

doi: 10.3788/gzxb20154402.0222002

基于三维缺陷检测的 DMD 数字条纹 投影光学系统设计

陈方涵^{1,3}, 赵光宇², 蒋仕龙³, 彭文达¹

(1 深圳大学 光电工程学院 光电子器件与系统(教育部/广东省)重点实验室, 广东 深圳 518060)

(2 华南师范大学 华南先进光电子研究院 光及电磁波研究中心, 广州 510006)

(3 北京大学深圳研究院 运动控制技术实验室, 广东 深圳 518057)

摘要:基于半导体行业中 PCB 焊膏印刷检测的实际应用, 采用 0.45 WXGA DMD 芯片设计了数字条纹投影光学系统. 以 LED 作为光源, 结合透镜阵列照明 DMD 芯片; 同时, 为了减小投影三角关系造成的条纹周期不均匀性对检测结果的影响, 采用双远心光路结构将 DMD 生成的条纹成像到待测表面, 且适用的最小检测面积为 1mm^2 . 光学模拟结果表明, 该数字投影系统在被投影表面上的照明均匀性为 91%, 投射条纹的对比度高于 0.8, 且条纹周期均匀, 为实际应用与后续条纹分析提供了良好保障.

关键词:光学投影; 表面缺陷; LED 照明; 数字条纹投影; 数字微镜元件; 双远心结构

中图分类号: O439; TN307

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)02-0222002-7

Optical System Design of DMD Digital Fringe Projection Based on the Application of 3-D Defect Inspections

CHEN Fang-han^{1,3}, ZHAO Guang-yu², JIANG Shi-long³, PENG Wen-da¹

(1 Key Laboratory of Optoelectronic Devices and System of Ministry of Education and Guangdong Province, College of optoelectronic engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)

(2 South China Academy of Advanced Optoelectronics, Center for Optics and Electromagnetic Research, South Normal China University City Campus, Guangzhou 510006, China)

(3 Laboratory of motion control Technology, PKU-HKUST Shenzhen-Hongkong Institution, Shenzhen, Guangdong 518057, China)

Abstract: According to the practical solder paste printing inspection of PCB, digital fringe projector design used 0.45 WXGA DMD chip was performed in this paper. The design adopted LED as light source, and combined with lens array for evenness illumination. In order to reduce the influence of nonuniform fringe on inspection results caused by triangular relationship of projection, double telecentric optical configuration was used for imaging DMD-generating fringe on defected surface. The minimal inspection area of projector can reach 1mm^2 . Simulation results show that illumination evenness of the digital fringe projector on defected surface is about 91%, contrast of projection fringe is better than 0.8, and keep the fringe pitch uniform. Optical projector designed in this paper provides guarantee for inspection application and following fringe analysis.

Key words: Optical projector; Surface defect; LED lighting; Digital fringe projection; Digital Micro-Mirror Device(DMD); Double-telecentric structure

OCIS Codes: 220.4830; 150.3040; 150.0155; 150.2950; 120.4630

基金项目: 广东省引进创新科研团队计划(No. 201001D0104799318)资助

第一作者: 陈方涵(1983-), 女, 在站博士后, 主要研究方向为现代光学技术及工程应用. Email: chenhan620@163.com.

导师: 彭文达(1948-), 男, 研究员, 硕士, 主要研究方向为光电成像器件与技术. Email: pwd@szu.edu.cn.

收稿日期: 2014-06-04; 录用日期: 2014-09-12

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

在现代化的工业检测中,非接触式三维信息的实时获取一直是行业关注的重点,发展至今不乏新方法新技术的涌现^[1-2].尤其是计算机和数字技术的发展,更是极大地推动着非接触式三维测量技术的进步.基于数字微镜装置(Digital Micro-Mirror Device, DMD)的数字相移条纹投影三维测试技术就是其中的典型代表之一^[3-5].与传统的基于物理光栅投影的相移法相比, DMD 条纹投影技术因独特的灵活性、高亮度、高分辨率和高像质,在快速数字相移条纹三维测量中发挥着非常重要的作用^[6-9].

