

传统光学设计手段 在计算机上的再现

王永仲

提 要 本文讨论焦距缩放、光焦度交换、透镜弯曲、分段设计、列象差差分表等传统手段如何再现于电子计算机,并能方便地用于自动设计的问题;阐述了其程序设计要点,并列有可实用的 FORTRAN 程序。

一、概 述

在以手工进行光学系统设计的时代,人们曾总结了一些行之有效的设计手段,如焦距缩放、光焦度交换、透镜弯曲、分段设计、列象差差分表等。它们在手工设计中所起的重要作用是人所共知的。我们这里要强调的是,它们在自动设计中仍然表现了旺盛的生命力,当自动优化过程陷入慢收敛或发散状态时,它们常常是我们摆脱这种病态的得力助手(请阅参考文献[1],[2]。)因此,如何把这些传统手段的思想通过实用的程序在电子计算机上实现,是一个很值得研究的课题。本文的重点就在于此。

二、焦 距 缩 放

在一般专刊文献和标准化资料中,常把系统光焦度规化为1后列出其结构参数。欲用以进行新的设计,首先就得做焦距缩放。根据现有结构设计新系统,常常也有这种问题。象差设计完成之后,一般也要按比例缩放进行实际焦距的调整。不难理解,焦距缩放是必不可少的一种手段。尤其在光学自动设计出现之后,焦距缩放又显示了新的威力,一方面,它与自动优化过程配合,提高了光学设计的自动化程度;另一方面,焦距缩放可以促成病态的摆脱,使自动优化过程实现快速而稳定的收敛。

我们在实践中体会到,为了实用方便,焦距缩放程序应该可以按两种方式实施缩放:其一,只将曲率半径按比例缩放,而厚度间隔不变;其二,全系统结构尺寸都按比例缩放。后者不必细说,前者意即不将对焦距影响甚小的厚度间隔纳入(例如薄透镜组

的情况), 以免数据太不简洁。

焦距缩放程序的设计应注意以下几点:

1. 为方便用户, 上述两种缩放方式应可自由选取;
2. 为便于引用, 焦距缩放程序应作为一个子程序, 并可方便地与象差计算过程、自动设计过程等等配合和协调;
3. 缩放完成后应及时把新结构及其对应的象差输出。

作为一个实例, 我们把 ADTF 综合光学设计程序中有关焦距缩放的编排做一个介绍。在其主程序中有如下过程:

```
AK = F ( I 7 ) / BF
SCA = F ( I 7 + 1 )
CALL SCAL ( AK, SCA )
CALL WRIT
CALL TRAC
CALL OFAX
CALL OUT
```

这就是执行焦距缩放的一个全过程。其中 $F(I7)$ 为给定的焦距目标值; BF 是现有焦距值; AK 即缩放的比例; SCA 指明缩放方式 ($SCA=1$ 时, 只缩放曲率半径, $SCA=2$ 时, 整体缩放)。

AK 、 SCA 都赋值后, 即调用焦距缩放子程序 SUBROUTINE SCAL(AK, SCA) 进行规定的缩放。

接着调用 SUBROUTINE WRIT 将缩放后的结构参数按标准格式输出打印。

CALL TRAC 是为了进行近轴光线和轴上点象差的计算。

CALL OFAX 则是要做主光线和轴外象差的计算。

最后是通过 SUBROUTINE OUT 将各种象差输出。与象差同时输出的内容还有: 入瞳、出瞳位置、光线在诸表面的投射高度及其在两面之间的几何路程长度等。

下面列出执行缩放的子程序:

```
SUBROUTINE SCAL ( AK, SCA )
DOUBLE PRECISION R ( 4 0 ), C ( 4 0 ), D ( 4 0 ),
    D 1 ( 4 1 ), N ( 4 1 ), S N D ( 4 1 ), S N F
    ( 4 1 ), S N C ( 4 1 ), D N ( 4 1 )
COMMON / R D N / R, C, D, D 1, N, S N D, S N F, S N C
    , D N / K K 1 2 / K 1, K 2
K = K 2 + 1
D 0 2 9 8 J = 1, K
R ( J ) = R ( J ) * AK
I F ( A B S ( S C A - 1 . 0 ) . L E . 1 E - 5 ) G O T O 2 9 8
D ( J ) = D ( J ) * AK
```

```

2 9 8  CONTINUE
      CALL ANOT
      RETURN
      END

