



南京工业大学
NANJING TECH
UNIVERSITY

光电信息科学与工程

第9章 现代光电检测技术与系统

9.1 光谱仪器

9.1.1 单色光的产生

色仪用来将具有宽谱段辐射的光源分成一系列谱线很窄的单色光，因而它既可作为一个可调波长的单色光源，也可作为分光器；

按其作用原理可分为：物质色散、多缝衍射、滤光片

单色仪的主要性能指标有：色散率和光谱分辨率

1. 色散率

色散率表明从色散系统中射出的不同波长的光线在空间彼此分开的程度（角色散率），或者汇聚到焦平面上时彼此分开的距离（线色散率）。

2. 光谱分辨率

分辨率是表明单色仪分开波长极为接近的两条谱线的能力。

理论分辨率等于角色散率与有效孔径在色散平面内宽度的乘积。

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = D' \frac{d\theta}{d\lambda}$$

9.1.2 光谱仪器的分类

根据光谱仪器所采用的分解光谱的工作原理，它可以分成两大类：经典光谱仪器和新型光谱仪器。

根据接收和记录光谱的方法不同，光谱仪器可分为：看谱仪、摄谱仪、光电光谱仪。

根据光谱仪器所能正常工作的光谱范围，光谱仪器可分为：真空紫外(即远紫外)光谱仪、紫外光谱仪、可见光光谱仪、近红外光谱仪、红外光谱仪、远红外光谱仪。

根据仪器的功能及结构特点，光谱仪器也可以分为：单色仪、发射光谱仪、吸收光谱仪器、荧光光谱仪器、调制光谱仪、其他光谱仪器（如激光喇曼光谱仪、光声光谱仪、成像光谱仪、多光谱扫描仪等）。

9.1.3 分光光度计

分光光度计主要用于测量物质的光谱反射比或光谱透射比。图9-1是美国通用电器公司生产的一种由双单色仪系统和工作在零读数下的偏光光度计组成的分光光度计的结构图。

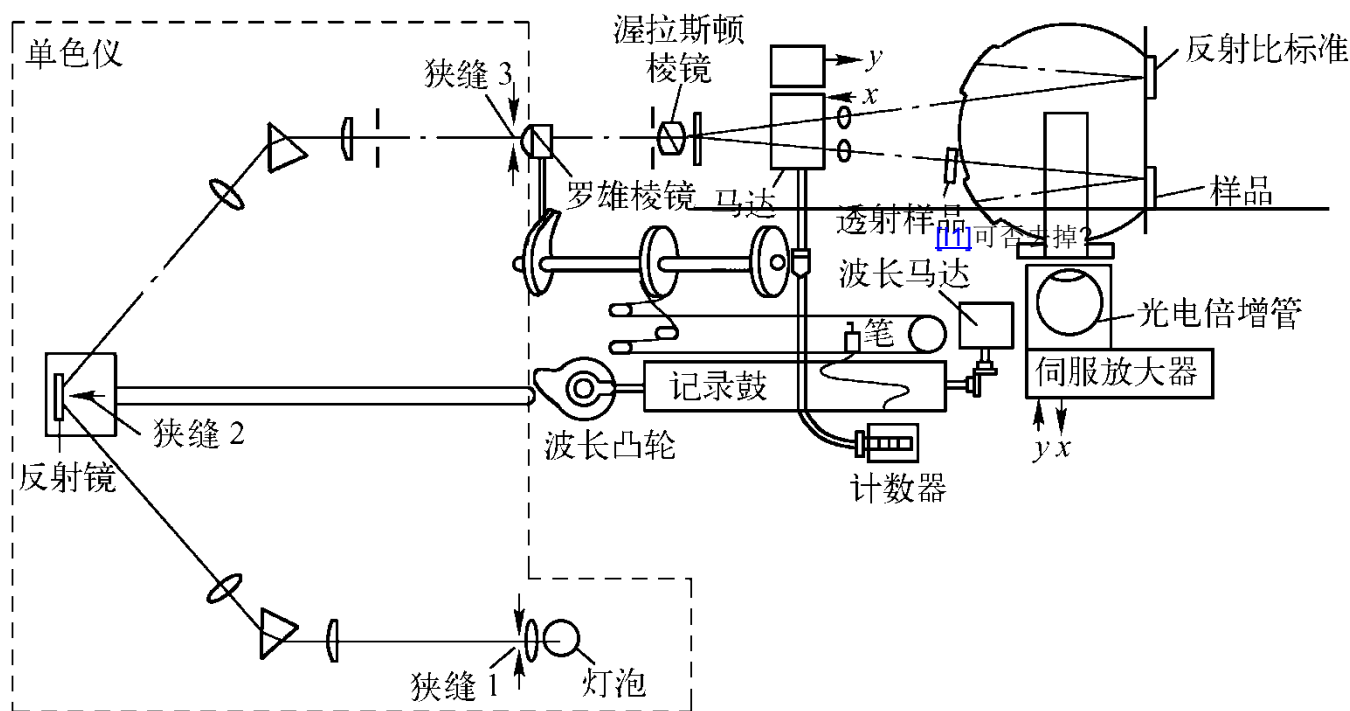


图9-1 美国GE公司生产的一种分光光度计

9.1.4 傅立叶变换光谱仪

如图9-2是迈克尔逊干涉仪的工作原理。

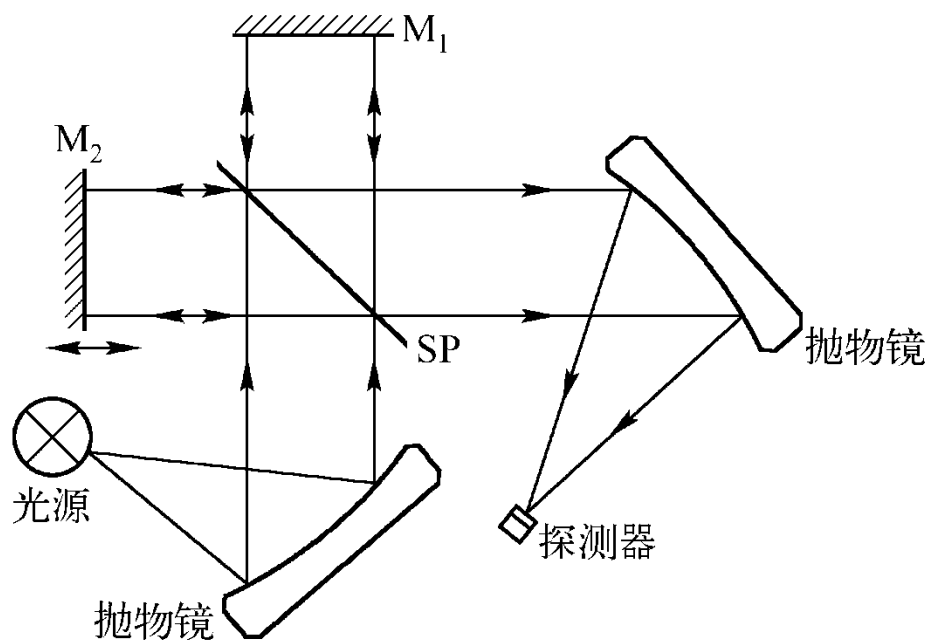


图9-2 迈克尔逊干涉仪的光学系统

FT光谱辐射计和迈克尔逊干涉仪的差别在于：①平面镜 M_2 以一恒速 V 运动，位移量 $X=Vt$ ；②光源不只是单色光，可以是连续光谱

与棱镜、光栅单色仪相比，FT光谱辐射计的主要优点：

(1)高的能量传输;(2)高的信噪比；(3)高的分辨率

9.1.5 成像光谱仪

1. 场景扫描模式

成像光谱仪场景扫描常用的模式包括掸帚式、推帚式和凝视三种，如图9-4所示。

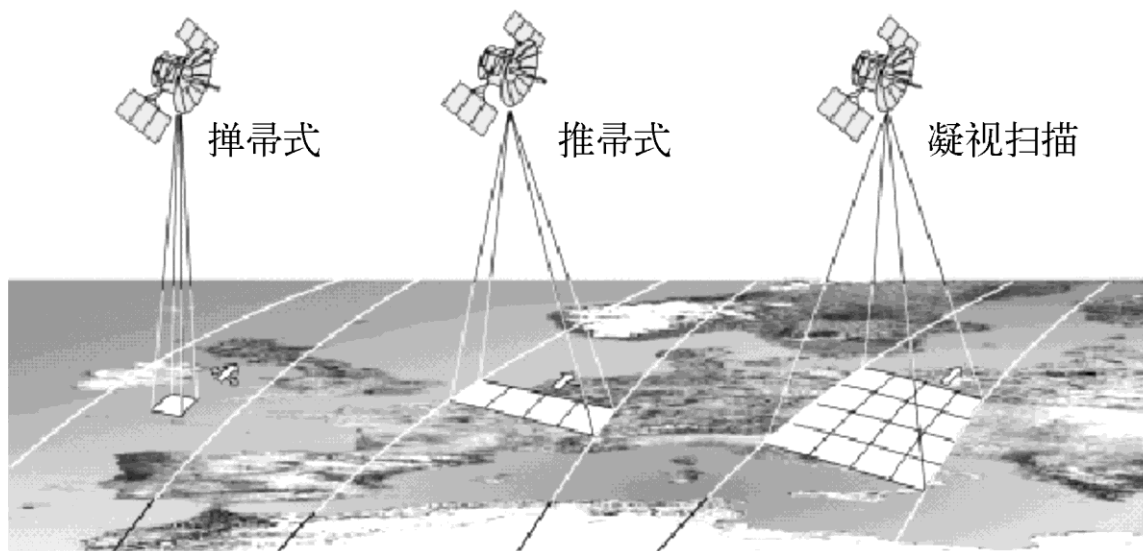


图9-4 成像光谱仪场景扫描模式

2. 光谱接收模式

成像光谱仪的光谱接收模式有色散型、干涉型和滤光片型，模式的最终选择取决于灵敏度、空间分辨率、光谱分辨率、视场之间的折衷。目前常见的成像光谱仪大多为基于分光棱镜、色散棱镜和衍射光栅的色散型成像光谱仪，其中又以采用光栅的色散型成像光谱仪最为突出。

(1) 色散型成像光谱仪

图9-5为基于反射光栅的色散超光谱系统，它原理简洁、性能稳定，可同时获得每一谱线且光谱分辨力高

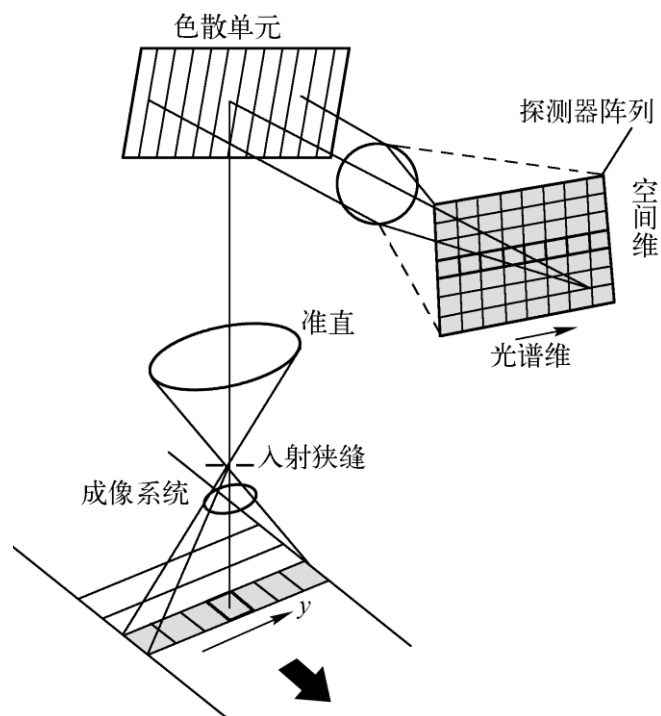


图9-5 基于光栅的色散系统

在光栅色散系统的实现形式上，凹面光栅由于兼具色散和成像作用，比起平面光栅系统来结构简单，光学结构紧凑、轻巧，设计简洁，所有外场应用时经常得到实际应用。凹面光栅的原理图及效果图如图9-6所示。