DMD 数字相移条纹投影三维测试技术包含 DMD 数字投影技术和条纹分析技术两部分.目前,国内外大多数的研究人员都将主要精力放在条纹分析方法的改善和创新上,至于条纹投影部分则多直接采用 TI 公司等提供的标准化 DMD 投影产品^[10-12],这在各不相同的应用需求中受到极大的限制.半导体行业中印刷电路板(Printed Circuit Board, PCB)焊膏印刷缺陷检测^[13]便是其中之一.为了减少在 PCB 焊膏印刷流程中产生的漏焊、焊膏高度不一致等缺陷,提高 PCB 板焊膏印刷合格率,本文从 DMD 投影技术的光学原理出发,根据检测的实际需求,针对性地设计基于 DMD 芯片的条纹投影光学系统用于焊膏三维重构.

1 DMD 数字条纹投影系统的应用要求与光学设计指标

采用单个数字条纹快速切换的四步相移法测量 PCB 板焊膏的三维分布.整个系统包括 DMD 数字条纹投影系统、相机和计算机三部分,前两者均受计算机控制.测量时,条纹投影系统光轴与相机成像光轴保持一定夹角,如图 1.

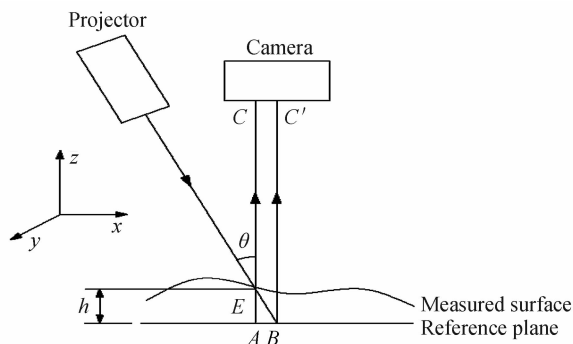


图 1 投影三角关系

Fig. 1 Triangular relationship of projection

计算机生成的正弦条纹通过 DMD 投影系统斜投射到物体表面(焊膏)E 点,经该点表面散射的条纹由垂直于参考平面的黑白相机接收并成像在 C 点;而同样方向的条纹直接投射到参考平面(PCB 基板)B 点后

成像于接收面上的 C' 点,从而使条纹产生了 x 方向的相移.由于相移是由待测焊膏点与参考基点的高度差 h 引起的,不同的 h 导致条纹产生不同程度的变形,因此通过解析变形条纹的位相值,便可获取焊膏的三维信息.为了确保相移条纹方法在 PCB 焊膏三维缺陷检测应用中的可靠性,所采用的投影光学系统需满足:

- 1) 投影条纹在 z 方向有 0.5 mm 的景深;
- 2) PCB 板上最小的焊膏印刷面积为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$,测量时要求该区域有 3 个完整的条纹周期;
- 3) DMD 投影光轴与相机成像光轴的夹角为 25° ;
- 4) 为减少测量误差,每个正弦条纹周期的采样点 $N=8$;
- 5) 投影光学系统投射条纹的对比度为 80%;
- 6) 被投影区域中条纹的周期均匀性为 90%.

目前市面上可用于条纹投影的商业数字化投影产品无法满足焊膏三维缺陷测试的应用.本文从条纹采样重构准确度、条纹覆盖范围等方面出发,选用 TI 公司生产的 0.45 WXGA DMD 芯片,设计单芯片的数字条纹投影光学系统.并选用了 TI 公司配套的 DMD 驱动板及软件,能自动校正正弦条纹投影测试中存在的非线性伽马误差,简化了后续软件处理,并且保证了应用的准确度.

基于 DMD 的数字条纹投影光学系统包括 DMD 芯片照明和投影两部分,两者通过 DMD 的反射特性相互承接.当光束照明到 DMD 有效区域上时,每个微反射元将根据接收到的电信号,以各自的对角线为轴线倾斜 $\pm \theta_{\text{tilt}}$,实现“开”或“关”两个状态.其中仅有“开”状态的微镜能够将光线切换进投影系统光瞳,并经脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)方式获取所需条纹灰度值投射到物体表面.

为了设计满足要求的 DMD 条纹投影系统,首先将应用要求 1)~6) 转化为照明和投影两部分光学系统的设计指标.表 1 基于 0.45 WXGA DMD 芯片的参数,计算并列出了设计所需的各项指标.

表 1 DMD 条纹投影光学系统设计指标

Table 1 Specifications of DMD fringe projector design

Item	Specification
Illumination area on DMD	$9.85 \text{ mm} \times 6.2 \text{ mm}$
Illumination evenness on DMD	0.900
Fringe pitch on object	0.330
Magnification of projector	$4.92 \times$
NA of projector in object side	0.032
NA of projector in DMD side	0.155
Projection area on object	$48 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$
Fringe contrast on object	0.8
Pitch evenness on object	90%

2 DMD 芯片照明设计

为了节省空间同时保证照明的均匀性,以 LED 为

光源,透镜阵列作为匀光器件,采用远心结构进行设计^[14-15].主要的光学元件包括准直透镜、透镜阵列、聚光镜和 TIR 棱镜.各元件参量的确定并非独立,它们都与 DMD 芯片的照明效果紧密相关.

