

光学系统双胶合透镜的替代设计法

曹红曲

成都奥晶科技有限责任公司, 成都, 611731, sean_cao2002@yahoo.com.cn

摘要

大多数光学系统都是由若干单透镜和双胶合透镜组成的, 单透镜可以看成是双胶合透镜的特殊情况。更换玻璃材料是光学系统设计中最主要、最常用、最有效的设计方法之一。运用 PW 法来更换光学系统中的玻璃材料使初级像差减小或按要求重新分布像差是可行的。将 PW 法引入到现代先进的光学设计软件中, 使程序能根据设计者的要求自动替换玻璃, 从而满足整个光学系统初级像差合理分布的要求。本替代程序就是将诸如国内开发的 ODP841、ABR、SOD88 等软件所采用的几何像差分析方法与国外 ZEMAX, CODEV 等具有强大优化功能的软件予以有机的结合。将设计者希望产生某种数量初级像差的双胶合透镜或单透镜替换光学系统中固有初级像差的双胶合透镜或单透镜, 使系统像差重新合理分布, 从而达到满意的成像质量。

关 键 词: 初级像差, 几何像差, 双胶合透镜, PW 法

中图分类号:

文献标识号:

文章编号:

Substitution Design Method of Doublet Lens in Optical System

CAO Hongqu

ChengDu Crystal Technology Co., Ltd, ChengDu 611731, China

Abstract:

Most of optical systems consist of a number of singlets and doublets, of which the singlet can be considered as a special doublet. Substituting glass is one of the most important, most commonly used and most effective methods in an optical system design. By introducing PW method into modern advanced optical design software, it can automatically substitute glass according to the designer's needs, thus meeting the requirements of rational distribution of primary aberrations in the entire optical system. This substitution program is intended to combine the geometrical aberration analytical method adopted in domestic software such as ODP841, ABR, SOD88, etc. with foreign software of great optimization like ZEMAX, CODEV, etc. Therefore, it is possible to substitute the designer's desired doublets or singlets of a certain amount of primary aberrations for those with inherent primary aberrations in optical systems, thus achieving a proper re-distribution of systematic aberrations and satisfied image quality.

Key words:

primary aberration, geometrical aberration, doublet lens, PW method

引言

目前,国外先进的光学设计软件如 ZEMAX、CODEV、OSLO 等正在国内逐渐普及,ZEMAX 因其较高的性价比更是被广泛使用,这些软件在对光学系统优化时的确表现出超强的能力,优势明显。光学设计软件的共同之处是:在设计者给出初始结构的基础上,运用阻尼最小二乘法对其进行优化,在满足边界条件的情况下寻找一个最接近要求的解,即所谓的极值点。但它毕竟受初始结构的合理性影响较大,并不是任意结构的系统经过这些软件的优化就能达到设计者的要求,如果设计者给出了一个很恰当的结构,程序将很快得到一个满意的解。但如果初始结构选择不当,材料搭配不好,初级像差特性严重背离了系统的性能要求,优化进行到一定程度时就无能为力了,若不经设计者有效干预,程序很难跳出这个局部极值点,这是因为对于一定结构型式的光学系统,在一定范围内,程序的优化一般不能对初级和高级像差特性作根本的改变,只能在该结构基础上达到有限的像差平衡。为了使程序能跳出这个局部极值点,设计者可以采用多种办法,比如:重新分配光焦度、更换材料、减少边界限制等。但很多情况下效果不大,再者,这些软件主要是根据各种几何像差对整个像面的综合作用来修正系统的结构参数,常常发生的情况是,各个组元以大的像差互补,虽然从设计结果来看似乎已达到了要求,但这样的系统往往有系统稳定性差、加工公差小等缺陷。而国内开发的光学设计软件如 ODP841、ABR、SOD88 等虽然在人机界面、优化能力方面略显不足,但在各种几何像差分析方面有一定的优势,并符合长期使用这些软件者的设计习惯。自然就想到,如果将两者的优势融合到一起,势必会提高设计效率。这其中,更换材料是光学设计中最主要、最常用、最有效的设计方法之一,但如何在繁多的玻璃中选出恰当的组合来并不是件容易的事情。但我们知道,一个光学系统一般是从求解、分析初级像差开始的,一个系统的初级像差小,一般其高级像差就小,只要初级像差小,那么很多时候他的加工宽容度就好,稳定性更好。反之,如果各组元以较大的像差来互相补偿,一是结构很容易陷入到一个停滞不前的境地,二是对加工也提出严格的要求。对于那些小孔径,小视场的光学系统,初级像差更能有效的反映系统的像差特性。另外,有一些系统比如变焦系统为了满足在各个焦点处性能保持稳定,要求系统各组元之间以小的像差互补,即要求各组元均要有小的像差。根据初级像差理论,一个光学系统的初级像差,可以用其像差特性参数 P 、 W 来表征。由此可联想到,运用 PW 法来更换系统中的玻璃组合来重新分布初级像差是可行的。将 PW 法引入到现代先进设计程序中,使程序能根据设计者的要求自动寻找满足要求的玻璃组合,从而达到整个系统初级像差合理分配,进而达到稳定、满意的成像质量。本程序就是将 ODP841、ABR、SOD88 所采用的几何像差分析方法和 ZEMAX, CODEV 等具有强大优化能力的软件予以有机结合所编写的。

