

## 激光与光电子学进展

## 四单元 PD 与 LED 的镜面角度检测模型及角度检测范围研究

王帅飞<sup>1,2</sup>, 吴志勇<sup>1,2\*</sup>, 吴佳彬<sup>1</sup>, 陈云善<sup>1,2</sup>, 高世杰<sup>1,2</sup>, 霍力<sup>1,2</sup>, 宋一诺<sup>1,2</sup><sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 为了解决电磁振镜系统中镜面大角度偏转难以测量的问题,设计了一种基于四单元光电探测器(PD)与LED的光电式镜面角度传感装置。首先分析了镜面角度检测的基本原理,基于LED朗伯辐射模型,建立了镜面偏转角度的真实值与解算值之间数学模型;其次以非线性度为评价标准定义了系统检测范围;然后仿真分析了探测器水平位置、镜面中心与LED距离和LED半功率角对系统检测范围的影响;最后搭建了实验平台进行验证。仿真及实验结果表明:所建立的数学模型对使用朗伯型LED进行镜面角度检测是有效的;通过减小探测器与LED之间距离、增加镜面中心与LED距离和增大LED半功率角,可以提高系统的角度检测范围。

**关键词** 四单元光电探测器; 角度传感装置; 朗伯辐射模型; 角度检测范围

中图分类号 TN215

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230564

## Research on Model and Detection Range of Mirror Angle Detection Based on Quadrant PD and LED

Wang Shuaifei<sup>1,2</sup>, Wu Zhiyong<sup>1,2\*</sup>, Wu Jiabin<sup>1</sup>, Chen Yunshan<sup>1,2</sup>, Gao Shijie<sup>1,2</sup>,  
Huo Li<sup>1,2</sup>, Song Yinuo<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,  
Changchun 130033, Jilin, China;<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** As the large angle deflection of a mirror is difficult to measure in an electromagnetic galvanometer system, a photoelectric mirror-angle-sensing device based on the quadrant photoelectric detector (PD) and LED was designed. First, the basic principle of mirror angle detection was analyzed, and based on the LED Lambertian radiation model, the mathematical model between the true value and the calculated value of the mirror deflection angle was established. Second, the system detection range was defined with the nonlinearity as the evaluation standard. Then, the influence of the detector's horizontal position, distance between the center of the mirror and the LED, and half-power angle of the LED on the detection range of the system were simulated and analyzed. Finally, an experimental platform was built for verification. The simulation and experimental results show that the established mathematical model is effective for mirror angle detection using Lambertian LED. With reduced distance between the detector and the LED, increased distance between the center of the mirror and the LED, and increased half-power angle of the LED, the angle detection range of the system can be improved.

**Key words** quadrant photoelectric detector; angle-sensing device; Lambert radiation model; system detection range

## 1 引言

电磁振镜系统是控制光源与接收端之间的光束传播方向的装置,因具有响应带宽高、定位精度高、角分

辨率高等优点,被广泛应用于空间光通信<sup>[1]</sup>、激光雷达<sup>[2]</sup>、机器视觉、激光加工<sup>[3-7]</sup>等领域。对于这些应用,尤其需要检测镜面的偏转角度,以达到镜面状态监测和闭环控制的目的。实现镜面角度传感方式最常用的

收稿日期: 2023-02-06; 修回日期: 2023-03-09; 录用日期: 2023-03-15; 网络首发日期: 2023-03-25

通信作者: \*wuzzy@ciomp.ac.cn

有电容式、压阻式和电涡流式<sup>[8-10]</sup>,然而这三种方式难以对镜面较大偏转角度进行传感,因此对被测量物角度的光电式传感研究成为了热点。

电磁振镜中用来检测镜面角度的光电式传感器主要有位置敏感探测器(PSD)和四象限探测器(QD)<sup>[11-14]</sup>,这两种器件的测量方式都是将光斑质心在探测器光敏面上的移动量转换为镜面的转角,由于光源和探测器不处于同一平面,且光路设计相对复杂,较难实现大角度范围的测量。Ishikawa等<sup>[15]</sup>为了检测镜面的转角,利用微机电系统技术(MEMS)开发了一种角度传感器芯片,该芯片将垂直腔面发射激光器(VCSEL)与两单元探测器设计在同一平面,测量范围达到 $5^\circ$ 。Cheng等<sup>[16-17]</sup>推导了高斯光源模型下镜面角度测量公式,制作了集成 VCSEL 与四单元探测器的芯片,并将其应用于测量 MEMS 微镜的角度,测量范围达到 $\pm 5^\circ$ 。Optotune 公司在 2019 年推出了大偏转角度范围的微型振镜,其内部的测量系统采用比激光光斑半径更大的 LED 作发射光源,四单元独立式光电二极管作为探测器,该装置的镜面角度测量范围为 $\pm 25^\circ$ 。Hung等<sup>[18]</sup>设计的镜面角度检测装置与 Optotune 公司相似,在选定使用器件后,采用实验测试的方法分析器件之间的几何参数,而没有建立系统数学模型,最终实现了镜面 $\pm 10^\circ$ 角度测量。目前为止,国内外针对在 LED 光源模型下镜面角度测量的数学模型研究及各参数对系统指标的影响研究鲜见报道。

因此本文基于 LED 朗伯辐射模型对四单元光电探测器的镜面角度检测原理进行深入分析,建立镜面角度解算值与角度真实值之间的数学模型,利用该模型对影响角度检测范围的主要因素进行仿真分析,并设计实验进行模型验证。本文所建立的数学模型为系统参数设计及优化提供理论依据,对工程实践有指导意义。

## 2 系统工作原理及数学模型推导

### 2.1 系统工作原理

二维微型电磁振镜系统结构示意图如图 1 所示,该系统主要由外部反射镜、万向节框架、机械驱动系统、基座、镜面角度探测系统等构成。其中,机械驱动

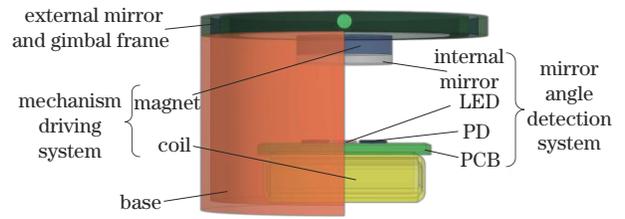


图 1 二维微型电磁振镜系统结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of two-dimensional miniature electromagnetic galvanometer system

系统由磁铁和通电线圈组成,镜面角度检测系统由附着在磁铁下方且平行于外部镜面的内部反射镜、LED 光源、光电探测器及印刷电路板(PCB)等组成。系统工作原理为:万向框架与外部反射镜连接实现镜面两个转动自由度;在通电线圈产生的磁场中,附着于外部反射镜下方的磁铁受到安培力作用,磁铁产生转矩带动内、外部反射镜按照万向框架结构进行偏转。光源发射出的光线经过内部反射镜反射后到达探测器,镜面角度检测系统对反射镜的角度偏转量进行测量并传递给电子控制系统。集成控制算法的电子控制系统根据角度偏转量闭环控制机械驱动系统带动镜面偏转至预期角度。