图 2(a)为理想点光源照明 DMD 的光路图,点光源经准直透镜后产生平行于光轴的绝对对准直光束,光

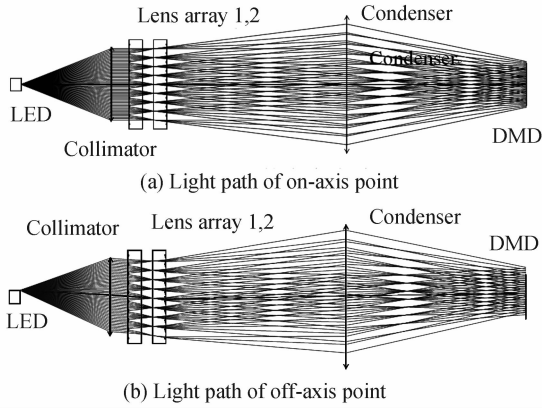


图 2 DMD 照明光路结构

Fig. 2 Layout of DMD illumination

束经过矩形透镜阵列 1、2 和聚光镜后,在聚光镜后焦平面上形成均匀矩形光斑,DMD 芯片置于该后焦平面.通过轴上点光源到 DMD 的光路几何关系可知,透镜阵列、聚光镜与 DMD 之间的参量满足

$$y_{\text{DMD}} = 2f_{\text{condenser}} \tan(\theta_{\text{lensarray}}) \quad (1)$$

$$\text{NA}_{\text{DMD_lighting}} = \frac{y_{\text{lensarray}}}{2f_{\text{condenser}}} \quad (2)$$

式中, y_{DMD} 和 $y_{\text{lensarray}}$ 分别表示 DMD 和透镜阵列的有效尺寸, $\theta_{\text{lensarray}}$ 为透镜阵列的偏折角, $f_{\text{condenser}}$ 为聚光镜焦距, $\text{NA}_{\text{DMD_lighting}}$ 为 DMD 各点的照明数值孔径.根据式(1)、(2),匹配参量合理的透镜阵列与聚光镜,可设计满足表 1 的用于 0.45 WXGA DMD 的照明.

为了使系统能够充分收集光源发散的能量,在理想点光源情况下,选用大相对孔径的准直镜.然而,理想的点光源是不存在的,光源的尺寸相对于准直镜存在视场角 θ_{source} ,如图 2(b), θ_{source} 与光源大小 y_{source} 、准直镜焦距 $f_{\text{collimator}}$ 之间满足

$$\theta_{\text{source}} = \arctan\left(\frac{y_{\text{source}}}{2f_{\text{collimator}}}\right) \quad (3)$$

光源尺寸的存在使得透镜阵列偏折角 $\theta_{\text{lensarray}}$ 受到的 θ_{source} 限制,即 $\theta_{\text{source}} < \theta_{\text{lensarray}}$.否则,在聚光镜后焦面上将会形成“宫格”状的照明光斑,使原本会聚到 DMD 芯片上的光能量向四周扩散,减低 DMD 对光源的能量利用率.因此,在准直透镜焦距一定的情况下,小尺寸的光源有利于提高 DMD 的照度.与其他照明系统一样,能量利用率 η_{lighting} 需要考虑光源大小,以及光源与 DMD 芯片的光学扩展量之比,即

$$\eta_{\text{lighting}} = \frac{\pi S_{\text{DMD}} \text{NA}_{\text{DMD}}^2}{\pi S_{\text{source}} \text{NA}_{\text{source}}^2} \quad (4)$$

式中, S 和 NA 分别为面积和数值孔径.

以 OSRAM 公司的 WHITE_LCW CQ7P. PC. LED 为光源,分别设计功能参量相互匹配的准直透镜、透镜阵列和聚光镜,并建立图 3 所示的 Tracepro 模型进行 DMD 面上的照明结果模拟.

