

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.02.013

超精密大行程 OLED 喷墨打印装备关键技术与研究进展

李奇,汪书辉,周志,黄子祥,刘成忠

(季华实验室,广东 佛山 528251)

摘要:高分辨率 OLED RGB 喷墨打印装备对精度有着极高的要求,为此研制一种新型超精密大行程喷墨打印装备。该装备包含多项关键技术,涉及精密机械、振动控制、精密测量、微环境控制等。实验数据表明:所研制的喷墨打印装备具有良好的速度稳定性和定位/重复精度。该精度为 OLED RGB 喷印工艺中的湿法成膜均匀性提供重要支撑。

关键词:OLED 喷墨打印机;压电-按需式喷墨打印;超精密定位平台;大行程运动平台;振动控制;精密测量;微环境控制

中图分类号:TH122 文献标志码:A 文章编号:1671-5276(2025)02-0068-06

Key Technology and Research Progress of Ultra-precision Large-stroke OLED Inkjet Printing Equipment

LI Qi, WANG Shuhui, ZHOU Zhi, HUANG Zixiang, LIU Chengzhong

(Jihua Laboratory, Foshan 528251, China)

Abstract:To meet the extremely high precision requirements by high-resolution OLED RGB inkjet printing equipment, a new type of ultra-precision large-stroke inkjet printing equipment is developed, which contains a number of key technologies involving precision machinery, vibration control, precision measurement, and micro-environment control etc. Its experimental data indicates that the inkjet printing equipment can achieve good speed stability and positioning/repetition accuracy, and provides important support for the uniformity of wet film formation in OLED RGB inkjet printing process.

Keywords:OLED inkjet printer; piezoelectric-on-demand inkjet printing; precision positioning stage; long-stroke motion stage; vibration control; precision measurement; micro-environment control

0 引言

在 OLED 喷墨打印、TFT 光刻、面板检测与修复等制造工艺中,基板由 G1 到 G8.5,甚至到 G10.5,尺寸变得越来越大,具体尺寸如图 1 所示。基板载台移动行程也同时增大。在精度方面,随着基板分辨率的提高,对墨滴落点精度和基板载台的定位精度等参数指标提出了更高的要求。众所周知,喷墨打印机的大行程和高精度是一对矛盾体。如何让喷墨打印机在具有大行程的基础上获得较高的定位精度,在设计上需要谨慎权衡。

工业级高精度喷墨打印一般采用压电按需式喷头。压电按需式喷墨打印是指利用电脉冲对喷头中的墨水施加压力,让墨水以液滴的形式喷射到基板的指定位置。压电按需式喷头搭配上合适的墨路系统与控制板块,墨滴能够得到良好的落点精度。

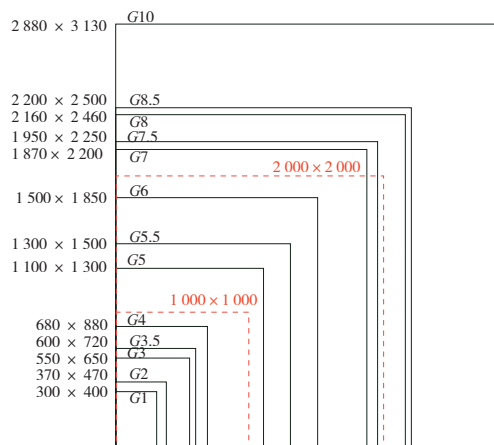


图 1 各代玻璃基板尺寸

喷墨打印机的综合精度为墨滴打印到基板上的最终落点精度。除了关注墨滴落点精度,还应提高喷墨打印机的定位精度。面对这一问题,采用双伺服控制的宏动-微动运动平台能有效解决

第一作者简介:李奇(1984—),男,江西宜春人,高级工程师,硕士,研究方向为印刷式 OLED 喷墨打印装备、大型精密加工装备、半导体设备微环境控制、高精密运动平台、宏动/微动运动平台和激光干涉仪实时反馈/测量系统,nwpulq@163.com。