图 2 为镜面转角检测系统结构及信号处理电路示意图。LED 中心与探测器阵列中心重合,且处于一个平面。四只 PD 通过阵列排布测量光斑在两个正交方向 X、Y 轴上的移动量,进而测量镜面偏转角度。PD 感光面接收反射镜出射光线,PD 内部产生光电效应,响应出与接收光功率成正比的光电流。当反射镜偏转时,探测器接收光功率改变,继而 PD 的光电流改变。四只光电流  $I_i (i=1, 2, 3, 4)$  通过跨阻放大电路,产生四只与光电流大小成正比的电压信号

$$V_i = KI_i, (i = 1, 2, 3, 4), \quad (1)$$

式中:  $K$  为放大增益。对电压信号进行模数转换、数据采集之后,再对数字信号进行处理。当内部反射镜面实现二维旋转时,可近似看作绕 A 轴和 B 轴旋转,以图 2 所示箭头旋转方向为正方向。利用经典归一化和差比算法<sup>[19]</sup>描述镜面偏转角度与角度解算值  $(\sigma_x, \sigma_y)$  之间的关系,即

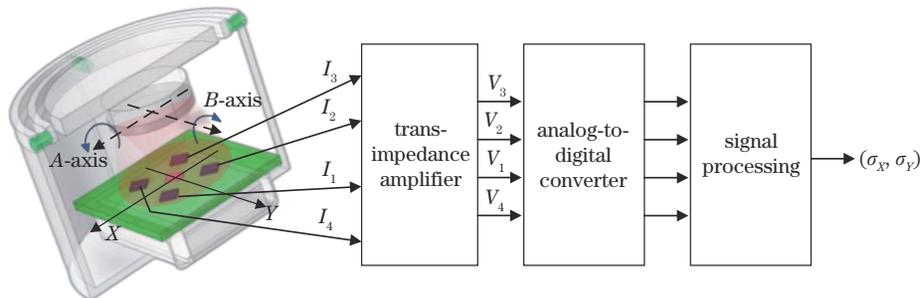


图 2 镜面角度检测系统结构及信号处理电路示意图

Fig. 2 Schematic diagram of mirror angle detection system structure and signal processing circuit

$$\sigma_x = \frac{(V_1 + V_4) - (V_2 + V_3)}{V_1 + V_2 + V_3 + V_4}, \quad (2)$$

$$\sigma_y = \frac{(V_1 + V_2) - (V_3 + V_4)}{V_1 + V_2 + V_3 + V_4}, \quad (3)$$

式中:  $\sigma_x$  和  $\sigma_y$  分别为 X 轴和 Y 轴的镜面角度解算值。

## 2.2 系统数学模型推导

在本文讨论的镜面转角检测系统中,探测器为理

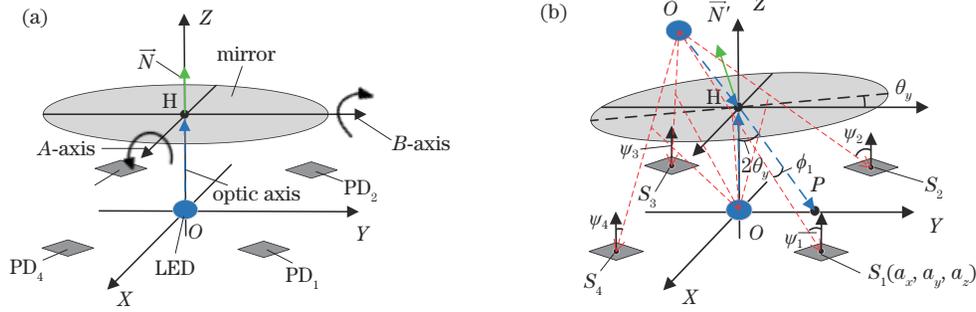


图3 镜面转角检测系统示意图。(a)反射镜面未偏转;(b)反射镜面绕A轴旋转 $\theta_y$

Fig. 3 Schematic diagram of mirror angle detection system. (a) Mirror is not deflected; (b) mirror rotates  $\theta_y$  around the A-axis

由欧拉旋转定理可知,当镜面绕A轴旋转角度 $\theta_y$ 时,镜面法向量 $N'=(0, -\sin\theta_y, \cos\theta_y)$ 。由平面的点法式方程可知,当镜面恒过点 $H(0,0,d_{lm})$ 时,镜面的平面方程为

$$-\sin\theta_y y + \cos\theta_y z - \cos\theta_y d_{lm} = 0, \quad (4)$$

式中: $d_{lm}$ 为镜面中心与光源中心距离。

假设模型满足以下条件:1)镜面反射率 $\rho$ 为1;2)镜面尺寸满足在一定角度范围偏转时,PD感光面始终被反射光斑覆盖;3)LED和PD之间可视距离远大于PD尺寸时,LED光源近似作为朗伯型点光源处理,PD $_i$ ( $i=1,2,3,4$ )感光面上所有接收光线与LED光轴夹角分别近似看作光线到达各个探测器中心点 $S_i$ 时与LED光轴的夹角。由三维欧氏空间中点关于面的对称点公式得到点O关于反射镜面对称点 $O'$ 的坐标 $(0, -2d_{lm}\sin\theta_y\cos\theta_y, 2d_{lm}\cos^2\theta_y)$ 。那么LED与PD $_i$ 之间的信道可近似看作直射链路(LOS)传输环境,不同信道的直流增益为

$$H_i(0) = \frac{A_r(m+1)}{2\pi d_i^2} \cos^m(\phi_i) T(\psi_i) g(\psi_i) \cos(\psi_i), \quad (5)$$

$$0 \leq \psi_i \leq \theta_{FOV},$$

式中: $A_r$ 为PD的感光面积; $d_i$ 为LED和PD $_i$ 之间可视距离; $\phi_i$ 为辐射光线 $O'S_i$ 与LED光轴 $O'P$ 夹角; $\psi_i$ 为辐射光线与感光面夹角; $\theta_{FOV}$ 为PD $_i$ 的视场角; $T(\psi_i)$ 为接收端光学滤波器增益; $g(\psi_i)$ 为光学聚光器增益; $m$ 为辐射瓣的模式数,即 $m = -\ln 2 / \ln(\cos\phi_{1/2})$ ,其中 $\phi_{1/2}$ 为LED半功率角。那么PD $_i$ 产生的光电流为

$$I_i = P_i H_i(0) R, \quad (6)$$

式中: $P_i$ 为LED发射光功率; $H_i(0)$ 为PD $_i$ 与LED之间的直流增益; $R$ 为探测器响应度。设PD $_i$ 的感光面在同一平面且中心对称分布,中心点 $S_i$ 的坐标分别为