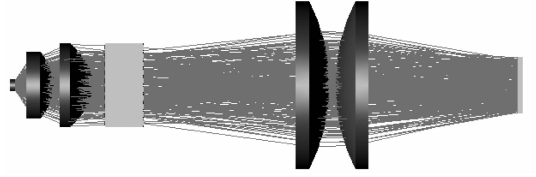


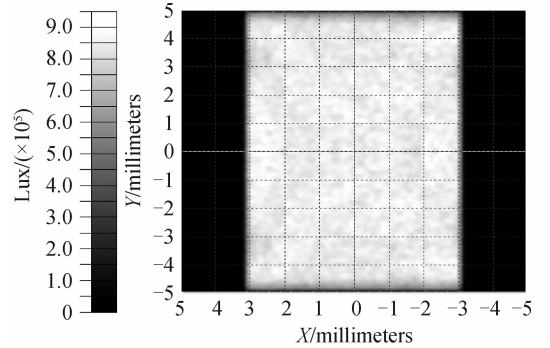
图 3 DMD 照明 Tracepro 模型

Fig. 3 Tracepro model of DMD chip illumination

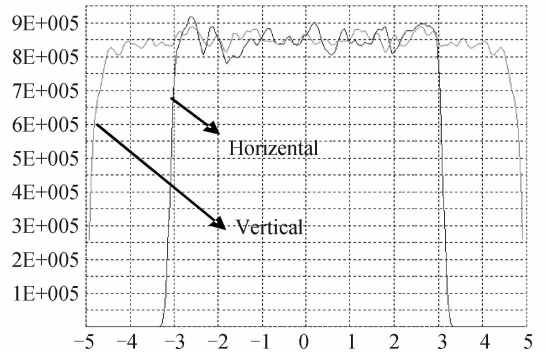
照明设计将发光直径为 2.1 mm 的 LED 均匀照明在约 9.85 mm×6.2 mm 的范围中.经模拟,该范围的照明均匀性为 91%,能量利用率约为 44%,如图 4.其中,照明的能量利用率与式(4)计算的理论值

$$\eta_{\text{lighting}} = \frac{\pi \cdot 9.85 \cdot 6.2 \cdot 0.155^2}{\pi \cdot (\pi \cdot 1.05^2) 1} \approx 0.43$$

相对应,即 DMD 芯片收集了光源约 43%的能量.



(a) Illumination intensity distribution on DMD chip



(b) Profile of illumination intensity

图 4 DMD 芯片照度

Fig. 4 Illumination intensity on DMD chip

另外,DMD 的工作特性决定了其照明光轴与投影光轴的夹角至少为微镜倾角的两倍,即 24° .为了在较小的空间里实现照明与投影光轴的衔接,采用了全反射(Total Internal Reflection, TIR)棱镜.当光束以平行于 DMD 表面的方向进入 TIR 棱镜后,经过一次全反射和两次折射,光束与 DMD 表面法线,即投影光轴,形成 24° 夹角.此时若微镜处于全“开”状态,则经微

镜反射的光将全部进入投影系统,如图 5(a);而微镜处于“平”和“关”状态的光则统统被挡在投影光阑外面,如图 5(b),(c).因此,照明和投影设计都需要考虑 TIR 棱镜,并为其预留足够空间.相应地,TIR 棱镜尺寸与角度参量的确定也要满足照明与投影系统的功能需求.

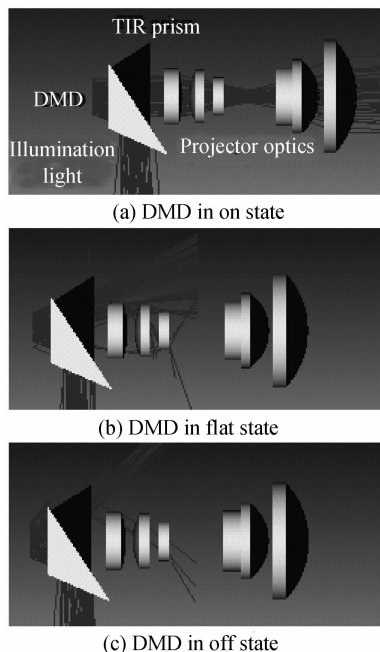


图 5 TIR 棱镜光路转换

Fig. 5 Ray switch of DMD with TIR prism

利用光路的折反射原理与几何关系,设计了图 6 所示的用于 DMD 投影的 TIR 棱镜.该 TIR 棱镜由两片 K9 的三角棱镜组成,棱镜 1 为等腰棱镜,棱镜 2 为直角棱镜.入射照明光束从棱镜 1 进入,经全反射和 DMD 反射,从棱镜 2 出射.当 DMD 处于“开”状态时,出射光与入射光方向相互垂直,直接进入投影系统.

