

DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201610032



利用干涉测量技术的染液均匀性方法

梅小华, 李平, 金福江, 李扬森

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 针对染色过程中染料和助剂不均容易导致色花问题,搭建干涉测量实验平台,采集染液处于不同均匀程度下的干涉条纹图,根据干涉条纹图形状特点及其频域特征,实现染液均匀性定性判断.实验结果表明:当染液存在化料不均的情况时,干涉条纹形态及频域特征相对均匀状态染液差异明显,利用干涉测量技术实现对染液均匀性检测的方法是可行的.

关键词: 均匀性检测; 染液; 干涉测量; 干涉条纹

中图分类号: TS 193.4; TP 274

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2019)02-0221-05

Homogeneity Testing of Uniform Degree of Dyeing Solution Using Interference Measurement

MEI Xiaohua, LI Ping, JIN Fujiang, LI Yangsen

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: When the dissolution of dyes or dye auxiliaries is not uniform, it can be easy to cause colored spot. To solve this problem, experimental system platform of interferometry was designed, and the interference fringe images in different uniform degree of dye were collected. The shape feature of interference fringes and the features in frequency domain are used to judge the uniform degree of dyeing solution. Experimental results prove that the difference of the shape of interference fringes and the features in frequency domain are obvious when the dyes in different degree of uniformity. Accordingly, analysis the degree of uniformity of dyes by using interferometric technique is feasible.

Keywords: homogeneity testing; dye liquor; interference measurement; interference fringe

为了避免染色过程中染料或助剂不均导致织物色花,配制好的染液首先需要通过化料机进行搅拌处理^[1-3].化料机通常由化料桶和搅拌棒构成,化料时间长短通常根据经验进行设定.如果化料时间过短,会导致化料不均,进而容易染花织物,对产品质量造成严重影响,往往需要消耗大量的人力与物力对染花的不合格产品进行重新染色.通常需要尽量延长化料时间,但这又会影响到生产进度,不利于提高产量.黄旭明等^[4]通过添加助剂的方法调节染液染料的均匀性,但是无法实时观察染液均匀程度,且增加额外的助剂成本.沈娟等^[5]通过示差折光检测器测量溶液折射率,实现对溶液均匀性、稳定性的检测,但对于质量浓度较低的溶液,存在灵敏度不足的问题.干涉测量技术^[6]是以光波干涉原理为基础进行测试的一门技术,相对于一般的光学成像技术具有更高的灵敏度.随着激光的出现及计算机的应用,在提高精度的同时,实现了条纹的实时自动分析.文献^[7-8]成功地将干涉测试技术应用于玻璃的均匀性检测.本文利用干涉测试技术的优势,搭建染液均匀性检测系统,以解决染料化料不均的问题.

收稿日期: 2017-10-16

通信作者: 梅小华(1978-),女,讲师,主要从事智能技术与自动化的研究. E-mail: forest999@126.com.

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(61273069);福建省泉州市科技计划项目(2013Z20)

1 干涉原理与检测方法

1.1 光的干涉原理^[9]

设 $E_{01}(\mathbf{r},t)$ 和 $E_{02}(\mathbf{r},t)$ 是两列频率相同的平面电磁波,在空间产生的电磁场分别为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{E}_1(\mathbf{r},t) &= E_{01} \cos(2\pi\nu t - \mathbf{k}_1\mathbf{r} + \varphi_1), \\ \mathbf{E}_2(\mathbf{r},t) &= E_{02} \cos(2\pi\nu t - \mathbf{k}_2\mathbf{r} + \varphi_2). \end{aligned} \right\} \tag{1}$$

式(1)中: E_{01}, E_{02} 为电磁波振幅; \mathbf{r} 为矢径; $\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2$ 为波矢量; ν 为频率; φ_1, φ_2 为初始相位.

根据叠加定理,两电磁波相遇区域电场为

$$\mathbf{E}(\mathbf{r},t) = \mathbf{E}_1(\mathbf{r},t) + \mathbf{E}_2(\mathbf{r},t). \tag{2}$$

相遇区域的光场强度 I 为

$$\begin{aligned} I = \langle \mathbf{E}\mathbf{E}^* \rangle &= \langle E_{01}^2 + E_{02}^2 + \mathbf{E}_1\mathbf{E}_2^* + \mathbf{E}_1^*\mathbf{E}_2 \rangle = \\ &= \langle E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2(E_{01}E_{02})\cos\theta \rangle = I_1 + I_2 + \langle 2E_{01}E_{02}\cos\psi \cdot \cos\theta \rangle. \end{aligned} \tag{3}$$

式(3)中: $\langle \rangle$ 表示对时间求平均,则 $I_1 = \langle E_{01}^2 \rangle, I_2 = \langle E_{02}^2 \rangle$ 分别表示两平面电磁波的平均光强; ψ 为 E_{01} 和 E_{02} 的夹角; $\theta = (\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1) \cdot \mathbf{r} - (\varphi_2 - \varphi_1)$. 式(3)中的第 3 项为干涉项,当两平面电磁波不相干时,干涉项为零, $I = I_1 + I_2$, 光场一片均匀. 若两列光波相干,则干涉项不为零,光强分布呈现干涉图纹.

