

前言

TCOS 光学设计软件是中船重工集团公司第七一七研究所光电一部自主开发的
光学设计软件。是一套实用化的可对各种共轴球面、非球面系统进行像质分析和
结构优化的大型光学设计软件，并能对非共轴、非常规复杂光学系统进行像质评
价。

TCOS 基于中文 Windows9X 或 Windows2000 操作系统，为全中文界面。对硬件
的要求是具有硬盘，CPU 为 Pentium166 以上，64M 以上内存。

本说明书共分七章，最基本的章节为第一章、第二章、第三章和第四章，这几
章讲述了 TCOS 的基本使用输入方法，包括概貌、数据输入方法、对系统评价像质
的方法、自动优化的方法等。更多的功能在后面的章节中讲述。

程序中用到的光学和数学理论不在本手册讨论的范围。有关符号规则与国内常
用的光学设计符号一致，用户可参照北京理工大学出版社出版的《光学设计》（主
编：袁旭沧）一书。

第一章 TCOS 软件的主要功能和基本操作方法

1.1 TCOS 的主要功能

TCOS2.00 版能计算共轴球面和非球面系统，以及非共轴、含有复杂面形的系统，具有丰富的像质评价功能和作图功能，还附带有对光学设计及作图很有帮助的一些实用工具。其主要功能罗列如下：

- 系统高斯参数计算
- 初级与高级像差计算
- 绘制多种像差曲线
- 绘制系统二维图
- 计算并绘制点列图
- 点列图能量分布曲线
- 自动寻找最佳像面位置
- 计算并绘制光学传递函数 MTF
- 自动计算单个及胶合透镜的参数（焦距、矢高、前后截距等）
- 计算任意两面间高斯参数
- 任意单根光线追迹
- 计算任意视场渐晕系数
- 计算光线在系统各面的瞳孔分布图
- 适应法自动校正像差
- 光学系统的温度分析
- 中国玻璃库查询
- 面倾角与中心偏、边厚差、球心偏的相互转换
- 激光光学（高斯光束）计算
- 其它辅助工具如缩放焦距、透镜弯曲、空气折射率等等

所有计算结果都可以存盘、编辑或导出到其它文字处理软件中进行编辑、打印等。所有图形都可以存为 BMP 格式，可方便地插入到其它排版系统中进行编辑打印等。

TCOS 本身采用一种二进制格式对初始数据进行存盘。同时有数据接口，用户可将数据存为美国 ORA 公司的光学设计软件 CODE V 的*.SEQ 格式，或者存为北京理工大学的光学设计软件 ODP841 的数据格式。同时，用户也可以读取 ODP841 格式的数据。

1.2 TCOS 的主界面

TCOS 软件基于 Windows9X 操作系统，也能在 Windows 2000 上使用。具有良好的操作界面，如图 1.1 所示。

软件有一个父窗口，在其顶部有菜单、工具条等，在通常情况下，该父窗口含有两个子窗口，一个为数据与控制窗口，另一个为结果窗口，这两个窗口不可关闭。所有数据的输入和主要的控制操作都在“数据与控制窗口”中，窗口中各个功能模块采用多级页面的方式，使用者可方便地找到需要使用的功能。在实际

操作过程中，软件会采取一种半自动向导的方式，自动切换页面，并适时给出操作提示，使用者能很快上手，简化了操作。程序计算的所有结果都放在“结果窗口”中，使用者可方便地对计算结果进行观看、修改、编辑、清空、复制、存盘等操作。在计算的过程中，软件还会开辟另外的子窗口以显示图形，例如系统二维图、点列图、光学传递函数 MTF 曲线等。有些功能在“数据与控制窗口”中没有列出，设计者可在菜单中找到。

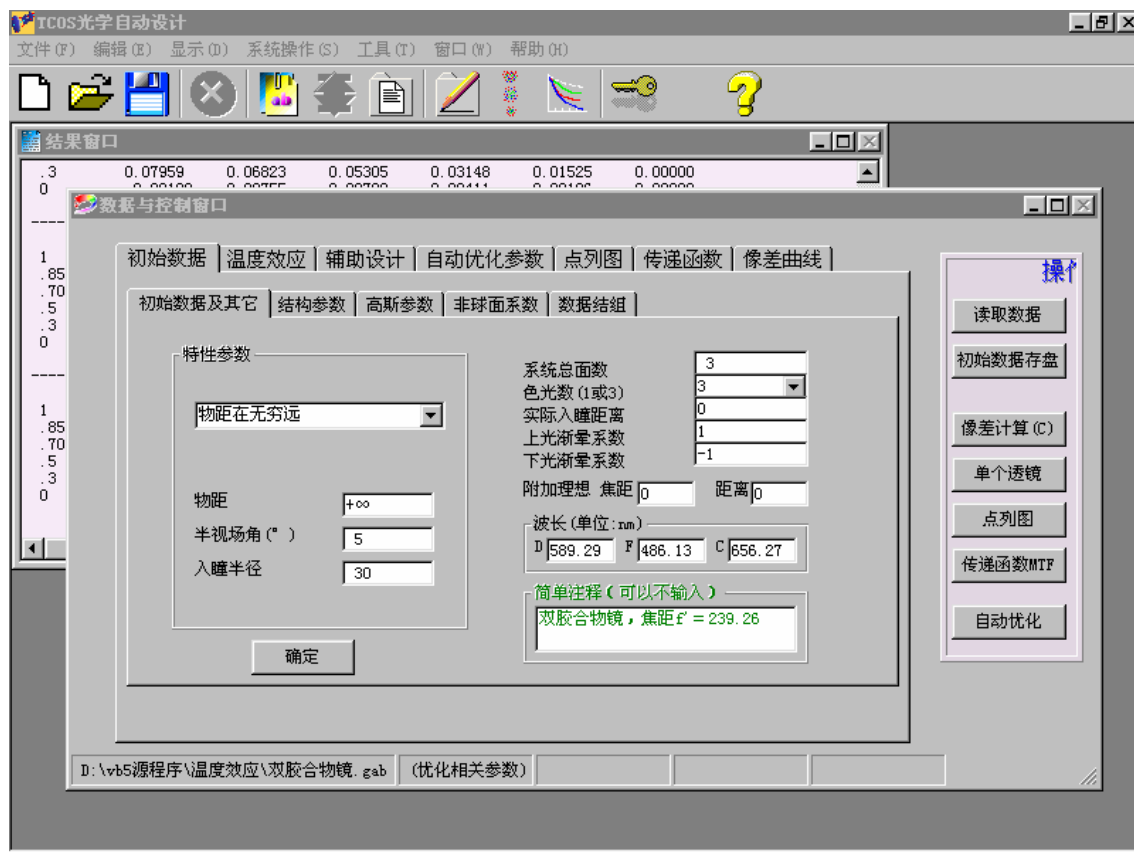


图 1.1 TCOS 主界

1.3 主要操作方法

TCOS 由于是全中文图形界面，应该输入的数据在界面上指明得都比较清楚，因此用户极易上手。在有些关键项，当鼠标停留在输入框上时，软件会给出提示或说明。当输入数据不合理时，程序也会给出提示及参考解决方案。通常在某一个页面的数据输入完成以后，如果该页面有“确定”按钮，则应该按“确定”按钮以确定输入。

具体的各项数据输入方式将在后面的章节详细介绍。

1.4 数据文件

使用者成功地输入了光学系统后，可在菜单“文件→初始数据存盘”中存盘，存盘数据为二进制格式，缺省扩展名为“*.gab”，用户也可以选择其它扩展名进行存盘。文件的缺省存盘路径为 TCOS 的安装目录。

打开文件同样从菜单“文件”中进行，其操作和存盘类似。

在进行了文件存盘和打开操作后，程序自动记录最近打开（或存盘）的四个文件，可在菜单“文件”中找到。使用者只需点击即可打开。

为提高软件的兼容性，TCOS 设置了数据接口。使用者可将输入的初始数据存为 CODE V 格式的文件（扩展名为*.SEQ）或 ODP841 格式的文件（缺省扩展名为*.TXT），用户可用 CODE V 或 ODP841 直接打开进行计算，这样用户可方便地用其它设计软件进行像质评价。

考虑到国内 ODP841 软件的用户比较多，TCOS 还提供了直接读取 ODP841 格式的功能。这样用户可继承以前的劳动成果而无需重新输入。

为便于用户统一管理和对比，TCOS 的所有计算结果放在一个“结果窗口”中，用户可将结果存盘，缺省格式为 Windows 下的基本格式*.RTF（富文本格式）。用户可用其它编辑软件（如 Word、WPS2000、Windows 自带的写字板等）进行排版、打印等工作。

第二章 光学系统的描述和数据的输入

2.1 概述

光学系统数据可以分成两大类，一类是描述光学系统的物理结构的数据，包括光学系统的面型、曲率半径、厚度间隔、透镜折射率等等，总称为系统的结构参数；另一类叫做系统的光学特性参数，包括系统的相对孔径、视场角、物距等。在执行像差计算、自动校正、点列图、MTF 等的计算前都必须给定光学系统的初始结构参数和光学特性参数，程序才有可能开始工作。本章将给出这些数据的输入方法。

一、光学系统结构参数

本软件用于共轴系统，系统中的每个曲面，可以是球面、二次曲面或高次曲面。系统可以是折射系统，反射系统或折反系统，代表每个曲面的通用方程式为

$$X = \frac{Cr^2}{1 + \sqrt{1 - (K+1)C^2r^2}} + A_4r^4 + A_6r^6 + A_8r^8 + \dots + A_{20}r^{20}$$

X 轴与系统对称轴——光轴重合，Y 轴在子午面内，如图 2.1 所示。



图 2.1 TCOS 的坐标系统

以上公式中有关参数的意义如下：

$$r^2 = Y^2 + Z^2$$

C——曲面顶点的近轴曲率，对于球面也就是球面的曲率

K——二次曲面系数，不同的 K 值对应的二次曲面为

K < -1	双曲面
K = -1	抛物面
K < 0 (> -1)	X 轴为长轴的椭球面
K = 0	球面
K > 0	X 轴为短轴的椭球面

$A_4, A_6, A_8, A_{10}, \dots, A_{20}$ ——高次非球面系数。对于球面，所有 A 为 0，对于球面，除了要给出中心点曲率半径 r ($r=1/c$) 外，还必须给出相应的 K 和 A 值。

光学系统的结构参数除了各面的面形参数外，还有各面的间隔和光学玻璃材料的名称或折射率。TCOS 可以计算一种色光或三种色光。对反射或折反射系统，每遇到一个反射面，折射率和间隔改变一次符号。当输入玻璃名称时，必须首先“定义玻璃”，即给出玻璃的三种折射率。对于国产玻璃，可以通过查询玻璃库来将数据引入到定义玻璃的窗口中。

二、光学特性参数

为了进行像差计算，除了需要光学系统的结构参数外，还必须给出系统成像的光学特性参数，它包括下列参数：

物距：指物体到系统第一面的距离

物高（或物方半视场角）：物体的半高度。当物距为无穷远时，输入半视场角（°）。

SinU（或半光束孔径）：孔径角的正弦值。当物距为无穷远时，输入光束孔径。

另外还必须指明孔径光阑的位置。如果输入实际入瞳距离（不为 0），则可以不指明光阑位置。如果实际入瞳距离输入为 0，则必须在面形数据栏输入“STO”以指明光阑位置。

TCOS 允许在实际光学系统后加入一个附加的理想光学系统。例如，对成像在无限远的系统可以在它的后面附加一个有限焦距的理想光学系统，然后对此组合系统计算像差，评价像质。此时必须给出附加理想系统的焦距，以及附加系统离原系统的距离。当附加系统离原系统的距离为 0 时，理想系统的物方和像方主面与实际的光学系统最后一个面的顶点重合。

2.2 系统初始数据的输入

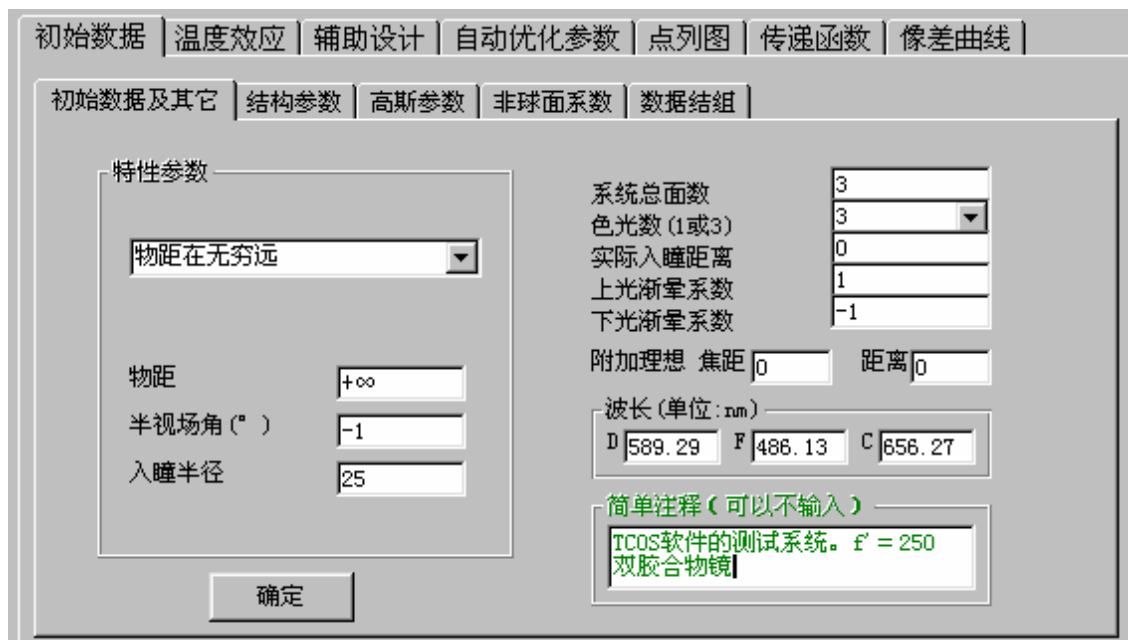


图 2.2 特性参数输入界面

我们将以一个具体的系统为例，说明初始数据的输入方法。

例 1：假定要输入一个双胶合望远物镜，光学特性要求为：

- 焦距： $f = 250\text{mm}$

- 通光直径: $D=50\text{mm}$
- 视场角: $2\omega=2^\circ$
- 光阑为系统第一面: $Lz=0$

打开 TCOS, 则初始的输入窗口如图 2.2 所示。按图 2.2 中的数据输入。

实际上要输入的就是物距、半视场角、入瞳半径和系统总面数。其它数据都为缺省数据。

另外, 当物距不是无穷远时, 则用鼠标在下拉框中选择“物距在有限距离”, 这时, “特性参数”栏的界面自动变化如图 2.3 所示。

第二、第三项输入指示已经变为“物高”和“孔径角正弦”。

需要特别说明的是, 对于“实际入瞳距离”, 通常建议输入为 0, 并在以后的结构参数输入页指明光阑位置, 则程序会自动计算出入瞳、出瞳的位置和口径。上光和下光渐晕系数也一般按缺省值, 对于有渐晕的系统, 可以给定系统各面的通光口径, 然后执行“计算渐晕系数”, 则程序会计算出准确的渐晕系数。

曲率半径	厚度间隔	折射率 _{nD}	折射率 _{nF}	折射率 _{nC}
1 200	10	1	1	1
2 -200	6	1.5163	1.521955	1.513895
3 -50000		1.6242	1.63663	1.619252

图 2.5 输入为折射率的情况

特性参数

物距在有限距离

物距

物高

孔径角正弦

图 2.3 物距在有限距离

数据与控制窗口

初始数据 | 温度效应 | 辅助设计 | 自动优化参数 | 点列图 | 传递函数 | 像差曲线

初始数据及其它 | 结构参数 | 高斯参数 | 非球面系数 | 数据组

输入窗口

曲率半径	厚度间隔	玻璃名	孔径	面型
1 200	10	1	1	STO
2 -200	6	K9	2	
3 -50000		F5	3	

像面: 0 0 1

输入折射率 输入玻璃名

定义玻璃 特殊面形

确定

图 2.4 结构参数输入页面

在输入完成以后, 如图 2.2 所示, 单击“确定”按钮, 则程序自动切换到“结构参数”输入页。在本页内, 要求输入曲率半径、厚度间隔和玻璃名(或折射率), 以及面形参数并指明光阑位置。如图 2.4 所示, 图中已经完成了结构参数的输入。

这里我们选择了两种玻璃 K9 和 F5。

其中，曲率半径是随便输入的数据。这是为了和以后执行自动优化时作比较。在图 2.4 的左下角，有两个单选按钮。当选择“输入玻璃名”时，即为图 2.4 所示。使用者可直接输入玻璃名。当选择“输入折射率”时，则结构参数输入界面会发生变化。如果已经定义了玻璃，则程序会自动给出折射率。如图 2.5 所示。

在结构参数输入窗口的右边，有一个表格，要求输入面的通光孔径（半径）的大小和面型。一般情况下，孔径可不输入，程序在下一步计算系统高斯参数时将自动算出，并将计算结果放到该栏。如果用户指定透镜的口径（通常在计算渐晕系数时必须），就需要在输入的数据后加一个字母“u”，不区分大小写，表示用户定义。例如“25u”。对于面型，通常要指明光阑所在的面，即用“STO”表示该面为光阑面。在图 2.4 中第一面为光阑面。如果该面为非球面，则用“ASP”表示。如果该面同时是光阑及非球面，中间用小圆点表示，如“STO.ASP”。在 TCOS2.00 版中，只有这几种情况。具体如下：

STO 或 sto	光阑面
ASP 或 asp	非球面
STO.ASP	该非球面作为光阑面
DEC	该面为偏歪面
CYL 或 CYLZ	柱面，柱面的母线和 Z 轴一致
CYLY	柱面，柱面的母线和 Y 轴一致
CONE	锥面
TOR	镯面（双曲率面）
GRT	光栅面

图 2.4 中，像面后的参数和前面的参数相似。通常像面为平面，因此曲率半径为 0。如果像面不是平面，可以输入一定的值，甚至可以是非球面、柱面等。像面的厚度间隔通常也为 0，但优化完成后，可以单击菜单“系统操作->寻找最佳像面”，则程序自动寻找出最佳像面，并将像面的位移值放入该数据框中。以后计算像差，评价光学系统成像质量等都按该位置进行。

在输入完图 2.4 所示的数据后，单击“定义玻璃”按钮，则弹出自定义玻璃的窗口，如图 2.6 所示。



图 2.6 自定义玻璃窗口

在“玻璃数”一栏中输入定义的玻璃数。例如本例中用到了两种玻璃，所以可输入“2”。在表格中，按图 2.6 输入两种玻璃的玻璃名和主波长的折射率 nD 以及两种参考波长的折射率 nF 和 nC。注意对于参考波长的折射率，必须将短波长的折射率放在前面。即必须满足折射率 nF > nC。在如图 2.6 输入完成以后，单击“确定”按钮，即可。



图 2.7 中国玻璃库查询窗口

实际上，对于用到的玻璃是中国玻璃的情况，有一种更简单的输入方式。单击菜单“工具→玻璃库→中国玻璃库”，则会弹出“中国玻璃库”查询窗口。如图 2.7 所示。在数据表格中列出了所有中国玻璃的名字及有关折射率及阿贝数的参数。对于国标 GB903-87 中没有列出的玻璃，则在玻璃名字后用“*”号标出。对于查询提供了两种方式，一种是按玻璃名进行查询，一种是按 D 光的折射率 nD 查询。选中“按玻璃名查询”，然后在输入框中输入“k9”，再回车或单击“查询”按钮，则程序自动查出玻璃的折射率参数，并同时显示到面板的左上部分的数据列中。这时再单击“引入到自定义”，则将该玻璃的三种折射率放到图 2.6 所示的自定义玻璃窗口中。对于 F5 玻璃，可用同样的方法查询得到。



图 2.8 计算的高斯参数页面

在自定义完玻璃后，单击确定按钮，则程序自动切换到下一页面，并计算出系统的有关参数，包括焦距、截距、像距、入瞳、出瞳、像高等，如图 2.8 所示。

到这里，所有的基本参数已经全部输入完成。以后就可以进行初始数据存盘、显示图形、计算像差、计算 MTF 等诸多操作。

2.3 其它类型初始数据输入方式



图 2.9 非球面系数输入界面

在示例中，输入的是胶合望远物镜，所有面为折射球面。还有其它一些情况，这里作补充说明。

①非球面

在结构参数输入页，在输入所有结构参数，并确定某一面为非球面后（在该面对应的面型表格中输入“ASP”，详见 2.3），点击“确定”按钮，则在“非球面系数”页，会自动给出非球面所在的面号，并要求输入非球面系数，如图 2.9 所示。

界面上部给出了非球面方程的形式，在下部为数据输入表格。有关系数的意义详见 2.1。在输入完成以后，单击“确定”按钮即可。

②数据结组

在有些系统中，出于工艺、某些结构形式（如有些反射系统）、平衡像差等的要求，常常将有些数据结组。即让两个参数大小相等，符号相同或相反。TCOS 中可设置两种形式的结组数据：曲率半径和厚度间隔。格式如下：

R, 3, 5, -

D, 2, 6, +

上面第一个格式表示的意义为：第 3 面和第 5 面半径结组，大小相同，符号相反，R 表示半径，“-”号表示符号相反。

第二个格式表示第 2 个间隔和第 6 个间隔数据结组，大小相等，符号相同，D 表示间隔，“+”号表示二者符号相同。

如图 2.10 所示，按上述格式在右边的输入框中输入数据，然后点击“<<”按钮，则引入到数据列表中去。同样，如果想删除某一项数据结组，则在结组数据列表中选中该项，然后单击“>>”，则删除该项。也可以单击“删除所有”来删除

