



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

博士学位论文

低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器研究

作者姓名: 凌必赞

指导教师: 夏善红 研究员

中国科学院电子学研究所

学位类别: 工学博士

学科专业: 微电子学与固体电子学

培养单位: 中国科学院电子学研究所

2019 年 6 月

Research on MEMS-based Three-dimensional Electric Field
Sensor with Low Cross-axis Coupling Interference

A dissertation submitted to
University of Chinese Academy of Sciences
in partial fulfillment of the requirement
for the degree of
Doctor of Philosophy
in Microelectronics and Solid-state Electronics

By

Ling Biyun

Supervisor: Professor Xia Shanhong

Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences

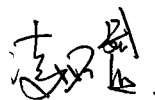
June 2019

中国科学院大学

研究生学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文是本人在导师的指导下独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明或致谢。

作者签名：



日

期：

2019. 6. 10.

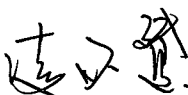
中国科学院大学

学位论文授权使用声明

本人完全了解并同意遵守中国科学院有关保存和使用学位论文的规定，即中国科学院有权保留送交学位论文的副本，允许该论文被查阅，可以按照学术研究公开原则和保护知识产权的原则公布该论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存、汇编本学位论文。

涉密及延迟公开的学位论文在解密或延迟期后适用本声明。

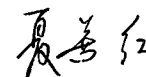
作者签名：



日

期：2019. 6. 10.

导师签名：



日

期：2019. 6. 10.

摘要

三维电场测量在航天发射、电力系统、气象、科学研究等诸多领域具有重要而广泛的应用。三维电场传感器一般包含 X 、 Y 和 Z 三个相互正交的测量轴，分别测量三个方向的电场分量。然而在实际测量中，任意一个测量轴方向的输出信号会受到另外两个测量轴方向电场分量的影响，这种轴间耦合干扰影响了三维电场传感器的测量准确性。为了研制微型化、高性能的三维电场传感器，本文基于微机电系统（Micro-Electro-Mechanical System, MEMS）技术，开展了低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器的研究。

本文提出并研制了一种低耦合干扰的 MEMS 一维电场敏感芯片。该芯片采用镜面对称结构设计，结合差分电路，可测量垂直于对称面方向的电场分量，并能够消除正交于测量轴方向的电场分量的耦合干扰。在此基础上，作者将三个该芯片正交布置形成了三个相互正交的测量轴，研制出了组件式低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器。

为了进一步减小传感器体积，本文提出了一种微组装式低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器。该芯片呈等腰直角三棱柱状，三个侧面分别为三个镜面对称的一维电场敏感单元，分别用于测量三个正交方向的电场分量。三个一维电场敏感单元通过微铰链连接构成一个等腰直角三棱柱状的整体结构；互锁机构固定了三个一维电场敏感单元的相对位置，从而保证了三个测量轴相互正交。作者将光敏型聚酰亚胺（Photosensitive Polyimide, PSPI）作为微铰链结构的材料，成功实现了与绝缘体上硅（Silicon-On-Insulator, SOI）微加工工艺的兼容制备；设计并研制了微组装机机械装置，用于实现微组装式低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器的构建。制备出的 MEMS 三维电场传感器的体积仅为 364.5mm^3 。

本文提出了一种基于有限元的标定电场误差分析模型和计算方法，用于指导标定结构设计和测试系统设计。作者分别研制了组件式和微组装式低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器的测试标定装置，并在常温常压下 $0\sim 120\text{kV/m}$ 电场强度范围内对传感器样机进行了标定与测试。实验结果表明，组件式低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器的轴间耦合灵敏度 $\leq 3.48\%$ ，微组装式低轴间耦合

MEMS 三维电场传感器的轴间耦合灵敏度 $\leq 19.54\%$ 。

关键词：三维电场传感器，MEMS，轴间耦合干扰，微组装，光敏型聚酰亚胺

Abstract

Three-dimensional (3D) electric field measurement is essential in many fields, including space launch, electric power system, meteorological study, scientific research, etc. A typical 3D electric field sensor (EFS) consists of three orthogonal sensing axes to measure all three Cartesian components of electric field. However, the output signal for each sensing axis of 3D EFS is probably coupled by electric field components from other two orthogonal sensing axes, which affects the accuracy of 3D electric field measurement. Aimd at developing miniaturized and high-performance 3D EFS, this paper studies MEMS-based 3D EFSs with low cross-axis coupling interference.

A one-dimensional (1D) EFS chip with low coupling interference is proposed in this paper. This 1D EFS chip is designed to be symmetrical, forming a pair of in-plane symmetrically-located sensing structures. With differential circuit, this 1D EFS chip is capable of sensing parallel electric fields along symmetrical structures and eliminating cross-axis coupling interference. This paper develops an assembled MEMS-based 3D EFS with low cross-axis coupling interference by arranging three proposed 1D EFS chips orthogonally forming three orthogonal sensing axes.

Aimed at miniaturizing 3D EFS, this paper develops a microassembled 3D EFS with low cross-axis coupling interference, and investigates its micromachining and microassembly technology. This microassembled 3D EFS consists of three 1D electric field sensing elements used to measure electric field components from X -, Y - and Z -axis respectively, and is made into a compact integrative structure by micro-hinges. This 3D EFS is in shape of triangular prism. Interlocking latches are employed to ensure the orthogonality of the three sensing axes. The proposed microassembled 3D EFS is fabricated on a silicon-on-insulator (SOI) die,

introducing photosensitive polyimide (PSPI) into its micromachining process to produce flexible micro-hinges. A mechanical device for microassembly is developed to construct this 3D EFS. The volume of this 3D EFS is merely 364.5mm^3 .

This paper adopts finite element analysis proposing a deviation model and a deviation analysis method for electric field used for calibration, which is benefit to guide the design of calibration structure and testing system. The calibration and testing system of assembled and microassembled 3D EFS are developed respectively. Experimental results show that in electric field range of 0–120 kV/m, cross-axis sensitivities of the proposed assembled 3D EFS are within 3.48%, and cross-axis sensitivities of the proposed microassembled 3D EFS are within 19.54%.

Key Words: three-dimensional electric field sensor, MEMS, cross-axis coupling interference, microassembly, photosensitive polyimide

目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 电场传感器研究现状及发展趋势	1
1.1.1 传统机电式电场传感器	1
1.1.2 基于 MEMS 技术的电场传感器	4
1.2 MEMS 三维电场传感器研究现状	10
1.2.1 组件式 MEMS 三维电场传感器	11
1.2.2 单芯片式 MEMS 三维电场传感器	13
1.2.3 MEMS 三维电场传感器标定	15
1.3 本文主要研究内容	17
第 2 章 低耦合干扰的 MEMS 一维电场敏感芯片研究	21
2.1 低耦合干扰的 MEMS 一维电场敏感芯片工作原理与基本结构	21
2.1.1 电荷感应式 MEMS 电场传感器工作机理	21
2.1.2 MEMS 一维电场敏感芯片结构和耦合干扰抑制原理	22
2.1.3 MEMS 一维电场敏感芯片耦合干扰抑制分析	24
2.2 感应结构优化	26
2.2.1 芯片尺寸优化	26
2.2.2 感应电极和屏蔽电极参数优化	31
2.2.3 感应结构布置方案优化	34
2.3 驱动结构和弹性结构设计与分析	36
2.4 动力学分析	40
2.4.1 动力学模型	40
2.4.2 固有频率和振动模态的仿真分析	42
2.5 MEMS 一维电场敏感芯片的设计参数总结	44
2.6 MEMS 一维电场敏感芯片微加工工艺	44
2.6.1 SOI	45
2.6.2 工艺流程	45
2.6.3 版图设计	49

2.7 MEMS 一维电场敏感芯片制备	50
2.7.1 DRIE 加工	50
2.7.2 正面保护材料去除	52
2.7.3 划片和压焊	52
2.8 本章小结	54
第 3 章 组件式低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器系统研究	57
3.1 组件式低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器	57
3.2 传感信号检测	59
3.2.1 前置放大电路设计	60
3.2.2 相敏检测电路设计	62
3.2.3 同频耦合串扰噪声分析	64
3.3 集成化后端处理系统研究	65
3.3.1 系统硬件设计	66
3.3.2 系统软件设计	69
3.4 标定系统研究	71
3.4.1 标定夹具设计	72
3.4.2 标定系统构建	74
3.4.3 误差分析	76
3.5 组件式低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器的标定与测试	78
3.5.1 传感器标定	78
3.5.2 三维电场测量	80
3.6 本章小结	82
第 4 章 微组装式低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器研究	83
4.1 微组装式低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器结构设计	83
4.2 微组装式低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器微加工工艺研究	86
4.2.1 微铰链材料选型	86
4.2.2 微加工工艺	88
4.2.3 版图设计	92
4.2.4 划片与制备结果	93
4.3 微组装式低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器组装工艺研究	96
4.4 本章小结	98

第 5 章 微组装式 MEMS 三维电场传感器测试标定系统研究	99
5.1 集成化小型测试系统研究	99
5.2 标定系统研究	102
5.2.1 标定夹具设计	102
5.2.2 标定系统构建	103
5.2.3 误差分析	104
5.3 微组装式低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器的标定与测试	106
5.3.1 传感器标定	106
5.3.2 三维电场测量	108
5.4 本章小结	110
第 6 章 总结与展望	111
6.1 论文完成的主要工作	111
6.2 主要创新点	112
6.3 未来工作展望	113
参考文献	115
致 谢	123
作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果	125

图表目录

图 1.1 双球式电场传感器.....	2
图 1.2 微火箭式电场传感器.....	3
图 1.3 磨式电场传感器.....	3
图 1.4 电极探针式三维电场传感器.....	4
图 1.5 Riehl 等提出的集成了侧面感应屏蔽式和上下感应屏蔽式的微型电场传感器.....	5
图 1.6 中国科学院电子学研究所彭春荣等研制的 MEMS 电场传感器	6
图 1.7 中国科学院电子学研究所杨鹏飞等研制的 MEMS 电场传感器	6
图 1.8 中国科学院电子学研究所储昭志等研制的扭转谐振式 MEMS 电场传感器	7
图 1.9 Bahreyni 等研制的热驱动型 MEMS 电场传感器.....	7
图 1.10 Kobayashi 等研制的压电驱动型电场传感器.....	8
图 1.11 Ghionea 等研制的压电驱动型电场传感器.....	8
图 1.12 Chen 等研制的静电力式 MEMS 电场传感器.....	9
图 1.13 Kainz 等研制的静电力式 MEMS 电场传感器.....	9
图 1.14 Williams 等研制的引导电荷式 MEMS 电场传感器.....	10
图 1.15 李冰等研制的组件式 MEMS 三维电场传感器	11
图 1.16 闻小龙等研制的共面式 MEMS 三维电场传感器	12
图 1.17 单芯片式 MEMS 三维电场传感器	14
图 1.18 典型的一维电场传感器标定装置示意图.....	15
图 1.19 闻小龙等研制的三维电场传感器的标定夹具	17
图 1.20 王宇等研制的三维电场传感器的标定夹具.....	17
图 1.21 李冰等研制的三维电场传感器的标定夹具	17
 图 2.1 电荷感应式电场传感器芯片的工作原理.....	21
图 2.2 (a)MEMS 一维电场敏感芯片的结构示意图; (b)两个感应电极阵列与差分电路连接	23
图 2.3 MEMS 一维电场敏感芯片在三维电场空间中的仿真模型	25
图 2.4 在 ANSYS 软件中施加不同方向电场的示意图.....	25
图 2.5 MEMS 一维电场敏感芯片对不同方向电场仿真结果。(a) Q_x 与 θ 和 φ 的关系; (b)当 φ 为 90° 、 180° 和 270° 时 Q_x 与 θ 的关系; (c)当 θ 为 20° 、 40° 、 60° 和 80° 时 Q_x 与 φ 的关系..	26
图 2.6 采用 Schwarz-Christoffel 变换分析 MEMS 一维电场敏感芯片上表面的电场强度, (a) 对该 MEMS 一维电场敏感芯片沿着测量轴方向做剖面; (b)简化后的二维模型; (c)Z 平面模型; (d)W 平面模型	27
图 2.7 电场强度在线 C-D 和线 D-A 上的变化曲线.....	30
图 2.8 理论计算与仿真计算比较.....	30
图 2.9 单位长度下该 MEMS 一维电场敏感芯片表面的电通量 D_x 与 d_1-d_2 的关系	31
图 2.10 感应电极和屏蔽电极仿真模型.....	31
图 2.11 感应电极和屏蔽电极的 ANSYS 仿真模型.....	32
图 2.12 电极参数与仿真所得的感应电荷量的关系 (a) Q 与 w_{g1} 的关系; (b) ΔQ 与 w_{sn} 的关系; (c) ΔQ 与 w_{sh} 的关系	33
图 2.13 双感应电极配合单屏蔽电极示意图.....	35
图 2.14 双感应电极配合单屏蔽电极仿真模型.....	35

图 2.15 感应电极和屏蔽电极的 ANSYS 仿真模型	36
图 2.16 Q 与 w_{g3} 的关系	36
图 2.17 梳齿结构的示意图	37
图 2.18 双折梁示意图	39
图 2.19 (a)双端固支梁的模型; (b)简化后的双端固支梁的模型	39
图 2.20 (a)振幅比随相对频率变化; (b)相位差随相对频率变化	42
图 2.21 MEMS 一维电场敏感芯片模态仿真结果, (a)一阶模态; (b)二阶模态; (c)三阶模态; (d)四阶模态; (e)五阶模态; (f)六阶模态	43
图 2.22 MEMS 一维电场敏感芯片工艺制作流程图	46
图 2.23 SOI 晶圆完成各步骤工艺后的实物图, (1)完成工艺(a)后; (2)完成工艺(b)后; (3)完 成工艺(d)后; (4)完成工艺(f)后	48
图 2.24 掩膜板设计图	49
图 2.25 MEMS 一维电场敏感芯片掩膜板设计图	50
图 2.26 结构体硅图形化后的显微镜图	50
图 2.27 衬底硅图形化后仍有硅残留	51
图 2.28 衬底硅图形化后的显微镜图	52
图 2.29 PI 去除后有絮状物残留	52
图 2.30 MEMS 一维电场敏感芯片的实物图	53
图 2.31 MEMS 一维电场敏感芯片的 SEM 图	54
图 3.1 MEMS 三维电场传感器实物图, (a)正面图; (b)背面图	57
图 3.2 MEMS 三维电场传感器前置放大电路实物图, (a)正面图; (b)背面图	58
图 3.3 MEMS 一维电场敏感芯片的检测电路原理图	59
图 3.4 I/V 转换电路原理图	60
图 3.5 I/V 转换电路的幅频响应曲线和相频特性响应曲线	61
图 3.6 三运放型仪表放大器原理图	61
图 3.7 相敏检测方法原理框图	62
图 3.8 驱动电极与感应电极形成耦合电容的原理示意图	64
图 3.9 差分驱动和差分检测的等效电路模型	64
图 3.10 后端处理系统模块图	66
图 3.11 后端处理电路实物图	67
图 3.12 驱动信号产生电路图	68
图 3.13 后端控制系统软件工作流程图	70
图 3.14 标定夹具结构示意图	72
图 3.15 三维电场传感器与标定夹具连接	73
图 3.16 导线和转接接头	74
图 3.17 三维电场传感器的测试标定装置	75
图 3.18 标定电场误差分析的仿真模型	76
图 3.19 不同断面处的相对误差 δ 的云图; (1) $z=0\text{mm}$; (2) $z=4\text{mm}$; (3) $z=8\text{mm}$; (4) $z=12\text{mm}$; (5) $z=16\text{mm}$; (6) $z=20\text{mm}$	77
图 3.20 MEMS 三维电场传感器的标定曲线, (a) X 轴方向电场标定; (b) Y 轴方向电场标定; (c) Z 轴方向电场标定	79
图 4.1 微组装式低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器示意图	84

图 4.2 MEMS 三维电场传感器的组装过程示意图	85
图 4.3 微铰链被弯折 135° 时模型	86
图 4.4 微组装式 MEMS 三维电场传感器制作工艺流程图	88
图 4.5 微组装式 MEMS 三维电场传感器工艺示意图	89
图 4.6 (a)用于 SOI 微加工的掩膜板设计图; (b)用于工艺步骤(a)-(d)的掩膜板设计图; (c)用于工艺步骤(d)-(h)的掩膜板设计图	93
图 4.7 SOI 晶圆完成工艺后的实物图	94
图 4.8 SOI 晶圆完成工艺步骤(d)后的显微镜	94
图 4.9 SOI 晶圆完成工艺步骤(h)后的显微镜	95
图 4.10 微组装式 MEMS 三维电场传感器实物图	95
图 4.11 微组装机械装置结构示意图	96
图 4.12 (a)微组装步骤 2)的现场图; (b)微组装步骤 3)的现场图	97
图 4.13 微组装式 MEMS 三维电场传感器实物图	98
图 5.1 集成化小型测试系统模块图	100
图 5.2 集成化小型测试系统实物图	101
图 5.3 标定夹具结构示意图	102
图 5.4 MEMS 三维电场传感器的测试标定装置	103
图 5.5 标定电场误差分析的仿真模型	105
图 5.6 不同 θ 和 φ 情况下的相对误差 δ	106
图 5.7 MEMS 三维电场传感器的标定曲线, (a) X 轴方向电场标定; (b) Y 轴方向电场标定; (c) Z 轴方向电场标定	107
表 1.1 已报道的 MEMS 三维电场传感器的轴间耦合灵敏度	15
表 2.1 电极参数列表	34
表 2.2 驱动结构参数列表	38
表 2.3 双折梁参数列表	40
表 2.4 MEMS 一维电场敏感芯片的主要参数列表	44
表 3.1 X 轴、 Y 轴和 Z 轴一维电场敏感芯片的灵敏度	80
表 3.2 组件式三维电场传感器在空间作不同角旋转的输出与计算电场	81
表 4.1 各类型 PSPI 参数汇总	87
表 5.1 X 轴、 Y 轴和 Z 轴一维电场敏感单元的灵敏度	107
表 5.2 微组装式 MEMS 三维电场传感器在空间作不同角旋转的输出与计算电场	109

第1章 绪论

1.1 电场传感器研究现状及发展趋势

电场作为一个基础的电学特性参量，其探测技术的发展具有重要的意义。针对不同的电场探测领域，待测电场的性质（例如电场频率、电场强度、电场方向和电场持续时间等）和传感器的工作环境（例如传感器与电场源的距离、传感器所处环境的温度、传感器所处环境的物态等）均不尽相同，因此测量所需的电场传感器的种类也不尽相同，按照工作原理可分为：电荷感应式^[1-29]、光学式^[30-37]、电容式^[38-41]、天线式^[42,43]、静电力式^[44-48]、场效应管式^[49,50]、铁电效应式^[51,52]、压电弯曲效应式^[53]、磁电效应式^[54]、电荷引导式^[55]、声表面波式^[56]和化学荧光式^[57]等。上述的电场传感器或是直接测量与待测电场有关的电荷、电势差及静电力，或是间接地将电场耦合入其它物理量和材料特性等方式最终实现电场的探测。

1.1.1 传统机电式电场传感器

目前，随着电力系统中电压等级的不断升高、气象研究的不断深入、材料的绝缘特性的不断提升、以及工业生产中对洁净度要求的不断提高和安全生产意识的不断加强等原因，面向环境中静电场和低频电场的探测引起了科学界和工业界的日益重视。以静电场为例，静电灾害大致上可以分为静电力所致和静电放电所致两大类^[58]。静电力的存在会使得墙壁上、仪表上、或衣服上粘附有小的粉体，对于洁净度要求较高的行业无疑会降低良品率。静电放电会造成可燃物着火，储油罐或是化工厂爆炸等，也会造成火箭飞行偏离预定轨道或是爆炸等灾害^[59-62]。在集成电路领域，由于静电放电产生的击穿会使器件失效。在工业生产领域，静电放电造成的电磁波辐射会使仪器仪表失灵或是电子设备产生误操作，后果不堪设想^[63,64]。此外，在气象研究领域，大气电场是研究各类型气象活动的最主要和最直接的观测量之一^[65-67]。大气电场的探测有助于研究气溶胶含量、水汽含量、云量及云的类别、降水，对研究和解决沙尘和雾霾问题也具有积极作用^[68-70]。因此，研制面向环境中静电场或低频电场探测的传感器具有重要意义。

目前,应用最广泛的用于环境电场测量的传感器为电荷感应式电场传感器,其工作原理是利用敏感结构表面感应电荷量的变化形成感应电流进而测量电场。传统的电荷感应式电场传感器的种类有:双球式^[1-3]、火箭式^[4-6]和场磨式^[7-12]等。

双球式电场传感器由两个空心导体球、旋转轴、轴承和电机构成,如图 1.1 所示。测量电路和电源分别被安装在这两个空心导体球内;两个导体球分别连接到电荷放大器的同相端和反相端用于感应电流的处理。两个导体球在电机的驱动下绕着轴旋转,从而改变两个导体球上的感应电荷量,进而感应出电流;通过提取该传感器输出电流的幅值进而可测量空中电场的强度。目前,该类电场传感器常用于探空测量。

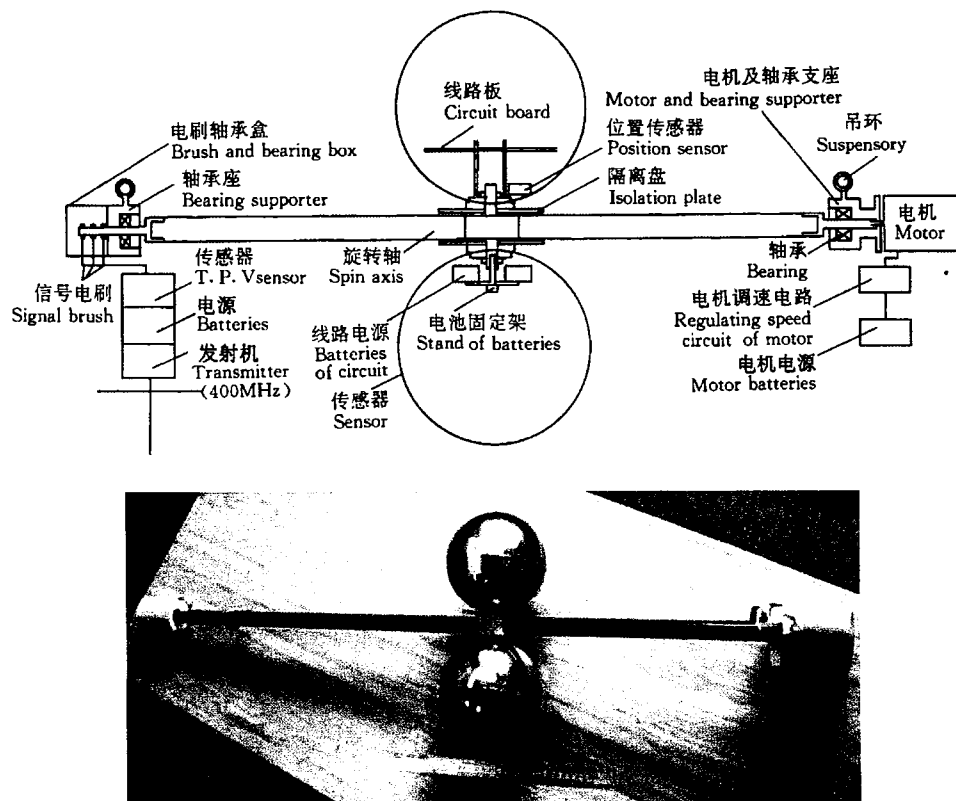


图 1.1 双球式电场传感器^[2]

Figure 1.1 Two sphere EFS^[2].

微火箭式电场传感器的工作原理与双球式电场传感器相似。如图 1.2 所示,电场传感器位于微火箭的端部,端部的感应电极旋转会感应出周期性的电流,通过提取该传感器输出电流的幅值进而可测量空中电场的强度。该类传感器的缺点在于:其端部的感应电极绕单轴旋转,因此只能测量沿火箭径向的电场强

度,无法测量其他方向的电场强度;火箭飞行过程中容易产生静电放电或者部分区域粘附带电粒子,两者均会产生干扰电场,从而影响了该传感器的电场测量精度。

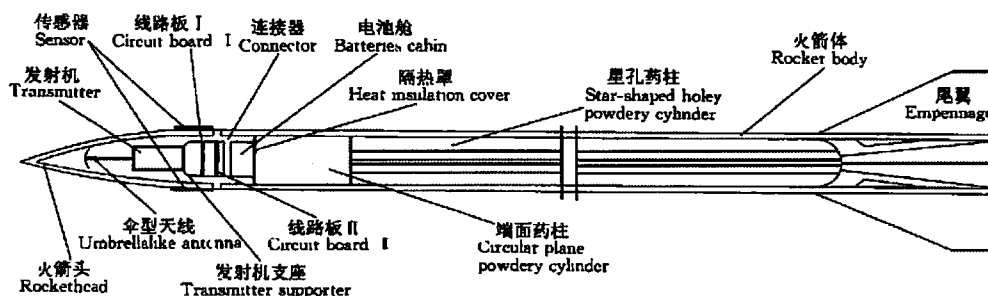


图 1.2 微火箭式电场传感器^[5]

Figure 1.2 Micro-rocket EFS^[5].

与双球式和微火箭式电场传感器通过旋转感应电极产生感应电流不同,场磨式电场传感器则是通过周期性地屏蔽位置固定的感应电极从而产生感应电流。如图 1.3 所示,在电机的驱动下,位于感应电极上方的屏蔽电极周期性地遮挡感应电极,使感应电极表面的感应电荷量发生周期性变化,产生感应电流,从而探测电场的强度。相比于双球式电场传感器,场磨式电场传感器的体积大大减小,相应的标定设备也得到了缩小,相应的标定操作得到了简化,并且测量精度高。然而,场磨式电场传感器的不足在于探头都采用机械加工制成,零部件精密、复杂且组装过程麻烦,不适合批量化生产。

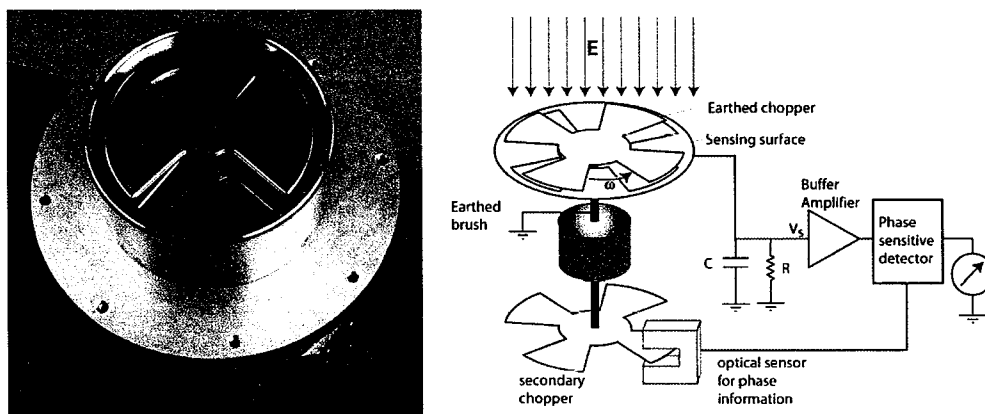


图 1.3 磨式电场传感器^[9]

Figure 1.3 Field-mill EFS^[9].

除此之外,电容式电场传感器也常用于环境中静电场或低频电场的探测,其工作原理为通过测量探针间的电势差来测量电场强度,一般用于星载探空领

域，例如面向宇宙射线、电离层或地磁场的研究等^[38-41]。为了提高电容式电场传感器的灵敏度高，其两探针的距离往往较大，所以电容式电场传感器的体积较大（两探针最远距离可达 100m^[38]）。图 1.4 为加州大学伯克利分校的 Kurpka 等^[39]于 2001 年研制的电容式三维电场传感器，其在正交的三个方向上分别对称布置了两个探针。

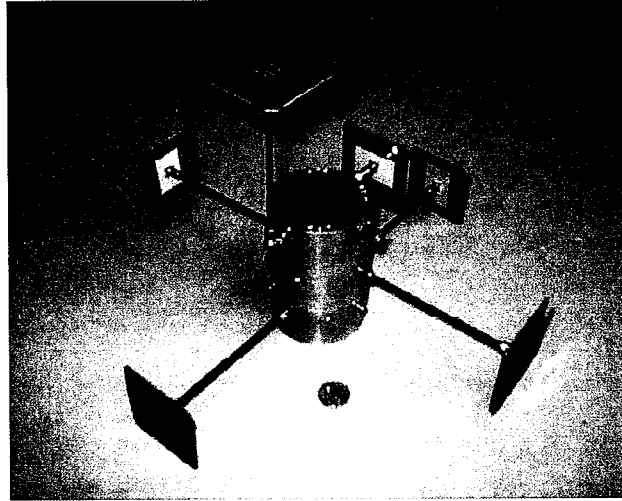


图 1.4 电极探针式三维电场传感器^[39]

Figure 1.4 3D EFS with six electrodes^[39].

