

文章编号: 1002-2082 (2020) 03-0516-07

基于蚁群算法的辊式涂布涂层厚度图像检测

包能胜^{1,2}, 方海涛¹

(1. 汕头大学机械电子工程系, 广东 汕头 515063; 2. 汕头大学智能制造技术教育部重点实验室, 广东 汕头 515063)

摘要: 针对目前辊式涂布涂层厚度检测效率低、准确率低等问题, 提出一种基于启发式蚁群算法的辊式涂布涂层厚度机器视觉检测方法。采用 Canny 算子的原理提取出边缘信息, 得到了边缘点的先验知识; 然后建立了改进的蚁群算法的边缘追踪模型, 实现了信息素和启发信息对蚂蚁的导向作用, 同时较好地避免了蚂蚁在非边缘区域的分布和行走, 解决了传统蚁群算法中随机性与正反馈两种机制的协调问题, 使用改进蚁群算法的机器视觉法进行测量实验, 与机理建模法对比最大误差为 5.74%, 平均误差为 4.04%, 满足实际生产需要。

关键词: 蚁群算法; 辊式涂布; 机器视觉; 涂层厚度; 边缘检测

中图分类号: TN206; TP391

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202041.0302005

Roll coating thickness image detection based on ant colony algorithm

BAO Nengsheng^{1,2}, FANG Haitao¹

(1. Department of Mechanical and Electronic Engineering, Shantou University, Shantou 515063, China; 2. Key Laboratory of Intelligent Manufacturing(Ministry of Education), Shantou University, Shantou 515063, China)

Abstract: Aiming at the problems of low efficiency and accuracy for roll coating thickness detection, a machine vision detection method based on heuristic ant colony algorithm was proposed. The principle of Canny operator was used to extract the edge information and obtain the prior knowledge of edge points. Then an improved edge tracking model of ant colony algorithm was established, which realized the guidance of pheromone and heuristic information to ants, avoided the distribution and walking of ants in non-edge areas and solved the problem of coordinated randomness and positive feedback in traditional ant colony algorithm. This improved ant colony algorithm based on machine vision was used in the measurement experiment. Compared with the mechanism modeling method, the maximum error is 5.74%, and the average error is 4.04%, which meet the actual production needs.

Key words: ant colony algorithm; roll coating; machine vision; coating thickness; edge detection

引言

涂布是将胶黏涂布液涂覆在基材上的一种工艺, 涂布技术已经被广泛应用在轻工造纸、信息材料、塑料薄膜深加工等领域^[1-3]。涂布膜在生产中会出现不均匀等问题, 针对涂布涂层进行厚度测量具有重要意义^[4-5]。当前国内外对涂布涂层厚度有很多研究, 如浙江大学的杜艳丽等人^[6]提出的基于白光干涉的金属极薄带测厚; 李福进等人^[7]提出的基于脉冲反射式的超声测厚系统; 郑岗等人^[8]提

出的基于提离点的脉冲涡流测厚等, 但是以上检测方式存在准确率低, 效率低等问题^[9]。针对以上测量方式的不足, 提出一种基于启发式蚁群算法的辊式涂布涂层厚度在线机器视觉检测方法。

1 辊式涂布涂层厚度的机理建模

1.1 双辊式涂布的工作原理

双辊式涂布系统的主要组成部分有涂布辊、背辊, 供料盘, 导辊和基材^[10]。双辊涂布的工作原

收稿日期: 2019-07-04; 修回日期: 2019-09-10

基金项目: 广东省重大科技专项项目 (2017B090910003)

作者简介: 包能胜 (1971-), 男, 教授, 博士, 主要从事机器视觉和图像处理技术研究。E-mail: nsbao@stu.edu.cn

理如图1所示, 涂布过程中涂布辊从供料盘中带上涂料, 将部分涂料转移至背辊与涂布辊间隙处的基材。被涂的基材涂布量以及涂层表面状态取决于被涂基材和涂布辊的线速度、背辊与涂布辊之间的间隙、湿润特性和涂料的粘稠度等因素。

