

第一章 概述

CODEV 是设计和分析光学系统的一种工具。本章的内容主要是向你介绍 CODEV, 用户可以从中学习的内容和如何使用 CODEV, 并且简要地阐述该软件的用户界面和结构。

目录

何谓 CODEV?	2
设计者与手册	4
假设和术语	5
CODEV 的界面	6
CODEV 的结构	9
开始, 结束, 技术支持	10
手册中的一些假定设置	11

1.1 何谓 CODEV?

1.1.1 光学设计的得力工具

CODEV 是一个解决光学问题非常有用的和灵活的软件。虽然, CODEV 的研究起源于 30 年前, 但是, 它一直不断地得到改进以便于能够和光学技术的发展保持同步。由于采用了一种专用的视窗用户界面, 随时可以得到帮助的特点和优越的技术支持, 所以, 正如这本手册所展示的, CODEV 软件很容易被掌握。

1.1.2 CODEV 的任务

许多应用都可以使用 CODEV 软件, 下面列举出一些具有代表性的任务:

- 对现有光学系统在新应用中的可实用性或者为降低生产成本进行评价和改造。塑料、非球面、衍射或者货架产品也可以用这样一种重新设计的方式来评价。

- 根据某种特定应用或者产品的要求进行新的设计。

- 可以通过进行公差分析, 绘制现场生产用图, 甚至于 IGES (CAD) 输出完成满足于生产要求的光学设计。

何谓应用? 从广义上来说, 有三种应用领域:

- 成像系统;

- 光电通讯系统;

- 照明和其它系统。

从历史的观点来看, CODEV 软件的 80% 以上的用处大概是在成像系统方面。其中包括照相镜头、变焦物镜、光盘录制光学系统、医用仪器、望远镜、分光镜、复印设备、投影仪、扫描仪、微光刻系统、和许多包括军用和民用航天领域的应用。

虽然这些应用已经延续了多年, 但是随着技术的发展, 例如普通照相机变成为数字相机、CD 成为 DVD 等等, 都会有新的工作要做。在最近几年, 光子学领域的应用一直发展得很快。由于 CODEV 有较强的适应性, 在照明和其他系统中的应用也占有较大的比重。

1.1.3 初始设计并非随意设计

正如上节所述, CODEV 软件已经被应用了多年, 并且在许多领域中都有应用。其中一个优点就是几乎完全没有必要从零开始设计光学系统。比较典型的方法就是改造一个现有的光学系统来实现新的设计目的。在这本手册中, 我们将教您如何从 CODEV 的 New lens Wizard (参考 2.2 节) 开始去工作。

1.1.3.1 知识产权问题

正如您将要看到的，New lens Wizard 会使您从一个 CODEV 的样品物镜，从一个具有 2400 个专利的资料库，从您自己建立的透镜库“favorite”或者从一块平板玻璃来开始进行设计。简单的物镜和专利可以是很有用的设计起点，但是在设计过程中，您也应当明白：需要尊重这些知识产权。当 CODEV 专利数据库中的所有专利都过期时，还会有其他的包括没有过期的专利资源。从这些材料中，您肯定可以学到一些东西，但是在利用一种未过期的专利作为设计起点时，一定要小心不要侵犯专利拥有权。

未来，建立一个属于你自己的透镜库“favorite”是一个好主意。当您开发了许多设计或者在您的组织下由您的同事输入和研究完成了设计，您将可以建立一个完全适合于您的应用领域的透镜设计库。当您完成了一个设计，并将它存入透镜文件中后，就可以利用 **Tools>Add to Favorites** 菜单快速地将它增加到您的透镜库“favorite”中。它也适合于后来的 New lens Wizard 一节。

1.1.4 保持设计简单

当您开始一个新的设计时，您应当明白系统中什么是必不可少的，并且将比较复杂的留在后面。很明显，偏振是一个重要的因素，但是，很可能现在您不必着急去考虑它。在此，给您一些提示以便于使您的设计更加简单：

- 在使用非球面或者衍射面之前首先采用一个全部都是球面的设计；
- 如果必须采用非球面或者衍射面，首先引入较低阶的项；
- 除了系统的确是而非对称系统外，否则不要使用光场的 X 分量，X 方向的倾斜和偏心。

但是，也不要把事情考虑的过于简单：

- 即使是一个系统仅仅打算轴上使用（例如，一些激光系统），并且假定是仅仅考虑使用中有可能出现的失调问题，通常比较明智的做法是在 Y 方向上至少给出一个非常小的离轴角。仅仅使用一个视场，有时候会造成缺省孔径太小的问题。

- 一个锥体似乎比一个非球面简单，但是一个表面的曲率如果很小，那么，一个锥体将不会是一个有效的优化变量，而四级的非球面项却可能是。

这些例子看起来非常专业性，但是，当您使用 CODEV 工作时就会逐步地理解它。在一般的情况下，您可以利用 CODEV 的速度、容易和 Undo 的功能（**Edit>Undo** 菜单）等特点首先用简单的方式做些设计并进行评价。如果不行，就使用 Undo，并使用更多的变量，然后，重新进行优化，这仅仅需要敲动几下键盘和花费几秒钟的时间。在某些情况下，会逐步逼近一个有效的战略设计目标。

1.2 手册和使用者

1.2.1 使用对象

这本手册的使用对象是那些准备使用 CODEV 软件对光学系统进行建模、分析和优化的技术人员。虽然具有光学工程专业的背景肯定会有帮助，但是，有许多 CODEV 的使用者是他们自己通过参加专业研讨会（SPIE 或者其它）或者通过自学各种书籍已经学到了必要的技巧。CODEV 不是一个神秘的黑匣子，它不会承诺使一个对光学毫无了解的人就可以设计透镜。但是，当您使用该程序工作时，常常可以学到必要的背景知识。

1.2.2 关于手册

这本手册的内容相当完善，但是并不打算讲述光学理论或者一般的光学工程知识，起码不是以系统的方式进行。也不对 CODEV 的每一条性能进行阐述。它是通过一系列详细设计的示例教会您使用 CODEV 来解决一系列实际的问题。

1.2.3 如何掌握更多的信息？

如果您需要了解关于使用界面方面更为详细的资料，可以通过 CODEV Test Drive 实现。为了找到程序方面更为详细的信息和更多的示例，online Help(在线帮助)或者 Reference Manual(参考手册)是一个很好的资源（更详细的 参阅下面的“在线帮助和文件”）

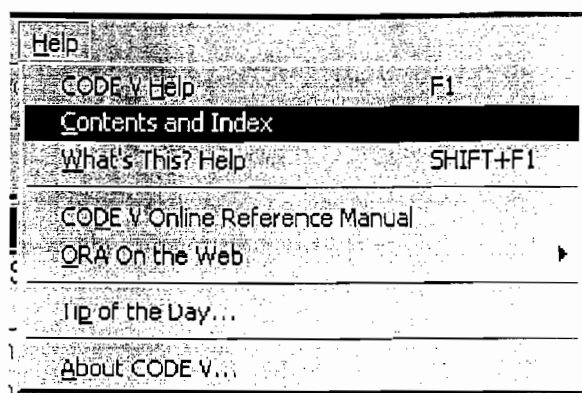
提示：

第十章，“基础知识”阐述了许多有价值的、更为详细地补充和解释光学建模问题的资料。包括坐标系、系统的数据资料、光瞳和渐晕，以及其他的重要内容。在做第二章和第三章的示例之前，您可能需要先浏览一下第十章。

如果您需要更多的背景知识来理解技术要点或者光学要点，建议您阅读参考资料（附录 B）中所列出的相关章节。由 Fischer（2000）和 Shannon（1997）出版的书籍都有一个很近代和实际的描述，是对本手册中示例和讨论的最好补充。

1.2.4 在线帮助和有关文件

CODEV 包含有广泛的在线帮助和文件（在线的含义是在您的计算机屏幕上而不是被打印出来，但是，也不是在网络上一这种帮助是连同程序一起被安装在您的计算机上）。甚至有关于帮助的帮助！CODEV 中有许多得到帮助的方式。现在来看 Help 菜单：



- 选择 **Help>CODE V Help** (或者按 **F1**) 进入帮助系统, 并显示出当前已经打开的视窗或者对话框。

- 选择 **Help>Contents and Index** 打开帮助内容的浏览器; 为了得到某些条款的解释和看到更多的分主题词, 双击该主题词。您也可以从这个视窗搜索帮助的内容。

- 选择 **Help>What 's This? Help** (按 **SHIFT+F1**) 将光标转换成“帮助指针”。用这个指针箭头敲击您感兴趣的项目, 并且阅读有关的帮助内容 (在该参考资料中绝大部分项目都有帮助, 但是, 并非全部都有)。

- 选择 **Help>Online Reference Manual** 打开 CODE V 全部参考手册的 PDF 文件, 包括所有的内容, 图表和示例。该参考手册的内容全部都可以被浏览, 并且可以打印出来。

- 选择 **Help>Tip of the Day** 阅读 CODE V 的提示 (您也可以关掉该对话框中的 **Show Tips on Startup**)。

1. 3 假设和术语

尽管这本手册的确是假定使用者已经比较熟悉光学系统、光学方法和光学术语, 但是并没有特定的先决条件。在此给出的是我们将要使用的、无须做过多解释的少量的概念和条目。如果您已经学习过大学水平的、包括基本光学知识的物理学课程, 那么, 您就可以发现大部分术语至少是比较眼熟, 尽管工程和设计方面对您可能是全新的。

光—从光学的角度来看, 电磁波主要是用波长或者颜色来表示其特征。

光波很短—对于绿光来说, 大约 500×10^{-9} 米 (m), 或者 500 纳米 (nm)。

真空中的光速是一个常数 ($c = 3 \times 10^8$ m/sec), 但是, 在光密媒质中, 例如玻璃中的速度就会慢下来。真空中和某一材料中的速度之比被称之为折射率 (n), 它随着材料的类型 (玻璃) 和波长而变化。光还有其他的性质, 例如在 CODE V 中可以被建模的偏振, 但是没有波长那么重要。

光学表面 — 一个具有曲率、位置 and 材料（主要是用其折射率的值来表示）的表面。光学表面也有横向范围（孔径尺寸）和其他的定义形状或者特征的性质。

几何光学与物理光学 — 几何光学是假定光沿直线传播，当光线遇到光学表面时，服从一些简单的定律（Snell 定律和反射定律）。物理光学假定光是一种波，这种类型波特性对衍射效应有效。CODEV 是在综合考虑几何光学和物理光学的基础上工作的。

光线追迹 — 确定光线通过一系列光学表面的路径的数学方法。一般来说，光线是与几何光学有关，但是，光线追迹可以以不同的方式扩展到与光波的特性，甚至于偏振状态有关并且允许进行物理光学计算（也被称为以波为基础或者以衍射为基础的计算）。

光学系统 — 用一些特性（系统数据）参数表示的光学表面的集合。CODEV 中的一个光学系统就是一个可以被制造出的、真实光学系统的模型。它可以包含折射面、反射面或者二者兼有之。

透镜 — CODEV 中使用透镜这个词来作为一个光学系统的同义词。同样，一个变焦距物镜和照相光学系统是同样的意义。在通常的使用中，透镜这个术语常常是意味着一个经过仔细成型的、单片玻璃。在光学设计阶段，被称之为透镜元件，或者有时候称之为光学元件。

物面和像面 — 物面是假定发出光线的表面，像面是指光线通常被聚集或被分析的表面（一幅图像常常在这里形成，但并不一定形成图像）。物和像这个词在普通光学或者古典光学中有特定的含义。关于更详细的内容，建议您查阅光学的基础教科书。尽管熟悉概念和含义比方程式更为重要，但是，由于 CODEV 中被建模的许多光学系统（也许是绝大部分）都是成像系统，并且，要为您计算出这些量，所以光学设计中的这些关系式非常重要。

近轴光学 — 通过某种假设（比如，小角度使 $\sin \theta = \theta$ ，小光线高度等等）可以将光线追迹简化到比较简单的线性方程式。这些被称之为近轴关系，对于确定光学系统的基本性质是很方便的。

焦距 — 光学成像系统的一个基本近轴特性。一个薄透镜（厚度为零）的焦距就是无穷处的光线会聚形成一个像的距离。有效焦距（EFL）就考虑到了真实光学系统的非零厚度。

我们假定本手册中的许多概念和术语都是您已经熟悉的。如果这些都是您不熟悉的，您可能需要阅读附录 B 中所列出书目中的一些章节，或者说先试一试，看看如何做。

1.4 CODEV 的界面

1.4.1 捷径

理论上，学习某种知识的最佳方法就是动手实践。我们建议您使用 CODEV Test Drive 作为 CODEV 使用界面的一种具体的介绍。虽然，有许

多是与其他的视窗应用一样，但是，有一些界面概念和技术是 CODEV 专用的。Test Drive 是一本浓缩版手册，它集中了使用界面和最基本的程序特性，解释性材料很少。

这本手册将向您显示所有的界面特性，以实例和解释性内容的形式散布在手册中，因为本手册的目的是教您在各种应用中学会实际操作 CODEV。

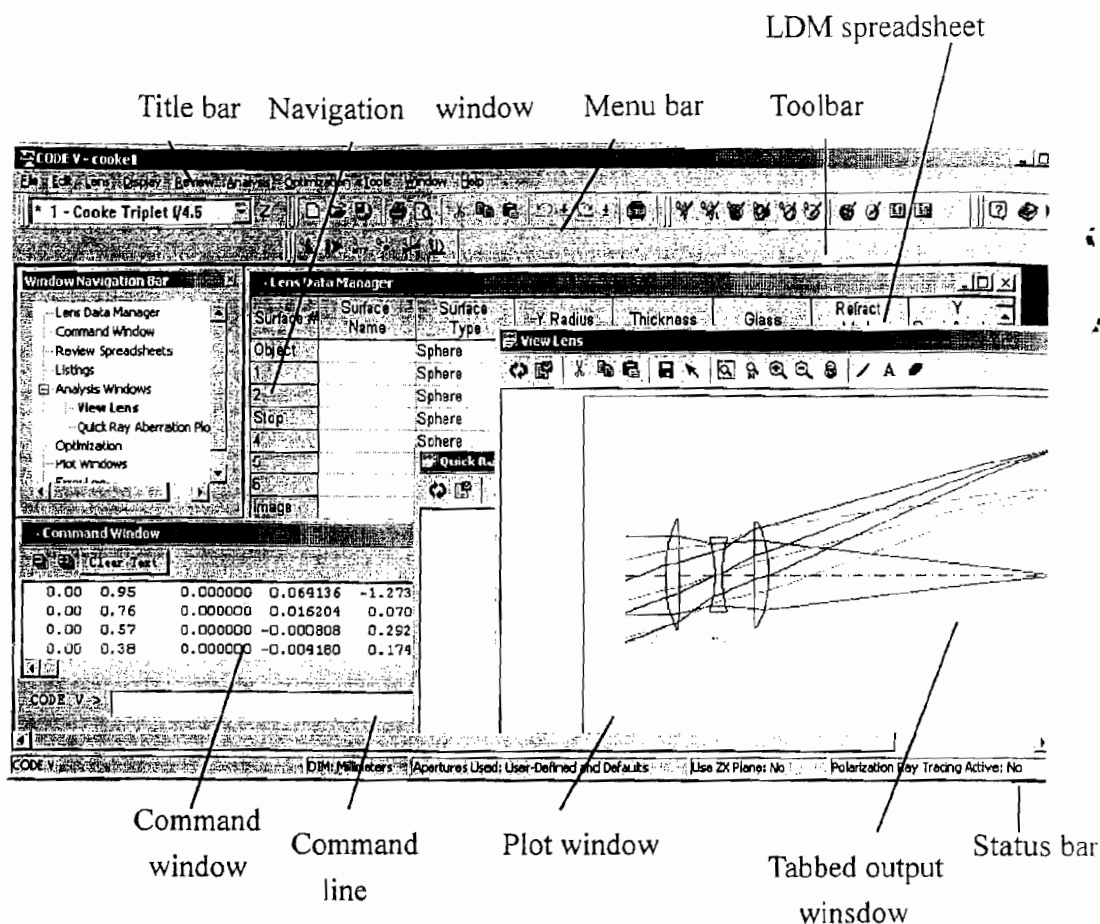
阅读 Test Drive 中两节简短的样例后，返回来准备学习技术资料，此时，不要过多地纠缠使用界面的机理。如果您比较熟悉其他的视窗应用，那么在学习界面方面就不应当有太多的困难。通过 Test Drive 的学习，也将教您掌握 CODEV 的专用界面特性，这将使您使用起来更为有效。

提示：

当您使用 CODEV 中的数据表格时，或者可以选择单独的一格，或者一行或者一列。一格是对应着具体的数据项，例如厚度；一行通常是对应着整个表面。根据不同的选择，右击不同的菜单内容。为了选择一行，敲击最左面的格，直到该行点黑。您也可以拖动光标以选择多行，然后右击以完成某项任务（例如，消除一组表面）。

上述的所有内容以及一些关键部分的定义都表示在由程序所显示的、下面的视窗中。如果您遇到了一个术语，例如 status bar，并且，想不起它是在何处或者什么含义，您可以回到该页查阅。

-
- **标题栏 (Title bar)** — 包括您目前正在使用的透镜“文件”的文件名
 - **视窗目录框 (Window Navigation Bar)** — 提供一种跟踪您正在使用的所有视窗的方式。正如下面例证所示，沿着 CODEV 工作区视窗的边缘可以将目录框“缩回”，或者移动（当用鼠标拖曳时，为了避免缩回，请按下 **CTRL** 键）。
 - **菜单框 (Menu BAR)** — 包含有程序的绝大多数功能。您也可以在用户对话框 (**Tool>Customize** 菜单) 中增加另外的菜单项（例如常常使用宏指令）。
 - **工具框 (Toolbar)** — 对于许多普通功能可以单击快捷键。将鼠标指示箭头压在一个功能键上可以看出“对该标的提示信息”。您可以用鼠标拖着工具框在附近移动，也可以在用户对话框里 (**Tool>Customize** 菜单) 修改工具框的内容。



● 透镜数据管理视窗 (Lens Data Manager (LDM) Window)

— 该数据表主要显示初始透镜的数据。右击该数据表中的某一格、一行或者一列，您就可以使用其它的数据和操作。最上面的菜单仅仅包含有您为选择的项可以输入的命令。

● 命令视窗 (Command Window) — 所有文本输出的“工作日志”视窗，是直接输入命令和观察命令结果的主要工作区。

● 命令输入栏 (Command entry line) — 命令视窗的一部分。如果您想使用的话，这是输入程序命令的地方 (以命令或者鼠标为基础的操作都被集成在 CODEV 中，事实上，您可以在任何时候使用其中的任何一种方法)。

● 图形视窗 (Plot Windows) — 由命令操作而产生的图形曲线被显示在专用图形视窗中。您可以拥有多达 100 个这样的视窗，但是，经常是用的 3 个到 4 个。

● 列表输出框 (Tabbed Output Window) — 在 CODEV 中，像 MTF 和点列图这样的专门的计算都被称之为选项 (options)。从菜单框开始，每一个选择项都会创造它自己的列表输出视窗 (TOW)，其中包括文字，图形和警告或者误差信息。TOW 的主要特征就是它存储了原来的设置，

因此, 敲击一下执行键(再计算)就可以重新进行计算。

- **状态框 (Status bar)** — 状态框位于 CODEV 主视图的最下边框处, 并显示出诸如焦距、尺寸等参数。这些参数可以安排在 Costomize 对话框中 (**Tool>Customize** 菜单)。

1.4.2 命令和宏指令

您可以通过选择菜单项、填写在表格和对话框中、然后敲击按键来运行 CODEV 程序。这是本手册中最经常被使用的方法, 但是还有另外的方法。您也可以在命令视窗 (**Command Window**) 中通过键入命令进入所有的程序层。如果您是一个有经验的 CODEV 使用者, 可能会知道许多命令, 并且更喜欢使用这种方法。如果真是这样, 那就太好了。您可以键入命令, 用菜单运行, 或者二者各兼用一点。当您仅仅使用命令运行时, 有一些界面特性, 例如列表输出视窗 (TOW) 并不适用。考虑到要对使用 CODEV 软件已经有经验的用户的方便, 特意地决定使界面设计尽可能地和过去的版本相兼容。

如果你想学习操作命令, 可以从研究这本手册的命令输入例子开始, 这些例子列在附录 A。也可以利用帮助特征 (特别是 F1 键) 获得列在 CODEV 命令的屏幕提示符和三个字母缩写词的文献资料 (如果你是一个热衷于三字母缩写词的爱好者, 你就会处身在 CODEV 命令语言的浩瀚世界里, 有一千多个这样的缩写词。这可能有助于解释为什么要开发菜单界面)。

1.4.3 宏+语言

学习和浏览命令语言的另一个地方是 ORA 公司提供的宏指令。在宏指令对话框里 (**Tools>Macro** 菜单), 或者在 CODEV 安装目录的子目录里有大量的 MACRO 语言。事实上, 虽然你从菜单界面就可以很好地使指令提供的宏语言, 但是你必须用命令来写宏指令。CODEV 的在线 Help 有一节是关于内置 Macro-Plus 编程语言和所提供的宏指令。

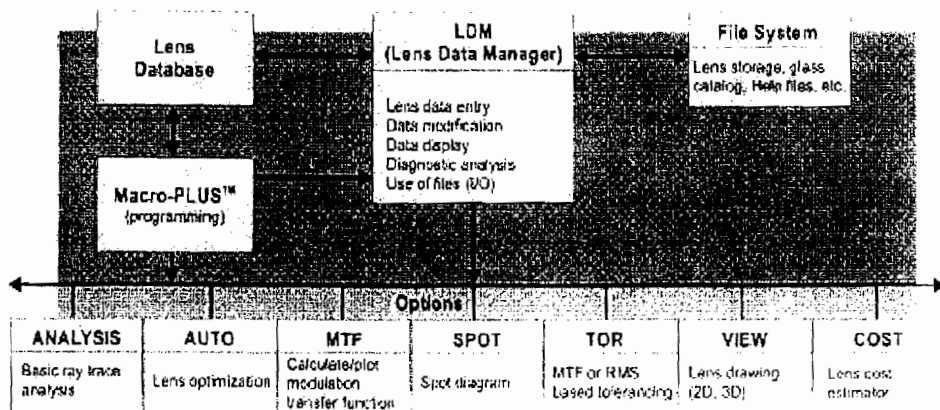
1.5 CODEV 的程序结构

CODEV 由许多部分组成, 但是, 它的总体结构相当简单, 仅仅有两级。CODEV 各部分之间相互联系的核心是 Lens Data Manager (透镜数据管理器 (LDM))。可以通过菜单和对话框, 或通过命令, 或者这两种方法并用, 与这部分程序互动 (如果在 Command Window 中看到了提示符 CODEV>, 就表明已经在 LDM 里了)。必要时, LDM 保留着透镜的数据库, 并且与计算机的操作系统和文件系统保持着联系。

CODEV 的另一级是选项级。选项是一项进行特殊目的的计算, 例如 MTF, 光点图, 优化等等。这一级有超过四十五个的选项。你可以把它们当作子程序, 它们有自己的输入对话框, 命令和输出体系, 这对它们来说也都是必要

的。当你在选项部分操作时，你被锁定在 LDM 操作之外，除非你在选项对话框里敲击了 OK 或 Cancel（或者在命令行里键入 GO 或 CAN，如果你启动的是选项）。如果看到的是命令视窗（Command Window）的提示符（例如，MTF >，AUTO >等），而不是 CODEV>，就表明已经是在选项中了。

宏+（Macro-Plus）指令总是可利用的。当运行宏指令时，它将命令传送到 LDM 或选项，这取决于编程的方式。



1.6 开始，结束和技术支持

1.6.1 安装 CODEV

假设已经正确地安装了 CODEV。如果需要帮助，请阅读 CODEV CD-ROM 中的安装指南。如果安装需要加密狗，要确认它已经在并行口上。如果有问题，请查看下面的“Getting Technical Support”部分。

1.6.2 开始运行 CODEV

为了在一台 PC 机上开始运行 CODEV，可以简单地利用视窗 Star 菜单设置程序快捷键（如果已经有了快捷方式，双击桌面快捷键，）。为了在一个 Sun 工作站上开始运行 CODEV，首先启动由 CODEV 提供的视窗仿真程序器，然后并从那里的 Star 菜单启动 CODEV。

1.6.3 保存文件

如果要保存透镜文件，选择 **File>Save Lens As** 菜单。

如果要保存文本或图形视窗的内容，把它显示在当前视窗中，然后选择 **File>Save Window As** 菜单。

如果要保存已经为 CODEV 选项所输入的设置，敲击选项对话框左下角的 **Option Set** 按钮。显示出 **Option Sets** 对话框。敲击 **Option Sets** 对话框中 **Save As** 键，并且为你输入的设置写入一个说明性的名字。

1.6.4 退出 CODEV

选择 File>Exit 菜单, 退出 CODEV (或者在命令窗口键入 EXIT)。

1.6.5 获得技术支持

虽然通过 F1 键或 Help 菜单总是可以获得在线帮助的, 但是有时候还是希望得到专家的帮忙。可以通过下面几种方式与 ORA 公司联系:

Email: service@opticalres.com

Web: <http://www.opticalres.com>

电话 (美国, 太平洋时间) (626) 795-9101

1.7 手册中的一些假定设置

CODEV 程序有大量的、会影响程序显示和运转的、可自己建立的设置。许多设置主要是出自个人的爱好 (例如, 字体大小), 但是, 如果它们跟这里所假定的设置不一样, 其中某些设置可能会导致混乱。开始使用该手册之前, 建议完成下面的操作。

1. 选择 **Tools>Preference** 菜单。
2. 在 **Preference** 对话框中, 敲击 **General** 键。
3. 如果需要的话, 对下面的两项进行检查和设置 (与这本手册的其它设置没有关系):

- 系统的单位设置成 **Millimeters**。
- 孔径模式设成 **Semi** (显示孔径的半径而不是直径)。

4. 敲击 **UI** 键 (对用户界面的设置, 参看下面的例子)。
5. 如果需要的话, 对下面的两项进行检查并且设置 (与这本手册的其它设置没有关系):

- 在使用设置的情况下, 选择 **Invoke Options Settings First**。
- 在使用 **Wizards** 的情况下, 选择 **New Lens**。

6. 敲击 **OK** 保存这些设置, 并且关闭 **Preference** 对话框。
7. 选择 **Tools>Customize** 菜单。
8. 在 **Customize** 对话框, 敲击 **Format Cell** 键, 确认选择了 **General Format** 键, 并且在 **Precision(#of digits)** 里键入 5。
9. 敲击 **Close** 键, 保存这些设置 并且关闭 **Customize** 对话框。
10. 选择 **Edit>Radius Mode** 菜单, 设置半径/曲率模式。

第二章

数码相机物镜的设计

在这一章,将设计一个与 VGA 分辨率(640×480)相匹配的的定焦距数码相机物镜。根据技术条件,使用 **New Lens Wizard** 确定一个合理的初始结构,然后通过调整,分析和优化该光学系统,最终满足使用要求。通过这个设计实例会让你学会使用 CODE V 软件时所需要的绝大部分基本技巧。

目录

在实践中学习.....	13
关于 New Lens Wizard.....	16
对面形进行操作.....	21

2.1 实践中学习

2.1.1 一个简单的数码相机物镜

现在，数码相机已经非常普遍，最新的百万像素模式的数码相机有清晰度的 CCD 阵列和复杂的光电子学。但是不要担心，那些都不是您使用 CODE V 的第一任务。相反，是让你设计一个相当简单的定焦距数码相机物镜。这仍然需要完成一些光学设计，但是，它是一个比较简单的问题，是一个两片或三片同心透镜，并且是玻璃或者/和塑料折射元件。

在本章你将会学到下面的内容：

- 一个简单物镜的总的设计要求
 - 利用这些信息确定一个初始结构
 - 修改初始设计，满足技术要求
 - 完成基本的分析，将分析结果与技术要求进行比较，确定优化方向
- 在下一章，将利用本章所得到的结果作为初始设计结构完成下面的工作：

- 优化该物镜
- 为了挖掘潜力，用该设计确定可以进一步改进的问题

这些步骤将允许你在光学设计的各个阶段使用 CODE V 的许多特征。随着这些特征的引入，将会对其中的一部分进行解释，在后面的章节中也还会有另外的说明。

2.1.2 设计技术条件

有时候，某人会告诉你一个物镜的技术要求，并且需要把它输入到 CODE V 里，分析它，可能还要优化它。这些都是相当直截了当的。在另外的情况中，一个设计问题可能会来源于一个技术要求，或一组技术要求，要求该物镜必须实现的方式，并且，根据这些技术条件，必须确定一个起始点，

创立一种结构，分析它并优化它。

该数码相机物镜的技术条件是由一位专门制造该类消费产品的 CODE V 用户提供的。问题就是：“如果你希望为 VGA 设计一个低价位，固定焦距的数码相机，那么，应当如何描述它的技术要求？”

2.1.3 定焦距 VGA 数码相机物镜的技术条件

- 由普通光学玻璃或者塑料材料制造的元件数少（1-3 片）
- 图像传感器（基线是 Agilent FDCS-2020）

分辨率	640×480 有效像素
像素尺寸	7.4×7.4 μ m
光敏面	3.55×4.74mm（对角线 6mm）
物镜	
调焦	固定焦距，景深 0.75m~无穷远
焦距	固定焦距，6.0 mm
几何畸变	<4%
F/#	固定孔径，F/3.5
锐度	最佳焦面处的 MTF（中心区域为 CCD 内 3mm）

低频 17lp/mm	>90%(中心)	>85%（边缘）
高频，51LP/mm	>30%（中心）	>25%(边缘)

渐晕	四个拐角处的相对照度>60%
透过率	仅仅对光学镜头而言，>80% 在 400~700nm 波段
红外滤光片	1mm 厚的肖特 IR-638 或 Hoya CM500

2.1.4 该技术条件意味着什么？

首先，这意味着它将是一个相当小的透镜系统。传感器的尺寸和透镜的焦距均为 6mm（大约 1/4 英寸）。根据无穷远物距关系式 $h = f \tan \theta$ 或者

$$\text{像高} = \text{EFL} \times \tan(\text{FOV}/2)$$

传感器的尺寸和有效焦距就决定了物镜的视场角（FOV）。

在这个例子中，像高为 3mm(传感器对角线的一半)，EFL=6mm，可以解出半视场角为 26.5° （因为专利数据库是根据 F/#和半视场角列表的，因此，解出该值是有用的）。已经知道是希望使用少量数目的元件，所以，这就是找到起始点需要的所有信息。

CODE V 具有分析特征，允许对其它技术条件（畸变、MTF、相对照度、透过率）进行评价。根据需要，我们将在以后会介绍这些功能中的大部分，但是，我们马上就来研究锐度这个术语。锐度常常用 MTF 来定义，它将镜头形成图像信息的能力量化成空间频率的函数。最大锐度是 MTF 等于 1.0。最小锐度（也就是没有信息）的 MTF 值是 0。高的空间频率代表了小的细节并且用每毫米线对数来度量。我们将在稍后对 MTF 和其它的评价方法进行更详细的讨论。

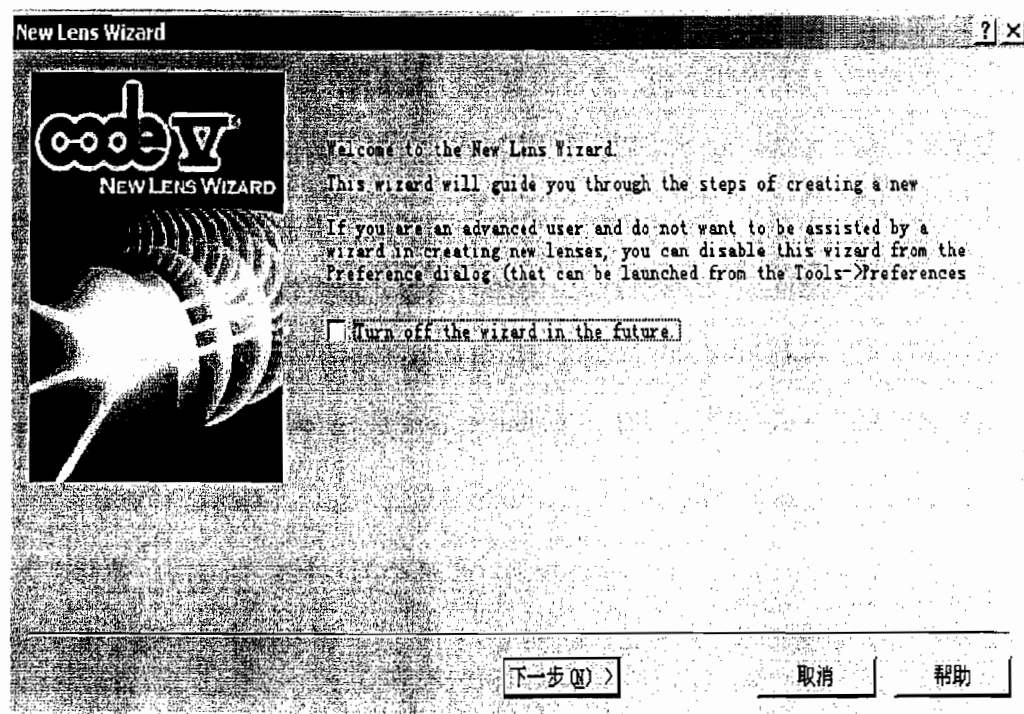
数码相机中使用的 CCD 阵列是由许多很小的，尺寸有限的，被称之为像素的光电元件组成（实际上，每个元件都有三个彩色像素，但是，出于设计考虑，我们认为每个元件是由单一像素组成）。技术条件表明，像素的大小为 $7.4\mu\text{m}^2$ 。按照一条线（对）覆盖两个像素考虑，可以计算出该阵列能够分辨的最大空间频率， $1/(2 \times 0.0074) = 67.6$ 条线（对）/mm。使用该 CCD 阵列，则任何高于该空间频率的图象信息（也就是更精细的细节）将不能分辨。无论如何，光学系统在 CCD 截止频率之外的部分都必须有非零 MTF，所以，一直到 CCD 的截止频率，包括光学物镜和探测器在内的组合系统的 MTF 都将会有一个可使用的对比度。这就是前面一页（原书 19 页）上关于

清晰度技术条件表格中的意义。

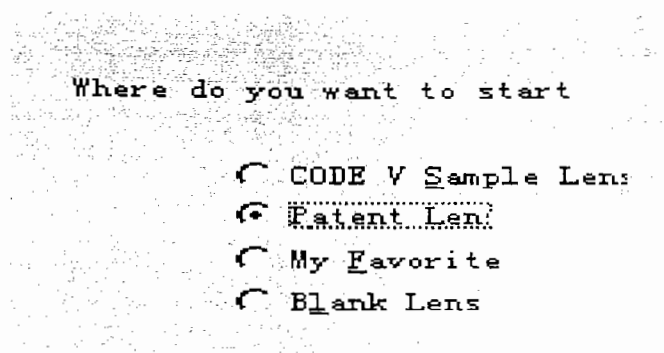
2.2 新镜头的设计 (New Lens Wizard)

2.2.1 开始一个新镜头的设计

New Lens Wizard 是一个从已有的设计 (样机, 专利, 或是您自己保存的比较好的镜头) 中或是从草图开始, 建立新的光学系统模型的工具。它可以帮助用户设置一个合适的起始点, 并确定主要的系统数据, 满足技术要求 (包括瞳孔, 波长, 视场)。现在, 运行 CODE V, 并进入 **New Lens Wizard**:



1. 选择 **File>New** 菜单。
2. 敲击 Welcome 屏幕上的 **Next** 键。
3. 敲击标有 **Patent Lens** 的地方, 然后敲击 **Next** 键。



2.2.2 专利数据库

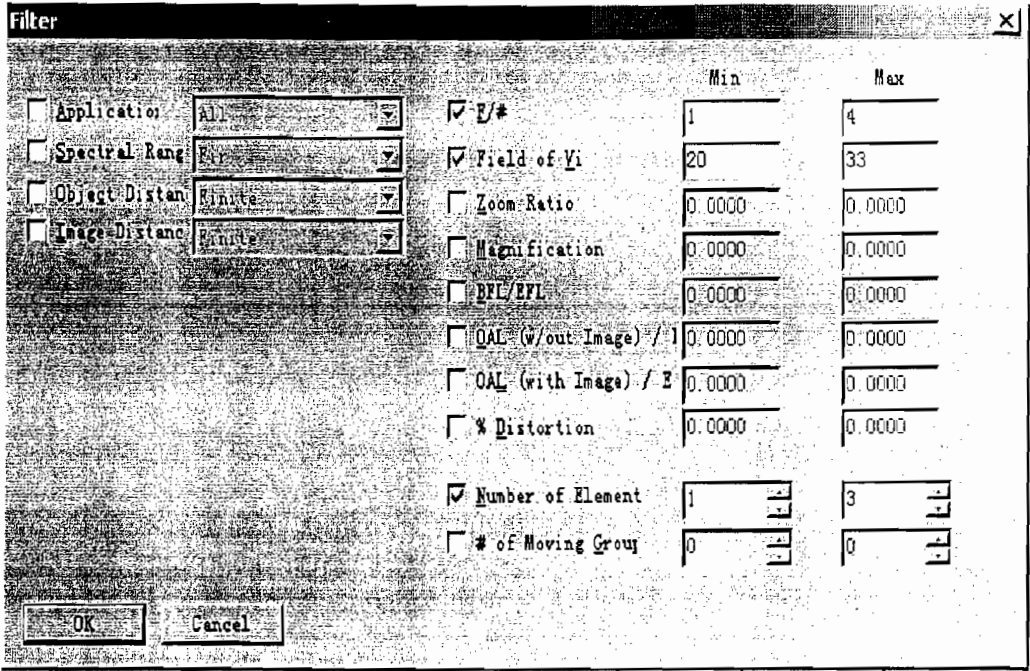
除了程序中演示用的 30 个样品镜头外, CODE V 还包含一个拥有 2400 个过期专利的数据库 (主要是用于不同领域的同心光学系统)。您可以使用 **New Lens Wizard** 或者 **Patent Lens Search** 特征 (**Tools>Patent Lens Search** 菜单), 通过各种属性的过滤器来访问和搜索该数据库。在下面的过程中, 可以继续使用 **New Lens Wizard** 来选择一种专利镜头:

1. 在 **New Lens Wizard** 中敲击 **Filter** 键。

显示 **Filter** 对话框, 缩小起始点的搜索范围。如果是数码相机物镜, 需要一个比较快的 (小的) $F/\#$ 和一个比较大的视场角 (26.5 度的半视场角, 与 CCD 阵列对应的半对角线长度是 3mm)。还要求该物镜的造价比较低, 所以, 透镜中元件的数目要少 (1-3 个)。填写 **Filter** 对话框, 开始搜索。因为经常需要对一个系统稍加修改或者进行优化以满足技术条件, 所以, 适当地扩大搜索范围是一个很好的想法。如果搜索范围过于小, 可能会错过一些很有希望的设计形式。

2. 敲击检查框 (**check boxes**), 为下面的项填入最大/最小值:

- $F/\#$ (输入 1~4), 目标为 3.5
- 视场 (实际上是半视场角, 输入 $20^{\circ} \sim 33^{\circ}$), 目标为 26.5°
- 元件数目 (输入 1~3), 目标是在低成本条件下尽可能地少。

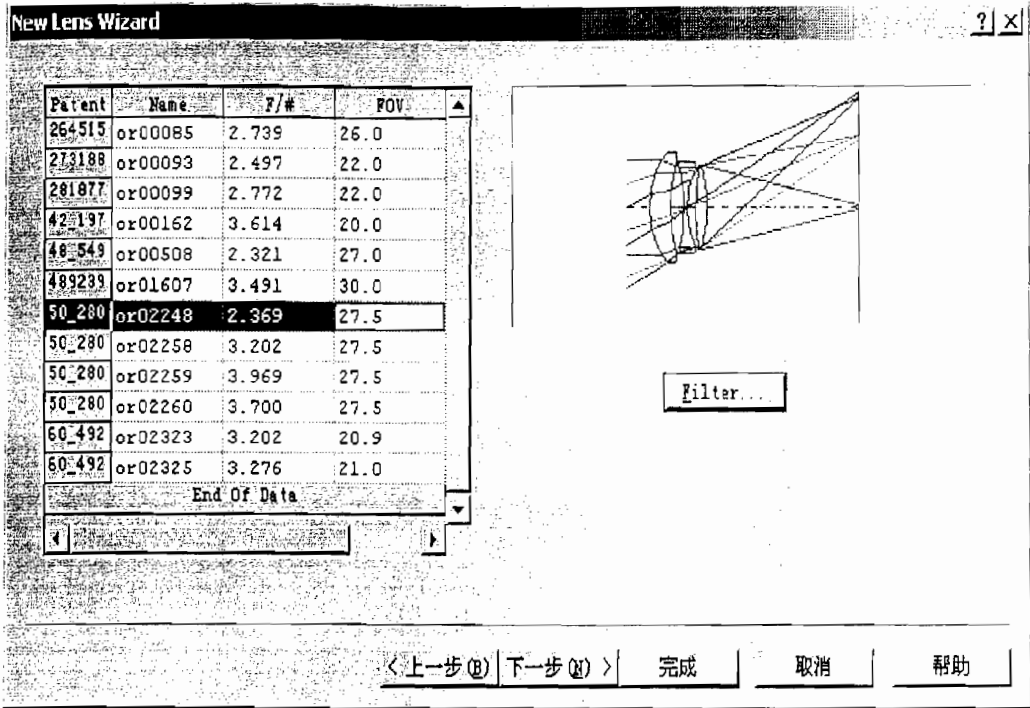


3. 敲击 **OK**。

New Lens Wizard 将返回到专利清单表中，会发现约 12 种专利满足上述要求。

您可以试用几个不同的起始点，但是要注意的是，要扩大视场角是比较困难的，所以，选稍大一点的视场作为起始点比较好。编号为 **or02248** 的物镜看上去比较有帮助—视场是 27.5 度，F 数比我们需要的要快（小）（2.4—这个值比较好，因为一个透镜具有大一点的 F/# 通常会使像质更好）。

4. 敲击专利表中，编号为 **or02248** 的物镜。

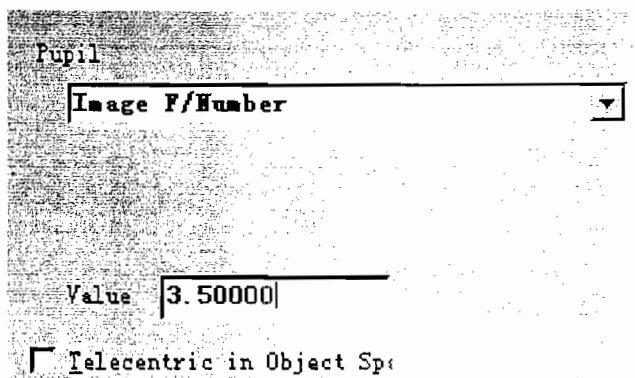


5. 敲击 **Next** 键，进入 **Pupil** 页。

2.2.3 确定系统数据

现在可以通过 **New Lens Wizard** 完成镜头数据的输入。下面的几个屏幕将会需要您回答一些关于如何使用这个镜头，镜头的一些特性等问题，在 **CODE V** 中镜头的特性被称之为系统的数据（**System Data**）。这样做的主要目的是为了获得一个可以进行修改和优化，满足最终技术要求的工作模型。当然，还会需要更进一步的变化。

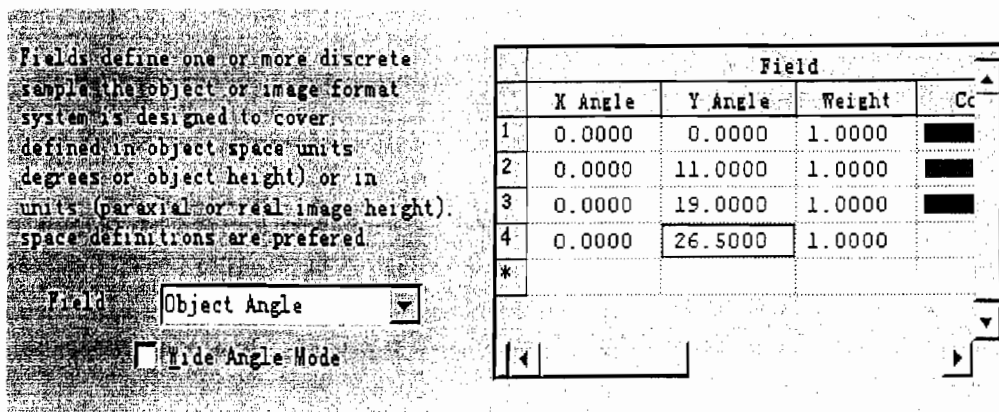
1. 在 **New Lens Wizard** 中，您应该是在 **Pupil** 页。从下拉列表中选择 **Image F/Number**，并输入数值 3.5。F 数 是一个比值，所以，当镜头被缩放时，它没有必要变化（大多数情况下镜头是需要被缩放的）。



● 敲击 **Next** 键进入 **Wavelength** 页，把绿光(589.0)波长的权改变为 2。这将使中心波长在后面的优化过程中占更主要的位置。

● 敲击 **Next** 键，进入 **Reference Wavelength** 页，但是不改变缺省值。这就是用来做近轴和标准光线追迹的波长，**OK** 是缺省值。

● 敲击 **Next** 键，进入 **Field** 页。为了插入一个视场，首先在视场 2 上右击，然后从快捷菜单中选择 **Insert**，并键入 0, 11, 19 和 26.5 四个值作为四个 Y 方向的视场角。



这个镜头的视场角是比较宽的，所以，为了更好地进行优化和分析，比较好的方法就是增加一个中间视场。有代表性的设计是最少要有 0 视场, 0.7 视场和全视场。增加一个中间视场对控制与视场相关的带像差，如像散，是有帮助的。

- 敲击 Next 键，进入 **New Lens Wizard** 的最后一页。
- 敲击 Done 键。

2.3 对透镜表面的设计

2.3.1 透镜数据管理表

CODE V 的基本操作就是光线追迹——在某种程度上，除此以外的每一件事情都是以追迹一条或多条光线，并通过追迹完成一些计算为基础。在大多数系统中，光线是顺序地通过用户所定义的一系列光学表面。这些表面的属性决定了光线如何被追迹。这些数据和系统的数据一起就建立了一个光学系统的模型。

由于表面是光学系统模型的核心，所以，需要花费一些时间来研究总是出现在界面中的透镜数据管理表（LDM）视窗（当您不想看它时，可以改变它的大小或最小化，但是您不能关闭它）。

