

激光与光电子学进展

单屏相位测量偏折术中的透明层折射误差补偿

李林峰^{1,2}, 黄启泰^{1,2*}, 任建锋^{1,2}, 侯名洋³¹苏州大学光电科学与工程学院&苏州纳米科技协同创新中心, 江苏 苏州 215006;²苏州大学江苏省先进光学制造技术重点实验室&教育部现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006;³北京空间机电研究所, 北京 100094

摘要 相位测量偏折术(PMD)面形检测中常使用液晶显示屏(LCD)作为投影设备。由于LCD的多层透明结构会对条纹投影光路产生折射而导致投影条纹位置偏离,继而影响最终检测精度,因此需要对这种误差进行点对点的校正。本文将LCD的多层透明结构简化建模为一个整体的等效透明层,建立相应的PMD模型进行透明层的误差分析和补偿。将补偿算法应用到PMD中测量标准平面镜及球面镜,与未进行补偿的情况相比,测量面形均方根误差(RMS)均减少了20%~40%。该补偿方法能显著减小单屏PMD中由LCD透明层折射效应带来的误差,补偿后的面形RMS有显著减小,检测结果更接近于实际面形误差。

关键词 仪器,测量与计量;相位测量偏折术;三维测量;折射误差;斜率补偿

中图分类号 O436 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220962

Refraction Error Compensation of Transparent Layer in Single-Screen Phase Measuring Deflection

Li Linfeng^{1,2}, Huang Qitai^{1,2*}, Ren Jianfeng^{1,2}, Hou Mingyang³¹School of Optoelectronic Science and Engineering & Collaborative Innovation Center of Suzhou Nano Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215006, Jiangsu, China;²Key Lab of Advanced Optical Manufacturing Technologies of Jiangsu Province & Key Lab of Modern Optical Technologies of Education Ministry of China, Soochow University, Suzhou 215006, Jiangsu, China;³Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China

Abstract Liquid crystal displays (LCDs) are used for projection in phase measuring deflection (PMD) surface shape detection. The multilayer transparent structure of the LCD refracts the light path, generating positional deviation errors. The error requires point-to-point correction to improve the final measurement accuracy. In this study, an equivalent transparent layer was modeled based on the LCD multilayer transparent structure, and a corresponding PMD model was established for analysis and compensation for the transparent layer. The standard spherical mirror and flat mirror were detected using a compensation algorithm to PMD. The root-mean-square (RMS) error of the surface shape decreases by 20%~40% compared with that before compensation. The error caused by the refraction effect of the LCD transparent layer in a single-screen PMD can be compensated using the proposed method. The RMS error is decreased, and the detection result is closer to the actual surface error after compensation than before compensation.

Key words instruments, measurement, and metrology; phase measuring deflection; 3D measurement; refraction error; slope compensation

1 引言

单屏相位测量偏折术(PMD)是一种成本低、效率高且对环境不敏感^[1-4]的检测方式,因此具有广泛的应用场景^[5]。但是目前学者对单屏PMD的系统误差特

别是由液晶显示屏(LCD)引入的误差研究较少。

Petz等^[6]对球面反射镜进行测量,考虑了31个相位偏折系统的系统参数,最后确认LCD中背光层上方的液晶层、玻璃基板、偏光片、滤光片等透明层引起的折射会使显示图案产生偏移;Bartsch等^[7]通过仿真的

收稿日期: 2022-03-11; 修回日期: 2022-04-15; 录用日期: 2022-05-23; 网络首发日期: 2022-06-02

通信作者: *huangqitai@126.com

方式对 LCD 角度及透明层的相关特性进行分析,发现 LCD 表面平整度和透明层厚度与折射率是引起误差的重要因素;Huang^[8]对 17 m 远处直径 4.2 m 的高反射镜面进行高精度检测时,对显示屏透明层的折射效应、显示屏的非线性及表面平整度三个方面进行的分析表明,显示屏透明层会给镜面均方根误差(RMS)带来 250 nm 的误差。以上研究分析并阐明显示屏会带来误差,但并未给出一种针对该误差进行补偿的方法,而是将多种系统参数统一迭代^[9],虽然能提高测量精度,但是迭代的效率较低,若环境噪声较大会导致迭代的不收敛,因此需要对每一个系统参数及其误差进行分析以提高检测系统的效率及稳定性。