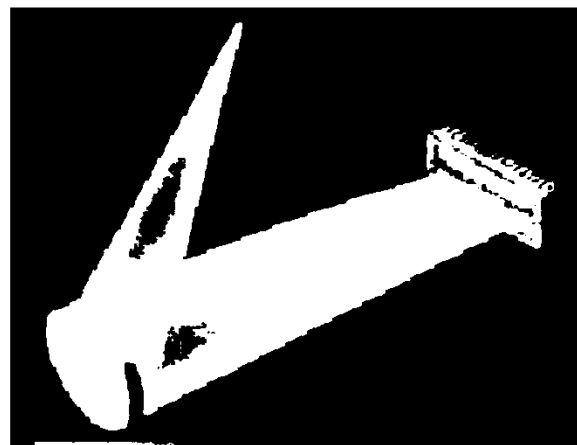
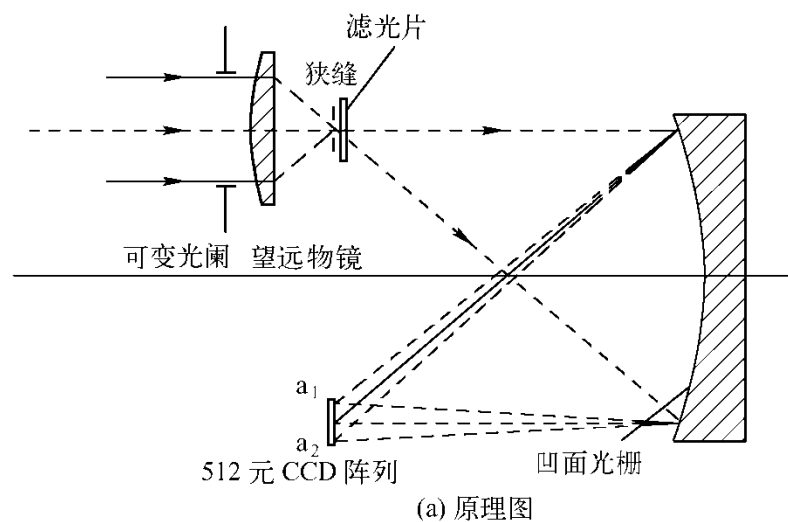


图9-6 凹面光栅的原理效果图

(2) 干涉型成像光谱仪

时间调制干涉成像光谱仪，将入射光分裂成两部分，并通过一种可变光程差将这两束光复合，从而产生一幅场景光谱干涉图（如图9-7）

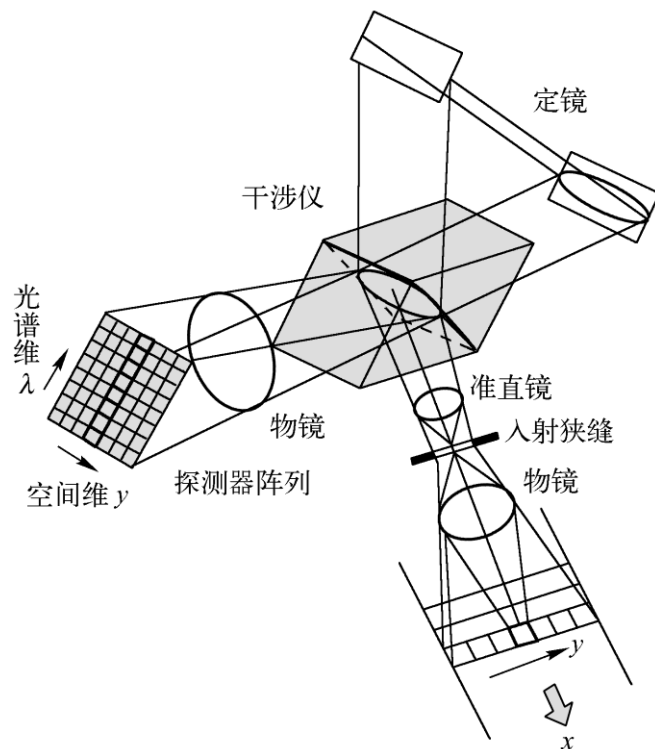


图9-7 时间调制干涉成像光谱仪

(3) 滤光片型成像光谱仪

包括可调谐滤光片系统和空间可变滤光片系统，通过光学带通滤光片把来自场景光谱的一个窄波段透射到单个探测器或者整个焦平面探测器列阵上，可采用可调谐滤光片、分立滤光片或空间可变滤光片。可调谐滤光片包括声光和液晶两种，声光可调谐滤光片通过改变声波频率而改变有效间隔，并将滤光片调到不同波长，对于给定的声频只有很窄的光波范围满足相位匹配条件。液晶可调谐滤光片利用双折射效应，通过改变寻常入射光线和非常入射光线之间的光程差选择波长，但其调谐速度慢。采用调谐滤光片的成像光谱仪谱段可任意选择，控制方便，但很难同时获得多谱段的图像。空间可变滤光片的典型是劈形滤光片。

采用劈式滤光片的成像光谱仪（图9-8）原理十分简单，但工艺复杂。

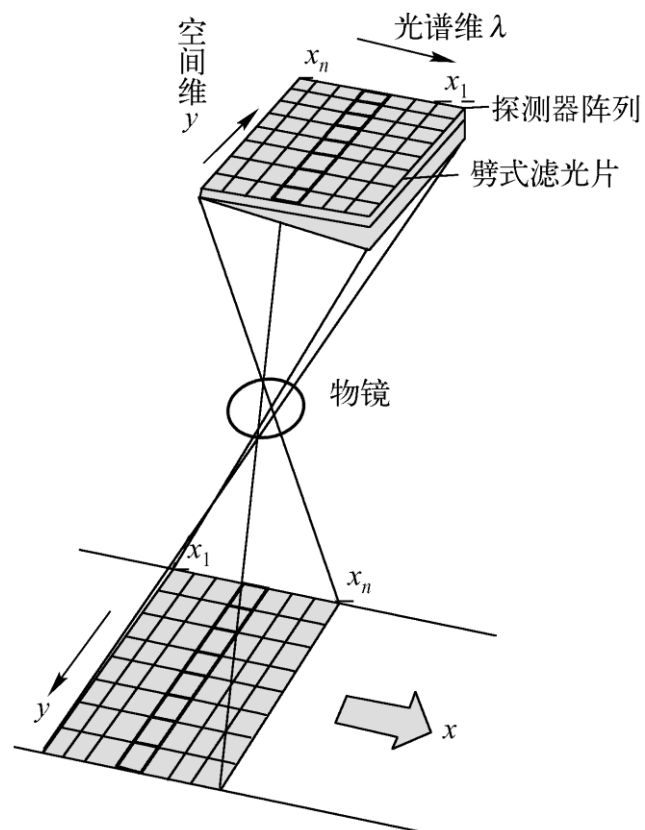


图9-8 劈式滤光片原理的成像光谱仪

几种光谱接收模式比较如下：

（1）由于色散型成像光谱仪中均含有入射狭缝，狭缝越窄，光谱分辨率越高，而进入系统的光通量就越少，即光谱分辨率和光通量成为色散型成像光谱仪中相互制约的一对矛盾。而在干涉型成像光谱仪中同时测量的却是所有谱元均有贡献的干涉强度，空间调制型干涉成像光谱仪虽然也有狭缝，但狭缝宽度不影响光谱分辨率，只决定于空间分辨率的要求。在满足空间分辨率的前提下，狭缝可以较宽，从而使狭缝面积和视场角较大。

（2）光栅比棱镜、楔型滤光片和干涉技术有很多优点。其中较滤光片的主要优点是可同时获得每一谱线且光谱分辨力高，极大简化了飞行后数据的处理。由于透射全息光栅难以解决低失真和杂散光，反射式光栅成为许多系统优选的对象。光栅主要的局限是传统的光栅系统存在光学失真、多衍射级杂散光及对入射光极性灵敏度问题，但通过使用具有散光修正反射衍射光栅可回避这些问题，如选择镜子的斜度和光栅全息构造点来优化设计，平衡第三、四级杂散光。

9.2 光度和辐射度量检测技术

9.2.1 照度的测量

目前在实际工作中主要采用客观法测量照度，即将照度计的光辐射探测器放在待测平面，光照引起探测器的光电流，放大后通过仪表或数字读出。对于标定过的照度计，读出的数据代表了所测平面的照度值。照度计的基本结构是光电测量头及其示数装置。光电测量头包括光电探测元件、光谱修正滤光片以及扩大测量量程的光衰减器(中性滤多片等)，如图9-9所示。

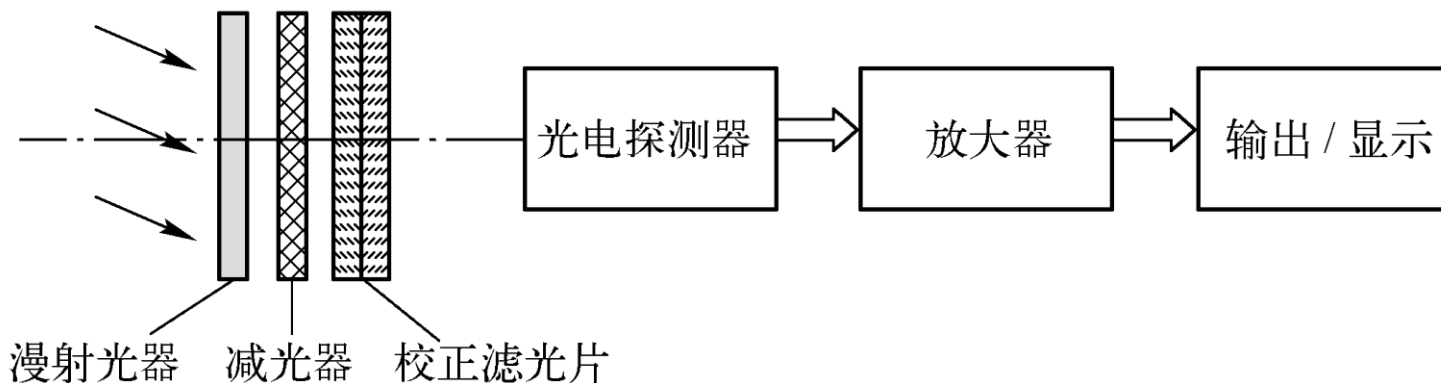


图9-9 照度计结构原理图

为了可靠地测量照度，照度计必须满足以下条件：

- (1) 光电探测器的光谱响应应符合照度测量的要求；
- (2) 探测器的余弦校正；
- (3) 照度示值与所测照度有正确的比例关系；
- (4) 照度计要定期进行精确标定；
- (5) 照计计要有较多强的环境适应性；