Lens Data Manager							
Surface #	Surface Name	Surface Type	Y Radius	Thickness	Glass	Refract Mode	Y Semi-Aperture
Object		Sphere	Infinity	Infinity		Refract	
1		Sphere	0.3561	0.1100	786500.501	Refract	0.1949
2		Sphere	0.7012	0.0700		Refract	0.1558
3		Sphere	-0.6597	0.0200	717360.295	Refract	0.1182
Stop		Sphere	0.4168	0.0350		Refract	0.1088
5		Sphere	0.9208	0.0650	834810.429	Refract	0.1243
6		Sphere	-0.5408	0.7743		Refract	0.1341
Image		Sphere	Infinity	-0.0040		Refract	0.4751
End Of Data							

LDM 视窗具有像其它程序中的数据表格一样的特性，可以重新对行或者列确定尺寸，选择单个的格或者一组格，并可以在单元格中输入数据。值得提醒的是，一些单元格变成了灰色，是不接受数据输入的——这些单元格包

含的数据是由程序计算出来的，不能被直接地改变。为了查阅某个单元格的菜单，可以右击任何单元格，包括灰色的格。右击是一个很平常的操作，它可以快速地访问一个单元格的所有信息。

提示:

如果要查看某一个被显示出的数字的全部数值，就将鼠标的指示符停在该数值上不动（不要点击）。如果要改变界面中数值显示中的数字，选择 **Tool>Customize** 菜单进入 **Customize** 对话框中的 **Format Cell** 表（在本手册中，使用的是五位数字的一般格式）。不能单独对单元格进行格式化。

需要提醒的是，在下面的讨论中所关注的 LDM 视窗的缺省显示是针对旋转对称光学系统的。有可能会隐藏一些列（右击最前面的单元格）或者使某个普通的输入形成空格（例如，球面和折射；为了改变这些量，选择 **Tools>Preferences** 菜单，并且进入 **Preferences** 对话框中的 UI 项）。如果是非旋转对称的系统，LDM 视窗将为 X 值或 Y 值增加另外的列。

2.3.2 面形设计的具体内容

任何镜头的建模都是从物面开始，到像面（实际上，它就是最后一个面，因为并不是所有的镜头都会在那里成像，虽然大多数是这样）结束。您可能也注意到总会有一个表面标记有 **Stop**，这个表面就是孔径光阑面。它被定义为限制轴上光线的表面。任何视场的主光线都会通过光阑面的中心（ $x=0, y=0$ ），除非使用 **Chief Ray Aiming**（主光线对准，参考原资料 223 页）属性让这种特征无效（这仅仅在少数非寻常的情况下使用）。

LDM 表中的每一行都有一个 **Surface Number**（表面编号）和 **Surface Name**（表面名称）（尽管并非必须有，但是在比较复杂的系统中是很有用的）。

要选择整个表面（每一个表面被显示在一行里）时，敲击表面编号。紧接着是 **Surface type**（表面类型），它是一个下拉清单（双击它可以显示出一个表面类型表），缺省类型是球面。**Y Radius** 是曲率半径，是曲率的倒数。球面和其它旋转对称的表面都只有一个曲率，用 Y 表示（诸如 Y 超环形表面具有 X, Y 两个曲率）。您也可以选择显示 Y 曲率（半径的倒数，也就是说，单位是 1/mm）。参阅下面的提示。

提示：

通过对 **Edit>Use Radius Mode** 菜单中的项核验（打勾）或不核验（不打勾），来表示在运行中使用曲率半径，还是使用其倒数，曲率。

厚度（Thickness） 被定义为沿当前表面（坐标系）Z 方向（共轴系统的光轴，例如本节举例的系统）测量的、到下一表面的距离。注意到表面 6 的厚度（空气间隔）格显示出是灰色，并且旁边还有一个小 S。这个厚度是通过近轴图象的解（**Paraxial image(PIM) solve**）得到的，保证近轴边缘光线在下一表面上的高度为 0。它设定了近轴像的位置，近似地位于物镜的焦点处。可能这并不是最佳焦面位置，因此，像面的厚度可以用来对 PIM 求解出的值进行离焦（总个像面距离是这两个值之和）。通常用优化来得到最佳的离焦位置（在大多数的光学系统中，建议 PIM 的值和可变化的离焦量一起使用）。

玻璃（Glass） 单元格包含了该表面之后空间的材料名称，如果该单元格是空的，就表示材料为空气。玻璃决定了折射率，而折射率是光线追迹的基本要求。玻璃名字有几种可能的形式，取决于它们是否来自于玻璃制造商，或者为某透镜专门定义的（私人目录“**Private catalog**”），或者被定义为虚拟玻璃（**Fictitious glass**），其折射率是可以在优化过程中变化的，正如

例子中所示（该软件提供了一个宏指令 **glassfit.seq**，帮助您将虚拟玻璃转换成可以买到的真实玻璃）。**Refract Mode** 决定了表面的基本特征，也就是说，在该表面上是折射还是反射（双击该单元格可进行选择）。

最后一列表示的是 **Y Semi-Aperture**（Y 方向的半孔径），代表该透镜表面在光学意义上的有效孔径。如果是一个缺省值，就表示是一个由程序计算出的、所有视场和变焦位置的标准光线都可以通过的、同心圆形孔径。用户可以通过几种方式自定义任何面的通光孔径，最简单的方法就是右击，并选择出现的 **Change to ...** 选项中的一项。现在，可以接受缺省的孔径值，后面还将会学到孔径、瞳孔大小及渐晕因子之间的关系。

2.3.3 改变和提交数据

在 LDM 数据表中修改数据是很简单的——敲击一下非灰色的单元格，并键入新的数值即可。您也可以双击一个单元格来显示和编辑所有的数值（在一些情况下，或者显示选择项的一个列表）。如果您修改错了，可以使用 **Edit>Undo** 菜单来修复（要确保数据表或命令视窗是处于当前的；如果图形视窗或者对话框是处于当前，则 **Undo** 功能是不可用的）。注意，一些单元格中的数值旁边有一个小的符号或者图形，来表明该单元格处于特殊的状态（如：S 代表解出的值，V 代表变量，Z 代表变焦）。

要改变任何单元格的状态（包括灰色的单元格），在其上面右击，可以查看选项快捷菜单（例如，把一个求解状态变为变量状态就会删除该求解值，并允许直接改变该数值，但是，必须要肯定您确实要这么做，因为在这里设置一个求解可能是有原因的）。

在表面数据项上右击菜单中的一种选项是 **Surface Properties**（表面属性）。选取该项时将会打开一个大的视窗，可以直接访问该面形的所有属性，也包括许多没有在 LDM 数据表中出现过的。我们将在稍后一点来讨论面形

属性。

也可以在命令视窗中 **CODEV**> 光标下键入适当的命令来改变 LDM 数据表中的数据。这就需要知道可以使用的命令及其体系（例如：THI S5 2.3 将使表面 5 的厚度改变为 2.3）。当您按照这种方法输入命令并按下回车键时，您将会看到 LDM 数据表或面形属性视窗口的更新。

2.3.4 成功提交

在 CODE V 中，使用术语“提交改变”（Commit Changes）将我们在用户界面（例如数据表单元格或对话框）中输入的数据传送到 CODE V 内部的透镜数据库（有时，也称之为 CODE V 的“后端”）。通常，数据提交是立即进行的，也就是说，就像在其它的单元格、数据区域或视窗口中键入或者敲击时一样迅速。除了还可以在命令视窗中看到相应的命令显示外，和其它的程序，如 Excel，很类似。

然而，还有一些情况，一个命令是由几个数据值构成，这几个数据是放在一个比较小的数据表中的一行内输入（例如，面形属性对话框中的通光孔径）。在这种情况下，只有一行中所有的数据都被输入后数据才能被提交。

有可能被混淆的事情必须用不同类型的视窗来完成。CODE V 中的视窗有两种基本的类型，一种是有 **OK** 和 **Cancel** 键的视窗（称做对话框），另一种视窗则没有这些键（主要的例子是面形属性视窗和系统数据视窗）。只要不敲击 **OK** 键，带有 **OK** 的对话框（包括 **CODE V** 选项，例如 MTF 中的对话框）就不会向后端（或者数据库）提交任何数据。如果您敲击了 **Cancel**，事实上就等于没有任何事情改变。如果是面形属性和系统数据视窗（和一些其它的几个，与 LDM 有关系的视窗），当您在其它视窗中操作时，可以保持它们的打开状态，或者点击视窗右上角的 **X** 来关闭它们。就像在 LDM 数据表一样，这些视窗发生的变化会被立即提交；然而，敲击 **Commit Changes**

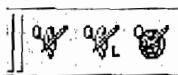
键来确保数据被提交给透镜的数据库。可以在命令视窗中看到数据已经被提交了，并且会显示出为这些操作所生成的命令。

万一改变了您不希望改变的事情，请不要过于担心，总是可以用 **Undo** 功能恢复到透镜的早期状态。无论何时，当您完成了一个有效的变化时，把您的透镜以一个文件的方式保存起来也是一个好办法（**File>Save Lens As** 菜单）。

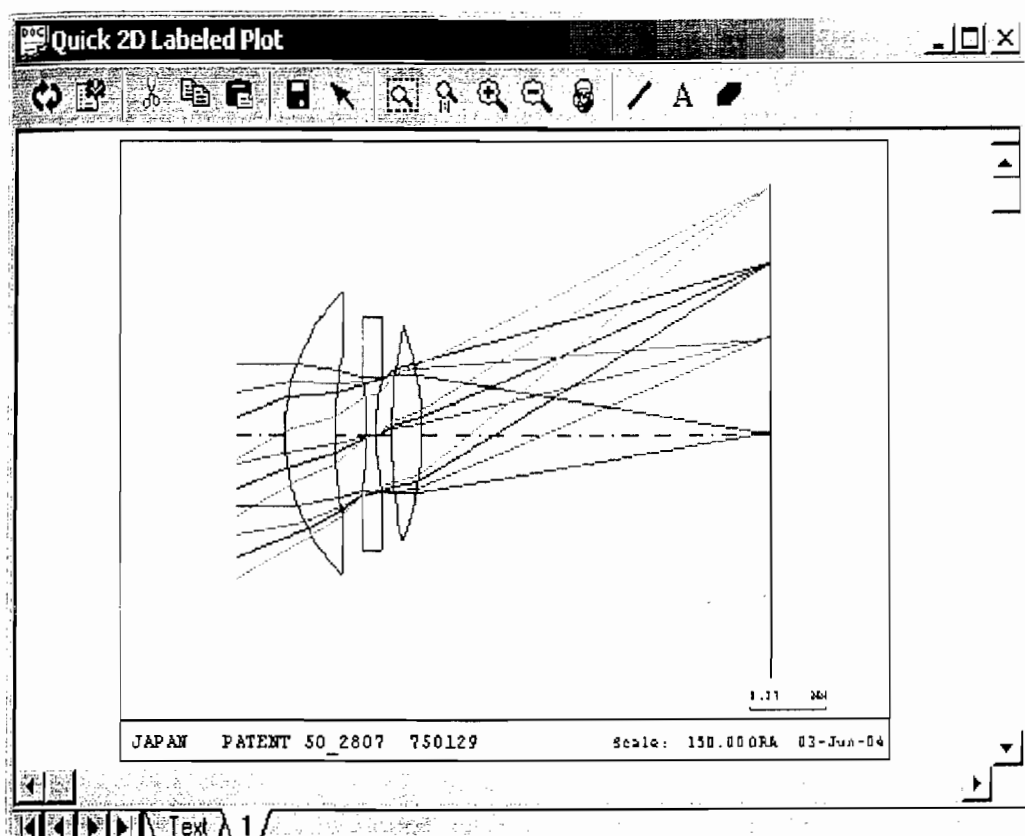
2.3.5 绘图

现在，您已经了解了 LDM 数据表，但是，正如人们常说的，看一幅绘图胜过看一千个数字。所以，只要有可能，画出该透镜的系统图是一个比较好的方法。很多问题都很容易地会在透镜的视图中暴露出来。有几种可以绘制透镜视图的方法，包括非常灵活的 **VIEW** 选项（**Display>View Lens** 菜单），但是现在，有一个比较快捷的方法。

- 敲击工具栏上的图标 **Quick 2D Labeled**:



它是中间的那个图标，包括有一块透镜，一枝铅笔，以及字母 Q（代表快速 Quick）和 L（代表标记 Labeled，将鼠标停在上面，可以看到“Quick 2D-Labeled”的提示信息）。当你工作时，保留该视窗开着（可以按照你的想法改变视窗的大小或移动视窗）。当您做了一些改变时，敲击视窗左上角的“**Execute**”（执行）键重新绘出透镜的视图。



在分析这个镜头之前，您可能更需要把它缩放到所需要的焦距（EFL）。

2.3.6 对透镜进行缩放

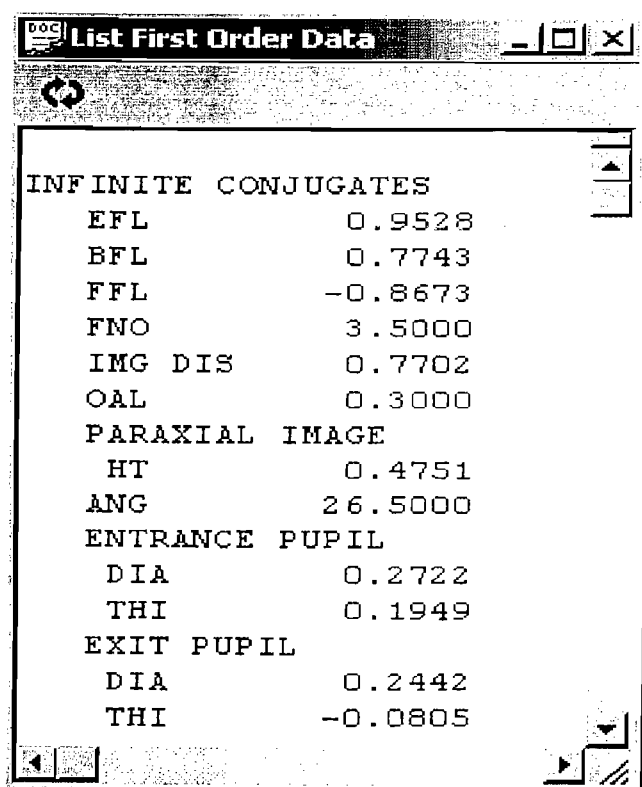
虽然在新镜头设计中设定过您所期望的 F/#数和视场角，但是您需要确保这个镜头的有效焦距为 6mm。完成这项任务的一个方法就是显示一个近轴属性的视窗。

1. 选择 **Display>List Lens Data>First Order Data** 菜单，可以根据需要来放置和放大该视窗。

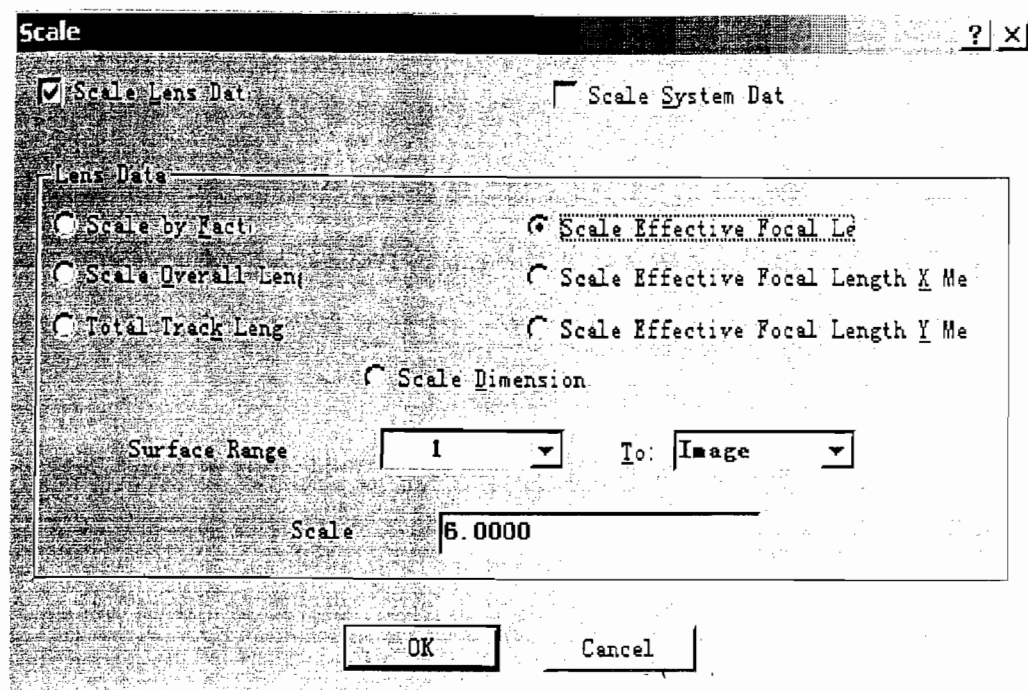
注意该视窗中的 EFL 值（0.9528mm）。不适合于我们的应用，为了满足要求，缩放透镜的数据是一个很正常的方法。

提示:

可以把 EFL 和状态栏中有关透镜的其它各种属性放在 CODE V 主工作空间的下端, 使你能够连续地监控这些属性。选择 **Tools>Customize** 菜单, 敲击 **Customize** 对话框中的 **Status Bar** 标记, 访问这种属性。



2. 在 LDM 数据管理视窗中选择表面 1 至像面 (为了选择这个范围, 在表面#栏中敲击, 并拖至像面)。
3. 选择 **Edit>Scale** 菜单, 打开一个对话框 (注意, 透镜表面的范围是从 1 至像面)。
4. 敲击 **Scale Effective Focal Length** 键, 然后在标有 **Scale Value** 的区域输入数值 6.0。

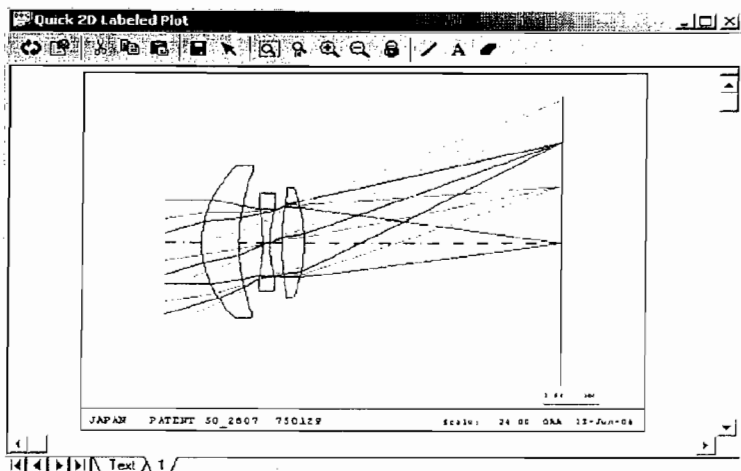


5. 敲击 **OK** 缩放透镜。

6. 在 **List First Order Data** 视窗中敲击重新计算键  来刷新原来的内容。

注意，现在的 EFL 值就是所期望的 6.0mm。还会注意到，近轴像是 2.99mm 和（非常接近期望值 3mm）。

7. 在 **Quick 2D Labeled Plot** 视窗中敲击重新计算键来刷新视图，如下所示：



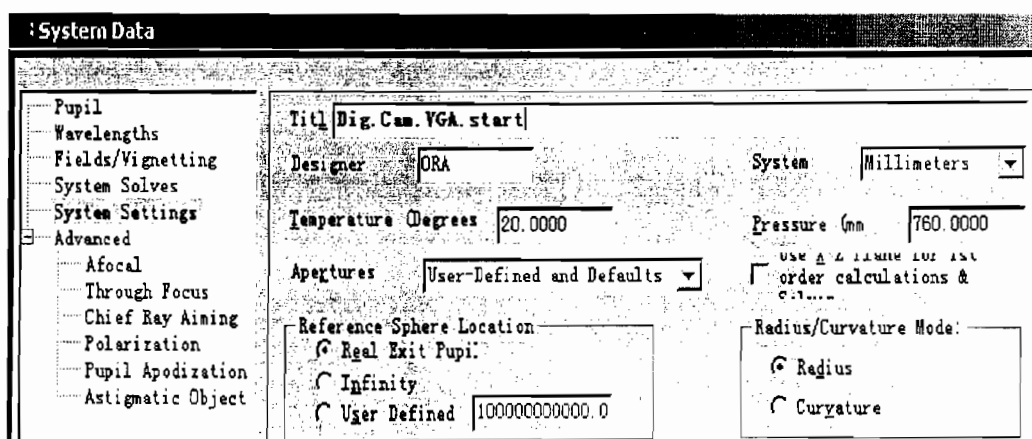
2.3.7 新标题和开始“保存镜头”

迄今为止，一切都很好，但是，在向下继续进行之前，你应该为你所完成的工作做一个标记并加以保存。注意，这是一个过期的专利，它将要被优化而发生变化，可以给新镜头一个标题名，并作为起始点保存。

- 选择 **Lens>System Data** 菜单，并敲击系统数据视窗中目录树（Navigation Tree）内的 **System Settings**

系统的数据被放在下述的区域中，在该区域，可以察看和修改大部分与面形无关的数据。基本的系统数据（瞳孔、波长、试场）在新镜头初始设计中已经被确定，但是您仍然可以通过系统数据对话框来察看和修改这些属性和其它许多性质。

- 选取 **Title** 区，并把它修改成类似于 **Dig Cam. VGA: start** 样式(您最多可以输入 80 个字符，但是不包括引用语或省略字符)。为了把该数据提交给 CODE V 的透镜数据库，敲击（或者跳到）在另外的区域。



- 选择 **File>Save Lens As** 菜单，并键入一个文件名，例如 **Dig Cam Start. len**，然后，敲击 **Save**。

2.4 分析起始数据

CODE V 中有许多类型的分析,但是只需要几种分析就可以确定透镜是否满足技术要求。这些分析结果也有助于对优化的设置(如果需要的话)。

- 近轴要求(在完成焦距缩放后进行,正如在(原文)29 页上“Surface Operation (面形设计)”中详细的叙述:对透镜进行缩放;缩放后的镜头具有正确的近轴焦距和像高)。

- 畸变(场曲和/或者畸变网格)。

- 锐度(衍射 MTF—通过分析不同物距时的 MTF 也可以确定焦深)

- 渐晕/照度(透过率分析)

另外,你也可以对标准光线使用一对快速分析属性(点列图和光线像差曲线)。现在,我们来解释这些分析选项的基础。更多的信息,包括评价属性,将在后面的章节中论述。由于没有完全符合技术条件的分析要求,在初始设计阶段还有一件事需要做:确定可行性。

假设某人最终要加工这个透镜,就会存在一些实际的问题。为了使加工容易,零件小些或者是大些?实际生产时,是薄些或是厚些?它们容易被组合和安装吗?有这种玻璃吗?便宜吗?这些基本的问题都是需要根据基本的镜头数据和已有的经验(您可能需要做一些计算或是请教那些已经设计过或是制造过类似光学系统的人)进行回答的问题。

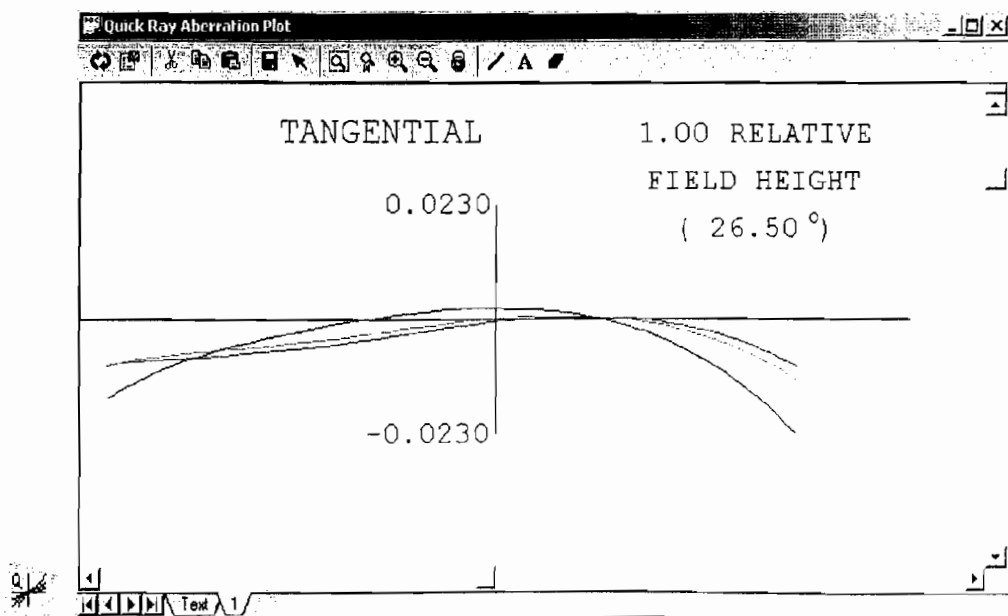
还有一些技术上更为复杂的可行性问题。一个就是公差分析,稍后些介绍。这个问题关系到这些零件必须以什么样的精度被加工和装配,才能够保证其光学质量。另外一个,但不包括在此的问题,就是热分析(虽然,在这个问题的某些方面,CODE V 可以帮助我们,例如,由于温度的变化导致性能变化)。

2.4.1 快速绘制像差曲线

为了查看有可能出现问题的视图，（绘制）一条光线像差曲线是检查光线追迹出的数据的有效方法。光线的横向像差是同一视场点发出的一条实际的光线与主光线在像面上的距离的度量。（如果是一个理想的透镜，对从同一视场点出射的所有光线的追迹，横向象差都是零）。对于一组即使是空间光线来说（一个光线扇），横向象差曲线都是以光线在光阑或瞳孔中位置的函数来绘制的。

首先研究的比较大的偏离，包括不同波长的曲线之间的间隔（色差）。也可以研究彗差、像散和其它基本像差的曲线。经验告诉您这些像差来源自何处，建议您在何处进行校正，加入元件或者非球面的可能形式。

快速像差曲线绘图是一种单击形式，敲击上面显示的快速像差曲线工具栏就可以运行（对于一般的情况，选择 **Analysis>Diagnostics>Ray Aberration Curve** 菜单，选项的名字：边缘光线是 **RIM**）。快速版本实际上是由宏指令来完成，并且实现自动缩放（它也以文本的形式提供一个像差列表，是由 **ANA** 选项产生的）。注意，下面的图形是在快速像差曲线绘图视窗中对最大视场角变焦和定位后才被显示出的。



起始设计没有要求总的像差的符号，在此，你也仅仅是了解了比例尺，并且知道哪种像差大。在这里，自动缩放比例尺为 0.023mm ，或者 $23\text{ }\mu\text{m}$ 。为了比较，艾利斑的直径（理想镜头的衍射光斑尺寸）是 $2.44 \times (\text{波长}) \times (F/\#)$ ，或者说，大约为 0.004mm ，该透镜的 $F\#$ 数是 3.5。这个镜头没有达到衍射极限（您也不应当希望它能够达到衍射极限），但是，它的像差要小于六倍艾利斑。

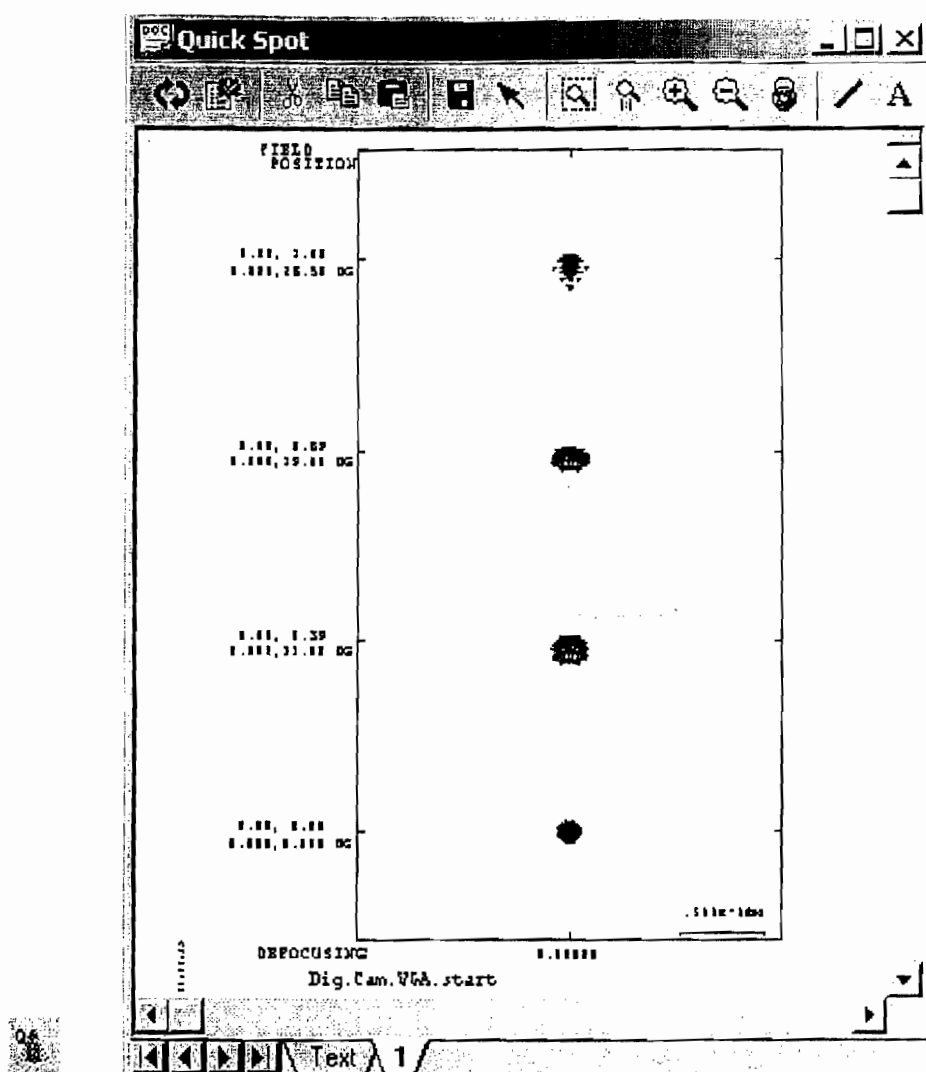
提示：

可以使用绘图变焦工具来改变图形的显示比例值。自动确定比例尺可以使一块透镜看上去比较舒服，但是，比例尺的数值会是比较大。

2.4.2 快速绘制点列图

一个点列图并不是技术条件所需要的一部分，但是，它可以被用来对该透镜的成像质量图给出一种快捷和容易的分析。基本程序如下，将入瞳分成一个矩形网格，每个视场发出的许多条光线都通过该系统进行追迹。光线在象面上的位置散布图被绘出，每个视场一个点列图，用不同的颜色代表不同的波长，给出一种有色差的印象。为了使光斑与绘图区的比例相一致，则绘图比例尺会自动地被设置，所以，在做任何分析绘图时，都必须检查一下比例尺的大小。

要运行该项，敲击快速绘制点列图键（一般情况：**Analysis>Geometrical>Spot Diagram**，选项的名字是 **SPOT**）。对于该透镜来说，所有视场的光斑尺寸大致都一样，尽管形状各不相同。比例尺是 0.050mm ，或者 $50\text{ }\mu\text{m}$ 。



提示:

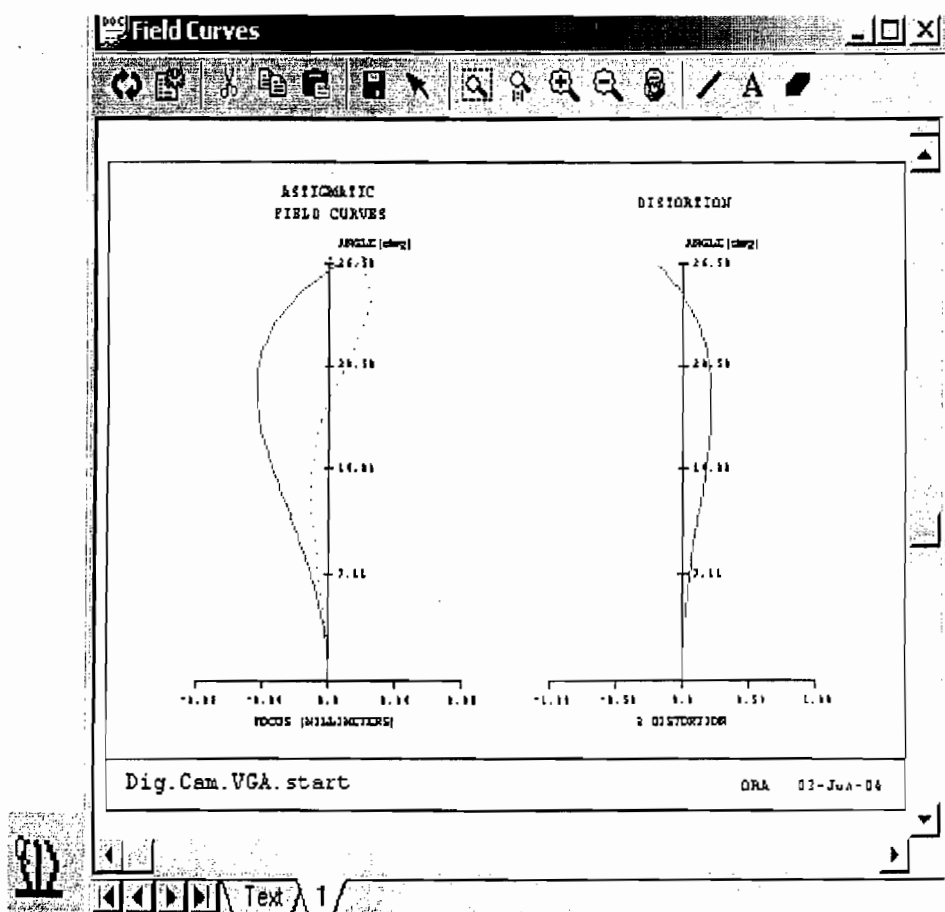
系统提供的宏指令 **spotdet.seq** 可以用叠加的圆或者矩形来绘制点列图，圆或者矩形代表一种指定的探测器尺寸或者艾利斑。选择 **Tools>Macro** 菜单，并且在 **Sample Macros/Geometrical Analysis** 下设置宏指令。注意，为了运行该宏指令，必须输入所需要的数据。

2.4.3 畸变

近轴像高和视场角有下列关系， $h=f \times \tan \theta$ 。如果真正的像高和近轴像

高不一致, 就会存在畸变。所以, 畸变是一种与视场相关的像差, 并且经常和另外一种与视场相关的像差—像散, 一起被显示为一条曲线。选择 **Analysis>Diagnostics>Field Curves** 菜单, 或是敲击工具栏中的快速视场绘图键, 就可以绘制这些与视场有关的曲线。

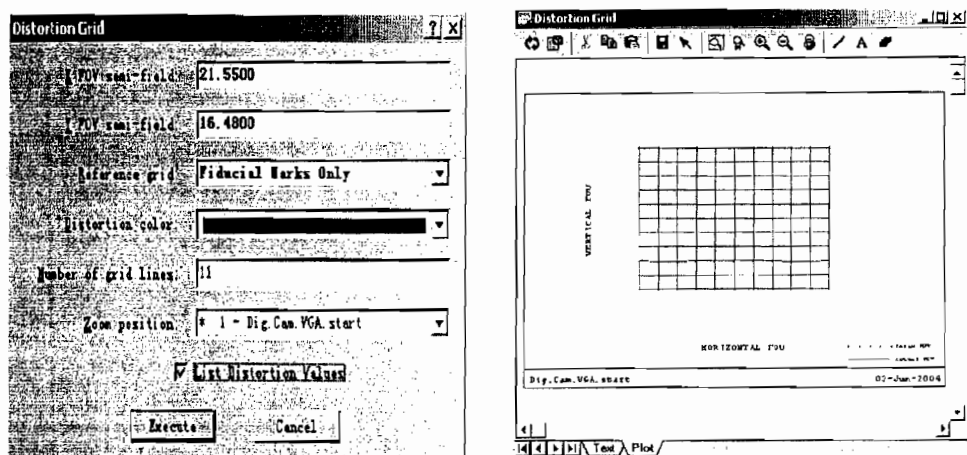
畸变曲线的纵坐标是视场角, 横坐标是百分数表示的相对畸变。它表示该镜头的畸变是在技术条件要求的 4% 以内。事实上, 在整个视场中都小于 $\pm 1\%$ 。像散 (下面视窗的左侧图形) 在全视场校正的很好, 但是, 在中间视场还有剩余畸变。



畸变网格是另一种研究畸变的方法, 这种方法可能更直观。如果是这样, 就会看到一个理想 (近轴) 成像的矩形的网格, 并用畸变后的网格迭加在其

上。由于该镜头的视场被定义为角度，所以，需要将 CCD 的水平和垂直尺寸按公式 $h=f \times \tan \theta$ 换算成视场角（我们用 3mm 的对角线尺寸确定定义最大的视场角，但是，在这里，我们希望看到实际格式的视场）。根据技术条件，探测器的尺寸是 3.55mm×4.74mm。将它们除以 2 倍焦距，然后，取它的反正切值就可以得到最大的 Y 方向和 X 方向的视场角（ 16.48° 和 21.55° ）。

1. 选择 **Analysis>Diagnostics>Distortion Grid** 菜单。
2. 在 **X FOV Semi-field** 中输入数值 21.55，在 **Y FOV Semi-field** 中输入数值 16.48。对于标准网格，还要选择 **Fiducial Marks Only**，并敲击 **Execute**。



这个畸变非常小，所以，为了看清它，需要对图形变焦。准标表示近轴光线的位置。看上去，小畸变的图形会有点儿混乱。

2.4.4 MTF（清晰度）

对于任何类型的相机，用户所关心的是它的成像质量，例如清晰度或分辨率。光学设计者把成像质量与 MTF 或调制传递函数相联系。从本质上说，调制就是相对对比度，用 1.0 代表理想的对比度（全黑和全白，没有中间灰

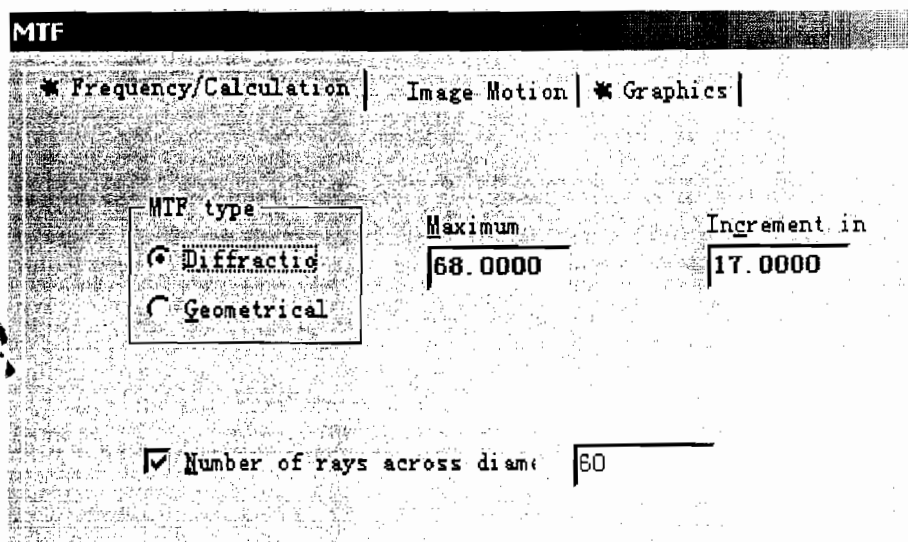
色)。对于大空间的对比条纹(低的空间频率),即使一个很差的镜头也具有好的对比度,但是,对于高空间频率(比较小的细节),像差和衍射会使亮暗条纹相互调和。如果希望确定,并绘出各个视场,各种空间频率范围内的MTF,可以以一种非常紧凑的形式来定义一个透镜的清晰度。

1. 选择 **Analysis>Diffraction>MTF** 菜单。

注意,有一个 **Quick MTF** 键,但是,我们需要输入特定的空间频率,然而,快捷版本不支持这些。

2. 在 **Frequency/Calculation** 列表中, **Maximum frequency** (最大频率) 栏内输入 68, **Increment in frequency** (频率增量)。

注意,当您改变列表中的一个值时,在该列表标题的旁边会显示出一个红色的星号* (称为改变指示器)。

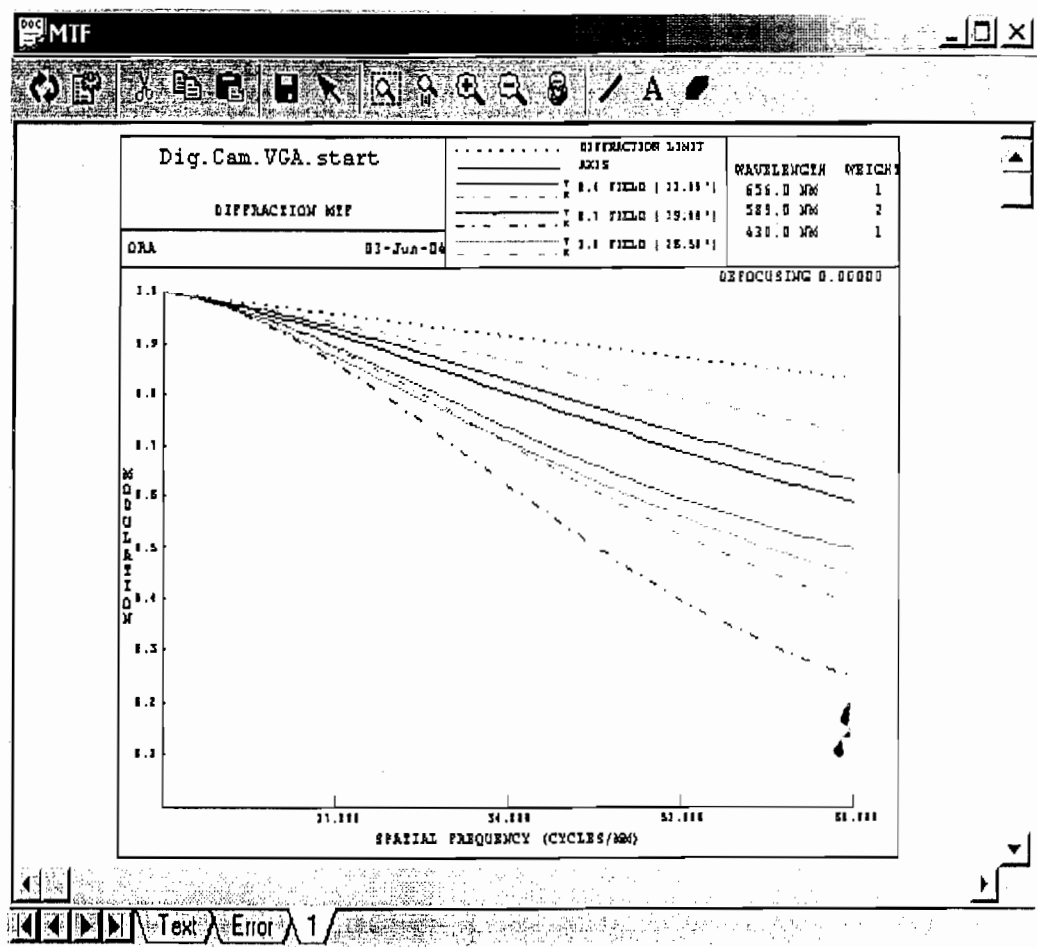


3. 在 **Graphics** 列表中, **Maximum Plot frequency** 栏内输入 68, 并敲击 **OK**。

CCD 阵列的最大空间分辨频率大约是 67 条线/毫米,混合使用 17 和 68 (4×17) 条线就可以很好地完成这项分析工作。

提示:

您可以使用绘图视窗中画图和写字工具增添一些注释信息,帮助您阅读和解释该视图。如果你重新计算该曲线,那么,上述的视图就会消失,但是,如果您要把注释后的图形保存下来,可以选择 **File>Save Windows As** 菜单。



看起来,初始选择的透镜具有一个很好的 MTF,满足所有视场和方位 (MTF 会随着不同的方向而变化,所以,要计算两个正交方向,就是弧矢和子午方向上的 MTF) 上对低频和高频清晰度的要求。

在 MTF=0.25 处,使用画图工具手工地增添一条水平线。注意,我们还

没有考虑景深的问题，因为它要求该透镜应满足物距为 750mm 和当前“无穷远”值（1.0E10mm）时的 MTF 技术条件。关于这些问题将放在第三章中讨论优化内容时阐述。

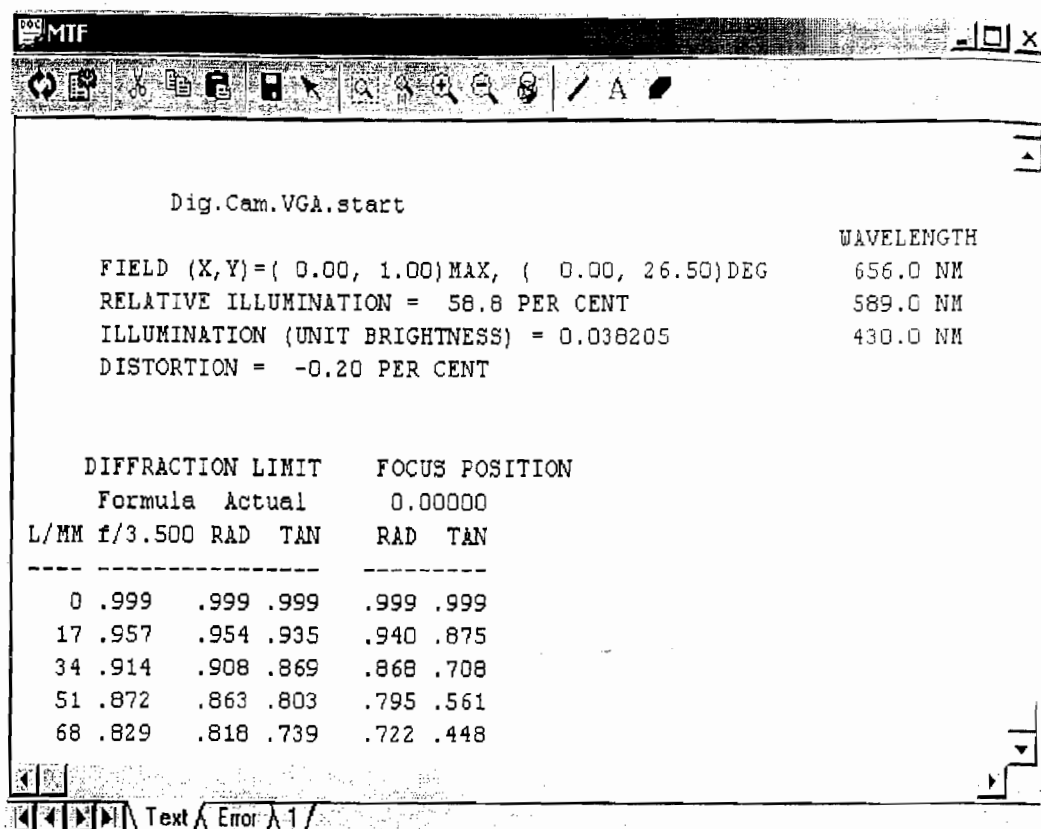
2.4.5 渐晕/照明

技术条件要求方形视场拐角处（就是系统数据里的全视场）的相对照度最小是 60%。这就包含了渐晕的影响（孔径光阑面以外的其它表面的孔径对轴外光线的拦截）和角度的影响（余弦的四次方是众所周知的、将照度与角度联系起来的近似表达式）。该程序对瞳孔大小（或 F/#），表面孔径，和所谓的渐晕因子之间的关系建立了模型。

