

文章编号 1004-924X(2012)02-0360-09

使用目标多特征识别的纳米纤维制造在线监测系统

刘大利^{1*}, 郭俊¹, 方淑慧¹, 井长娟¹, 刘媛媛¹, 胡庆夕^{1,2}

(1. 上海大学快速制造工程中心, 上海 200444;

2. 上海大学机械自动化及机器人上海市重点实验室, 上海 200444)

摘要:针对电纺丝成型纳米级纤维工艺中因供料速度与电压值不匹配而出现的不稳定现象-流涎,提出了基于目标多特征识别的纳米纤维制造在线检测系统来提高纳米纤维成型质量的稳定性并实现纤维直径的可控性。首先,使用工业CCD对喷头出口处的泰勒锥进行连续图像采集,并对其进行锐化、滤波、阈值分割等预处理;然后,用目标多特征识别算法对泰勒锥的周长、面积和锥高等特征进行识别,实现对泰勒锥的形态和大小实时判别;最后,以判别结果作为控制系统的反馈信号,实时在线调节供料模块或电源模块驱动供料速度与电压达到匹配。实验结果表明,当电压为8 kV,系统能在0.43 s后达到稳定,从而维持泰勒锥形状稳定,无流涎现象,得到直径均匀的纳米纤维。提出的方法有效地解决了电纺纳米纤维直径不均匀和不可控制的难题。

关键词:电纺丝;工艺控制;图像处理;泰勒锥;多特征识别

中图分类号:TQ34;TP67 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122002.0360

On-line monitor system for nanoscale fiber manufacturing based on multi-featured pattern recognition

LIU Da-li^{1*}, GUO Jun¹, FANG Shu-hui¹, JING Chang-juan¹, LIU Yuan-yuan¹, HU Qing-xi^{1,2}

(1. *Rapid Manufacturing Engineering Center, Shanghai University, Shanghai 200444, China;*

2. *Shanghai Key Laboratory of Mechanical Automation & Robotics, Shanghai University, Shanghai 200444, China)*

* *Corresponding author, E-mail: 4datianwang@163.com*

Abstract: To solve the problem of salivate, an unsteady phenomenon caused by the mismatch of feed velocity and high-voltage in the electrospinning to fabricate nanoscale fibers, this paper proposes an on-line monitor system based on the multi-featured pattern recognition for realizing both the stability of nanofiber manufacturing and the controllability of fiber diameter. Firstly, an industry CCD is used to collect the image of the Taylor cone continuously, and then these images are preprocessed by sharpening, filtering and threshold segmentation. The perimeter, area and height of the Taylor cone are recognized by the multi-featured pattern recognition algorithm to judge the shape and size of the Taylor cone. Finally, the result of pattern recognition is viewed as the feedback signal to adjust the feed module and high-voltage module. Experimental results indicate that when the voltage is 8 kV, the system

收稿日期:2011-09-27;修订日期:2011-11-09.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51075253, 51105239)

can be stabilized in 0.43 s, and it maintains a stable shape of Taylor cone without the salivate phenomenon. Moreover, obtained nanoscale fiber shows a uniform diameter. In conclusion, this method has reliably and effectively solved the instability and uncontrollability of nanoscale fiber manufacturing.

Key words: electrospinning; process control; image processing; Taylor cone; multi-featured pattern recognition

1 引言

1934年, Formhals^[1]等人首先提出了电纺丝技术,直到20世纪90年代该技术才逐渐被人们所重视,近十多年来电纺丝理论和技术得以迅猛发展。电纺丝技术是利用强电场的作用使聚合物溶液或熔体形成喷射流来进行纺丝加工,是一种制备纳米纤维的新型加工方法,其应用已涉及到生命科学、组织工程、光电器件、航天器材等领域^[2-6]。利用电纺丝技术可以喷射出亚微米级甚至纳米级的纤维,从而构成三维相互贯通的微孔结构,其外形结构类似于无序状的无纺布^[7-8]。

