻. CCD 制造的关键工艺[J]. 光电技术应用,2005,20(1): 38-42.

[4] 薛实福. 薄膜厚度测量系统[J]. 电子工业专用设备,1994,23(1): 29-33.

[5] 青莉,高晓蓉. 线阵 CCD 摄像技术在接触导线磨损检测中的应用[J]. 机车车辆工艺,2005(4): 30-32.

[6] 刘晓昌. 线阵 CCD 高精度检测技术[J]. 仪表技术与传感器,

1993(3): 6 - 8.

[7] 钱思明. 动态线材直径 CCD 测量仪[J]. 仪表技术与传感器, 1995(3): 17 - 18.

### 三、提供的仪器与材料

DM99CCD 测径实验仪, LM99PC 型 CCD 微机多道光强分布测量系统, 计算机, 螺旋测微计, 标准物, 待测物。

### 四、开题报告及预习

1. 什么是电荷耦合器件, 在日常生活中有没有该类产品的存在?
2. 势阱产生的过程。
3. 结合日常使用相关产品的经验理解电子溢出的过程。
4. 线阵或面阵 CCD 中电荷究竟如何转移。
5. 什么是一次定标、二次定标与分段二次定标?
6. 如何获得精确的物体边界, 包括幅度切割法、像元细分以及梯度法。
7. 考虑光强能否影响物体边界的提取, 为什么?
8. 考虑影响单缝衍射图样对称性的因素, 以及如何观察和利用不对称的衍射图样去调整光路。

### 五、实验课题内容及要求

1. 熟悉掌握 CCD 的基本工作原理。
2. 用 DM99 型 CCD 测径实验仪准确测量多个物体的直径。
  - (1) 正确连线, 仔细调节仪器, 熟悉 CCDDIA 软件操作, 使在软件主界面有待测物体直径的下凹区域。
  - (2) 以二次定标法(任选幅度切割法或梯度法)对两个直径为  $L_1$  和  $L_2$  的标准物定标, 求出  $K$  值和  $b$  值(系统误差), 然后测量待测物直径  $L_x$ , 测 5 次求平均值。
  - (3) 采用分段二次定标法, 求出各段(0.8~1.2, 1.2~1.5, 1.5~2.0 mm)的  $K$  和  $b$ , 然后测量待测物直径  $L_x$ , 测 5 次求平均值。作出误差分



布曲线,观察多种平滑处理方式对测量显示值的影响。

(4) 在幅度切割法边界提取方式时,平行光光强  $I$  变化对测量结果有一定的影响。光强可用 A/D 变换后某个 CCD 像元的幅值表示,单位为 V。要求改变光强  $I$ ,在不同光强下测量直径  $L$ ,给出  $I-L$  关系曲线。

3. 用 LM99PC 型 CCD 多道光强分布测量系统测量单缝夫琅禾费衍射。

(1) 正确连线,调整光路,尽可能将激光器、减光器、缝、CCD 光强仪调整为等高共轴,并尽可能满足夫琅禾费衍射条件,熟悉 CCDWIN5.0 版软件操作。

(2) 测量 0 级、 $\pm 1$  级和  $\pm 2$  级衍射亮纹和暗纹的  $X(\text{ch})$  值、 $Y(\text{A/D})$  值(在局部视窗中)以及光栅片到 CCD 光敏元面的水平距离。

## 六、实验结题报告及论文

1. 报告实验课题研究目的。
2. 介绍实验基本原理和实验方法。
3. 介绍实验所用仪器装置及其操作步骤。
4. 对实验数据按照课题内容与要求进行处理和计算。

(1) 计算二次定标和分段二次定标法所得的  $K, b$  值以及待测物体直径  $L_x$ 。

(2) 作出光强  $I$  与所测直径  $L$  的关系曲线。

(3) 在单缝衍射中,计算 0 级和  $\pm 1$  级衍射亮纹和暗纹的衍射角  $\theta$  以及相对光强  $I/I_0$ ,并与理论值比较,计算并分析误差。

5. 报告通过本实验所得收获并提出自己的意见。

# 实验指导

## 一、实验原理

### 1. 电荷耦合器件的基本原理

电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)主要功能是把光学图像转换为电信号。了解其基本原理主要是了解信号电荷的产生、存储、传输与检