想探测器。构建镜面转角检测系统的数学模型如图3(a)所示:以LED中心为原点O,LED光轴为Z轴,建立空间直角坐标系。由于X、Y方向的坐标解算相互独立,本文仅对内部反射镜绕A轴旋转、B轴未旋转时的Y方向镜面角度解算值进行分析,X方向同理。设镜面未绕A轴旋转时的镜面法向量 $N=(0,0,1)$ 。图3(b)为反射镜面绕A轴旋转时系统示意图。

$(a_x, a_y, a_z)$ 、 $(-a_x, a_y, a_z)$ 、 $(-a_x, -a_y, a_z)$ 、 $(a_x, -a_y, a_z)$ , 探测器未采用滤光片和透镜,则 $T(\psi_i)=1, g(\psi_i)=1$ 。 $H_i(0)$ 中各项可由向量或向量夹角的余弦表示为 $d_i^2 = |\mathbf{O'S}_i|^2$ ,  $\cos(\phi_i) = \cos\langle\mathbf{O'S}_i, \mathbf{O'H}\rangle$ ,  $\cos(\psi_i) = \cos\langle\mathbf{O'S}_i, \mathbf{HO}\rangle$ 。至此, $I_i$ 可表示为

$$I_i = \frac{P_i R A_r (m+1)}{2\pi |\mathbf{O'S}_i|^2} \cos^m\langle\mathbf{O'S}_i, \mathbf{O'H}\rangle \cos\langle\mathbf{O'S}_i, \mathbf{HO}\rangle, \quad (7)$$

综合式(1)、(2)、(7)可得,镜面角度 $\theta_y$ 与角度解算值 $\sigma_y$ 的关系为

$$\sigma_y = \frac{(V_1 + V_2) - (V_3 + V_4)}{V_1 + V_2 + V_3 + V_4} = \frac{a^m d^{m+3} - b^{m+3} c^m}{a^m d^{m+3} + b^{m+3} c^m}, \quad (8)$$

式中: $a, b, c, d$ 均为 $\theta_y$ 的函数,分别表示为 $a = (\mathbf{O'S}_1 \cdot \mathbf{O'H})/d_{lm} = (\mathbf{O'S}_2 \cdot \mathbf{O'H})/d_{lm}$ ,  $b = |\mathbf{O'S}_1| = |\mathbf{O'S}_2|$ ,  $c = (\mathbf{O'S}_3 \cdot \mathbf{O'H})/d_{lm} = (\mathbf{O'S}_4 \cdot \mathbf{O'H})/d_{lm}$ ,  $d = |\mathbf{O'S}_3| = |\mathbf{O'S}_4|$ ;  $\sigma_y$ 亦可表示为 $\sigma_y = f(\theta_y) = g(a_x, a_y, a_z, d_{lm}, \phi_{1/2})$ 。

通过式(8)可以看出:探测器输出电压值将镜面角度 $\theta_y$ 与解算值联系起来,且角度解算值受系统参数影响。将表1所示系统模型典型参数代入式(7)得到4只探测器输出的光电流随镜面角度变化关系曲线如

表1 系统模型典型参数

Table 1 Typical parameters of system model

Parameter	Value
$A_r / \text{m}^2$	$2.25 \times 10^{-6}$
$a_x, a_y / \text{m}$	$2.08 \times 10^{-3}$
$a_z / \text{m}$	$1.1 \times 10^{-3}$
$\phi_{1/2} / (^\circ)$	17
$P_i / \text{W}$	0.02
$d_{lm} / \text{m}$	$5 \times 10^{-3}$
$R / (\text{A/W})$	0.34

图 4(a) 所示, 探测器能量随角度变化呈现“钟形”分布。将表 1 参数代入式 (8) 得到角度真实值  $\theta_y$  与解算值  $\sigma_y$  的关系如图 4(b) 所示, 角度解算曲线呈“S”形, 在  $\pm 25^\circ$  之外曲线接近直线, 实际情况的噪声影响会导致该部分

角度很难进行检测, 因此该角度范围在不满足系统指标时可忽略。当内部反射镜绕 B 轴旋转、A 轴未旋转时, X 方向镜面角度解算值推导及分析同理。

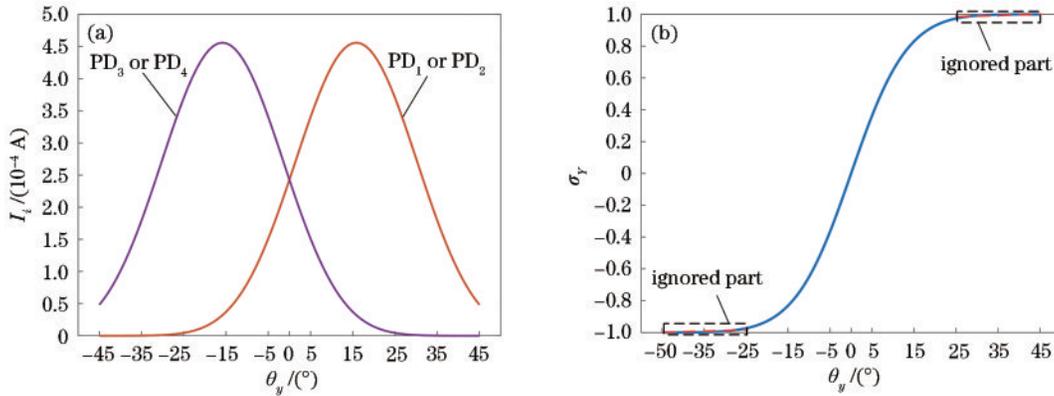


图 4 系统测量值与镜面偏转角度的关系曲线。(a) 探测器光电流与镜面角度的关系; (b) 角度解算值与真实值的关系

Fig. 4 Relationship between system measurement value and mirror deflection angle. (a) Relationship between detector photocurrent and mirror deflection angle; (b) relationship between mirror deflection angle calculated value and true value

### 3 系统角度检测范围分析

前面介绍了镜面角度检测系统的基本原理, 推导了镜面角度解算值与探测器中心位置、镜面中心与光源中心距离  $d_{lm}$ 、光源半功率角  $\phi_{1/2}$  的闭合表达式。通过定义镜面转角检测系统角度检测范围, 在 MATLAB 中仿真分析各变化因素对系统角度检测范围的影响。

镜面角度解算值  $\sigma_y$  与真实值之间呈非线性的“S”形, 采用多项式函数对“S”形曲线进行拟合, 在一定非线性度或误差允许范围内, 确定镜面转角检测系统的角度检测范围。假设内部反射镜面以角度步长  $A_m$  从  $-\theta_{yj}$  移动到  $\theta_{yj}$ , 记录每间隔  $A_m$  时, 镜面偏转角度  $\theta_{yj}$  和各个探测器产生的电压值, 根据式 (3) 计算出各点的解算值  $\sigma_{yi}$ 。为了获得相对准确的系统角度检测范围, 利用最小二乘法对所得曲线进行线性拟合。同时定义曲线非线性度为

$$\delta_Y = \frac{|\Delta\sigma_{YMax}|}{L} \times 100\%, \quad (9)$$

式中:  $|\Delta\sigma_{YMax}|$  为角度解算误差最大值的绝对值;  $L$  表示角度从  $-\theta_{yj}$  移动到  $\theta_{yj}$  时  $\sigma_y$  的测量范围。角度解算值与角度解算拟合值对比如图 5 所示, 规定在非线性度为  $\delta_Y$  范围内时, 镜面转角检测系统角度检测范围为  $[-\theta_{yj}, \theta_{yj}]$ 。

