

文章编号 1004-924X(2010)03-0670-07

# UV-LIGA 制作超高微细阵列电极技术

胡洋洋, 朱 菽, 李寒松, 曲宁松, 曾永彬, 明平美

(南京航空航天大学 江苏省精密与微细制造技术重点实验室, 江苏 南京 210016)

**摘要:**采用 UV-LIGA 技术制作了超高金属微细阵列电极, 并利用电解置桩的方法辅助去除 SU-8 胶。通过单次涂胶和提高前烘温度、降低后烘温度的方法制作了厚度达 1 mm 的 SU-8 胶结构; 采取反接电极法在金属基底上电解得到微坑, 增强电铸金属电极与金属基底的结合力, 保证去胶后电铸金属的完整性。选取优化的工艺参数: 单次注射式涂胶, 前烘 110 °C/12 h, 适量曝光剂量, 分步后烘 50 °C/5 min、70 °C/10 min、90 °C/30 min, 反接电极电解 10 V/15 min 等, 获得了高 900  $\mu\text{m}$ 、线宽 300  $\mu\text{m}$  的金属微细阵列电极结构。试验表明, UV-LIGA 技术是一种高效、经济的制造超高微细阵列电极的有效手段。

**关键词:**UV-LIGA; SU-8 胶; 电解; 去胶; 微细阵列电极

**中图分类号:** TN305.7; TG662 **文献标识码:** A

## Fabrication of ultra-high metal micro electrode array using UV-LIGA technology

HU Yang-yang, ZHU Di, LI Han-song, QU Ning-song,  
ZENG Yong-bin, MING Ping-mei

(*Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-manufacturing Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China*)

**Abstract:** UV-LIGA technology was investigated to fabricate the ultra-high micro electrode array, and the micro electrochemical machining was used as an aided method to remove the SU-8 resist. During the lithography process, a SU-8 mold up to 1 mm thick was fabricated on the substrate by methods of single coating, increasing soft bake temperature and decreasing post bake temperature. Before the electroforming process, a reverse polarity procedure was carried out to make the micro roots on the substrate, which could enhance the adhesion of the electroformed micro copper electrode array to the substrate. Using the optimized parameters: single coating; soft bake 110 °C/12 h; post bake 50 °C/5 min, 70 °C/10 min, 90 °C/30 min; electrochemical machining 10 V/15 min *et al.*, the micro electrode arrays with a height of 900  $\mu\text{m}$  and a linewidth of 300  $\mu\text{m}$  were fabricated. The result indicates that UV-LIGA is an excellent method for fabricating ultra-high metal micro electrode arrays.

**Key words:** UV-LIGA; SU-8 resist; electrochemical machining; resist removal; micro electrode array

收稿日期: 2009-10-10; 修订日期: 2009-11-26.

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (No. 50635040); 江苏省自然科学基金资助项目 (BK2007530); 中国博士后科学基金特别资助项目 (No. 200801373)

## 1 引言

微细阵列电极由多根排列整齐的微细电极组合而成,在微细加工和生命科学领域应用广泛,因而成为微细加工领域的研究热点。目前,制作微细阵列电极的方法主要有:LIGA(Lithographie, Galvanoformung und Abformung)技术、电火花线切割技术及电火花反拷技术等。美国密西根大学 Takahata 等通过 LIGA 技术制作了高度为 300  $\mu\text{m}$  的圆柱金属微细阵列电极并用于微细电火花制造<sup>[1]</sup>。美国麻省理工学院 Timothy 等利用电火花线切割技术和化学腐蚀的方法加工了高度达 1 mm 的方形微细阵列电极,并用其成功采集了老鼠脑细胞的活动信号<sup>[2]</sup>。哈尔滨工业大学翁明浩等利用微细电火花线切割技术制作了高度达 500  $\mu\text{m}$  的方形阵列电极,将其用于微细电火花和微细电化学加工<sup>[3]</sup>。松下电器公司的牧野正志等利用电火花超声复合反拷法制作了长度为 250  $\mu\text{m}$  的圆柱阵列电极并用于微细电火花加工<sup>[4]</sup>。上述加工方法中,LIGA 技术由于需要使用昂贵的同步 X 射线发生器作为光源,所以成本非常高;电火花线切割技术只能加工方形结构;电火花反拷法工序较多,设备复杂,加工效率低,且中间电极存在着严重的损耗。

