

文章编号 1004-924X(2010)07-1605-08

注射成型微流控芯片微沟槽成型质量的无损检测

祝铁丽,周 亮,刘永云

(大连理工大学 模具研究所,辽宁 大连 116023)

摘要:针对注射成型的微流控芯片具有微沟槽深度成型质量好,宽度成型质量较差,而且各处微沟槽的宽度成型质量不均衡的特点,利用 Matlab 软件的图像处理工具箱开发了微流控芯片微沟槽显微平面图片的图像处理系统,实现了利用常用的光学显微镜对微沟槽的成型质量进行无损检测。引入人工干涉来进行高效图像去噪处理。根据提取的微结构轮廓点进行了微沟槽轮廓的曲线拟合,测量了微沟槽的开口宽度和底部宽度。对由微流控芯片微沟槽显微平面图片所得到的测量结果与由对微流控芯片进行切片检测所得到的测量结果进行比较,结果显示,两种方法得到的微沟槽开口宽度相差约 4%,槽底部宽度相差约 3%,说明微沟槽显微平面图片的测量结果能够满足注射成型工艺研究中微流控芯片微结构成型质量检测的要求。

关键词:注射成型;微流控芯片;微沟槽;图像处理;无损检测

中图分类号:TQ317.3;TP391.41 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20101807.1605

Non-destructive testing for micro grooves of injection molded micro-fluidic chips

ZHU Tie-li, ZHOU Liang, LIU Yong-yun

(*Institute of Mold & Die, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China*)

Abstract: Injection molded micro-fluidic chips are characterized by that their micro grooves show perfect imaging quality in height but not satisfactory in width, meanwhile the chip cannot remain the uniform quality for the width of micro groove everywhere. Therefore, this paper proposes an image processing system based on Matlab to process the micro flat photo of the micro groove of an injection molded micro-fluidic chip and to complete the non-destructive testing for the micro groove. In image processing, the artificial interference is introduced to eliminate the image noise effectively and the profile point extracted from the photo are used to fit the profile lines of the groove. Then, the opening width and bottom width of the micro groove are measured. Measured data of microchannel widths from the micro flat photos are compared with those data obtained from cross-sectional photos of micro-channel slices. Results indicate that the differences between the two measuring ways are less than 4% for the opening width and less than 3% for the bottom width, respectively. Obtained data demonstrate that the proposed non-destructive method based optical telescope can meet the requirements of

收稿日期:2009-09-15;修订日期:2009-11-26.

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划资助项目(No. 2006BAF04B13)

micro-fluidic chips for measurement of molded quality in injection molding.

Key words: injection molding; micro-fluidic chip; micro groove; image processing; non-destructive testing

1 引言

微流控芯片是一种采用微细加工技术在数平方厘米的面积上制作出微沟道网络结构以实现集样品制备、进样、分离、检测于一体的高效、低耗微型分析系统^[1-2]。聚合物微流控芯片的制备方法主要有热压成型^[3-6]和注射成型^[7-10]两种。热压成型的微流控芯片由于其各处的成型条件相同,所以各处微沟槽的成型质量相同,只要在微流控芯片的某个位置进行剖切并检测此位置处的微沟槽横截面,即可完成对微流控芯片微结构成型质量的检测,但是热压成型微流控芯片的生产周期较长,约 5~10 min;而注射成型的微流控芯片生产周期非常短,约 40~60 s,非常有利于批量生产,所以微流控芯片的注射成型已成为当前的研究热点。

注射成型的微流控芯片的微沟槽通常在深度上成型质量较好,但在宽度上成型质量却较差,尤其是塑料熔体的表面张力以及高粘度引起的塑料熔体在模具微凸起根部的滞流,会使微沟槽的开口处出现圆角,而不是复制出模具微凸起根部的直角,这是注射成型微流控芯片的主要问题。此外,注射成型的微流控芯片由于各处的成型条件不尽相同,因此微沟槽宽度各处的成型情况并不一致,需要对各处的成型质量都进行检查。所以对于注射成型微流控芯片的质量检测,如果仍像检测热压成型的微流控芯片那样采用切片的方法,不仅工作量太大,而且无法实现全面检测。除了切片以外,微沟槽的检测还可以通过离子溅射等途径在其表面镀上 5~10 nm 厚的金膜后,用扫描电子显微镜获取微沟槽的三维形态;或者用共聚焦激光扫描显微镜获取其横截面的三维形态,但前一种方法的检测周期长,后一种方法所需的设备又昂贵罕有。为此,本文针对注射成型的

