

# 含非球面光学系统多功能光学设计程序

王 永 仲

(国防科技大学应用物理系,长沙)

## 提 要

本 FORTRAN 程序普适于球面和含有非球面的光学系统。用它可在微机上完成包括自动设计和 OTF 计算在内的全部设计过程。自动设计子程序贯穿了复合优化思想;提出了新的病态处理方法;实现了自动设计与 OTF 评价的方便结合,与传统设计手段的方便结合。

关键词: 非球面、光学自动设计、复合优化、病态、模块化程序。

## 一、引 言

随着光学加工技术的发展,特别是面型复制工艺的逐渐成熟,光学非球面的制造已不象过去那样困难。另一方面,光学系统正越来越多地与光电探测器件、CCD 阵列元件、计算机接口等配合使用。这些情况常常要求光学系统结构尽量从简而光能却十分集中——例如要求光线弥散范围达到衍射极限。纯球面系统往往难以同时满足上述两方面的要求,需要引入适当的非球面。这就要求程序不仅能自动优化球面,还能自动挑选最合适的表面使之向非球面转化,并自行优化出最合适的非球面参数。从而以最少的非球面、最简单的结构取得最好的结果。基于上述考虑,本文编制了普适于球面和非球面的大型多功能 FORTRAN 语言程序。

为便于微机采用,全程序由各自执行单一功能的多个模块化子程序构成,并形成可以任一链节为入口的活套闭环锁链结构,主要功能是:光阑倒推;像差计算;焦距缩放;光焦度交换;透镜弯曲;渐晕和通光口径计算;光焦度分配计算;透镜和透镜组元的焦距和顶焦距计算;自动设计;分段计算与分段自动设计;点列图计算;OTF(光学传递函数)计算;离焦 OTF 计算;参数修改及各种辅助性计算等。

## 二、复合优化思想的实施

从所周知,适应法常因像差相关而陷入病态,使化过程半途中止或辗转不前。为弥补其缺点,我们在过去针对纯球面系统所做工作的基础上,使程序实现了以适应法为主体、辅之以阻尼最小二乘法诱导优化方式的复合优变思想。具体实施途径是:以子午光束垂轴像差曲线和弧矢光束垂轴像差曲线为基础,构成三个特殊的优化指标,即

(1) 借用常规光路计算数据,把轴上点、0.707 视场点和边缘视场点所对应的子午光束

垂轴像差曲线各自按相对孔径坐标轴作数值积分, 求得其面积  $A_{0\omega}$ 、 $A_{0.707\omega}$ 、 $A_{1\omega}$ , 再按下式求加权积和

$$A'_T = 4A_{0\omega} + 2A_{0.707\omega} + A_{1\omega}, \quad (1)$$

进而以  $A'_T$  的起始值作为度量单位进行规一化, 规化后记为  $A_T$ , 即:

$$A_T = A'_T / A'_{T\text{起始值}}, \quad (2)$$

程序中把  $A_T$  列为一个优化指标。

(2) 与上述作法类似, 对 0.3, 0.5, 0.85 三个视场分点抽取各自的弧矢光束垂轴像差 (在与子午面垂直的方向取分量) 曲线, 也作数值积分得到面积  $A_{0.3\omega}$ 、 $A_{0.5\omega}$ 、 $A_{0.85\omega}$ , 并取

$$A'_s = 4A_{0.3\omega} + 2A_{0.5\omega} + A_{0.85\omega}, \quad (3)$$

同样以  $A'_s$  的起始值为度量单位进行规化, 并以  $A_{Ts}$  表示, 作为另一个优化指标。

(3) 第三个优化指标即是

$$A_{Ts} = (A_T + A_s) / 2, \quad (4)$$

上述  $A_T$ 、 $A_s$ 、 $A_{Ts}$  即是在我们的适应法程序中引进的三个特殊优化指标, 关于它们的构成和应用, 还作如下说明:

(1)  $A'_s$  计算时所取视场分点与  $A'_T$  的不同, 主要是为避免  $A'_T$  与  $A'_s$  之间的相关性, 因为同一视场分点的子午垂轴像差和弧矢垂轴像差可能并不完全独立, 而受控指标之间的相关性是适应法程序力求避免的。

(2) 由于不同系统的垂轴像差是不相同的, 故直接以  $A'_T$  和  $A'_s$  作为优化指标是不相宜的, 因此无法确定其目标值和公差。但在进行规化后, 问题便迎刃而解, 目标值的含义是把曲线面积降低为原来的百分之几, 这是容易确定的。

(3) 垂轴像差有正有负, 但在  $A'_T$ 、 $A'_s$  的计算中均以几何面积计入, 以保证  $A_T$ 、 $A_s$  的优化能真正缩小光线的弥散范围。

(4) 为了不增加追迹光线的计算量, 计算上述各曲边面积时, 其数值积分的相对孔径抽样点即直接按常规取为: 0.3、0.5、0.707、0.85、1 (子午光束则正负成对选取)。为突出中等孔径以内的光线的重要性, 我们在程序中把 0.707 孔径以内的垂轴像差乘以权因子 2, 使它们更快地得到优化。

(5) 在本程序中,  $A_T$ 、 $A_s$ 、 $A_{Ts}$  均作为一个普通的像差, 怎样控制和是否纳入控制均由用户确定。它们可以单独地或集体地诱导系统进行优化; 也可以与其它优化指标 (几何像差或边界条件) 一起优化全系统; 还可以交叉进行优化控制; 程序都能保证各步骤之间相贯衔接, 而不必中断程序的运行。

实践证明, 对于初始结构较差的系统, 先选用上述优化指标进化预优比, 再转入对其它诸项几何像差的控制, 可以避免优化过程陷入病态, 从而加快收敛。对于以光电转换元件为光能接收器的系统, 其像质要求常以光线弥散范围来规定, 此时选用上述优化指标进行控制, 效果一般较好, 下面将举实例说明。

由于  $A_T$ 、 $A_s$ 、 $A_{Ts}$  的构成是应用阻尼最小二乘法的评价函数概念, 它们对系统的优化控制也不象适应法那样以各单项指标直接控制, 而是间接诱导。因而, 从上述意义来说, 它们是对阻尼最小二乘法优化指标的模拟。但从它们在程序中充当普通像差的地位以及程序求解的数学方法而言, 仍然是适应法的基本模式。经验表明,  $A_T$ 、 $A_s$ 、 $A_{Ts}$  的引入, 有助于解决

适应法应用中对初始结构要求太高和因受控指标的相关而陷入病态,使优化毫无进展等问题。

### 三、新的病态处理方式

适应法程序运行中的病态通常是指解出的最大因子上升和 $(AA^T)$ 为奇异阵( $A$ 是像差方程组的系数矩阵, $A^T$ 是其转置矩阵)有效的病态处理是适应法程序成败的关键之一。我们在程序中采取三个互相配合的低节处理病态:缩减迭代步长;调整自变量增量之间的比例,释放像差。具体做法是:

(1) 出现最大因子上升,则将叠代步长减半;若不能阻止这种上升,则连续三次上升时转入自变量增量之比例的调整。先将与最大因子对应的自变量增量减半,而其余的增量则加倍,重新建立系数矩阵求解;若仍未摆脱病态,则废弃刚才的自变量增量和系数矩阵,把上次与最大因子对应的自变量增量加倍,而其余的减半,再建矩阵求解。若上述两环节都不奏效,才释放一种受控指标。

