

文章编号 1004-924X(2008)02-0279-06

# 混合 Preisach 迟滞模型及其性质研究

李 黎, 刘向东, 侯朝桢, 王 伟

(北京理工大学 信息科学技术学院 自动控制系, 北京 100081)

**摘要:** 压电陶瓷执行器物理结构复杂, 通过参数化方法辨识经典 Preisach 模型(CPM)描述其迟滞特性时, 难以找到合适的 Preisach 函数, 模型预测误差较大。为了提高建模精度, 定义了均值迟滞模型作为 CPM 的补充, 通过将均值迟滞模型与 CPM 加权叠加, 得到混合 Preisach 模型(MPM), 并将权值定义为迟滞度参数, 用以描述模型的迟滞非线性强烈程度。证明了 MPM 具有类似于 CPM 的擦除特性和一致特性, 给出了 MPM 的表示定理。最后结合神经网络方法完成了 MPM 的辨识过程。实验结果表明, MPM 及其预测误差最大值较 CPM 降低了  $1.20 \mu\text{m}$ , 同时 MPM 的两种特性也得到了验证。

**关键词:** 压电陶瓷执行器; 迟滞特性; Preisach 模型

**中图分类号:** TN384 **文献标识码:** A

## Mixed Preisach hysteresis model and its properties

LI Li, LIU Xiang-dong, HOU Chao-zhen, WANG Wei

*(Department of Automatic Control, School of Information Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)*

**Abstract:** It is difficult to find a suitable Preisach function in the Classical Preisach Model's(CPM) identification by the parametric strategy because the piezoceramics actuator has complex construction. To improve the modeling accuracy, this paper presented an average hysteresis model as compensation of the CPM. The Mixed Preisach Model(MPM) was obtained by the weight sum of the CPM and the average hysteresis model, and the weight parameter defined as hysteresis degree was used to describe the degree of the hysteresis nonlinearity. As the CPM was, the MPM had the wiping-out and congruency properties, which gave the representation theorem. The neural network was applied to accomplish the identification of the MPM. Experimental results illustrated that the max predicted error of MPM reduces  $1.20 \mu\text{m}$  compared with the CPM and the two properties of the new model have been proven at the same time.

**Key words:** piezoceramic actuator; hysteresis; Preisach model

收稿日期: 2007-09-12; 修订日期: 2007-10-22.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 10402003); 中国博士后科学研究基金资助项目(No. 2005038047)

# 1 引言

随着科学技术的发展,航天技术、微电子工程、计量科学与技术及光学与光电子工程等领域迫切需要亚微米乃至纳米级定位技术,压电陶瓷执行器因其体积小、响应快、精度高、承载大、结构简单等优点,受到了该项技术高度的重视和关注<sup>[1-3]</sup>。然而,压电陶瓷的迟滞非线性在实际应用中严重影响系统定位精度,成为高精度位移控制技术中面临的主要困难<sup>[4-5]</sup>。源于磁滞现象的经典 Preisach 模型<sup>[6]</sup>(Classical Preisach Model, CPM)是一种应用广泛的建模方法,对 CPM 的辨识通常有两种方法:非参数化方法和参数化方法<sup>[7]</sup>。非参数化方法通过实验获得迟滞曲线数据,并将这些实验数据进行微分,直接用于描述模型,因此一旦实验数据出现错误,被微分运算放大后,辨识出的模型精度将受到严重影响;参数化方法根据建模对象的先验信息,利用已有数学分布函数定义一个合适的 Preisach 函数,再利用实验数据辨识该函数的未知参数,这种方法不易受到输入噪声影响,克服了非参数化方法对实验数据错误过于敏感的缺点。然而,由于压电陶瓷迟滞特性复杂,数学分布函数的表达形式有限,难于找到合适的分布函数应用于压电陶瓷迟滞特性辨识<sup>[7]</sup>。因此,在已有工作的基础上<sup>[2]</sup>,本文提出了一种混合 Preisach 模型(Mixed Preisach Model, MPM),该模型为均值迟滞模型与 CPM 加权叠加,均值迟滞模型表示主迟滞环上升支线和下降支线的平均特性,权值定义为迟滞度,用于描述 MPM 迟滞非线性的强烈程度;在证明了 MPM 具有擦除特性和一致特性的基础上,给出了其表示定理;最后利用神经网络完成了 MPM 的参数化方法辨识。试验结果表明,MPM 改善了参数化方法辨识迟滞模型的精度。

