

# 引信中应用的加速度传感器的研制

刘晓明\*

(电子科技大学机械电子工程学院 成都 610054)

**【摘要】**讨论了应用于引信中的高g微阵列式加速度传感器的设计理论、布阵方法和微加工工艺。讨论过程中,针对测量不同的加速度值,利用了不同的设计方法和加工工艺及二维传感阵列的布阵设计上的特点,将微加工中三维加工工艺与平面加工工艺相结合,利用体加工技术和高深宽比刻蚀技术,研制出了微阵列加速度传感器的样品。经测试表明符合使用要求,其结果为实用化奠定了基础。

**关键词** 微传感器;阵列式;加速度;微加工技术

**中图分类号** TP212      **文献标识码** A

## Manufacture of Micro Sensor of Acceleration in Fuse System

Liu Xiaoming

(School of Electromechani Engineering, UEST of China Chengdu 610054)

**Abstract** In this paper the method of the design and the manufacture for the high g micro sensor array of the acceleration for the use of the fuse system are presented systematically, synthetically. It is applied the different method of the design and the technique for measuring the different value of the acceleration, and had the different sensor array in the manufacture of the micro sensor array of the acceleration. It is used the 3-D technique union of the 2-D technique of the integrated circuit. This sample meet the demand which is based upon this paper for the application.

**Key words** micro sensor; array; acceleration; micro machining technology

建立引信系统环境识别(如多向加速度)与参数估计的多维信息处理理论产生新的引信原理是当前重要的研究方向。如对硬目标的侵彻或贯穿装甲所使用的巡航导弹、激光制导炸弹等,都存在多向加速度的探测问题。因此大量程的能测量 $10^5$  g微加速度计具有非常重要的应用价值。目前微阵列式加速度计发展非常迅速,它对提高武器作战水平,改进武器性能起着十分重要作用。另外汽车上的安全气囊,在微机器人中,执行器动作的运动速度、加速度和力的大小的检测都需要微阵列式加速度传感器。因此微阵列式加速度传感器的应用范围广,前景十分看好。

随着集成电路平面加工工艺技术日趋成熟,微加工中的三维加工工艺不断地发展,使微传感器、微马达、微泵等制造已成为现实。文献[1]曾提出了传感阵列的布阵设计问题,但未展开研究。本文在文献[2~4]的研究基础上系统、综合地研究了微阵列式加速度传感器,根据理论研究和实验分析,应按加速度值的大小进行微阵列式加速度传感器的研制。

## 1 微阵列加速度传感器的设计理论

加速度的影响因素与加速度之间呈现某种关系,应用多元回归理论研究加速度场的数学模型,当其关系是线性时,应用线性回归理论研究,建立数学模型及其评估方法,而非线性时,应用非线性回归理论

2003年1月7日收稿

\*女 54岁 副教授 主要从事微机电系统设计制造方面的研究

研究,建立数学模型及其评估方法。

### 1.1 线性回归分析

设加速度 $Y$ 与其影响因素 $X_1, X_2, \dots, X_p$ 存在线性关系, 则其数学模型为

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_p X_p + \varepsilon \quad \varepsilon \sim N(0, \sigma^2) \quad (1)$$

式中  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p, \sigma^2$  是与  $X_1, X_2, \dots, X_p$  无关的未知参数。若设  $b_1, b_2, \dots, b_p$  为  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p$  的最小二乘估计, 则式(1)的回归方程为

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_p X_p$$

由最小二乘准则, 可得方程组

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i) = 0 \\ \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i) X_{ij} = 0 \quad j=1, 2, \dots, p \end{cases}$$

用矩阵表示

$$(X^T X) b = X^T Y = B$$

式中

$$b = (X^T X)^{-1} X^T Y = CB \quad (2)$$

当  $X^T X$  可逆时

$$C = (X^T X)^{-1}$$

对回归方程显著性检验, 由总的偏差平方和  $S_t$ , 回归偏差平方和  $S_r$ , 剩余偏差平方和  $S_d$ , 并且  $S_r$  与  $S_d$  互相独立, 应用  $F$  来检验

$$F = \frac{S_r / p}{S_d / (n - p - 1)} \sim F(p, n - p - 1)$$

若  $F > F_\alpha(p, n - p - 1)$ , 则回归方程是显著的。还需对回归系数检验, 在回归方程中剔除影响较小的变量。设  $C_{jj}$  为式(2)中对角线上的第  $j$  个元素, 则

$$F = \frac{b_j^2 / C_{jj}^2}{S_r / (n - p - 1)} \sim F(1, n - p - 1) \quad (3)$$