传统的电场传感器多为机电式，尽管技术成熟，且在航天发射、电力系统、科学研究等诸多领域有着大量的应用，但是缺点在于：第一，零部件繁多且组装过程复杂，不易批量化生产；第二，体积较大，容易引起待测电场较大的畸变；第三，电荷感应式电场传感器工作时需要电机带动感应电极或屏蔽电极做机械运动，功耗较大，如采用电池供电则不适于长期的电场测量；第四，研制成本较高，若用于探空测量则无法回收反复使用，探测成本较高。因此，研究制造一种结构简单、体积小、功耗低和成本低的电场传感器具有非常重要的意义。

1.1.2 基于 MEMS 技术的电场传感器

近三十年来，随着微加工技术的快速发展，基于 MEMS 技术的微型电场传感器凭借其体积小、成本低、重量轻、集成度高、功耗低和可批量生产等优点，已成为了电场传感器的研究热点。MEMS 电场传感器主要用于静电场和低频电场的测量，按照工作原理可分为：电荷感应式^[14-29]、静电力式^[44,46,47]和引导电荷式^[55]三种。

与静电力式和引导电荷式相比,电荷感应式测量方法更为直接(直接测量外电场产生的电荷,无需耦合入别的物理量),因此是 MEMS 电场传感器研究的主流。与传统的电荷感应式电场传感器类似,电荷感应式 MEMS 电场传感器分为周期性地振动感应电极和周期性地屏蔽感应电极两种,两者的共同点在于都需要有驱动力激励结构振动,其驱动方式主要有:静电驱动^[14-22]、热驱动^[23,24]和压电驱动^[25-29]。

静电驱动型的 MEMS 电场传感器是最早被提出且被研究最多的 MEMS 电场传感器。早在 1991 年,加州大学伯克利分校的 Hsu 等^[14]首次提出了一种单端静电驱动的微型静电压传感器。该传感器在感应结构设计上采用了上下屏蔽感应式,即屏蔽电极在上感应电极在下,屏蔽电极周期地屏蔽位置固定的感应电极,从而产生感应电流,用于测量电场强度。该微型电场传感器能够测量到距离 0.2mm 外的 20V 电压。波士顿大学的 Horenstein 等^[16]于 2001 年提出了一种双端静电驱动的微型静电场传感器。该传感器在感应结构设计上也采用了上下屏蔽感应式,在驱动结构设计上采用了推挽式差分驱动。该微型电场传感器的灵敏度为 40nV/(V/m),输出信号的信噪比得到了提升。加州大学伯克利分校的 Riehl 等^[17]于 2003 年首次提出了一种侧面屏蔽感应式微型电场传感器,即感应电极和屏蔽电极处于同一平面,主要通过屏蔽电极周期地屏蔽位置固定的感应电极的侧面,从而测量电场强度。如图 1.5 所示,同一块芯片集成了侧面屏蔽感应式和上下屏蔽感应式两种微型电场传感器,并集成了各自对应的信号处理电路。其中,侧面屏蔽感应式微型电场传感器的电场分辨率达到了 630V/m。

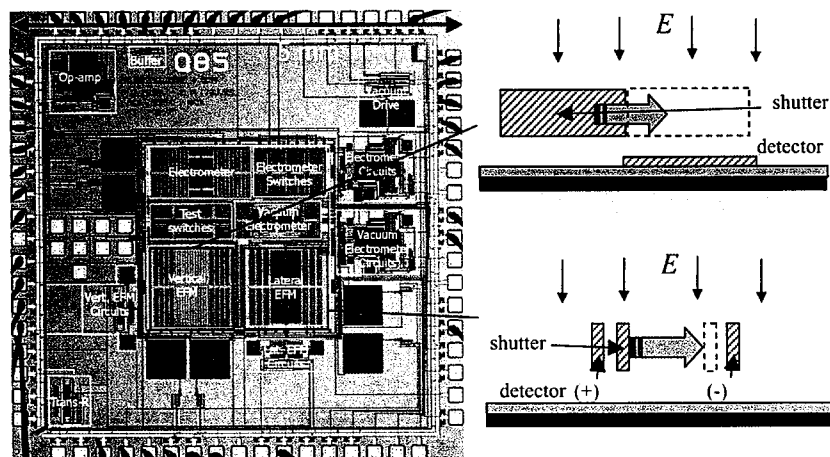


图 1.5 Riehl 等提出的集成了侧面感应屏蔽式和上下感应屏蔽式的微型电场传感器^[17]

Figure 1.5 Electric field microsensors developed by Riehl, which contains lateral sensing structures and vertical sensing structures^[17].

中国科学院电子学研究所的彭春荣等^[19]引入了差分感应的概念，于 2006 年提出了一种差分驱动差分感应的 MEMS 电场传感器，如图 1.6 所示。该电场传感器采用了上下屏蔽感应式的工作原理；其感应电极分成正感应电极和负感应电极，且分别与差分电路的正极和负极连接；屏蔽电极在两组感应电极间谐振使正感应电极和负感应电极感应出相位相差 180° 的电流。差分电路有助于消除感应电极输出电流中的共模成分。该 MEMS 电场传感器的电场分辨率达到了 100V/m ，为当时国际最好水平。

同年，AD (Analog Device) 公司的 Denison 等^[20]将反馈控制的概念引入了微型电场传感器的结构设计和测试电路设计中。该电场传感器量程为 $\pm 700\text{kV/m}$ ，电场的分辨率优于 40V/m 。

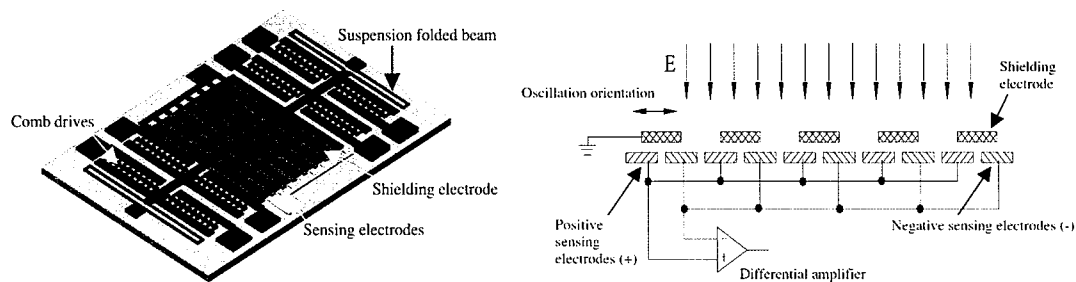


图 1.6 中国科学院电子学研究所彭春荣等研制的 MEMS 电场传感器^[19]

Figure 1.6 Electric field microsensor developed by Peng from Institute of Electronics of Chinese Academy of Sciences (IECAS)^[19].

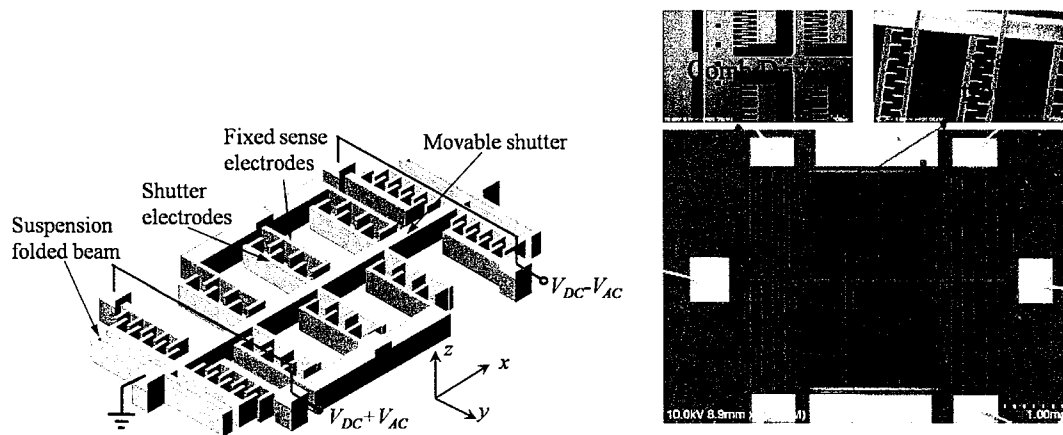


图 1.7 中国科学院电子学研究所杨鹏飞等研制的 MEMS 电场传感器^[21]

Figure 1.7 Electric field microsensor developed by Yang from IECAS^[21].

为了提高 MEMS 电场传感器的灵敏度，即电荷感应的效率，中国科学院电子学研究所的杨鹏飞等^[21]在侧面屏蔽感应式微型电场传感器的基础上进行了优

化, 于 2013 年提出了一种谐振共面梳齿电极 MEMS 电场传感器, 如图 1.7 所示。该电场传感器也采用了差分驱动差分感应的工作模式; 采用了基于 SOI 的微加工工艺, 其所有感应结构均共面, 优点在于结构简单且工艺流程简单; 引入了带有梳齿的感应电极, 相比于条状的感应电极, 提高了感应效率, 降低了空气阻尼。该传感器的电场分辨率达到了 40V/m , 与 AD 公司研制的电场传感器的分辨率相当, 同为静电驱动微型电场传感器中的最佳水平。

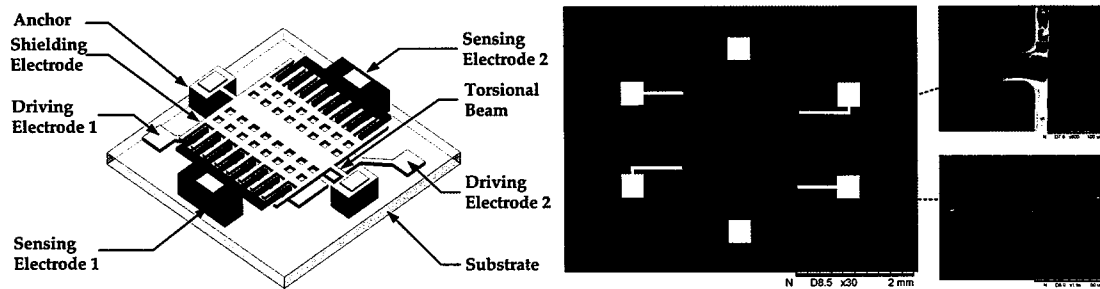


图 1.8 中国科学院电子学研究所储昭志等研制的扭转谐振式 MEMS 电场传感器^[22]

Figure 1.8 Torsional-resonance-based electric field microsensor developed by Chu from IECAS^[22].

为了进一步提高 MEMS 电场传感器的灵敏度, 中国科学院电子学研究所的储昭志等^[22]提出了一种扭转谐振式的 MEMS 电场传感器。处于平衡位置时, 其感应电极和屏蔽电极均共面; 屏蔽电极在静电驱动力的驱动下做离面扭转振动, 即相对于感应电极做上下振动, 从而周期地改变感应电极表面的感应电荷量, 进而产生感应电流。该 MEMS 电场传感器的结构示意图和实物如图 1.8 所示。其灵敏度达到了 $4.82\text{mV}/(\text{kV/m})$, 为目前已报道的电荷感应式 MEMS 电场传感器中的最佳水平。

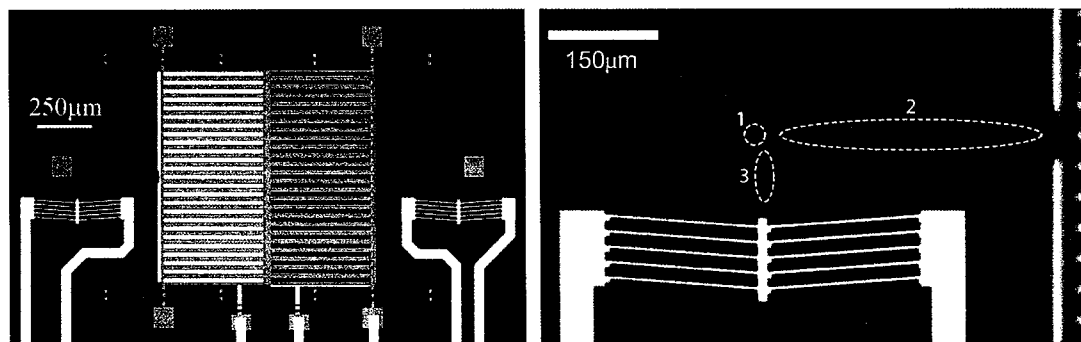


图 1.9 Bahreyni 等研制的热驱动型 MEMS 电场传感器^[24]

Figure 1.9 Thermally actuated Electric field microsensor developed by Bahreyni^[24].

除了静电驱动型 MEMS 电场传感器, 中国科学院电子学研究所的陈贤祥等

[23]于 2006 年首次将热驱动梁式结构引入到 MEMS 电场传感器的驱动结构设计中。该 MEMS 电场传感器也采用了上下屏蔽感应的工作原理和差分感应的工作模式；采用热驱动梁式结构驱动屏蔽电极谐振。实验结果表明，该 MEMS 电场传感器的电场分辨率为 240.8V/m 。为了增加热驱动的位移进而增加传感器的灵敏度和分辨率，曼尼托巴大学的 Bahreyni 等[24]于 2008 年研制出了一种基于杠杆作用的新型热驱动梁式结构，如图 1.9 所示。该器件实现了 42V/m 的电场分辨率，为热驱动型 MEMS 电场传感器中的最好水平。

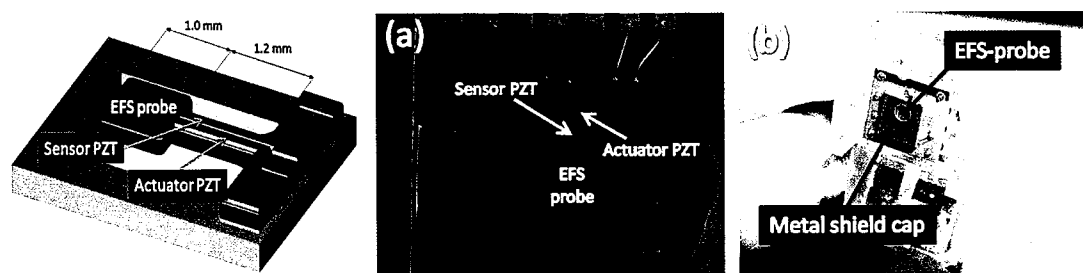


图 1.10 Kobayashi 等研制的压电驱动型电场传感器[26,27]

Figure 1.10 Pizeoelectrically actuated Electric field microsensor developed by Kobayashi[26,27].

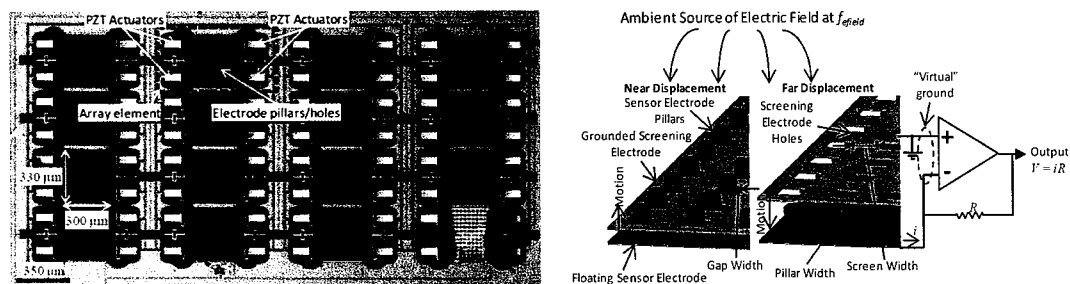


图 1.11 Ghionea 等研制的压电驱动型电场传感器[29]

Figure 1.11 Pizeoelectrically actuated electric field microsensor developed by Ghionea[29].

中国科学院电子学研究所的龚超等[25]于 2005 年首次实现了一种基于压电陶瓷驱动的交错振动式 MEMS 电场传感器，压电驱动助其敏感结构获得了较大的振幅。日本产业综合技术研究所的 Kobayashi 等于 2008 年[26]和 2012 年[27]、美国陆军研究实验室的 Ghionea 等[29]于 2013、以及中国科学院电子学研究所的冯可等[28]于 2014 年分别报道了基于 PZT 的压电驱动型 MEMS 电场传感器。其中，Kobayashi 等采用 PZT 周期性地振动悬臂梁状的感应电极，使其周期性改变与外电场的夹角（因此该传感器未用到屏蔽电极），从而改变感应电极表面的感应电荷量，如图 1.10 所示。Ghionea 等提出的传感器的屏蔽电极呈网状结构，

其网孔中布置了柱状的感应电极；PZT 驱动网状屏蔽电极相对于柱状感应电极做上下振动，从而改变感应电极表面的感应电荷量，如图 1.11 所示。该传感器实现了 830fA/V/m 的灵敏度，在 49Hz 频率下分辨力可达 $0.6\text{V/m}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

除了电荷感应式，Chen 等^[46]和 Kainz 等^[47]分别提出了一种基于静电力式的 MEMS 电场传感器，均采用光学手段测量静电力导致的结构位移的方法反推电场强度。Chen^[46]通过微加工技术加工出弹性薄膜，用于反射激光。当有外电场作用时，弹性薄膜发生位移，激光反射后的位置发生偏移。通过测量偏移量从而测量电场强度。其工作原理和实物如图 1.12 所示。

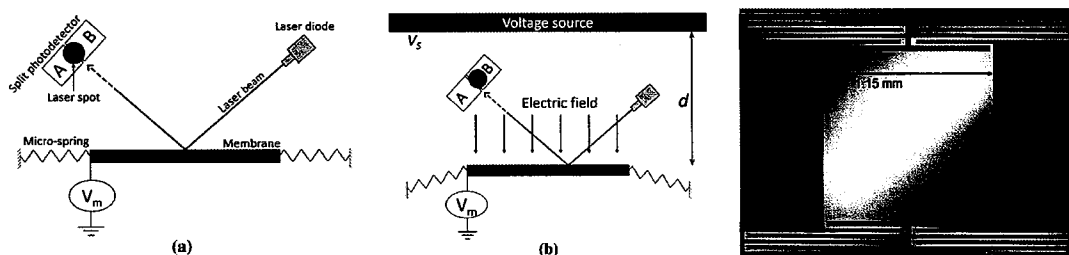


图 1.12 Chen 等研制的静电力式 MEMS 电场传感器^[46]

Figure 1.12 Electrostatic-force-based electric field microsensors developed by Chen^[46].

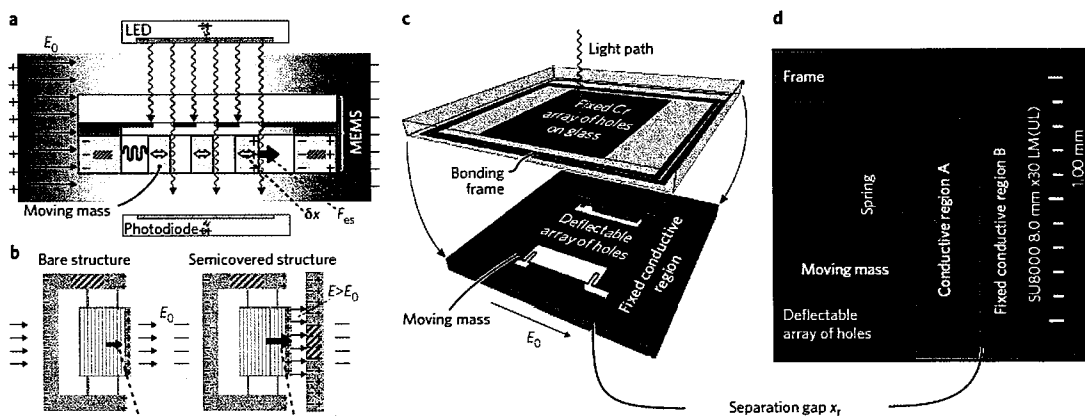


图 1.13 Kainz 等研制的静电力式 MEMS 电场传感器^[47]

Figure 1.13 Electrostatic-force-based electric field microsensors developed by Kainz^[47].

Kainz 等^[46]通过微加工技术加工出两个正对布置的光栅，其中一个光栅位置固定，一个光栅通过弹性梁固定于基板上成为可动结构。在两个光栅的上下两侧分别为光源与光电检测设备，在无外电场的情况下，可动光栅没有位移，光源不会透过两个光栅；当施加了外电场时，可动光栅会产生位移，会有部分光透过光栅照射到光电检测设备上。通过标定光电检测设备输出信号的强度既

能标定电场。其工作原理和实物如图 1.13 所示。然而，由于在毫米和微米尺度下，重力相对于静电力不可忽略，因此，如不能解决重力耦合的问题，基于该方法的电场测量只能停留在实验室阶段，并不适用于实际应用。

Williams 等^[55]于 2014 年报道了一种引导电荷式的 MEMS 电场传感器，其工作原理如图 1.14 所示。阴极了受到热激励从而产生了自由电子；自由电子在阴极和阳极电场作用下形成单方向移动的电子束。在外电场作用下，电子束会发生偏转，导致不同阳极接收到电子数量不同，从而测量外电场。

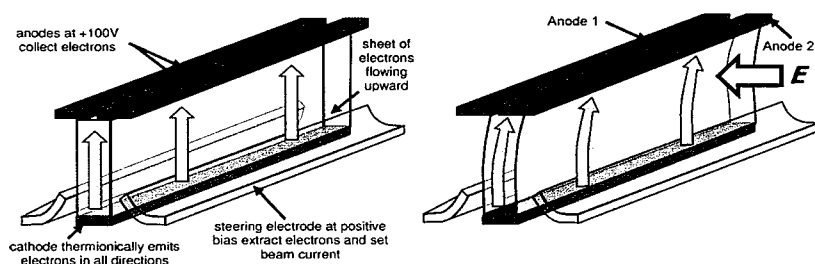


图 1.14 Williams 等研制的引导电荷式 MEMS 电场传感器^[55]

Figure 1.14 Electron-steered electric field microsensor developed by Williams^[55].

1.2 MEMS 三维电场传感器研究现状

目前，大部分的 MEMS 电场传感器只能测量垂直于其芯片上表面的一维电场分量，但是在很多应用场合中电场的方向未知，一维电场测量只能反映三维电场中某一个方向分量的大小，并不能反映该三维电场的全部信息，因此不适用于空间环境中三维电场的探测。例如在空中大气探测中，由于空中大气电场的情况往往比较复杂，雷暴云电场受云中电荷分布的影响，且随着云层的运动不断变化，呈现三维动态非均匀分布特征，因此空中大气探测需要采用三维电场传感器。又例如在电力系统中，高压架空线周围有很强的电场，且电场分布与高压线的排布情况相关，往往需要采用三维电场传感器进行电场测量。此举可以有效地帮助作业工人远离危险区域，增强安全保障。所以，研究基于 MEMS 技术的三维电场传感器能在减小传感器体积和功耗、降低传感器成本，以及简化传感器结构的情况下，实现三维电场测量，具有非常重要的意义。

目前，国内外关于 MEMS 电场传感器的研究报道大部分针对一维电场传感器，在 MEMS 三维电场传感器方面的研究报道较少，主要是中国科学院电子学研究所开展了 MEMS 三维电场传感器的相关研究工作。按照结构形式，MEMS

三维电场传感器可分为组件式^[71-73]和单芯片式^[74]两大类。两者均包含了至少三个一维电场敏感单元，构造出了三个相互正交的测量轴。两者的区别在于：组件式采用了分立的 MEMS 一维电场敏感芯片，单芯片式将所有电场敏感单元集成于用一个芯片。与众多三维传感器类似，MEMS 三维电场传感器在实际测量中也会受到轴间耦合干扰的影响，即任意一个测量轴的输出信号会被耦合入另外两个测量轴的电场分量的影响。例如， X 测量轴的输出信号不仅与 X 轴方向的电场分量有关，还会受到 Y 轴方向和 Z 轴方向的电场分量的影响。这种轴间耦合干扰严重影响了三维电场测量的准确性。针对轴间耦合干扰的影响，上述的三维电场传感器或采用了解耦标定矩阵或采用了对称结构配合差分电路的办法，分别从算法和传感器信号输出端分别进行了去轴间耦合干扰处理。

1.2.1 组件式 MEMS 三维电场传感器

基于杨鹏飞等^[21]设计的 MEMS 一维电场敏感芯片，中国科学院电子学研究所的李冰等^[72]、方奕庚等^[71]和闻小龙等^[73]分别研制了组件式的 MEMS 三维电场传感器。该 MEMS 一维电场敏感芯片用于测量垂直于芯片表面的电场分量（即对垂直于芯片表面的电场分量最为敏感），但无法减小或消除平行于芯片表面的电场分量的耦合影响（即对平行于芯片表面的电场分量也有响应）。因此，将三个该 MEMS 一维电场敏感芯片正交布置必定会引入轴间耦合干扰。

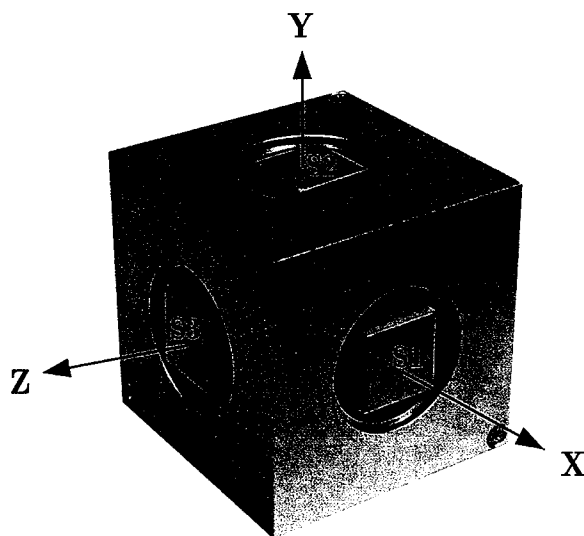


图 1.15 李冰等研制的组件式 MEMS 三维电场传感器^[72]

Figure 1.15 Assembled MEMS-based 3D EFS developed by Li Bing^[72].

李冰等^[72]和方奕庚等^[71]均在三个相互正交的方向上分别布置了一个

MEMS 一维电场敏感芯片，分别用于测量三个正交方向的电场分量。图 1.15 为李冰等研制的组件式 MEMS 三维电场传感器，其形状为边长 50mm 的立方体。该传感器的 X 、 Y 和 Z 三个相互正交的方向上各布置了一个 MEMS 一维电场敏感芯片（封装后）；该立方体内部为三个 MEMS 一维电场敏感芯片的前端信号处理电路，包括 I/V 转换电路和放大电路。闻小龙等^[73]则利用了该芯片的耦合特性，将三个 MEMS 一维电场敏感芯片共面布置，构成了一个电场传感器的平面阵列，如图 1.16 所示。其中，#1、#2 和 #3 分别为三个共面布置的 MEMS 一维电场敏感芯片（封装后）；该传感器的形状为直径 100mm、高 75mm 的圆柱，圆柱内部为三个 MEMS 一维电场敏感芯片的前端信号处理电路与后端系统电路。相对于李冰等将 MEMS 一维电场敏感芯片正交布置，共面布置方式简化了传感器的综合设计，但是降低了该传感器对平行于平面阵列方向电场分量的灵敏度，因此降低了三维电场测量的准确度。

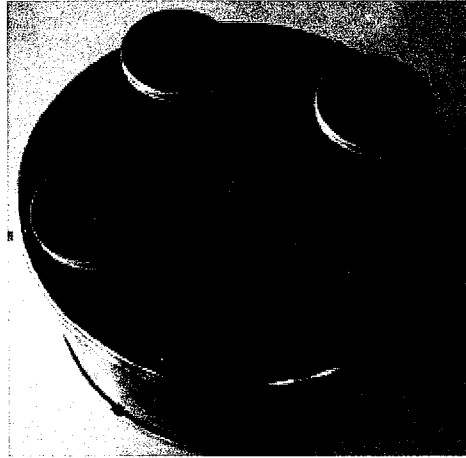


图 1.16 闻小龙等研制的共面式 MEMS 三维电场传感器^[73]

Figure 1.16 Coplanar MEMS-based 3D EFS developed by Wen Xiaolong^[73].

