

二次非球面光学系统的自动优化

王永仲

(应用物理系)

摘要 本文讨论二次非球面光学系统在计算机上的自动设计与优化, 提出预优化思想及数学模型; 提出程序实施方案; 实现了以球面初始结构自动优化出二次非球面系统的构想。

关键词 计算机应用, 光学系统, 自动设计; 二次非球面, 预优化

分类号 F224.5, TP311

引言

人们对纯球面光学系统的认识已经比较充分, 但对含有非球面的光学系统, 却讨论不多。对它们在计算机上的自动设计与优化及其程序设计等重要问题, 至今很少有公开文献。因而, 光学仪器广泛采用非球面以自我更新的理想久未实现。诚然, 非球面的加工检测比球面困难, 但也不能因此固守旧习, 止步不前。何况, 随着光学加工技术的发展, 尤其是近年来面型复制工艺的日臻成熟, 制造非球面光学零件已经不像过去想象的那样困难。特别是理论和实践都表明, 非球面的采用可以明显简化光学系统的整体结构, 突出地提高光学性能, 因而近些年来实际采用非球面的光学仪器越来越多。同时计算机的广泛应用和光学自动设计技术的推广, 非球面在设计计算方面的困难已经可以克服, 这对非球面的应用又是一种极大促进。可见, 现在讨论含非球面光学系统的自动优化问题是有实际意义的。基于现实应用情况, 这里先就一般二次曲面进行讨论。

1 光路计算的矢量公式

因为光路计算是非球面自动设计的基础, 故先简略汇集适于计算机采用的矢量公式。本文采用图1所示的右手坐标系, 并遵循文献[1]所述的符号规则。

光线起始坐标是: 方向余弦 (α, β, γ) 投射点 $P(x, y, z)$ 据此可依下列公式追迹光线:

$$a = \alpha(d - x) - \beta y - \gamma z \quad (1)$$

$$M_x = x - d + \alpha a \quad (2)$$

$$M^2 = M_x^2 + (y + \beta a)^2 + (z + \gamma a)^2 \quad (3)$$

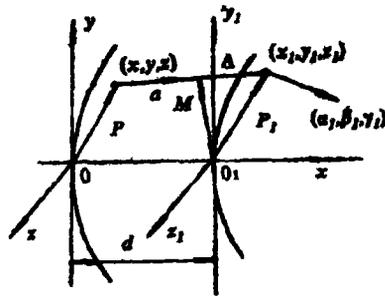


图 1

$$\delta = (\alpha + e^2 \alpha c M_x)^2 - (1 - e^2 \alpha^2) (M^2 c^2 - 2M_x c - e^2 c^2 M_x^2) \quad (4)$$

$$\Delta = (M^2 c - 2M_x - e^2 c M_x^2) / (\alpha + e^2 \alpha c M_x + \sqrt{\delta}) \quad (5)$$

$$D = \alpha + \Delta \quad (6)$$

$$x_1 = x - d + D\alpha \quad (7)$$

$$y_1 = y + D\beta \quad (8)$$

$$z_1 = z + D\gamma \quad (9)$$

$$K = 1 - e^2 \quad (10)$$

$$A = \sqrt{1 + c^2 e^2 (y_1^2 + z_1^2)} \quad (11)$$

$$u = 1 - cKx_1 \quad v = cy_1 \quad w = cz_1 \quad (12)$$

$$\cos I = |ua - v\beta - w\gamma| / A \quad (13)$$

$$\cos I' = \sqrt{1 - n^2 (1 - \cos^2 I) / n'^2} \quad (14)$$

$$g = n' \cos I' - n \cos I \quad (15)$$

$$\alpha_1 = n\alpha / n' + gu / (n'A) \quad (16)$$

$$\beta_1 = n\beta / n' - gv / (n'A) \quad (17)$$

$$\gamma_1 = n\gamma / n' - gw / (n'A) \quad (18)$$

式中 c , e 各为表面顶点曲率和表面离心率。

2 轴外细光束焦点与象散

对一般二次曲面, 主光线投射点处沿不同方位的曲率各异, 因而子午方位和弧矢方位的曲率半径应按下列公式分别计算:

$$r_s = \sqrt{1 + e^2 c^2 (y_1^2 + z_1^2)} / c \quad (19)$$

$$r_t = [1 + e^2 c^2 (y_1^2 + z_1^2)] r_s \quad (20)$$

进而按下式计算子午焦点和弧矢焦点:

$$n' \cos^2 I' / t' - n \cos^2 I / t = g / r_t \quad (21)$$

$$n' / s' - n / s = g / r_s \quad (22)$$

其转面过渡公式、象散公式均与球面系统相同。

纵观上述公式(1)~(22), 可以看出:

(1) 球面可作为离心率 $e=0$ 的特殊情况。当令 $e=0$ 时, 追迹光线的矢量公式便与球面系统的公式一致; 且(19)、(20)式的 $r_t=r_s=1/c$, (21)、(22)式便成为球面系统中的杨氏公式。

(2) 适于一般二次曲面的向量追迹公式和细光束焦点计算公式与球面系统的相应公式十分相似。这使我们可以很方便地将原来只适用于球面系统的有关程序改造成适用于球面和一般二次非球面的相应程序。

基于上述认识和分析, 我们重新设计了一个大型综合光学设计程序, 它继承了原有程序的特色和长处, 并适于球面和二次非球面, 因而适应了当前光学仪器越来越多地采用非球面的发展趋势。一年多的实践证明, 程序是成功的。用它设计的含非球面的光学系统, 具有结构简单、象质清晰等优点。

3 非球面的自动优化

在纯球面光学系统中, 每个表面只能为我们提供一个自由变量——表面曲率。而一般二次曲面则可提供二个独立的自由变量——近轴曲率和离心率。从光学自动设计的角度来看, 这正是我们所希望的, 它使我们得以控制更多的优化指标, 取得更好的设计质量。

在编制自动设计程序时, 特别要注意到以下问题:

- (1) 使光学系统以最简单的结构、最少的非球面个数取得最好的设计质量。
- (2) 自动设计过程能够方便地运用传统的手工设计经验(例如焦距缩放、光焦度交换、透镜弯曲、分步校正、象面离焦、列象差变化表等)。
- (3) 光学传递函数的计算能方便地穿插于自动设计过程中, 以便对各阶段的自动优化结果进行准确的评价; 或者对各种自动设计方案进行合理的分析比较。

考虑到上述第一点, 程序应该既能将原始非球面的近轴曲率和离心率同时进行优化, 还能把原始结构的球面按需要优化成非球面。对于由纯球面构成的起始结构, 程序可以分别挑选一个或几个表面, 使之向非球面变化, 以便找到最合适的非球面位置和结构。实现了这一点, 在确定初始结构时, 可以先当作纯球面系统进行考虑, 投入自动设计以后, 由程序寻求出合理的非球面。这样可以简化拟定初始结构的工作——因为考虑一个纯球面结构比考虑一个含非球面的结构简单得多, 故其实用意义不言而喻。但是, 以纯球面系统充当起始结构, 其象差必然很大, 投入适应法程序作自动设计时常因受控指标的相关而使优化过程半途中止, 这是我们经常碰到的一个突出矛盾。为了解决它, 我们设计了一个预优化指标 A_{rs} , 用它来对初始结构进行单一的诱导优化, 其构成是:

(1) 取轴上点、0.707 视场点和边缘视场点所对应的子午垂轴象差曲线, 按辛普生方法做数值积分, 得到三条曲线与相对孔径坐标轴所围成的曲边面积 A_{i_0} , $A_{i_{.707}}$, A_{i_1} ; 再按 4:2:1 的比例加权求和得到 A'_r , 以其初始值为度量单位进行规一化处理, 规化后记为 A_r 并贮存。

(2) 取 0.3 视场点、0.5 视场点和 0.85 视场点各自对应的弧矢垂轴象差, 并取用其在与子午面垂直方向上的分量, 作出垂轴象差曲线, 仿照上述办法处理后以规化量 A_s 贮存。