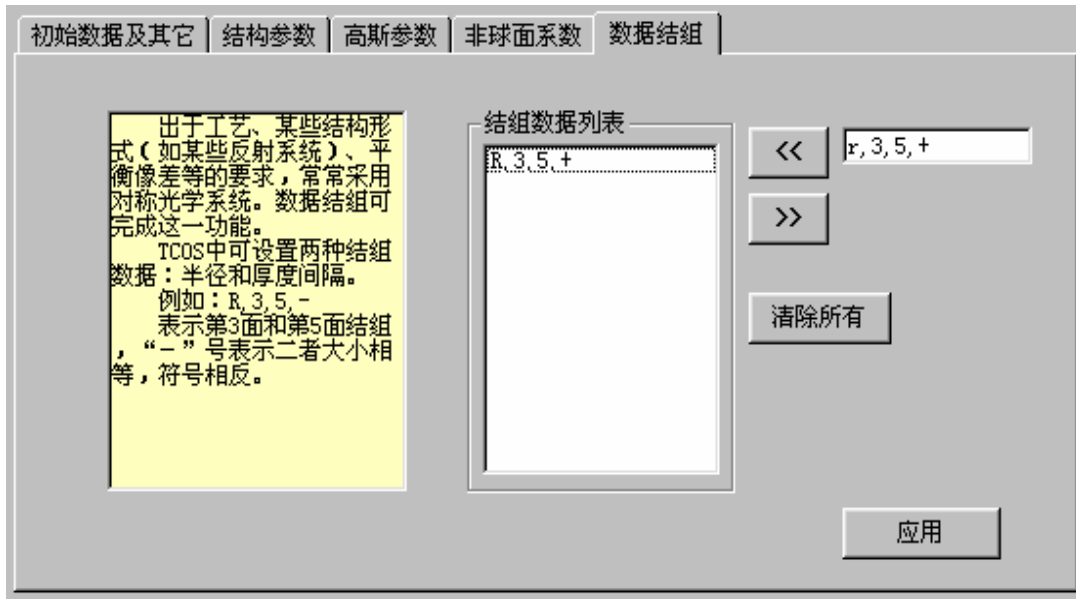


图 2.10 数据结组输入界面

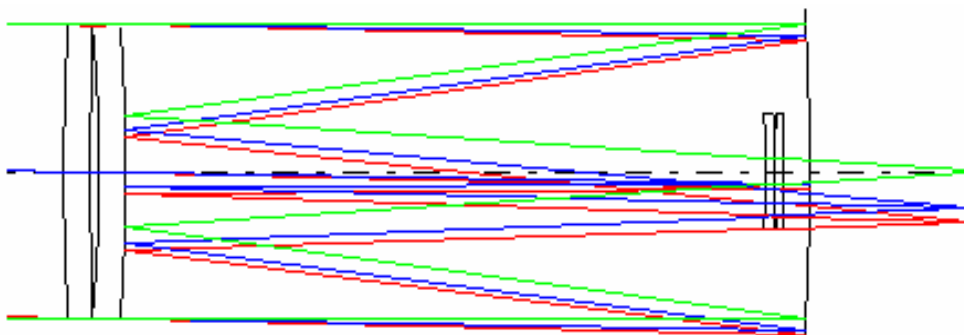


图 2.11 例 2 折反系统示意图

所有定义的结组数据。如果用户输入的格式不正确或输入的面号超过系统的总面数，程序会智能判断，并给出警告及提示。

③反射面

TCOS 可以计算反射系统。

例 2：假如有一个折反系统，数据如下：

面序号	半径	厚度	玻璃
1	968.6440	12.000	1
2	1588.2950	4.105	K9
3	-577.7730	12.000	1
4	-762.0000	310.000	K9
5	-1000.0000	-310.000	1
6	-762.0000	290.000	-1
7	-390.4400	4.000	1
8	-1775.7600	0.100	K9
9	407.3800	4.000	1
10	12267.2100	84.693	K9

其中，第 5 面和第 6 面为反射面，则数据输入方式如上面所示。注意第 5 面和第 6 面之间的空气折射率为-1，厚度为-310。该系统的二维示意图如图 2.11 所示。系统每遇到一个反射面，则折射率反号，且曲率半径、厚度也反号。

注意：反射面的标志是其后的所有材料的折射率反号，且曲率半径、厚度间隔都要反号，直到遇到下一个反射面。即每遇到反射面，其后的结构参数都要反号（不包括非球面系数）。为了正确绘制系统二维图，当系统的第一面是反射面时，可在反射面前加一个虚面，虚面后的间隔请给定一个大于 0 的值。

技巧提示：对于倾斜的反射面，由于光轴发生 2 倍角度的倾斜，显然用“偏歪后不返回”或“偏歪后返回”都不容易描述，这时可先将反射面倾斜（不返回） γ 角，然后在其后距离为 0 处加一个虚面，令虚面再倾斜 γ 角，这样使得反射镜后的零件共倾斜 2γ 角。

④透镜结构参数编辑功能

TCOS 对输入系统的结构参数提供了灵活的输入方式。用户可直接在输入表格中输入。用户可随意进行插入面、删除面、将数据颠倒、数据反号等操作。操作提供快捷键和下拉菜单两种方式

如果想删除某一个面的数据，则将鼠标点在该面的数据上，然后，按快捷键“CTRL+D”则可删除。如果想在某一面前增加一个面，可按快捷键“CTRL+I”来完成。

用户也可以通过菜单“编辑->透镜结构参数->...”来实现对数据的操作。具体的内容如图 2.12 所示。从图中可以看出，程序提供了多种方式进行结构数据的编辑，合理应用这些功能，将大大降低使用者的劳动强度。

在输入完初始数据并计算了

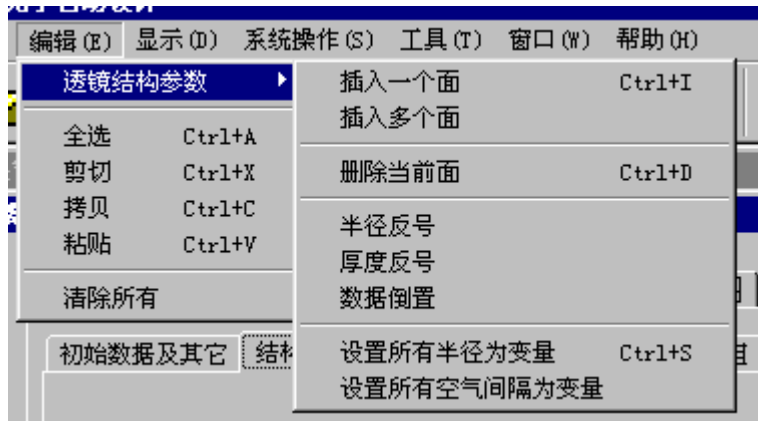


图 2.12 透镜结构参数编辑菜单

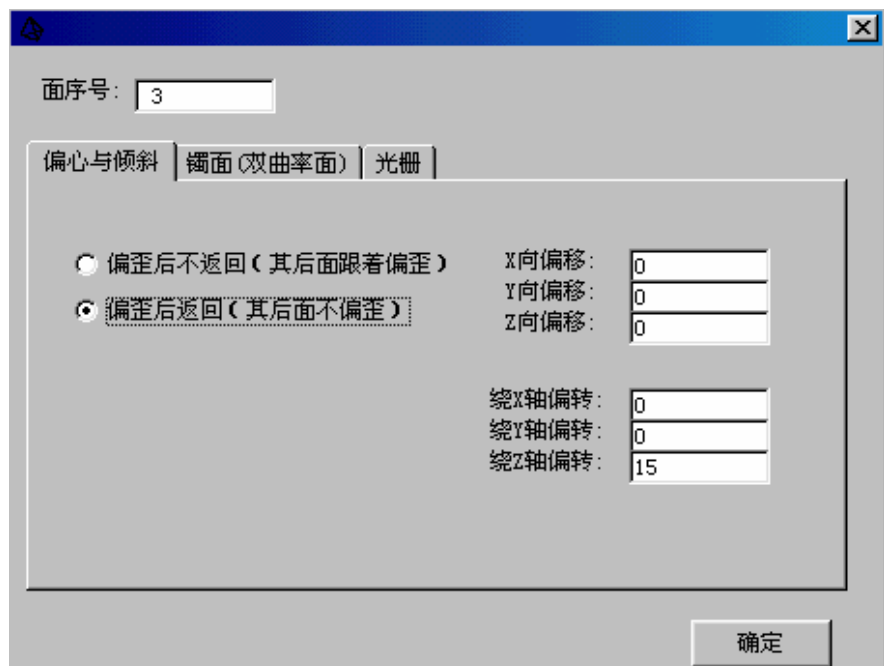


图 2.14 偏歪面的输入界面

一次高斯参数后，最好马上存盘，以防出现意外。存盘方式为：从菜单“文件→初始数据存盘”或右边的“操作选择”面板中的“初始数据存盘”按钮。

⑤偏心和倾斜面

1) 在“数据与控制窗口”的“初始数据→结构参数”页中，在“面型”下面的数据输入表中，输入“DEC”（大、小写都可以）。如图 2.13 所示；



孔径	面型
30.38	STO
30.40	
19.65	DEC

图 2.13

2) 用鼠标单击“特殊面形”按钮，则弹出如图 2.14 所示的窗口；

3) 在图 2.14 中输入相应数据，然后按“确定”按钮即可。

偏心量的符号规则是：顺着坐标轴方向的偏移为正，反之为负；倾斜角的符号规则是：迎着坐标轴观看，逆时针旋转为正，顺时针旋转为负。

注意，“X 向偏移”是沿光轴方向的移动，因此对应着系统两面之间间隔的改变。在这种情况下通常不要在这里输入，而是直接在结构参数里修改。即该值通常都为 0。

“偏歪后不返回（其后面跟着偏歪）”是将坐标以当前的偏歪面来衡量，其后的面以其为参照（中心和其重合），主要用于描述成组偏歪；“偏歪后返回（其后面不跟着偏歪）”则在偏歪后立即返回到原坐标系中描述，主要用于描述单个面的偏歪。

强烈建议，对于一些形式上是偏歪系统，实际上是可以转化为非偏歪系统的光学系统，最好按非偏歪系统输入计算，这样可以减少输入上的麻烦，避免坐标变换，有利于提高计算速度。例如直角反射棱镜，展开后为平板玻璃。

技巧提示：对于倾斜的反射面，由于光轴发生 2 倍角度的倾斜，显然用“偏歪后不返回”或“偏歪后返回”都不容易描述，这时可先将反射面倾斜（不返回） γ 角，然后在其后距离为 0 处加一个虚面，令虚面再倾斜 γ 角，这样使得反射镜后的零件共倾斜 2γ 角。

⑥柱面

1) 在“数据与控制窗口”的“初始数据→结构参数”页中，在“面型”下面的数据输入表中，输入“CYL”或“CYLY”或“CYLZ”（大、小写都可以）。参考图 2.13 所示；其中“CYL”及“CYLZ”表示柱面的母线和 Z 轴一致，“CYLY”表示柱面的母线和 Y 轴一致。

2) 则结构参数中的曲率半径就表示柱面的半径。

⑦锥面

1) 在“数据与控制窗口”的“初始数据→结构参数”页中，在“面型”下面的数据输入表中，输入“CONE”（大、小写都可以），表示该面为锥面；

2) 则结构参数中的曲率半径实际上表示的是锥面的半锥顶角，单位是（°）。

注意：锥面半顶角通常是接近 90° 的值，不能大于 90°。可正可负。

⑧双曲率面（镞面）

1) 在“数据与控制窗口”的“初始数据→结构参数”页中，在“面型”下面的数据输入表中，输入“TOR”（大、小写都可以）。表示该面为镞面；

- 2) 用鼠标单击“特殊面形”按钮，则弹出如图 2.15 所示的窗口；
- 3) 在图 2.15 中，分别输入子午方向曲率半径和弧矢方向曲率半径，然后按“确定”按钮即完成输入。

⑨平面光栅

1) 在“数据与控制窗口”的“初始数据—>结构参数”页中，在“面型”下面的数据输入表中，输入“GRT”（大、小写都可以）。表示该面为光栅面；

2) 用鼠标单击“特殊面形”按钮，则弹出如图 4 所示的窗口；

3) 在图 4 中，分别输入要计算的衍射级次 m 和光栅刻线 N ，并选择光栅类型和刻线方向，然后按“确定”按钮即完成输入。

注意：程序认为光栅的中心刻线和一条坐标轴重合。如果不重合，只要将光栅偏心一个值即可（即同时认为光栅面为偏歪面）。

输入说明：

对于以上的偏心和倾斜面、镗面、光栅面，要修改所输入的数据时，必须先用鼠标在对应的面型框内点击一下，再单击“特殊面形”按钮，才会弹

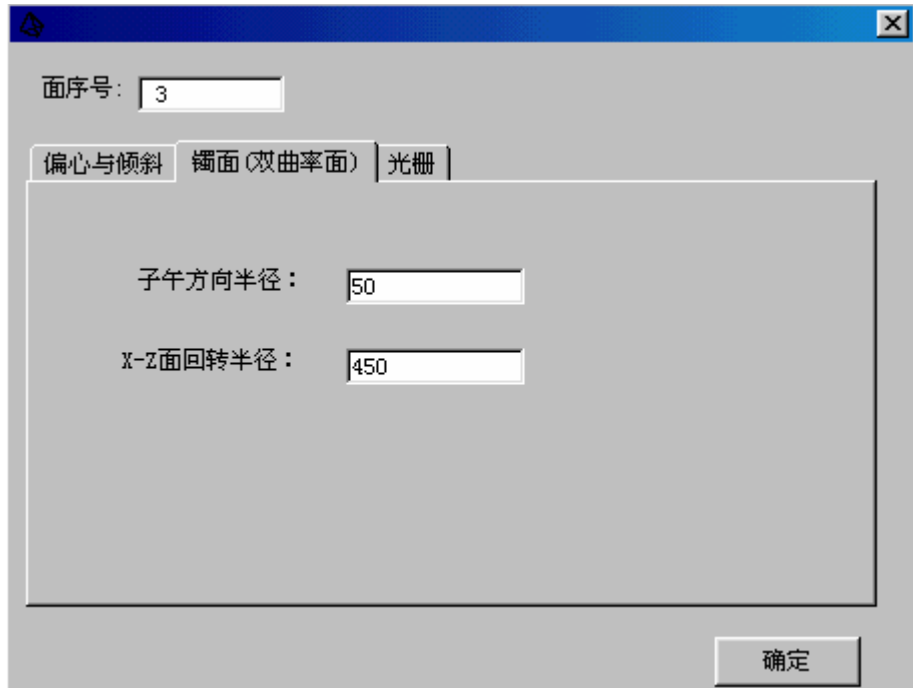


图 2.15

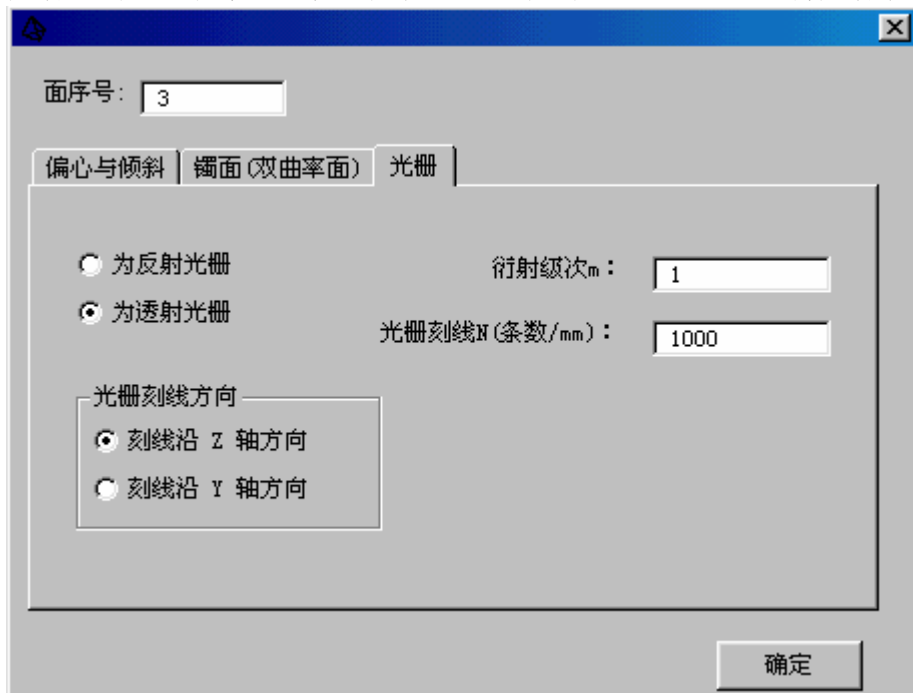


图 2.16

出如图 2、3、4 所示的输入窗口。如果要取消某一面的特殊面形，只需删除该面形的符号即可。所有特殊面形的符号规则与球面系统的一致。

第三章 自动优化功能

3.1 概述

TCOS2.00 的自动优化方法为适应法，由用户指定需要优化的像差及其应达到的目标值。将在后续版本中加入阻尼最小二乘法。适应法自动校正程序的最大特点是：第一，参加校正的像差个数 m 不能大于自变量的个数 n ；第二，参加校正的像差不能相关。因为适应法所求的解，严格满足像差线性方程组的每个方程式，如果某两种像差相关，像差方程组就无法求解，校正过程就要中断。这对使用者提出了较高的要求，使用者应该有一定的光学设计经验，必须先判断那些像差是相关的，不能同时参加校正。另外，给出的初始结构也应该比较合理，否则不能得到较好的结果。在自动优化的过程中，有的变量在初始阶段可能是不相关的，但在优化过程中有可能变成相关的。这些都是适应法的一些缺点。但同时它又具有较大的优点：第一，符合中国的光学设计人员的传统习惯，可根据像差理论进行优化，有利于提高设计人员素质；第二，要平衡的像差由设计人员指定，能将一些像差消到很小的指定值，且具有较大的灵活性，有利于满足一些特殊光学系统的要求。

程序将系统的四个主要光学参数也作为像差对待，用户指定目标值。这四项为光焦度 Φ （焦距倒数）、相对后截距 l'/f' 、相对出瞳距离 lz'/f' 、垂轴放大率 β 。

TCOS 在界面安排上，充分考虑使用者的要求，最大限度减少使用者的输入和记忆量。无论是自变量的确定，还是要校正像差的确定都非常容易选择。

3.2 TCOS 的可控像差

TCOS2.00 的可控制像差有 37 种，具体的代号及中文说明如下：

$\delta Lm'$	轴上点边缘球差（全口径球差）
KTm'	视场边缘全口径的子午慧差
$Xtsm'$	视场边缘的细光束像散
Xtm'	视场边缘的细光束子午场曲
Xsm'	视场边缘的细光束弧矢场曲
$\delta Yzm'$	视场边缘的畸变
$\Delta LFC0.7'$	0.707口径的轴像色差
$\Delta YFCm'$	视场边缘的垂轴色差
$\delta Lsn'$	0.707口径的剩余球差
$\delta LTym'$	视场边缘的全口径的子午视场高级球差
$KT'snh$	视场边缘0.707口径的剩余子午慧差
$KT'sny$	0.707视场全口径的剩余子午慧差
$Xtsn'$	0.707视场剩余细光束子午场曲
$Xssn'$	0.707视场剩余细光束弧矢场曲
$\delta LFC'$	色球差
$\Delta YFC'sn$	色畸变
Φ	系统总光焦度（焦距倒数）

l' / f'	相对后工作距离
l_z' / f'	相对出瞳距离
β	垂轴放大率
ST	子午垂轴像差的均值
$\delta L' 0.7$	0.707口径的球差
$KT' 0.7my$	0.707视场、全口径的子午慧差
$KT' my 0.7h$	边缘视场、0.707口径的子午慧差
$KS' 0.7y 0.7h$	0.707视场、0.707口径的弧矢慧差
$Xts' 0.7$	0.707视场的细光束像散
$Xt' 0.7$	0.707视场的细光束子午场曲
$Xs' 0.7$	0.707视场的细光束弧矢场曲
$\delta Yz' 0.7$	0.707视场的畸变
$\Delta YFC' 0.7$	0.707视场的垂轴色差
$Ks' 0.3$	0.3视场全口径的弧矢慧差
Dm	视场边缘 $\pm 1h$ 的子午光线对的弥散尺寸
$Dm 0.7h$	视场边缘 $\pm 0.707h$ 的子午光线对的弥散尺寸
$D0.7ym$	0.707视场 $\pm 1h$ 的子午光线对的弥散尺寸
$D0.7y 0.7h$	0.707视场 $\pm 0.707h$ 的子午光线对的弥散尺寸
ρDFC	三个视场、三种色光的综合弥散圆半径的加权平均值
ρD	三个视场、主光线的垂轴像差的平均值

使用者可选取上述的任意参数作为像差进行平衡，但必须满足不能相关及个数小于自变量个数的规定。

使用者在输入完初始数据后，可以通过菜单“显示→所有可控像差值”来观看系统当前的上述像差的具体值，以确定需要平衡那些像差。

3.3 自动校正功能的实现

在输入完初始数据后，要进行自动优化，必须首先指明那些参数作为自变量，以及要平衡哪些像差。通常优化一个系统，焦距是必须作为要优化的量，其它像差则要根据使用者的要求以及光学系统的结构形式与用途来决定。我们仍以第二章所述的例1来说明优化的过程。

在第二章中，曲率半径是随便输入的值，因此系统的有效焦距为484.64597mm，而我们要求系统焦距为250mm。而且由于是随便输入的数据，一般像差也比较大。下面我们说明优化的过程。

①将页面换到“初始数据”的“结构参数”页，在三个曲率半径后加上一个字母“v”或“V”，回车或将鼠标点往别处，则这些数据变为红色，表示用户指明这些参数为优化过程中的自变量。如图3.1所示。

②单击“确定”按钮，单击“自动优化参数”页签，则显示出“自变量”页，要求输入欲达到的焦距和优化初始增量。界面如图3.2所示。其中“自变量数”是由第①步决定的，“欲达到的焦距”则由用户输入。

输入窗口			
	曲率半径	厚度间隔	玻璃名
1	200v	10	1
2	-200v	6	k9
3	-5000v	472.72215	

图 3.1 设置优化自变量

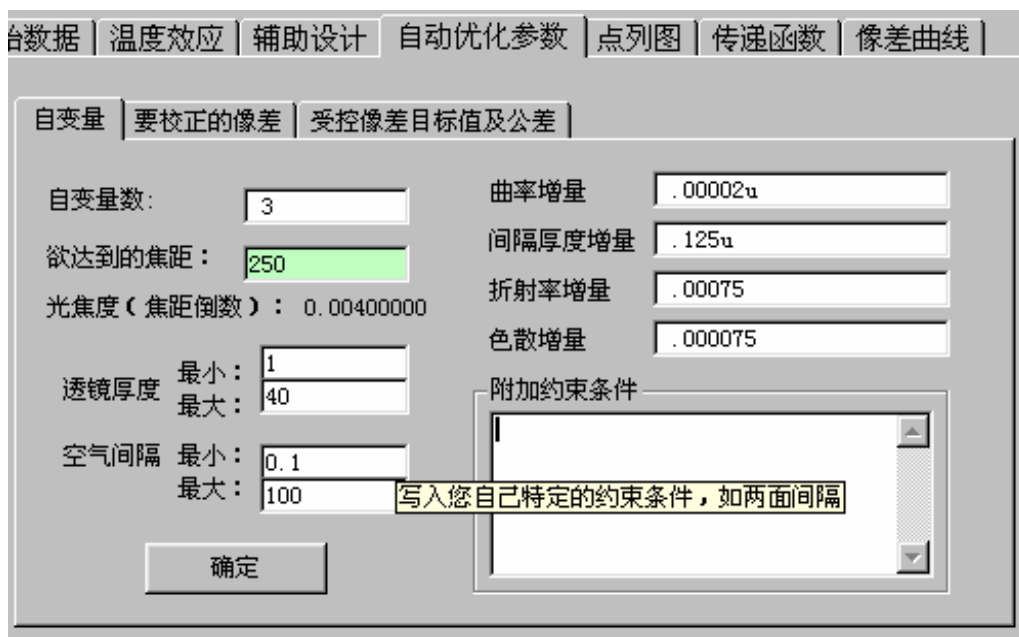


图 3.2 自动优化之自变量页面

在输入的过程中，显示的“光焦度（焦距倒数）”则不断地变化，同时“曲率增量”、“间隔厚度增量”等也根据输入的焦距值而不断变化。这些增量值是自动优化的自变量初始增量，在优化过程中，增量由程序自动调整，因此这些由程序确定的初始值通常能满足要求。在输入焦距250后，单击“确定”按钮。

