

文章编号 1004-924X(2009)04-0757-07

# 透射式旋转对称光学系统中的偏振像差

张 颖,赵慧洁,邢 辉,程 宣

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院 精密光机电一体化技术教育部重点实验室,北京 100191)

**摘要:**为了控制透射式旋转对称光学系统中的偏振效应,提高系统的光学性能,对该系统中的偏振像差进行了分析。在偏振像差理论的基础上,用偏振光线追迹法导出了该系统偏振像差的计算公式。对影响偏振像差的因素进行了分析,提出了透射式旋转对称光学界面产生的偏振像差的影响因子。最后,对一望远物镜进行了偏振像差分析,结果显示,入射角为  $18.77^\circ$  时所产生的偏振像差是入射角为  $7.86^\circ$  时的 5.5 倍;镀有膜系 Layers2 时的偏振像差比镀有  $\text{MgF}_2$  膜时减小了约 30%; $\lambda=1.1\ \mu\text{m}$  时的偏振像差约为  $\lambda=0.55\ \mu\text{m}$  时的 10 倍。分析结果表明,对于具有宽光谱、大入射角、大视场等特点的透射式旋转对称光学系统,要想提高其光学性能,必须控制偏振像差。尽可能减小入射角的大小,将薄膜设计和光学设计结合起来,通过减小偏振分离的方式来降低系统中的偏振效应,是控制光学系统中的偏振像差的有效措施。

**关键词:**光学设计;偏振像差;偏振光线追迹;旋转对称光学系统;增透膜

**中图分类号:** O436.3; TH703 **文献标识码:** A

## Polarization aberrations of transmitting rotationally symmetric optical systems

ZHANG Ying, ZHAO Hui-jie, XING Hui, CHENG Xuan

(Key Laboratory of Precision Opto-mechatronics Technology, Ministry of Education, School of Instrumentation Science & Opto-electronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** The polarization aberrations of an optical system were analyzed to control the polarization effects and to improve the optical performance of the transmitting rotationally symmetric optical systems. The expressions of the polarization aberrations were deduced by a method of polarization ray tracing based on a polarization aberration theory. Then, the factors affecting the polarization aberrations were analyzed and the affecting factor of a transmitting rotationally symmetric optical interface was defined. Finally, the polarization aberrations in a telescope objective were analyzed. Obtained results show that the polarization aberrations at an incident angle of  $18.77^\circ$  are 5.5 times as large as those at an incident angle of  $7.86^\circ$ , the polarization aberrations of the interfaces coated with Layers 2 are decreased by 30% as compared with those coated with  $\text{MgF}_2$  and the polarization aberrations at  $\lambda=1.1\ \mu\text{m}$  are 10 times as large as those at  $\lambda=0.55\ \mu\text{m}$ . The results indicate that polarization aberrations must be controlled to improve the optical performance of the transmitting rotationally symmetric optical systems with large fields of view, large incident angles or worked in wide wavelengths. This paper

收稿日期:2008-07-01;修订日期:2008-09-28.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60678030);中国博士后科学基金资助项目(No. 20070420284)

presents two kinds of methods for control the polarization aberrations of this type of optical systems effectively, and they are to keep the angles of incidence as small as possible and to minimize the polarization separation by optimizing the coating design.

**Key words:** optical design; polarization aberration; polarization ray tracing; rotationally symmetric optical system; anti-reflective thin film

## 1 引言

透射式旋转对称系统是光学仪器中最常用的光学系统,其几何像差的研究已经非常成熟<sup>[1-4]</sup>,但其偏振像差一般被忽略,普遍认为光束的同一波面上有相同的振幅和偏振态。事实上,所有的光学界面都会导致非正入射光波的偏振态发生变化,所以从某种程度上来说,所有的光学系统都会改变光波的偏振态。偏振光束经过透射式旋转对称光学界面后,同一出射面上不同点的出射光具有不同的偏振态,产生偏振像差。若光束经过多个透射式旋转对称光学界面,产生的偏振像差会引起一定的偏振效应,影响光学系统的成像质量和测量精度。本文在偏振像差理论的基础上,针对透射式旋转对称光学系统的特点,利用基于琼斯算法的偏振像差函数导出该类系统中的偏振像差的计算公式,对影响其偏振像差的因素进行了分析,并通过实例分析,提出控制偏振像差的有效措施。