9.2.2 亮度的测量

常用的亮度计用一个光学系统把待测光源表面成像在放置光辐射探测器的平面上。图9-11给出一种亮度计的结构。

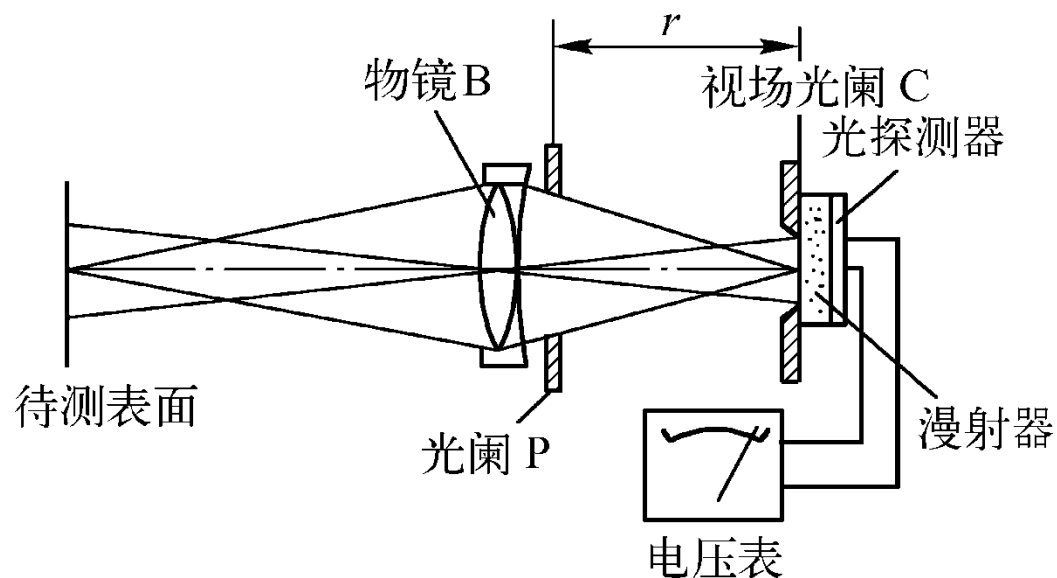


图9-11 亮度计结构图

图9-12是一种用途广泛的亮度计(Spectra Pritchard光度计)的结构图

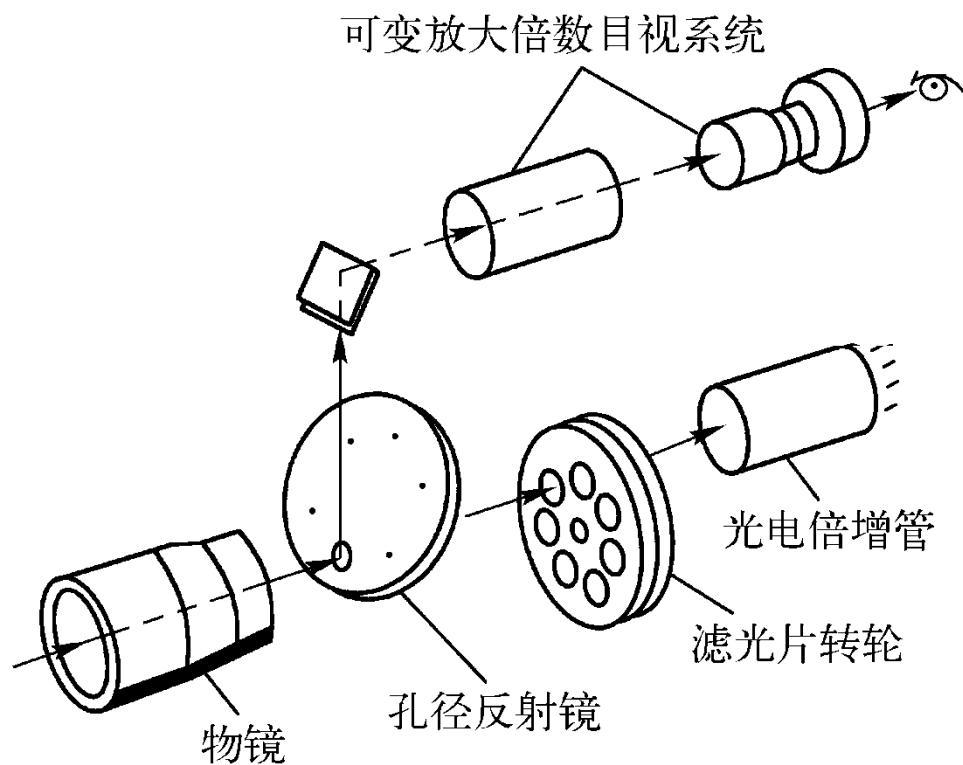


图9-12 某亮度计结构示意图

9.2.3 辐射测量与测温

1. 总辐射度量的测量

总辐射度量的测量是待测光源在整个辐射谱段内总辐射能的测量，具有一些特点：

- ① 由于待测光源一般包含相当宽光谱范围的辐射能，信号较强，在测量时一般可不需用光学系统聚光，从而可避免光学系统吸收、反射等所引入的辐射能损失使测量不精确。在辐亮度测量中，光学系统则是为了使测量有确定的视场大小。
- ② 由于要适应测量光谱范围的光辐射能，探测器的光谱响应范围应足够宽，随之也带来背景辐射对测量值有较大影响的问题。
- ③ 在宽谱段内测量时，应考虑光辐射能传输介质可能出现的吸收对测量结果的影响。介质中水蒸汽，二氧化碳等过量及其变化，都会在测量结果中引入误差，所以，除了平方反比定律等对测量距离的限制外，测量距离不宜过大，也可用强迫通风、充入惰性气体、局部抽真空等方法，使介质的吸收、散射对测量的影响减小。

2. 辐射体的温度

(1) 亮温

实际发射体在某一波长(窄谱段范围内)的光谱辐亮度和黑体在某一温度同一波长下的光谱辐亮度相等时，黑体温度称为发射体的辐亮度温度。如果波长在可见光谱范围内用人眼(或具有人眼光谱光视效率响应的探测器)来判断其间亮度相等时，则称为亮度温度，简称亮温；

(2) 色温和相关色温

色温是颜色温度的简称，在可见谱段内，当发射体和某温度的黑体有相同的颜色时，那末黑体温度就称为发射体的色温。相关色温就是发射体和某温度的黑体有最相近的色时黑体的温度；

(3) 辐射温度

辐射体的辐射温度是在整个光辐射的谱段范围内的辐亮度与某温度黑体辐亮度相等时黑体的温度，即

$$T = T_b / \sqrt[4]{\varepsilon(T)}$$

式中， $\varepsilon(T)$ 是材料的平均发射率； T 是辐射体的真实温度； T_b 是其等效黑体温度

3. 亮度的测量

测量亮温最常用的仪器是光学高温计，图9-14是其结构原理图

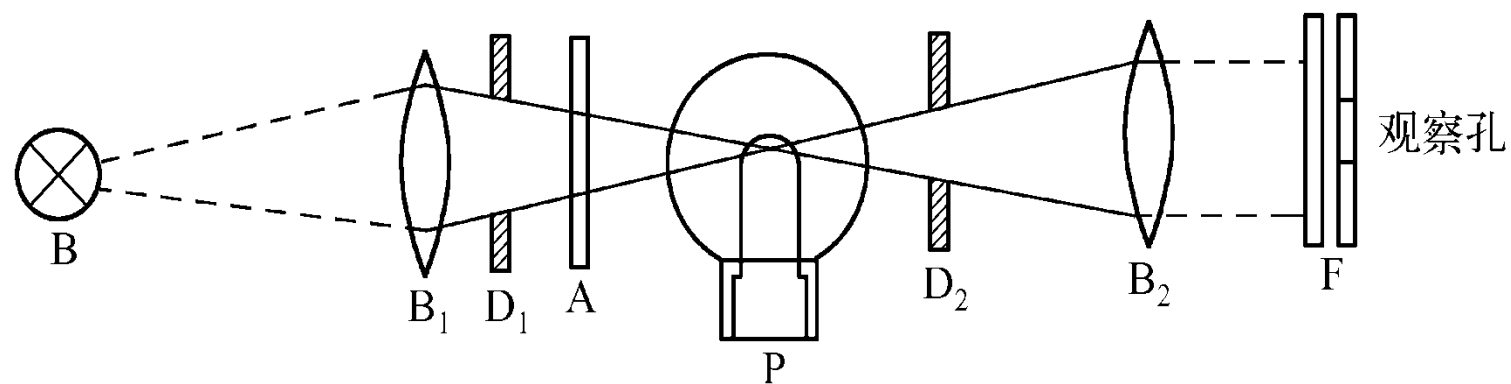


图9-14 光学高温计的结构

光学高温计红色遮光片和人眼光谱光视效率曲线的组合，构成了中央波长约 $0.65\ \mu\text{m}$ ，谱段宽度约 80nm 的响应特性(见图9-15中带剖面线部分)。

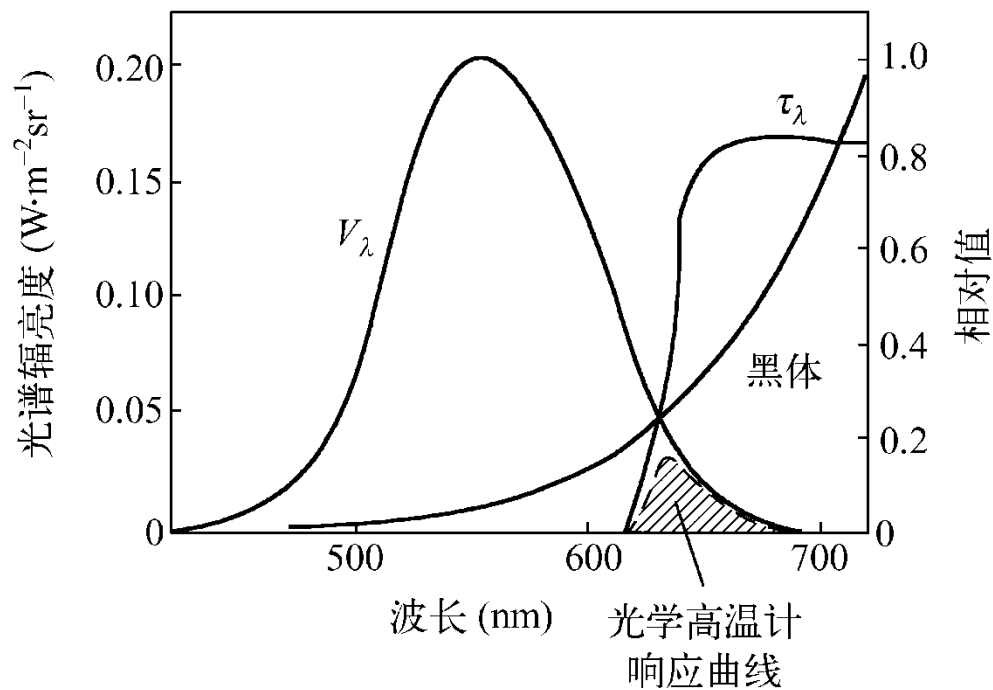
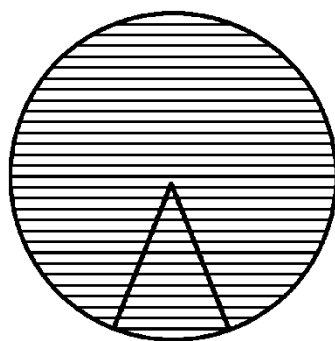
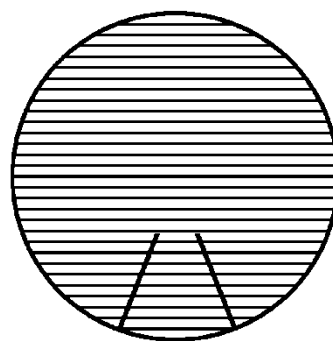


图9-15 光学高温计的光谱响应

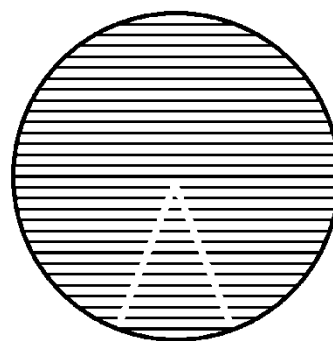
光学高温计的观察视场内，人眼可看到待测辐射源和高温计灯泡灯丝像
(图9-16)



(a) 电流过低



(b) 消隐



(c) 电流过高

图9-16 高温计灯泡灯丝的消隐

4. 色温的测量

最常用的测量色温的方法有两种：

① 测量待测光源的相对光谱能量分布，利用色度计算公式，求出光源在色度图上的色坐标，从而由色度图上等温相关色温线确定光源在给定工作电压下的色温或相关色温；

② 双色法，这是最常用的色温测量或标定的方法；

测量需要已标定色温值的标准光源，再用待测光源和标准光源进行双色比对测量，求出待测光源的色温值。测量原理是：选定两个窄谱段(原则上是任意的，例如在可见谱段，常在蓝色和红色各选一个谱段)，如果待测光源在这两个谱段探测器输出信号的比值与某色温的标准光源相同，那么标准光源的色温值就是待测光源的色温值(图9-17)，测量装置如图9-18所示。