该页面中还有透镜厚度和空气间隔的输入框，其中透镜厚度最大值就是透镜的中心厚度，最小厚度对于正透镜和负透镜不同，正透镜指的是透镜的边缘厚度，负透镜则是透镜的中心厚度。空气间隔具有类似的特点，只要将空气层看成透镜就行了。这是为了满足加工和装配的需要。在自动优化过程中，如果没有矛盾约束，程序会自动调整满足要求。

上述约束条件的作用范围是系统中所有透镜和空气间隔。如果对两面之间的间隔有特定的参数，则在右边的“附加约束条件”输入框中定义，语法为：

oal $S_i..S_{i+1}>Val$ 或
oal $S_i..S_{i+1}<Val$

其中oal表示为两面间隔， S_i 和 S_{i+1} 是面的序号，两面序号之间用两个小点“..”连接。val表示约束值，只能为大于或小于，不能是等于。在一行内只能写一个约束条件，如果有多个特定约束，需要分行写。例如：

oal 1..2<10
oal 1..2>2

表示要求第1面和第2面之间的最小间隔为2，最大间隔为10。这样就改变了某两面间原来的缺省约束值。

需要说明的是，只有在两面之间的间隔作为自变量参加优化时，这些约束条件才能起作用。在本例中由于透镜厚度没有作为自变量，因此这些约束条件不起作用。

③程序自动切换到“要校正的像差”页，在这一页里，列出了所有可供平衡的像差。每种像差代号前有一个复选框，使用者确定要校正某些像差时，选中其前面的复选框即可。当鼠标移动到某项像差代号前时，在复合框下面会实时显示

除该项像差的中文说明，因此使用者能非常方便地选择出要校正的像差而无需作任何记忆。如图3.3所示。



图 3.3 选择要校正的像差界面

其中，第1到第8种像差（ $\delta Lm'$ ~ $\Delta YFCm'$ ）为初级像差，通常比较容易校正，第9到第16种为高级像差（ $\delta Lsn'$ ~ $\Delta YFCsn'$ ），对于大视场角的系统，一般比较难以校正，这16种像差是自动优化过程中常用的。第17到第20种像差（ Φ ~ β ）实际上是光学特性参数，在自动优化过程中作为像差对待。第21种像差（ST）是垂轴像差曲线和水平轴之间所围的面积，是一种综合指标，通常可以用其进行初优化，其目标值不要给0。以下为一些辅助像差，可根据情况选用。例如，第36种像差（ ρDFC ）为综合弥散半径，它能比较好地反映成像质量，但需要计算点列图，要追迹大量光线，速度较慢，因此一般只在最后精优化时才采用。其它像差可根据该项像差的意义，结合实际系统进行选用。

④单击“应用”按钮，则程序自动切换到“受控像差和目标值”页面。在该页的表格中，程序根据使用者在第③步做出的选择，自动列出了使用者要校正的像差。同时，对于光焦度 Φ ，程序自动填写其目标值。其它为空，表示其要求的值为0，使用者不用输入。因此在通常情况下，使用者在该页可不填任何数值。如图3.4所示。但对于有些系统，其结构型式不足以使像差校正到0，则必须合理确定目标值。



图 3.4 受控像差目标值及公差

⑤单击输入窗口右边的“操作选择”面板中的“自动优化按钮”，则程序进行自动优化。也可通过工具栏中的快捷按钮或菜单“系统操作→自动优化”来进行。在优化过程中，程序首先自动切换

到“初始数据”的“高斯参数”页，并将优化过程中的不断变化的计算结果实时显示在该页面上。同时“数据与控制窗口”的底部状态栏中显示出当前的最大因子和优化的步长。最大因子通常逐渐减小，但也可能出现忽大忽小的振荡情况，程序可自动调整。如果最大因子连续增大，使用者也可以人工终止优化，再修改初始数据后再进行优化。在优化的过程中，工具栏的快捷按钮变灰，表示不可操作。只剩一个“停止”按钮可以操作。使用者随时单击该按钮，则优化过程立即终止，并将当前的结果显示出来。通常如果最大因子的变化量非常小，则可人工终止优化。对例1的优化完成后，程序显示的结果如下：

-----自动优化-----

优化前，受控像差的情况为：

**受控像差KTm'
目标值：0
现在值：-0.051131
**受控像差 Δ LFC0.7'
目标值：0
现在值：1.288214
**受控像差 ϕ
目标值：.004
现在值：0.002062

优化后，受控像差的情况为：

**受控像差KTm'
目标值：0
现在值：0.000232
**受控像差 Δ LFC0.7'
目标值：0
现在值：-0.016368
**受控像差 ϕ
目标值：.004
现在值：0.004007

程序指出了优化前和优化后的受控像差情况。对于不同的计算机，其结果可能略有不同。可见，像差大大减小。起到了优化的作用。对于一些系统，通常先优化一部分像差，再优化另外一部分像差，反复进行几次，往往能够得到更好的结果。比如对于例1，在经过上述优化后，再将球差 $\delta Lm'$ 、慧差 KTm' 、光焦度 Φ 投入优化，得到了更好的结果。二者的传递函数MTF计算结果对比，如图3.5及3.6所示。这些都需要使用者的设计经验。

光学设计软件的自动优化功能是非常重要的，掌握自动优化功能的一些使用技巧，对于充分发挥软件的自动优化的潜能，更快地设计出像质良好的光学系统，具有很重要的意义。下面是一些要注意的事项。

1. 自动优化时，一般不要将所有准备平衡的像差同时校正，而是先校正一部分像差，例如球差和彗差，然后显示所有可控像差值，挑选其中较大的像差逐步加入自动优

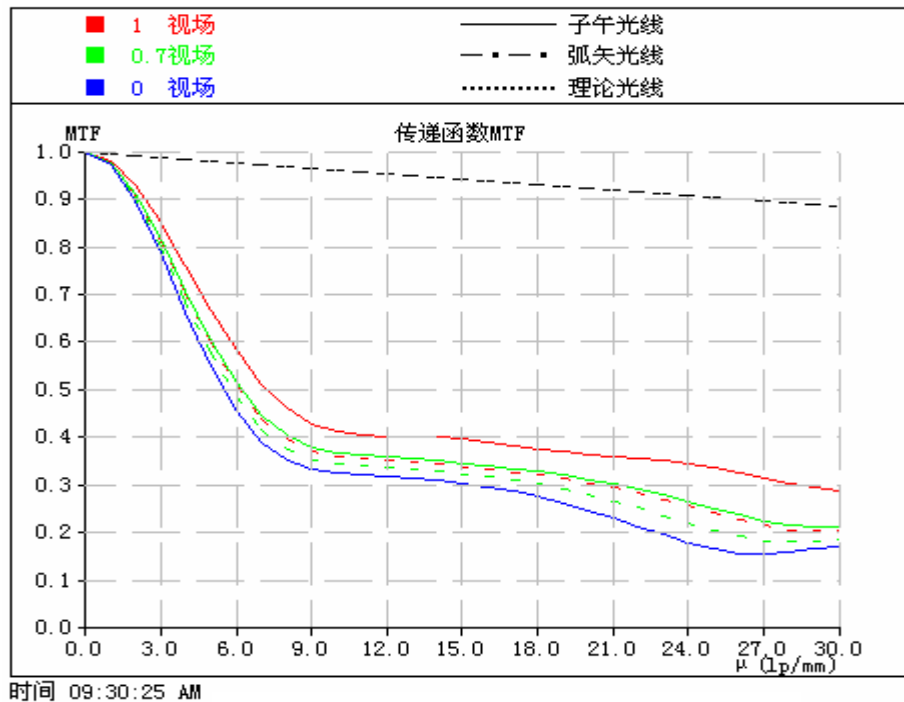


图 3.5 例1首次优化后的 MTF 曲线

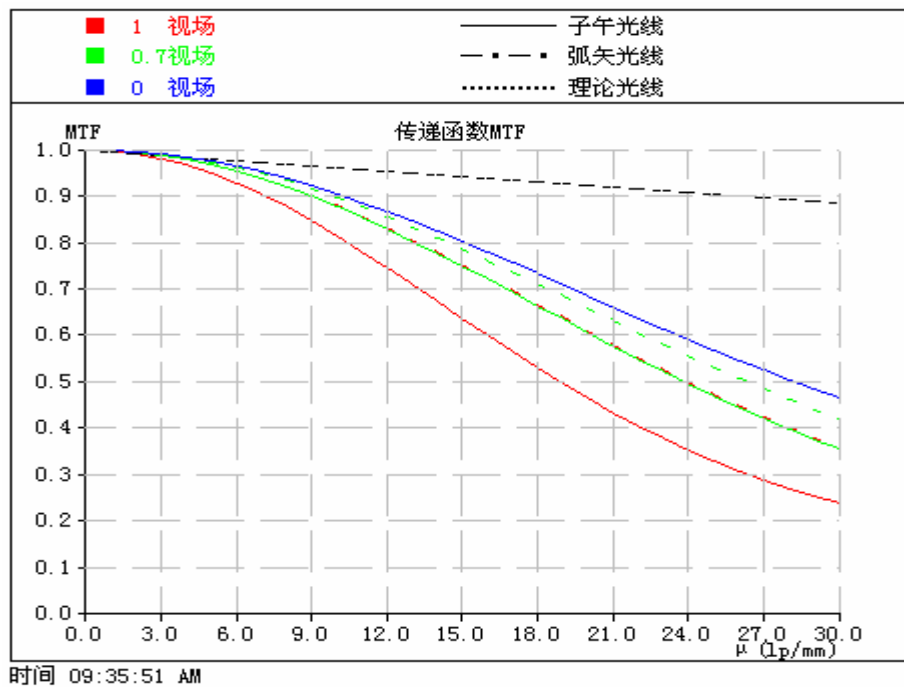


图 3.6 例1二次优化后的 MTF 曲线

化行列。TCOS 中, 进行这一过程是非常方便的。这样往往能提高设计速度, 甚至避免一些优化过程中的相关现象;

2. 有时在优化过程中, 最大因子经过震荡后, 进入一种稳定慢收敛状态 (表现为状态栏中的最大因子的值持续减小, 但减小得比较少), 这时可终止优化, 然后再单击“自动优化”按钮重新投入优化, 往往能快速收敛到位;

3. 有时程序自动优化结束后, 像差值还不一定满足使用者的要求, 这时可以不作任何修改, 再单击“自动优化”按钮, 重新优化; 如果还是不满足要求, 则可以修改自动优化中的自变量增量, 例如将“曲率增量”减小或增加一个数量级。

4. 对于有些难校正的像差, 可根据显示的“所有可控像差值”的大小, 逐步校正减小其值, 直到无法校正下去为止。即不要试图一次使其校正到 0。这个过程中注意每校正一次后都观看一下结果, 并注意将当前数据存盘。

5. 自动优化可控像差的“综合平均弥散半径”项, 是多视场、多色光的垂轴像差的综合均方根值, 是建立在追迹大量光线的基础上的综合指标, 用其进行优化时, 速度很慢。一般只有在优化特殊面形和非共轴系统时才有用。

6. 对于非共轴的系统, 传统的几何像差已经失去意义, 因此一般不校正单项几何像差。

最后需要说明的是, “自动设计”是让计算机根据一定的算法, 代替人做分析像差和自动修改结构参数的工作。计算机及优化程序的出现, 大大减轻了人的劳动强度, 使光学设计产生了一个飞跃。过去一个人需要几个月的时间计算, 现在用计算机只要几分钟就可能完成, 而且能设计出质量更高, 结构更简单的光学系统。但是, 要设计一个光学特性和像质都能满足特定的使用要求而结构又最简单的光学系统, 只靠自动设计程序是难以完成的。在使用自动设计程序的条件下, 人的主观能动性仍然起主导作用, 特别是那些为了满足某些特殊需要而设计的新结构型式, 主要是依靠设计人员的理论分析和实际经验来完成的。因此, 光学设计者必须学习光学设计的基本理论, 并通过光学自动设计程序多加练习, 才能真正掌握光学设计, 并用好光学设计软件。

第四章 TCOS 的像质评价及其它计算功能

4.1 概述

TCOS 提供了丰富的像质评价功能，使用者可对一个光学系统进行多种方式的评价。在 TCOS2.00 中主要提供了以下评价手段：

- 几何像差数据
- 几何像差曲线
- 点列图
- 弥散园能量分布曲线
- 几何光学传递函数 MTF 及曲线

4.2 几何像差计算

在输入完一个系统的初始数据后，即可计算几何像差。只要单击“操作选择”面板中的“像差计算”按钮，即可计算出几何像差。它包括以下几个方面的内容：

①轴上点像差

含球差、球差弥散园、F 光球差、C 光球差、轴向色差五项。

②轴外点像差

含 1、0.85、0.7071、0.5、0.3 视场的单项像差，高级像差，以及垂轴像差。输出数据比较多，下面给出像差代号的中文说明。

以下为初级像差

Lz1	入瞳距离
Lz2	出瞳距离
Yz'	主光线在像面的高度
Xt'	子午场曲
Xs'	弧矢场曲
Xts'	细光束像散
$\delta Yz'$	畸变
$\delta Yz' F$	第一参考光 (F 光) 畸变
$\delta Yz' C$	第二参考光 (C 光) 畸变
$\Delta y_{FC}'$	垂轴色差
$\delta LT'$	子午球差
$\delta LS'$	弧矢球差
KT'	慧差

以下为高级像差

$\delta L' sn$	孔径高级球差
$\delta LT' y$	视场高级球差
KT' snh	孔径高级慧差
KT' sny	视场高级慧差

Xt'_{sn}	高级细光束子午场曲
Xs'_{sn}	高级细光束弧矢场曲
$\delta LFC'$	色球差
$\Delta y_{FC' sn}$	色畸变

以下为反映弥散程度的综合像差（垂轴像差）

$\delta Yt'$	子午垂轴像差
$\delta Ys'$	弧矢垂轴像差的子午分量
$\delta Zs'$	弧矢垂轴像差的弧矢分量

有关像差的计算方法及其物理意义，使用者可参考有关的像差理论书籍，比如北京理工大学出版社出版的《光学设计》（袁旭沧 主编）一书。

以第三章优化后的双胶合物镜物镜为例，输出的结果如下：

程序注释：TCOS软件的测试系统。f' = 250

双胶合物镜

设计时间：2001年9月10日 07:37:27 PM

-----输入数据-----

1. 初始参数

物距	半视场角(°)	入瞳半径		
0	-1	25		
系统面数	色光数	实际入瞳	上光渐晕	下光渐晕
3	3	0	1	-1
理想面焦距	理想面距离			
0	0			

面序号	半径	厚度	玻璃
ST0	154.4776	8.000	1
2	-101.0406	5.000	k9
3	-356.6726	243.825	f5

☆定义了下列玻璃：

K9	1.5163	1.521955	1.513895
ZF1	1.6475	1.661196	1.642076
F5	1.6242	1.63663	1.619252

-----计算结果-----

1. 高斯参数

有效焦距(f')	后截距(L')	前截距(L)	像距(l')
249.99837	243.82516	-247.74414	243.82516

入瞳距离(l_z)	出瞳距离(l_z')	近轴像高(y')	放大率(β)
0.00000	-8.44786	-4.36374	0.00000

入瞳直径(D)	出瞳直径(D')	拉赫不变量(J)	像方孔径角(U')
50.00000	50.45493	0.13091	0.10000

2. 像差

零视场像差

		1H	0.85H	0.707H	0.5H	0.3H	0H
球差	$\delta L'$	0.0044	-0.0470	-0.0589	-0.0435	-0.0188	0.0000
弥散圆	$\delta LR'$	0.0004	-0.0040	-0.0042	-0.0022	-0.0006	0.0000
F光球差	$\delta LF'$	-0.0841	-0.1967	-0.2553	-0.2900	-0.2961	-0.2943
C光球差	δLC	0.2010	0.1717	0.1767	0.2102	0.2461	0.2711
轴向色差	$\Delta LFC'$	-0.2851	-0.3684	-0.4320	-0.5002	-0.5423	-0.5654

D光各视场像差

相对视场	$Lz1$	$Lz2$	Yz'	Xt'	Xs'	Xts'
1	0.0000	-8.4473	4.3637	-0.1363	-0.0635	-0.0728
.85	0.0000	-8.4475	3.7092	-0.0985	-0.0459	-0.0526
.7071	0.0000	-8.4476	3.0856	-0.0682	-0.0318	-0.0364
.5	0.0000	-8.4478	2.1819	-0.0341	-0.0159	-0.0182
.3	0.0000	-8.4479	1.3091	-0.0123	-0.0057	-0.0066

	$\delta Yz'$	$\delta Yz'F$	$\delta Yz'C$	$\Delta yFC'$	$\delta LT'$	$\delta LS'$
1	0.0000	-0.0003	0.0001	-0.0004	0.0046	0.0041
.85	0.0000	-0.0002	0.0001	-0.0003	0.0045	0.0042
.7071	0.0000	-0.0002	0.0001	-0.0003	0.0045	0.0043
.5	0.0000	-0.0001	0.0001	-0.0002	0.0044	0.0043
.3	0.0000	-0.0001	0.0000	-0.0001	0.0044	0.0044

	$KT' 1.0H$	$KT' .7H$	$KT' .3H$	$KS' 1.0H$	$KS' .707H$	$KS' .3H$
1	0.0000	0.0010	0.0003	0.0005	0.0005	0.0001
.85	0.0000	0.0009	0.0003	0.0004	0.0004	0.0001
.7071	0.0000	0.0007	0.0002	0.0004	0.0003	0.0001
.5	0.0000	0.0005	0.0002	0.0003	0.0002	0.0001
.3	0.0000	0.0003	0.0001	0.0002	0.0001	0.0000

高级像差

$\delta L' sn$	$\delta LT' y$	$KT' snh$	$KT' sny$
----------------	----------------	-----------	-----------

-0.00377	0.00008	-0.00152					
.5	0.00026	-0.00116	0.00027	-0.00537	0.00023	-0.00531	0.00014
-0.00298	0.00005	-0.00104					
.3	0.00016	-0.00014	0.00016	-0.00450	0.00014	-0.00458	0.00008
-0.00247	0.00003	-0.00074					
0	0.00000	0.00044	0.00000	-0.00401	0.00000	-0.00418	0.00000
-0.00218	0.00000	-0.00056					

在通常情况下，使用者应该对上面的数据比较熟悉。另外，通常应该重点考虑垂轴像差，因为它是一种综合像差，直接反映了光线的像面的弥散程度。

4.3 像差曲线

显然，分析 4.2 所述的像差计算数据是比较枯燥的，因为它涉及了多视场、多口径的情况，设计者不太容易从总体上把握像差的大小与走向。TCOS 提供了自动绘制像差曲线的功能，如图 4.1 所示。

在“像差曲线”页面，左边有一个面板，其中有两列按钮，显示了 TCOS 能够绘制的像差曲线。使用者在输入完初始数据后，单击其中一个按钮，则画出对应的像差曲线。当将鼠标停留在其中任一按钮上时，程序都能给出该按钮对应的像差的详细说明，如图 4.2 所示。使用非常方便。

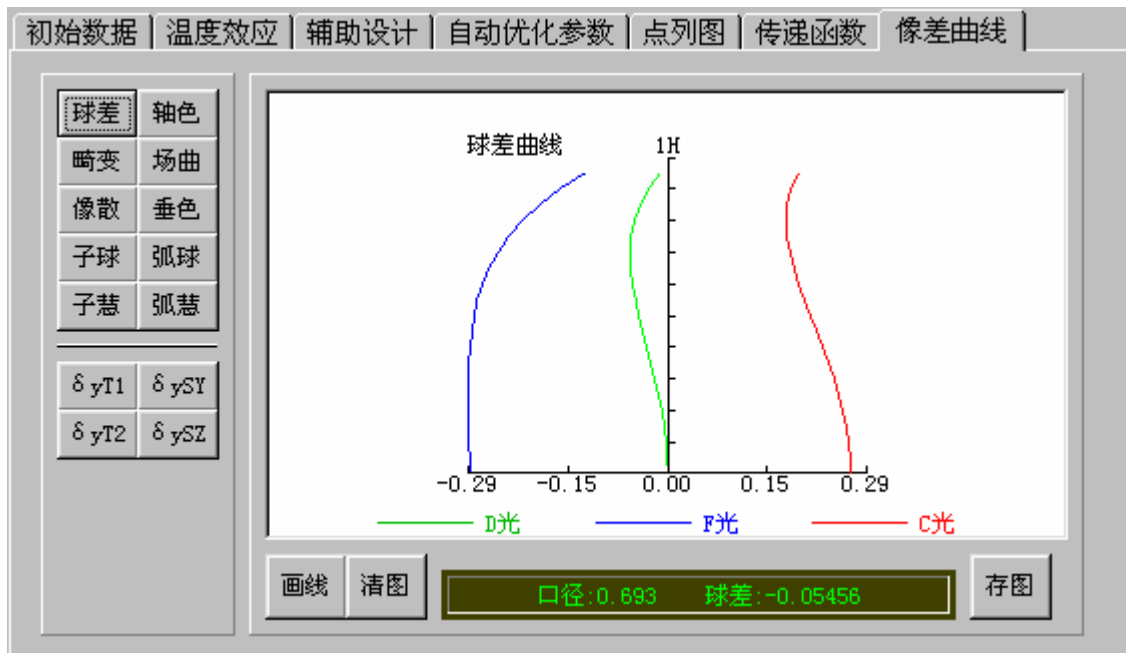


图 4.1 像差曲线绘制界面

在图 4.1 所示中，曲线的下方还有三个按钮。点击“画线”按钮后，则打开了人工画线开关，使用者可用鼠标在绘图区绘制任意直线，主要是为了使用者能够将曲线和坐标轴能够比较准确地对应起来。