由于电纺丝所成型的纤维直径在几十纳米到几微米之间,所以很难控制其工艺的稳定性。首先,在温度、湿度和接收距离等工艺环境一定的情况下,如果电压和供料速度不能很好的匹配就会产生流涎现象,造成纤维直径不均匀;其次,电纺丝所成型纤维的直径存在于微观的尺度上,很难对电纺丝的直径进行直接监测和控制,这样会导致每次做出来的纤维直径和形貌不尽相同。目前对电纺丝成型过程的控制也被国内外研究人员所关注,开展了在电压一定的情况下,设计精准的闭环供料系统,通过实验得到供料速度与纤维直径的关系方面的研究^[9-10],但还无法实现电纺丝过程中的自动化。比如,在供料与电压匹配时的调节问题还需依赖人对泰勒锥的观察。泰勒锥的大小和状态直接反应供料速度和电压的匹配效果,也直接决定电纺纤维的直径大小和形貌的均匀性^[11]。

在成型过程中的电压和距离一定的情况下,由供料速度导致的泰勒锥形状有两大类,一类是液滴状,其对电纺丝的影响是液滴直接滴落在接

收板上;第二类是泰勒锥状,但是泰勒锥过大会形成流涎或丝的直径不均匀,而泰勒锥过小会出现因供料不足而产生的纳米纤维材料的不连续。

随着工业摄像机硬件和图像处理技术的发展,CCD已被用于微制造领域的在线监测^[12-13]。为达到对电纺丝成型质量的控制,本文提出采用对目标的多特征进行在线监测的方法对喷头出口处液滴的形状和大小进行监测,以实现电纺丝成型过程的实时控制。

2 泰勒锥的图像识别

电纺丝工艺中,泰勒锥的尺度范围是由喷头尺寸决定的,一般在1 mm左右,用现有的工业摄像机能够清晰捕捉到其形状,如图1所示。在完成图片的采集和传输后,首先要对泰勒锥的图像进行实时的预处理,其次是要对预处理后的图像进行多特征识别,实现对泰勒锥的形状和大小进行模式识别和分类。

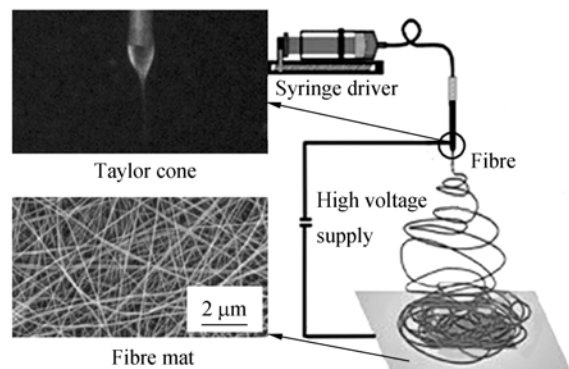


图1 电纺丝示意图

Fig. 1 Forming diagram of electrospinning

2.1 泰勒锥形状的数学描述

一幅数字图像相当于一个2维的灰度值矩

阵,盛放了每个像素点对应的灰度值。可以把每个像素点的行号和列号作为该像素的坐标,这样一幅数字图像就呈现在眼前。一幅经过采样和量化之后得到的数字图像可以用矩阵表示如下

$$F = \begin{bmatrix} f(1,1) & f(1,2) & \cdots & f(1,n) \\ f(2,1) & f(2,2) & \cdots & f(2,n) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ f(m,1) & f(m,2) & \cdots & f(m,n) \end{bmatrix} = [f(i,j)], \quad (1)$$

式中, $f(i,j)$ 表示位于图像第 i 行、第 j 列的像素灰度值,因此式中表示的矩阵包含了单幅图像的全部原始信息,图像的灰度变化是图像的特征源。图像数据按上式图像序列 $f(i,j)$ 存放在图像卡帧存或计算机内存中,图像处理和分析系统根据从图像序列中提取的特征信息来判断和分析处理^[14]。

2.2 图像的采集与预处理

(1) 数据采集

用工业 CCD 黑白摄像机对电纺丝的喷丝过程进行全程监控,快门速度可以达到 0.01 ms;

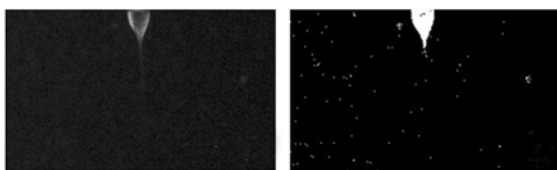
(2) 预处理

对因背景、光线、输入设备、操作等因素造成的图片质量退化现象进行锐化增强、去噪声等前期处理;