为此使用的系统是一个很灵活，但是，稍为有点复杂的系统，并且将放在第十章中更为详细地解释。这里是比较简明的文本。渐晕因子决定了标准光线，因此，又决定了缺省的孔径。这些也决定了参与 MTF 或其它的计算所使用的光线。从设计的目的出发，可以直接改变渐晕因子来扩展或压缩轴外视场的光锥，缺省的孔径也随之被调整。在该专利中，全视场在 Y 方向最上面和最下面的渐晕分别为 0.21 和 0.11。这将会对相对照度产生何种影响呢？

有两种研究方法，其中一种方法已经在使用。

- 敲击上一节里建立的 MTF 输出视窗中的 **Text** 页，向下滚动最大视场（0.0,26.5 度）的输出表。



注意，除了列表给出每个视场的 MTF 数据以外，还有另外的信息。在此，相对照度就特别有用，是 58.4%，比技术条件所要求的 60% 稍低了一点（注意， 26.5° 的 $\cos$ 四次方的值是 0.64）。如果试图提高这个值，可以使用渐晕因子（在 **System Data** 视窗的 **Fields/Vignetting** 页上寻找），但是，由于该值已经和技术条件比较接近了，也可以使用这个渐晕结果，看一看是否在优化过程中能够提高一些。

另外一个可以查看照度的地方是 **Transmission Analysis** 选项（**Analysis>system** 菜单），可以提供更详细的照度数据，如果需要，还包括镀膜的影响。CODE V 假设每个玻璃表面都镀了 $1/4\lambda$ 的减反膜，除非您删除这些镀膜或者是使用一种用户自定义的膜层。

2.4.6 确定可行性

根据一些技术要求简单地找到一个过期的专利，并把它进行缩放，表面看起来，这个物镜很不错了。万事大吉了吗？没有，零件的大小和厚度还没有考虑。虽然加工和装配很小的透镜零件是有可能的，但是，与孔径相比，这些零件实在是太薄了。

原始专利的焦距大约是 1mm，很可能是出于专利的目的被缩小成了单位焦距（它可能是一个比较大的、用于 35mm 胶片的物镜，与这个视场角相对应的焦距是 43mm）。在 EFL=6 时，中间（负）透镜的直径为 1.5mm，而厚度只有 0.126mm，仅仅是 126 μm （在有效焦距是 43mm 时，这个零件的厚度更合理，是 0.9mm）。为了给您一个直观的印象，下面就是一张该透镜接近实际比例的视图：



为了加工和安装这种尺寸的光学零件，应当要求合理的中心厚度和边缘厚度，恐怕，中心厚度是 0.9mm，边缘厚度是 0.8mm。这就意味着，尽管这个设计看上去相当不错，但是，您的任务还没有完成。还需要利用约束优化（自动设计或 **AUTO** 选项）来重新设计该透镜，使它满足所有的要求。

至少有另一个实际性的问题，就是玻璃的选择。专利中的三种虚拟玻璃都具有高的折射率（1.786，1.717，1.835）。太高或太低折射率（如 >1.65 或 <1.45 ）的玻璃都比较少见，因此，比中等折射率的玻璃要贵许多。可以利用 **glassfit.seq** 宏指令将这些玻璃转换成最接近的、等效的实际玻璃（选择 **Tools>Macro** 菜单，运行 **glassfit.seq**，在 **Micro** 对话框中 **Sample Macros/Material Information** 下搜寻）。这个宏指令在 **Command** 视窗中交互运行（问答形式）。选择 Schott 玻璃和下述的自动替换，将会得到下面的

结果:

Schott		0	preferred glass					
		1	Standard Glass					
		2	Inquiry Glass					
Surf	Catalog Glass	Delta Nd	Delta Vd	Avail	Price	DPF	Bubl	Stain
1	Schott LAFN28	0.01336	0.5317	1	315.00	-75	0	1
3	Schott SF1	0.00000	-0.0129	0	36.50	0	1	1
5	Schott NLASF41	-0.00020	-0.2291	2	0.00	-79	1	0

注意, 只有 SF1 是“首选”的(普通)玻璃, NLASF41 是“查询”玻璃(特种材料)。LAFN28 玻璃列出的价格为\$315/磅(\$693/Kg), 是最普通光学玻璃 BK7 价格的 19 倍。这些对于一个低成本的数码相机来说并不是最好的选择, 尽管这些元件都很小(注意, 可以用 **COST** 选项确定玻璃的重量和估价; 选择 **Analysis>Fabrication Support>Cost Analysis** 菜单)。一定要明白, 应当将玻璃的选择约束到玻璃三角形中一个低折射率和便宜的区域内。这种愿望可以在 **AUTO** 中完成。

2.5 结论

作为总结, 在本章中, 您已经学到了下面的内容:

- 解释了要设计一个数码相机物镜应当满足的技术条件。
- 使用 **New Lens Wizard**, 从过期专利的数据库中设置一个合适的起始点。
- 对透镜进行缩放, 满足使用条件。
- 分析起始点, 确定优化的策略。

如果您还没有保存设计结果，现在，就请您先保存它，在这本手册以后的章节中还会用到它。选择 **File>Save Lens As** 菜单，并给该透镜的文件加注一个名字，例如 **DigCamStart.len**。在下一章中，将使用这个起始点优化出一个既具有良好的光学性能，又适合于加工的光学透镜。

第三章 优化设计

在这一章，将学习如何优化上一章中所建立的数码相机物镜。优化将包括设置变量，确定和定义限制条件，以及分析优化结果。一些先进的优化方法也要讨论，其中包括全局综合法。

目录

概述.....	45
操作规则.....	47
变量.....	47
自动设计的设置.....	50
AUTO 的输出.....	57
结果分析和调整权重.....	62
最终优化和注意事项.....	64
塑料，私人样品目录和非球面.....	68
全局综合法和其它的 AUTO 特性.....	68
限制条件：问题和解决方案.....	68

3.1 概述

3.1.1 优化的目的

优化的目的是为了设计和制造出成像质量可能是最好的光学系统，同时也满足事先给定的一组物理的和其它的限制条件。术语“最好”是用一个误差函数来计量，误差函数把图像的误差数据都组合成一个单一的数字，并力图使该数字尽可能的小。虽然，各种控制和权重可以比较容易地和大量地进行修改，但是，在 CODE V 的基本结构中已经预先定义了误差函数。甚至有可能用一个完全是用户自定义的误差函数来代替该误差函数，当然，这样做的难度会更大，事实上几乎也没有什么必要。

3.1.2 优化方法

CODE V 的优化属性称为自动设计，缩写为 AUTO。AUTO 使用一种加速阻尼二乘法 (DLS) 算法使可以改变系统成像质量的变量发生变化。约束要求对搜索最佳解设置边界条件。如果需要，AUTO 会使用 Lagrangian (拉格朗日) 乘数强行加入约束条件。这就可以对约束条件进行精确的控制，而不要求限制条件被包括在误差函数本身中，通常会在限定的求解区域内比较快和比较平稳地收敛到一个最优化的解。

3.1.3 缺省

内嵌在 AUTO 里面的缺省值可以让设计者在无需注意误差函数结构细节，和以最少的输入要求使用 AUTO。同时，对于后面设计阶段进行的一些特殊设计或者精细调整来说，如果需要，很多可选择的控制、权重、约束等都会使设计者有更大的灵活性。

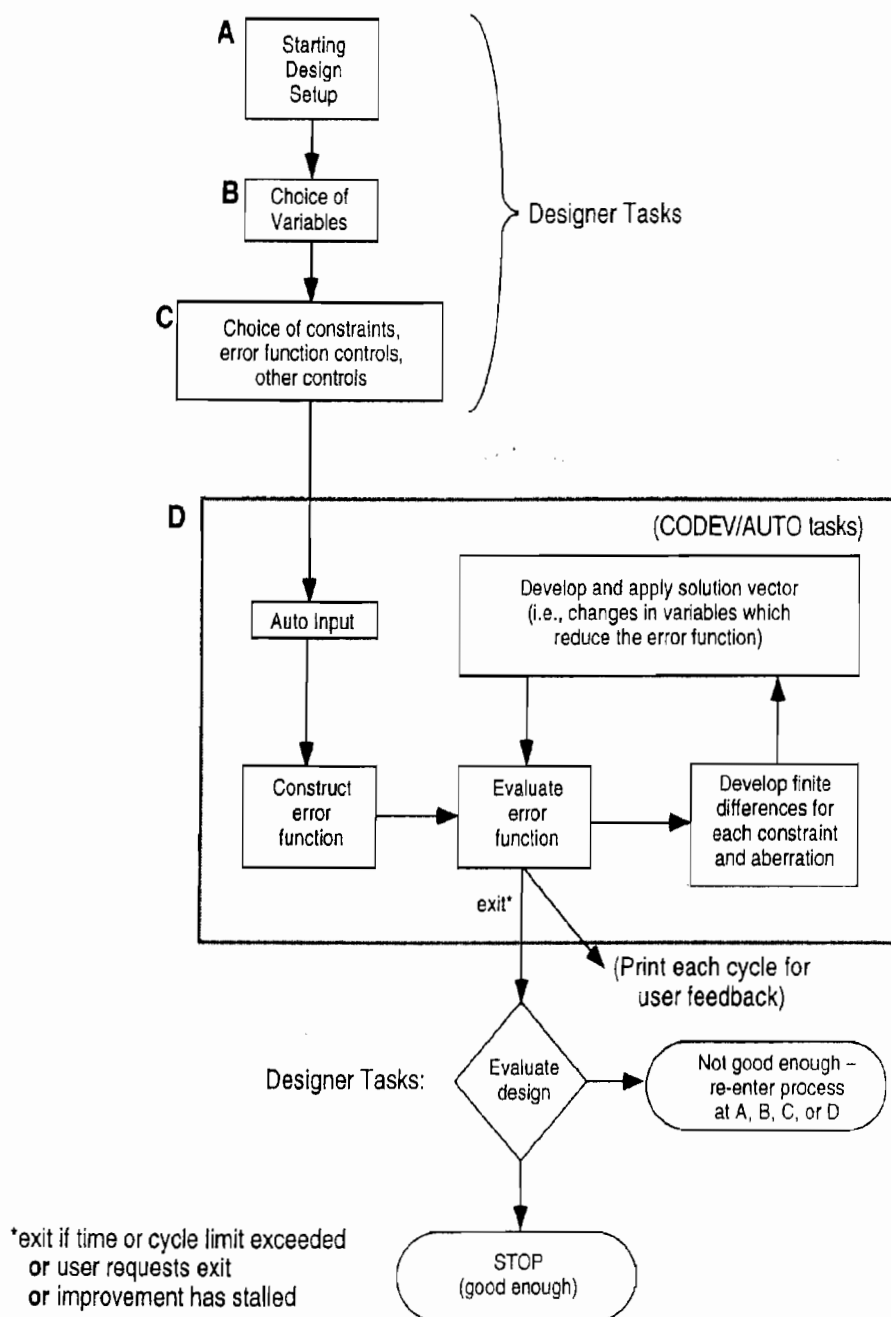
3.1.4 AUTO (自动优化) 过程

虽然，您可以把 AUTO 作为一个黑匣子，并且，得到设计结果，但是，或许对其内在流程感兴趣。下面的框图表示了设计过程的一般流程，包含 AUTO 管理的部分。随着我们设置，并且运行一个例子，各个步骤的含义会更明白。

在线 CODE V *Reference Manual* 的第三章详细地叙述了自动设计；标题为“Discussion of Input and Computations” (原文 P352) 一节特别有助于理解 AUTO 的工作原理和过程。

3.1.5 自动设计过程

Automatic Design Process



3.1.6 局部优化和全局优化

如果把误差函数想象为一个有多座山峰和山谷组成的空间,那么优化的目标就是要找到有可能是最低的山谷。在局部优化中,将会找到距起始点最近的山谷。全局优化会在搜寻最深的山谷过程中从起始点向更远处探测山谷,或者称为全局最佳。CODE V 的全局综合 (GS) (Global Synthesis) 是一个极好的全局优化属性,它可以从任何一个实际的起始点得到多个解。

3.2 操作规则

在这一章,看上去似乎有很多步骤,但是,实际上就有几步,加上一些说明性的内容。为了使设计者既看到森林,也看到树木,这里概括性地论述优化一个透镜所需要的程序规则。除了变量是在 LDM 中确定,分析检查是在 MTF 和 FIELD 选项中完成外,在此叙述的步骤都将在 **Automatic Design** 选项对话框中执行 (**Optimization** 菜单):

- 把所有曲率半径、厚度和虚拟玻璃都设为变量,然后,保存修改过的起始点。
- 确保所有的玻璃元件都有足够的厚度 (**General Constraints** 列表)。
- 确保所有玻璃的折射率不会太高 (**General Constraints** 列表)
- 限制有效焦距 (EFL) 等于目前的 6mm (**Specific Constraints** 列表)
- 在每一次优化循环后都绘出透镜视图 (**Output Control** 列表)
- 使用缺省的光斑尺寸 (光线的横向像差) 误差函数,但是在网格中追迹更多的光线 (**Error Function Definitions and Controls** 列表)
- 通过再次运行前面使用的评价准则来分析透镜 (敲击上一章视窗的最新资料,主要是 **VIEW**,**MTF** 和 **FIELD** 选项)
- 修改 **AUTO** 设置,改善优化结果 (**Error Function Weights** 列表现在,开始详细阐述!

3.3 变量

3.3.1 定义变量

优化透镜时,需要告诉 CODE V 哪些透镜参数是自由变量。这些变量在 LDM 中被定义,并且,在以文件的形式保存透镜时,与透镜数据一起被保存。决定什么参数可以变化并不总是一件简单的事情,但是,在共轴系统中,最常见的变量就是所有玻璃表面的曲率 (但是,不包括像面的曲率,因为通常是希望有一个平面胶片或探测器表面),所有的空气间隔,和正玻璃透镜的厚度 (为了保证透镜的边缘有足够的厚度,无需对曲率限制太多)。玻璃通常也被设置为可变 (折射率和色散)。这就要求在 CODE V 中使用一个特定的可变化的“虚拟玻璃”形式,因为目录上玻璃的属性都是固定不变的,不能够直接变化。

3.3.2 使用 LDM

变量在 LDM 中被确定。默认状态下,所有的量在一开始时都是被冻结的。为了改变一个半径或者厚度,在 **Lens Data Manager** 视窗中将光标移到该参数上面,右击,并从快捷菜单中选择 **Vary**。一个小 V 符号紧靠着这个参数会出现一个小的符号 V,表明它是一个变量。如果某个变量设置错了,为了删除 V,就在该参数上右击,并且从快捷菜单上选择 **Freeze**。也可以对一个或者多个类型选择多个值,并且,通过右击 **Vary** 一次将所有选出的值改变为变量。

如果没有打开文件,那么,需要从上一章就打开或者建立 6mm,F/3.5 数码相机物镜的开始点。

1. 选择 **File>Open** 菜单,找出上一章中所建立的数码相机物镜的文件 (DigCamStart.len 或者是您所命名的别的名字),然后,敲击 **OK**。

如果您保存过一个透镜,并且,后来从 **File** 菜单打开过,那么,当透镜文件被打开时,在存储时被打开的分析视窗会被恢复。注意,如果您是命令视窗中使用 **RES** (恢复) 命令打开透镜文件的话,这些将不会发生。如果是这种情况,无需变化其它的视窗,该透镜就被恢复。

2. 在 LDM 数据列表中,拖曳选择表面 1 至表面 6 的 **Y Radius** 的值。

3. 右击一个选中的单元格,并且选取 **Vary**, 如下所示:

Surface Type	Y Radius	Thickness	Glass	Refract Mor
Sphere	Infinity	Infinity		Refract
Sphere	2.2422	0.6927	786500.501	Refract
Sphere	4.4153			Refract
Sphere	-4.1545	Copy	295	Refract
Sphere	2.6249	Paste		Refract
Sphere	5.7984	Vary	429	Refract
Sphere	-3.4054	Freeze		Refract
Sphere	Infinity	Surface Properties...		Refract
End Of Data				

4. 对于厚度,重复同样的操作 (表面 1 至表面 5 选择厚度,并设为变量,然后,选取像面厚度,并单独变化它;没有包含表面 6,因为这将会删除该表面的 PIM 解出的值)。

全部都是变量的 LDM 数据视窗显示在第 50 页上,下面讨论虚拟玻璃。

3.3.3 虚拟玻璃

由于玻璃的折射率和色散二种性质都可以变,所以,可变化的玻璃要额

外考虑一些问题，可能会增加一些步骤。为了在 AUTO 中被用作变量，必需确定一个材料作为虚拟玻璃。如果选择一种目录玻璃作为变量，它就会被转换成等效的虚拟玻璃（一个最终设计里，使用者需要用最接近的真实玻璃替代优化过的虚拟玻璃，经常是借助于提供的 **glassfit.seq** 宏指令）。虚拟玻璃有一种专门的形式。对于折射率（587.6nm 或者“d”光线）为 1.62，阿贝数（即倒色散）或者 V -值为 60.3 的一种玻璃，虚拟玻璃的名字为 620.603（该（英文）句号告诉程序这是一块虚拟玻璃）。另外一种形式 1.620:60.3 也被 CODE V 接受，并允许输入 $n>2.0$ 且 $V>100$ 的玻璃。

以该数码相机的物镜为例，引以为基础的那个专利已经包含了虚拟玻璃，尽管它们是被冻结不变。您也应该注意到，三块透镜片都有很高的折射率（1.7 到 1.8），通常这就表示是一种比较昂贵的玻璃。你就需要变化玻璃，但是，在 AUTO 中要约束折射率（这将在下一节中进行）。

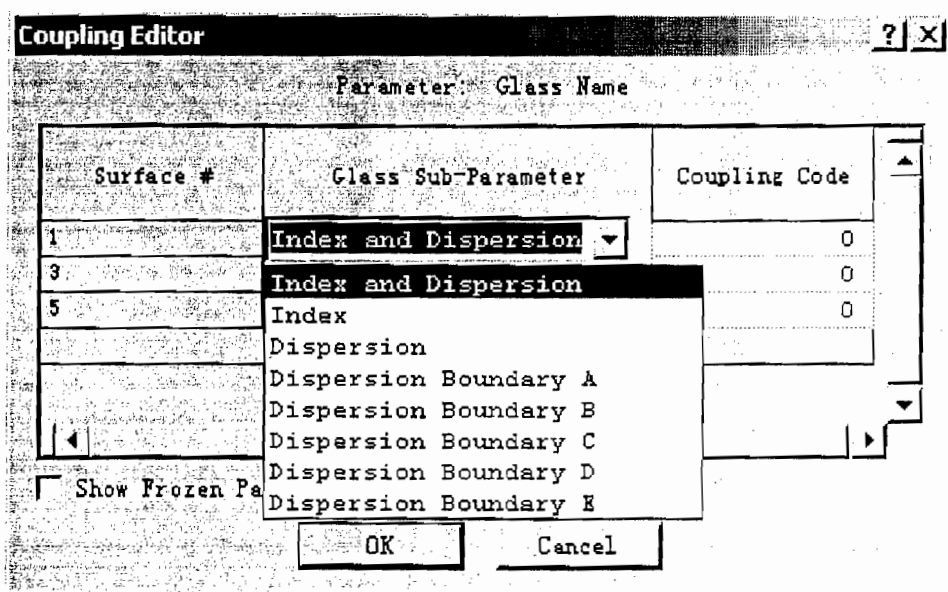
1. 为了变化表面 1 的玻璃，右击 LDM 视窗中的玻璃名称，并从快捷菜单中选取 **Vary**。

在玻璃名字旁边会出现一个 **v** 字，表明它是一个变量。对于一个多色（多波长）系统，通常要同时变化折射率和阿贝数，这也属于缺省设置。但是，对于玻璃还有其它的情况。

2. 左击表面 1 玻璃的 **V**（或者右击，并且选择 **coupling**）。

显示一个耦合编辑对话框。耦合是将变量连接在一起的一种方法，但是，在变玻璃中，可以理解为折射率和色散变量。

3. 双击表面 1 的 **Index and Dispersion** 单元格。



注意，可以单独或者同时变化折射率和色散。由于这是一个多波段系统，所以，同时变化折射率和色散为好。色散的边界就是玻璃多边形的边界，限

制了可使用玻璃类型的范围。这将在下一节关于一般约束（General Constraints）中进行讨论。

4. 敲击 **Cancel**。

5. 右击表面 3 和表面 5 的玻璃，并且，从快捷菜单中选择 **Vary**。

当这些被完成后，就会看到类似下面的 LDM 视窗：

Lens Data Manager							
Surface #	Surface Name	Surface Type	Y Radius	Thickness	Glass	Refract Mode	Y Semi-Aperture
Object		Sphere	Infinity	Infinity		Refract	
1		Sphere	2.2422 V	0.6927	786500.501 V	Refract	1.2276
2		Sphere	4.4153 V	0.4408		Refract	0.9808
3		Sphere	-4.1545 V	0.1259	717360.295 V	Refract	0.7444
Stop		Sphere	2.6249 V	0.2204		Refract	0.6954
5		Sphere	5.7984 V	0.4093	834810.429 V	Refract	0.7825
6		Sphere	-3.4054 V	4.8756 S		Refract	0.8447
Image		Sphere	Infinity	-0.0040		Refract	2.9915
End Of Data							

6. 选择 **File > Save lens** 菜单，连同定义过的变量一起存储一个新版本的透镜文件。

3.4 自动设计的设置

现在，准备进行自动设计，并且，确定一些对透镜的优化有指导意义的设置。

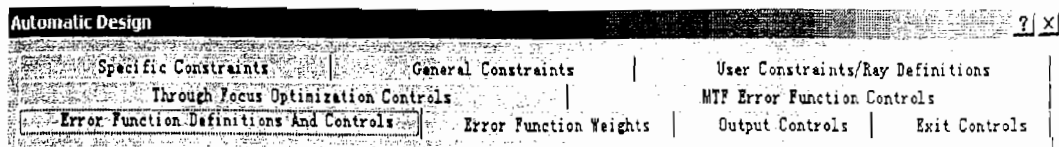
- 选择 **Optimization>Automatic Design** 菜单，打开 **Automatic Design (AUTO)** 对话框。

提示：

在没有结束本节之前不要敲击自动对话框中的 **OK** 键。

在敲击 **OK**，运行 **AUTO** 之前，一直都变化几种列表中的设置。如果您错误地敲击了 **OK**，不用惊慌：为了恢复到透镜的初始状态，选择 **Edit>Undo** 菜单，然后，在 **AUTO** 输出视窗中敲击 **Settings** 键，重新开始。

AUTO 是一个非常强大的，具有许多种设置类型的属性，这些设置被分散在输入对话框九种列表中。



大多数设置是确定诸如权重这些参数，或者具有某些特殊性质的标记，例如绘出每次优化循环后的透镜图。有两类设置是确定边界或者约束条件的。

第一类边界条件被称之为 **General Constraints**（一般约束）。这些是一般的边界条件，是控制厚度值和玻璃多边形的边界条件，帮助设计者避免不现实的设计。厚度约束可以保证不会出现负边缘厚度，或者透镜元件交叉这样的问题。玻璃边界可以防止程序选择不实际的折射率或色散值。一般约束条件总是对所有变焦位置中的所有表面都会适当地施加限制。也可以为这些限制设定一些值，或者跳过被选定的一般约束，从而对每一个表面给出特定的限制。

第二类边界条件是 **Specific Constraints**（特殊约束）。只有在使用者输入设置时才应用特殊约束。许多限制都是以某表面为基础的，与某种物理性质或者光学性能有关的约束。其它的约束应于整个系统或者一组表面。特殊约束允许设计者更详细地确定本人的要求，但是，必须小心，不要过分地约束系统，因为这样做，有可能会不利于潜力的发挥。

3.4.1 一般约束

3.4.1.1 厚度的一般约束

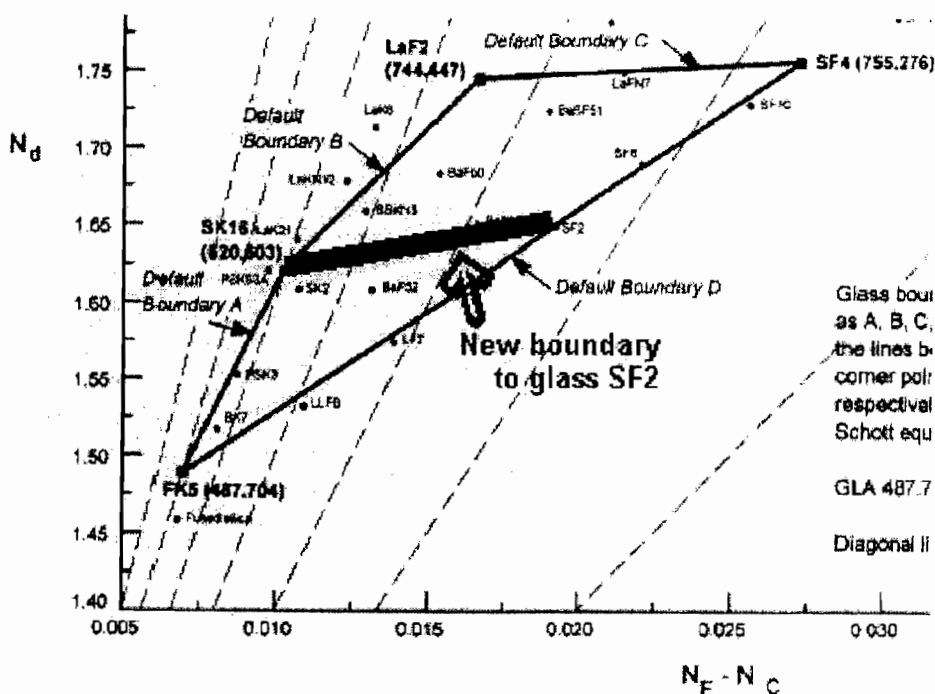
对于小孔径透镜，必须保证元件有足够的厚度，便于加工和处理。根据加工专家的意见，这里推荐的值是合理的，尽管有可能该孔径下元件的厚度会是 0.5mm。这就是一般厚度约束给出的最佳控制。另外，上一节注意到，专利中的玻璃都是高折射率玻璃。玻璃多边形边界约束可以被用来将优化后的玻璃限制在玻璃多边形中低折射率，低成本区域内。假设，已经打开了 AUTO 对话框（如上图所述，（原文中是 51 页））：

1. 敲击 **General Constraints** 列表。
2. 在 **Minimum Center Thickness**（最小中心厚度）栏中输入 **0.9**。
3. 在 **Minimum Edge Thickness**（最小边缘厚度）栏中输入 **0.8**。

3.4.1.2 玻璃多边形约束

在 AUTO 中使用的玻璃多边形（或者称为玻璃三角形）图是一条 Nd 与（NF-NC）曲线图。下面显示的曲线图是从在线 CODE V Reference Manual 第三章（自动设计）中摘录出来的。它表示了一个缺省的、四边形的玻璃边界，是一个可以使用的，有很高折射率的区域。注意，对于某些 Schott 牌号的特殊玻璃被表示为带标记的点，而缺省的玻璃边界范围包含了最普通、实

用的玻璃。然而，很重要的是要注意到，AUTO 只能是连续地变化玻璃——而不能查找离散的真实玻璃。优化之后，为了分析最终的性能和加工的可能性，必须将虚拟玻璃转换成真实玻璃（即，使用 glassfit.seq 宏指令）。

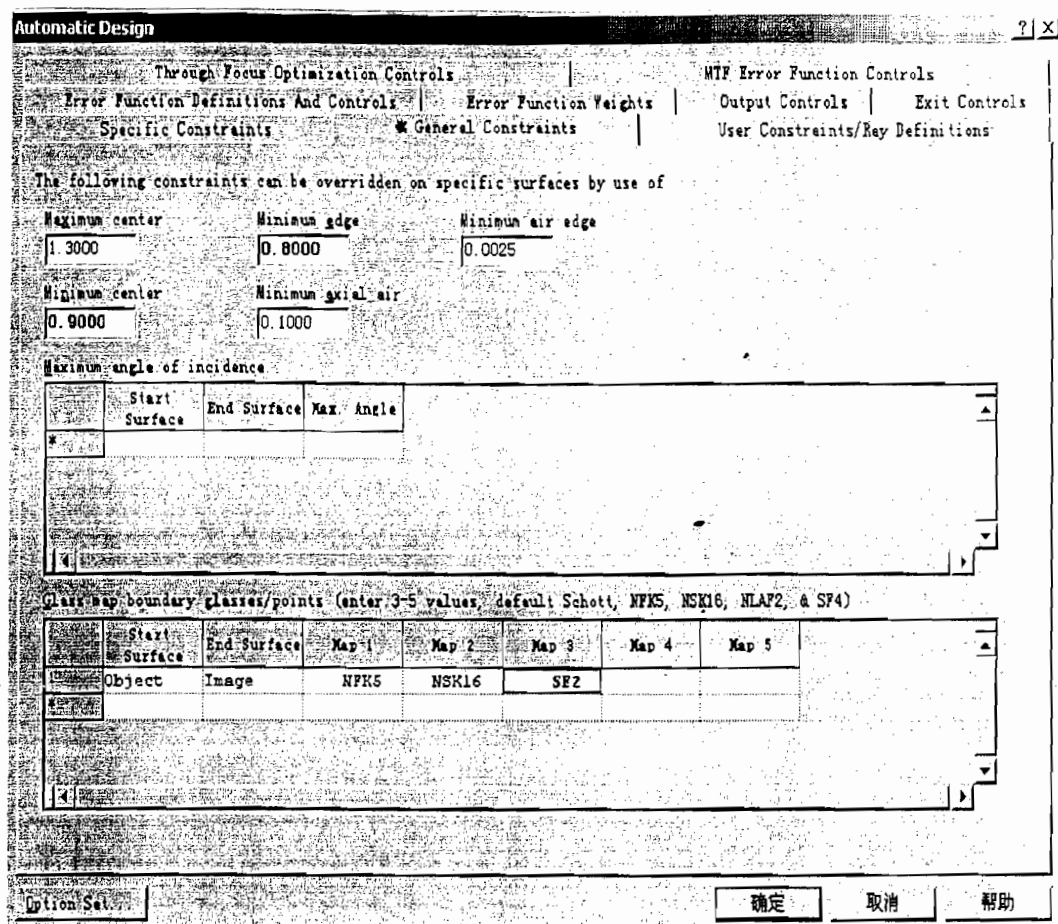


实际上，玻璃约束多边形可以有 3 到 5 个边，依次标记为 A~E(它必须是一个凸的多边形；更详细的查阅 Reference Manual)。似乎 SF2 确定了玻璃三角形区域的一个顶点，在这个范围内，最大的折射率会低于 1.6（希望是在优化后能够得到比较便宜的玻璃）。注意，使用缺省值时，玻璃多边形边界的变化将会应用于所有的表面，如果需要的话，也可以对每一个表面单独定义一个玻璃多边形。

1. 在 AUTO 对话框 **General Constraints** 列表里，敲击对话框底部 Glass Map Boundary 数据表内 Map4 单元格中的 SF4 玻璃，并且，按 DEL 键（或者，CTRL—X）删除第四个边界。

2. 敲击 Map3 单元格，键入 SF2，确定一个玻璃三角形边界新的顶点。

General Constraints（一般约束）列表应是如下所示：



3.4.1.3 特殊约束

当需要确定优化的边界条件时，有许多项目需要加以约束。它们包括实际的和光学的属性（总长，焦距，畸变，真实光线的属性，近轴光线的属性等）。约束条件可以有几种输入形式：包括设置等于值（输入一个值），上下边界，最小值（不直接给出约束值，而是让实际值与目标值之差最小）。也可以指定约束值仅仅作为显示用（每次循环时都被计算和显示出，但是，并不控制）。约束及约束模式将在在线 Reference Manual 第三章“Automatic Design”中详细地阐述。

对大部分透镜而言，至少需要一个特殊约束来保持系统的比例。它可以是像面上一条近轴或实际光线的高度，一个近轴斜率或者一条真实光线的方向余弦值。但是，最经常使用的是（在此也将会用到的）系统的近轴有效焦距（EFL）。

1. 在 Automatic Design 对话框中，敲击 Specific Constraints 列表。这个表一开始是空的（缺省模式没有设置特殊约束）。

2. 敲击位于对话框的底部的 Insert Specific Constraint 键。

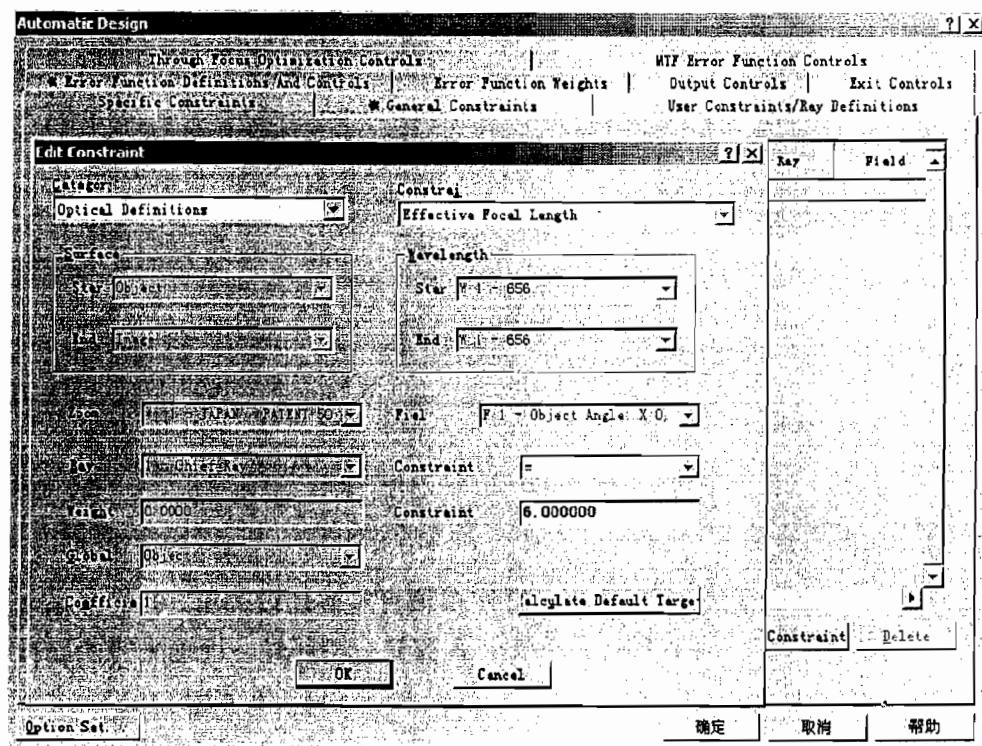
显示 Edit Constraint 对话框，Effective Focal length（有效焦距）作为缺省约束（这是最普通的情况）。实际上，对于这种情况，您只需要敲击 OK

就可以了，但是，首先要注意，可以从左上方的列表中选择类别，在右上方每种类别都有自己的约束条件列表。有效焦距是 Optical Definition（光学定义）中的首项。

3. 在 **Constraints Target** 区域中敲击，输入 10.0（注意，这是一个错误的值；然而，这里只是一个演示，因为需要的值是 6）。

4. 敲击 **Calculate Default Target** 键。

注意，数值 6 出现。这个按钮认为当前的约束值是一个合适的值。您不需要保留它，但是在这里它是正确的。



5. 敲击 **OK**，输入这个约束值。

提示：

当输入一种约束时，在选完约束后要保证在数据栏中敲击一下，使程序能显示该约束类型所需要的数据。如果它是与表面有关的或是与视场有关的约束，要保证选择了所希望的表面或者视场（如果是一个变焦系统的话，还有变焦位置）。**Calculate Default Target** 键将显示当前值，帮助您确定一个好的目标值。

3.4.1.4 其它的特殊约束

许多情况中,另外的一些特殊约束也是必需的,但是,通常在你完成一次优化尝试后才会明白这一点。通常,最好的办法是将特殊约束的数目限制到对设计者确实是很重要的一个数目。对于该透镜来说,要求畸变小于 4%。你可以很容易地加上这项约束(它位于 **Edit Constraint** 对话框中 **Optical Definition** 类型里,标记为 Distortion Fraction Y; 命令是 DIY)。如果的确增加了该项,还应当选择需要控制畸变的视场(通常,是最大的视场),并且,几乎不会对多个视场同时进行控制。这个透镜的最初方案的畸变就很小,所以,也许一开始无需去约束它(在 **Edit Constraint** 对话框里,你可以在 **Display Only** 约束模式中加上这种特殊约束,以加强对畸变的监视)。如果畸变成为一个比较严重的问题,就要加上这种约束(可能要增加两项,分别限制正负畸变)。

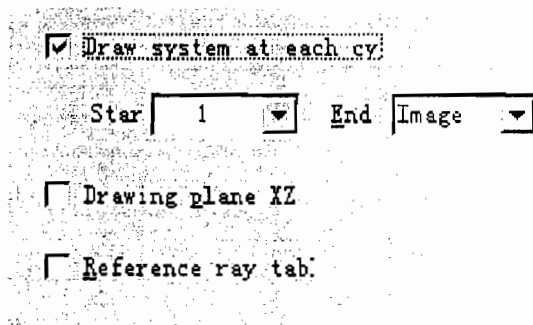
尽管一个数码相机不像使用胶片的相机那样需要考虑为反射镜或棱镜留有一定的空间,但是,像距(后截距(Back Focus))仍然是另外一个通常要约束的项。数码相机中,景物可以通过一个分离取景器或是 LCD 预览屏观看。其它常用的约束是加工和包装类型的,例如总长度。

3.10 一节(原文 73 页上)“约束:问题和解决方法”(原文中“Constraints: Problems and Solutions”)描述了经常出现的问题和对应的解决方法。

3.4.2 输出控制

对于由许多表面组成的透镜,您可能会希望限制与表面有关的输出项的数量。也可能希望查看一下变量表。在这种情况下,可以接受这些项的缺省值,但是,每次循环后查看一下透镜的视图会很有帮助。仍然是修改 AUTO 设置(几乎都要做!)

1. 在 **Automatic Design** 对话框里,敲击 **Output Controls** 列表。
2. 审验标有 **Drew system at each cycle** 的栏。

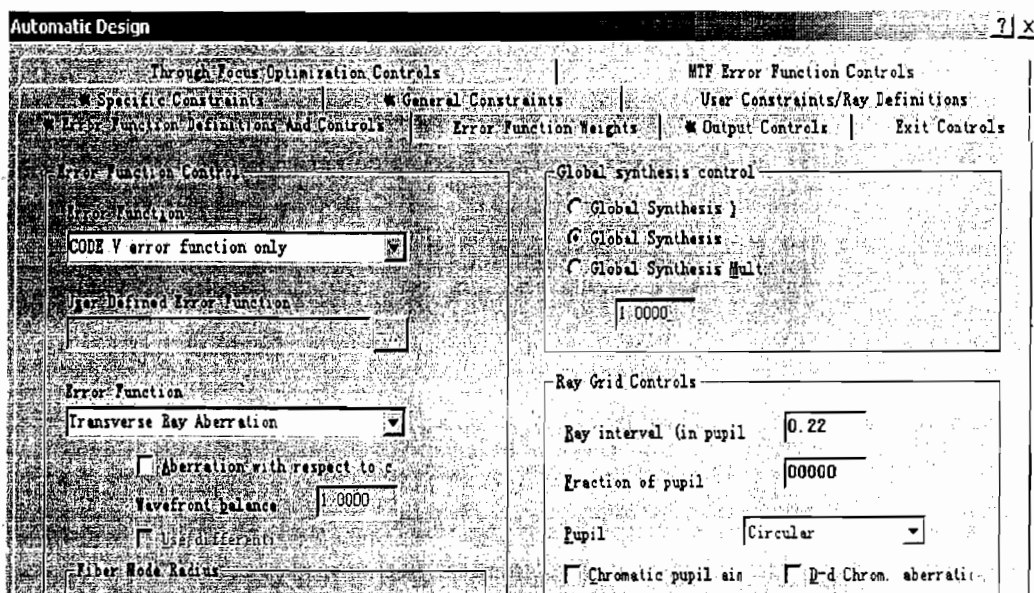


这样做的结果是每次循环后都会在标有误差函数的 AUTO 输出视窗中出现一个单独的表格。

3.4.3 误差函数的定义和控制

Error Function Definitions and Controls 列表是首先出现在 **Automatic Design** 对话框中由于缺省设置而计算出的一种表。在这里，可以设置一般的方法和和一些控制值（例如，误差函数的类型，全局综合）。可以接受缺省误差函数的类型（横向光线像差，本质上就是 RMS 光点的尺寸），但是，对于这个具体的透镜，应该将光线栅格的间隔改变为一个不同的值。

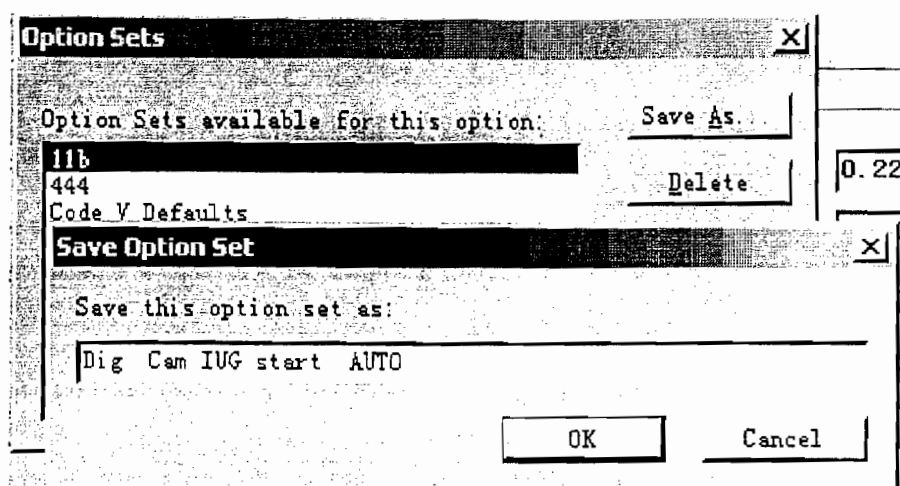
1. 在 **Automatic Design** 对话框中，敲击 **Error Function Definitions and Controls** 选项。
2. 在 **Ray Grid Control** 栏，输入 0.22 作为 **Ray interval** 的值。



3.4.4 保存设置（选项 Set），运行 AUTO

只要 **AUTO** 视窗打开着，就应当允许多次修改设置和重新运行 **AUTO**，为此，在 **CODE V** 工作期间，**Automatic Design** 对话框中的设置将一直被保存。但是，为了在未来的 **CODE V** 工作时还可以使用这些设置，需要保存它们。这些做非常容易，常常会节约未来的大量时间。

1. 敲击 **Automatic Design** 对话框左下角的 **Option Set** 键。
2. 敲击 **Save As** 键。
3. 为要保存的 **AUTO** 设置键入一个名字，敲击 **OK**。
4. 在 **Option Sets** 对话框中敲击 **Close** 键。



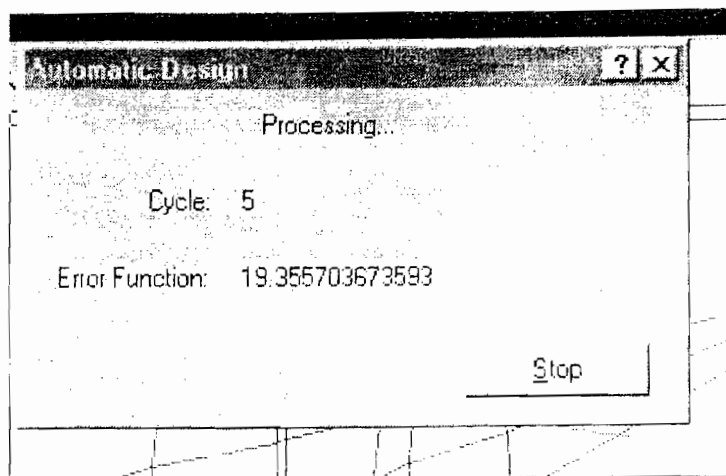
5. 在 **Automatic Design** 对话框中敲击 **OK**。

这将会建立一个带有标记的 **AUTO** 输出视窗，并且，按照你的设置运行 **AUTO**。通常它会运行几个循环，直到不能对该镜头的误差函数有所改善时就停止运行（为了确定何时停止，在 **AUTO** 对话框的 **Exit Controls** 列表中有一些设置）。

3.5 AUTO 的输出

敲击 **OK** 键后，**AUTO** 开始运行，显示出列表式的输出视窗（**TOW**）（Tabbed output window）和一个带有 **STOP** 键的控制对话框。**TOW** 总是有一个包括了大部分输出内容的 **Text**（文本）列表。如果要求每次循环都要绘制一次透镜的视图，那么，您就会看到多组曲线（数据）列表，每次循环一组。如果有警告或者错误产生的话，也可以看到一个 **Error** 列表。

