

## 论证与研究

## 关于玻璃滤光片双面印刷装置分析

张顺华

杭州华境光电有限公司 311300

**【摘要】**针对现有印刷装置存在的定位偏差、油墨附着不均、双面套准误差等问题，从装置机械结构、传动系统、印刷工艺参数三方面展开系统性分析。通过设计双工位同步印刷试验与不同张力控制试验，结合高精度视觉检测数据，验证了优化后装置的性能提升效果。试验结果表明，采用伺服电机驱动+真空吸附定位的复合结构，可将双面套准误差控制在 $\pm 3\mu\text{m}$ 内，油墨附着强度较传统装置提升27%，满足高精度光学元件的生产需求。该研究为玻璃滤光片双面印刷装置的技术升级提供了理论支撑与实践参考。

**【关键词】**玻璃滤光片；双面印刷装置；定位精度；套准误差；油墨附着性

Analysis of Double-Side Printing Device for Glass Filters by

Zhang Shunhua

Hangzhou Huajing Optoelectronics Co., Ltd. 311300

**【Abstract】**To address existing issues in printing equipment such as positioning deviations, uneven ink adhesion, and double-sided alignment errors, this study conducts systematic analysis from three perspectives: mechanical structure, transmission system, and printing process parameters. Through designing dual-station synchronous printing tests and varying tension control experiments, combined with high-precision visual inspection data, the performance enhancement of the optimized device was validated. Experimental results demonstrate that the composite structure combining servo motor drive and vacuum adsorption positioning can control double-sided alignment errors within  $\pm 3\mu\text{m}$ , while achieving 27% higher ink adhesion strength compared to conventional devices, meeting production requirements for high-precision optical components. This research provides theoretical support and practical references for technological upgrades in double-sided printing systems for glass filters.

**【Key words】** glass filter; double-sided printing device; positioning accuracy; alignment error; ink adhesion

## 引言

在光电信息技术快速迭代的背景下，玻璃滤光片在图像传感、激光通信、光学检测等领域的应用愈发广泛，其表面印刷层不仅需实现特定光谱过滤功能，还需满足双面图案的高精度匹配要求<sup>[1]</sup>。传统单面印刷后翻面二次印刷的工艺模式，易因滤光片形变、定位基准偏移导致双面套准误差超过 $10\mu\text{m}$ ，无法适配微型光学系统的装配需求<sup>[2]</sup>。基于此，本文通过剖析双面印刷装置的核心技术要素，设计针对性试验方案，探究结构参数与工艺参数对印刷质量的影响机制，为高性能印刷装置的研发与应用提供技术依据，对推动光学元件制造行业的提质增效具有重要现实意义。

## 1 玻璃滤光片双面印刷装置的结构组成与工作原理

## 1.1 装置整体结构设计

装置采用模块化集成架构，核心由双工位同步印刷单

元、真空吸附定位系统、高精度传动模组及视觉校准模块构成，整体尺寸为 $1200\text{mm} \times 850\text{mm} \times 1500\text{mm}$ ，重量控制在 $380\text{kg}$ 以适配车间布局需求。双工位印刷单元对称布置于中央机架，间距设定为 $420\text{mm}$ ，各工位配备独立的网版固定机构，网版框架尺寸为 $500\text{mm} \times 600\text{mm}$ ，网目数选用 $360$ 目/英寸，张力调节范围为 $15\text{--}35\text{N}$ ，确保印刷图案的一致性传递。真空吸附定位平台采用蜂窝状吸附结构，有效吸附面积为 $300\text{mm} \times 300\text{mm}$ ，吸附孔径为 $0.8\text{mm}$ ，分布密度为 $12$ 个/ $\text{cm}^2$ ，工作真空度可在 $-0.06\text{MPa}$ 至 $-0.09\text{MPa}$ 间无级调节，能快速固定不同尺寸的玻璃滤光片（兼容 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ 至 $200\text{mm} \times 200\text{mm}$ 规格），抑制印刷过程中的形变位移。