## 2 偏振像差理论

### 2.1 偏振像差的定义

美国亚利桑那州大学 Russell A. Chipman 博士在 1989 年明确定义了偏振像差的概念<sup>[5-8]</sup>。在光学界面上非正入射的光是引起偏振像差的主要原因。偏振像差即是光线通过光学系统时光的偏振态所发生的变化,它在光学界面上以及光在媒质中传播的过程中产生。偏振像差是几何光学中波像差的扩展,并且存在于所有的光学系统中。

对于一般的透射式旋转对称光学系统,系统的偏振像差主要包含两种偏振效应—线性二次衰减和线性延迟。线性二次衰减是指通过光学系统的光的两个本征偏振之间的相对振幅改变的大小:

$$D = \frac{|\rho_q^2 - \rho_r^2|}{\rho_q^2 + \rho_r^2}, \quad (1)$$

其中,  $\rho_q$  和  $\rho_r$  分别是光的两个本征偏振的振幅。线性延迟是指通过光学系统的两个本征偏振之间的位相差的大小:

$$\delta = |\delta_q - \delta_r|, \quad (2)$$

其中,  $\delta_q$  和  $\delta_r$  分别是光的两个本征偏振的位相。

### 2.2 偏振光线追迹

目前主要采用偏振光线追迹的方法来处理光学系统中的偏振像差<sup>[9]</sup>。偏振光线追迹的方法是几何光线追迹方法的扩展,它对几何光线追迹方法中的位相信息进行了光线的振幅补充和偏振补充。一个光线追迹程序中的基础计算是光线在光学系统中的传播。一条具体的光线在物空间的定义包括物坐标矢量  $\mathbf{h}$ 、瞳坐标矢量  $\mathbf{p}$  和波长  $\lambda$ , 跟随这条光线通过系统,从而确定光线在每一个界面上的交点的坐标、在每一种介质中的传播矢量和所有光路的长度,这一过程就是光线追迹的过程。将振幅、相位和光沿着光路的偏振态总称为光线的“偏振”,光线的“偏振”由偏振矢量定义。偏振光线追迹的一个重要的任务就是计算偏振矢量沿着光路通过光学系统时所发生的变化。

由于琼斯矢量和琼斯矩阵是比较容易解释并易于计算的,因此在对透射式旋转对称光学系统进行偏振像差分析时,采用了基于琼斯算法的偏振光线追迹的方法。琼斯矢量是描述光的偏振态的偏振矢量,琼斯矢量定义为:

$$\mathbf{E}_j = \begin{bmatrix} E_i \\ E_j \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中,  $E_i$ 、 $E_j$  分别是电场在  $\hat{i}$  轴、 $\hat{j}$  轴投影的复振幅。 $\hat{i}$  轴、 $\hat{j}$  轴和光的传播矢量  $\hat{k}$  构成了一个正交的坐标系。琼斯矩阵则描述了光学元件对琼斯矢量的影响,琼斯矩阵定义为:

$$\mathbf{E}_{J,\text{out}} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \mathbf{E}_{J,\text{in}}, \quad (4)$$

其中,  $J_{i,j}$  是复数。

系统沿着不同光路表现出的不同的偏振像差可以用偏振像差函数来描述<sup>[8]</sup>, 偏振像差函数描述的是光学系统的偏振矩阵与被追迹光线的入射高度  $h$ 、入射极坐标半径  $\rho$  和波长  $\lambda$  之间的函数关系式。利用琼斯算法时, 光学系统的偏振像差函数可以表示为:

$$\mathbf{J}(h, \rho, \lambda) = \begin{bmatrix} j_{11}(h, \rho, \lambda) & j_{12}(h, \rho, \lambda) \\ j_{21}(h, \rho, \lambda) & j_{22}(h, \rho, \lambda) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

被追迹光线的入射角  $\theta$  与其入射高度  $h$  和入射极坐标半径  $\rho$  有关, 因此偏振像差函数也可以表示成为光学系统的琼斯矩阵与入射角  $\theta$  和波长  $\lambda$  之间的函数关系式:

$$\mathbf{J}(\theta, \lambda) = \begin{bmatrix} j_{11}(\theta, \lambda) & j_{12}(\theta, \lambda) \\ j_{21}(\theta, \lambda) & j_{22}(\theta, \lambda) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