测。CCD有两种基本类型,一是电荷包存储在半导体与绝缘层之间的界面并沿界面传输,这类器件称为表面沟道 CCD,简称 SCCD;二是电荷包存储在离半导体表面一定深度的体内,并在半导体体内沿一定方向传输,这类器件称为体沟道或埋沟道器件,简称 BCCD。

下面以 SCCD 为例来说明 CCD 工作原理。

### 1) 电荷存储

对于 SCCD,构成 CCD 的基本单元是 MOS(金属—氧化物—半导体)结构,如图 1(a)所示,在栅极施加正偏压  $U_G$  之前 p 型半导体中空穴(多数载流子)的分布是均匀的,当栅极施加正偏压  $U_G$ (此时  $U_G$  小于 p 型半导体的阈值电压  $U_{th}$ )后,空穴被排斥,产生耗尽区。如图 1(b)所示,偏压继续增加,耗尽区将进一步向半导体内延伸,当  $U_G > U_{th}$  时,半导体与绝缘体界面上的电势(常称为表面势)用  $\Phi_s$  表示,变得如此之高,以至于将半导体内的电子(少数载流子)吸引到表面形成一层极薄的约  $10^{-2} \mu\text{m}$ ,但电荷浓度很高的反型层,如图 1(c)所示。反型层电荷的存在表明了 MOS 结构存储电荷的功能。

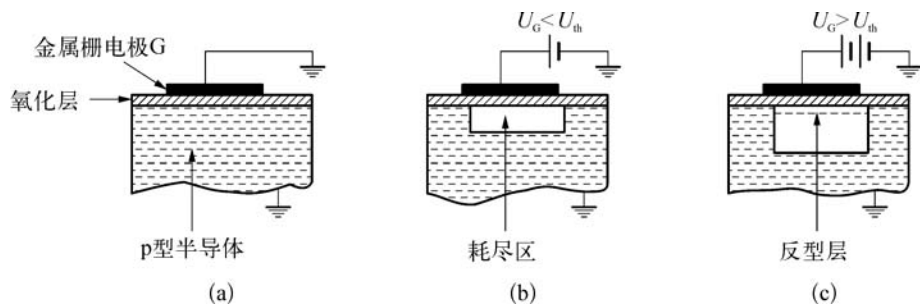


图 1 CCD 栅极电压变化对耗尽区的影响

然而,当栅极电压由零突变到高于阈值电压时,轻掺杂半导体中的少数载流子很少,不能立即建立反型层,在不存在反型层的情况下,耗尽区将进一步向体内延伸,而且栅极和衬底之间的绝大部分电压降落在耗尽区上,表面势与栅极电压为近似的正比关系,因此  $U_G$  越大,势阱越深,如图 2(a)所示。由于表面势与反型层电荷密度成反比,如果随后可以获得信号电荷(少数载流子)时,它们便聚集在界面,使电荷密度上升,那么耗尽区将收缩,反型层变薄,表面势下降,可称为势阱的填充,如图 2(b)所示。当反型层电荷足够多,

