

# 全息光学设计

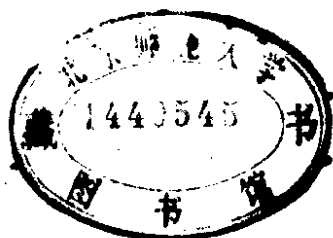
陈 晃 明 编著

科 学 出 版 社

J21154103

# 全息光学设计

陈晃明 编著



科学出版社

1987

## 内 容 简 介

本书系统地叙述了全息光学系统的设计问题,提供了全息光学设计所必需的理论知识和最新的设计方法,并着重讨论了全息光学元件的制作方法和成像原理、三级象差理论和高级象差理论、光路计算和光学自动设计、波数计算、点列图和光学传递函数的计算等。书中介绍了几种典型的全息光学系统和它们的实际应用。最后,对光学零件的技术要求以及程序的操作和使用作了说明。

本书可供高等院校光学专业的师生及研究生阅读,亦可作为近代光学及全息光学方面的科研人员和工程技术人员的参考书。

## 全 息 光 学 设 计

陈晃明 编著

责任编辑 刘海龄

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院科技印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1987年8月第一版 开本: 787×1092 1/32

1987年3月第一次印刷 印张: 12

印数: 0001—2,400 字数: 272,000

统一书号: 15031·785

本社书号: 5061·15-4

定价: 2.85元

## 绪 言

全息光学设计是近代光学发展的一个分支，它研究的成象原理与普通光学系统不同，不是建立在光的折射和反射理论的基础上，而是建立在光的干涉和衍射理论的基础上。全息光学理论早在本世纪四十年代就有人提出，但由于技术条件不足，未能在实际中获得应用。直到六十年代初激光的出现，使得单色光在全息干板上进行记录成为可能，它才获得了迅速的发展。全息光学元件不但具有良好的成象性质，而且具有普通光学元件所达不到的光学性能。全息光学设计是为了解决近代光学中出现的一系列新问题和满足现代光学仪器高性能要求而诞生的一门学科，它有着广阔发展的前景。

目前，英国国家物理实验室和美国亚里桑那（Arizona）光学中心有许多专业人员进行这方面的研究工作。他们所研制出来的头盔显示器和歼击机上的平视显示器，是全息光学设计的最新成果。在这两种光学仪器中，都包含有一个全息光学元件，把光学仪器的技术战术性能发挥到了理想的程度，在实战中取得了十分满意的效果。国外关于这方面发表的具有实用价值的书籍和论文不多，而关于全息术的理论研究和初级象差计算的论文却有一定的数量，至于用于全息光学设计的电子计算机程序和制作全息光学元件的新工艺则完全处于保密状况。