“清图”按钮则清除绘图区的所有图形，这时不能在绘图区人工画线。要再次用鼠标画线，必须再点击一次“画线”按钮。自动绘制像差曲线则不受此影响。“存图”按钮则可将当前绘制的像差曲线图形存为“*.BMP”图形，用户可方便地用其它工具进行打印输出、插入文档等。

从图 4.1 绘制的像差曲线可以看出，设计者能够对像差大小情况一目了然，有利于把握像差情况。图形中还给出了中文提示，更是方便了用户或其它人员使用。另外，当将鼠标移到绘图区（曲线上）时，程序会在绘图区下方实时给出当前的口径（或视场）的像差值，如图 4.1 所示的“口径 0.693 球差 -0.05456”，这样用户能够大致知道任意口径（或视场）的像差的值。



图 4.2 像差曲线按钮提示

TCOS2.00 能够绘制的像差曲线有：

- 轴向光线在不同口径的球差 $\delta L'$
- 色光在不同口径的球差 $\Delta LFC'$
- 不同视场的三种色光的畸变
- 不同视场的细光束子午场曲 Xt' 和弧矢场曲 Xs'
- 不同视场的像散 Xts'
- 不同视场的垂轴色差 $\Delta yFC'$
- 轴外光线在不同视场全口径的子午球差 $\delta Lt'$
- 轴外光线在不同视场全口径的弧矢球差 $\delta Ls'$
- 不同视场、三个口径的子午慧差 (1、0.707、0.3 口径)
- 不同视场、三个口径的弧矢慧差 (1、0.707、0.3 口径)
- 不同视场、三条上光线的子午垂轴像差
- 不同视场、三条下光线的子午垂轴像差
- 不同视场、三对光线的弧矢垂轴像差的子午分量
- 不同视场、三对光线的弧矢垂轴像差的弧矢分量

4.4 点列图及能量分布

光学系统的像差和成像质量并没有非常明确的关系。而点列图反映了大量光线通过系统各面后达到像面的情况。它表明了在不考虑衍射情况下的光线弥散情况。它是一种综合数据，因此和系统的成像质量有明确的关系。

计算点列图首先要在入瞳面上均匀划分网格，每个网格内追迹一根光线。在 TCOS 中，网格是以正方形来划分网格的，如图 4.3 所示。划分出的网格大小以网格划分比来表示。网格比越小，

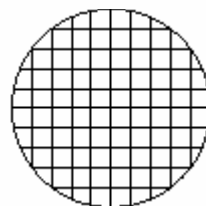


图 4.3 入瞳网格划分图

表示网格数越多，通常计算的结果越准确。程序缺省的网格比为 0.2。

在 TCOS 中，计算点列图即考虑了简便性，又兼顾了灵活性。通常情况下，在输入完系统的初始数据后，只要点击以下操作选择中的点列图，即可计算出点列图以及像面的能量分布。使用者不需输入任何数据。当然，使用者也可以根据情况，做出以下选择：

- 确定划分的网格比
- 是否只计算单色光
- 自定义比例尺
- 画出弥散园均方图
- 指明像面位移

点列图计算的页面如图 4.4 所示。

当改变下拉列表框中的网格比的值使，右边显示该网格比对应的点数（光线数）。当选中“用户定义比例尺”时，会显示出一个输入框，要求使用者输入点列图比例尺的值。如果不选中该项，则程序根据计算结果自动设定比例尺。选中“画出弥散圆均方图”时，则在画出点列图的同时，还画出点列图的均方根值作为半径所对应的圆。

由于有些系统，在近轴像面位置并不是像质最佳的位置，因此，TCOS 还允许用户指定计算的像面位移，评价偏离像面一定距离的位置的像质，也便于用户找到最佳像面位置。用户设计完成后，可以由程序自动寻找最佳像面。当像面位移的值变化时，结构参数页的像面距离会跟着同步变化。

TCOS 计算点列图后，输出 1、0.707、0 视场的结果，数据包括共追迹点数、通过点数、通过百分比、弥散圆直径均方根值。通常可考察均方根值。

TCOS 在计算点列图的同时，还计算三个视场的点列图能量分布曲线。因为对许多系统而言，只需考虑 70% 的点的弥散程度，因此这是一个非常实用的功能。使用者也很容易根据曲线考察光束弥散情况。

对 4.2 的例子而言，输出的结果如下所示。由于输出结果中有中文的说明，用户很容易看明白数据。

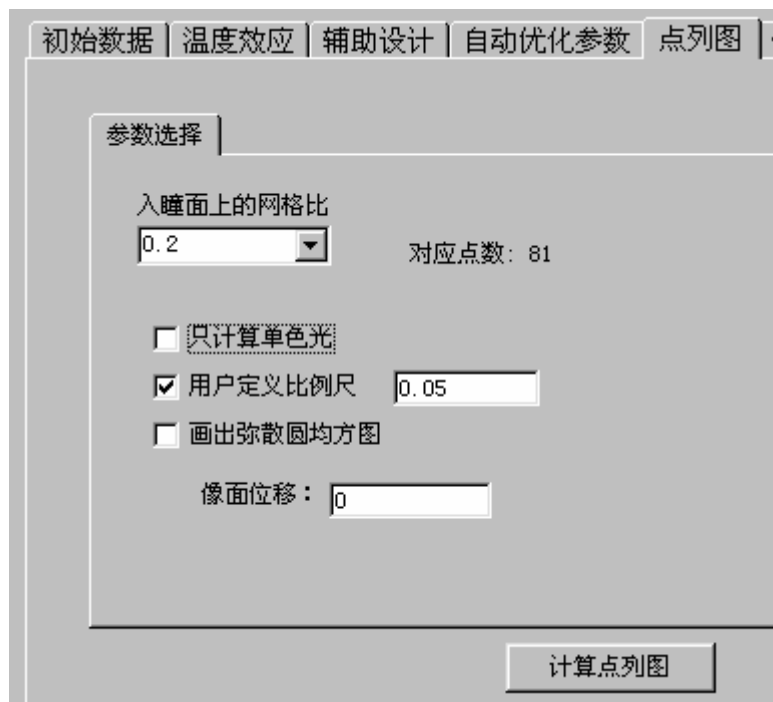


图 4.4 点列图计算界面

-----点列图计算结果-----

计算位置的像面偏离理论像面距离: 0

1 视场

共追迹点数	通过点数	通过百分比	弥散圆直径均方根值
243	241	0.992	0.02865

.7071 视场

共追迹点数	通过点数	通过百分比	弥散圆直径均方根值
243	243	1.000	0.02495

0 视场

共追迹点数	通过点数	通过百分比	弥散圆直径均方根值
243	243	1.000	0.02322

----加权综合弥散半径为(权因子为:1、1.414、2): 0.012504

点列图能量分布情况

☆这里计算的是实际通过的光线在像面上的能量分布

----1 视场----

能量	范围半径
10%	0.003921
20%	0.005638
30%	0.007075
40%	0.008547
50%	0.010126
60%	0.011859
70%	0.014880
80%	0.020600
90%	0.024567
100%	0.029097

----0.707视场----

能量	范围半径
10%	0.004042
20%	0.005911
30%	0.007044
40%	0.007977
50%	0.009318
60%	0.010501
70%	0.013902
80%	0.016990
90%	0.020797
100%	0.023523

----0 视场----

能量	范围半径
10%	0.001240
20%	0.003313
30%	0.004256

40%	0.008389
50%	0.009851
60%	0.012661
70%	0.014117
80%	0.016079
90%	0.017392
100%	0.020182

在输出计算结果的同时，程序还画出了点列图及能量分布曲线。如图 4.5 及

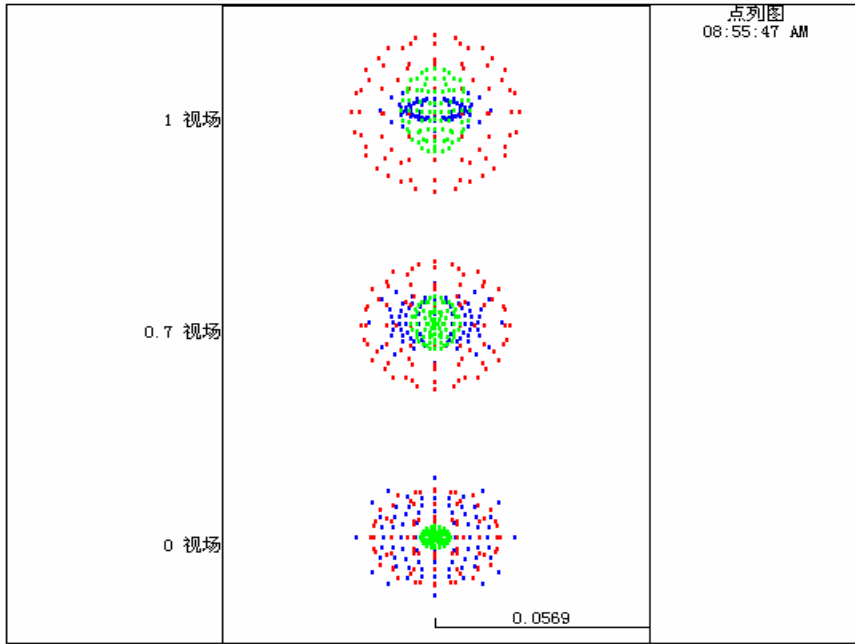


图 4.5 点列图

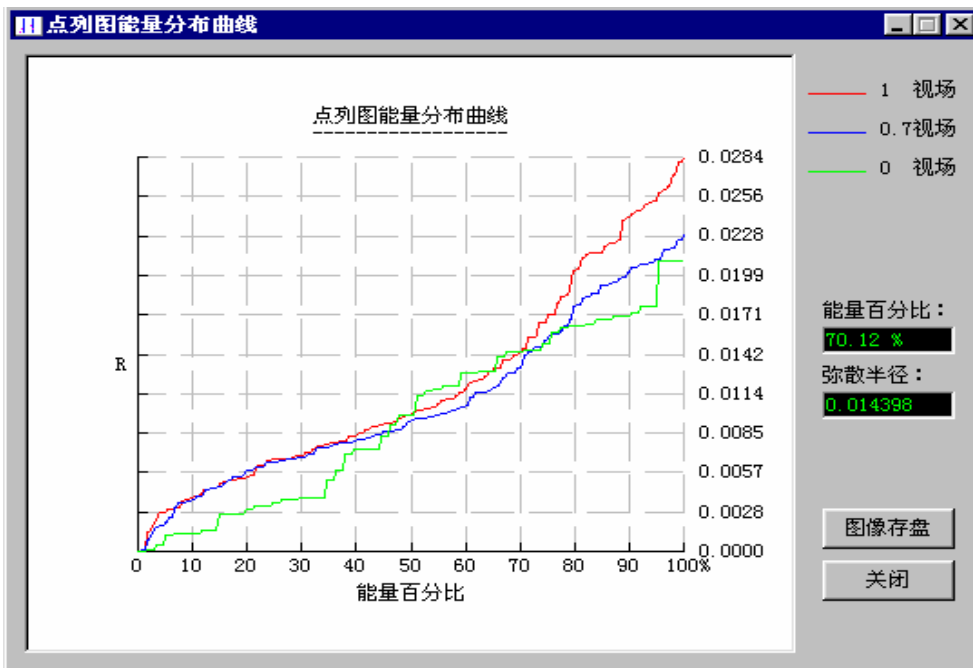


图 4.6 点列图能量分布曲线

4.6 所示。

在图 4.6 中，当使用者把鼠标放在曲线上时，绘图区右边会显示出当前的能量百分比和弥散半径。这样就可弥补结果输出时的仅给出 10 的整数倍的百分比的问题。

4.5 几何传递函数 MTF

对于一些常用的光学仪器，例如目视光学仪器，人们已经总结出一些比较可靠的经验数据，作为光学设计中像差公差的标准。但随着科学技术的发展，光学仪器的使用范围日益扩大，种类不断增加，作为光学系统的接收器，已不局限于人眼，如不同性能的感光乳胶、CCD、各种类型的光敏元件等。在这些不同类型的光学仪器中，光学系统的实际工作性能和像差之间更是没有直接的数量对应关系。而计算光学传递函数则能在设计阶段就能比较确切的知道系统的实际工作性能。光学传递函数已经成为评价光学系统成像质量最重要的手段之一。

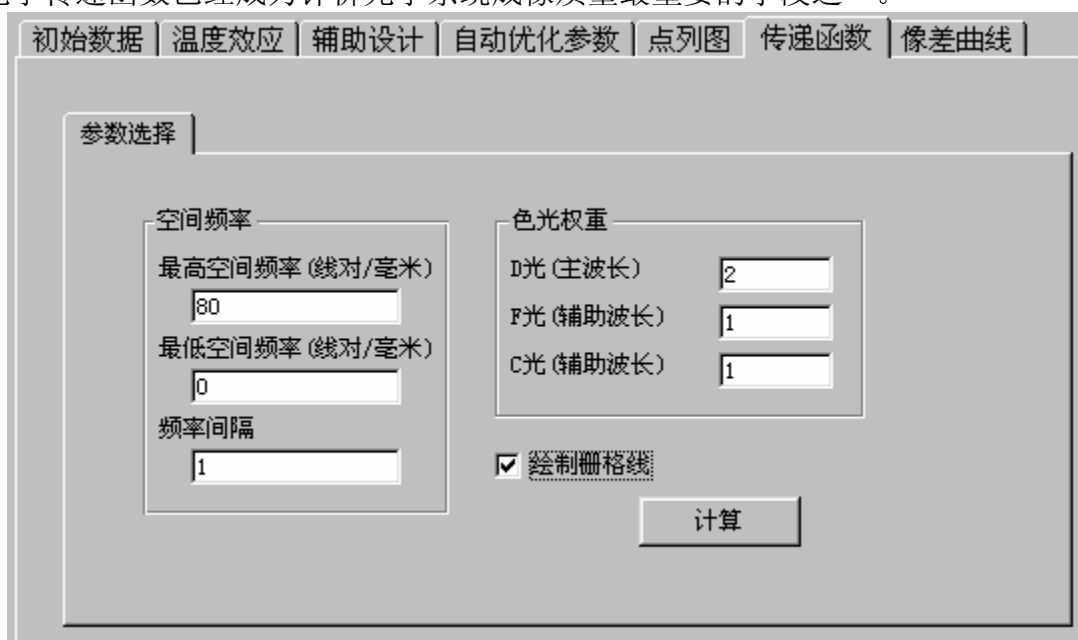


图 4.7 光学传递函数计算界面

TCOS2.00 能计算几何传递函数 MTF。其界面如图 4.7 所示。

使用者可任意指定最高空间频率、最低空间频率以及频率间隔，但要注意输入数据的合理性，例如最高空间频率应该大于最低空间频率及频率间隔等。当使用者输入的数据不合理时，程序会指出并给出提示。

色光权重缺省为 2、1、1，即中心波长为 2，参考波长为 1。使用者一般可不予修改。如果使用者想计算单色光（主波长）的传递函数，可令两种辅助波长的权重为 0。

选中“绘制栅格线”，可在输出曲线图时，绘制出栅格，以便观看更加清除。

程序计算并输出 1 视场、0.707 视场、0 视场的子午传递函数 MTF_t 、弧矢传递函数 MTF_s 以及理论传递函数 MTF。计算的结果下列所示。

-----光学传递函数MTF计算结果-----

线对lp	子午MTF _t	弧矢MTF _s	理论MTF
------	--------------------	--------------------	-------

**1 视场

0.00	1.0000	1.0000	1.0000
1.00	0.9979	0.9987	0.9963
2.00	0.9917	0.9949	0.9926
3.00	0.9815	0.9885	0.9889
4.00	0.9674	0.9796	0.9851
5.00	0.9496	0.9683	0.9814
6.00	0.9283	0.9548	0.9776
7.00	0.9038	0.9390	0.9739
8.00	0.8765	0.9212	0.9701
9.00	0.8467	0.9015	0.9663
10.00	0.8148	0.8800	0.9625
11.00	0.7811	0.8569	0.9587
12.00	0.7461	0.8324	0.9549
13.00	0.7102	0.8067	0.9511
14.00	0.6738	0.7800	0.9473
15.00	0.6372	0.7525	0.9434
16.00	0.6009	0.7244	0.9396
17.00	0.5651	0.6958	0.9357
18.00	0.5302	0.6670	0.9318
19.00	0.4965	0.6381	0.9279
20.00	0.4642	0.6093	0.9240
21.00	0.4335	0.5808	0.9201
22.00	0.4045	0.5528	0.9162
23.00	0.3774	0.5253	0.9123
24.00	0.3522	0.4985	0.9084
25.00	0.3289	0.4724	0.9044
26.00	0.3075	0.4473	0.9005
27.00	0.2880	0.4231	0.8965
28.00	0.2703	0.3999	0.8926
29.00	0.2542	0.3778	0.8886
30.00	0.2397	0.3568	0.8846

**0.707视场

0.00	1.0000	1.0000	1.0000
1.00	0.9987	0.9989	0.9963
2.00	0.9948	0.9957	0.9926
3.00	0.9883	0.9903	0.9889
4.00	0.9793	0.9828	0.9851
5.00	0.9678	0.9733	0.9814
6.00	0.9540	0.9617	0.9776
7.00	0.9380	0.9483	0.9739
8.00	0.9199	0.9331	0.9701
9.00	0.8999	0.9162	0.9663

10.00	0.8781	0.8978	0.9625
11.00	0.8548	0.8778	0.9587
12.00	0.8300	0.8566	0.9549
13.00	0.8041	0.8342	0.9511
14.00	0.7772	0.8109	0.9473
15.00	0.7494	0.7866	0.9434
16.00	0.7211	0.7616	0.9396
17.00	0.6924	0.7361	0.9357
18.00	0.6635	0.7102	0.9318
19.00	0.6345	0.6841	0.9279
20.00	0.6057	0.6579	0.9240
21.00	0.5773	0.6318	0.9201
22.00	0.5493	0.6059	0.9162
23.00	0.5219	0.5803	0.9123
24.00	0.4953	0.5552	0.9084
25.00	0.4695	0.5307	0.9044
26.00	0.4446	0.5068	0.9005
27.00	0.4206	0.4838	0.8965
28.00	0.3977	0.4617	0.8926
29.00	0.3759	0.4405	0.8886
30.00	0.3551	0.4203	0.8846

**0 视场

0.00	1.0000	1.0000	1.0000
1.00	0.9990	0.9990	0.9963
2.00	0.9960	0.9960	0.9926
3.00	0.9910	0.9910	0.9889
4.00	0.9841	0.9841	0.9851
5.00	0.9754	0.9754	0.9814
6.00	0.9648	0.9648	0.9776
7.00	0.9524	0.9524	0.9739
8.00	0.9384	0.9384	0.9701
9.00	0.9228	0.9228	0.9663
10.00	0.9057	0.9057	0.9625
11.00	0.8874	0.8874	0.9587
12.00	0.8678	0.8678	0.9549
13.00	0.8471	0.8471	0.9511
14.00	0.8255	0.8255	0.9473
15.00	0.8031	0.8031	0.9434
16.00	0.7800	0.7800	0.9396
17.00	0.7564	0.7564	0.9357
18.00	0.7325	0.7325	0.9318
19.00	0.7084	0.7084	0.9279
20.00	0.6842	0.6842	0.9240
21.00	0.6601	0.6601	0.9201

22.00	0.6362	0.6362	0.9162
23.00	0.6126	0.6126	0.9123
24.00	0.5896	0.5896	0.9084
25.00	0.5671	0.5671	0.9044
26.00	0.5454	0.5454	0.9005
27.00	0.5245	0.5245	0.8965
28.00	0.5044	0.5044	0.8926
29.00	0.4854	0.4854	0.8886
30.00	0.4674	0.4674	0.8846

同时绘制出曲线图。图中，红线表示 1 视场的 MTF 曲线、绿线表示 0.707 视场的 MTF 曲线、蓝线表示 0 视场的 MTF 曲线。黑色的虚线“.....”表示理论 MTF 曲线。另外，实线表示子午传函，虚线表示弧矢传函。程序自动绘制坐标轴及其

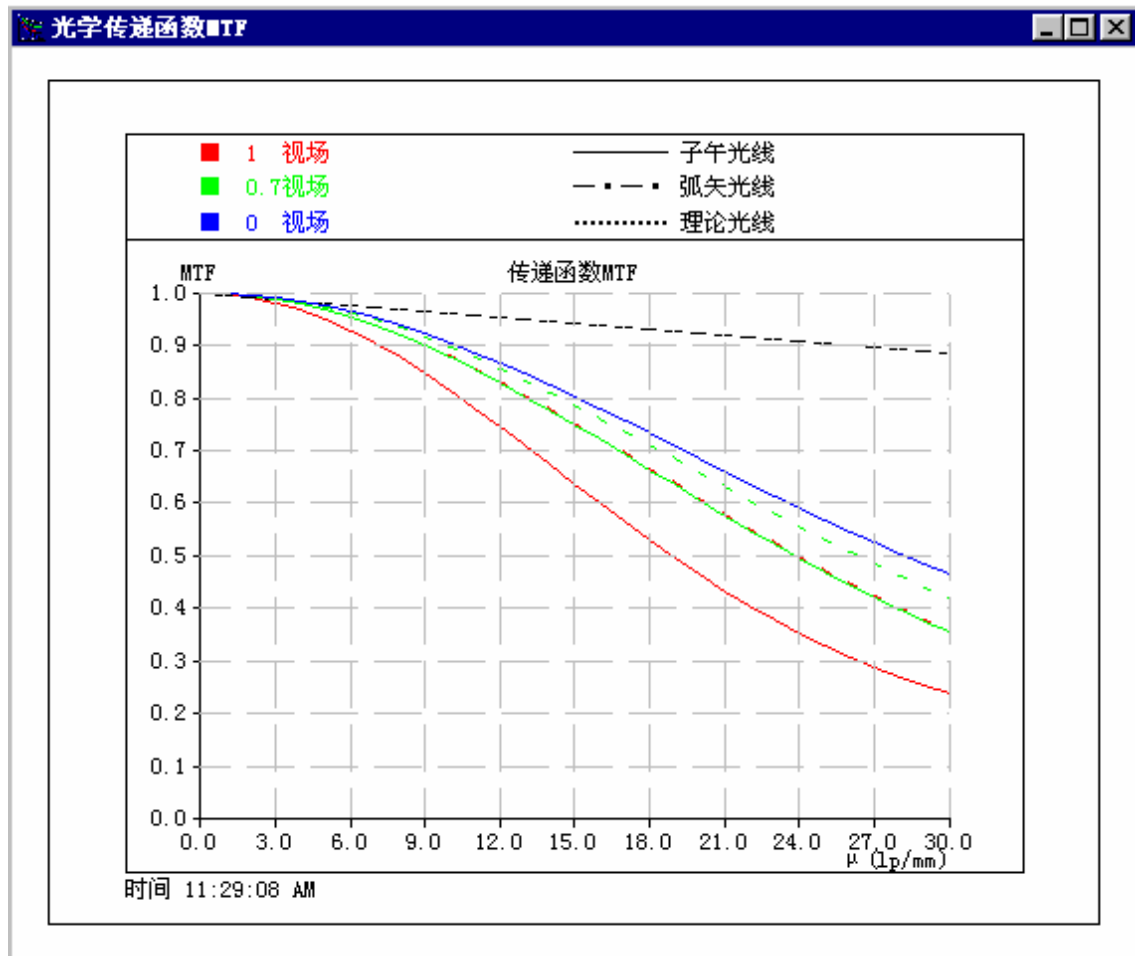


图 4.8 MTF 曲线示例

刻度并给出适当的标注，如图 4.8 所示。

第五章 TCOS 的辅助设计功能

5.1 概述

TCOS 为了方便使用者，提供了许多辅助功能，其中有些是进行光学设计所必须的。本章主要介绍以下内容：

- 单个与胶合透镜计算
- 系统二维图
- 视场通光区域计算（瞳孔图）
- 任意单根光线追迹
- 视场渐晕系数计算
- 焦距缩放
- 光焦度交换
- 透镜弯曲
- 组合透镜参数计算