微流控芯片具有微沟槽深度成型质量好、宽度成型质量较差的特点,基于 Matlab 软件开发了微流控芯片微沟槽显微平面图片的图像处理系统,从而可以利用常用的光学平面显微镜对微流控芯片的微沟槽成型质量进行快速、全面的无损检测。

2 微流控芯片的注射成型

在研究注射成型工艺参数对微流控芯片微沟槽成型质量的影响时,为了减少干扰因素,微流控芯片的微沟槽网络结构被简化为一条长 40 mm 的纵槽与两条长 5 mm 的横槽,微沟槽的横截面形状则设计为宽 85 μm ,深 50 μm 的矩形,如图 1 所示。

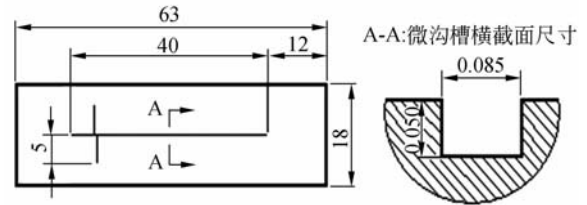


图 1 微流控芯片的设计尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Design of microfluidic chip(Unit:mm)

图 2 表示了微流控芯片注射成型模具的型腔部分,其中带有矩形截面微凸起的镍镶块由大连理工大学微系统研究中心使用紫外光刻光敏树脂-电铸镍的方法制得。使用此微流控芯片注射成型模具与台湾奇美公司的聚甲基丙烯酸甲脂(PMMA),在德国 Boy12A 型微注射机上注射成型的微流控芯片如图 3 所示。注射成型选用的工艺参数为:料筒温度 240 $^{\circ}\text{C}$,模具温度 80 $^{\circ}\text{C}$,注射速度 96 mm/s,注射压力 100 MPa,保压压力 80 MPa,保压时间 10 s,冷却时间 20 s。

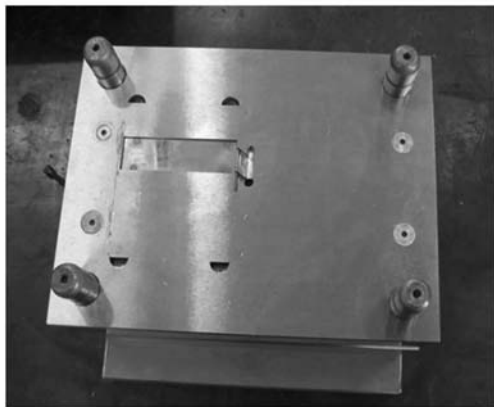


图2 微流控芯片注射模具的型腔

Fig. 2 Cavity of injection mold for microfluidic chip

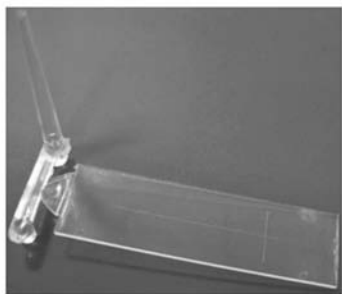


图3 注射成型的微流控芯片及其浇注系统

Fig. 3 Injection molded microfluidic chip and its runner system

3 微沟槽显微平面图片的图像处理

图4是用日本Keyence VHX-600型数字显微镜采集的微流控芯片微沟槽显微平面图片。图片的像素数为 $1\ 600 \times 1\ 200$,显微镜的放大倍数为 $500\times$,此时的图片分辨率为 $0.38\ \mu\text{m}/\text{pixel}$ 。图4中,微沟槽上、下两侧的阴影是由所注射成型微沟槽的开口圆角(参见图5)造成的。由于微沟槽的底部与微沟槽的外面均为平坦表面,因此呈现为亮的区域。可见,微沟槽显微平面图片上的两个外边缘之间的距离代表微沟槽的开口宽度,两个内边缘之间的距离代表微沟槽的底部宽度。

Keyence VHX-600型数字显微镜虽然有较强的图像处理能力,但用于选取测量位置的直线(图6中与微沟槽轮廓大致垂直的线)完全由操作者人为画出,无法保证被测两点连线与微沟槽轮廓的垂直,而且其三维合成结果(图6下方的V