我在该领域的研究中，先后指导了数名硕士研究生进行了具体的理论工作和作了大量的实验，并取得了一些成果，本书中的个别章节的内容和数据取材于研究生论文精华。绿

• • •

波对本书的最后完成做了许多有益的工作。

高级工程师盛尔镇同志审阅了本书的全稿，并提出了许多宝贵的意见，在此表示感谢。

陈晃明

1985年4月

# 目 录

|                                        |     |
|----------------------------------------|-----|
| 绪言                                     | 1   |
| 第一章 概论                                 | 1   |
| 1.1 全息光学发展简史                           | 1   |
| 1.2 透射和反射全息光学元件                        | 3   |
| 1.3 光衍射成象的基本公式                         | 5   |
| 1.4 光在二次曲面上的衍射                         | 8   |
| 1.5 符号规则                               | 13  |
| 1.6 理想光学系统                             | 17  |
| 1.7 细光束象散计算                            | 18  |
| 第二章 三级象差理论                             | 30  |
| 2.1 记录时参考光及物光中心联线通过全息光学元件对称中心时的成象及象差公式 | 31  |
| 2.2 由两束平行光记录的全息光学元件的成象及象差公式            | 52  |
| 2.3 球基面上记录面对面成象的象差公式                   | 60  |
| 2.4 用象差波前记录对再现的影响                      | 72  |
| 2.5 单个同轴全息光学元件的齐明条件和消象散条件              | 77  |
| 2.6 外光瞳离轴全息光学元件点对点成象的三级象差公式            | 81  |
| 2.7 外光瞳离轴全息光学元件子午面内面对面成象的三级象差公式        | 88  |
| 2.8 外光瞳离轴全息光学元件弧矢面内面对面成象的三级象差公式        | 96  |
| 2.9 象差分析                               | 100 |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 第三章 高级象差理论.....                  | 105 |
| 3.1 平面全息光学元件的高级象差.....           | 105 |
| 3.2 球面全息光学元件的高级象差.....           | 114 |
| 3.3 高级球差及其分布.....                | 121 |
| 3.4 高级相对弧矢彗差(正弦差)及其分布.....       | 126 |
| 3.5 高级象散及其分布.....                | 128 |
| 3.6 高级场曲及其分布.....                | 135 |
| 3.7 高级畸变及其分布.....                | 139 |
| 3.8 色差及其分布.....                  | 141 |
| 3.9 计算实例.....                    | 144 |
| 第四章 光路计算.....                    | 149 |
| 4.1 概述.....                      | 149 |
| 4.2 近轴光线光路计算公式.....              | 150 |
| 4.3 矢量法空间光线光路计算公式.....           | 155 |
| 4.4 轴上点球差的光路计算.....              | 165 |
| 4.5 轴外点主光线和畸变的光路计算.....          | 173 |
| 4.6 轴外点宽光线的场曲和彗差的光路计算.....       | 176 |
| 4.7 象差总结公式.....                  | 179 |
| 4.8 全息光学元件的坐标转换.....             | 182 |
| 4.9 计算实例.....                    | 185 |
| 第五章 光学自动设计.....                  |     |
| 5.1 光学自动设计的发展概况.....             | 189 |
| 5.2 光学自动设计的基本数学公式.....           | 192 |
| 5.3 阻尼最小二乘法光学自动设计.....           | 193 |
| 5.4 适应法光学自动设计.....               | 197 |
| 5.5 0.618优化法光学自动设计.....          | 200 |
| 5.6 光学自动设计中的线性检查与步长控制.....       | 207 |
| 5.7 用垂轴象差曲线所围面积作评价函数的光学自动设计..... | 213 |
| 5.8 光学自动设计中的相关象差.....            | 222 |

|      |                 |     |
|------|-----------------|-----|
| 5.9  | 摆脱光学自动设计中病态的措施  | 228 |
| 5.10 | 计算实例            | 230 |
| 5.11 | 全息光学元件的等效透镜     | 241 |
| 第六章  | 波差计算            | 252 |
| 6.1  | 波差的级数展开式        | 252 |
| 6.2  | 普通光学系统的波差       | 255 |
| 6.3  | 全息光学元件的波差       | 256 |
| 6.4  | 光程差的确定          | 260 |
| 6.5  | 全息光学系统的波差       | 265 |
| 6.6  | 波差程序            | 269 |
| 第七章  | 点列图和光学传递函数计算    | 273 |
| 7.1  | 几何渐晕和象差渐晕       | 273 |
| 7.2  | 用双半椭圆法逼近光瞳计算点列图 | 275 |
| 7.3  | 在光栏面控制渐晕追迹光线    | 277 |
| 7.4  | 光学传递函数          | 281 |
| 7.5  | 计算实例            | 286 |
| 第八章  | 全息光学系统          | 298 |
| 8.1  | 全息头昼夜视仪光学系统     | 298 |
| 8.2  | 普通平视显示器光学系统     | 303 |
| 8.3  | 全息平视显示器光学系统     | 309 |
| 8.4  | 对全息光学元件的要求      | 314 |
| 第九章  | 光学零件的技术要求与制图    | 317 |
| 9.1  | 光学玻璃的质量指标       | 317 |
| 9.2  | 光学零件技术要求        | 321 |
| 9.3  | 光学零件尺寸公差        | 328 |
| 9.4  | 光学制图            | 338 |
| 第十章  | 程序操作和使用说明       | 351 |
| 10.1 | 程序功能            | 351 |
| 10.2 | 数据填写格式          | 353 |
| 10.3 | 打印输出格式          | 359 |