光学系统的基于琼斯算法的偏振像差函数的扩展式为:

$$\mathbf{J}(\theta, \lambda) = \exp(c_0 \boldsymbol{\sigma}_0 + c_1 \boldsymbol{\sigma}_1 + c_2 \boldsymbol{\sigma}_2 + c_3 \boldsymbol{\sigma}_3), \quad (7)$$

其中,  $\boldsymbol{\sigma}_0$  是强度矩阵,  $\boldsymbol{\sigma}_1, \boldsymbol{\sigma}_2, \boldsymbol{\sigma}_3$  是泡利旋转矩阵:

$$\boldsymbol{\sigma}_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \boldsymbol{\sigma}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\boldsymbol{\sigma}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \boldsymbol{\sigma}_3 = \begin{bmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix},$$

$$c_0 = \frac{j_{11}(\theta, \lambda) + j_{22}(\theta, \lambda)}{2}, c_1 = \frac{j_{11}(\theta, \lambda) - j_{22}(\theta, \lambda)}{2},$$

$$c_2 = \frac{j_{12}(\theta, \lambda) + j_{21}(\theta, \lambda)}{2}, c_3 = \frac{j_{12}(\theta, \lambda) - j_{21}(\theta, \lambda)}{2}, \quad (9)$$

其中,  $c_0, c_1, c_2$  和  $c_3$  描述了琼斯算法的 8 个自由度, 分别对应光学系统的 8 种独立的偏振行为:

$\text{Re}(c_0)$ ——不受偏振影响的振幅的大小;

$\text{Im}(c_0)$ ——不受偏振影响的位相的大小;

$\text{Re}(c_1)$ ——沿着坐标轴向的线性二次衰减;

$\text{Im}(c_1)$ ——沿着坐标轴向的线性延迟;

$\text{Re}(c_2)$ ——沿着  $45^\circ$  轴的线性二次衰减;

$\text{Im}(c_2)$ ——沿着  $45^\circ$  轴的线性延迟;

$\text{Re}(c_3)$ ——圆二次衰减;

$\text{Im}(c_3)$ ——圆延迟。

### 3 透射式旋转对称光学系统中的偏振像差分析

#### 3.1 公式推导

透射式旋转对称光学界面的偏振像差函数在本征坐标系中可以表示为:

$$\mathbf{J}_r(\theta, \lambda) = \begin{bmatrix} t_s & 0 \\ 0 & t_p \end{bmatrix} = \frac{t_s + t_p}{2} (\boldsymbol{\sigma}_0 + \frac{t_s - t_p}{t_s + t_p} \boldsymbol{\sigma}_1), \quad (10)$$

式(10)中,  $t_s, t_p$  分别是光的  $p$  偏振分量和  $s$  偏振分量在折射率分别为  $n_1, n_2$  的两种介质之间的振幅透射系数。

设本地坐标系相对于本征坐标系的旋转角度是  $\gamma$ , 则透射式旋转对称光学界面在本地坐标系中的偏振像差函数可以表示为:

$$\mathbf{J}'_r(\theta, \lambda) = \mathbf{R}^{-1}(\gamma) \mathbf{J}_r(\theta, \lambda) \mathbf{R}(\gamma), \quad (11)$$

其中,  $\mathbf{R}(\gamma)$  是旋转矩阵:

$$\mathbf{R}(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma \\ \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix}, \quad (12)$$

将式(12)代入式(11)中, 可得

$$\mathbf{J}'_r(\theta, \lambda) = \frac{t_s + t_p}{2} \left( \boldsymbol{\sigma}_0 + \frac{t_s - t_p}{t_s + t_p} (\boldsymbol{\sigma}_1 \cos 2\gamma + \boldsymbol{\sigma}_2 \sin 2\gamma) \right), \quad (13)$$

因此, 入射光线在透射式旋转对称光学界面上产生了四项偏振像差, 分别是沿坐标轴向的线性二次衰减  $D_{0^\circ}$  和线性延迟  $\delta_{0^\circ}$ , 沿  $45^\circ$  轴向的线性二次衰减  $D_{45^\circ}$  和线性延迟  $\delta_{45^\circ}$ , 令:

$$C = \frac{t_s - t_p}{2}, \quad (14)$$

则:

$$D_{0^\circ} = \text{Re}(t \cos 2\gamma), \delta_{0^\circ} = \text{Im}(t \cos 2\gamma),$$

$$D_{45^\circ} = \text{Re}(t \sin 2\gamma), \delta_{45^\circ} = \text{Im}(t \sin 2\gamma), \quad (15)$$