设计一个光学系统,如果设计者能将初级像差控制的很好,再合理的平衡高级像差,设计的结构一定是很有前景的,当然,高级像差的平衡控制还得依靠程序的性能,这样设计的产品,公差好、性能稳定,也适合批量生产。

1. 初级像差的光学理论

在设计初期,我们可以将任何光学系统看成是由若干厚度为零的薄透镜组成的。根据初级像差理论,一个近似薄透镜系统的初级像差和数经简化后可以表示如下^[1]:

$$S_I = \sum hP \quad \text{..... (球差).....} \quad (1)$$

$$S_{II} = \sum h_z P - J \sum W \quad \text{..... (彗差).....} \quad (2)$$

$$S_{III} = \sum \frac{h_z^2}{h} P - 2J \sum \frac{h_z}{h} W + J^2 \sum \frac{1}{h} \Delta \frac{u}{n} \dots\dots\dots (像散) \dots\dots\dots (3)$$

$$S_{IV} = J^2 \sum \frac{\Delta n c}{n n'} \dots\dots\dots (场曲) \dots\dots\dots (4)$$

$$S_V = \sum \frac{h_z^3}{h^2} P - 3J \sum \frac{h_z^2}{h^2} W + J^2 \sum \frac{h_z}{h} (3 \frac{1}{h} \Delta \frac{u}{n} + \frac{\Delta n c}{n n'}) - J^3 \sum \frac{1}{h^2} \Delta \frac{1}{n^2} \dots\dots\dots (畸变) \dots\dots\dots (5)$$

$$S_{IS} = \sum n h (h c - u) \Delta \frac{\delta n}{n} = \sum h^2 C \dots\dots\dots (轴向色差) \dots\dots\dots (6)$$

$$S_{IIS} = \sum (n h_z (h c - u) \Delta \frac{\delta n}{n} + J \Delta \frac{\delta n}{n}) = \sum h h_z C \dots\dots\dots (垂轴色差) \dots\dots\dots (7)$$

$$P = n^2 (h c - u)^2 \Delta \frac{u}{n} \qquad W = -n (h c - u) \Delta \frac{u}{n}$$

其中P、W、C称为像差特性参数，如果我们将上面公式中所有的“ Σ ”去掉，就变成了系统中某一个单独薄透镜组所产生的像差和数，根据初级像差理论，对每一个薄透镜的P、W、C可求出相应规划后的 $\bar{P}_\infty$ 、 $\bar{W}_\infty$ 、 $\bar{C}$ ，同时，对一个双胶合透镜，有下列近似关系：^[1]

$$\text{冕玻璃在前时：} \bar{P}_\infty = P_0 + 0.85(\bar{W}_\infty - 0.1)^2 \dots\dots\dots (8)$$

$$\text{火石玻璃在前时：} \bar{P}_\infty = P_0 + 0.85(\bar{W}_\infty - 0.2)^2 \dots\dots\dots (9)$$

需要说明的是，不同的玻璃组合和不同 $\bar{C}$ 值唯一不同的是 P_0 ，也就是说，只要我们知道 P_0 和 $\bar{C}$ 的值，就可以找到一系列相应的玻璃组合及其结构参数。由于篇幅有限，这里的内容涉及的较多，就不再阐述了，要想更详细了解这些特性，可参阅科学出版社出版（1983），袁旭沧编著的《光学设计》。

2. 编制程序的思路

基于ZEMAX软件在国内普及较高的原故，该程序是在ZEMAX平台上编写的，当然很容易移植到其它光学设计软件中。考虑到大多数光学系统一般都是由若干单透镜和双胶合透镜组成，单透镜又可以看成是双胶合透镜的特殊情况，因此，程序仅针对双胶合透镜来编写，只要稍加变化，就可以应用到单透镜了。