若对某一系数  $b_j$ , 其  $F < F(1, n - p - 1)$ , 则将此变量剔除, 然后重新估计回归系数, 直至回归系数均为显著。

若要判断是否有不可忽略的因素, 需要通过重复试验判定。重复试验可对一个或多个试验点进行。

若对每个实验点, 均做  $m$  次重复试验:

首先检验统计量

$$F_1 = \frac{S_{if} / f_{if}}{S_w / f_w} \sim F_\alpha(n - p - 1, nm - n)$$

若  $F_1 > F_\alpha(f_{if}, f_w)$ , 需进一步考虑模型。若  $F_1 \leq F_\alpha(f_{if}, f_w)$ , 基本上由试验误差引起, 再作检验。

$$F_2 = \frac{S_r / f_r}{(S_{if} + S_w) / (f_{if} + f_w)} \sim F(p, nm - p, 1)$$

若  $F_2 \leq F_\alpha(f_r, f_{if} + f_w)$  说明回归方程不理想, 试验误差过大, 线性关系不显著。

据此, 可应用逐步线性回归的方法, 将因子一个个地引入, 引入的条件是该因子的偏回归平方和经检验是显著的, 同时, 每引入一个因子, 要对老因子逐个检验, 将偏回归平方和变为不显著的因子剔除。

逐步线性回归算法流程如下:

1) 设定函数  $\text{FunInitial}()$  是输入的实验数据建立结构矩阵  $X$ 、观察值矩阵  $Y$ 、自相关系数矩阵  $R$ 、常数矩阵  $B$ 、增广矩阵  $R^{(0)}$ , 并且设置相应的初始化值, 函数  $\text{FunAssesGet}()$  引入因子时, 计算偏回归平方和及检验的函数; 2) 函数  $\text{FunAssesPel}()$  引入一个因子后, 做剔除旧因子的检验函数; 3) 数组均用首元素表示当前已被使用的数组数目; 4) 数组  $\text{Already Trans Row}[n]$  记录已经被检验过, 放入回归方程中的因子下标; 5) 整

数变量 $L$ 用来计数,对 $n-1$ 次可能的引入因子的处理加以限制;6) 整数变量 $T$ ,  $\text{rausRow}$ 表示当前要进行 $R^{(0)}$ 矩阵变换的行,当其值为 $-1$ ,表示没有转化的行,程序最终输出有效的回归方程。

## 1.2 非线性回归分析

当测试加速度与影响因素呈非线性关系,则需建立非线性模型,并应用阻尼最小二乘法解决。

### 1) 非线性回归数学模型及分析方法

假设函数

$$Y = \varphi(X, \beta) + \varepsilon \quad (4)$$

选择 $\beta$ 的估计值

$$Q(\beta) = \sum_{i=1}^N e_i^2 = \sum_{i=1}^N [y_i - \varphi(X_i, \beta)]^2$$

为最小,用

$$F(\beta) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N e_i^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N [y_i - \varphi(X_i, \beta)]^2 \quad (5)$$

当 $\beta = \hat{\beta}$ 时,得到

$$e(\beta) = \begin{bmatrix} y_1 - \varphi(X_1, \beta) \\ y_2 - \varphi(X_2, \beta) \\ \vdots \\ y_N - \varphi(X_N, \beta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1(\beta) \\ e_2(\beta) \\ \vdots \\ e_N(\beta) \end{bmatrix}$$

式中

$$X = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{ip})^T \quad \beta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_r)^T$$

从式(5)得到

$$F(\beta) = \frac{1}{2} e^T(\beta) e(\beta) \quad J(\beta) = \frac{\partial e(\beta)}{\partial(\beta)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_1(\beta)}{\partial \beta_1} \\ \frac{\partial e_1(\beta)}{\partial \beta_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial e_N(\beta)}{\partial \beta_1} \\ \frac{\partial e_N(\beta)}{\partial \beta_2} \end{bmatrix}$$

当 $\beta = \beta^{(k)}$ ,  $F(\beta)$ 的梯度 $g(\beta^{(k)})$ 为 $g(\beta^{(k)}) = J^T(\beta^{(k)}) e(\beta^{(k)})$

Hessian矩阵

$$H(\beta) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 F(\beta)}{\partial \beta_1 \partial \beta_1} \\ \frac{\partial^2 F(\beta)}{\partial \beta_1 \partial \beta_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial^2 F(\beta)}{\partial \beta_2 \partial \beta_1} \\ \frac{\partial^2 F(\beta)}{\partial \beta_2 \partial \beta_2} \end{bmatrix}_{r \times r}$$