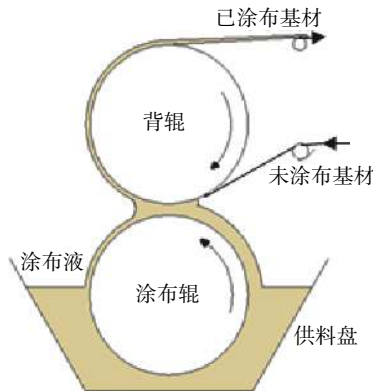


图1 双辊式涂布工作原理

Fig. 1 Operational principle of two-roll forward roll coating

1.2 涂布涂层厚度的建模

当涂布辊带起涂层厚度小于或等于两辊间隙时, 称为非饱和型涂布流场; 当涂布辊带起涂层厚度大于两辊间隙时, 称为饱和型涂布流场。

1.2.1 非饱和型涂布流场

当处于非饱和型涂布流场时, 此时涂布流场形

式如图2所示。

图2中 h_i 为涂布辊带入到两辊间隙中的涂层厚度, h_1 为被基材带走的涂层厚度, h_2 为涂布辊带回供料盘中涂布涂层厚度, H 为两辊间隙距离。由流量守恒得:

$$u_2 h_i = u_1 h_1 + u_2 h_2 \quad (1)$$

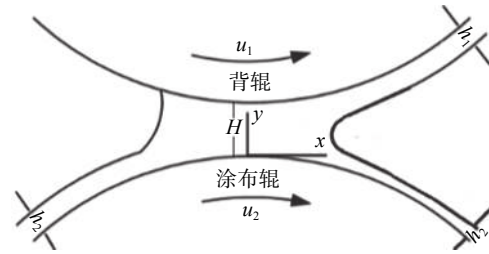


图2 非饱和型涂布流场

Fig. 2 Unsaturated coating flow

由参考文献[10]可得:

$$\frac{h_2}{h_1} = \left(\frac{u_2}{u_1} \right)^{\frac{2}{3}} = S^{\frac{2}{3}} \quad (2)$$

结合(1)与(2)式, 化简得:

$$h_1 = \frac{h_i}{\frac{u_1}{u_2} + \left(\frac{u_2}{u_1} \right)^{\frac{5}{3}}}, h_2 = \frac{h_i}{1 + \left(\frac{u_1}{u_2} \right)^{\frac{5}{3}}} \quad (3)$$

涂布辊从供料盘中带出的涂层厚度的公式为

$$h_i = \left\{ -0.1553 \left[\arccos \left(1 - \frac{h_d}{R} \right) \right]^2 - 0.0464 \arccos \left(1 - \frac{h_d}{R} \right) + 0.4556 \right\} \frac{(3\mu)^{\frac{2}{3}} u_2^{\frac{2}{3}}}{\sqrt{2\rho g \sigma^{\frac{1}{6}} \left(1 - \frac{h_d}{R} \right)}} \quad (4)$$

将涂布辊带起涂层厚度的数学模型公式(4)代入(3)式得:

$$h_1 = \frac{\left\{ -0.1553 \left[\arccos \left(1 - \frac{h_d}{R} \right) \right]^2 - 0.0464 \arccos \left(1 - \frac{h_d}{R} \right) + 0.4556 \right\} (3\mu u_2)^{\frac{2}{3}}}{\sqrt{2\rho g \sigma^{\frac{1}{6}} \left(1 - \frac{h_d}{R} \right) \left[\frac{u_1}{u_2} + \left(\frac{u_2}{u_1} \right)^{\frac{5}{3}} \right]}} \quad (5)$$

$$h_2 = \frac{\left\{ -0.1553 \left[\arccos \left(1 - \frac{h_d}{R} \right) \right]^2 - 0.0464 \arccos \left(1 - \frac{h_d}{R} \right) + 0.4556 \right\} (3\mu u_2)^{\frac{2}{3}}}{\sqrt{2\rho g \sigma^{\frac{1}{6}} \left(1 - \frac{h_d}{R} \right) \left[1 + \left(\frac{u_1}{u_2} \right)^{\frac{5}{3}} \right]}} \quad (6)$$

式中: μ 为涂布液的动力粘度; σ 为表面张力; g 为重力加速度; ρ 为涂布液密度; u_2 为涂布辊的线速度; u_1 为背辊的线速度; h_d 为涂布辊浸没在涂布液中的深度; R 为涂布料辊的半径。