(3) 特征提取

对喷头处液滴进行阈值分割和边缘提取,根据泰勒锥所属像素的像素点的数量计算其周长和面积。

由 CCD 采集的一帧图像经过滤波、阈值分割及边缘提取等处理后的图像分别如图 2(a), 2(b), 2(c), 2(d), 2(e) 所示。



(a) 滤波 (a) Filtering
(b) 带有噪声的二值图像 (b) Binary image with noise



(c) 去噪后的二值图像 (c) Binary image without noise
(d) Canny 边缘提取 (d) Canny edge extraction



(e) 二值图像的局布放大图
(e) Magnified local binary images

图 2 泰勒锥的预处理图像

Fig. 2 Pretreatment of Taylor cone image

2.3 多特征识别算法

首先对通过二值化图形处理后得到的液滴的形状进行判断,然后对泰勒锥的锥高进行判断,最终测得泰勒锥的轮廓是否符合要求。

2.3.1 判断液滴的形状

喷头出口处的液体材料的形状可以分为液滴状和泰勒锥状,且一般液滴状在二维视图所占的面积和周长都要大于泰勒锥状。根据阈值分割所得到的连续形状像素点数量和边缘提取中的轮廓像素点的数量计算出口材料的面积和周长。首先,把数据库中保存的在固定工艺参数情况下得到的标准泰勒锥图像数据作为模板 X ,把面积、周长及二者所属的像素值作为其特征,将液滴状记为 A ,其特征向量为 $X_A = (x_{A1} \ x_{A2} \ x_{A3})$;泰勒锥状记为 B ,其特征向量为 $X_B = (x_{B1} \ x_{B2} \ x_{B3})$ 。每一次相机采样传回到计算机的图像数据为图像标本,记为 X_p , ($p=1, 2 \cdots n$) 表示按时间排序的次数,其特征向量可表示为 $X_p = (x_{p1} \ x_{p2} \ x_{p3})$ 。采用模板匹配方法识别时,设 ξ 为误差值,若 $X_A - \xi < X_p < X_A + \xi$,则判定此帧图像为液滴状;同理,如果 $X_B - \xi < X_p < X_B + \xi$,则判定此帧图像为泰勒锥状。通过最短距离法来判定 X 属于 A 类还是 B 类,其计算公式为

$$d(X, Y) = \left[\sum_{i=1}^3 ((x_i + \xi)^2 - y_i^2) \right]^{1/2}, \quad (2)$$

其判别法则为

$$\begin{cases} d(X, X_A) < d(X, X_B) \Rightarrow X \in A \\ d(X, X_A) > d(X, X_B) \Rightarrow X \in B \end{cases}, \quad (3)$$

2.3.2 判断泰勒锥的大小

泰勒锥在连续变化过程中的形状差别非常小,所以在二值化图形中,使用面积计算方法很难准确的找出泰勒锥的形状变化。故通过找到泰勒锥最低点来判断泰勒锥的状态。

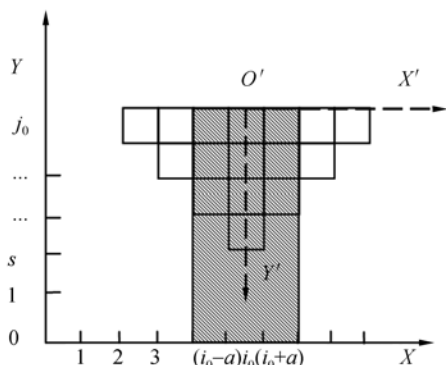


图 3 泰勒锥在直角坐标系下的描述

Fig. 3 Description of Taylor cone in coordinate

把 $f(i, j) = 0$ 记为区域外的像素点; $f(i, j) = 1$ 记为区域内的像素点;在电纺丝的稳定段直径还未达到微米以下时,在二值图像中其直径会以极少像素点被检查到。所以,泰勒锥最底端的监测结果不能以一个像素值来判断,而是要设定一个阈值 λ , λ 是在泰勒锥最底端所属的行内像素值为 1 的像素点的个数。阈值 λ 受喷头的大小、相机的分辨率等因素影响,可通过实验得到。如图 3 所示,设喷头出口的对称中心为 O' 点, $X'O'Y'$ 为矩阵的相对坐标系,而且 O' 点在直角坐标系 XOY 中的坐标是 (i, j) 。如果从 O' 点所在的直线 $y=j$ 处向下搜索,每次扫描一层像素点,直到扫描到 $y=s$ 所在的层,得到像素点之和为 λ ,则判断上一层的记录图幅内的坐标值为 (i, s) 的点为泰勒锥的最底部。判断法则可描述为