## 2 混合 Preisach 模型(MPM)

### 2.1 均值迟滞模型和迟滞度

迟滞环是迟滞特性的重要表现形式。当电压从零初始值单调上升到饱和值  $\alpha_1$ ,再从  $\alpha_1$  单调下降至零电压,压电陶瓷驱动器将产生一个主迟滞环,其中,电压上升过程产生上升支线  $f_a$ ,即极限

上升支线,所有上升支线均位于该极限上升支线之上;电压下降过程产生下降支线  $f_d$ ,称为极限下降支线,所有下降支线均位于该极限下降支线之下<sup>[4]</sup>;如图 1 所示。定义均值迟滞模型如下:

$$\Delta[u(t)] = \frac{f_a[u(t)] + f_d[u(t)]}{2}, \quad (1)$$

$\Delta[u(t)]$  是一个一一映射函数,它描述了主迟滞环的上升支线和下降支线的均值特性。

定义迟滞度参数用来描述迟滞特性非线性程度如下:

$$\rho = \frac{f_d(u_\rho) - f_a(u_\rho)}{\Delta[u_\rho]}, \quad (2)$$

式中,对于任意  $u(t)$ ,当  $u(t) = u_\rho$  时,

$$f_d(u_\rho) - f_a(u_\rho) = \max_{\forall u(t)} [f_d[u(t)] - f_a[u(t)]]. \quad (3)$$

由式(2),当  $0 \leq f_a[u(t)] \leq f_d[u(t)] \leq 3f_a[u(t)]$  时,  $0 \leq \rho \leq 1$ 。对于文中第四节实验装置中的压电陶瓷执行器,试验数据表明,  $\rho$  满足该条件。

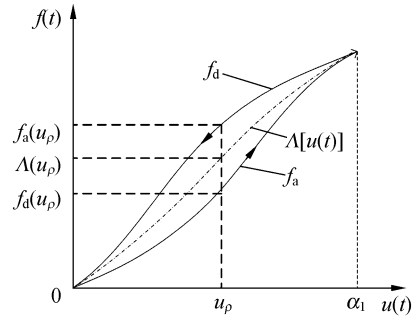


图 1 均值迟滞模型

Fig. 1 Average hysteresis model

### 2.2 混合 Preisach 模型(MPM)

CPM 模型的数学表达式<sup>[4]</sup>如下:

$$\Gamma[u(t)] = \iint_{\alpha \geq \beta} \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\varphi} [u(t)] d\alpha d\beta, \quad (4)$$

式中  $\Gamma[u(t)]$  为模型在  $t$  时刻的输出,  $u(t)$  为模型在  $t$  时刻的输入,  $\mu(\alpha, \beta)$  为 Preisach 函数,  $\hat{\gamma}_{\varphi}(u(t))$  为基本迟滞算子,  $\alpha$  和  $\beta$  分别为其上升和下降阈值,  $\mu(\alpha, \beta)$  是 CPM 中需要辨识的部分。

MPM 的数学表达式为:

$$f(t) = H[u(t)] = \rho \Gamma[u(t)] + (1 - \rho) \Delta[u(t)], \quad (5)$$

式中,  $\Gamma(u(t))$  为 CPM,  $\Delta(u(t))$  为均值迟滞模型,

$\rho$  为迟滞度。当  $\rho$  增大时,CPM 在 MPM 中影响增强,均值迟滞模型影响减弱,MPM 迟滞非线性程度增强。

CPM 具有两个重要的性质:擦除特性和一致特性。擦除特性是指当输入局部极大值大于历史上的某些极大值或者输入的局部极小值小于历史上的某些极小值时,新的局部极值将会擦除这些历史极值,而与这些历史极值相应的历史过程也将被擦除,不再影响该时刻之后的输出;所谓一致性,是指输入极大值和极小值相同的所有次环均一致全等。这两个特性构成了利用 CPM 描述迟滞特性的充分必要条件<sup>[4]</sup>。

MPM 同样具有这两个性质,其证明过程如下:

### 2.2.1 擦除特性

假设两个电压输入信号  $U_1, U_2$  如图 2(a) 所示,其历史极值序列分别为  $(\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2, \alpha_3, \beta_3)$  和  $(\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_3)$ , 且  $(\beta_1 < \beta_3 < \beta_2 < \alpha_3 < \alpha_2 < \alpha_1)$ 。