既然程序主要基于初级像差理论，由此，程序先计算系统的初级像差，为了方便，我们近似将一个系统看成是一个薄透镜系统，且用P、W、C来表示足以表征系统初级像差特性的像差和数，给出每一面、每一组和整个系统的 S_I 、 S_{II} 、 S_{III} 、 S_{IV} 、 S_V 、 S_{IS} 、 S_{IIS} 以及它们在最后像面上的像差贡献量。设计者在此基础上进行详细的分析，然后决定需要替换哪一个透镜，需要该透镜增加或减少什么样的像差、数量是多少。

当某一透镜产生了较大的初级像差时，必然导致其它的透镜组产生反号的初级像差与其补偿，这将限制整个系统的进一步校正像差的能力。为了寻求一个好的结果，假设只要求该组产生设计者要求的初级像差 S_I 、 S_{II} 、 S_{III} 、 S_{IV} 、 S_V 、 S_{IS} 、 S_{IIS} 等，但必须说明的是，一个薄透镜组最多只能校正两种单色像差和一种色差，因此，只能要求该组的某两种像差和一

种色差达到某具体的值（与P、W无关的场曲 S_{IV} 除外）。比如，如果要求该组产生 $S_I=a$ 、 $S_{II}=b$ 、 $S_{IS}=c$ ，或者 $S_{II}=a$ 、 $S_{III}=b$ 、 $S_{IS}=c$ 等等，根据公式（1）-（7），只要简单的求解一个二元一次方程，就可以求出该组相应的P、W、C值，由公式（8）或（9）也就得到了 P_0 的值。这里的 P_0 和C是我们希望该透镜组所具有的，而不是它在系统中固有的。

逐一组合玻璃，求出 P_0 值，与要求的 P_0 比较，如果在可以接受的范围内，将其记录下来，继续寻找下一组，最后将所有满足要求的玻璃组合列表打印出来。此时，设计者根据玻璃的工艺性、稳定性、价格等综合因素选取一组，由程序计算出这种组合的结构参数自动替代原来的玻璃组合。这样，经替代后的透镜组焦距维持不变，整个系统的性能不变，而初级像差特性发生了改变。

在 ZEMAX 中，各种玻璃在玻璃库中的排列可以设置成让冕玻璃和火石玻璃分开为前后两段，这样更有利于玻璃的组合程序的编制。程序的流程图如下：

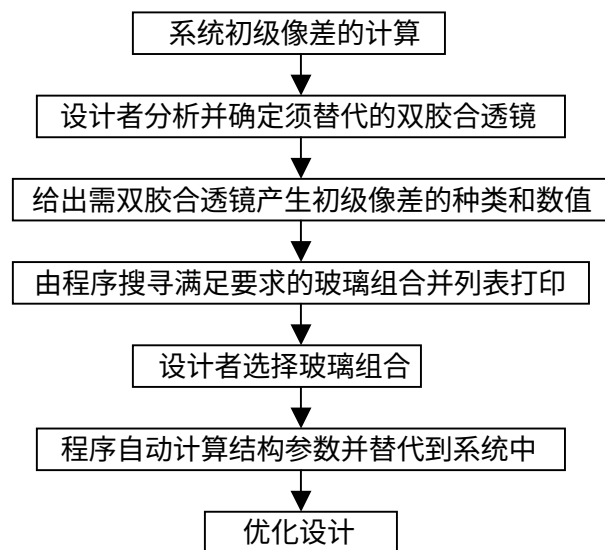


图 1 程序流程图

3. 程序的使用说明

在ZEMAX中给出一个光学系统，就可运行该替代程序了。程序首先将每一面、每一组透镜的初级像差列表，经设计者详细分析，确定将替代哪个透镜组。程序将提示输入透镜组起始面在系统中的序号，然后选择是冕玻璃在前还是火石玻璃在前，更主要的是必须给出设计者希望该透镜组将产生 S_I 、 S_{II} 、 S_{III} 、 S_V 、 S_{IS} 、 S_{IIS} 的值，由这些值，程序将搜寻满足要求的玻璃组合。为了能找到多组基本满足要求的组合，还得给出 P_0 的公差。当满足要求的玻璃组合较多时，可以减小 P_0 的公差，如果没有找到，则必须增大 P_0 的公差。这样，程序通过ZEMAX自带的玻璃库将每一种冕玻璃和火石玻璃进行组合，得到一系列满足要求的玻璃组合，并将搜寻到的结果列表出来，设计者只需要输入玻璃组合相应的序号，程序将自动完成玻璃的替代设计工作。

应当说明的是，一个光学系统往往要经过多次的替代，才可能找到比较满意的玻璃组合，形成一个合理的初始结构。替代完成后，并不表示系统的成像质量变好了，因为其它的透镜组还没作相应变化，它仅仅只是打破了系统原来的像差分布。这时，再利用 ZEMAX 强大的优化功能对其进行优化，重复以上过程，直到达到满意的成像质量为止。可以看出，利用该程序，显然也可以对单透镜或双胶合透镜单独进行设计。

4. 设计示例

由于初级像差的列表及分析将占较多的篇幅，鉴于此，这里仅仅列出搜寻玻璃组合的程序执行结果。比如在一个焦距 $f'=24$ 的系统中，ZF7 和 QK3 的胶合透镜将被替换。

Executing C:\ZEMAX\MACROS\光学系统双胶合透镜替代设计法.ZPL.