```

下面予以简略解释：

1. DOUBLE PRECISION 定义双精度型数组和变量（上例中全是数组）；
2. COMMON 定义公用区元素（这里是有名公用区，其名分别为RDN和KK12，斜杠之后是各自包括的数组名或变量名）；
3. R、C、D都是可纳40个元素的一维数组，分别存贮曲率半径 r 、曲率 c 、厚度 d ；N、D1是追迹光线子程序中所用的量，分别表示折射率和厚度；SND、SNF、SNC、DN 分别对应于 n_D 、 n_F 、 n_C 、 Δn_{FC} ；
4. K为系统总面数，且有：

$$K1 = K + 1 \quad K2 = K - 1$$

三、光焦度交换

光焦度交换作为一种特殊的变量形式，它在自动设计中具有特殊的功用。例如，在设计一个双高斯物镜时，视场高级彗差太大。把它与别的象差混在一起进行优化时，它下降很慢，整个优化过程无明显进展。我们改变优化途径，先在光阑两侧凹面之间交换光焦度以改善视场高级彗差，再转入上述校正过程，则很快达到预期状态。这种例子不胜枚举。

下面列出光焦度交换的数学公式。

假定光焦度交换在第 i 、 j 两表面上进行，则要考虑两种可能情况：

1. $j = i + 1$ 且 i 、 j 两面组成一个实际的透镜，则光焦度交换服从下列公式：

$$\begin{aligned} & (n_j - 1)(c_i - c_j) + d_i(n_j - 1)^2 c_i c_j / n_j \\ & = (n_j - 1)(c_i^* - c_j^*) + d_i(n_j - 1)^2 c_i^* c_j^* / n_j \end{aligned} \quad (1)$$

c —— 曲率； d —— 厚度； n —— 折射率；角标 * 表示光焦度交换后的量。

2. 上述情况之外的其它场合，光焦度交换服从以下公式：

$$\begin{aligned} & (n_{i+1} - n_i)c_i / n_{i+1} + (n_{j+1} - n_j)c_j / n_{j+1} \\ & = (n_{i+1} - n_i)c_i^* / n_{i+1} + (n_{j+1} - n_j)c_j^* / n_{j+1} \end{aligned} \quad (2)$$

下面列出 ADTF 程序中实施光焦度交换的子程序：

```

SUBROUTINE EXCH (IJ1, IJ2, SND, C, A2,
  R, D)
DOUBLE PRECISION A2, SND(41), C(40),

```

```

      R ( 4 0 ) , D ( 4 0 ) , POW1 , POW2
      IF ( ( I J 1 + 1 ) . EQ. I J 2 ) GOTO 2
1     POW1 = ( SND ( I J 1 + 1 ) - SND ( I J 1 ) ) * C ( I J 1 ) /
          SND ( I J 1 + 1 ) + ( SND ( I J 2 + 1 ) -
          SND ( I J 2 ) ) * C ( I J 2 ) / SND ( I J 2 + 1 )
      POW2 = ( SND ( I J 1 + 1 ) - SND ( I J 1 ) ) * A2 / SND
          ( I J 1 + 1 )
      POW1 = ( POW1 - POW2 ) * SND ( I J 2 + 1 )
      R ( I J 2 ) = ( SND ( I J 2 + 1 ) - SND ( I J 2 ) ) / POW1
      GOTO 3
2     IF ( ( ABS ( SND ( I J 2 ) ) - 1 . ) . LE. 1 E - 5 )
          GOTO 1
      POW1 = ( SND ( I J 2 ) - 1 . ) * ( C ( I J 1 ) - C ( I J 2 ) )
          + C ( I J 1 ) * C ( I J 2 ) * D ( I J 1 ) *
          ( SND ( I J 2 ) - 1 . ) * * 2 / SND ( I J 2 )
      POW2 = A2 * D ( I J 1 ) * ( SND ( I J 2 ) - 1 . ) * * 2 /
          SND ( I J 2 ) - ( SND ( I J 2 ) - 1 . )
      POW1 = POW1 - ( SND ( I J 2 ) - 1 . ) * A2
      R ( I J 2 ) = POW2 / POW1
3     IF ( A2 . LE. 1 E - 5 ) R ( I J 1 ) = . 0
      IF ( ABS ( A2 ) . GT. 1 E - 5 ) R ( I J 1 ) = 1 . / A2
      RETURN
      END

```

程序中各量的含义为：

IJ_1 、 IJ_2 是参与光焦度交换的折射面序号，前者为主动面，后者指被动面； SND 即 n_D ； c 为曲率； A_2 是主动面的曲率目标值（由程序根据曲率半径目标值自行转换）； POW_1 、 POW_2 是上述(1)、(2)式用到的过渡变量。