当 $\psi = 0$, 即两偏振电磁波偏振方向相同,有

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2}\cos\theta. \tag{4}$$

I 随 θ 变化,其极大值和极小值分别为

$$\left. \begin{aligned} I_{\max} &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2}, \\ I_{\min} &= I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1I_2}. \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

激光是一种相干性好、方向性好且亮度极高的光源,是光学干涉计量中的理想光源.

1.2 染液均匀性检测方法

染液均匀性检测系统示意图^[10],如图 1 所示. 从氦氖激光器发出的点光源经空间滤波器和正透镜扩束成相干光束,由空间分光棱镜 B_1 分为两束相干平面波,分别经反光镜 M_1, M_2 反射,光束 1 通过装有待测溶液的比色皿与光束 2 在分光棱镜 B_2 处汇合,形成混合光,在电荷耦合器件(CCD)相机屏产生干涉条纹图,并采集传送到个人计算机(PC)端.

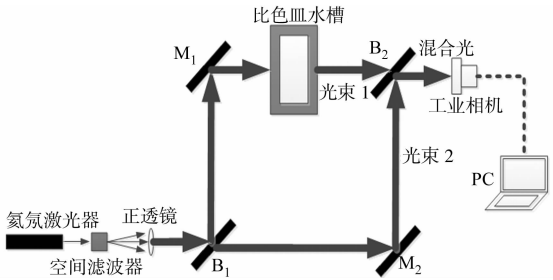


图 1 染液均匀性检测系统示意图

Fig. 1 Diagram of dye uniformity degree detection system

如果比色皿中的染液处于均匀状态,则由光束 1 组成的波面仍为平面波,与光束 2 平面波之间仍保持相干性,满足式(5)的形式,干涉图条纹形态固定且相互平行. 如果染液处于不均匀状态,光束 1 通过不均匀染液后,会对光束中的各光线产生不同程度的影响,波面不再是平面波,与光束 2 波面之间的相干性发生了变化,光场不再满足式(5),而是变成了其他更为复杂的形式,导致干涉条纹图形态发生明显变化.

由以上分析可知,可直接通过肉眼观测条纹的形态对染液均匀性进行判断. 除此之外,为了减轻人眼观测负担,可提取干涉条纹频谱特征,设定判断指标,实现染液均匀性自动判断.

设染液为均匀状态,CCD 相机采集到的干涉条纹图某点 (x,y) 处的物光和参考光波分别为 $O(x,y)$ 和 $R(x,y)$,由式(3)可得 CCD 屏光场强度为

$$I = (O(x,y) + R(x,y)) \cdot (O(x,y) + R(x,y))^* = |O|^2 + |R|^2 + R^*O + RO^*. \tag{6}$$

对干涉光强分布 I 作傅里叶变换,即

$$A_0 = F(|O|^2 + |R|^2), \quad A_{+1} = F(R^*O), \quad A_{-1} = F(RO^*). \tag{7}$$

式(7)中: A_0, A_{+1}, A_{-1} 分别表示频谱图中的零级频谱、+1 级频谱和 -1 级频谱. 当染液均匀性发生变化时,物光波的相干性受到影响,频谱图不仅仅由这三级主频谱构成,通过程序设定适当的判断条件,即可实现染液均匀度的定性判断.

2 实验部分

2.1 材料与仪器

激光干涉测量平台(CCD 相机的分辨率为 1 024 px×1 024 px)、光学减震平台;FN-2R 黄均匀染液、染色助剂(元明粉、固色碱).