(3) 取 $A_{rs} = 0.5(A_r + A_s)$ 作为一个特殊的优化指标, 放在我们的适应法程序中, 以便在初始结构较差时引用它来实现对系统的预优化。

由于 A_{rs} 已通过规一化处理, 故它的目标值很容易确定: 希望光线弥散范围缩小为原来的一半时, 此目标值即为 0.5, 依此类推。可见, 上述规化处理的物理意义和数学意义都是明确的。因为设计者无法预知各个初始结构所对应的两种垂轴象差曲线面积的大小, 更无法知道将它们缩小到多少才合适, 因而, 不规一化处理便无法确定其目标值。这便是规化处理的实用价值——否则便无法在适应法程序中引用。

由于 A_{rs} 的下降意味着光线弥散范围从整体上减小, 它必定伴随着全系统结构参数的改善。因而, 它能控制系统进行优化是确定无疑的。同时, 这种预优化过程是以 A_{rs} 进行单一控制, 故不会出现相关问题。可见, 以 A_{rs} 为媒介解决前面指出的矛盾是有理

论根据的。我们的实践也证明了这一点。

因为 A_{TS} 不可能把系统的各项指标都优化到相应的目标值，故自始至终都引用这一个指标是不合适的，一般正常过程是：先用 A_{TS} 作预优化，接着按各单项指标（象差或边界条件）进行通常的适应法校正。这就要求程序有特殊的结构，以确保预优化和后续校正过程的相贯衔接，本程序已经做到了这一点。

值得说明，在计算 A_{TS} 时，各曲边面积皆以几何量论，以保证 A_{TS} 的下降确实伴随着光线弥散范围的缩小。显然， A_{TS} 是一个比传统的几何象差有更丰富象质信息的广义优化指标。

与纯球面系统相比，含有二次非球面的系统多了一类新的结构参数自变量——离心率 e ，计算象差有限差分， e 的一个标准步长 δe 取多大呢？按我们的实际体会， δe 可在 $0.0005 \sim 0.008$ 之间选取。当 e 的基数本来就比较大大（例如大于 1.5）时， δe 一般往大的方向取数；而当 e 的基数本身较小（例如小于 1）时， δe 一般取小一些。自动设计过程中若发现 e 的变化过快，要适当减小 δe 的取值；反之亦然。

4 设计实例

作为实例，我们把 [1] 所设计的双分离球面透镜照明系统改成含一个二次非球面的单透镜，其主要光学特性要求与原系统相同，即：

$$\text{物方孔径角 } U = -20^\circ$$

$$\text{象方孔径角 } U' = 10^\circ$$

$$\text{物距 } L \approx -18$$

我们先按光线折射作图法，确定一个纯球面单透镜，光束总偏角 $\Delta U = U' - U = 30^\circ$ ，由两表面平均分担，于是得到下面的初始结构：

r	d	n
19.75		1
	6.37	1.5163
-14.10		
		1
$f' = 17.025$	$l_F = -14.406$	$l'_F = 15.155$ $l'_0 = 104.504$

按 $l = -17.65$ ， $\sin U = 0.342$ 计算象差。因为是一般照明系统，这里只考虑球差，其数值是：

$$\delta l'_m = -67.37 \quad \delta l'_{0.85} = -55.60 \quad \delta l'_{0.707} = -43.68 \quad \delta l'_{0.5} = -25.91 \quad \delta l'_{0.3} = -10.62$$

由于每个表面负担的光线偏角太大，上述结构质量太差，球差大到了不能使用的程度。

为了改善球差状况，我们让程序将透镜后表面改成二次非球面，并按下述思路进行自动设计（ β 是垂轴放大率）：

自变量： c_1 、 c_2 、 e_2

自变量增量： $\delta c = 0.0005$ $\delta e = 0.006$

边界条件：透镜边缘厚度 ≥ 1

受控象差情况如表 1。

表 1

象差	初值	目标差	公差	优化结果
$\delta l'_m$	-67.37	0	0.1	-0.29
$\delta l'_{0.707}$	-43.68	0.1	-0.2	-0.06
β	-5.25	-2.0	0	-2.0