当  $0 \leq t \leq t_3, U_1 = U_2$ , 则

$$f_{U_1}(t_3) = f_{U_2}(t_3). \quad (6)$$

当  $t_3 < t \leq t_6, U_1$  依次出现了下降极值  $\beta_2$ , 上升极值  $\alpha_3$  和下降极值  $\beta_3$ , 而  $U_2$  仅出现下降极值  $\beta_3$ 。

当  $t = t_6$  时,有

$$f_{U_1}(t_6) = H_{U_1}(\beta_3) = \rho \Gamma_{U_1}(\beta_3) + (1-\rho)\Lambda(\beta_3) = \rho \Gamma_{U_1}(\beta_3) + (1-\rho) \frac{f_a(\beta_3) + f_d(\beta_3)}{2}, \quad (7)$$

$$f_{U_2}(t_6) = H_{U_2}(\beta_3) = \rho \Gamma_{U_2}(\beta_3) + (1-\rho)\Lambda(\beta_3) = \rho \Gamma_{U_2}(\beta_3) + (1-\rho) \frac{f_a(\beta_3) + f_d(\beta_3)}{2}. \quad (8)$$

对于输入信号  $U_1$ , 当  $t = t_6$  时,下降极值  $\beta_3$  小于  $t_4$  时刻的下降极值  $\beta_2$ , 即  $\beta_2$  被下降极值  $\beta_3$  擦除,根据 CPM 的擦除特性,下降极值  $\beta_2$  及其相关的上升极值  $\alpha_3$  对  $t_6$  时刻 CPM 的输出  $\Gamma_{U_1}[\beta_3]$  均无影响。

当  $t = t_6$  时,CPM 的输出  $\Gamma_{U_1}$  仅与极值序列  $(\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_3)$  相关,则

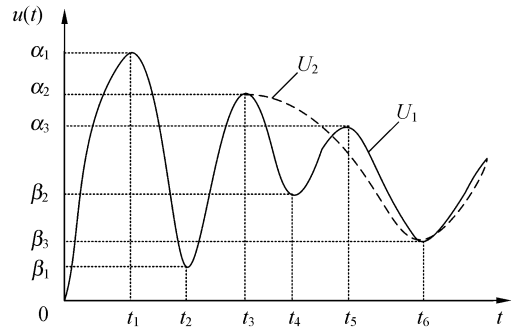
$$\Gamma_{U_1}[\beta_3] = \Gamma_{U_2}[\beta_3]. \quad (9)$$

而对于一个确定的 CPM,  $f_a(\beta_3), f_d(\beta_3)$  和  $\rho$  均是定值,故

$$f_{U_1}(t_6) = f_{U_2}(t_6). \quad (10)$$

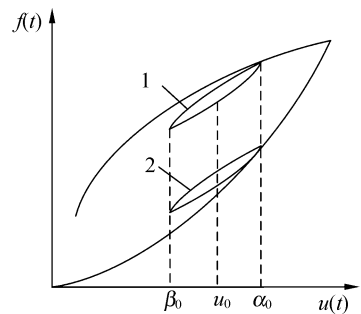
上述证明表明,由于均值迟滞模型不具有局部记忆性,仅与当前输入电压值有关,将均值模型

与经典 Preisach 加权叠加后得到的 MPM 仍然保持擦除特性。



(a) 擦除特性

(a) Wiping-out property



(b) 一致特性

(b) Congruency property

图 2 MPM 的性质

Fig. 2 Properties of MPM

### 2.2.2 一致特性

图 2(b) 在不同时刻极大值  $\alpha_0$  和极小值  $\beta_0$  产生了次环 1 和次环 2。任取电压  $u_0 (\beta_0 \leq u_0 \leq \alpha_0)$ , 设

$$\Delta u = u_0 - \beta_0, \quad (11)$$

在次环 1 的上升支线上,输入电压从  $\beta_0$  变化  $\Delta u$  时,MPM 的输出变化量为:

$$\Delta f_1 = H_1(u_0) - H_1(\beta_0), \quad (12)$$

同理,当电压从  $\beta_0$  沿着次环 2 的上升支线变化到  $u_0$  时,MPM 的输出变化量为:

$$\Delta f_2 = H_2(u_0) - H_2(\beta_0), \quad (13)$$

将式(5)代入式(12)和式(13),可分别得到:

$$\begin{aligned} \Delta f_1 &= \rho \Gamma_1(\beta_0) + (1-\rho)\Lambda(\beta_0) - \rho \Gamma_1(u_0) - \\ & (1-\rho)\Lambda(u_0) = \rho(\Gamma_1(\beta_0) - \Gamma_1(u_0)) + \\ & (1-\rho)(\Lambda(\beta_0) - \Lambda(u_0)) = \\ & \rho \Delta \Gamma_1 + (1-\rho)\Delta \Lambda, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \Delta f_2 = & \rho \Gamma_2(\beta_0) + (1-\rho)\Delta(\beta_0) - \rho \Gamma_2(u_0) - \\ & (1-\rho)\Delta(u_0) = \rho(\Gamma_2(\beta_0) - \Gamma_2(u_0)) + \\ & (1-\rho)(\Delta(\beta_0) - \Delta(u_0)) = \\ & \rho \Delta \Gamma_2 + (1-\rho)\Delta \Delta, \end{aligned} \quad (15)$$

式中,  $\Delta \Gamma_1$  表示 CPM 在输入电压沿着次环 1 的上升支线从  $\beta_0$  变化  $\Delta u$  时的输出变化量,  $\Delta \Gamma_2$  表示 CPM 沿着次环 2 在此电压变化下的输出变化量,  $\Delta \Delta(\beta_0)$  表示均值迟滞模型对应的输出变化量。

由于 CPM 具有次环一致特性, 对于同在极值  $\alpha_0$  和  $\beta_0$  间的次环 1 和次环 2, 从极小值增大同样的电压变化量  $\Delta u$ , 有:

$$\Delta \Gamma_1 = \Delta \Gamma_2, \quad (16)$$

由式(14)、(15), 故,

$$\Delta f_1 = \Delta f_2. \quad (17)$$

同理, 当电压分别沿着次环 1 和 2 从  $\alpha_0$  下降到  $u_0$  时, MPM 的输出变化量也是相同的, 因此, MPM 具有次环一致特性。

与 CPM 的证明过程类似<sup>[6]</sup>, 可以得到 MPM 表示定理: 擦除特性和一致特性构成 MPM 描述迟滞非线性现象的充分必要条件。

### 3 混合 Preisach 模型(MPM)的辨识

由于非参数化方法对实验数据的错误非常敏感, 易于受到噪声干扰, 所以本文采用参数化方法对 MPM 进行辨识。MPM 的辨识过程主要分为以下三个部分:

#### 3.1 均值迟滞模型的辨识

从均值迟滞模型的定义可以看出, 分别利用试验数据拟和出压电陶瓷执行器的主迟滞环的上升支线和下降支线后, 取平均即可得到均值迟滞模型。假设

$$f_a[u(t)] = a_1 u(t)^2 + a_2 u(t) + a_3, \quad (18)$$

$$f_d[u(t)] = b_1 u(t)^2 + b_2 u(t) + b_3, \quad (19)$$

则代入式(1)可得

$$\begin{aligned} \Delta[u(t)] = & \frac{1}{2} [(a_1 + b_1)u(t)^2 + \\ & (a_2 + b_2)u(t) + (a_3 + b_3)], \end{aligned} \quad (20)$$

当  $u(0) = 0$  时,  $\Delta[u(0)] = 0$ , 故,

$$\Delta[u(t)] = \frac{1}{2} [(a_1 + b_1)u(t)^2 + (a_2 + b_2)u(t)], \quad (21)$$

通过实验数据进行多项式拟和即可辨识出  $a_1$ ,

$a_2, b_1$  和  $b_2$  四个参数的值。

#### 3.2 迟滞度的计算

在实验数据描绘的压电陶瓷器主迟滞环上找出下降支线和上升支线间差值最大的电压  $u_\rho$ , 将  $u_\rho$  代入式中, 计算出迟滞度的值。

#### 3.3 Preisach 函数的神经网络辨识

常用的数学分布函数有 Gauss 函数:

$$\mu(k)_{Gs} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_k} \exp\left(-\frac{(k-E_k)^2}{2\sigma_k^2}\right), \quad (22)$$

Cauchy 函数:

$$\mu(k)_{Cy} = \frac{1}{\pi\sigma_k} \frac{1}{1 + [(k-E_k)/\sigma_k]^2}. \quad (23)$$