记 $\varphi_i(\beta) = \varphi(X_i, \beta)$ , 则

$$H(\beta) = X^T X + \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N -e_i(\beta) \frac{\partial \varphi_i(\beta)}{\partial \beta_1, \partial \beta_2} \end{bmatrix}_{r \times r}$$

### 2) 迭代算法分析

若搜索方向为 $P_k$ , 在确定搜索方向 $P_k$ 后,其迭代式为

$$\beta^{(k+1)} = \beta^{(k)} + \lambda_k P_k$$

步长因子 $\lambda_k$ 满足

$$F(\beta^{(k)} + \lambda P_k) = \min_{\lambda > 0} F(\beta^{(k+1)} + \lambda P_k)$$

在实际计算中,不一定要要求 $\lambda_k$ 相应的点是在 $P_k$ 方向上最小值的点,可以只要求 $F(\beta^{(k+1)}) < F(\beta^{(k)})$ 或满足一定的程度范围,即 $F(\beta^{(k)}) - F(\beta^{(k+1)}) < \varepsilon$ 则满足。

上述方法收敛速度一般较快,但求解过程中,会产生 $J_k^T J_k$ 是奇异阵,无法求解搜索方向,虽然可以用负梯度方向作为 $P_k$ ,然而速度较慢。另外,当初始值 $\beta^{(0)}$ 选取不佳时,反复迭代可能不收敛,从而无法得到正确的结果。而阻尼最小二乘法考虑了上述两方面的问题。其目标函数为

$$F(\beta) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N e_i(\beta) \quad e(\beta) = (e_1(\beta), e_2(\beta), \dots, e_N(\beta))^T$$

$e(\beta)$ 的Jacobi矩阵 $J(\beta)$ 记 $A = J^T J = (a_{ij})_{r \times r}$ , 式中

$$J(\beta) = \left( \frac{\partial e_i(\beta)}{\partial \beta_j} \right)_{N \times r}$$

同时对阻尼因子的调整作了研究,使阻尼的确定和计算速度满足实际应用的要求。

## 2 微阵列加速度传感器的版图设计

微阵列加速度传感器版图设计是依赖于传感阵列布阵的研究。根据上述的回归分析方法确定因子空间中传感器有效的布阵,从而可以用较少的传感器得到有效的、足够的关于研究对象的加速度场的信息。

借助正交回归设计对线性和非线性情况下传感阵列的布阵设计进行研究:

### 1) 线性情况

经正交实验和回归分析后,按照正交表来安排试验,二水平正交表如表1所示。

图1所示的版图在3 mm×3 mm芯片平面上有8个悬臂梁组成,在每个悬臂梁根部上面有变形电阻。变形电阻中心点位置处在同一平面上,其中4个在顶点,另外4个是正方形四边的中点位置,8点形成正方形图形。

### 2) 非线性情况

经理论分析计算和实验研究,其实验数据如表2所示。

图2所示版图为在3 mm×3 mm的芯片平面上刻制有8个悬臂梁组成,每个悬臂梁根部上表面有变形电阻。变形电阻的中心位于同一平面圆周上,其位置是在同一圆周8等分的点处。

表1 二水平正交表

实验号	$X_1$	$X_2$	$X_3$
1	1	1	1
2	1	-1	-1
3	-1	1	-1
4	-1	-1	1

表2 各点实验值

实验点	1	2	3	4	5	6	7	8
$X_1$	1	0.707	0	-0.707	-1	-0.707	0	0.707
$X_2$	0	0.707	1	0.707	0	-0.707	-1	-0.707