输出结构参数为:

r	e	d	n
			1
70.184	0		
		6.37	1.5163
-8.028	0.9928		
			1
$f' = 14.352$	$l_p = -10.474$	$l'_p = 13.908$	$l'_0 = 42.612$

系统的球差得到了良好的校正, 与原来的双分离球面透镜系统比较, 球差也小得多, 结构上又更为简单, 因为只用了一块单透镜。球差对比情况如表 2。

表 2

	$\delta l'_m$	$\delta l'_{0.85}$	$\delta l'_{0.707}$	$\delta l'_{0.5}$	$\delta l'_{0.3}$
原双分离透镜系统	-9.65	-7.27	-5.22	-2.73	-1.01
含非球面单透镜	-0.29	-0.12	-0.06	-0.03	-0.01

参 考 文 献

- [1] 袁旭沧. 光学设计. 科学出版社, 1983
 [2] 王永仲. 光学设计与微型计算机. 国防科技大学出版社, 1986

Automatic Optimization of the Optical Systems for Quadric Aspherical Surfaces

Wang Yongzhong

Abstract

The paper discusses the automatic design and optimization of the optical

systems for the quadric aspherical surfaces with computer, presents the idea of preoptimization and its mathematical model, makes the implementation scheme for the program, thus realizing the idea to optimize original spherical system to quadric aspherical one.

Key words: computer applications, optical systems, automatic design, quadric aspherical surface, preoptimization

电视电脑屏幕对眼睛的危害及其防护

随着科学技术的发展, 电脑、电视和录像设备进入办公室、实验室和千家万户, 给人们的工作带来方便和效率, 使人们的生活丰富多采。然而, 就是这些现代社会的宠儿, 同时也给人们带来了潜在的威胁, 因为它们都不同程度地辐射电磁波和紫外、红外等光波, 对我们的机体, 特别是最容易受损害的部位——眼睛造成伤害。因此对于电视和电脑终端屏幕对人眼的影响引起了不少研究工作者极大的关注。例如美国职业安全和健康研究所已开始了一项全面研究, 对两千名使用电脑终端的妇女和两千名不使用电脑终端的妇女作观察比较, 纽约州的西奈山医院则计划对一万名使用电脑终端的办公室工作人员进行体格检查, 因为他们普遍反映眼睛疲倦。瑞典国家辐射研究所的研究人员则研制了电脑终端屏蔽装置, 以减轻操作者的眼睛疲劳。在所有的这些研究工作中, 以美国加利福尼亚州的伯克利大学的詹姆斯·希迪教授领导的研究小组的研究结果将特别引人注目。他们对长期在电脑终端屏幕前工作的 153 名工作人员做的眼科检查表明, 电脑终端屏幕前的工作会严重损害视力, 甚至改变眼睛的机能。因此专家们要求在电脑终端屏幕前工作的所有人员立即配戴防护眼镜。

对防护眼镜人们做过不少研究, 但迄今为止, 还没有很理想的解决办法。我们经过多年努力, 研制成功了具有多种防护功能的“多功能护目镜”和“多功能增透镜”, 其透光率极好, 达85~96%, 与玻璃的透光率相差无几或高出玻璃透光率4~6%; 对微波的防护效率接近100%, 衰减量高达34dB; 对紫外, 特别是短波紫外线(300毫微米以下)是完全吸收的, 对中远红外具有很高的反射率, 最高可达93%。这种镀膜镜片耐磨性远远超过国外的镀膜镜片, 在其表面用刀片刮也不会出现痕迹。并且价格比国外镀膜镜片便宜50%以上。这些性能的完美结合, 使它融专业防护和视力矫正、工作学习和日常生活为一体, 成为一种理想的防护镜。经专家鉴定和一年多的试销, 受到各类人员的普遍欢迎, 并取得了两项国家专利。这种护目镜广泛用于雷达及其它微波设备调试和操作人员, 电视及电脑终端屏幕前的工作人员, 电视受教人员, 电视编辑及电视台工作人员, 文艺工作者, 广大电视观众, 使其免受微波、紫外、红外等射线对眼睛的伤害, 减少视觉疲劳, 提高工作效率。

(彭传才)