1.2.2 饱和型涂布流场

当处于饱和型涂布流场时, 此时涂布流场如

图3所示。

图3中 h_1 为最终覆于基材的涂层厚度; h_2 为随涂布辊回到供料盘中涂层厚度; H 为两辊间隙距离。由流量体积守恒得:

$$\frac{u_1 + u_2}{2} H = u_1 h_1 + u_2 h_2 \quad (7)$$

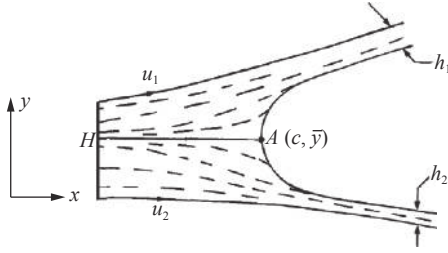


图3 饱和型涂布流场

Fig. 3 Saturated coating flow

由参考文献[11]得:

$$\frac{h_2}{h_1} = \left(\frac{u_2}{u_1} \right)^{\frac{2}{3}} = S^{\frac{2}{3}} \quad (8)$$

结合公式(7)与(8), 化简得:

$$h_1 = \frac{u_1^{\frac{5}{3}} + u_1^{\frac{2}{3}} u_2}{2(u_1^{\frac{5}{3}} + u_2^{\frac{5}{3}})} H, \quad h_2 = \frac{u_1^{\frac{5}{3}} u_2^{\frac{2}{3}} + u_1^{\frac{2}{3}} u_2^{\frac{5}{3}}}{2(u_1^{\frac{7}{3}} + u_1^{\frac{2}{3}} u_2^{\frac{5}{3}})} H \quad (9)$$

式中: μ_2 为涂布辊的线速度; μ_1 为涂布背辊的线速度; H 为两辊间隙距离。

2 启发式蚁群边缘检测算法

2.1 涂布涂层图像的预处理

图像的平滑化处理又称图像滤波操作^[12], 通过滤波操作尽可能地消除图像中的噪声, 达到改善图像质量的目的。经过对比均值滤波器、高斯滤波器和双边滤波器对涂布涂层滤波效果, 发现双边滤波器滤波效果最好, 选用双边滤波器对图像进行平滑化处理。

图像增强即期望突出的目标区域增强, 将背景区域平滑; 通过对比线性对比度拉伸、直方图均衡化和同态滤波对涂布涂层图像增强处理后结果, 发现同态滤波对涂布涂层图像的增强效果最好, 选用同态滤波的方法对图像进行增强处理。

2.2 改进的蚁群边缘检测算法

2.2.1 传统的蚁群边缘检测算法

传统蚁群边缘检测算法的检测方法^[13], 算法分为5个步骤:

1) 初始化。系统开始搜索前需进行初始化设置。首先将 α 只蚂蚁随机的放置在图像 I 上。然后为算法参数分配初始值。包括当前移动次数 $l=0$, 蚂蚁移动总次数 L , 当前迭代次数 $z=0$, 迭代总次数 Z , 信息素矩阵初始值 $\tau_{(i,j)}^0 = C$ 。其中 C 为常数且 $0 < C < 1$, $i \in [1, P]$, $j \in [1, Q]$ 。

2) 构建转移概率。蚂蚁 k 移动到图像上的下一点概率:

$$p_{(i,j)(m,n)}^k = \frac{(\tau_{(i,j)}^s)^\alpha \cdot (\eta_{ij})^\beta}{\sum_{(m,n) \in \text{allow}_{(i,j)}^k} (\tau_{(i,j)}^s)^\alpha \cdot (\eta_{ij})^\beta} \quad (10)$$

式中: β 表示启发影响指数; α 表示信息素影响指数; $k \in [1, m]$ 。假设蚂蚁首先处于点 $V(x, y)$, 然后计算转移概率值, 蚂蚁 k 依转移概率值转移到下一个像素点, 记 $l=l+1$ 。

3) 信息素更新。当蚁群完成一次所有步数移动后, 信息素会按照下式更新:

$$\tau'_{(i,j)} = (1 - \rho) \cdot \tau_{(i,j)}^{n-1} + \rho \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{(i,j)}^k \quad (11)$$

