

等厚度圆锥面风挡玻璃光线偏向角计算分析研究

赵献民

(沈阳飞机设计研究所, 沈阳 110035)

摘要: 用光路追迹法建立了等厚度圆锥面风挡玻璃偏向角分布的数学模型, 提出偏向角工程化模型的建立方法, 在此基础上利用最小二乘法得出高精度近似模型。该近似模型适用于机载软件对相关偏差的实时补偿处理, 已经在某型飞机上成功应用。

关键词: 风挡玻璃; 光路追迹; 偏向角; 最小二乘法; 飞机

中图分类号: V271.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)07-0098-05

Calculation and Analysis to Deviation Angle of Uniform Thickness Conical Surface Windshield Glass

ZHAO Xian-min

(Shenyang Aircraft Design and Research Institute, Shenyang 110035, China)

Abstract: The mathematic model of deviation angle distribution of uniform thickness conical surface windshield glass was deduced based on the theory of ray-tracing, and a method for establishing the engineering model of angle of deviation was also proposed. Based on which, an approximate model with high-precision was developed by using least square method. The model is applicable for real-time compensation of the relative deviations for the onboard software, which has been applied in a certain type of airplane successfully.

Key words: windshield glass; ray-tracing; angle of deviation; least square method; aircraft

0 引言

某飞机风挡玻璃的理论外形为圆锥面, 在光学上相当于等厚度圆锥面透镜^[1]。为了研究圆锥面风挡玻璃对飞行员观察以及座舱内光学设备的影响, 需要确定等厚度圆锥面透镜的光线偏向角分布规律^[2-3]。

现有光学计算软件适用于光学仪器的设计和分析, 但等厚度圆锥面透镜不会应用在光学仪器中, 光学软件一般也不适用于对等厚度圆锥面透镜的分析, 尤其不能支持机载软件实时解算以及对由此产生偏差的补偿。本文用光路追迹法对等厚度圆锥面这一特殊透镜进行几何光学特性分析, 是对一般光学计算分析工具功能的补充^[4]。

1 偏向角理论数学模型

1.1 视线方程和风挡锥面方程

风挡玻璃理论外形为圆锥面, 其轴线与飞机纵轴

夹角为 θ 。为进行光学追迹计算^[5-6], 需要首先定义观察坐标系和内锥面坐标系, 以便在适当的坐标系中建立入射光线方程和风挡内、外表面方程。

观察坐标系 P_1 (见图1): 坐标原点 M_1 , 即观察点; i_1 为正向水平视线的反方向; j_1 为铅垂线, 向上为正; k_1 为顺航向向左为正。

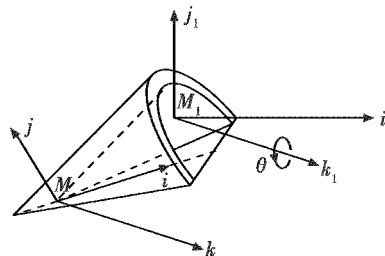


图1 观察坐标系 P_1 与内锥面坐标系
($M-i, j, k$)示意图

Fig. 1 The coordinate systems of P_1 and ($M-i, j, k$)
for the internal conical surface

内锥面坐标系 $M-i, j, k$ (见图1): 将 P_1 沿 k_1 轴转 θ , 并将风挡内表面锥面顶点 M 作为坐标原点; i 为锥面轴线, 顺航向反向为正; k 为与 k_1 相同方向; j 为按

$i-j-k$ 顺序且应符合右手系。

建立风挡玻璃偏向角的光学模型,关键在于求解光线在风挡内、外表面两次折射后的出射光线方程。这一求解过程的每一个步骤都涉及风挡内、外表面方程。为计算方便,将内锥面坐标系($M-i,j,k$)作为求解的基础坐标系,其他点、直线、向量和平面的方程都通过内锥面坐标系转换。

视线(抽象的射线,即始于观察点的光线的描述)方程在观察坐标系 P_1 中建立,下面求解视线在内锥面坐标系($M-i,j,k$)中的方程。

由(i_1, j_1, k_1)到(i, j, k)的基变换公式为

$$\begin{pmatrix} i \\ j \\ k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ j_1 \\ k_1 \end{pmatrix} = Q \begin{pmatrix} i_1 \\ j_1 \\ k_1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