Preisach 函数  $\mu(\alpha, \beta)$  描述的是  $\alpha$  和  $\beta$  的分布情况,  $\alpha$  和  $\beta$  互相独立, 选取 Gauss 函数作为  $\alpha$  的分布函数, Cauchy 函数作为  $\beta$  的分布函数, 则  $\mu(\alpha, \beta)$  可写为

$$\mu(\alpha, \beta) = \mu(\alpha)_{Gs} \mu(\beta)_{Cy}, \quad (24)$$

式中,  $E_\alpha, E_\beta, \sigma_\alpha, \sigma_\beta$  为待辨识参数。

利用文献[8]介绍的构建神经网络的方法辨识各分布函数的待定参数。选定一组实例参数, 代入混合迟滞模型, 计算出这组模型在同一电压下的输出值, 把实例参数和其对应的模型产生的输出值分别作为输出样本和输入样本训练神经网络。用同样电压驱动压电陶瓷执行器, 获得实测数据, 将它们作为训练后的神经网络的输入数据, 神经网络的输出值即是辨识出的混合迟滞模型的参数值。利用同样的方法完成 CPM 的辨识。

## 4 实验验证

微动平台型号为 MPT-1JRL/I002, 耐压范围为  $-30 \sim 150$  V, 输出位移范围为  $0 \sim 15.02 \mu\text{m}$ ; 内置测微仪采用电阻应变片式传感器, 检测分辨率为  $0.01 \mu\text{m}$ 。

#### 4.1 擦除特性实验验证

输入电压信号为频率 0.01 Hz 的不同幅值的正弦:

$$\begin{cases} 25 + 25\sin(0.02\pi(t-25)) & t \in [0, 75] \\ 25 + 45\sin(0.02\pi(t-75)) & t \in [75, 130] \end{cases}, \quad (25)$$

经典 Preisach 模型(CPM)和混合 Preisach 模型(MPM)预测位移与实验位移如图 3 所示, 实

线表示实验数据,长虚线表示 CPM 预测位移,短虚线表示 MPM 预测位移,混合 Preisach 模型位移误差绝对值的最大值为  $0.41 \mu\text{m}$ ;经典 Preisach 模型位移误差绝对值的最大值为  $1.61 \mu\text{m}$ 。在  $t=100 \text{ s}$  时,信号在  $t=50 \text{ s}$  产生的上升极值被新的极值超过,出现擦除现象,此时混合 Preisach 模型的误差为  $0.12 \mu\text{m}$ ,并没有突然增大,进一步验证了混合 Preisach 模型的擦除特性。

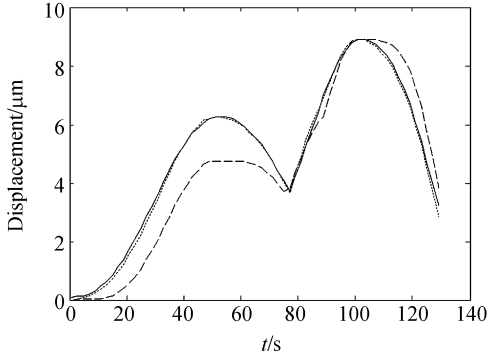


图3 擦除特性实验验证

Fig. 3 Wiping-out experimental verification

#### 4.2 一致特性实验验证

如图4所示,输入电压信号使得压电陶瓷执行器在  $42 \text{ V}$  和  $83 \text{ V}$  之间形成了两个次环,采用 MPM 模型辨识出的位移次环近似一致,验证了 MPM 具有近似一致特性。另外,由图4可见,MPM 的辨识精度高于 CPM。

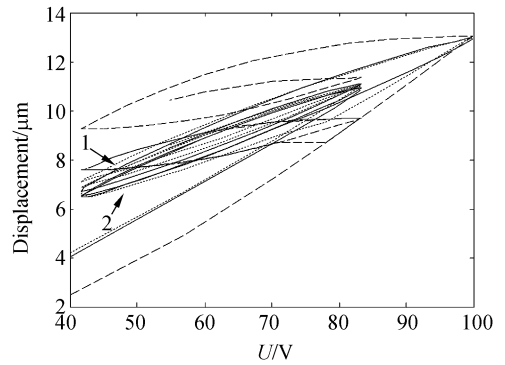


图4 一致特性实验验证

Fig. 4 Congruency experimental verification

## 5 结论

直接设定 Preisach 函数来完成辨识过程的参数化方法辨识出的 CPM 无法保证精度,本文在定义均值迟滞模型和迟滞度的基础上,提出了一种新的 MPM,该模型为 CPM 和均值迟滞模型以迟滞度为权值的加权叠加,具有与 CPM 类似的擦除特性和一致特性,这两种特性构成了 MPM 的表示定理。实验结果表明,由于迟滞度和均值迟滞模型的调节补偿作用,MPM 较 CPM 能够更精确地描述压电陶瓷的迟滞特性,辨识误差有明显降低,同时该模型的两种重要特性也得到进一步的验证。