近年来,以 SU-8 胶为光敏材料、采用低廉的远紫外光为光源的 UV-LIGA 技术逐渐成为微细、高深宽比加工的首选加工手段<sup>[5-8]</sup>。但是交联后的 SU-8 胶难以去除,特别是当电铸的金属结构为阳结构(如微细阵列电极)时,去胶产生的应力会导致金属微结构彻底脱落。尽管已经报导了各种各样的去胶方法,如机械法、物理法、化学法(干法和湿法)等<sup>[9-10]</sup>,但上述去胶方法都会不同程度的损坏电铸金属结构,暂时还没有一种经济有效的去胶方法。本文通过电解置桩的方法辅助去除 SU-8 胶,并通过 UV-LIGA 技术制作了高度达 900  $\mu\text{m}$  的微细阵列电极。试验证明这是一种高效、低廉的制作超高金属微细阵列电极的方法。

## 2 试验材料、设备及试验过程

### 2.1 试验材料

本文使用的光刻胶、显影液和去胶液分别为

美国 Micro. Chem. 公司生产的 SU-8 100 光刻胶、PGMEA 显影液和 Removal PG 去胶液。试验用基底为紫铜薄圆片(直径 40 mm,厚度 800  $\mu\text{m}$ )。

### 2.2 试验设备

烘胶台为北京创威纳科技有限公司生产的 BP-2B 型烘胶台;曝光机为信息产业部电子第四十五研究所生产的 BG-401 型光刻机,最大光强为  $30 \times 1000 \text{ W/cm}^2$ ;超声波发生器为宁波科生超声有限公司生产的 KS-300T 型超声清洗机,频率为 33 kHz,功率 0~300 W 可调;电铸电源是艾德克斯电子有限公司生产的 IT6921 型直流电源;采用德国 EPK 公司生产的 MINITEST 600 覆层测厚仪测量胶膜厚度,美国 ADE 公司的 MicroXAM 型三维轮廓仪和日本电子公司的 JSM-5610LV 型扫描电子显微镜检测形貌结构。

### 2.3 试验过程

试验过程如图 1 所示,具体方法及参数如下。

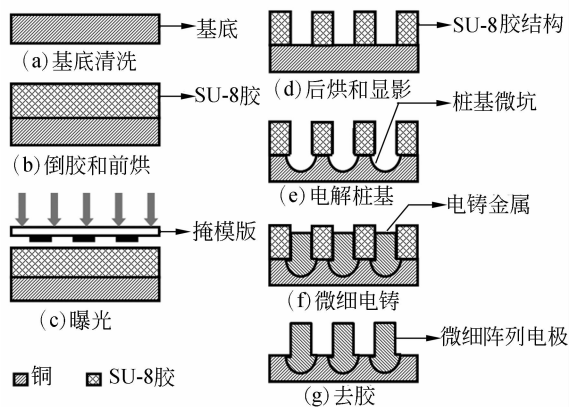


图 1 UV-LIGA 制作微细阵列电极主要过程示意图  
Fig. 1 Partial fabrication processes of fabricating micro electrode array utilizing UV-LIGA process

(1) 基底清洗(图 1(a)):基底先经抛光处理,抛光后粗糙度为  $R_a = 0.05 \mu\text{m}$ ,然后依次经过 10% 稀盐酸、10% NaOH 溶液、丙酮和去离子水清洗,保证表面没有酸、碱和油污残留。然后放入真空烘箱在 150  $^{\circ}\text{C}$  下烘烤 30 min,保证表面没水分残留。

(2) 倒胶和前烘(图 1(b)):为了通过单次涂胶方式获得厚度为 1 mm 的 SU-8 胶,采取注射式涂胶法。SU-8 100 光刻胶中有机溶剂的含量为 27%,前烘后保留 7% 的溶剂量<sup>[11]</sup>,即前烘过程中

