

文章编号: 1001-3806(2010)03-0405-04

## 像差计算的可视化应用软件开发

秦 华

(山东理工大学 理学院, 淄博 255049)

**摘要:** 为了方便快速地计算像差, 采用 MATLAB 中 GUI 工具, 从球面光路计算的向量公式出发, 得到了一计算像差的程序界面, 在程序界面输入各个相关参量, 点击界面上各种像差菜单就能得到不同视场角在光瞳上不同入射点的各种像差, 并可以计算系统的焦距和理想像面的像距以及给出像面的模糊程度(同一物点发出的不同方向光线的聚焦程度)的具体数值。结果表明, 该软件程序语言简单, 程序语句大大减少, 占用机时少, 运行结果正确。程序通过编译后可以脱离 MATLAB 运行环境独立运行。

**关键词:** 几何光学; 光路计算; 像差; 程序界面

中图分类号: O435.2

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.1001-3806.2010.03.034

## Visualization application software development for calculating light aberrations

QIN Hua

(Department of Sciences, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

**Abstract:** In order to calculate aberrations rapidly and easily, MATLAB's GUI tools are used to make a program interface. A user interface software for calculating light aberrations is realized according to vector formulae to trace optical path passing through spherical faces, when various parameters are input in the program interface, different kinds of aberrations with different view-field angles and different incident points on the pupil can be got by clicking aberration menus, containing on-axis aberrations, off-axis aberrations of wide beam in the tangential plane and the sagittal plane, and aberrations of sharp beam. The focal distance, the ideal image distance of an optical system and spatial ambiguities in images are also obtained. It can be used as a single interface to calculate all sorts of aberrations. The soft has a simple programming language, fewer programming sentences, less machine time and correct running results. The compiled program can be run independently on any operating system without the MATLAB operating environment.

**Key words:** geometrical optics; optical computation; geometrical aberration; program interface

### 引言

光路计算或像差计算是光学设计的基础, 也是自动化设计的基础。因此, 光路计算一直是光学设计的重要课题<sup>[1-3]</sup>, 其研究的主要方向是改变计算的形式, 减轻光路计算的劳动, 加快光路计算的速度。

电子计算机出现以后, 很快被用来替代人工计算, 并进一步发展成为像差自动校正, 只要原始系统选择合理, 像差自动校正程序能很快得出要求的设计结果<sup>[4]</sup>。设计人员不必了解光学设计软件的编制方法和程序自动进行像差校正的具体过程。即使这样, 像差计算也是必要的<sup>[5-7]</sup>, 通过像差计算更进一步熟练不同光学设计的不同要求, 从而实现更合理

的设计。

作者从像差计算的向量公式出发, 利用 MATLAB 编程工具, 编制了一套像差计算的程序界面, 只要在界面上输入相关的参量, 点击有关的像差菜单, 就能给出所需要计算的像差。本程序通过编译后可以形成脱离 MATLAB 运行环境的独立运行程序。

### 1 像差计算的起始和终结公式

#### 1.1 由入射光线的位置和方向计算出射光线的位置和方向

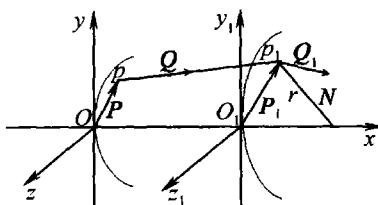


Fig. 1 The schematic diagram of position and direction of an incident ray and an exit ray

如图 1 所示,  $P$  表示入射光线上某一点  $p$  的位置

作者简介: 秦 华(1964-), 男, 副教授, 主要从事光学设计及全固态激光器的研究工作。

E-mail: zfjqinh@gmail.com

收稿日期: 2009-04-07; 收到修改稿日期: 2009-05-20

向量,  $\mathbf{Q}$  表示沿光线进行方向上的单位向量;  $r$  表示  $p_1$  点的曲率半径,  $\mathbf{N}$  表示其法向单位向量;  $d$  为前后两球面间隔。