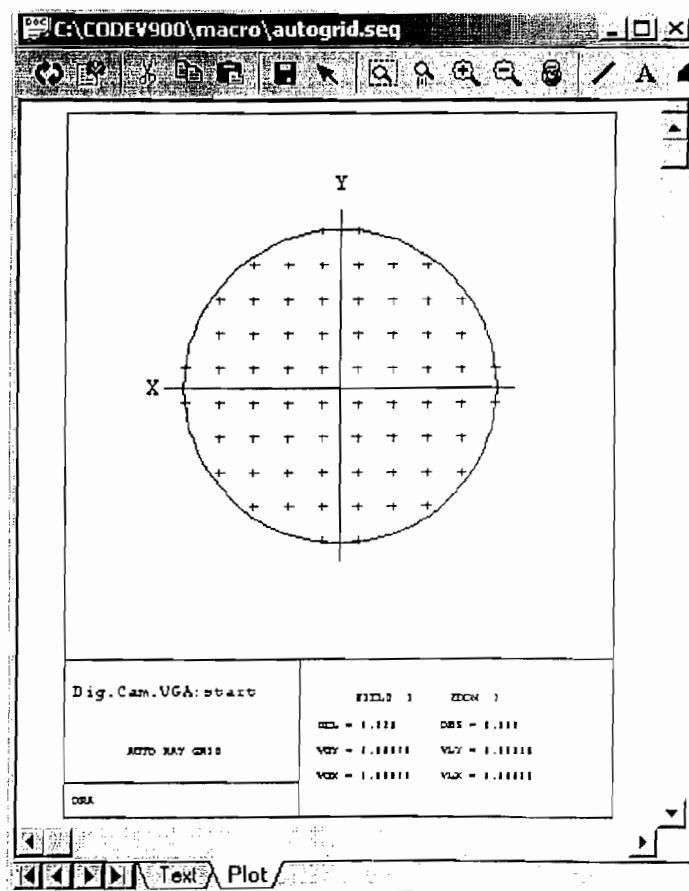
控制对话框显示当前的循环次数和误差函数值。注意，如果您敲击了 **Stop** 键，**AUTO** 不会马上停止。它要完成当前的循环，并且，确保在停止之前透镜的数据是有效的。



3.5.1 误差函数

误差函数是在 AUTO 运行时所产生的最有一个信息。这个数字代表了透镜的成像质量, 数字零代表一个无像差透镜。缺省的误差函数是由 X, Y 方向的横向光线像差的平方之和构成, 其比例的确定使得该值近似等于所有视场和变焦位置的平均后 RMS 光斑半径的平方。缺省的误差函数还有波前误差方差, 光纤匹配效率和 MTF。这些情况中, 对误差函数值的解释是不相同的, 但是, 都认为越小越好, 最理想的状态就是零 (但是, 几乎不可能达到)。用户自定义的误差函数也可以使用。

为了计算误差函数, CODE V 对每一个确定的视场, 变焦位置, 一种波长追迹一组光线网格。网格是这样被定义: 假设入瞳的半径是 1 (规化值), 光线之间的间隔被认为是瞳孔上用小数表示的光线间隔 (命令: DEL)。有一个宏指令 (AUTO.SEQ, 可以在 **Tools>Macro** 菜单中找到, 并且, 被列在 **Sample Macros/Optimization** 条目下面) 可以用来检查具体的 DEL 值的光线分布图。这次优化中所选取的 DEL 值是 0.22, 光线分布图案如下图所示。(注意, 当 AUTO 对话框或者其它任何选项的对话框是打开状态时, 你不可能运行该宏指令或者其它任何宏指令)。



每一条光线在 X, Y 方向的横向像差都是在像面上被计算出的, 这些像差的加权平方和确定每次优化循环中误差函数的值。求和公式中的权重对优化是一个重要的控制。对孔径的位置, 波长和视场 (X 和 Y 分量) 都要确定权重。对于误差函数更详细的处理以及优化的其它数学问题, 可以参考在线 Reference Manual3-80 页。

3.5.2 AUTO 输出的标题

现在, 让我们看一下 AUTO 的文本输出, 输出首先是显示计算中使用的输入数据和缺省值, 这部分被称为输出标题。主要以命令形式给出。

```

Automatic Design
EFL Z1 = 6.00000000003687
DEL 0.22
GS NO
DRA S1..I YES
MNT 0.9
MNE 0.8
GLA SO..I NFK5 NSK16 SF2
GO

-----

POTENTIALLY ACTIVE SPECIFIC CONSTRAINTS
EFL Z1 = 6.000000

GENERAL CONSTRAINTS
MXT 1.300000
MNT 0.900000
MNE 0.800000
MNA 0.100000
MAE 0.002500
GLA NFK5 NSK16 SF2

ERROR FUNCTION CONSTRUCTION
WTW 1 2 1
WTA 0.500000
DEL 0.220000
WTX F1 1.000000
WTX F2 1.000000
WTX F3 1.000000
UTX F4 1.000000
WTY F1 1.000000
Text 1 2 3 4 5 6 7 8 9

```

通过显示由您的设置 (EFL, DEL 等) 所产生的命令开始输出标题。然后, 在 EFL 情况下, 会列出可能使用的特殊约束。“可能使用”就意味着 AUTO 将动态地决定每次循环时是否需要一种约束, 为了控制像差, 要尽可能多地释放一些变量。下面列出的是一般约束; 命令也不是太难理解 (MNE

是最小边厚，MXT 是最大中心厚度等）。

提示：

要查看一种输入类型的命令，在 Automatic Design 对话框中敲击感兴趣的选项（例如，**General Constrains**）并按 F1 键。将显示出一个描述输入的帮助页，包括 CODE V 命令的名字。

Error Function Construction（误差函数结构）显示出不同项目上的权重，以及光线追迹网格中使用的 DEL 值。**Convergence Control**（收敛控制）显示了退出的条件（MXC 是最大的循环次数，MNC 是最小的循环次数，TAR 是误差函数的目标值，IMP 是每一次循环实现的目标值提高的部分）。这个例子中，**Output Control** 仅仅包括透镜的绘图命令（DRA）。紧接着是变量的数目，该例子中是 18 个变量（6 个半径，6 个厚度，6 个玻璃变量，每个玻璃都有折射率，色散两个变量）。

提示：

在 AUTO 对话框 **Output Controls** 列表的 **Vaviable Table** 栏中敲击 **Print Cycle Value** 键，就可以得到一个变量表。

最后，标题的内容将告诉您，由于是 18 个变量，因此，18 种约束可以被使用。这是一个上限！事实上，是希望使用较少量的约束，应用最多的“自由度”（就是变量）来提高像质。

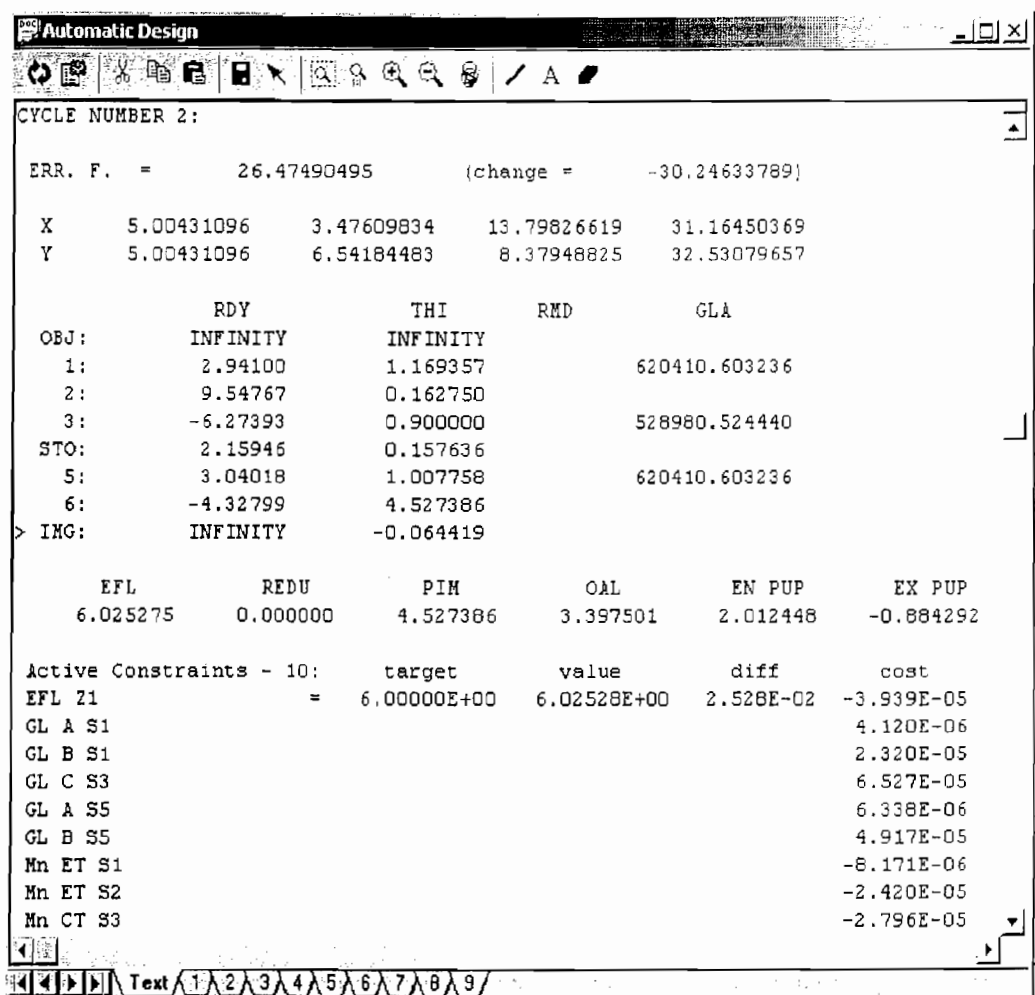
3.5.3 AUTO 每次循环的输出

一般说来，AUTO 中的一次循环就是一次显示误差函数和约束的迭代。事实上，每次循环都会包括几次小迭代，分别尝试不同的参数，根据需要增加或取消约束，使当前的设计有最好的提高。

每一次循环的开始和结尾都是误差函数值，标记为 **ERR.F**。随后显示的是每个视场的 X, Y 分量，虽然总的误差函数值也包含有权重因子（例如，如果 WTX F4 的权重值小，那么，第四个视场中一个大的 X 分量也不可能会有太大的贡献），但是，可以使设计者看出哪一个视场或分量对误差函数的作用最大。接着列出了表面的数据，和系统的初级基本属性（EFL，缩小倍率 REDU，近轴像距 PIM，总长度 OAL，入瞳/出瞳距 EN/EX PUP）。

最后，有一个 **Active Constraints**（有效约束）表（在这个具体的循环里为 10）。首先列出 EFL，有目标值，当前值和它们的差值。已经知道，这是唯一的一个特殊约束，其它的所有约束是什么约束呢？它们是 AUTO 已经决定了在这个具体的循环中需要进行控制的一般约束。**GL A S1** 是一个玻璃边界约束（在该例子中，会想到标有 A、B、C 的玻璃多边形的边界）。

Mn ET S1 是对表面 1 的最小边厚的约束。



3.5.3.1 约束的代价

该程序根据拉格朗日 (Largrange) 系数的值, 动态地决定每一次循环中需要控制的约束, 并被列在 **cost** 栏中。为什么被称做“COST”? 当一个边界条件被控制时, 程序会受到约束, 趋于使误差函数达到可能是比较低的解空间点 (一组变量值)。这个使误差函数无法达到最佳点的约束将会使设计者由于无法实现本来可以实现的误差函数而付出代价 (如果可以被释放, 则误差函数可能会更小)。

某些约束可能会比其它的约束更难控制, 而且, 要付出更大的代价。尽管不能直接比较不同类型约束的代价, 但是, 比较大的值要比较小的值付出的代价要大, 如果您看到了非常大的值 (任何正的幂指数, 如 1E+02), 那么, 这个约束正在造成一个大的问题。或许, 你需要删除它, 或者提供另外的变量, 使它比较容易被满足。

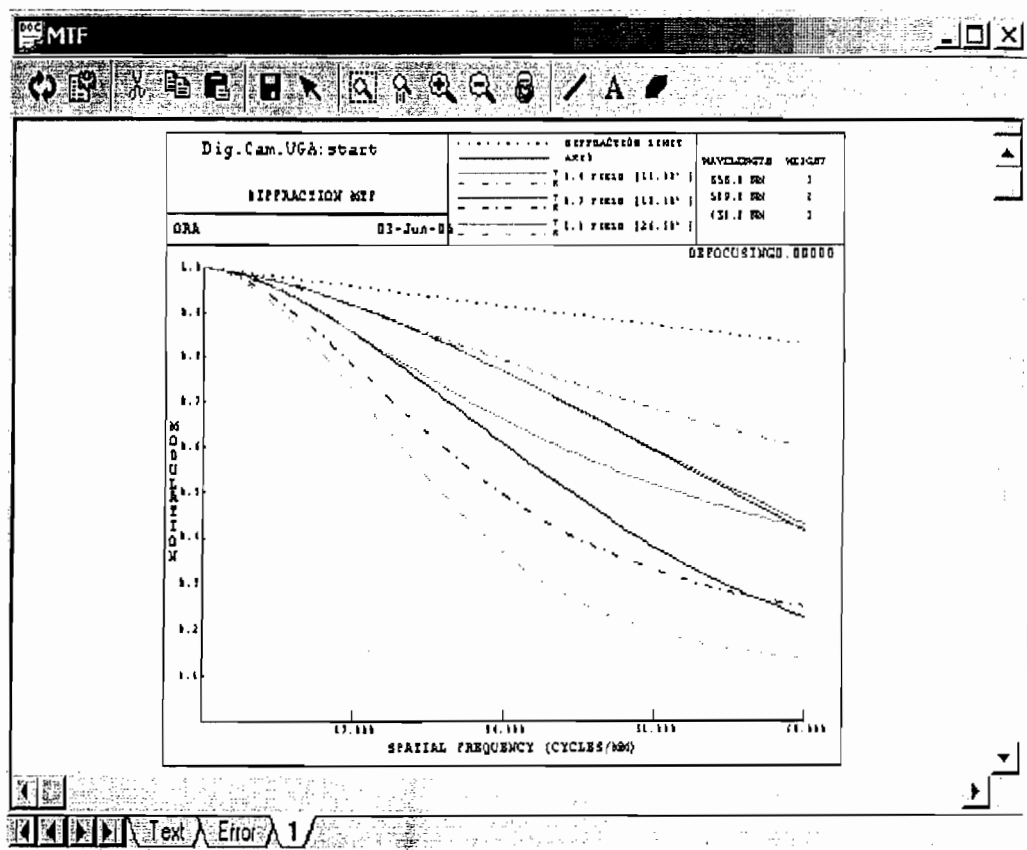
拉格朗日乘数的值和符号, 与其它的程序数据一起被用来确定一次循环

中哪一个约束需要被控制。剩下的变量（在本次循环中是 18-10 或 8）被用来准备改善成像质量。

3.6 分析结果和修改权重

在确定数码相机物镜时，曾经使用过分析视窗。如果该视窗仍然是打开着的话，更新这些视窗，查看优化的效果就是一件简单的事情。

1. 从前面的分析中找到 **MTF** 输出视窗。
2. 用鼠标拖动该曲线标记，完成原始 **MTF** 曲线的复制（这是可选项，但是，这种方法很容易进行优化前后的比较）。
3. 敲击 **MTF** 视窗中的 **Execute**（执行）键（**Recalculate**（重新计算）），重新运行计算，查看新的 **MTF** 结果。



这个曲线图表明，对于大部分视场和方位（T, R 分别代表子午和弧矢，对应于 Y 和 X）来说，MTF 是好的，但是，有一对弧矢分量上的曲线（X 方向，虚线）比较低。也可以把它与 AUTO 的输出联系起来。敲击 AUTO 输出视窗中的 **Text** 列表，并且滚动到底。

CYCLE NUMBER 8:

ERR. F. = 17.06330203 (change = -0.21116315)

X	5.37836001	3.16479108	11.98338510	17.26189877
Y	5.37836001	5.85626308	12.06082000	7.16933006
	(F1	F2	F3	F4)

Normal AUTO Completion - System improvement less than IMP

注意，最大的误差函数分量是 F3 和 F4 的 X 值，以及 F3 的 Y 值。它们与最低的 MTF 曲线相对应。由于该问题与具体的视场和 X 分量有关，所以，在优化过程中，可以修改 AUTO 的设置来增加这些地方的权重。

1. 敲击 AUTO 输出视窗中的 Modify Setting (修改设置) 键。

2. 敲击 AUTO 对话框中 **Error Function Weights** 列表。

缺省的视场权来自 LDM 的数据, 正如在 System Data 视窗(Lens>System Data 菜单)的 **Fields/Vignetting** 页中可以看到, 权重值全是 1.0。也可以增加视场 F3 和 F4 X 分量的权重, 例如, 增加为 1.2。

3. 在标记有 **X-Aberration Weights Only** 的数据表的第一行中敲击, 然后, 双击第一个单元格, 选择视场 3(F3)。

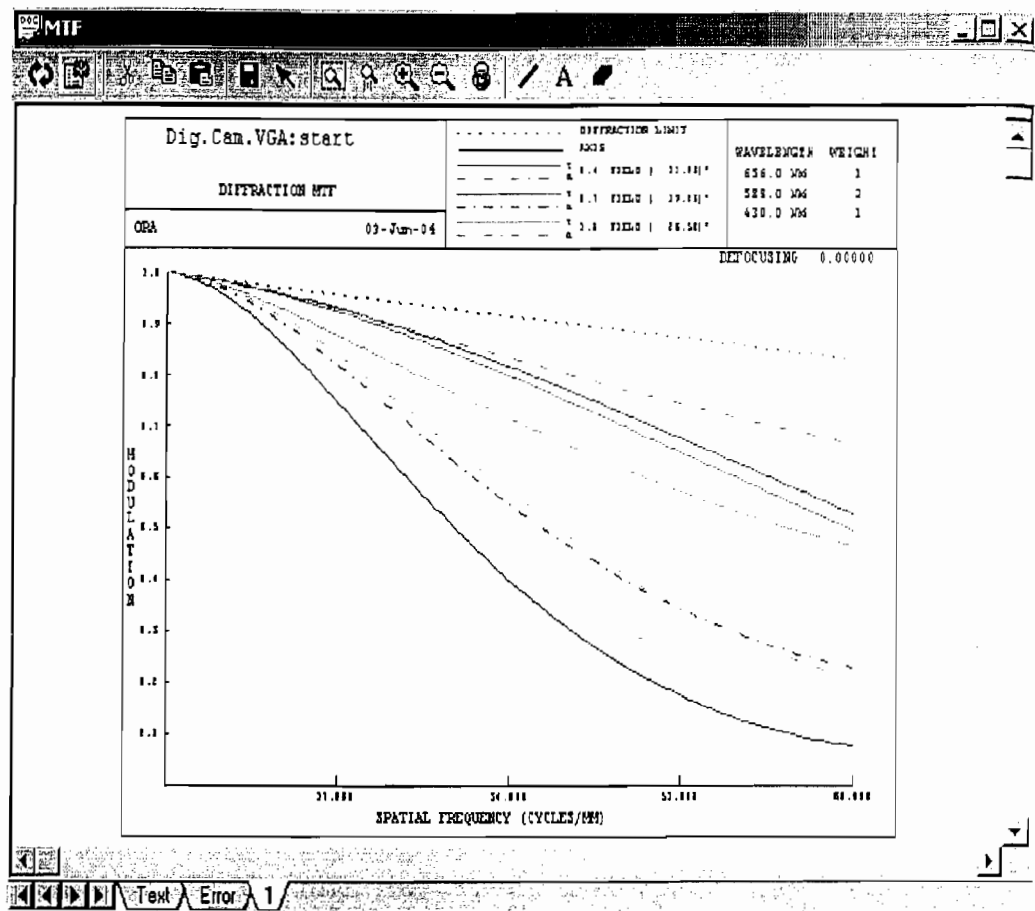
4. 在这一行的 **Value** 栏内输入 1.2。

5. 敲击空白行, 并对第 4 个视场 (F4) 重复上面的操作。

X-Aberration weights	Field	Zoom	Focus	Value
1	F 3 - Ob	All Zoom	1	1.2
2	F 4 -	All Zoom	1	Default
*	F 1 - Object Angle: X 0, Y 0			
	F 2 - Object Angle: X 0, Y 11			
	F 3 - Object Angle: X 0, Y 19			
	F 4 - Object Angle: X 0, Y 26.5			

6. 敲击 **OK**, 重新运行含有新权因子的 AUTO。

7. 在 MTF 视窗中敲击 **Execute** (执行) 键, 重新运行分析。



现在，弧矢曲线（虚线）比较高，但是，F3 的 T（子午）曲线仍然比较低，需要更大的权重。你可以做个实验，在 X 和 Y 方向选取不同的权重，甚至于可以降低轴上（F1）和 0.4（F2）视场的权重，因为这两个视场的 MTF 比需要的还高。虽然，你现在可以转而进行 MTF 优化了，但是，确定 MTF 误差函数的目标值可能要比相互改变权重，重新运行 AUTO 和重新运行 MTF 要花费更多的时间。

顺便说一句，用另一种方式表示 MTF 也是非常方便的，主要是描述每个视场的相对亮度和相对畸变两项（以文本输出的方式）。当优化 MTF 时，也需要注意这些技术条件。

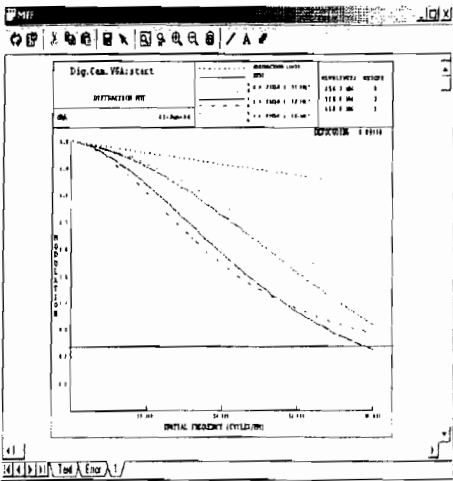
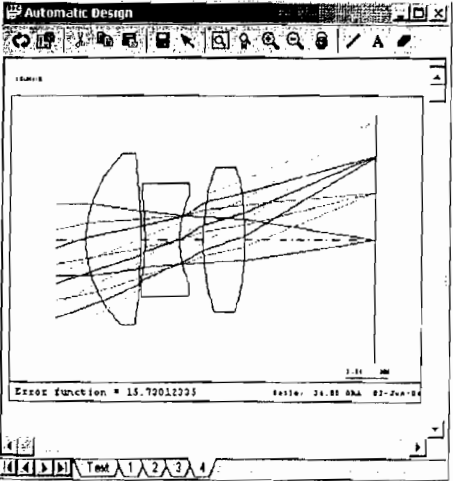
3.7 最终优化和注意事项

在几次试算后，就可以找到一组满足 MTF 和其它技术要求的权重（WTX, WTY）。一组这样的权重显示如下（在前面的章节中已经显示过，对初始缺省权首先进行优化，然后再进行试算，每次试算都使用 Undo 返回到相同的起始点）。

X- and Y-Aberration Weights				
	Field	Zoom	Focus	Value
1	F 1 - Ob	All Zoom	1	0.8
2	F 2 - Ob	All Zoom	1	0.8
*				
X-Aberration weights				
	Field	Zoom	Focus	Value
1	F 3 - Ob	All Zoom	1	1.2
2	F 4 - Ob	All Zoom	1	1.3
*				
Y-Aberration weights				
	Field	Zoom	Focus	Value
1	F 3 - Ob	All Zoom	1	1.5
*				

由于与使用的权重和起始点有关，所以，不可能完全会得到同样的解，但是，得到的解应该具有相似的性能。当得到一个好的解时，应该设置一个新标题，并且，保存该透镜文件（通过选择 **File>Save Lens As** 菜单）。

下面的图形显示了最终玻璃透镜的基本 **Quick 2D** 视图，MTF 和 LDM 数据。



Lens Data Manager							
Surface	Surface Name	Surface Type	Y Radius	Thickness	Glass	Refract Mode	Y Semi-Aperture
Object		Sphere	Infinity	Infinity		Refract	0
1		Sphere	2.7745 V	1.4130 V	620410.603 V	Refract	1.6741 O
2		Sphere	-14.1767 V	0.1000 V		Refract	1.2013 O
3		Sphere	-6.7242 V	0.9000 V	579384.415 V	Refract	1.0552 O
Stop		Sphere	2.5168 V	0.6083 V		Refract	0.5757 O
5		Sphere	5.3858 V	1.0672 V	620410.603 V	Refract	1.1157 O
6		Sphere	-6.5092 V	-3.4399 S		Refract	1.3911 O
Image		Sphere	Infinity	-0.1061 V		Refract	2.9915 O
End Of Data							

为了得到其它的最终分析结果, 敲击前面分析时已经使用过的分析视窗中的执行/重新计算 (Execute/Recalculate) 键 (如果分析视窗已经被关闭, 就重新再运行)。对于这组解, 得到:

- 在 17lp/mm 空间频率处的 MTF 满足技术要求, 68lp/mm 处的 MTF 几乎可以满足 51 lp/mm 处的要求, 因此, 留有一定的性能余量。
- 视场曲线中最差的畸变为-1.7% (**Analysis>Diagnostics** 菜单)。
- 全场的相对照度为 67.3% (根据 MTF 选项)。透过分析 (**Analysis>System** 菜单, 或者 TRA 选项) 更准确些, F4 视场的透过为 63.2%, 仍然高于 60% 的技术要求。

● 同样的 TRA 选项报告了全场的平均透过率为 88.2%, 这是 CODE V 缺省默认在每个表面上涂镀单层 (四分之一波长的 MgF₂) 反射膜的结果, 但是, 技术条件并没有要求。如果去掉所有的镀膜 (**Lens>Surface Properties** 菜单, **Cement/Coating** 页, 对每个表面上的镀膜, 敲击 **None** 键), 透过率下降到 66%。或许会使用某些镀膜, 但是, 总是要仔细检查一下透镜技术条件中的详细要求, 如上所述。

实际上, 在该透镜可以被加工之前, 还有许多事情要做。

3.7.1 关于真实玻璃?

正如在第二章末尾讨论过的, 一个关键的问题是将虚拟玻璃变成真实的玻璃。因为真实玻璃不会完全与虚拟玻璃相匹配, 所以, 通常还要进行一些少量的再优化。提供的宏指令 **Glassfit.seq** 很有用, 但是, 不能总是使用 “**Fit all glasses automatically** (自动选配所有的玻璃)” 选项。以该透镜为例, 前后元件 (620.603) 自动选配出的 SCHOTT 玻璃是 NSK16, 被列为 “咨询” 玻璃 (第二类)。SK16 是一个好的解, 但是, 它被列为优先选用玻璃 (实用, 便宜)。这可能反映了使用 Schott 材料的某些中期条件, 当然, 也会有其它合适的材料制造商。

问题就在于可以用多种模式运行 **Glassfit** (玻璃选配) 宏指令, 包括为

每个表面列出五种最接近的玻璃。除了折射率和色散尽可能匹配外，还可以考虑玻璃的其它性能。

3.7.2 关于焦深

对于这种定焦物镜来说，没有涵盖的一项技术条件就是焦深。当物距从 750mm (2.5 英尺) 变到无穷远时，应当对 MTF 有要求，但是，我们仅仅是按照物体位于无穷远来设计和分析的。要评估这一项：

1. 在 LDM 数据视窗中，右击表面 6 的厚度（包含有该数据的单元格变成了灰色），并从快捷菜单中选取 **Delete Solve**。

这将删除 PIM 求出的解，所以，物距改变时，该透镜不会重新聚焦。

2. 将物距从无穷远变为 750mm。

3. 重新运行 MTF 和其它希望完成的分析。

可以看到，使用这个解不能在限定的焦距处满足技术要求。有几种方法可以解决这个问题，在 AUTO 中使用离焦参数，或者使用 Zoom 同时对不同的物距进行优化。在此，我们不进行这项工作，但是要注意高频（51-68lp/mm）区 MTF 的最大值，找到一个折衷的焦深解是比较合理的。

3.8 塑料，私人目录和非球面

一个低成本数码相机物镜真真实实地应该被制造成一个全是玻璃材料的三片型系统吗？这取决于许多因素，但是，纯塑料或者玻璃/塑料兼用的方案肯定值得考虑。塑料透镜被模压成型，而且，还包括模压非球面，加工起来就像加工球面一样容易。塑料便宜，并且，模压可以提供大批量的，便宜加工。但是，塑料的确也存在一些问题：

- 与光学玻璃相比，光学塑料的种类较少，只有几种，折射率和色散的范围比较小，它们的性能也没有标准。

- 塑料模压的公差要求比玻璃材料的要低。

- 大部分光学塑料对温度变化比光学玻璃更敏感。

在标准目录中，例如 Schott, Ohara, Hoya 和其它玻璃目录，并不提供塑料的有关信息。在塑料可以被使用在一个透镜定义中之前，必须使用 Private Catalog 属性（PRV 命令）以透镜的形式定义这种塑料。ORA 公司提供了一个宏指令，可以确定许多普通的，不同厂家的光学塑料。

1. 选择 **Tools>Macro** 菜单，并且，在 **Sample Macro/Material Information** 项目下设置 **prvpl.seq** 宏指令。敲击 **Run** 键。当显示出宏指令对话框时，敲击 **OK**，运行该宏指令。

将使用诸如 **'P-CARBO'**（聚碳酸）和 **'P-STYRO'**（聚苯乙烯）这样的名字来定义各种材料。

2. 为了使用一种 **PRV** 材料，在 **LDM** 数据表的 **Glass** 栏中的引号内键入它的名字。

该引号可以是单引号或双引号，但是，根据需求和具体情况考虑（例如，材料‘P-CARBO’和材料‘p-carbo’是不一样的）。

3. 为了检查 PRV 材料的名字和类型，选择 **Review>Private Catalog** 菜单。

在此，看不到，也无法修改其性质，只能看看什么材料被确定，并删除不需要的材料。

4. 为了查看被确定的 PRV 材料的属性，选择 **Display>List Data>Private Catalog** 菜单。

关于 Private Catalog 属性的更多信息，参看在线 *Reference Manual* 的第二章。

3.9 全局综合和其它的 AUTO 功能

本章一开始，我们就论述了局部优化和全局优化的区别。到现在为止，我们已经使用过局部优化，有效地找到了在一定的约束条件下、离起始点最近的局部极小值。CODE V 还有一个非常强大的全局优化属性，称为全局综合（GS），而且，无论什么时候，只要是在使用 AUTO，都可以很容易地使用全局优化。

1. 选一个容易辨认的文件名字来保存你的透镜（例如，**GS1DCAM.LEN**）。

GS 将保存每一个结果在透镜文件（**GS1DCAM1.LEN**, **GS1DCAM2.LEN** 等）中，并且，一个有显著差别的名字可以比较容易地记起许多文件。

2. 敲击正在工作的 **AUTO** 视窗中的 **Setting** 键，访问 **AUTO** 对话框。

3. 在 **Error Function Definitions and Controls** 列表中，敲击 **Global Synthesis Yes** 键。

4. 敲击 **OK**。

好啦！正是如此。现在，正常的 **AUTO** 运行就是一个全局运行，程序将产生多个解。可以选择一个最大误差函数目标值（在 **Exit Controls** 列表上）来限制得出的解，从而滤掉不好的结果。也可能会发现增加些约束是必要的，例如总长（OAL），因为设计（的结构）形式可以有很多种。也建议使用 **DRAW** 属性（**Output Controls** 列表）。通常，可以得到许多解（例如本节中的例子），有一些比起始点好，但是，还是要再审查一下它的成像质量，看一看是否适合加工。

AUTO 还有许多其它的属性，包括 **MTF** 优化，光纤耦合效率，和用户自定义误差函数。在线 *Reference Manual* 是开始学习这些属性的最好课堂。

3.10 约束：问题和解决方法

下面这张表格是根据设计者应当约束什么，列出了各种问题和解决方法

法, 并且, 对每一种约束都给出了一个命令的例子。表格中没有完整地说明解决问题的过程, 而是给你指出一个解决问题的方向。记住下面这些要点:

- 约束太多会妨碍你找到一个好的结果。
- 确信有变量影响你正在约束的项。
- 如果是等于约束或者界限 ($<$ 或 $>$) 约束造成了问题, 可以使用最小化模式使约束接近目标值, 而不是精确地控制它。

关于约束和它们的使用, 在线 Reference Manual 有更详细的解释。

问 题	特殊约束列表 (AUTO 对话框)	命令例子
透镜 或透镜部分太长	Manufacuring&Packaging, Overall Length (surface range),	OAL S3..9<21.5
在某特定位置需要一个近轴瞳孔(虚拟面或者真实面)	Paraxial Ray Trace Data, YZ Paraxial Chief Height (surface, 设置目标值为零)	SCY S13=0
在某特定位置需要中间像(虚拟面或真实面)	Paraxial Ray Trace Data, YZ Paraxial Marginal Height (surface, 设置目标值为零)	HMY S15=0
畸变太大	Optical Definitions, Distortion Fraction Y (field number, 通常是有界的, 如果需要上下界, 输入两次)	DIY F3<0.025 DIY F3>-0.025 (相对畸变: 2.5%)
某个具体元件(面)的直径太大	Manufacuring&Packaging, Max Semi Diameter (surface number)	SD s9<25.5

需要线性 $f-\theta$	Real Ray Trace Data, Local Y Surface Coordinate (象面, 光线 1, 视场数, 计算 $f-\theta$ 目标值)	Y Si R1 F3=-127.8
除了一个很小的元件 外, 总厚度约束 OK	Manufacuring&Packaging, Overall Length (surface ,value)	ET s10<2.1 (跳过 MNE 等)
找不到一个想要的约 束	User Defined Constraints (用户自定义约束)允许用宏 指令和程序数据确定许多 约束条件。更详细的, 请参 考 User Constraints 和 Help	参考在线 Help 和/或 <i>Reference Manual</i>

第四章 分析

一旦完成了透镜设计,分析选项就可以让你用不同的方法来评估它的性能。从简单的光线追迹、到点列图,到以波动光学为基础的计算,例如 MTF、RMS 波前误差,点扩散函数(PSF),甚至于还包括衍射光束的传播。CODE-V 软件中这些选项的大多数都会有图表。本章中还将对选出的这些属性给出输入和输出实例。对程序所提供的分析宏指令也将给出指南性的论述。

目录

CODE-V 中的分析选项.....	72
诊断分析.....	76
几何分析.....	92
衍射分析.....	97
分析宏指令.....	103
多层膜设计.....	105

4.1 CODE-V 中的分析选项

一个光学系统的性能可以用多种方式来定义和描述。CODE-V 有多种分析方式，每一种又有多个选项。

提示：

多数分析属性都是真实的 CODEV 选项（在 **Command** 视窗中用命令 **GO** 来执行）。然而，一些属性实际上是用一个单一命令运行的 LDM 命令，而另外一些才真正是宏指令。这些分类仅仅在使用命令时才显出重要性，并且，在附录 A 的命令列表中以评论的方式进行注释说明。

4.1.1 诊断分析

诊断分析属性可以帮助你更详细地了解一个正在设计的光学系统。可以在 **Analysis>Diagnostics** 菜单中找到，并且，是以具有多种表示形式的真实（或者近轴）光线追迹作为基础。下面就是一些当你使用具体的诊断分析时的一些例子。

- 傍轴光线追迹（**Paraxial ray trace (FIO)**）可以显示出光瞳和中间像的位置。

- 实际的光线追迹（**Real ray trace (RSI, SIN)**）比较详细地显示出具体的光路，帮助设计者用标准光线就可以决定孔径尺寸和评估问题，避免进行其它的运算。

- 场曲（**Field Curves (FIE)**）是与视场有关的像差曲线，尤其是像散和畸变。

- 高斯光束追迹（**Gaussian beam trace (BEA)**）是表示“慢”光束的特性，最典型的是激光系统。能提供束腰和光斑尺寸的有关信息。

- 光瞳图（**Pupil maps (PMA)**）可以显示光程差 **OPD**（**Optical Path Difference**）在出瞳上的分布。表明光瞳的密集度和被拦截光线的位置。

- 视场图（**Field maps (FMA)**）是按照视场被网格化的一种形式表示各种分析结果，帮助设计者检验视场范围（或者像面）内的性能变化。

- 光线轨迹图（**footprint (FOO)**）显示一个指定表面上来自于所有视场和变焦位置的光线的范围。有助于查明由于某些孔径的尺寸不够对光线造成不希望有的拦挡。

一些诊断属性在前几章已经用过。另外一些属性将在本章中介绍。**Diagnostics** 菜单中有许多属性，一些比较专业（例如，双目视场曲线仅仅适用于某些诸如平视显示器之类的目视显示系统）。要了解更多的信息，请参阅在线 Reference Manual 或者 Help。

提示:

要学习 **Analysis** 菜单中某种属性的最容易的方法就是从菜单中选中它, 显示其输入对话框。然后, 敲击 F1 键就可以得到此项属性有关内容的帮助。许多帮助主题包含有很多页。使用双箭头键 (《》和《》) 移动相关的页码到你需要的主题。

4.1.2 几何分析

分析和评价整个系统的成像质量有多种方法, 通常使用追迹一组光线来模拟输出光束或者波前。对一个像差已经校正得非常好的理想光学系统来说, 衍射也会使该系统产生有限大小的像点。但是, 几何分析忽略衍射效应, 因此, 在几何分析的范畴, 一个理想光学系统 (对一个点光源) 形成的像点尺寸可以是零。

提示:

CODEV 里的几何分析和衍射分析属性都是基于光线的网格化。为了在系统的瞳孔范围内有一个良好的抽样, 重要的是要追迹足够的光线。通常是以缺省的形式运作, 但是如果有非球面、遮挡、或者其它特殊的属性, 你或许希望追迹更多的光线。大多数选项都有一个被称为 “直径上的光线数目” (NRD) 的属性, 用来控制光线密度。

下面是几何分析选项的部分项目:

- 点列图 (**Spot diagram(SPO)**) 是以光线为基础表示每个视场图像分布的几何形状。对成像质量提供一个良好的目测印象。
- 径向能量分析 (**Radial Energy Analysis(RAD)**) 是对点列图的一种定量分析, 给出包含有特定百分比能量的直径。
- 探测器分析 (**Detector Analysis(GDE)**) 是计算到达探测器 (尺寸和位置都是一定的) 上的几何光线的数量和能量。

4.1.3 衍射分析

以衍射为基础的计算是考虑光的波动性。除了光束传播选项 (**BPR**) 外, 所有的以衍射为基础的计算都是使用传统的光线追迹, 一直到系统的出瞳, 并在该处计算光线网格的 OPD 值, 瞳孔的形状 (由于孔径的原因) 和透射性 (由于切趾, 偏振效应和瞳孔像差的原因)。然后, 光瞳函数被变换计算, 并得到所希望的结果 (MTF, PSF 等)。

光束传播选项的工作原理却不一样, 要适当地考虑出瞳之前表面的衍射效应。对于 BPR 选项的有关讨论和实例, 请查阅在线参考手册 *Reference Manual*。

下面是以衍射为基础选项的部分项目。除了光束传播和耦合效率选项

外,以衍射为基础的选项都是多色的,使用在 LDM 中定义的波长和光谱权重。

- **MTF** (振幅传递函数) 用来确定系统的频率响应。诸如系统的清晰度和分辨率之类的特性都与 MTF 有关。

- **Point Spread Function(PSF)** (点扩散函数) 是计算一个点物体的像。实际上,其它几种计算,包括线扩散函数(**Line Spread Function(LSF)**),圆形区域能量(**Encircled Energy**) 和 探测器能量(**Detector Energy**),都可以从 PSF 中推导出,。

- **Wavefront Analysis(WAV)** (波前分析) 是计算多色均方根 (RMS) 波前误差,并且可以完成以波前为基础的最佳聚焦计算。

- **Partial Coherence(PAR)** (部分相干) 是一个特殊的,但也是很强的一个选项,主要是用于分析显微光刻系统,当然,它也可以被用于其它装备有部分相干照明的投影系统。

- **Beam Propagation(BPR)** (光束传播) 是使用特殊的方法对整个光学系统(不仅仅在出瞳位置)中实现光线和波前表达式之间的转换。对于此外的一些情况,具有慢光束和空间滤波器的系统中的自由空间光束传播是非常重要的。要特别注意用 BPR 取样。

- **Fiber Coupling Efficiency(CEF)** (光纤耦合效率) 是另外一个特定的、以 PSF 为基础的选项。它用来确定从一个光学系统耦合到一根单模光纤中的能量。

4.1.4 其它分析

与使用其它的类型一样,并没有完整地列出全部有用的属性。从菜单中选择一项,并且敲击 **F1** 键查看此项属性的帮助。

Analysis>Fabrication Support 菜单包含有几种与加工有关的分析选项:

- **Fabrication Data Tables(FAB)** (加工数据表) 是一份很实用的资料,表中显示出与加工有关的数据,包括非球面的系数表和干涉图 (.INT) 文件的显示。

- **Cost Analysis (COS)** (成本分析) 计算加工费 (blocking factor)、玻璃的成本和其它费用,估计一个设计 (与其它设计相比) 的相关比价。

- **Weight(WEI)** (重量) 计算光学元件的体积和重量。

Analysis>System 菜单研究的内容是一个透镜系统的非成像性质:

- **Spectral analysis(SPE)** (光谱分析) 可以将该透镜的各种光谱响应曲线 (滤光片, 探测器等) 组合成统一的一组光谱权。

- **Spectral transmission (TRA)** (光谱透过率) 计算系统的透过率,包括多层膜的影响。

- **Ghost and Narcissus (GHO,NAR)** (鬼像和冷反射像的分析) 是以近轴成像原理为基础、评价不希望有的二次像的选项。

● **Illumination(LUM)** (照度) 使用蒙特卡罗 (Monte Carlo) 法评价各种类型的点或者扩展光源的照度。

还有一些是分析公差影响的属性 (见第五章), 和许多由 CODE-V 提供的专用分析宏指令。

4.1.5 孔径在分析中的作用

按照表面孔径的用途, 分析计算被分成两种重要的类型:

● **Calculations that ignore apertures** (不考虑孔径的计算)。这包括大部分的诊断分析属性, 再加上自动设计 (不是一个分析选项, 而是一个重要的理解选项)。这些属性或者是使用瞳孔尺寸和渐晕系数来确定光束的尺寸, 或者在很少的几种情况下, 它们与光束的尺寸完全无关。

● **Calculation where apertures are essential** (必须考虑孔径的计算)。包括几何和衍射子菜单中的所有选项, 以及诊断选项光瞳图、视场图、光线轨迹图、猫眼图 (Catseye Plot) 和双目视场曲线图。

这是一个很重要的区别。

提示:

判断一种分析选项是否要使用表面孔径的经验就是看它是否要追迹一组光线。如果它追迹一组光线, 它就将使用孔径, 而且, 有可能还要输入通过入瞳直径上的光线数目 (NRD)。

如果孔径被用于正在运行的分析选项中, 就应当保证你已经合适地设置了一组孔径。何谓合适? 就是在一个或者几个严重地限制光线的表面上, 而不是光阑上有一个用户自定义孔径。如果没有自定义孔径, 至少要说明缺省孔径适合于你的透镜。如果只有一个视场, 或者一些表面在其附近有一个中间聚焦点, 那么, 缺省孔径可能会出现問題。

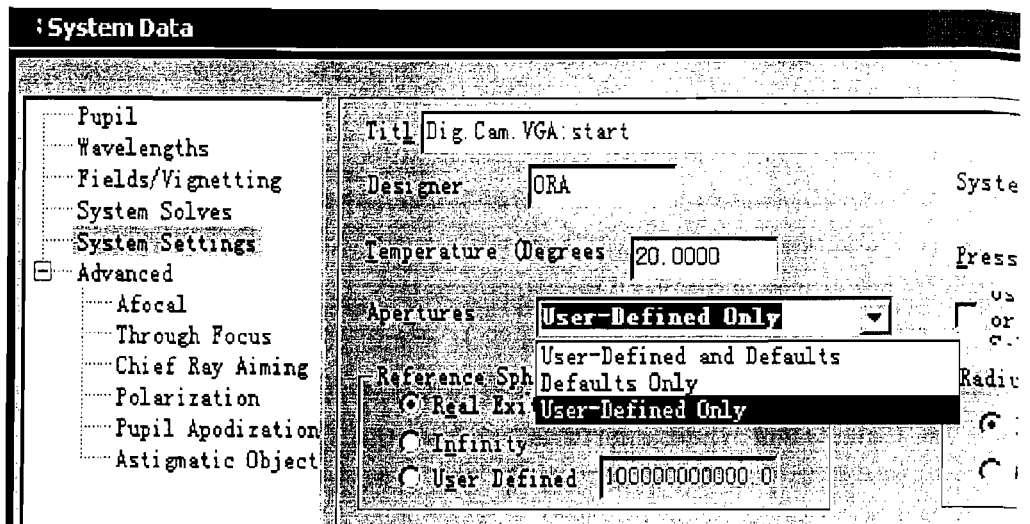
4.1.6 通光孔径的控制 (CA command)

假设已经在一些重要的表面上有了自定义孔径, 但是, 在某些位置 (特别是靠近像面的表面, 包括中间像面或者最终像面) 处使用 CODEV 计算出的缺省孔径仍然会有问题。最好的解决方法是用通光孔径控制 (Clear Aperture Control), 也称为使用控制的孔径, 关闭缺省孔径的审验。

这个控制是对每一个透镜进行设置 (也就是说, 不能对所有的透镜进行整体设置), 而且, 最安全的设置是 **User-Defined Only**。

1. 选择 **Lens>System Data** 菜单, 进入系统数据视窗的 **System Setting** 页中。

2. 从 **Apertures Used** 下拉列表中选择 **User-Defined Only**。



完成该项任务的命令是 **CA APE**。

CODEV 里关于孔径这个重要选项的更多信息，请参阅本手册的第十章，以及在线 *Reference Manual*（参考手册）2A-198 页上的“Defining Aperture”。

提示：

下面章节中的例子使用各种 CODEV 的样本透镜。为了描述简洁，仅仅给出文件名。可以使用 **File>Open** 菜单在插入目录设置这些透镜（子目录：透镜），或者使用 **New Lens Wizard** 打开每个透镜。也可以在命令视窗（Command Window）中用 **RES** 命令打开透镜。例如：

```
RES cv_LENS:eyepiece.len
```