上述的两个 MEMS 三维电场传感器通过分别标定在 X 、 Y 和 Z 三个正交方向下三个 MEMS 一维电场敏感芯片的输出，能够构造出 3×3 的灵敏度系数矩阵

$$\begin{bmatrix} V_x - V_{x0} \\ V_y - V_{y0} \\ V_z - V_{z0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} \\ S_{yx} & S_{yy} & S_{yz} \\ S_{zx} & S_{zy} & S_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix}, \quad \dots (1.1)$$

其中， V_q 是用于测量 q 轴的 MEMS 一维电场敏感芯片的输出， V_{q0} 是用于测量 q 轴的 MEMS 一维电场敏感芯片的零点输出， S_{qi} 是用于测量 q 轴的 MEMS 一维电场敏感芯片在沿着 i 轴方向电场作用下的灵敏度（ $i=x,y,z$ 、 $q=x,y,z$ ）。例如，

S_{xx} 是用于测量 X 轴的 MEMS 一维电场敏感芯片在沿着 X 轴方向电场作用下的灵敏度； S_{xy} 是用于测量 X 轴的 MEMS 一维电场敏感芯片在沿着 Y 轴方向电场作用下的灵敏度，两者存在固定的比例关系 k_{xy} ，即轴间耦合灵敏度^[75]。因此，式 (1.1) 可改写为

$$\begin{bmatrix} V_x - V_{x0} \\ V_y - V_{y0} \\ V_z - V_{z0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xx}k_{xy} & S_{xx}k_{xz} \\ S_{yy}k_{yx} & S_{yy} & S_{yy}k_{yz} \\ S_{zz}k_{zx} & S_{zz}k_{zy} & S_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix}, \quad \dots (1.2)$$

k_{qi} 是轴间耦合灵敏度 ($i=x,y,z, q=x,y,z$)。以 k_{xy} 和 k_{xz} 为例，它们代表了用于测量 X 轴电场分量的 MEMS 一维电场敏感单元在 Y 轴和 Z 轴方向电场分量作用下的灵敏度与 X 轴方向电场分量作用下的灵敏度的比值（需要注意的是轴间耦合灵敏度是衡量三维测量中轴间耦合干扰的指标^[76,77]，已广泛应用于三维加速度传感器^[78]、三维陀螺仪^[79]和三维磁场传感器^[80]中，该比值越小代表了轴间耦合干扰的影响越小）。最后，对灵敏度矩阵 S 求逆矩阵或是伪逆矩阵即可得到解耦标定矩阵。

目前已报道的组件式 MEMS 三维电场传感器的优点在于：简单易实现，体现在 MEMS 一维电场敏感芯片的结构和工艺简单且成熟，以及传感器外形结构简单。缺点在于：上述的组件式 MEMS 三维电传感器所用的 MEMS 一维电场敏感芯片本身就存在耦合干扰，因此无论将 MEMS 一维电场敏感芯片正交布置或是平面布置，组成的 MEMS 三维电场传感器的轴间耦合灵敏度较大，且解耦方式完全依赖解耦标定矩阵，并不能从源头上减小或消除轴间耦合干扰，从而会降低三维电场测量的准确度；此外，传感器探头体积较大，且组装过程也会引入误差从而也会降低三维电场测量的准确度。

1.2.2 单芯片式 MEMS 三维电场传感器

单芯片式 MEMS 三维电场传感器将用于测量 X 、 Y 和 Z 这三个相互正交方向的电场敏感单元集成于一个芯片^[74]，如图 1.17 所示，共有五个电场敏感单元，分别为 $X+$ 、 $X-$ 、 $Y+$ 、 $Y-$ 和 Z 轴电场敏感单元。其中，两对电场敏感单元（ $X+$ 和 $X-$ 电场敏感单元、 $Y+$ 和 $Y-$ 电场敏感单元）均对称布置在芯片两侧，构成一个“十字形”，分别用于测量 X 轴和 Y 轴方向的电场分量； Z 轴电场敏感单元布置在芯片的中心处，用于侧垂直与芯片上表面的电场分量。该芯片也采用电荷感

应工作原理：该芯片的结构主要由一个静电驱动的扭转谐振结构构成，即驱动电极激励谐振结构绕着圆心做面内扭转谐振，谐振结构上的屏蔽电极周期性地屏蔽位置固定的感应电极，从而产生感应电流；该芯片的所有结构均共面，因此该芯片也采用了侧面屏蔽感应的工作原理；该芯片的微加工工艺为 MEMSCAP 公司的 MetalMUMPS 工艺，根据 MetalMUMPS 工艺，其结构的材料为镍，结构的厚度为 $20\mu\text{m}$ ；该芯片的形状为边长 10mm 的正方形。

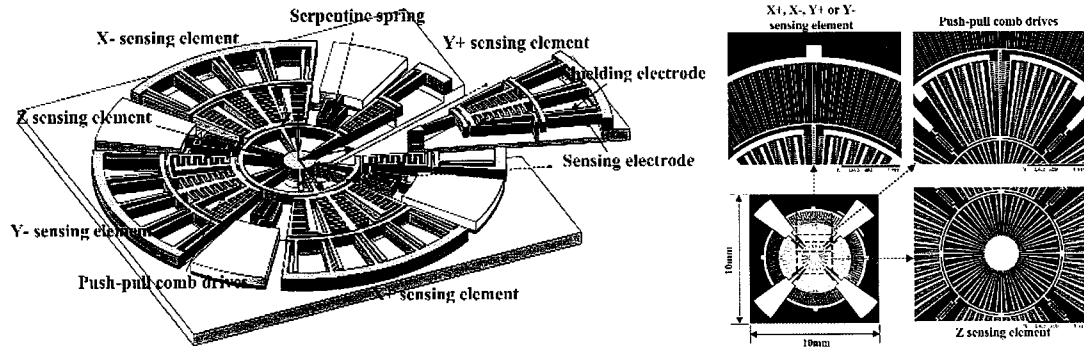


图 1.17 单芯片式 MEMS 三维电场传感器^[74]

Figure 1.17 Single-chip 3D electric field microsensor.^[74]

其中，两对电场敏感单元（ $X+$ 和 $X-$ 电场敏感单元、以及 $Y+$ 和 $Y-$ 电场敏感单元）均采用镜面对称设计，即两个电场敏感单元形状结构相同且采用镜面对称布置。在差分电路的配合下，该设计能够帮助 X 测量轴和 Y 测量轴消除耦合干扰。以 X 测量轴的那对电场敏感单元为例，其中 Y 轴方向的电场分量和 Z 轴方向的电场分量在两个电场敏感单元产生的电荷均相同。将上述两个电场敏感单元的输出连接至差分电路，能够消除两个电场敏感单元的共模信号，包括 Y 轴和 Z 轴方向的电场分量的影响，最终实现消除耦合干扰的作用（此方法也用于了单芯片式 MEMS 二维电场传感器的研制中，并获得了实验验证）。

但是受到芯片本身条件的限制，单芯片式 MEMS 三维电场传感器不能对垂直于芯片上表面方向的电场分量（即 Z 方向的电场分量）做差分处理，因此单芯片式 MEMS 三维电场传感器的轴间耦合干扰依然存在。除此之外，尽管单芯片式 MEMS 三维电场传感器有芯片体积小、高集成度、确保三个测量轴相互正交和各个电场敏感单元的振动频率一致等优点，但是其也存在着传感器结构复杂、品质因数低等缺点，从而增加了工艺难度，增大了传感器的驱动电压，并且降低了传感器的灵敏度。

组件式和单芯片式 MEMS 三维电场传感器的轴间耦合灵敏度如表 1.1 所示。由此可见，目前已报道的 MEMS 三维电场传感器仍具有较大的轴间耦合灵敏度，因此研究低轴间耦合的 MEMS 三维电场传感器具有重要的意义。

表 1.1 已报道的 MEMS 三维电场传感器的轴间耦合灵敏度

Table 1.1 Cross-axis sensitivities of previously reported MEMS-based 3D EFSs.

基于 MEMS 技术的三维电场传感器	时间	轴间耦合灵敏度
方奕庚等研制的组件式 MEMS 三维电场传感器 ^[71]	2014	$\leq 100\%$
李冰等研制的组件式 MEMS 三维电场传感器 ^[72]	2016	$\leq 11.80\%$
单芯片式 MEMS 电场传感器 ^[74]	2017	$\leq 56.62\%$

1.2.3 MEMS 三维电场传感器标定

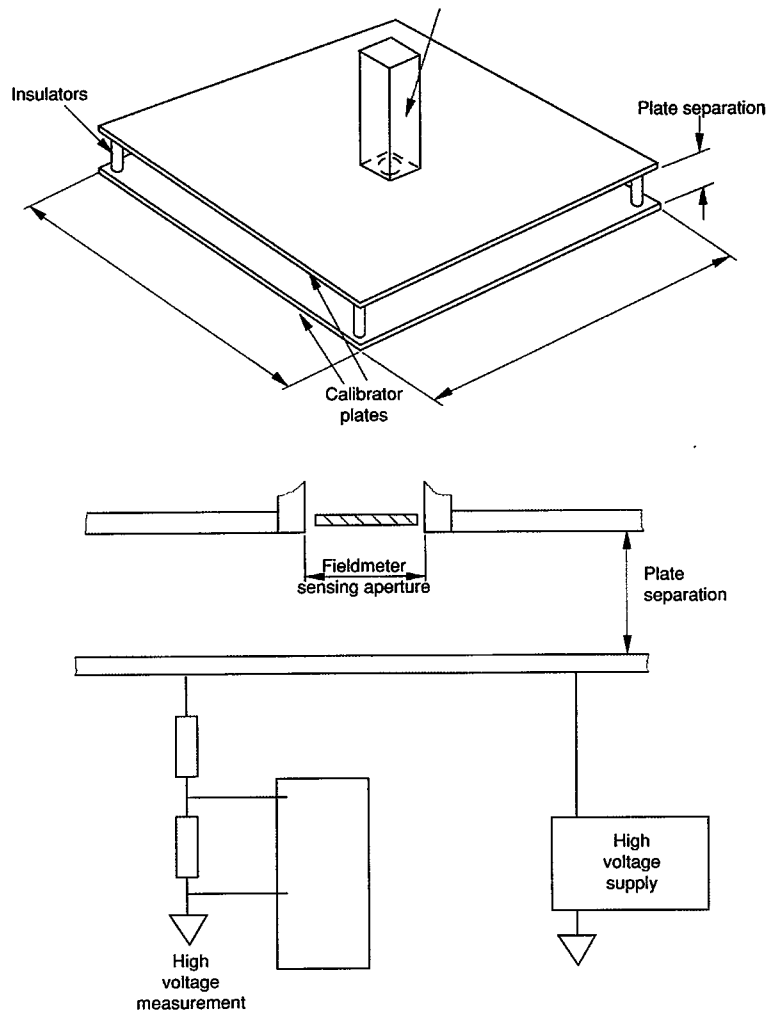


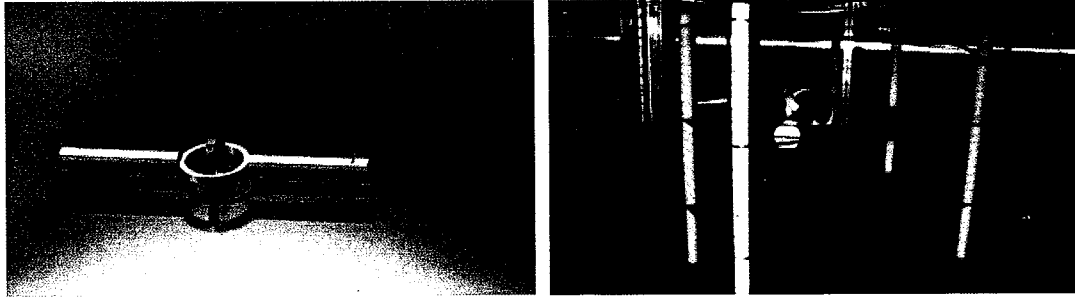
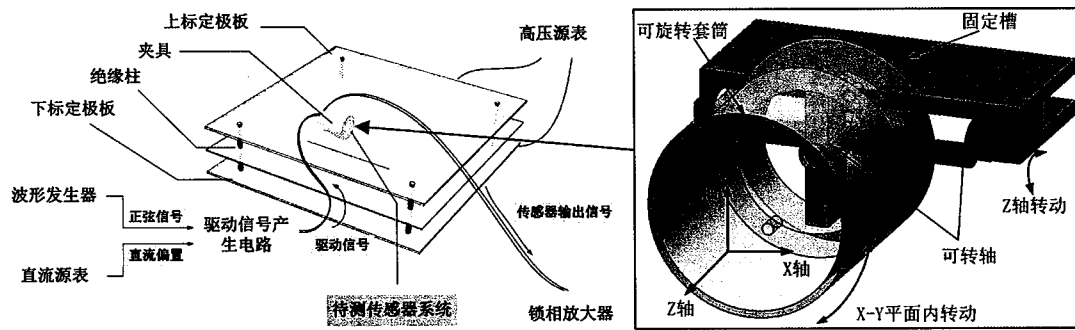
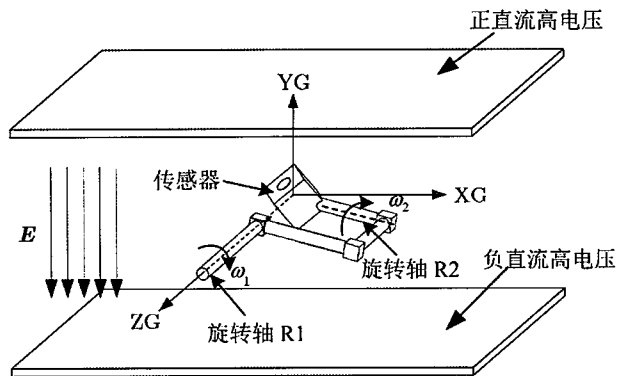
图 1.18 典型的一维电场传感器标定装置示意图

Figure 1.18 Schematic view of typical calibration system for 1D EFS.

目前,关于一维电场传感器的标定研究已经较为成熟。以英国于 1996 年制定的标准 British Standard BS 7506:Part 2:1996^[81]为例,采用两块施加不同电势的平行金属电极板产生均匀电场;将电场传感器的传感面放置在与其中一块平行金属电极板共面的位置;标定电场方向相对于待标定的传感器不变;信号线和电源线均置于电场空间外从而避免导线对电场的干扰,如图 1.18 所示。除此之外,美国也于 1990^[82]年和 1994^[83]年制定了类似的一维电场传感器的标定标准。美国的 Campbell 公司^[84]、美国 NASA^[85]、中国科学院空间中心^[86,87]、南京信息工程大学^[88]和中国科学院电子学研究所等研究机构也均根据自己研制的一维电场传感器研制了类似的电场标定装置。

然而,目前还未有关于 MEMS 三维电场传感器的标定标准的相关报道。与一维电场传感器的标定相比,三维电场传感器的标定的重点在于提供相对于传感器方向可变的空间电场。在三维电场传感器标定中,为了产生相对于传感器的不同方向的空间电场,常采用两块固定的平行板电极产生平行电场,配合旋转电场传感器的方式实现。但是不同于一维电场传感器的标定,三维电场传感器需要被安装在带有旋转轴的标定夹具上,且放置在电场空间的中心处,从而通过旋转传感器实现多个方向空间电场的标定;如果采用有线信号传输和外部电源供电,信号线和电源线均不可避免地放置于电场空间内。因此,标定夹具和导线的存在均会干扰标定电场的强度和方向。

目前,根据不同的 MEMS 三维电场传感器,已开发出了各自的标定夹具。图 1.19、图 1.20 和图 1.21 分别为闻小龙^[73]、王宇^[74]和李冰^[72]根据自己研制的 MEMS 三维电场传感器设计的用于标定的夹具。他们的标定夹具均由低介电常数的绝缘材料制成,且有两个相互正交的转动轴。然而,由于要在标定夹具上集成两个旋转轴,因此标定夹具体积都较大。其中,闻小龙和王宇均未分析标定夹具对空间电场造成的误差。此外,除了图 1.19 中的三维电场传感器采用无线信号传输和电池供电之外,图 1.20 图 1.21 中的三维电场传感器均为有线传输和外接电源供电。以图 1.21 为例,导线沿着标定夹具布置,若夹具绕着旋转轴 R2 转至最高点时,导线上的电势必然会对标定电场造成巨大的干扰。然而,李冰^[89]在分析夹具对标定电场造成的误差时忽略了信号线和电源线对电场的这两个重要的因素。

图 1.19 闻小龙等研制的三维电场传感器的标定夹具^[73]Figure 1.19 Fixture for 3D EFS calibration developed by Wen^[73].图 1.20 王宇等研制的三维电场传感器的标定夹具^[74]Figure 1.20 Fixture for 3D EFS calibration developed by Wang^[74].图 1.21 李冰等研制的三维电场传感器的标定夹具^[72]Figure 1.21 Fixture for 3D EFS calibration developed by Li^[72].

综上所述，目前还没有关于标定夹具或导线对标定电场造成干扰的较为系统全面的研究。因此，研究一种针对 MEMS 三维电场传感器的标定电场误差分析模型和计算方法，用于指导标定结构设计和测试系统设计，具有重要意义。

1.3 本文主要研究内容

三维电场测量在航天发射、电力系统、气象、科学研究等诸多领域具有重

要而广泛的应用。典型的三维电场传感器包含 X 、 Y 和 Z 三个相互正交的测量轴，分别测量三个方向的电场分量。然而在实际测量中，任意一个测量轴的输出信号会被耦合入另外两个测量轴的电场分量的影响，这种轴间耦合干扰影响了三维电场传感器的测量准确性。为了研制微型化、高性能的三维电场传感器，本文基于 MEMS 技术，开展了低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器的研究。本文提出并研制了一种低耦合干扰的 MEMS 一维电场敏感芯片；在此基础上，作者研制出组件式和微组装式两种低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器。

具体研究内容如下：

1、本文提出了一种低耦合干扰的 MEMS 一维电场敏感芯片，基于该芯片研制了一种组件式低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器。该 MEMS 一维电场敏感芯片采用镜面对称设计，在差分电路的配合下该芯片够测量垂直于对称面方向的电场分量敏感，并能够消除正交于测量轴方向的电场分量的耦合干扰；将三个该芯片正交布置构成三个相互正交的测量轴，实现了低轴间耦合的三维电场测量。本文对该 MEMS 一维电场敏感芯片的敏感结构进行了理论分析和仿真建模，并基于 SOI 工艺成功制备了该芯片。

2、为了在减小轴间耦合干扰的同时进一步减小传感器的体积，本文提出了一种微组装式低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器，并研究了其微加工工艺和微组装工艺。该传感器呈等腰直角三棱柱状，三个侧面分别为三个一维电场敏感单元，分别用于测量 X 、 Y 和 Z 三个正交方向的电场分量。每个一维电场敏感单元也采用镜面对称设计，在差分电路的配合下该一维电场敏感单元仅对垂直于对称面方向的电场分量敏感。三个一维电场敏感单元通过微铰链连接构成一个整体结构，互锁机构固定了三者的相对位置保证了三个测量轴相互正交。本文成功将 PSPI 作为微铰链结构的材料兼容进了传统 SOI 的微加工工艺中，制备了该 MEMS 三维电场传感器芯片；设计并研制了相应的微组装机械装置，最终实现了该 MEMS 三维电场传感器的结构。

3、本文分别研制了组件式和微组装式低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器的测试系统和标定系统。针对 MEMS 三维电场传感器标定时标定系统对标定电场造成的干扰，本文提出了一种基于有限元的标定电场误差分析模型和计算方法，用于指导标定结构设计和测试系统设计。本文在常温常压下分别对组件式

和微组装式低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器进行了标定与测试。

针对上述研究内容, 本文各章节内容组织如下:

第 1 章: 绪论。介绍了电场传感器的研究现状及发展趋势, 特别介绍了 MEMS 三维电场传感器的发展现状, 并分析了已报道的 MEMS 三维电场传感器中存在的问题, 明确了本文的研究目的和主要研究内容。

第2章: 低耦合干扰的MEMS一维电场敏感芯片研究。本章提出并研制了一种低耦合干扰的MEMS一维电场敏感芯片。本章介绍了该MEMS一维电场敏感芯片的工作原理和基本结构, 且通过有限元仿真验证了该芯片仅对垂直于对称面方向的电场分量敏感; 为了增加该MEMS一维电场敏感芯片的感应效率, 本章对芯片的感应结构进行了优化, 包括芯片的尺寸参数、电极的尺寸参数、以及电极的布置方式; 本章通过有限元仿真计算和理论计算, 分析了该MEMS一维电场敏感芯片谐振结构的工作模态和固有频率; 该MEMS一维电场敏感芯片采用SOI微加工工艺, 本章介绍了芯片制备工艺的流程, 以及制备过程中遇到的问题和解决方案。

第 3 章: 组件式低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器系统研究。基于本文第二章中提出并研制的低耦合干扰的 MEMS 一维电场敏感芯片, 本章研制了一种组件式低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器。本章介绍了该三维电场传感器的基本结构。为了实现低误差的三维电场传感器标定; 论述了该三维电场传感器的标定系统(特别是标定夹具和导线)对电场空间的干扰, 设计了一款低干扰的标定夹具, 并且提出了一种基于有限元的标定电场误差分析模型和计算方法, 计算了标定夹具和导线对电场空间造成的误差。针对该三维电场传感器, 本章研制了其前端放大电路和集成化后端处理系统。最后, 本章在常温常压下对该三维电场传感器进行了标定与测试, 并对结果展开分析和讨论。

第 4 章: 微组装式低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器研究。为了在减小轴间耦合干扰的同时进一步减小传感器的体积, 本章提出了一种微组装式低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器, 并研究了其微加工工艺和微组装工艺。该三维电场传感器采用微组装技术, 将微加工后二维的 MEMS 芯片组装成一个小型化且集成化的呈三维结构的 MEMS 芯片。该芯片呈等腰直角三棱柱状, 三个侧面分别为三个低轴间耦合的一维电场敏感单元, 分别用于测量 X 、 Y 和 Z 三个正交

方向的电场分量。每个一维电场敏感单元也采用了镜面对称设计，在差分电路的配合下该一维电场敏感单元仅对垂直于其对称面方向的电场分量敏感。本章详细介绍了该 MEMS 三维电场传感器芯片的结构和实现低轴间耦合三维电场测量的方法；该 MEMS 三维电场传感器芯片采用 SOI 和 PSPI 结合的微加工工艺，本章详细介绍了该芯片微加工工艺流程、版图设计和微组装工艺，以及制备过程中遇到的问题和解决方案。

第 5 章：微组装式 MEMS 三维电场传感器测试标定系统研究。针对本文第四章中设计并制备的微组装式低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器，本章提出了一种集成化小型测试系统，并设计了一款三维电场传感器标定夹具，用于减小传感器标定过程中引入的误差。该集成化小型测试系统采用无线传输和电池供电，避免了标定过程中电源线和信号线对空间电场的干扰。基于本文第三章中提出的标定电场误差分析模型和计算方法，本章计算了标定夹具对电场空间造成的误差。最后，本章在常温常压下对该 MEMS 三维电场传感器进行了标定与测试，并对结果展开分析和讨论。

第 6 章：结论。概述了论文的主要工作内容，总结论文工作的创新点，对下一步工作进行展望。

第2章 低耦合干扰的 MEMS 一维电场敏感芯片研究

传统的 MEMS 电场敏感芯片用于测量垂直于芯片上表面的电场分量，但无法减小或消除平行于芯片表面的电场分量的耦合干扰。针对上述的问题，本章提出并成功制备了一种低耦合干扰的 MEMS 一维电场敏感芯片。本章介绍了该 MEMS 一维电场敏感芯片的工作原理和基本结构，仿真验证了其对耦合干扰的抑制能力，对其驱动结构、敏感结构和弹性结构进行了解析分析和仿真分析。此外，本章详细介绍了该 MEMS 一维电场敏感芯片的微加工工艺流程和版图设计，介绍了芯片制备工艺中遇到的问题和解决方案。

2.1 低耦合干扰的 MEMS 一维电场敏感芯片工作原理与基本结构

2.1.1 电荷感应式 MEMS 电场传感器工作机理

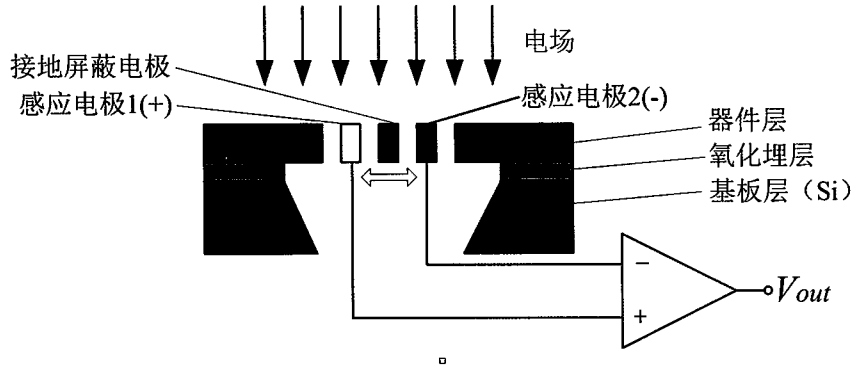


图 2.1 电荷感应式电场传感器芯片的工作原理^[89]

Figure 2.1 Schematic view of charge-induction-based EFS chip^[89].

本文设计的 MEMS 一维电场敏感芯片采用电荷感应的原理进行电场测量。图 2.1 为电荷感应式 MEMS 电场传感器的工作机理示意图，感应电极和屏蔽电极均置于外电场中。其中，感应电极与检测电路连接，屏蔽电极接地。在外电场的作用下，感应电极和屏蔽电极的表面均会感应出一定量的电荷。根据高斯定理，感应电荷量的大小与闭合曲面内的电通量成正比，取闭合曲面为感应电极表面，感应电荷量的计算公式为

$$Q_s = \varepsilon_0 \oint_S E_n \cdot dS, \quad \dots (2.1)$$

其中 ε_0 为真空介电常数, E_n 为感应电极表面的电场强度, S 为感应电极的面积, Q_s 为感应电极表面的总电荷量。当屏蔽电极与感应电极的相对位置发生周期改变时, 感应电极表面的电场分布也会发生周期变化, 使得感应电极表面的感应电荷总量变化, 从而形成了电流。该电流 i_s 可以表示为

$$i_s = \frac{dQ_s}{dt} \quad \dots (2.2)$$

由式 (2.2) 可知, 该电流信号的幅值与待测电场强度大小呈正比。将传感器的输出电流进行 I/V 转换可得到便于测量的电压信号。需要注意的是传感器的存在会让被测外电场产生畸变, 部分外电场由于畸变会作用在感应电极表面, 其作用方向为感应电极表面的法向。因此, 外电场无论是沿着垂直于芯片上表面方向或是沿着平行于芯片上表面方向, 均能在感应电极表面形成电荷。所以, 传统的 MEMS 电场敏感芯片尽管用于测量垂直于芯片上表面的电场分量, 但对平行于芯片表面的电场分量也有响应, 即存在耦合干扰。

2.1.2 MEMS 一维电场敏感芯片结构和耦合干扰抑制原理

为了抑制传统的 MEMS 电场敏感芯片中的耦合干扰, 本章基于 SOI 提出了一种低耦合干扰的 MEMS 一维电场敏感芯片。该芯片主要由一个静电驱动的谐振结构构成, 如图 2.2(a)所示。其结构特点为:

- 该芯片采用了 SOI 的微加工工艺, 所有结构均共面;
- 谐振结构包括了屏蔽电极、可动电极和双折梁;
- 该芯片采用条状电极作为其感应电极和屏蔽电极, 两组感应电极阵列镜面对称布置在芯片的两侧;
- 屏蔽电极与感应电极共面, 且两者以叉指的形式相对布置;
- 推挽梳齿驱动结构分布在感应电极阵列的左右两侧, 为谐振结构提供静电驱动;
- 推挽梳齿驱动结构包括驱动电极和可动电极, 驱动电极与电路连接用于提供静电电压, 可动电极作为谐振结构的一部分, 受到静电力驱动时会带动谐振结构运动;
- 双折梁分布在推挽梳齿驱动结构的左右两侧, 其一端固定, 为谐振结构提供弹性结构。

V_{DC} 是静电驱动信号中的直流偏置成分, V_{AC} 是静电驱动信号中的交流成分。如图 2.2(b), 当谐振结构在推挽梳齿驱动结构提供的静电力的驱动下沿着对称面做周期性平动时, 屏蔽电极与其对应的感应电极的间距会发生周期改变, 从而周期性地改变感应电极表面的电场分布, 最终输出电流。两组感应电极阵列分别连接两个相同的 I/V 转换电路, 用于将输出的电流信号转化为可进一步处理的电压信号, 然后一起并入仪表放大器用于差分。

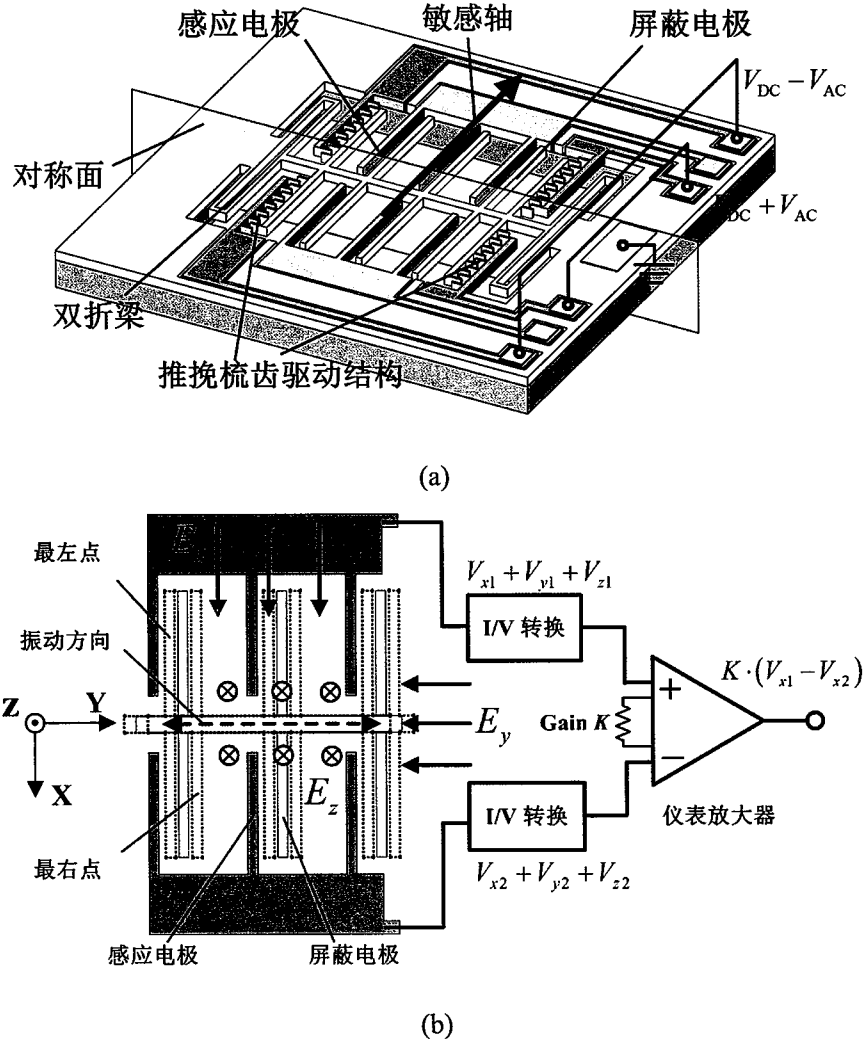


图 2.2 (a)MEMS 一维电场敏感芯片的结构示意图; (b)两个感应电极阵列与差分电路连接

Figure 2.2 (a) Schematic view of the proposed 1D EFS chip; (b) two arrays of fixed sensing electrodes are connected to difference circuit.