入射光线为:

$$\begin{cases} \mathbf{P}(x, y, z) = x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k} \\ \mathbf{Q}(\alpha, \beta, \gamma) = \alpha\hat{i} + \beta\hat{j} + \gamma\hat{k} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}$  分别为沿  $x, y, z$  3 个坐标轴方向的单位向量, 由于  $\mathbf{Q}$  为单位向量, 因此它在坐标轴上的分量  $\alpha, \beta, \gamma$  就是它的 3 个方向余弦。 $\mathbf{P}_1, \mathbf{Q}_1$  分别为折射光线折射点  $p_1$  的位置向量和沿折射方向上的单位向量。

折射光线为:

$$\begin{cases} \mathbf{P}_1(x_1, y_1, z_1) = x_1\hat{i} + y_1\hat{j} + z_1\hat{k} \\ \mathbf{Q}_1(\alpha_1, \beta_1, \gamma_1) = \alpha_1\hat{i} + \beta_1\hat{j} + \gamma_1\hat{k} \end{cases} \quad (2)$$

通过  $\mathbf{P}(x, y, z), \mathbf{Q}(\alpha, \beta, \gamma)$  逐步运算求出  $\mathbf{P}_1(x_1, y_1, z_1)$  和  $\mathbf{Q}_1(\alpha_1, \beta_1, \gamma_1)$ , 参考文献[8]中给出了运算公式详尽的推导。循环运用这些公式, 即可计算任意共轴球面系统中任意光线的光路。

## 1.2 起始公式

1.2.1 物平面位在无限远的情形 当物平面位在无限远时, 物距  $l = \infty$ , 系统的成像范围用视场角  $2\omega_{\max}$  表示, 光束大小用光束最大半径  $h_{\max}$  表示, 入瞳位置用  $l_z$  表示。光路计算的起始坐标点取在入瞳面上, 坐标原点和入瞳中心重合。

由无限远同一物点射来的光线是一束平行光线, 同一视场角不同光线的单位向量  $\mathbf{Q}$  的 3 个方向余弦都是相同的。对应于某一视场角  $\omega$  的光线的方向余弦为:  $\alpha = \cos\omega, \beta = -\sin\omega, \gamma = 0$ 。

需要对不同的视场角进行像差计算, 一般对视场角  $\omega_{\max}$  按以下比例系数取 6 个点:  $a$  分别为 1.0, 0.85, 0.7071, 0.5, 0.3, 0.0。对于某一个视场角, 需要在整个光束中计算若干条光线, 通过入瞳上不同点的光线, 对应不同的坐标  $y, z, x \equiv 0$ , 因此有:  $x \equiv 0; y = bh_{\max}; z = ch_{\max}; -1 \leq b, c \leq +1$ , 一般取  $b, c$  分别为  $\pm 1.0, \pm 0.85, \pm 0.7071, \pm 0.5, \pm 0.3, 0.0$ ; 对于子午光束,  $c \equiv 0$ ; 对于弧矢光束,  $b \equiv 0$ 。

(1) 轴上点:  $a = 0$ , 由(1)式得:  $\alpha = 1; \beta = \lambda = 0$ 。

轴上物点的光束对称于光轴, 一般只计算  $x-y$  坐标平面的光线, 同时只需要计算光轴上半部分的光线,  $x \equiv 0; y = bh_{\max}; z = 0$ 。

(2) 轴外物点子午光束: 取  $a$  分别为 1.0, 0.85, 0.7071, 0.5, 0.3。 $b$  分别为  $\pm 1.0, \pm 0.85, \pm 0.7071, \pm 0.5, \pm 0.3, 0.0, c \equiv 0$ 。

(3) 轴外物点弧矢光束: 取  $a$  分别为 1.0, 0.85,

0.7071, 0.5, 0.3,  $b \equiv 0$ ,  $c$  分别为  $\pm 1.0, \pm 0.85, \pm 0.7071, \pm 0.5, \pm 0.3, 0.0$ 。