其中 ρ ($0 < \rho < 1$) 代表信息素挥发因子。

4) 判定是否终止迭代。令每完成一次迭代记 $z=z+1$, 如果 $z < Z$ 则返回2), 否则继续进行下个步骤。

5) 边缘决策过程。完成 Z 次迭代后, 人为选定阈值 T 。将信息素矩阵 τ 与阈值 T 对比, 若 $\tau > T$ 该点为边缘点。

2.2.2 改进的蚁群边缘检测算法

改进算法将在传统蚁群算法的基础上引入合适的启发信息, 定义蚂蚁的运动规则和改进信息素的更新规则。首先使每只蚂蚁随机分布在 $M \times N$ 的二维网格点阵上^[13], 每个网格点代表1字节的灰度值像素。使蚂蚁在此网格点阵上运动, 定义蚂蚁在某时刻所处的位置和运动方向用蚂蚁本身表示^[14]。任意时刻蚂蚁所在位置均存在8邻域, 规定蚂蚁每步仅能移动一个像素点。

1) 启发信息的获取

启发信息是蚂蚁寻求边缘点的先决条件, 蚂蚁依据局部环境遗留的信息素与启发信息相结合来增强外部感知能力^[15]。本文选取 Canny 算子作为启发信息, 因为 Canny 算子边缘定位较准确与完整, 同时可以滤除图像噪声, 且所检测边缘的连接性较好^[16]。

用 Canny 算子得到的边缘将作为蚁群边缘检测算法的启发信息 η 。像素点 (i, j) 的启发信息的公式如下:

$$\eta(i, j) = \begin{cases} -1 & \text{该点为非边缘点} \\ [0, 1] & \text{该点为边缘点} \end{cases} \quad (12)$$

2) 信息素更新规则的改进

改进的信息素更新规则是, 为了防止信息素更新算法陷入停滞或局部最优解状态, 本文对信息素挥发因子 ρ 采取如下自适应改进:

$$\rho(t) = \begin{cases} \sigma \rho(t-1) & \sigma \rho(t-1) \geq \rho_{\min} \\ \rho_{\min} & \text{else} \end{cases} \quad (13)$$

式中: ρ_{\min} 为 ρ 的最小值; σ 为常数, σ 为 $\rho(t-1)$ 的调整系数, 取值范围为 $(0, 1]$ 。在算法初期, 为了增

大全局搜索能力与信息素的影响, ρ 的取值尽可能小。当经过 N 次循环迭代后, 所得最优解没有明

显提高时, 因增大 ρ 的值, 减小信息素的影响, 从而跳出局部最优状态^[17]。

表 1 辊间间隙 2 mm 涂布涂层厚度结果对比表

Table 1 Comparison of coating thickness with roller gap 2 mm results

序号	涂布辊转速/(r/min)	背辊转速/(r/min)	机理建模法/mm	称重测量法/mm	机器视觉法/mm
1	70	40	0.776 54	0.661 84	0.711 31
2	70	45	0.827 47	0.729 52	0.787 08
3	70	50	0.872 07	0.771 09	0.813 93
4	70	55	0.911 01	0.812 02	0.847 81
5	70	60	0.944 93	0.837 79	0.901 86
6	70	65	0.974 41	0.915 47	0.956 21
7	75	25	0.552 46	0.516 86	0.549 94
8	75	30	0.624 43	0.547 16	0.600 56
9	75	35	0.688 96	0.647 49	0.719 76
10	75	40	0.746 55	0.658 25	0.754 94
11	75	45	0.797 71	0.754 31	0.795 62
12	75	50	0.843 01	0.796 72	0.885 32
13	75	55	0.882 98	0.836 12	0.852 94
14	75	60	0.918 18	0.877 06	0.974 14
15	75	65	0.949 11	0.861 33	0.934 01
16	75	70	0.976 23	0.932 01	0.930 45
17	80	25	0.528 37	0.486 91	0.424 71
18	80	30	0.598 34	0.505 53	0.559 42
19	80	35	0.661 62	0.586 04	0.684 62
20	80	40	0.718 59	0.682 71	0.715 81
21	80	45	0.769 69	0.702 74	0.789 97
22	80	50	0.815 36	0.744 69	0.839 08
23	80	55	0.856 05	0.841 76	0.859 01
24	80	60	0.892 21	0.857 93	0.870 73
25	80	65	0.924 29	0.895 77	0.915 61
26	80	70	0.952 69	0.973 23	0.980 42

3) 算法最终阈值的选取

选取图像中所有像素点的信息素矩阵的平均值 $T(0)$ 为

$$T(0) = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \tau_{ij}(t)}{MN} \quad l=0 \quad (14)$$