因此,  $|C|$  是透射式旋转对称光学界面产生的偏振像差的影响因子。

由  $Q$  个旋转对称透射式光学界面组成的旋转对称透射式光学系统的偏振像差函数可以表示为:

$$\mathbf{J}_{\text{sys}}(\theta, \lambda) = \mathbf{J}_Q(\theta, \lambda) \mathbf{J}_{Q-1}(\theta, \lambda) \cdots \mathbf{J}_2(\theta, \lambda) \mathbf{J}_1(\theta, \lambda), \quad (16)$$

入射光线通过该系统时产生的各类偏振像差等于该光线在每个透射界面上产生的各类偏振像差的总和:

$$D_{\text{sys}(0^\circ)} = \sum_{q=1}^Q D_{q(0^\circ)}, \delta_{\text{sys}(0^\circ)} = \sum_{q=1}^Q \delta_{q(0^\circ)} \quad (17)$$

$$D_{\text{sys}(45^\circ)} = \sum_{q=1}^Q D_{q(45^\circ)}, \delta_{\text{sys}(45^\circ)} = \sum_{q=1}^Q \delta_{q(45^\circ)}$$

### 3.2 影响偏振像差的因素分析

设透射界面两侧介质的折射率分别为  $n_1$  和  $n_2$ , 透射界面的传递角为  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 。由菲涅耳等式<sup>[10]</sup>, 可得:

$$t_s = \frac{2n_1 \cos \theta}{n_1 \cos \theta + n_2 \cos \theta'}, \quad (18)$$

$$t_p = \frac{2n_1 \cos \theta}{n_1 \cos \theta' + n_2 \cos \theta'}, \quad (19)$$

根据斯涅尔定律, 有:

$$n_1 \sin \theta = n_2 \sin \theta' \quad (20)$$

将式(18)、(19)和(20)代入式(14)中, 即可求得影响因子  $|C|$  的计算公式。

图 1 表示的是当  $n_1 = 1, n_2 = 1.52$  时, 振幅透射率  $t_s$ 、 $t_p$  与入射角  $\theta$  之间的关系图, 由图可知,  $t_p > t_s$ 。

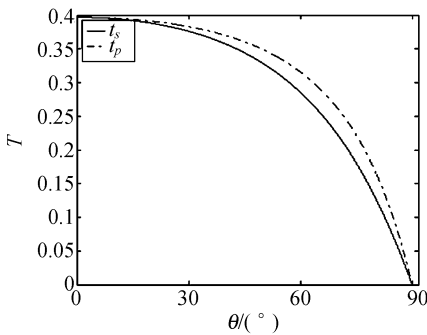


图 1 振幅透射率  $t_s$ 、 $t_p$  与入射角之间的关系图

$$(n_1 = 1, n_2 = 1.52)$$

Fig. 1 Relationship between amplitude transmitting index  $t_s$ 、 $t_p$  and incident angle  $\theta$

$$(n_1 = 1, n_2 = 1.52)$$

图 2 表示的是当  $n_1 = 1, n_2 = 1.52$  时, 影响因子  $|C|$  与入射角  $\theta$  之间的关系图, 由图可知, 偏振影响因子  $|C|$  随着入射角  $\theta$  的增大而迅速增大, 当

$\theta = \theta_A = 75.3^\circ$  时,  $|C|$  的值最大。因此, 为了控制透射式旋转对称光学界面产生的偏振像差, 并保证一定的透过率, 应尽可能减小入射角的大小, 使  $\theta \ll \theta_A$ 。

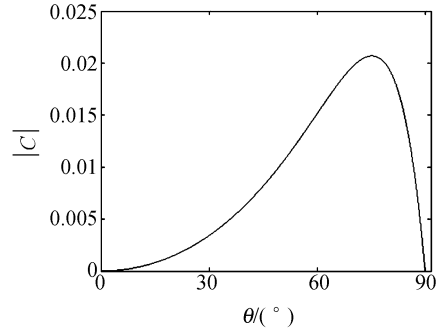


图 2 偏振影响因子  $|C|$  与入射角  $\theta$  的关系图

$$(n_1 = 1, n_2 = 1.52)$$

Fig. 2 Relationship between polarization affecting factor  $|C|$  and incident angle  $\theta$

$$(n_1 = 1, n_2 = 1.52)$$

透射式光学系统中的透射界面通常镀有增透膜。薄膜同样会产生偏振效应, 这是由于当光倾斜入射时, 薄膜对  $s$  偏振光和  $p$  偏振光表现出来的有效折射率不同:

$$\eta_p = n / \cos \theta, \quad (21)$$

$$\eta_s = n \cdot \cos \theta, \quad (22)$$

偏振分离定义为<sup>[11]</sup>:

$$\Delta n = \frac{\eta_p}{\eta_s} = \frac{1}{\cos^2 \theta} = \frac{1}{1 - \frac{n_0^2 \sin^2 \theta_0}{n^2}}, \quad (23)$$