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 10.4 程序总框图和上机操作..... | 363 |
| 附录 .....             | 366 |
| 玻璃光学常数和温差光学常数 .....  | 386 |

# 第一章 概 论

## 1.1 全息光学发展简史

在现有的许多光学仪器中，都是依据光的反射和折射成象的，基本公式用斯涅尔定律来描述。不同的透镜（包括正或负透镜、胶合或分离透镜）、棱镜（包括平板玻璃或分划板）和反射镜（平面或球面）的有机组合，并且使各自的象差相互补偿，就构成各式各样的光学仪器，它们基本上能够满足现代科学技术所提出的一系列要求。但是，光除了反射和折射的性质以外，还有衍射的性质。最早利用光的衍射性质做成的光学元件有费涅尔波带片，其作用与一块普通的透镜相当，而外形恰似一块玻璃平板。由于它的衍射效率很低，未能实际应用。由于激光和全息术的发展，具有较高衍射效率的全息光学元件被认为具有新的生命力，它和普通透镜一样，能起成象作用。利用全息光学元件研制而成的光学仪器不但重量轻，而且制作方便。此外，它还可以满足一些特殊的要求。在这一新的科学领域中进行的工作，对研制配备有全息光学元件的新型光学仪器具有重大的意义。

近十余年来，全息光学元件的设计和制造有了很大的发展。它和透镜一样，能够对物体成象，而且还可以和透镜或反射镜组合在一起，构成复合光学系统。但是，全息光学元件的成象原理和透镜不同，前者基于光的衍射效应，而后者则是光的折射和反射，不难理解，在一个包含全息光学元件的系统中，既要考虑到光的衍射效应，又要考虑到光的折射和反射。

“全息”二字来源于希腊字，意思为“信息的全部记录”。它的形成分为两个步骤：第一步骤为实物被相干光照明后，实物的散射光与参考光在感光干板上形成干涉条纹；第二步骤为在显影后的干板上用相同波长的光波照射，便可以再现出原物体的三维图象。这一原理于1948年由英国伦敦帝国理工学院的丹尼斯·加伯(D. Gabor)首先提出，称为全息术。在当时的条件下，由于找不到能够产生足够相干光的光源，他的工作进展缓慢。直到六十年代初期，高度相干性的激光的出现，推动了全息术的发展，全息术的面貌焕然一新，他的实验才获得成功，并于1971年被授予诺贝尔物理学奖金。

全息术的下一个突破是利思(Leith)和乌帕尼克(Upatnieks)于1962年提出离轴全息图的概念，也就是记录时两相干光波与全息光学元件的对称轴不重合。这种实验比丹尼斯·加伯的实验要复杂一些。这样，记录时的物体可以从各个侧面被照明，再现时的物体是三维的，栩栩如生。此外，参考光波不限定为平面光波。

从七十年代开始，全息术的应用不限定在获得三维再现图象上，它只能作为一种艺术品供人欣赏，而是试图研制包含全息光学元件在内的光学产品，这类产品在某些光学特性方面有着普通光学仪器无法媲美的优越性。例如：美国鹰式战斗机和大黄蜂号强击机上的光学瞄准具，于1980年由配备有全息光学系统的平视显示器更新。这种瞄准具使战斗机空战和俯冲的战术技术性能有了明显的提高。1982年英国、意大利和西德联合研制的旋风战斗机及其上的瞄准设备，使驾驶员容易看准敌机和击中目标。英国研制出的另一个全息产品是头盔夜视仪。利用这种仪器在微弱的星光下能够看清一公里远的目标，又叫星光镜，它在1982年英国与阿根廷在马岛冲突中被英军使用，显示了威力。1983年美国亚利桑那光