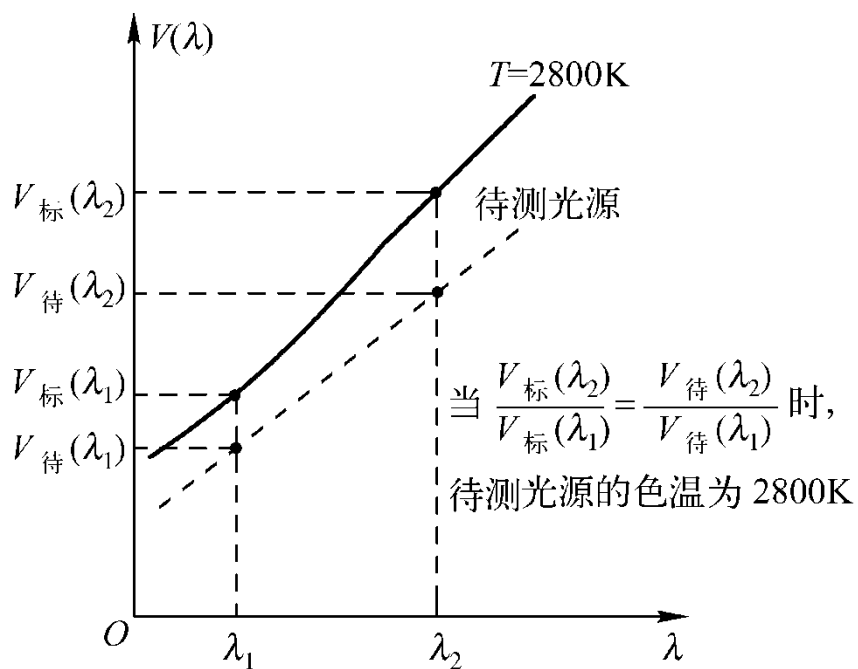


图9-17 双色法测色温

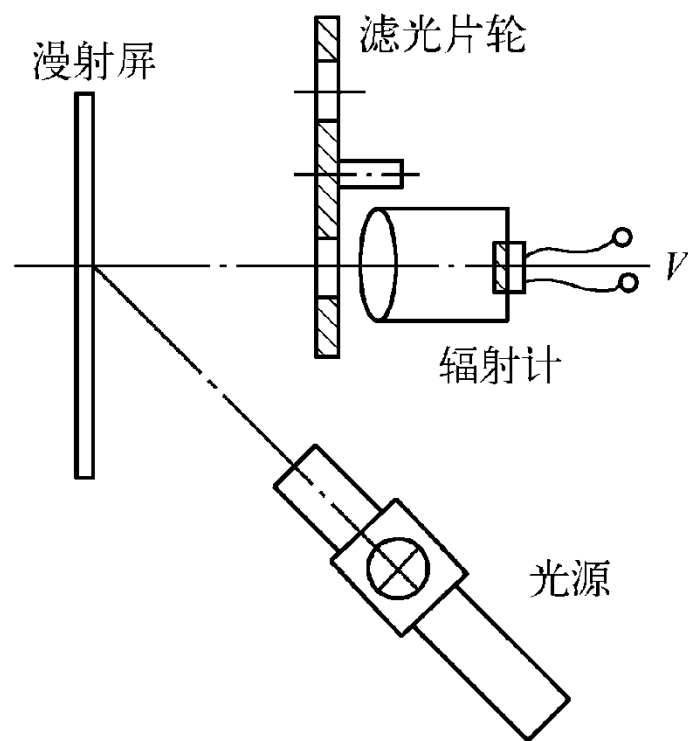


图9-18 双色法测色温的装置

5. 辐射温度的测量

图9-19是加了镀金半球前置反射器的辐射测温计结构

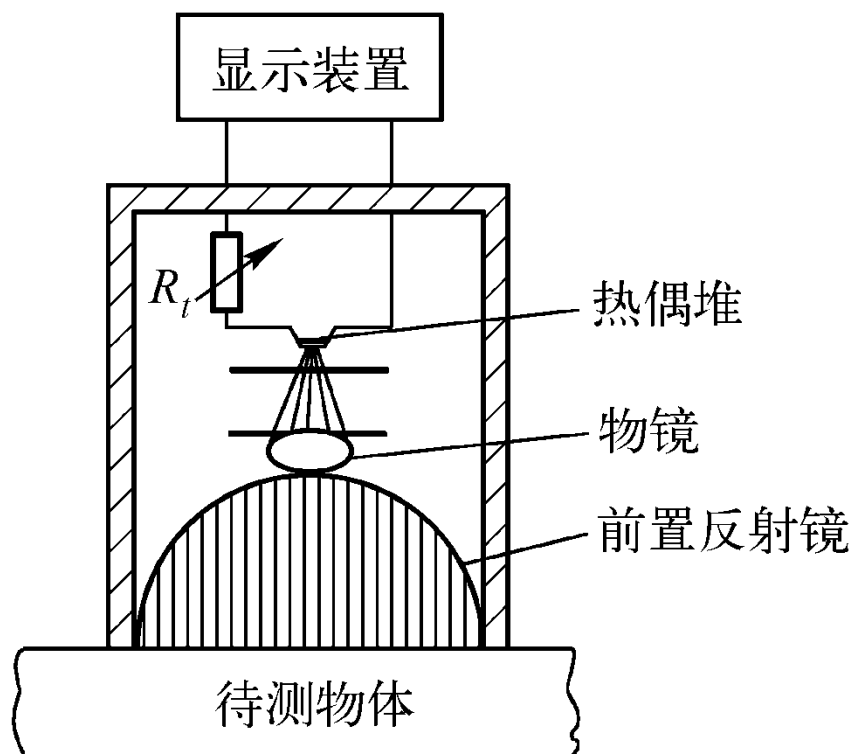


图9-19 全辐射测温计

(2) 视差修正

在图9-20中，像机所摄莫尔条纹在D点，坐标为（ x' ， y' ），而实际上此条纹应代表试件表面上E点的高度，E点坐标为（ x ， y ）。因此，应对坐标的视差进行修正。由图9-20可知

$$\begin{cases} x = x' - \frac{h}{l}(d - x') \\ y = y' - \frac{h}{l}(d - y') \end{cases} \quad (9-15)$$

获得莫尔条纹图后，应根据式（9-15）进行坐标修正。

9.3.2 投影型莫尔法

图9-21所示为光栅投影系统和投影法的原理图

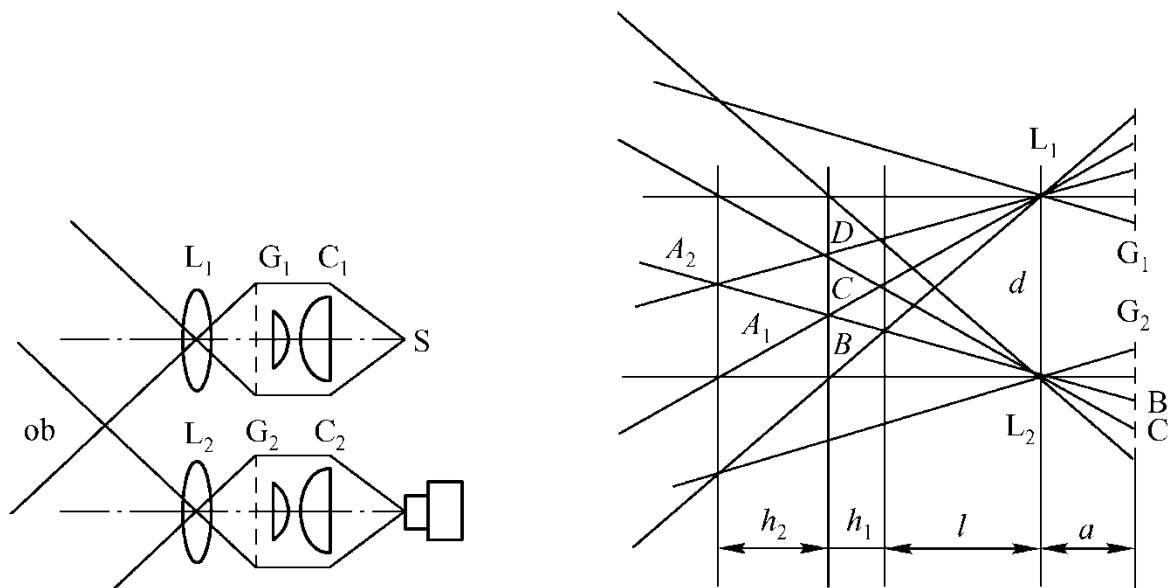


图9-21 投影型莫尔法光学系统与原理示意图

投影型莫尔法有下列特点：

- （1）采用小面积基准光栅（通常像手掌那样大即可），透镜可以调换倍率；
- （2）同其他方法相比，可以测较大的三维物体；
- （3）对微小物体，采用缩小投影方法，这样就不受光栅衍射现象的影响；
- （4）投影的莫尔图形可在物体上直接观察；
- （5）能取出变形光栅

9.3.3 莫尔条纹级次与凹凸判断

在使用照射莫尔方法与投影莫尔方法时，计算莫尔条纹所代表的高度时，要知道条纹的级数。实际测量时条纹的绝对级数不易确定，只能定出条纹的相对级数。确定条纹的级数前，应先确定物体表面的凹凸。

被测定的物体是凹是凸，单从莫尔等高线是不能判断的，这就增加了计量中的不确定性，因此需要考虑如何进行凹凸判定问题。判定凹凸的一种方法是，当光栅离开物体时，如果条纹向内收缩，表明该处表面是凸的，反之是凹的；照射型中还可通过移动光源来确定凹凸问题，如果光源同接受器之间的距离 d 增加，条纹向外扩张且条纹数增加，则是凸的。此外，也可采用彩色光栅的方法来判断凹与凸。

物体表面的凹凸一旦确定，就可用确定干涉条纹级次的方法来确定莫尔条纹的级次。

9.3.4 几何可测深度

现以照射型莫尔方法为例进行分析，在照射莫尔方法中，只有当参考栅在光源照射下能在试件表面形成被调制的变形参考栅时，才有可能获得等高莫尔条纹。当栅线间距 P 较大时，可用几何光学的方法分析可测深度，称为几何可测深度，如图9-22所示。

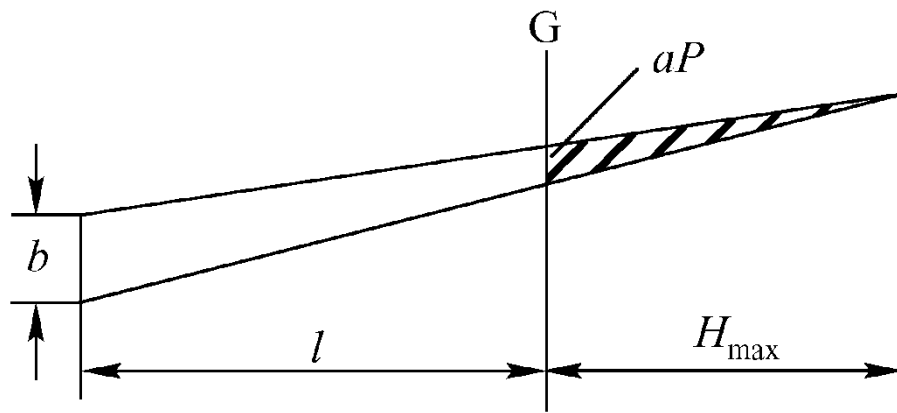


图9-22 几何可测深度

设光栅节距为 P ，栅线遮光部分宽度与节距之比为 a ，忽略衍射效应时，可得

$$H_{\max} = \frac{aPl}{b - aP}$$

9.4 条形码技术

1. 条形码的概念及特点

条形码系统是按特定格式组合起来的一组宽度不同的平行线条，其线条和间隔代表了某些数字或符号，用以表示某些信息。条形码可以印刷在物品、纸包装或其他介质上，做成含有信息的条形码标签，通过光电扫描阅读设备，即可准确反映出所表示的信息。

一幅完整的条形码标签，在条形码图形下面还常印有供人员识别的相应文字信息，如图9-23所示。

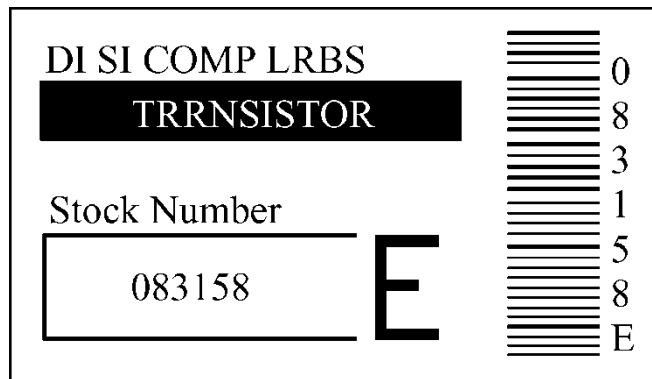


图9-23 典型的条形码标签

图9-24表示了条形码信号的阅读和处理的工作原理

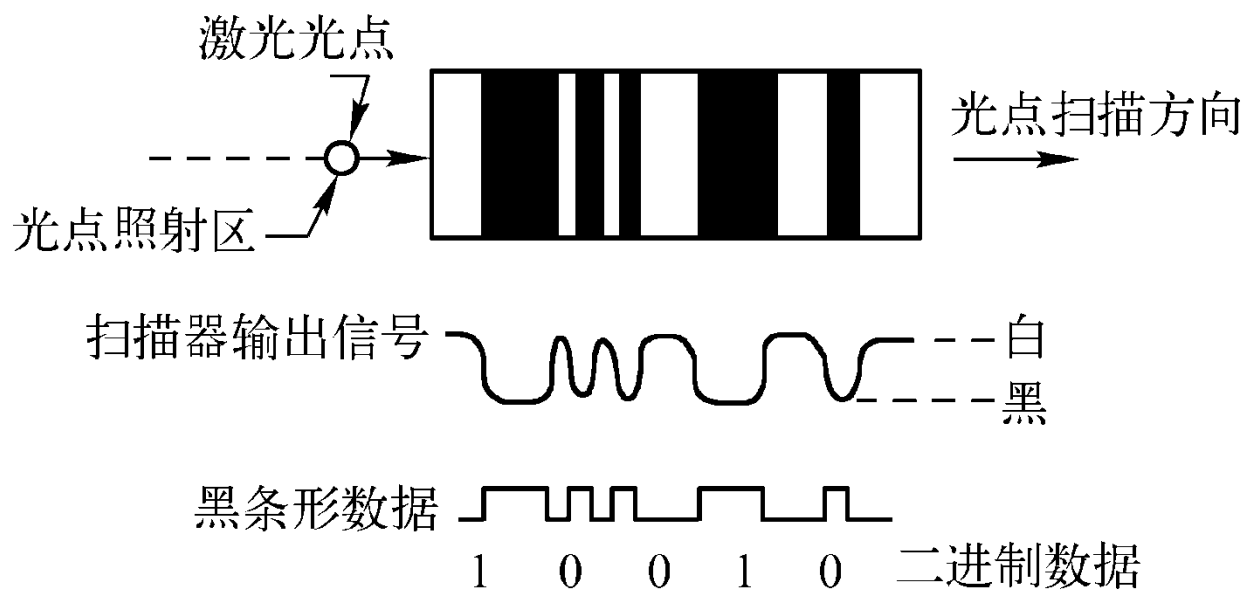


图9-24 条形码信号的阅读和处理的工作原理

3. 条形码的识别原理及装置

(1) 条形码的识别原理

条形码识别的核心内容就是通过光学扫描或成像把沿空间一维方向分布的条形码信息传递到光电变换器件上，然后转换成以时间为变量的时序脉冲串。图9-25给出了使用He-Ne激光扫描器阅读条形码信息变化过程。