其中,  $n_0$  是入射介质的折射率,  $n$  是薄膜的折射率,  $\theta_0$  是入射角,  $\theta$  是折射角。从式(23)中可以看出, 对于一个单层膜来说,  $\Delta n$  是一个恒大于 1 的量; 当  $\theta_0$  的值和  $n_0$  的值一定时,  $n$  的值越高,  $\Delta n$  越小。对于一个膜系组合, 有可能使  $\Delta n = 1$ , 从而达到消偏振的目的。因此, 在设计增透膜时, 应对增透膜进行优化设计, 在增大  $t_s$  和  $t_p$  的同时, 使得  $t_p$  尽可能的接近  $t_s$ , 通过这种减小偏振分离的方式来降低系统中的偏振效应。

## 4 实例分析

现利用基于琼斯算法的偏振光线追迹程序,

分析一个透射式旋转对称光学系统望远物镜中的偏振像差,该系统由3片单透镜组成,其结构图如图3所示,其光学性能如表1所示。

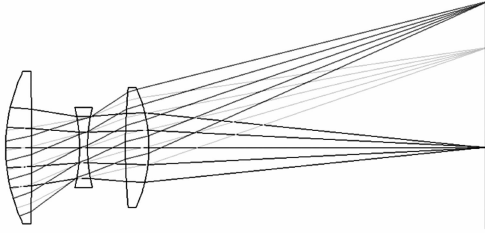


图3 望远物镜光学系统结构图

Fig. 3 Structure of telescope objective

表1 望远物镜光学系统光学性能参数

Tab. 1 Optical parameters of telescope objective

性能参数	
Focal length	50 mm
F-number	0.2
Field of view	40°
Wavelength	0.5~1.1 μm

入射光的偏振态设为轴向线性偏振,入射光在  $x$  方向的归一化振幅和位相分别为  $\rho_x=0, \delta_x=0$ ; 在  $y$  方向的归一化振幅和位相分别为  $\rho_y=1, \delta_y=0$ 。薄膜优化波长设为  $0.65 \mu\text{m}$ 。

对视场角为  $0^\circ$  的边缘光线进行偏振光线追迹,表2表示的是增透膜为单层  $\text{MgF}_2$  膜,  $\lambda=0.55 \mu\text{m}$  时的偏振光线追迹的结果;表3表示的是增透膜为多层膜系 Layers2,  $\lambda=0.55 \mu\text{m}$  时的偏振光线追迹的结果;表4表示的是增透膜为多层膜系 Layers2,  $\lambda=1.1 \mu\text{m}$  时的偏振光线追迹的结果。由于 Surf. 1、Surf. 3 和 Surf. 5 3个透射界面的入射光线是从空气到玻璃,而 Surf. 2、Surf. 4 和 Surf. 6 3个透射界面的入射光线是从玻璃到空气,因此将每次的分析结果分为两组, Surf. 1、Surf. 3 和 Surf. 5 为 A 组, Surf. 2、Surf. 4 和 Surf. 6 为 B 组。视场角为边缘光线在 Surf. 1、Surf. 3 和 Surf. 5 上的入射角分别为  $13.13^\circ, 18.77^\circ, 7.86^\circ$ ; 在 Surf. 2、Surf. 4 和 Surf. 6 上的入射角分别为  $5.71^\circ, 9.64^\circ, 11.76^\circ$ 。

表2 增透膜为单层  $\text{MgF}_2$  膜,  $\lambda=0.55 \mu\text{m}$  时的偏振光线追迹的结果

Tab. 2 Results of polarization ray tracing when transmitting film is  $\text{MgF}_2$  and  $\lambda=0.55 \mu\text{m}$