上述问题。国内外学者对宏动-微动运动平台技术进行了大量的研究。国内,饶裕等^[1]介绍了一种光刻机掩模台的宏动-微动结构,从控制的角度比较了微动跟随宏动与宏动跟随微动两种控制策略的差异,通过实验对比证明宏动跟随微动的控制策略具有更好的性能。国外,TOMITA 等^[2]总结了面向晶圆和 FPD 面板行业的运动平台关键技术,重点介绍了晶圆光刻机中的 6 自由度微动台结构及运动过程外扰力抑制方法,同时比较了 FPD 面板运动平台中直线电机驱动与滚珠丝杠驱动在不同速度下的跟随误差,并通过实验数据发现,使用直线电机、气浮轴承及 PID 控制的运动平台有较低的跟随误差。LEE 等^[3]提出一种面向晶圆光刻的精密运动平台,运动平台步进轴为双直线电机驱动,步进/扫描轴测量方式为激光干涉位移测量,控制方法为传统的 PID。微动台由挠性轴承加压电作动器实现 6 自由度微小运动。试验数据表明运动平台具有纳米级定位精度。

本文介绍一种新型的超精密大行程 OLED 喷墨打印装备。喷墨打印机中的宏动台工作在低带宽模式,微米级定位精度;微动台工作在高带宽模式,亚微米级定位精度。喷墨打印机采用压电按需式喷印技术、主动减振控制、激光干涉仪实时位置反馈等技术,以此来实现高精度 OLED 喷墨打印工艺。另外,为了提高喷墨打印机的综合精度,同时兼顾 OLED 喷墨打印工艺的具体要求,还将引入微环境控制技术。

1 喷墨打印装备结构

设计一种涵盖喷头阵列滑台和玻璃基板载台的喷墨打印装备,基板尺寸 920 mm×730 mm (G4.5)。喷头阵列滑台沿 x 轴导轨做步进运动,行程为 1 500 mm;玻璃基板载台沿 y 轴导轨做扫描运动,行程为 2 200 mm。如图 2 所示,喷墨打印装备主要由大理石台、打印框架、推力框架、激光干涉仪、喷头阵列、玻璃基板载台、微环境系统等组成。玻璃基板载台包含双驱伺服控制的宏动台和多音圈电机伺服控制的微动台,基板载台总体质量 1.2 t,最高运动速度 500 mm/s,定位精度 $\pm 3 \mu\text{m}$ 。

喷墨打印装备的超高精度主要以精密机械、运动控制、振动控制、高精度测量和微环境控制 5 个要素为支撑。具体形式为以下几个方面。1) 压电-按需式喷墨打印。压电式喷头在合适的墨路系统和波形控制下,可以获得良好的落点精度和体积稳定性。2) 直线电机驱动。运动平台的 x 轴

和 y 轴均采用直线电机直接驱动,与传统的滚珠丝杠、齿轮-齿条、同步带传动方式相比,直线电机驱动具有较高的定位精度、重复定位精度和动态响应速度,且行程上不受限制。同时,直线电机直驱克服了一般机械传动装置的齿隙、摩擦力和磨损等缺点^[4-5]。3) 气浮轴承。运动平台的喷头阵列滑台和玻璃基板载台与相应导轨的运动副为气浮轴承。较之传统的机械轴承如滚珠轴承,气浮轴承近似于零摩擦和零磨损,具备高速、高精度特性,并且不需要润滑^[6-7]。4) 振动控制。运动平台的振动主要有地面传导过来的环境微振动和各轴运动过程中产生的反作用力^[8-9]。各轴产生的反力作用到运动平台上,带来的自激励效应会影响喷头阵列喷出墨滴的落点精度。解决的办法从两方面入手,首先从结构上将各轴进行分离, x 轴和 y 轴框架独立安装,确保 x 轴、 y 轴的反作用力不会相互串扰。其次就是在基台底部设置主动减振系统^[10-11],抑制地面环境微振和运动平台水平方向的振动。5) 精密测量,运动平台使用激光干涉仪位置反馈。在精密机床、显示面板加工设备、光刻机^[12-14]等高端装备中,工件运动台一般采用直线光栅和激光干涉仪做位移测量与反馈。6) 微环境控制。喷墨打印微环境控制的核心思路是为喷墨打印机创造一个温度、气压、洁净度、气流场环境指标受控的局部区域,在该区域内,环境参数必须控制在要求范围内。稳定的微环境可以保证喷墨打印机中关键部件的机械精度。