胶的溶剂量会减少 20%，因此涂胶量为：

$$v = 1.2\pi r^2 h \times 10^{-4}, \quad (1)$$

式中， $v$  为涂胶量 (mL)， $r$  为基底的半径尺寸 (cm)， $h$  为胶膜厚度 ( $\mu\text{m}$ )。

涂胶后进入前烘过程，将涂好胶的基片放在已经调平的烘胶台上，由于 SU-8 胶在高于其玻璃化转变温度  $T_g$  (55  $^\circ\text{C}$ ) 时具有很好的流动性，依靠 SU-8 胶自身流动性即可以得到平整的转台 SU-8 胶膜。如果要得到厚度达 1 mm 的胶膜，传统的烘胶方式是在 65  $^\circ\text{C}$  下预烘数分钟再升温至 95  $^\circ\text{C}$  烘烤几十小时，这样使烘胶过程过于冗长；由于影响 SU-8 胶光催化剂 (PGA) 性能的温度是 135  $^\circ\text{C}$ ，本试验直接在 110  $^\circ\text{C}$  条件下前烘 12 h，且不通过升温过程，这样可以显著缩短烘胶时间。然后关闭电源，使基片温度自然冷却至室温。

(3) 曝光 (图 1(c))：在 BG-401 光刻机上曝光，曝光时间为 100 s，曝光量为 3 000  $\text{mJ}/\text{cm}^2$ 。

(4) 后烘和显影 (图 1(d))：SU-8 胶在后烘过程中会产生很大的内应力<sup>[12]</sup>，为减少内应力，采用分段升温及降低后烘温度的方式。先由室温缓慢升温至 50  $^\circ\text{C}$ ，保持 5 min，然后升温至 70  $^\circ\text{C}$ ，保持 10 min，最后升温至 90  $^\circ\text{C}$ ，保持 30 min，随炉冷却至室温。使用超声显影，辅助超声振动 30 min，然后用异丙醇 (IPA) 清洗。如果出现白色沉淀，再次使用显影液喷涂去除，并重复使用 IPA 清洗，直至无白色沉淀产生。用去离子水清洗后，在 150  $^\circ\text{C}$  下烘 15 min 进行坚膜。

(5) 电解桩基 (图 1(e))：本试验采用  $\text{CuSO}_4$  电铸液进行电铸。电铸液组成与工艺条件见表 1。电铸时，磷铜板为阳极，涂覆 SU-8 胶的铜基底为阴极。在电铸前，将阴阳极反接，即磷铜板接阴极，涂覆 SU-8 胶的铜基底接阳极，通电产生电化学反应，电解 (ECM) 制作桩基微坑。

表 1 电铸液配方以及试验条件

Tab. 1 Composition of electrolyte solution and operating conditions

电解液成分	含量 (g/L)	试验条件	
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	230	温度	30 $^\circ\text{C}$
浓硫酸 (98%)	60	搅拌方式	冲液搅拌
氯离子	0.08		

(6) 电铸 (图 1(f))：根据法拉第定律，可推得

铸层厚度计算公式如下：

$$\delta = \frac{i_K \eta_K t E}{\rho}, \quad (2)$$

式中， $\delta$  为镀层厚度， $i_K$  为阴极电流密度， $\eta_K$  为阴极电流效率， $t$  为电镀时间， $E$  为镀层金属的电化当量， $\rho$  为镀层金属的密度。

由式 (2) 可以得出，为了获得厚度为 1 mm 的铸层，在 200  $\text{A}/\text{m}^2$  的电流密度下，应连续电铸 38 h。

(7) 去胶 (图 1(g))：电铸结束后，将金属结构连同 SU-8 胶膜一起打磨至 900  $\mu\text{m}$ ，放入 80  $^\circ\text{C}$  去胶液中浸泡 24 h 去胶。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 电解桩基过程

图 2 为微细圆孔阵列 SU-8 胶微结构的扫描电镜照片。圆孔直径为 500  $\mu\text{m}$ ，孔心距为 1 mm，胶膜厚度为 1 mm。由图 2 可见，圆孔结构侧壁陡直，形状规则。