在 M_1 处观察,方位角 α (绕 j_1 轴逆向旋转为正),俯仰角 β (绕 k_1 轴逆向旋转为正)处视线方向向量 S_1 (见图2)在坐标系 P_1 中的坐标为

$$[S_1]_1 = (n_1, m_1, p_1) = (-1, \tan \beta, -\tan \alpha) \quad (2)$$

即

$$S_1 = (n_1, m_1, p_1) \begin{pmatrix} i_1 \\ j_1 \\ k_1 \end{pmatrix} = (n_1, m_1, p_1) Q^{-1} \begin{pmatrix} i \\ j \\ k \end{pmatrix} \quad (3)$$

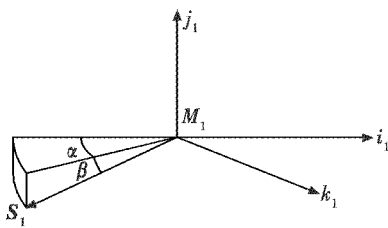


图2 以 M_1 点为基准坐标系示意图

Fig.2 The coordinate system taking M_1 as the origin

S_1 点在坐标系($M-i,j,k$)中的坐标为

$$[S_1] = (n, m, p) = (n_1, m_1, p_1) Q^{-1} \quad (4)$$

M_1 点在坐标系($M-i,j,k$)中的坐标为

$$[M_1] = (x_0, y_0, z_0) \quad (5)$$

M_1 处角度符合(α, β)的视线方程为

$$\frac{x-x_0}{n} = \frac{y-y_0}{m} = \frac{z-z_0}{p} \quad (6)$$

式(6)即为视线在内锥面坐标系($M-i,j,k$)中的方程。锥面半顶角为 τ ,则内锥面方程为

$$y^2 + z^2 = x^2 \tan^2 \tau \quad (7)$$

玻璃厚度为 D ,则外锥面方程为

$$y^2 + z^2 = (x + D/\sin \tau)^2 \tan^2 \tau \quad (8)$$

1.2 求解内表面折射光线

1) 求解入射点处内锥面法向量。

联立式(6)和式(7),可求得入射点在坐标系($M-i,j,k$)中的坐标为 $M_2 = (x_2, y_2, z_2)$ 。参照式(7)定义内锥面隐式方程

$$F_1(x, y, z) = y^2 + z^2 - x^2 \tan^2 \tau = 0 \quad (9)$$

定义 $F_1(x, y, z)$ 的偏导数 f_{1x}, f_{1y} 和 f_{1z} ,则内锥面在 M_2 点的法向量 S_2 在坐标系($M-i,j,k$)中的坐标为

$$[S_2] = (f_{1x}(x_2, y_2, z_2), f_{1y}(x_2, y_2, z_2), f_{1z}(x_2, y_2, z_2)) = (-2x_2 \tan^2 \tau, 2y_2, 2z_2) \quad (10)$$

2) 建立第一折射坐标系。

为了按照入射光线和折射角求解第一次折射光线,需要建立第一折射坐标系。

入射面法向量 S_3 在坐标系($M-i,j,k$)中的坐标为

$$[S_3] = [S_1] \times [S_2] = (n, m, p) \times (f_{1x}(x_2, y_2, z_2), f_{1y}(x_2, y_2, z_2), f_{1z}(x_2, y_2, z_2)) \quad (11)$$

由向量 S_2 和向量 S_3 按照右手系确定的第3坐标轴向量为 S_4 ,则 S_4 在坐标系($M-i,j,k$)中的坐标为

$$[S_4] = [S_2] \times [S_3] \quad (12)$$

将向量 S_2, S_3, S_4 单位化为 $S_2^\circ, S_3^\circ, S_4^\circ$,作为坐标系 P_3 的基,即

$$\begin{pmatrix} i_3 \\ j_3 \\ k_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} [S_2^\circ] \\ [S_3^\circ] \\ [S_4^\circ] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i \\ j \\ k \end{pmatrix} \quad (13)$$

坐标系 P_3 即第一折射坐标系。

3) 求解第一次折射光线。

向量 S_1 与向量 S_2 的夹角为 η_1 (入射角),则

$$\sin \eta_1 = (|S_1 \times S_2|) / (|S_1| |S_2|) = |S_3| / (|S_1| |S_2|) \quad (14)$$