使势阱被填满时,此时表面势不再束缚多余的电子,电子将产生“溢出”现象。这样,表面势可作为势阱深度的度量。

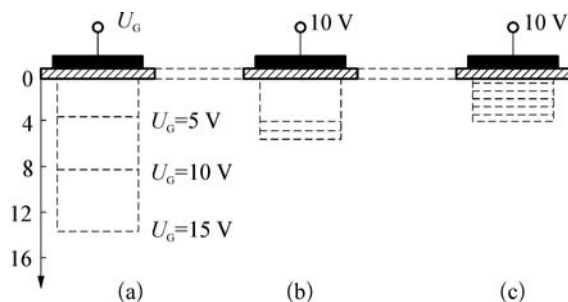


图2 势阱

## 2) 电荷转移

观察图3 CCD中4个彼此靠得很近的电极将有助于理解CCD中势阱及电荷如何从一个位置迁移到另一个位置。假定开始时有一些电荷存储在偏压为10 V的第一个电极下面的深势阱里,其他电极上均加有较低电压,例如2 V,设图3(a)为零时刻,初始时刻经过 $t_1$ 时刻后各电极上的电压变为图3(b)所示,第一个电极仍保持为10 V,第二个电极上的电压由2 V变为10 V,因为这两个电极靠得很紧,间隔只有几微米,他们各自的对应势阱将合并在一起。原来在第一个电极下的电荷变为这两个电极下势阱所共有,如图3(b)和(c)所示。若此后电极上的电压变为图3(d)所示,第一个电极电压由10 V变为2 V,第二个电极电压仍为10 V,则共有的电荷转移到第二个电极下面的势阱中,如图3(e)所示。由此可见,深势阱及电荷包向右移动了一个位置。通过将一定规则变化的电压加到CCD各电极上,电极下的电荷包就能沿半导体表面按一定方向移动。通常把CCD电极分为几组,每一组称为一相,并施加同样的时钟脉冲,CCD的内部结构决定了使其正常工作所需要的相数。图3所示的结构需要三相时钟脉冲,其波形图如图3(f)所示。这样的CCD称为三相CCD。

三相CCD的电荷耦合传输方式必须在三相交叠脉冲的作用下,才能以一定的方向逐单元地转移。

另外,必须强调指出CCD电极间隙必须很小,电荷才能不受阻碍地从一

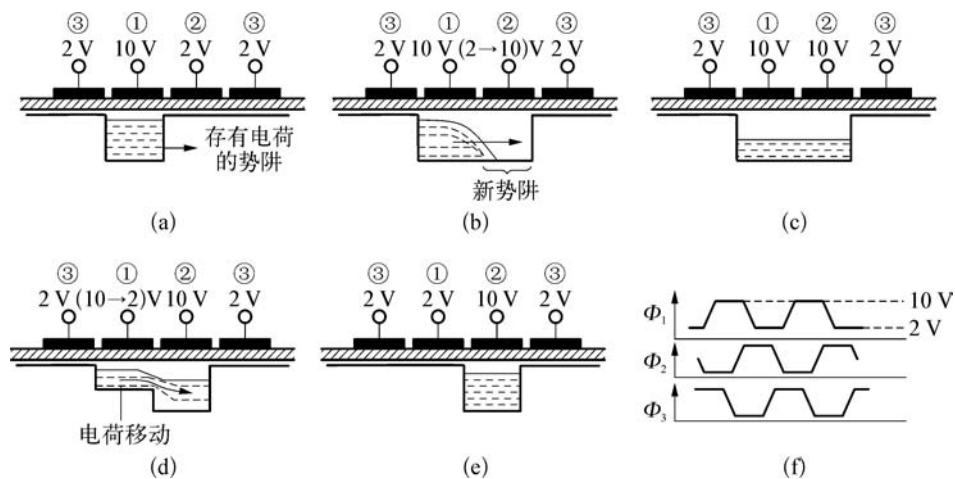


图3 三相 CCD 中电荷转移过程

个电极下转移到相邻电极下。这对图3所示的电极结构是一个关键问题,如果电极间隙比较大,两相邻电极间的势阱将被势垒隔开,不能合并,电荷也不能从一个电极向另一个电极完全转移,CCD便不能在外部脉冲作用下正常工作。能够产生完全耦合条件的最大间隙一般由具体电极结构、表面态密度等因素决定。理论计算和实验证实,为了不使电极间隙下方界面处出现阻碍电荷转移的势垒,间隙的长度应小于 $3\mu\text{m}$ ,这大致是同样条件下半导体表面深耗尽区宽度的尺寸,当然如果氧化层厚度、表面态密度不同,结果也会不同,但对绝大多数 CCD, $1\mu\text{m}$ 的间隙长度是足够小的。

以电子为信号的 CCD 称为 n 型沟道 CCD, 简称为 n 型 CCD。而以空穴为信号电荷的 CCD 称为 p 型沟道 CCD, 简称为 p 型 CCD。由于电子的迁移率(单位场强下的运动速度)远大于空穴的迁移率,因此 n 型 CCD 比 p 型 CCD 的工作频率高得多。

### 3) 电荷的注入

在 CCD 中电荷注入的方法有很多,归纳起来可分为光注入和电注入两类。在 CCD 实时在线非接触式线径测量系统中使用的电荷注入方式是光注入。当光照射到 CCD 硅片上时,在栅极附近的半导体体内产生电子-空穴,对其多数载流子被栅极电压排开,少数载流子则被收集在势阱中形成信号电