学中心研制的全息望远镜，具有结构简单、体积小和重量轻的优点。

随着全息光学产品的陆续投入使用，全息光学象差理论、全息光学自动设计、全息光学元件制造工艺和记录材料也在不断的发展，日趋完善。这些都是在最近几年里出现的事情，说明全息光学设计是一门崭新的学科，有着光辉的发展前景。

## 1.2 透射和反射全息光学元件

全息光学元件为衍射成象元件。最早的衍射成象元件是1871年由瑞利制成的费涅尔波带片，它由半径与整数的平方根成比例递增的透明与不透明相间的圆环组成，半径与整数的关系为：

$$\rho_n = \sqrt{n\lambda f} \quad (1.1)$$

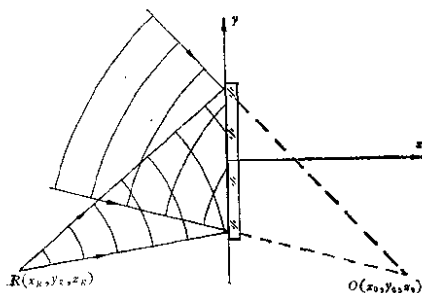


图1.1 平面全息光学元件曝光的几何位置

其中 $\rho_n$ 为第 $n$ 个圆环半径， $n$ 是整数， $\lambda$ 为波长， $f$ 为焦距。自六十年代激光和全息术发展起来以后，可以用相干的点光源制成的全息图来代替波带片，这就是全息光学元件（在国外文献中缩写为HOE），也称“全息透镜”。

全息光学元件是在感光干板上制成的新型光学元件。图1.1所示为一平面全息光学元件，它对两束相干的球面波曝光。两束光的坐标分别用 $O(X_o, Y_o, Z_o)$ 和 $R(X_R, Y_R, Z_R)$ 表示， $O$ 为物光波， $R$ 为参考光波，其位置可以在空间任意点。两束光叠加以后在照相干板（与 $Y$ 坐标轴重合）上形成一系列弧形干涉条纹，经过暗室处理以后，便能衍射聚焦，其作用如同透镜一样。

图1.2表示制作全息光学元件的最简单的光学原理图。其中（a）物光和参考光位在照相干板的同侧，形成透射全息光学元件；而（b）则物光和参考光分别位在照相干板的异侧，形成反射全息光学元件。激光被分束器BS分成两路，分别被反射镜 $M_1$ 和 $M_2$ 反射，由透镜 $L_1$ 和 $L_2$ 聚焦，经过光栏 $S_1$ 和 $S_2$ 以后，由单色光形成的两个球面波在干板上发生干涉。如果制作时采用具有球差的单色点光源所产生的波前进行记录，还能补偿全息光学元件本身所产生的球差，从而获得良好的象质。利用不同干涉条纹的全息光学元件的组合，可以消象差。

为了设计一个全息光学元件，需要进行光路和象差计算。考虑到它与普通透镜和反射镜的组合，我们采用“衍射光线”的概念，计算出来的仍为“几何象差”。无论衍射光线的象差或折射光线的象差，都可以纳入一起平衡。在全息光学元件的诸象差计算中，细光束象散，连同子午和弧矢场曲的计算尤为重要，正如同对普通透镜系统一样，必须计算这些象差；此外，还必须计算宽光束的各种象差。