出射角为

$$\mu_1 = \arcsin(\sin \eta_1 / nk) \quad (15)$$

式中, nk 为风挡玻璃折射率。

S_1 在坐标系 P_3 中的坐标为

$$[S_1]_3 = |S_1| (\cos \eta_1, 0, \sin \eta_1) \quad (16)$$

折射光线向量 S_5 在坐标系 P_3 中的坐标为

$$[S_5]_3 = (\cos \mu_1, 0, \sin \mu_1) \quad (17)$$

折射光线向量 S_5 在坐标系($M-i,j,k$)中的坐标为

$$[S_5] = (\cos \mu_1, 0, \sin \mu_1) \begin{pmatrix} [S_2^\circ] \\ [S_3^\circ] \\ [S_4^\circ] \end{pmatrix} = (\cos \mu_1, 0, \sin \mu_1) Q_1 = (n_2, m_2, p_2) \quad (18)$$

第一次折射光线方程为

$$\frac{x-x_2}{n_2} = \frac{y-y_2}{m_2} = \frac{z-z_2}{p_2} \quad (19)$$

1.3 求解外表面折射光线

求解外表面折射光线的过程与求解内表面折射光线的过程相同。

联立式(8)和式(19)可解得折射光线与外锥面的交点: $M_3(x_3, y_3, z_3)$ 。

参照式(8)定义外锥面隐式方程

$$F_2(x, y, z) = y^2 + z^2 - (x + D/\sin \tau)^2 \tan^2 \tau = 0 \quad (20)$$

定义 $F_2(x, y, z)$ 的偏导数 f_{2x} 、 f_{2y} 和 f_{2z} , 则外锥面在 M_3 点的法向量 S_6 在坐标系 $(M-i, j, k)$ 中的坐标为

$$[S_6] = (f_{2x}(x_3, y_3, z_3), f_{2y}(x_3, y_3, z_3), f_{2z}(x_3, y_3, z_3)) = (-2(x_3 + D/\sin \tau) \tan^2 \tau, 2y_3, 2z_3) \quad (21)$$

出射面法向量 S_7 在坐标系 $(M-i, j, k)$ 中的坐标为

$$[S_7] = [S_5] \times [S_6] \quad (22)$$

由向量 S_6 和向量 S_7 按照右手系确定的第3坐标轴向量为 S_8 , 则 S_8 在坐标系 $(M-i, j, k)$ 中的坐标为

$$[S_8] = [S_6] \times [S_7] \quad (23)$$

将向量 S_6 、 S_7 、 S_8 单位化为 S_6° 、 S_7° 、 S_8° , 作为坐标系 P_4 的基, 即

$$\begin{pmatrix} i_4 \\ j_4 \\ k_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} [S_6^\circ] \\ [S_7^\circ] \\ [S_8^\circ] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i \\ j \\ k \end{pmatrix} = Q_2 \begin{pmatrix} i \\ j \\ k \end{pmatrix} \quad (24)$$