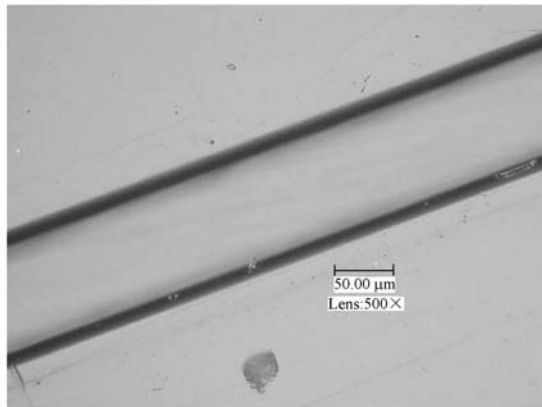


图4 微沟槽的显微平面图片

Fig. 4 Micro flat photo of micro groove



图5 注射成型微流控芯片的微沟槽横截面

Fig. 5 Cross section of micro groove of injection molded micro- fluidic chip

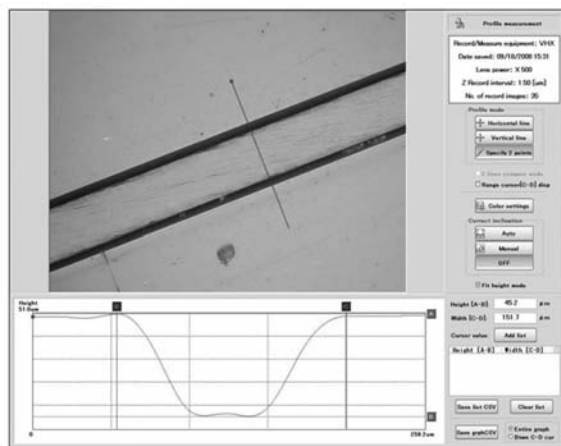


图6 Keyence VHX-600型数字显微镜的图像处理

Fig. 6 Image processing of Keyence VHX-600

型曲线)与实际情况也有较大差别,为此,本文针对微流控芯片微沟槽宽度的测量开发了显微平面图像处理系统。

微沟槽显微平面图片的图像处理程序是基于Matlab软件的图像处理工具箱开发的,包括图像灰度化模块、图像边缘提取模块、图像轮廓拟合模块及微沟槽宽度测量模块4部分,如图7所示。

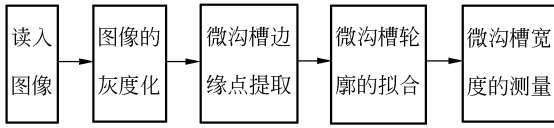


图 7 微沟槽显微平面图片的图像处理过程

Fig. 7 Image processing of microgroove flat photo

3.1 图像灰度化及边缘提取

对数字显微镜采集到的真彩图像,首先将其转化为灰度图像,然后利用 canny 微分算子进行边缘提取。在进行边缘提取时,所选取的转换阈值应能够较好地筛选出所考察对象的形貌特征信息,特别是在问题对比分析中,应具有较好的区分度^[11]。本文先采用较大的阈值范围(如 0.1~0.9)与步长(如 0.1),提取出 10 张边缘图片,以能提供足够的信息反映微沟槽轮廓的特征为依据,缩小最优阈值的搜索范围;再以更小的步长(如 0.01)在缩小后的阈值范围内重复上述的边缘提取与比较过程,确定最优阈值,从而最大程度地保留微沟槽的边缘像素点,同时尽可能减少噪声点。对图 5 所确定的最优阈值为 0.11,边缘提取后所得到的二值图像如图 8 所示。