2.2 实验方法

搭建激光干涉测量实验平台,如图 2 所示. 实验有如下 5 个主要步骤:1) 调节光路,使物光和参考光波在 CCD 屏发生干涉;2) 在比色皿中缓慢滴入 $0.1\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ FN-2R 黄均匀染液 10 mL,静置 30 s;3) 用移液器取 $10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ FN-2R 黄均匀染液,往比色皿中缓慢滴入两滴染液;4) 在滴入染液的同时,采用 CCD 相机每隔 1 s 采集 1 次,采集 10 次获得 10 幅干涉条纹图;用搅拌棒搅拌均匀,采集 1 幅染液处于较为均匀状态下的干涉条纹图;5) 清空比色皿中的染液,将步骤 3) 中的 FN-2R 黄均匀染液分别换成元明粉及固色碱进行实验. 通过以上实验步骤,可采集到 3 组实验图像.

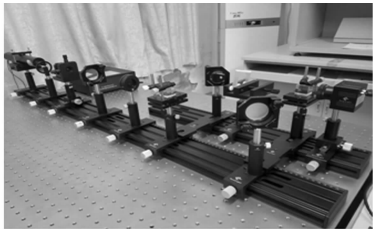
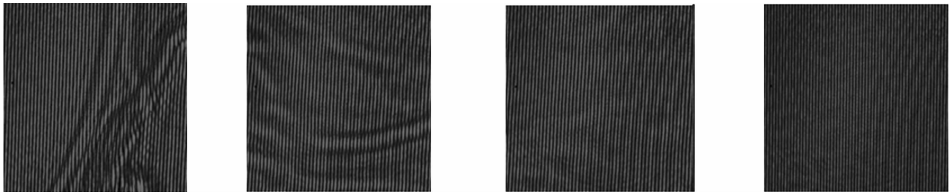


图 2 激光干涉实验平台
Fig. 2 Experimental platform of laser interference

3 结果与分析

3.1 干涉图纹形态分析

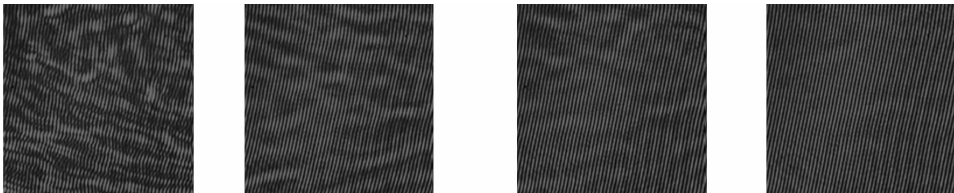
取 3 组干涉实验条纹图中第 2 秒、第 4 秒、第 8 秒和染液处于均匀状态时的干涉条纹图进行对比,结果如图 3~5 所示. 由图 3~5 可知:加入溶质后,由于溶液的不均匀性,干涉条纹扭曲且不断变化,随着时间的推移,溶液逐渐变均匀,干涉条纹逐渐恢复相互平行状态且形态稳定. 因此,在进行染液均匀性检测时,可以通过观测干涉条纹图的条纹是否处于稳定的相互平行状态,而对染液均匀性做定性判断.



(a) 第 2 秒 (b) 第 4 秒 (c) 第 8 秒 (d) 均匀情况

图 3 加入 FN-2R 黄染液后的不同时刻干涉条纹图

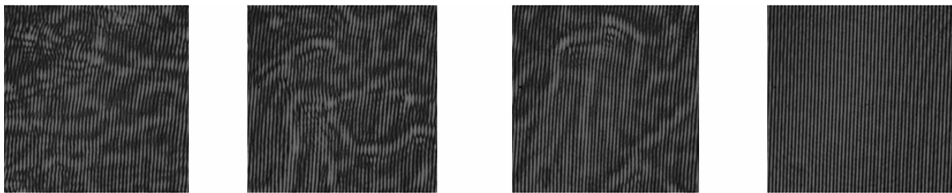
Fig. 3 Interference fringe images at different time point after adding dyeing solution of yellow FN-2R



(a) 第 2 秒 (b) 第 4 秒 (c) 第 8 秒 (d) 均匀情况

图 4 加入元明粉后的不同时刻干涉条纹图

Fig. 4 Interference fringe images at different time point after adding sodium sulfate



(a) 第 2 秒 (b) 第 4 秒 (c) 第 8 秒 (d) 均匀情况

图 5 加入固色碱后的不同时刻干涉条纹图

Fig. 5 Interference fringe images at different time point after adding soda ash

3.2 干涉图纹频域分析

图像的频率是表征图像中灰度变换剧烈程度的指标,是灰度在平面空间上的梯度.将图像从空间域变换到频域,对于图像的特征提取和图像识别等方面发挥着重要作用^[11].利用 MATLAB 对染液加入元明粉后采集到的干涉条纹图进行离散快速傅里叶变换,求得的干涉条纹频谱图,如图 6 所示.由图 6 可知:在主频谱周边,存在不同程度的杂谱,且杂谱的影响随着染液均匀度的提高逐渐减小.