将所有像素的信息素矩阵按照小于和大于 $T(0)$ 分成 2 组。计算 2 组元各自的平均数, 并求取 2 个平均数的中值。

$$\begin{aligned} m_L^l &= \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N g_T^L(l)(\tau_{ij}(t))}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N h_T^L(l)(\tau_{ij}(t))}, \\ m_U^l &= \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N g_T^U(l)(\tau_{ij}(t))}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N h_T^U(l)(\tau_{ij}(t))} \end{aligned} \quad (15)$$

$l=l+1$, 更新阈值 $T(l) = [m_L^l + m_U^l]/2$ 。

若 $|T(l) - T(l-1)| > \varepsilon$, 返回上一步, 不断重复该过程; 否则结束迭代。最后根据如下公式判断 (i, j) 是否是边缘:

$$F_{i,j} = \begin{cases} 1 & \tau_{ij}(t) \geq T(l) \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (16)$$

像素位置 (i, j) 是边缘, $F_{i,j} = 1$; 否则 $F_{i,j} = 0$ 。

在对传统蚁群算法改进后, 分别使用传统的蚁群边缘检测算法和改进的蚁群边缘检测算法对涂布辊图像进行边缘检测, 检测结果如图 5 和图 6 所示, 图 4 为涂布辊原始图像。

图 5 为传统蚁群边缘检测算法所得到的结果。可以看出所检测边缘存在不连续、断裂等现象, 且对图像噪声非常敏感。图 6 为改进的蚁群边

缘检测算法所得到的结果。可以看出所检测边缘较为完整,并且对噪声信息不敏感。说明了改进的蚁群边缘检测算法对涂布辊图像的检测是有效的且优于传统蚁群边缘检测算法。



图 4 涂布辊原始图像

Fig. 4 Original image of coating roll



图 5 传统的蚁群算法效果图

Fig. 5 Effect diagram of traditional ant colony algorithm

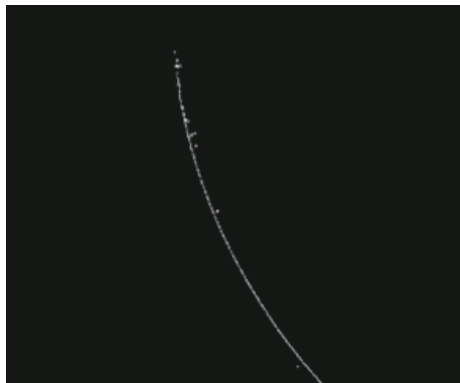


图 6 改进的蚁群算法效果图

Fig. 6 Effect diagram of improved ant colony algorithm

3 结果与分析

实验采用 3 种测量方法的结果进行对比,分别是机器视觉测量法、机理建模法、称重测量法,以

称重测量法为基准,以机理建模法为辅助基准。

3.1 机器视觉测量法

涂布机稳定运行时,涂布液经过涂布辊带到两辊之间,在两辊之间形成弯月面,然后厚度逐渐保持不变。测量该处涂布涂层的厚度,需要获取两辊边缘以及液面边缘。当两辊处于静止状态时,通过边缘提取以及最小二乘法拟合可得涂布辊的边缘拟合圆。采集辊间运动状态的图像,对图像进行双边滤波平滑化处理、同态滤波增强以及改进的蚁群算法边缘检测。

为了避免测量结果的随机误差,每间隔 1° 从圆心向外引射线。分别求出 10 处测量点的液体涂层厚度,最后将所得的 10 个数据结果取均值,即为涂布涂层平均厚度,检测效果如图 7 所示。

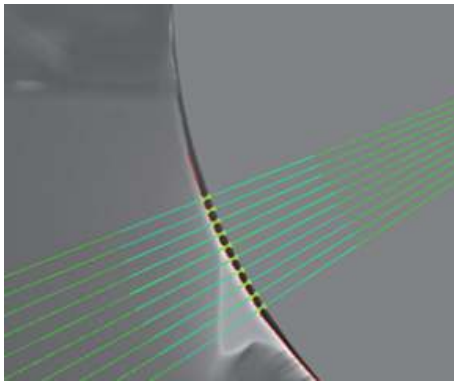


图 7 辊间涂布涂层厚度检测效果图

Fig. 7 Effect diagram of thickness detection for coating between rolls

3.2 机理建模法

从本文第 1 节推导出的涂布涂层厚度数学模型可知,涂布辊在供料盘中的浸没深度会对最终涂层厚度产生影响,也是计算涂布涂层理论厚度的重要参数。本文通过对边缘提取后的图像进行最小二乘法拟合圆和 Hough 直线检测 2 种检测手段,完成涂布辊浸没深度的计算。