#### 3.1 探测器水平位置对角度检测范围的影响

由于位置坐标  $(a_x, a_y, a_z)$  中感光面垂直高度  $a_z$  变化较小, 因此本文仅讨论探测器中心水平位置  $(a_x, a_y)$  对角度检测范围的影响。根据式 (8) 可知, 探测器中心不同水平距离时的角度解算曲线和角度检测范围有差异。为方便讨论, 假定镜面中心与光源中心距离  $d_{lm} =$

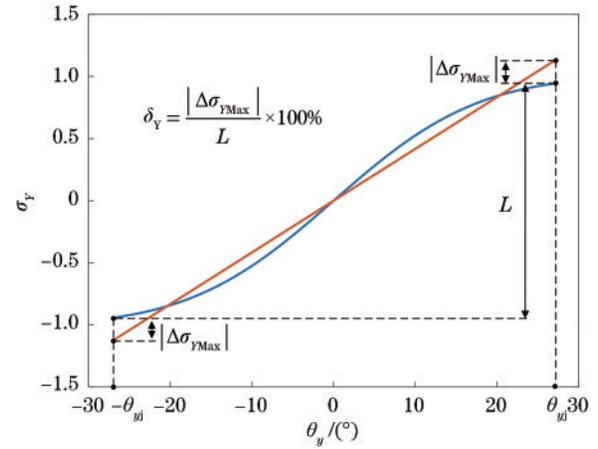


图 5 角度解算值与角度解算拟合值对比

Fig. 5 Comparison between angle calculated value and angle calculated fitting value

5 mm, LED 半功率角  $\phi_{1/2} = 17^\circ$ ,  $a_z = 0$  mm。以  $S_1$  位置为例,  $a_x$  和  $a_y$  变化范围为 1.7~4.4 mm, 步长为 0.3 mm。图 6 给出了不同探测器水平位置时镜面角度真实值与解算值关系, 可以看出,  $a_x$  和  $a_y$  越大, “S”形曲线越陡峭。这是因为探测器越远离光源, 单个探测器接收到的能量随角度呈现出“钟形”曲线的极值点就越远离  $0^\circ$ , 在相同角度下, X 轴左右两侧探测器  $PD_1 + PD_2$  与  $PD_3 + PD_4$  之间的光能量差异越大, 因此曲线中心斜率越大。根据对非线性度和角度测量范围的定义, 在保证非线性度为 5% 时, 通过迭代运算可得到探测器不同水平位置时系统单方向检测最大角度值  $\theta_{yj}$ , 如图 7 所示。通过比较不同参数时的  $\theta_{yj}$  可以看出, 当  $a_x$  和  $a_y$  变大或探测器远离光源时, 系统的检测范围变小, 且探测器越远离光源, 检测范围减小的速度越慢。一般情况下, 为了扩大系统检测范围, 可以在器件空间位置合

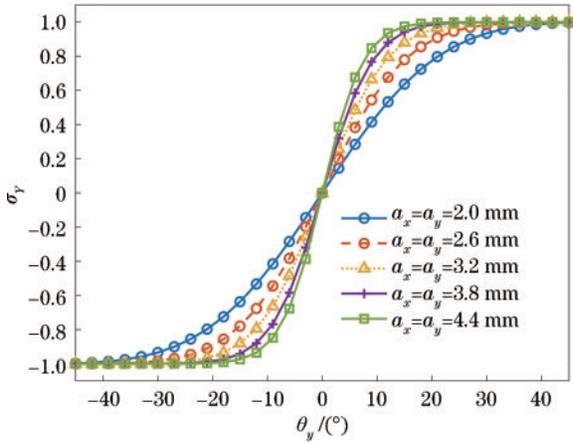


图 6 不同探测器水平位置时,镜面角度真实值与解算值关系  
Fig. 6 Relationship between the true value and the calculated value of the mirror angle at different detector horizontal positions

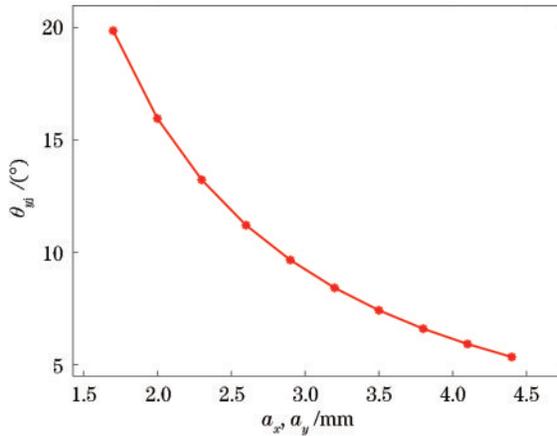


图 7 非线性度为 5% 时,探测器水平位置与单方向检测最大角度值变化关系  
Fig. 7 Relationship between the horizontal position of the detector and the maximum angle value of single-direction detection, when the nonlinearity is 5%

理的情况下使探测器靠近光源。

### 3.2 镜面中心与 LED 距离对角度检测范围影响

分析式(8)可知,镜面中心与 LED 距离对镜面角度解算关系也有重要影响,因此进行了关于镜面中心与 LED 不同距离的单因素系统模型仿真实验。假定 LED 半功率角  $\phi_{1/2} = 17^\circ$ ,  $a_x$  和  $a_y$  为 2.6 mm,  $a_z$  为 0 mm。图 8 给出了镜面中心与光源中心距离  $d_{lm}$  为 1~11 mm, 步长为 1 mm 变化时镜面角度解算的仿真曲线。从图 8 可以看出,随着  $d_{lm}$  的增加,“S”形曲线越来越缓,中心角度探测区域的斜率越小。这是因为镜面相同偏转角度时,增加  $d_{lm}$  的同时改变了 LED 与 PD 之间可视距离  $d_i$ 、出射光线与 LED 夹角  $\phi_i$  和入射光线与 PD 夹角  $\psi_i$ ,进而  $PD_1 + PD_2$  与  $PD_3 + PD_4$  接收的光能量差值变小。在保证非线性度为 5% 时,得到镜面中心与 LED 不同距离时的  $\theta_{y_j}$  如图 9 所示。从图 9 可以看出,

