

文章编号: 1000-6893(2000)05-0474-03

热激励谐振式硅微结构压力传感器

樊尚春, 刘广玉

(北京航空航天大学 自动控制系, 北京 100083)

THERMAL EXCITED SILICON MICROSTRUCTURE RESONATOR PRESSURE SENSOR

FAN Shang-chun, LIU Guang-yu

(Department of Automatic Control, Beijing University of Aeronautics & Astronautics, Beijing 100083, China)

摘要: 对一种以方形硅膜片作为一次敏感元件, 硅梁作为二次敏感元件的热激励硅谐振式压力微传感器进行了较系统的研究: 建立了微传感器敏感结构的工程用数学模型; 以所建立的模型实际设计了敏感结构参数: 方形膜边长 4 mm, 膜厚 0.1 mm, 梁谐振子长 1.3 mm, 宽 0.08 mm, 厚 0.007 mm; 采用微机械加工工艺加工出了原理样件; 采用电热激励、压阻拾振方式对其进行了开环测试。

关键词: 谐振式传感器; 硅微结构; 压力传感器

中图分类号: TP 212 **文献标识码:** A

Abstract: A thermal excited silicon resonant pressure microsensor whose preliminary sensing unit is a square silicon diaphragm, and the final sensing unit is a silicon beam resonator, was investigated systematically. A mathematical model of the above sensing structure was established in engineering. Based on the above model and theoretical analyzing results, the principle sample of the above sensing structure was designed and manufactured by using the micro-mechanical technology. The parameters of the sensing structure are as follows: length 4 mm, thickness 0.1 mm, for the diaphragm; length 1.3 mm, width 0.08 mm and thickness 0.007 mm for the beam resonator. The open loop tests for the resonator of the sensor were carried out with the thermal resistance exciter and piezo-resistance detector.

Key words: resonant sensor; silicon microstructure; pressure sensor

当前, 传感器正以晶体材料(主要是半导体硅)为主, 向微型化、智能化、数字化方向发展。美、日、荷、英、德等国的高校和研究机构, 如麻省理工学院、加州大学、荷兰大学、慕尼黑工大、横河电气株式会社等已经并正在投入大量的人力、物力和财力, 重点开展硅微结构传感器的研究, 并取得了一些阶段性的实用成果, 而且有的已经小批量生产, 在一些工业领域得到了成功地应用。进入 90 年代, 国内有的重点高校和研究院所也相继开展了有关的研究工作。这表明: 今后相当长的时期内, 传感技术发展的主流是硅微结构传感器技术。特别是要重点发展易与计算机匹配的直接输出频率量的谐振式硅微结构传感器技术^[1~5]。

航空用传感器与飞机技术的发展密切相关。现在我国机载用的传感器, 在重量、体积、功耗、精度、可靠性和成本等方面均不能满足当代日益复杂的飞机技术对传感器性能提高的要求。因此研究新一代航空用传感器的任务便十分迫切和突出。解决的途径就是从传统的结构设计转向以微

机械加工工艺为基础的微机械设计, 研制各种敏感原理的、结构优化的硅微结构传感器, 进一步发展研制具有强大信息处理功能的智能化传感器及其系统。例如, 国外现在制造的硅微型谐振桥式压力传感器, 已经在飞机上的大气数据计算机中, 替代体积大、制造难的谐振筒式压力传感器, 不仅性能优越, 还大大减轻了大气数据计算机的重量。同时使机载分布式大气数据计算机的研制成为可能。

因此, 研究开发直接输出频率量(准数字量)的谐振式航空用硅微结构传感器具有极其重要的意义。不仅为我国新一代航空用硅微结构压力传感器的工程化、研制新一代大气数据计算机打下良好的基础。同时, 也为敏感其他参数(如: 温度、加速度、角速度等)硅微结构传感器的研究提供重要的参考依据。

1 压力微传感器的敏感结构及数学模型

图 1 给出了所研究的热激励硅微结构谐振式压力传感器的敏感结构, 它由方形膜片、梁谐振子和边界隔离部分构成。方形硅膜片作为一次敏感元件, 直接感受被测压力, 在膜片的上表面制作浅

槽和硅梁, 以硅梁作为二次敏感元件, 间接感受被测压力。外部压力 P 的作用使硅膜片上表面产生相应的变形, 进而引起硅梁的变形, 导致其等效刚度发生变化, 从而梁的固有频率将随外部压力的变化而变化。通过检测梁谐振子的固有频率的变化, 即可间接测出外部压力的变化。为了实现微传感器的闭环自激系统, 采用电阻热激励、压阻拾振方式。热激励电阻设置在梁谐振子的正中间, 拾振压敏电阻设置在梁谐振子一端的根部。