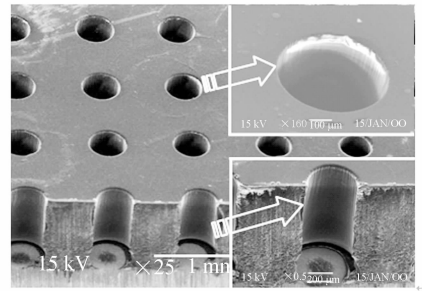


图 2 SU-8 胶微结构

Fig. 2 SEM pictures of SU-8 photoreist mold

本文给出了一种经济、简单的电化学加工微坑的方法，即在电铸前，将阴阳极反接实现电解作用，由此制备桩基微坑，如图 3 所示。

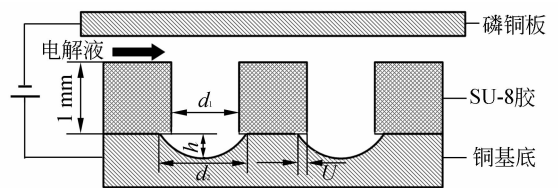


图 3 电解桩基示意图

Fig. 3 Schematic process of electrochemical machining

图 3 中  $d_1$  表示圆孔的直径  $500\ \mu\text{m}$ ,  $d_2$  和  $h$  分别表示电化学作用后桩基的直径和桩基的深度。  $U$  表示置桩前后圆孔半径的变化量,即过切量,可用下面的公式计算

$$U = \frac{d_2}{2} - \frac{d_1}{2}, \quad (3)$$

为了增大过切量,本试验直接采用直流电源供电,试验加工参数见表 2。

表 2 反接置桩加工参数

Tab. 2 Operating conditions of ECM

编号	电压/V	加工时间/min
1	5	5
2	5	15
3	10	5
4	10	15
5	20	5
6	20	15

图 4 为在加工电压为 10 V、加工时间为 15 min 的加工条件下得到的反接置桩后桩基微坑三维形貌图,桩基微坑形貌为典型电化学腐蚀造成的碗状结构。

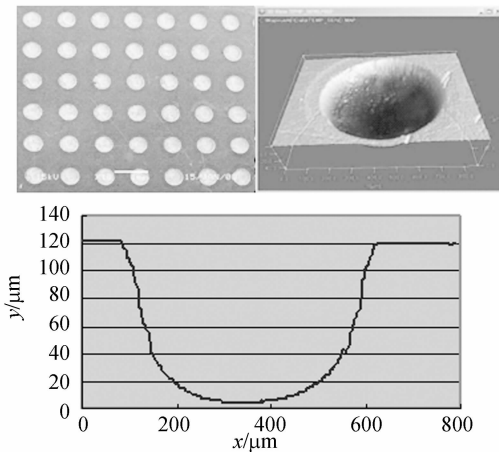


图 4 10 V, 15 min 条件下的桩基形貌

Fig. 4 SEM and surface profilometer pictures of micro roots

图 5 给出了反接电极加工的电流密度随电压变化曲线,可见电流密度随电压增大呈增加趋势。

过切量  $U$  可以增大电铸金属与金属基底的接触面积,同样微坑的深度  $h$  也可以增加电铸金属与金属基底的接触面积,从而增强电铸金属与

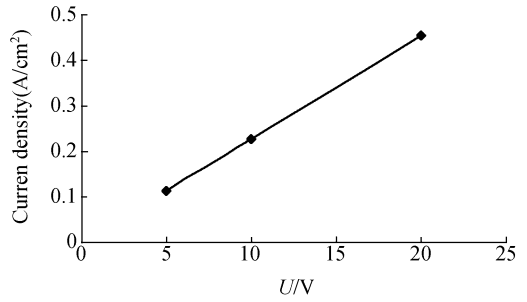


图 5 电流密度随电压变化曲线图

Fig. 5 Current density of different voltages

金属基底的结合力。图 6 和图 7 分别是在整个基片上随机测量 20 个点,得出的过切量  $U$  和桩基深度  $h$  平均值随加工条件变化的曲线。加工时间保持不变时,  $U$  和  $h$  都随电压的增大而增大,这是由于当电压增加时,电流密度不断增大,导致阳极的溶解速度随电流密度增大而增加。当电压恒定时,  $U$  和  $h$  都随加工时间的增加而增大,这是由于阳极随时间增加而不断蚀除造成的。但是,随电压、时间不断增加,相临两孔的间隙会不断变小而导致胶膜脱落,例如本试验中,使用 10 V 电压加工 30 min 后胶膜已出现脱落迹象,所以控制加工条件很重要。