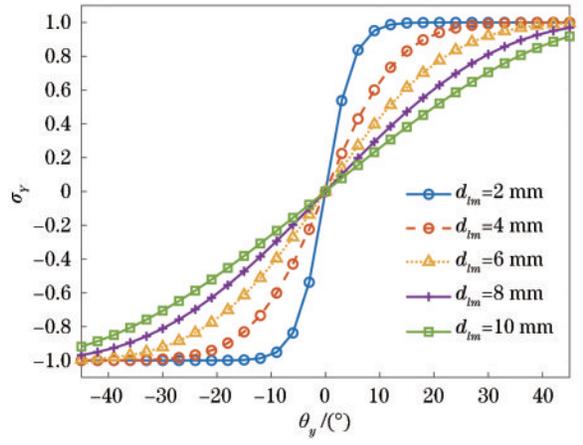


图 8 不同距离  $d_{lm}$  时,镜面角度真实值与解算值关系  
Fig. 8 Relationship between the true value and the calculated value of the mirror angle at different distances  $d_{lm}$

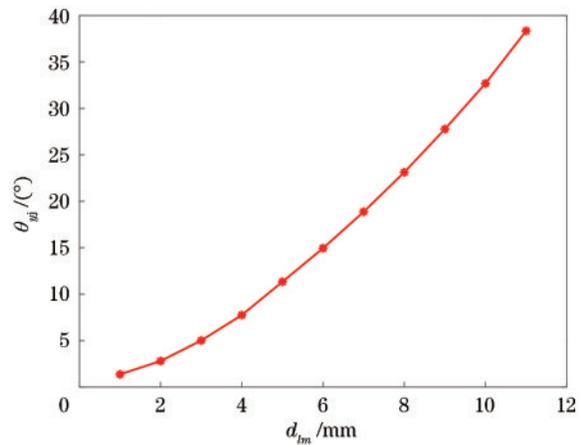


图 9 非线性度为 5% 时,不同距离  $d_{lm}$  与单方向检测最大角度值变化关系  
Fig. 9 Relationship between different distances  $d_{lm}$  and the maximum angle value of single-direction detection, when the nonlinearity is 5%

随着  $d_{lm}$  的增加,镜面角度检测范围变大。因此认为,镜面中心与 LED 距离对镜面角度检测范围起到了正相关作用。

### 3.3 LED 半功率角对角度检测范围影响

LED 半功率角  $\phi_{1/2}$  的大小反映了 LED 发射光功率的集中程度,即  $\phi_{1/2}$  越大,相同区域所受到的辐照强度越小。分析式(8)可知,LED 半功率角对镜面角度解算关系也有一定影响,因此,本文进行了关于 LED 不同半功率角的单因素系统模型仿真实验。现假定镜面中心与光源中心距离  $d_{lm} = 5$  mm,  $a_x$  和  $a_y$  为 2.3 mm,  $a_z$  为 0 mm。图 10 给出了 LED 半功率角  $\phi_{1/2}$  变化范围为  $8^\circ \sim 24^\circ$ , 步长为  $2^\circ$  镜面角度解算值仿真曲线,可以看出,LED 半功率角增大过程中,角度解算曲线中心斜率越来越小。这是因为镜面相同偏转角度时,  $\phi_{1/2}$  越大,探测器感光面单位面积接收的辐照度越小。在保证非线性度为 5% 时,得到感光面不同垂

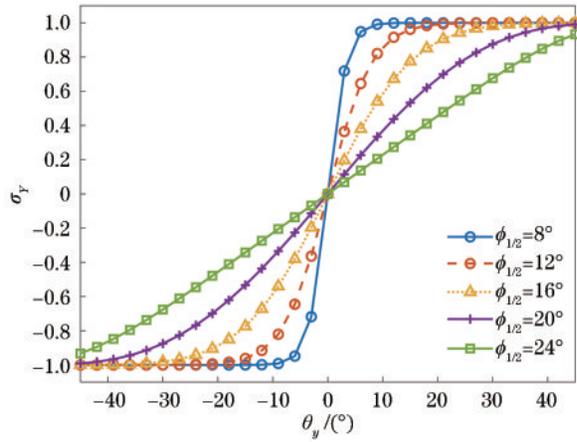


图 10 LED 不同半功率角时, 镜面角度真实值与解算值关系  
Fig. 10 Relationship between the true value of the mirror angle and the calculated value when the LED has different half-power angles

直高度时的  $\theta_{y1}$  如图 11 所示。从图 11 可以看出, 随着 LED 半功率角的增加, 镜面角度检测范围呈增大趋势。因此, LED 半功率角对镜面角度检测范围起到了正相关作用。因为 LED 半功率角  $\phi_{1/2}$  是器件确定的参数, 并不能在系统设计时改变, 所以在系统设计之前, 通过理论模型仿真以确定 LED 半功率角是有必要的。

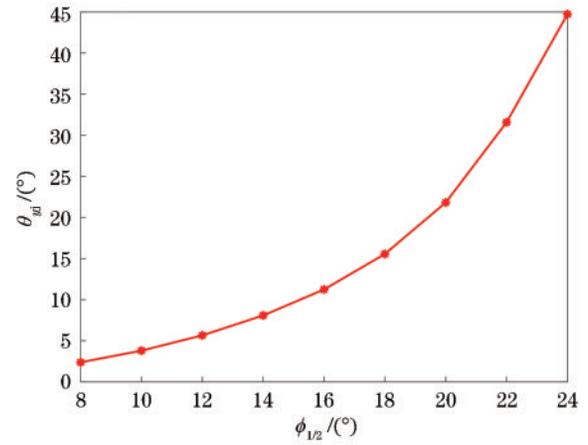


图 11 非线性度为 5% 时, LED 不同半功率角与单方向检测最大角度值变化关系  
Fig. 11 Relationship between different half-power angles of LEDs and the maximum angle value of single-direction detection, when the nonlinearity is 5%

## 4 实验结果与分析

### 4.1 实验平台搭建

为验证所建模型的有效性和正确性, 搭建镜面角度检测系统实验平台如图 12 所示。

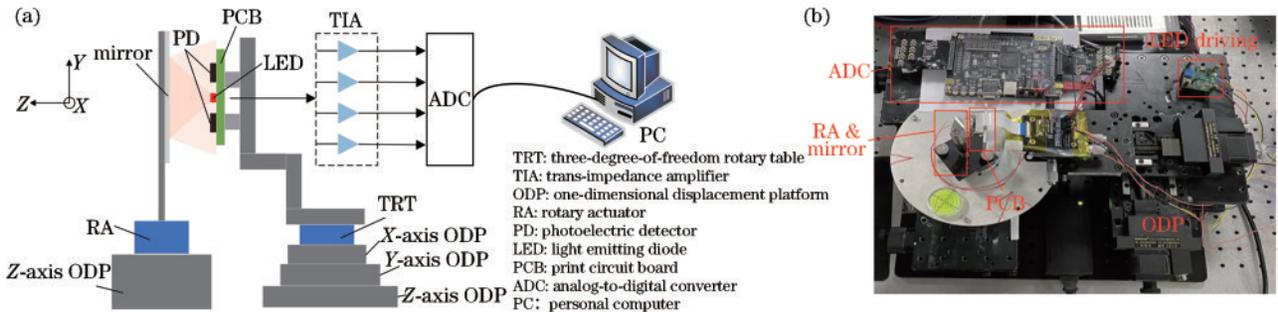


图 12 镜面角度检测系统实验平台。(a) 实验平台示意图; (b) 实验平台实物图

Fig. 12 Experimental platform of mirror angle detection system. (a) Schematic diagram of experimental platform; (b) physical diagram of experimental platform