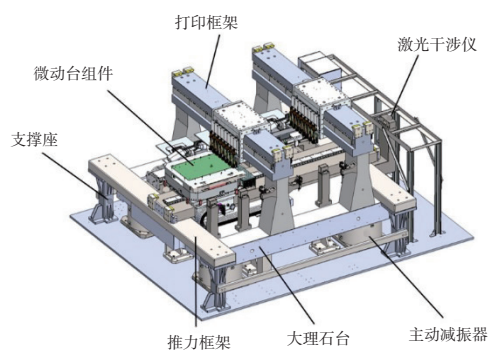


图 2 喷墨打印装备结构图

1.1 喷头与喷印精度

喷墨打印 (inkjet printing, IJP) 技术是一种数据驱动喷头直接图案化的制造工艺,所谓直接图案化就是指在计算机控制下,皮升量级的连续“墨滴”(溶液或者分散液)按照设定的程序高速精确地打印在基材的特定位置,形成完美的图形^[15]。

喷墨打印主要有两种技术:连续式喷墨打印(continuous inkjet printing, CIJ)和按需式喷墨打印(drop on demand inkjet printing)。加热-按需式喷墨打印技术广泛应用在桌面级打印机,工业打印机使用压电-按需式喷墨打印技术^[16](piezoelectric technology DOD)。几种主流工业打印喷头如图 3 所示。

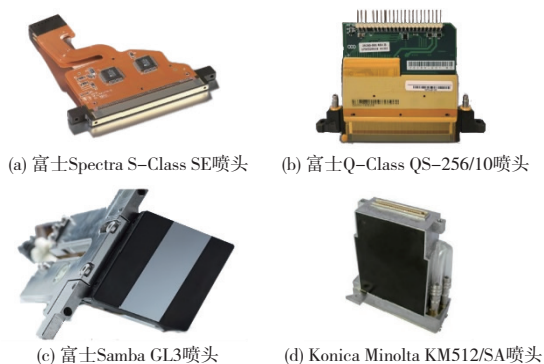


图 3 几种主流工业打印喷头

压电-按需式喷墨打印利用压电元件与墨水腔体之间的接触,电压施于压电元件使墨水腔体产生变形,由此感应脉冲压力喷射出墨滴。墨滴大小与喷嘴直径有关,一般为数十微米,喷射速度几米每秒,喷射频率 1~100 kHz。在喷墨打印技术中,喷印精度至关重要。衡量喷印精度有 3 个重要的物理参数:喷射直线度(或喷射角度)、喷射速度和墨滴体积,其中喷射直线度直接影响墨滴的落点精度。墨滴在飞行过程中可看作理想的球体,因此墨滴体积决定墨滴直径。基板像素密度 ppi (pixels per inch) 决定像素大小,ppi 值越高,像素尺寸越小,比如 202 ppi 基板子像素宽度为 $34.5\ \mu\text{m}$,而 300 ppi 基板子像素宽度为 $20.8\ \mu\text{m}$ 。在喷头与基板高度、墨滴体积确定的情况下,子像素槽宽越小,墨滴准确落到像素槽内的难度就越大。

如图 4 所示,202 ppi 对应的子像素间距是 $42\ \mu\text{m}$,喷嘴喷出的 7 pL 墨滴直径为 $23.7\ \mu\text{m}$,子像素槽宽度是 $34.5\ \mu\text{m}$,要求墨滴的落点精度为 $\pm 5.4\ \mu\text{m}$ 。

1.2 直线电机与气浮轴承

半导体光刻、精密测量等领域需要精密的定位技术,具有“零传动”特性的直接驱动系统随之应运而生。直接驱动系统一般采用直线电机加气浮轴承组合方式。直线电机响应速度快、传动刚度高、推力平稳。气浮轴承优点在于高精度、无摩擦、不产生等。

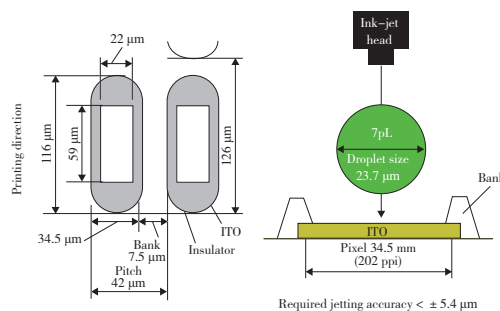


图 4 喷头、墨滴与子像素槽^[17-18]

高精度运动平台采用直线电机直驱技术,避免了传统传动方式比如滚珠丝杠传动存在的反向间隙、惯性、刚度不足等局限性。气浮轴承与导轨为非接触,有效克服了摩擦带来的随机影响,运动平台能获得较高的重复定位精度。图 5 中所示为晶圆光刻机运动平台,宏动台 x 、 y 方向的运动由直线电机(73,74,75)提供推力,对应的气浮轴承-导轨实现精密非接触导向。气浮轴承 66-1、66-2、66-3 和 70-1、70-2 在底座 60 上滑动,提供精密的 z 向定位。