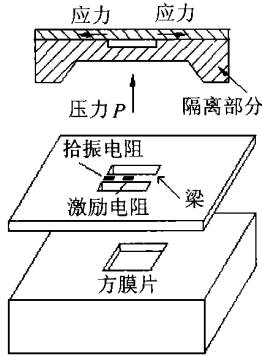


图 1 硅谐振式压力微传感器敏感结构

基于对一次敏感元件的静力学分析的结果, 文献[5]给出了方形膜片结构参数优化设计的准则。

根据分析结果, 当在膜片的中心建立直角坐标系(见图 2), xoy 平面与膜片的中平面重合, z 轴向上。在压力 P 的作用下, 方形膜片的法向位移为^[6]

$$W(x, y) = W_{\max} H \left[\frac{x^2}{A^2} - 1 \right]^2 \left[\frac{y^2}{A^2} - 1 \right]^2 \quad (1)$$

$$W_{\max} = \frac{49P(1-L^2)}{192E} \left(\frac{A}{H} \right)^4 \quad (2)$$

式中: E, Q, L 分别为膜片的弹性模量、质量密度和泊松比; A, H 分别为膜片的半边长和厚度; W_{\max} 为在压力 P 的作用下, 膜片的最大法向位移与其厚度之比。

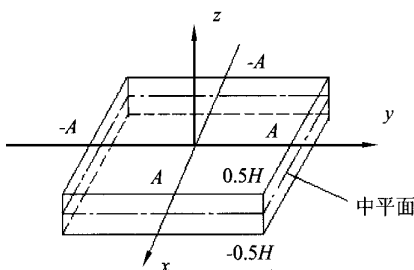


图 2 方膜片坐标系

$$u = -2W_{\max} \left[\frac{H}{A} \right]^2 \left[\frac{y^2}{A^2} - 1 \right]^2 \left[\frac{x^2}{A^2} - 1 \right]^2 x \quad (3)$$

根据敏感结构的实际情况及工作机理, 由有限元法和上述解析模型计算结果的详细比较, 揭示出: 当梁谐振子沿着 x 轴设置时, 由压力 P 引起的梁谐振子的位移基本上是直线, 而且在梁谐振子的两个端点处, 其轴向静位移与方形膜片相应位置的轴向位移非常接近(即可以由式(3)计算)^[7]。当梁谐振子设置在 $x \in [X_1, X_2]$ ($X_2 > X_1$) 时, 由压力 P 引起梁的谐振子的初始应力为^[7,8]

$$R_0 = E\epsilon = E \frac{u_2 - u_1}{L} \quad (4)$$

$$u_1 = -2H^2 W_{\max} \left[\frac{X_1^2}{A^2} - 1 \right] \frac{X_1}{A} \quad (5)$$

$$u_2 = -2H^2 W_{\max} \left[\frac{X_2^2}{A^2} - 1 \right] \frac{X_2}{A} \quad (6)$$

式中: R_0, ϵ 分别为梁所受到的轴向应力和应变; u_1, u_2 分别为梁在其两个端点 X_1, X_2 处的轴向位移; L, h, b 分别为梁的长度, 厚度和宽度; 且有 $L = X_2 - X_1$ 。

在初始应力的作用下, 两端固支梁的一阶固有频率(最低阶)为^[8]

$$f_1 = \frac{4.73^2 h}{2PL^2} \left[\frac{E}{12Q} \left(1 + 0.295 \frac{R_0 L^2}{Eh^2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Hz}) \quad (7)$$

利用式(4)~式(7), 就可以优化梁谐振子在方形膜片上的位置以及梁谐振子的长度与方形膜片半边长的相对比值, 进而确定梁谐振子的宽度和厚度。

利用上述模型, 本文提供一组压力测量范围在 $0 \sim 0.1 \text{MPa}$ 的微传感器敏感结构参数的参考值: 方形膜边长 4mm , 膜厚 0.1mm , 梁谐振子沿 x 轴, 设置于方形膜片的正中间, 长 1.3mm , 宽 0.08mm , 厚 0.007mm ; 此外浅槽的深度为 0.002mm 。依此参数实际加工了样件。

图 3 给出了利用上述模型计算的梁谐振子的

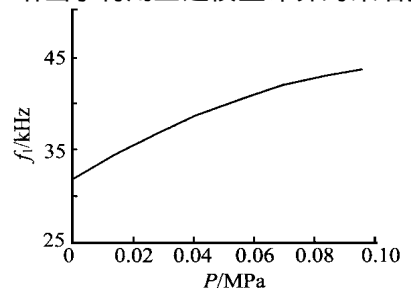


图 3 梁谐振子的压力-频率特性

在膜片的上表面, 膜片沿 x 轴的位移为

压力-频率特性曲线。当被测压力在 $0 \sim 0.1 \text{ MPa}$ 时, 梁谐振子的频率范围为: $31.81 \sim 44.04 \text{ kHz}$ 。其中硅材料的弹性模量、密度和泊松比分别为: $E = 1.3 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$, $Q = 2.33 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $L = 0.278$ 。