向量 S_1 与向量 S_2 的夹角为 η_2 (入射角), 则

$$\sin \eta_2 = (|S_5| \times |S_6|) / (|S_5| |S_6|) \quad (25)$$

风挡玻璃折射率为 nk , 则出射角

$$\mu_2 = \arcsin(nk \cdot \sin \eta_2) \quad (26)$$

S_5 在坐标系 P_4 中的坐标为

$$[S_5]_4 = (\cos \eta_2, 0, \sin \eta_2) \quad (27)$$

出射光线向量 S_9 在坐标系 P_4 中的坐标为

$$[S_9]_4 = (\cos \mu_2, 0, \sin \mu_2) \quad (28)$$

出射光线向量 S_9 在坐标系 $(M-i, j, k)$ 中的坐标为

$$[S_9] = (\cos \mu_2, 0, \sin \mu_2) Q_2 \quad (29)$$

1.4 求解偏向角

为了求解偏向角, 需要求解出射光线向量在观察坐标系中的坐标

$$[S_9]_1 = (\cos \mu_2, 0, \sin \mu_2) Q_2 Q \quad (30)$$

参照式(2), 出射光线的方位角 α' 、俯仰角 β' 分别为

$$\alpha' = \arctan(p_4/n_4) \quad (31)$$

$$\beta' = \arctan(m_4/n_4) \quad (32)$$

则方位偏向角为

$$\Delta\alpha = \alpha' - \alpha \quad (33)$$

俯仰偏向角为

$$\Delta\beta = \beta' - \beta \quad (34)$$

依据某飞机风挡几何参数、光学参数和典型观察点坐标数据, 按照上述步骤计算可以得到偏向角分布的数值解, 见表1和表2。

表1 方位偏向角分布情况

Table 1 The distribution of the azimuth angle of deviation

俯仰角/ (°)	方位角/(°)												
	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
4	9.5	8.9	8.3	7.8	7.3	6.8	6.3	5.8	5.3	4.9	4.4	4.0	3.6
3	9.4	8.8	8.3	7.7	7.2	6.7	6.2	5.7	5.2	4.7	4.3	3.9	3.5
2	9.3	8.7	8.2	7.6	7.1	6.5	6.0	5.5	5.1	4.6	4.2	3.7	3.3
1	9.2	8.6	8.1	7.5	7.0	6.4	5.9	5.4	4.9	4.5	4.0	3.6	3.2
0	9.2	8.6	8.0	7.4	6.8	6.3	5.8	5.3	4.8	4.3	3.8	3.4	3.0
-1	9.1	8.5	7.9	7.3	6.7	6.2	5.6	5.1	4.6	4.1	3.7	3.3	2.8
-2	9.0	8.4	7.8	7.2	6.6	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0	3.5	3.1	2.7
-3	8.9	8.3	7.6	7.0	6.5	5.9	5.3	4.8	4.3	3.8	3.4	2.9	2.5
-4	8.8	8.2	7.5	6.9	6.3	5.7	5.2	4.6	4.1	3.6	3.2	2.7	2.3
-5	8.7	8.0	7.4	6.8	6.2	5.6	5.0	4.5	4.0	3.5	3.0	2.6	2.1
-6	8.6	7.9	7.3	6.6	6.0	5.4	4.8	4.3	3.8	3.3	2.8	2.4	1.9
-7	8.5	7.8	7.1	6.5	5.9	5.2	4.7	4.1	3.6	3.1	2.6	2.2	1.7
-8	8.4	7.7	7.0	6.3	5.7	5.1	4.5	3.9	3.4	2.9	2.4	2.0	1.5
-9	8.3	7.5	6.8	6.2	5.5	4.9	4.3	3.7	3.2	2.7	2.2	1.7	1.3
-10	8.1	7.4	6.7	6.0	5.3	4.7	4.1	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.1

表2 俯仰偏向角分布情况

Table 2 The distribution of the pitch angle of deviation

俯仰角/ (°)	方位角/(°)												
	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
4	1.0	0.7	0.4	0.1	-0.1	-0.3	-0.4	-0.6	-0.7	-0.8	-0.8	-0.9	-0.9
3	1.0	0.7	0.4	0.2	-0.1	-0.3	-0.4	-0.6	-0.7	-0.8	-0.8	-0.9	-0.9
2	1.1	0.7	0.4	0.2	-0.1	-0.3	-0.5	-0.6	-0.7	-0.8	-0.8	-0.9	-0.9
1	1.1	0.8	0.5	0.2	-0.1	-0.3	-0.5	-0.6	-0.7	-0.8	-0.8	-0.9	-0.9
0	1.2	0.8	0.5	0.2	-0.1	-0.3	-0.5	-0.6	-0.7	-0.8	-0.8	-0.9	-0.9
-1	1.2	0.8	0.5	0.2	-0.1	-0.3	-0.5	-0.6	-0.7	-0.8	-0.8	-0.9	-0.9
-2	1.3	0.9	0.5	0.2	-0.1	-0.3	-0.5	-0.6	-0.7	-0.8	-0.8	-0.9	-0.8
-3	1.3	0.9	0.5	0.2	-0.1	-0.3	-0.5	-0.6	-0.7	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8
-4	1.4	0.9	0.6	0.2	-0.1	-0.3	-0.5	-0.6	-0.7	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8
-5	1.4	1.0	0.6	0.2	-0.1	-0.3	-0.5	-0.6	-0.7	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8
-6	1.5	1.0	0.6	0.2	-0.1	-0.3	-0.5	-0.6	-0.7	-0.8	-0.8	-0.8	-0.7
-7	1.6	1.1	0.6	0.3	0.0	-0.3	-0.5	-0.6	-0.7	-0.8	-0.8	-0.8	-0.7
-8	1.6	1.1	0.7	0.3	0.0	-0.3	-0.5	-0.6	-0.7	-0.8	-0.8	-0.7	-0.6
-9	1.7	1.2	0.7	0.3	0.0	-0.3	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.6
-10	1.8	1.2	0.7	0.3	0.0	-0.3	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7	-0.7	-0.6	-0.5

2 模型适用范围扩展

上述建立偏向角数学模型的方法还可以扩展到更多形状的单透镜, 至少对于二次曲面透镜来说, 其计算过程和计算复杂程度与此相同^[7]。计算时只要将透镜内、外表面方程替换为相应的二次曲面方程即可。