目前常用的 LCD 是基于无碱玻璃多层印刷,具有极高的表面平整度,可以作为理想平面^[10],因此本文仅针对 LCD 折射效应进行误差分析并提出补偿方法。LCD 多层结构整体引起光线折射,因此将这个多层结构建模为一个完整的透明层,标定其等效厚度与等效折射率。将此透明层引入 PMD 模型,对新模型的几何关系进行分析,得到透明层引起误差的原因,并给出相应的补偿方法。通过实验证明补偿方法的可行性并验证该方法能有效提高待测面的测量精度,实现直接补偿系统参数以减小误差的目的。

2 基本原理

2.1 PMD 原理

如图 1 所示为单屏 PMD 示意图。根据光路可逆原理,假设由 CCD 相机发出的一条光线,经参考面反射到 LCD 显示屏上,若反射镜相对参考面发生角度为 θ 的偏转,则反射光线发生角度为 2θ 的偏转,其在 LCD 上的入射点由 A 点变化到 B 点。 θ 角的正切值即被测面在此截面中光线入射点上的斜率。

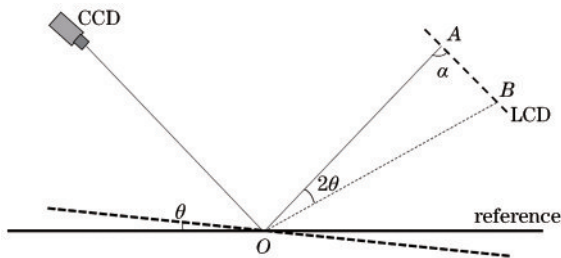


图 1 PMD 结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of phase measuring deflection (PMD) structure

如图 1 所示,为了获得待测面上各点的斜率,LCD 投射多幅不同相位的正弦条纹经待测面调制后由 CCD 相机接收。使用相移法解调条纹获得相位信息,与参考面相位信息的差为 $\Delta\varphi$ 即图 1 所示 $|AB|$ 段的相位信息。在 $\triangle OAB$ 中通过正弦定理即可得到光线偏转角 2θ 的正切值:

$$\tan 2\theta = \frac{P \sin \alpha \Delta\varphi}{P \cos \alpha \Delta\varphi + 2\pi |OA|}, \quad (1)$$

式中: P 为条纹周期; α 为参考面反射光线与显示屏的夹角; $|OA|$ 为参考面反射光线到显示屏的距离。通过式(1)计算得到被测面表面斜率分布,通过二维方向上的积分即可获得待测面表面的面形。

$$w(x, y) = \int g^x dx + g^y dy, \quad (2)$$

式中: w 为面形矢高分布; g^x 为 x 方向上的斜率; g^y 为 y 方向上的斜率。此方法的测量精度理论上可达几个纳米或者更高^[9]。

对于被测表面上不同斜率的点,根据光路的可逆性,光线在 LCD 表面的入射角不同,则显示屏透明层引起的误差也不同,因此需要点对点分析并给出补偿公式。

2.2 LCD 折射效应补偿

如图 2 所示为 LCD 结构,由玻璃层、液晶层、滤光片等多个透明层组成。



图 2 LCD 结构示意图

Fig. 2 LCD structure diagram

目前广泛使用的 LCD 是基于表面平整度极高的无碱玻璃印刷^[11],在相位偏折测量中可等效为理想平面的透明层。如图 2 所示的多层结构可以建模为单个等效透明层,通过 Levenberg-Marquardt (LM) 算法标定其等效厚度 d 与等效折射率 n ,并将其作为不可忽略项基于图 1 所示的模型进行改进,将完整的 LCD 结构引入相位偏折测量系统,得到如图 3 所示的相位偏折测量检测模型。

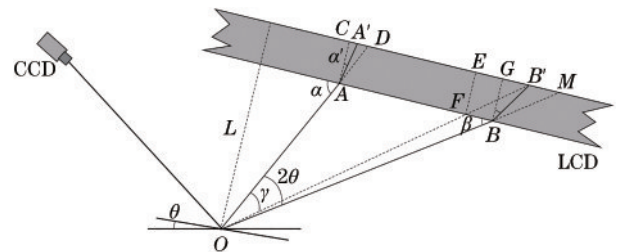


图 3 显示屏透明层折射效应的相位-斜率映射示意图

Fig. 3 Phase gradient mapping of refraction effect of transparent layer of display screen