不同于传统的 MEMS 一维电场敏感芯片, 该芯片采用镜面对称设计, 用于测量垂直于对称面方向的面内电场分量。假定该传感器芯片置于匀强电场中, 放置在 X - Y 平面上, 且对称面与 Y - Z 面重合, 如图 2.2(b)所示。在沿 X 轴电场

分量作用下，由于芯片结构对称，因此 $Y-Z$ 平面是一个等势面。由此可推断出两组感应电极阵列上的电通量大小相等方向相反，所以两组感应电极阵列上分别感应出等值但符号相反的电荷。相应地，两组感应电极阵列上产生的感应电流也等值但符号相反。相反地，沿 Y 轴电场分量和沿 Z 轴电场分量在两组感应电极阵列上均感应出等值且等符号的电荷，因此两组感应电极阵列上产生的感应电流也相等。图 2.2(b)展示了该 MEMS 一维电场敏感芯片去耦合干扰的过程， V_x 、 V_y 和 V_z 分别为在沿 X 轴、沿 Y 轴和沿 Z 轴电场分量作用下感应电极阵列输出的电流经过 I/V 转换后得到的输出电压，其中 $V_{x1} = -V_{x2}$ 、 $V_{y1} = V_{y2}$ 、 $V_{z1} = V_{z2}$ 。经过仪表放大器的差分后， V_x 得到保留，而 V_y 和 V_z 均被抵消。由此可知，该 MEMS 一维电场敏感芯片仅对垂直于其对称面方向的电场分量敏感。

2.1.3 MEMS 一维电场敏感芯片耦合干扰抑制分析

为了进一步证明该 MEMS 一维电场敏感芯片仅对垂直于对称面方向的电场分量敏感，本章使用有限元方法，基于有限元分析软件仿真分析该 MEMS 一维电场敏感芯片在不同方向电场条件下的感应电荷。

考虑到芯片结构较为复杂，所以在有限元分析时需要对芯片结构进行简化。图 2.3 为该 MEMS 一维电场敏感芯片的等尺寸仿真模型。其中，两组感应电极阵列被简化为了两个矩形感应面，且省略了推挽梳齿驱动结构和双折梁等结构。该芯片置于匀强电场中，放置在 $X-Y$ 平面上，且对称面与 $Y-Z$ 面重合。假设电场的强度为 E_0 ，电场矢量与 Z 轴夹角为 θ ，电场矢量在 $X-Y$ 平面上的投影与 X 轴的夹角为 φ ，则

$$E_x = -E_0 \sin \theta \cos \varphi, \quad \dots (2.3)$$

$$E_y = E_0 \sin \theta \sin \varphi, \quad \dots (2.4)$$

$$E_z = -E_0 \cos \theta, \quad \dots (2.5)$$

E_x 、 E_y 和 E_z 分别为空间三维电场在 X 轴、 Y 轴和 Z 轴方向的分量。假定 Q_{A1} 和 Q_{A2} 分别是感应面 1 和感应面 2 上感应产生的电荷量，则

$$Q_x = Q_{A1} - Q_{A2},$$

其中， Q_x 为感应面 1 和感应面 2 的差分输出。从理论上说， Q_x 相对于 θ 和 φ 的关系应该与 E_x 相对于 θ 和 φ 的关系一致，且 Q_x 与 E_y 和 E_z 无关。

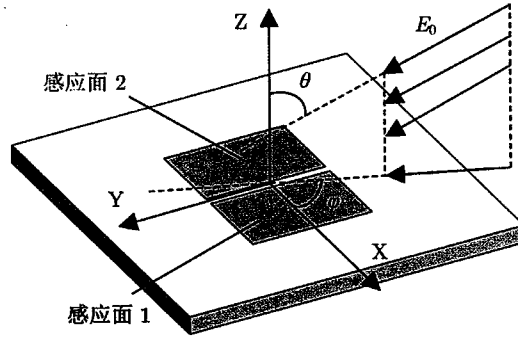


图 2.3 MEMS 一维电场敏感芯片在三维电场空间中的仿真模型

Figure 2.3 Simulation model for the response of 1D EFS chip to a 3D electric field with different directions.

如图 2.4 所示, 建立立方体的电场空间, 该立方体电场空间的尺寸远大于一维电场敏感芯片尺寸。在立方体电场空间的两个相对面上分别施加大小相等符号相反的电势 (图 2.4 中的 A17 和 A18), 用于产生匀强电场, 电场强度设为 1kV/m 。将该 MEMS 一维电场敏感芯片模型置于立方体电场空间的中心。考虑到该 MEMS 一维电场敏感芯片的屏蔽电极接地, 且感应电极等效接地, 因此将该 MEMS 一维电场敏感芯片的电势设为零。然后将立方体电场空间先绕着 Z 轴旋转角度 φ , 再绕着 Y 轴旋转角度 $90^\circ - \theta$, 用于不断改变电场相对于该 MEMS 一维电场敏感芯片的方向。本章采用了 ANSYS 有限元分析软件进行仿真分析, 考虑到每个电场方向均对应了一个独立的仿真模型, 本章采用了 ANSYS 软件中批处理模式 (ANSYS Batch Mode) 来实现对众多仿真模型的处理, 批处理能够有效地提高仿真效率。

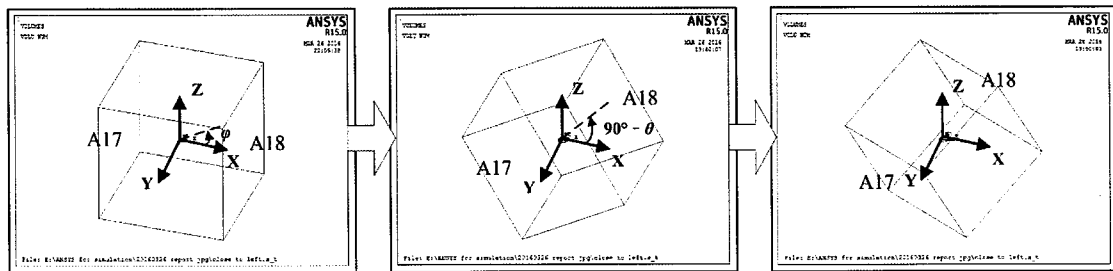


图 2.4 在 ANSYS 软件中施加不同方向电场的示意图

Figure 2.4 Schematic view of generating 3D electric field with different directions in ANSYS.

仿真实验的结果如图 2.5 所示。其中, 图 2.5(a)为 Q_x 与 θ 和 φ 的关系图, 图 2.5(b)和图 2.5(c)可视为图 2.5(a)的部分截面。如图 2.5(b)所示, 当 φ 为 180°

时, Q_x 与 θ 呈三角函数关系, 而当 φ 为 90° 和 270° 时, Q_x 为零, 这说明 Q_x 与 E_y 和 E_z 无关。如图 2.5(c) 所示, 当 θ 为定值时, Q_x 与 φ 呈三角函数关系。综上所述, 通过仿真证明了采用镜面对称设计的 MEMS 一维电场敏感芯片仅对垂直于对称面方向的电场分量敏感, 能够消除耦合干扰。

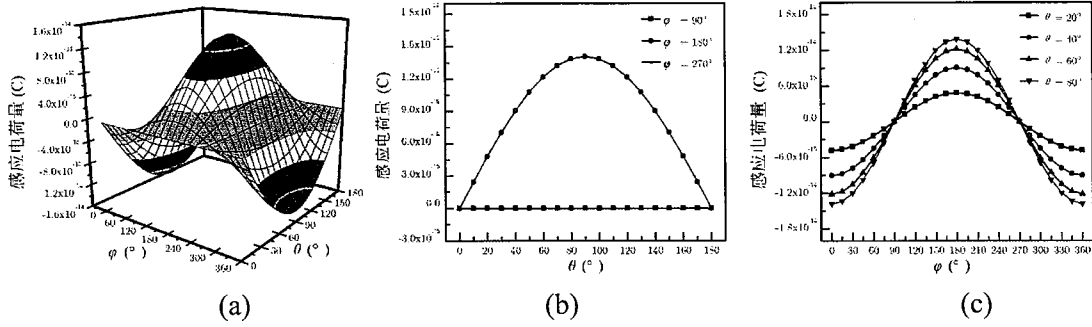


图 2.5 MEMS 一维电场敏感芯片对不同方向电场仿真结果。(a) Q_x 与 θ 和 φ 的关系; (b) 当 φ 为 90° 、 180° 和 270° 时 Q_x 与 θ 的关系; (c) 当 θ 为 20° 、 40° 、 60° 和 80° 时 Q_x 与 φ 的关系

Figure 2.5 Simulation results of the proposed 1D EFS chip's response to electric fields with different directions. (a) Q_x with respect to θ and φ ; (b) Q_x with respect to θ when φ is 90° , 180° , and 270° ; (c) Q_x with respect to φ when θ is 20° , 40° , 60° , and 80° .

2.2 感应结构优化

为了增加该 MEMS 一维电场敏感芯片的感应能力, 本章对该芯片的感应结构进行了优化, 包括芯片的尺寸参数、电极的尺寸参数、以及电极的布置方式。

2.2.1 芯片尺寸优化

芯片尺寸参数优化的目的在于: 通过调整芯片的长或宽, 增加该芯片的感应区域在沿着测量轴方向电场分量作用下的感应电荷量。为此, 本节建立了理论模型, 分析了当该 MEMS 一维电场敏感芯片置于沿着其测量轴方向的匀强电场中时, 该芯片感应区域上的电场分布。

本节建立如图 2.6(a) 所示的模型, 该 MEMS 一维电场敏感芯片置于沿着其测量轴方向的匀强电场中。其中, 面 1 和面 3 为相互平行且无限大的等势面, 面 1 和面 3 施加不同的电势用于产生匀强电场; 面 1 和面 3 均与 MEMS 一维电场敏感芯片的对称面面 2 平行, 且与面 2 的距离相等。根据本章 2.1.2 节的分析, 面 2 也为等势面, 其电势值应为面 1 和面 3 电势之和的一半, 因此若分别在面 1 和面 3 分别施加等值且反向的电势, 则面 2 的电势为 0。由于该 MEMS 一维

电场敏感芯片仅对沿着其测量轴方向的电场分量敏感，因此本节沿着该 MEMS 一维电场敏感芯片的测量轴取下了剖面进行研究。为了简化研究模型，本节忽略了该 MEMS 一维电场敏感芯片表面的传感器结构，将其简化为一个相对于坐标系 y 轴轴对称的矩形等势体，如图 2.6(b)所示。该 MEMS 一维电场敏感芯片的感应区域简化为坐落在矩形上表面的长度为 l 的直线；面 1、面 2 和面 3 均简化为无限长的直线，其中由面 2 简化后的直线与 y 轴重合；简化后 MEMS 一维电场敏感芯片的电势与 y 轴一样，均为 0。

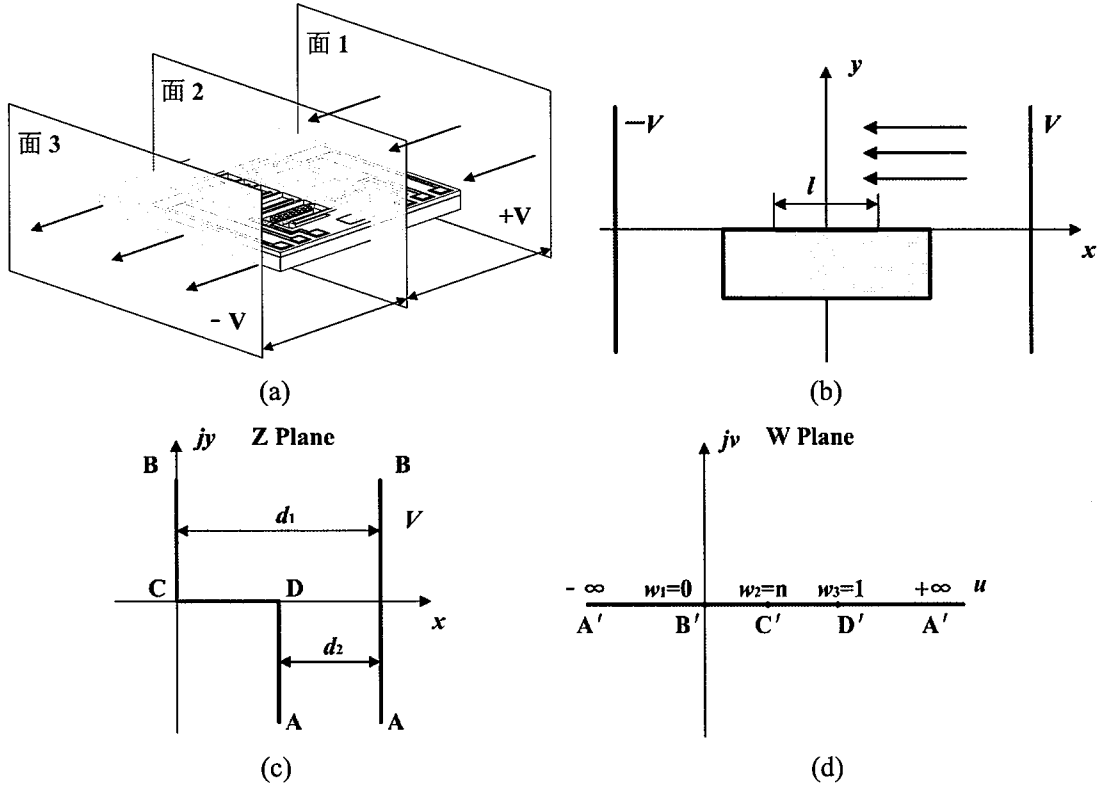


图 2.6 采用 Schwarz-Christoffel 变换分析 MEMS 一维电场敏感芯片上表面的电场强度。(a) 对该 MEMS 一维电场敏感芯片沿着测量轴方向做剖面；(b)简化后的二维模型；(c)Z 平面模型；(d)W 平面模型。

Figure 2.6 The analysis of electric field distribution on the upper surface of 1D EFS chip with Schwarz-Christoffel transformation. (a) Cut section along sensing axis of 1D EFS chip; (b) simplified model of 1D EFS chip in cut section along sensing axis; (c) simplified model of 1D EFS chip in Z plane; (d) electric field distribution area in Z plane is transformed to W plane.

图 2.6(c)为该模型在 Z 平面的示意图。为了方便分析，本节 (1) 取坐标轴上 $x \geq 0$ 的区域进行研究；(2) 由于只研究电场在简化的 MEMS 一维电场敏感芯片上表面的分布，所以将该 MEMS 一维电场敏感芯片的厚度设置为无限长。因此，图 2.6(c)中线段 $A-B$ 是电势为 V 的高电位场源； $B-C-D-A$ 电势为零；线 $A-B$

和 B-C 的距离为 d_1 ，线 A-D 和 A-B 的距离为 d_2 。如图 2.6(d)所示，使用 Schwarz-Christoffel 映射，将 Z 平面上的电场分布考察区转换到 W 平面的上半平面，Z 平面的 A、B、C 和 D 分别对应于 W 平面的 A'、B'、C'和 D'。这一过程的转换式为

$$\frac{dz}{dw} = K (w - w_1)^{-\frac{\alpha_1}{\pi}} (w - w_2)^{-\frac{\alpha_2}{\pi}} (w - w_3)^{-\frac{\alpha_3}{\pi}}, \quad \dots (2.6)$$

其中 w_1 、 w_2 和 w_3 是平面内 B'、C'和 D'的值， K 为积分常数。因此 $w_1=0$ 、 $w_2=n$ 和 $w_3=1$ ，且 $\alpha_1=\pi$ 、 $\alpha_2=\pi/2$ 、和 $\alpha_3=-\pi/2$ 。所以，式 (2.6) 可写为

$$\frac{dz}{dw} = K \frac{1}{w} \sqrt{\frac{w-1}{w-n}}. \quad \dots (2.7)$$

由于 Z 平面中的点 A 对应于 W 平面的 A'在 ∞ 处，因此可得

$$K = -\frac{d_2 j}{\pi}.$$

由于点 B 处有 1 对平行线，所以可以构建方程

$$d_1 = \pi \frac{d_2}{\pi} \sqrt{\frac{0-1}{0-n}}.$$

由上述方程式可得 $n = \frac{d_2^2}{d_1^2}$ ，其中 n 与 m 的表达式由 d_1 和 d_2 决定。对式(2.7)

进行积分，计算得

$$z = K \int \frac{1}{w} \sqrt{\frac{w-1}{w-n}} dw + C_1. \quad \dots (2.8)$$

式 (2.8) 并不属于常规积分，因此需要用换元法进行积分计算，设 $t^2 = \frac{w-1}{w-n}$ ，

则 $w = \frac{nt^2-1}{t^2-1}$ ，则式 (2.8) 可表示为

$$z = -\frac{2d_2 j}{\pi} \int \frac{(1-n)t^2}{(t^2-1)(nt^2-1)} dt + C_1. \quad \dots (2.9)$$

将式 (2.9) 调整成多个分式相加的形式，并引入待定系数 H_1 和 H_2 ，可得如下形式

$$z = -\frac{2d_2}{\pi} \int \left[\frac{H_1}{t^2-1} + \frac{H_2}{nt^2-1} \right] dt + C_1,$$

计算可得 $H_1 = -1$, $H_2 = 1$ 。因此

$$z = \frac{d_2 j}{\pi} \ln \frac{t-1}{t+1} - \frac{d_1 j}{\pi} \ln \frac{d_2 t - d_1}{d_2 t + d_1} + C_1。$$

当 $w=1$ 时, $t=0$, $z=d_1-d_2$, 带入上式得 $C_1=0$, 则

$$z = \frac{d_2 j}{\pi} \ln \frac{t-1}{t+1} - \frac{d_1 j}{\pi} \ln \frac{d_2 t - d_1}{d_2 t + d_1}, \quad \dots (2.10)$$

其中, t 为中间变量。式 (2.10) 为 Z 平面内任意一点 ($z=x+jy$) 与 W 平面内任意一点 ($w=u+jv$) 的坐标对应关系。再引入对数变换将 W 平面内图形变换成无限大平行板电容形状, 即可求解出 W 平面内电场分布。通过 W 平面内电场分布和式 (2.10), 最终求得 Z 平面参考区域内任意一点的电场强度 E 为

$$E = -E_1 \frac{d_1}{d_2} \sqrt{\frac{w-n}{w-1}} = -\frac{V}{d_1 d_2} \sqrt{\frac{d_1^2 w - d_2^2}{w-1}}, \quad \dots (2.11)$$

其中 E_1 为水平匀强电场强度。结合式 (2.10) 和式 (2.11), 研究电场在图 2.6(c) 的线 C-D 和 D-A 的强度, 结果如图 2.7 所示。其中, 预设 $d_1=0.3\text{m}$ 、 $d_2=0.295\text{m}$ 、 $E_1=100\text{V/m}$, 因此该 MEMS 一维电场敏感芯片在沿着水平方向上的尺寸为 $2 \times (d_1-d_2)=0.01\text{mm}$ 。由图 2.7 可知, 当 $x \rightarrow 0.005\text{mm}$ 时, 即趋于 D 点的位置, E 递增并在 D 处趋于无穷大。所以, 由该理论模型可知, 当该 MEMS 一维电场敏感芯片置于沿着其测量轴方向的匀强电场中时, 该芯片上表面的电场强度在对称面附近几乎为零; 芯片上表面的电场强度随着远离对称面递增。同时, 本节采用了有限元分析的方法对线 C-D 上的电场强度进行了仿真计算, 并与理论计算结果进行比较验证, 结果如图 2.8 所示。实验结果表明: 针对不同尺寸的 d_1 和 d_2 组合, 有限元仿真计算结果和理论计算结果一致。

对图 2.7 或图 2.8 中的某一段电场强度曲线做积分, 即可计算得到该段区域内单位长度下 MEMS 一维电场敏感芯片上表面的电通量 D_x 。若该 MEMS 一维电场敏感芯片的感应区域长度为 $l=4\text{mm}$, 本节只需研究在 x 为 0 至 $l/2$ 这段区域内的 D_x 即可。由图 2.8 可知, d_1-d_2 越小, D_x 越大。图 2.9 量化地给出了在 l 固定的情况下 D_x 与 d_1-d_2 的关系, 其中, $E_1=100\text{V/m}$ 、 $l=4\text{mm}$ 、 $d_1=0.3\text{m}$ 。图 2.9 中, D_x 随着 d_1-d_2 的增加而递减, 由此可得: 在芯片感应区域面积固定

的情况下，芯片在沿着测量轴方向的尺寸越小，其感应区域上的电通量越大，则最终的感应电荷量也越大。

综上所述，应尽量减少芯片在沿着测量轴方向的尺寸，以增加其感应电荷的效率。最终，芯片的尺寸设为 $6.4\text{mm} \times 6.4\text{mm}$ 。

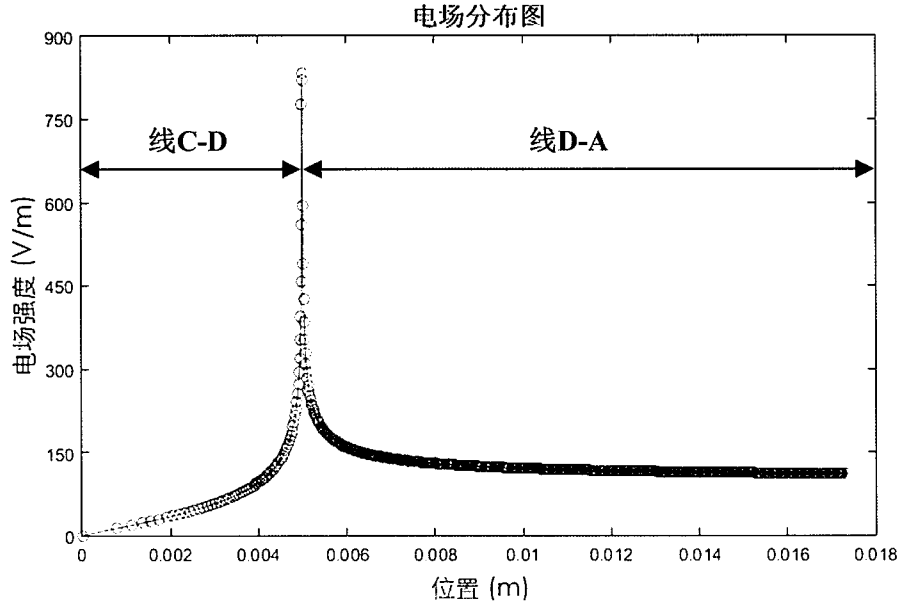


图 2.7 电场强度在线 C-D 和线 D-A 上的变化曲线

Figure 2.7 Electric field strength on line C-D and line D-A

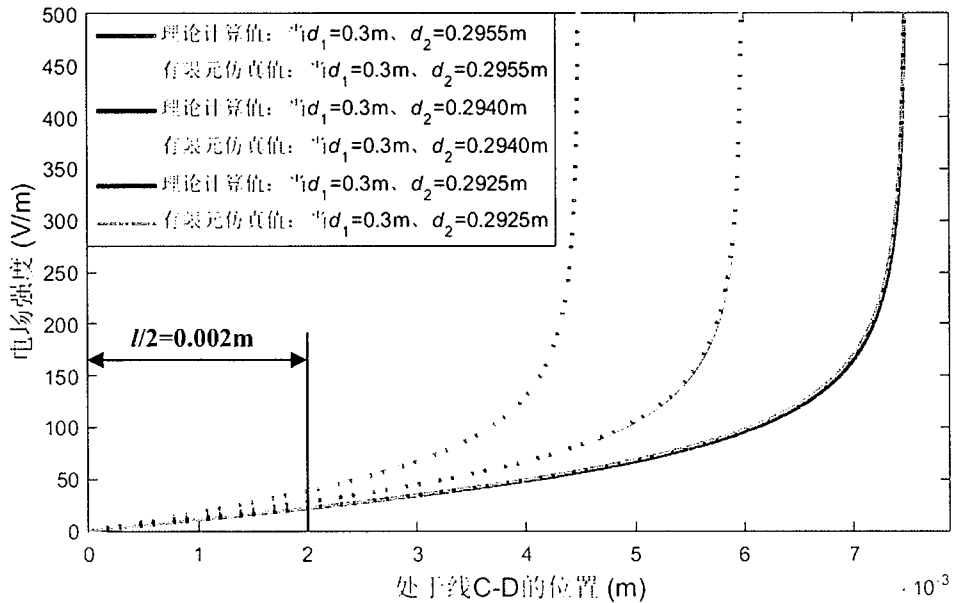


图 2.8 理论计算与仿真计算比较

Figure 2.8 Comparison between theoretical results and simulation results.

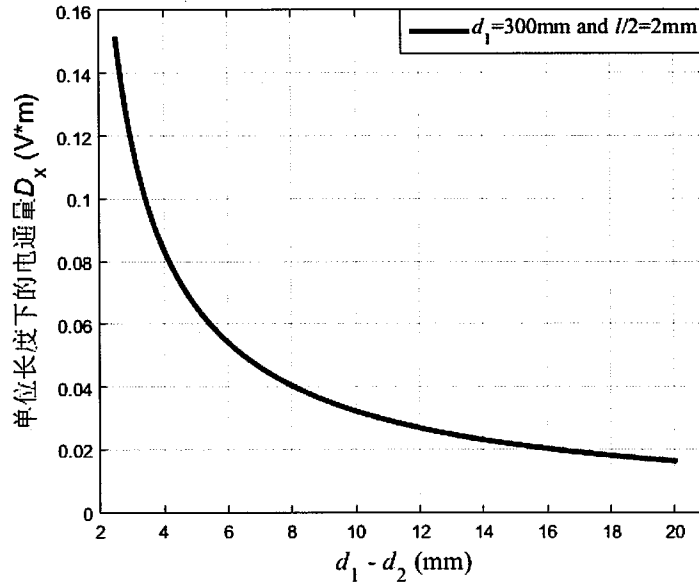


图 2.9 单位长度下该 MEMS 一维电场敏感芯片表面的电通量 D_x 与 d_1-d_2 的关系

Figure 2.9 D_x , Electric flux on the sensing area of 1D EFS chip per unit length, versus d_1-d_2 .