(2) 对于 $(AA^T)$ 奇异的情况,则只采用后两个环节配合处理。

实践证明,对于绝大多数情况,前两个环节就是以摆脱病态,释放像差只是不得已而为之。凡被释放的像差,待一个阶段的优化完成后,程序要逐一将其依次重新纳入控制。我们做过试验:裁去前两个环节,使程序单纯依靠释放像差的办法处理病态,则发现多数情况是过早地中止优化,输出没有最后达到目标的解;少数情况被误判为“无解”。对于同样的例题,一旦恢复了前两个环节,则程序能够在不释放像差的条件下顺利摆脱病态,快速而稳定地收敛到预期目标。这足以说明上述那种循序渐进的三环节处理病态方式比国内外一般文献介绍的单纯释放像差方式优越,并且能明显节省机时——因为被释放的像差在重新纳入控制时相当于校正过程重新开始\*。

第一环节的处理方式,其基本出发点是认为,系统按现行方向优化是可行的,不必明显改变求解方向;只是在当前所取的步长范围内,受控指标与结构参数自变量之间的函数关系远非近似线性关系,试图通过缩小步长的方式克服上述严重的非线性性,使反复多次的线性逼近得以奏效。实例分析表明,以最大因子上升为表现的病态,通常不是因为优化方向不当,而是非线性性作梗所致,故这种处理方式一般都能成功。当然,为了避免程序处理的失误,我们并不是僵化地固守这一种处理模式,而是规定:在此种处理方式不能迅速奏效时,立即转入后续环节进行处理。

后面两个环节的处理方式截然不同,但有一个共同的基点,即认为当前优化方向不当,需要进行大幅度调整。

采用第三环节释放像差的处理方式转明显改变优化方向,这是已有文献介绍过的,我们不再赘述。本文仅就我们提出的第二环节处理方式作简要说明。

如所周知,适应法是以求解像差线性方程组为基础的,而此线性方程组的系数矩阵正好是由各受控像差对诸结构参数自变量的有限差分构成,因此,计算这种有限差分时,对结构参数自变量所取的增量大小,完全决定了系数矩阵。特别是各类自变量所取增量的比例关

\* 后有实例说明。

系之调整,而不单纯是它们各自数值的变化。显然,这种比例的调整将完全改变系数矩阵诸元素之间的比例关系,因而从数学意义上,明显调整了像差方程组的求解方向即系统的优化方向。从光学设计的意义来说,自变量增量之间比例的调整还具有深刻的内在含义:它能调整各结构参数自变量校正像、优化系功的功能——自变量甲的增量取得比原来病态时大,而乙的增量却比病态时小,则此后的优化过程必然更多地发挥甲的作用而抑制乙——这也是对结构参数优化方向的调整。请看实例:

例一:用本程序设计文献[2] $P_{588}$ 的双高斯物镜,自变量为 $c_1 \sim c_5, c_7 \sim c_{11}, d_3, d_5, d_6, d_8$ 增量 $\delta c = 0.00025, \delta d = 0.02$ 。校正边缘像差时,第三次矩阵求解,发现首次最大因子 $X_{\max}$ 由14.597上升到20.647;后在收缩剩余像差时,第二次矩阵求解,又发现 $X_{\max}$ 由24.708升到44.474,程序都自行收缩减步长,经6次内循环摆脱了病态。因这种处理不另建系数矩阵,故非常迅速。若去掉此环节,单靠释放像差,则在DPS-6机上要多化43分钟。

例二:设计文献[2] $P_{598}$ 的物镜。自变量 $c_1 \sim c_6, d_2, d_4; \delta c = 0.0005, \delta d = 0.03$ ;去掉程序的病态处理环节,则在校边缘像差时,自第五次矩阵始 $X_{\max}$ 持续上升:28.210→29.816→42.767→163.978。若置入第二环节,程序自行调整为 $\delta c = 0.00025, \delta d = 0.6$ ,即刻制止了发散,只建三次矩阵就完成校正, $X_{\max}$ 的收敛如:134.734→69.441→50.771→0.362。由此可见,134.734/28.210≠0.0005/0.00025,即 $X_{\max}$ 并非简单地依前后所取增量的比例变化;且取得最大因子的变量由 $c_6$ 变成 $c_3$ ;这都表明优化方向已明显改变。若单靠释放像差,则程序会先释放球差优化其余,再将球差复控,也能完成优化,但机上时间要多31分钟。