根据光路可逆原理,由 CCD 相机发出一条光线到待测点 O ,经参考平面反射后光线为 \overline{OA} ,经待测面反射后光线为 \overline{OB} ,经过显示屏透明层上表面发生折射分别形成折射光线 $\overline{AA'}$ 、 $\overline{BB'}$ 。如图 3 所示,入射点斜率越大则经该点的反射光线入射到 LCD 表面时的入射角越大,则折射光线的折射角也越大。经参考平面

的入射光线 \overline{OA} 与显示屏的夹角 α 和折射角 α' 是已知量;放入待测面后对应点斜率发生改变,经过该点的光线发生偏转形成 \overline{OB} 与显示屏夹角 β 和折射角 β' 是未知量。若不考虑透明层,如图 1 所示,则由 CCD 相机获取的相位信息为 $|AB|$;若考虑透明层,由图 3 所示,两次拍摄分别引入了 $|CA'|$ 、 $|GB'|$ 的偏差,CCD 相机获取的相位信息为 $|A'B'|$ 。其中, $|CA'|$ 与 $|GB'|$ 可表示为

$$\begin{cases} |CA'| = d \cdot \tan \alpha' \\ |GB'| = d \cdot \tan \beta' \end{cases} \quad (3)$$

显然,入射点处斜率越大,光线入射显示屏角度越大,引入的偏差也越大。

CCD 相机获得的相位信息受上述偏差影响,直接用于运算将引起较大的检测误差,因此需要对其进行补偿,即通过 $|A'B'|$ 获得 $|AB|$,如图 3 所示, $|AB|$ 与 $|CG|$ 相等:

$$|AB| = |CG| = |A'B'| + |CA'| - |GB'|, \quad (4)$$

式中, $|A'B'|$ 、 $|CA'|$ 为已知量,由式(3)可知,需要考虑 β 与 β' 的关系获得 $|GB'|$ 。如图 3 所示,显然 $\triangle OB'M$ 与 $\triangle OFB$ 相似:

$$\tan \beta' = \frac{L}{d^2} |B'E| - \frac{L-d}{d} \cdot \frac{1}{\tan \beta}. \quad (5)$$

如图 3 所示, \overline{OA} 、 $\overline{AA'}$ 、 $\overline{A'B'}$ 均为已知量,则 $\overline{OB'}$ 已知,于是 \overline{OA} 与 $\overline{OB'}$ 的夹角为 γ 可由向量夹角公式获得,在 $\triangle B'EF$ 中:

$$|B'E| = \frac{d}{\tan(\alpha - \gamma)}. \quad (6)$$

在 $\triangle OAB$ 中,由正弦定理可以得到:

$$\frac{|AB|}{\sin 2\theta} = \frac{|OA|}{\sin \beta}, \quad (7)$$

其中 $\beta = 2\pi - 2\theta - \alpha$,由式(4)获得 $|AB|$ 。通过式(3)、式(6)的已知量构成常量 K 。

$$K = |A'B'| + |CA'| - \frac{L}{d} |B'E|. \quad (8)$$

因此,由式(7)可知,考虑了 LCD 透明层厚度与折射率的相位-斜率映射关系为

$$\tan 2\theta = \frac{K \sin \alpha + (L-d) \cos \alpha}{|OA| + K \cos \alpha - (L-d) \sin \alpha}. \quad (9)$$

将 LCD 的多层透明结构建模为一个整体等效透明层,标定其等效厚度与等效折射率,同一块显示屏仅需标定一次即可用于后续多次测量,且不需要在测量中引入其他步骤和设备,可提高效率、降低成本。具体测量的实施步骤如图 4 所示。

1) 系统参数标定。CCD 相机、系统结构参数和 LCD 标定,得到相关参数;

2) 测量图片获取。使用 CCD 相机拍摄待测表面的多幅变形条纹图案;