## 1.2.2 物平面位在有限距离的情形 如图 2 所示, 物

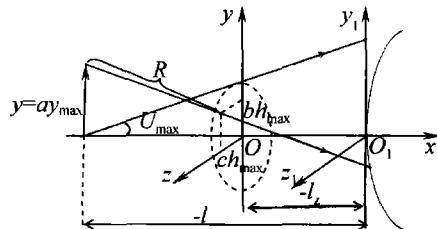


Fig. 2 The incident ray when an object plane is at a finite distance

距用  $l$  (使用非近轴近似公式时表示方法) 表示, 成像范围用物高  $2y_{\max}$  表示, 光束大小用数值孔径  $\sin U_{\max}$  表示, 入瞳位置用  $l_z$  表示, 光路计算的起始坐标原点同样取在入瞳中心, 同时物点位在  $x-y$  坐标面内。同一物点发出的光线在入瞳坐标面的投射点位置, 按数值孔径  $\sin U_{\max}$  用系数  $b$  和  $c$  进行划分:

$$\begin{cases} x \equiv 0 \\ y = |l - l_z| \tan[\arcsin(b \sin U_{\max})] \\ z = |l - l_z| \tan[\arcsin(c \sin U_{\max})] \end{cases} \quad (3)$$

物高  $y = ay_{\max}$  的物点, 通过入瞳面上  $(x, y)$  的光线的方向余弦为:

$$R = (l - l_z) \sqrt{1 + \left(\frac{ay_{\max} - y}{l - l_z}\right)^2 + \left(\frac{-z}{l - l_z}\right)^2} \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{l - l_z}{R}, \beta = \frac{ay_{\max} - y}{R}, \gamma = \frac{-z}{R} \quad (5)$$

(1) 轴上点:  $a = 0, c = 0, b$  分别为 1.0, 0.85, 0.7071, 0.5, 0.3。

(2) 轴外物点子午光束:  $a$  分别为 1.0, 0.85, 0.7071, 0.5, 0.3;  $b$  分别为  $\pm 1.0, \pm 0.85, \pm 0.7071, \pm 0.5, \pm 0.3, 0.0; c = 0$ 。

(3) 轴外物点弧矢光束:  $a$  分别为 1.0, 0.85, 0.7071, 0.5, 0.3;  $b = 0; c$  分别为 1.0, 0.85, 0.7071, 0.5, 0.3。

## 1.3 终结公式

用起始公式求出入射光线的坐标以后, 利用光路计算公式逐面进行计算, 即可求出最后一面折射点的坐标和折射光线的单位矢量:

$$\begin{cases} \mathbf{P}_k(x_k, y_k, z_k) = x_k\hat{i} + y_k\hat{j} + z_k\hat{k} \\ \mathbf{Q}_k(\alpha_k, \beta_k, \gamma_k) = \alpha_k\hat{i} + \beta_k\hat{j} + \gamma_k\hat{k} \end{cases} \quad (6)$$

式中, 下标  $k$  表示系统的第  $k$  个面。利用参考文献[8]中的终结公式通过 MATLAB 编程就可以得到各种像差的值。把所编程序用 mcc-m 编译工具编译后, 即可得到独立于 MATLAB 运行环境的可执行程序。

## 2 程序介绍

图3是像差计算输入参量界面。当物距 $L$ (使用

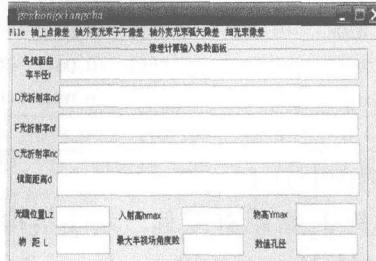


Fig. 3 The interface used to input parameters for calculating aberrations  
近轴公式时表示方法)为无穷远时,所输入的参量包括各面的曲率半径 $r$ ,D,F,C光的折射率 $n$ ,各镜面之间的距离 $d$ ,光瞳位置 $L_z$ ,最大入射光束半径 $h_{\max}$ ,最大半视场角度数。当物距 $L$ 有限远时,把入射光束半径 $h_{\max}$ 和最大半视场角度数换为输入物高 $y_{\max}$ 和数值孔径。