$$\sum_0^j f(i, y) \neq 0 \Rightarrow BT(i, s), \quad (4)$$

$BT(i, s)$ 为泰勒锥最底部的坐标。

由于实时采集到的图像中的像素点数量非常多,如果按照上述搜索方法,会因循环次数过多而导致计算机内存资源消耗过大^[15],造成一定的延时,对整个系统的实时性有一定的影响。故提出

在直角坐标系的 X 轴上设置阈值 λ 的方法来判断是否达到泰勒锥的最底部。如图 3 所示,在设置阈值后,会在 $x=i_0-a, x=i_0+a$ 两条直线间形成一个矩形区域,搜索时从 O' 点 $y=j$ 开始向下搜索,搜索区域可以用矩阵描述为

$$F' = \begin{bmatrix} f(i_0-a, j_0) & \cdots & f(i_0, j_0) & \cdots & f(i_0+a, j_0) \\ \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ f(i_0-a, s) & \cdots & f(i_0, s) & \cdots & f(i_0+a, s) \\ \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ f(i_0-a, 0) & \cdots & f(i_0, 0) & \cdots & f(i_0+a, 0) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

3 控制系统的实现

图像的采集和处理是在 MFC 框架内实施的,其软件实现框图如图 4 所示。该框架是为了实现泰勒锥检测和闭环控制系统的四个功能模块而构建的,分别是:

- (1)实时监控画面
- (2)相机参数调节
- (3)实时图像处理
- (4)DDE 通讯

这个软件框架的优点是在主线程外添加各个功能模块的子线程,使各个功能模块并行不悖,同时又相互联系,达到有效利用计算机资源,实现实时图像采集和处理的目的。

在主程序中添加一个 OpenCV 图像处理类,取名 MyIpl。首先必须将对应的头文件包含进来,在项目属性里也需要设置下包含库文件等,这在 OpenCV 使用说明中有详细说明。类中定义了至少一个存放图像变量的指针和需要的图像处理功能函数。关键代码框架如下所示^[16]:

```
IplImage * m_Ipl;//Ipl 图像变量指针
void GetIplData(IplImage * Ipl);//获得图像数据
void CannyEdge(IplImage * img,double threshold1,double threshold2);//Canny 边缘检测
void cvAdaptiveThreshold( const CvArr * src, CvArr * dst, double max_value, CV_A-
```

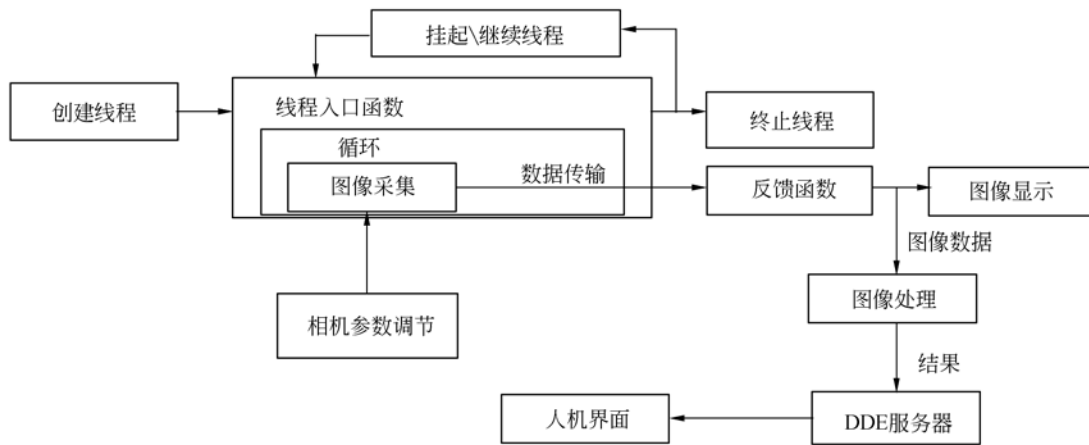


图 4 基于 MFC 的泰勒锥图像采集和处理系统框架

Fig. 4 Image processing framework of Taylor cone based on MFC

DAPTIVE_THRESH_MEAN_C, CV_THRESH_BINARY, int block_size = 3, double param1 = 5); 自适应阈值选取

```
void Statistic(IplImage * img, float * percent); //像素点统计函数
```

```
void Display(IplImage * img); //显示图像};
```