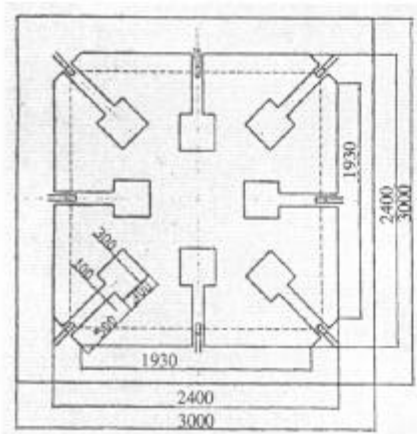


图1 适用线性情况微阵列加速度传感器版图

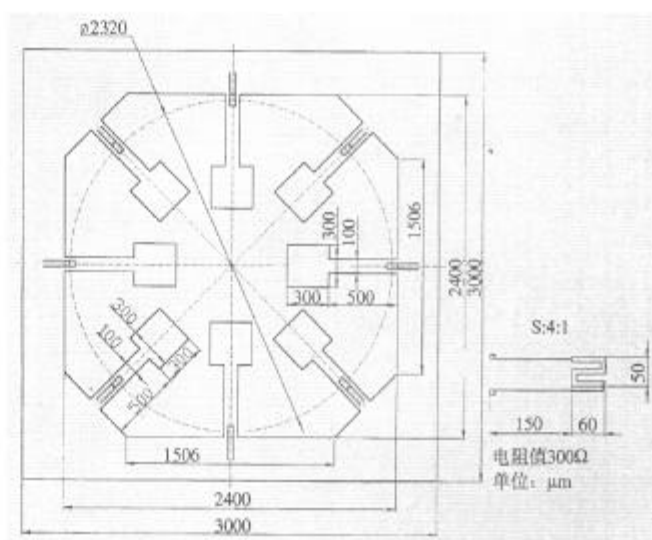


图2 适用非线性情况微阵列加速度传感器版图

## 3 微阵列式加速度传感器的工艺制造

加工微阵列式加速度传感器的工艺特点是集成电路三维加工工艺与二维加工工艺相结合,实现双极集

成电路与传感器体加工工艺相兼容方法制成。采用多次光刻及高深宽比加工工艺使控制深度达到 $50\ \mu\text{m}$ <sup>[5]</sup>, 其工艺流程框图如图3所示。

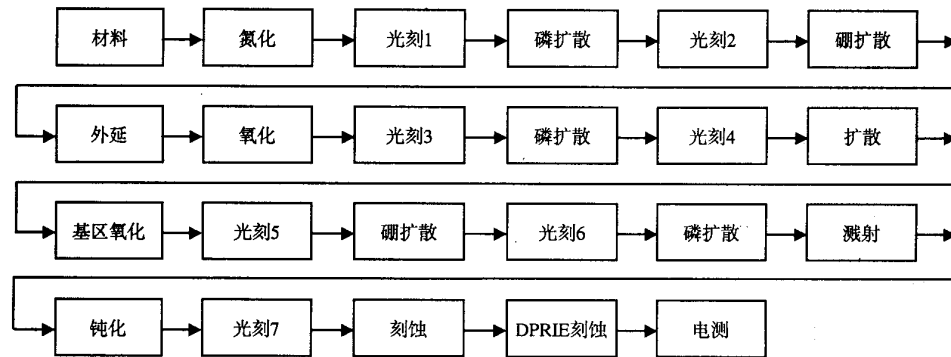


图3 工艺流程框图

经上述工艺多次光刻和扩散处理后制成的样品, 其微阵列加速度传感器的参数如下:

- 1) 芯片面积:  $3\ \text{mm} \times 3\ \text{mm}$
- 2) 测试加速度范围:  $100 \sim 5\ 000\ \text{g}$
- 3) 灵敏度:  $0.98\ \text{V/g}$
- 4) 适应环境温度:  $-40 \sim +400\ ^\circ\text{C}$

## 4 结 论

在文献[2~4]的基础上, 系统地研制了微阵列式加速度传感器, 该传感器不仅能满足引信系统、微系统、微机器、微电子机械、微机器人系统中测试加速度的需要, 同时能应用到一般测试加速度值大的工程系统中。本文总结了线性和非线性两种情况下传感阵列布阵的不同方法, 采用集成电路和微加工技术, 其结果测试数据真实, 测试反应灵敏。

本文研究的微加工技术中的二维与三维工艺相结合的方法, 不仅对制造微阵列式加速度传感器起着关键性作用, 而且对微系统中其他部件如微马达、微泵等的加工, 提供了有效的经验。

## 参 考 文 献

- [1] Fabrizio A M D, Arnaldo D A. Pattern recognition from sensor arrays: theoretical consideration sensor and actuators[C]. 1992, (32): 507-578
- [2] Liu Xiaoming, Shao Zili, Zhu Zhonggan. The research for the sensor array of the acceleration[C]. Proceeding of the 2nd China-Japan Symposium on Mechatronics, 1997: 321-326
- [3] Liu Xiaoming, Zhu Zhonggan, LI Hai. The design for the micro sensor array of the acceleration [C]5nd France-Japan Congress 3rd Europe-Asia Congress on Mechatronics, Besancon France Oct, 2001 J 127
- [4] Liu Xiaoming, Zhu Zhonggan, Li Hai. The research in nonlinear design theory for the micro sensor array of the acceleration [C] The 3rd China-Japan Symposium on Mechatronics, 2002
- [5] 章吉良, 杨春生. 微机电系统及其相关技术[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1999

编 辑 孙晓丹