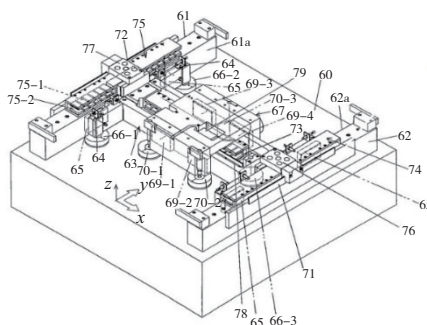


图 5 一种典型的晶圆光刻机运动平台^[19]

1.3 运动平台

运动平台是喷墨打印装备的核心系统,主要包括喷头模组、基板载台、喷头维护装置等重要部件。这里重点阐述基板载台的精密机械结构。

玻璃基板载台有宏动台和微动台组成。基板载台宏动台沿 y 轴导轨运动时,存在定位误差、角度误差和直线度误差。宏动台定位精度依靠光栅尺加激光干涉仪测量数据补偿可达到 $1\ \mu\text{m}$ 。角度误差(特别是偏摆角 Yaw 误差)和水平直线度误差可以用激光干涉仪测量得到。对于长度约为 3 m 的导轨,水平直线度误差达到数十微米。要实现高质量打印,提高墨滴的落点精度,让宏量的墨滴准确、稳定地喷射到指定的子像素槽内,需要微动台机构对误差进行实时补偿。微

动台能够完成 6 自由度微小运动。结构上如图 6 所示。

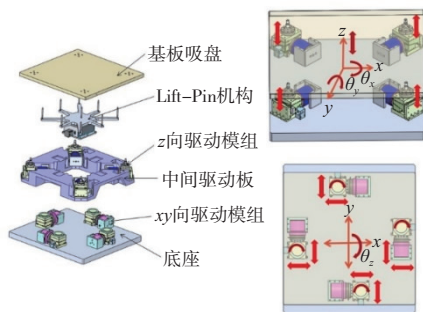


图 6 微动台机构示意图^[20]

6 自由度微动台由上、下层微动机构串联而成。上层微动机构分为基板吸盘、中间驱动板和 z 向驱动模组。4 个独立控制的 z 向驱动模组支撑基板吸盘,以中间驱动板为参考对象做相对运动,实现基板吸盘沿 z 轴、绕 x/y 轴的 z 、 θ_x 、 θ_y 微小运动。底座上安装 4 个 xy 向驱动模组,中间驱动板以底座为参考对象做相对运动,实现沿 x/y 轴、绕 z 轴的 x 、 y 、 θ_z 微小运动。微动台内部还有一个 Lift-Pin 机构,玻璃基板装卸时, Lift-Pin 机构升起,打印时, Lift-Pin 机构处于收缩状态。

1.4 振动控制

从严格意义上讲,本文提出的运动平台振动控制分为两部分,一是振动隔离,二是主动减振。振动隔离的原理是将 x 轴、 y 轴的运动分离。从图 7 可以看到, x 轴喷头阵列滑台-导轨安装在打印框架上, y 轴玻璃基板载台-导轨安装在推力框架上。打印框架和推力框架准确地固定在地面上,推力框架受到的双驱直线电机较大的反作用力,依靠反力抵消装置来吸收。