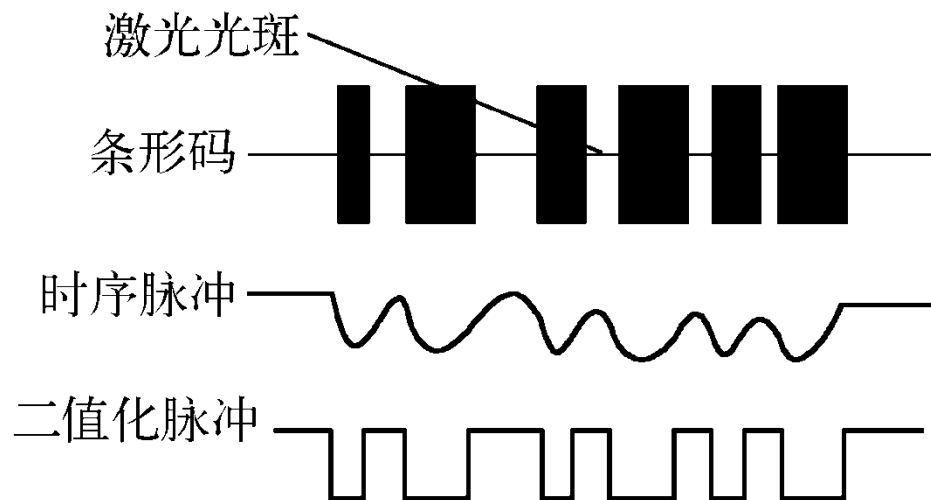


图9-25 激光扫描条形码的信息变换过程

图9-26为CCD条形码识别工作原理

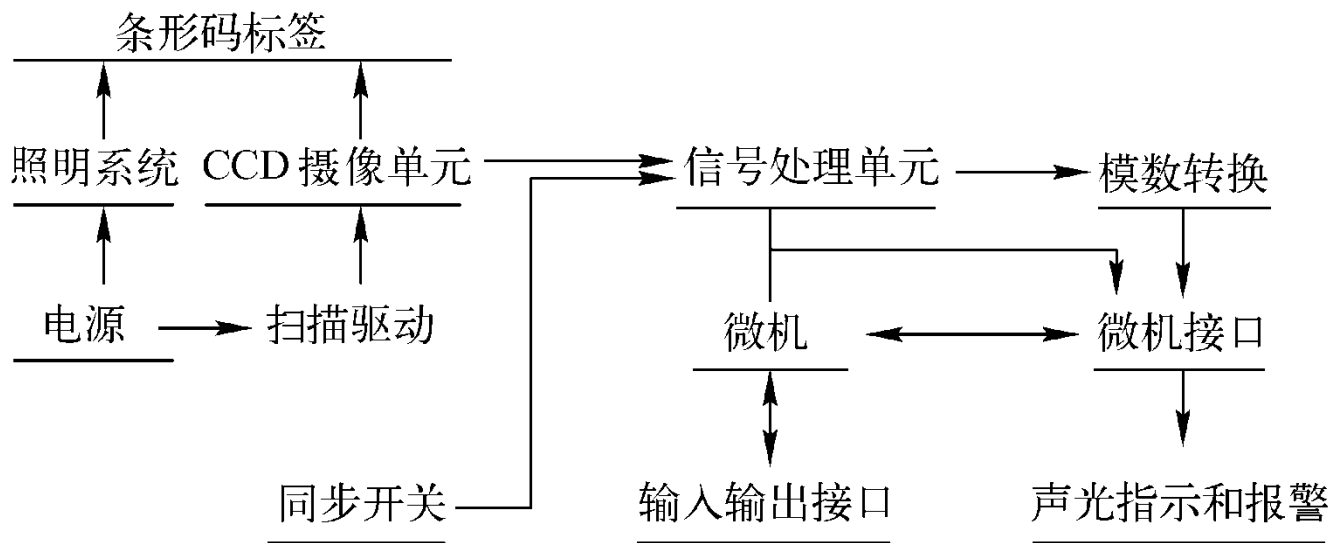


图9-26 CCD条形码识别工作原理

(2) 条形码识别器

条形码的识别首先要求利用某些光电扫描装置沿某一轨迹对所有条码条符进行扫描，需要经过以下几个环节：

- ① 要求建立一个光学系统
- ② 要求一个接受系统能够采集到光点运动时打在条形码条符上反射回来的反射光
- ③ 要求一个电子电路将接受到的光信号不失真地转换为电脉冲

下面介绍几种常用的条形码扫描阅读器

① 手持装置

一种是由透镜、光导纤维、光敏元件、放大整形电路和接触开关组成，其结构如图9-27所示。

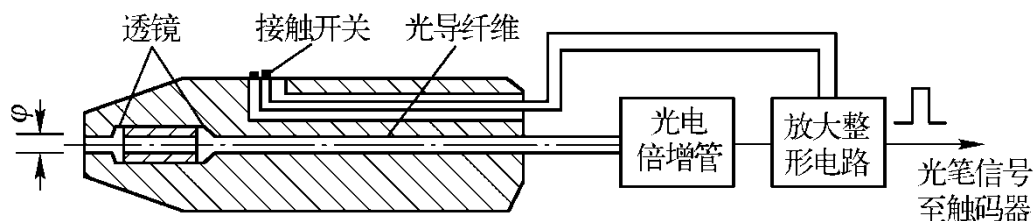


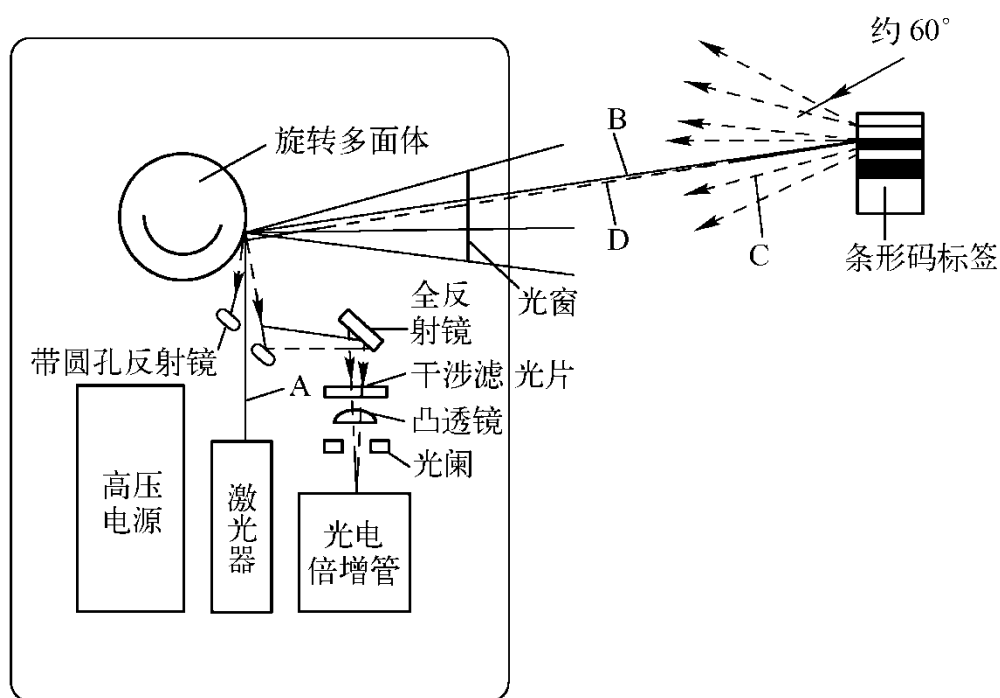
图9-27 光笔的一种结构

② 固定光束的光学扫描阅读器

这种扫描器通常安装在某个特定的位置，例如装在紧靠传送带的地方。扫描器只能对它面前的条形码作单路或多光路的一次性扫描。它的内部结构与光笔类似，也使用白炽灯或发光二极管作光源，用光电三极管作为光敏接收元件，只是传输光信号的光学系统略为复杂些。