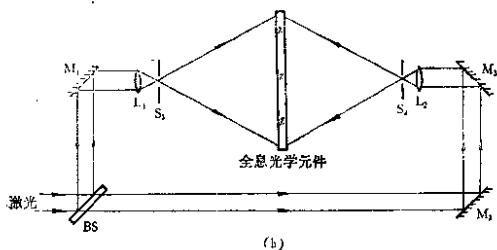
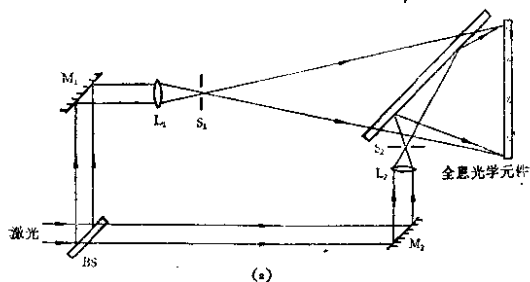


图1.2 全息光学元件的制作

### 1.3 光衍射成像的基本公式

在图1.3中，(a)表示全息干板在单色相干光照射下记录的情形，(b)则为再现时的情形。

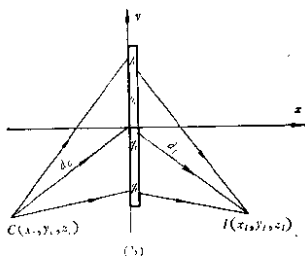
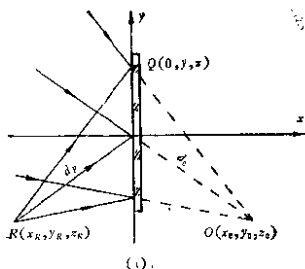


图1.3 全息光学元件的成象和再现光路

设记录时两光源  $R$  和  $O$  在记录介质表面上的复振幅为:

$$R = R_0 e^{i\varphi_R}$$

$$O = O_0 e^{i\varphi_O} \quad (1.2)$$

式中  $R_0$  和  $O_0$  分别为记录时参考点振幅和物点振幅,  $\varphi_R$  和  $\varphi_O$  分别为记录时参考点位相和物点位相。在线性记录下, 透射系数为:

$$T = (R_0^2 + O_0^2) + O_0 R_0 [e^{i(\varphi_O - \varphi_R)} + e^{-i(\varphi_O - \varphi_R)}] \quad (1.3)$$

再现时, 类似地可以设物光波的复振幅为  $C_0 e^{i\varphi_C}$ , 则衍射光波的复振幅等于:

$$I = T C_0 e^{i\varphi_C} = (R_0^2 + O_0^2) C_0 e^{i\varphi_C}$$

$$+ O_0 R_0 C_0 [e^{i(\varphi_C + \varphi_O - \varphi_R)} + e^{-i(-\varphi_C + \varphi_O - \varphi_R)}] \quad (1.4)$$

式中:

$$(R_0^2 + O_0^2) C_0 e^{i\varphi_C}$$

$$O_0 R_0 C_0 e^{i(\varphi_C + \varphi_O - \varphi_R)}$$

$$O_0 R_0 C_0 e^{-i(-\varphi_C + \varphi_O - \varphi_R)}$$

把衍射光波看作象光波, 写为:

$$I = I_0 e^{i\varphi_I} \quad (1.5)$$

为零级衍射光波

为正一级衍射光波

为负一级衍射光波

并认定正一级衍射光波为我们所采用的象光波，则正一级象的位相由下式决定：

$$\varphi_i = \varphi_o + (\varphi_o - \varphi_R) \quad (1.6)$$

式中  $\varphi_i$ ,  $\varphi_o$ ,  $\varphi_o$  和  $\varphi_R$  分别为再现时的象点位相、物点位相及记录时的物点位相、参考点位相。

