

适应法光学自动设计中优化指标的控制

王永仲

(应用物理系)

摘要 本文讨论采用适应法进行光学系统的自动设计时,如何挑选优化指标,如何确定其目标值和公差,以及以什么顺序把它们投入优化的问题。

一、导 言

适应法是光学自动设计技术中最成功的方法之一,也是深受大家欢迎的优化方法。它适应性好,符合多数光学设计人员的传统习惯,能充分发挥象差理论和设计经验的能动作用,优化过程的进展也便于分析和调整。这些突出的特色使它迅速发展和逐渐普及。但适应法对设计人员本身的要求较高,在控制优化指标时,如果没有正确的选择,没有恰当的先后次序,或者规定的目标值、公差不合理,都可能造成设计的失败。本文试图就上述问题谈点体会,为了有益于引起讨论,我们结合具体的光学系统发表看法。

二、优化指标的选择与控制

我们所说的优化指标,系指用以判别光学系统设计质量的性能参数,它主要包括象差和边界条件两大类。

为了阐述简明起见,我们先规定各种常用的技术指标代号:

$\delta L'_m$	轴上点孔径边缘球差	K'_{Tm}	视场边缘全孔径的子午彗差
x'_{sm}	视场边缘的细光束象散	x'_{sm}, x'_{sm}	分别为视场边缘细光束子午场曲和弧矢场曲
$\delta y'_{sm}$	视场边缘畸变	$\Delta L'_{FC.7}$	0.707孔径的轴向色差
$\Delta y'_{Fom}$	视场边缘垂轴色差	$\delta L'_{sn}$	表征孔径高级球差
$\delta L'_{Tym}$	表征子午视场高级球差	K'_{Tsnh}	表征孔径高级子午彗差
K'_{Tsnv}	表征视场高级子午彗差	x'_{sn}	表征高级细光束子午场曲

$\delta L'_{F\sigma}$	色球差	$\Delta y'_{F\sigma sn}$	色畸变
φ	总光焦度	l'/f'	相对工作距离
l'_s/f'	相对出瞳距离	β	垂轴放大率
S_T	各视场子午垂轴象差曲线面积加权后的规范化值		

对于最常见的各类系统，我们讨论如下。

1. 低倍消色差显微物镜

此类物镜系指 $\beta \leq 6^\times$ 、 $NA \leq 0.15$ 的消色差物镜，它一般取双胶合结构。自动设计时应以三个曲率为自变量，直接控制 β 、 $\Delta L'_{F\sigma.7}$ 、 K'_{Tm} ，一次投入优化，要求为：

	β	$\Delta L'_{F\sigma.7}$	K'_{Tm}
目标值	(按使用要求)	0	0
公差	0	0	0

注意，设计时常用反向光路， β 值应与此相应。

本来，此类物镜也可将上表中 K'_{Tm} 换成 $\delta L'_m$ ，但实践证明，控制 K'_{Tm} 更好，表现为收敛快且剩余象差小，这与双胶合望远镜物镜同。

2. 中倍消色差显微物镜

此类系统之 $\beta \leq 20^\times$ 、 $NA \leq 0.35$ ，通常由两个双胶透镜组成。若它们之间间隔不大且此间隔不作为自由变量，则应以六个曲率变量控制以下六项指标，要求是：

	$\delta L'_m$	K'_{Tm}	$\Delta L'_{F\sigma.7}$	β	l'/f'	$\delta L'_{sn}$
目标值	0	0	0	(按使用要求)		0
公差	0	0	0	0		(按剩余球差允量)

若两双胶组之间间隔充当自变量，则可增加控制 x'_{ism} ，其目标值定为 0，公差按象散允量。

若 l'/f' 已能充分保证使用要求，则可将此项改为 $\delta L'_{F\sigma}$ (双胶组密接时) 或 $\Delta y'_{F\sigma m}$ (不密接时)。

注意，对 $\delta L'_{sn}$ 和 $\delta L'_{F\sigma}$ 的控制应在边缘象差校正之后，并以逐步收缩方式为好。

3. 双胶合望远镜物镜

与低倍显微物镜类似，控制要求为：

	φ	$\Delta L'_{F\sigma.7}$	K'_{Tm}
目标值	$1/f'$	0	0
公差	0	0	0

4. 双分离望远镜物镜

若按初级象差理论挑选玻璃，则此类物镜可用四个曲率变量控制下述四项指标，

	φ	K'_{Tm}	$\Delta L'_{F\sigma.7}$	$\delta L'_{sn}$
目标值	$1/f'$	0	0	0
公差	0	0	0	(按剩余球差允量)