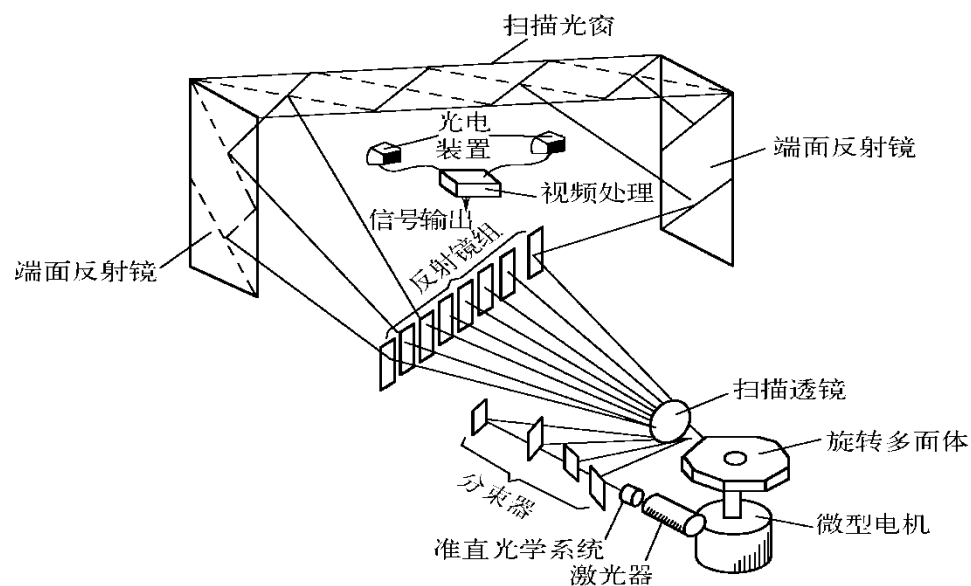
③ 移动光束的光学扫描阅读器

图9-28给出两种有代表性的激光扫描器光路图以及应用示意图。

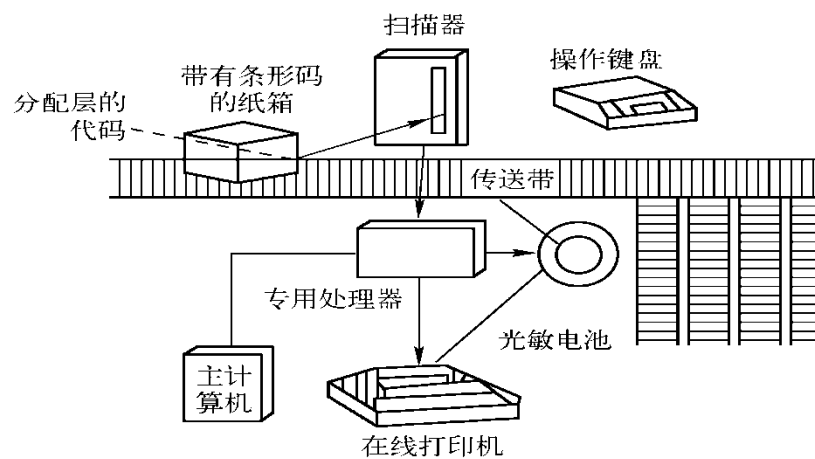


(a) 一般工业用激光扫描器结构图

图9-28 激光扫描器光路图



(b) 超级市场用激光全向扫描光路图



(c) 用激光扫描器进行物料分拣示意图

图9-28 激光扫描器光路图

9.5 三角法测试技术

9.5.1 三角法测试技术基础

单点式激光三角法测量常采用直射式和斜射式两种结构，如图9-29所示。

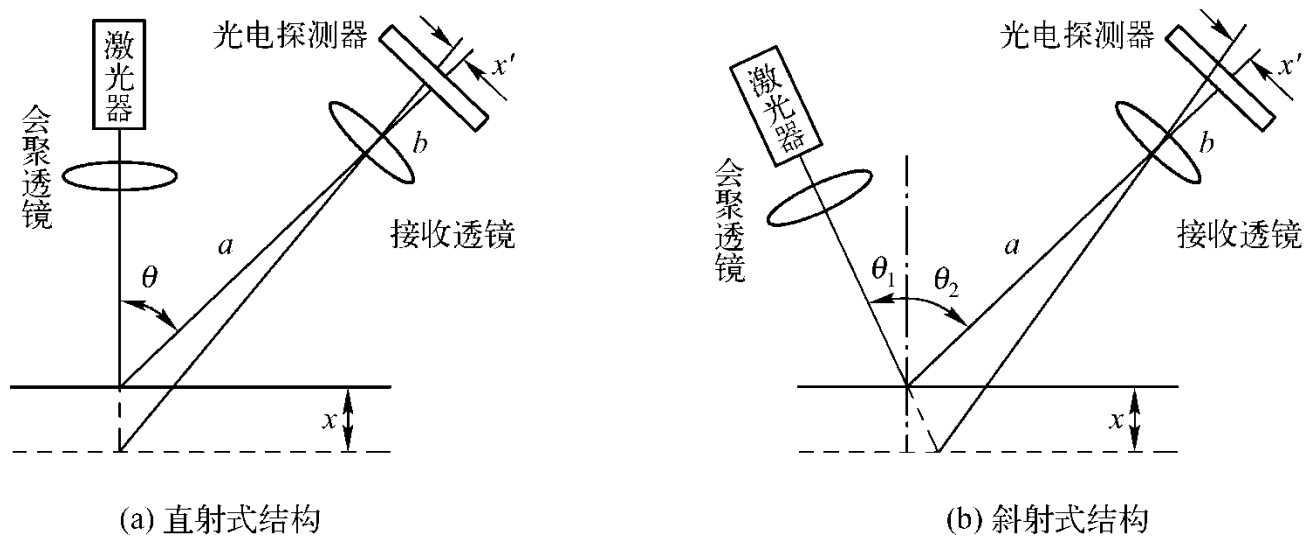


图9-29 三角法测量原理示意图

在图9-29(a)中，激光器发出的光线，经会聚透镜聚焦后垂直入射到被测物体表面上，物体移动或其表面变化，导致入射点沿入射光轴的移动。入射点处的散射光经接收透镜入射到光电位置探测器（PSD或CCD）上。若光点在成像面上的位移为 x' ，则被测面在沿轴方向的位移为

$$x = \frac{ax'}{b \sin \theta - x' \cos \theta}$$

图9-29(b)所示为斜射式三角法测量原理图。激光器发出的光线和被测面的法线成一定角度入射到被测面上，同样地，物体移动或其表面变化，将导致入射点沿入射光轴的移动。入射点处的散射光经接收透镜入射到光电位置探测器上。若光点在成像面上的位移为 x' ，则被测面在沿法线方向的移动距离为

$$x = \frac{ax' \cos \theta_1}{b \sin(\theta_1 + \theta_2) - x' \cos(\theta_1 + \theta_2)}$$

9.5.2 三角法测试技术的应用

1. 测距仪及其在自动测焦照相机中的应用

实际的测距仪系统如图9-31所示。

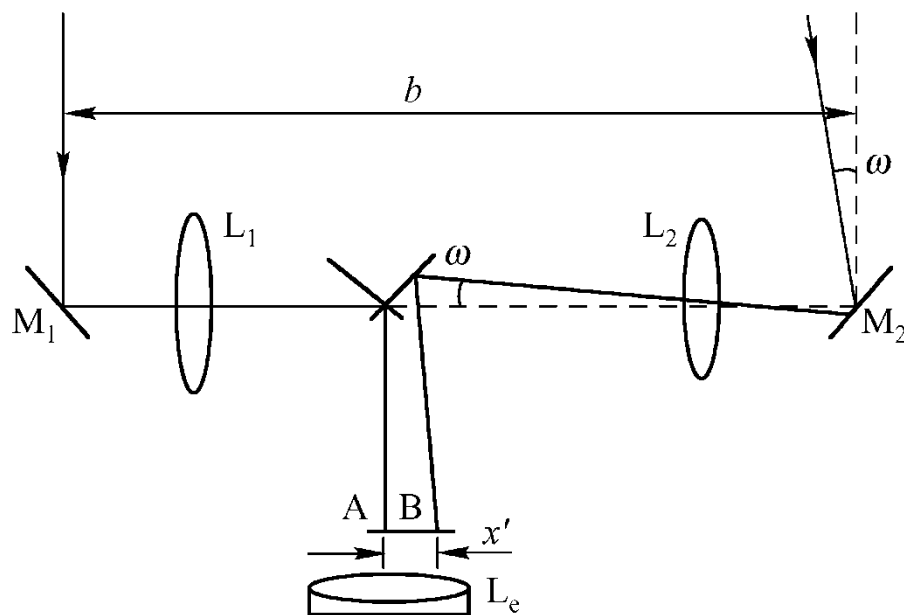


图9-31 测距仪原理图

实际装置在测定时，为提高测试准确度可以采用像符合法（零位法）。即在 L 的后面插入一个棱镜，通过调节棱镜的位置来使像 B 重叠在 A 上，由棱镜所转动的角度 ω 就可以求出 x' ，继而求出被测距离，如图9-32所示

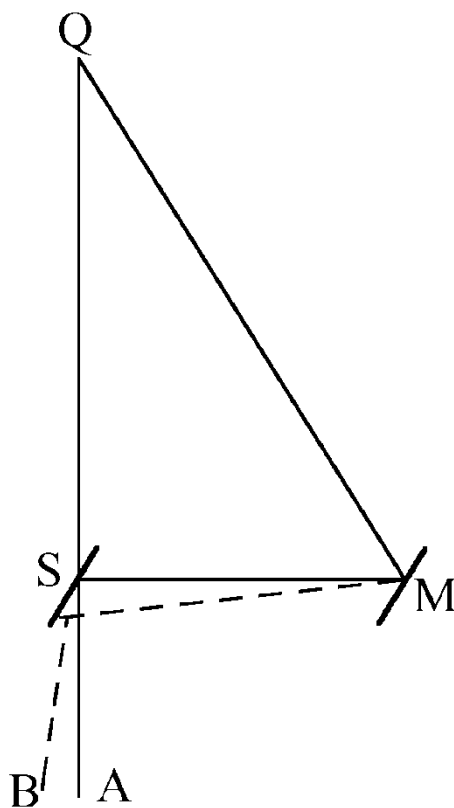


图9-32 像符合法示意图

像符合法在照相机的自动测焦装置中被广泛地采用。自动测焦照相机是采用两个图像传感器来判定像的重合，其光学系统如图9-33所示。

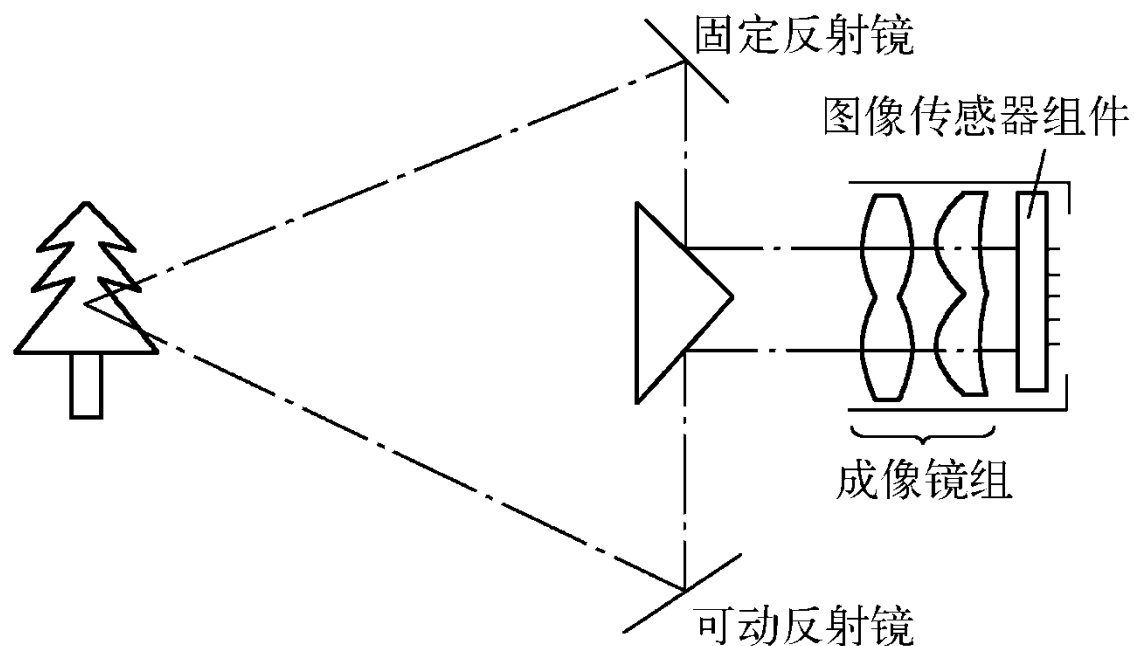


图9-33 自动调焦照相机自动调焦光学系统

2. 计算机视觉三维测试

图9-34所示为应用激光三角法测量汽车车身曲面装置的原理图。

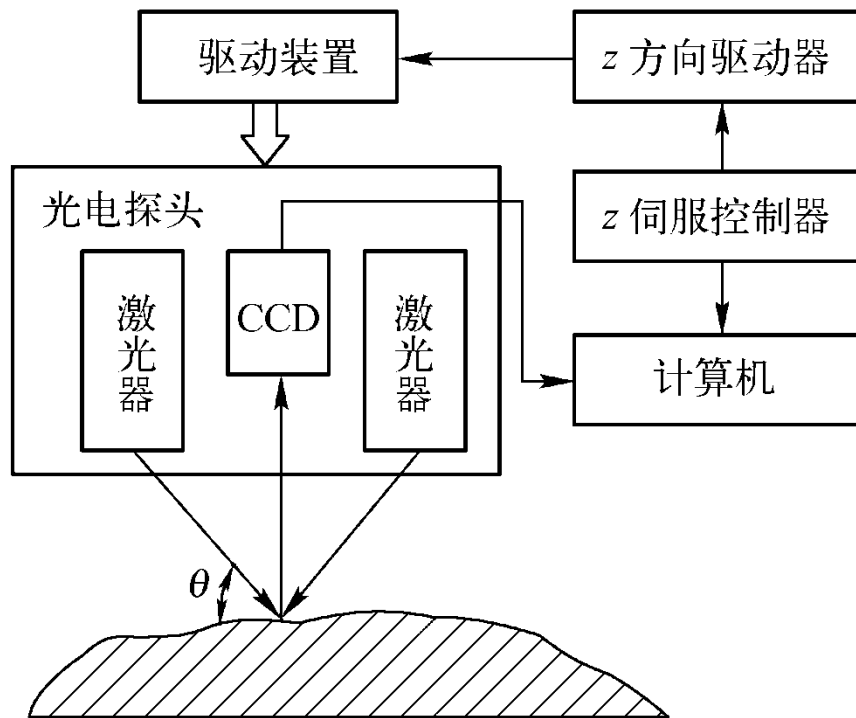


图9-34 激光三角法测量汽车车身曲面装置的原理图

9.6 光电图像检测技术

9.6.1 图像的预处理技术

1. 灰度直方图

灰度直方图是灰度级的函数，描述的是一幅图像中的灰度级与出现这种灰度的概率之间的关系图形，其横坐标是灰度级，纵坐标是该灰度出现的概率（像素的个数）。当一幅图像被压缩为直方图后，所有的空间信息都丢失了。直方图描述了每个灰度级具有的像素的个数，但不能为这些像素在图像中的位置提供任何线索。因此，任一特定的图像有唯一的直方图，但反之并不成立，即不同的图像可以有着相同的直方图，如在图像中移动物体一般对直方图没有影响。

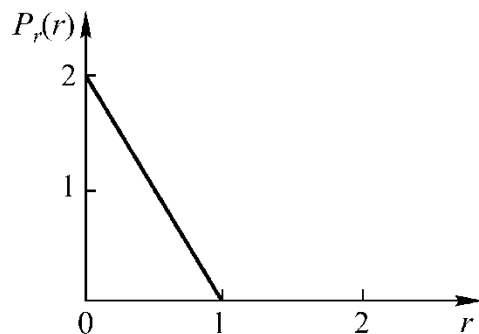
2. 图像增强处理

图像增强是指按特定的需要突出一幅图像中的某些信息，同时削弱或去除某些不需要的信息的处理方法。

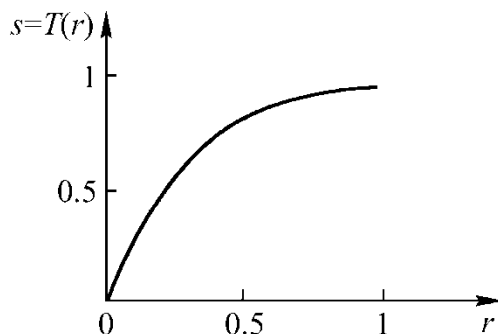
(1) 灰度直方图均衡化处理

图9-35 (a) 所示为原始图像的直方图,从图中可以知道,该图像的灰度集中在较暗的区域,相当于一幅曝光过强的照片。其概率密度函数为

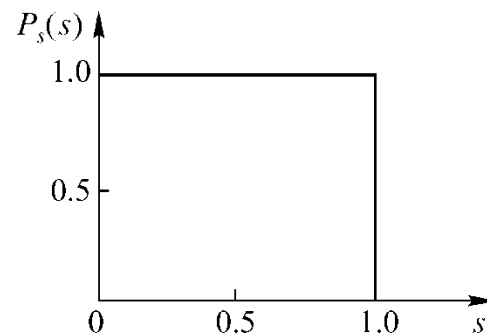
$$P_r(r) = \begin{cases} -2r + 2 & 0 \leq r \leq 1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (9-23)$$