Surface	Linear diattenuation	Linear retardance	Ray intensity out
Surf. 1	0.000 975 862	$-160.65^\circ$	0.990 4
Surf. 2	0.000 493 929	$138.63^\circ$	0.979 1
Surf. 3	0.001 946 671	$-164.99^\circ$	0.971 3
Surf. 4	0.001 390 805	$-42.42^\circ$	0.962 3
Surf. 5	0.000 354 809	$-15.62^\circ$	0.952 1
Surf. 6	0.002 063 415	$135.53^\circ$	0.943 8

从表2可以看出,入射介质一定的情况下,在透射界面上的入射角越大,产生的偏振像差就越大,入射角为  $18.77^\circ$  时所产生的偏振像差是入射角为  $7.86^\circ$  时的 5.5 倍。当视场角为边缘视场时,会产生比较严重的偏振像差,因此大视场的旋转对称光学系统中会存在严重的偏振效应。在入射角一定的情况下, B 组的偏振效应明显比 A 组的偏振效应要强一些,这是因为 B 组的偏振分离  $\Delta n_B > A$  组的偏振分离  $\Delta n_A$ 。

表3 增透膜为多层膜系 Layers2,  $\lambda=0.55 \mu\text{m}$  时的偏振光线追迹的结果

Tab. 3 Results of polarization ray tracing when transmitting film is Layers2 and  $\lambda=0.55 \mu\text{m}$

Surface	Linear diattenuation	Linear retardancy	Ray intensity out
Surf. 1	0.000 645 529	$-28.48^\circ$	0.995 1
Surf. 2	0.000 318 934	$38.64^\circ$	0.988 8
Surf. 3	0.001 355 887	$-123.19^\circ$	0.984 6
Surf. 4	0.000 946 255	$135.52^\circ$	0.979 6
Surf. 5	0.000 227 432	$-71.03^\circ$	0.974 4
Surf. 6	0.001 430 661	$-136.94^\circ$	0.969 5

从表3中可以看出,对于该望远物镜,当透射界面镀有膜系 Layers2 时,系统中的偏振像差比透射界面镀有  $\text{MgF}_2$  膜时减小了约 30%, 光强明显增大,成像质量得到了提高,因此可以通过薄膜优化来控制光学系统中的偏振效应。

表 4 增透膜为多层膜系 Layers2,  $\lambda=1.1 \mu\text{m}$  时的偏振光线追迹的结果

Tab. 4 Results of polarization ray tracing when transmitting film is Layers2 and  $\lambda=1.1 \mu\text{m}$

Surface	Linear	Linear	Ray intensity
	diattenuation	retardancy	out
Surf. 1	0.006 173 991	-99.55°	0.877 8
Surf. 2	0.002 899 434	-91.59°	0.768 6
Surf. 3	0.012 789 643	-118.63°	0.677 5
Surf. 4	0.008 863 419	-107.74°	0.595 6
Surf. 5	0.002 063 925	12.04°	0.521 7
Surf. 6	0.013 830 639	-167.07°	0.459 6

从表 4 中可以看出,在望远物镜所镀膜系一定的情况下, $\lambda=1.1 \mu\text{m}$  时系统中的偏振像差约为  $\lambda=0.55 \mu\text{m}$  时的 10 倍,即入射光波长距离薄膜的优化波长越远,偏振像差就越大,因此宽光谱的光学系统中同样存在严重的偏振效应。

## 5 结 论

综合论述了偏振像差理论,推导了基于琼斯

算法的透射式旋转对称光学系统中的偏振像差计算公式,提出了透射式旋转对称光学界面产生的偏振像差的影响因子,分析了影响偏振像差的几个因素,并对一望远物镜进行了偏振像差分析。对于该望远物镜,在入射介质一定的情况下,入射角为  $18.77^\circ$  时所产生的偏振像差是入射角为  $7.86^\circ$  时的 5.5 倍;当透射界面镀有膜系 Layers2 时,望远物镜中的偏振像差比透射界面镀有  $\text{MgF}_2$  膜时减小了约 30%,光强明显增大,成像质量得到了提高;在望远物镜所镀膜系一定的情况下, $\lambda=1.1 \mu\text{m}$  时系统中的偏振像差约为  $\lambda=0.55 \mu\text{m}$  时的 10 倍。分析结果表明,对于具有宽光谱、大入射角、大视场等特点的透射式旋转对称光学系统,要想提高其光学系统的性能,必须控制其偏振像差。在光学设计过程中,尽可能减小入射角的大小,并将薄膜设计和光学设计结合起来,通过减小偏振分离的方式来降低系统中的偏振效应是控制透射式旋转对称光学系统中的偏振像差的有效措施。