传动模组以伺服电机为动力核心，选用额定功率 $1.5\text{kW}$ 的交流伺服电机，配备精度等级为C10的滚珠丝杠，导程设定为 $10\text{mm}$ ，传动误差控制在 $\pm 0.01\text{mm/m}$ 以内。电机与丝杠通过弹性联轴器连接，传动效率达 $98\%$ ，可实现 $0.1\text{--}5\text{mm/s}$ 的无级调速，满足不同印刷速度需求。视觉校准模块集成 $2$ 台分辨率为 $2048 \times 1536$ 像素的工业相机，安装高度距吸附

平台 180mm, 配备 8mm 焦距的工业镜头, 结合精度为 0.001mm 的激光位移传感器, 实时采集滤光片边缘特征点, 通过图像处理算法实现定位偏差的动态补偿, 补偿响应时间  $\leq 20\text{ms}$ 。

机架采用 Q235 钢板焊接而成, 经时效处理消除内应力, 底座配备 4 组可调节地脚螺栓, 调节行程为 50mm, 确保装置水平度误差  $\leq 0.02\text{mm/m}$ 。各功能单元通过标准化接口连接, 模块化设计便于维护与升级, 同时在关键传动部位加装防尘罩与减震垫, 防尘等级达 IP54, 振动加速度控制在 0.05g 以下, 为高精度印刷提供稳定的运行环境。

### 1.2 传动系统工作机制

传动系统以伺服电机为动力核心, 通过精密齿轮啮合与滚珠丝杠传动形成闭环驱动链路, 实现印刷工位与版辊的同步运动调控。伺服电机的脉冲信号响应精度达微秒级, 可实时追踪视觉检测系统反馈的定位偏差数据, 通过 PID 算法动态修正传动参数, 确保双工位印刷动作的时序一致性。同步带轮采用高刚性铝合金材质, 经齿面淬火处理后啮合间隙控制在 0.01mm 以内, 配合预紧力自动调节机构, 有效抑制高速运行时的弹性滑移与振动干扰。真空吸附平台与传动机构的机械耦合设计, 通过柔性连接部件吸收传动冲击, 避免滤光片在定位与印刷切换过程中产生微位移, 而伺服电机与真空吸附系统的协同控制逻辑, 使定位误差补偿速度与印刷节奏形成动态匹配, 为双面套准精度的提升奠定了传动基础。

## 2 试验设计与数据采集

### 2.1 试验样本与设备参数

试验选用硼硅玻璃滤光片作为样本, 尺寸覆盖 10mm × 10mm、50mm × 50mm、100mm × 100mm、200mm × 200mm 四种规格, 厚度均为 1.1mm, 表面粗糙度控制在  $Ra \leq 0.02 \mu\text{m}$ , 无划痕、气泡等缺陷, 单次试验样本总量为 1350 片, 确保数据统计的有效性。

试验设备以优化后的双工位同步印刷装置为核心, 配套设备包括激光干涉仪 (测量精度  $\pm 0.1 \mu\text{m}$ )、拉力测试仪 (量程 0–50N, 精度 0.01N)、环境试验箱 (温度范围  $-40^\circ\text{C}$ – $85^\circ\text{C}$ , 控温精度  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ )。印刷装置关键参数如下: 网版框架尺寸 500mm × 600mm, 网目数 360 目/英寸, 张力调节范围 15–35N; 真空吸附平台有效吸附面积 300mm × 300mm, 吸附孔径 0.8mm, 分布密度 12 个/ $\text{cm}^2$ , 工作真空度可调范围  $-0.06\text{MPa}$  至  $-0.09\text{MPa}$ ; 传动系统采用 1.5kW 交流伺服电机, 搭配 C10 级滚珠丝杠, 导程 10mm, 传动误差  $\leq \pm 0.01\text{mm/m}$ , 调速范围 0.1–5mm/s; 视觉校准模块含 2 台 2048 × 1536 像素工业相机, 配备 8mm 焦距镜头, 激光位移传感器精度 0.001mm, 补偿响应时间  $\leq 20\text{ms}$ 。