多特征识别的结果被当作控制形态的反馈信号,过程如图 5 所示。在输入固定电压值后,程序将每一次循环中所得到的识别后结果与输入的参考值进行比较,以此给送料系统的伺服电机发送控制转速和转动方向的脉冲。同样的控制方式也可以用在固定送料速度的基础上改变电压值,控

制系统面板如图 6 所示。

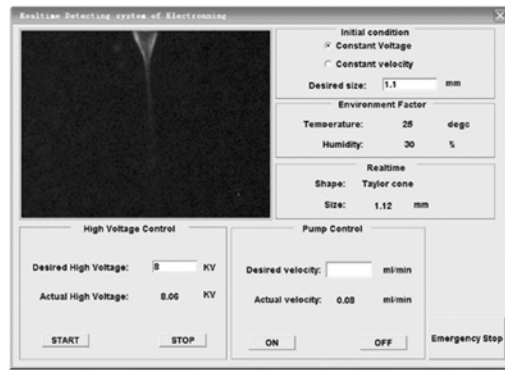


图 6 系统控制面板

Fig. 6 Interface of control system

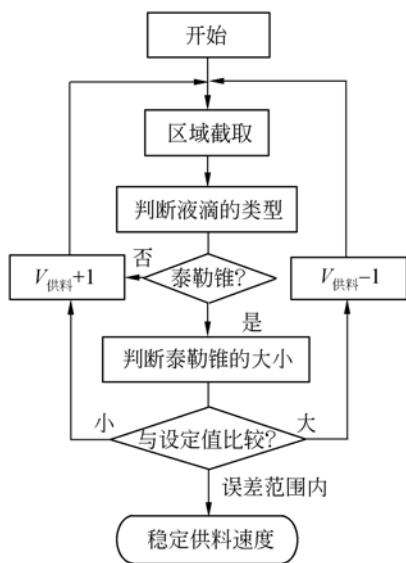


图 5 控制系统框架

Fig. 5 Framework of control system

4 实验

4.1 实验材料及设备

材料: 分子量为 30 万的聚氧化乙烯 (poly ethylene oxide, PEO)、去离子水、无水乙醇。使用质量比为 3 : 2 的去离子水和乙醇混合溶液作为溶剂, 配制 8% 的聚氧化乙烯溶液。为消除“鱼眼”现象, 首先将 PEO 溶于酒精, 并搅拌均匀; 然后添加去离子水。将盛有 PEO 溶液的密封容器放在盛有 40 °C 温水的振动槽内振动 10 min, 使溶质充分溶解, 然后静置 20 min, 去除溶液中的气泡。

设备: 振动搅拌仪, 0~5 万伏数控高压直流电源 (天津东文公司); 自制压力反馈微量供料装置; PointGrey CMLN-13S2M CCD 一台, 快门最

快速度 0.01 ms, 130 万像素; 电子显微镜一台 (x500); 高性能工作站一台 酷睿 i5650CPU, 4G 内存。

4.2 实验方法

在温度 25 °C, 湿度 50% 的环境下, 喷嘴与接收板的距离为 15 cm, 进行三组实验, 分别是: (1) 无监测条件下, 喷头与接收板距离、电压、供料速度都设为固定值; (2) 接收距离和电压为常值, 供料速度为被控变量; (3) 接收距离和供料速度设为常值, 电压为被控变量。

5 结果与讨论

5.1 无图像识别条件下

在无图像识别的情况下, 电压为 8 000 V, 供料速度为设定值 0.015 ml/min。泰勒锥的形状如图 7(a)、7(b) 所示, 由于供料过快, 喷头处会出现流涎现象。最终接收到的电纺丝的实验结果如图 7(c) 所示, 纤维直径不均匀, 且在纤维中会夹杂着较大球状材料堆积现象, 其中用圆圈标记为材料堆积处。