4.2 诊断分析

这一节包含有几种诊断属性的例子。

4.2.1 近轴光线追迹（FIO）

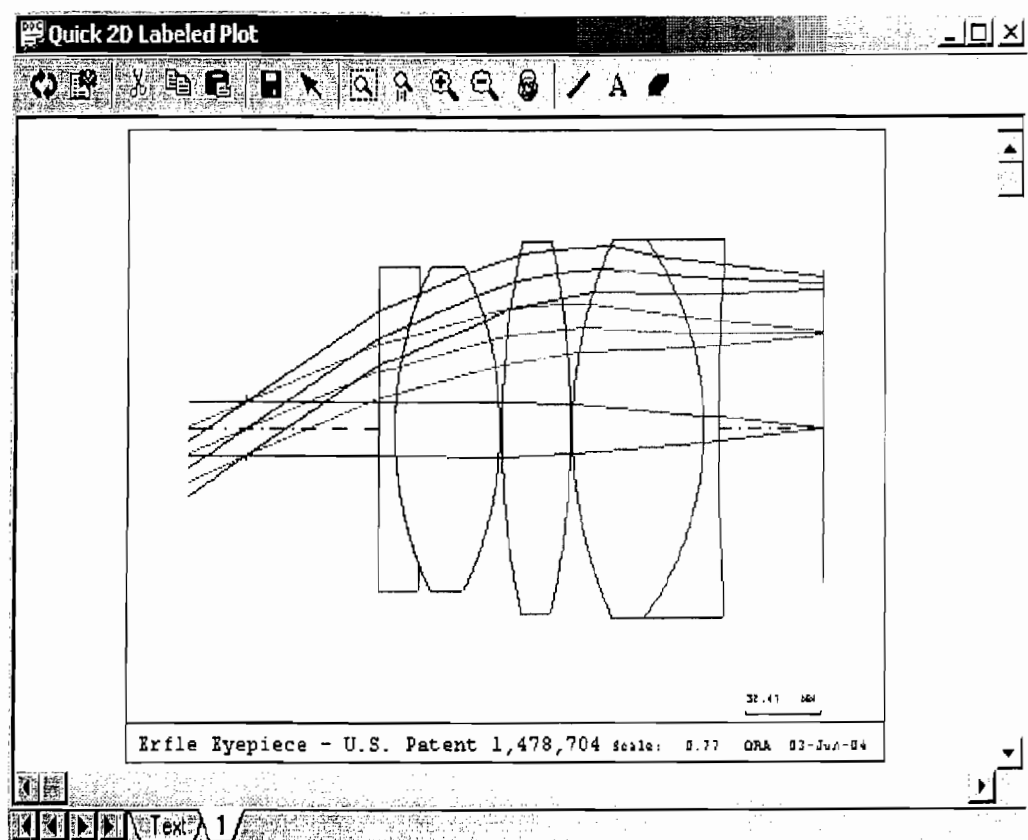
近轴或者初级光线追迹是真实光线特性的线性近似。现在，尽管使用计算机很容易实现真实光线的追迹，但是，有一些性质仍然使近轴光线追迹很有用。诸如 EFL(有效焦距)之类系统的性质就是近轴范围内定义的。近轴光线的斜率和坐标与曲率和厚度值是线性相关，根据近轴光线的性质可以间接地确定厚度和曲率，因此，对于求解很有用。

近轴光线追迹表只显示两条光线，近轴边缘光线（从物体中心到出瞳的

边缘)和全视场近轴主光线(从物体的最高点入瞳中心)。从这两条光线中可以推导出任何其它的近轴光线数据。

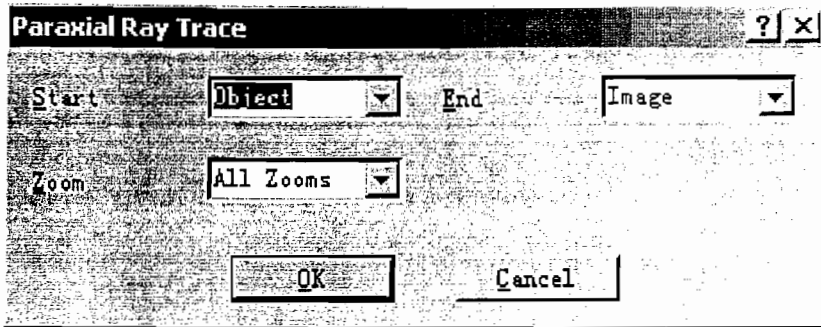
4.2.1.1 具体的操作

1. 打开透镜文件 `cv_lens:eyepiece.len`, 并且, 使用快速 2D 绘(Quick 2D Plot)绘制出一张视图。



这是一个艾夫尔(Erfle)目镜, 按照标准形式绘制这类系统的视图, 眼点位置放在相反的方向作为左面的孔径光栏。

2. 选择 **Analysis>Diagnostics>Paraxial Ray Trace** 菜单, 显示出 **Paraxial Ray Trace** (近轴光线追迹) 对话框。



3. 在对话框中敲击 **OK**，认可缺省表面的范围（从物面到像面）。

FIO SO..I
Erfile Eyepiece - U.S. Patent 1,478,704
Position 1, Wavelength = 587.6 NM

	HMY	UMY	N * IMY	HCY	UCY	N * ICY
EP	10.000000	0.000000		0.000000	0.577350	
STO	10.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.577350	0.577350
2	10.000000	0.001156	-0.003020	33.728590	0.360279	0.567166
3	10.007539	0.005516	0.135831	36.078878	0.394515	1.066609
4	10.257796	-0.037271	-0.122028	53.979050	0.366711	-0.079298
5	10.232394	-0.037219	-0.000153	54.228986	0.174741	0.563429
6	9.123487	-0.073558	-0.106654	59.435223	0.153623	-0.061981
7	9.073353	-0.069962	-0.010255	59.539927	-0.045893	0.569019
8	4.986197	-0.064171	-0.180426	56.858869	-0.017019	-0.899549
9	4.567578	-0.100000	-0.093615	56.747844	0.021612	0.100935
IMG	0.000000	-0.100000		57.734974	0.021612	

Text

尽管透镜视图中显示的是真实光线（不是近轴光线），但是，当你解释近轴光线表中的数据时仍然可以参考该视图。

- 光栏位于透镜的前面，因此，在这个例子中的入瞳（EP）数据和光栏面的数据是一样的。

- 表面 1（光栏）处的边缘光线高度（HMY）是 10mm，是入瞳直径（EPD）的一半。物距是无穷远，因此，这条光线在 S1 表面上是一条准直光线（与 Z 轴平行），所以，边缘倾斜角（UMY）是零。HMY 只有在像面

处才为零，因此，该系统没有中间像。

- 光阑处的近轴主光线高度(HCY)为零，与其它光瞳面处一样（其它的所有表面处的 HCY 值都不是零，因此，该透镜没有中间像，而且，没有显示出瞳数据）。输入的主光线（UCY）斜率是 0.577350，是该透镜最大半视场角 30° 的正切值。

- 像面处近轴主光线的斜率（UCY）比较小（0.02），这就表示透镜在像空间几乎是远心光路（所有视场的主光线几乎都与光轴平行）。设置主光线斜率的解为 0.0 是指定像侧远心性的一种方法。

近轴光线追迹数据是基本数据，但在，对于理解和确定一个透镜的性能却是很有用。

4.2.2 真实光线追迹（RSI,SIN）

有时候，仅仅追迹几条光线就可以帮助你发现关于孔径、边缘厚度等方面的问题。 **Ansys>Diagnostics>Real Ray Trace** 控制着哪些光线被追迹、确定它们的各种选项和光线输出的格式。这项属性没有任何视图输出，但是，可以使用 **View Lens** 选项帮助设计者查看视图，在透镜的视图中设置同样的光线就可以帮助你解释表中的输出。

4.2.2.1 确定简单的光线组

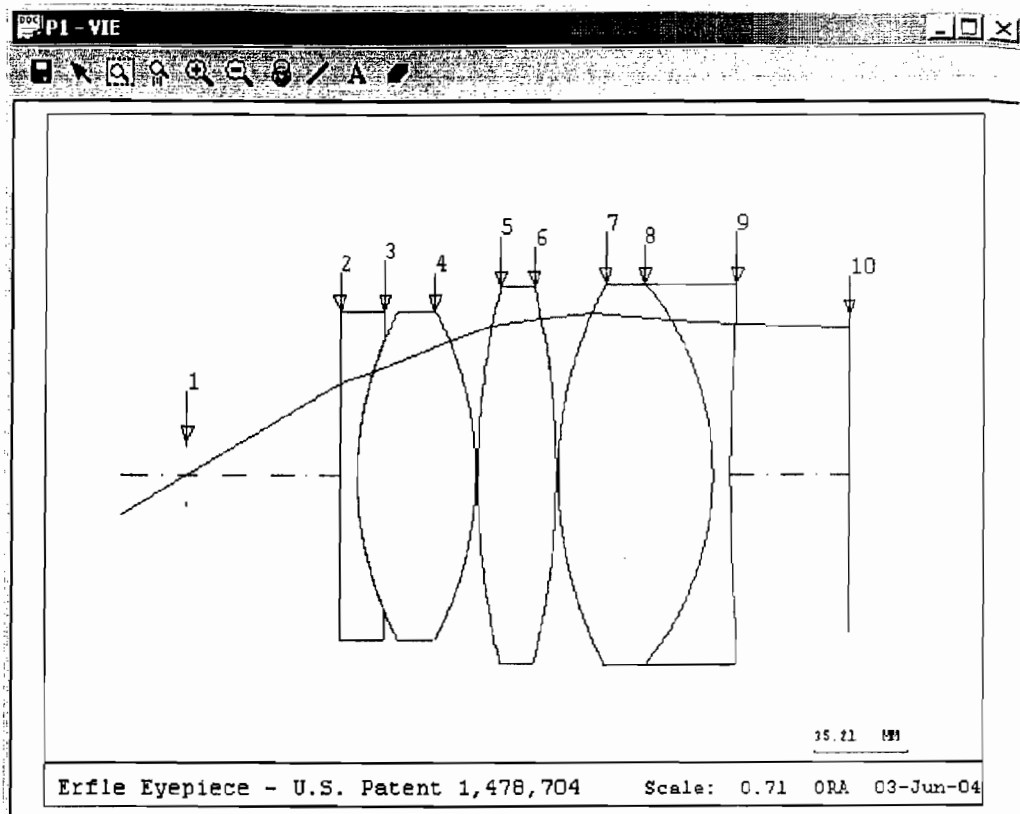
简单的光线组是由它们在物面上的位置（光线开始的地方）和在入瞳内的位置（进入透镜的地方）来确定。物体上的位置或者是由每个方向（X、Y）上的最大物体高度的相对值 X 和 Y 给出，或者指定透镜的某一个视场，当然，这个视场是根据该透镜的数据（F1，F2 等）所确定。瞳孔位置的确定类似——它被定义为近轴瞳孔半径在 X 和 Y 方向的相对值，或者从一个预先确定的视场中选择一条标准光线（例如，R1 主光线，R2+Y 边缘光线，等）。注意，如果你指定了视场的个数和标准光线的数目，那么将会对该条标准光线加上一个渐晕因子。当指定了相对视场或者瞳孔坐标时，就不再使用渐晕因子。

4.2.2.2 具体操作

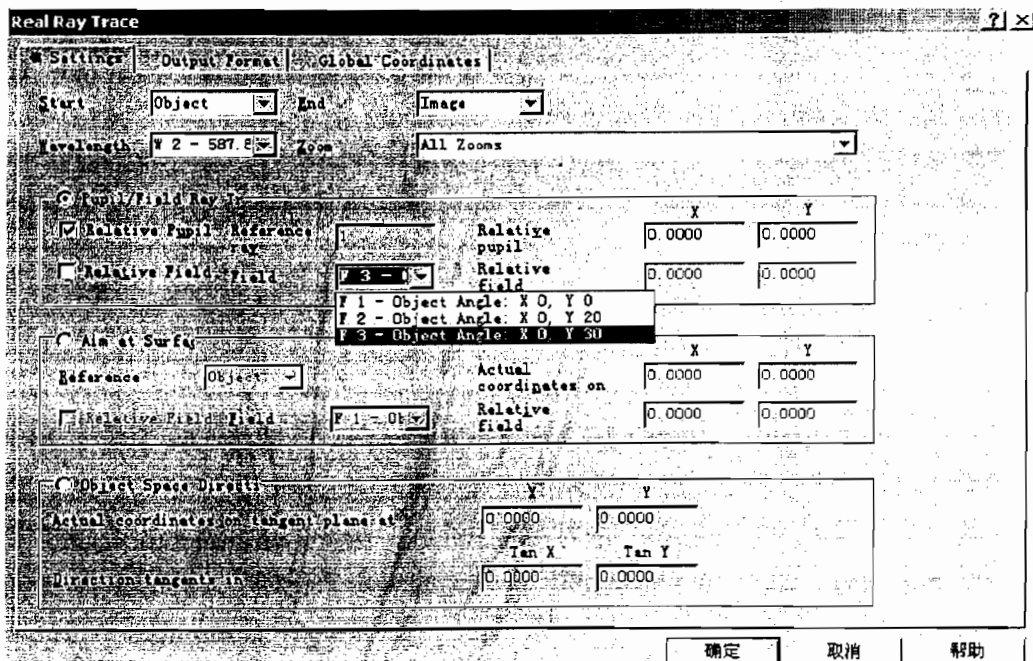
1. 打开透镜 **CV_LENS:eyepiece.len**。

2. 这与上面近轴光线追迹例子中使用的是同一个透镜，如果选择相同的真实光线，可以将真实的和近轴的光线数据进行比较。因为要与近轴主光线相对应，所以，将追迹真实的全视场主光线。这条光线被显示在下面的视图中作为参考。由于 **VIEW** 不是当前讨论的重点，我们将直接提供给你这条可以绘出该视图的命令，从而，会节约一些时间。在 **Command Window** 命令视窗中敲入下面显示的命令行，按下 Enter 键：

VIEW;RFR NO;RSI F3 0 0 ; NSR SUR SA ; GO



3. 选择 Analysis>Diagnostics>Real Ray Trace 菜单。显示出 Real Ray Trace 对话框。



4. 敲击 **Relative Pupil** 审验框, 并且, 分别对 X 和 Y 输入 0.0 值。这些就是确定一条主光线的缺省值, 是瞳孔的中心。

5. 从 **Field Number** 下拉菜单中选择 **F3**。

这是预先设置的视场中的一个, 代替输入相对视场的坐标, 应当是 (X=0,Y=1)。

6. 单击 **OK**。

RSI SO..I W2 F3 0 0

Erfile Eyepiece - U.S. Patent 1,478,704
Position 1, Wavelength = 587.6 NM

	X	Y	Z	TANX	TANY	LENGTH
OBJ	0.00000	-0.562E+12	0.00000	0.00000	0.57735	
STO	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.57735	0.00000
2	0.00000	33.63000	-0.17076	0.00000	0.32939	67.26001
3	0.00000	37.83281	6.06522	0.00000	0.37317	13.43385
4	0.00000	48.68582	-10.22438	0.00000	0.33853	31.04203
5	0.00000	54.19926	5.38058	0.00000	0.13935	17.19444
6	0.00000	56.77767	-5.91043	0.00000	0.10306	18.68179
7	0.00000	58.75518	12.59595	0.00000	-0.09107	19.28957
8	0.00000	56.04778	-16.09463	0.00000	-0.05380	29.85208
9	0.00000	54.71818	2.09566	0.00000	-0.03962	24.74955
IMG	0.00000	52.99156	0.00000	0.00000	-0.03962	43.61427

OPD = 0.000 Waves

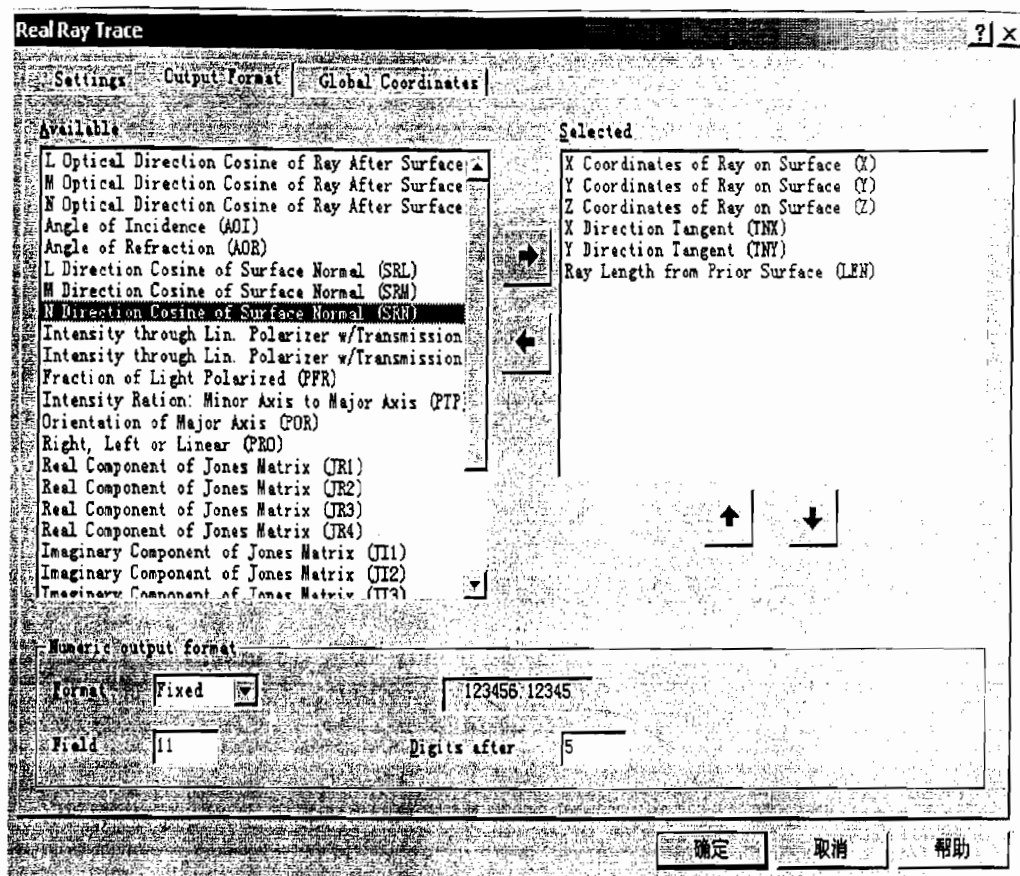
Text

把这张表和前面 78 页上 (原文 83 页) 的近轴光线追迹表相比较。Y 对应于 HCY (近轴主光线 Y 向高度), TANY (光线和 Z 轴之间的夹角在 YZ 平面内的正切值) 对应于 UCY (近轴主光线的倾斜角)。由于光线位于 YZ 平面内, 所以, X 坐标为零。对每一个表面来说, 都是沿着光线来测量 **LENGRH** (长度)。

注意, 光线高度 (Y 与 HCY) 是相近, 但是并不完全一样——对于有一定视场和孔径的透镜来说, 近轴光线追迹只是一个近似。尽管初始值是相同的 (0.57735, 是 30° 的正切值), 但是, 近轴光线的斜率有很大的差别 (TANY 与 UCY)。真实光线和近轴光线在像面上的高度差就是畸变——在这个例子中大约是 8% (可以用 **Analysis>Diagnostics>Field Curves** 菜单来查验该值, 其结果没有显示出)。

4.2.2.3 输出格式 (ROF)

上面的输出是缺省显示,但是有许多可以被显示的参数。在 **Real Ray Trace** 对话框中的 **Output Format** 图标可以让你从一长串清单中选择要显示的内容。在下面选中的屏幕上,已经增加了方向余弦 L 和 M,方向余弦 N 也将要被选上。当你改变格式 (**ROF** 命令) 时,必须重新运行光线追迹以便于看到新的格式。



如果是命令的形式,则刚刚被追迹的光线就是 **RSI F3 0.0 0.0** (RSI 代表相对单条光线)。在线帮助可以为通过该对话框追迹单条光线组提供许多其它选项的信息。在打开对话框后,按下 F1, 会有一个很好的开始。

4.2.3 光线的像差曲线 (RIM)

光线像差曲线是绘制横向像差 (垂直坐标: 在透镜部件的像面上测量) 相对于归一化后孔径光阑或者入瞳位置 (水平坐标: 一般的, 不加标记, 终端代表 100% 的归一化光阑或者瞳孔) 的曲线。有时候, 这些曲线被称为“光扇图”或者“边缘光线图 (rim ray plots)”, 这就是 CODEV 中命令 RIM 名字的来历。

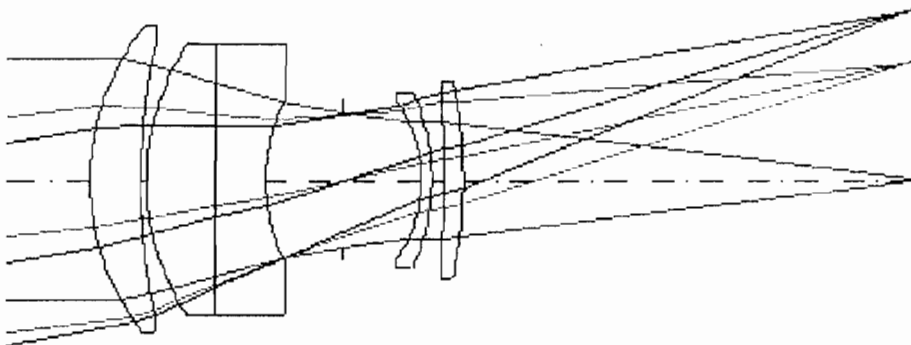
4.2.3.1 一般说明

所有的视场和波长都被绘在唯一的一幅显示图中（变焦系统中的每一个变焦位置对应于一幅视图）。对每一个视场都要追迹子午（Y-Z 平面）和弧矢（X-Z 平面）光扇。通过下面的方式来表示渐晕：在入瞳内发生渐晕的地方停止绘制曲线。

像差曲线的形状可以帮助你识别存在像差的类型和程度。例如，抛物面形状存在彗型像差，而原点处曲线的斜率表示的是离焦量，如果随视场变化，表示的就是场曲。

4.2.3.2 具体操作

1. 打开透镜文件 **CV_LENS:telephot.len** 。

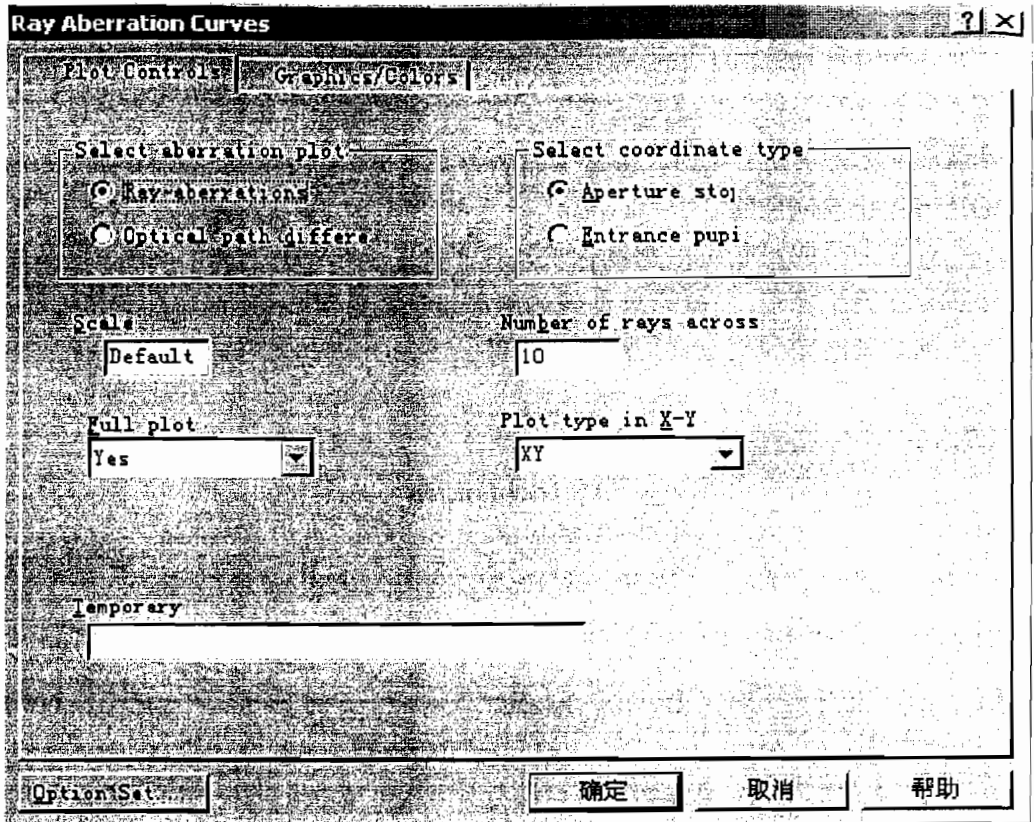


2. 对于无需输入就可以完成的快速缺省绘图，在快速分析工具栏（Quick Analysis）上直接敲击 **Quick Ray Aberration Plot**。

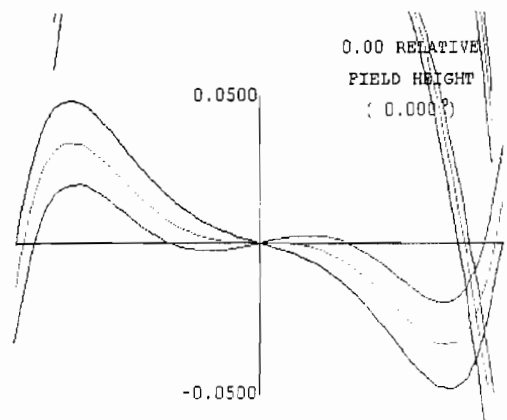
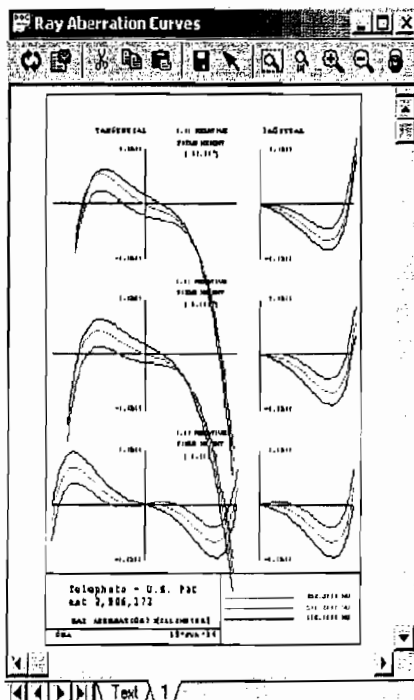


实际上，这是运行了一个绘制可以被自动缩放的光线像差曲线的宏指令（输出没有被显示），而且，在输出视窗的文字列表（从 **ANA** 选项进入）中也可以以列表的形式显示光线扇的数据。

3. 一般情况下，选择 **Analysis>Diagnostics>Ray Aberration Plot** 菜单。显示出 **Ray Aberration Curves** 对话框。



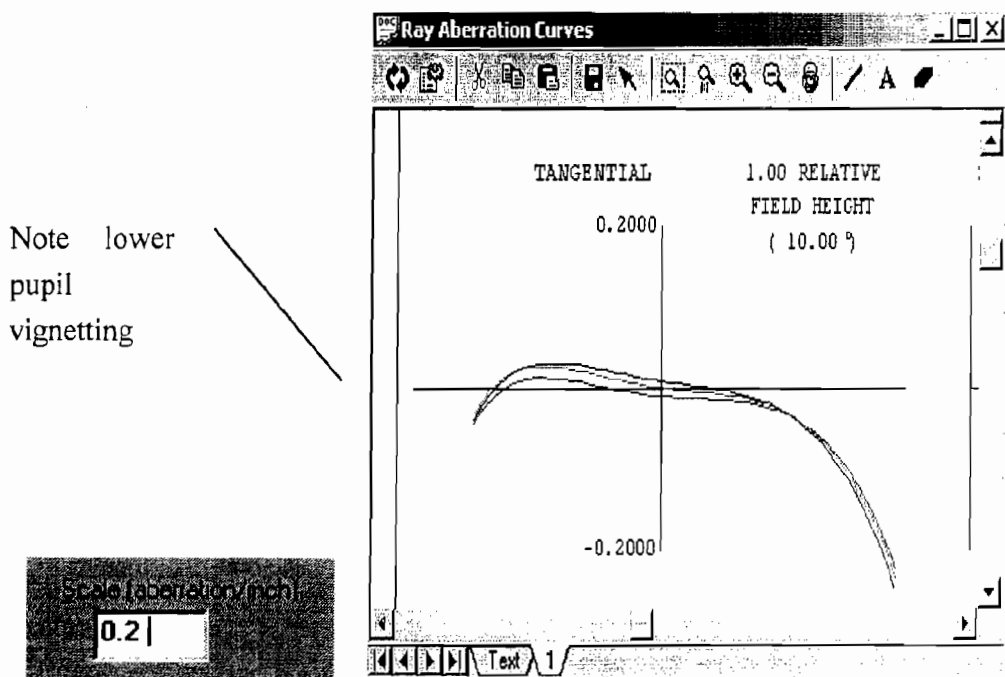
4. 敲击 **OK**，认可缺省设置，并且运行该选项。下面的输出形成在一个带有标记的输出视窗中。



RIM 不能自动按比例缩放到适合的数据——它使用标准缺省值（对于该系统，是 0.05mm），而不考虑它看上去如何。这意味着你不可能认为一个性能比较差的系统得到了很好的矫正，但是，这是一个小优点（总是可以用鼠标进行缩放，确信分析视图上的比例）。再次提醒一下，快速光线像差绘图选项（**Quick Ray Aberration Plot**）能自动进行比例缩放（请写一个隐含的宏指令），因此，如果喜欢，总是可以使用该选项。

5. 敲击设置（Setting）键，并且，在标有 Scale（Aberration/Inch）的地方输入数值 0.2，然后，敲击 **OK**。

注意，术语 *Aberration/Inch* 是指全尺寸硬拷贝（hardcopy）曲线图中的绘图比例。这一项与随系统的尺寸无关，尽管数据和绘图标注都使用正确的系统尺寸（通常是 mm）。



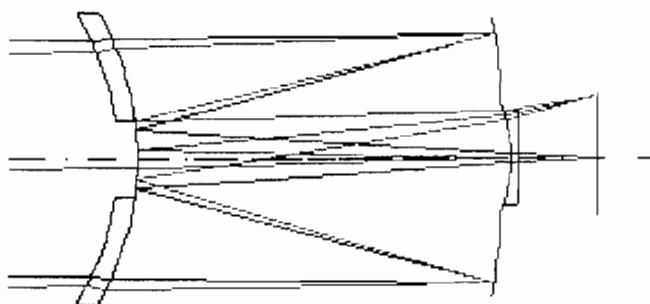
0.2mm/英寸的图形看起来更合理一些。三种波长轴外曲线的间隔表示色差（横向色差）。开口向下的轴外曲线表明主要是慧差。如果希望进一步搞清楚如何根据像差来解释光线像差曲线的形状，可以阅读任何一本关于光学设计的参考书。

4.2.4 光瞳图（Pupil Map（PMA））

光瞳图（PMA）选项把光程差（OPD）和其它几个量描述为出瞳中位置的函数。这组波像差数据是衍射分析属性，例如 MTF 和 PSF 的基本输入，而且，被看作是一种诊断分析，因为它提供像差和瞳孔形状的信息，其中，瞳孔的形状可以从表面孔径的数据中间接地推出（通过光线追迹）。

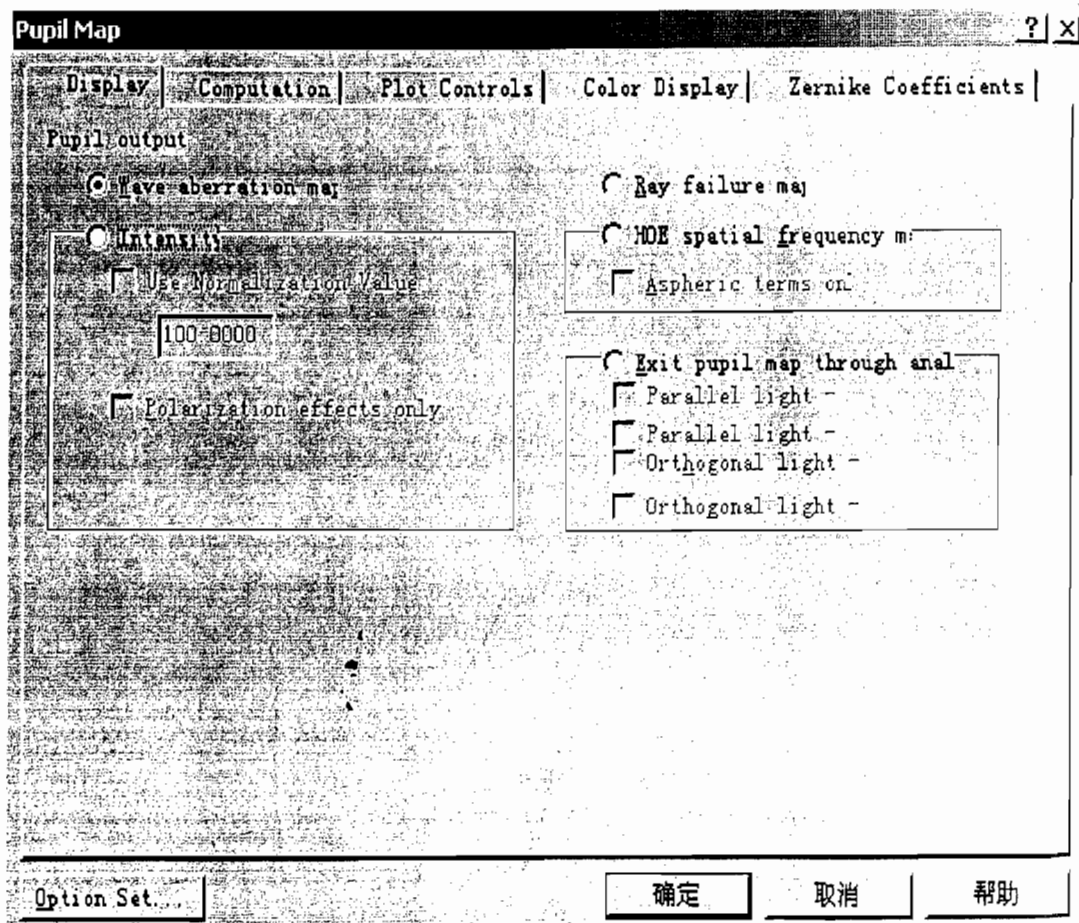
4.2.4.1 具体操作

1. 打开透镜文件 `cv_LENS: maksutov.len`。



这是一个折反射（反射/折射混合）物镜，基本上是一个反射式望远照相物镜。它有一个中心遮挡，而且，只包含一种波长，因为，它对每种波长、每个视场和变焦位置产生各自单独的输出，所以，对使用 PMA 就很有利。

2. 选择 **Analysis>Diagnostics>Pupil Map** 菜单。显示出 Pupil Map 对话框。

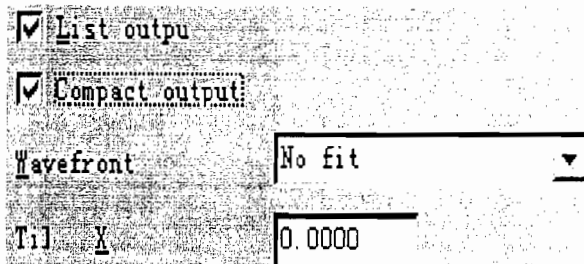


3. 在 **Display** 列表上, 保持缺省设置 **Wave aberration map**。

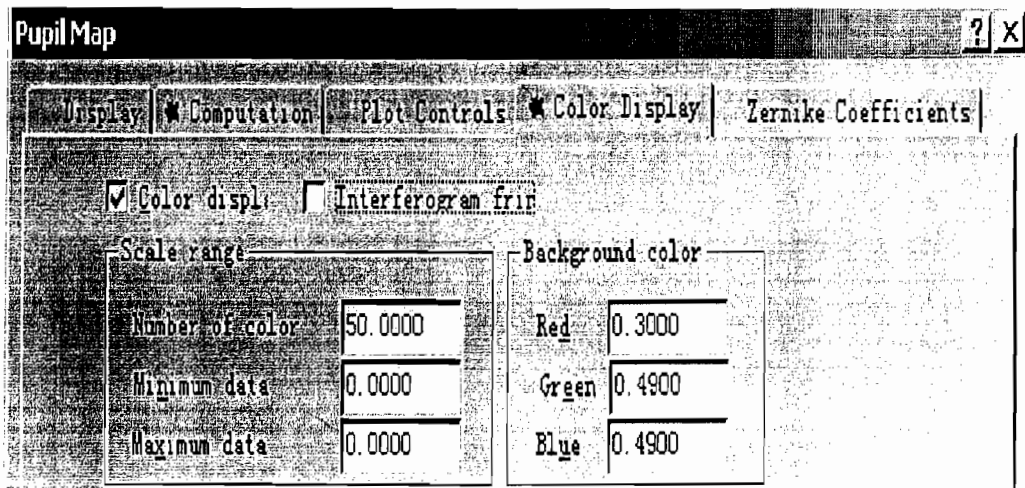
提示:

这是可以被显示的五个量中的一个, 包括光瞳密度 (PIN) 和被拦截的光线图 (RAC)。当你发现不希望被阻挡的光线被阻挡时 (例如, 当你注意到在某些选项如 MTF 中, 被追迹光线的数目过于少时), RAC 就是一个非常有用的显示。

4. 在 **Computation** 列表中, 敲击 **Compact output** 栏 (从文本图中删除了空白行)。

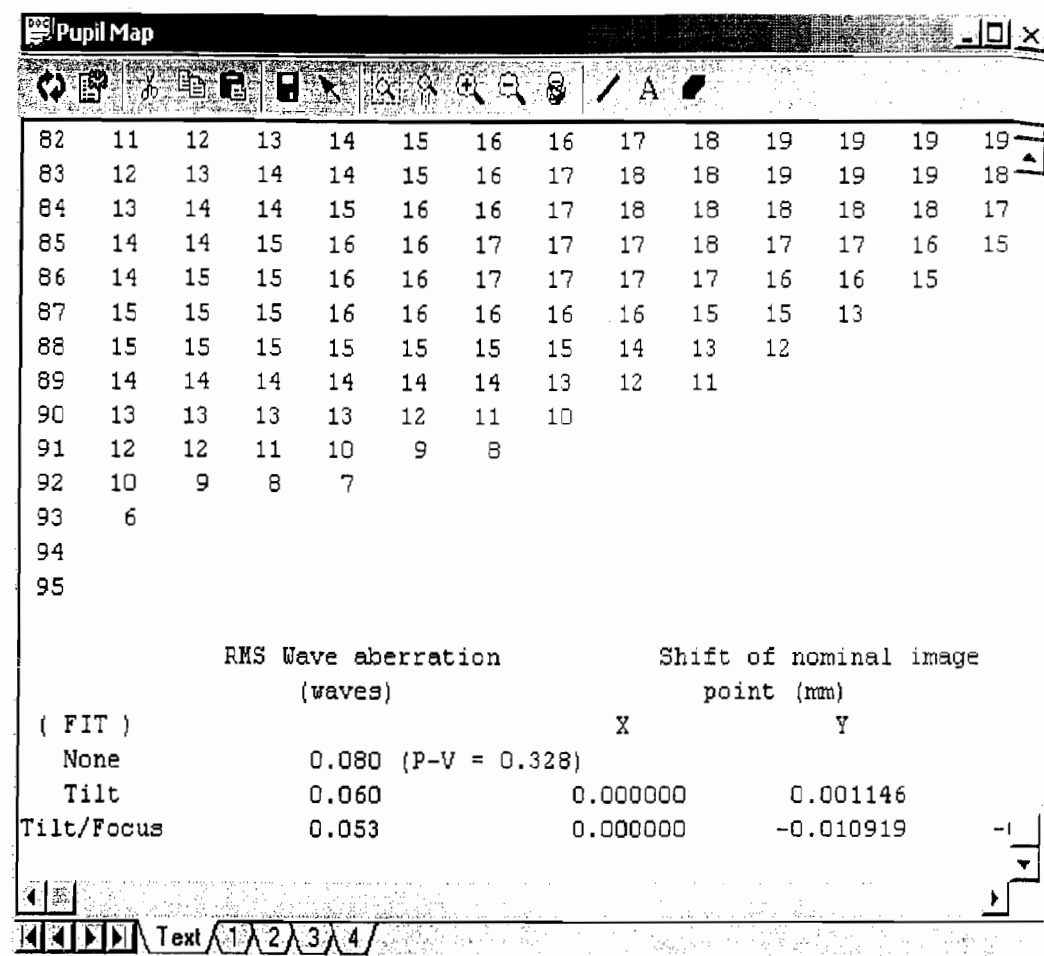


5. 在 **Color Display** 列表中, 确信 **Color Display** 已经被审验, 而 **Interferogram fringes** 没有被审验。

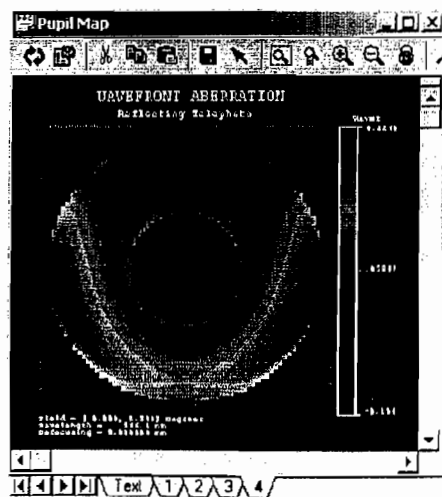
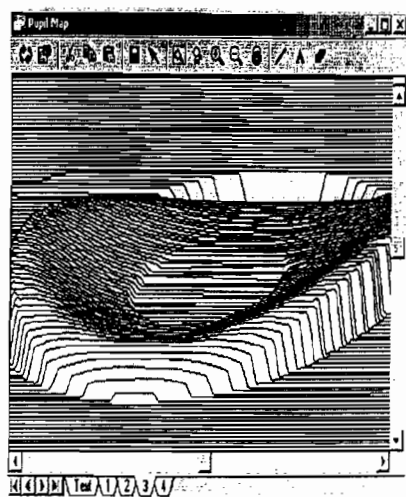


注意, 还有其它一些列表, 包括被用来产生能够匹配波前数据的 Zernike 多项式的那项列表。其它的列表在这个例子中不需要。

6. 敲击 **OK** 运行 PMA。



PMA为每一个视场产生一个文本显示,一个3D投影图和一个画有影线的光栅图。文本输出包括大的显示图(64×64个数据块内嵌在128×128个网格中,缺省设置)和显示在每个视场数据块底部的波阵面匹配信息(替换掉带有tilt和focus的RMS)。



文本视图非常详细，但是图表的形式比较容易理解。3D 投影图对波前的形状给出一种想象。画有影线的光栅显示以彩色编码的形式提供同样信息，并且，清晰地表明出光瞳的形状和中心遮挡。

PMA 选项很有用，尤其是与衍射（以波动为基础）计算有关的属性中，例如 MTF 和 PSF。

4.2.5 光线轨迹图（FOO）

光线轨迹图是指表面被照射区域的形状，是由所有视场和变焦位置发出的光线轮廓（边界）来确定。光线轨迹图选项（FOO）就确定了能够毫无阻拦（或者，有计划的阻拦）地通过各个视场和变焦位置发出的全部光线所需要的表面孔径。它也有一个可以作为任意表面上多视场点列图的栅格模式。

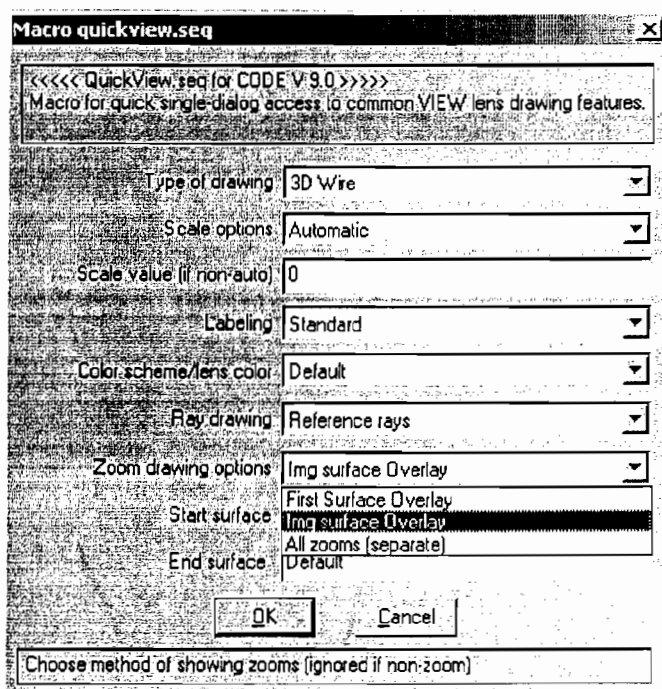
4.2.5.1 具体操作

1. 打开透镜文件 CV_LENS:scanlens.len

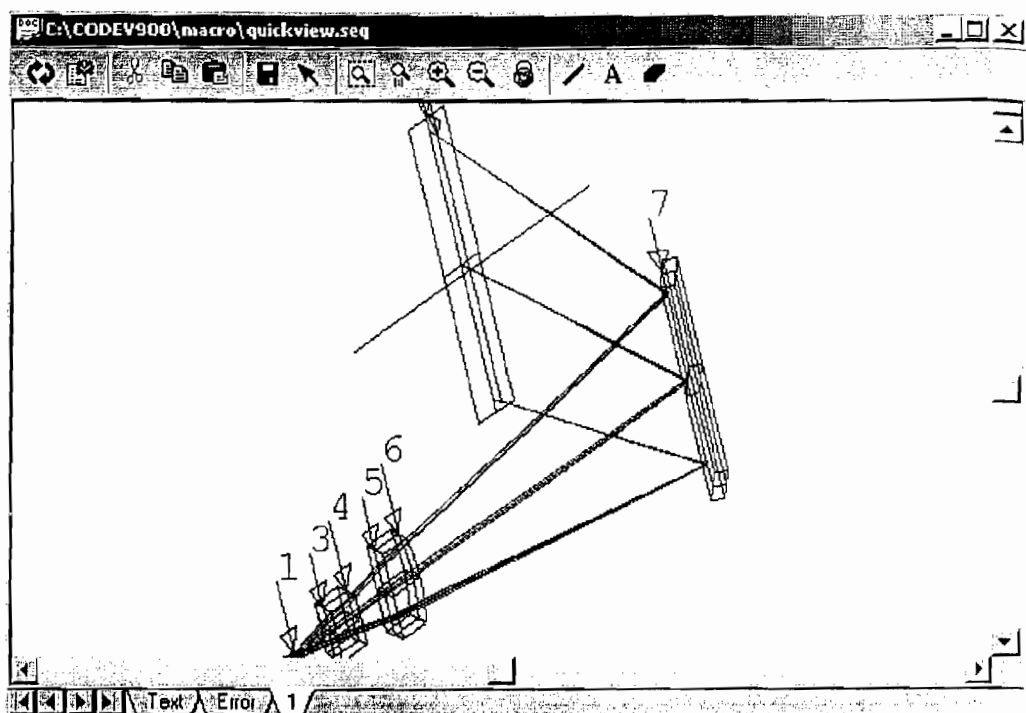
这是一个三视场模式的 $f-\theta$ 扫描物镜（变焦的内容将在第九章中讨论）。一个 3D 视图是很有用的。