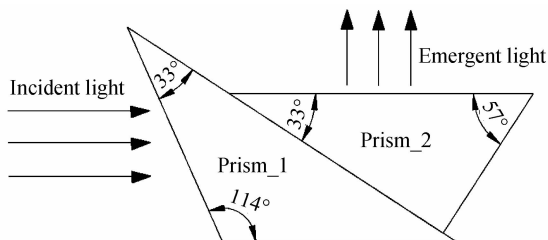


图 6 TIR 棱镜角度

Fig. 6 Angle of TIR prism

3 投影光学系统设计

投影系统是将 DMD 上的条纹图像按要求投射到待测物体的表面,通常采用单边远心设计,即在 DMD 方向满足远心.但是,由于待测表面一方存在较大的视角^[16],当投影光轴与 z 方向产生夹角 θ 时,如图 7 (a),即便输入 DMD 的是等间距条纹,投射到物体表面的条纹周期却存在极大差异,虽然该差异可以通过算

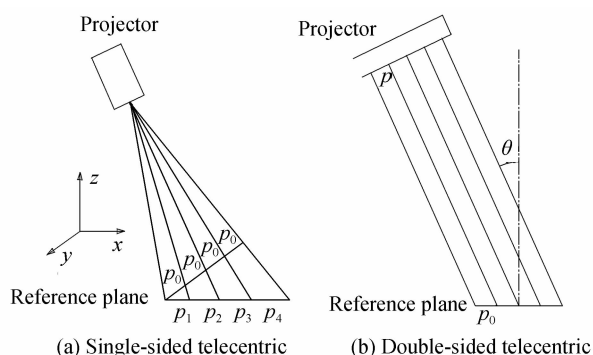


图 7 投影条纹周期变化

Fig. 7 The pitch variation of fringe

法消除,但会增加算法的复杂性,并且在一定程度上影响测试结果的准确度.因此,为了满足条纹周期均匀性的应用要求,采用双远心投影光学结构,结合 Scheimpflug 原理,直接利用光学方法使 DMD 生成周期 p 的条纹以周期 p_0 投射到物体表面,并且两者存在关系

$$p_0 = p / \cos \theta$$

投影系统的设计以 DMD 芯片作为输入方,待测表面作为输出方,DMD 前面的 TIR 棱镜等效平板厚度为 13 mm.根据表 1 要求,采用 ZEMAX 软件设计 $NA_{DMD} = 0.15$,放大倍率 $\beta = -4.92 \times$ 的双远心光学系统,其二维结构如图 8(a).投影系统采用 4 片单透镜和 1 片双胶合透镜,0.45 WXGA DMD 经该系统后,在物体表面的投影面积约为 $48 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$.由于应用要求在 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的投射区域内有 3 个完整的条纹周期,因此确定 MTF 曲线的分析空间频率为 3 lp/mm .从图 8(b)给出的 MTF 可以看出,当空间频率为 3 lp/mm 时,系统的 MTF 为 0.88.

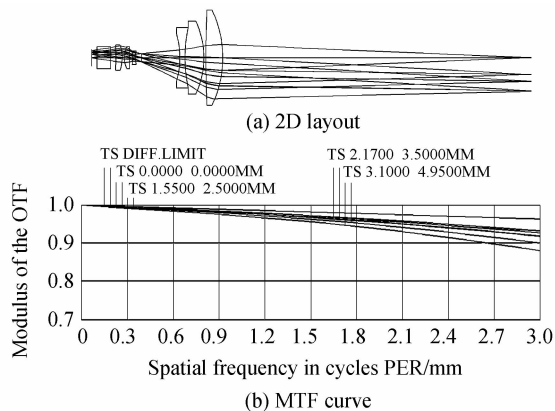


图 8 投影光轴垂直于参考物平面设计结果

Fig. 8 Optical design of perpendicular projector

图 8 仅给出了投影光轴垂直于参考物平面的分析结果,在实际应用中,投影光轴与参考物平面存在 25° 的夹角.基于图 8 的设计结果,利用 Scheimpflug 原理关系式

$$\tan \theta' = \beta \tan \theta \quad (5)$$

分析可知,当参考物面相对于投影光轴倾斜 25° 时,为保证成像质量,需调整 DMD 使其与垂直光轴方向成 5.4° 角. 式(5)中 β 是光学放大倍率, θ 和 θ' 分别为物面、像面相对于垂直光轴方向的夹角,如图 9.