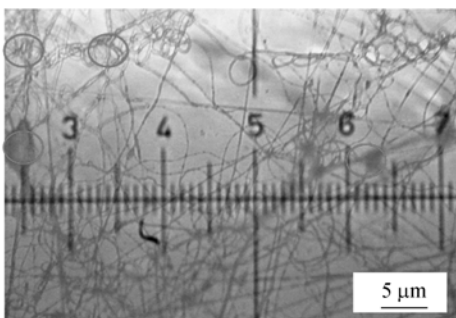
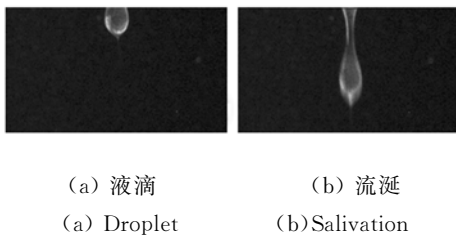


图 7 无监控下的电纺纳米纤维

Fig. 7 Electrospinning without pattern recognition system

5.2 恒定流速值条件下

在有图像识别系统参与, 且流速值设为常值

0.015 ml/min, 锥高设定为 1.1 mm 的情况下, 泰勒锥的形状如图 8(a)、8(b)、8(c)、8(d) 所示, 由液滴状逐渐变化, 形状在经历 0.43 s 后稳定下来, 且此时电压值稳定在 9 300 V。最终得到的纤维形状如图 8e 所示, 纤维形状较为均匀, 且直径在 800~1 000 nm 之间, 纤维中无球状堆积现象。

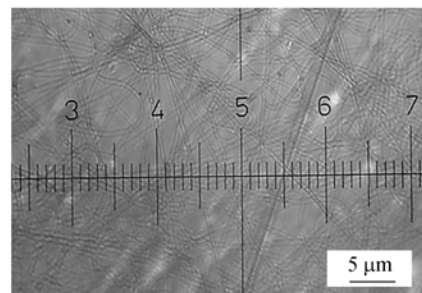


图 8 定电压条件下的电纺纳米纤维

Fig. 8 Electrospinning with fixed voltage

5.3 恒定电压条件下

在有图像识别系统参与, 先启动电压设备, 电压值稳定在 8 000 V, 锥高设定为 0.8 mm 前提下, 泰勒锥的变化过程如图 9(a)、9(b)、9(c)、9(d) 所示, 泰勒锥逐渐变大, 在经历 0.7 s 后形状稳定下来, 此时流速自调整为 0.012 ml/min。得到的纤维形貌如图 9(e) 所示, 纤维直径为 400~600 nm 且形貌均匀, 无球状聚集现象产生。

从实验结果可以看出, 在无监测情况下, 材料会出现由于供料过快而导致的流涎现象, 会影响到最终接收到的效果。而加入监测系统后, 流涎

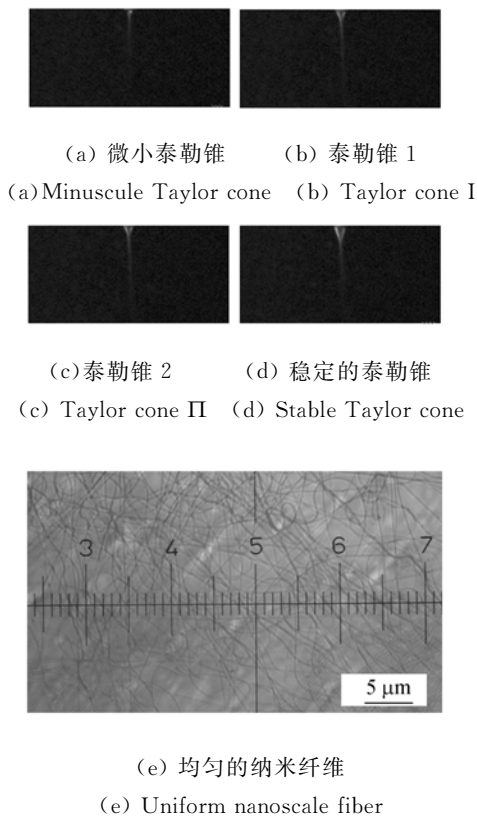


图 9 定流速条件下的电纺纳米纤维

Fig. 9 Electrospinning with fixed voltage

现象不再出现,泰勒锥能够快速地平稳,而且所成型的纤维较为均匀。从带有监测的两组实验中可以看出,系统的响应时间不同,第三组比第二组反应时间稍长,这是由于供料系统要比数字电源需要更多的响应时间。