荷。光注入后,势阱中光生信号电荷( $Q$ )可表示为

$$Q = \eta q \Delta n_{\text{eo}} A T_{\text{C}} \quad (1)$$

式中, $\eta$ 为材料的量子效率, $q$ 为电子电荷量, $\Delta n_{\text{eo}}$ 为入射光的光子流速率, $A$ 为光敏单元的受光面积, $T_{\text{C}}$ 为光注入时间。

由式(1)可以看出,当 CCD 确定以后, $q$ 及 $A$ 均为常数,注入到势阱中的信号电荷 $Q$ 与入射光子流速率 $\Delta n_{\text{eo}}$ 及注入时间 $T_{\text{C}}$ 成正比。注入时间 $T_{\text{C}}$ 由 CCD 驱动器的转移脉冲的周期 $T_{\text{SH}}$ 决定。当所设计的驱动器能够保证其注入时间稳定不变时,注入到 CCD 势阱中的信号电荷只与入射光辐射光子流速率 $\Delta n_{\text{eo}}$ 成正比。若光源为单色光,则注入的信号电荷量 $Q$ 与单色光源的光谱辐射通量成线性关系。该线性关系就是应用 CCD 器件检测光谱强度和进行多通道光谱分析的理论基础。

## 2. CCD 器件应用之一:一维尺寸的测量

CCD 器件用于尺寸测量是一种非常有效的非接触测量技术。具有灵敏度高、动态范围大、性能稳定、工作可靠、几何失真小、抗干扰能力强、便于计算机处理等优点,在工业生产中得到了广泛应用,诸如冶金部门中各种管、线、带材轧制过程中的尺寸测量,光纤及纤维制造中丝径尺寸测量、控制机械产品尺寸测量、分类等。下面讨论几种尺寸测量方法的原理。

### 1) 平行光投影法

当一束平行光透过待测目标投射到 CCD 器件上时,由于目标的存在,目标的阴影将同时投射到 CCD 器件上,在 CCD 器件输出信号上形成一个凹陷,如图 4 所示。

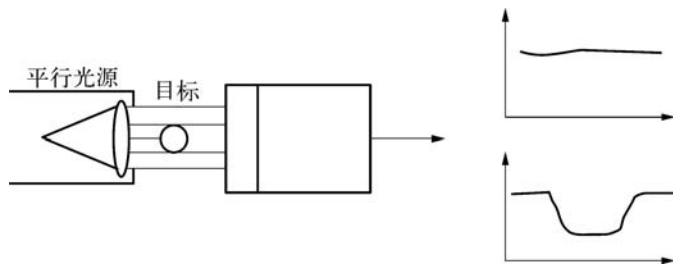


图 4 平行光投影及输出信号波形

如果平行光准直度很理想,阴影的尺寸就代表了待测目标尺寸,只要统计出阴影部分的 CCD 像元个数,像元个数与像元尺寸的乘积就代表了目标的尺寸。

测量精度取决于平行光的准直程度和 CCD 像元尺寸的大小。对 DM99 测径实验仪使用的 5 430 位像元 CCD 器件,像元之间的中心距为  $7\ \mu\text{m}$ ,像元尺寸也为  $7\ \mu\text{m}$ 。平行光源要做得十分理想受成本、体积等方面的限制,在实际应用中常通过计算机处理,对测量值进行修正,以提高测量精度。

### 2) 光学成像法

被测物经透镜在 CCD 上成像,像尺寸将与被测物尺寸成一定的比例。设  $T$  为像尺寸, $K$  为比例系数,则被测物的尺寸  $S$  可由  $S = KT$  来表示, $K$  表示每个像元所代表的物方尺寸的当量,它与光学系统的放大倍率、CCD 像元尺寸等因素有关。 $T$  对应于像尺寸所占的像元数与像元尺寸的乘积。如图 5 所示。