在该实验平台中: 为减小检测系统的体积, 选择 EVERLIGHT 公司生产的 PIN 型光电二极管 PD15-22B/TR8; 为使光源更贴近理想朗伯光源模型, 选择 OSRAM 公司生产窄半功率角 ( $\pm 17^\circ$ ) 的红外波段 LED SFH 4441; 旋转执行器为 ZeroErr 公司生产的 eRob 70 I, 角度绝对精度为  $150 \mu\text{rad}$ ; 采用四通道低噪声跨阻放大器 AD8624, 放大增益为  $2 \times 10^3 \text{ V/A}$ ; 为满足 LED 发射光功率的调节, 采用超低噪声电荷泵芯片 LTC3201, 实现驱动电流在  $0.63 \sim 126 \text{ mA}$  范围内可调节; 数据采集模块集成了 16 位 200kSPS SAR 型 ADC, 实现对探测器信号  $1 \text{ kHz}$  数据的采集; 在 PC 机上, 采用自编软件对接收数据进行存储, 使用 MATLAB 进行数据处理。

系统工作过程为: LED 发出  $940 \text{ nm}$  波段光, 经过

前方反射镜面反射后入射在四单元光电探测器感光面上, 四单元探测器将接收到光能量转换成四路光电流, 经过跨阻放大、AD 转换后将电流模拟量转换成相应的电压数字量传输给 PC 进行数据处理。当光电探测器和光源型号选定后, 感光面高度  $a_z$  与半功率角  $\phi_{1/2}$  就已确定, 无法在相同条件下对这两个参数的影响进行验证。为探究系统中另外两个几何参数对系统角度检测范围的影响, 分别改变系统中探测器水平位置、镜面中心到 LED 的距离, 重复上述工作过程进行实验。

### 4.2 数学模型验证

实验采用的光源 SFH 4441 与理想朗伯光源的相对辐射曲线有所区别, 曲线对比如图 13(a) 所示。从图 13(a) 可以看到: 1) 理想朗伯光源相对辐射曲线在  $22^\circ$  之前与实验光源吻合得较好, 在之后的角度范围

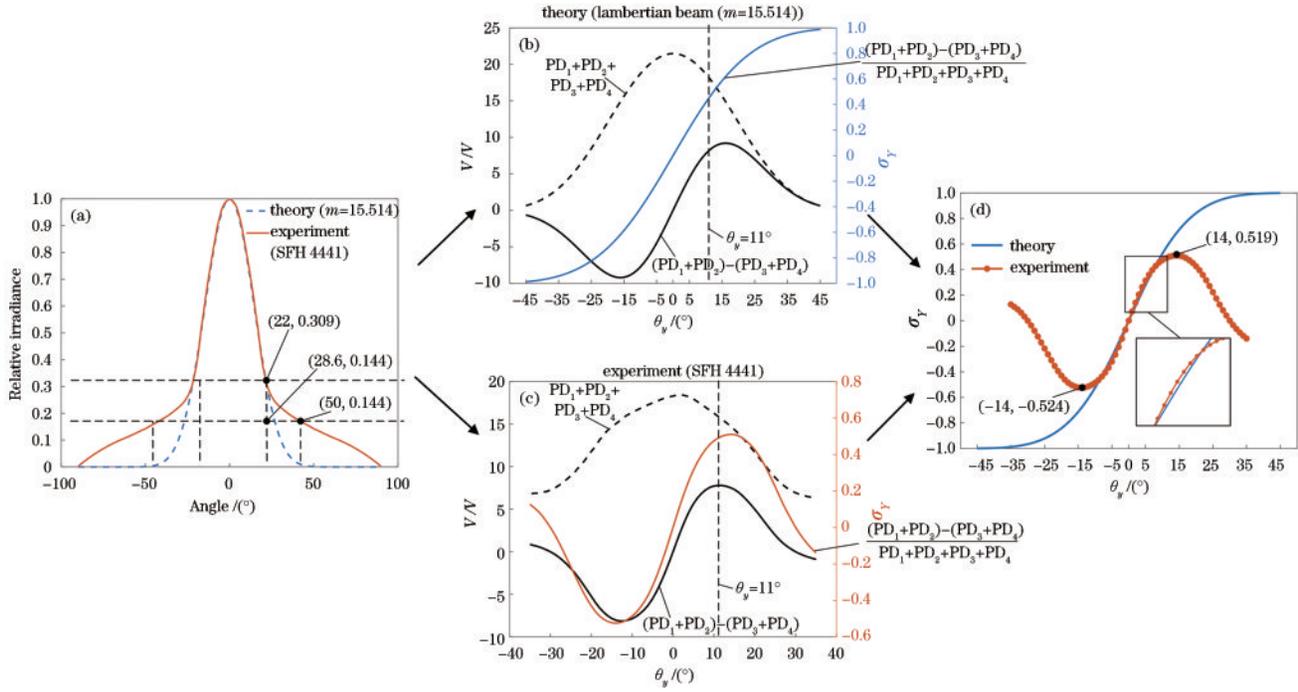


图 13 理论模型验证思路。(a) 实验光源 SFH 4441 与朗伯光源辐射曲线对比图；(b) 理想朗伯光源的探测器能量和、差、比曲线；(c) 实验光源 SFH 4441 的探测器能量和、差、比曲线；(d) 理论与实验的镜面角度真实值与解算值关系对比  
Fig. 13 Verification ideas of theoretical model. (a) Radiation curves comparison of SFH 4441 and Lambert light source; (b) detector energy sum, difference, and ratio curves of ideal Lambert light source; (c) detector energy sum, difference, and ratio curves of experimental light source SFH 4441; (d) comparison of the relationship between the true value and the calculated value of the mirror angle in theory and experiment

内,实验光源的相对辐照度明显大于理想朗伯光源; 2) 随角度增加,实验光源的相对辐射值衰减速度比理想朗伯光源慢; 3) 相对辐照值相同时,实验光源的光斑半径明显大于理想朗伯光源。已知镜面出射光线偏转角度是镜面偏转角度的 2 倍,四单元探测器接收镜面出射光线相当于光源光轴绕镜面中心旋转了镜面偏转角度的 2 倍。分析可以得知,在镜面偏转角度大于  $11^\circ$  之后,探测器接收到的能量因两光源相对辐照曲线的不同而有差异。

为验证理论模型的正确性和有效性进行实验:采用探测器感光面中心坐标  $a_x$  和  $a_y$  为 2.6 mm 的电路板,调节实验光源的驱动电流为 10 mA,将四单元探测器的对角输出值调节至近似相等,将镜面中心到 LED 的距离调至 5 mm,旋转执行器以步长  $1^\circ$  进行旋转,在镜面旋转角度  $\pm 35^\circ$  范围内,采集四单元探测器的测量数据,最终在 PC 机上对数据处理。图 13(b)、(c) 分别给出了理想朗伯光源、实验光源 SFH 4441 的探测器能量和、差、比曲线。对比图 13(b)、(c) 可以看出:在  $11^\circ$  之后,作为归一化差和比算法中分母的探测器的能量和,实验光源比理想朗伯光源衰减慢;作为归一化差和比算法中分子的探测器能量差的变化趋势相差较小,这导致了使用归一化差和比的方法计算时,角度解算曲线出现“非单调部分”。

