

光盘用双非球面不晕透镜设计

史 光 辉

摘要: 介绍一种校正球差和正弦差的, 含有10次方项的双非球面自动设计程序。用该程序设计出焦距为4.5mm, 数值孔径为0.45的双非球面透镜。用实例讨论了折射率, 厚度和工作距离对透镜质量的影响。

一、前 言

用于激光电视唱片光盘拾取器的物镜, 是光盘的关键部件之一。该物镜的成像质量对光盘读出信号的质量, 有决定性的影响。这类物镜的像质要求达到衍射极限所决定的分辨率。如果采用球面透镜, 需4—5片镜片。这会增加重量和成本。近年来日本, 荷兰等国家相继研制出了双非球面塑料透镜^[1]。不仅结构简单, 重量轻, 成本低, 而且成像质量也比球面透镜优良。用玻璃制作双非球面透镜也初步取得了成功^[2]。

二、设计方法和自动设计程序介绍

为获得有一定视场的, 高质量的物镜, 即不晕物镜, 必须校正好球差 (LA') 和正弦差 (OSC')。对于单透镜来说, 就要求采用两个非球面。一般激光电视唱片光盘用物镜的焦距 $f' = 4.5\text{mm}$, 数值孔径 $NA = 0.45$ 。根据实际设计经验表明, 须采用10次方非球面方程。即:

$$x = -\frac{1}{2R}y^2 + By^4 + Cy^6 + Dy^8 + Ey^{10} \quad (1)$$

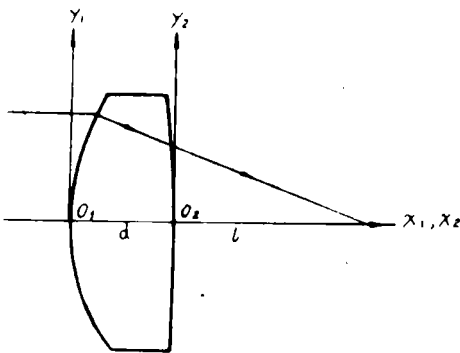


图 1

式中 R 为轴上点曲率半径。因为非球面化是在已知球面基础上进行的。因此 R 是已知的。其他四个系数 B , C , D 和 E 是要求的未知数。坐标原点取在轴上曲率半径的顶点。 x 为横坐标轴, y 为纵坐标轴 (图 1)。

两个非球面方程, 需求出八个未知数, 对应需校正的像差数, 就需八个。因此需选择四个孔径。让每一个孔径的球差和正弦差, 经自动设计后, 都达到预定的目标值。这里的变数和像差目标值是相等的。又由于方程的幂次最高达10次, 随着幂次增加, 变量和像差改变量之间已远非线性关系。为解决这一问题, 对应八个变量, 需加进八个阻尼系数。但因方程的各个系数之间的差别很大, 经常在几个数量级。因此这样的阻尼系数是不容易给定的。为解决这一困难, 我们采用了逐面、逐个像差、逐个孔径、逐次接近的方法, 逐个地求出每个未知数。详细过程见图 2 所示程序逻辑框图。为节

省篇幅，框图仅以校正两个孔径的两种像差，求两个方程的四个系数 B_1, C_1 和 B_2, C_2 为例。求 D_1, E_1 和 D_2, E_2 的过程与求 B_1, C_1 和 B_2, C_2 的过程相同。