通过第 1 节可知,涂布辊从供料盘中带起涂布涂层厚度数学模型和最终涂覆在基材表面上的涂布涂层厚度数学模型,结合(5)式、(9)式,计算可得理论涂布涂层厚度。

3.3 称重测量法

称重测量法即使用宽度为 l 的刮刀紧贴于辊子表面,在辊子运转时刮掉宽度为 l 的涂布液。然后用高精度天平秤测量刮掉涂布液的质量 m ,其称重精度为 0.1 mg 。根据辊子的线速度 V 与采样时间 t 以及涂布液密度 ρ ,可计算出涂布涂层厚度 H ,

其计算公式如(17)所示。

$$H = \frac{m}{\rho V t l} \quad (17)$$

采集涂布液示意图如下所示。其中图8为刮刀收集涂布辊液面, 图9为刮刀收集背辊液面。

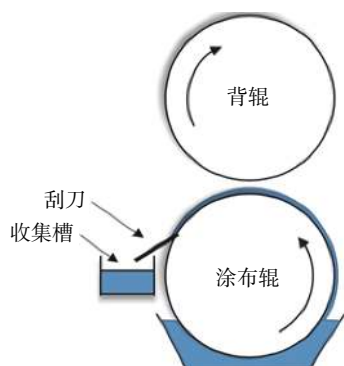


图8 刮刀收集涂布辊涂布液示意图

Fig. 8 Diagram of coating fluid for roller collected by scraper

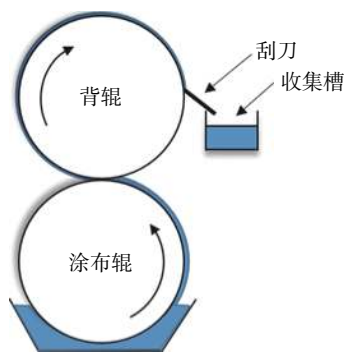


图9 刮刀收集背辊涂布液示意图

Fig. 9 Diagram of coating fluid for back roller collected by scraper

测量过程: 1) 辊子以线速度 V 匀速运转, 等待取样; 2) 刮刀刮取宽度为 l 的涂布涂层, 放置于容器中等待称重, 同时记录采样时间 t ; 3) 使用分析天平进行质量测量, 最后, 进行实验数据的记录。

3.4 结果分析

本文实验使用甘油为涂布液, 粘度为 0.15 pas; 背辊行星减速器选用 SL120-L1-4、伺服电机选用 130DNMA1-01D5B、驱动器选用 EPS-B1-01D5AA 和涂布辊行星减速器选用 SL120-L1-3、伺服电机选用 130DNMA1-0003C、驱动器选用 EPS-B1-0003AA。

本文对比基于改进的蚁群边缘检测算法的机器视觉测量法、机理建模法与称重测量法, 两辊间隙距离为 2 mm 时的对比数据如表 1 所示。

从表 1 中可知, 机理建模法平均值为 0.808 mm, 标准差 0.133; 称重测量法平均值为 0.747 mm, 标准

差为 0.140; 机器视觉法平均值为 0.794 mm, 标准差为 0.142。机器视觉法与机理建模法最大误差为 5.74%, 平均误差为 4.04%; 机器视觉法与称重测量法最大误差为 7.35%, 平均误差为 6.52%。

机器视觉测量的误差来源有以下几个原因:

1) 对比标准是目前已知最接近真实涂层厚度的测量结果, 但不是涂层客观的实际结果;

2) 采集图片是由于采集环境造成的误差, 以及相机本身的误差, 包括安装误差;

3) 图片处理中算法的误差也会造成最后实际结果的误差。

4 结论

针对辊式涂布涂层厚度检测问题, 提出一种基于启发式蚁群算法的辊式涂布涂层厚度检测方法, 改进的蚁群边缘检测算法通过引入边缘启发信息、改进信息素更新公式和自适应阈值选取, 改进了算法, 使用该方法测量与机理建模法最大误差为 5.74%, 平均误差为 4.04%; 与称重测量法最大误差为 7.35%, 平均误差为 6.52%, 可满足实际生产需求。

参考文献:

- [1] COHEN Gutoff. Modern coating and drying technology[M]. ZHAO Boyuan Translate. Beijing: China Light Industry Press Ltd, 1999.
柯亨古塔夫. 现代涂布干燥技术[M]. 赵伯元, 译. 北京: 中国轻工业出版社, 1999.
- [2] SHEN Feng, CHEN Xiaofeng. Application of environmental-friendly adhesive in food packaging composite film[J]. *Plastics Packaging*, 2006(6): 21-24.
沈峰, 陈小峰. 环保型粘合剂在食品包装复合膜中的应用[J]. *塑料包装*, 2006(6): 21-24.
- [3] MITCHELL A, JOHNSON A. Viscoelastic roll coating flows[D]. Minnesota: University of Minnesota, 2003.
- [4] GUO Xingwang, DING Mengmeng. Simulation of thermal NDT of thickness and its unevenness of thermal barrier coatings[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2010, 31(1): 198-203.
郭兴旺, 丁蒙蒙. 热障涂层厚度及厚度不均热无损检测的数值模拟[J]. *航空学报*, 2010, 31(1): 198-203.
- [5] JIA Zhiguo, LU Zhigong. Online testing technology of thickness[J]. *Instrumentation Technology*, 2009(2): 19-

21.
贾治国, 卢治功. 在线厚度检测技术[J]. *仪表技术*, 2009(2): 19-21.
- [6] DU Yanli. Theory and system research for ultra-thin metallic foil thickness measurement based on white light interference[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
杜艳丽. 基于白光干涉的金属极薄带测厚理论与系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [7] LI Fujin, FEI Dongmei. Design of ultrasonic thickness system based on pulse reflecting type[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2013(4): 50-52.
李福进, 费冬妹. 基于脉冲反射式的超声测厚系统的设计[J]. *仪表技术与传感器*, 2013(4): 50-52.
- [8] ZHENG Gang, LIU Ding, ZHANG Zhen, et al. Research on thickness measurement based on lift-off intersection of pulsed eddy current[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2008(8): 1745-1749.
郑岗, 刘丁, 张震, 等. 基于提离点的脉冲涡流测厚研究[J]. *仪器仪表学报*, 2008(8): 1745-1749.
- [9] SINGH N, DELWICHE M. Machine vision methods for defect sorting stone fruit[J]. *Trans of ASAS*, 1994, 37(6): 452-460.
- [10] MMBAGA J P, HAYES R E, BERTRAND F H, et al. Flow simulation in the nip of a rigid forward roll coater[J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2005, 48: 1041-1066.
- [11] ZHU Wei, ZHAO Chunguang, OU Leqing, et al. An Example of OpenCV image processing programming[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2016.
朱伟, 赵春光, 欧乐庆, 等. OpenCV图像处理编程实例[M]. 北京: 电子工业出版社, 2016.
- [12] WU Qidi, WANG Lei. Intelligent ant colony algorithm and its application[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technological Education Publishing House, 2004.
吴启迪, 汪镭. 智能蚁群算法及应用[M]. 上海: 上海科技教育出版社, 2004.
- [13] CHIALVO D R, MILLONAS M M. How swarms build cognitive maps[J]. *The Biology and Technology of Intelligent Autonomous Agents*, 1995, 144: 439-450.
- [14] ZHANG Zhilong, YANG Weiping, LI Jicheng. A novel salient image edge detection algorithm based on ant colony optimization[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(9): 2061-2067.
张志龙, 杨卫平, 李吉成. 一种基于蚁群优化的显著边缘检测算法[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(9): 2061-2067.
- [15] GONZALEZ R C, WOODS R E. Digital image processing [M]. Beijing : Publishing House of Electronics Industry, 2011.
- [16] CHEN Hao, FANG Yong, ZHU Dazhou, et al. Edge detection of thermal infrared images of maize plants based on ant colony algorithms[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2015, 37(6): 49-52.
陈浩, 方勇, 朱大洲, 等. 基于蚁群算法的玉米植株热红外图像边缘检测[J]. *农机化研究*, 2015, 37(6): 49-52.
- [17] ZHAN Xiaoqian, HE Kun, JU Shenggen, et al. Image edge detection based on improved ant colony algorithm[J]. *Journal of Sichuan University(Natural Science Edition)*, 2010, 47(6): 1265-1271.
詹晓倩, 何坤, 琚生根, 等. 基于改进蚁群算法的图像边缘检测[J]. *四川大学学报(自然科学版)*, 2010, 47(6): 1265-1271.