图 13(d) 给出了理论与实验的镜面角度真实值与

解算值关系对比。可以看出: 1) 实验所得到的“S”形曲线并非单调曲线,以曲线右半部分为例,实验曲线在  $14^\circ$  存在极值,由于在大于  $14^\circ$  的区域内进行角度解算时,将会存在一个角度解算值对应两个角度真实值的情况,因此该区域不适合对镜面角度解算,需要舍弃; 2) 若用直线分别对图 13(d) 中的理论和实验曲线中心区域进行拟合,并以相同的非线性度定义检测范围,可以发现实验曲线两侧的“非单调部分”的斜率“提前改变”,导致实验曲线的检测范围小于理论曲线; 3) 在曲线中心附近,理论仿真曲线解算值与实验曲线吻合得较好,这说明了所建立的理论模型的正确性和有效性。

### 4.3 探测器水平位置对角度检测范围的影响

为探究探测器水平位置对系统角度测量范围的影响,实验设计五组探测器的水平位置,  $a_x$  和  $a_y$  分别为 2.3、2.6、2.9、3.2、3.5 mm,其中,  $d_{lm}=5$  mm,  $\phi_{1/2}=17^\circ$ ,重复上述实验步骤,得到探测器不同水平位置时的镜面角度解算曲线如图 14 所示。可以看出,随着  $a_x$  和  $a_y$  的减小,“S”曲线的中心斜率越来越小,与仿真结果变化趋势相同。以非线性度 5% 为标准,得到探测器不同水平位置时  $\theta_{yi}$  的理论值和实验值对比结果如图 15 所示。可以看出: 1) 平均探测器水平坐标  $a_x$  和  $a_y$  每增加 1 mm,理论上角度测量范围减小约  $4.84^\circ$ ,实验中减小约  $4.2^\circ$ ; 2) 随着探测器水平位置坐标的增加,  $\theta_{yi}$

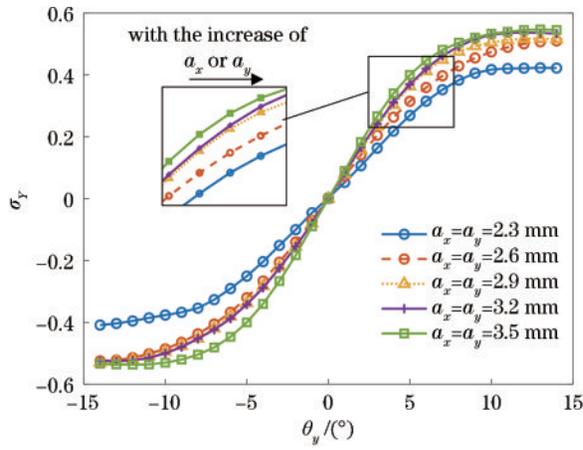


图 14 探测器不同水平位置时的镜面角度解算曲线

Fig. 14 Mirror angle calculated curve at different horizontal positions of the detector

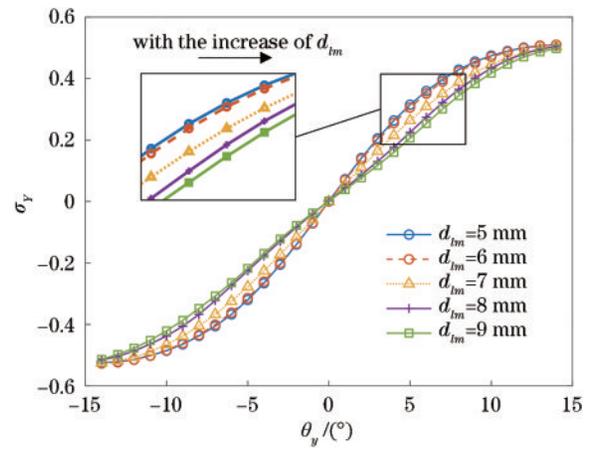


图 16 不同距离 \$d\_{lm}\$ 时, 镜面角度解算曲线

Fig. 16 Calculation curves of the mirror angle at different distances \$d\_{lm}\$

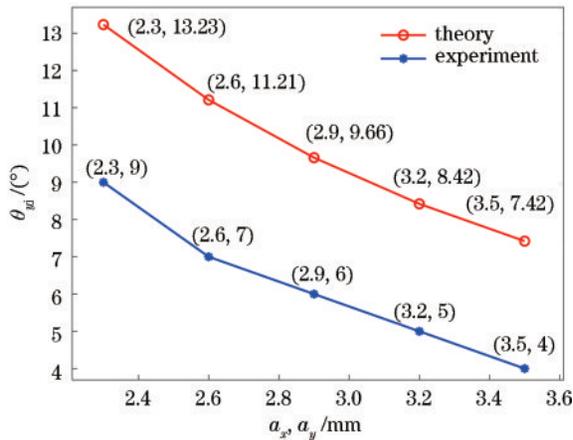


图 15 非线性度为 5% 且探测器不同水平位置时, 单方向检测最大角度理论值和实验值对比

Fig. 15 Comparison of theoretical and experimental values for maximum angle value of single-direction detection, when the nonlinearity is 5% and the detector is at different horizontal positions

变小, 系统角度检测范围变小, 实验结果与理论仿真趋势一致。

#### 4.4 镜面中心与 LED 距离对角度检测范围影响

为探究镜面中心与 LED 距离对系统角度测量范围的影响, 采用探测器水平位置  $a_x$  和  $a_y$  均为 2.6 mm 的电路板进行探测, 其中  $d_{lm} = 5$  mm,  $\phi_{1/2} = 17^\circ$ , 改变镜面中心与 LED 之间的距离, 重复上述实验步骤。图 16 给出了镜面中心与 LED 之间不同距离时的镜面角度解算曲线, 可以看出, 随着  $d_{lm}$  的增加, 曲线中心斜率变小, 与仿真结果变化趋势相同。以非线性度 5% 为标准, 得到镜面中心与 LED 之间不同距离时  $\theta_{yj}$  的理论值和实验值对比结果如图 17 所示。可以看出: 1) 平均镜面中心与 LED 距离  $d_{lm}$  每增加 1 mm, 理论上角度测量范围增加约  $6.94^\circ$ , 实验中增加约  $2.25^\circ$ ; 2) 总体变化趋势是随着  $d_{lm}$  的增加,  $\theta_{yj}$  逐渐变大, 系统角度检测范围变大, 实验结果与理论仿真趋势一致。