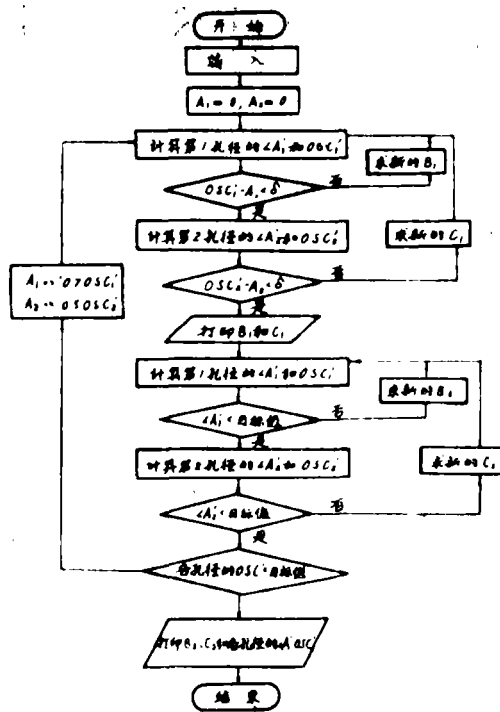


图2 求 B_1, C_1 和 B_2, C_2 的程序逻辑框图

在初始自动设计时，可选择的四个孔径为 1，0.8，0.6 和 0.3。从大到小顺次称为第 1 孔径，第 2 孔径，第 3 孔径和第 4 孔径。用前次自动设计得到的八个方程系数，再计算出其他孔径的球差和正弦差，并绘出像差曲线图，看整个孔径范围内各带像差大小是否合适。若各带像差大小差的比较大。就再重新选择孔径，在前次基础上，再次进行自动设计。直到满意为止。一般情况下，两次就够了。

已知前一次叠代时的方程系数为 x_n 。求新的方程系数 x_{n+1} ，用公式：

$$x_{n+1} = x_n - K \cdot \frac{f(x) \cdot h}{f(x+h) - f(x)}$$

$f(x)$ 和 $f(x+h)$ 分别为参变量 x 加进一个小量 h 前和后的像差和像差目标值之差。 K 为阻尼系数。对于我们的设计，第 1 孔径取 $K = 1$ ，第 2 孔径取 $K = -1$ ，第 3 孔径取 $K = 0.5 \sim 1$ ，第 4 孔径取 $-0.2 \sim -0.4$ 较为合适。根据前后两次叠代后像差的变化量的差异，就可很容易地选定 K 值。

前面提到，非球面化是在球面的基础上进行的，为此在初始自动设计前，要按球面给出方程（1）的各项系数。为求出这些系数，将 $x = R - \sqrt{R^2 - y^2}$ 中的 $\sqrt{R^2 - y^2}$ 按级数展开，就会得出：

$$B = \frac{1}{8R^3}$$

$$C = \frac{1}{16R^5}$$

$$D = \frac{3}{128 R^7}$$

$$E = \frac{7}{256 R^9}$$

根据非球面的初级像差理论, 若将光栏放在第 2 面上, 则将该球面非球面化, 只影响球差, 不影响正弦差。因此, 我们确定, 先将第 1 面非球面化校正正弦差, 后将第 2 面非球面化校正球差。这样可以减少叠代次数。但实际上, 由于高级量有变化, 实际正弦差, 还是要变的, 只是变化量小些。所以还得反复叠代。直到满足目标值要求为止。初始进行自动设计时, 可设正弦差的各孔径的目标值 A_1, A_2, A_3 和 A_4 皆为零。以后的目标值可取为前次叠代后产生的剩余正弦差反号。每个孔径的像差校正应该是 $OSC' - A < \delta$ 。 δ 可根据要求给定。实践证明, 在目标值前加权可以减少叠代次数。权的大小按孔径的顺序可分别取为 0.7, 0.5, 0.3 和 0.1。球差的目标值始终为零。

为了计算球差和正弦差, 只算子午光线就够了。为了求出光线在折射面上的入射高度 y , 采用逐次接近法直到满足下式为止

$$y \cot u + x - L \approx 0$$

式中 U 为入射孔径角。 L 为物距。 x 由 (1) 式求出。初次叠代时, 可取 $y = L \cdot \tan u$ 。

三、设计结果

取焦距 $f' = 4.5\text{mm}$, 数值孔径 $NA = 0.45$, 物距为无限远, 工作距离 $l' = 2\text{mm}$ 。分别对四种折射率 $n = 1.5, 1.6, 1.7$ 和 1.8 进行了设计。初始自动设计用到的球面透镜弯曲状态皆取处于接近球差极小值位置。在弯曲时, 调整厚度来满足工作距离的要求。球差处于极小值时, 正弦差也很小。设计结果得到的各方程系数见表 1。从表 1 可见, 在四种情况中, 第 1 面的非球面方程只用到了 6 次方项或八次方项。(D, E 的初始值都给了零) 第 2 面都用到了 10 次方项。对应的全孔径内各带球差均小于 $1/6 \sim 1/15$ 焦深。(取波长 $\lambda = 0.6328\mu\text{m}$, 焦深为 0.003mm)。正弦差皆小于 0.0005。用长春光机所和成都光电所联合编制的程序 CAOD—1 计算了波像差 RMS。在未离焦情况下, 计算结果见表 2。