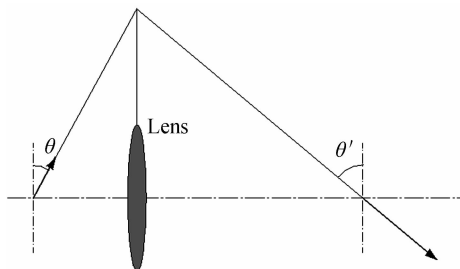


图 9 Scheimpflug 原理图

Fig. 9 Scheimpflug principle

经 Scheimpflug 原理调整后的投影系统二维结构及其 MTF 曲线如图 10. 由图 10(b)MTF 曲线可知,倾

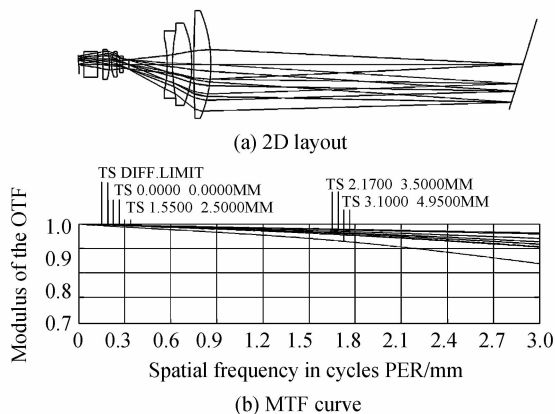


图 10 投影光轴与参考物平面成 25° 夹角设计结果

Fig. 10 Optical design of projector tilting 25°

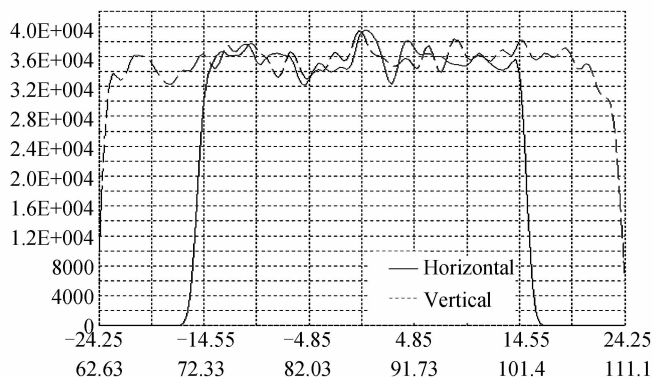
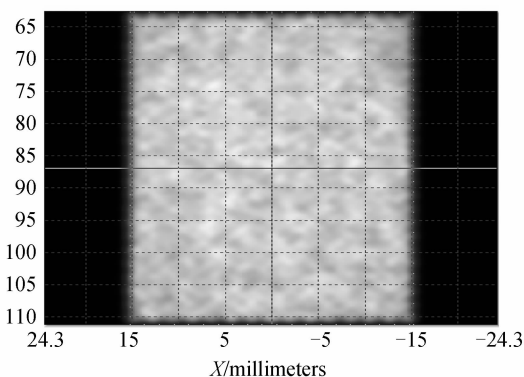


图 12 被投影区域照度图

Fig. 12 Illumination distribution on projected plane

范围的条纹模拟结果,如图 13(e),该图所示的条纹周期较输入条纹图 13(a)明显变大,放大倍数为投影系统的光学倍率. 条纹模拟分析结果表明,投影系统投射出的条纹对比度大于 0.8,且周期分布均匀;同时在 $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ 的检测范围内存在 3 个完整的周期条纹,设计满足应用要求.

斜 25° 后的投影系统在空间频率 3 lp/mm 时,MTF 值为 0.83,较倾斜前略有下降,但总体来说结果变化不大,理论上满足条纹对比度为 0.8 的要求.

4 DMD 条纹投影系统总体模拟

在分别完成了基于 DMD 芯片的照明、投影设计后,现将两部分合并建立总体模型,如图 11. 将 DMD 设置为全亮图像,经模拟,投射面上的强度分布如图 12. 整个被投影区域为 $48\text{ mm} \times 30\text{ mm}$,照明均匀性为 91%;若不考虑光学系统能量损失和 DMD 能量传输效率,该区域对光源的能量利用率为 43%,即系统充分利用了 DMD 芯片接收到的照明光能量.