参考文献:

- [1] Formhals. Process and apparatus for preparing artificial threads;US,1975 504[P]. 1934.
- [2] 李文望,郑高峰,王翔,等. 电纺直写纳米纤维在图案化基底的定位沉积[J]. 光学 精密工程,2010,18(10):2231-2238.
LI W W, ZHENG G F, WANG X, *et al.*. Position deposition of electrospinning direct-writing nanofiber on pattern substrate[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10):2231-2238. (in Chinese)
- [3] SELL S, BARNES C, SMITH M, *et al.*. Extracellular matrix regenerated: tissue engineering via electrospun biomimetic nanofibers [J]. *Polymer In-*

另外,从后两组实验中也可以发现纤维直径的变化,这主要是由于供料速度和电压变化导致^[10],但通过建立控制模型并对其解耦的方法较难控制电纺丝的直径。所以,从实验结果看,唯一能够反应供料和电压匹配,并最终影响到纤维形态的就是泰勒锥的大小,泰勒锥的锥高与纤维直径成正比。通过研究泰勒锥的锥高变化与成型纤维直径之间的关系是控制电纺丝直径的最好方式。

6 结 论

电纺丝成型纳米纤维丝多在高压环境下实施,所以很难做到实时监控,本文提出使用图像识别技术解决这一问题。采用工业 CCD 对泰勒锥的形状和大小进行实时监控,在对图像进行滤波、二值化等预处理后,对泰勒锥的面积、边缘周长及锥高等多个特征进行提取和识别,最终识别出泰勒锥的形状和大小,并以此为控制系统的反馈调整供料速度和电压值大小。实验结果表明,在有图像识别系统的情况下,电压和供料速度能够快速自适应匹配,泰勒锥的大小和形状能够快速稳定,实现对电纺丝工艺的稳定性控制,解决出口材料的流涎问题。泰勒锥的大小直接影响纳米纤维的直径,通过对泰勒锥的形状和大小进行有效控制,可以间接地控制纳米级纤维丝的统一性和直径。

ternational,2007,56:1349-1360.

- [4] KUO C, LI W, MAUCK R, *et al.*. Cartilage tissue engineering: its potential and uses [J]. *Current Opinion in Rheumatology*,2006, 18(1):64-73.
- [5] LI W J, TULI R, OKAFOR C, *et al.*. A three-dimensional nanofibrous scaffold for cartilage tissue engineering using human mesenchymal stem cells [J]. *Biomaterials*,2005, 26:599-609.
- [6] 邹科,龙云泽,吴佑实. 静电纺丝制备纳米纤维的进展及应用[J]. 合成纤维工业,2007,30(3):54-57.
ZOU K, LONG Y Z, WU Y SH. Progress and application of electrospun nanofibers [J]. *China Synthetic Fiber Industry*,2007,30(3):54-57. (in Chinese)