## 参考文献:

- [1] 袁旭仓. 光学设计[M]. 北京:北京理工大学出版社,1988.  
YUAN X C. *Optical Design* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1988. (in Chinese)
- [2] 郭培基,高清峰,胡家升. 新型遥感光学立体成像系统的光学系统设计[J]. 光学 精密工程,2000,8(1): 1-4.  
GUO P J, GAO Q F, HU J SH. Optical system design of new remote sensing stereo imaging [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(1):1-4. (in Chinese)
- [3] 董科研,潘玉龙,王学进,等. 谐衍射红外双波段双焦光学系统设计[J]. 光学 精密工程,2008,16(5): 764-770.  
DONG K Y, PAN Y L, WANG X J, *et al.*. Optical design of a HDE infrared dual-band step-zoom system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(5): 764-770. (in Chinese)
- [4] 张建萍,冯秀恒,黄廉卿,等. 数字 X 线影像仪的激光扫描光学系统设计[J]. 光学 精密工程,2008,16(2):202-207.  
ZHANG J P, FENG X H, HANG L Q, *et al.*. Design of laser scanning optical system for computed radiograph [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2):202-207. (in Chinese)
- [5] CHIPMAN R A. Polarization analysis of optical systems[J]. *Optical Engineering*, 1989, 28(2): 090-099.
- [6] CHIPMAN R A. Polarization analysis of optical systems II[J]. *SPIE*, 1989, 1166:79-94.
- [7] MCGUIRE J P,CHIPMAN R A. Polarization aberrations in the solar activity measurements experiments (SAMEX) solar vector magnetograph[J]. *Optical Engineering*, 1989,28(2):141-147.
- [8] MCGUIRE J P,CHIPMAN R A. Polarization aberrations. 1. Rotationally symmetric optical systems [J]. *Applied Optics*, 1994,33(22):5080-5100.
- [9] CHIPMAN R A. Chipman. Mechanics Polarization ray tracing [J]. *Optical Engineering*, 1995, 34(6):1636-1645.
- [10] 赵达尊,张怀玉. 波动光学[M]. 北京:北京理工

大学出版社, 2000.

ZHAO D Z, ZHANG H Y. *Wavy Optics* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2000. (in Chinese)

[11] 林永昌, 卢维强. 光学薄膜原理[M]. 北京: 国防

工业出版社, 1990.

LIN Y CH, LU W Q. *Theory of Optical Thin Films* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1990. (in Chinese)

#### 作者简介:



张颖(1979—),女,山西朔州人,工学博士,讲师,主要从事光学设计、偏振探测、高光谱探测、光电探测等方面的研究。E-mail: yingzhang@buaa.edu.cn



赵慧洁(1966—),女,辽宁沈阳人,工学博士,教授,博士生导师,主要从事视觉检查、光电探测和信息处理等方面的研究。E-mail: hjzhao@buaa.edu.cn

邢辉(1981—),男,山东青州人,博士研究生,主要从事光电载荷技术和定标技术等方面的研究。E-mail: xinghui@aspe.buaa.edu.cn

程宣(1981—),男,山东济宁人,博士研究生,主要从事光电技术等方面的研究。E-mail: chengxuan2002@163.com

#### ●下期预告

## 统一积分时间数据提高生化分析仪精度方法

李正刚<sup>1,2</sup>, 吴一辉<sup>1</sup>, 宣明<sup>1</sup>, 王一凡<sup>1</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林长春 130033; 2. 中国科学院研究生院北京 100039)

为了简化生化分析检测过程,提高测量结果精密度,提出了统一积分时间数据测量法。首先根据PDA驱动程序和光电转换原理推导出光强与积分时间档的关系式,然后在实验的基础上按照PDA性能参数确定线性工作区间,再将各个积分时间档暗电流数据记录下来,在数据采集过程中将相应的积分时间档下的暗电流数据扣除,保证了暗电流给分析仪器造成的误差最小。实验结果表明:提高工作效率1~3倍,提高检测精密度25%。在以光纤光谱仪为主体的微型生化分析仪样品检测过程中的应用表明:简化了实验步骤,在测试样品浓度发生很大变化时也可以使仪器有较高的测试精密度。