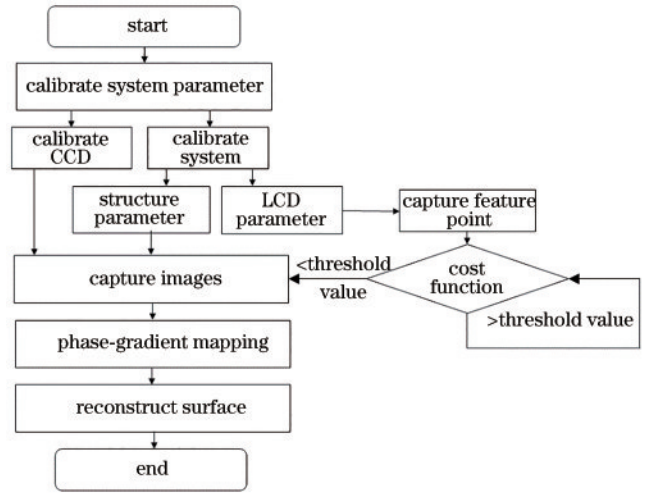


图 4 测量步骤流程图

Fig. 4 Measurement flow chart

3) 相位-斜率映射。使用系统参数标定得到的系统结构参数和 LCD 参数,结合本文提出的相位-斜率映射方法计算得到待测表面斜率分布;

4) 待测面面形重建。由待测表面斜率分布积分重建待测面面形。

3 实验与分析

PMD 检测光学面面形通过表面残差值反映其面形重建精度,是该检测技术的重要评价依据^[12],通过实验验证上述 LCD 表面透明层误差补偿的实际效果。为开展实验,将标定完成的 CCD 相机置于 LCD 下方,固定两者相对位置,调节待测镜面至 CCD 相机获得清晰的条纹图,搭建实验论证系统如图 5 所示,实验所用 CCD 及 LCD 相关参数如表 1 所示。

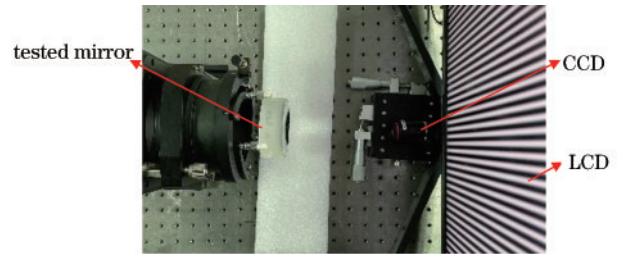


图 5 PMD 系统

Fig. 5 PMD system

表 1 实验仪器参数

Table 1 Experimental instrument parameters

	Model	Resolution	Pixel size
CCD	HIKVISION MV-CE123-10UM	4000 pixel × 3036 pixel	1.8 μm
LCD	SAMSUNG U28R550UQC	3840 pixel × 2160 pixel	0.16 mm

3.1 显示屏标定

显示屏标定^[13]是系统标定的一部分,标定时使用

两个已标定的相机在不同位置拍摄显示屏上显示的特征点图案,值得注意的是,特征点需要尽量同时占满两个 CCD 相机的视场,以保证光线有足够大的入射角度使显示屏透明层对特征点的位置产生影响。获得特征点图像后,利用 LM 算法获得透明层的等效厚度及折射率。实验中计算得到的该显示屏的等效折射率为 1.63,等效厚度为 0.8 mm。