5.2 单个与胶合透镜计算

在完成设计后，需要绘制透镜零件图和系统总图。这时需要知道各个单个透镜以及胶合透镜的焦距、前后截距、矢高、边厚等参数。本功能就是从光学系统中自动找出所有透镜和胶合透镜，并计算上述参数。以 4.2 的经过优化后的双胶合物镜为例，输入所有面的口径（半径）为 $25u$ ，则计算结果如下：

```
-----单个和胶合透镜结构及光学参数-----
***透镜 1  R1=154.4776   R2=-101.0406   d=8.0000   n=1.516300
           焦距:119.5893   后截距:117.4805   前截距:-116.3652
           矢高:  x 1=2.0423   x 2=3.1187
           边缘厚度:  t=2.8390

***透镜 2  R1=-101.0406   R2=-356.6726   d=5.0000   n=1.624200
           焦距:-227.5641   后截距:-231.8919   前截距:226.3381
           矢高:  x 1=3.1187   x 2=0.8586
           边缘厚度:  t=7.2601

★★胶合镜
           R1=154.4776   R2=-101.0406   R3=-356.6726   d1=8.0000   d2=5.0000   n1=1.516300
n2=1.624200
           焦距:249.9984   后截距:243.8252   前截距:-247.7441
           矢高:  x 1=2.0423   x 2=0.8586
           边缘厚度:  t=10.0991
```

可见，这些数据对绘制光学图是非常有利的。

5.3 系统二维图

在设计过程以及设计完成后，常常需要知道系统的情况，比如成像情况、透

镜形状等。TCOS 提供了自动绘制系统二维图的功能。在输入完初始数据后，使用者不需输入任何参数，只要单击菜单“显示→系统二维图”，即可绘制出系统的二维图形。

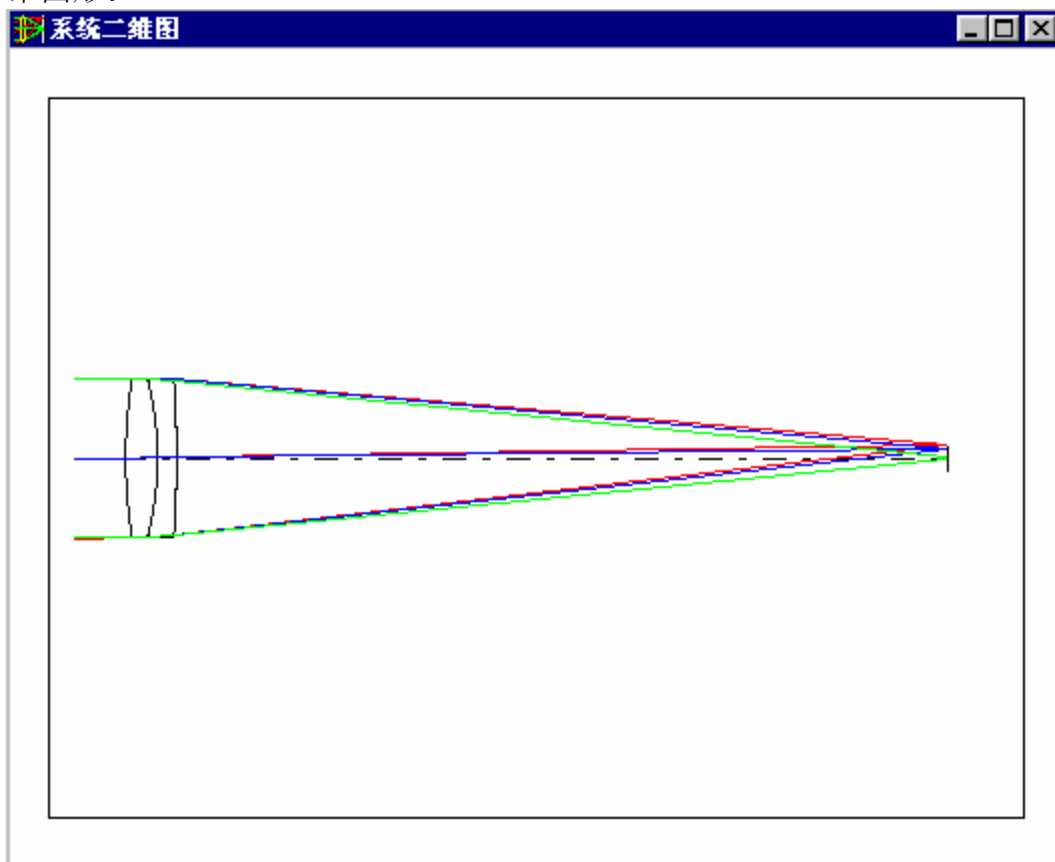


图 5.1 系统二维图示例

图中，绘制各个透镜，以及 1 视场、0.707 视场和 0 视场三束光线的光路。红线表示 1 视场的光线，蓝线表示 0.707 视场的光线，绿线表示 0 视场的光线。上述例子的二维图如图 5.1 所示。

使用者可用鼠标在图形上拖出矩形框，进行局部放大、观看。当放大的范围太小时，程序会自动清空绘图区，这时可点击工具栏中的“系统二维图 1:1 显示”按钮，该按钮通常是灰的（不能操作），当绘制了系统二维图后，就变成“使能”的了。

对于系统二维图，有以下技巧：

- 透镜按初始数据表格中的曲率半径和口径的数据绘制，因此口径既可为自动计算的，也可是自定义的
- 光线按实际追迹路线绘制，因此观查上下光线在像面的汇聚情况，能大致判断系统的成像情况
- 当计算了系统的渐晕系数后，光线按实际渐晕系数的情况绘制，因此使用者可大致考察系统渐晕对光路的影响

5.4 视场通光区域图（瞳孔图）

对于系统的不同视场，了解入瞳边缘光线在系统各面上的投射坐标，进而了解

解边缘光线在系统各面的的通光范围，对于确定透镜口径，确定透镜的材料要求等都有一定的参考价值。

TCOS 能计算任意视场任意面的通光区域，并绘制图形。计算的输入界面如图 5.2 所示。

画的图形即可以是多个面，也可以是单个面，甚至是像面。还可以通过是否选择“画透镜轮廓”来确定在图形中是否将透镜外圆轮廓和光线通光范围同时画出。

在缺省情况下，程序画出从第一面到最后一面的情况，包括透镜的轮廓。用黑线表示透镜轮廓，红线表示边缘光范围，如图 5.3 所示。

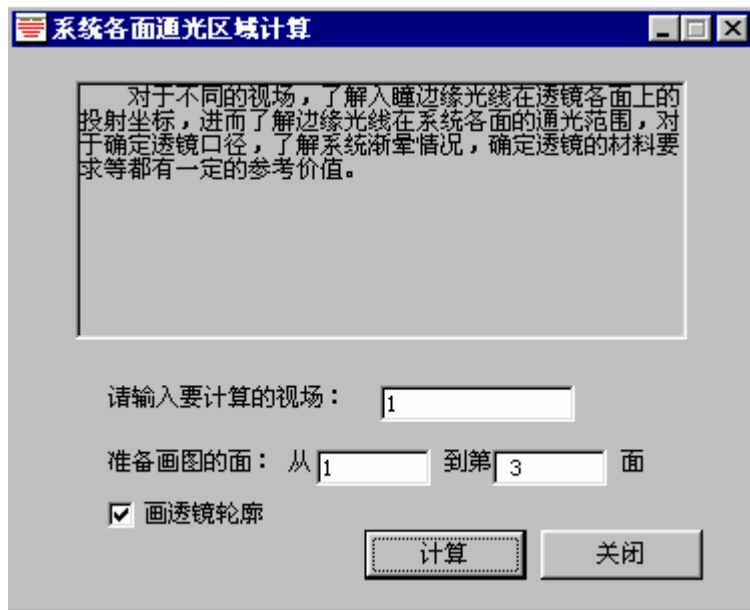


图 5.2 瞳孔图计算输入界面

输出的数据包括各面的每隔 30°，顺时针旋转的一系列点的坐标，以及左端、右端、顶端、底端的坐标及其差值（反映了通光范围的大小）。0° 的位置为入瞳处相对 Y=1, Z=0 处。

对于上述例子，输出的结果如下：

-----光线在各面的通光区域-----

所求的视场： Y方向相对视场： 1

☆本功能一律不考虑实际的渐晕系数（即认为渐晕系数为 1）

☆ 0° 为入瞳处相对 Y=1, Z=0, 其余每隔30° 顺时针旋转。

面号	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
210°	240°	270°	300°	330°			
ST0	Y 25.0356	21.6863	12.5356	0.0355	-12.4645	-21.6152	-24.9646
	-21.6152	-12.4645	0.0355	12.5356	21.6863		
	Z 0.0000	12.5000	21.6506	25.0000	21.6506	12.5000	0.0000
	-12.5000	-21.6506	-25.0000	-21.6506	-12.5000		
	左端： -25.0000	右端： 25.0000	差值： 50.0000				
	顶端： 25.0356	底端： -24.9646	差值： 50.0002				
2	Y 24.9098	21.5816	12.4888	0.0683	-12.3516	-21.4433	-24.7710
	-21.4433	-12.3516	0.0683	12.4888	21.5816		

Z 0.0000 12.4208 21.5131 24.8406 21.5121 12.4198 0.0000
 -12.4198 -21.5121 -24.8406 -21.5131 -12.4208

左端: -24.8406 右端: 24.8406 差值: 49.6812
 顶端: 24.9098 底端: -24.7710 差值: 49.6808

3 Y 24.7336 21.4395 12.4399 0.1461 -12.1478 -21.1475 -24.4417
 -21.1475 -12.1478 0.1461 12.4399 21.4395

Z 0.0000 12.2938 21.2936 24.5878 21.2937 12.2940 0.0000
 -12.2940 -21.2937 -24.5878 -21.2936 -12.2938

左端: -24.5878 右端: 24.5878 差值: 49.1756
 顶端: 24.7336 底端: -24.4417 差值: 49.1753

4 Y 4.3505 4.3524 4.3575 4.3642 4.3707 4.3753 4.3769
 4.3753 4.3707 4.3642 4.3575 4.3524

Z 0.0000 -0.0032 -0.0054 -0.0060 -0.0049 -0.0028 0.0000
 0.0028 0.0049 0.0060 0.0054 0.0032

左端: 0.0060 右端: -0.0060 差值: 0.0119
 顶端: 4.3505 底端: 4.3769 差值: 0.0265

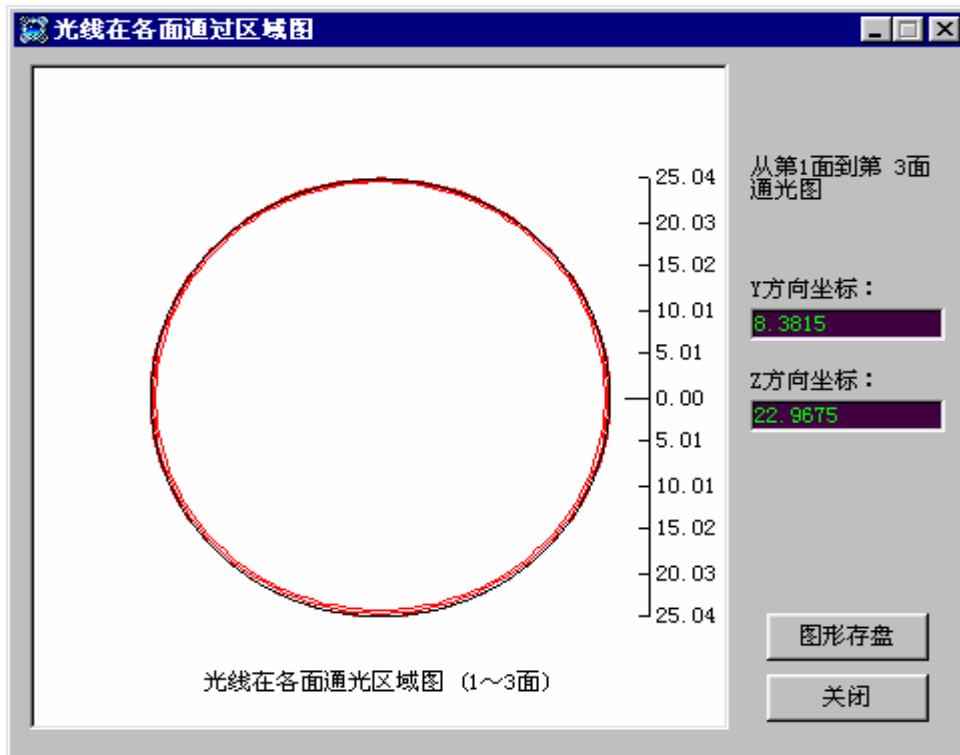


图 5.3 光线通光区域图示例

5.5 任意单根光线追迹

考察任意光线在系统中的路径，即进行单根光线追迹，是光学设计软件必不可少的功能。TCOS 提供的单根光线追迹输入界面直观，操作简便。在输入框上方给出了 TCOS 的坐标系，有利于数据输入。界面如图 5.4 所示。

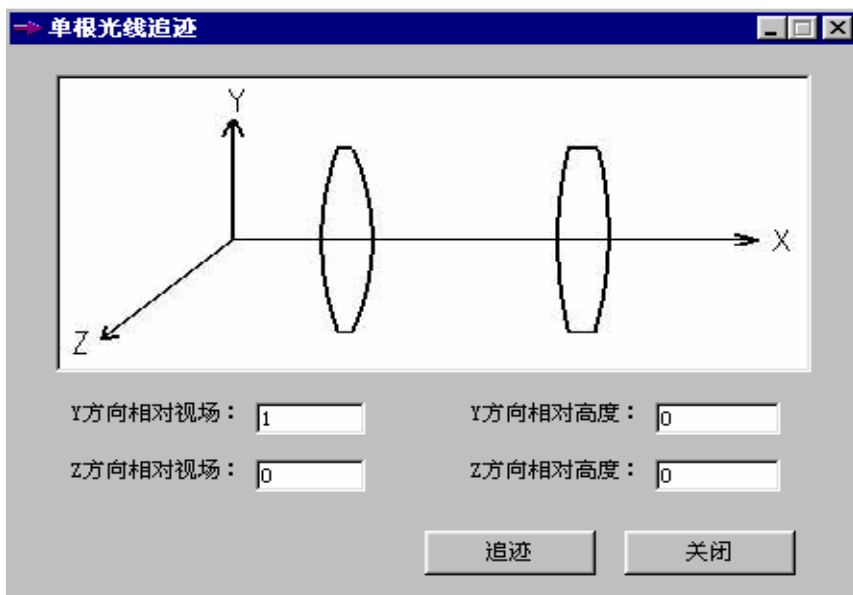


图 5.4 单根光线追迹界面

图 5.4 中，Y 方向相对视场为 1，Y 方向相对高度为 0，因此这是一根 1 视场的主光线。追迹的结果输出如下所示：

```
-----单根光线追迹-----
追迹的光线：      Y方向相对视场： 1      Y方向相对高度： 0
                  Z方向相对视场： 0      Z方向相对高度： 0
☆本功能一律不考虑实际的渐晕系数（即认为渐晕系数为 1）
```

面号	Y向投射高	Z向投射高	X向投射长
ST0	0.00000	0.00000	0.00000
2	0.09208	0.00000	-0.00004
3	0.14612	0.00000	-0.00003
4	4.36371	0.00000	0.00000

5.6 视场渐晕系数计算

TCOS 的视场渐晕系数计算包括两部分，一是缺省计算 1、0.85、0.707、0.5、0.3、0 六个视场的渐晕系数，另外一个为计算用户指定的任意视场的渐晕系数。

一、缺省渐晕系数计算

TCOS 能计算在给定透镜口径的情况下，系统的渐晕情况。仍以优化后的例 1 为例，假定将透镜口径都输入为 20u，即人为使其有一定的渐晕。然后，选取菜单“系统操作—>计算渐晕系数”，则输出下列结果：

```
-----渐晕系数计算结果-----
** 1 视场
      上光          下光          合计
```

渐晕系数: 0.799	0.801	0.800
边缘光高度: 0.799	-0.801	
中间光高度: 0.000	0.000	
首次挡光面: 1	1	

** .85 视场

	上光	下光	合计
渐晕系数: 0.799	0.801		0.800
边缘光高度: 0.799	-0.801		
中间光高度: 0.000	0.000		
首次挡光面: 1	1		

** .7071 视场

	上光	下光	合计
渐晕系数: 0.799	0.801		0.800
边缘光高度: 0.799	-0.801		
中间光高度: 0.000	0.000		
首次挡光面: 1	1		

** .5 视场

	上光	下光	合计
渐晕系数: 0.799	0.800		0.800
边缘光高度: 0.799	-0.800		
中间光高度: 0.000	0.000		
首次挡光面: 1	1		

** .3 视场

	上光	下光	合计
渐晕系数: 0.800	0.800		0.800
边缘光高度: 0.800	-0.800		
中间光高度: 0.000	0.000		
首次挡光面: 1	1		

** 0 视场

	上光	下光	合计
渐晕系数: 0.800	0.800		0.800
边缘光高度: 0.800	-0.800		
中间光高度: 0.000	0.000		
首次挡光面: 1	1		

*****警告: 0 视场的光线也有渐晕系数, 这将导致实际光学参数 (如相对孔径) 与要求的不同!
可能是指定的透镜口径太小。

结果中, 给出了非常详细的结果, 包括上光渐晕系数、下光渐晕系数以及总

的渐晕系数，边缘光高度指入瞳处能通过的靠近透镜边缘的光线的高度，中间光高度指入瞳处靠近透镜中心的光线的高度，这对于考察主光线不能通过系统所有面的光学系统的实际通光情况非常有用。程序还指明了当有渐晕时，首次挡光的面号。对于 0 视场也有渐晕的情况，由于它改变了光学系统的特性，因此程序自动给出警告。

TCOS 的计算渐晕系数还有其它功能。在计算渐晕系数后，程序会询问“是否以后计算本系统垂轴像差、画二维图等，都按计算出的渐晕系数计算？”，在回答了“是”后，则以后计算有些参数会考虑渐晕系数。这些参数包括：

- 垂轴像差
- 点列图
- 光学传递函数
- 绘制系统二维图

其它像差等计算则一般不考虑渐晕系数。

当改变了系统的结构参数以后，或打开新的数据文件，必须重新计算渐晕系数。

如果不想考虑渐晕系数的影响，则再计算一次渐晕系数，然后在程序提问时回答“否”即可，以后计算垂轴像差等都不考虑渐晕系数。

二、任意视场渐晕系数计算

为了增加程序的灵活性，TCOS 允许用户计算任意视场的渐晕系数。操作通过页面“辅助设计->任意视场渐晕系数”来完成，输出内容和缺省计算渐晕系数的内容一样，这里不再赘述。

5.7 焦距缩放

在一些专利和光学设计手册中，给出了一些实用的光学系统，但半径、厚度等已经对焦距进行了归一化。另外，有时从一种已经存在的系统着手，经过修改进行光学设计，也是光学设计的一种重要方法。这些工作都需要进行焦距缩放。TCOS 提供了方便的焦距缩放功能，使用者可选择“只缩放曲率半径”和“缩放曲率半径和厚度间隔”，操作选择从页面“辅助设计->焦距缩放”来进行。如图 5.5 所示。

除了上述情况要使用到焦距缩放外，在下面一些情况也要用到：

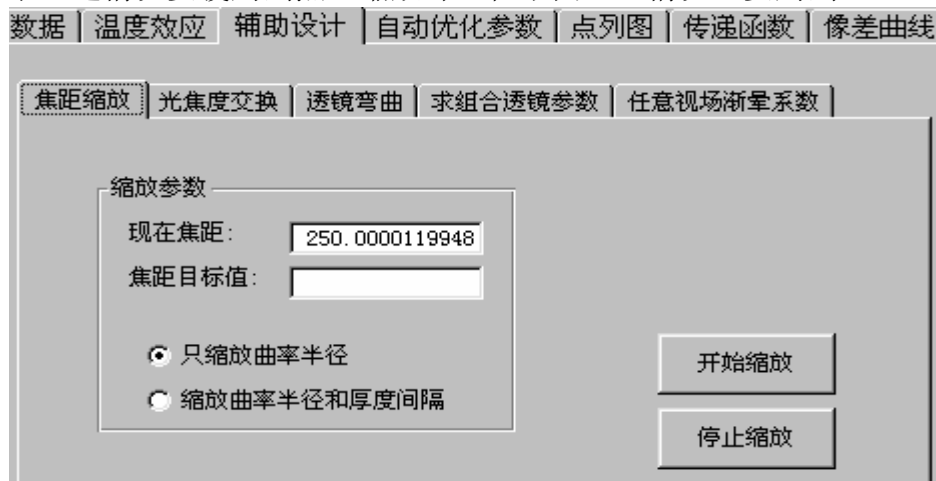


图 5.5 焦距缩放的操作界面

- 初始数据的焦距离要求比较远，在优化前先缩放焦距有利于提高优化的速度
- 优化过程中出现优化不下去的情况（例如出现像差相关），这时进行一下焦距缩放再优化有时能够解决问题
- 对于无像质要求的透镜，可随便根据加工工艺输入半径，再缩放焦距就可得到