利用二项展开式求  $\varphi_o$  的表达式，并忽略高次项，由图 1.3 (a) 得到：

$$\begin{aligned} \varphi_o &= \frac{2\pi}{\lambda} \{ [x_o^2 + (y - y_o)^2 + (z - z_o)^2]^{\frac{1}{2}} - d_o \} \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} \{ [d_o^2 + (y^2 + z^2) - 2(y y_o + z z_o)]^{\frac{1}{2}} - d_o \} \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} \{ d_o [1 + \frac{(y^2 + z^2) - 2(y y_o + z z_o)}{d_o^2}]^{\frac{1}{2}} - d_o \} \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} \left\{ \frac{1}{2} \frac{(y^2 + z^2) - 2(y y_o + z z_o)}{d_o} + \dots \right\} \end{aligned}$$

同理可以得到  $\varphi_R$ ,  $\varphi_i$  和  $\varphi_o$  的表达式，并注意到  $\lambda'$  为再现时的波长，则有：

$$\begin{aligned} \varphi_R &= \frac{2\pi}{\lambda} \left\{ \frac{1}{2} \frac{(y^2 + z^2) - 2(y y_R + z z_R)}{d_R} + \dots \right\} \\ \varphi_i &= \frac{2\pi}{\lambda'} \left\{ \frac{1}{2} \frac{(y^2 + z^2) - 2(y y_i + z z_i)}{d_i} + \dots \right\} \\ \varphi_o &= \frac{2\pi}{\lambda'} \left\{ \frac{1}{2} \frac{(y^2 + z^2) - 2(y y_o + z z_o)}{d_o} + \dots \right\} \end{aligned}$$

将以上四式与 (1.6) 式比较，并利用相同的系数项相等，对照  $(y^2 + z^2)$  项，得到：

$$\frac{1}{\lambda'} \frac{1}{d_i} = \frac{1}{\lambda'} \frac{1}{d_o} + \frac{1}{\lambda} \left( \frac{1}{d_o} - \frac{1}{d_R} \right)$$

如果令再现波长 $\lambda'$ 与记录波 $\lambda$ 之比为 $\mu$ ，则有：

$$\frac{1}{d_i} = \frac{1}{d_o} + \mu \left( \frac{1}{d_o} - \frac{1}{d_s} \right) \quad (1.7)$$

这就是全息光学元件近轴象点的高斯公式。对照 $y$ 项，可得：

$$\frac{y_i}{d_i} = \frac{y_o}{d_o} + \mu \left( \frac{y_o}{d_o} - \frac{y_s}{d_s} \right)$$

或者写作：

$$\cos \beta_i = \cos \beta_o + \mu (\cos \beta_o - \cos \beta_s) \quad (1.8)$$

同理，对照 $z$ 项，可得：

$$\frac{z_i}{d_i} = \frac{z_o}{d_o} + \mu \left( \frac{z_o}{d_o} - \frac{z_s}{d_s} \right)$$

或者写作：

$$\cos \gamma_i = \cos \gamma_o + \mu (\cos \gamma_o - \cos \gamma_s) \quad (1.9)$$

(1.8) 和 (1.9) 两式决定了所研究的衍射光线的方向。

#### 1.4 光在二次曲面上的衍射

现在来研究以二次曲面为基面的全息光学元件的空间光线衍射公式。可以把一个曲面分割为无数多个面积基元，每个面积基元可以近似地看作一个平面，我们取其中一个小面积基元 $S$ 进行研究，如图1.4所示。

为了表示 $S$ 的方位，可以在它的上面作两个相交的向量 $\mathbf{A}$ 和 $\mathbf{B}$ ，它们的叉积为 $S$ 面的法向量，用 $\mathbf{Y}$ 表示：

$$\mathbf{A} \times \mathbf{B} = \mathbf{Y} \quad (1.10)$$

在一般情况下，向量 $\mathbf{A}$ 与面积基元的切线方向一致。图1.5为通过向量 $\mathbf{A}$ 且垂直切面的截面，其中 $d_A$ 为光栅间距， $\mathbf{C}$ 为再现光波的方向， $\mathbf{l}$ 为衍射光波的方向。设再现光波和衍