3.2 反射镜测量实验

首先对标准平面平晶进行检测实验,该平晶经

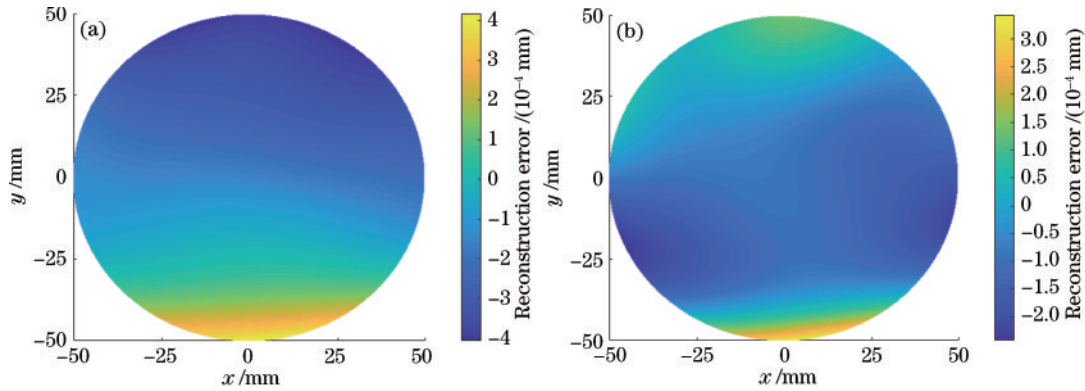


图 6 补偿前后平面平晶面形残差。(a) 补偿前 PV 为 $0.83 \mu\text{m}$, RMS 为 $0.15 \mu\text{m}$; (b) 补偿后 PV 为 $0.59 \mu\text{m}$, RMS 为 $0.12 \mu\text{m}$
Fig. 6 Plane flat crystal surface residuals before and after compensation. (a) PV is $0.83 \mu\text{m}$ and RMS is $0.15 \mu\text{m}$ before compensation; (b) PV is $0.59 \mu\text{m}$ and RMS is $0.12 \mu\text{m}$ after compensation

将本文所提补偿方法用于实际高精度测量中,测试一个标准凹球面镜。该球面镜的曲率半径为 131 mm,有效口径为 40 mm,镜面经 Zygo 干涉仪测量得到其面形 PV 为 $0.288 \mu\text{m}$, RMS 为 $0.027 \mu\text{m}$ 。应用图 1 所示的未补偿模型进行面形检测获得图 7(a)的面形,面形残差的 PV 为 $1.14 \mu\text{m}$, RMS 为 $0.22 \mu\text{m}$;应用图 3 透明层补偿模型重建面形获得图 7(b)的面形,面形残差的 PV 降低到 $0.71 \mu\text{m}$,较补偿前降低了 38%, RMS 降低到 $0.14 \mu\text{m}$,较补偿前降低了 36%。如图 7

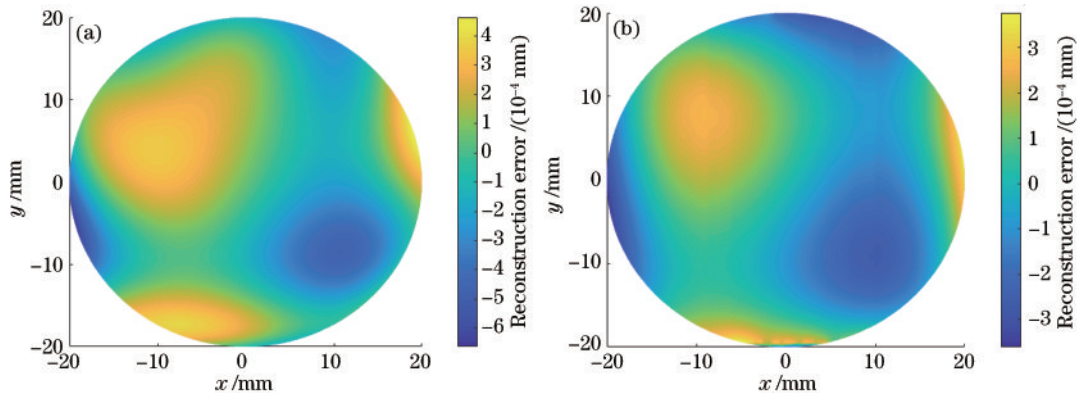


图 7 补偿前后球面镜面形残差。(a) 补偿前 PV 为 $1.14 \mu\text{m}$, RMS 为 $0.22 \mu\text{m}$; (b) 补偿后 PV 为 $0.71 \mu\text{m}$, RMS 为 $0.14 \mu\text{m}$
Fig. 7 Spherical mirror surface residuals before and after compensation. (a) PV is $1.14 \mu\text{m}$ and RMS is $0.22 \mu\text{m}$ before compensation; (b) PV is $0.71 \mu\text{m}$ and RMS is $0.14 \mu\text{m}$ after compensation

4 结论

提出一种用于补偿显示屏折射效应误差的方法。

Zygo 干涉仪标定,其面形 RMS 为 $\lambda/20$ 。应用图 1 所示的未补偿模型进行面形检测获得图 6(a)的面形,面形残差的峰谷值(PV)为 $0.83 \mu\text{m}$, RMS 为 $0.15 \mu\text{m}$;应用图 3 透明层补偿模型重建面形获得图 6(b)的面形,残差的 PV 降低到 $0.59 \mu\text{m}$,较补偿前降低了 30%, RMS 降低到 $0.12 \mu\text{m}$,较补偿前降低了 20%。实验证明本文提出的补偿方法能获得更高的面形检测精度。