### 2.2 试验方案设计

#### 2.2.1 套准误差设计

双工位同步印刷与传统翻面印刷套准误差对比试验。试验旨在验证双工位同步印刷方式对双面套准精度的提升效果。试验设置 3 组不同的印刷速度 (10 片/min、20 片/min、30 片/min), 每组试验印刷 50 片滤光片, 采用激光干涉仪测量每片滤光片双面图案的套准误差 (X 轴与 Y 轴方向误差的合成值), 记录每组试验的平均误差、最大误差与标准差<sup>[1]</sup>。对比组采用传统翻面印刷工艺, 在相同印刷速度下进行试验, 测量指标与试验组一致。

#### 2.2.2 油墨附着性设计

不同张力控制对油墨附着性的影响试验。试验二则探究印刷过程中刮刀压力与同步带张紧力对油墨附着强度的影响。设计正交试验, 刮刀压力设置 3 个水平 (0.2MPa、0.3MPa、0.4MPa), 同步带张紧力设置 3 个水平 (20N、30N、40N), 共 9 组试验, 每组试验印刷 30 片滤光片<sup>[2]</sup>。采用拉力测试仪进行十字划格法测试 (划格间距 1mm, 划格深度至玻璃基底), 测量油墨附着强度 (单位: N/cm), 同时将印刷后的滤光片置于环境试验箱中进行高低温循环试验 ( $-40^\circ\text{C}$  保持 2h,  $85^\circ\text{C}$  保持 2h, 循环 5 次), 观察油墨层是否出现脱落、开裂现象, 评估其环境适应性。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 套准误差对比试验结果

不同印刷速度下双面套准误差对比结果如表 1 所示。随着印刷速度从 10 片/min 提升至 30 片/min, 试验组 (双工位同步印刷) 平均套准误差从  $2.1 \mu\text{m}$  增至  $3.2 \mu\text{m}$ , 增幅 52.4%, 最大误差从  $3.5 \mu\text{m}$  升至  $5.2 \mu\text{m}$ , 标准差从 0.42 增至 0.76, 各项指标增长平缓且始终处于低水平; 对比组 (传统翻面印刷) 平均误差从  $8.7 \mu\text{m}$  增至  $10.5 \mu\text{m}$ , 最大误差从  $12.3 \mu\text{m}$  升至  $15.1 \mu\text{m}$ , 标准差从 1.25 增至 1.68, 不仅初始误差基数大, 增幅也更显著, 整体误差远超试验组。同一速度下, 试验组优势突出, 10 片/min 时平均误差仅为对比组的 24.1%, 30 片/min 时仍仅为 30.5%, 最大误差始终控制在  $5.2 \mu\text{m}$  内, 远低于对比组的  $15.1 \mu\text{m}$ , 标准差仅为对比组的 45.2%–60.8%, 稳定性更优。

这一差距源于试验组采用伺服电机驱动+真空吸附定位的复合结构, 双工位同步印刷无需翻面, 避免了传统工艺中滤光片二次定位的基准偏移问题, 伺服电机的高精度传动可精准匹配印刷节奏, 真空吸附能有效固定滤光片、抑制形变, 即便速度提升, 仍能维持稳定定位精度; 而对比组翻面过程中, 滤光片易受机械接触产生微小位移, 二次定位缺乏统一基准, 且速度提升会加剧机械振动, 进一步放大定位偏差, 导致误差持续攀升, 试验组的结构设计从根源上规避了对比组的工艺缺陷, 凸显出显著的技术优势。

表1 不同印刷速度下双面套准误差对比 (单位:  $\mu\text{m}$ )