#### 四、程序主要参数与设计实例

(1) 程序运行时机器内存用量91K;通用于球面和含有非球面的共轴系统,但总面数 $\leq 60$ ;一个自动设计指令可控指标个数 $\leq 40$ ,所用变量 $\leq 90$ 个;且允许一次规定多个自动设计指令;色光数 $\leq 3$ ;网格比5种;频率分点 $\leq 11$ 个。

(2) 为保证程序在具有大容量的前提下最大限度减少机器内存用量,程序设有多种辅助功能,并保证各种辅助性计算能方便地穿插于任意计算过程,从而使程序功能进一步扩展。设计实例:一个纯球面折反系统,原与光电元件配套,光线弥散范围 $\leq 0.2$ 。后要求与CCD阵列配用,其光线弥散 $\leq 0.02$ ,并去掉整流罩和校正透镜,成为图1形式。技术条件: $f' = 475, 2\omega = 0.8^\circ, D_\lambda = 63, \text{轴上 MTF}(30) \geq 0.8, \text{轴外 MTF}(30) \geq 0.6$ 。原系统只保留

两球面反射镜即作为初始结构:

$r$	$d$	$n$
-398.34		1
	-122.06	-1
-265.50		1

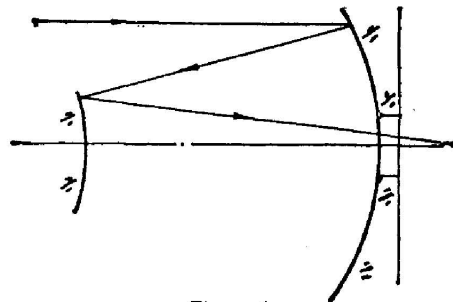


Fig. 1

程序使第一球面向非球面转化,于是自变量为  $c_1, c_2, d, e_1$  (离心率);自变量增量各为:  $\delta c = 0.00005, \delta d = 0.05, \delta e = 0.0005$ 。自动优化按两种方案进行:第一种,控制球差  $\delta L'_m$ 、视场边缘最大孔径和 0.707 孔径子午垂轴像差  $\delta y'_m, \delta y'_{0.707}$  及光焦度  $\varphi$ ;第二种,先以前述  $A_{T_s}$  和  $\varphi$  作预优化,取  $A_{T_s \text{ 目标}} = 0.5$ ,再与第一方案一样继续优化。发现第一方案在 DPS-6 机上需 43 分钟,而第二方案只需 13 分钟,它输出结果是:  $r_{10} = -694.97585, r_2 = -1615.10477, d = -130.56212, e_1 = 0.65786$ ,即把第一反射面优化成了椭球面。光线弥散  $\leq 0.018$ ,轴上 MTF(30) = 0.842,轴外 MTF(30)  $\geq 0.621, f' = 475.11$ 。结构比原设计简单得多,光线弥散范围缩小了一个数量级,并且完全没有色差。

### 参 考 文 献

- [1] 王之江;《光学设计理论基础》, (科学出版社,北京,1985)。  
 [2] 袁旭沧;《光学设计》, (科学出版社,北京,1983)。

## Multifunctional optical design program for the optical system including aspherical surfaces

WANG YONGZHONG

(Department of Applied Physics, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan)

(Received 16 March 1988)

### Abstract

The FORTRAN program is universal for the optical systems including spherical and aspherical surfaces. With the aid of the program all design work containing optical automatic design and OTF calculation can be finished by microcomputer. The idea of complex optimization has been put into effect in the subroutine of optical automatic design, and the new treatment methods of 'ill-states' have been carried out in it. Convenient integration of optical automatic design and OTF assessment, convenient integration of optical automatic design and the traditional design have been realized.

**Key words:** aspherical surface; optical automatic design; complex optimization; 'ill-state'; modularized program.