5.8 光焦度交换和透镜弯曲

一、光焦度交换

为了既改善某项像差,又不明显地改善系统的焦距,可以通过两表面之间的光焦度交换来达到目的。这在有些情况下仍有用途,例如为了满足工艺等的要求。另外,也是为了兼顾一些老的光学设计者的要求,TCOS 提供了光焦度交换的功能。操作通过页面“辅助设计—>光焦度交换”来完成。主动面就是您要改动的面,改动后被动面将跟着调整,使得系统焦距大致不变。

二、透镜弯曲

我们知道,消色差条件仅取决于玻璃材料的选择和各透镜的光焦度分配,而与透镜的形状无关。这样,我们就可以在校正了色差以后,通过对透镜的弯曲(即保持透镜的光焦度不变而只改变透镜的形状)来改善其他像差,这时的色差校正仍不致破坏,因为透镜弯曲既不改变玻璃材料,也不引起透镜光焦度分配比例的变化。这就是说,弯曲透镜给我们提供了一种校正单色像差的手段,供经验丰富的设计者使用。TCOS 提供了透镜弯曲的功能,操作通过“辅助设计—>透镜弯曲”来完成。

5.9 组合透镜参数计算

对于一些系统,特别是有两个以上的子系统组成的光学系统,我们需要知道子系统的组合焦距。在有些情况下,设计者也常常需要知道系统中任意一些面间的组合参数,以了解系统各部分的功能。TCOS 提供了任意面的组合参数的计算这一非常实用的功能。操作通过页面“辅助设计—>求组合透镜参数”来完成。例如,对于优化后的例 1,我们想知道第二个透镜的参数(这里可通过单个透镜与胶合透镜计算完成),即第 2 面到第 3 面的组合参数,用此功能输出结果如下:

-----组合透镜参数计算结果-----

计算的面是从第 2 到第 3 面

组合有效焦距为: -226.6875

组合的后项焦距(后截距)为-231.89042

组合的前项焦距(前截距)为225.21255

对于一些复杂的系统,这个功能就更显得非常有用。

5.10 自动寻找最佳像面

对于大多数稍微复杂一点的照相光学系统,其近轴高斯像面往往不是成像质

量最佳的位置，因此设计完成后经常需要计算几个位置的像面处的成像质量，以期找到最佳的像面位置。在 TCOS 中，这一工作可由程序自动完成。

寻找最佳像面位置的方法是：

用鼠标单击菜单“系统操作->寻找最佳像面”，则程序自动计算光学系统的最佳像面位置。

TCOS 中是根据三个视场、三种色光的综合弥散半径的加权平均值作为评价指标，用最小二乘法和黄金分割法完成最佳像面的寻找，一般情况下是比较准确的。但在有些情况下，由于轴上点成像质量和轴外点成像质量的关系问题，以及程序中所取的权因子的影响，程序寻找的最佳像面有可能不是设计者所需要的（表现为新像面位置成像质量没有提高）。这是，设计者可再计算几个像面位置

第六章 温度效应分析

6.1 概述

本功能主要针对红外光学系统，用来分析温度变化对红外光学系统的光学特性和成像质量的影响。

军用光学仪器一般都要求适应比较大的温度变化范围。众所周知，用于红外方面的绝大部分透镜材料都是半导体或类似材料。半导体材料通常都显示出相当强的固有特性参数和温度之间的关系。光学材料的折射率随温度的变化影响比较大，进而导致光学系统的特性参数发生变化。另外，透镜的曲率半径、透镜厚度也随着温度的变化而变化。联结透镜的镜框由于温度变化而热胀冷缩，导致长度变化，影响了光学系统透镜之间的间隔，从而导致光学系统特性参数发生变化。因此必须对红外光学系统的温度特性做出分析，并在进行光学设计和结构设计时考虑光学系统的绝热问题，或者对已经设计出的红外光学系统进行温度效应计算，分析出该光学系统在满足成像质量基本不变的情况下，适应的温度变化范围。还要计算在任意温度，该光学系统像面的变化量，以及成像质量的变化情况，这样为采取适当的温度补偿措施提供数据和依据。这一点对于要求成像质量比较高的热成像光学系统以及要求适用温度范围比较大的军用红外热成像系统都有很重要的意义。

常用红外材料的温度折射率系数一般在 $70\sim 300\times 10^{-6}$ 范围内，而可见光玻璃的温度折射率系数一般在 $4\sim 10\times 10^{-6}$ 范围内，因此红外材料的温度折射率系数比普通光学玻璃的数值大得多，两者相差约几十到一百多倍，因此红外光学系统的温度效应要比普通光学系统大得多，对于在大温差环境下工作的红外光学系统，必须进行温度补偿。

TCOS 提供的温度效应分析功能主要分成三部分：

- 温度分析
- 温度改变
- 光、机、热一体化设计

6.2 温度分析

这部分的主要功能就是对于已知的红外光学系统，分析其适应的温度范围。分析的依据有两点：

- 允许的焦深

主要决定系统的像面变化量，适用于对无穷远的物体成像的系统。

- 允许焦距变化的百分比

主要确定焦距的变化情况，既适用于对无穷远的物体成像的系统，也适用于对有限距离成像的放大系统。

使用者可根据实际情况综合考虑。

在进行温度分析前，用户必须输入系统的结构参数，以及系统的允许焦深和

允许的焦距变化的百分比。同时要指明允许波长。还要输入系统中材料（含镜框）的线胀系数 dL/dt 、透镜折射率温度系数 dn/dt ，以及系统各面的通光口径（隔圈口径，半径）。

下面以一个已经有一定温度补偿功能的红外光学系统的例子加以说明。

例 3：具有温度补偿功能的红外系统

系统的有关参数如下：

焦距 $f=50\text{mm}$ ，光圈数 1.8，工作在红外波段，中心波长为 $3800\mu\text{m}$ 。系统有三片透镜，材料为 Si-Ge-Si。结构参数及有关参数见表（1）。

表（1） $f50/1.8$ 物镜的结构参数

序号	R	d	n	材料	$\alpha \times 10^7$	$\beta \times 10^6$
0	∞		1			
1	520.6362	3.5	3.42627	Si	42.0	162.0
2	-628.3786	42.43	1	Al	240.0	
3	-41.5882	4	4.02725	Ge	61.0	270.0
4	-48.5716	46.384	1	Al	240.0	
5	39.6308	5	3.42627	Si	42.0	162.0
6	79.0032	21.156	1	Al	240.0	

输入界面如图 6.1 所示。

初始温度缺省为 20°C ，允许焦深是根据波差小于 $\lambda/4$ 的规定由程序自动算出，当改变中心波长时，其值跟着自动改变。如果用户要自己指定允许焦深，可在输入的数据后加上一个字母“u”。允许焦距变化百分比缺省为 0.05%。

其它数据（材料热系数等）的输入形式如图 6.1 所示。

对于空气间隔，缺省认为材料为铝（Al），程序自动填充其线胀系数为 240。折射率的温度系数为 0。



图 6.1 温度分析界面

注意：隔圈口径输入的是直径值，这和初始结构参数中透镜孔径的不一样
本页的数据输入完成后，存盘，这些数据会存入数据文件中。
当数据输入完成后，单击“分析”按钮，即可完成温度分析功能。
输出的结果如下所示：

-----温度分析结果-----

- *本系统满足焦距变化百分比为0.05%的温度变化范围为： $\pm 23.625\text{ }^{\circ}\text{C}$
即本光学系统满足焦距变化百分比使用的温度范围为： -3.625 到 $43.625\text{ }^{\circ}\text{C}$
- *本系统满足焦深 $2\Delta s' = 0.011814$ 的温度变化范围 ΔT 为 $\pm 2.688\text{ }^{\circ}\text{C}$
即本光学系统满足焦深使用的温度范围为： 17.313 到 $22.688\text{ }^{\circ}\text{C}$

需要特别说明的是，像面位置变化量指从第1面到系统像面的距离的变化量。因为温度造成系统的总长要发生变化。

几点技巧：

- 在缺省情况下，通常认为透镜隔圈材料为铝，使用者可根据设计的实际情况自行修改
- 将隔圈的线胀系数输入为0，则相当于不考虑机械结构的影响。这样使用者进行温度分析时既可考虑机械隔圈，也可只考虑纯光学系统
- 允许焦深值指的是正、负极限之间的距离，而不是一个方向的距离
- 程序计算像面位置的变化量时，不考虑系统最后一面到接收面之间的机械材料，而是直接考虑后像距

6.3 温度改变

本功能能够实现：

- ①计算任意温度下的系统焦距变化量；
- ②计算任意温度下的系统像面位置变化量；
- ③计算任意温度下的结构参数的变化值，因此可以进行任意温度下的系统像质评价。

使用本功能的前提是已经输入了“温度分析”所必须的数据。

使用者只需输入要计算的温度，即可完成该温度下的有关计算，并输出以下结果：

-----任意温度计算结果-----

☆当温度由20变到40 $^{\circ}\text{C}$ 时，有关参数变化如下：

温度	20	40	差值
焦距	49.3700	49.3909	0.0209
像面	122.4697	122.4714	0.0017

****注：结构参数已经自动变化为40 $^{\circ}\text{C}$ 时的参数。要计算变化后的参数及像质，可按普通方法计算

结构参数改变后，如果要评价像质，请将像面位移改为：0.0017，放在《点列图》页下的《像面位移》编辑框中

同时，初始数据的表格中，所有数据已经改变为指定温度下的值。这时，使用者可用常规方法进行像质评价。但要注意，此时，认为探测器的接收面位置没动，即相当于给定了一定的像面位移。如果使用者不考虑温度引起的像面位置的

变化，可将“点列图”页下的“像面位移”编辑框中的数值改为0。

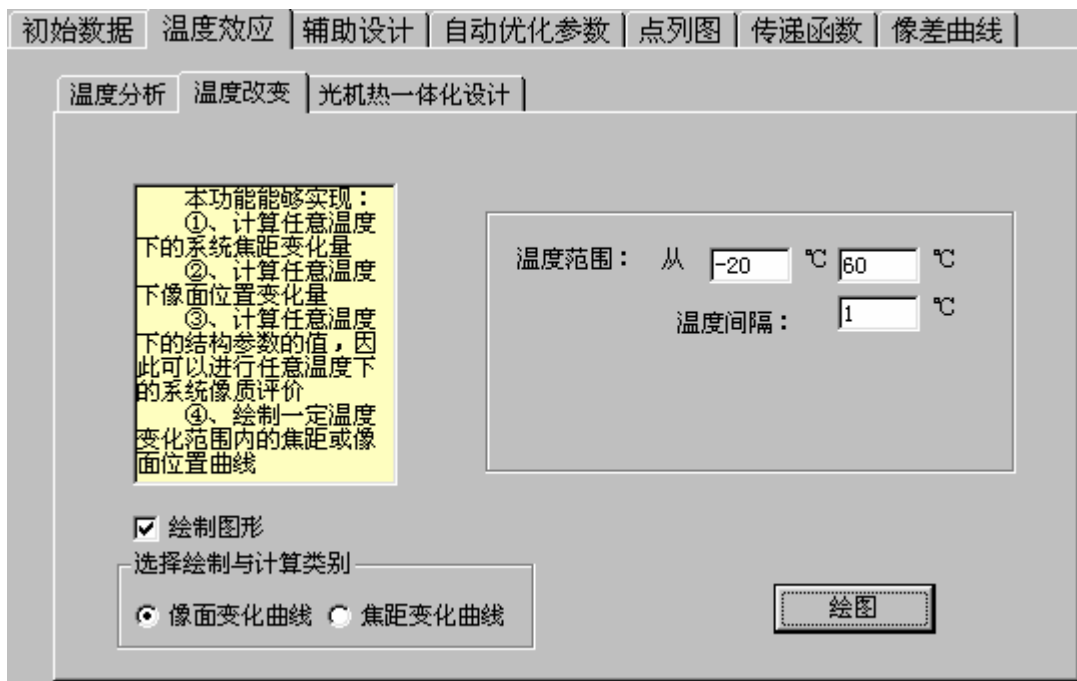


图 6.2 温度改变页面

当选中“绘制图形”的复选框时，则界面改变为如图6.2所示。输入相应参数，这程序可以计算一系列温度的焦距或像面变化的值，并绘制曲线。一个计算像面位置变化的计算结果如下所示：

-----在温度范围内变化的计算结果-----

☆注意：这里计算的是实际像距，即从最后一面到像面位置的变化量。

这一点和计算在单个温度值时的像面位置变化量概念不同。

温度	像距	像面位置变化量
-20.0	21.2424	0.1299
-19.0	21.2402	0.1277
-18.0	21.2380	0.1256
-17.0	21.2359	0.1234
-16.0	21.2337	0.1212
-15.0	21.2315	0.1191
-14.0	21.2294	0.1169
-13.0	21.2272	0.1147
-12.0	21.2250	0.1126
-11.0	21.2228	0.1104
-10.0	21.2207	0.1082
-9.0	21.2185	0.1061
-8.0	21.2163	0.1039
-7.0	21.2142	0.1017
-6.0	21.2120	0.0996
-5.0	21.2098	0.0974

-4.0	21.2077	0.0952
-3.0	21.2055	0.0931
-2.0	21.2033	0.0909
-1.0	21.2012	0.0887
0.0	21.1990	0.0866
1.0	21.1968	0.0844
2.0	21.1947	0.0822
3.0	21.1925	0.0801
4.0	21.1903	0.0779
5.0	21.1882	0.0757
6.0	21.1860	0.0736
7.0	21.1838	0.0714
8.0	21.1817	0.0692
9.0	21.1795	0.0671
10.0	21.1774	0.0649
11.0	21.1752	0.0627
12.0	21.1730	0.0606
13.0	21.1709	0.0584
14.0	21.1687	0.0562
15.0	21.1665	0.0541
16.0	21.1644	0.0519
17.0	21.1622	0.0498
18.0	21.1600	0.0476
19.0	21.1579	0.0454
20.0	21.1557	0.0433
21.0	21.1535	0.0411
22.0	21.1514	0.0389
23.0	21.1492	0.0368
24.0	21.1471	0.0346
25.0	21.1449	0.0324
26.0	21.1427	0.0303
27.0	21.1406	0.0281
28.0	21.1384	0.0260
29.0	21.1362	0.0238
30.0	21.1341	0.0216
31.0	21.1319	0.0195
32.0	21.1297	0.0173
33.0	21.1276	0.0151
34.0	21.1254	0.0130
35.0	21.1233	0.0108
36.0	21.1211	0.0086
37.0	21.1189	0.0065
38.0	21.1168	0.0043
39.0	21.1146	0.0022

40.0	21.1124	0.0000
41.0	21.1103	-0.0022
42.0	21.1081	-0.0043
43.0	21.1060	-0.0065
44.0	21.1038	-0.0086
45.0	21.1016	-0.0108
46.0	21.0995	-0.0130
47.0	21.0973	-0.0151
48.0	21.0952	-0.0173
49.0	21.0930	-0.0195
50.0	21.0908	-0.0216
51.0	21.0887	-0.0238
52.0	21.0865	-0.0259
53.0	21.0843	-0.0281
54.0	21.0822	-0.0303
55.0	21.0800	-0.0324
56.0	21.0779	-0.0346
57.0	21.0757	-0.0367
58.0	21.0735	-0.0389
59.0	21.0714	-0.0411
60.0	21.0692	-0.0432

绘制的曲线图如图6.3所示。

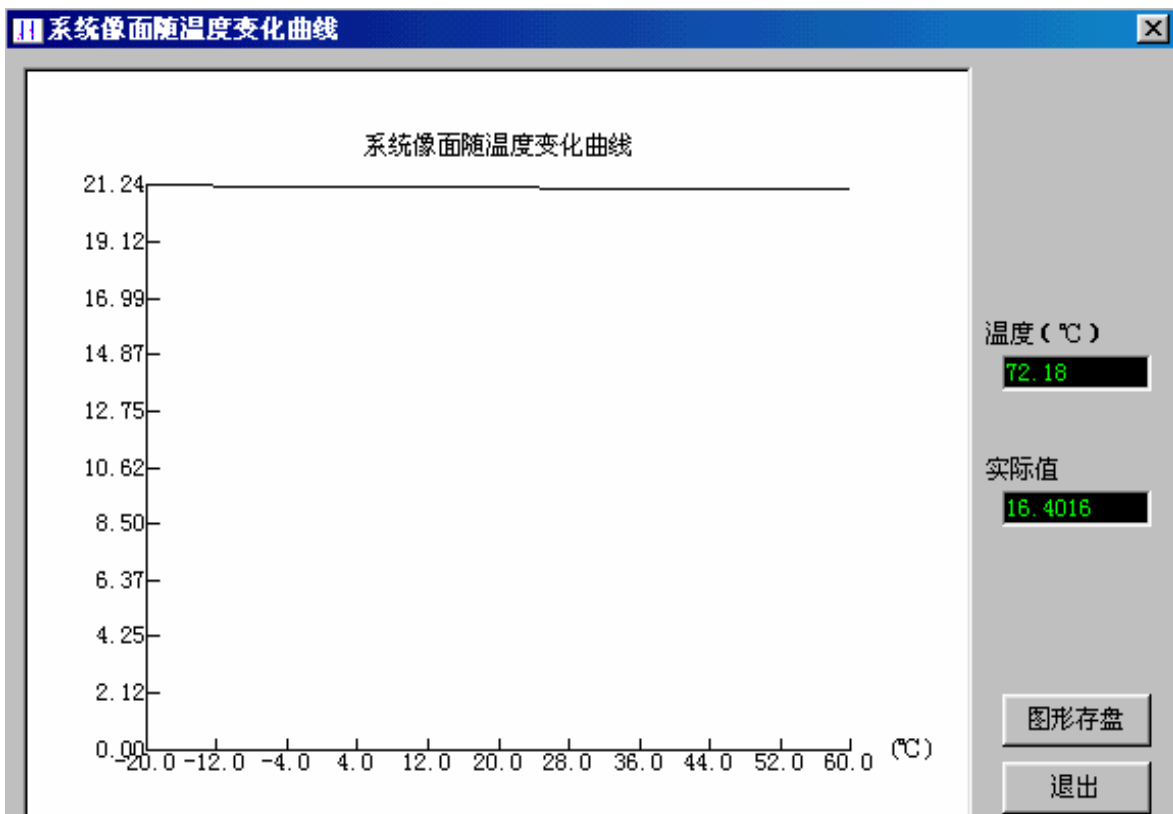


图 6.3 像面随温度变化曲线

6.4 光机热一体化设计

设计绝热物镜是一个比较复杂的任务。TCOS 提供了一种考虑光、机、热一体化设计的方案。本功能能计算出三片式热不敏物镜的焦距。

您需要输入镜筒的线胀系数，透镜材料的线胀系数和折射率温度系数以及透镜材料的色散系数。对于密接型物镜，所有的归一化孔径为 1。三种透镜材料不能相同。

假定一个三片密接型物镜，组合焦距为 50mm，三种材料为“Ge-GaAs-热压 ZnSe”，则输入及计算的结果如图 6.2 所示。

有关数据说明： $dL1/dt$ (E-7) 为透镜材料的线胀系数 α

dn/dt (e-6) 为透镜材料的折射率温度系数 β

n 为透镜材料的中心波长的折射率 $n_{\lambda 0}$

色散系数 C 的计算公式： $C = \frac{n_{\lambda 1} - n_{\lambda 2}}{n_{\lambda 0} - 1}$ ， $n_{\lambda 1}$ ， $n_{\lambda 2}$ 为两个参考波长的

折射率



图 6.2 光机热一体化设计示例

规一化高度：轴向光线在各个透镜上的入射高的归一化值。当为密接透镜时全为 1。

$dL2/dt$ (E-7)：镜筒材料的线胀系数（当为密接透镜时前两个输入 0，后一个输入材料的线胀系数）。

程序计算出了三个透镜的焦距分配，再按常规设计方法设计，即可得到考虑了机械和温度的密接物镜。

以上数据仅为举例说明输入方式，材料的选取不一定合理。

第七章 实用工具

7.1 概述

根据中国国情，为满足光学设计者的需要，例如设计、出图等，以及实际工作中可能遇到的一些情况，TCOS 提供了一些实用的辅助设计工具。这些工具有的可无缝集成到 TCOS 的主功能中。

TCOS2.00 提供的主要工具如下：

- 中国玻璃库查询
- 插值求折射率
- 空气折射率
- 透镜中心误差
- 光学零件倒角
- 外径及配合公差
- 激光光学

所有这些工具可从菜单“工具—>……”中得到。

7.2 中国玻璃库查询

从菜单“工具—>玻璃库->中国玻璃库”中，可调出中国玻璃库查询窗口。如图 7.1 所示。



图 7.1 中国玻璃库查询窗口

本工具的作用主要有三点：

- 查询中国玻璃的折射率和阿贝数
- 求任意波长的折射率

• 将查询到的玻璃引入到自定义窗口中，辅助输入
本工具可和 TCOS 的系统参数输入无缝集成。

查询方式有两种：

- 按玻璃名查
- 按折射率 nD 差

当查询一种玻璃后，在“插值求折射率”的输入框内输入波长（单位：nm），则可求出任意波长的折射率，程序采用的是拉格朗日插值法。

7.3 插值求折射率

从菜单“工具—>插值求折射率”中，可调出“插值法求材料的折射率”窗口。如图 7.2 所示。

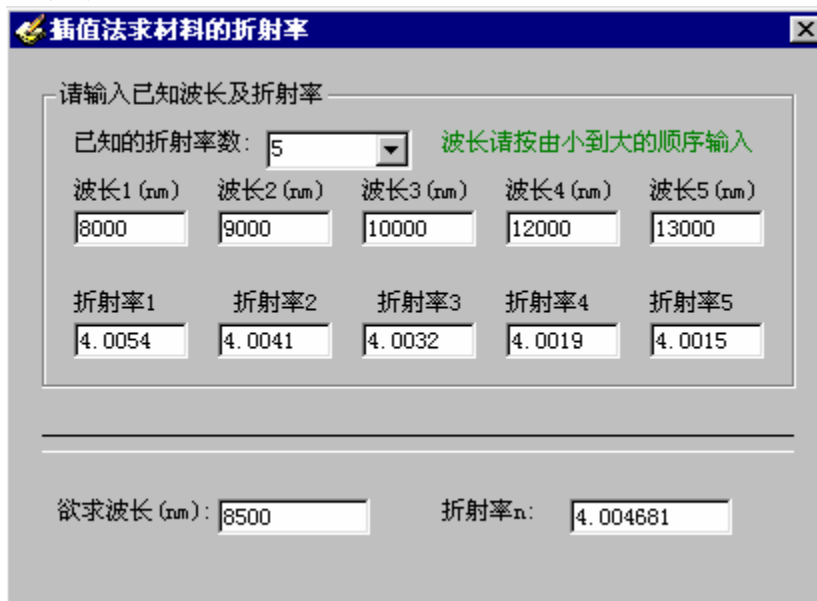


图 7.2 插值法求折射率

本工具的作用是在已知材料在三种或五种波长下的折射率，求其它任意波长的折射率。

图 7.2 显示了已知 Ge 在 $8\mu\text{m}$ 、 $9\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 、 $12\mu\text{m}$ 、 $13\mu\text{m}$ 时的折射率，求其它任意波长（这里是 $8.5\mu\text{m}$ ）时的折射率。