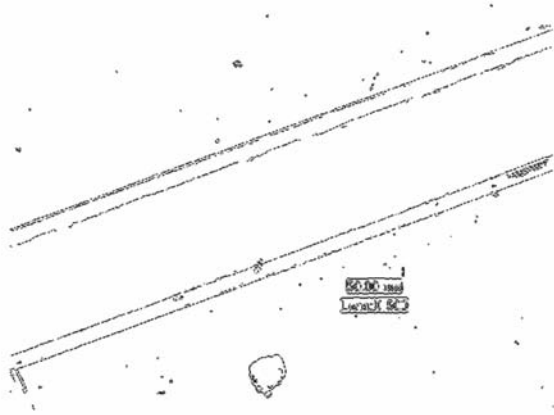


图 8 阈值为 0.11 时的微沟槽边缘提取图片

Fig. 8 Edge extraction of micro groove with threshold value of 0.11

3.2 微沟槽轮廓拟合

边缘提取后的二值图像除了含有所需的微沟槽轮廓点外,还有许多噪声点。对噪声点的处理,通常是采用滤波方法^[12-14],但是滤波处理在清除噪声点的同时,不可避免地会将图像变得模糊,因此,本文不采用滤波方法处理噪声点,而是引入人工交互操作,在微沟槽待拟合轮廓的两侧划定需

要处理的图像区域,从而高效地排除噪声点。图 9 中以虚线表示的两条直线即为人工设定的辅助线,通过在图像处理程序中规定只能在这两条辅助线之间搜索用于拟合微沟槽的上侧外轮廓的像素点,即将不需要拟合的像素点排除在数据处理范围之外。

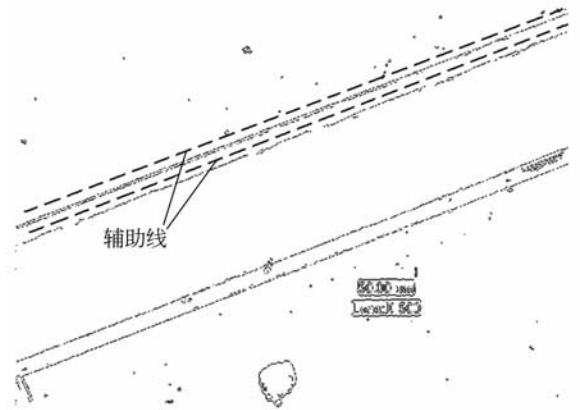


图 9 待拟合轮廓的像素坐标搜索范围划定

Fig. 9 Artificial interference to define the area of picking up points for profile fitting

本文中的微沟槽轮廓是直线,因此对搜索到的边缘像素点用最小二乘法进行直线拟合,根据求出的直线斜率和截距可绘出所拟合的直线。同样可求出微沟槽的上侧内轮廓、下侧内轮廓以及下侧外轮廓的直线斜率和截距。为了使拟合出的各轮廓直线与微沟槽显微平面图片之间有直观的对照以便检验拟合结果,可将拟合出的微沟槽各轮廓直线绘制到微沟槽显微平面图片中。程序运行结果的输出图像如图 10 所示。

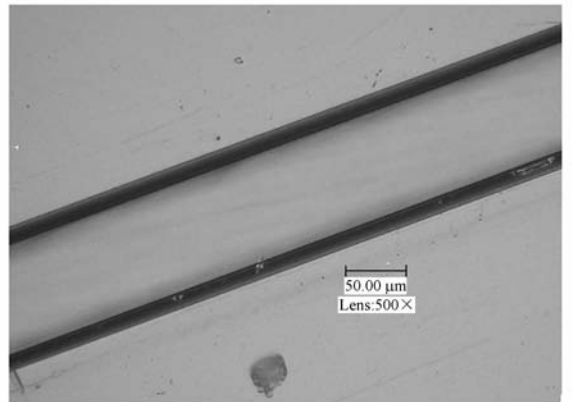


图 10 微沟槽各轮廓直线的拟合结果

Fig. 10 Fitted lines for profiles of micro groove

3.3 微沟槽宽度测量

在待测量位置作微沟槽轮廓的垂线,此垂线与微沟槽上、下侧的外轮廓相交,两个交点之间的距离即为测量位置处微沟槽的开口宽度(将像素距离转化为空间距离时利用了显微镜的标尺),而垂线与微沟槽上、下侧内轮廓的两个交点之间的距离即为测量位置处微沟槽的底部宽度。

4 微沟槽显微平面图片测量结果检验

在注射成型的微流控芯片上选择 3 处位置(参见图 11),用于对比微沟槽显微平面图片的测量结果与微沟槽横截面切片的测量结果。首先,在微流控芯片未进行切片之前,对微流控芯片的 3 个不同位置进行微沟槽显微平面图片的采集,再以本文的图像处理程序对其进行微沟槽开口宽度与底部宽度的测量,测量结果见图 12(a),图 13(a)与图 14(a)。然后,在采集微沟槽显微平面图片的 3 个位置处将微流控芯片切断,拍摄微沟槽横截面的显微图片,经过图像处理,根据显微镜的标尺得到微沟槽的开口宽度、底部宽度以及深度,测量结果见图 12(b),图 13(b)与图 14(b)。