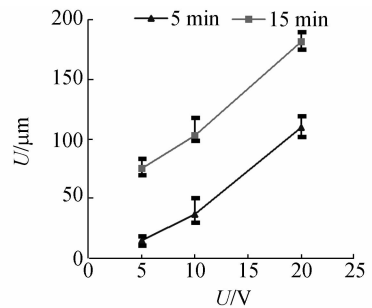


图 6 过切量随加工条件变化曲线图

Fig. 6 Average undercut under different conditions

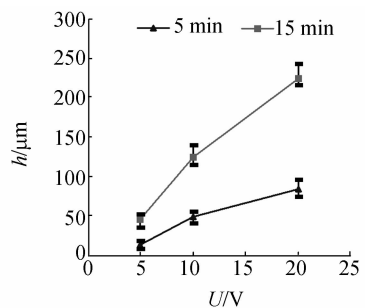


图 7 桩基深度随加工条件变化曲线图

Fig. 7 Average depth under different conditions

由于过切量  $U$  和桩基深度  $h$  都可以用来增强电铸金属与金属基底的结合力,本文选取过切量  $U$  与桩基深度  $h$  之和作为试验的考察指标。图 8 为考察指标 ( $U+h$ ) 随加工条件变化的曲线图。加工时间不变,考察指标随电压的增加而增大;加工电压不变,考察指标随时间的增加而增大。

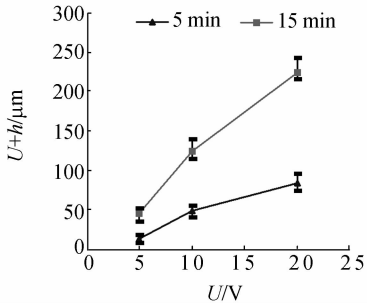
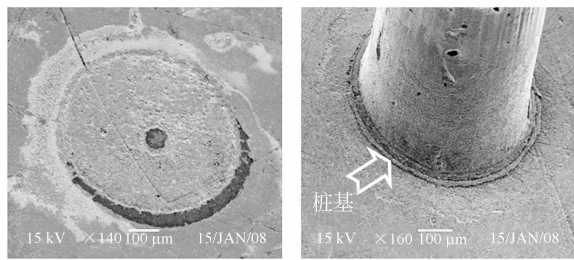


图 8  $U+h$  随加工条件变化曲线图

Fig. 8 Etching factor ( $U+h$ ) of different conditions

### 3.2 电铸与去胶过程

图 9 为未置桩与置桩去胶后的电极对比图。图 9(a) 为未置桩情况,电极完全剥落;图 9(b) 为置桩情况,电极完整无损,电极外围一圈即为桩基微坑填充金属后的形貌。可见,置入桩基是一种有效的提高电铸金属与金属基底结合力的方法,从而保证去胶后电极的完整性。



(a) 未置桩电极 (b) 置桩电极

(a) Electrode without micro root (b) Electrode with micro root

图 9 去胶后的未置桩与置桩电极对比图

Fig. 9 SEM pictures of electrode without and with micro roots

图 10 是未置桩与表 2 所示 6 种加工参数下去胶后完整无损的电极百分比图。如图 10 所示,当加工电压为 10 V、加工时间为 15 min 时,没有电极剥落。对照图 8 可知,当加工参数对应的  $U+h$  值  $>228$  时,去胶后所有的电极将完整无损。试验证实了在加工条件为 20 V, 15 min 时,确实无电极脱落。

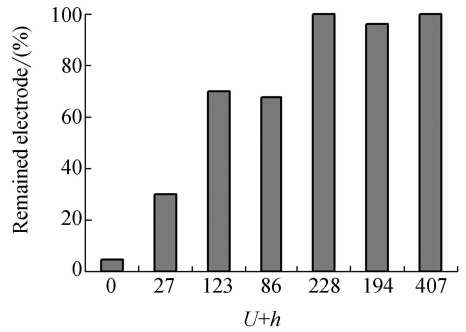
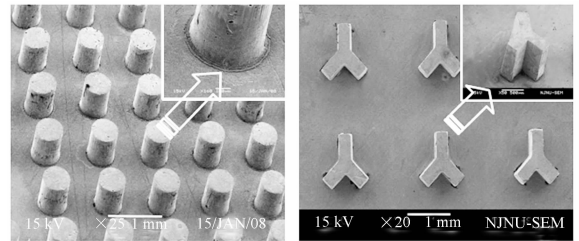