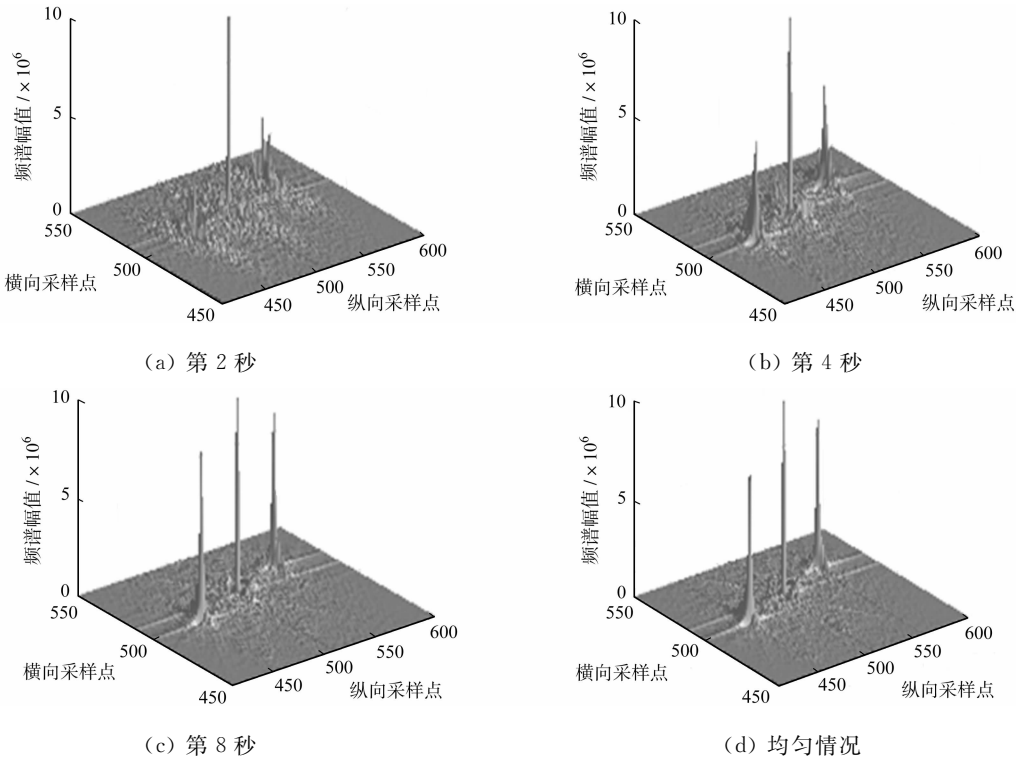


图 6 加入元明粉后不同时刻干涉条纹频谱图

Fig. 6 Frequency charts of interference fringe imagesat different time point after adding sodium sulfate

为了便于实现染液均匀程度的定性检测,设置合适的阈值,将幅值小于阈值的点置为零,设阈值为 1.0×10^6 ,染液加入元明粉后的不同时刻频谱处理平面图,如图 7 所示.由图 7 可知:染液越均匀,白点所占比重越少,可以利用计算均值的方法实现图像的特征提取.

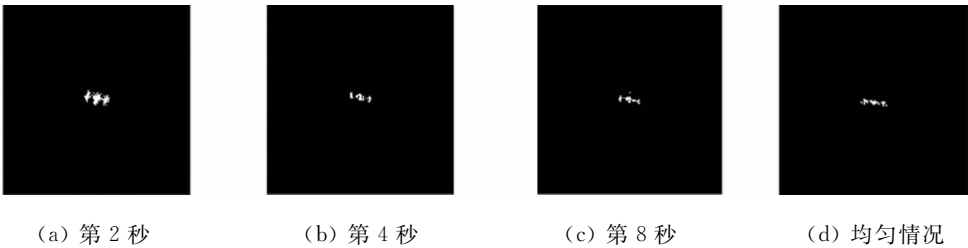


图 7 加入元明粉后的不同时刻频谱处理图

Fig. 7 Frequency processing charts of interference fringe imagesat different time point after adding sodium sulfate