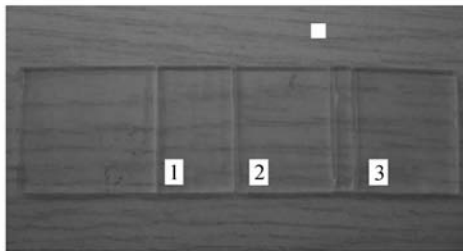
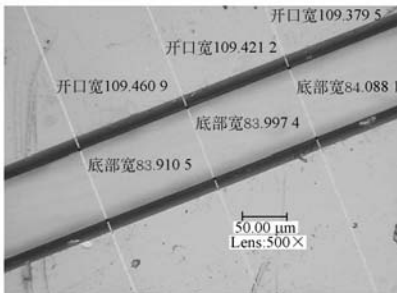


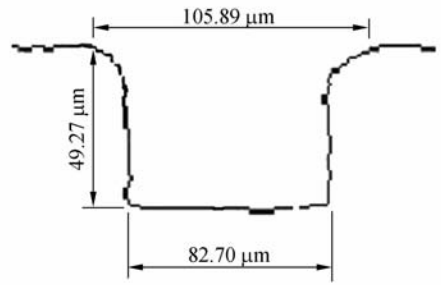
图 11 微流控芯片的剖切位置

Fig. 11 Division positions of microfluidic chip



(a) 显微平面图片

(a) Micro flat photo

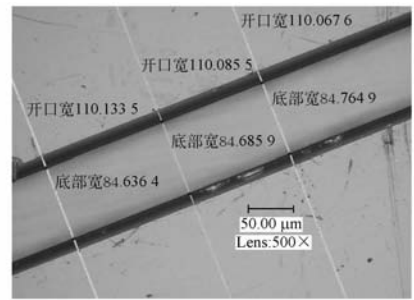


(b) 横截面图片

(b) Cross-section photo

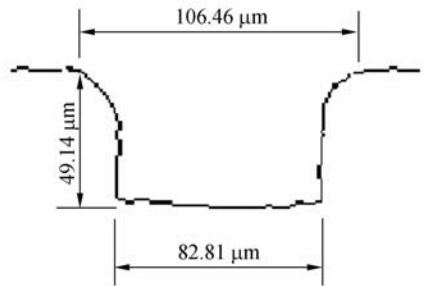
图 12 位置 1 处的微沟槽测量结果

Fig. 12 Measurement results of micro groove at position 1 of the microfluidic chip



(a) 显微平面图片

(a) Micro flat photo



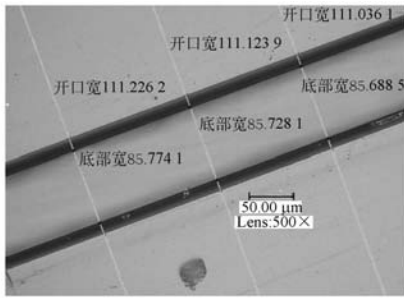
(b) 横截面图片

(b) Cross-section photo

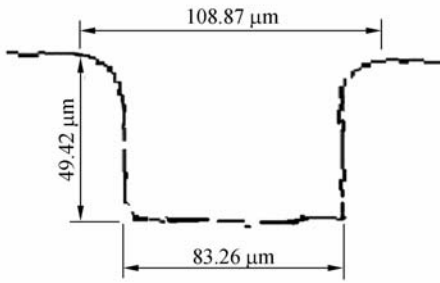
图 13 位置 2 处的微沟槽测量结果

Fig. 13 Measurement results of micro groove at position 2 of microfluidic chip

表 1 是微沟槽显微平面图片测量结果与微沟槽横截面图片测量结果的对比,其中微沟槽显微平面图片的测量数据是取每幅显微平面图片中的平均值。可以看出,在微沟槽开口宽度的测量上,这两种方法的绝对差值低于 $5 \mu\text{m}$ (微流控芯片的微结构成型精度要求为 $\pm 5 \mu\text{m}$),相对差值