图 10 去胶后残留电极百分比与  $U+h$  值关系图

Fig. 10 Percent of remained electrodes after SU-8 resist removed

图 11 是利用优化过的参数得到的去胶后的阵列电极扫描电镜照片。图 11(a) 是圆柱阵列电极,电极直径为  $500 \mu\text{m}$ ,高度为  $900 \mu\text{m}$ ;图 11(b) 为“人”字形阵列电极,电极单边宽  $300 \mu\text{m}$ ,长  $500 \mu\text{m}$ ,高度为  $900 \mu\text{m}$ 。



(a) 柱型电极

(b) 人字型电极

(a) Column shape electrode array (b) 人 shape electrode array

图 11 去胶后阵列电极 SEM 照片

Fig. 11 SEM pictures of micro electrode array after SU-8 resist removed

## 4 结 论

直接采用 UV-LIGA 技术制作了超高金属微细阵列电极。首先,通过优化的工艺参数制作了厚度达 1 mm 的 SU-8 超厚胶微结构;然后,通过反接电极产生电解作用的方式在基底上获得桩基微坑,微坑可以有效增强电铸金属与金属基底的结合力,从而保证去胶时电铸金属微结构不被剥离。选取过切量  $U$  与桩基深度  $h$  之和作为电铸金属与金属基底的结合力的考察指标, $U+h$  值越大,去胶时脱落的金属微结构越少。可以通过提高电压或延长加工时间来增大  $U+h$  值,当  $U+h$

值大于一定阈值时,去胶后得到的微金属结构将完整无缺。试验通过优化的工艺参数(单次注射式涂胶,前烘 110 °C/12 h,适量曝光剂量,分步后烘 50 °C/5 min、70 °C/10 min、90 °C/30 min,反

接电解 10 V/15 min,连续电铸 38 h 等),获得了高度为 900  $\mu\text{m}$ 、线宽为 300  $\mu\text{m}$  的金属微细阵列电极结构。UV-LIGA 技术是一种高效、经济制造超高微细阵列电极的有效手段。

## 参考文献:

- [1] TAKAHATA K, GIANCHANDANI Y B. Batch mode micro-electro-discharge machining[J]. *Micro-electromech. Syst.*, 2002,11:102-110.
- [2] TIMOTHY A F, SYLVAIN M M, NICHOLAS G H, *et al.*. Microelectrode array fabrication by electrical discharge machining and chemical etching[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2004,51(6):890-895.
- [3] 翁浩明,王振龙. 微细阵列方形轴孔的电火花和电化学组合加工工艺研究[J]. *电加工与模具*, 2007,5:5-8.
- WENG H M, WANG ZH L. Research on micro square array electrodes and holes combination process by EDM and ECM [J]. *Electromachining & Mould*, 2007,5:5-8. (in Chinese)
- [4] 曾伟梁,王振龙. 微细群电极的加工及其封装技术[J]. *电加工与模具*, 2007,1:6-9.
- ZENG W L, WANG ZHEN L. Application of micro-electrode array and its machining encapsulation technology [J]. *Electromachining & Mould*, 2007, 1:6-9. (in Chinese)
- [5] 明平美,朱荻,胡洋洋,等. UV-LIGA 技术制备微型柔性镍接触探针[J]. *光学精密工程*, 2007,15(5):735-740.
- MING P M, ZHU D, HU Y Y, *et al.*. Fabrication of nickel soft contact microprobe based on UV-LIGA [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(5):735-740. (in Chinese)
- [6] ZHANG J, TAN K L, HONG G D, *et al.*. Polymerization optimization of SU-8 PR and its applications in microfluidic systems and MEMS[J]. *J. Micromech. Microeng.* 2001,11:20-26.
- [7] LORENZ H, DESPONT M, LABIANCA N. SU-8: a low-cost negative resist for MEMS[J]. *J. Micromech. Microeng.* 1997,7:121-124.
- [8] 张立国,陈迪,杨帆,等. SU-8 胶光刻工艺研究 [J]. *光学精密工程*, 2002,10(3):266-269.
- ZHANG L G, CHEN D, YANG F, *et al.*. Research on SU-8 resist photolithography process [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(3):266-269. (in Chinese)
- [9] 崔峰,靖向萌,赵小林,等. SU-8 胶膜去除技术[J]. *微细加工技术*, 2007,1:1-6.
- CUI F, JING X M, ZHAO X L, *et al.*. Techniques for remove of SU-8 photoresist mold [J]. *Microfabrication Technology*, 2007, 1: 1-6. (in Chinese)
- [10] GHANTASALA M K, HAYES J P, HARVEY E C, *et al.*. Patterning, electroplating and removal of SU-8 moulds by excimer laser micromachining [J]. *J. Micromech. Microeng.* 2001,11:133-139.
- [11] HO C H, CHIN K P, YANG C R, *et al.*. Ultra-thick SU-8 mold formation and removal, and its application to the fabrication of LIGA-like micro-motors with embedded roots[J]. *Sensors and Actuators A*, 2002,102:130-138.
- [12] 杜立群,朱神渺,喻立川. 后烘温度对 SU-8 光刻胶热溶胀性及内应力的影响[J]. *光学精密工程*, 2008,16(3):500-504.
- DU L Q, ZHU SH M, YU L CH. Effect of post exposure bake temperature on thermal swelling of SU-8 photoresist [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(3):500-504. (in Chinese)