要计算的像差分为4大类,如图4最上面的一行菜单所示,有轴上点像差,轴外宽光束子午像差,轴外宽光束弧矢像差,细光束像差。



Fig. 4 The drop-down menus for calculating on-axis aberrations

鼠标指向轴上点像差并左键单击,出现下拉菜单,如图4所示,下拉菜单有8类可要计算的像差,包括系统焦距 $fdpie$ (D光在该系统的焦距)、 $fcpie$ (C光在该系统的焦距),C,F,D光理想像面的像距 $lcpie$ , $ldpie$ , $lfpie$ ,轴上点球差 $\delta ldpie$ ,轴上色差 $\delta lcpie$ 和 $\delta lfpie$ ,近轴光线轴上色差 $\delta lalcpie$ 和 $\delta lalfpie$ ,远轴光线F光和C光色差 $\delta lfcpie$ ,近轴光线F光和C光色差 $\delta lalfcpie$ 。

鼠标指向轴外宽光束子午像差并左键单击,出现如图5所示的下拉菜单,可计算理想成像像高 $y_0pie$ ,

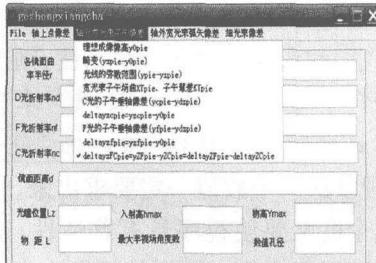


Fig. 5 The drop-down menus for calculating off-axis aberrations of wide beam in the tangential plane  
畸变,光线的弥散范围,宽光束子午场曲 $Xspie$ 、子午

慧差 $Kspie$ ,C光和F光的子午垂轴像差,C光和F光产生的畸变 $deltayzcpie$ 和 $deltayzfpie$ ,F光和C光主光线像高之差 $deltayFCpie$ 。

鼠标指向轴外宽光束弧矢像差并左键单击,出现如图6所示的下拉菜单,可计算像的模糊程度,弧矢场曲 $Xspie$ ,弧矢慧差 $Kspie$ ,正弦差 $SCpie$ 。

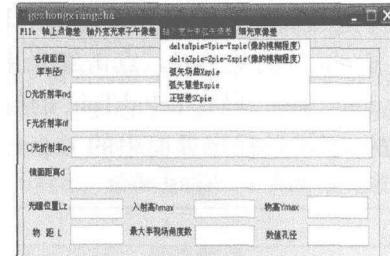


Fig. 6 The drop-down menus for calculating off-axis aberrations of wide beam in the sagittal plane

对于细光束像差有如图7所示的下拉菜单:C光、D光、F光子午和弧矢场曲 $xspie$ , $xspie$ ,C光、D光、F光的像散 $xtspie$ ,D光的子午球差 $\delta ltpie$ 和D光的弧矢球差 $\delta lspie$ 。



Fig. 7 The drop-down menus for calculating aberrations of sharp beam

## 3 程序软件使用示例

计算示例1:物距无穷远。图8是双胶合物镜示意图,系统的结构参量见表1<sup>[8]</sup>, $r$ , $d$ 取相同单位。

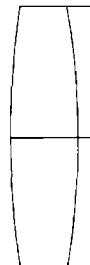


Fig. 8 The doublet objective lens

Table 1 Optical system structural parameters

$r$	$d$	$n_D$	$n_F$	$n_C$
		1.0	1.0	1.0
139.62	10	1.5688	1.57597	1.56582
-121.58	4	1.7172	1.73468	1.71037
-535.90		1.0	1.0	1.0