表 1 经自动设计得出的各种折射率透镜非球面方程系数

| n | R | d | B | C | D | E |
|-----|---------|-------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 1.5 | 3.021 | 5 | 1.7×10^{-8} | -1.78×10^{-6} | -5.8×10^{-6} | 0 |
| | -3.952 | | 2.42×10^{-2} | -1.16×10^{-2} | 4.98×10^{-3} | -1.08×10^{-8} |
| 1.6 | 3.380 | 5 | 1.31×10^{-8} | -5.24×10^{-6} | 0 | 0 |
| | -5.965 | | 1.45×10^{-2} | -1.16×10^{-2} | 7.99×10^{-3} | -2.32×10^{-8} |
| 1.7 | 3.601 | 4.958 | 1.23×10^{-8} | -4.32×10^{-6} | 0 | 0 |
| | -11.181 | | 7.84×10^{-3} | -7.73×10^{-3} | 4.94×10^{-3} | -1.32×10^{-8} |
| 1.8 | 3.900 | 4.875 | 8.6×10^{-4} | 6.02×10^{-6} | -5.89×10^{-6} | 0 |
| | -20.800 | | 1.86×10^{-3} | -5.96×10^{-4} | -8×10^{-4} | 3.27×10^{-4} |

表 2 各种折射率透镜的波差 RMS

单位: λ

| 半视场 \ n | 1.5 | 1.6 | 1.7 | 1.8 |
|---------|-------|-------|-------|-------|
| 0° | 0.005 | 0.008 | 0.006 | 0.006 |
| 1.42° | 0.020 | 0.019 | 0.014 | 0.067 |
| 2° | 0.038 | 0.039 | 0.083 | 0.142 |

四、几种影响透镜质量的因素

1. 折射率的影响

由表 2 可知, 各种折射率透镜的轴上像点的波差 RMS 在 $.005 \sim .008\lambda$ 之间, 可以认为, 就轴上点像质而言, 各种折射率透镜的像质几乎没有差别, 都达到了理想像质 (一般认为, $RMS < .07\lambda$, 就满足瑞利极限要求)。出乎意料的是, 轴外点的像质, 折射率低的反而比折射率高的好。 $n = 1.7$ 和 1.8 的透镜, 在 2° 视场时, RMS 已超过了 $.07\lambda$ 。分别对这两种透镜进行离焦计算。结果 $n = 1.7$ 的透镜, 在 2° 视场内, RMS 均可小于 $.07\lambda$ 。而 $n = 1.8$ 的透镜, 在 2° 视场时, 仍然大于 $.07\lambda$ 。这说明低折射率透镜反而比高折射率透镜容易获得更大的视场。

表 3 为不同折射率透镜的非球面度。非球面度被定义为在透镜边缘点非球面矢高和轴上点半径在该点矢高之差。

从表 3 可见, 随折射率的增高, 非球面度显著下降。小的非球面度对加工有利。非球面度增加到某种程度, 光线将有可能在透镜边缘发生全反射。用 $n = 1.4$, 在相同情况下进行自动设计, 结果总是出现折射角大于 90° 的现象。致使自动设计无法进行下去。这说明高折射率比用低折射率容易得到大的数值孔径。

表 3 各种折射率透镜的非球面度

单位: μm

| n | 1.5 | 1.6 | 1.7 | 1.8 |
|-------|-----|-----|-----|-----|
| 第 1 面 | 74 | 49 | 36 | 28 |
| 第 2 面 | 13 | 6 | 2.6 | 0.7 |

2. 透镜厚度的影响

根据国外文献报导^[3], 厚度 d 影响透镜的偏心差。偏心差对透镜压铸工艺有很大影响。为验证这一结论, 我们选 $n = 1.7$ 为例, 对一系列不同厚度进行了自动设计, 用设计得到的结果计算了它们的偏心差。只用 6 次方非球面方程就够了。工作距离和厚度一定时, 透镜的两个半径是唯一的, 可用公式直接求出。偏心差计算采用了我们常用的公式:

$$\delta_i = \frac{S_{2i}}{\left(\frac{\frac{k}{2} S_1}{y_i} + \frac{\frac{k}{2} S_{11}}{\eta_i} \right) - \left(\frac{\frac{k}{2} S_1}{y_{i+1}} + \frac{\frac{k}{2} S_{11}}{\eta_{i+1}} \right)}$$