(a) 显微平面图片
(a) Micro flat photo



(b) 横截面图片
(b) Cross-section photo

图 14 位置 3 处的微沟槽测量结果

Fig. 14 Measurement results of micro groove at position 3 of microfluidic chip

低于 4%；在微沟槽底部宽度的测量上，这两种方法的绝对差值低于 $3 \mu\text{m}$ ，相对差值低于 3%。此外，由微沟槽显微平面图片所获得的微沟槽开口宽度及微沟槽底部宽度均大于微沟槽横截面图片的测量数据，这是因为在对微沟槽的切片进行拍摄时，很难将微沟槽切片的安放位置调整至使微沟槽的横截面与显微镜观察方向垂直，因此该处横截面后面的微沟槽通道会在微沟槽横截面图片上产生阴影，从而在提取微沟槽横截面边缘时使微沟槽的宽度变窄。可见，切片检测的方法虽然

能直观地观察微沟槽的横截面形状并提供深度方面的测量数据，但由微沟槽横截面图片获得的微沟槽开口宽度及微沟槽底部宽度的测量数据会偏小，而且在切片过程中微沟槽不可避免会发生变形。因此，对注射成型微流控芯片微结构进行检测时，利用微沟槽显微平面图片来获得最想知道的微沟槽开口宽度不仅快速、便捷，不会对微流控芯片造成破坏，并且测量数据更为准确。

表 1 微沟槽平面图片与横截面图片的测量结果对比

Tab. 1 Comparison between micro flat photo and cross-section photo for micro groove

	微沟槽显微平面 图片测量结果	微沟槽横截面 图片测量结果	相对 差值
开口 1#	$109.42 \mu\text{m}$	$105.89 \mu\text{m}$	3.33%
宽度 2#	$110.10 \mu\text{m}$	$106.46 \mu\text{m}$	3.42%
/ μm 3#	$111.13 \mu\text{m}$	$108.87 \mu\text{m}$	2.08%
底部 1#	$84.00 \mu\text{m}$	$82.70 \mu\text{m}$	1.57%
宽度 2#	$84.70 \mu\text{m}$	$82.81 \mu\text{m}$	2.28%
/ μm 3#	$85.51 \mu\text{m}$	$83.26 \mu\text{m}$	2.70%

5 结 论

本文基于 Matlab 软件开发了微沟槽显微平面图片的图像处理程序，对注射成型微流控芯片的微沟槽进行了宽度测量。其测量结果与切片检测得到的开口宽度测量数据相差约 4%，底部宽度测量数据相差约 3%，说明微沟槽显微平面图片的测量结果能够满足注射成型工艺研究中微流控芯片微结构成型质量检测的要求。利用微沟槽显微平面图片进行检测，不仅避免了微沟槽切片时带来的形变，最重要的是能够对各处的微沟槽成型情况进行检测，有助于加快微流控芯片注射成型工艺的研究进程。

参考文献:

- [1] 方肇伦. 微流控分析芯片[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
FANG ZH L. *Microfluidic Chip* [M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)

- [2] 林炳承, 秦建华. 微流控芯片分析化学实验室[J]. 高等学校化学学报, 2009, 30(3): 433-445.
LING B CH, QIN J H. Analysis laboratory based on a microfluidic chip [J]. *Chemical Journal of Chinese Universities*, 2009, 30 (3): 433-445. (in Chinese)