光学特性为: $D_{\max} = 60$ ;  $2\omega_{\max} = 10^\circ$ ;  $l = \infty$ ;  $l_z = 0$ 。  
把以上参量代入到程序界面中,两个参量之间用空格

键隔开。点击轴上点像差→系统焦距,在 MATALB 命令窗口就会输出 fdpie 为 239.2586,fcpie 为 239.4236, 表示 D 光的焦距和 C 光的焦距。点击轴上点像差→轴上点球差, 命令窗口输出 deltaLdpie 为 0.0096, -0.0703, -0.0886, -0.0653, -0.0281, 分别表示 1.0, 0.85, 0.7071, 0.5, 0.3 入射半径的球差。

点击轴外宽光束弧矢像差→弧矢慧差 Kspie 在命令窗口得到 Kspie 的值见表 2。点击细光束像差→D 光子午球差 deltaLTpie, 得到 deltaLTpie 的值如表 3 所示。表 2 中的  $K_s'$  就是程序界面中的 Kspie, 表 3 中的

Table 2 Sagittal comas

$\omega$	$K_s'$					
1.0	-0.0446	-0.0306	-0.0203	-0.0097	-0.0034	0
0.85	-0.0375	-0.0257	-0.0171	-0.0081	-0.0028	0
0.7071	-0.0309	-0.0212	-0.0141	-0.0067	-0.0023	0
0.5	-0.0217	-0.0148	-0.0098	-0.0047	-0.0016	0
0.3	-0.0129	-0.0088	-0.0059	-0.0028	-0.0010	0
$h$	1.0	0.85	0.7071	0.5	0.3	0

Table 5 Aberrations in different apertures

$h$	deltaLdpie	deltaLfpie	deltaLepie	deltaLfcpie	SCpie(0.3sinU <sub>max</sub> )
1.0	0.0040	0.0882	0.0143	0.0739	$-2.224 \times 10^{-5}$
0.85	-0.0289	0.0257	-0.0081	0.0338	$5.102 \times 10^{-5}$
0.7071	-0.0362	-0.0035	-0.0075	0.0040	$6.900 \times 10^{-5}$
0.5	-0.0265	-0.0168	0.0105	-0.0272	$5.176 \times 10^{-5}$
0.3	-0.0114	-0.0155	0.0307	-0.0462	$2.230 \times 10^{-5}$
0	0	-0.0117	0.0448	-0.0564	0

Table 6 Aberrations for different fields of view

$y$	xtpie	xspie	xtspie	deltaLTpie(1.0h <sub>max</sub> )	KTpie(1.0h <sub>max</sub> )	deltayfcpie	deltayzpie(1.0h <sub>max</sub> )
1.0	-0.5087	-0.2428	-0.2658	-0.0011	-0.0018	-0.000047	-0.0013
0.85	-0.3685	-0.1758	-0.1928	0.0003	-0.0017	-0.000042	-0.0008
0.7071	-0.2556	-0.1218	-0.1338	0.0015	-0.0015	-0.000036	-0.00046
0.5	-0.1281	0.0610	-0.0671	0.0027	-0.0011	-0.000027	-0.00016
0.3	-0.0462	-0.0220	-0.0242	0.0036	-0.0007	-0.000017	-0.000035

以上示例 1 和示例 2 的结果与参考文献[8]和参考文献[9]中的所得结果一致, 程序运行结果正确。

#### 4 分析与结论

本软件的特点是把种类繁多的像差集合在一个界面上来完成编程求解, 操作简便。由于编程语言为 MATLAB 语言, 所以语句简单, 大大简化了编程工作量, 编程语句的减少也大大地缩减了机时量, 提高了计算效率。例如, 计算全口径全视场轴外点光线的弥散范围, 要输出 55 个像差值, 只要鼠标一按数值立刻显出, 并且把这 55 个像差值按视场和口径的不同用矩阵的形式输出, 这样的结果简单明了。