D:\定焦镜头\24.ZMX Total Surface : 20

像 差	----	S _I	-----	S _{II}	-----	S _{III}	-----	S _{IV}	-----	S _V	-----	S _{IS}	-----	S _{IIS}	-----
系 统		0.031489		0.001985		-0.017659		0.100149		0.475692		-0.002603		-0.001822	

胶合镜		0.096792		-0.080532		0.143379		0.221643		0.656156		-0.000474		-0.001011	
-----	--	----------	--	-----------	--	----------	--	----------	--	----------	--	-----------	--	-----------	--

差 值		-0.065303		0.082517		-0.161037		-0.121495		-0.180464		-0.002128		-0.000811	
-----	--	-----------	--	----------	--	-----------	--	-----------	--	-----------	--	-----------	--	-----------	--

胶合组: $f'=104.800000$ $H=6.536175$ $U=-0.125522$ $H_z=2.812196$ $J=3.862733$

该双胶合组要求相应的 $P_0=0.639007$ $C=-0.001163$

原玻璃组合:ZF7()QK3

满足要求的玻璃组合为:

-序号-	-----	玻璃组合-	-----	$\phi 1$	-----	P_0	-----	Q_0	-----	ΔP_0	-----
------	-------	-------	-------	----------	-------	-------	-------	-------	-------	--------------	-------

1		LAK10()ZF6		2.033020		0.680870		-3.690689		-0.041863	
2		LAK10()ZF5		2.081792		0.691813		-3.815915		-0.052806	
3		LAK10()ZF3		2.189623		0.701017		-4.091733		-0.062010	
4		LAK8()ZF7		2.072592		0.736763		-3.546467		-0.097756	
5		LAK7()ZBAF21		3.549150		0.574057		-7.126579		0.064950	
6		LAK3()LAF5		4.002189		0.591995		-7.984046		0.047012	
7		ZK19()ZF13		1.895602		0.644905		-3.472084		-0.005898	
8		ZK19()ZF12		1.946316		0.606313		-3.610600		0.032694	
9		ZK19()ZF7		1.871269		0.635761		-3.405063		0.003246	
10		ZK19()F7		2.790577		0.624860		-5.843711		0.014147	

oooooooooooooooooooo

满足要求的部分玻璃组合已经选出 !!! 请选择玻璃组合的序号:2

*** LAK10()ZF5 玻璃组合被替代到系统中 !!!

ALL DONE!!!

图2 程序执行结果

到此，ZF7()QK3 的双胶合被 LAK10()ZF5 的玻璃组合替换，我们将得到的新系统的初级像差重新计算，可以看到 LAK10()ZF5 这套玻璃组合在系统中产生的初级像差已经发生了较大的变化。下一步，就可以用 ZEMAX 的优化功能对新的系统进行优化了。同理，采用此方法对系统中的单透镜也可以替换设计。

5. 结束语

设计一个卓越的光学系统是一项及其繁杂的工作，其复杂的非线性特性，只能依靠程序的优化在一定程度上近似满足性能。由于高级像差的理论还很不成熟，目前只能在初级像差的基础上定性地分析光学系统。实践证明，那种完全依靠程序的性能来设计光学系统是行不通的，很容易在设计中无法自拔。为了更有效的设计，只有很好的掌握和控制初级像差，才可能控制好高级像差。目前，计算机在运算速度方面已不是问题，我们的目的只是给出一个合理的初始结构，让计算机少走弯路。这对设计一个小视场、小孔径系统是很效的，对设计大视场，大孔径系统也是一个必要条件。笔者曾设计了一个较复杂的光学系统，利用该程序，取得了很好的效果。通过对给程序的多次验证，该程序是可行的，但不是万能的。

参考文献：

1. 袁旭沧. 光学设计[M]. 北京：科学出版社，1983.

作者简介：

曹红曲，男，1968 年出生，重庆市巫山县人，1989 年毕业于北京理工大学工程光学系应用光学专业，同年分配到成都华西光学电子仪器厂工作，从事光学冷加工、光学镀膜和光学设计方面的工作，目前就职于成都奥晶科技有限责任公司，从事 CRT、LCD、DLP、LCOS 等投影电视光学镜头的设计开发工作，曾编写若干光学设计方面的软件。