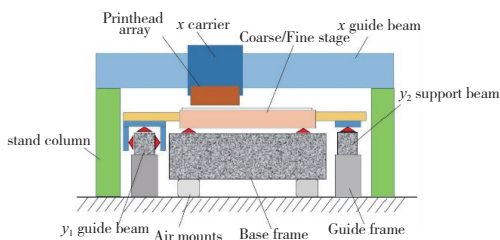


图 7 喷墨打印机主视图

分离式设计大幅度削弱运动平台自身运动带来的振动,避免因自激励效应降低喷头阵列喷出墨滴的落点精度。

主动减振既要隔离来自地面的激励,又要抑制运动平台自身运动的直接扰动。通过应用自动

控制技术实现对被动隔振器的伺服控制,使得负载平台上的微振满足喷墨打印的落点精度。主动减振器结构原理如图 8 所示。

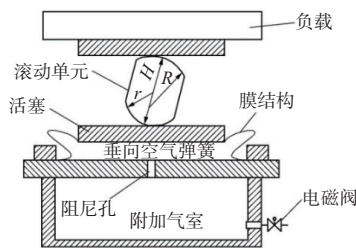


图 8 主动减振器结构

按照 OLED 喷墨打印工艺要求,在垂直方向上频率 $f_n = 2 \text{ Hz}$ 。开启主动减振控制,振动传递率约为 -20 dB ;关闭主动减振,减振传递率大于 0,地面激励振动被放大。在水平方向上频率 $f_n = 2 \text{ Hz}$,开启主动减振控制,振动传递率约为 -15 dB ,关闭主动减振,台面振动也被放大。

1.5 测量系统

在精密工程与制造领域中,位移激光干涉仪和光栅编码器常作为反馈传感器用于数字式控制系统中。二者均为非接触测量,具有较高的可靠性和精度。

激光波长取决于空气的折射率,激光干涉仪通常需要一个良好的工作环境。在高端装备中,像半导体行业中的光刻机、掩模板测量机,激光干涉仪测量位移可达到亚纳米精度。图 9 中给出了一种典型的双频激光干涉系统。

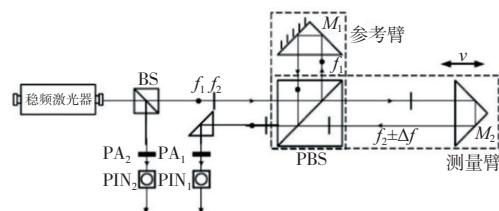


图 9 双频激光干涉仪系统^[21]

在光栅编码器(尺)位移测量系统中,光栅尺是系统的核心部分,主要由刻有周期栅线的衍射光栅和输出干涉信号的光栅尺读数头组成^[22]。具体结构如图 10 所示。

精密测量以实现喷印打印装备中的宏动-微动台精确定位。宏动台沿导轨 y_1 运动,激光干涉仪 IFM1 实时测量宏动台的位置并将位置信号反馈给运动控制器,从而实现宏动台的匀速控制。

基板微动台安装在宏动台上,微动台由音圈

电机驱动,可沿 x 轴、 y 轴、 z 轴做微小移动,也可绕 x 轴、 y 轴、 z 轴做微小角度转动。如图 11 所示,微动台在喷墨打印机空间坐标系中的姿态通过激光干涉仪 IFM1、IFM2、IFM3 测量获得。3 个角锥棱镜呈“品”字型固定在微动台上层板(基板吸盘)一端,三路激光干涉仪 IFM1、IFM2、IFM3 配合角锥棱镜对微动台 y 向定位、绕 z 轴角摆误差、绕 x 轴俯仰角误差进行实时测量。

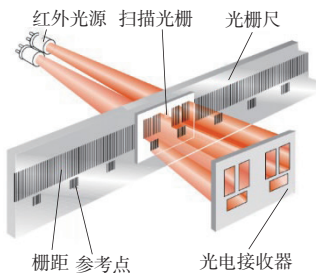


图 10 光栅编码器结构图

结合正、逆向运动学可求得微动台的调整参数。具体计算公式如下:

$$y = (Y_1 + Y_2) / 2 \quad (1)$$

$$\Theta_z = \arctan[(Y_1 - Y_2) / L_1] \quad (2)$$

$$\Theta_x = \arctan\left[\left(\frac{Y_1 + Y_2}{2} - Y_3\right) / L_2\right] \quad (3)$$

式中: y 表示微动台沿 y 轴定位; Y_1 和 Y_2 分别表示激光干涉仪 IFM1 和 IFM2 与对应角锥棱镜的测长值; L_1 表示角锥棱镜 C_1 和 C_2 的水平距离; Y_3 表示激光干涉仪 IFM3 与对应角锥棱镜的测长值; L_2 表示角锥棱镜 C_1 和 C_3 的垂直距离。

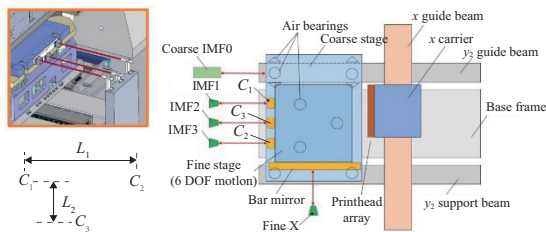


图 11 宏动台-微动台测量系统

1.6 微环境控制

在 OLED 喷墨打印工艺中,显示器件分辨率和均匀度是最为重要的指标,这对喷墨打印机所处环境的温度、气压、气流状态、气体洁净度、水氧含量等参数均提出了更高的要求。喷头是喷墨打印机实现高精度打印的核心部件,喷头的性能受到温度、内部气压影响。其次,喷墨打印机中的关键运动主轴、基板载台在较大温度波动环境下很