各频谱处理平面图中像素平均值的计算结果如下:1) 图 7(a)的像素平均值 $\bar{M}_a = \sum_{x=1}^{1\,024} \sum_{y=1}^{1\,024} M_a(x, y) / (1\,024 \times 1\,024) \approx 3\,697$; 2) 图 7(b)的像素平均值 $\bar{M}_b = \sum_{x=1}^{1\,024} \sum_{y=1}^{1\,024} M_b(x, y) / (1\,024 \times 1\,024) \approx 1\,853$; 3) 图 7(c)的像素平均值 $\bar{M}_c = \sum_{x=1}^{1\,024} \sum_{y=1}^{1\,024} M_c(x, y) / (1\,024 \times 1\,024) \approx 1\,291$; 4) 图 7(d)的像素均值 $\bar{M}_d = \sum_{x=1}^{1\,024} \sum_{y=1}^{1\,024} M_d(x, y) / (1\,024 \times 1\,024) \approx 1\,095$. 由计算结果可知:染液越均匀,像素平均值越小,可根据均匀大小实现染液均匀性的定性判断.

分别对加入固色碱、FN-2R 黄的均匀染液干涉条纹图进行频域分析，溶质均匀状态的频谱处理图，如图 8 所示。各频谱处理平面图中像素平均值的计算结果如

下：1) 图 8(a)的像素平均值 $\overline{M}_{\text{固色碱}} = \sum_{x=1}^{1\,024} \sum_{y=1}^{1\,024} M_{\text{固色碱}}(x,y)/(1\,024 \times 1\,024) \approx 1\,119$ ；2) 图 8(b)的像素平均值 $\overline{M}_{\text{FN-2R 黄}} = \sum_{x=1}^{1\,024} \sum_{y=1}^{1\,024} M_{\text{FN-2R 黄}}(x,y)/(1\,024 \times 1\,024) \approx 1\,126$ 。综上可得，当染液中加入不同溶质后，达到均匀状态时，其频谱处理图中像素平均值小于 1 200，即可判断染液处于较为均匀状态。



(a) 固色碱 (b) FN-2R 黄
图 8 均匀状态频谱处理图

Fig. 8 Frequency processing charts of uniform condition

4 结论

- 1) 当染液处于均匀状态时，干涉图条纹间接近相互平行状态；而当染液不为均匀状态时，干涉条纹相对于均匀状态变化明显。
- 2) 均匀状态下染液的干涉图纹与不均匀状态下的频域存在较大差异，染液越均匀，围绕零级、+1 级和-1 级主频谱的杂谱越少，且主频谱幅值越大。
- 3) 直接通过肉眼观察采集到的干涉图纹，可实现对染液均匀状态的定性判断。通过图像处理的方法，在频域提取图像特征，当像素平均值小于 1 200 时，即可实现对染液均匀程度的定性判断。通过图像处理的方法实现对染液均匀性的判断方法，可摆脱人眼观察的不便性，有利于提高生产的自动化程度。

参考文献：

[1] 刘江岭,陈蒙,李华,等. 涤纶织物染色色花问题分析与修补[J]. 针织工业,2003(4):63-64. DOI:10. 3969/j. issn. 1000-4033. 2003. 04. 012.

[2] 李振峰,王纪年,苏长志. 影响浸染染色质量的因素[J]. 印染,2007,33(2):20-22.

[3] 杨晓红. 针织物活性艳绿色的染色实践[J]. 纺织科技进展,2007(2):51-52.

[4] 黄旭明,金雅,蔡再生. 稳定液体活性染料的制备及印花喷墨油墨的试制[J]. 纺织科技进展,2006(1):58-60.

[5] 沈娟,吴建刚,李咏雪,等. 高效液相色谱仪标准物质丙三醇水溶液的研制[J]. 医疗卫生装备,2011,32(9):22-23. DOI:10. 3969/j. issn. 1003-8868. 2011. 09. 008.

[6] 王文生,华苗,陈宇,等. 现代光学测试技术[M]. 北京:机械工业出版社,2013.

[7] MANTEL K,SCJWIDER J. Interferometric homogeneity test using adaptive frequency comb illumination[J]. Applied Optics,2013,52(9):1897-1912.

[8] HARDER I,LEUCHS G,MANTEL K,*et al.* Adaptive frequency comb illumination for interferometry in the case of nested two-beam cavities[J]. Applied Optics,2011,50(25):4942-4956.

[9] 熊秉衡,李俊昌. 全息干涉计量: 原理和方法[M]. 北京:科学出版社,2009.

[10] 王铁汉. 基于干涉法测量溶液浓度变化的研究[D]. 济南:山东大学,2012.

[11] 张强,王正林. 精通 MATLAB 图像处理[M]. 2 版. 北京:电子工业出版社,2012.

(责任编辑：钱筠 英文审校：吴逢铁)