3 模型近似

按照圆锥面风挡玻璃的数学模型计算风挡理论偏向角的公式非常复杂, 如果机载设备据此进行偏差补偿

计算会占用过多资源。为了适合工程应用,需要按照圆锥面风挡理论偏向角数学模型求解偏向角的近似计算公式^[8-10]。以下说明工程化近似模型的建立方法。

3.1 工程化模型的形式

考察偏向角的规律,确定工程化模型可以使用二次线性函数。即方位偏向角为

$$F(\alpha_i, \beta_i) = A_{00} + A_{10}\alpha_i + A_{01}\beta_i + A_{20}\alpha_i^2 + A_{11}\alpha_i\beta_i + A_{02}\beta_i^2 \quad (35)$$

俯仰偏向角为

$$L(\alpha_i, \beta_i) = B_{00} + B_{10}\alpha_i + B_{01}\beta_i + B_{20}\alpha_i^2 + B_{11}\alpha_i\beta_i + B_{02}\beta_i^2 \quad (36)$$

3.2 工程化模型的求解

首先计算方位偏向角的近似公式。定义函数

$$H = \sum_{i=1}^n [\Delta\alpha_i - F(\alpha_i, \beta_i)]^2 \quad (37)$$

$\frac{\partial H}{\partial A_n} = 0, r+t=0 \sim 2$ 。得6元非齐次线性方程组 $\frac{\partial H}{\partial A_{00}} = 0$, 即

$$\sum_{i=1}^n [\Delta\alpha_i - (A_{00} + A_{10}\alpha_i + A_{01}\beta_i + A_{20}\alpha_i^2 + A_{11}\alpha_i\beta_i + A_{02}\beta_i^2)] = 0 \quad (38)$$

$\frac{\partial H}{\partial A_{10}} = 0$, 即

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i [\Delta\alpha_i - (A_{00} + A_{10}\alpha_i + A_{01}\beta_i + A_{20}\alpha_i^2 + A_{11}\alpha_i\beta_i + A_{02}\beta_i^2)] = 0 \quad (39)$$

$\frac{\partial H}{\partial A_{01}} = 0$, 即

$$\sum_{i=1}^n \beta_i [\Delta\alpha_i - (A_{00} + A_{10}\alpha_i + A_{01}\beta_i + A_{20}\alpha_i^2 + A_{11}\alpha_i\beta_i + A_{02}\beta_i^2)] = 0 \quad (40)$$

$\frac{\partial H}{\partial A_{20}} = 0$, 即

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i^2 [\Delta\alpha_i - (A_{00} + A_{10}\alpha_i + A_{01}\beta_i + A_{20}\alpha_i^2 + A_{11}\alpha_i\beta_i + A_{02}\beta_i^2)] = 0 \quad (41)$$

$\frac{\partial H}{\partial A_{11}} = 0$, 即

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i\beta_i [\Delta\alpha_i - (A_{00} + A_{10}\alpha_i + A_{01}\beta_i + A_{20}\alpha_i^2 + A_{11}\alpha_i\beta_i + A_{02}\beta_i^2)] = 0 \quad (42)$$

$\frac{\partial H}{\partial A_{02}} = 0$, 即

$$\sum_{i=1}^n \beta_i^2 [\Delta\alpha_i - (A_{00} + A_{10}\alpha_i + A_{01}\beta_i + A_{20}\alpha_i^2 + A_{11}\alpha_i\beta_i + A_{02}\beta_i^2)] = 0 \quad (43)$$

利用表1和表2的数据解以上线性方程组得到 A_n 的值($r+t=0 \sim 2$), 可以将式(35)和式(36)实例化。

$$F(\alpha, \beta) = 5.735 - 0.512\alpha - 0.126\beta + 0.0100\alpha^2 - 0.0070\alpha\beta - 0.0027\beta^2 \quad (44)$$

$$L(\alpha, \beta) = -0.559 - 0.173\alpha + 0.018\beta + 0.0211\alpha^2 - 0.0027\alpha\beta + 0.0012\beta^2 \quad (45)$$

继而用该工程化模型对风挡的同样区域进行计算, 将计算结果与表1和表2的数据进行对比分析, 方位偏向角近似误差(均方根)为0.04 mrad, 俯仰偏向角近似误差(均方根)为0.09 mrad, 可见近似模型精度很高, 可以称为高精度近似模型。式(44)和式(45)形式简单, 对计算资源需求很低, 可以满足机载计算机实时计算使用要求。