2. 选择 **Tools>Macro** 菜单。在宏指令对话框中，使用浏览键[...]设置提供的宏指令 **Quick View.seq**，然后，敲击 **Run** 键。

显示出宏指令的输入对话框。为了增加到工具栏（**Tools>Customize** 菜单）中，这是一个有用的宏指令。

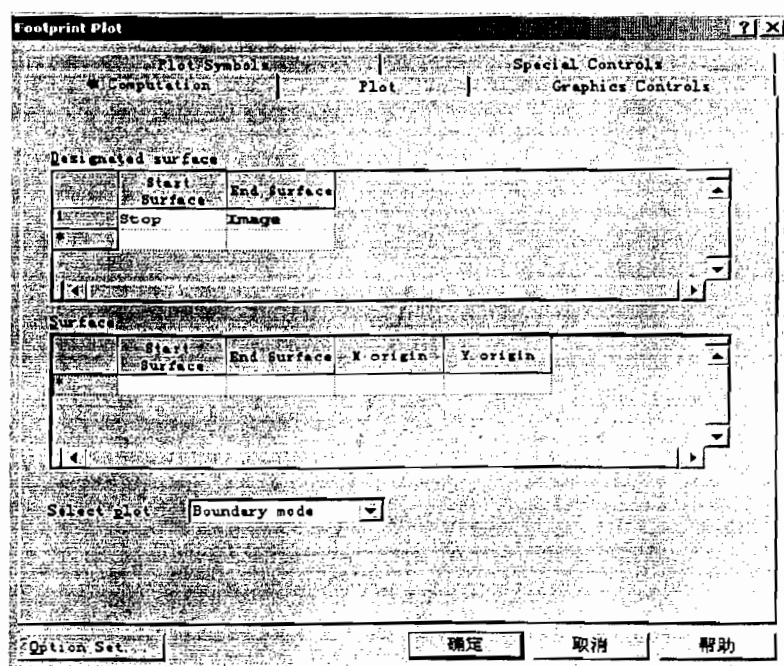


3. 为了与上述的视图匹配, 改变宏指令对话框的设置, 并且, 敲击 **OK** 运行宏指令。显示出下面的输出。



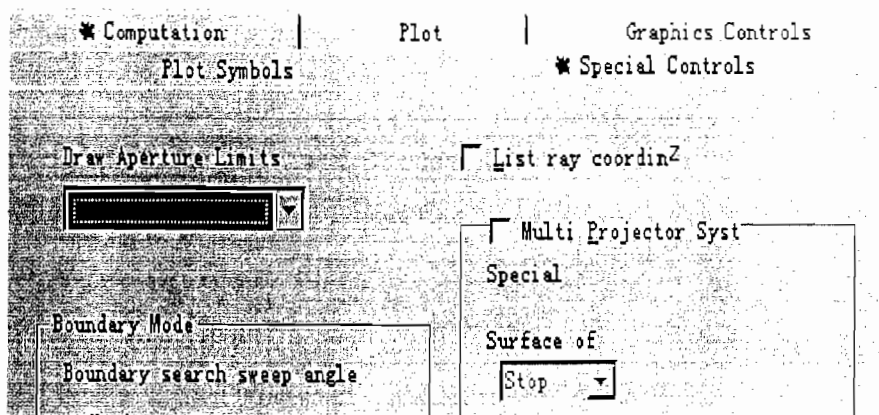
标有数字的 3D 透镜图 (来自 **VIEW** 选项) 有助于理解 **FOO** 的结果。

4. 选择 **Analysis>Diagnostics>Footplot** 菜单。显示出 **Footprint plot** 对话框。

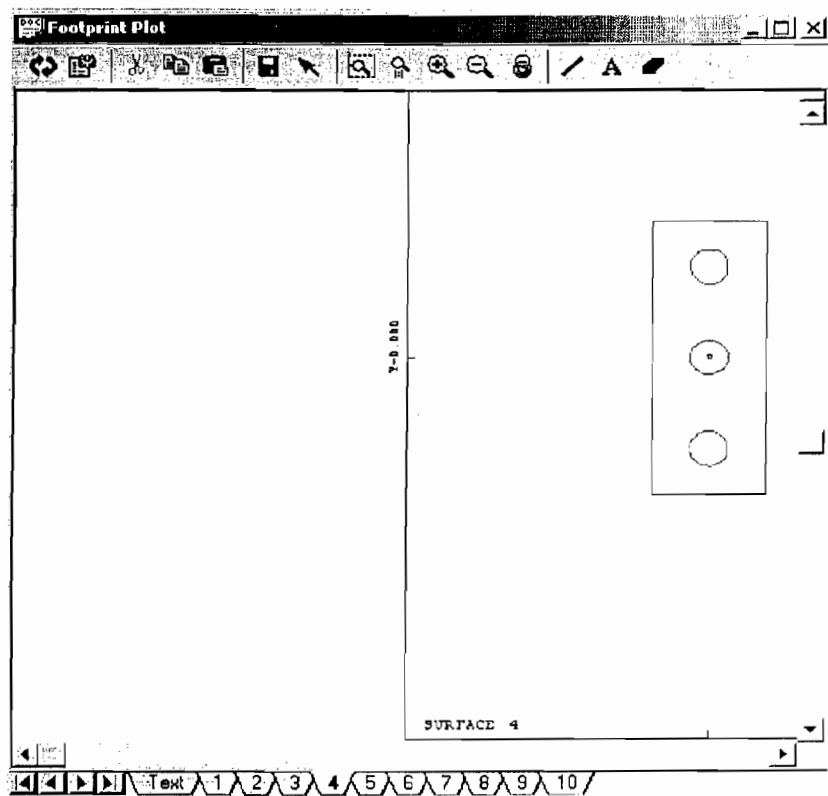


5. 在 **Designated Surface Range** 中双击 **End Surface** 格，并且，将它改变为 **Image**。这将会在所有表面上形成光线轨迹图。

6. 在 **Special Controls** 列表上，从 **Draw Aperture Limits** 之下的清单中选择一种颜色。



7. 敲击 **OK**。显示出下面的输出。



上面视图中的输出是显示第 4 面上的光线轨迹图。注意，矩形代表该表面上的矩形孔径（见 **Review>Apertures**）。三个变焦（扫描）位置中每一

个发出的光束都是圆形，而且不会被系统中任何一个孔径拦截。

4.3 几何分析

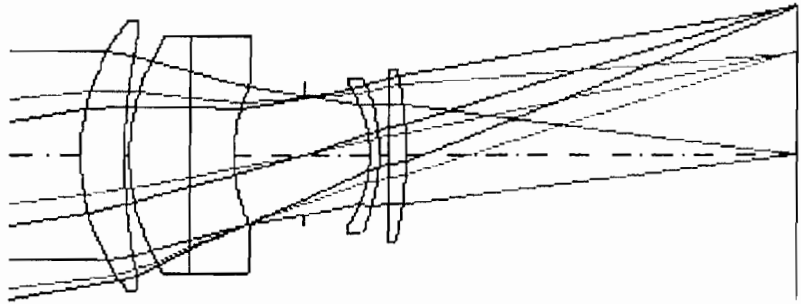
虽然 CODEV 中的大多数属性是以几何光线追迹为基础，但是，只有极少数追迹光线网格、涉及表面孔径和忽略衍射效应的选项被列在几何分析类型中。

4.3.1 点列图 (Spot Diagram (SPO))

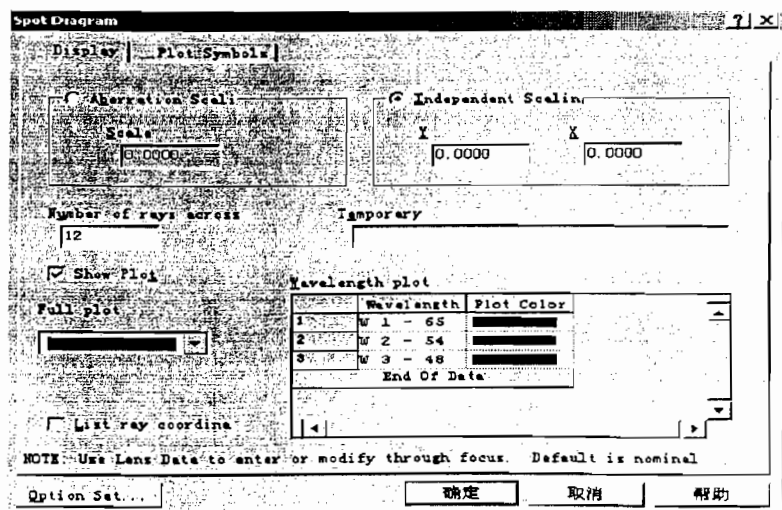
点列图 (SPO 选项) 显示图像的几何结构。他们对于非衍射受限系统特别有用。画一个彩色点列图 (每个波长用不同的颜色来表示，程序中缺省表示) 也能有助于理解色差。

4.3.1.1 具体操作

1. 打开透镜 CV_LENS:telephot.len。这与前面光线像差曲线图例子中使用的是同一的透镜。

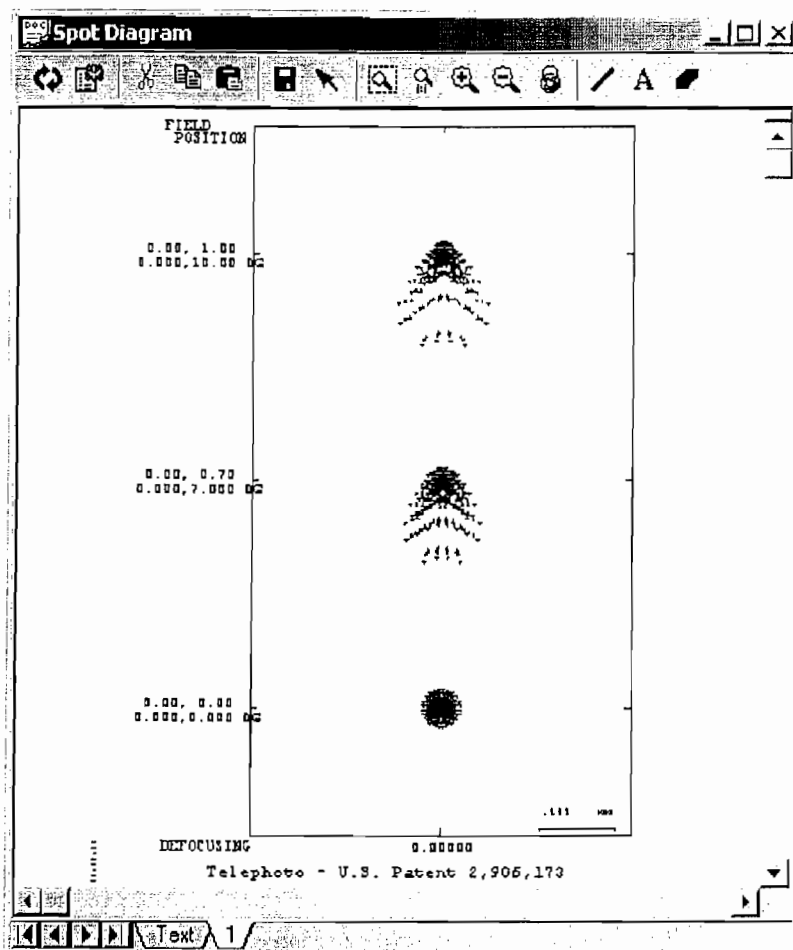


2. 选择 Analysis>Geometrial>Spot Diagram 菜单。显示出 Spot Diagram 对话框。



尽管自动比例尺是缺省值,但是,你可以设置一个比例因子,改变被追迹光线的数目,改变标注和颜色编码。

3. 在这个例子中,缺省是 **OK**, 因此,敲击 **OK**, 运行 **SPO** 选项。下面是输出结果。

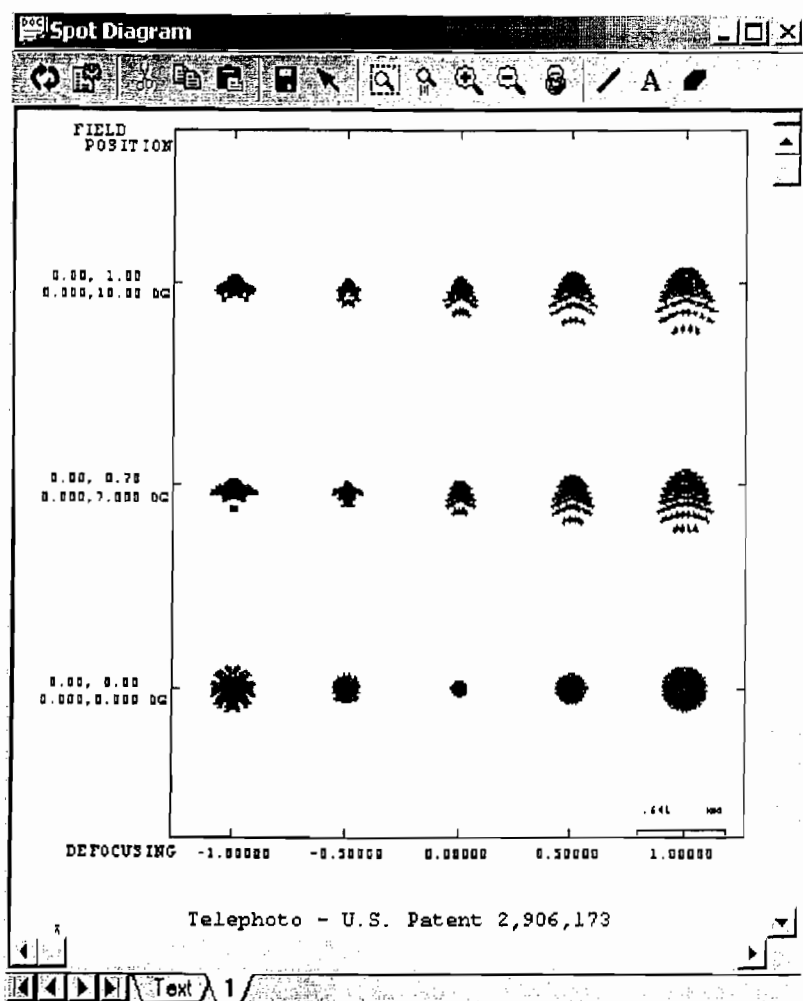


SPOT 最初的输出结果是图形输出。对所有的被 **LDM** 定义的波长、视场、聚焦位置和有效变焦位置,都要追迹一组在入瞳中被均匀分布的矩形光束网格,一直到像面。在垂直方向绘出各种视场位置,同时在水平方向绘出多个聚焦位置(如果在 **LDM** 中已经被确定)。一张表示出希望被追迹的光线数和到达像面的光线数的表格被显示在 **Text** 视窗中。其差值就表示被孔径和遮挡物拦截掉的光线。列出的还有每个视场光斑的 **RMS** 尺寸和光斑重心到主光线的距离。

4.3.1.2 离焦点列图

如果在 **LDM** 中定义了离焦参数(选择 **Lens>System Data >Through Focus** 菜单),就可以显示离焦点列图。用这种方式最多可以绘画出有 18 个焦

点位置的曲线。如果在 LDM 中被定义，SPOT 将自动绘出这些离焦位置。下面的例子是 5 个位置的光斑图，从 -1mm 开始，间隔为 0.5mm。



4.3.2 径向能量分析

使用径向能量分析选项 (RAD) 来计算包含在最小半径内的能量百分比—每个视场的几何点列图的径向能量分布。可以把这种分析与所使用的探测器的尺寸联系在一起，或许有一个目标值，例如要求在探测器的直径范围内所包围的能量是 80%。

4.3.2.1 计算

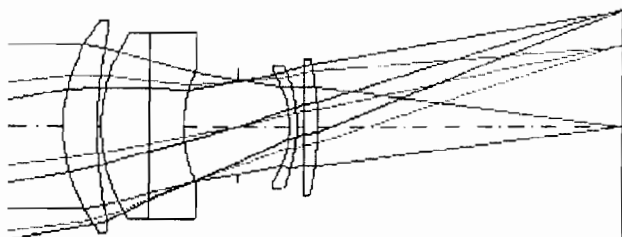
径向能量分布，也被称之为被围能量，可以在几何光线追迹点列图的基础上提供量化的光斑尺寸。入瞳内一组均匀分布的矩形光束被追迹到像面位置按照 LDM 中定义的波长、视场、焦点位置和动态缩放位置。每个光线被假设都含有与它的波长权重成比例的能量（在 LDM 中的 WTW）。

像面上，被围能量可以通过计算不同半径的园内所包含的光线来确定。

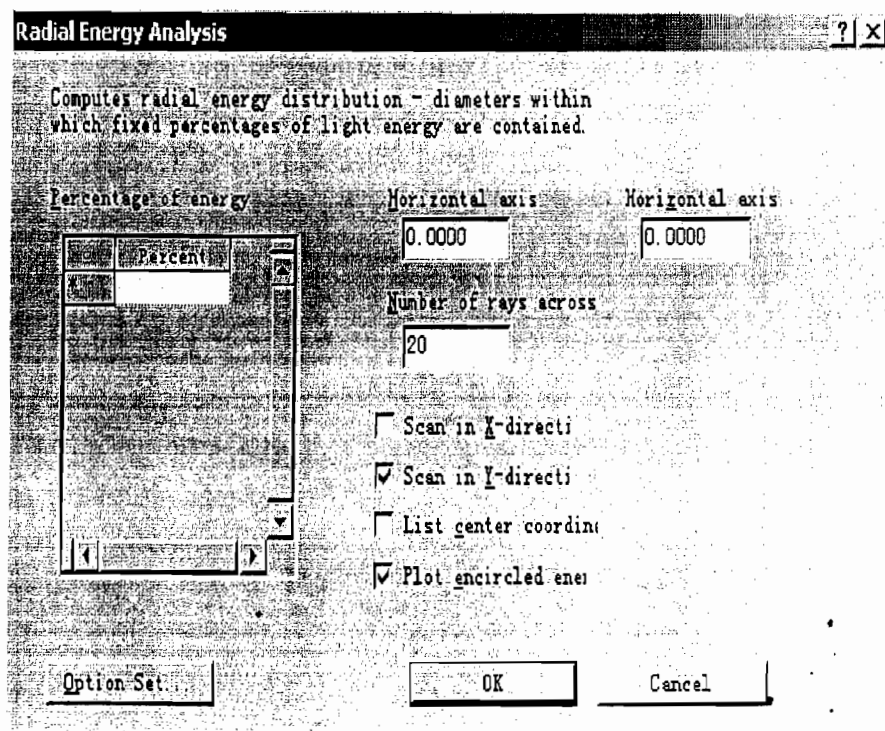
为了找到含有指定百分比能量的最小尺寸的圆斑, 需要改变圆斑的直径和位置。

4.3.2.2 具体操作

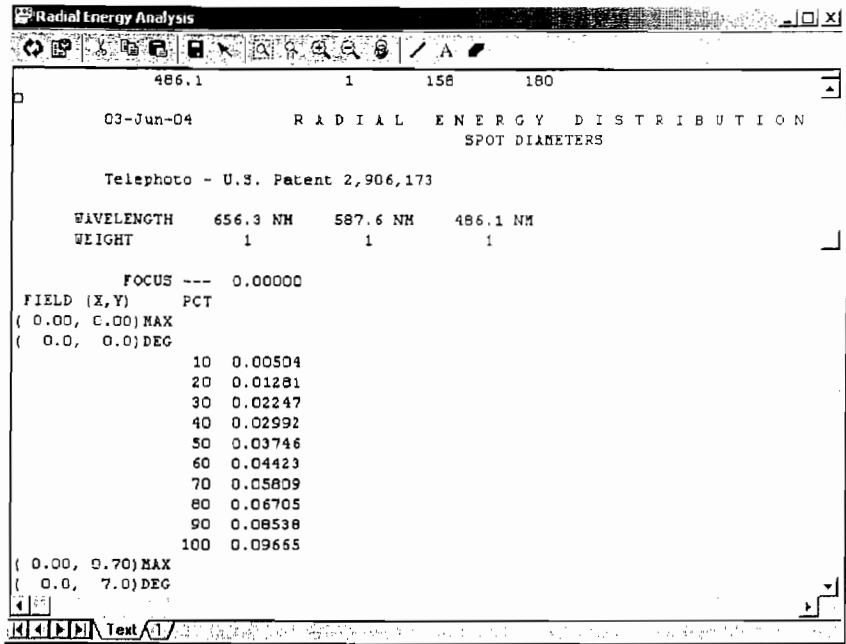
1. 打开透镜 **CV_LENS:telephot.len**。这与前面光线像差图和点列图例子中使用的是一样的透镜。



2. 选择 **Analysis>Geometrical>Radial Energy Analysis** 菜单。
显示 **Radial Energy Analysis** 对话框。

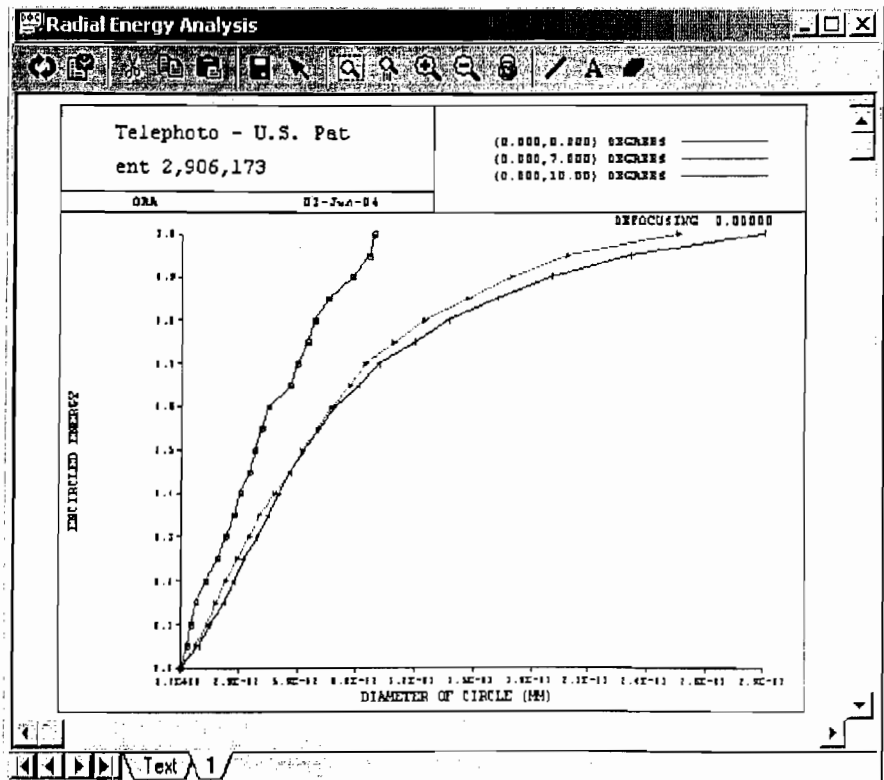


缺省假设包含了标准的百分比 (10, 20 等等), 但是, 也可以跳过这一步, 输入你希望有的特定百分比数。文中的 *Scanning* 是指能够确定包含各个百分比能量的最小圆斑尺寸的中心点。对于这个系统来说, 该缺省值是合适的。

3. 敲击 **OK**, 产生下面的输出。.

文本输出对每个视场显示一份列表, 如果在 LDM 中定义了离焦位置, 还要增加一些列。注意, 已经显示出光斑的直径。

所有视场的曲线输出都放在一张曲线图上。点列图中被良好校正的光斑曲线会有一个大的斜率, 反之, 斜率小就表示是一个大的, 比较模糊的光斑。



注意,如果在前面的点列图例子中定义了离焦位置,而且,还没有删除,那么,你就会看到额外的输出。在文本输出列表中会对每一个聚焦位置显示一行,同时显示该焦点位置时的曲线数据列表。

4.4 衍射分析

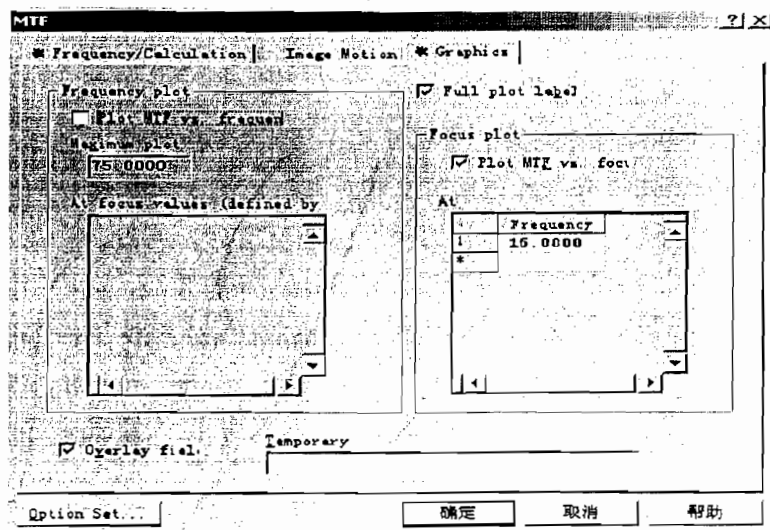
衍射分析计算考虑光的波动性,因此,即使是一个得到理想校正的系统所形成的像点也是一个有限大小的尺寸,并且,有一定的频率响应。这里给出的三个例子并没有包括在 11 个 **Analysis>Diffraction** 菜单目录中。其它选项的输入与这些例子相同,对于更详细的内容和更多的例子,请参考在线 *Reference Manual*。

4.4.1 MTF

在本手册的第 2 章和第 3 章中,广泛地讨论过 MTF 的使用和对结果的解释。MTF 主要是分析光学系统空间频率的响应。会给出有关 MTF 频率曲线的几个例子。

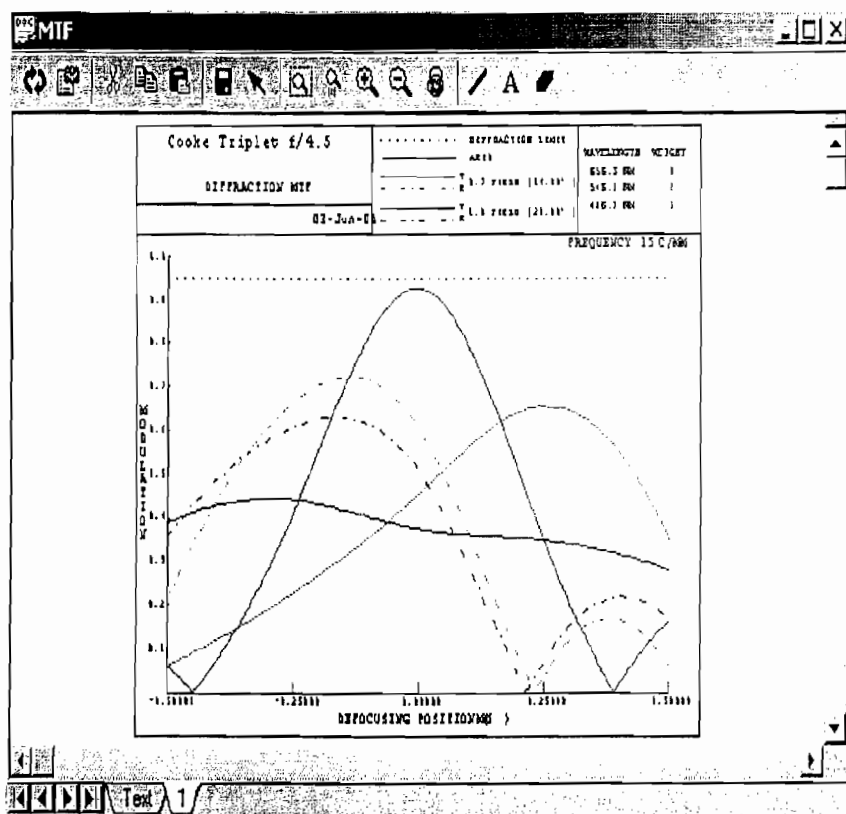
没有包括的一项内容是离焦 MTF 曲线。到此为止,我们得到了一条具体空间频率下,是焦移函数的 MTF 曲线。焦移的数据必须在 LDM(系统数据表)中被提供。下面是快捷方式的一个例子。

1. 打开透镜文件 **CV_LENS:cooke1.len**。
2. 选择 **Lens>System Data** 菜单并且进入 **Trough Focus** 页。
3. **Number of Focus Positions**(焦距位置数)输入数值 5,在 **First Focus Position**(第一个聚焦位置)输入-0.5,在 **Focus Position Increment**(聚焦位置增量)输入 0.25。
4. 选择 **Analysis>Diffraction>MTF** 菜单, **Maximum Frequency** 输入 75, **Increment in Frequency** 输入 15。
5. 敲击 **Graphics** 键,如下所示输入数据。



6. 敲击 OK

形成下面的输出结果。



4.4.2 点扩散函数

点扩散函数选项会提供了详细的, 包括所有的衍射效应在内的图像结构信息。如同使用所有的以衍射为基础的选项一样, PSF 是根据真实光线追迹的 OPD (光程差) 进行计算。这就可以保证像差、不对称性、孔径、遮挡、等因素的影响全部都被包括了。

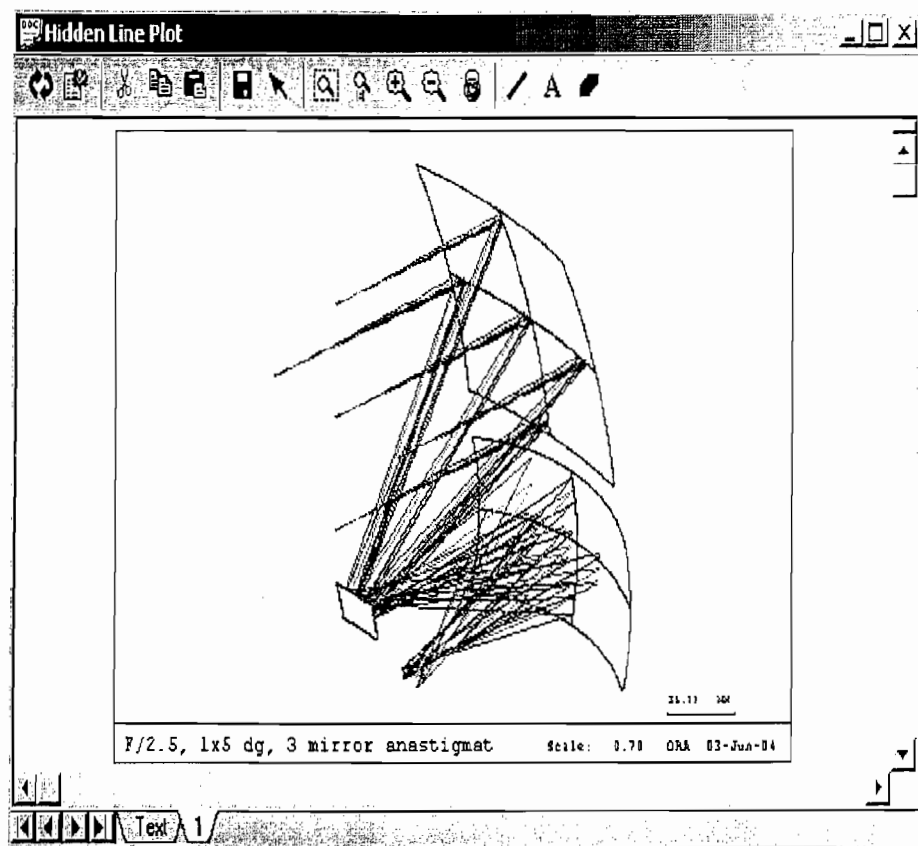
4.4.2.1 计算方面的考虑

由一组在出瞳面上被计算出光程差的光线, 点扩展函数选项首先计算瞳函数。然后, 将该瞳函数放入付里叶变换网格, 并且, 使用快速付里叶变换 (FFT) 来计算 PSF。因为使用的抽样网格数目有限, 所以, 必须小心有像差的系统在光斑尺寸较大时溢出栅格。对于校正好的系统, 缺省的栅格尺寸 (128×128) 可以很好地工作。在线 *Reference Manual* 提供关于栅格尺寸参数如何相互制约的信息。参阅第 5 章, 在 PSF 选项“输入和计算的讨论 (Discussion of Input and Computation)”一节中的“像质评价 (Image Evaluation)”。

4.4.2.2 具体操作

1. 打开透镜文件 **CV_lens:threemir.len**。

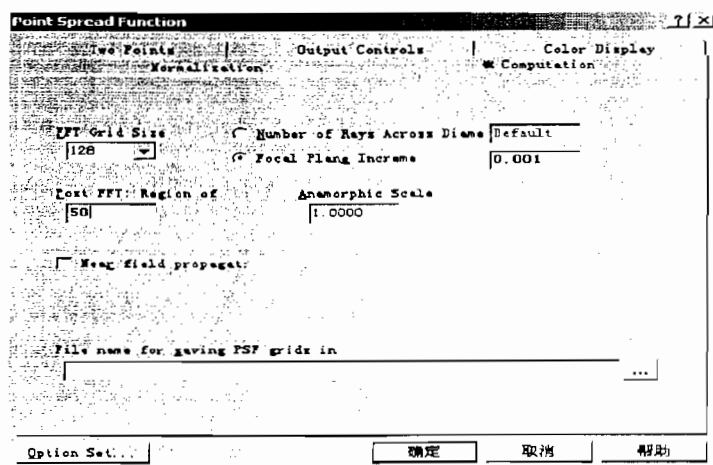
下面是一个表明系统大概轮廓的 **Quick Hidden Line** 的绘图示例。



这个设计全部由反射表面组成，包含有倾斜和偏心的矩形反射镜。

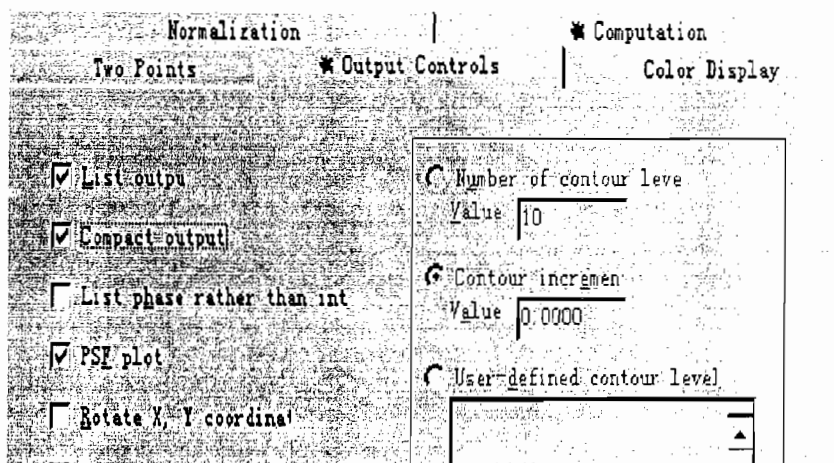
2. 选择 **Analysis>Diffraction>Point Spread Function** 菜单。

3. 敲击 **Computation** 键，并且改变焦平面增量为 0.001mm 和变化范围为 50。

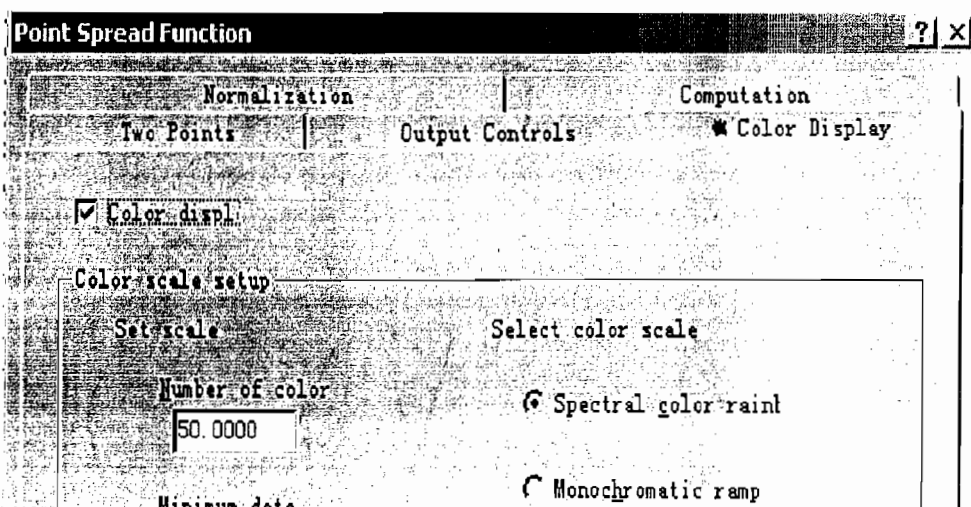


通常情况下, 应该首先使用缺省值 (栅格的增量为 0.0006mm)。然后, 改变焦平面的增量, 从缺省值改为更方便的值。只要抽样是保持在出瞳 (在文本输出中检查瞳孔栅格) 和像面的范围内, 通常可以在放大因子是 2 之内变化。视窗中 Region of Interest (感兴趣的范围) 允许在 128×128 栅格内“变焦”, 包括了本节中感兴趣的数据 (50×50 格)。

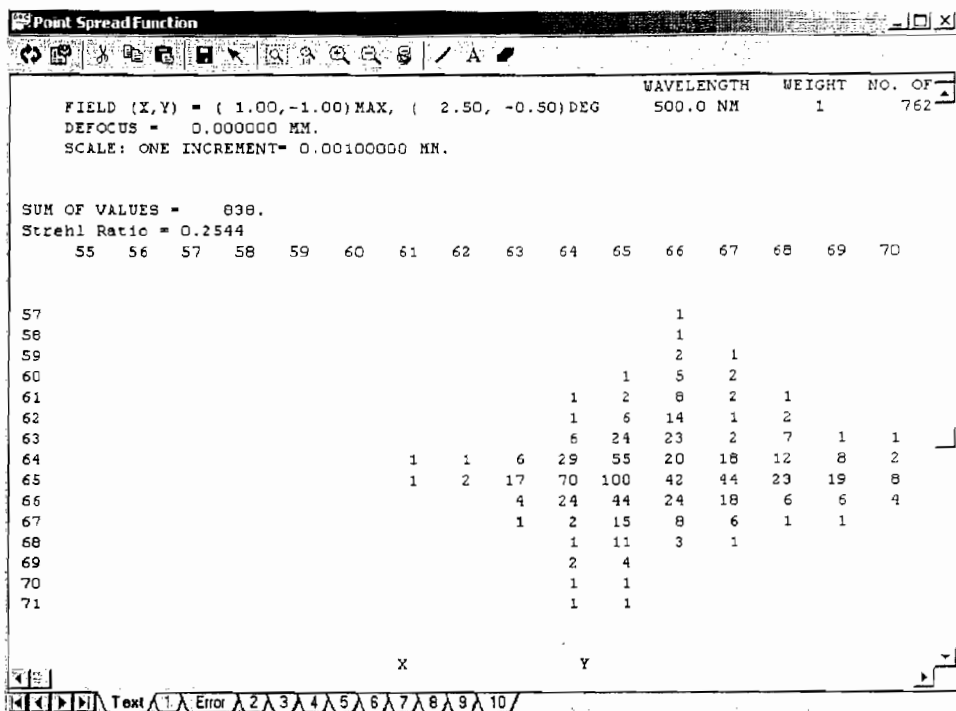
4. 敲击 **Output Controls** 键, 选择 **Compact output** (选中 **List output** 和 **PSF plot** 项)。



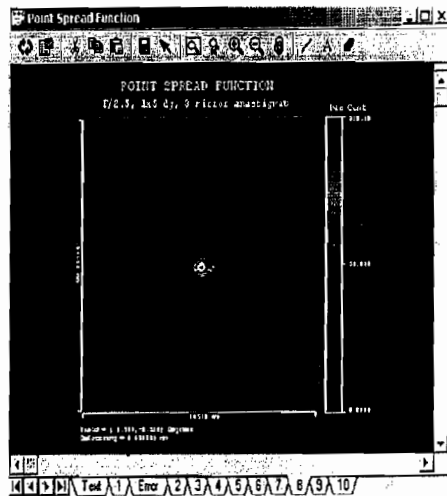
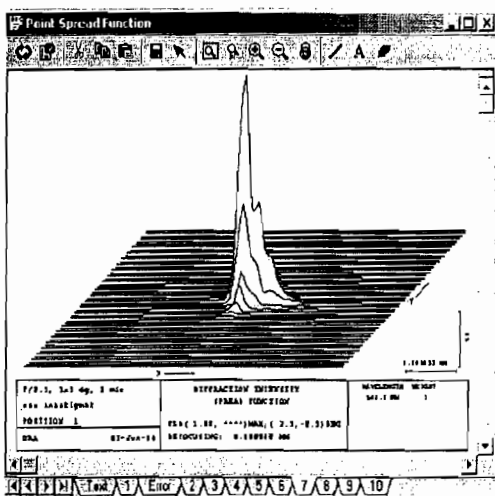
5. 敲击 **Color Display** 键, 而且, 敲击 **Color display** 复选框, 然后, 敲击 **OK**。



文本输出显示的是五个视场 (F4) 中的一个。它表示的是被缩放了 100 倍的“原始数据”相对强度值, 网格的单元格是 0.001mm , 栅格的中心点 (65, 65) 位于主光线上。



图形输出将该分布表示为 3D 投影和假颜色光栅图（两个图表示的都是该透镜五个视场中的第四个视场，F4）。



4.4.3 波前分析

RMS(root mean square 均方根)波前(WAV)误差对于某些光学系统来说是一个很有用的评价指数。WAV(波前分析)选项追迹一组通过入瞳的,由各个视场发出的,每种波长的标准光线,计算每条光线的光程差 OPD。对每个视场的光线扇都要计算多色加权 RMS。

提示:

OPD (光程差) 是一条实际光线和一条参考光线 (通常是主光线) 之间光程长度之差。对于一个理想的球面波前来说, 光瞳每一个点的光程差都是零。光程差通常都被表示为波数

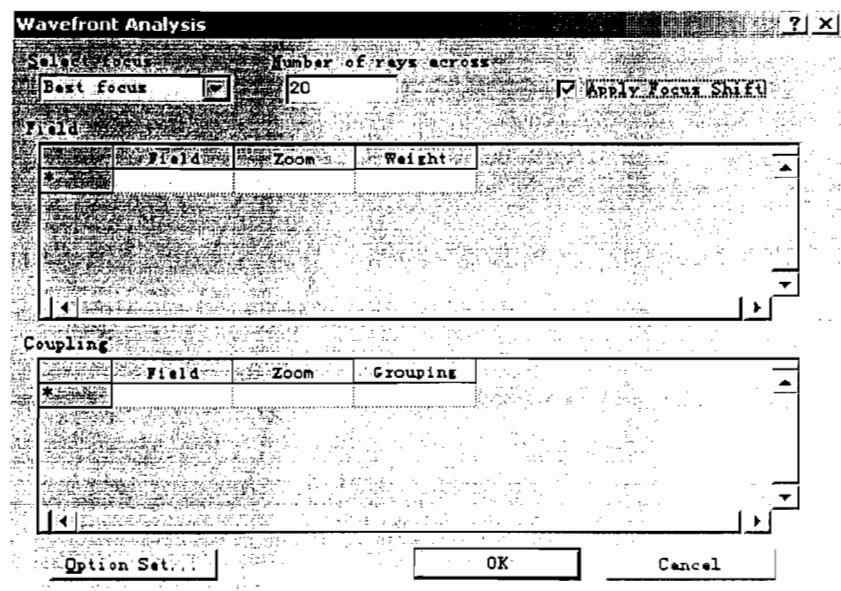
4.4.3.1 计算

在缺省模式下 (最佳焦点, **BES**), 要计算焦移和横向移动, 从而使 RMS 波前误差最小。这项计算要逐个视场分别进行, 而且, 要综合考虑 (在视场和变焦范围内, 达到“平均”最佳聚焦)。其它的计算选项就是利用 LDM 中定义的聚焦位置数据, 计算名义焦点的 RMS (NOM), 或者是离焦条件下的 RMS。当前的聚焦位置值也可以用由 WAV-定义的最佳聚焦值来替代 (**RFO**)。可以利用该方法重新使透镜聚焦, 或者敲击 **Quick Analysis** 工具条上的 **Quick Best Focus** 键, 无需再输入就可以完成同样的事情。**WAV** 使用 LDM 中定义的一些高斯或者其它的切趾数据, 最典型的就是被用来模拟激光输入光束。

为了综合计算, 也可以改变计算中使用的光线数、视场的相对权重以及变焦耦合编码 (参阅 CODEV 在线 *Reference Manual*)。

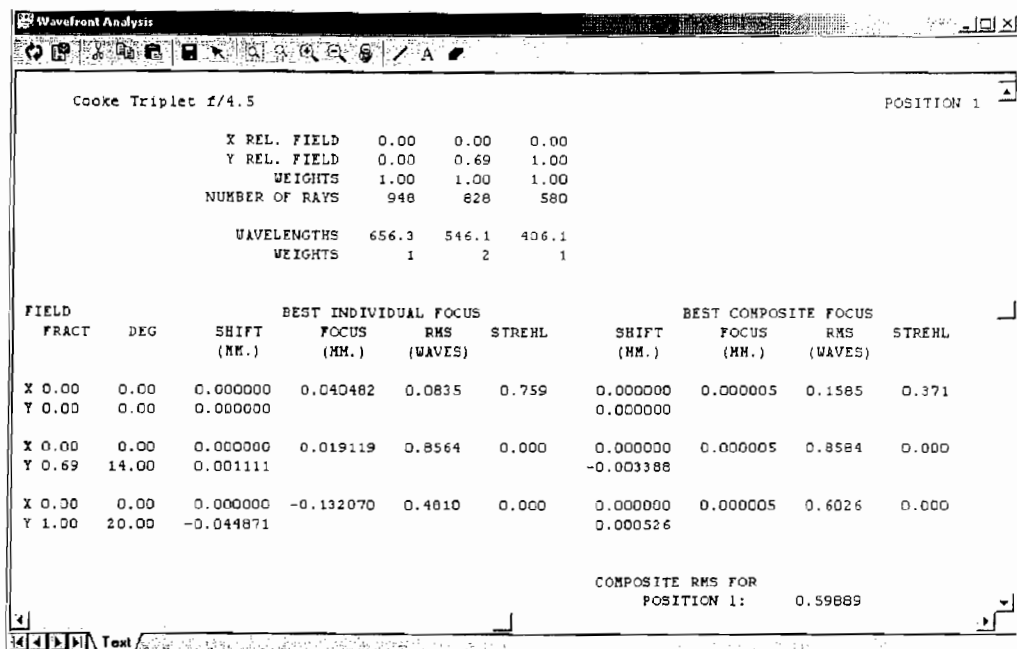
4.4.3.2 具体操作

1. 打开透镜 **CV_LENS:cooke1.len**。这个透镜也被用于上面 MTF 的例子中。
2. 选择 **Analysis>Diffraction>Wavefront Analysis** 菜单。
3. 敲击 **Apply Focus Shift** 审验框。