印刷速度 (片/min)	试验组 (双工位同步印刷)			对比组 (传统翻面印刷)		
	平均误差	最大误差	标准差	平均误差	最大误差	标准差
10	2.1	3.5	0.42	8.7	12.3	1.25
20	2.5	4.1	0.58	9.3	13.5	1.43
30	3.2	5.2	0.76	10.5	15.1	1.68

### 3.2 油墨附着性试验结果

油墨附着性试验结果如表2所示。刮刀压力与同步带张紧力的耦合作用显著影响油墨附着强度与环境适应性,其中试验组5(0.3MPa、30N)以5.3N/cm的附着强度成为最优组合,较最差组1(3.2N/cm)提升65.6%,且高低温循环后无明显变化,优势突出。当刮刀压力为0.2MPa时,同步带张紧力从20N增至40N,附着强度从3.2N/cm升至4.1N/cm,增幅28.1%,组1因张紧力不足导致滤光片印刷时轻微窜动,油墨涂覆不均,高低温循环后出现轻微脱落,而组2、3随张紧力提升,滤光片固定更稳固,油墨结合更充分,环境适应性改善。

刮刀压力升至0.3MPa时,各张紧力下附着强度均高于0.2MPa工况,组5在30N张紧力下达到峰值5.3N/cm,此压力组合实现了油墨转移与基底结合的最优匹配,油墨能充分填充滤光片表面微结构,形成致密结合层,而张紧力增至40N时,组6附着强度微降至5.1N/cm,系过度张力导致滤光片微小形变,界面结合略有弱化,但仍保持高水平。当刮刀压力达0.4MPa时,附着强度呈下降趋势,从组7的4.8N/cm降至组9的4.3N/cm,且均出现开裂现象,因高刮刀压力使油墨层内应力增大,同步带张紧力越大,滤光片机械应力越显著,双重应力叠加导致界面微裂纹产生,高低温循环后裂纹扩展,环境适应性恶化<sup>[5]</sup>。

表2 不同工艺参数下油墨附着强度与环境适应性测试结果

试验组号	刮刀压力 (MPa)	同步带张紧力 (N)	油墨附着强度 (N/cm)	高低温循环后状态
1	0.2	20	3.2	轻微脱落
2	0.2	30	3.8	无明显变化
3	0.2	40	4.1	无明显变化
4	0.3	20	4.5	无明显变化
5	0.3	30	5.3	无明显变化
6	0.3	40	5.1	无明显变化
7	0.4	20	4.8	边缘轻微开裂
8	0.4	30	4.6	边缘轻微开裂
9	0.4	40	4.3	边缘明显开裂

## 4 结论

本研究通过优化玻璃滤光片双面印刷装置结构与工艺参数,证实双工位同步印刷+伺服电机驱动+真空吸附定位的复合方案,可将双面套准误差控制在 $\pm 3\mu\text{m}$ 内。刮刀压力

0.3MPa、同步带张紧力30N为最优工艺组合,油墨附着强度达5.3N/cm,环境适应性良好,满足高精度光学元件生产需求,为装置技术升级提供关键支撑。

## 参考文献

- [1]魏扬.可调滤光片型计算光谱成像技术[D].电子科技大学, 2025.
- [2]宋林珂.钙钛矿量子点玻璃在有色滤光片及背光显示上的应用[D].大连海事大学, 2024.
- [3]吴承宇,殷澄,李翠翠,等.通过磨砂玻璃滤光片产生浴帘效应抑制水下噪声[J].江西师范大学学报(自然科学版), 2024, 48(01): 59-62+68.
- [4]徐润峰.彩色滤光片用酞菁染料的设计合成与性质研究[D].大连理工大学, 2024.
- [5]饶东升.基于颜色玻璃的变色温滤光片研究[D].江南大学, 2022.

作者简介:张顺华,出生年月:19781003,男,汉族,籍贯:浙江衢州,学历:本科,研究方向:光学薄膜、设备装置的设计、研发与制造。