- [7] 郑高峰,王凌云,孙道恒. 基于近场静电纺丝的微/纳米结构直写技术[J]. 纳米技术与精密工程, 2008,(1):20-23.
ZHENG G F, WANG L Y, SUN D H. Micro/Nano-Structure Direct-Write Technology Based on Near-Field Electrospinning [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2008, (1): 20-23. (in Chinese)
- [8] HUANG ZH M, ZHANG Y Z, KOTAKI M, et al.. A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites [J]. *Composites Science and Technology*, 2003, 63 (15): 2223-2253.
- [9] CHARLES J D, CELAL B, MIKO C, et al.. Pressure Control System for Electrospinning Process [J]. *Polymer Engineering and Science*, 2010, 50 (4):800-810 .
- [10] NADERI N, AGEND F, FARIDI-MAJIDI R, et al.. Prediction of nanofiber diameter and optimization of electrospinning process via response surface methodology [J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2008, 8(5):2509-2515.
- [11] DANIEL J S, DARRELL H R. Non-woven fiber assembly for use in forming e. g. medical dressing, comprises fibers including adhesive component, elastomeric component, and hydrophilic component; US, 2006153904-A1[P]. 2004.
- [12] 郭锐,赵万生,李刚. 微细电火花加工的微细电极在线检测[J]. 光学精密工程, 2006, 14(6): 998-1003.
GUO R, ZHAO W SH, LI G. Micro electrodes on-line measurement in micro EDM[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6):998-1003. (in Chinese)
- [13] 吴福培,邝泳聪,张宪民. 基于模式匹配及其参数自适应的 PCB 焊点检测[J]. 光学精密工程, 2009, 17(10):2586-2593.
WU F P, KUANG Y C, ZHANG X M, et al.. Pattern matching and parameter adaptive based PCB solder joint inspection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(10):2586-2593. (in Chinese)
- [14] FRIDRIKH S V, Y J, BREBBER M, et al.. Controlling the fiber diameter during electrospinning [J]. *Physical Review Letters*, 2003, 90 (14): 144502_1- 144502_4.
- [15] 孙燮华. 数字图像处理-原理与算法[M]. 北京:机械工业出版社, 2010:19-25.
SUN X H. *Digital Image Processing-Theory and Algorithm*[M]. Beijing: Science Press, 2010:19-25. (in Chinese)
- [16] Open Source Computer Vision Library Reference Manual, Intel Corporation, 2001.

作者简介:



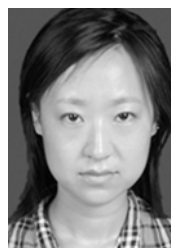
刘大利(1985—),男,安徽五河人,博士研究生,2008年于安徽理工大学获得硕士学位,主要从事快速制造,生物制造,设备在线监测方面的研究。E-mail: 4datianwang@163.com



郭俊(1983—),男,贵州遵义人,工程师,2006年于华中科技大学获得学士学位,2011年于上海大学获得硕士学位,主要从事数控系统的应用及研究。E-mail: guojun@fiyangenc.com



方淑慧(1987—),女,青海人,硕士研究生,2010年于电子科技大学获得学士学位,主要从事电气设备控制研究。E-mail: fangsh1996@gmail.com



井长娟(1985—),女,天津人,硕士研究生,2009年于天津大学获得学士学位,主要从事电气设备控制研究。E-mail: chinajingchangjuan@yahoo.com.cn



刘媛媛(1979—),女,新疆石河子人,博士,副教授,硕士生导师,2008年于上海交通大学获得控制理论与控制工程专业博士学位,主要从事控制系统设计理论与工程应用问题的研究。E-mail: yuanyuan_liu@shu.edu.cn



胡庆夕(1959—),男,安徽明光人,博士,教授,博士研究生导师,1997年于华中科技大学获得博士学位,主要从事快速成型、仿生建模及再生骨支架制造的研究。E-mail: huqingxi@shu.edu.cn

● 下期预告

双球面法标定立式参考球面精度分析

谷勇强^{1,2},苗二龙¹,隋永新¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院,北京 100039)

为提高立式光学系统中光学元件的面形检测精度,立式 Fizeau 干涉仪的参考球面在使用前需要进行严格标定,确定因为重力、安装夹持力等导致的面形形变量。双球面法是一种高精度的球面绝对标定方法。首先对双球面法标定的算法进行推导;进而对影响检测精度的环境、重力、安装夹持力等因素做了理论分析或模拟计算;最后,利用双球面法对立式 Fizeau 干涉仪的参考球面进行标定,并利用误差合成理论对实验结果进行了分析。实验结果发现,利用双球面法对 F/1.5 的立式 Fizeau 干涉仪参考面的标定精度为 2.3 nm。其中,算法本身以及实验操作的引起的测量重复性不大于 0.7 nm,包含环境误差时的重复性低于 1.2 nm;重力导致的面形形变约为 0.9 nm;标准镜安装导致的面形形变约为 1.7 nm。因此,双球面法具有很高的标定精度;环境对检测精度的影响与干涉腔长度有关,长度增加时影响很明显;立式工作时,重力、安装等导致的标准镜参考球面的面形形变很大,在高精度使用前必须进行标定。