- [3] KRICKA L J, FORTINA P, PANARO N J, *et al.*. Fabrication of plastic microchips by hot embossing[J]. *Lab Chip*, 2002, 2(1): 1-4.
- [4] 王晓东, 罗怡, 刘冲, 等. 塑料(PMMA)微流控芯片微通道热压成形工艺参数的确定[J]. *中国机械工程*, 2005, 16(22): 2061-2063.
- WANG X D, LUO Y, LIU CH, *et al.*. Process parameter determination in fabrication of microchannel of plastic (PMMA) microfluidic chips using hot-embossing method[J]. *China Mechanical Engineering*, 2005, 16(22): 2061- 2063. (in Chinese)
- [5] 贺永, 傅建中, 陈子辰. 微热压过程中聚合物流动形态的研究[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(2): 270-278.
- HE Y, FU J ZH, CHEN Z CH. Study on polymer flow profile in micro hot embossing[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2): 270- 278. (in Chinese)
- [6] 申溯, 周雷, 魏国军, 等. 微区微纳米压印技术及设备[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(4): 807-812.
- SHEN S, ZHOU L, WEI G J, *et al.*. Design of distributed micro-area micro/nano-imprinting lithographic system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(4): 807- 812. (in Chinese)
- [7] CHIEN R D. Micromolding of biochip devices designed with micro channels[J]. *Sensors and Actuators A*, 2006, 128(2): 238-247.
- [8] LIOU A C, CHEN R H. Injection molding of polymer micro- and sub-micron structure with high-aspect ratios[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2006, 28(11): 1097-1103.
- [9] MURAKAMI O. Effect of molecular weight and molding conditions on the replication of injection moldings with micro-scale V-groove features[J]. *Polymer Engineering and Science*, 2008, 48(4): 697-704.
- [10] 蒋炳炎, 申瑞霞, 沈龙江, 等. 注射成型工艺参数对微结构零件复制度的影响[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(2): 248-256.
- JIANG B Y, SHEN R X, SHEN L J, *et al.*. Influence of processing parameters in injection molding on replication fidelity of microstructure parts [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2): 248- 256. (in Chinese)
- [11] 路杨, 宋亚林, 顾景文. X光胸片中肋骨信息自动提取算法及实现[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2008, 36(9): 1725-1277.
- LU Y, SONG Y L, GU J W. Automatically-extracted algorithm of rib information in chest X-ray image and its implementation [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2008, 36(9): 1725-1277. (in Chinese)
- [12] 陶剑锋, 殷志祥, 廖光洪. 基于模糊中值滤波的图像处理方法[J]. *信息与电子工程*, 2007, 5(5): 391-394.
- TAO J F, YIN ZH X, LIAO G H. Research of fuzzy medium filtering about image processing [J]. *Information and Electronic Engineering*, 2007, 5(5): 391-394. (in Chinese)
- [13] 关新平, 赵立兴, 唐英千. 图像去噪混合滤波方法[J]. *中国图像图形学报*, 2005, 10(3): 332-337.
- GUAN X P, ZHAO L X, TANG Y G. Mixed filter for image denoising [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2005, 10(3): 332-337. (in Chinese)
- [14] 刘权, 吴陈, 潘舒, 等. 边缘保留的图像滤波方法[J]. *微计算机信息*, 2007, 23(3-3): 309-310.
- LIU Q, WU CH, PAN SH, *et al.*. An Edge-preserving image filter [J]. *Microcomputer Information*, 2007, 23(3-3): 309-310. (in Chinese)

作者简介:



祝铁丽(1973—),女,辽宁海城人,讲师,1995年、2002年于大连理工大学分别获学士、博士学位,主要从事精密注射模具设计与制造方面的研究。E-mail:zhutieli@hotmail.com



刘永云(1964—),女,山东烟台人,工程师,主要从事精密注射模具制造方面的研究。E-mail:delllyy@163.com。



周亮(1981—),男,河北蔚县人,硕士研究生,2006年于燕山大学获得学士学位,主要从事数字图像处理技术的研究。E-mail:liangzhouyx@foxmail.com

● 下期预告

圆光栅角度传感器误差补偿及参数辨识

高贯斌,王 文,林 铿,陈子辰

(浙江大学 现代制造工程研究所,浙江 杭州 310027)

为提高圆光栅角度传感器的测量精度,提出一种基于正弦函数和粒子群算法的误差补偿及参数辨识方法。使用光电自准直仪和金属多面体对圆光栅角度传感器的测量误差进行了离散标定,通过对标定数据的频谱分析发现传感器测量误差主要由几种不同频率的正弦函数信号组成,由此提出一种基于正弦函数的圆光栅角度传感器误差补偿模型,补偿模型中包含 7 个待定常量,本文采用粒子群算法求解这 7 个待定常量以克服最小二乘法无法收敛的问题。以待定常量为粒子位置坐标,以平均误差为适值函数,建立一种基于粒子群算法的参数辨识模型,并根据参数辨识模型求出最优的待定常量。应用补偿模型对关节臂式坐标测量机的 6 个圆光栅角度传感器测量误差进行了补偿,实验结果表明:经过补偿后各角度传感器的平均测量误差减小了约 398~1 102.5 倍,大大地提高了传感器的测量精度。