当数据输入不合理时，程序会自动给出提示。

本工具采用的插值方法为拉格朗日插值法。

7.4 空气折射率

通常我们认为空气的折射率为 1。但是，对于有些精密仪器，或者超长仪器（如潜艇潜望镜），或内部充气加压保护的仪器，空气的折射率往往不能简单认为是 1。本工具计算考虑大气条件中的三种参数对空气的折射率的影响：

- 气压
- 温度
- 湿度

从菜单“工具—>空气折射率”中，可调出“空气折射率”窗口。如图 7.3 所示。

本工具缺省情况下同时求出 D 光、F 光、C 光三种谱线对应波长的空气折射



图 7.3 求空气折射率界面

率，这是为了和 TCOS 的初始数据输入的“自定义玻璃”的要求一致，以便使用者方便地应用，方法是：单击“引入到自定义”，程序将缺省的空气名字定为“**AIR**”。用户也可以自己输入任意波长。

湿度输入例：湿度为 70%，输入 0.7。

改变图 7.3 中六个输入框中的任意一个，对应的折射率都将发生变化。

7.5 透镜中心误差

在长期的设计、生产、实践经验中，人们总结了一些常用光学系统中心偏的经验公差，即 c 值经验值，非常有用。在老国标中，光学零件图上要求标注这个参数。在新国标（GB13323-91）中，要求标注面倾角 x ，并提供了二者之间的转换公式。另外，有时为了测量方便，需要标注球心偏 a ，或零件的厚薄差 Δt 。TCOS 提供了上述四种参量之间的相互转换工具。

从菜单“工具—>透镜中心误差”中，可调出“求透镜的中心误差”窗口。如图 7.4 所示。

本工具的主要作用：求单个透镜或胶合镜的面倾角 x 、中心偏 c 、球心偏 a 和边厚差 Δt 的相互转换。

在窗口的上半部分，列出了常见的不同系统对应的中心偏的经验值 c ，设计者可根据这些经验值确定其它的参数。在已知其它参数的情况下，也可求出中心偏 c 。

输入要求：

- 对于面倾角和中心差的相互转换，必须输入透镜的折射率和后顶焦距。
- 对于球心偏，还必须给出所求面的曲率半径。
- 对于边厚差，还必须给出测量点处对应的口径（直径）
- 对于胶合透镜，需要输入两个透镜的折射率

当选择胶合镜时，界面会有些变化，如图 7.5 所示。其中的复选框“胶合镜的

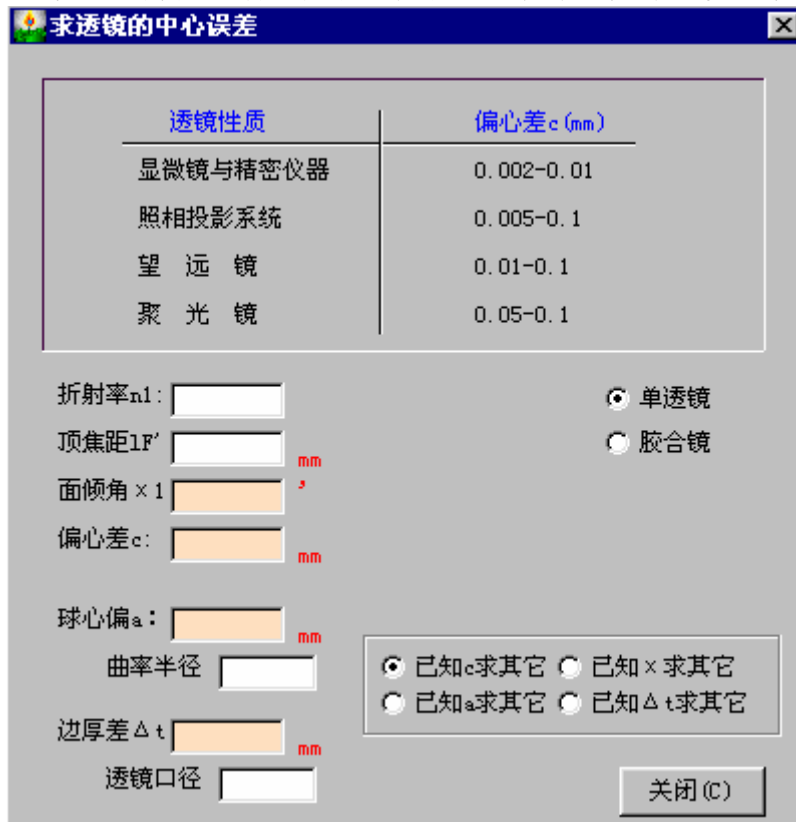


图 7.4 求透镜中心误差缺省界面

面倾角按组合考虑”仅当在“已知 \times 求其它”时能作用，即在这种情况下，如果不选中该复选框，则分别求出两个单透镜的面倾角。其它情况胶合镜都按组合面倾角考虑。

在胶合镜按组合面倾角计算时，折射率按两种材料折射率的平均值计算。

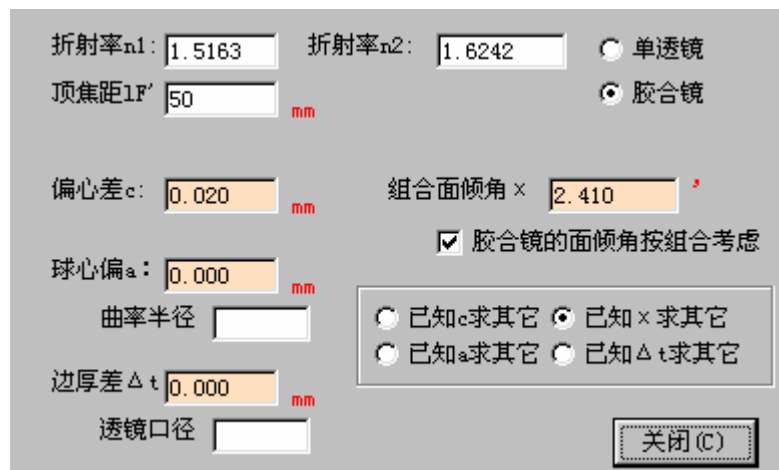


图 7.5 胶合镜中心误差界面

7.6 光学零件倒角查询

本工具是按 GB 1204-75 设计，主要是为了设计者查询方便。

从菜单“工具—>光学零件倒角”中，可调出“光学零件倒角查询”窗口。如图 7.6 所示。

本窗口采用页面的形式，分为圆形光学零件和非圆形光学零件。在“圆形光

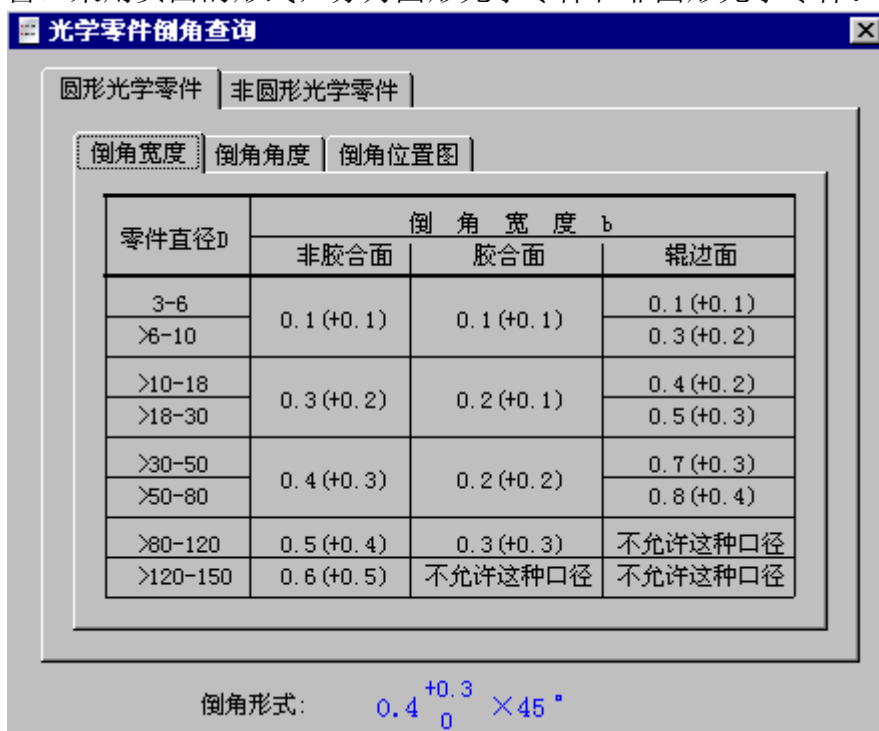


图 7.6 光学零件倒角查询窗口

学零件”下面又分三个子页面。在“倒角角度”页中，程序具有简单计算功能，要求使用者输入口径和曲率半径。

本工具非常直观简便，但又很有用。这里不作多述。

7.7 外径及配合公差查询

TCOS 中自动计算出的透镜口径都是按通光口径计算的。实际透镜与镜框固定，使得其留有外径余量。

从菜单“工具—>外径及配合公差”中，可调出“光学零件的外径及配合公差”窗口。如图 7.7 所示。

窗口同样采取页面的方式，分为光学零件外径和圆形零件与镜框的配合公差两个页面，查询方便。

由于功能简单，使用方便，这里不多述。

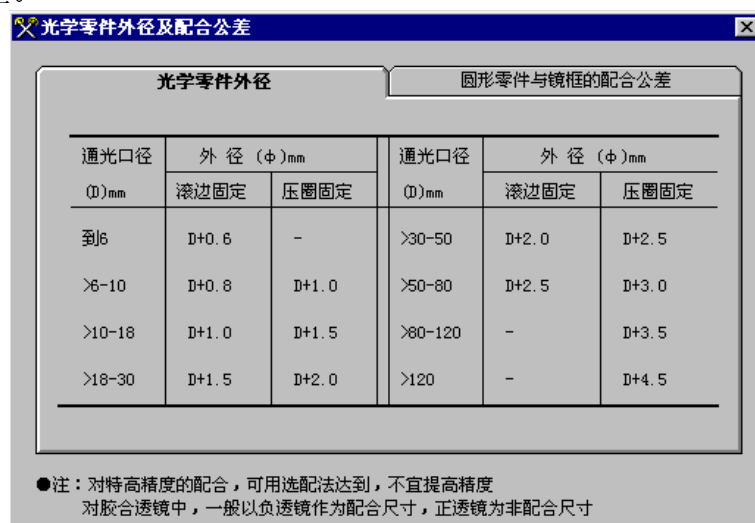


图 7.7 外径与配合公差

7.8 激光光学

随着激光技术的发展，激光光学系统使用越来越广泛。激光光束为高斯光束，它不沿直线传播，具有和传统几何光学截然不同的性质。TCOS 提供了计算激光光学一些非常有用的工具。

激光束最重要的光学参数为束腰半径、束腰位置以及发散角大小等。本工具即着眼于这几个方面的计算。

点击菜单“工具—>激光光学”，即可调出“激光光学”窗口。

本工具分两部分内容：

- 激光器和高斯光束
- 高斯光束变换

一、激光器与高斯光束

本部分功能主要是计算气体激光器（如：He-Ne 激光器）和固体激光器（如：Nd:YAG 激光器）的有关参数。它包括：

- 已知条件为谐振腔参数，求束腰参数
- 已知条件为谐振腔参数，求离束腰任意距离的光束参数

操作界面如图 7.8 所示。

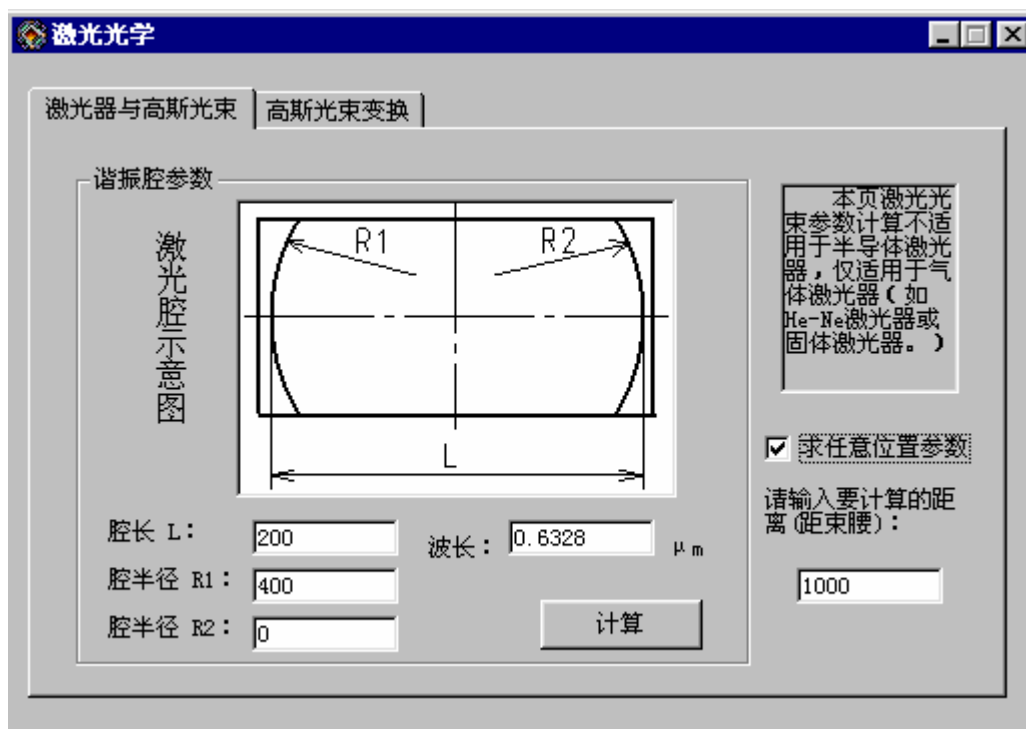


图 7.8 激光器与高斯光束计算界面

在界面上给出了激光腔示意图，指明了腔长 L 、腔半径 $R1$ 和腔半径 $R2$ 的物理意义。用户按照实际情况输入有关参数，单击“计算”按钮即可。

右下角有一个“求任意位置参数”选择按钮，选中该按钮后，输入离束腰的距离，即可计算任意位置的高斯光束参数。

假定有一 He-Ne 激光器，腔参数为：

- $L=200$

- $R1=400$
- $R2=0$
- $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$

求离束腰 1m 处的光束参数。

数据输入如图 7.8 所示。计算结果如下：

-----激光光束参数计算结果-----

已知: $L = 200$
 $R1 = 400$
 $R2 = 0$
 $\lambda = .0006328 \text{ mm}$

求出:

光束的束腰半径为: $\omega_0 = .200711980697268 \text{ (mm)}$
 远场发散角(半角)为: $\theta = 1.00355990348634\text{E-}03 \text{ (rad)}$
 高斯光束准直区F: $F = 200 \text{ (mm)}$
 共焦点处发散角: $\theta_F = 7.09624013082109\text{E-}04 \text{ (rad)}$
 共焦点处波阵面半径: $RF = \pm 400 \text{ (mm)}$

在距离束腰 1000 mm处, 高斯光束参数:

光束半径 $\omega(z)$: $.284355292683351 \text{ (mm)}$
 波阵面半径 $R(z)$: 1040 (mm)
 发散角(半) $\theta(z)$: $9.84071448256951\text{E-}04 \text{ (rad)}$

- ★注: ① 通常激光为高斯光束, 为一波阵面半径随距离变化的变心球面波, 而非直线传播;
 ② 对于基模高斯光束, 准直区内(共焦点间)可认为是平行光, 通常的激光发散角指远场发散角;
 ③ 束腰处为平面波, 即波阵面半径为无穷大;
 ④ 在共焦点, 波阵面半径具有最小值 $2F$, 圆心在另一个共焦点处(两准直点关于束腰处对称);
 ⑤ 计算出的光束半径为 $\omega(z)$ 或 ω_0 的园瞳, 约占基模高斯光束全部能量的 86.4%, 但半径为 $2\omega(z)$ 时约占 99.7% 能量。

可见, 程序对计算结果有较详细的注释。用户可对上述数据详加观察。

二、高斯光束变换

本部分主要计算已知激光束束腰半径或发散角, 求经过一定距离远的光学系统后的光束参数。界面如图 7.9 所示。

例如, 已知 He-Ne 激光器(波长 $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$) 的束腰半径为 0.25mm , 经过一个距束腰 25mm , 焦距为 50mm 的光学系统, 求:

- 经过光学系统后束腰参数
- 离光学系统一定距离(如: 45mm) 出高斯光束参数

输入的数据如图 7.9 所示。计算输出结果如下:

-----高斯光束通过理想光学系统后的参数-----

经过光学系统前:

束腰半径为: $\omega_0 = .25$

发散角(半): $\theta = 8.05705983908412E-04$ (rad)
准直区: $F = \pm 310.286885033758$

通过焦距为 50 的理想光学系统后

束腰半径为: $\omega_0 = 1.61243799439481E-03$
束腰位置为: $Z = 49.3550248022421$
发散角(半): $\theta = .124920459997411$ (rad)
准直区: $F = \pm .012907717394158$

在偏离新束腰位置 45 处的高斯光束特性:

束腰半径为: $\omega = 9.20649437522427E-03$
波面半径为: $R = 45.000003702426$
发散角(半): $\theta = .124920454858426$ (rad)

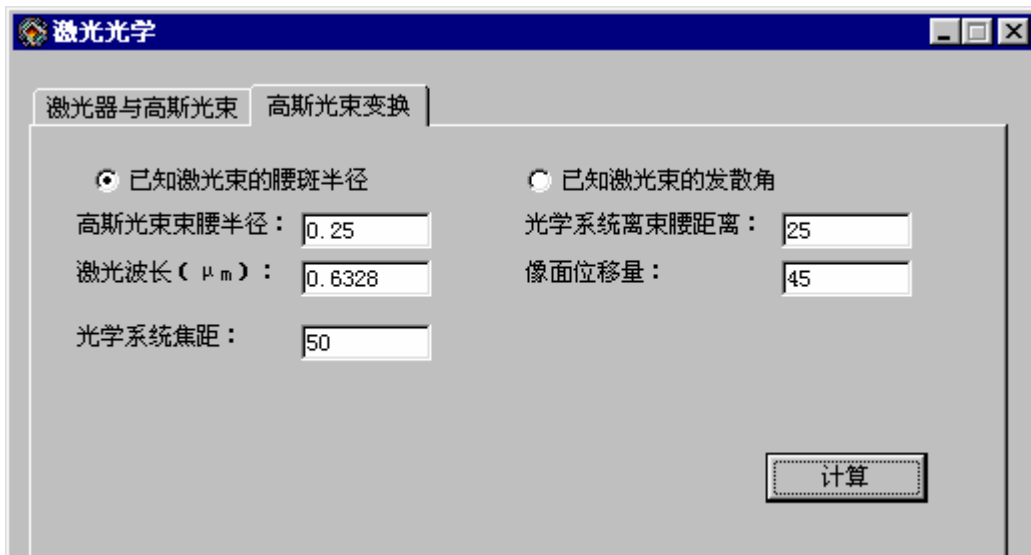


图 7.9 高斯光束变换输入界面

附录一 光学自动设计软件 TCOS2.00 版快速指南

我们将以一个具体的例子，引导使用者快速掌握使用 TCOS2.00 版的主要步骤及主要功能。

假定要设计一个双胶合望远物镜，光学特性要求为：

焦距： $f' = 250\text{mm}$


通光直径： $D = 40\text{mm}$

视场角： $2\omega = 6^\circ$

入瞳和系统第一面重合： $l_z = 0$

1 打开 TCOS，在数据与控制窗口的初始数据一>初始数据与其它页中，在“半视场角”中输入：3（或-3），在“入瞳半径”中输入：20，在“系统总面数”中输入：3，其它保持缺省值不变。单击“确定”按钮。

2 在结构参数页，单击“输入玻璃名”，即选择输入玻璃名，在“曲率半径”下的列中任意输入透镜的三个曲率半径，这里假定为 200，-200，-10000；在“厚度间隔”下的列中，输入两块玻璃的厚度，假定为 8，5；最后一行的数值不要输入，它表示系统最后一面到像面的距离，将由程序自动算出，并放到该栏。在“玻璃名”中，第一行缺省为 1，表示空气，即第一面之前的材料为空气，第二行表示第一面和第二面之间的材料，输入 **k9**，第三行表示第二面和第三面之间的材料，输入 **ZF1**。


3 单击“定义玻璃”按钮，或单击工具栏中的  图标，则弹出“自定义玻璃”窗口，您可以输入玻璃名及三种折射率，对于中国玻璃，则可以在右下角弹出的蝴蝶助手窗口中，单击“是，谢谢”，或者单击菜单“工具一>玻璃库一>中国玻璃库”，则可弹出“中国玻璃库”窗口。

4 在“中国玻璃库”中的“查询”框中，选中“按玻璃名查”，在输入框中输入 **k9**，然后回车（或用鼠标单击“查询(Q)”按钮），则自动查出 **k9** 玻璃的有关参数。单击“引入到自定义”按钮，则将当前的玻璃参数放到“自定义玻璃”窗口中，单击该窗口的“确定”按钮。

5 重复步骤 4，输入 **ZF1** 的参数。



6 关闭“中国玻璃库”窗口，回到结构参数页，注意观察右边的表格，“孔径”栏用来输入透镜各面的通光口径（通光半径），如果不输入，则程序以后自动计算通光口径，并放到该栏，如果设计者自己指定通光口径，以便计算实际的渐晕系数，输入时要在数值后加一个字母 **u**，表示用户指定（User），例如 **20u**，在“面型”栏，第一行有个缺省的 **STO** 标志，表示该面为光阑面（STOP），如果某一面为非球面，则在对应的“面型”中输入 **ASP**，如果该面同时为光阑面及非球面，则中间用小圆点分开，如 **STO.ASP**。这里不作任何改动，直接单击“确定”按钮。