2.2.2 感应电极和屏蔽电极参数优化

为了增加该 MEMS 一维电场敏感芯片的灵敏度, 本节对条状感应电极和条状屏蔽电极的尺寸参数进行优化。根据该 MEMS 一维电场敏感芯片的设计, 每一对感应电极和屏蔽电极均平行且等间距布置, 如图 2.10 所示。其中, 设电极的长度为 L 、电极的厚度为 h 、感应电极宽度为 w_{sn} 、屏蔽电极宽度为 w_{sh} 、屏蔽电极 1 和感应电极 1 的间距为 w_{g1} 、屏蔽电极 1 和感应电极 2 的间距为 w_{g2} 。设当屏蔽电极处于平衡位置时 $w_{g1}=w_e$; 另外, 为了方便分析引入了变量 $w_T=w_{g1}+w_{g2}$, 需要注意的是 w_T 为定值。

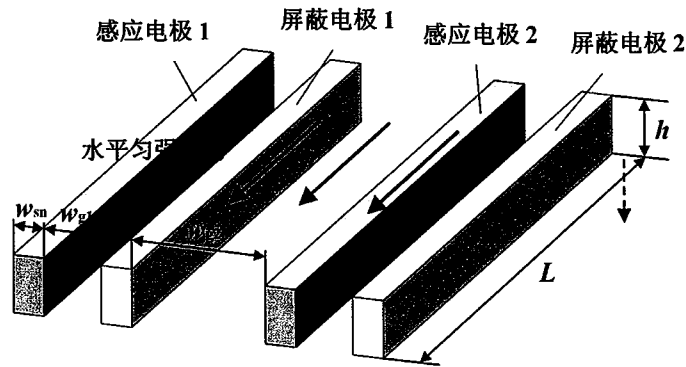


图 2.10 感应电极和屏蔽电极仿真模型

Figure 2.10 Simulation model for sensing electrodes and shielding electrodes.

其中, L 越长感应电极上的感应电荷量 Q 越大, 因此在满足条状电极力学极限的情况下应尽可能增加条状电极的长度, 此处的 L 设为 $1000\mu\text{m}$ 。 h 由 SOI 的结构体硅厚度决定, 此处选用结构体硅厚度为 $25\mu\text{m}$ 的 SOI (MEMS 一维电场敏感芯片的微加工工艺会在本章 2.6 节中具体介绍), 因此 h 确定为 $25\mu\text{m}$ 。

与本章 2.1.3 节类似, 本节也采用 ANSYS 有限元分析软件建模分析了其余参数组合对感应电极表面的感应电荷量 Q 和感应电荷变化量 ΔQ 的影响, 并采用了 ANSYS 有限元分析软件中的批处理模式来实现对众多仿真模型的处理。为了获得更准确的仿真数据, 有限元分析模型须尽可能地接近实际情况, 采取的措施包括: (1) 尽可能细化网格和 (2) 尽可能使仿真的边界条件接近实际情况。细化网格会相应地增加有限元单元的数量和待解方程的数量, 最终增加计算量, 因此本章需要调试仿真模型中网格的大小, 以求在计算精度和计算耗时之间找到平衡点。ANSYS 有限元仿真的模型如图 2.11 所示, 其中, 感应电极和屏蔽电极的底部距离电场空间的底部为 $300\mu\text{m}$, 因为 SOI 的衬底硅的厚度为 $300\mu\text{m}$; 最外侧的感应电极和屏蔽电极距离电场空间的两侧边际均为 $w_{g2}/2$, 因为每对感应电极和屏蔽电极均等间距布置, 所以电场空间也应该平均分配。最后, 施加 1V/m 的水平匀强电场。

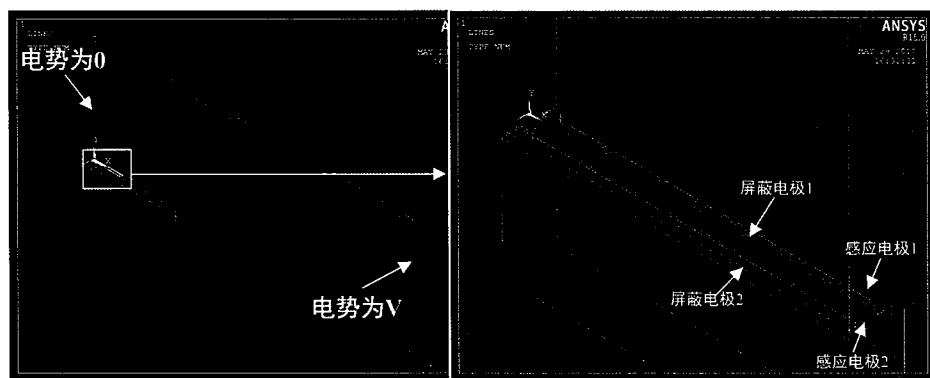


图 2.11 感应电极和屏蔽电极的 ANSYS 仿真模型

Figure 2.11 Simulation model for sensing electrodes and shielding electrodes in ANSYS.

图 2.12(a)为仿真计算所得的单个感应电极的感应电荷量 Q 与 w_{g1} 的关系。由图可知, (1) 当屏蔽电极越靠近感应电极时 (即 $w_{g1} \rightarrow 0$ 或 $w_{g1} \rightarrow w_T$ 时), Q 变化量越大; (2) 当 $w_{g1} \rightarrow w_T/2$ 时, Q 变化量越小。因此在屏蔽电极振动幅度不变的情况下, 为了增加感应电极的感应电荷变化量, 应尽量减小屏蔽电极和感应电极的间距。考虑到屏蔽电极和感应电极距离过小容易产生静电吸附, 所

以选取屏蔽电极的平衡位置 $w_e=w_{g1}=15\mu\text{m}$ 。

根据经验,屏蔽电极的振幅为 $\pm 5\mu\text{m}$,因此,在屏蔽电极振动时,屏蔽电极和感应电极的最大间距为 $20\mu\text{m}$,最小间距为 $10\mu\text{m}$ 。设这两个位置时单个感应电极的感应电荷量 Q 的变化量为 ΔQ , ΔQ 决定了感应电极的输出电流。由图 2.12(b)所示,对于不同的 w_{sh} , ΔQ 均随着感应电极的宽度 w_{sn} 的增加不断减小。因此为了增加 ΔQ , w_{sn} 设为 $8\mu\text{m}$ 。由图 2.12(c)所示,对于不同的 w_T , ΔQ 随着 w_{sh} 的增加不断增加。例如, $w_{sh}=16\mu\text{m}$ 时的 ΔQ 相对于 $w_{sh}=8\mu\text{m}$ 时的 ΔQ 均多了 50%以上。但是屏蔽电极的宽度 w_{sh} 的增加会 (1) 降低谐振结构的谐振频率和 (2) 增加谐振结构的阻尼,因此 w_{sh} 不宜过大,此处 w_{sh} 设为 $10\mu\text{m}$ 。同时由图 2.12(c)所示,感应电荷变化量 ΔQ 均随着 w_T 的增加不断增加,因此 w_T 设为 $85\mu\text{m}$ 。

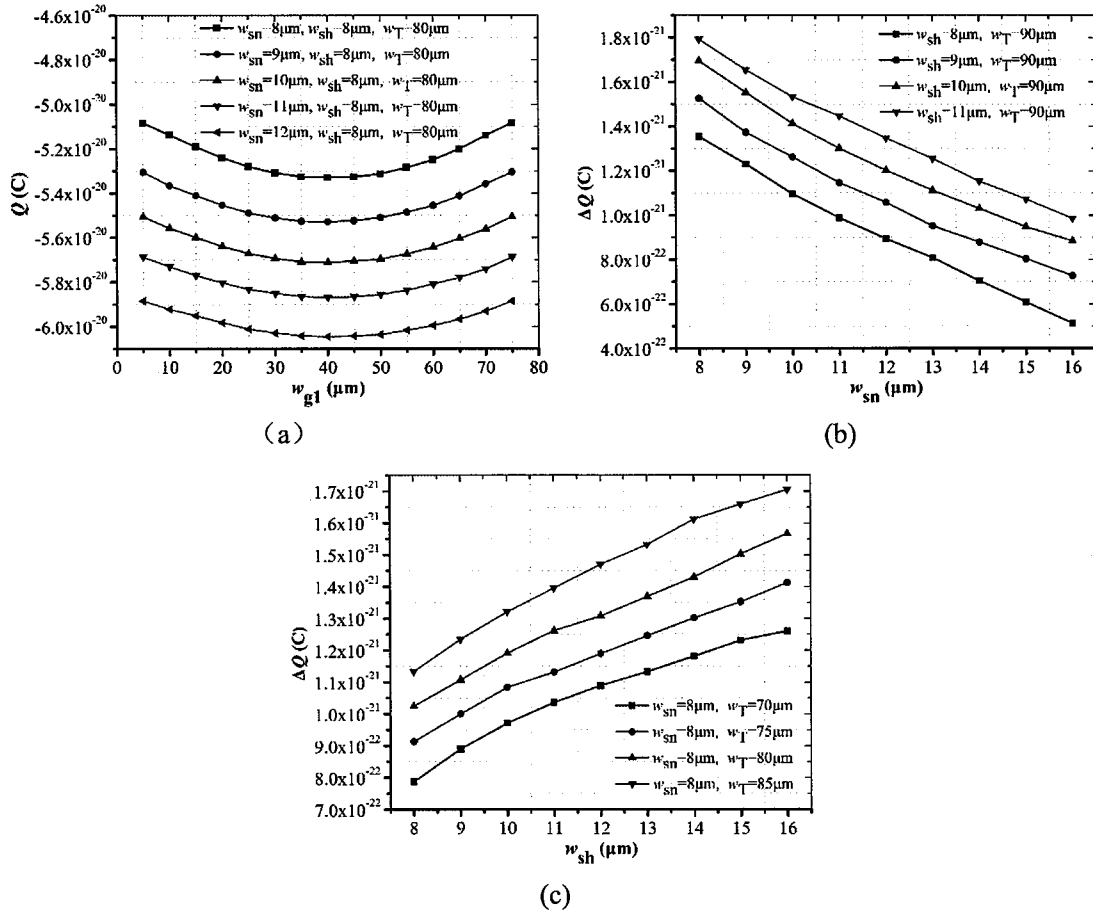


图 2.12 电极参数与仿真所得的感应电荷量的关系 (a) Q 与 w_{g1} 的关系; (b) ΔQ 与 w_{sn} 的关系; (c) ΔQ 与 w_{sh} 的关系

Figure 2.12 The relationship between simulated induced charge and electrode parameters. (a) Q versus w_{g1} , (b) ΔQ versus w_{sn} , (c) ΔQ versus w_{sh} .

该条状电极的具体参数如表 2.1 所示。在表 2.1 的参数条件下，当沿着测量轴方向的电场强度为 1V/m 时，单个感应电极在屏蔽电极从距离 10 μm 到距离 20 μm 的过程中电荷变化量为 $1.324 \times 10^{-21}\text{C}$ 。

表 2.1 感应电极和屏蔽电极参数列表

Table 2.1 List of parameters of sensing electrode and shielding electrode.

L (μm)	h (μm)	w_{sn} (μm)	w_{sh} (μm)	w_{c} (μm)	w_{T} (μm)
1000	25	8	10	15	85

另外，由图 2.12(a)可知，当 w_{gl} 在 10 μm ~20 μm 区间时，单个感应电极的感应电荷量 Q 与 w_{gl} 近似为线性关系。当该 MEMS 一维电场敏感芯片工作在谐振状态时，屏蔽电极的位移变化量与时间呈三角函数关系，且与驱动信号同频（在本章 2.4 节中详细介绍），因此可推导如下公式

$$\begin{aligned}
 i_{\text{sn}} &= \frac{dQ}{dt} = \frac{d\left(Q_0 + \frac{\Delta Q N_{\text{e}}}{2} \sin(2\pi ft + \varphi_0)\right)}{dt} \\
 &= \pi f \Delta Q N_{\text{e}} \cos(2\pi ft + \varphi_0), \quad \dots (2.12)
 \end{aligned}$$

其中， i_{sn} 为单个感应电极阵列的输出电流， f 为屏蔽电极的振动频率， N_{e} 为单个感应电极阵列上的感应电极数量， φ_0 为初始角频率， Q_0 为感应电极上的初始感应电荷量。由式 (2.12) 可得， i_{sn} 的幅值与 ΔQ 成正比，同时根据高斯定理可知， ΔQ 与外电场强度成正比，因此 i_{sn} 的幅值与外电场强度成正比；每个感应电极阵列输出的电流与驱动信号同频，且相位差固定，因此可以采用以驱动信号作为参考信号的相敏检波电路提取电流 i_{sn} 的幅值（该电路在本文 3.2 节中详细介绍）。

2.2.3 感应结构布置方案优化

除了本章 2.2.2 节提出的单感应电极配合单屏蔽电极的感应结构布置方案外，屏蔽电极和感应电极的布置方式还有可能为双感应电极配合单屏蔽电极，或是单感应电极配合双屏蔽电极。考虑到屏蔽电极数量的增加会降低谐振结构的固有频率，从而降低感应电极的输出电流的幅值，因此本节仅研究双感应电极配合单屏蔽电极的方案。如图 2.13 所示，单个屏蔽电极坐落在两个感应电极中间。本节计算了双感应电极配合单屏蔽电极方案的感应电荷变化量，并与单

感应电极配合单屏蔽电极方案对比，从而选用更优的感应结构布置方案。

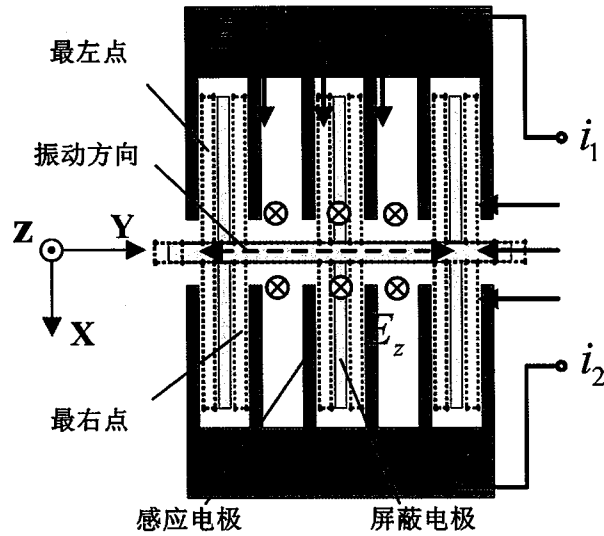


图 2.13 双感应电极配合单屏蔽电极示意图

Figure 2.13 Schmetaic view of double-sensing-eletrodes-single-shielding-electrode.

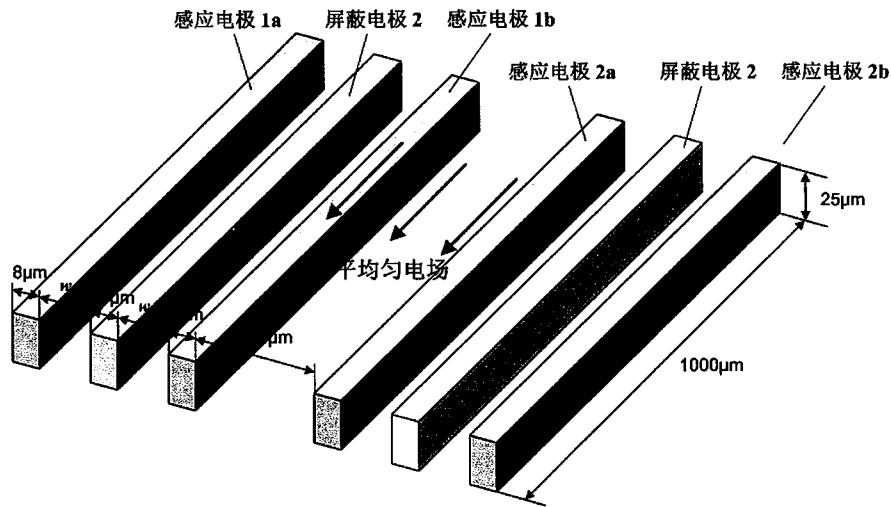


图 2.14 双感应电极配合单屏蔽电极仿真模型

Figure 2.14 Simulation model for double-sensing-eletrodes-single-shielding-electrode.

图 2.14 为双感应电极配合单屏蔽电极的仿真模型，感应电极和屏蔽电极的结构尺寸参照表 2.1；此外， w_{g3} 和 w_{g4} 之和为 $30\mu\text{m}$ ，当屏蔽电极处于平衡位置时 $w_{g3}=w_{g4}=w_e=15\mu\text{m}$ ；假设屏蔽电极的振幅也为 $\pm 5\mu\text{m}$ ，则 w_{g3} 的变化范围为 $10\mu\text{m}\sim 20\mu\text{m}$ 。通过有限元分析方法仿真计算屏蔽电极振动时感应电极的感应电荷变化量，仿真过程参考本章 2.2.2 节，包括（1）尽可能细化网格和（2）尽可能使仿真的边界条件接近实际工作，从而建立了 ANSYS 有限元仿真模型，如图 2.15 所示。最后，施加 1V/m 的水平匀强电场。

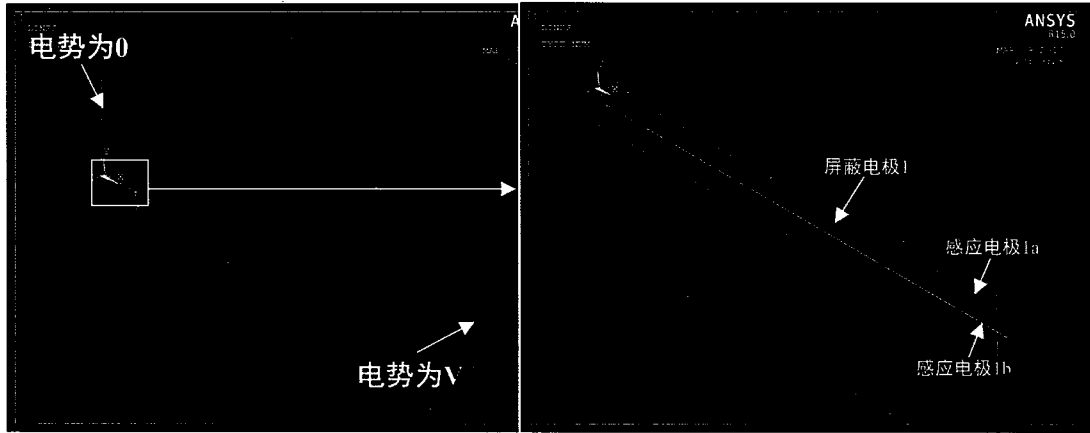


图 2.15 双感应电极配合单屏蔽电极的 ANSYS 仿真模型

Figure 2.15 Simulation model for double-sensing-electrodes-single-shielding-electrode in ANSYS.

图 2.16 为仿真计算得到的双感应电极配合单屏蔽电极方案中感应电极表面的感应电荷量 Q 与 w_{g3} 的关系。其中, Q 为感应电极 1a 和感应电极 1b 两者的电荷量总和。由此图可得, 在 $\pm 5\mu\text{m}$ 的振幅内, 感应电荷变化量为 $2.806 \times 10^{-22}\text{C}$ 。由本章 2.2.2 节可知, 在相同的振幅内, 单感应电极配合单屏蔽电极方案中的感应电荷变化量为 $1.324 \times 10^{-21}\text{C}$ 。两者对比可得: 单感应电极配合单屏蔽电极的感应结构布置方式的电荷感应效率更高。此外, 由图 2.16 可知, Q 与 w_{g3} 并非呈线性关系, 难以采用相敏检波的方式将其提取感应电极输出电流的幅值。

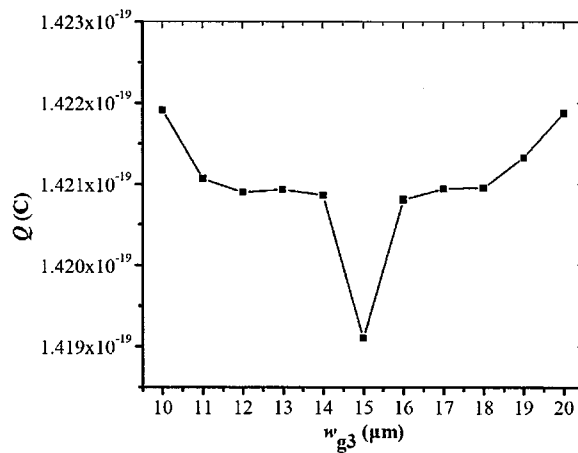


图 2.16 Q 与 w_{g3} 的关系

Figure 2.16 The relationship between Q and w_{g3} .

2.3 驱动结构和弹性结构设计与分析

该 MEMS 一维电场敏感芯片主要由一个谐振结构构成, 因此需要选择合适

的驱动方式和驱动结构来激励其做谐振。微机械结构中常用的驱动方式主要可分为：静电驱动、热驱动、压电驱动和电磁驱动。为了减小器件尺寸、降低功耗、提高器件的响应速度、且避免不必要的工艺复杂度，本节最终选择静电驱动作为其驱动方式。在电气隔离的两个电容平板施加电压会产生静电力，从而驱动两电容平板运动。静电驱动是目前 MEMS 器件中运用最为广泛的驱动方式，其优点在于驱动所需的结构和对应的加工工艺简单、控制方便、功耗低、动作范围大、且与 IC 的兼容性较好等；缺点在于易产生“粘连”失效，且驱动电压容易耦合入测量所得的微弱信号中，降低了输出信号的信噪比。针对可能产生的“粘连”问题，本节需要谨慎选择驱动结构尺寸和驱动电压的大小。

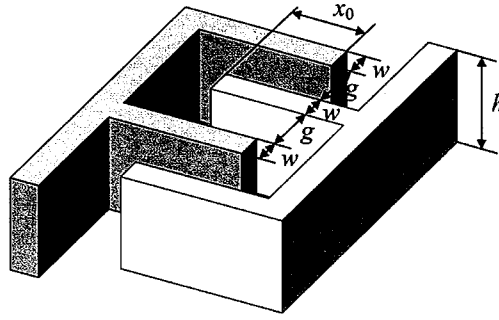


图 2.17 梳齿结构的示意图

Figure 2.17 Schematic view of comb structures.

本章选用梳齿结构作为其驱动结构，如图 2.17 所示，包括可动梳齿和固定梳齿。初始状态下两者的交叠长度为 x_0 ，梳齿高度为 h ，梳齿之间间隙为 g ，梳齿宽度为 w ，当可动梳齿在静电力的作用下产生位移时交叠长度的变化量为 x 。由能量法可得，在可动梳齿和固定梳齿之间施加大小为 V_d 的电压，其产生的静电力大小为

$$F = \frac{1}{2} \frac{\partial C_d}{\partial x} V_d^2, \quad \dots (2.13)$$

其中， C_d 为可动梳齿和固定梳齿之间的电容，忽略边界效应可得

$$C_d = 2N_d \epsilon_0 \epsilon_r (x_0 + x) h / g, \quad \dots (2.14)$$

其中， N_d 为梳齿的对数， ϵ_0 为真空介电常数， ϵ_r 为相对介电常数。将式 (2.13) 代入式 (2.14)，整理得到

$$F = \frac{N_d \epsilon_0 \epsilon_r h}{g} V_d^2. \quad \dots (2.15)$$

根据本章2.1.2节所述,该MEMS一维电场敏感芯片采用推挽差分驱动,即在两侧的驱动电极分别施加大小相等且相位相差 180° 的交流驱动信号成分。左右两侧的电电压分别为

$$V_d^+ = V_{DC} + V_a \sin(\omega t),$$

$$V_d^- = V_{DC} - V_a \sin(\omega t),$$

其中, V_{DC} 为直流电压, V_a 为交流驱动电压的幅值, ω 为交流驱动电压的角频率。因此,将驱动电压带入式(2.16),且通过差分计算可得差分驱动力为

$$\begin{aligned} F_d = F^+ - F^- &= \frac{N_d \varepsilon_0 \varepsilon_r h}{g} \left\{ [V_{DC} + V_a \sin(\omega t)]^2 - [V_{DC} - V_a \sin(\omega t)]^2 \right\} \\ &= \frac{4N_d \varepsilon_0 \varepsilon_r h V_{DC} V_a}{g} \sin(\omega t). \end{aligned} \quad \dots (2.16)$$

因此,驱动力的幅值为

$$F_A = \frac{4N_d \varepsilon_0 \varepsilon_r h V_{DC} V_a}{g}. \quad \dots (2.17)$$

由式(2.17)可知,为了增加驱动力:(1)可增加直流电压,直流偏置电压不会增加同频串扰噪声,有助于提高该MEMS一维电场敏感芯片输出信号的信噪比;(2)尽可能减小梳齿之间的间隙 g ,由于 g 的大小受到工艺限制,尺寸过小难以加工,因此本章中 g 设为 $3\mu\text{m}$;为了尽可能在固定长度上增加梳齿的数目,需要减小梳齿的宽度,因此本章中 w 也设为 $3\mu\text{m}$ 。表2.2为驱动结构的主要参数。

表 2.2 驱动结构参数列表

Table 2.2 List of parameters of driving structure

N_d	$x_0 (\mu\text{m})$	$w (\mu\text{m})$	$g (\mu\text{m})$	$h (\mu\text{m})$
84×20	10	3	3	25

该MEMS一维电场敏感芯片采用双折梁为其弹性结构,如图2.18所示。该双折梁的一端固定,另一端在推挽梳齿驱动结构的作用下受到了力 F_d 作用, F_d 与芯片主梁的中心线平行。该双折梁可视为两个双端固支梁串联,因此在弹性变形范围内该双折梁的弹性系数为 $\frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2}$,其中, k_1 和 k_2 分别为两个双端固支梁的弹性

系数。考虑到该谐振结构左右各布置了一个双折梁，因此谐振结构的总弹性系数应该为 $k = \frac{2k_1k_2}{k_1+k_2}$ 。所以，研究单个双端固支梁的弹性系数就能推断出该双折梁的弹性系数，进而推断出该谐振结构的弹性系数。图2.19(a)为双端固支梁2的模型，考虑到该模型沿着作用力的方向对称，因此能够对该模型作简化，如图2.19(b)所示。

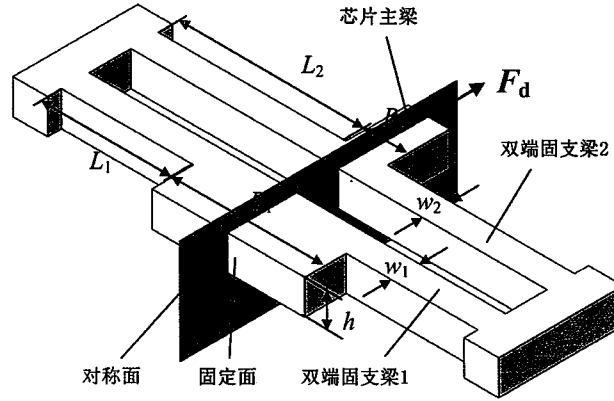


图 2.18 双折梁示意图

Figure 2.18 Schematic view of double-folded-beam.

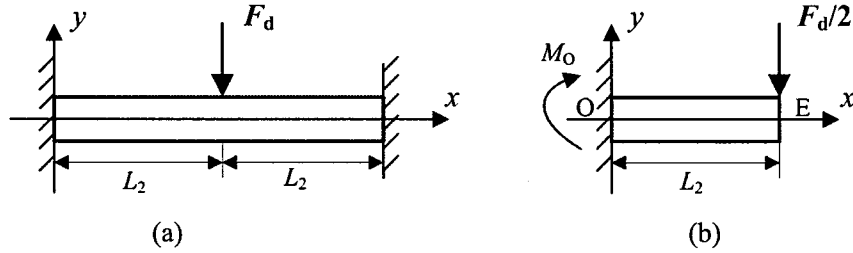


图 2.19 (a)双端固支梁的模型；(b)简化后的双端固支梁的模型

Figure 2.19 (a) Model of double-clamped-beam, (b) simplified model of double-clamped-beam.