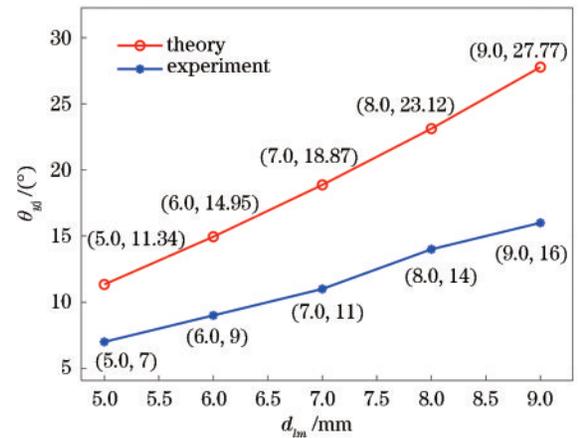


图 17 非线性度为 5% 且不同距离 \$d\_{lm}\$ 时, 单方向检测最大角度理论值和实验值对比

Fig. 17 Comparison of theoretical and experimental values for maximum angle value of single-direction detection, when the nonlinearity is 5% and different distances \$d\_{lm}\$

综合实验分析可以得知: 1) 当系统参数变化时, 实验中采用的非理想朗伯光源会限制角度检测范围增大; 2) 从总体上看, 实验结果与理论仿真结果趋势相符, 验证了基于 LED 朗伯光源模型所建立的四单元探测器检测镜面角度的数学模型的有效性; 3) 提升角度测量范围时, 可以考虑使探测器水平位置靠近光源、增大镜面中心到光源的距离。

## 5 结 论

本文首先将 LED 朗伯光源模型应用于镜面偏转角度测量系统, 推导了镜面偏转角度与角度解算值的数学模型, 其次定义了以非线性度为评价标准时的系统测量范围, 并利用所建立的数学模型对影响系统测量范围的主要参数进行了仿真和分析, 设计了相关实验进行验证。仿真及实验结果表明: 1) 建立的数学模型在一定角度范围内是有效的; 2) 探测器中心位置、镜

面中心与 LED 中心距离和 LED 半功率角是系统测量范围的主要影响因素,为增大系统角度测量范围,设计时可以选择半功率角大的 LED,使探测器水平位置上尽量靠近光源,尽量增加镜面中心与 LED 中心距离。因此,所建立的模型对系统设计和器件选型具有指导作用,为进一步工程应用奠定了基础。

### 参 考 文 献

- [1] 杨尚君,柯熙政,吴加丽,等. 利用二维反射镜实现无线光通信快速对准[J]. 中国激光, 2022, 49(11): 1106001.  
Yang S J, Ke X Z, Wu J L, et al. Fast alignment of wireless optical communication using two-dimensional mirror[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(11): 1106001.
- [2] 李小路,周依尔,毕腾飞,等. 轻量型感知激光雷达关键技术发展综述[J]. 中国激光, 2022, 49(19): 1910002.  
Li X L, Zhou Y E, Bi T F, et al. Review on key technologies of lightweight type-aware LiDAR[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(19): 1910002.
- [3] Shin B, Oh D, Lee K M. Biaxial scanning mirror with large rotation angle and low resonance frequency for LIDAR application[J]. Microsystem Technologies, 2018, 24(11): 4631-4639.
- [4] 厉冰川,张杰,向诗文,等. 激光扫描增强现实系统中抑制带斑的波导研究[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(20): 2011011.  
Li B C, Zhang J, Xiang S W, et al. Banding pattern suppressed waveguide in laser beam scanning augmented reality system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(20): 2011011.
- [5] Singh R, Feng F, Hong Y, et al. Design and characterisation of terabit/s capable compact localisation and beam-steering terminals for fiber-wireless-fiber links [J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(24): 6817-6826.
- [6] Shin B H, Oh D, Lee S Y. A two-dimensional laser scanning mirror using motion-decoupling electromagnetic actuators[J]. Sensors, 2013, 13(4): 4146-4156.
- [7] Zaman I U, Velazco J E, Boyraz O. Omnidirectional optical crosslinks for CubeSats: transmitter optimization [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2020, 56(6): 4556-4566.
- [8] 倪迎雪,伞晓刚,高世杰,等. 激光通信 APT 系统中快速反射镜研究[J]. 激光与红外, 2018, 48(2): 140-147.  
Ni Y X, San X G, Gao S J, et al. Research of fast steering mirror in laser communication APT system[J]. Laser & Infrared, 2018, 48(2): 140-147.
- [9] 王震,程雪岷. 快速反射镜研究现状及未来发展[J]. 应用光学, 2019, 40(3): 373-379.  
Wang Z, Cheng X M. Research progress and development trend of fast steering mirror[J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(3): 373-379.
- [10] 刘力双,夏润秋,吕勇,等. 音圈电机快速控制反射镜研究现状[J]. 激光杂志, 2020, 41(9): 1-7.  
Liu L S, Xia R Q, Lü Y, et al. Research situation of fast steering mirror driven by voice coil motor[J]. Laser Journal, 2020, 41(9): 1-7.
- [11] 徐新行,杨洪波,王兵,等. 快速反射镜关键技术研究[J]. 激光与红外, 2013, 43(10): 1095-1103.  
Xu X H, Yang H B, Wang B, et al. Research on key technology of fast-steering mirror[J]. Laser & Infrared, 2013, 43(10): 1095-1103.
- [12] 吴鑫. 高性能快速控制反射镜研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012: 8-11.  
Wu X. Research on high-performance fast steering mirror [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012: 8-11.
- [13] 陈云善,吴佳彬,王景源,等. 改进的激光光斑位置分辨率模型[J]. 中国激光, 2019, 46(9): 0904004.  
Chen Y S, Wu J B, Wang J Y, et al. Improved laser-spot-position resolution model[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(9): 0904004.
- [14] 黄国华,方石,张亚男,等. 基于位置传感器的空间激光准直系统标定技术[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(11): 110401.  
Huang Z H, Fang S, Zhang Y N, et al. Spatial laser collimation system calibration based on position sensitive device[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(11): 110401.
- [15] Ishikawa I, Sawada R, Higurashi E, et al. Integrated micro-displacement sensor that measures tilting angle and linear movement of an external mirror[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2007, 138(2): 269-275.
- [16] Cheng X, Sun X L, Liu Y, et al. Integrated optoelectronic position sensor for scanning micromirrors [J]. Sensors, 2018, 18(4): 982.
- [17] Liu Y, Feng Y J, Sun X L, et al. Integrated tilt angle sensing for large displacement scanning MEMS mirrors [J]. Optics Express, 2018, 26(20): 25736-25749.
- [18] Hung S K, Chung Y H, Chen C L, et al. Optoelectronic angular displacement measurement technology for 2-dimensional mirror galvanometer[J]. Sensors, 2022, 22(3): 872.
- [19] 赵馨,佟首峰,姜会林. 四象限探测器的特性测试[J]. 光学精密工程, 2010, 18(10): 2164-2170.  
Zhao X, Tong S F, Jiang H L. Experimental testing on characteristics of four-quadrant detector[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(10): 2164-2170.