(a) 原始图像的直方图



(b) 变换函数曲线



(c) 变换后图像的直方图

图9-35 直方图均衡或处理的均匀密度变换

式9-23中， r 是归一化的像素灰度级，采用累积分布函数原理可以求其变换函数为

$$s = T(r) = \int_0^r P_r(\omega) d\omega = -r^2 + 2r \quad (9-24)$$

式中， s 为变换后的像素灰度级，其变换函数曲线如图9-35 (b)所示，可以证明，变换后的像素分布概率密度是均匀的，如图9-35(c)所示。

(2) 直方图规定化处理

直方图均衡化的变换函数采用的是累积分布函数，只能产生近似均匀的直方图效果。在某些应用中，并不总是需要具有均匀分布直方图的图像，而是需要具有特定直方图的图像，以便能够对图像中的某些灰度级加以增强。

设 $P_r(r)$ 是原始图像灰度分布的概率密度函数， $P_z(z)$ 是希望得到的图像的概率密度函数。首先，对原始图像进行直方图均衡化处理，即有

$$s = T(r) = \int_0^r P_r(\omega) d\omega$$

假设对希望得到的图像也做直方图均衡化处理，有

$$u = G(z) = \int_0^z P_z(\omega) d\omega$$

由于两幅图像同样做了均衡化处理，那么， $P_s(s)$ 和 $P_u(u)$ 具有同样的均匀密度分布。如果用从原始图像中得到的均匀灰度级 s 来代替 u ，则式（9-24）的逆过程的结果，其灰度级就是所要求的概率密度函数 $P_z(z)$ 的灰度级。

$$z = G^{-1}(u) = G^{-1}(s)$$

用这种处理方法得到的新图像的灰度级具有事先规定的概率密度函数 $P_z(z)$ 。这种方法在连续变量的情况下涉及到求反变换函数的解析式的问题，一般比较困难，但是数字图像处理的是离散变量，一般采用近似方法绕过这个问题。

(3) 图像平滑化处理

图像平滑化处理追求的目标是消除图像中的各种寄生效应又不使图像的边缘轮廓和线条模糊，图像平滑化处理方法有空域法和频域法两大类，主要有邻域平均法、低通滤波法、多图像平均法等。

邻域平均法的基本思想是用几个像素的平均值来代替每个像素的灰度，假定有一幅 $M \times N$ 个像素的图像 $f(x, y)$ ，平滑处理后得到一幅图像 $g(x, y)$ ，则

$$g(x, y) = \frac{1}{M} \sum_{(m,n) \in S} f(m, n)$$

低通滤波法是一种频域处理法。在分析图像的频率特性时，图像的边、跳跃部分以及颗粒噪声表现为图像信号的高频分量，而大面积的背景区域则表现为图像信号的低频分量，用滤波的方法除去高频部分，就能抑制噪声，使图像平滑，由卷积定理可知

式中， $F(u, v)$ 是含有噪声的图像的傅里叶变换； $G(u, v)$ 是平滑处理后的图像的傅里叶变换； $H(u, v)$ 是传递函数，选择低通滤波特性的 $H(u, v)$ 使 $F(u, v)$ 的高频分量得到衰减，得到 $G(u, v)$ 后再经反傅里叶变换就得到所希望的平滑图像 $g(x, y)$ 。常用的低通滤波器有以下几种，其 $H(u, v)$ 的剖面图如图9-36所示。

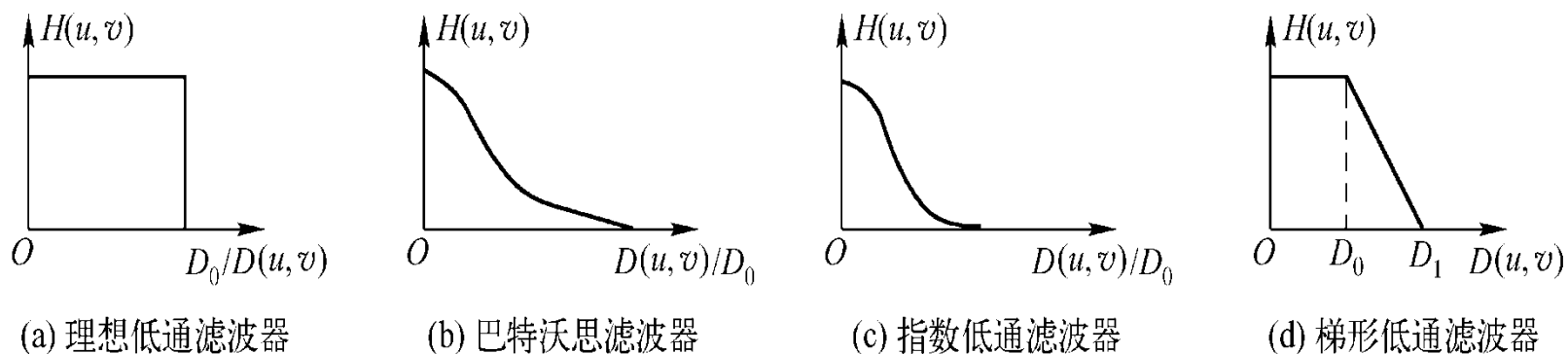


图9-36 低通滤波器传递函数剖面图

(4) 图像锐化处理

图像锐化处理主要用于增强图像的边缘和灰度跳跃部分。与图像平滑化处理一样，图像锐化处理方法也有空域法和频域法两大类

梯度微分法是最常用的图像锐化方法。如果给定一个函数 $f(u, v)$ 在坐标 (x, y) 上的梯度可以定义为一个矢量

$$\text{grad}[f(x, y)] = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix}$$

在数字图像处理中，数据是离散型的，通常采用差分形式代替微分运算

$$G[f(x, y)] \approx \left\{ [f(x, y) - f(x+1, y)]^2 + [f(x, y) - f(x, y+1)]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

而且在计算机计算梯度时，通常用绝对值来近似代替差分运算

$$G[f(x, y)] \approx |f(x, y) - f(x+1, y)| + |f(x, y) - f(x, y+1)|$$

与图像平滑方法相反，采用高通滤波法可以锐化图像，常用的高通滤波器有以下几种，其 $H(u, v)$ 的剖面图如图9-38所示

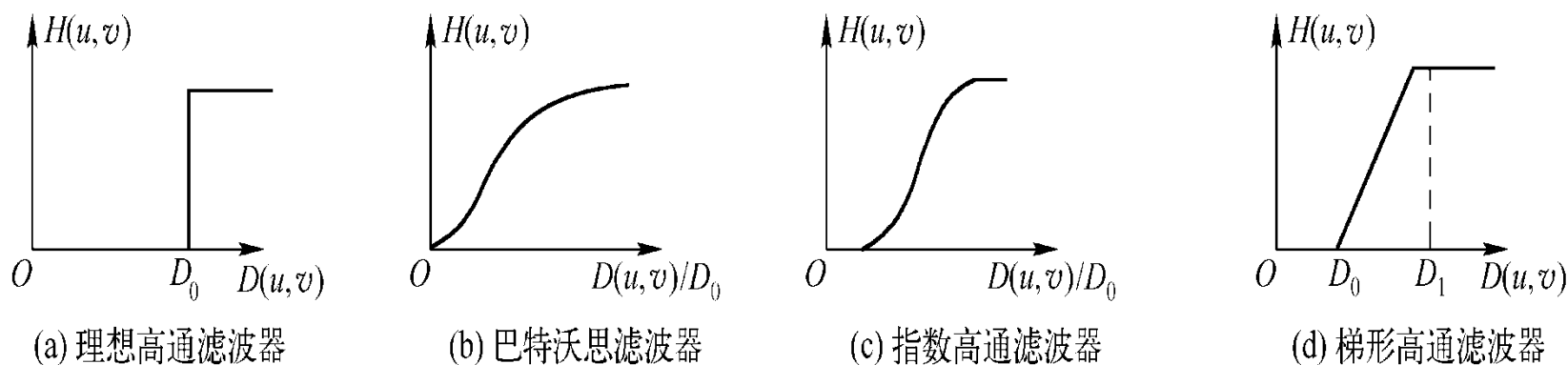


图9-38 高通滤波器传递函数剖面图

3. 失真校正

任意的几何失真由非失真坐标系 (x, y) 变换到失真坐标系 (x', y') 的方程来定义，即

$$\begin{cases} x' = h_1(x, y) \\ y' = h_2(x, y) \end{cases}$$

式中， h_1 和 h_2 是几何失真系数，它们随几何失真的性质而变化，例如透视失真的变换是线性的，其形式为

$$\begin{cases} x' = ax + by + c \\ y' = dx + ey + f \end{cases}$$

式中， a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f 是线性方程系数，通常情况下， h_1 和 h_2 是未知数，这时可以通过标准网格的已知失真图形，测量失真网格中的网格点的位置来决定此失真变换中 h_1 和 h_2 的近似值。

如图9-39所示为一个标准测试板和其在鱼眼透镜中的成像图形，变形极为严重。借助于此，可以设计一种变换方程，将透过该鱼眼透镜拍摄的图像校正到一个矩形坐标系中。

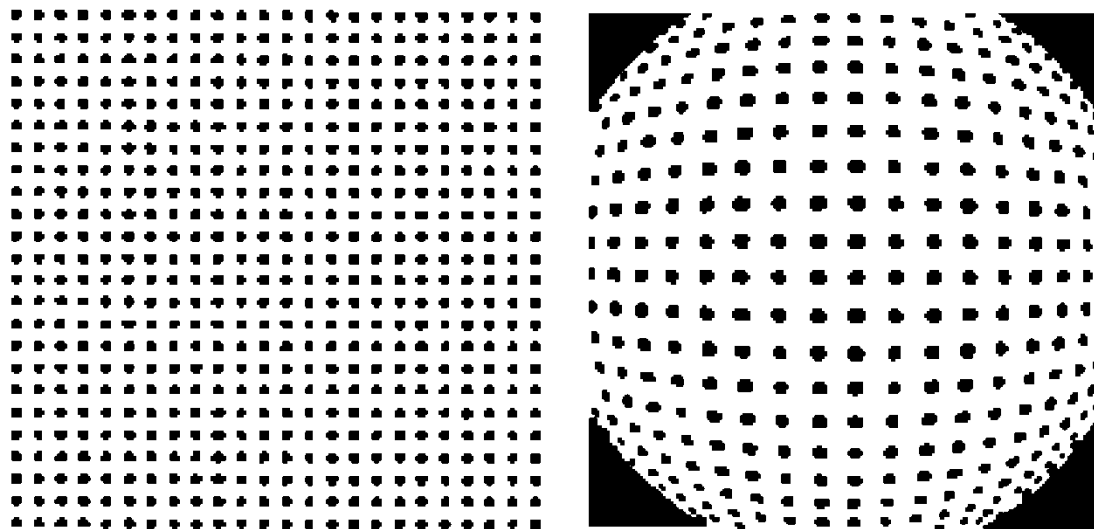


图9-39 测试板和对应的鱼眼图像

4. 图像坐标变换

(1) 平移变换

$$[x', y', H] = [x, y, 1] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ m & n & 1 \end{bmatrix} = [x + m, y + n, 1]$$

式中, m 、 n 是平移常量, 于是有

$$x' = x + m, y' = y + n$$

(2) 比例变换

$$[x', y', H] = [x, y, 1] \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = [x \cos \theta - y \sin \theta, x \sin \theta + y \cos \theta, 1]$$

式中, N_x 、 N_y 是 x , y 方向的比例因子, 于是有

$$x' = N_x x, y' = N_y y$$

(3) 旋转变换

$$[x', y', H] = [x, y, 1] \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = [x \cos \theta - y \sin \theta, x \sin \theta + y \cos \theta, 1]$$