根据材料力学，挠度 w 和转角 θ 可表示为：

$$\begin{cases} \frac{d^2 w}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI} \\ \theta = \frac{dw}{dx} \end{cases},$$

其中， E 为双折梁的材料的杨氏模量； I 为惯性矩， $I = \frac{hw_2^3}{12}$ ； $M(x) = M_0 - \frac{F_d x}{2}$ ，

代表了梁在 x 处的弯矩大小。因此，通过对挠度和转角表达式做不定积分可得

$$\theta = \frac{M_0 x}{EI} - \frac{F_d x^2}{4EI} + C, \quad \dots (2.18)$$

$$\omega = \frac{M_0 x^2}{2EI} - \frac{F_d x^3}{12EI} + Cx + D, \quad \dots (2.19)$$

其中, C 和 D 均为不定积分产生的未知的常数。将该模型的边界条件 $\begin{cases} \theta_0 = 0 \\ \theta_E = 0 \\ \omega_0 = 0 \end{cases}$ 带

入式 (2.18) 和式 (2.19) 可得 $C=0$ 、 $D=0$ 和 $M_0 = \frac{F_d L_2}{4}$, 且由此可得

$$\omega = \frac{F_d L_2 x^2}{8EI} - \frac{F_d x^3}{12EI}. \quad \dots (2.20)$$

当 $x = L_2$ 时, $\omega_E = \frac{F_d L_2^3}{2Eh w_2^3}$, 所以弹性系数 $k_2 = \frac{F_d}{\omega_E} = \frac{2Eh w_2^3}{L_2^3}$ 。同理可得

$k_1 = \frac{2Eh w_1^3}{L_1^3}$ 。因此, 该可动结构的弹性系数为

$$k = \frac{4Eh w_1^3 w_2^3}{L_1^3 w_2^3 + L_2^3 w_1^3}. \quad \dots (2.21)$$

表2.3为双折梁结构的主要参数。

表 2.3 双折梁参数列表

Table 2.3 List of parameters of double-folded-beam.

L_1 (μm)	L_2 (μm)	B_1 (μm)	B_2 (μm)	w_1 (μm)	w_2 (μm)	h (μm)
515	665	500	200	7	7	25

假设SOI的结构体硅的杨氏模量为 $E = 130 \times 10^9 \text{ N/m}^2$, 经计算得弹性系数 $k = 10.3 \text{ N/m}$ 。

2.4 动力学分析

2.4.1 动力学模型

根据振动力学的概念^[90], 该MEMS一维电场敏感芯片的谐振结构的动力学方程可表示为:

$$m_e \frac{d^2x}{dt^2} + C \frac{dx}{dt} + kx = F_A \sin \omega t \quad \dots (2.22)$$

其中, m_e 为可动结构的等效质量; C 为等效阻尼系数; k 为可动结构的弹性系数, 如式 (2.21) 所示; F_A 为驱动力的幅值, 如式 (2.17) 所示。式 (2.22) 的瞬态解随时间消逝, 其特解应为正弦或余弦形式, 设为幅值为 X , θ 为激励与响应的相位差, 则

$$x(t) = X \sin(\omega t - \theta)。 \quad \dots (2.23)$$

将式 (2.23) 代入式 (2.22), 建立等号两边的对等关系可得

$$X = \frac{X_0}{\sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + 4\zeta^2 \lambda^2}}, \quad \dots (2.24)$$

$$\theta = \arctan \frac{2\zeta\lambda}{1 - \lambda^2}, \quad \dots (2.25)$$

其中, X_0 为静态振幅, $X_0 = \frac{F_A}{k}$; λ 相对频率, $\lambda = \frac{\omega}{\omega_n}$; ω_n 为谐振结构的固有频率,

率, $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m_e}}$; ζ 为结构的阻尼比, $\zeta = \frac{C}{2\sqrt{m_e k}}$ 。

此外, 该 MEMS 一维电场敏感芯片的谐振结构的等效质量可表示为^[91]

$$m_e = m_p + m_f + \frac{12}{35} m_b + \frac{1}{4} m_t, \quad \dots (2.26)$$

其中, m_p 为屏蔽和支撑梁的质量, m_f 为梳齿的质量, m_b 为双折梁的质量, m_t 为双折梁的桁架质量。结合表 2.4, 经过计算可得, 其等效质量 $m_e = 4.4 \times 10^{-5} \text{g}$ 。由本章 2.3 节可得, 该谐振结构的弹性系数 $k = 10.3 \text{N/m}$ 。因此, 其谐振结构的固有频率计算得 ω_n 为 2436Hz。

图2.20为不同结构阻尼比情况下振幅比和相位差与相对频率的关系。由图

2.20(a)可得: 当 $0 < \xi < \frac{\sqrt{2}}{2}$ 时振幅比有极大值; 设该谐振结构振幅比为极大值时

的共振频率为 ω_m , 另 $\frac{dX(\lambda)}{d\lambda} = 0$, 导出 $\omega_m = \omega_n \sqrt{1 - 2\zeta^2}$ 。此时, 该谐振结构的最大

振幅比为

$$\frac{X_{\max}}{X_0} = \frac{1}{2\zeta \sqrt{1 - 2\zeta^2}}, \quad \dots (2.27)$$

且 $\zeta \rightarrow 0$ 时, $\omega_m \rightarrow \omega_n$, 最大振幅比越大。将 ζ 的表达式带入式 (2.27) 可得该谐振结构的最大振幅比与谐振结构的等效质量 m_e 、弹性系数 k 与阻尼系数 C 有关。为了能以较小的驱动力获得较大的驱动位移, 驱动力的频率应与 ω_m 一致。由图

2.20(b) 可得: 当 $0 < \zeta < \frac{\sqrt{2}}{2}$, 且 $\omega = \omega_m$ 时, 相位差 $0 < \theta < 90^\circ$, 表明响应信号滞后于驱动信号。

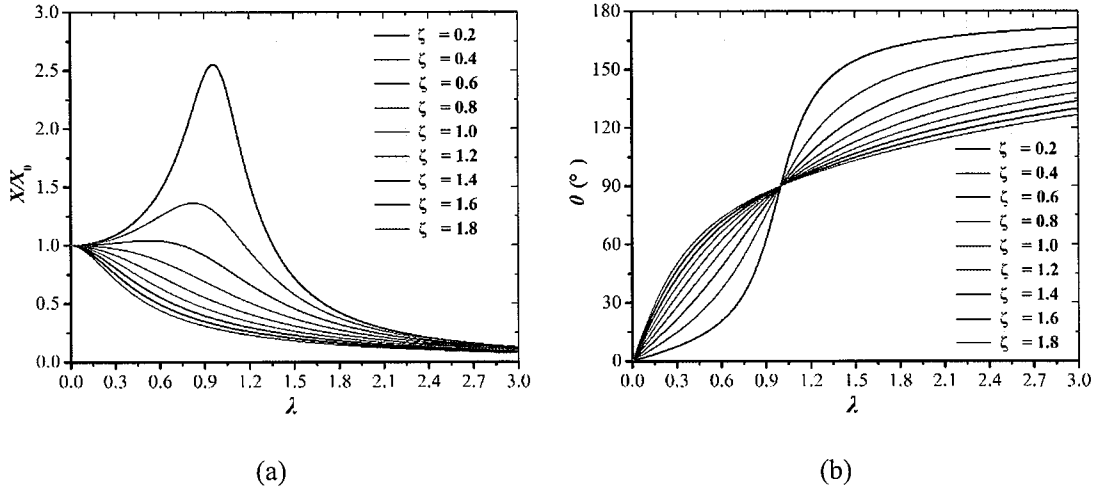


图 2.20 (a) 振幅比随相对频率变化; (b) 相位差随相对频率变化

Figure 2.20 (a) Amplitude ratio versus relative frequency, (b) phase difference versus relative frequency.

2.4.2 固有频率和振动模态的仿真分析

为了获得该 MEMS 一维电场敏感芯片中谐振结构的各个振动模态对应的固有频率, 本节采用 ANSYS 有限元分析软件对谐振结构进行了模态仿真,

为了降低仿真模型的复杂程度, 本仿真中省略了谐振结构上的梳齿; 将谐振结构左右两个双折梁的最外侧面固支, 约束了其所有的旋转自由度和平移自由度; 此外, 仿真中未考虑空气阻尼的影响。仿真结果如图 2.21 所示。

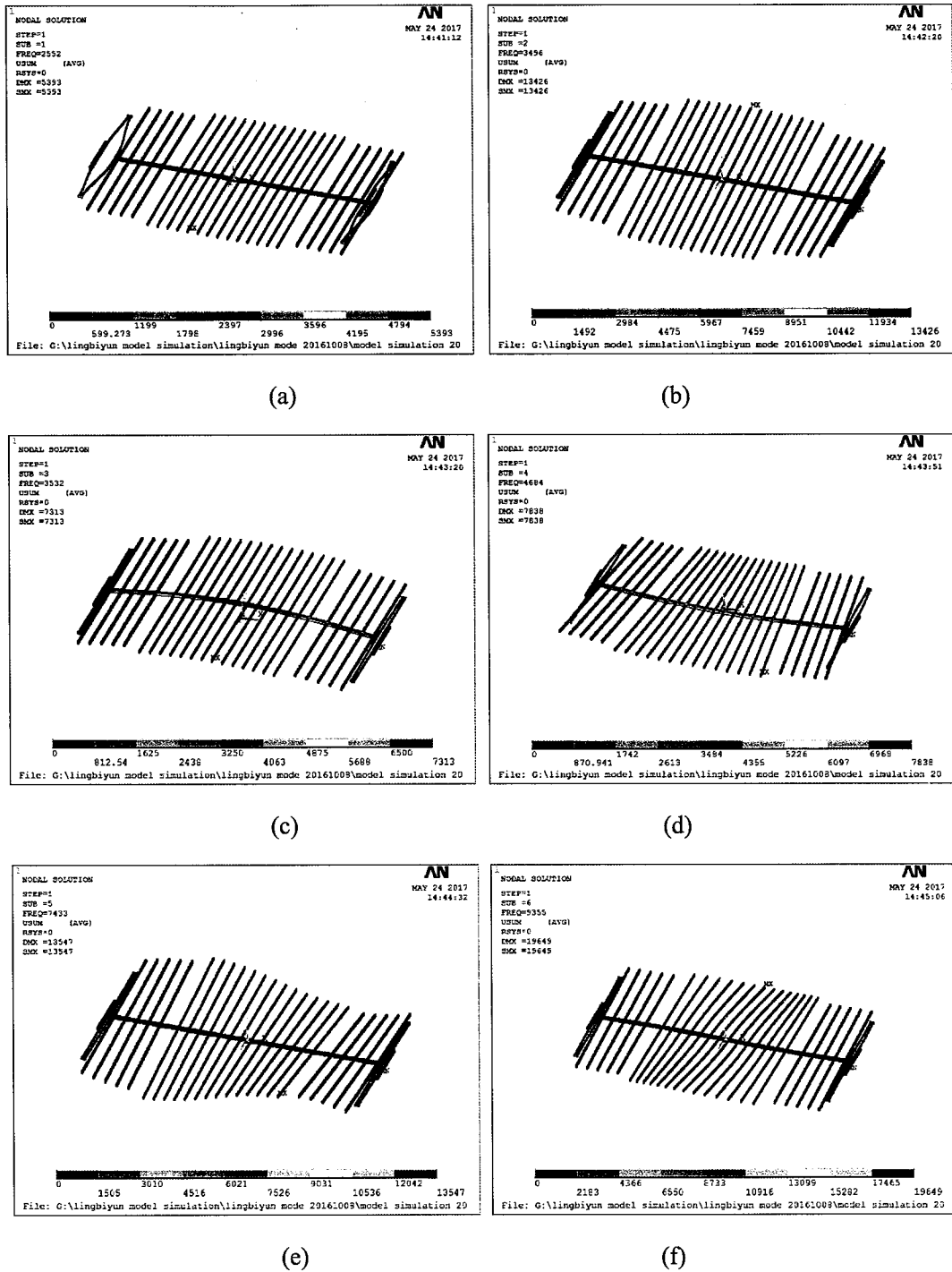


图 2.21 MEMS 一维电场敏感芯片模态仿真结果, (a)一阶模态; (b)二阶模态; (c)三阶模态; (d)四阶模态; (e)五阶模态; (f)六阶模态

Figure 2.21 Modal simulation results of 1D EFS chip, (a) first model, (b) second model, (c) third model, (d) fourth model, (e) fifth model, (f) sixth model.

由图 2.21 可知, 一阶模态至六阶模态的固有频率分别为 2522Hz、3496Hz、3532Hz、4684Hz、7433Hz 和 9355Hz。其中, 一阶模态为传感器的理想工作模

态，即在面内做平移，其余五阶模态均非面内平移。将仿真计算得到的一阶模态的固有频率与本章 2.4.1 节中理论计算到的一阶模态的固有频率对比，两者数值基本相等，相差了 3.4%。两者频率存在差别的主要原因在于有限元仿真时梳齿的质量被忽略，导致有限元仿真计算得到的固有频率略高于理论计算得到的固有频率。

2.5 MEMS 一维电场敏感芯片的设计参数总结

表 2.4 汇总了该 MEMS 一维电场敏感芯片的主要参数。

表 2.4 MEMS 一维电场敏感芯片的主要参数列表

Table 2.4 List of parameters of 1D EFS chip

		结构参数	参数值
SOI 参数	τ	衬底厚度	25 μm
	h	结构厚度	300 μm
敏感结构参数	w_{sn}	感应电极宽度	8 μm
	w_{sh}	屏蔽电极宽度	10 μm
	w_{e}	感应电极与屏蔽电极的间距（平衡位置）	15 μm
	$w_{\text{T}+} w_{\text{sh}}$	相邻的两个感应电极的间距	95 μm
	L_{sn}	感应电极长度	1030 μm
	L_{sh}	屏蔽电极长度	1045 μm
	$2 \times N_{\text{e}}$	感应电极数量	14×2
驱动结构参数	w	梳齿宽度	3 μm
	g	相邻梳齿间距	3 μm
	x_0	相对梳齿交叠区域长度	10 μm
	N_{d}	梳齿数量	84×20
双折梁参数	$2 \times L_1$	双端固支梁 1 长度	1030 μm
	$2 \times L_2$	双端固支梁 2 长度	1330 μm
	w_1	双端固支梁 1 宽度	7 μm
	w_2	双端固支梁 2 宽度	7 μm
等效参数	m_{eff}	谐振结构质量	$4.4 \times 10^{-5} \text{ g}$
	k	等效弹性系数	10.3 N/m
MEMS 一维电场敏感芯片的尺寸		长度×宽度	6.4mm×6.4mm

2.6 MEMS 一维电场敏感芯片微加工工艺

该 MEMS 一维电场敏感芯片采用基于 SOI 的微加工工艺。

2.6.1 SOI

SOI, 即绝缘体上硅, 是结构体硅——二氧化硅氧化层——衬底硅的三层结构。SOI的顶层结构体硅厚度可以从 $1.5\mu\text{m}$ 至几百微米, 且厚度误差一般小于 $0.5\mu\text{m}$, 因此能实现高深宽比、厚度均匀和大质量的三维结构。此外, 由于二氧化硅氧化层的存在, 衬底硅和结构体硅电气绝缘, 这大大减小了衬底硅与结构体硅之间的寄生电容, 有利于降低信号的耦合噪声; 氧化层也使得衬底硅上各个独立的结构电气隔离, 省去了设置常规的隔离层, 简化了工艺流程并且提高了器件的集成度。目前, SOI已广泛应用于MEMS器件的制备中, 基于SOI制备的MEMS器件具有工艺简单和可靠性高等优势, 例如基于SOI制备的高稳定性、高灵敏度和高分辨率的MEMS陀螺仪和MEMS加速度计等。

本文提出的低耦合干扰的MEMS一维电场敏感芯片采用基于SOI的微加工工艺, 且在中国科学院电子学研究所的超净间内完成。该SOI晶圆为双抛光表面无氧化层, 大小为4英寸; 结构体硅厚度为 $25\mu\text{m}$, 衬底硅厚度为 $300\mu\text{m}$, 氧化层厚度为 $1\mu\text{m}$; 结构体硅为N掺杂, 且电阻率 $\leq 0.02\Omega\cdot\text{cm}$ 。

2.6.2 工艺流程

本章的SOI微加工工艺仅需3张掩模板, 分别为金电极焊盘掩模板、结构体硅掩模板和衬底硅掩模板, 三者依次用于形成金电极焊盘层、用于结构体硅的图形化、以及用于衬底硅的图形化。金电极焊盘层包含了金丝球焊接所需的焊盘、导出感应信号所需的电气连接线、以及正面和反面套刻所需的基准标记; 结构体硅掩模板通过正面对准标记与金电极焊盘层对准, 结构体硅经图形化后部分区域被刻至氧化层, 形成所需的传感器芯片结构; 衬底硅掩模板通过反面对准标记与金电极层对准, 衬底硅除了起支撑作用外, 其背面经图形化后被刻穿形成通孔, 通孔可减小该芯片的谐振结构振动时的空气阻尼。

该MEMS一维电场敏感芯片的微加工工艺流程如图2.22所示。需要注意的是: 工艺步骤中多次进行光刻胶的旋涂, 每次旋涂工艺过程均为先在转速 800r/min 时旋转 30s , 然后在转速 3000r/min 时旋转 1min ; 工艺步骤中多次用到光刻机, 每次曝光时光刻机的光强功率和光波长均不变, 分别为 15mW/cm^2 和 $365/405\text{nm}$; 工艺步骤中多次在进行深反应离子刻蚀(Deep Reactive Ion Etching, DRIE)前去除自然氧化层, 采用的设备为ICP-98A型等密度等离子体刻蚀机, 刻

蚀气体选用 CHF_3 ，进气速率为100sccm，上电极功率为500W，下电极功率为50W，刻蚀时间为30s，氧化层的刻蚀速率为1000Å/min。

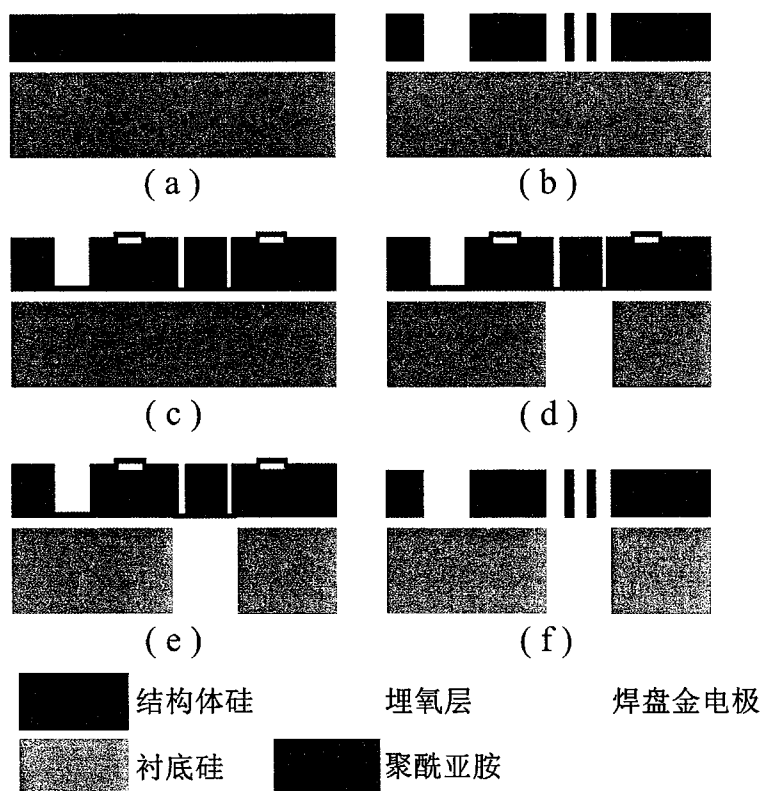


图 2.22 MEMS 一维电场敏感芯片工艺制作流程图

Figure 2.22 Fabrication process of 1D EFS chip.

具体步骤如下：

- (a) 使用溅射和 lift-off 工艺在结构体硅的表面制备金电极焊盘。
 - 1) 将光刻胶 AZ5214E 旋涂至 SOI 的结构体硅表面。AZ5214E 为一款反转胶，即在特定的条件下它会从正胶变为负胶，本章使用 AZ5214E 的负胶特性用于图形化金电极焊盘，因为负胶更适合 lift-off。
 - 2) 将 SOI 放置于 100℃ 的热板上加热 3min30s 用于固化 AZ5214E。
 - 3) 将光刻胶紧贴金电极焊盘掩模板，置于光刻机中曝光 4s。
 - 4) 将 SOI 置于 120℃ 的热板上加热 3min 用于反转 AZ5214E 至负胶。
 - 5) 将 SOI 置于光刻机中曝光 12s。
 - 6) 将 SOI 置于 AZ300 显影液中图形化光刻胶，留出空窗用于溅射，制备金电极焊盘，测量得光刻胶的平均厚度约为 1.2μm。
 - 7) 在 SOI 的结构体硅表面依次溅射 500Å 的铬和 2000Å 的金。

8) 将 SOI 浸泡在丙酮溶液中进行 lift-off 操作, 剥离多余铬和金, 形成金电极焊盘。

(b) 使用 DRIE 图形化结构体硅。

- 1) 将光刻胶 AZ1500 旋涂至 SOI 的结构体表面, AZ1500 为一款正胶。
- 2) 将 SOI 置于 80℃ 的烘箱中加热 40min, 用于固化 AZ1500。
- 3) 将光刻胶紧贴结构体硅掩模板, 置于光刻机中曝光 4s。
- 4) 将 SOI 置于 AZ300 显影液中图形化光刻胶, 为 DRIE 提供掩膜, 测量得光刻胶的平均厚度约为 1.3 μm 。
- 5) 去除结构体硅表面的自然氧化层。
- 6) 采用 Alcatel 的 AMS100 进行 DRIE, 用于图形化结构体硅。其具体工艺参数为: 反应气体的充气周期为 7s, 其中, 依次充入 2s 的 350sccm 的 C₄F₈ 和 5s 的 350sccm 的 SF₆; 上电极的功率始终保持为 1500W, 下电极依次施加 10ms 的 80W 和 90ms 的 0W, 并循环往复。该 DRIE 的时间为 11min, 刻蚀深度为 25 μm , 经测量 DRIE 的深宽约比为 15:1。
- 7) 用去胶机去除结构体硅表面多余的光刻胶。

(c) 在结构体硅表面旋涂聚酰亚胺 (polyimide, PI) 作为结构体硅的保护层。使用 PI 作为保护层的原因在于其耐高温、耐酸性腐蚀和强度高, 能够在 DRIE 工艺中保护结构体硅, 且自身不会因为高温碳化。本章选用的 PI 型号为波米科技的 ZKPI-330I 低温固化型。

- 1) 将 PI 旋涂在 SOI 的结构体硅表面。
- 2) 将 SOI 放置于烘箱中, 阶梯升温至 140℃, 烘烤 14h, 用于固化且亚胺化 PI。

(d) 使用 DRIE 图形化衬底硅。

- 1) 将光刻胶 AZ4620 旋涂在 SOI 的衬底硅表面, AZ4620 为一款正胶。
- 2) 将 SOI 置于 80℃ 的烘箱中加热 40min, 用于固化 AZ4620。
- 3) 将光刻胶紧贴衬底硅掩模板, 置于光刻机中曝光 15s。
- 4) 将该 SOI 置于 1% 浓度的 NaOH 显影液中图形化光刻胶, 为 DRIE 提供掩膜, 测量得光刻胶的平均厚度约为 5.2 μm 。
- 5) 去除结构体硅表面的自然氧化层。

6) 采用 Alcatel 的 AMS100 进行 DRIE，用于图形化结构体硅。其具体工艺参数为：反应气体的充气周期为 9s，其中，依次充入 2s 的 150sccm 的 C_4F_8 和 7s 的 700sccm 的 SF_6 ；上电极的功率始终保持为 1800W，下电极依次施加 10ms 的 70W 和 90ms 的 0W，并循环往复。该 DRIE 的时间为 52min，刻蚀深度为 $300\mu m$ ，经测量 DRIE 的深宽约比为 15:1。

7) 用去胶机去除衬底硅表面多余的光刻胶。

(e) 用 CHF_3 从 SOI 的背部去除氧化层。采用 ICP-98A 型等密度等离子体刻蚀机，其刻蚀时间约为 13min，刻蚀气体选用 CHF_3 ，进气速率为 100sccm，上电极功率为 500W，下电极功率为 50W。

(f) 用去胶机去除正面保护材料 PI 从而释放可动结构。

图 2.23 为 SOI 晶圆完成各步骤工艺后的实物图。其中，图 2.23(1)、图 2.23(2) 和图 2.23(4)均为 SOI 结构体硅表面，图 2.23(3)为衬底硅表面。

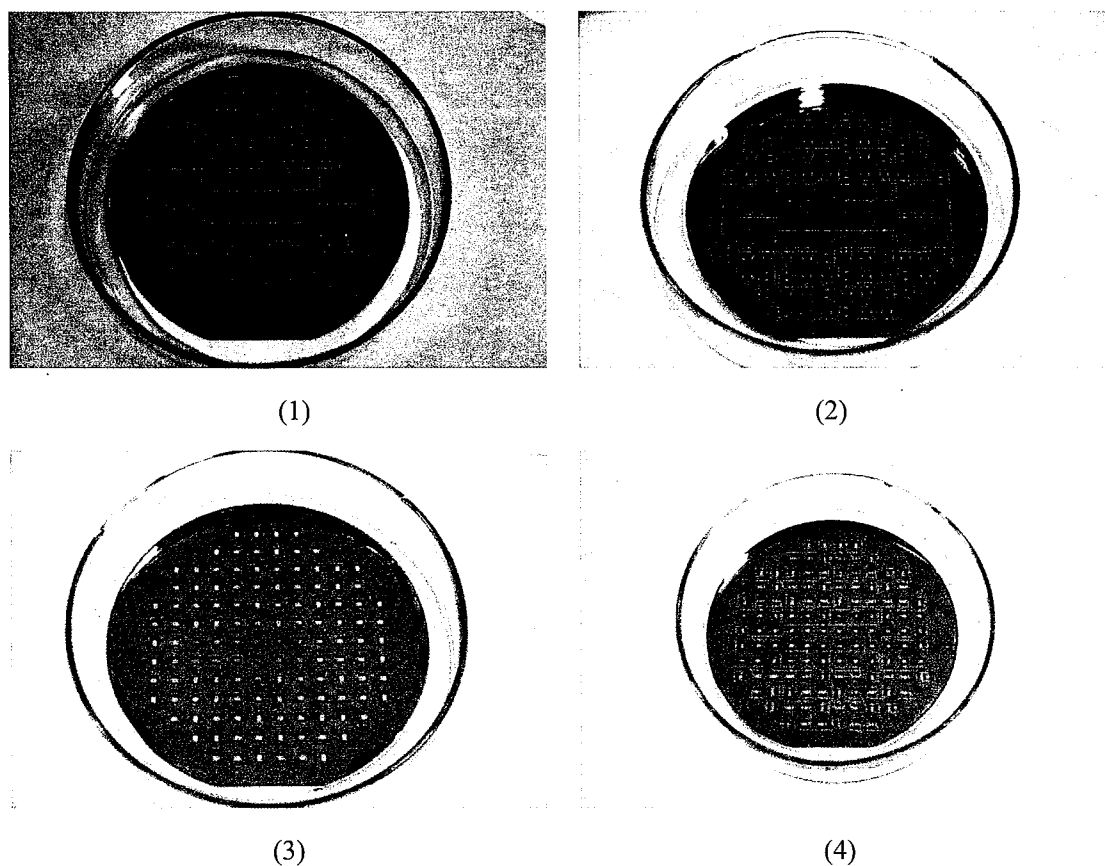


图 2.23 SOI 晶圆完成各步骤工艺后的实物图，(1)完成工艺(a)后；(2)完成工艺(b)后；(3)完成工艺(d)后；(4)完成工艺(f)后

Figure 2.23 Pictures of SOI wafer after main steps of fabrication (1) after step (a), (2) after step (b), (3) after step (d), and (4) after step (f).

2.6.3 版图设计

MEMS 一维电场敏感芯片的版图设计除了绘制敏感结构外, 还需针对微加工工艺中可能存在的问题预设解决方案, 例如为了增加套刻精度优化标记的形状、反面套刻时标记的快速定位、衬底硅图形化时的余量设置、以及划片标记设置等。

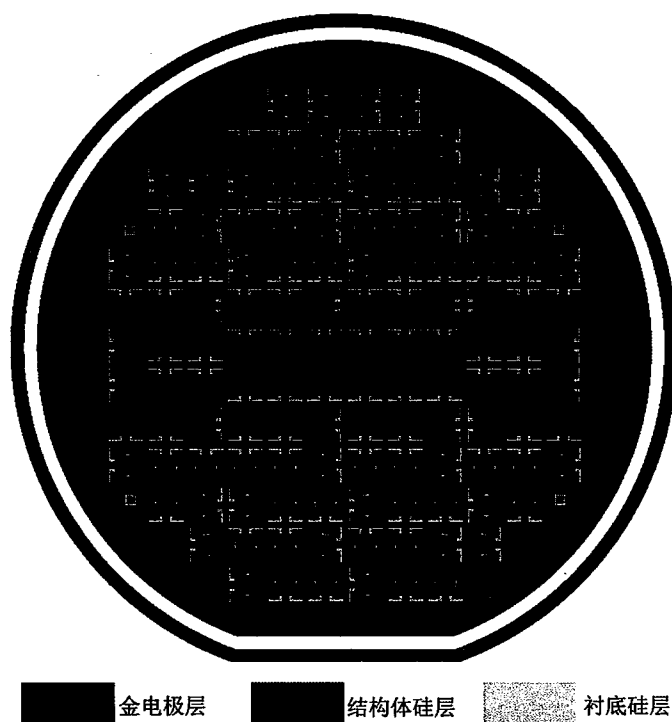


图 2.24 掩膜板设计图

Figure 2.24 Design drawing of masks.