所示,镜面补偿前后残差较大区域有显著减小,测量精度提高,同时镜面边缘部分残差减小,根据式(3),光线入射到显示屏表面的入射角度越大,引起的折射效应误差越大。实验所用镜面斜率较镜面中心斜率更大,因此镜面边缘误差将增大,而本文所提相位-斜率映射可有效补偿光线入射角不同引起的折射效应误差。实验证明了在高精度检测中,本文所提补偿方法能减小镜面表面测量误差,获得更准确的三维面形分布信息。

基于 LCD 基本结构的分析给出了误差来源,并提出误差的补偿方法。通过实验证明了本文的补偿方法可将测量精度提升 20%~40%,并能在一定程度上减小面

形误差,证明了该方法是可行的且可以提高测量精度。本文的补偿方法为单屏 PMD 提供了 LCD 误差的直接补偿方法,不需要迭代参数与添加设备,简单高效且成本低,能对工业环境下的测量提供及时的补偿以提高测量精度,对于提高实际应用中的检测精度有重要意义。

参 考 文 献

- [1] 成先明,王婷婷,史柏迪,等.基于相位偏折术和图像处理的面缺陷检测[J].计算机测量与控制,2021,29(5):64-69.
Cheng X M, Wang T T, Shi B D, et al. Surface defect detection based on phase deflection and image processing [J]. Computer Measurement & Control, 2021, 29(5): 64-69.
- [2] 王月敏,张宗华,高楠.基于全场条纹反射的镜面物体三维面形测量综述[J].光学精密工程,2018,26(5):1014-1027.
Wang Y M, Zhang Z H, Gao N. Review on three-dimensional surface measurements of specular objects based on full-field fringe reflection[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(5): 1014-1027.
- [3] Faber C, Olesch E, Krobot R, et al. Deflectometry challenges interferometry: the competition gets tougher [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8493: 84930R.
- [4] Su P, Parks R E, Wang L R, et al. Software configurable optical test system: a computerized reverse Hartmann test [J]. Applied Optics, 2010, 49(23): 4404-4412.
- [5] 张宗华,刘巍,刘国栋,等.三维视觉测量技术及应用进展[J].中国图象图形学报,2021,26(6):1483-1502.
Zhang Z H, Liu W, Liu G D, et al. Overview of the development and application of 3D vision measurement technology[J]. Journal of Image and Graphics, 2021, 26(6): 1483-1502.
- [6] Petz M, Tutsch R. Reflection grating photogrammetry: a technique for absolute shape measurement of specular free-form surfaces[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5869: 58691D.
- [7] Bartsch J, Nüss J R, Prinzler M H U, et al. Effects of non-ideal display properties in phase measuring deflectometry: a model-based investigation[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10678: 106780Y.
- [8] Huang R. High precision optical surface metrology using deflectometry[D]. Tucson: The University of Arizona, 2015.
- [9] 吴雨祥.基于光学三维成像的镜面物体表面质量检测方法研究[D].成都:电子科技大学,2017.
Wu Y X. Study on specular surface quality inspection based on optical three dimensional metrology[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.
- [10] 詹总谦.基于纯平液晶显示器的相机标定方法与应用研究[D].武汉:武汉大学,2006.
Zhan Z Q. Research on camera calibration based on completely flat liquid crystal display[D]. Wuhan: Wuhan University, 2006.
- [11] 莫益栋.精细雾化施液抛光 TFT-LCD 玻璃基板关键技术研究[D].无锡:江南大学,2015.
Mo Y D. Studies on the key technologies in fine atomization CMP of TFT-LCD glass substrate[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015.
- [12] 殷永凯,张宗华,刘晓利,等.条纹投影轮廓术系统模型与标定综述[J].红外与激光工程,2020,49(3):0303008.
Yin Y K, Zhang Z H, Liu X L, et al. Review of the system model and calibration for fringe projection profilometry[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(3): 0303008.
- [13] 王月霞,张宗华,高楠,等.透射显示双屏偏折系统中透明屏折射误差补偿方法[J].光学学报,2022,42(5):0512003.
Wang Y X, Zhang Z H, Gao N, et al. Compensation method of refraction error caused by transparent display screen in transmissive display dual-screen deflectometric system[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(5): 0512003.