## 作者简介:



胡洋洋(1982—),男,江苏徐州人,博士研究生,1999年于南京航空航天大学获得学士学位,主要从事微机电系统和精密、微细加工方面的研究。E-mail: hyy502@nuaa.edu.cn



李寒松(1975—),男,河南洛阳人,博士,副教授,2006年于西安交通大学获得博士学位,主要从事纳米压印、特种加工、微细加工等方面的研究。E-mail: hsl75@nuaa.edu.cn



曲宁松(1968—),男,辽宁沈阳人,硕士,教授,1990年在沈阳航空工业学院获得学士学位,1995年在南京航空航天大学获得硕士学位,主要研究方向为特种加工、微细加工等。E-mail: nsqu@nuaa.edu.cn



明平美(1974—),男,湖北黄石人,博士,副教授,2006年于南京航空航天大学获得博士学位,现在南京航空航天大学从事博士后研究工作,主要研究方向为特种加工、微细加工等。E-mail: mingpm@nuaa.edu.cn



曾永彬(1977—),男,重庆人,博士,讲师,2008年于南京航空航天大学获得博士学位,主要研究方向为特种加工、微细加工等。E-mail: binyz@nuaa.edu.cn

#### 导师简介:



朱 荻(1954—),男,辽宁沈阳人,博士,博士生导师,长江学者特聘教授,1985年于南京航空航天大学获得博士学位,现为南京航空航天大学校长,主要从事特种加工和微细加工研究。E-mail: dzhu@nuaa.edu.cn

(本栏目编辑:李树军)

#### ●下期预告

## Preisach 迟滞逆模型的神经网络分类排序实现

耿 洁,刘向东,陈 振,赖志林

(北京理工大学 自动化学院,北京 100081)

迟滞非线性严重影响了压电陶瓷执行器纳米定位系统的定位精度,为补偿它的不良影响,提高系统的控制精度,开展了基于压电陶瓷执行器迟滞非线性的逆模型研究。兼顾到迟滞的擦除特性和建模的精确度,提出了一种 Preisach 逆模型分类排序法的神经网络实现方法,用神经网络取代了传统的反查值方法,以避免插值误差。建立了三层 BP 神经网络,运用实测数据进行训练确定各层权值;然后,结合排序得到的电压和位移极值信息,通过神经网络方法拟合出较精确的输入电压值。运用若干组实验数据来检验此逆模型的有效性,结果表明,该神经网络的实现方法将逆模型的平均误差降低到了 1.5 V 以下,最大误差绝对值降低到了 2.7 V 以下。与反查值方法相比,神经网络实现方法有效提高了压电陶瓷执行器纳米定位系统的定位精度。