4 结论

本文针对等厚度圆锥面风挡玻璃光线偏向角数学模型的数值解进行分析, 并进行了工程化模型的求解, 可得到以下结论: 1) 观察点与风挡玻璃轴线近则偏向角小, 观察点在风挡玻璃轴线上时偏向角等于 0° , 按此规律, 在飞机研制时, 需要使风挡玻璃轴线尽量靠近飞机设计眼位, 这样可以减小风挡玻璃对飞行员观察的影响; 2) 观察点沿飞机纵轴后移则偏向角梯度减小; 3) 玻璃厚度增加, 则偏向角显著增加。本文所提理论分析经过实践检验, 光线偏向角工程化模型在飞机上应用效果良好, 具有很大的工程应用价值, 对于飞机设计具有重要的指导意义。

参考文献

- [1] 魏星, 黄维菊. 圆锥曲面风挡玻璃透光率检测台设计[J]. 机械设计, 2009, 26(8): 73-75.
WEI X, HUANG W J. Test bench design for light transmittance of conical surfaced wind shield glass[J]. Journal of Machine Design, 2009, 26(8): 73-75.
- [2] 赵成强, 徐文东. 航空透明件光学角偏差测试仪的光学系统设计[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(2): 437-441.
ZHAO C Q, XU W D. Optical system design of optical angular deviation tester for transparent parts in aviation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(2): 437-441.
- [3] 王宇鑫, 熊超, 温新竹, 等. 光子晶体负折射的计算机

- 仿真研究[J]. 广西科学院学报, 2008, 24(1): 59-62.
WANG Y X, XIONG C, WEN X Z, et al. Research on photonic crystal negative reflection by computer simulation [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2008, 24(1): 59-62.
- [4] 邓金萍, 李闻, 俞金海, 等. 基于视觉仿真的飞机座舱风挡眩光分布影响研究[J]. 航空工程进展, 2012, 3(3): 284-288.
DENG J P, LI W, YU J H, et al. Cockpit windshield glare analysis based on optical simulation [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2012, 3(3): 284-288.
- [5] 骆永洁, 杨甬英, 田超, 等. 非球面部分补偿检测系统的误差分析与处理[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2012, 46(4): 636-642, 733.
LUO Y J, YANG Y Y, TIAN C, et al. Error analysis and processing of partial compensatory aspheric testing system[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science Edition, 2012, 46(4): 636-642, 733.
- [6] 王骏凯, 李俊源, 姜献峰. 基于单曲面迭代计算的曲面透镜设计方法[J]. 光学技术, 2010, 36(6): 807-810.
WANG J K, LI J Y, JIANG X F. Optical design method based on single-surface iterative method [J]. Optical Technique, 2010, 36(6): 807-810.
- [7] 罗勇. 二次非球面镜参数求解模型及求解算法研究[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(36): 8968-8971.
LUO Y. Research on the model and algorithm for computing surface parameter of conic aspheric mirror[J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(36): 8968-8971.
- [8] 陈立刚, 孟凡刚, 袁银麟, 等. 航空偏振相机的光学偏振特性实验研究[J]. 光电子·激光, 2011, 22(11): 1629-1632.
CHEN L G, MENG F G, YUAN Y L, et al. Experimental study for the polarization characteristics of airborne polarization camera[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2011, 22(11): 1629-1632.
- [9] 乔培玉, 何昕, 魏仲慧. 加权整体最小二乘法在光学自准直法测量挠曲角中的应用[J]. 光学精密工程, 2012, 20(9): 1953-1959.
QIAO P Y, HE X, WEI Z H. Application of weighted total least squares in measurement of deflection angle with optical self-collimation method[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(9): 1953-1959.
- [10] 伍卫平, 何玉明, 胡而已. 移动最小二乘三次曲面拟合法分析图像亚像素位移[J]. 固体力学学报, 2008, 29(专辑): 224-227.
WU W P, HE Y M, HU E Y. Sub-pixel displacement analysis based on the moving least-square cubic surface fitting algorithm [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2008, 29 (SI): 224-227.
- (上接第 50 页)
- [12] QIAN S, CHEN D. Decomposition of the Wigner distribution and time-frequency distribution series [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994, 42(10): 2836-2842.
- [13] RICHARD G, BARANIUK M C. Hybrid linear/quadratic time-frequency attributes[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2001, 49(4): 760-766.
- [14] STEINBERG B D. Microwave imaging of aircraft[J]. Proc. IEEE, 1988, 76(12): 1578-1592.

声 明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司等在其网络平台和系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文, 著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我部上述声明。