4. 敲击 **OK**，认可这些设置，并运行计算。

4.4.3.3 输出



WAV 的输出分别表明每个视场的最佳聚焦位置，以及对应的 RMS 值。在第二组的那一栏设置中（标有 **Best Composite Focus** 记号的），显示的是视场加权最佳聚焦；注意，三个视场的焦点值都是一样的。这就是焦点的移动，要被加到像面离焦值上。显示的还有加权视场的 **Composite RMS**。

除了 **RMS** 值外，对于经过良好校正的系统（ $\text{RMS} < 0.1$ 个波长）还将显示 **Strehl ratio**（斯切尔比）值。斯切尔比被定义为实际系统点扩散函数峰值处的强度与相对应的无像差系统点扩散函数峰值处的强度之比。三片型物镜满足轴上视场（F1）的要求，但是，对于其它视场的打印结果都是零。

4.5 分析宏命令

除了许多内嵌的分析属性外，CODEV Macro-PLUS 编程语言还为分析计算提供大量的灵活性。即使你不需要对自己的宏指令进行编程，但是，可以很容易地使用许多由 ORA 公司提供的宏指令。关键是要知道有什么指令。如果选择 **Tools>Macro** 菜单，对话框被打开，可以进入计算机中全部的宏指令。除了浏览键[...]外，还有一个列出最常用的，当前的和样本宏指令的树结构。样本宏指令被分成一些类型，例如衍射分析、实用性等。

提示:

尽管大多数宏指令是自成一体,但是,很少几种被提供的宏命令还要调用其它的宏指令,而且,可能还要依靠一个通往宏指令目录的路径。在命令视窗里打印命令

PTH SEQ CV_MACRO:

定义这条路径。也可以在个人的 **defaults.seq** 文件中设置该命令,所以,在每次开始 CODEV 的时候,都要将它定义。

下面表格列出了你希望完成的各种分析工作,提供有用的宏指令。类型信息也被列出来,但是,如果你知道宏指令的名字,可以使用浏览键将它设置在所提供的宏指令目录中,然后,敲击 **Run** 键。

4.5.1 运行提供的宏命令

1. 选择 **Toools>Macro** 菜单。
2. 用浏览键[...] 或者在 **Sample Macros** 下进入 Category 来设置感兴趣的宏指令。
3. 敲击 **Run** 键。
4. 如果宏指令显示一个对话框,填入所要求的信息,并且敲击 **OK** 运行。

注意,一些宏指令没有对话框,而是立即运行,但是,有几种宏指令在命令视窗中要相互配合,以文本光标提示的方式进行。

目标或者问题	种类	宏指令的名字
当运行 CODEV 选项时,光线不能够通过通光孔径(那些标准光线不能通过?)	实用性	REFCHECK.SEQ
透镜中每个元件的焦距?	初级分析	FL.SEQ
对 PSF 的结果绘制一张剖面图?	衍射分析	SPOTDET.SEQ
在点列图中显示爱里斑和探测器的尺寸?	几何分析	SPOTDET.SEQ
将 MTF 绘制为视场的函数?	衍射分析	MTFVSFLD.SEQ

如何绘制横向色差?	几何分析	MTFVSFID.SEQ
如何绘制焦距或者后截距相对于波长的图形?	初级分析	FLPLOT.SEQ BFLPLOT.SEQ
如何形成一个透镜的 y-ybar 图	初级分析	YYBAR.SEQ
如何使透镜转换为适合于照明和其它分析用?	实用性	ILREVERS.SEQ
绘制一个用宏指令计算出的量与波长的曲线关系图	实用性	PLOTWL.SEQ
绘制光学和探测器的组合 MTF?	衍射分析	MTFDET.SEQ

4.6 多层膜设计

CODEV 有一个属性在当前的程序的菜单中是找不到的。这个属性称之为 **Multilayer Coating Design (MUL)**，本质上它是一个程序中的程序，也就是说，它是一个用来定义，保存、分析和优化多层膜的多段属性。

尽管在 MUL 中被定义的镀膜可以附加到一个透镜模型中的表面上，也将会影响偏振和透过率的计算，但是，该属性基本上与 CODEV 中以透镜为基础的属性无关。实际上，这就是 MUL 的主要的目的。

此时，仅仅在命令行中支持 MUL。在在线 *Reference Manual* 中会找到以命令为基础的文件和例子。如果需要的话，在一个以文本为基础的 .SEQ（宏指令）文件中修改一条现有的命令，并输入它是最简单的确定一种镀膜的方法。

第五章
违背 Murphy 定律：
容许公差

你可能熟悉 Murphy 定律：任何可能出错的事情都会出错。公差就是试图通过理解：何种类型的误差会发生、它们在多大程度上影响光学系统的性能以及建造一个可以工作的系统的概率有多大等问题使 Murphy 定律不适用。

CODE-V 有一些用于进行公差分析的工具，包括一个被称为 TOR 的强有力的属性。其它的工具被用来分析用户自定义的公差要求和蒙特卡罗（Monte Carlo）仿真。

目录

Murphy 定律.....107

公差分配和 TOR.....109

公差类型.....110

LDM 中的公差分配和 TOR..... 111

TOR 的输出..... 120

其它的公差分析属性.....125

5.1 Murphy 定律

光学系统对加工精度有一定的要求。在许多机械装置中不太明显的误差在光学系统中可能会造成严重的成像质量问题。因为没有任何事情可以做得非常完美，因此，误差必然会产生。公差分析就是要弄明白在建造一个光学系统中，以及在建成之前预测它们的影响中会出现的误差类型。你不能够推翻 Murphy 定律，但是，可以懂得何处会出错，确定对误差的限制，以及预测它们的影响，从而限制误差。

5.1.1 何种项目会出错？

一个共轴光学系统由不多的几个参数就可以确定，主要是每个表面的曲率、厚度和玻璃材料。但是，这几个参数会使许多事情出现错误，包括：

- 错误的曲率（通常用样板的吻合度来测试，DLF, 加上柱面的不规则度, IRR）
- 错误的厚度（玻璃）或者空气间隔（安装误差），由 δ -厚度来测量（DLT）
- 错误的折射率或者色散（DLN, DLV）
- 定心误差（前后表面不同轴，被称为光楔，或者称为零件偏心率 TIR (Total Indicator Runout)）
- 安装误差（单个元件或者一组元件相对于设计位置的倾斜、移动或者偏心）

总之，有七种或者更多的与光学表面有关的，很容易出现的加工误差。有特殊面形的复杂系统会有更多的潜在误差。每一种潜在误差都必须规定一个可接受的范围或者公差。例如，表面 8 玻璃元件的厚度（THI S8 5.5）可能要求被控制在 ± 20 微米的公差范围内（如 $5.500\text{mm} \pm 0.020\text{mm}$ ，或者 DLT S8 0.02）。这类公差值常常会简单地被估计给出，或者根据“标准值”，或者根据光学车间及加工过程的能力确定。CODE-V 提供比较系统的确定这些公差值的方法。

5.1.2 成像质量会有多差？

现在的问题是，使用光学建模中对各种加工误差规定的公差，究竟会使光学系统的成像质量恶化到何种程度？实际上，这可能意味着两件不同的事情。如果你设定了一组公差值，“假设每一个结构参数都是在这些公差范围之内，并且，开始模拟该透镜的结构”，那么，问题可能是：当检测一个样品透镜时，将得到什么样的 MTF 或者 RMS 波前误差？这就被称为灵敏度分析，因为每一种误差都会造成一种不同的影响，并且，取决于设计对每个具体值的灵敏度。

解释“成像质量会有多差？”的另外一种方法是估计多大的一个误差将会造成 MTF 的变化在指定的范围内？假设此外的每一项都是理想的。这被称为逆灵敏度（Inverse sensitivity）分析，是 TOR 属性中的一项。将这种技术应用到全部公差中就称为半自动误差预算（Semi-automatic error budgeting）。这就意

味着，为了使每个公差就像其它的参数一样对系统贡献大致相等的误差量，该项公差要被缩放。这是一种合理的假设。这是一个非常系统的回答“成像质量会有多差？”的方式，尽管在很多情况下其它的因素可能会影响到公差值（上述其它因素中的大部分由公差限制来控制，可以使问题保持在实际的约束之内）。

5.1.3 补偿元

光学装配的一个重要方面就是装配过程中的调整能力，能够部分地补偿加工和装配过程中已经出现的累计误差和随机误差。这些调整被称之为补偿。原则上，任何一个公差都是一个补偿元。最普通的补偿元是焦点位移或者其它的空气间距的调整。可以发现，有效补偿元的选择是最重要的公差分配工具之一，经常会将很紧张（很小）的公差转换成非常合适的值。补偿元的选择要求熟悉一些可能的安装方法，因为，必须是一种实际可行的方法，在所要求的范围内能够完成所希望的位移。

5.1.4 统计方法

遗憾的是，没有办法使每件事情都能够很完美，仅仅有一种误差的情况除外。实际上，尽管所有的误差都是在指定的公差（所希望的）限制之内，但是，它们可能会同时出现和随机产生。这就意味着，对于一个具体的，用一组已知公差制造出的真实透镜来说，无法预测它的确切性能。如果你制造了 1000 个透镜，每一个透镜的性能都会略有不同。能够做到的最佳之处就是预测结果的统计分布。你可以这样来描述某件产品，“如果制造了 1000 个透镜，其中 980 个的性能在标称设计值的 11% 以内”。如果 11% 的性能衰减可以被接受，而且，98% 的（合格）量也可以接受的话，你就可以达到目标了，完成了任务。如果不是这样，那么，还需要继续做一些工作——或者把一些公差的要求提高，或者给出一些能够提高质量和产量的调整措施（补偿元）。最坏的情况，可能需要重新设计该透镜，使它对某项公差不是太敏感。

CODE V 公差属性（TOR 和其它）准确地提供这类统计预测，并且，为了在零件被加工之前找到良好的解决方法，允许设计者改变公差，调整（补偿元），以及其它的假设。

5.1.5 失败的代价

成功的公差分配可以使设计者确定一组比较现实的公差和有效的补偿元，从而制造出具有良好成像质量和产量的光学仪器。另外一种方法就是对每一个参数指定最严格的，又是可以实现的公差，不用再操心补偿的问题（或者是“仅仅调整像距”）。这些做的代价可能会很高，为不必要的高公差值付出的工作会增加加工时间和费用。甚至更糟糕的是，有可能会由于最严格的公差和不可能的补偿元导致光学系统太昂贵而无法制造。

5.2 公差分配和 TOR

前面一节是试图对于光学公差分配问题进行一般性介绍，没有太多的技术细节。现在，我们开始分析如何用 CODE V 解决这些实际问题。

5.2.1 公差分配的目的

对光学系统进行公差分配的主要目的就是确定被加工出具有不同公差范围的元件组合起来的效果，在满足性能、装配、和表面质量要求的同时，要使生产成本最低。这是透镜设计过程中很重要的一部分。在 **Analysis>Tolerancing** 菜单中可以找到 TOR 选项，使用 TOR 能够解决公差分配中所涉及到的大部分实际困难。TOR 可以使设计者集中力量关注光学系统及其性能，而不是花费大量的人力物力进行计算和描述难以解释清楚的间接结果上。

5.2.2 TOR 的功能

TOR 直接将加工误差和可测量的性能要求相联系，例如多色衍射的 MTF（在一个特定的频率和方向下），RMS 波前误差，或者光纤匹配效率。三种菜单隶属三种光学质量模式（MTF, RMS Wavefront Error 和 Fiber Coupling Efficiency, 在 **Analysis>Tolerancing** 菜单中都可以找到）。TOR 信息的基本内容就是一个参数变化一定的量造成成像质量（MTF, RMS 或者耦合效率）的变化。灵敏度计算包括由用户指定的，为了模拟对像面调焦和使像面倾斜等装配工艺过程，使光学性能最优的可调整参数（补偿元）的影响。该选项也可以输出瞄准线（例如，视线的移动）的校正和畸变的变化。

下面的一些讨论中，偶尔也会使用术语 MTF *drop* 来描述由于加工误差而造成的性能恶化。应当认识到，在此进行的讨论完全可以应用到 TOR、RMS 波前误差或者光纤匹配效率中关于其它成像质量恶化的分析，主要取决于在你的光学系统中选择使用那一种评价方式。

5.2.3 半自动误差预算

半自动误差预算（也称为逆灵敏度模式）意味着该程序可以选择一组合适的公差参数、参数的变化范围和一些特定的值，从而提前确定 MTF 的下降。正如使用其它的 CODE V 属性一样，这些计算中使用的许多缺省量可以很容易地部分越过或者全部越过（这是为什么称它是半自动的原因）。

为了预测整个系统的性能，可以自动进行统计计算。清晰的公差输出表有助于和其它技术员工进行交流。

5.2.4 相互影响的公差分配

在初始 TOR 运算后，假定透镜的数据保持不会再变，那么，将灵敏度和透镜数据一起保存起来，以便于更快速地进行后续的某些公差分析（不要求进

行光线追迹)。为了使你可以改变公差值,并且,立即就能够看到它们对预测性能的影响,相互影响的公差分配会使用这些被保存起来的数据。这项属性可以在 **Analysis>Tolerancing>Interactive Tolerancing** 菜单中找到,并且只能在已经完成了一次标准的 TOR 运行,透镜和 TOR 的系数数据已经被保存之后才能够进入。

5.2.5 其它的公差分配选项

除了 TOR 选项之外, CODE V 还有几种其它的公差分配属性。TOD (**Analysis>Tolerancing>Distortion** 菜单)的操作几乎与 TOR 完全相同,但是,它是使用由波前微分推导出的主光线畸变作为评价光学性能的标准。TOL 是以初级像差为基础,比较早期的一个选项(仅仅适合于在命令栏中使用;对于该项属性的更多信息,请参考在线 *Reference Manual* 的第 6 章)。两个以宏指令为基础的用户自定义公差分配属性 TOLFDIF (**Analysis>Tolerancing>User-Finite Differences** 菜单)和 TOLMONTE (**Analysis>Tolerancing>User-Monte Carlo** 菜单)也是适用的。这两个属性都要求确定一组公差的预估价值来,而且,在使用这些属性之前将透镜和这些值一起储存起来。尽管其它的属性也将最后会作为一节来讨论,但是,本章的重点是讨论 TOR 选项。

关于这些属性的更多的信息,请参考 *Reference Manual* 或者 Help。

5.3 公差的类型

CODE V 支持许多类型的公差,这里只列了其中的几种。公差被认为是透镜数据的一部分,因此,被放在 LDM 中定义和检查,并在下一节中阐述。大部分公差是以透镜的度量单位(经常是 mm)来计量的线性量。角度误差是以弧度为单位(这不同于结构数据中的倾斜和视场角,它们是以度为单位)。并非是所有可能产生的公差都被包括在自动生成的缺省设置中;可以使用 **Review>Tolerances** 菜单,从缺省设置中增加或者删除公差项。一些公差类型具有特殊的定义。下面仅仅给出许多公差类型中的三个例子。

测试样板的匹配(DLF)——一个表面和一个标准测试样板表面之间精确配合程度的一种计量,表示为干涉条纹数(牛顿环)。在这种检验中,还要测量不规则度(IRR)(Irregularity),例如,偏离标称圆的椭圆度。

光楔——当一块零件的前后表面不共轴时,该误差就被描述为表面倾斜,或者更常见的是叙述为光楔,根据工厂中测量用的设备和方法,被描述为 TIR (零件的总偏心率)。

镜筒倾斜(BTI)——当一组表面整体倾斜时,就称为镜筒倾斜(弧度为单位)。镜筒倾斜要求(提供)一个表面(起始)范围,而且,第一表面是缺省的倾斜支点,尽管随着 X、Y、Z 方向上的偏斜,该支点也会发生变化。

提示:

CODE V 能够认可缺省公差的面组仅仅是单个透镜元件和胶合透镜。虽然, 从结构上考虑, 其它的面组也可以形成一组, 但是, CODE V 并不识别该安装结构, 因此, 没办法确认它们是一组。例如, 如果知道从表面 8 到表面 15 是一个组件, 就必须在缺省设置中加上 BTI S8..15 (和其它组的公差), 否则这一组的位置误差不会被模拟。

从在线 *Reference Manual* 2A-227 页开始, 可以看到全部公差的描述。

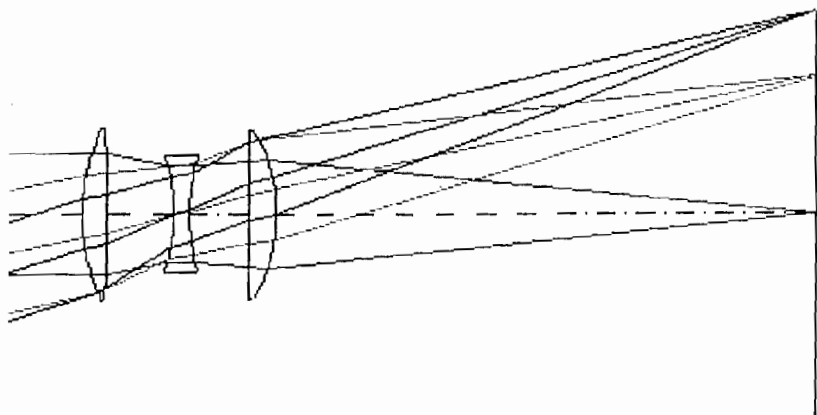
5.4 LDM 中的公差分配和 TOR

你可以用几种不同的方式, 对被使用的公差和补偿元, 对进行计算的类型, 和输出量采取不同的控制程度来运行 TOR。虽然可以进行全缺省的 TOR 运行, 但是, 通常在运行 TOR 之前, 要使用 LDM 来准备透镜和确定公差。

5.4.1 全部缺省的 TOR 运行

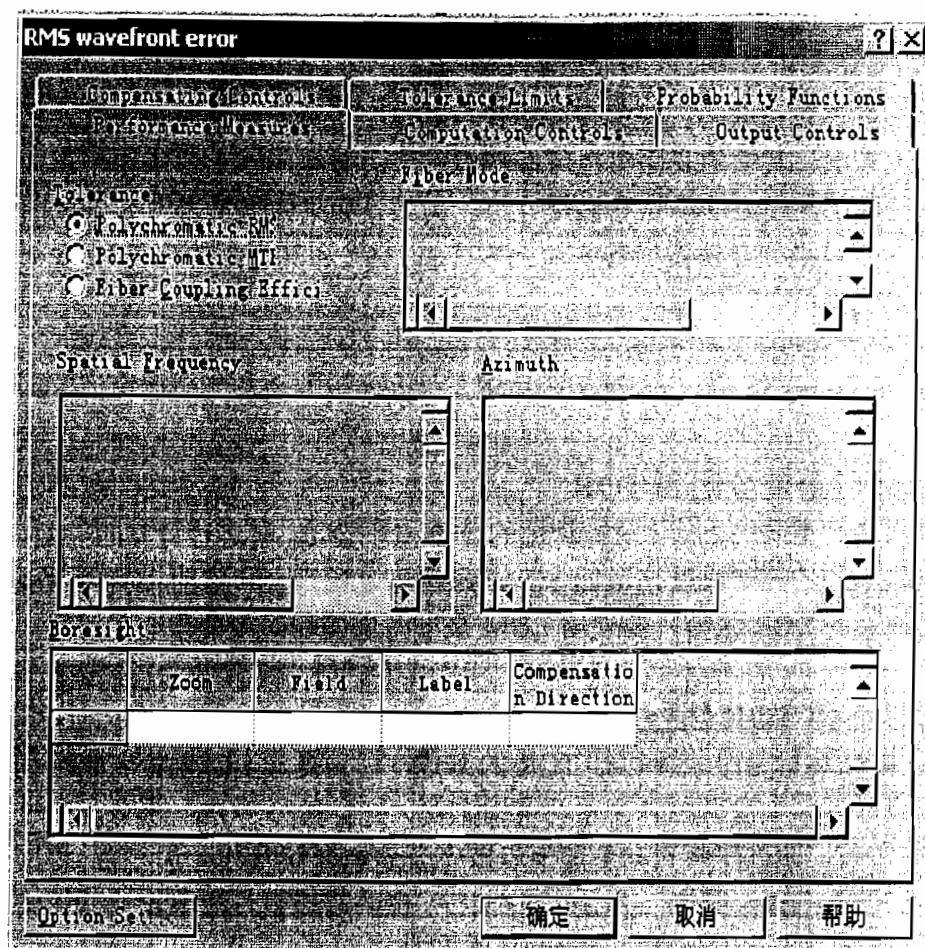
全缺省 TOR 运行是最快捷运行 TOR 的方式, 因为是让 CODEV 完成所有的工作。如果打开一个没有包含公差的透镜文件, 并且运行 TOR, 那么, 在进行 TOR 计算之前, 该程序将自动生成一组缺省公差和补偿元。

1. 选择 **File>Open** 菜单, 并且在 CODEV 提供的透镜目录中设置透镜文件 `cooke1.len`。下面显示的就是该透镜的系统图。



这里提供的透镜目录称为 **CV_LENS**; 而且在缺省安装中被定义为 **C:\CODEV\LENS**。这是一个 Cooke 三片型物镜 ($f/4.5$, 20° 半视场角, 50mm 焦距)。该样本透镜没有事先确定公差。

2. 选择 **Analysis>Tolerancing>RMS Wavefront Error** 菜单。显示出 **RMS wavefront error** 对话框, 选择均方根波前误差作为光学成像质量的判别标准。



3. 敲击 **OK** 开始运行。

从这点少量的输入，该程序将会产生许多行输出结果（与该运行相等效的输入命令是 TOR; GO）。公差是一个标准缺省组，与一个单补偿元（像面的 Z 向移动，例如调焦）一起被用在逆灵敏度模式中。滚动输出视窗文本列表就中查看输出结果。由于马上你就要亲自完成一次类似的运行，所以，我们就不再对该具体输出结果进行解释了。你将要完成的那个运行比较典型，对公差，补偿元和一些 TOR 控制的设置都有精确的定义。我们将会对那个运行的输出进行讨论。

5.4.2 设置公差

正如前面所述，公差实际上被认为是透镜数据的一部分，因此，在 LDM 中被定义、查看和编辑。当透镜被保存时，它们也被保存在 .len 文件中。

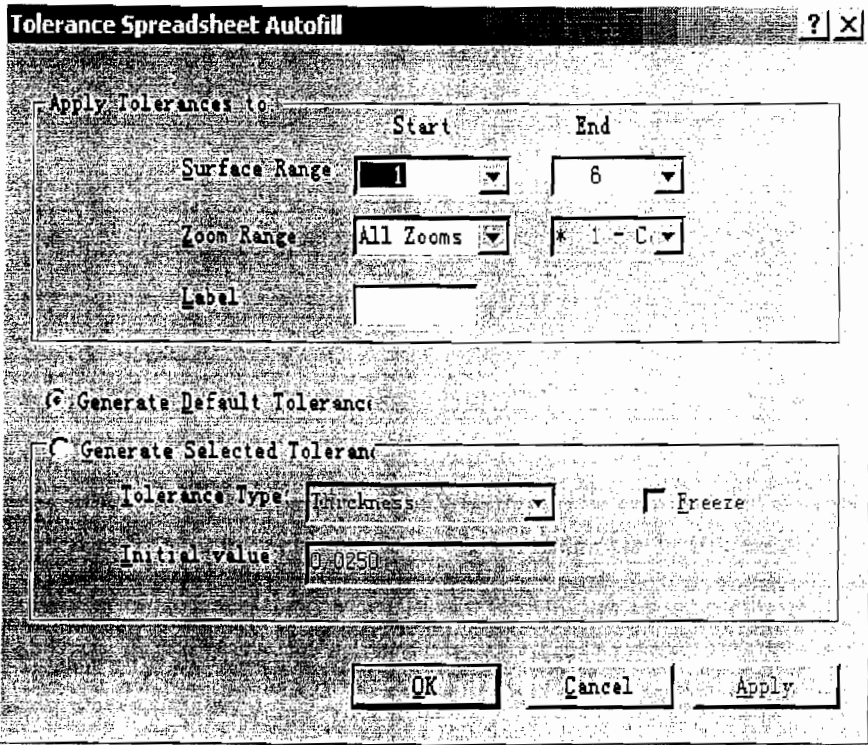
1. 选择 **File>Open** 菜单，并且，在 CODEV 提供的透镜目录中设置透镜文件 **cooke1.len**。

这是一个事先定义好了的，和前面例子中一样的透镜文件；为了确保在这个使用中有正确的结果，需要重新打开该透镜文件。

2. 选择 **Review>Tolerance** 菜单。

显示 **Tolerances and Compensators** 视窗。注意，由于 **cooke1.len** 没有包含任何缺省公差值，所以，这个视窗是空的。

3. 敲击LDM视窗表上端的 **Autofill** 键，打开 **Tolerance Spreadsheet Autofill** 对话框。



该例子采用缺省设置（对所有的表面都产生缺省公差）是可以的。

4. 敲击 **OK**，确定公差。

在 **Tolerances and Compensators** 视窗中显示出的公差是标准的缺省值。向下滚动，并且会注意到，对于这个有 6 个表面的共轴透镜来说，已经产生了 53 个缺省公差。使用右击，可以从列表中加上（**Insert**）或者删除（**Delete**）公差。每一个没有变成灰色的单元格都是可编辑的（例如，双击 **Type** 项，可以把它改变成另外一个不同的类型）。

Tolerances and Compensators

Column Width

Primary Length

546.1000

Auto Fit

Delete All

Tolerances									
	Type	Start Surface	End Surface	Label	Value	Freeze	X Offset	Y Offset	Z Offset
1	Test plate	1	5		5.0000	☐			
2	Test plate	2	2		5.0000	☐			
3	Test plate	Stop	Stop		5.0000	☐			
4	Test plate	4	4		5.0000	☐			
5	Test plate	5	5		5.0000	☐			
6	Test plate	6	6		5.0000	☐			
7	Radius	1	1		0.0250	☐			
8	Radius	2	2		0.0250	☐			
9	Radius	Stop	Stop		0.0250	☐			
10	Radius	4	4		0.0250	☐			

1

Compensators

Type	Start Surface	End Surface	Label	Value	X Offset	Y Offset	Z Offset
End Of Data							

提示:

要改变视窗中任何一列的宽度，右击该列的前端，并且选择 Column Width（对于 Type 列，选择 120 就很适合）。

到现在为止，还没有对这些公差的效应做过任何计算（这是 TOR 要做的）。还必须确定一个离焦补偿元；一旦你开始确定公差和补偿元，那么，CODE V 就假定你将会确定你所需用的一切，就不再需要自动生成什么了。

5. 在 **Tolerances and Compensators** 视窗底部补偿元表格中右击 **End of Data** 栏。

6. 从快捷菜单中选择 **Insert**。

7. 双击 **Start Surface** 单元格，并且选择 **Image** 表面。

8. 对于这个新的补偿元，双击 **Type** 单元格，并且滚动设置和选择 **Z Surface Displacement** 作为该补偿元，如下所示。

Compensators					
Type	Start Surface	End Surface	Label	Value	X
Thickness	Image	1		0.5000	0.000
45 degree cylindrical irregularity over CA Combination, DLX and DLY X Surface displacement Y Surface displacement Z Surface displacement Combination, DLA and DLB Alpha Surface tilt about X axis Beta Surface tilt about Y axis Gamma Surface tilt about Z axis Total Indicated Runout (TIR), Combination, TRX and TRY Total Indicated Runout (TIR) in X at CA - Alternate to DLB					

如果是像面，厚度（DLT）和 Z 轴位移（DLZ）是等效的，不需要真正地改变缺省值，当然，演示除外。一般来说，DLT 是通过向后推移后续表面的面来改变厚度，而 DLZ 仅仅是移动该表面，其它的表面不发生变化。

9. 敲击顶端处的 **Commit** 键，或者敲击公差列表中的任何地方，执行刚刚为 DLZ Si 补偿元确定的数据。

10. 选择 **File>Save Lens As** 菜单，将新确定的公差和补偿元与透镜一起存储起来。

5.4.3 TOR 透镜的准备

现在，已经为运行 TOR 做好了准备，并使用衍射 MTF 作为成像质量的评判标准。在运行之前，应该保证该透镜是位于最佳焦面位置。虽然，TOR 是使用以波前为基础的计算（RMS 或者衍射 MTF），但是，即使是使用一个校正得很差的透镜，它也会工作地很好。这个透镜应当被调整，使它尽可能精确地模拟终端用户的技术方案。由于大多数光学系统被用在最佳焦面上，所以，一般的情况下，应该确信透镜的模型是位于最佳焦点。实际上，TOR 的结果是随焦点位置而变化。

1. 选择 **Analysis>Diffraction>MTF** 菜单，显示 **MTF** 对话框。

2. 在 **Frequency/Calculation** 列表上，最大频率值输入 **75**，频率间隔值输入 **15**。

3. 敲击 **Graphics** 键，最大绘图频率值输入 **75**。

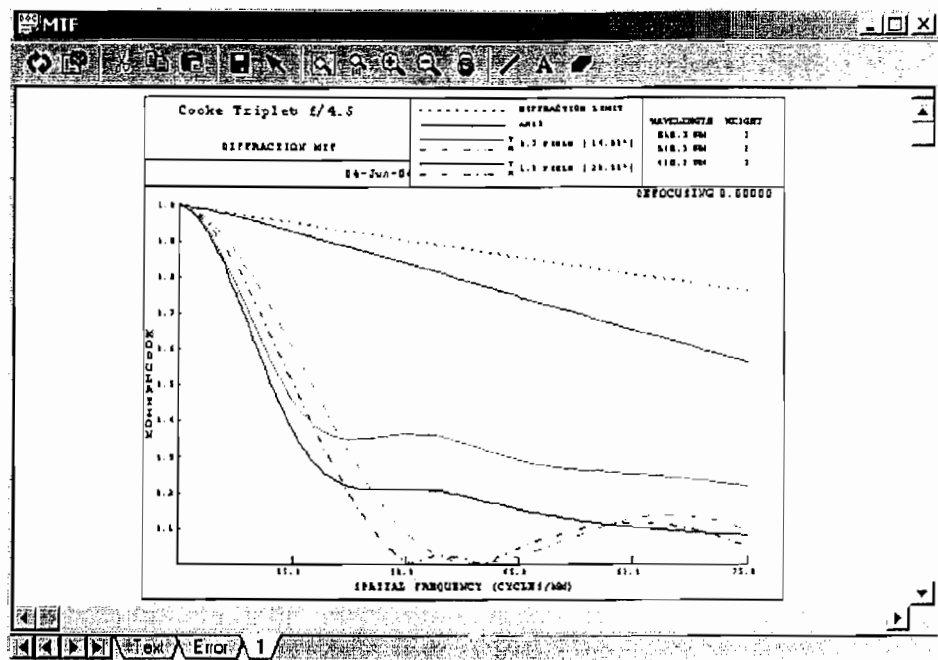
4. 敲击 **OK**，运行 **MTF**。

5. 敲击 **Quick Analysis** 工具栏上 **Quick Best Focus** 图标：

这就表明是使用 **Replace Focus** 命令在运行波前分析选项，分析系统的 RMS 波前误差，设置象面的离焦（THI, Si）来使它最大。这与优化 MTF 并不完全一样，而是一种合理的近似。

6. 敲击 MTF 视窗上的 **Execute**（执行）键，再次运行 MTF 计算。

注意到，MTF 曲线略有改进。使用 **15 cycles/mm** 作为公差分配频率。轴外视场弧矢（ 0° ）和子午（ 90° ）方向的 MTF 曲线有很大差别。虽然最好是包括两个方向，但是，为了公差分配（**TAN**（子午）是缺省项），可以选择一个方向。这样做就要求重复完成轴外视场的运行。



7. 选择 **Lens > System Data** 菜单，进入 **System Data** 视窗中 **Fields/Vignetting** 页面。

8. 在 **Fields/Vignetting** 页面中的表格里插入两个新的视场。可以通过右击当前的一个视场栏插入一个新视场，并且从快捷菜单中选择 **Insert**。一旦你已经增加了新的两行，就可以把现有视场中的值复制和粘贴到新的视场中（可以使用 **Edit** 菜单中的 **Copy** 和 **Paste** 属性来完成这项工作）。结果是有五个视场，与之相匹配的视场数据显示在下面的图表中。

	Field				Vignetting			
	X Angle	Y Angle	Height	Color	+Y	-Y	+X	-X
1	0.0000	0.0000	1.0000		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.0000	14.0000	1.0000		-0.1406	0.0688	0.0000	0.0000
3	0.0000	14.0000	1.0000		-0.1406	0.0688	0.0000	0.0000
4	0.0000	20.0000	1.0000		0.1617	0.2435	0.0000	0.0000
5	0.0000	20.0000	1.0000		0.1617	0.2436	0.0000	0.0000

9. 选择 **File > Save Lens** 菜单，更新保存过的透镜数据，现在，就包括了被确定的公差和五个视场（YAN 0 14 14 20 20）。

5.4.4 TOR 的输入对话

为了开始运行 TOR, 选择 **Analysis>Tolerancing>MTF** 菜单, 打开 TOR 对话框。变动六种列表中的两种, 另外审查一下其它两种的缺省设置。

5.4.4.1 性能测量列表

当你打开 TOR 对话框时, 缺省状态下的 **Performance Measures** 标记位于前面最显著的地方。这时, 使用多色 MTF 作为公差判别标准, 而且, 已经被选中。如果使用 MTF, 就必须对每一个视场选择空间频率和方位 (目标的方向)。所有视场的空间频率都使用 15cycles/mm, 并且, 对视场 3 和 5 输入 RAD (弧矢), 其它视场输入 TAN (子午), 缺省 (由于对称, 轴上的 RAD 和 TAN 都一样)。

MTF [?] [X]

Compensating Controls | Tolerance Limits | Probability Functions
 * Performance Measures | Computation Controls | Output Controls
 Fiber Mode

Tolerance
☐ Polychromatic RMS
☒ Polychromatic MTF
☐ Fiber Coupling Efficiency

Spatial Frequency

	Lines Per MM	Field	
1	15.0000	F 1 - Ob	*
2	15.0000	F 2 - Ob	*
3	15.0000	F 3 - Ob	*
4	15.0000	F 4 - Ob	*
5	15.0000	F 5 - Ob	*

Azimuth

	Lines Orientation	Field	
2	TAN	F 2 - Ob	A1
3	RAD	F 3 - Ob	A1
4	TAN	F 4 - Ob	A1
5	RAD	F 5 - Ob	A1

Boresight

	Zoom	Field	Label	Compensation Direction
*				

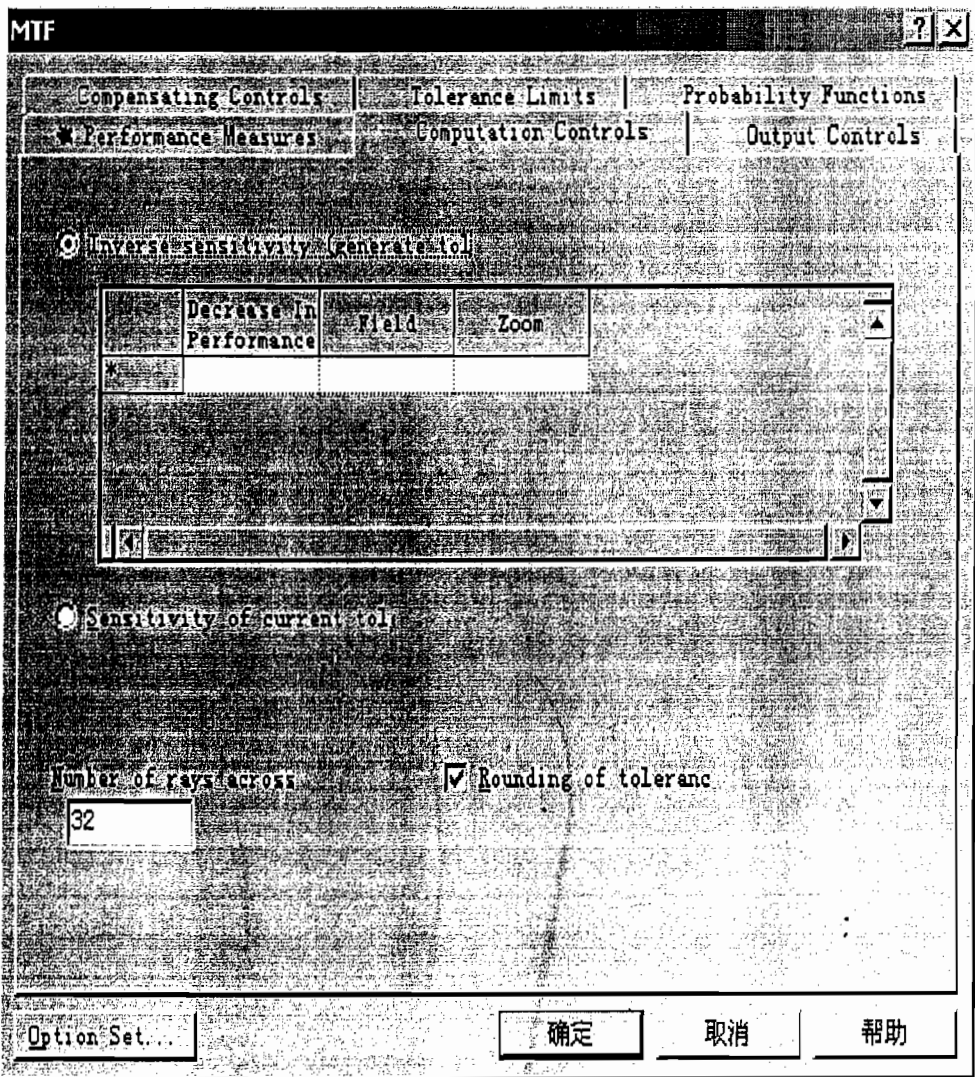
Option Set... [确定] [取消] [帮助]

1. 在 **Lines per MM** 行, 五个视场的空间频率都输入数值 15。
2. 对于 **Azimuth** (方位), 在一开始是空格的 **Lines Orientation** 单元格里敲击和使用下箭头四次, 从而建立 5 个视场项 (或者, 使用右击 **Insert**)。双击

Field 项，设置第 2 行是视场 2，第 3 行是视场 3，以此类推。对于视场 3 和视场 5，将方位从 TAN 该为 RAD，如上所示。

5.4.4.2 计算控制列表

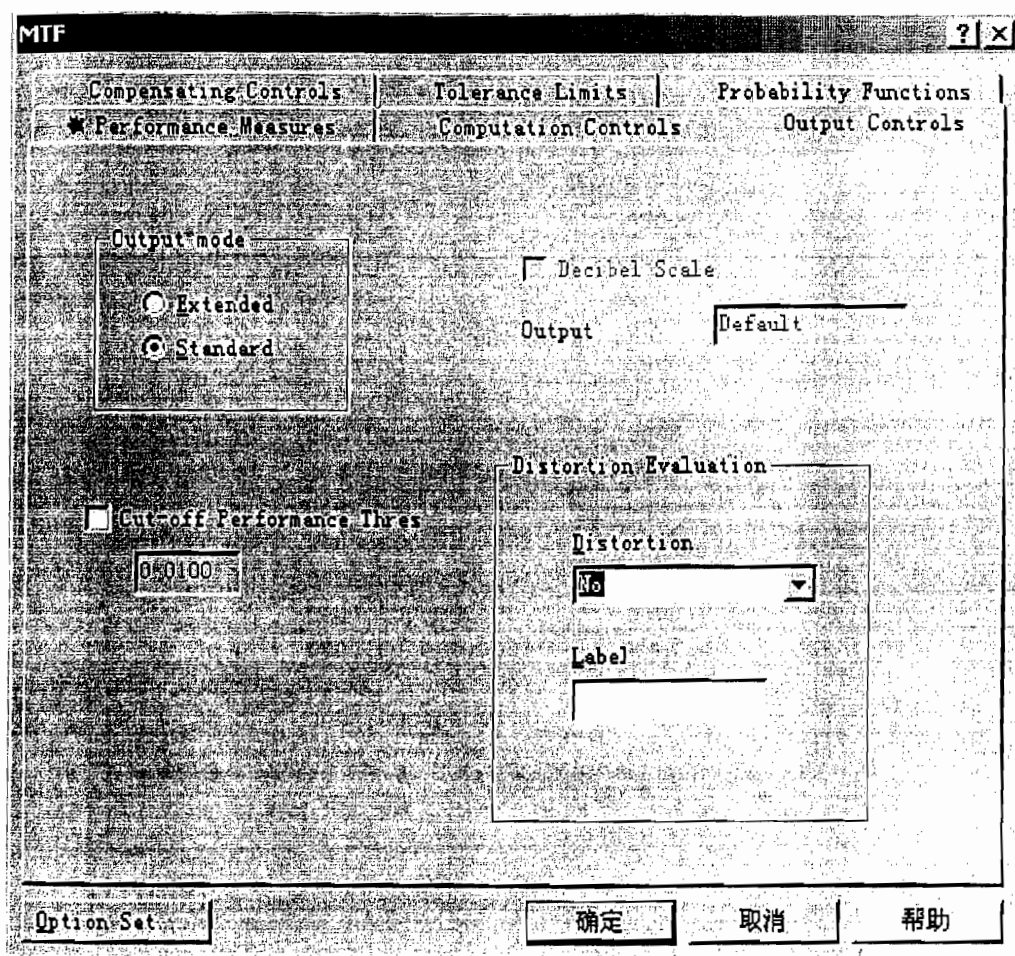
Computational Controls 列表上的设置将决定如何计算公差。有两种模式：逆灵敏度（缺省）计算和灵敏度计算。逆灵敏度计算模式中的公差值是通过设置一些可以使光学性能评价实现预期变化（缺省设置下 MTF 会下降 0.01）的值计算出的。灵敏度计算模式是计算由当前的公差组（设计者提供的数值，缺省值，或者一些综合结果）造成的 MTF 的变化。逆灵敏度计算模式在初始的公差分配阶段是最有用的，在这个例子中，可以使用这种模式，并且，假定缺省设置下的 MTF 允许下降 0.01。



- 在这项列表中不需要任何输入。

5.4.4.3 输出控制列表

Output Control 列表影响 TOR 输出的量和类型。输出的扩展模式（命令符是 FUL）列出一些使你能够手工重新计算单个灵敏度的系数值，无需重新整体运行。对于这次运行，可以使用“标准”的缺省模式。输出阈值（SEL）控制着被显示的敏感度值，仅仅挑出那些使 MTF 的变化超出阈值的参数。这就减少了输出量，而且，使你集中力量关注那些是光学性能在范围内变化的公差（由于各种原因，主要是公差范围，许多参数的 MTF 变化很小）。可以使用缺省项。畸变评价（DST）增加一张表格，表示公差如何影响主光线的位置。该例子也使用缺省值。



- 该列表不需要任何输入。

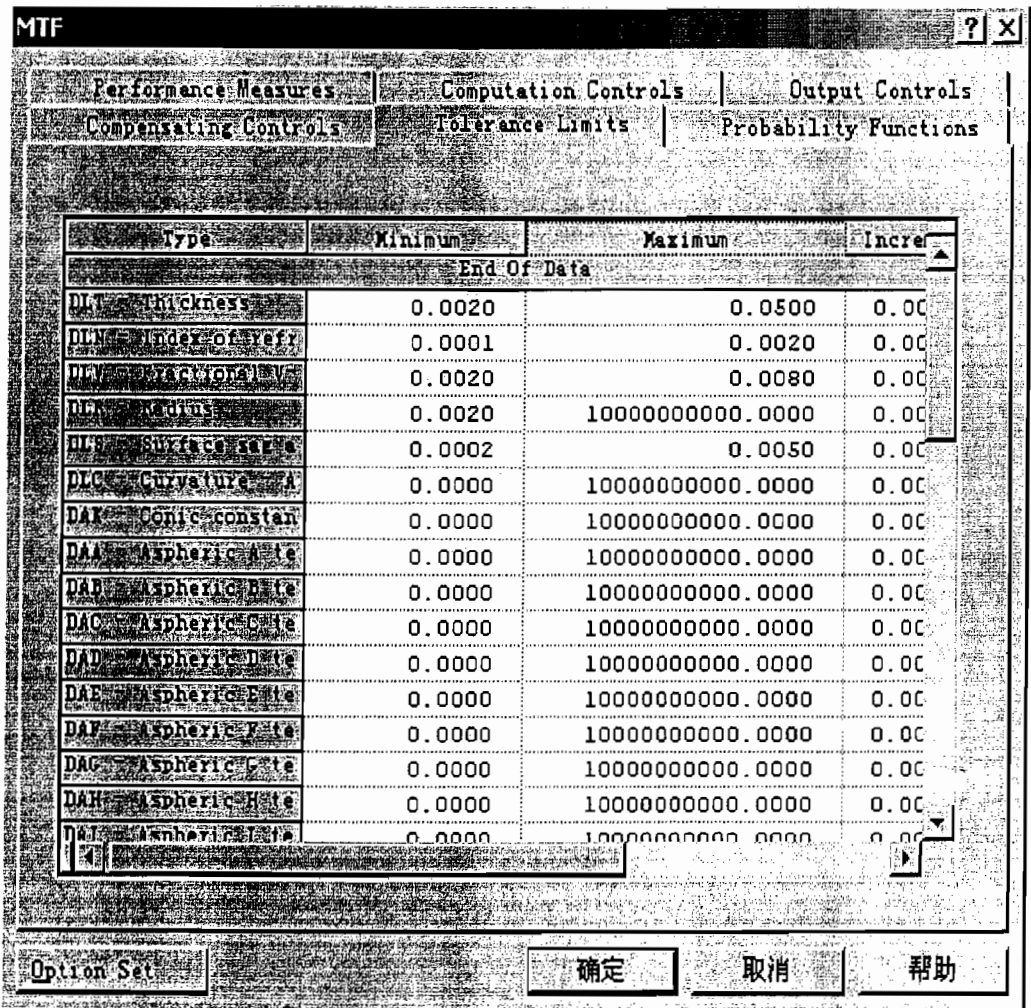
5.4.4.4 公差限制范围表

Tolerance Limits 列表允许编辑所有公差类型的限制范围值。缺省值反映了高质量光学加工条件下，有代表性的工业加工能力。如果你正在设计某些特殊的，高质量的光学系统或者大批量的塑料光学元件，那么，就应当调整该公差

限制范围，使它适应真正的加工环境，或许比缺省设置更严，或许比较宽。

提示：

虽然，限制范围只是应用于当前的 TOR 计算，但是，也可以为你自己的光学工厂输入该限制值，并且，使用选项设置（Option Set）把它们存为未来 TOR 运行的“模版”（可以称它为“我自己工厂的公差限制”）。通过输入选项设置开始每一项 TOR 的输入，然后根据需要，修改其它的表格数据。



- 该列表不需要任何输入。
- 敲击 OK 开始计算。

5.5 TOR 的输出

使用刚刚描述的 LDM 公差输入和 TOR 设置，要求 TOR 使用空间频率 15cycles/mm 处的子午和弧矢 MTF 作为质量的判别标准，而且，对于每一种加工误差，都要确定出对最灵敏的三个视场角会引起 MTF 下降 0.01 的误差值。实际上，在输出结果中不可能经常看到 0.01 这个值，因为其它因素的影响经

常不会使 MTF 下降 0.01。

5.5.1 灵敏度列表

每一个视场都有一个灵敏度表(下面显示的是 20° 视场的子午 MTF)。表格的开始是显示该视场中被追迹光线的数目和标称性能的有关信息(为了便于检查问题,还是值得一看的)。紧接着就是长长的一列有关灵敏度的资料。

INVERSE SENSITIVITY POLYCHROMATIC MODULATION TRANSFER FUNCTION				
Cooke Triplet f/4.5				
FIELD (X,Y) = (0.00, 1.00)MAX, (0.00, 20.00)DEG		WAVELENGTH	WEIGHT	NO. OF RAYS
FIELD WEIGHT = 1.00		556.3 NM	1	454
		546.1 NM	.2	456
		486.1 NM	1	460
FREQUENCY = 15.00 L/MM				
AZIMUTH = TANGENTIAL				
DIFFRACTION LIMITED MTF = 0.924				
NOMINAL MTF = 0.394				
MANUFACTURING ERROR		CHANGES IN MTF FOR PLUS AND MINUS MANUFACTURING ERRORS		COMPENSATING PARAMETERS
TYPE	CHANGE			DLZ S7
DLF S1	2.0000000v	-0.001	0.001	-0.037422
DLF S2	2.0000000v	0.008	-0.007	0.038229
DLF S3	2.0000000v	-0.001	0.001	-0.057705
DLF S4	2.0000000v	-0.003	0.002	0.055239
DLF S5	2.0000000v	-0.001	0.001	-0.031842
DLF S6	2.0000000v	-0.002	0.002	0.029977
DLR S1	0.0500000v	0.006	-0.005	0.218297
DLR S2	0.5000000v	0.010	-0.011	0.017727

可以按照下面的方式来解释灵敏度数据(以 DLF S2 为例):第 6 面面形如果有 2 个干涉条纹的误差,并且是正值,将会引起 MTF 改变+0.008,如果是负值,则为变化-0.007。这些变化假定补偿参数(DLZ S7, 象面离焦)分别改变了+0.038mm 和-0.038mm。下拉表格,就会发现下面一行显示:

DSF S1..2 0.0200000V 0.026 -0.031 0.000000

这就表明,MTF 的最大变化(-0.031)是由前面元件(DSY S1..2)的 Y 向偏心-0.020mm 引起的。注意,补偿该公差的补偿元的值是零。这是因为同轴公差(DLZ Si 或者聚焦)不能够补偿非对称误差。可以增加偏心补偿元(对于公差

或者补偿元的数目没有专门的限制), 假设检测和完成这些调整, 无论在结构或者在经济方面都是可行的。

提示:

每个公差和补偿元只能有一个值, 因为通过比较各视场之间的具体的公差值可以实现这个要求。每个公差对每个视场会产生不同的影响, 实际上, 总会有一个视场是确定逆灵敏度运行中公差值的最坏的情况。

Probable Change in MTF (MTF 的概率变化) 是在综合了所有定义过的公差的基础上计算出的一个统计值。在每一个灵敏度表的后面还打印的有其它的统计值, 在下面会做进一步的解释。

5.5.1.1 误差能使系统更好吗?