图 2.24 为 MEMS 一维电场敏感芯片的 3 层掩膜板版图。该掩膜板是针对 4 英寸的 SOI 设计的, 一张 4 英寸的 SOI 上共设计有 126 个 MEMS 一维电场敏感芯片。该掩膜板的版图采用 L-edit 软件绘制, 蓝紫色区域代表金电极焊盘层、红色区域代表图形化后的结构体硅层、灰色区域代表图形化后的衬底硅层。由于金电极焊盘层、结构体硅层和衬底硅层会有重叠的区域, 因此该掩膜板版图的部分区域颜色较深。

单个芯片的版图如图 2.25 所示, 芯片结构和具体结构参数已在本章 2.1 节至本章 2.5 节中做了详细介绍。该芯片大范围接地, 且感应信号线尽可能远离驱动信号线, 用于降低感应信号与驱动信号之间的串扰; 芯片的驱动结构与感应结构也由接地的梁隔开, 用于减小驱动结构对感应结构造成的空间耦合干扰,

用于提高该 MEMS 一维电场敏感芯片输出信号的信噪比。

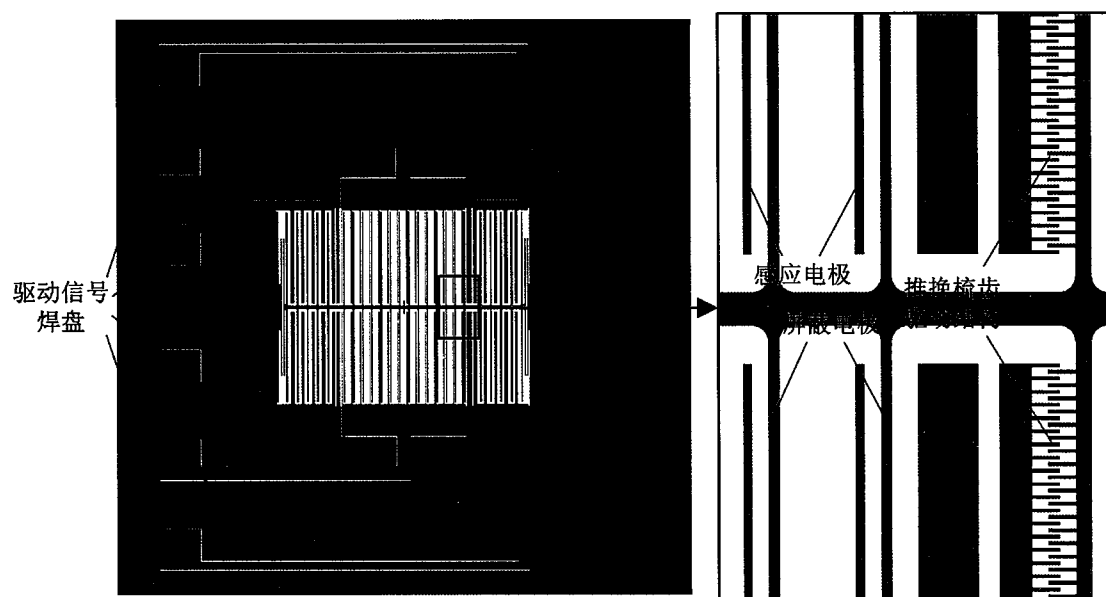


图 2.25 MEMS 一维电场敏感芯片掩膜板设计图

Figure 2.25 Design drawing of masks for 1D EFS chip.

2.7 MEMS 一维电场敏感芯片制备

2.7.1 DRIE 加工

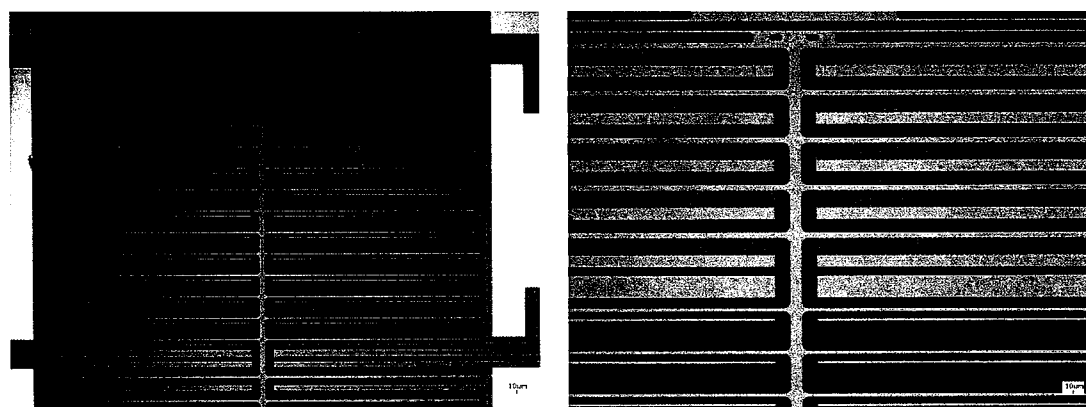


图 2.26 结构体硅图形化后的显微镜图

Figure 2.26 Pictures of patterned silicon layer taken by microscope.

本章制备的 MEMS 一维电场敏感芯片的敏感结构均形成于 SOI 的结构体硅层，采用 DRIE 来实现结构体硅的图形化，因此 DRIE 工艺结果对 MEMS 一维电场敏感芯片的性能最为重要。DRIE 加工需要保证刻蚀后的区域表面干净且没有大面积的“硅柱”，且刻蚀形成的结构尺寸与设计结构尺寸基本相符。图

2.26 为结构体硅图形化后的光学显微镜图，图中结构清晰且没有多余的斑点。经过测量感应电极的平均宽度为 $7.82\mu\text{m}$ ，屏蔽电极的平均宽度为 $9.75\mu\text{m}$ ，梳齿平均宽度为 $2.91\mu\text{m}$ ，与设计值基本相符。

衬底硅的刻蚀是释放谐振结构中重要的一步，其也采用 DRIE 工艺来实现衬底硅的图形化。相对于结构体硅的刻蚀，衬底硅刻蚀的难度在于正面保护材料和氧化层容易破裂，导致在刻蚀过程中散热用的全氟聚醚（PFPE）渗透到刻蚀表面从而影响衬底硅的刻蚀进程。因为在 DRIE 工艺前需要将 SOI 正面涂有 PFPE 材料且与铝块紧密相连，用于 DRIE 时候的散热；当衬底硅快被刻蚀完时，由于 SOI 与铝块贴合部位的内外压差，所以正面保护材料 PI 和氧化层极易破裂，致使 PFPE 渗透至刻蚀面。因为 PFPE 不与 C_4F_8 和 SF_6 反应，因此 PFPE 相对于其覆盖的区域来说类似于掩膜，阻止了该区域的刻蚀，从而导致完成衬底硅在 DRIE 工艺后会有较大范围的“硅柱”残留，如图 2.27 所示（从衬底硅面为视角）。

因此，为了避免“硅柱”的出现，应该适当地增加正面保护材料的厚度，且适当地减小 SOI 与铝块贴合时 PFPE 的涂量，从而减小正面保护材料 PI 和氧化层破裂的概率。图 2.28 为衬底硅刻蚀图形化后的光学显微镜图，由图可见衬底硅已被刻蚀干净，没有多余的“硅柱”残留在氧化层上。



图 2.27 衬底硅图形化后仍有硅柱残留

Figure 2.27 Pictures of patterned substrate layer with some pillar-shaped silicon-based structures remained.

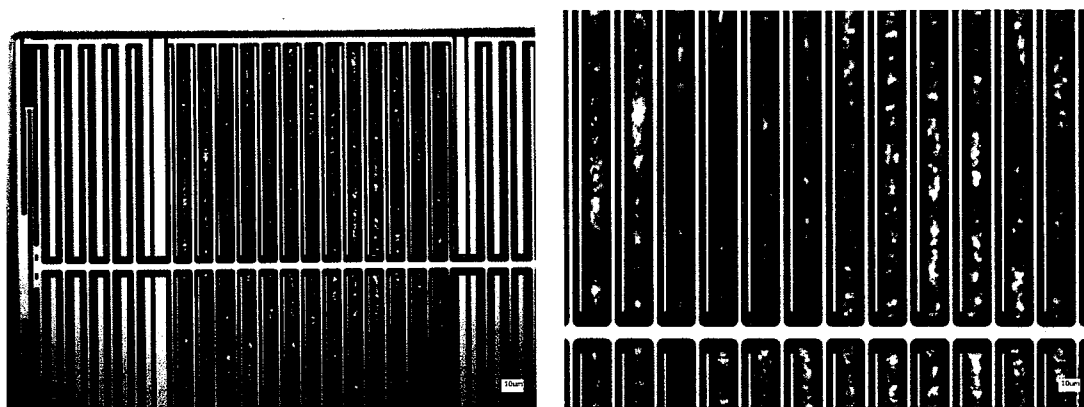


图 2.28 衬底硅图形化后的显微镜图（无硅柱残留）

Figure 2.28 Pictures of patterned substrate layer without pillar-shaped silicon-based structures remained taken by microscope.

2.7.2 正面保护材料去除

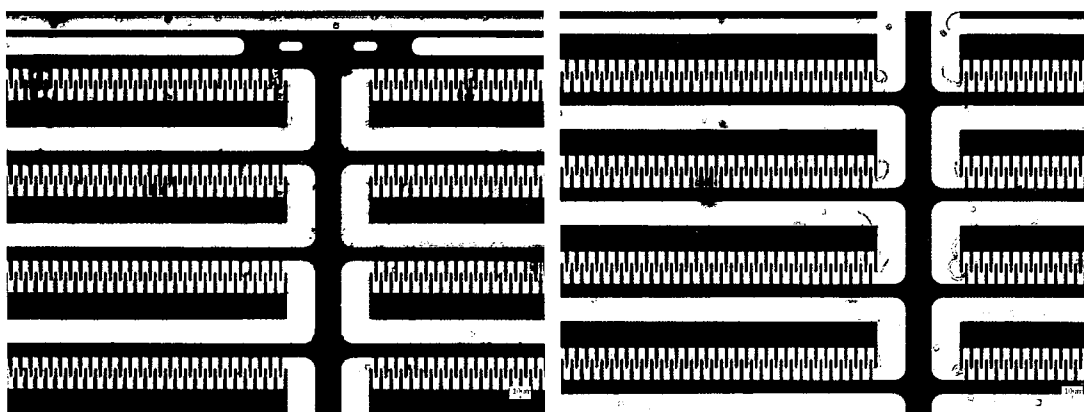


图 2.29 PI 去除后有絮状物残留

Figure 2.29 Floccule remains on structures of 1D EFS chip after removing PI.

正面保护材料 PI 去除后可能会有絮状物残留在芯片的结构上，致使芯片的谐振结构不能彻底释放，如图 2.29 所示。因此，需要分别用 CHF_3 和 O_2 不断尝试刻蚀该絮状物，即采用 ICP 轰击 SOI 的背面。不能轰击 SOI 的正面的原因在于正面含有大量的金电极焊盘，用 ICP 轰击 SOI 的正面会去除金电极焊盘。为了背面轰击 CHF_3 和 O_2 ，SOI 的正面需要与 ICP 的冷却腔直接接触，然而在固定或是取下 SOI 片子时存在损坏芯片结构的风险，因此需要尽可能减少 SOI 固定或是取下的次数。

2.7.3 划片和压焊

完成 SOI 微加工工艺后，需要对 SOI 晶圆进行划片从而分离提取出 MEMS

一维电场敏感芯片。目前常用的划片方式包括：砂轮划片、传统激光划片和隐形激光划片。

砂轮划片是利用砂轮的高速旋转研磨来完成晶圆的划片，该划片方式需要伴随较高压的水流用于冷却以及清洗加工产生的碎屑。然而本文研制的 MEMS 一维电场敏感芯片包含悬空结构（即谐振结构），水流会冲坏悬空结构，因此砂轮划片技术不适用于本晶圆的划片。传统激光划片是利用高能激光束照射在晶圆表面，使其被聚焦的区域局部熔化和气化从而达到划片的目的，所以该划片方式是非接触式的且无需配合水流。然而，传统激光划片会产生大量的粉尘，粉尘落入芯片的结构中很难去除，极易造成结构失效，因此也不适用于本晶圆的划片。隐形激光划片利用穿透率较高的激光束聚焦在单晶硅材料内部，是内部形成变质层，再对晶圆施加外力将其分开成一颗颗的小芯片的划片技术。该划片技术是非接触式的、无需配合水流、且无污染产生，因此适用于对本晶圆的划片。本节使用了 ML 200plus 激光隐形划片机对 4 英寸 SOI 晶圆进行划片。

图2.30为完成划片和压焊后的MEMS一维电场敏感芯片。转接电路板的一边等间距地分布着7个沉积了金的焊盘，该焊盘与MEMS一维电场敏感芯片的焊盘一一对应。该芯片通过导电胶带粘连在转接电路板的中心处，转接电路板中心处有焊盘且与电路的地导通，因此通过导电胶带的作用，该芯片的底部也与电路的地导通；通过金丝球焊接工艺与转接电路板电气连接。图2.31为该MEMS一维电场敏感芯片的SEM图。

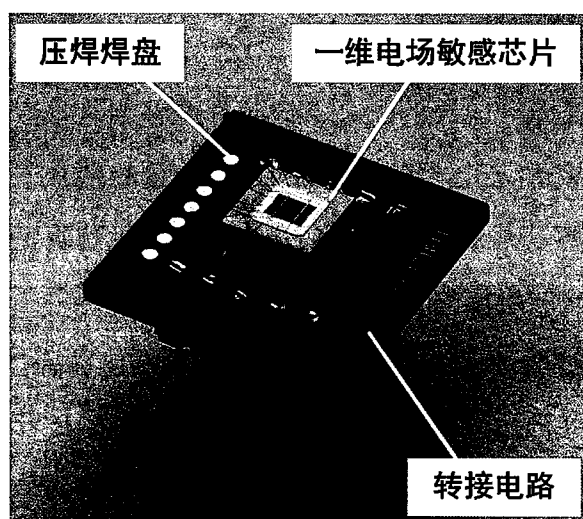


图 2.30 MEMS 一维电场敏感芯片的实物图

Figure 2.30 Picture of 1D EFS chip.

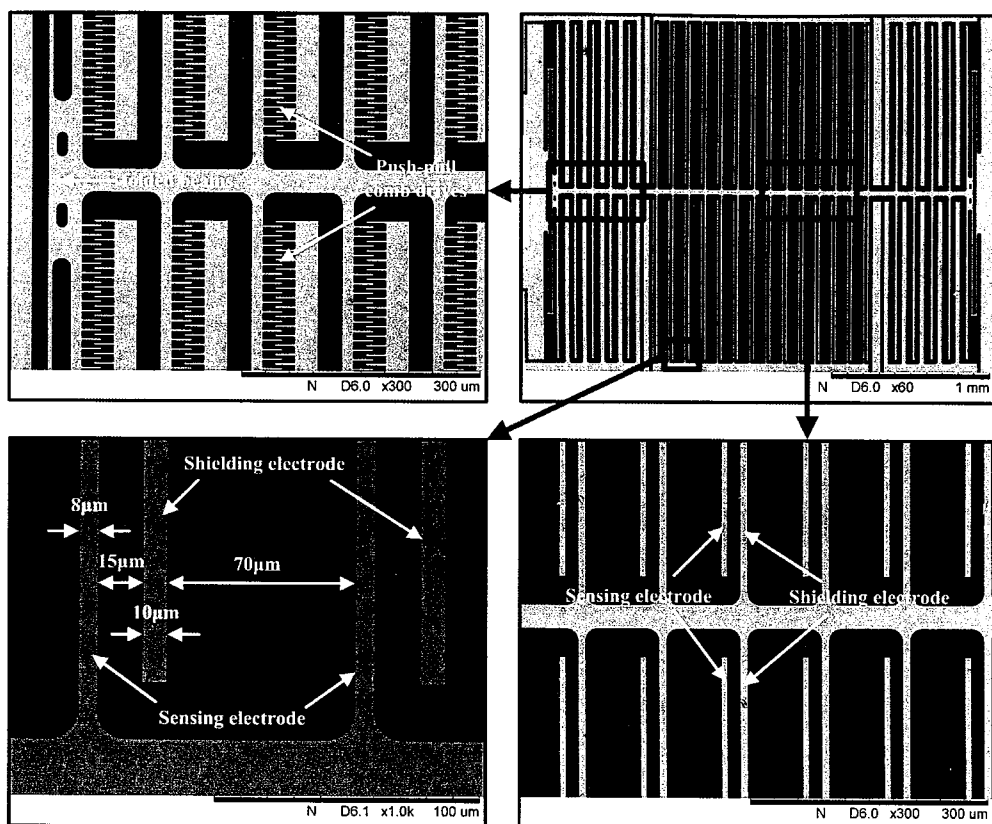


图 2.31 MEMS 一维电场敏感芯片的 SEM 图

Figure 2.31 SEM photos of 1D EFS chip.

2.8 本章小结

本章提出了一种低耦合干扰的 MEMS 一维电场敏感芯片。不同于传统的用于测量垂直方向电场分量的一维电场敏感芯片，该芯片用于测量面内电场分量。该 MEMS 一维电场敏感芯片采用镜面对称设计，其主要结构包括一对镜面对称布置的感应结构。在差分电路的配合下该芯片能够测量垂直于对称面方向的电场分量，并能够消除正交于测量轴方向的电场分量的耦合干扰。本章介绍了该 MEMS 一维电场敏感芯片的工作原理和基本结构，且仿真证明了该芯片仅对沿着垂直于对称面方向的电场分量敏感。

为了增加该 MEMS 一维电场敏感芯片的电荷感应能力，本章对该芯片的感应结构进行了优化分析，包括芯片的尺寸参数、电极的尺寸参数、以及电极的布置方式。研究发现：减小芯片的尺寸有助于增加沿着其测量轴方向的电场在其表面产生的电场强度，从而增加传感器的感应效率。通过 ANSYS 有限元分析软件仿真研究了在沿着其测量轴方向的电场作用下，感应电极宽度、屏蔽电

极宽度、两者的间距与感应电荷变化量的关系，且通过对比选定了较优的参数组合。此外，对比了两种不同的感应电极和屏蔽电极的布置方式下感应电荷变化量的大小，最终选定了单感应电极对应单屏蔽电极的布置方式。

本章研究了该 MEMS 一维电场敏感芯片的驱动结构中的驱动力、弹性结构中的等效弹性系数、以及谐振结构的动力学方程。通过 ANSYS 有限元分析软件的模态仿真得到了前 6 阶的模态和固有频率，其中一阶振动模态为理想的振动模态，且仿真所得的一阶模态的固有频率与理论计算得到的固有频率误差为 3.4%。

基于 SOI 的微加工工艺，本章成功制备了该 MEMS 一维电场敏感芯片。本章详细介绍了该 MEMS 一维电场敏感芯片的微加工工艺流程和版图设计，介绍了芯片制备工艺中遇到的问题和解决方案。该 MEMS 一维电场敏感芯片在中国科学院电子学研究所的超净间内制备完成。

第3章 组件式低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器系统研究

基于本文第二章中提出并制备的低耦合干扰的 MEMS 一维电场敏感芯片，本章研制了一种组件式低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器。本章介绍了该三维电场传感器的基本结构，研制了其传感信号检测电路和集成化后端处理系统。为了实现低误差的三维电场传感器标定，本章研究了该三维电场传感器的标定系统（特别是标定夹具和导线）对电场空间的干扰，设计了一款低干扰的标定夹具和提出了一种基于有限元的标定电场误差分析模型与计算方法。最后，本章在常温常压下对该三维电场传感器进行性能测试，并对结果展开分析和讨论。

3.1 组件式低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器

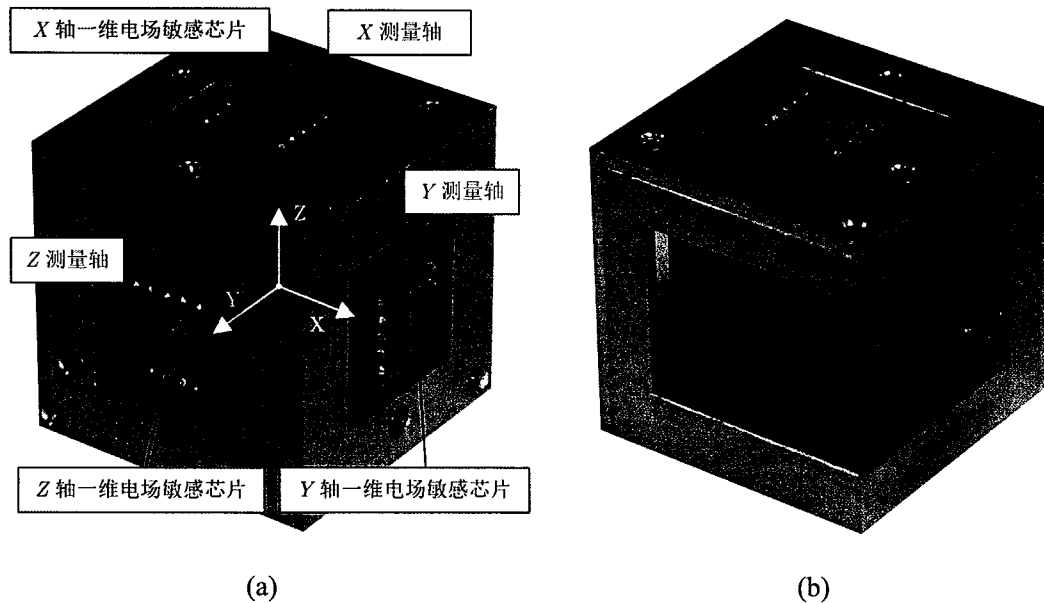


图 3.1 MEMS 三维电场传感器实物图，(a)正面图；(b)背面图

Figure 3.1 Pictures of MEMS-based 3D EFS, (a) front view, (b) rear view.

图 3.1 为三个相同的低耦合干扰的 MEMS 一维电场敏感芯片组装而成的 MEMS 三维电场传感器。如图 3.1(a)所示，三个 MEMS 一维电场敏感芯片均置于立方体金属外壳的三个相互正交面的中心处，构成了三个相互正交的测量轴，分别用于测量 X 轴、 Y 轴和 Z 轴方向的电场分量。立方体金属外壳的边长为 44mm，该立方体金属外壳内包含了每个 MEMS 一维电场敏感芯片的前置放大

电路, 包括 I/V 转换电路和仪表放大器 (电路原理在本章 3.2 节中做详细介绍)。图 3.1(b) 为该 MEMS 三维电场传感器的背面图, 立方体金属外壳上设置了一个开口, 用于连接外接的信号线和电源线, 以及连接用于该三维电场传感器标定的夹具 (夹具设计和误差分析将在本章 3.4 节中做详细介绍)。

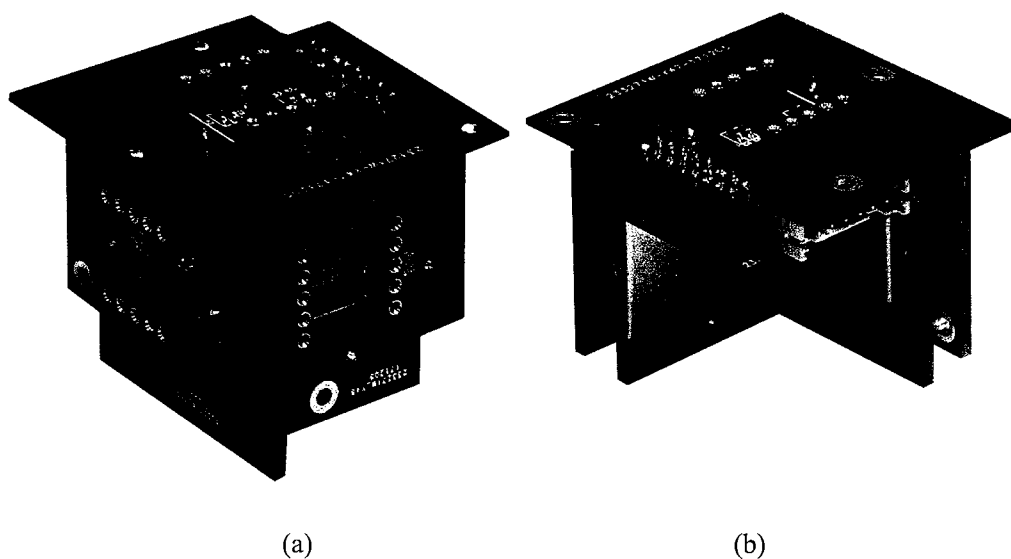


图 3.2 MEMS 三维电场传感器前置放大电路实物图, (a) 正面图; (b) 背面图

Figure 3.2 Front-end amplification circuit of MEMS-based 3D EFS, (a) front view, (b) rear view.

图 3.2 为该 MEMS 三维电场传感器内部的 PCB 电路, 由 4 块 PCB 电路组成。该前置放大电路的特点在于:

- 外侧的 3 块相互正交的 PCB 板分别为三个 MEMS 一维电场敏感芯片的前置放大电路板。
- 每块前置放大电路板的地信号分为感应地信号与驱动地信号, 分别为感应信号和驱动信号提供地信号, 且两者电气隔离。
- 每个前置放大电路均放置于接感应地信号的铜制屏蔽罩内, 用于减小驱动信号对感应信号的干扰。
- 上述的 3 块前置放大电路板均与 1 块带有插座的转接板电气连接, 该转接板的中心处有一个圆孔用于安装标定夹具 (夹具设计和分析将在本章 3.4 节中做详细介绍)。
- 3 块前置放大电路板的感应地信号与驱动地信号均在转接板处以 0Ω 电

阻连接的形式实现共地，以减小三块前置放大电路板之间的相互干扰。

- 上述的 4 块 PCB 电路板的尺寸需要精确设计，使其能够组装在一起，且固定于立方体金属外壳内。需要保证安装之后的 MEMS 一维电场敏感芯片置于立方体金属外壳某个面的中心处。
- 将上述 PCB 电路保护在金属外壳内，且金属外壳接地，此举能够有效地屏蔽外界环境对电路系统的影响，减小误差干扰。

3.2 传感信号检测

本章设计的 MEMS 三维电场传感器采用了三个相同 MEMS 一维电场敏感芯片，每个 MEMS 一维电场敏感芯片均有独立的前置放大电路，且由独立的驱动信号激励其谐振结构振动。

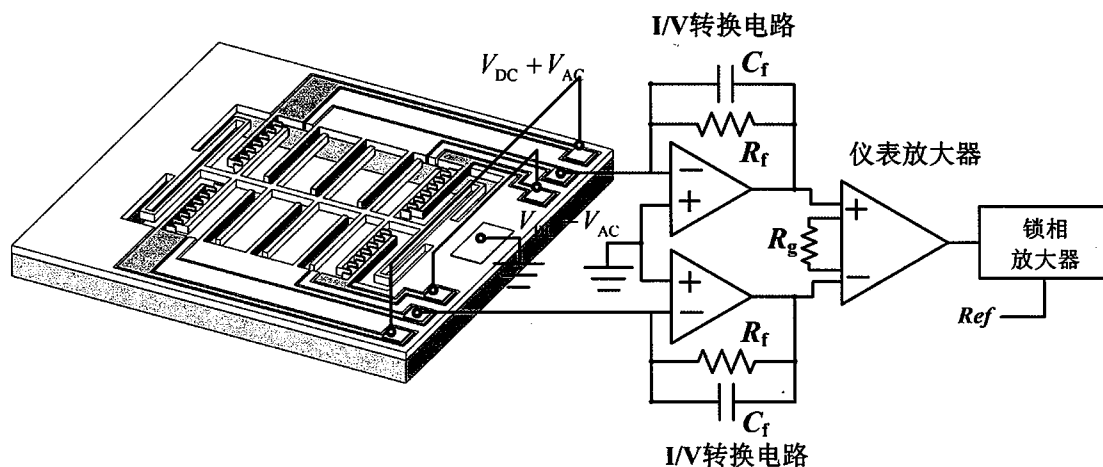


图 3.3 MEMS 一维电场敏感芯片的检测电路原理图

Figure 3.3 Schematic view of testing circuit of developed 1D EFS chip.