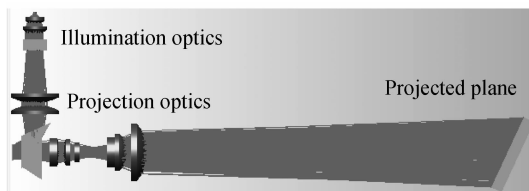


图 11 投影系统总体模型

Fig. 11 Simulation model of projector based on DMD

将一组正弦数字条纹输入 DMD 芯片. 由于应用要求一个条纹周期的采样点 $N=8$,则一个正弦周期由 8 个微反射镜表征,即周期为 0.0608 mm ,输入的条纹如图 13(a),对应的部分条纹曲线如图 13(b),从条纹曲线可以看出,输入 DMD 的条纹对比度为 1. 图 13(a)经图 10(a)的投影系统后,得到覆盖区域 $48\text{ mm} \times 30\text{ mm}$,周期为 0.33 mm 的条纹图像,如图 13(c),对应的部分条纹曲线如图 13(d). 为了对比投影前后的条纹周期变化,截取了与 DMD 芯片大小相同的投射

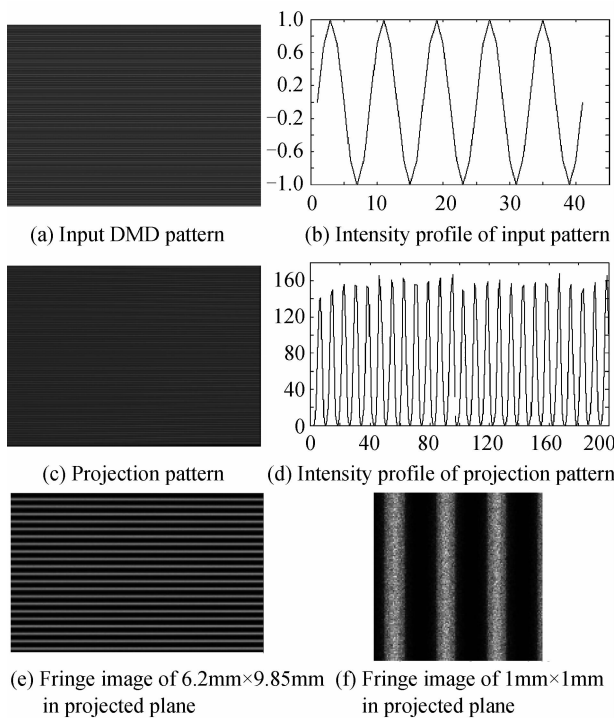


图 13 投影系统条纹模拟结果

Fig. 13 Fringe simulation of projector

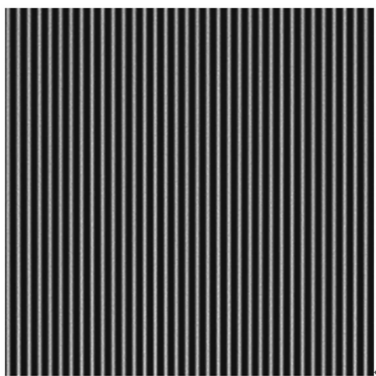


图 14 CCD 抓取条纹图像

Fig. 14 Fringe image captured by CCD

排除该传递函数对最终获取图像对比度的影响外,可知 DLP 投影到参考表面的条纹对比度约为 0.8,与设计结果相符。

5 结论

本文基于条纹四步相移法检测 PCB 焊膏印刷三维缺陷的实际应用,利用数字条纹投影技术快速、高精度、高对比度等优势,设计了基于 0.45 WXGA DMD 芯片的数字条纹投影系统.整个设计分为照明和投影两部分,其中照明采用 LED 作为光源,透镜阵列作为匀光器件;投影采用双远心光学结构,以保证倾斜投影时投射条纹周期的均匀性.模拟分析结果表明,该投影系统在被投射面上的照明充分利用了 DMD 芯片接收的照明光能量,均匀性大于 90%;DMD 生成的正弦条纹经投影系统投射的条纹对比度大于 80%,条纹周期

均匀,并且适用于面积为 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 区域的三维缺陷检测,符合设计要求,在工程应用中具有良好的可实现性。