难保证微米/亚微米级精度,其中基板载台的运动性能会受到气体中污染颗粒和化学腐蚀物的影响。最后,在稳定的微环境内,激光干涉仪能够得到相对精确的测量数据。基于上述多重考虑,对 OLED 喷墨打印运动平台开展微环境控制技术^[23-25]的研究很有必要。

喷墨打印微环境控制的核心思路是为喷墨打印运动平台创造一个温度、气压、洁净度、气流场环境指标受控的区域。具体指标数值如表 1 所示。

表 1 喷墨打印微环境系统主要指标

名称	数值或描述
洁净度	ISO2
氧含量	$<1 \times 10^{-6}$
水含量	$<1 \times 10^{-6}$
温度/℃	喷头模组: 22 ± 0.5 基板载台: 22 ± 0.2
流量范围/(L/min)	30~80
流量波动/(L/min)	<2
压力范围/Pa	200~1 000
压力波动/Pa	<150
气流场	单向流(层流)

喷墨打印微环境系统中的气流组织一般分为单向流(层流)和非单向流(乱流)两种^[26],其对应的洁净室分别称为单向流(层流)洁净室和非单向流(乱流)洁净室,如图 12 所示。

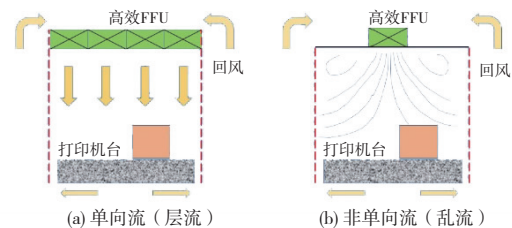


图 12 洁净室层流示意图

2 测量数据与打印测试

在 G.45 OLED RGB 喷墨打印成套装备中,喷墨打印机是核心设备。喷墨打印机的运动控制,底层的控制硬件采用高性能运动控制器,基于 Qt 语言设计的上层软件系统,可在应用层对运动平台进行操控与监测。同样,减振系统的控制由特定的控制器完成,前馈加反馈控制抑制外部振动等干扰,减振系统各项参数均可在上层软件系统中设定。

通过精密控制和激光干涉仪实时反馈,运动平

台精度能做到亚微米,参数如图 13 与图 14 所示。

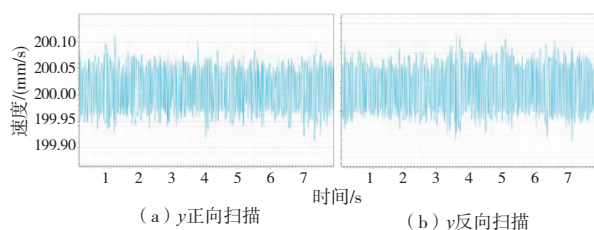


图 13 y 轴往返扫描运动速度波动测试结果

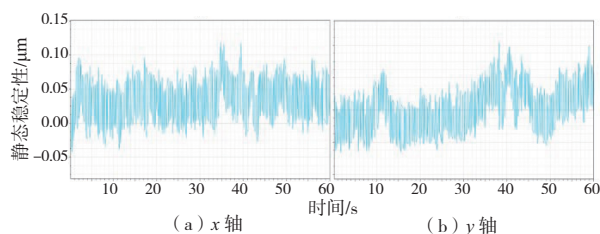


图 14 x、y 轴静态稳定性测试

在使用激光干涉仪对 y 轴扫描运动时进行动态测量,设定速度 200 mm/s 时,速度波动不超过 0.2 mm/s。

喷墨打印装备在实验室千级洁净间分别进行了 80 ppi、137 ppi、220 ppi 的基板打印。图 15(a) 为 31″(787.4 mm) 137 ppi 基板分区打印结果。通过高倍 CCD 观测发现,指定的墨滴均已整齐的落入最下方的子像素槽中。137 ppi 基板还进行了 31″(787.4 mm) 的整板打印、挖孔打印、分区打印等,目前已可以做到从湿膜观测上无缺陷。整板打印速度 200 mm/s,单色打印时间小于 15 min。另外,喷墨打印装备中的真空烘烤与热板成膜设备运行稳定。图 15(b) 为 31″(787.4 mm) 基板用绿色墨水打印,点亮后的局部效果图。