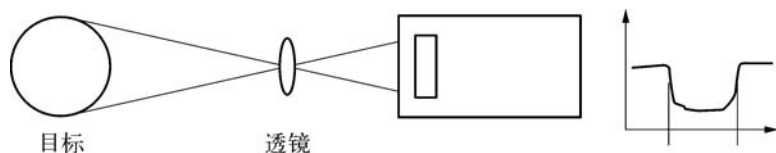


图 5 成像法测径及信号波形

对于一个已选定的 CCD 器件,可以采用不同的光学成像系统来达到测量不同尺寸的目的,如用照相物镜来测较大物体尺寸(像是缩小的);用显微物镜来测细小物体尺寸(像是放大的)。

光学系统担负着传递目标光学信息的作用,对 CCD 成像质量有着十分重要的意义。在高精度测量中,要求光学系统的相对几何畸变小于  $0.03\%$ ,这种大像场、高精度要求是一般工业摄像系统达不到的。所以一个高精度的线阵 CCD 摄像系统,必须配置一个专用的大像场和小畸变的光学系统。

DM99 测径实验仪使用的是一个普通的显微物镜,存在着一定的几何失真。所以测量时必须分段进行修正。

### 3) 测量系统参数标定

当系统的工作距离确定了之后,为了从目标像所占有的像元数  $N$  来确

定目标的实际尺寸,需要事先对系统进行标定。标定的方法是:先把一个已知尺寸为  $L_p$  的标准模块放在被测目标位置,然后通过计数脉冲,得到该模块的像所占有的 CCD 像元数  $N_p$ ,从  $K = L_p/N_p$  可以得到系统的脉冲当量值,  $K$  值表示一个像元实际所对应的目标空间尺寸的当量。然后再把被测目标  $L_x$  置于该位置,测出对应的脉冲计数  $N_x$ ,由  $L_x = KN_x$  可以算出  $L_x$  值。这就是一次定标。

通常可以把  $K$  值存入计算机中,在对目标进行连续测量时,可以通过软件计算出目标的实际尺寸。这种标定方法简单,但测量精度不高,因为还存在着系统误差的影响。

为了在实测值中去掉系统误差,可以采用二次标定法来确定系统的显示数当量值  $K$ 。实验表明,被测物体的实际尺寸  $L_x$  和对应像元脉冲数  $N_x$  之间有  $L_x = KN_x + b$ ,  $b$  就是测量值中的系统误差,通过两次标定就可以确定  $K, b$  值。其方法是:先在被测位置上放置一已知尺寸为  $L_1$  的标准块,通过计数电路得到相应的脉冲数  $N_1$ ,然后再换上另一个已知尺寸为  $L_2$  的标准块,再得到对应的计数脉冲  $N_2$ ,将  $L_1, L_2, N_1, N_2$  代入  $L_x = KN_x + b$  可以算得

$$\begin{aligned} K &= (L_2 - L_1)/(N_2 - N_1) \\ b &= L_1 - KN_1 \end{aligned} \quad (2)$$

显然,  $b$  值代表实际值与测量值之差,这是由系统产生的测量误差。

采用二次标定法所得到的  $K$  值和  $b$  值,消除了系统误差对测量精度的影响,因而普遍适用于一般工业测量系统。对于在线动态尺寸测量,还需要根据实际状态采用计算机校正方法来提高测量精度。

在实际应用中,往往采用分段二次标定方法,将一个测量范围分成若干段,对每一个小段用标准块进行标定,分段越多,标定越精确。用标定值对测量值进行修正,大大提高了测量精度,同时也降低了对光学系统的要求。

#### 4) 物体边界提取

##### (1) 幅度切割法。

在光电图像测量中,为了实现被测目标尺寸量的精确测量,首先应解决的问题是物体边界信号的提取和处理。从图像信号中提取边界信号最常用

的方法是二值化电平切割法,利用目标和背景的亮度差别,用电压比较器对图像信号限幅切割,加大信号电压与背景电压的“反差”,使对应于目标和背景的信号具有“0”,“1”特征的信号,然后交与计算机处理。也可以用软件方法实现这一功能,将每个像元信号先经过 A/D 转换成数字化的灰度等级,确定一个数字化的阈值,高于阈值部分输出高电平,低于阈值部分输出低电平,达到了物体边界提取的目的。

二值化处理的重要问题是阈值如何确定。由于衍射、噪声、环境杂光等影响,CCD 输出的边界信号存在一个过渡区,如何选取阈值是影响测量精度的重要因素,并且,阈值的选取应随环境光和光源的变化而变化。因此,这种方法对环境和光源的稳定性有较高的要求,实际使用上有一定的局限性。但是如果设计得好,可以利用“像元细分”技术来大大提高仪器的分辨率。