误差中的许多项都会引起 MTF 的正值变化。但是, 一个误差是如何引起 MTF 提高的呢? 原因就在于该系统并非是针对某视场的某个 MTF 频率专门进行优化。可以假设整个设计是按照设计要求进行优化的, 并且, 假定一个带有特定符号的单个公差可能会提高某个具体的 MTF 值。但是, 当许多误差同时运行时, 综合提高的可能性实际上是零。

还要注意, 当计算补偿元时, 它们被局限于消除由误差造成的性能恶化, 但是, 不可能将系统的性能提高到优于标称值。

5.5.2 限制范围和舍入误差的影响

表格中的 **Manufacturing Error** (加工误差) 可以通过使 MTF 下降到指定的值 (0.01 是缺省值) 所对应的公差值得到, 包括可使用的补偿元的影响。然而, 只有很少几个参数能达到这个值, 多数都无法实现。在一些情况下, 将公差量四舍五入到一个方便的值就限制了公差范围。但是, 最普通的理由就是使用限制: TOR 对所有的公差设置上下边界值避免出现不现实的值 (稍微严些或者非常宽松)。这些限制显示在文本输出中。下面显示的是共轴 (公差) 的限制范围 (注意, 这个程序也可以显示偏心公差的限制范围)。

	Tolerance limits	
	MINIMUM	MAXIMUM
* RADIUS	0.0200	
*SAG (挠度)	0.0020	0.0500
**Power (面形误差)	2.0	12.0
IRREGULARITY	0.5	3.0
THICKNESS	0.02000	0.50000
INDEX	0.00010	0.00200
V-NUMBER	0.20	0.80

*半径公差由半径和挠度限制共同决定。

**光学表面面形半径的公差是面形局部公差的 2—4 倍。

正如前面所讨论的，可以在 TOR 对话框中的 Tolerance Limits 列表里调整该限制范围。在线 *Reference Manual* 资料 TOR 一节里很详细地解释了决定这些值的因素。

5.5.3 概率分布、交叉项和统计

在计算了所有的灵敏度之后，必须进行统计预测。在线 *Reference Manual* 中将讨论假设、计算、方法和输出表（第 6 章，“Tolerancing（公差分配）”；重点查阅标题为，“Description of Output”和“Technical Notes”两节，从 6-23 页开始）。这里是几个要点：

- 假定误差是在公差范围之内，而且，遵循一种特定的概率分布（也可以改变概率功能表中的一些项目，敲击表格，按 F1 键，得到这方面的帮助）。

- 统计预测是以数学算法为基础的。这种“模拟蒙特卡罗”法对于大量（ $N>10$ ）的独立误差是有效的。一个真实蒙特卡罗模拟的宏指令（tolmonte.seq）也适用。

- 交叉项包含在统计预测里，就是说，误差可以与其它误差组合或者部分地消除其它误差的影响。

对每一个视场，都会显示出诸如下面形式的一份表格。

```
DSY S5..6      0.0200000v    -0.014    0.022    0.000000
DSX S5..6      0.0200000v    -0.002    -0.002    0.000000

PROBABLE CHANGE IN MTF          -0.040
```

```
PROBABLE CHANGE OF COMPENSATORS (+/-)    0.649247
```

Units - linear dimensions in mm. angles in radians,
fringes in wavelengths at 546.1 nm.

The probable change in MTF assumes a uniform distribution of manufacturing errors over the range for all parameters except tilt and decenter which have a truncated Gaussian distribution in X and Y

CUMULATIVE PROBABILITY	CHANGE IN MTF	
50.0 PCT.	0.002	* If it is assumed that the errors can only take on the extreme values of the tolerances, the 97.7 percent probable change in MTF is -0.068
84.1 PCT.	-0.019	
97.7 PCT.	-0.040 *	
99.9 PCT.	-0.061	

假设透镜是按照透镜模型中使用的公差来制造，那么，对累计概率表的解释就是，与设计的 MTF 相比，被建成的系统在该视场下的 MTF 的变化有 97.7% 的概率是 -0.054 或者更小一些。其它的百分比可以用同样的方法解释（50% 代表平均值，而 84.1%，97.7% 和 99.9% 分别代表 1 σ ，2 σ ，3 σ 的可信度）。表格右侧的注释表明什么是可能最坏的情况，假设所有的参数均是在允许公差范围

的极限情况下被加工。

5.5.3.1 补偿元的范围

补偿元可能变化的范围也近似于 2σ 的水平。这就意味着，如果补偿元（该例子中是焦移）可以变化 $\pm 0.5\text{mm}$ ，那么，这个变化范围将允许有 98% 的可能性对被建造的系统进行补偿（例如，有 2 % 的概率是因为共轴误差的组合太大，该移动范围会使系统散焦）。这个信息为装配设计者也提供了一种指南。

5.5.4 公差输出表格

在每次 TOR 运行结束时，都会显示出共轴和偏心公差的表格，将灵敏度表格中所有的数据汇总成一个紧凑的形式。在每一张表格之后，紧接着就会显示出公差的限制范围。下面显示的是 Decentered Tolerances（偏心公差）表。

DECENTERED
TOLERANCES

Cooke Triplet f/4.5

ELEMENT NO.	FRONT RADIUS	BACK RADIUS	ELEMENT WEDGE		ELEMENT TILT		EL. DEC/F	
			TIR	ARC MIN	TIR	ARC MIN	TIR	mm
1	21.48138	-124.10000	0.0020	0.5	0.0041	1.0	0.0152	0.0
2	-19.10000	22.00000	0.0020	0.8	0.0027	1.0	0.0189	0.0
3	328.90000	-16.70000	0.0080	2.1	0.0039	1.0	0.0181	0.0

Radii are given in units of mm.

For wedge and tilt, TIR is a single indicator measurement taken at the smaller of the two clear apertures. For decenter and roll, TIR is a measurement of the induced wedge and is the maximum difference in readings between two indicators, one for each surface, with both surfaces measured at their respective clear apertures. The direction of measurement is parallel to the original optical axis of the element before the perturbation is applied. TIR is measured in mm.

半径的单位是 mm。

对于楔形和倾斜，TIR 是在两个通光口径中比较小的那一个孔径上进行的倾斜误差（或者平行误差）的一种测量。对于偏心和滚动，TIR 是感应楔形（Induced Wedge）的一种测量，由于是沿着每个表面的通光孔径进行测量，每个表面都有一个测量值，因此，TIR 是两个测量值之间读数的最大差值。TIR 按 mm 测量。

5.5.5 性能汇总表

Performance Summary 表以一张表格的形式汇总了标称值和可能变化的数值（对系统的性能和补偿元的范围而言）。在这里，可以很快地浏览一下公差运行的结果，并且，核对一下 Design+TOL 栏是否满足已被制造的性能技术要求。

RELATIVE FIELD	FREQ L/MM	AZIM DEG	WEIGHT	DESIGN	DESIGN + TOL *	COMPENSATOR RANGE (+/-) *
						DLZ S7
0.00, 0.00	15.00	TAN	1.00	0.926	0.882	0.649247
0.00, 0.69	15.00	RAD	1.00	0.602	0.538	0.649247
0.00, 0.69	15.00	TAN	1.00	0.451	0.396	0.649247
0.00, 1.00	15.00	TAN	1.00	0.365	0.325	0.649247
0.00, 1.00	15.00	RAD	1.00	0.498	0.429	0.649247

5.6 其它的公差分析属性

正如本章前面所阐述的, CODE V 中还有其它的公差属性, 包括 TOD (主光线畸变公差分配) 和 TOL (初级象差公差分配, 为了与老版本的 CODEV 兼容而包括的一种比较老的公差分配方法)。此外, 还有两种形式的用户自定义的公差分配, 为了最大限度地方便于用户, 它们作为 CODEV 的宏指令来执行。

用户自定义的公差分配就意味着, 用户以满足某种格式的宏指令形式来定义成像质量的判别方式。这也意味着, 如果你不可能使用所提供的某一个例子时, 你就必须编写这样一个宏指令。用户自定义公差分配也被局限于灵敏度模式, 这就意味着, 你必须设法确定一组合理的公差值。大多数情况下, 一个比较好的方法就是运行适合于 RMS 波前误差的逆灵敏度 TOR, 从而确定一组合理的初始公差设置(对于一个具体的光学系统来说, 只使用缺省值不一定合理)。必须将该透镜, 包括计算出的公差值, 存储在 .len 的文件中。

两种形式的用户自定义公差分配:

● **TOLFDIF.SEQ**——*FDIF* 意味着“有限差别”, 这就是与一种与 TOR 的差别, 使用微分的方法来评价公差。有限差别意味着透镜是在标称状态下被评价, 然后, 进行变化, 因此, 标称结果减去改变后的结果就得到了由于变动而产生的差值。一旦所有的误差都被评估过 (一次一个公差), 类似于 TOR 中一样, 进行统计计算。

● **TOLMONTE.SEQ** ——这个宏指令同时应用所有公差的扰动影响来创建一个由用户评价宏指令进行评价的“蒙特卡罗样本”。当非常多的样本 (多于 50 个) 被形成后, 就可以以所有的样本为基础得出统计和概率曲线。

这些宏指令在 **Analysis>Tolerancing** 菜单里的 **User—Finite Differences** 和 **User-Monte Carlo** 条目下可以使用。在 Reference Manual 的 11D 一章“CODEV Supplied Macros”中有更详细的介绍。

下面的表格比较了 TOR, TOLFDIF, 和 TOLMONTE 的基本性能。

公差分配方法	算 法	提供的性能评价判据	提供的公差	备 注
TOR	波前微分	RMS 波前误差; 衍射 MTF; 光纤耦合效率	CODE-V 提供的公差 (例如 DLR,DLT 等)	对于小公差量,快速而精确,包括交叉项
TOLFDIF 宏指令	有限差别	CODEV 可以计算所有的项	CODE-V 提供的公差和用户自定义的公差	相当快,但是不包含交叉项。对于一些性能判定方式,不可能太精确。
TOLMONTE 宏指令	蒙特卡罗模拟	CODEV 可以计算所有的项	CODE-V 提供的公差和用户自定义的公差	如果进行多次实验运行,会比较精确,但是,慢 (比 TOR 慢 100 多倍)

第六章 反射系统

反射系统是普通的光学传播系统。与折射系统相比,没什么根本的不同,有一些与符号习惯(厚度和曲率)有关的细节可能会使输入出现一些不同。反射系统通常都会有中间遮挡。本章中所列举的例子综合使用了反射系统的几个普通的属性。

目录

CODEV 中的反射系统.....	128
反射系统的数据.....	129
孔径问题.....	132

6.1 CODEV 中的反射系统

6.1.1 用 CODEV 设计反射系统

一般来说，在 CODE-V 中使用以反射表面，而不是以折射表面为基础的系统进行设计没有什么区别。各种 CODE-V 选项在操作上是相同的，与被使用的系统类型无关（在某些选项中，例如 **ENV** 和 **ELE**，必须首先指定反射镜镜片的数据；在 **Surface Properties** 视窗中的 **Materials** 页面中输入这些数据）。主要的区别就在于玻璃名称、厚度的符号，以及为了建立正确的系统模式需要反复确定表面的遮挡。

除了折射模式（RMD）被改输成 REFL 外，输入一个反射表面与输入一个折射表面完全一样。有两种方法可以实现：

- 从 LMD 数据视窗 Refract Mode 单元格的下拉清单中选择 REFL；
- 或者，输入 REFL 作为玻璃名字，这样，就设置了折射模式（必须输入唯一的四个字母 REFL）。

如果反射面是一块第二表面反射镜（second surface mirror），因此，反射面两侧的介质都是玻璃，不是空气（或是空白），仍旧可以使用 REFL 作为玻璃的名字，或者把折射模式设置成 REFL。CODE-V 会自动地从前面的表面中选择玻璃的折射率和特征参数。材料的名字会被填入单元格，但是，单元格变成灰色，而且不可编辑，这就表明该材料事实上是从 REFL 表面之前的材料“拾取”获得的，如下表所示。

Y Radius	Thickness	Glass	Refract Mode
Infinity	Infinity		Refract
Infinity	5.0000	BK7_SCHOTT	Refract
-33.0000	-10.0000	BK7_SCHOTT	Reflect
Infinity	-4.2853		Refract

6.1.2 符号规则

一个折射面到下一个折射面的厚度符号通常是正的，因为在正常情况下，后一个折射表面相对于当前表面而言是位于+Z 轴方向。然而，如果是一个反射面，那么，下一个表面相对于该反射面来说，通常是位于-Z 轴方向。因此，厚度被输入负值。因为此后的光线继续沿着 Z 轴的负方向传播，所以，后续所有的厚度值都应该输成负值，直到光线碰到第二个反射面为止。之后，光线又重新沿着 Z 轴的正方向传播，厚度重新被输入成正值（直到光线碰到第三个反射面，以此类推）。

提示:

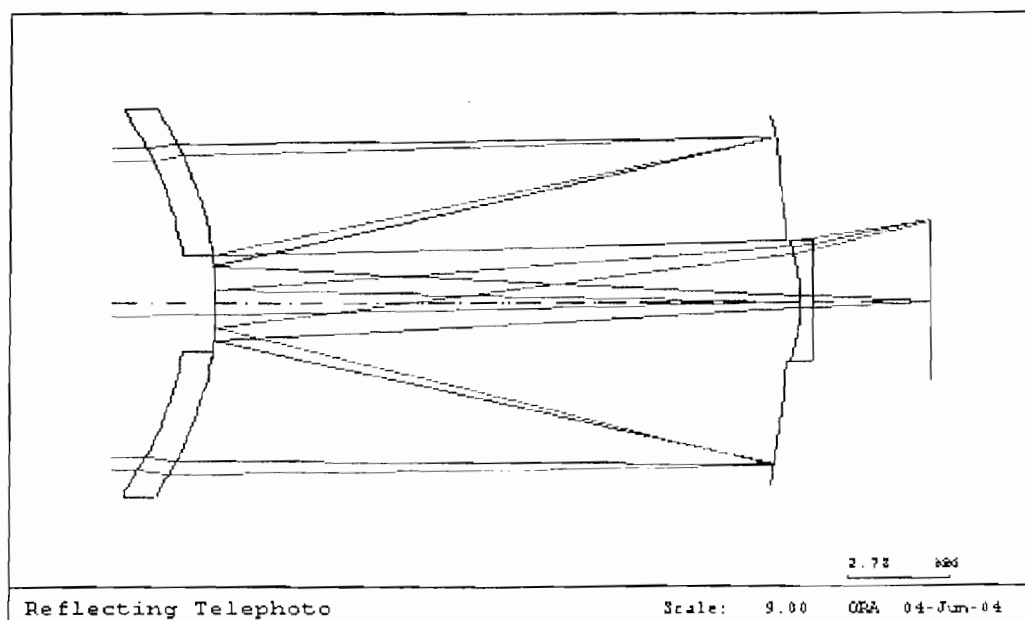
反射后厚度值的符号总要被改变。偶数次反射后(0、2、4)，符号应该是正值。奇数次反射后符号应该是负值。除非碰到了另外一个反射面，否则厚度将一直使用该符号。

无论是反射前和后，曲率(或是半径)输入的符号规则与折射面一样：如果曲率中心位于顶点的右边(+Z轴)，是正值；如果位于顶点的左边(-Z轴)，为负值。

6.1.3 双程面(Double Pass Surfaces)和系统

在一些反射系统中，有些表面被光线“光临”两次，例如一个双程面系统(例如，一种零位透镜测试)。这些表面必须被输入两次，也许更多次，每输入一次，光线就会接触表面一次。当这样一个系统被优化时，这些面必须被正确地耦合在一起，所以，曲率(经常还包括厚度值)不会单独变化。尽管耦合编码也可以被使用，但是，最好还是用“拾取”获得。

有可能把多程反射系统(multi-pass reflecting system)设置成非连续面(NSS)，尽管该表面会多次受到光线的照射，但是，每个表面仅仅被输入一次。NSS系统的内容在这本使用指南中没有描述(参阅在线 CODE-V *reference Manual*，从 2A-379 页开始)。

6.2 反射系统的数据**6.2.1 表面数据**

上面所显示的 **MAKSUTOV** (马克苏托夫) 系统中, 有一个前置的折射透镜来校正球面反射镜的球差。在该透镜的后表面上有一部分表面被镀铝, 起着次反射镜的作用。虽然, 该透镜的后表面和镀铝面实际上是同一个表面, 但是, 光线投射到这个表面上实实在在的是两次, 一次是在碰到主镜之前, 一次是在碰到主镜之后。因为光线两次通过这个面, 所以, 在 CODEV 中就必须输入两次, 每通过一次就要输入一次。

校正透镜被输入为表面 1 和表面 2, 主反射镜被输入为表面 3, 厚度为负值。被光线第二次光顾的校正透镜的后表面 (次反射镜) 被输入为表面 4, 厚度为正值。然后, 光线传播到场镜, 输入为表面 5 和表面 6, 像平面是表面 7。打开透镜文件, 检查一下折射模式, 并改变该例子中厚度的符号。

1. 选择 **FILE>NEW** 菜单, 启动 **New Lens Wizard**, 然后, 在 **New Lens Wizard** 首页上敲击 **NEXT** 键。

如果选择 **FILE>NEW** 菜单, 而不启动 **New Lens Wizard**, 就选择 **Tools>Preferences** 菜单, 敲击 **UI** 键, 并在 **Use Wizards** 区域选中 **New Lens**。

2. 选择 **CODE-V Sample Lens** 并敲击 **NEXT** 键。

3. 在样本透镜文件的清单中敲击 **cv-lens:maksutov.len**, 然后敲击 **Done**。

这样做就会跳过 **New Lens Wizard** 中的所有系统数据, 并认可样本文件中的值 (F#/10, 单波长 546.1nm, 物方视场角 0° 和 1.5°)。全部都是球表面的表面数据如下所示。

Lens Data Manager							
Surface #	Surface Name	Surface Type	Y Radius	Thickness	Glass	Refract Mode	Y Semi-Aperture
Object		Sphere	Infinity	133333333.0300		Refract	
1		Sphere	-11.7867 ^v	0.8307	K4_SCHOTT	Refract	5.4325 ^o
2		Sphere	-12.5183 ^v	15.7506 ^v		Refract	5.5658 ^o
Stop		Sphere	-39.6792 ^v	-15.7506 ^v		Reflect	5.2891 ^o
4		Sphere	-12.5183 ^v	16.0829 ^v		Reflect	1.5963 ^o
5		Sphere	-6.6458 ^v	0.3323	K4_SCHOTT	Refract	1.9696 ^o
6		Sphere	Infinity	3.3300 ^s		Refract	2.0458 ^o
Image		Sphere	Infinity	-0.0867 ^v		Refract	2.6186 ^o
End Of Data							

注意, 表面 3 (光阑) 和表面 4 的 **Refract mode** (折射模式) 列中显示的是 **Reflect**, 厚度 3 的符号是负的 (一次反射, 奇数), 而厚度 4 是正的 (二次反射, 偶数)。还注意到, 有一些值是相同的, 例如表面 2 和表面 4 的半径, 这表明它们有同一个真实表面。现在, 这些都是独立的变量 (数据表中用符号 ^v 表示), 但是, 你应该使用“拾取”来改变它们。

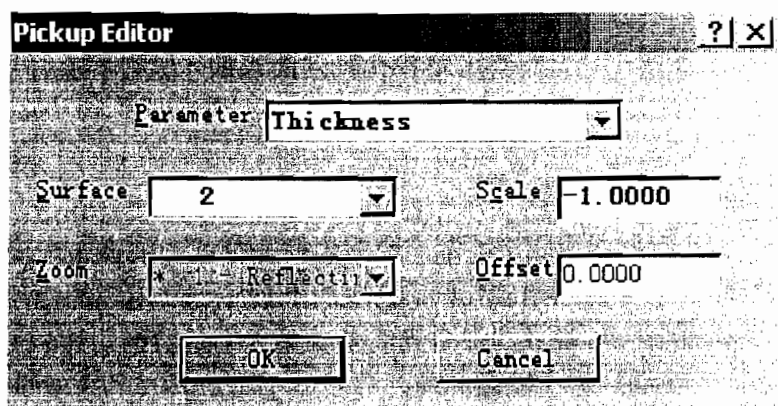
4. 右击表面 4 的 **Y Radius**，从快捷菜单中选择 **Pickup**。显示 **Pickup Editor**。

5. 在 **Parameter** 栏中选择 **Same as Dependent Parameter** 或者 **Radius**。在 **Surface** 栏中填 2，在 **Scale** 栏中填 1.0，在 **Offset** 栏中填 0，然后，敲击 **OK**。

6. 在 **LDM** 视窗中，右击表面 3 的 **Thickness**，从快捷菜单中选择 **Pickup**。

7. 在 **Parameter** 栏中选择 **Same as Dependent Parameter** 或者 **Thickness**，在 **Surface** 栏中填 2，在 **Scale** 栏中填 -1.0（注意负号），在 **Offset** 栏中填 0，然后点击 **OK**。

输入的值显示在下面的 **Pickup Editor** 例图中。



现在，**LDM** 窗口看上去就像下面的例子（注意小的红色状态指示符 **p**，表明是拾取）。前面已经讲过，灰色单元格表示该数据是由程序确定的，因此，不能直接进行编辑；这些数据包括由拾取、求解、缺省、或者多孔径确定的值。仍然可以右击这些单元格来改变它们的状态（例如，可变或者用户自定义的）。表面标记 **Primary** 和 **Secondary** 是可选项，但是，稍后一些，当你准备增加孔径和遮挡时可能会有用。

Lens Data Manager							
Surface	Surface Name	Surface Type	Y Radius	Thickness	Glass	Refract Mode	Y Semi-Aperture
Object		Sphere	Infinity	1.33333e+009		Refract	
1		Sphere	-11.78675 V	0.83073	K4_SCHOT	Refract	5.43251
2		Sphere	-12.51825 V	15.75064 V		Refract	5.56581
Stop	primary	Sphere	-39.67921 V	15.75064 P		Reflect	5.28907
4	Secondary	Sphere	-12.51825 P	16.08293 V		Reflect	1.59630
5		Sphere	-6.64584 V	0.33229	K4_SCHOT	Refract	1.96980
6		Sphere	Infinity	3.32398 S		Refract	2.04580
Image		Sphere	Infinity	-0.08667 V		Refract	2.61860
End Of Data							

6.3 孔径问题

6.3.1 CODE-V 中的孔径类型

在前面的例子中所看到的表面孔径都是光学通光孔径 (*optical clear apertures*) (缺省或者自定义值)。他们代表能够通过光线的表面的最大外径; 投射到该孔径之外的光线都被遮挡。在这个例子中, 还需要另外一种类型的孔径, 即遮拦孔径, 以遮拦某半径范围内的光线。CODEV 还有另外两种类型的孔径, 是边缘 (*edge*) 孔径和孔 (*hole*) 孔径。它们在 NSS 系统中最常用, 在这个例子中用不到。

在主反射镜设置中使用孔状的孔径类型, 看起来可能最直观, 但是, 对于顺续 (计算) 的透镜系统 (例如, 在此列举的例子) 来说, 合适的孔径类型是遮挡孔径。CODE-V 中遮挡孔径类型有两种功能:

1. 阻挡投射在遮拦孔径内的光线;
2. 告诉绘图选项, 无需画出遮拦孔径内的表面 (参阅 129 页 (原文 142 页) 上透镜绘图部分)。

6.3.1.1 需要设置虚面

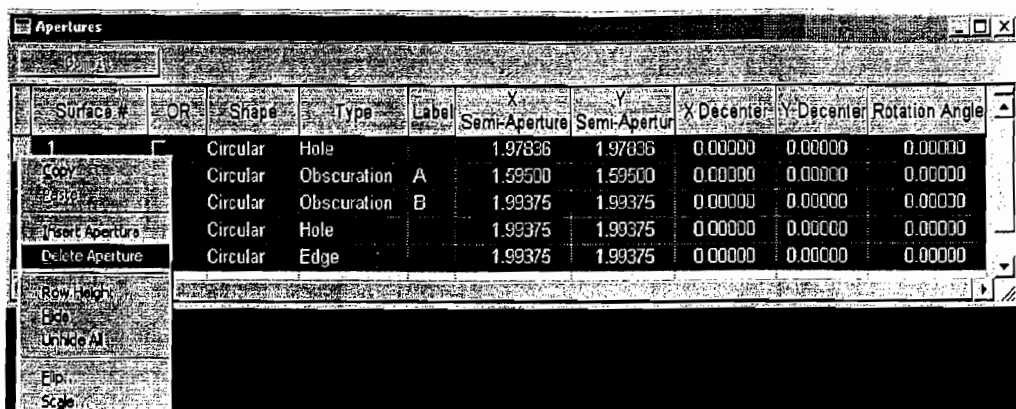
注意, 在某些反射系统中, 为了设置遮拦孔径就必须插入虚设面, 从而正确地对实际表面的排列布置建模。这取决于顺序光线追迹的性质。尽管真实透镜和透镜视图上可能表明中心光线是被某表面的背面边遮挡 (例如, 表面 4), 但是, 在遇到这个表面之前, 光线不会被遮挡 (当前例子中, 是表面 2)。原因就在于, 在顺续 (计算) 的系统中, 仅仅是为了追迹从 S3 (该系统中, 是主镜) 出射之后的光线, 才设置了 S4。

因为在这个具体的系统中, 有一个折射面与次镜 (S2 和 S4) 重合, 所以, 不需要虚设面。但是, 在其它的系统中, 需要加入虚设面 (典型的是空气—空气) 以便于在正确的位置设置必要的遮挡。

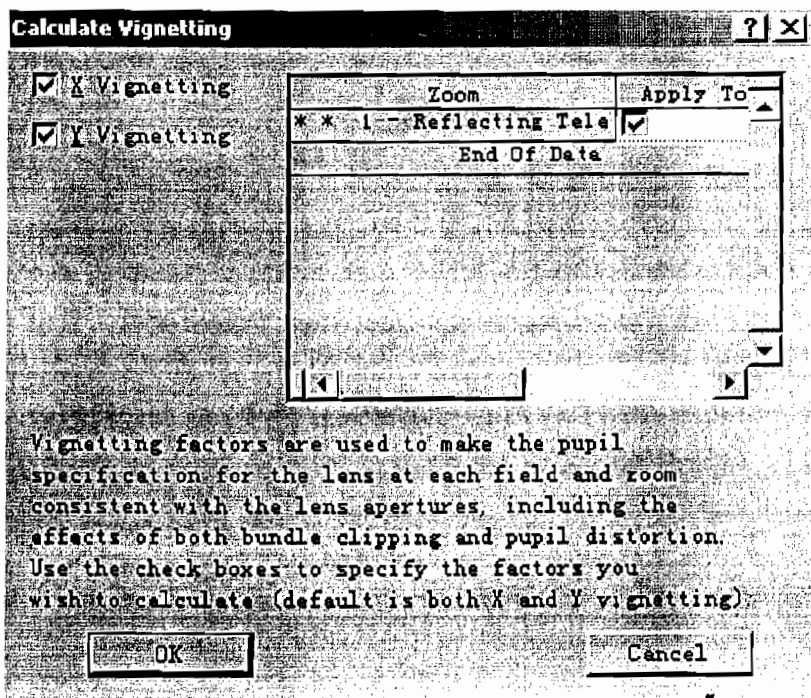
6.3.2 输入遮拦孔径

你需要输入两个遮拦孔径, 一个在校正透镜的后表面上, 代表真实镀过铝的部分, 另一个在主镜上, 实际上就是反射镜中的那个孔。该样本透镜已经确定了一些孔径和遮拦 (和一些孔, 尽管通常只在 NSS 系统中使用)。但是, 为了学会如何使用光线追迹来确定正确的遮拦, 将删除所有的孔径值, 从头开始做起。

1. 选择 **Review>Apertures** 菜单。显示出 **Apertures** 视窗。
2. 通过选择第一行 (敲击该行的第一列), 并拖动鼠标到最后一行来选择所有的孔径。
3. 右击 (任何一行的) 第一列, 并且, 从快捷菜单中选择 **Delete Aperture**。



4. 选择 **Lens>Calculate>Set Vignetting Data** 菜单，并且，在 **Calculate Vignetting** 对话框中敲击 **OK**（这就确保了所有的标准光线都可以正确地被追迹）。

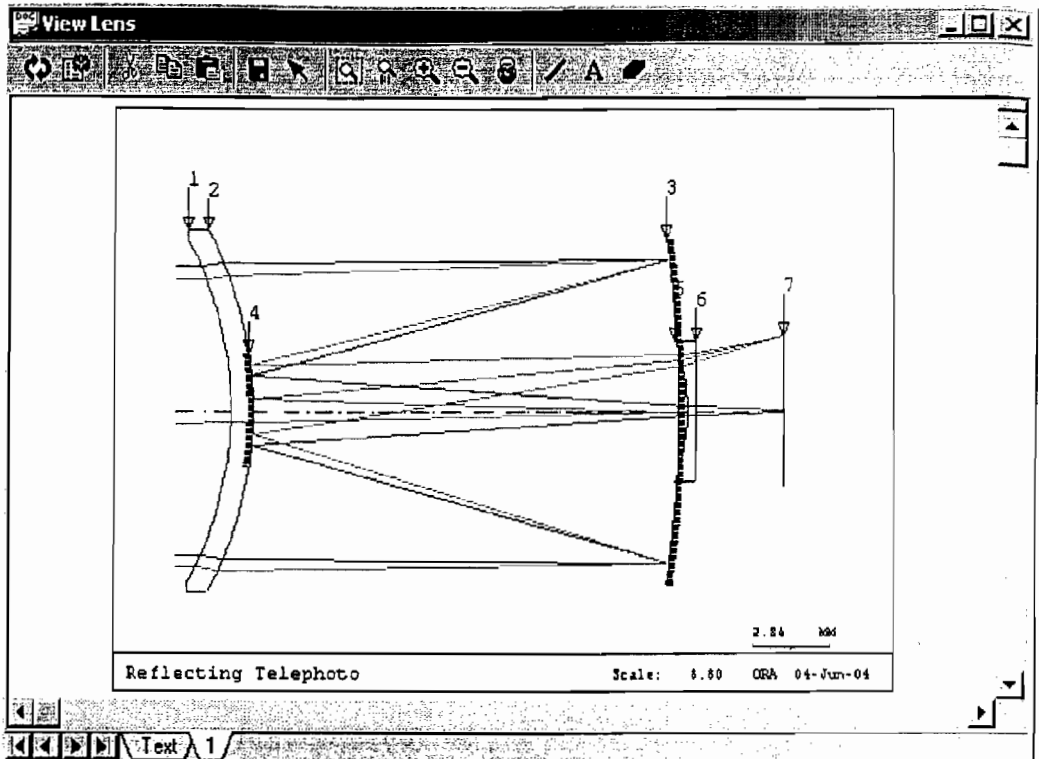


5. 选择 **Display>View Lens** 菜单，绘出透镜系统图。显示出 **View Lens** 对话框。

6. 在 **View Lens** 对话框中的 **Lens Drawing** 选项中，敲击 **Hatch back of mirrors** 审验框，从 **Number Surfaces** 中的列表内选择一种颜色给表面的序号数的加上标记。

7. 在 **Ray Properties** 列表上，检查 **Drop CA Blocked/Obstructed Rays** 框，敲击 **OK**。

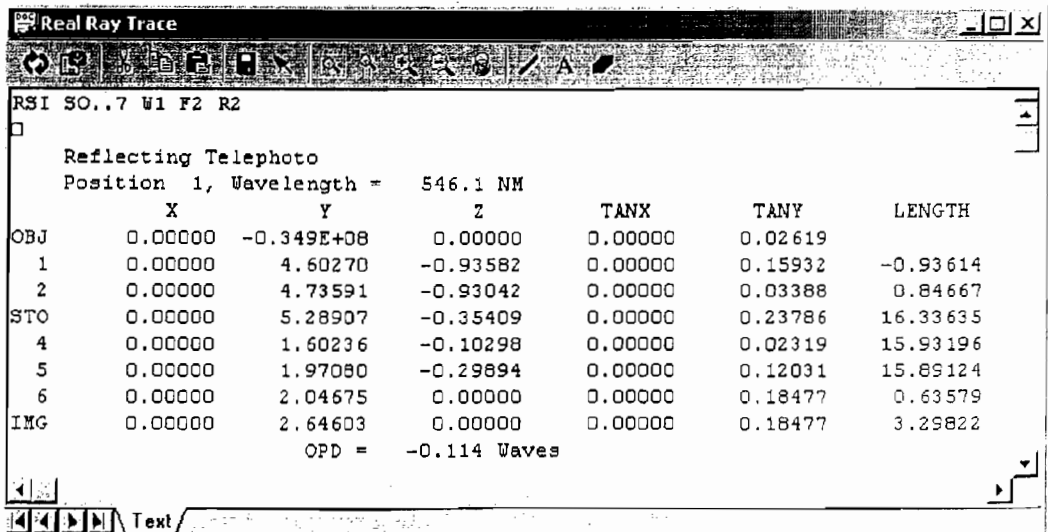
下面显示出的是输出视窗。



现在，可以追迹一条或者两条光线来确定合适的遮拦。从该视图中，看起来似乎是轴外视场的最上面的边缘光线会提供必要的信息（R2, F2）。

8. 选择 **Analysis>Diagnostics>Real Ray Trace** 菜单。显示 **Real Ray Trace** 对话框。

9. 在 **Pupil/Field Ray Trace** 的 **Settings** 栏中，标准光线数输入 2，视场数输入 2，敲击 **OK**。
下面显示的是输出视窗。



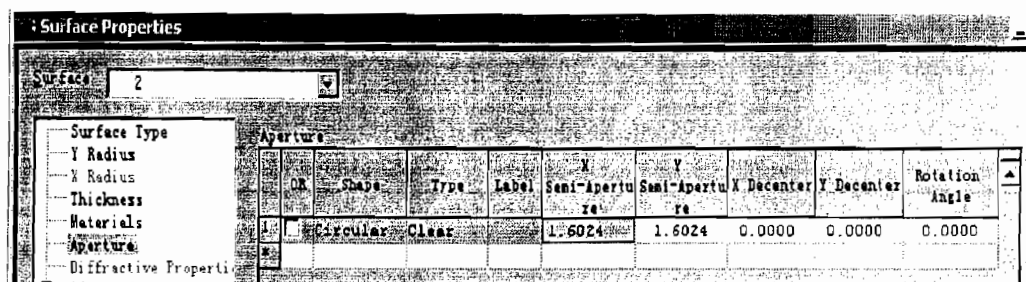
查看输出结果，并且，与 LDM 数据视窗中和带有标记的透镜视图中的表面相比较。可以看出表面 4 上 Y 光线高度 (1.60236) 就是表面 2 的遮拦尺寸 (半径)。也可以使用像面上的高度 (s3, 2.64603) 作为主镜的遮拦半径。可以使用 s5，但是，光线会向上倾斜，因此，较大的像面尺寸会使所有的光线都通过反射镜中的孔。

10. 选择和复制 (使用 **Edit>Copy** 菜单或者 **CTRL+C** 键) 光线在表面 4 上的 Y 向高度。

11. 在 LDM 数据视窗中右击表面 2 的孔径，而且，从快捷菜单中选择 **Surface Properties**。

12. 在 **Surface Properties** 视窗中进入 **Aperture** 页。

13. 对于表面 2 来说，敲击 **Aperture** 数据表空行中的任何之处，然后，双击 **Type** 单元格，从下拉列表中选择 **Obscuration**。然后，粘贴 (用 **Edit>Paste** 菜单，或者 **CTRL+V** 键) 该光线的高度作为 Y 向的半孔径值。



14. 从 **Real Ray Trace** 视窗中复制光线在像面上的 Y 向高度。

15. 在 **Surface Properties** 视窗中，将 **Surface** 栏 (视窗左上边) 中的值改变为表面 3 (主镜)。

16. 对于表面 3，敲击 **Aperture spreadsheet** 列表中空白行的任何之处，双击 **Type** 单元格，并选择 **Obscuration**，然后，粘贴光线高度作为 Y 向的半孔径值。

17. 敲击 **View Lens** 视窗中重新计算键，再次绘制透镜视图。现在，遮拦的尺寸就比较合适了。

第七章 非球面

许多光学系统都使用非球形表面，例如非球面，柱面和其它面形。CODEV 软件中含有一些非常有用的面形，包括衍射面。

目录

非球面类型.....	137
一个非球面例子.....	138
锥形表面.....	143
输入一个椭球面.....	145
多项式非球面.....	148
非球面单透镜举例.....	149
衍射面.....	153
光线栅格的问题.....	156

7.1 非球面的类型

7.1.1 非球面表面

现代的光学系统广泛地使用着非球面透镜，锥形面也出现在许多反射系统中（包括带有抛物面主反射镜的普通牛顿望远镜）。由于现代加工方法（例如玻璃或者塑料压模法）和数控方法（例如金刚石车削，这种方法可以直接在金属、玻璃、塑料和锗等特殊材料上加工出精密的非球面）的实现，多项式非球面正在愈来愈广泛地被应用。许多红外系统都使用非球面，绝大部分光盘系统都使用一个双非球面单透镜作为光盘读出物镜。衍射光学元件也已经是非常普通。分格式衍射光栅已经在光谱仪和其它仪器中使用了许多年。全息元件也在一些系统中使用。非全息衍射光学元件，例如二元光学元件也正在变得越来越普通。

CODEV 有两类表面：旋转对称表面和非旋转对称表面。下面的章节将叙述这些表面。一般来说，当使用旋转对称表面时，可以使用 Y-视场和圆形孔径（保持两侧对称），反之，对于非旋转对称系统，可能需要在 X 和 Y 方向定义多个视场或者物点，并且要使用矩形或者椭圆形孔径。

非球面在用户界面中用三个字母的命令编码形成的叙述名（例如，SPH，CON，等等）来识别，并且在命令的输入和许多输出的列表中也使用。在这一节，将介绍一些比较通用的非球面面形。其它的一些面形可以按照完全相同的方式定义和修改，区别在于定义这些面形时会有比较多的和不一样的系数和参数。如果想进一步了解有关一些特殊面形的信息，可以在 help 或者在线的 Reference Manual 中查询（三个字母的编码是一个好的搜索线索，当然，也可以使用其它的关键词）。

7.1.2 旋转对称表面

这些表面包括下面一些面形：

- 球面（SPH）—球形表面，包括平面（曲率为零）。CODEV 中为缺省面形。
- 锥面（CON）—真正的锥面（抛物面，椭球面和双曲面）。
- 非球面（ASP）—多项式非球面，在基本的锥形表面上加上一个（高达）第二十级的变形系数。
- 花键轴面（SPL）—花键形表面（由 4 个径向高度和斜面定义）。
- 热梯度面（THG）—热梯度表面（通常由 CODEV 中环境变化特征确定）。
- 光栅面（GRT）—刻蚀在一个第十级多项式非球面上的线形衍射光栅。
- 透镜模块（MOD）—透镜模块是一个黑匣子透镜，被用来表示一块具有理想的三级像差或者特定量三级像差的薄透镜或者厚透镜（在要求两个

相邻的表面中设定特殊表面时只能设定一个)。

7.1.3 非旋转对称表面

包括下面一些表面：

- 柱面 (CYL) — 柱形表面 (有非零曲率, 并且, 仅仅在 Y-Z 平面或者 X-Z 平面内有光焦度)。
- Y 向环面 (YTO) — 环面在 Y-Z 平面内, 是围绕一条平行于 Y 轴的基轴旋转而形成的第十级多项式面。
- X 向环面 (XTO) — 环面在 X-Z 平面内, 是围绕一条平行于 X 轴的基轴旋转而形成的第十级多项式面。
- 变形非球面 (AAS) — 这种表面在 X-Z 和 Y-Z 平面内有不同的曲率和第十级非球面外形。(在 X-Z 平面和 Y-Z 平面两侧有对称性)。
- 全息面/衍射面 (HOE) — 各种形式的衍射表面 (例如 “二元光学”) 都用所谓的全息面来代表。
- 用户定义面 (UDS, UD2) — 由用户定义的表面, 用户使用 FORTRAN 或者 C 语言写出子程序, 并连接在 CODEV 中以确定该表面。

在 CODEV 中有被称为特定表面 (SPS) 的另一些非球面。它们不同于上述的非球面类型, 并且都使用命令编码 SPS, 再加上一些描述特定类型的限定词 (举例来说, 奇数多项式非球面被称为 SPS ODD, 包括半径的奇次和偶次幂, 而超锥面被称为 SPS SCN)。它们被作为特定的面形被列在该软件的用户界面中。当你在查看输出列表时, 应当明白 SPS ODD 和 SPS SCN (和其它的编码) 代表着不同类型的表面。对于更为详细的资料, 请在线查阅 Reference Manual 中的 SPS。

7.2 一个非球面实例

7.2.1 平场施密特物镜

作为使用非球面光学系统的一个例子, 可以参考 CODEV 中的样板透镜 “平场施密特物镜”。这种物镜是一个众所周知的折反射设计形式。它使用一个弱光焦度的非球面玻璃元件来校正一个相对孔径比较大的球面主镜的球差 (在这种情况下, $f/1.3$)。一个非常靠近像平面的透镜用来校正场曲。对这个例子, 我们不想叙述得太多, 仅仅是查看一下未来使用非球面类型设计时将会遇到的用户界面元素。

1. 选择 **File>New** 菜单进入 **New Lens Wizard**。敲击 **Next** 按钮进入 New Lens Wizard 的下一页。
2. 选择 **CODEV Sample Lens** (缺省), 并且敲击 **Next**。
3. 向下滚动找出文件 **cv_lens: schmidt.len**, 并且敲击它。
4. 在保留 New Lens Wizard 的页上敲击 **Next** 以查阅和接受该物镜的系统数据, 或者敲击 **Finish** 键以接受全部数值, 并且查看透镜图。