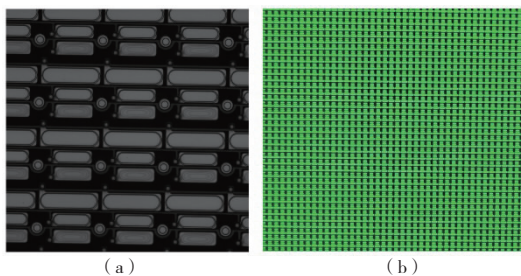


图 15 湿膜打印效果与屏幕点亮图

3 结语

本文研制了一种新型超精密大行程 OLED 喷墨打印装备,与现有的制造装备相比,具有如下优点:1)精密定位运动平台技术与压电-按需式喷

墨打印技术结合,墨滴在基板上有良好的落点精度;2)振动控制技术使得打印机既能抑制运动平台自身运动带来的内部振荡,又能主动减弱地面振动,将外部振动对墨滴落点精度的影响降至最低;3)测量技术,在光栅反馈的基础上增加激光干涉仪实时反馈,激光干涉仪可以更快速准确地将基板载台/喷头的位置反馈给打印机,显著提升喷印墨滴的综合落点精度;4)微环境控制技术,整个打印机安装在温度场、气流场等相对稳定的微环境中,在这种环境下,精密机械保持极低的热膨胀,有利于打印机精度的长期保持稳定。

参考文献:

- [1] 饶裕,刘杨,齐彪,等. 基于宏微驱动的光刻机掩模台控制系统设计[J]. 自动化技术与应用, 2017, 36(10): 61-64.
- [2] TOMITA Y, KOJIMA E, KAWACHI S, et al. Development and applications of sumitomo precision stage technologies for FPD Process[J]. Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 2012, 78(2): 117-121.
- [3] LEE C W, KIM S W. An ultraprecision stage for alignment of wafers in advanced microlithography[J]. Precision Engineering, 1997, 21(2/3): 113-122.
- [4] PRITSCHOW G. A comparison of linear and conventional electromechanical drives[J]. CIRP Annals, 1998, 47(2): 541-548.
- [5] ALTER D M, TSAO T C. Control of linear motors for machine tool feed drives: design and implementation of H_{∞} optimal feedback control[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1996, 118(4): 649-656.
- [6] 王贵林,李圣怡,栗时平. 基于超精密应用的高刚度高阻尼空气静压导轨研究[J]. 航空精密制造技术, 2001, 37(6): 1-5.
- [7] New Way Air Bearing Corporation. Air bearing application and design guide[Z]. Aston, PA, USA: New Way Air Bearing Corporation, 2006.
- [8] 原田 真. ステージ用反力処理装置 特開: 日本, 2007331079A[P]. 2007-12-27.
- [9] BUTLER H. Position control in lithographic equipment: an enabler for current-day chip manufacturing [J]. IEEE Control Systems, 2011, 31(5): 28-47.
- [10] 廖飞红,李小平,陈学东,等. 精密主动减振器技术研究现状与进展[J]. 机械科学与技术, 2012, 31(9): 1411-1419.
- [11] HAN C, CHOI S B, LEE Y S, et al. A new hybrid mount actuator consisting of air spring and magneto-rheological damper for vibration control of a heavy precision stage[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 284: 42-51.

(下转第 93 页)