参考文献

- [1] SU Xian-yu, ZHANG Qi-can. Dynamic 3-D shape measurement method: A review [J]. *Optical and Laser in Engineering*, 2010, **48**(2): 191-204.
- [2] CHEN Xiao-rong, CAI Ping, SHI Wen-kang. The latest development of optical non-contact 3D profile measurement [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, **39**(1): 143-149.
陈晓荣,蔡萍,施文康. 光学非接触式三维形貌测量技术新进展[J]. *光学精密工程*, 2000, **39**(1): 143-149.
- [3] YU Rui-zhi, CAO Yi-ping. A three dimensional on-line inspection method for workpiece by PMP [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(6): 1139-1143.
喻睿智,曹益平. 一种采用相位测量轮廓术的工件在线三维检测方法[J]. *光子学报*, 2008, **37**(6): 1139-1143.
- [4] YIN Gong-jie, ZHU Chuan-gui, LIU Bo. Extract 3-D shape measurement of small-sized objects [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1997, **26**(9): 841-845.
殷功杰,朱传贵,刘波,等. 小尺寸物体三维面型高精度测量[J]. *光子学报*, 1997, **26**(9): 841-845.
- [5] CHEN Tan, LAI Jian-jun, ZHAO Yue. Application of DMD in 3-D profilometry using grating projection [J]. *Infrared*, 2006, **27**(9): 24-28.
陈坦,赖建军,赵悦. DMD 芯片在光栅投影三维轮廓测量技术中的应用[J]. *红外*, 2006, **27**(9): 24-28.
- [6] NIU Xiao-bing, LIN Yu-chi, ZHAO Mei-rong, et al. 3-D profilometry measurement using grating projection and key techniques analysis [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2002, **13**(9): 983-986.
牛小兵,林玉池,赵美蓉,等. 光栅投影三维轮廓测量及关键技术分析[J]. *光电子·激光*, 2002, **13**(9): 983-986.
- [7] GONG Yuan-zheng, ZHANG Song. Ultrafast 3-D shape measurement with an off-the-shelf DLP projector [J]. *Optics Express*, 2010, **18**(19): 19743-19754.
- [8] LU Cun-wei, CHO Gen-ki. Projection pattern intensity control technique for 3-D optical measurement [J]. *Optics Express*, 2004, **13**(1): 106-114.
- [9] ZUO Chao, CHEN Qian, GU Guo-hua, et al. High-speed three-dimensional profilometry for multiple objects with complex shapes [J]. *Optics Express*, 2012, **20**(17): 19493-19510.
- [10] YANG Chu-ping, WENG Jia-wen, LI Hai, et al. Phase demodulation using a single deformed fringe pattern by wavelet analysis [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(10): 1211-1216.
杨初平,翁嘉文,李海,等. 单独条纹图相位解调的小波分析方法[J]. *光子学报*, 2012, **41**(10): 1211-1216.
- [11] LI Yong, SU Xian-yu, WU Qing-yang. Study of effect on the phase measuring profilometer to the spatiotemporal characteristic of DMD [J]. *Laser Journal*, 2004, **26**(3): 57-58.
李勇,苏显渝,吴庆阳. 数字未经器件的时空特性对象为测量轮廓术影响的实验研究[J]. *激光杂志*, 2004, **26**(3): 57-58.
- [12] YANG Fu-jun, HE Xiao-yuan, WANG Yun-shan, et al. A novel approach for phase demodulation from a single fringe pattern [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(8): 1257-1261.
杨福俊,何小元,刘波. 一种新的单幅条纹图的相位解调方法

- [J]. 光子学报, 2005, **34**(8):1257-1261.
- [13] LUO Xian-shan, LUO Bin. SMT solder paste deposition 3D inspection based on machine vision [J]. *Computer Engineering and Design*, 2010, **31**(24): 5363-5366.
周贤善, 罗兵. 基于机器视觉的 SMT 焊膏印刷缺陷自动三维检测[J]. 计算机工程与设计, 2010, **31**(24): 5363-5366.
- [14] PAN Jui-wen, WANG Chih-ming, LAN Hsiao-chin, *et al.* Homogenized LED-illumination using microlens array for a pocket-sized projector[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(17): 10483-10491.
- [15] CHANG Chong-min, SHIEH Han-Ping. Design of illumination and projection optics for projectors with single digital micromirror devices [J]. *Applied Optics*, 2000, **39**(19): 3202-3208.
- [16] CHEN Chen, LI Wei-shan, ZHANG Yu, *et al.* Optical design of short focal digital projection lens [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(12): 1855-1859.
陈琛, 李维善, 张禹, 等. 短焦数字投影镜头的光学设计[J]. 光子学报, 2011, **40**(12):1855-1859.