2 传感器敏感结构的开环特性测试

硅谐振式微结构传感器的激振方式一般有: 电磁激励、静电激励、压电激励、电热激励和光热激励等; 拾振方式一般有: 压电拾振、静电拾振、电磁拾振和压阻拾振等。考虑到加工工艺及激、拾振效果等因素, 采用电热激励和压阻拾振方式。图4给出了微传感器敏感结构中梁谐振子部分的激励、拾振示意图。其中, 激励热电阻设置于梁的正中间, 拾振电阻设置在梁端部。

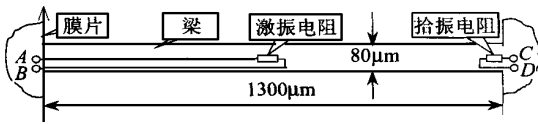


图4 梁谐振子平面结构示意图

当敏感元件开始工作时, 在激励电阻上加载交变的正弦电压 $U_{ac} \cos \omega t$ 和直流偏压 U_{dc} , 激励电阻 R 上将产生热量

$$P(t) = [U_{dc}^2 + 0.5U_{ac}^2 + 2U_{dc}U_{ac} \cos \omega t + 0.5U_{ac}^2 \cos 2\omega t] / R \quad (8)$$

$P(t)$ 可分为常值分量

$$P_s = (U_{dc}^2 + 0.5U_{ac}^2) / R \quad (9)$$

和交变分量

$$P_{d1}(t) = 2U_{dc}U_{ac} \cos \omega t / R \quad (10)$$

$$P_{d2}(t) = 0.5U_{ac}^2 \cos 2\omega t / R \quad (11)$$

常值分量 P_s 将使梁谐振子产生恒定的温度差分布场 ΔT_{av} , 并将在梁谐振子上引起初始热应力, 从而对梁谐振子的谐振频率产生一定的影响, 当激励电压一定时, 这个影响是固定的, 本文不讨论这一问题。

交变分量 $P_{d1}(t)$ 将使梁谐振子产生交变的热应力, 当其频率 ω 与梁谐振子的固有频率一致时, 梁谐振子将发生谐振。通过拾振桥路将得到一个以频率 ω 变化的交变信号, 由此可确定梁谐振子的谐振频率。因此, $P_{d1}(t)$ 是所需要的交变信

号, 由它实现了‘电-热-机’转换。

二倍频交变分量 $P_{d2}(t)$ 是热激方式特有的, 属干扰信号。为消除其影响, 可选择适当的交直流分量, 使 $U_{dc} \gg U_{ac}$, 或在调理电路中进行滤波处理。

按以上思路, 将研制的梁谐振子放置于真空罩中对实验样件进行开环频率特性测试。实测得到的梁谐振子的最低阶固有频率点约为 32 kHz , 与上述理论计算结果吻合。

参 考 文 献

- [1] Senturia S D. Simulation and design of microsystems: a 10-year perspective[J]. Sensors & Actuators, 1998(A67): 1~7.
- [2] Kim J, Wise K D. Electrothermal oscillator for film-thickness monitoring[J]. Sensors & Actuators, 1998(A66): 56~62.
- [3] Luo R C. Sensor technologies and microsensor issues for mechatronics systems (Invited Paper) [J]. IEEE/ASME Trans on Mechatronics, 1996(1): 39~49.
- [4] Beeby S P, Tudor M J. Modeling and optimization of micromachined silicon resonators[J]. J Micromech Microeng, 1995(5): 103~105.
- [5] 樊尚春, 李明明, 宋治生. 谐振式硅微结构压力传感器的优化设计[J]. 航空学报, 1999, 20(4): 362~364.
- [6] Timoshenko S P, Krieger S W. Theory of plates and shells [M]. McGraw-Hill Book Company Inc, 1959.
- [7] 李明明. 硅谐振式压力微传感器若干问题研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 1998.
- [8] 刘广玉, 樊尚春, 等. 新型传感器技术及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1995.

作者简介:



樊尚春 1990 年在北京航空航天大学获工学博士学位。后留校在自动控制系统任教。1994 年破格晋升为教授, 1997 年增补为博士生导师。在国内外发表论文 60 多篇。研究方向: 硅微结构传感器、谐振式直接质量流量传感器、仪表, 传感器的建模与仿真、检测技术与自动化装置。



刘广玉 1955 年 7 月毕业于天津大学机械工程系, 长期从事传感器的教学和科研工作, 尤其对于谐振传感器进行了较为深入地研究, 取得了一系列成果和显著成绩。出版过多本专著, 发表了一批学术水平较高的论文, 现致力于耐谐振微传感器的研究。