## (2) 像元细分。

每一种 CCD 器件的光敏元尺寸大小和相邻两像元间的尺寸(空间分辨率)是一定的,DM99 测径仪上所用 CCD 的空间分辨为  $7\ \mu\text{m}$ ,如不采取其他措施,则测径精度只能为  $7\ \mu\text{m}$ ,不能再高了。在 CCD 前加一个光学系



图 6 像元细分

统,就能改变测径仪的分辨率。同样,在 CCD 后,通过一个“像元细分”(线性内插)电路,也能提高测径仪的分辨率,其原理与做法如图 6 所示。

一条阈值线与“浴盆”状波形梯形前沿和后沿相交于  $M_1$  和  $M_2$  点,一般来说  $M_1$  ( $M_2$ ) 点数据(即阈值)落在两相邻单元数据之间,而不会与哪一个单元数据完全相等,这就是说  $M_1$  ( $M_2$ ) 点所对应的地址号不是一个整数。采用下式可求出  $M_1$  点所对应的单丝影像在 RAM 中的起始地址(地址号带小数):

$$ADD(M_1) = A_1 - (V_S - V_{21}) / (V_{11} - V_{21}) \quad (3)$$

式中,  $A_1$  为邻近  $M_1$  点下一个单元地址,  $V_{21}$  为该单元的值,  $V_{11}$  为邻近  $M_1$  点前一个单元 ( $A_1 - 1$ ) 的值,  $V_S$  为阈值电平。同理,单丝影像结束地址为



$$ADD(M_2) = A_2 - (V_{12} - V_S)/(V_{12} - V_{22}) \quad (4)$$

式中,  $A_2$  为邻近  $M_2$  点下一个单元地址,  $V_{12}$  为该单元的值,  $V_{22}$  为邻近  $M_2$  点前一个单元( $A_2-1$ )的值。采用像元细分技术, 可以达到若干分之一的像元分辨率。

### (3) 梯度法。

CCD 输出的目标边界信号是一种混有噪声的类似斜坡的曲线, 由于边缘和噪声在空间域上都表现为灰度较大的起落, 即在频率域中都为高频分量, 给实际边缘的定位带来了困难。利用计算机的强大运算能力, 先对 CCD 输出的经 A/D 转换后的数字化的灰度信号进行搜索, 找出斜坡段, 然后对斜坡段数据作平滑处理, 再对处理后的数据求梯度, 找出图像斜坡上梯度值最大点的位置, 该点的位置就定为边缘点的位置(见图 7)。利用该方法可以将边缘精确地定位在 CCD 的一个像元上, 并有较强的抗干扰能力。

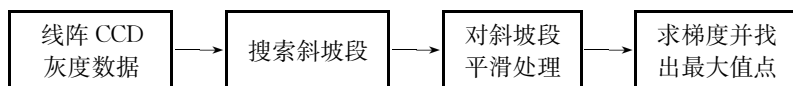


图 7 梯度法算法原理

### 3. CCD 器件的应用之二: 光谱图形和光强分布的测量

由于 CCD 器件光谱响应范围广, 灵敏度高, 因此对于光谱图形、干涉、衍射花样的光强分布测量, 以 CCD 器件为核心构成的各种光学测量仪器完全可以取代照相干版法和测量望远镜或丝杠带动光电池。本实验中仅分析用 CCD 器件完成光的单缝衍射实验原理。

光的衍射现象是光的波动性的一种表现, 可分为菲涅耳衍射与夫琅禾费衍射两类。菲涅耳衍射是近场衍射, 夫琅禾费衍射是远场衍射, 又称平行光衍射(见图 8)。将单色点光源放置在透镜 L1 的前焦面, 经透镜后的光束成为平行光垂直照射在单缝 AB 上, 按惠更斯——菲涅耳原理, 位于狭缝的波阵面上的每一点都可以看成一个新的子波源, 他们向各个方向发射球面子波, 这些子波相叠加经透镜 L2 会聚后, 在 L2 的后焦面上形成明暗相间的衍射条纹, 其光强分布规律为