对于像差计算的编程, 重要的是程序能够适应各

Table 3 Tangential spherical aberrations of D-ray

$\omega$	$\delta L_T'$					
1.0	0.0318	-0.0552	-0.0786	-0.0606	-0.0265	0
0.85	0.0257	-0.0593	-0.0814	-0.0619	-0.0269	0
0.7071	0.0208	-0.0627	-0.0836	-0.0630	-0.0273	0
0.5	0.0152	-0.0665	-0.0861	-0.0641	-0.0277	0
0.3	0.0117	-0.0689	-0.0877	-0.0649	-0.0280	0
$h$	1.0	0.85	0.7071	0.5	0.3	0

$\delta L_T'$  是程序界面中的 deltaLTpie。

计算示例 2: 物距有限远。系统结构参量见表 4<sup>[9]</sup>,  $L = -143.16$ ,  $y = -10$ ,  $\sin U_{\max} = 0.033$ ,  $l_z = 0$ 。把以上参量代入到程序界面中, 计算部分像差结果如表 5、表 6 所示。

Table 4 Optical system structural parameters

$r$	$d$	$n_D$	$n_F$	$n_C$
		1.0	1.0	1.0
31.05	4	1.5688	1.575969	1.565821
-13.996	1.5	1.7172	1.734681	1.710371
-34.99	1.0	1.0	1.0	1.0

种情况, 即不论光线的视场角和光束孔径是多少, 程序都能给出正确的运行结果。编程过程中会遇到一些特殊的光线, 比如求不同视场不同孔径的宽光束子午场曲  $X_T'$  时, 要使用上光线和下光线两条光线, 但是当上下光线趋于重合时, 即孔径缩小到一定程度, 计算公式就不能再用了, 编程时就要注意这个度, 则这时只能用求细光束子午场曲的公式来求。求子午球差  $\delta L_T' = X_T' - x_t'$  要同时用到  $X_T'$  和  $x_t'$  ( $x_t'$  表示细光束子午场曲), 所以这两个数值一定要求出来, 编程过程中即要考虑这个度又要使程序具有普适性, 还要考虑到程序的简化即运行速度。同样的问题也出现在求弧矢球差的编程过程中。

(下转第 428 页)

Table 1 Parameter of the composite cavity

S	F	$L_{\text{mode}}/\text{m}$	$\Delta L/\text{m}$	$\Delta\nu_{\text{mode}}/\text{MHz}$	$\Delta\nu_f/\text{MHz}$	$\Delta\nu_c/\text{MHz}$	M	$f_{\text{mode}}/\text{GHz}$
10	9.6	48	5	4.310	41.379	413.79	232	1
20	9.55	47.75	5	4.333	41.379	827.58	231	1
25	9.54	47.70	5	4.337	41.379	1034.4	231	1

### 3 结 论

主要研究了复合腔主动锁模激光器的结构。基于传输函数法建立了复合腔等效结构模型,从理论上分析了复合腔主动锁模激光器的结构特性。详细论证了等效复合腔基频与两子腔腔长的关系。在1GHz 射频调制频率下,给出了复合腔各参量与超模噪声的关系。结果表明,复合腔可以有效减小超模数目,超模噪声的抑制与单腔相比并不具有优势,对主动锁模激光器走向实用化有一定的参考意义。