其中前三项一次控制，再纳入 $\delta L'_{sn}$ 进行收缩。

若不严格挑选玻璃，则应一次同时控制以下指标；

	φ	K'_{Tm}	$\delta L'_m$	$\Delta L'_{F0.7}$
目标值	$1/f'$	0	0	0
公差	0	0	0	0

5. 双胶透镜与单透镜密接的望远镜物镜

在双胶合透镜前面或后面，紧挨着再加一个薄型单正透镜，便组成一个大相对孔径（可达到1/2）的望远镜物镜。在自动设计时，可用五个曲率变量控制下述五项指标：

	φ	$\delta L'_m$	K'_{Tm}	$\Delta L'_{F0.7}$	$\delta L'_{in}$
目标值	$1/f'$	(注1)	(注2)	0	0
公差	0	0	0	0	(按剩余球差允量)

注1 $\delta L'_m$ 的目标值可按“过校正”控制，使大部分孔径对应着较小的球差。

注2 K'_{Tm} 的目标值可按平衡孔径高级彗差的要求，使整个孔径范围内彗差改变一次符号，且大部分孔径的彗差较小，边缘残留一定的彗差。

进入校正的顺序是：前四项先进入，达到目标值后再纳入 $\delta L'_{in}$ ，并以逐步收缩方式进行控制。

6. 密接三分离型望远镜物镜

如果在上例中取单透镜在前、双胶透镜在后的结构，再把双胶透镜变成双分离透镜，则构成三分离的密接结构。它的自动设计是利用六个曲率变量，控制 φ 、 $\delta L'_m$ 、 K'_{Tm} 、 $\Delta L'_{F0.7}$ 、 $\delta L'_{in}$ 、 $\delta L'_{Fo}$ ，其中前五项目的控制同上例； $\delta L'_{Fo}$ 的控制是使其目标值为零，公差按色球差公差取定，并采用逐步收缩方式。

7. 对称目镜

对称目镜由两个相同的双胶透镜相对放置构成，在自动设计时应使其三对曲率成为反号结组变量，并以它们去控制下列三项指标（这里先暂不考虑补偿物镜系统象差的要求，下同）：

	φ	$\Delta y'_{Fom}$	x'_{im}
目标值	$1/f'$	0	0
公差	0	0	0

以上三项，一次纳入控制。

其 l'/f' 、 l'_s/f' 均由初始结构保证，自动设计时不再纳入控制。因变量不够， K'_{Tm} 也不能控制。

8. 凯涅尔目镜

凯涅尔目镜的自动设计可用五个曲率、一个空气间隔共六个变量去控制下面六项指标：

	φ	$\Delta y'_{Fom}$	x'_{im}	K'_{Tm}	l'_s/f'	l'/f'
目标值	$1/f'$	0	0	0	(按使用要求)	
公差	0	0	(注1)	0	(注2)	

注1 此项可按0.5视度的标准确定公差。

注2 此两项可按各自目标值的(1/10~1/5)确定公差。

关于顺序，一般先控制前四项，再逐次纳入后两项进行收缩。

9. 广角目镜

广角目镜在自动设计时,一般只通过校正结构的曲率变量来优化整个目镜。

对 I 型广角目镜,常以校正结构的四个曲率来控制以下四项指标:

	φ	$\Delta y'_{FCm}$	x'_{im}	K'_{Tm}
目标值	$1/f'$	0	0	0
公差	0	0	(注 1)	(注 2)

注 1 此项可按 $1/4 \sim 1/2$ 视度规定公差。

注 2 为保证前三项指标的优化,此项可按当前值的 $1/4 \sim 1/2$ 规定公差。

控制的顺序,可以一次投入;也可先控制前三项,再纳入 K'_{Tm} 进行收缩。

II 型广角目镜的校正结构只有三个曲率变量,通常可用这三个变量控制下述指标:

	$\Delta y'_{FCm}$	x'_{im}	K'_{Tm}
目标值	0	0	0
公差	0	(与 I 型相同)	

这三项指标一次纳入控制。

若光焦度 φ 不合要求,可作焦距缩放。

广角目镜的 l'/f' 、 l'_2/f' 两项指标,应该由初始结构保证,若初始结构不能充分保证,需要在自动设计中调整时,则须把基本结构的曲率列为自变量。 l'/f' 、 l'_2/f' 的控制可参照上面所述凯涅尔目镜进行。