- Sciences, 2010, 52(9): 1193-1201.
- [2] CHOUDHURY A, TANDON N. Vibration response of rolling element bearings in a rotor bearing system to a local defect under radial load[J]. Journal of Tribology, 2006, 128(2): 252-261.
- [3] ZHANG X, YAN C F, LIU Y F, et al. Dynamic modeling and analysis of rolling bearing with compound fault on raceway and rolling element[J]. Shock and Vibration, 2020, 2020: 1-16.
- [4] SAWALHI N, RANDALL R B. Simulating gear and bearing interactions in the presence of faults[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2008, 22(8): 1924-1951.
- [5] DESHPANDE L G. Simulation of vibrations caused by faults in bearings and gears[D]. UNSW Sydney: [s.n.], 2014.
- [6] GU R K A N E, O Z G U V E N H N. Interactions between backlash and bearing clearance nonlinearity in geared flexible rotors[C]//Volume 7: 10th International Power Transmission and Gearing Conference. Las Vegas, Nevada, USA: ASME, 2007: 459-468.
- [7] 许礼进, 陈青, 代鹏, 等. 外圈与轴承座配合间隙对齿轮-轴-轴承系统振动性能的影响[J]. 机械传动, 2023, 47(4): 30-37, 73.
- [8] LIU Y F, YAN C F, WANG K, et al. Dynamic modeling of rotor-bearing-housing system with local defect on ball bearing using mass distribution and energy methods[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-Body Dynamics, 2021, 235(3): 412-426.
- [9] SHAH D S, PATEL V N. A dynamic model for vibration studies of dry and lubricated deep groove ball bearings considering local defects on races[J]. Measurement, 2019, 137: 535-555.
- [10] LIOLIOS A N, ANTONIADIS I A. Effect of rotational speed fluctuations on the dynamic behaviour of rolling element bearings with radial clearances[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2006, 48(8): 809-829.
- [11] AMBROZKIEWICZ B, LITAK G, GEORGIADIS A, et al. Effect of radial clearance on ball bearing's dynamics using a 2-DOF model[J]. International Journal of Simulation Modelling, 2021, 20(3): 513-524.
- [12] YAKOUT M, NASSEF M G A, BACKAR S. Effect of clearances in rolling element bearings on their dynamic performance, quality and operating life[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2019, 33(5): 2037-2042.
- [13] 刘永强, 王宝森, 杨绍普. 含外圈故障的高速列车轴承转子系统非线性动力学行为分析[J]. 机械工程学报, 2018, 54(8): 17-25.
- [14] 张阿中, 刘建新, 蔡久凤. 考虑轴承故障高速列车齿轮传动系统振动响应分析[J]. 噪声与振动控制, 2022, 42(5): 165-170.
- [15] 陈果, 贺志远, 尉询楷, 等. 基于整机的中介轴承外圈剥落故障振动分析[J]. 航空动力学报, 2020, 35(3): 658-672.
- [16] CUI L L, ZHANG Y, ZHANG F B, et al. Vibration response mechanism of faulty outer race rolling element bearings for quantitative analysis[J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 364: 67-76.

收稿日期: 2023-07-13

(上接第 73 页)

- [12] 徐全坤, 阚侃, 黄振宇, 等. 基于气浮导轨的光栅尺动态检测系统设计与误差分析[J]. 机电工程技术, 2021, 50(8): 138-141.
- [13] 张志平, 杨晓峰. 激光外差干涉技术在光刻机中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(9): 297-304.
- [14] 党宝生, 熊显名, 王献英, 等. 超精密光栅尺位移测量系统[J]. 激光杂志, 2018, 39(9): 42-46.
- [15] KWON K S, RAHMAN M K, PHUNG T H, et al. Review of digital printing technologies for electronic materials[J]. Flexible and Printed Electronics, 2020, 5(4): 043003.
- [16] 豆姣. 压电式喷墨打印头的动态特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [17] TADASHI G, YUHKI K, KIYOSHI O, et al. 202 - ppi Full - color AMPLD display fabricated by ink - jet method[J]. Sid Symposium Digest of Technical Papers, 2012, 37(1): 1767-1770.
- [18] KODEN M. OLED displays and lighting[M]. [S.I.]: John Wiley & Sons, 2016.
- [19] 金子诚, 富田良幸, 堀内雅彦. Stage Equipment 特刊: 日本, 200328973[P]. 2005-10-21.
- [20] 姬琪, 王红园. 基于直线电机驱动气浮导轨的高精度定位平台实现[J]. 电子测量技术, 2015, 38(12): 89-91, 95.
- [21] 杨宏兴, 付海金, 胡鹏程, 等. 超精密高速激光干涉位移测量技术与仪器[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(9): 305-319.
- [22] 汪书辉. 基于激光干涉仪的大范围二维坐标计量关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2021.
- [23] 陆叶盛. 超精密装备恒温气浴关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [24] 曾强辉. 浸没式光刻机浸没单元微环境恒温气浴技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [25] 钟凌. 投影光刻机内部气体温度控制系统设计[D]. 上海: 华东理工大学, 2014.
- [26] 黄宁. 超稳定微环境恒温气浴温度场协同仿真研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.

收稿日期: 2023-07-25