#### 参考文献:

- [1] 晏祖根,孙立宁,节德刚. 微驱动定位系统及其在误差补偿机器人中的应用[J]. 光学精密工程, 2005,13(6):703-708.  
YAN Z G, SUN L N, JIE D G. Research of micro-driven table based on PZT and its control system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(6):703-708. (in Chinese)
- [2] 刘向东,刘宇,李黎. 一种新广义 Preisach 迟滞模型及其神经网络辨识[J]. 北京理工大学学报,2007,27(2):135-138.  
LIU X D, LIU Y, LI L. A new kind of generalized Preisach hysteresis model and its identification based on the neural network[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2007,27(2):135-138. (in Chinese)
- [3] 王岳宇,赵学增. 补偿压电陶瓷迟滞与蠕变的逆控制算法[J]. 光学精密工程, 2006,14(6):1032-1040.  
WANG Y Y, ZHAO X Z. Inverse control algorithm to compensate the hysteresis and creep effect of piezoceramic [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(6):1032-1040. (in Chinese)
- [4] 节德刚,刘延杰,孙立宁,等. 一种宏微双重驱动精密定位机构的建模与控制[J]. 光学精密工程, 2005,13(2):171-178.  
JIE D G, LIU Y J, SUN L N, et al.. Modeling and control of a macro-micro dual-drive ultra-precision positioning mechanism[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(2):171-178. (in Chinese)

- [5] BEN M R, HU H. A model for voltage-to-displacement dynamics in piezoceramic actuators subject to dynamic-voltage excitations[J]. *IEEE Transactions on Mechatronics*, 2002,7(4):479-489.
- [6] MAYERGOYZ I D. *Mathematical Models of Hysteresis*[M]. New York: Springer-Verlag, 1991.
- [7] YU Y H, XIAO Z C, LIN E B, *et al.*. Analytic and experimental studies of a wavelet identification of Preisach model of hysteresis[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2000,208:255-263.
- [8] MAURIZIO C, ROSARIO M, GIUSEPPE R G, *et al.*. Preisach function identification by neural networks[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2002,38(5):2421-2423.

作者简介:李 黎(1982—),女,江苏人,博士研究生,研究方向为迟滞非线性系统的建模与控制。E-mail:pearli@bit.edu.cn

刘向东(1971—),男,湖北人,教授,博士生导师,研究方向为非线性动力学理论、迟滞非线性系统的建模与控制等。E-mail:xdliu@bit.edu.cn

## ● 下期预告

# 后烘温度对 SU-8 光刻胶热溶胀性及内应力的影响

杜立群<sup>1,2</sup>,朱神渺<sup>2</sup>,喻立川<sup>2</sup>

(1. 大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室,辽宁 大连 116024;

2. 大连理工大学 辽宁省微纳米技术及系统重点实验室,辽宁 大连 116024)

在不同后烘温度条件下,对 SU-8 胶在电铸液中的热溶胀性及胶层的内应力大小进行了研究。SU-8 胶层内应力会使胶体结构开裂变形,而其在电铸液中的热溶胀效应则是造成微电铸结构线宽减小的主要因素,SU-8 胶内应力和溶胀性问题的存在,严重地影响了所制作图形的深宽比和尺寸精确性。在其他工艺参数相同的情况下,测量了不同后烘温度条件下,SU-8 胶微通道线宽随溶胀时间的变化。溶胀实验结果表明,后烘温度越低,SU-8 胶的溶胀变形越大,且热溶胀现象主要发生在前 30 min,其后溶胀速率逐渐减缓而趋于稳定。在 SU-8 胶后烘后,利用基片曲率法的原理测量了胶层内应力的大小,实验数据表明,采用较低的后烘温度可以降低 SU-8 胶层的内应力。因此,在工艺过程中,应该综合考虑热溶胀性及胶层内应力的影响,根据实际加工器件的要求适当选取后烘工艺参数。