7 程序自动切换到“高斯参数”页，并显示计算出的高斯参数。可以看出，系统的等效焦距为 500.51987，因为透镜初始曲率半径是任意给的，因此不符合要求。

8 单击右边的“操作选择”面板中的“初始数据存盘”（或单击工具栏  的图标，则弹出存盘窗口，将文件存为 胶合透镜 1.gab。

9 单击结构参数页，回到输入结构参数的地方，可以看到程序已经自动计算出了最后一面的厚度间隔（实际上是后截距），并计算除了透镜各面的通光口径。

以下步骤主要是像质评价（不一定要按步骤顺序操作）：

10 单击菜单“显示—>系统二维图”，则画出系统的二维图形及 1、0.707、0 视场的实际光线。可用鼠标  拖出选择区放大。当放大倍数太大时，会显示空白，这时单击工具栏中的  按钮，则自动按 1:1 比例重绘。

11 单击右边的“操作选择”面板中的“单个透镜”，则计算出系统中所有单个及胶合透镜的焦距，顶焦距等，便于出图。

12 单击右边的“操作选择”面板中的“像差计算”，则算出该系统的像差。该部分算出的数据较多，请注意观察。

13 单击 像差曲线 页，再单击其中的所有按钮，观察像差曲线。

14 单击“点列图”页，不作任何修改，单击“计算点列图”按钮，则计算出点列图并画出图形。

15 单击“传递函数”页，不作任何修改，单击“计算”按钮，则计算出点传递函数并画出图形（当像差校正的较好时，曲线比较符合实际情况，如果像差太大，MTF 值较低，会出现曲线振荡现象，尚需要改动）。

以下为自动校正像差步骤：



16 单击 初始数据—>结构参数 页，我们将三个曲率半径作为变量，方法是：在半径数值后加一个 v，回车，则该数值变红，表示为变量，如 200v。将三个变量都这样操作后，单击“确定”按钮。

17 单击 自动优化参数—>自变量 页，在“欲达到的焦距”后输入 250，单击“确定”。

18 在“要校正的像差”页中，选中想要校正的像差，注意鼠标移动到像差符号上时，在选择框底部会显示该像差符号的详细中文名字。这里我们选择三种像差同时校正：子午慧差 KTm' ，轴向色差： $\Delta LFC0.7'$ ，光焦度（焦距倒数）： Φ ，然后单击“应用”按钮。

19 在 受控像差目标值及公差 页，不作任何修改，直接单击右边“操作选择”

面板中的“自动优化”按钮，则进行自动优化。

（在自动优化过程中，在“数据与控制窗口”的底部状态栏中，显示最大因子，一般情况下是逐渐减小的，有时会出现一些振荡，但程序  会自动纠正，如果最大因子长时间连续上升，可单击工具栏中的图标终止， 然后再重新自动优化或人工改变结构参数后再投入优化。如果在优化过程中，最大因子变化很小，也可单击该按钮结束优化。）

20 优化完成后，观看结果，可知道，受控像差 KT_m' 由 0.110247 变为 0.000066， $\Delta LFC_{0.7}'$ 由 3.098134 变为 0.003592，焦距由 500.51987 变为 250.0211，其它像差也得到一定程度的减小。如果焦距略有差别，只要简单在“辅助设计”页中缩放一次焦距即可。也可再用其它的像差优化。

30 将优化后的结构参数存盘。

以上步骤叙述起来好像很繁，但实际上输入、修改数据非常简单方便。特别是用熟练以后，更能节省大量的时间

附录二 TCOS 自动优化实例

一、TCOS 自动优化基本要点

在您阅读本说明之前，应该已经会用 TCOS 进行数据的输入及基本操作，并阅读了 TCOS 的使用说明书的自动优化功能部分的说明。

TCOS2.00 采用适应法进行光学系统自动优化，由设计者指定平衡像差的种类和个数，以及这些像差要达到的目标值。适应法校正像差的特点是：a. 自变量的个数不能小于要校正的像差的个数；b. 参加校正的像差不能相关；c. 能够充分利用设计人员的设计经验和像差理论知识，可根据不同类型光学系统的特点，选择平衡不同的像差，使用比较灵活。

程序将系统的四个主要光学参数也作为像差对待，用户指定目标值。这四项为光焦度 Φ （焦距倒数）、相对后截距 l'/f' 、相对出瞳距离 lz'/f' 、垂轴放大率 β 。

TCOS 可控像差的界面如下：



其中，第 1 到第 8 种像差 ($\delta Lm' \sim \Delta$

$YFCm'$) 为初级像差，通常比较容易校正，第 9 到第 16 种为高级像差 ($\delta Lsn' \sim \Delta YFCsn'$)，对于大视场角的系统，一般比较难以校正，这 16 种像差是自动优化过程中常用的。第 17 到第 20 种像差 ($\Phi \sim \beta$) 实际上是光学特性参数，在自动优化过程中作为像差对待。第 21 种像差 (ST) 是垂轴像差曲线和水平轴之间所围的面积，是一种综合指标，通常可以用其进行初优化，其目标值不要给 0。以下为一些辅助像差，可根据情况选用。例如，第 36 种像差 (ρDFC) 为综合弥散半径，它能比较好地反映成像质量，但需要计算点列图，要追迹大量光线，速度较慢，因此一般只在最后精优化时才采用。其它像差可根据该项像差的意义，结合实际系统进行选用。

光学设计软件的自动优化功能是非常重要的，掌握自动优化功能的一些使用技巧，对于充分发挥软件的自动优化的潜能，更快地设计出像质良好的光学系统，具有很重要的意义。下面是一些要注意的事项。

1. 自动优化时，一般不要将所有准备平衡的像差同时校正，而是先校正一部分像差，例如球差和彗差，然后显示所有可控像差值，挑选其中较大的像差逐步加入自动优化行列。TCOS 中，进行这一过程是非常方便的。这样往往能提高设计

速度，甚至避免一些优化过程中的相关现象；

2. 有时在优化过程中，最大因子经过震荡后，进入一种稳定慢收敛状态（表现为状态栏中的最大因子的值持续减小，但减小得比较少），这时可终止优化，然后再单击“自动优化”按钮重新投入优化，往往能快速收敛到位；

3. 有时程序自动优化结束后，像差值还不一定满足使用者的要求，这时可以不作任何修改，再单击“自动优化”按钮，重新优化；如果还是不满足要求，则可以修改自动优化中的自变量增量，例如将“曲率增量”减小或增加一个数量级。

4. 对于有些难校正的像差，可根据显示的“所有可控像差值”的大小，逐步校正减小其值，直到无法校正下去为止。即不要试图一次使其校正到0。这个过程中注意每校正一次后都观看一下结果，并注意将当前数据存盘。

5. 自动优化可控像差的“综合平均弥散半径”项，是多视场、多色光的垂轴像差的综合均方根值，是建立在追迹大量光线的基础上的综合指标，用其进行优化时，速度很慢。一般只有在优化特殊面形和非共轴系统时才有用。

6. 对于非共轴的系统，传统的几何像差已经失去意义，因此一般不校正单项几何像差。

下面列举一些光学系统的设计实例。设计完成后一般要使曲率半径靠国标或企业的样板，这里省略了这一步。

二、 望远物镜设计实例

望远物镜的光学特性主要是：相对孔径小，视场角不大。因此望远物镜的结构型式通常比较简单，要校正的像差也比较少。一般主要校正轴向色差 L_{FC}' 、球差 $\delta L'$ 和慧差 K_r' 这三种像差。对畸变 $\delta y'$ 、像散 x_{ts}' 、垂轴色差 $\Delta y_{FC}'$ 等则不予校正。

假定要设计一个望远物镜，其光学特性参数为：

通光孔径： $D=40$
焦距： $f'=200$
视场角： $2\omega=5^\circ$

分析：该物镜的相对孔径为 $D/f'=1/5$ ，视场角也不大，因此可以采用望远物镜中最常用的双胶合物镜。

自动优化思路：此类小相对孔径、小视场角的光学系统，各透镜的中心厚度的少量变化对像差的影响较小，因此透镜厚度不作为自变量，而是根据加工和装调工艺由设计者指定。将三个曲率半径作为自变量，这样最多只能控制三种像差（其中有一种为焦距）。由于物镜要和目镜组合起来使用，因此允许有一定的球差、色差等。我们这里控制球差 $\delta L_m'$ 、慧差 K_{im}' 和光焦度 Φ 。色差在玻璃选择适当的情况下也会较小，有一定的剩余值可通过目镜进行校正，这里不作控制。

初始曲率半径任意给定。

优化步骤：

①输入初始特性参数（参照使用说明书）和结构参数，三个曲率半径分别为 200、-200、-10000，厚度为 6、5，玻璃为 K9、ZF1。如图所示，完成后存盘；

	曲率半径	厚度间隔	玻璃名
1	200	6	1
2	-200	5	k9
3	-10000		ZF2

像面: 0 0 1

输入折射率 输入玻璃名

②将页面换到“初始数据”的“结构参数”页，在三个曲率半径后加上一个字母“v”或“V”，回车或将鼠标点往别处，则这些数据变为红色，表示用户指明这些参数为优化过程中的自变量。单击“确定”按钮；

③单击“自动优化参数”页签，则显示出“自变量”页，要求输入欲达到的焦距、优化初始增量和厚度约束条件。其中“自变量数”是由第②步决定的，“欲达到的焦距”则由用户输入。在输入的过程中，显示的“光焦度（焦距倒数）”则不断地变化，同时“曲率增量”、“间隔厚度增量”等也根据输入的焦距值而不断变化。这些增量值是自动优化的自变量初始增量，在优化过程中，增量由程序自动调整，因此这些由程序确定的初始值通常能满足要求。在输入焦距200后，单击“确定”按钮；

④程序自动切换到“要校正的像差”页，用鼠标选中球差 $\delta L_m'$ 、慧差 K_{tm}' 和光焦度 Φ ，然后单击“应用”按钮；

⑤程序自动切换到“受控像差和目标值”页面。在该页的表格中，程序根据设计者在第③步做出的选择，自动列出了设计者要校正的像差。同时，对于光焦度 Φ ，程序自动填写其目标值。其它为空，表示其要求的值为0，设计者不用输入；

⑥单击输入窗口右边的“操作选择”面板中的“自动优化按钮”，则程序进行自动优化。

⑦程序完成自动优化后，输出优化前受控像差的目标值、当前值，以及优化后受控像差的目标值、当前值。可以看出控制的像差已经很小。设计者也可以计算像差，分析像差情况。

说明：在自动优化过程中，有可能出现最大因子多次振荡的情况。这说明当前的结构型式不能够满足设计者所要求的像差平衡状态。这是时可强制停止优化，然后计算、观察当前受控像差值，给其中的一个像差的目标值一个较大的值，待达到目标后再逐步缩小像差目标值。

三、目镜设计实例

目镜的特点是焦距短、视场角大、相对孔径小，且入瞳和出瞳都离透镜组有一定的距离。因此，目镜的轴外像差一般较大，必须校正。这就决定了目镜的结构型式通常比较复杂。

根据像差理论和设计经验，目镜通常校正像散 x_{ts}' 、垂轴色差 $\Delta Y_{FC}'$ 和慧差 K_T' 这三种像差。同时，要考虑它和物镜的像差补偿关系，要校正物镜的剩余像差，同时有些像差也可以利用物镜得到校正。

设计目镜通常按反向光路进行设计。由于望远系统要求有一定的出瞳距离，因此对应着目镜设计时，就必须给出一定的入瞳距离。如果在物镜焦面上要安装分划板，还必须使目镜保持一定的后截距。

我们以一个最简单的冉斯登目镜的设计为例，简要说明目镜的设计方法。目镜的光学特性为：

焦距：	$f'=20\text{mm}$
视场角：	$2\omega=30^\circ$
出瞳直径：	$D'=2.5\text{mm}$
出瞳距离：	$lz'=7\text{mm}$
前截距：	$l_f=-4\text{mm}$

望远系统的放大倍数为 10 倍，则物镜焦距为 200mm。因此按反向光路设计时，出瞳距离为 $200+4=204\text{mm}$ 。根据瞳孔共扼的要求，设计时应该控制该出瞳距离。

冉斯登目镜是最简单的一种目镜型式，由两片平凸透镜组成，玻璃材料通常都为 K9，不能消垂轴色差。由于可供使用的自变量非常有限，通常只有两个曲率半径和一个空气间隔共三个变量，而需要控制焦距 f' 、后截距 l' 和出瞳距离 lz' ，所以通常可以从设计手册上找一个类似结构，在此基础上进行优化。从光学设计手册上找到一个结构，初始数据为：

半径	厚度	玻璃
0	2.3	K9
-12.057	16.2	
15.06	2.3	K9
0		

优化步骤：

①将光学特性参数和上述初始数据输入，将两个曲率和透镜间隔作为自变量，注意入瞳距离输入为-7；

②在“自动优化参数”页，输入欲达到的焦距为 20mm，约束条件缺省。控制三项像差：光焦度 Φ 、相对后截距 l'/f' 、相对出瞳距离 lz'/f' ，目标值分别为 0.05、0.2、10.2（对应 $f'=20$ 、 $l'=4$ 、 $lz'=204$ ）；

③单击“自动优化”按钮，开始自动优化。很快得到结果；

④观看高斯参数，发现出瞳距离可能离要求还有一定差距，这时不作任何修改，再次单击“自动优化”按钮，则再次优化，并得到了一个较好的结果。

优化完成后，计算像差并分析可以看出，系统的慧差非常小，满足要求，但球差和垂轴色差还有一定的值，这是冉斯登目镜的主要缺点。可以用物镜进行补偿。

另外，目镜的子午场曲 x_t' ，也还比较大。读者可以作一个试验，将两个透镜的厚度也作为自变量，并加上控制 x_m' ，目标值给为 0.03，再进一步优化，则能得到一个消子午场曲的结果。作为练习，这个过程中也可以限制透镜的厚度再进行优化，例如，在“附加约束条件”输入框内输入：

```
oal 1..2>1.2
oal 1..2<3
oal 3..4>1.2
oal 3..4<3
```

当然，这是为了练习输入特殊约束条件。实际上也可以不输入上述约束条件，而直接在“自动优化参数—>自变量”页中，修改透镜厚度的最小值为 1.2，最大值为 3。能达到同样的效果。

四、 显微镜设计实例

显微镜主要光学特性是数值孔径 NA 和垂轴放大率 β 。NA 越大，其衍射分辨率越高； β 越大，则焦距越短。

设计显微镜应该注意，为了保证不同倍率的物镜和目镜可以互换使用，我国规定显微镜的共扼距离为 195mm，即显微镜的物像间距为 195mm。另外，有一种叫做“无限筒长”的显微镜，物体经过这种显微镜后，成像在无穷远，

在该物镜的后面，另有一固定不变的镜筒透镜，再把像成在目镜的焦面上。物镜的倍率按与镜筒透镜的组合倍率计算。我国规定镜筒物镜的焦距为 250mm。

对于一般的显微物镜来说，最主要的特点就是相对孔径大，所以设计显微物镜时，主要校正球差、轴向色差和慧差，特别要设法减小它们的高级像差。对于轴外像差，由于视场角不太大，且允许视场边缘像质降低，通常可不必太多考虑，只在优先保证前面三种像差的前提下，有可能的情况下才考虑校正。显微物镜的设计通常也按反向光路进行，主要是为了保证修改结构参数时，共轭距和倍率变化很小。

对于一些特殊用途的物镜，例如用于显微摄影的物镜，为了保证整个视场都比较清晰，就要求校正场曲、像散和垂轴色差，这种物镜称为平像场物镜。

低倍显微物镜物平面在有限距离，与前面例子中的物平面在无穷远不同，这类系统往往需要控制垂轴放大率 β ，而可能不控制焦距 f' 。下面我们就以低倍显微物镜的设计为例，介绍这类物镜的设计方法。

假定要设计一个低倍消色差显微物镜，光学特性要求为：

$\beta = -3\times$ ， $NA = 0.1$ ，共轭距 $L = 195$

设计思路：低倍消色差物镜通常为双胶合透镜。共轭距为 195，考虑透镜的主面间隔，光路计算时取为 $L = 190$ 。经过简单计算（计算过程略），并按反向光路考虑，得出对光学系统的特性参数要求为：

物距： $l = -142.5$

像距： $l' = 47.5$

垂轴放大率： $\beta = -0.333$

数值孔径： $NA = \sin U = 0.0333$

设计步骤：

①输入光学特性参数，其中物高输入为-10。任意输入一个初始结构，参数如下：

半径	厚度	玻璃
200	4	BaK7
0	2	ZF3
0		

完成后存盘；

②单击“辅助设计->焦距缩放”页面，在“焦距目标值”输入框中输入 30，单击“开始缩放”按钮，完成焦距的缩放；

③将三个曲率半径作为自变量，从“自动优化参数->要校正的像差页”，选中慧差 KTm' 、色差 $\Delta LFC0.7'$ 和垂轴放大率 β 作为受控像差，目标值分别为：0、0 和 -0.333；

④单击“自动优化”按钮，完成设计。

说明：以上设计过程中，控制的是 β ，最后计算出的共轭距 L 不是严格地等于 195mm，但是由于是按反向光路计算的，因此使用时，稍微改变物距，就能够保证共轭距，而像质变化不大。当然，也可以根据物距、系统长度，来控制像距，同样能完成优化，读者可作这一试验。

五、照相物镜设计实例

随着光电成像技术的发展，照相物镜已经成为应用最多的光学系统。照相物镜的光学性能主要由其焦距 f' 、相对孔径 D/f' 和视场角 2ω 确定。

照相物镜的种类非常多，焦距、相对孔径、视场角的范围很宽，因此结构型式也多种多样。要平衡哪些像差，需要根据具体的光学特性参数和光学系统的用途来确定。一般情况下评价其像质可考察垂轴像差、弥散圆的大小，或用光学传递函数 MTF 进行评价。

由于照相物镜的结构型式比较复杂，高级像差一般较大，因此其原始系统一般不用初级像差求解的办法，而是直接从设计手册或专利上寻找一个和设计要求相近的系统作为初始结构，在此基础上进行优化。而在本说明的例子中，为了说明 TCOS 自动优化的能力和步骤，我们将曲率半径随便输入。

下面我们以简单的三片型物镜的设计为例，介绍照相物镜的设计。在三片型基础上可演化出多种复杂的结构型式。

光学特性要求：

焦距： $f'=20\text{mm}$

相对孔径： $D/f'=1:3.5$

后截距： $l_f'=18\text{mm}$

视场角： $2\omega=15^\circ$

设计步骤：

①输入特性参数。初始结构参数任意输入一个，光阑为第一面，玻璃为 ZK6 和 ZF1 和 ZK6：

半径	厚度	玻璃
200	3	ZK6
0	2	
0	1.5	ZF1
0	2	
0	3	ZK6
0		

将三个透镜的所有曲率半径和空气间隔作为自变量，共有 8 个。输入完成后存盘；

②将球差 $\delta L_m'$ 、慧差 KT_m' 、光焦度 Φ 和相对后截距 l'/f' 作为受控像差，目标值分别为 0、0、0.05 和 0.9。输入完成后，单击“自动优化”按钮；

③在程序迭代过程中，注意观察下面状态栏里的最大因子。当最大因子处于一种连续的慢收敛状态时(例如变化趋势类似于 $87.6789 \rightarrow 86.5555 \rightarrow 85.4532 \rightarrow \dots$ ，每 1 秒钟左右变化一次，且变化比较小)，这时人工终止优化，然后不作任何改动，再单击“自动优化”按钮重新优化，则优化过程大大加快。这样的过程可能要重复几次。直到程序自动优化终止，得到一个较好的结果。观看系统二维图，并将这时的数据存在一个临时文件中；

④单击菜单“显示 \rightarrow 所有可控像差”，计算所有可控像差，观察像差的大小。可看到像散 $xtsm'$ 较大。则将 $xtsm'$ 加入受控像差中，目标值给 0。再接着自动优化；

注意，在优化过程中，同样可能需要由设计者控制停止优化，再重新优化的过程，这样能够大大加快优化速度。在许多情况下，给出的目标值可能不合适，即该结构达不到设计者想要的像差要求，则程序反复迭代，最大因子反复振荡，试图寻找更好的解，但有时可能出现一个结构更差的系统，而使优化无法进行。

这也是为什么每得到一个较好结果，就存盘保存的原因。当优化无法进行下去时，可人工终止优化，观看系统二维图，如果结构太差，可调出上一个结构较好的系统，并修改像差目标值重新优化。这样的过程经常会出现，以后不再特别强调。

⑤再计算所有可控像差值并分析，发现 0.7 口径的轴向色差 $\Delta LFC0.7'$ 比较大，为-0.2 左右，则将其纳入受控像差，目标值给为-0.1，然后自动优化。优化过程很快完成，将结果存盘；

⑥再计算所有可控像差值并分析，发现高级球差 $\delta LTym'$ 比较大，到-0.7 左右，则将其纳入受控像差，目标值定为-0.5，其它目标值不变，再自动优化。完成后，在将该像差的目标值改为-0.3，再进行优化。完成后，再将其目标值设为-0.25，再优化。完成后存盘；

⑦再试着减小像差的目标值。例如将第五步中的 $\Delta LFC0.7'$ 的目标值由-0.1 改为 0，再自动优化，很快完成。结果存盘；

⑧计算并分析像差，发现轴上光线的像质已经非常好，因此可以不控制轴向色差 $\Delta LFC0.7'$ ，而改为控制垂轴色差 $\Delta YFCm'$ ，目标值定为-0.015。由于控制了垂轴色差，轴向色差也不会变得很大。同时纳入高级慧差 $KT'sny$ ，目标值定为 0.07，其它目标值不变，然后进行自动优化。完成后存盘；

⑨现在共控制了 8 种像差，而自变量也为 8 个，因此不能再加入新的受控像差，焦距、像距等光学特性参数都满足要求，认为设计完成。如果认为像质不太满意，则只有更换玻璃材料，或逐步减小像差目标值，或改变受控像差的种类，也可以将透镜厚度也作为自变量，参加优化，可以得到更好的结果。

需要说明的是，上述步骤只是一个例子，并不是固定的，您可以改变校正像差的顺序、种类等，有可能得到更好的结果。但上述步骤给出了一种解决问题的思路。

自动优化过程中，人的因素非常重要，对于用适应法自动优化更是如此。只有对不同的系统的光学特性、像差特性比较了解，并多用程序进行练习，摸索总结经验，才能比较快地完成光学系统的设计。适应法对设计者的要求相对较高，但使用熟练以后，能够设计出满足要求、针对性很强的光学系统。