

光学自动设计中一种新的优化指标

王永仲

提 要 本文提出以各视场子午光束垂轴象差曲线面积加权求和, 构成一个新的优化指标, 用于光学自动设计。文章分析了其理论基础和实用特色, 并有实际验证。

一、引 言

人们早就知道, 子午光束垂轴象差曲线形状全面反映了光学系统对于子午光束成象质量的优劣。在手工设计时期, 一直是设计者用以评价设计质量、指导矫正方向的可靠依据。光学自动设计的出现, 是光学设计在理论和技术上的重大突破。那末, 自动设计中能否继续有效地运用子午光束垂轴象差曲线的宝贵性质? 怎样运用? 运用起来有什么特色? 这是本文讨论的课题。

二、新优化指标的构成

要把子午光束垂轴象差曲线用于自动设计, 就须以此构成优化指标。我们认为, 这个指标应满足以下条件:

1. 能综合反映光学系统各视场各口径的成象质量;
2. 不增加追迹光线的计算量;
3. 简便可行, 符合设计人员的传统习惯。

基此, 我们把轴上点、0.7 视场点和最大视场点各自的子午光束垂轴象差曲线都按相对孔径坐标轴做数值积分, 其面积各为 $S_{0\omega}$ 、 $S_{0.7\omega}$ 、 $S_{1\omega}$, 并分别乘以权因子 3、2、1, 于是加权求和为:

$$S'_T = 3S_{0\omega} + 2S_{0.7\omega} + S_{1\omega}$$

为使用方便, 我们将 S'_T 的起始值规化为 1, 于是系统的优化值便是相对于 1 的一个小数, 用 S_T 代表。 S_T 就是我们实用于自动设计的新优化指标。在我们的自动设计语言程序中, 完全把它做为一个普通象差对待。当然, 相对于传统的几何象差说来, 它是一种广义的象差。

其中 $S_{0\omega}$ 、 $S_{0.7\omega}$ 、 $S_{1\omega}$ 就是按通常光路计算常规, 对 0.3、0.5、0.707、0.85、1 等五个相对孔径追迹光线后, 用辛卜生公式或梯形公式做数值积分而得。加权因子的意思是为了体现不同视场之重要性应有差异。我们目前采用的权因子值尚有待进一步研究。

三、 S_T 的实用特色

实践证明, S_T 这个新的优化指标在光学自动设计中的应用, 表现了新的特色, 主要是:

1. 改善初始结构, 避免自动设计过程的早期发散或慢收敛;
2. 排除相关因素, 摆脱优化过程的病态, 加快自动设计进程。

这种特色显然是我们求之不得的。分析其理论基础, 就是:

1. 子午光束垂轴象差曲线与相对孔径座标轴所围的几何面积包含着丰富的象质信息, 它反映子午光束成象质量之全面和准确, 显然是我们历来采用的单项几何象差所不及的。因而, 优化过程中 S_T 的下降必然伴随着系统结构的改善。

2. S_T 同时考虑了轴上点和轴外点, 又体现了球差 $\delta L'$ 、彗差 K_T' 、细光束子午场曲 x_i' 、宽光束子午场曲 X_T' 等多种象差的综合影响, 把它作为一个统一的优化指标, 无疑减少了象差相关因素。

我们知道, 对于质量较差的初始结构, 若一开始就用传统的单项几何象差施行自动设计, 常常因为象差相关而使优化过程陷入病态, 设计过程辗转不前, 这是人们屡见不鲜而又难于处理的事。我们发现, 假若采用 S_T 这个优化指标进行单一的先行优化, 就能明显改善系统结构, 顺利地摆脱病态, 实现快速而稳定的收敛。我们曾分别以常用的望远镜物镜、显微镜物镜、照相物镜 (如三片型、双高斯型、托卜岗型、天塞型) 等做过这种试验, 完全验证了上述论点。其中, 尤以结构较复杂、受控象差多而易于陷入病态的照相物镜为突出。下面仅举一例。

四、实例

设计一个常见的三片型照相物镜。

要求: $f' = 30$, $2\omega = 50^\circ$, $D/f' = 1/4$

从初级象差求解入手, 确定以两个平凸镜和中央的等凹透镜为初始结构, 光阑位于凹透镜正中, 数据为:

r	d	n_D	n_F	n_C
10.11		1	1	1
	2.5	1.6384	1.64657	1.63506
∞				
	0.66	1	1	1
-11.33				
	1	1.6242	1.63663	1.61925
11.33				
	0.66	1	1	1
∞				
	2.5	1.6384	1.64657	1.63506
-9.27		1	1	1

正透镜材料为 ZK_{11} ，负透镜为 F_5 。

经光路计算发现，此结构象差太大。如：球差 $\delta L'_1 = 4.39$ ，子午慧差 $K'_{T1} = -0.48$ ，细光束子午场曲 $x'_i = 7.37$ ，视场高级球差 $\delta L'_{Ty} = 18.36$ 。如采用传统的单项几何象差施行控制，则矫正过程很快就出现发散，采用逐个释放象差的办法，也使优化过程拉得很长。显然是由于初始结构太差，优化中出现了象差相关的情况。我们改变优化途径，利用 S_T 这个指标做先行优化，使其降低 60%，再转入单项几何象差的矫正，则发现优化过程快速而稳定地收敛到我们预定的目标，一直没有出现发散情况。整个系统的设计连同光线分布点列图的计算与打印、几何光学传递函数的计算、各透镜焦距与截距的计算等等，在国产 DJS—8 型电子计算机上只花 11 分钟。这就突出地说明了 S_T 的实用特色。

我们将有关数据列出：

象 差	φ	$\Delta L'_{FC\cdot 7}$	$\Delta y'_{FC1}$	K'_{T1}	x'_{i1}	x'_{s1}	$\delta L'_1$	$\delta L'_{Ty}$
起 始 值	0.03211	0.2854	-0.009	-0.475	7.37	1.2	4.39	18.36
目 标 值	0.03333	0.	0.	0.	-0.6	-0.6	0.	1.
给定公差	0.	0.	0.	± 0.02	0.	0.	± 0.25	± 0.7
矫正结果	0.03333	0.	0.	0.019	-0.6	-0.6	0.05	1.42

由表可知，系统各受控象差都完好地矫正到了给定的数值。

系统的调制传递函数值为：

0. ω										
频 率	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50(线对/mm)
MTF	0.979	0.956	0.919	0.870	0.811	0.744	0.674	0.601	0.528	0.456
0.7 ω										
MTF _r	0.703	0.533	0.517	0.479	0.406	0.466	0.382	0.309	0.365	0.345

输出结构参数为：

r	15.037	-37.994	-10.894	17.553	-77.950	-9.565
d	2.5	1.602	1	1.251	2.5	

为了方便而有效地把 S_T 运用在自动设计中，我们编制了实用化的 FORTRAN 语言程序。设计者可以根据需要随时将 S_T 纳入控制，也可随时由对 S_T 的优化转入对其它诸象差的矫正。关于这些，就不是本文讨论的内容了。

参 考 文 献

- [1] 陈晃明, 进退变步 0.618 优化法光学自动设计, 《工程光学》, 1980年第 1 期。

A New Optimization Object in Optical Automatic Design

Wang Yong-zhong

Abstract

This paper presents a new optimization object in optical design. It is the sum of the weighted areas of lateral aberration curves of the meridional rays in different fields. In the paper its theoretical basis and practical properties are analysed, and there is an example.