式中， θ 为要求的旋转角，于是有

$$x' = x \cos \theta - y \sin \theta, y' = x \sin \theta + y \cos \theta$$

9.6.2 光电图像检测技术的应用

1. 自动在线监测

如图9-40所示，经模具冲压机加工成型的被测工件随传送带由右向左移动，在传送带上方工件经过位置设置工业摄像机（如CCD摄像机），用来拍摄工件图像

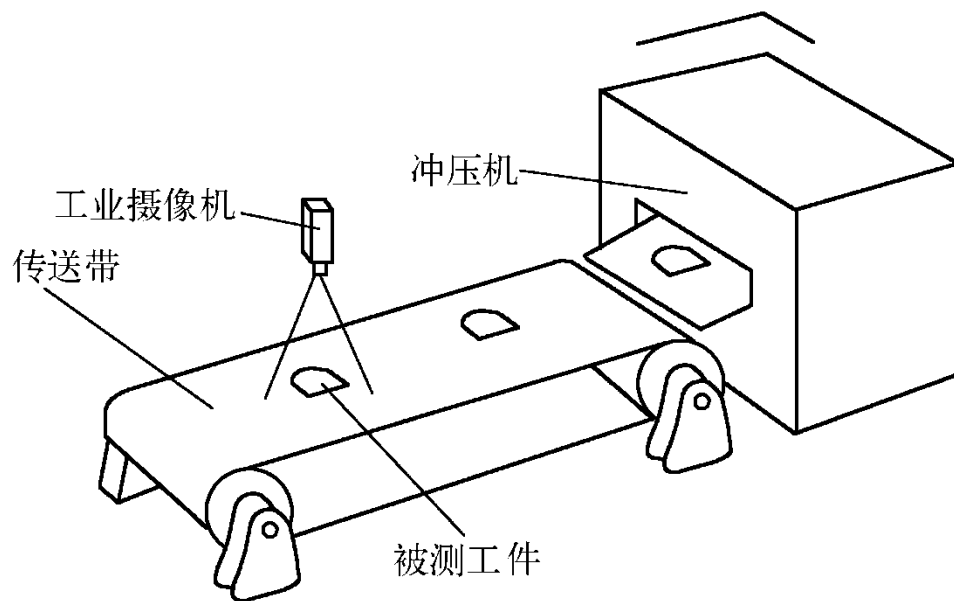


图9-40 工件形状在线测量系统

2. 基于双目立体视觉的空间目标坐标测量

采用基于双目立体视觉的**CCD**成像技术，可以测量空间目标的二维坐标。在垂直平面内布置两个线阵**CCD**摄像机，两个**CCD**相机的主光轴在物空间交汇于一点，构成一个竖直的测量区域，待测目标在两个**CCD**上各有一个像点与之对应，这样，**CCD**靶面内的任意一点都可以通过它在**CCD**上的像高计算出来。如图9-41所示

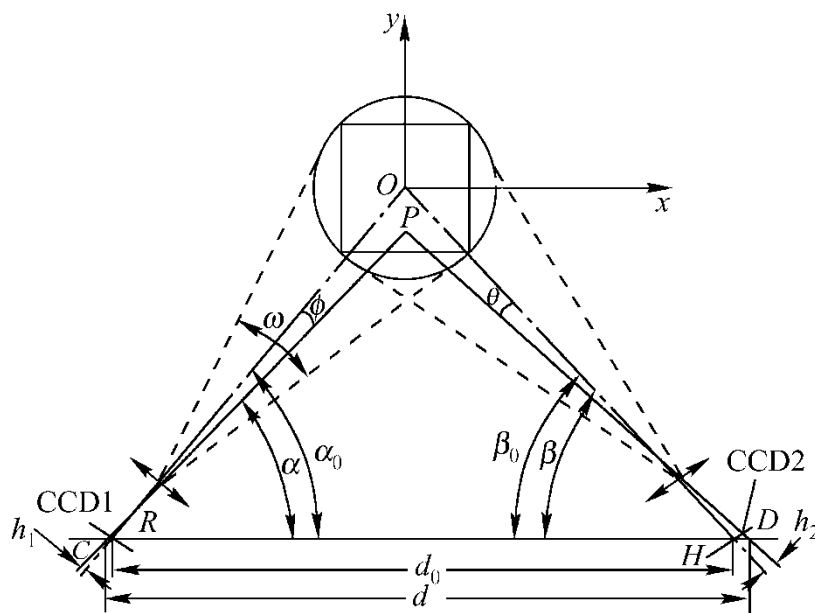


图9-41 两台**CCD**交汇测量空间目标坐标原理图

3. 基于热成像技术的应力分析

图9-42～图9-44是以三种光弹性材料作为研究对象，在同等受力条件下红外热成像和光弹性测试的对比实验结果。

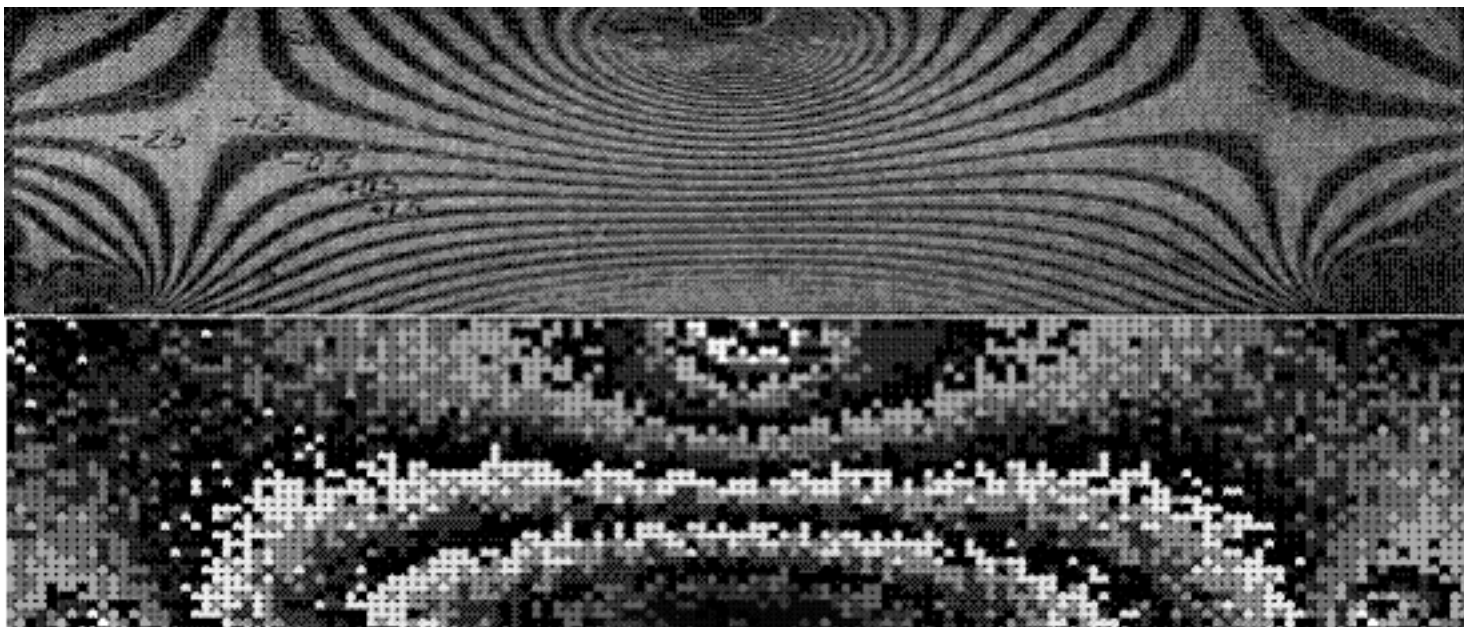


图9-42 三点弯曲梁的等和线和红外热图

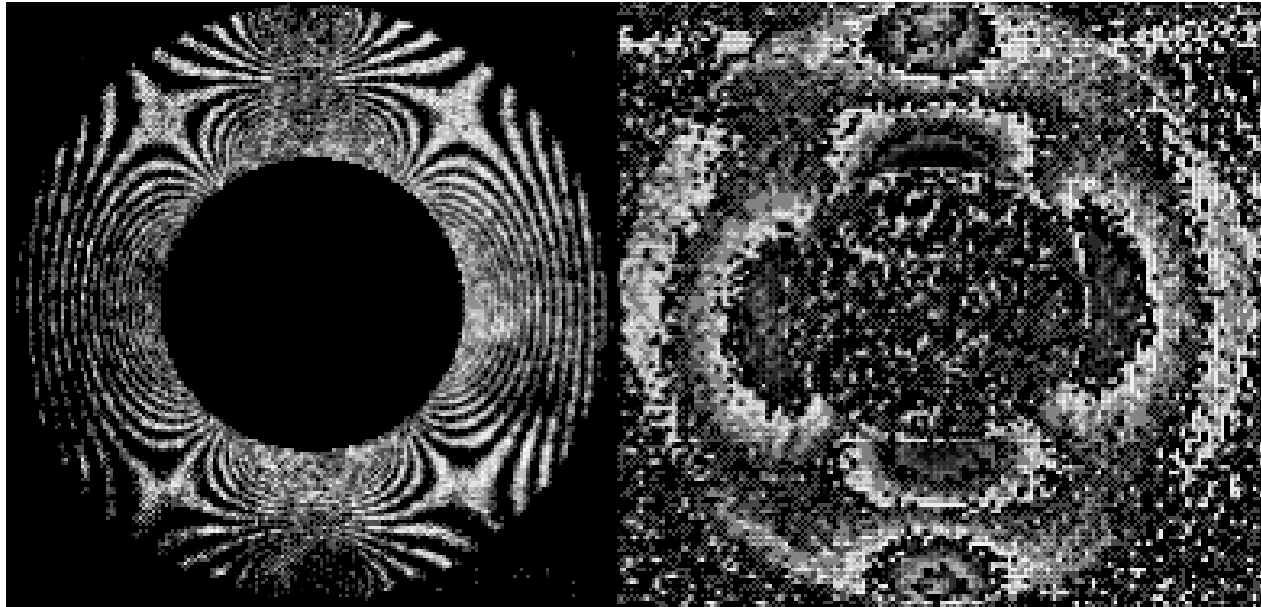


图9-43 径向受压圆环的等和线和红外热图

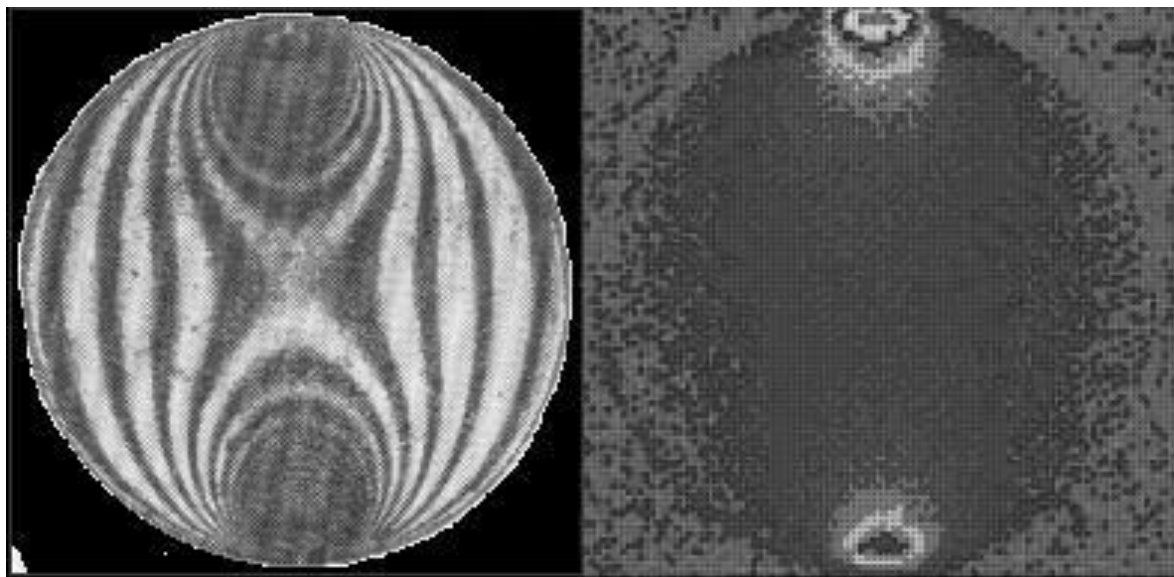


图9-44 径向受压圆盘的等和线和红外热图

基于热成像技术的应力分析具有如下特点。1) 等和线条纹和红外辐射等温层的形状极其相似；2) 区域分布对应性很好，高应力区温度变化大，而低应力区温度变化小，并且等和线条纹和等温层的梯度变化是相似的；3) 拉应力区和压应力区分别对应着红外辐射降温区和升温区，而在等和线图中，拉应力区和压应力区分别对应着正级和负级条纹；4) 零应力区有明显的对应，比如拉、压应力区的交界。

这说明，应力变化对应着等和线与等温层的变化，这种对应关系是有确定性的，呈线性关系。