在 $ADTF$ 程序中，光焦度交换的实施有两种方式：其一是在自动设计过程中，主动面的曲率是按规定的曲率增量 δc 取目标值为 $(c_i + \delta c)$ ；并且这个值是不断地随着优化过程进展而变化（因为 c_i 在不断变化）；自然，被动面的曲率也会相应变化，以满足上述(1)式或(2)式所说明的规律。其二，在其它场合，主动面曲率是一次达到规定的目标值，并按(1)式或(2)式把被动面曲率作相应地一次性调整。前一种方式是把光焦度交换作为一类特殊的结组变量参与系统的优化，其功用已如前述。后种方式可能带来一种好处：例如，象差设计完毕，若某个曲率半径与现有的对样板相近，则可考虑采用现成的对样板，并通过光焦度交换把由此产生的光焦度差额转移到合适的表面。再如，在设计过程后期，发现某曲率半径甚大，则可考虑令其为平面，同时把光焦度作相应的转移。在以上两例中，光焦度交换都提高了设计的工艺质量，带来了经济效益。

为方便用户,使用ADTF程序做光焦度交换时,输入的是曲率半径,由程序转换为曲率。

四、透镜弯曲

把透镜的所有曲率都增加相同的曲率增量也是手工设计时期常用的手段——即弯曲透镜。

以下是ADTF程序中弯曲透镜的子程序:

```

SUBROUTINE CURV
DOUBLE PRECISION R(40), C(40), D(40),
  D1(41), N(41), SND(41), SNF
  (41), SNC(41), DN(41), EE1(30,6),
  F(800)
COMMON/RDN/R, C, D, D1, N, SND, SNF, SNC
, DN/EEF/EE1, F/PS/I6
IJ=IDINT(F(I6))
IJ1=IDINT(F(I6+1))
IJ2=IDINT(F(I6+2))
WRITE(6,65) IJ
65  FORMAT(//I15,2X,21HCHANGES OF
  CURVATURES)
DO 310 J=IJ1, IJ2
WRITE(6,66) J, F(I6+3)
C(J)=C(J)+F(I6+3)
310 R(J)=1./C(J)
66  FORMAT(17X,2HDC, I3,1H=, F9.5)
CALL ANOT
RETURN
END

```

现简要说明如下:

1. 程序中的IDINT是把双精度量整型化的专用字符;F(I6)提供透镜弯曲的指令性信息;IJ1规定了实施弯曲的起始面号;IJ2为弯曲的终止面号;F(I6+3)是规定的曲率增量 δ_c 。

2. 程序第11至14行的循环体即完成弯曲过程,它使第IJ1面至第IJ2面之间的所有曲率都增加了增量 δ_c ,并把曲率转化为曲率半径。

3. 透镜弯曲完成后还要输出新的结构参数、计算象差并输出,即依次有以下四个调用语句:

```

CALL WRIT
CALL TRAC
CALL OFAX
CALL OUT

```

这与前述焦距缩放及光焦度交换后的流程是一样的。

4. 透镜弯曲同样可被自动设计过程或其它过程引用。在自动设计中引用时,是把它作为另一类变量,因而这种弯曲是随着系统的优化而不断地进行着。但在别的过程引用时,弯曲是一次性的。

五、分段设计或计算

在手工设计时期,对于具有明显前后组的系统(例如摄远型望远镜物镜),通常采用分段方法先设计前组。在把前组象差尽量校正好之后,进行全系统的象差修正。这种思想已经在我们编制的ADTF程序中体现。输入规定的分段信息,即可完成前组的象差计算,在分段信息之后规定自动设计指令,即能完成前组的自动设计;尔后规定全系统的自动设计信息,则整个设计过程便一气呵成。其输入数据安排如图1所示。

分段的实质表现为参与象差计算和自动设计(或其它计算)的系统折射面数目变更,这在程序设计时是容易实现的。例如图2所示的摄远型物镜:

若以一个规定的指令性信息将折射面数目算到第5面截止,则可实现系统的分段;分段设计(或分段计算)完成后,给一个将折射面总数恢复为8的指令,又可接着进行全系统的设计或计算。