关于各种目镜的自动设计,若要求它们的象差与物镜系统象差补偿,则应按以下原则确定目镜象差的目标值:

$$(x'_{im})_{\text{目镜}} = -(x'_{im})_{\text{物镜系统}}$$

$$(K'_{Tm}, \Delta y'_{FCm})_{\text{目镜}} = (K'_{Tm}, \Delta y'_{FCm})_{\text{物镜系统}}$$

它们的公差要求仍与前面讨论的情况一样。

10 摄影物镜

摄影物镜结构参数自变量较多,一般应使所有可用的自变量(包括光阑位置变量)都参与系统的优化。自动设计时,通常先控制光焦度 φ 和边缘象差 $\delta L'_m$ 、 K'_{Tm} 、 x'_{im} 、 x'_{sm} 、 $\Delta L'_{FC.7}$ 、 $\Delta y'_{FCm}$ 。其中, φ 按焦距要求,公差为零; $\Delta L'_{FC.7}$ 目标值、公差均为零。

$\delta L'_m$ 应按平衡孔径高级球差的要求确定目标值,例如,当 $D/f' \leq 1/5$ 时,取欠校正方式;当 $D/f' \geq 1/3$ 时,取过校正方案; $1/5 < D/f' < 1/3$ 时,使 $\delta L'_m = 0$; 其公差按球差允量规定。

K'_{Tm} 应兼顾平衡孔径高级彗差和视场高级彗差的要求。如果孔径高级彗差很大,视场高级彗差较小,则应主要考虑孔径高级彗差的平衡,使孔径边缘留有一定的彗差,而使彗差曲线改变一次符号,以保证在小光圈或中等光圈下使用时(这是实际使用最多的情况)有良好的质量。如果视场高级彗差很大,则 K'_{Tm} 应主要考虑视场高级彗差的平衡,此时宜使 0.707 视场处彗差为零,边缘视场有一定彗差。

由于摄影物镜可以校正初级场曲, x'_i 、 x'_s 的曲线形状都可以独立地变化。在只考虑以它们的初级量来平衡高级量时,常

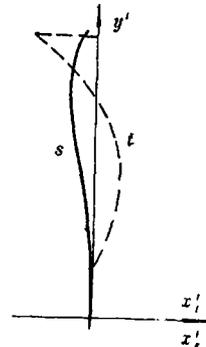


图 1

把曲线平衡成图1的形状,即 x'_{1m} 、 x'_{2m} 留有一定数值,而使中间大部分视场质量较好,如果要考虑对视场高级球差的平衡,则应使细光束焦点与宽光束焦点分居于理论象面两侧,而使理论象面处于球差对应的最小弥散圆位置。

$\Delta y'_{fcm}$ 的目标值常取为零,若这样使剩余色差太大,可使 $\Delta y'_{fcm}$ 留有一定数值,而使整个视场范围内垂轴色差改变一次符号,例如使 $\Delta y'_{fcr} = 0$ 。

在以上各项控制好,再根据各剩余象差的大小和结构优化的可能性,逐次纳入某些剩余象差,此时宜取逐步收缩的方式来控制。

对上述各类系统,若初始结构较差,都可先以 S_T 进行预优化,再转入各单项象差的控制。

三、边界条件的控制

U/f' 、 U_2/f' 、 φ 、 β 等几项最重要的边界条件已归入优化指标,控制方法已如前述。对厚度类边界的控制,太宽则不能保证结果实用,太严会导致其它性能指标变差。前者不难理解;关于后者,我们举一实例。例如,在设计一个中倍显微镜物镜时,按国家标准,要求正透镜边缘和负透镜中央之最小厚度 $d_{min} \geq 1$ 。以此为边界条件进行象差控制,则三次建立系数矩阵进行优化就完成校正,未受控的象差也很好。但若把边界条件提高为 $d_{min} \geq 1.25$,其它要求不变,则优化中曾三次处理边界违背,总共建立七次系数矩阵才完成优化。花费时间多出一倍,未受控的象差还远不及前者好。这就是边界条件太严造成的后果。

因此,控制边界条件的正确思想应该是:可控可不控的则不控;可宽可严者从宽。

关于玻璃光学特性参数的边界控制一般是纳入程序内部处理,有关问题我们将另文讨论,因为处理过程比较复杂,这里先不涉及。

The Control of Optimization Indexes in Adaptive Optical Automatic Design

Wang Yongzhong

Abstract

The following problems concerning the automatic design of optical systems by adaptive methods; how to choose the optimization indexes; how to define their target values and tolerances, and how to arrange a right order to correct them, are discussed in this paper.