δ_i 为第 i 面的中心偏差, S_{2i} 为允许的第 i 面产生的中心彗差系数。 S_1 和 S_{11} 分别为球差系

数和彗差系数。 y_i 和 η_i 分别为第 i 面物方光栏高和物高。 k 为系统总面数。在计算 S_i 和 S_{i1} 时, 除了球面外, 还需加上由于非球面化产生的增量 ΔS_i 和 ΔS_{i1} :^[4]

$$\Delta S_i = (n - n') \left(-8B + \frac{1}{R^3} \right) y^4$$

$$\Delta S_{i1} = \Delta S_i \cdot \frac{y_p}{y} \quad (2)$$

y_p 为主光线在折射面上的高度。

S_{2i} 的值取允许透镜产生的中心彗差对应的波差为 $\lambda/10$, 并按均方差分配到每个面上对应的值。得出的 δ_i 变成分, 即:

$$\alpha_i = \frac{\delta_i}{R_i \times .00029} \quad (\text{分})$$

再选两面中 α 最小的, 作为透镜的偏心差。计算结果见表 4

| d | 3.6 | 3.8 | 3.9 | 4.0 | 4.1 | 4.2 |
|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| α | 0.9 | 1.6 | 2.3 | 3.7 | 1.2 | 0.2 |

由表 4 可见, 厚度为 4 mm 时, 允许的偏心差最大。大于和小于 4 mm 的偏心差都迅速变小。这说明对应偏心差的最大值、存在一个最适厚度。这是在设计双非球面透镜时, 应当考虑的一个重要因素。

此外, 厚度对像差校正亦很有影响。据公式(2)可知, 第 1 面的 y_p/y 值愈大, 对校正正弦差愈有利, 当厚度小到接近零时, 正弦差校正就变成不可能了。因此, 为校正好双非球面透镜的两种像差, 透镜就必需有足够的厚度。

3. 工作距离的影响

以 $n=1.7$, 工作距离分别为 2, 2.5, 3, 3.5 为例进行了设计。提供给自动设计的球面透镜的球差仍取极小值。表 5 给出了在不离焦情况下, 不同工作距离时的波差 RMS 。从表 5 可见, 轴上点的波差 RMS 随工作距离的增加迅速变大。轴外点变化缓慢, 当大到 3.5 时, 轴外点的 RMS 反而下降, 但这时的轴上点 RMS 显著变大。考虑到实际的高焦效果, 波差 RMS 随工作距离的增加, 总的还是变大了。

| 半视场 | d | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 |
|-----|-------|------|------|------|------|
| | 0° | .006 | .010 | .017 | .034 |
| | 1.42° | .044 | .049 | .046 | .035 |
| | 2° | .083 | .093 | .090 | .071 |

表 6 为随工作距离的增加, 非球面度变化情况。显然非球面度随工作距离增加而变大了。

表 6 不同工作距离时的非球面度

单位: μm

| f' | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 |
|-------|-----|-----|-----|-----|
| 第 1 面 | 36 | 46 | 58 | 72 |
| 第 2 面 | 2.6 | 4.0 | 2.2 | 5.5 |

此外,随工作距离增加,透镜厚度逐渐变小,由前述理由,当工作距离增大一定程度时,由于厚度太小,将不可能用双非球面同时校正两种像差了。因此,在满足要求情况下,工作距离应尽量选择小些。

参 考 文 献

- [1] 高晓苹译,国外光学精密机械, No9, 1985, P1
- [2] 高晓苹译,光机情报, No11, 1986, P39
- [3] 吴秀丽译,光机情报, No 9, 1986, P23
- [4.] 王之江,光学设计理论基础,科学出版社, 305, 1965

Design of Aplanatic Lens with Two Aspheric Surfaces Used in Optical Disks

Shi Guanghui

Abstract

A method and program of automatic design of lens with two aspheric surfaces are given in this paper. The highest order of the term in the equation used in the program is 10 of power. Using this program a two aspheric surface lens with focal length $f' = 4.5\text{mm}$ and numerical aperture $NA = 0.45$ has been designed. The effect of index, working distance and thickness of the lens on its image quality is discussed.