### 参 考 文 献

- [1] YOSHIDA E, NAKAZAWA M. 80~200GHz erbium doped fiber laser using a rational harmonic mode locking technique [J]. Electron Lett, 1996, 32(18): 1370-1372.
- [2] ZHAO Y, LIU Y Z, ZHAO D S, et al . Evolution of mode-locked technology of fiber lasers [J]. Laser Technology, 2009, 33(2): 162-165 (in Chinese).
- [3] HARVEY C T, MOLLENAUER L F. Harmonically mode-locked fiber ring laser with an internal Fabry-Perot stabilizer for soliton transmission [J]. Opt Lett, 1993, 18(2): 107-109.
- [4] DEPRIEST C M, YILMAZ T, ETAMAD S, et al . Ultralow noise and supermode suppression in an actively mode-locked external-cavity semiconductor diode ring laser [J]. Opt Lett, 2002, 27(9): 719-721.
- [5] DOEER C R, HAUS E P, IPPEN E P, et al . Additive pulse limiting [J]. Opt Lett, 1994, 19(1): 31-33.
- [6] LI Y H, LOU C Y, WU J, et al . Novel method to simultaneously compress pulses and suppress supermode noise in actively mode-locked fiber ring laser [J] IEEE Photonics Technology Letters, 1998, 10(9): 1250-1252.
- [7] THOEN E R, GREIN M E, KOONTZ E M, et al . Stabilization of an active harmonically mode-locked fiber laser using two-photon absorption [J]. Opt Lett, 2000, 25(13): 949-950.
- [8] NAKAZAWA M, TAMURA K, YOSHIDA E. Supermode noise suppression in a harmonically modelocked fiber laser by self-phase modulation and spectral filtering [J]. Electron Lett, 1996, 32(4): 461-463.
- [9] ONODERA N. Supermode peak suppression in harmonically mode-locked erbium-doped fiber ring lasers with composite cavity structure [J]. Electron Lett, 1997, 33(11): 962-963.
- [10] POTTIEZ O, DEPARIS O, HAELETERMAN M, et al . Experimental study of supermode noise of harmonically mode-locked erbium-doped fiber lasers with composite cavity [J] IEEE J Q E, 2002, 38(3): 161-167.
- [11] HU Z Y, DING Y K, JIA D F, et al . Supermode noise suppression in harmonically mode-locked fiber lasers with composite cavity [J]. Journal of Tianjin University, 2003, 36(5): 645-647 (in Chinese).
- [12] AGRAWAL G P. Applications of nonlinear fiber optics [M]. San Diego: Academic Press Incorporated, 2001:414.
- [13] BILBO T J, DONKOR E. Modeling of noise in actively and passively mode-locked fiber laser systems [J]. Proc SPIE, 2003, 5104:33-39.

(上接第 408 页)

通过很多示例的运行结果来看,本程序具有很好的普适性和正确的运行结果,光学设计中需要求出的所有像差值都能从本程序的运行中得到。下一步需要做的工作就是把各种像差的运行结果用像差曲线表示出来,使读者一目了然,而再进一步的工作就是进行像差自动校正程序的设计。

### 参 考 文 献

- [1] XIONG D P, HE Zh P. The optical path calculation and analysis of a sphere surface optical system [J]. Optical Instruments, 2004, 26(4): 45-47 (in Chinese) .
- [2] XU Ch, MA X M, LIU J S. Analysis of tracks of light rays in dual-stage wedge type fiber optical isolator [J]. Laser Technology, 2005, 29(5): 455-458 (in Chinese).
- [3] WANG F, ZHU Q H, JIANG D B, et al . Analysis of system aberration influenced by the lens tilt in a multi-pass amplifier [J]. Laser Technology, 2007, 31(3): 333-336 (in Chinese) .
- [4] QU E Sh, YANG Zh, WANG G, et al . Combining binary optics with achromats to revise secondary spectrum [J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(11): 2274-2278 (in Chinese) .
- [5] TIAN J Y, GONG M L, YAN P, et al . The design of bi-aspherical single objective lens with numerical aperture of 0. 85 [J]. Laser Technology, 2005, 29(2): 116-118 (in Chinese) .
- [6] SHEN W M, XUE M Q. Aberration analysis and optical design of aspheric spectacle lens [J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(6): 744-747 (in Chinese) .
- [7] SAWADA H, SANNO MIYA T, HOSOKAWA F, et al . Measurement method of aberration from Ronchigram by autocorrelation function [J]. Ultramicroscopy, 2008, 108(11): 1467-1475.
- [8] YUAN X C. Optical design [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1988:11-38 (in Chinese) .
- [9] YUAN X C. Modern optical design [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1995:160-161 (in Chinese) .