在ADTF程序中,只须按图1的规定一次输入有关数据,则上述过程便可一次上机完成,中途不必停机。

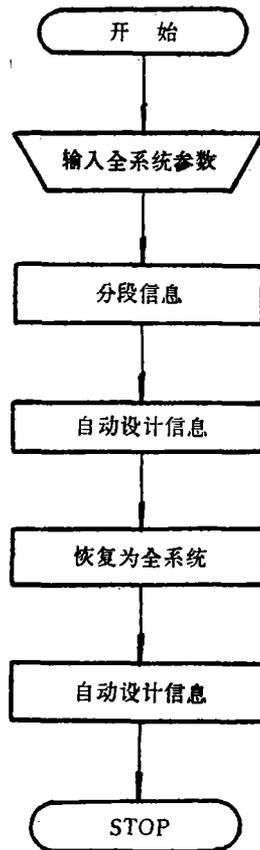


图 1

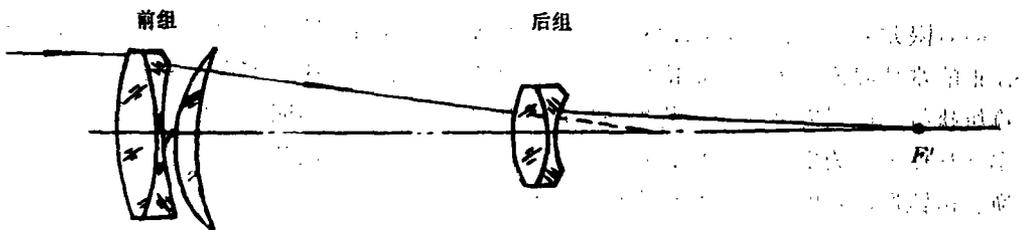


图 2

六、作象差有限差分表

列象差有限差分表（亦称象差变化量表）是手工设计较复杂系统时常用的分析手段。即选取若干个结构参数，分别给它们以相应的增量，并计算其对应的象差变化量

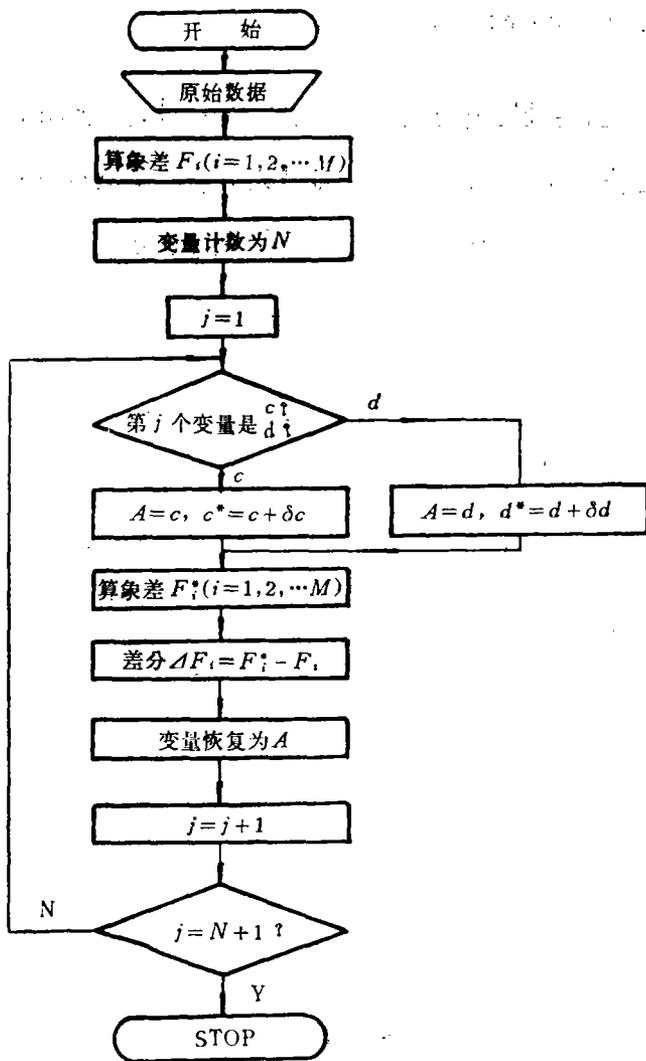


图 3

(即有限差分), 便可列成数表, 借以分析象差与结构参数之间的制约规律, 了解象差校正的难易程度, 为有效地使用变量提供依据。手工进行这种工作很是繁琐, 但交由计算机执行, 则很容易实现。其程序框图如图 3 示。为了图面明晰, 框图中只展示了以曲率 c 和厚度 d 为变量的情况, 对于以折射率和色散为变量以及结组变量 (包括光焦度交换、透镜弯曲) 的情况, 其程序编排构思是一样的。

在自动设计过程中, 程序也要计算象差有限差分, 以便建立系数矩阵。这与上述过程完全相同。因为我们以后将要列出 ADTF 程序的自动设计子程序, 这里就不写出计算象差差分表的子程序了。

参 考 文 献

- [1] 王永仲, 光学学报, 1985, 5, No. 6, 570.
- [2] 王永仲, 国防科技大学学报, 1983, No. 1, 1.
- [3] 王永仲, 国防科技大学学报, 1983, No. 4, 27.

The Reappearance of the Traditional Techniques in Optical Design Through the Electronic Computer

Wang Yongzhong

Abstract

The thesis discusses how to reappear the following traditional techniques in optical design through the computer and how to use them conveniently in optical automatic design, scaling focal length, exchange of powers, changes of curvatures of lens, separate design, listing tables of aberration variations, etc. It expounds the gists of the programs, and lists the pragmatic programs.