图 3.3 为 MEMS 一维电场敏感芯片的检测电路原理图。驱动信号施加在 MEMS 一维电场敏感芯片的两侧的推挽梳齿驱动结构上，用于周期性地改变屏蔽电极与其对应的感应电极的间距。驱动信号包含直流偏置电压 V_{DC} 和交流电压 V_{AC} ，两侧推挽梳齿驱动结构施加的直流偏置电压一致，但交流电压有 180° 的相位差（关于驱动电压和驱动力已于本文 2.3 节中做了详细的介绍）。感应电极阵列输出的感应电流信号先经过 I/V 转换电路变为电压信号，再进入仪表放大器中现差分处理并完成二级放大，然后进入锁相放大电路，利用相敏检测方法将噪声中的响应信号提取出来，最终实现了外界电场的检测。其中，I/V 转换

和仪表放大器均属于前置放大电路，而相敏检测则是在后端处理系统中以软件的方式实现的。

3.2.1 前置放大电路设计

由式 (2.13) 和表 2.4 可推算出：对于本文设计的 MEMS 一维电场敏感芯片，单个感应电极阵列的输出电流的幅值应位于 pA 的量级，信号微弱且易受噪音的干扰，因此要在 I/V 转换电路中施加较大的放大倍数。I/V 转换电路原理图如图 3.4 所示。

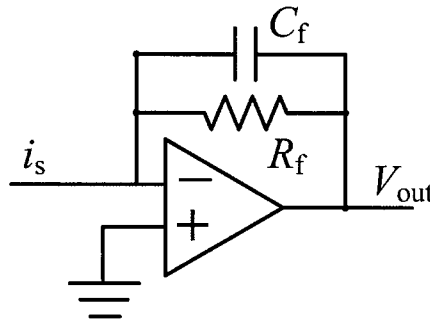


图 3.4 I/V 转换电路原理图

Figure 3.4 Schematic view of I-V convertor.

图中 C_f 为放大器的反馈电容， R_f 为放大器的反馈电阻， i_s 为放大器的反相输入电流， V_{out} 为输出电压。则 I/V 转换电路的放大倍数 G_1 可表示为

$$G_1 = \frac{V_{out}}{i_s} = \frac{1}{C_f \sqrt{\omega^2 + \omega_0^2}}, \quad \dots (3.1)$$

其中， ω 为输入电流的角频率； ω_0 为 I/V 转换电路的截止角频率， $\omega_0 = \frac{1}{C_f R_f}$ 。

该电路为低通滤波电路，其 R_f 越大，增益 G_1 越大； C_f 越小，截止频率 ω_0 越大。因此，为了增加该 I/V 转换电路的放大倍数， R_f 选用了 $10\text{M}\Omega$ 的电阻。不选用更高的电阻的原因在于：电阻值较大时，电阻表现出来的寄生电容效应变得明显^[92]，且电阻的精度很难保证。根据本文 2.4 节中分析的 MEMS 一维电场敏感芯片的固有频率在 2500Hz 左右，相应地 C_f 选用 1pF 的电容用于增加通带的带宽，经计算 $\omega_0=10^5\text{Hz}$ 。

图 3.5 为该 I/V 转换电路的幅频特性响应曲线和相频特性响应曲线。在 2500Hz 左右时，该 I/V 转换电路增益约为 140dB ，即放大了 10^7 倍，且输出信

号相对于输入信号的相移约为 -9° 。对于本文研制的 MEMS 一维电场敏感芯片，其 2 个感应电极阵列的输出电流均需要 I/V 转换，因此本章选择 AD 公司的双通道型放大芯片 AD8626 来实现 I/V 转换电路。

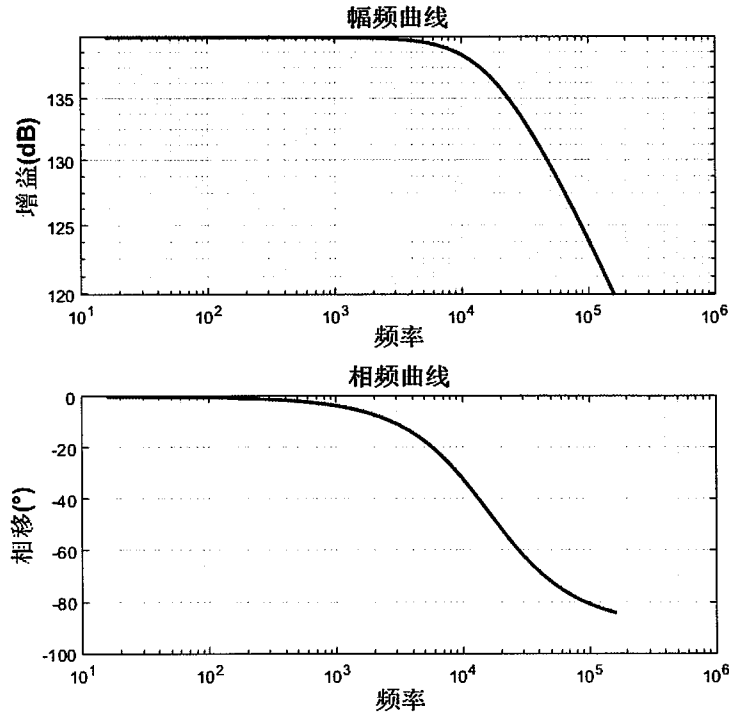


图 3.5 I/V 转换电路的幅频特性响应曲线和相频特性响应曲线

Figure 3.5 Amplitude-frequency response curve and phase-frequency response curve of I-V convertor.

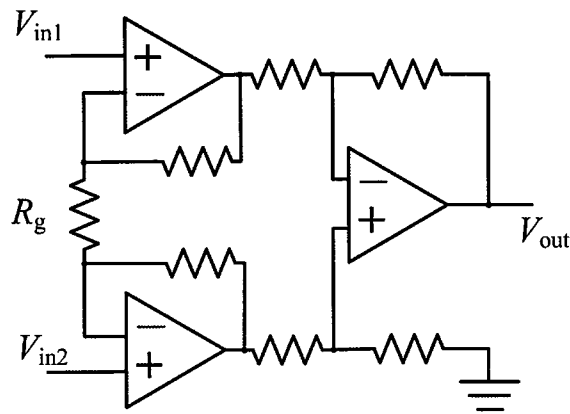


图 3.6 三运放型仪表放大器原理图

Figure 3.6 Schematic view of instrumentation amplifier based on three operational amplifiers.

I/V 转换后输出的电压信号进入差分放大电路用于消除两者之间的共模量，

包括耦合干扰信号，以及完成信号的二次放大。本章使用仪表放大器完成信号的差分放大功能。图 3.6 所示为经典的三运放型仪表放大器的原理图。本章采用 AD 公司的 AD620 仪表放大器芯片构建了差分放大电路，其内部集成了具有极佳匹配性的三个运放。该芯片的增益 G_2 为

$$G_2 = \frac{49.4\text{k}\Omega}{R_g} + 1,$$

其中， R_g 为仪表放大器的增益电阻，大小可调。 R_g 越小，增益 G_2 越大，信号的信噪比越高。输入电压与输出电压的对应关系为

$$V_{\text{out}} = G_2 \cdot (V_{\text{in1}} - V_{\text{in2}})。$$

其中， V_{in1} 和 V_{in2} 分别为 MEMS 一维电场敏感芯片上 2 个感应电极阵列的输出电流经过 I/V 转换电路后的输出电压。因此 AD620 实现了差分功能，该差分能够消除两者之间的共模量信号，包括轴间耦合信号。本章中 R_g 选用 500Ω 的电阻，因此增益 G_2 约为 10^3 。

在设计前置放大电路板时还需要注意以下几点：

- MEMS 一维电场敏感芯片输出端与 I/V 转换电路要尽量靠近，以及 I/V 转换电路的输出端与差分电路也要尽量靠近，用于减小电流信号和电压信号传输过程中受到的噪声干扰。
- 芯片的驱动信号线应尽量远离前置放大电路，驱动信号线周围和前置放大电路周围都要覆铜，且分别接驱动地信号和感应地信号；在驱动信号线周围的覆铜上布置过孔，用于减小其对感应信号的干扰。

3.2.2 相敏检测电路设计

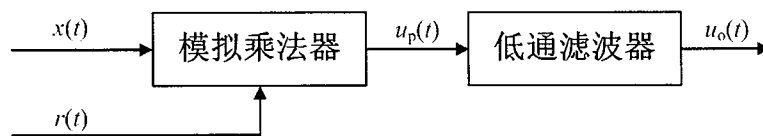


图 3.7 相敏检测方法原理框图

Figure 3.7 Schematic view of PSD.

经过 I/V 转换和差分放大后的信号中还混杂有耦合噪声，本章采用相敏检测（Phase Sensitive Detector, PSD）的方法将该信号解调出来。常用的相敏检测

方法是基于模拟乘法器配合低通滤波器来实现^[93]，其系统原理框图如图 3.7 所示。相敏检测电路具有选频和鉴别信号相位的能力，它的输出不仅取决于输入信号的幅值，同时也与输入信号与参考信号的相位差有关。模拟乘法器的输出 $u_p(t)$ 由输入信号 $x(t)$ 与参考信号 $r(t)$ 相乘所得，可表示为

$$u_p(t) = x(t)r(t)。 \quad \dots (3.2)$$

以驱动信号中的交流成分作为参考信号 $r(t)$ ，当其为正弦信号时，驱动信号 $r(t)$ 可以表示为

$$r(t) = V_a \sin(\omega t),$$

其中， V_a 为驱动信号的幅值大小， ω 为驱动信号的频率。由式 (2.26) 和图 2.21 可知，当屏蔽电极工作于谐振状态时，屏蔽电极的位移变化比驱动信号滞后了 90° 的相位；由式 (2.13) 可知，屏蔽电极的位移变化比感应电流提前了 90° 的相位，因此感应电流比驱动信号滞后了 180° 相位。设该感应电流经过前置放大电路后，其输出电压与驱动信号之间的相位差为 φ_0 ，则

$$x(t) = V_x \sin(\omega t + \varphi_0),$$

其中， V_x 为输入信号幅值大小，参考信号与输入信号同频率。则通过模拟乘法器输出的 $u_p(t)$ 可以表示为

$$u_p(t) = \frac{1}{2} V_x V_a \cos(2\omega t + \varphi_0) + \frac{1}{2} V_x V_a \cos \varphi_0。 \quad \dots (3.3)$$

由式 (3.3) 可知，相敏检测后，角频率为 ω 的交流信号转化为了直流信号和角频率为 2ω 的交流信号的叠加；经过低通滤波器之后，角频率为 2ω 的交流信号被滤除，只得到直流分量，输出为

$$u_o(t) = \frac{1}{2} V_x V_a \cos \varphi_0。 \quad \dots (3.4)$$

式 (3.4) 表明了：经过模拟乘法器与低通滤波器之后的输出信号与输入信号 $x(t)$ 、参考信号 $r(t)$ 的幅值，以及两者相位差的余弦函数值成正比，当相位差 φ_0 为 0 时，输出值达到最大。在本章中，相敏检波处理均在后端处理系统中以软件的形式实现的，对采集到某一段的传感信号与驱动信号做乘法，然后减去平均值。

3.2.3 同频耦合串扰噪声分析

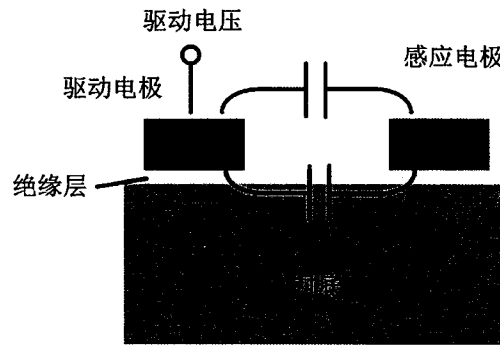


图 3.8 驱动电极与感应电极形成耦合电容的原理示意图

Figure 3.8 Schematic view of coupling capacitor formed by driving electrode and sensing electrode.

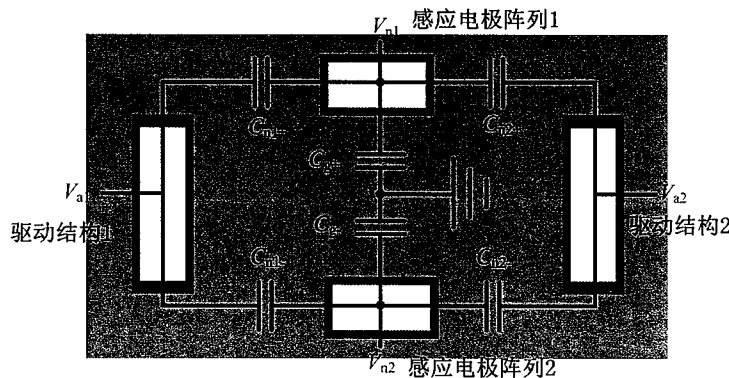


图 3.9 差分驱动和差分检测的等效电路模型

Figure 3.9 Equivalent circuit model of differential driving and differential testing.

由于本文第二章中研制的 MEMS 一维电场敏感芯片的输出信号频率较低，因此易受到多种低频噪声的干扰。噪声干扰会降低 MEMS 一维电场敏感芯片输出信号的信噪比，从而降低 MEMS 一维电场敏感芯片的分辨率。噪声的主要来源包括芯片感应结构和电路系统的热噪声、布朗噪声、闪变噪声、以及来自外部的同频耦合串扰噪声，其中，以同频耦合串扰噪声最为主要。MEMS 一维电场敏感芯片的感应电极和驱动电极通过衬底的硅馈通形成耦合电容，且在自由空间中产生静电感应形成自由空间的耦合电容，其模型如图 3.8 所示。当驱动电极上施加交流信号时，感应电极会被耦合入同频耦合串扰噪声。

减小驱动信号中交流电压和减小耦合电容是两种减少同频耦合串扰噪声的方法。对于减小驱动信号中交流电压，最有效的方法为真空封装。中国科学院

电子学研究所的毋正伟等^[94]曾研究了谐振式电荷感应式 MEMS 电场传感器芯片的真空封装,实验结果表明在驱动信号中直流偏置电压为 0.1V 和交流电压为 0.06V 的条件下,该器件的品质因数 Q 达到了 30727.4。对于减小耦合电容,可以采用增加感应电极和驱动电极两者间的空间距离来实现,或是采用差分驱动和差分检测结合的方法来减小它的影响^[95]。本文研制的 MEMS 一维电场敏感芯片就是采用了差分驱动和差分检测。

图 3.9 为 MEMS 一维电场敏感芯片采用的差分驱动和差分检测的等效电路模型。正负感应电极阵列与地的电容的分别为 C_{g+} 和 C_{g-} ,正感应电极阵列与左右两组驱动电极的电容分别为 C_{n1+} 和 C_{n2+} ,负感应电极阵列与左右两组驱动电极的电容分别为 C_{n1-} 和 C_{n2-} ;当左右两组驱动电极分别被施加了 V_{a1} 和 V_{a2} 的交流电压时,由于耦合电容的存在,MEMS 一维电场敏感芯片的正负感应电极阵列分别被耦合入 V_{n1} 和 V_{n2} 的同频噪声。通常 C_{g+} 和 C_{g-} 近似相等,且远大于 C_{n1+} 、 C_{n2+} 、 C_{n1-} 和 C_{n2-} 。设 $C_{g+}=C_{g-}=C_g$ 、 $C_{n1-}=C_{n2-}=C_n$ 、 $C_{n1+}=C_{n1-}(1+\varepsilon_1)$ 和 $C_{n2+}=C_{n2-}(1+\varepsilon_2)$ (ε_1 为 C_{n1+} 与 C_{n1-} 的不匹配度, ε_2 为 C_{n2+} 与 C_{n2-} 的不匹配度),则差分输出的同频耦合串扰信号为

$$|V_{n1+} - V_{n1-}| = V_a \frac{C_n}{C_g} |\varepsilon_1 \varepsilon_2|, \quad \dots (3.5)$$

其中, V_a 为驱动电压的幅值。由式 (3.5) 可得,在 C_g 、 C_n 和 V_a 不变时, ε_1 和 ε_2 越小,即耦合电容的值越接近,则差分驱动和差分检测之后的耦合串扰噪声的幅值越小。因此,差分驱动和差分检测能有效地抑制耦合串扰噪声。

3.3 集成化后端处理系统研究

由本章 3.1 节和 3.2 节可知,本章研制的 MEMS 三维电场传感器具有三个独立工作的 MEMS 一维电场敏感芯片,分别对应了相互独立的驱动信号和相互独立的检测信号,因此若采用分立的设备来搭建测量系统会使该测试系统变得较为庞大且复杂。综上所述,本章研制了一种集成的且小型化的后端处理系统。其主要功能在于:

- 分别为三个 MEMS 一维电场敏感芯片提供驱动信号。每个 MEMS 一维电场敏感芯片均需要 2 路驱动信号,每 1 路驱动信号均为直流偏置电压和交流电压的叠加。这 2 路驱动信号的直流偏置电压大小相等,交流电

压的幅值和频率均相等但有 180° 的相位差。此外，上述的交流电压的幅值和频率均可调。

- 对前置放大电路输出的 3 路电压信号做带通滤波。
- 对带通滤波输出的 3 路电压信号和三个 MEMS 一维电场敏感芯片中驱动信号中的交流电压，共 6 路信号做 A/D 转换。（将驱动信号中的交流电压作为相敏检波电路中的参考信号）
- 以软件的形式对 A/D 转换后的 3 路测量信号做相敏检波，然后传输至上位机软件。
- 基于上位机软件，重新设置三个 MEMS 一维电场敏感芯片的工作频率。
- 在上位机软件给定的频率范围和频率步长，对一维电场敏感芯片进行扫频，确定其谐振频率。

3.3.1 系统硬件设计

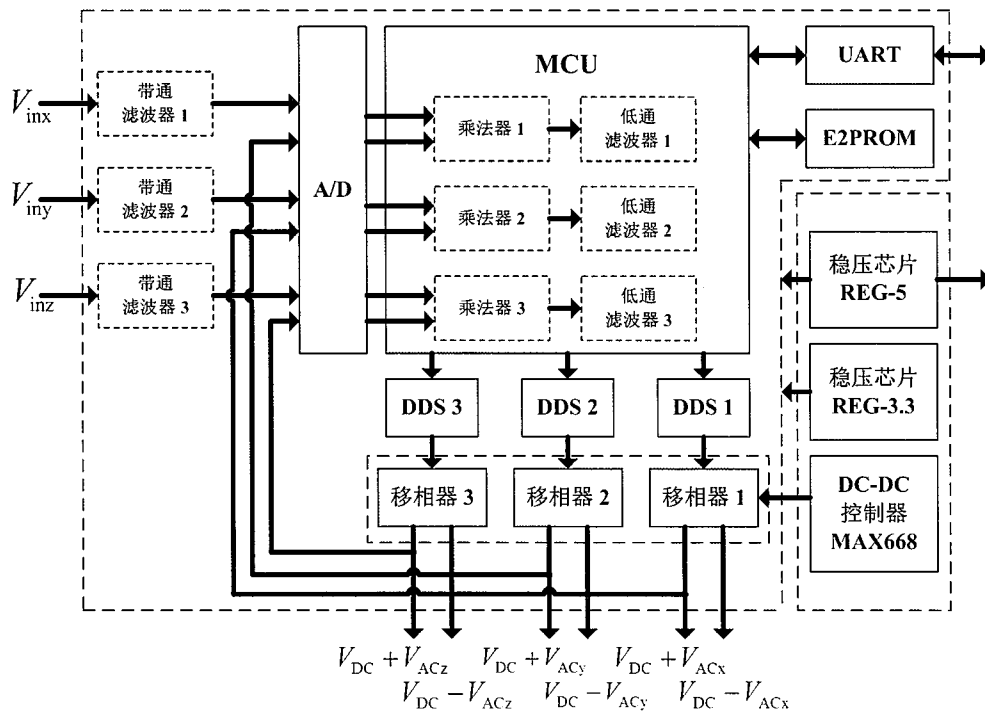


图 3.10 后端处理系统模块图

Figure 3.10 Schematic view of back-end processing system.

图 3.10 为后端处理系统模块图。其中， V_{DC} 为直流偏置电压， V_{ACq} 为用于驱动 q 轴一维电场敏感芯片的交流电压， V_{inq} 为 q 轴 MEMS 一维电场敏感芯片经过前置放大电路后的输出电压， q 为 x 、 y 和 z 。由图 3.10 可得，该后端处理

系统主要包括控制器芯片（Microcontroller Unit, MCU）、A/D 转换芯片、三个直接数字式频率合成器（Direct Digital Synthesizer, DDS）、3 路移相电路、三个带通滤波器、电源模块、EEPROM（Electrically Erasable Programmable read only memory）存储芯片和通用异步收发传输器（Universal Asynchronous Receiver/Transmitter, UART）。图 3.11 为该后端处理系统的实物图，由两块 4 层的 PCB 板组成。其中，下层的 PCB 板为图 3.10 中的电源模块，其余均位于上层的 PCB 板。两块 PCB 板的尺寸为 65mm×65mm。

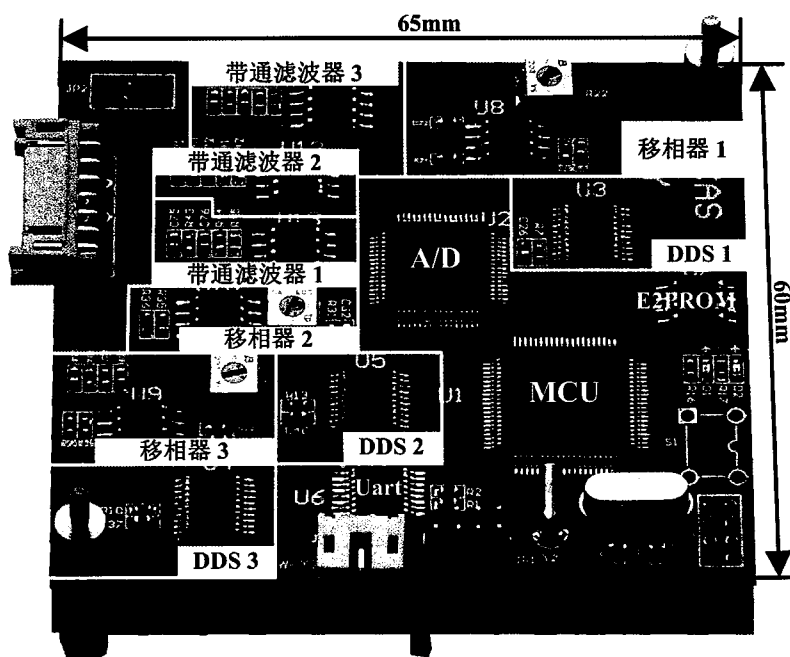


图 3.11 后端处理系统实物图

Figure 3.11 Picture of back-end processing system.

3.3.1.1 驱动信号产生

驱动信号由直流偏置 V_{DC} 和交流电压 V_{AC} 组成。其中，直流偏置 V_{DC} 的大小为 20V，由电源模块中的升压芯片 MAX668 提供。为了实现交流电压 V_{AC} 的频率程序可控，本章采用了 DDS 芯片作为其交流电压源。DDS 属于直接数字频率合成技术，其主要由相位累加器、相位幅度转换器、数模转换器和低通滤波器组成。其工作流程如下：相位累加器进行累加不断输出相位编码，该编码在相位幅度转换器中被转换为相应的幅度数据，再传输给 D/A 转换器形成阶梯波，最终通过低通滤波器处理输出不同频率的平滑信号。DDS 技术的优点在于频率切换速度快、集成度高、成本低和频率分辨率高等。本章采用的 DDS 芯片

为 AD 公司的 AD9834。MCU 与三个 AD9834 芯片以 SPI 的方式连接，在后端处理系统上电后向三个 AD9834 芯片传输频率编码，是三个 AD9834 芯片分别产生 3 路不同频率的正弦信号。

输出的正弦信号进入移相电路中，依次进行 DDS 输出正弦电压的放大、反相和与直流偏置 V_{DC} 的叠加，其电路原理如图 3.12 所示。其中， V_{in} 为 DDS 芯片的输出信号； R_2 为可变电阻，通过调节其阻值能实现 V_{AC} 的幅值可控，本章中 V_{AC} 的幅值选为 1V； R_3 和 R_4 为等值电阻，保证了反相时 V_{AC} 幅值不变。每一个移相电路均输出了 $V_{DC}+V_{AC}$ 和 $V_{DC}-V_{AC}$ 两路信号。因此本章选择 TI 公司的双通道型运算放大芯片 OPA2277，对 DDS 输出的正弦电压做放大和反相。

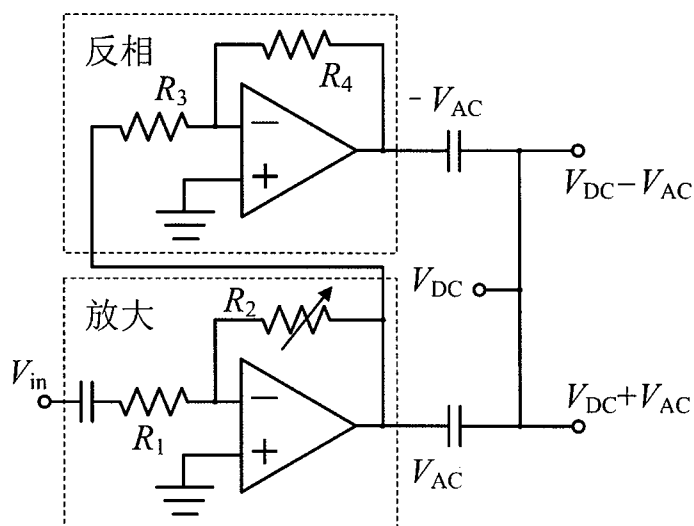


图 3.12 驱动信号产生电路原理图

Figure 3.12 Schematic view of driving signal generation circuit.

3.3.1.2 A/D 芯片和 MCU 的选型

由图 3.12 所示，该 A/D 芯片需要对 6 路信号进行 A/D 转换，包括 3 路测量信号和 3 路驱动信号。因此，本章选择 AD 公司的 AD7606-6 作为后端处理系统的 A/D 转换芯片。AD7606-6 为 16 位同步采样的 A/D 转换芯片，有 6 个采集通道，且所有的通道均能以 200ksps 的速率进行采样。

AD7606-6 芯片以 8 位数据总线与 MCU 连接。MCU 作为该后端处理系统的核心，它需要：（1）与多个外设连接；（2）同时控制 6 路信号的采集和处理；（3）在内部实现相敏检波和扫频，所以使其代码量较大。因此，这对 MCU 的性能提出了很高要求，包括有较高的工作频率、足够的 I/O 接口，和较大的程

序存储空间。本章选用的 MCU 是基于 ARM Cortex-M3 内核的 LPC1752, 它是一款 32 位的高性能微处理器。它具有 52 个通用的 I/O 管脚, 频率为 100MHz, 具有 512KB 的片上 Flash 程序存储器。本章采用 Keil C51 开发环境搭配 C 语言进行 LP1752 的软件开发, 其支持 JTAG 的程序下载方式。

除此之外, 带通滤波器用于在 A/D 转换前给测量信号做进一步滤除噪声; UART 用于与上位机的通信, 包括测量数据的上传和上位机命令的接收; EEPROM 用于存储三维电场传感器中三个 MEMS 一维电场敏感芯片的谐振频率, 系统上电后 MCU 将自动读取, 用于配置各个敏感芯片的工作频率; 电源模块分别为前置放大电路和后端处理系统提供 3.3V 和 $\pm 5V$ 的电源电压, 以及驱动电压中 20V 的直流偏置电压。

在设计后端处理系统的 PCB 时还需要注意以下几点, 其目的均在于减小后端处理系统内的耦合噪声干扰:

- 将该系统的地信号分为模拟地信号、数字地信号、三个 DDS 芯片的各自的地信号、3 路移相电路的各自的地信号、以及 3 路带通滤波器的各自的地信号, 共 11 路地信号。他们之间只通过 0Ω 电阻电气连接, 用于尽量减小各个芯片或是电路之间的耦合噪声干扰。
- 驱动信号的产生电路应尽可能地远离感应信号线, 用于减小驱动信号对感应信号的耦合噪声干扰。
- DDS 应尽量靠近与其连接的移相电路。
- 驱动信号的产生电路和感应信号线周围应大面积覆铜, 覆铜所接的地信号与该芯片或是该电路所对应的地信号一致, 用于减小耦合噪声干扰。
- 在激励信号线周围的覆铜上布置过孔。
- 电源模块采用低误差的低压差线性稳压器芯片 (low dropout regulator, LDO), 用于减小电源噪声干扰, 或是供电电压不稳对感应信号的干扰。

3.3.2 系统软件设计

后端处理系统软件的功能直观地表现为: (1) 周期性地采集 MEMS 三维电场传感器上三个 MEMS 一维电场敏感芯片的输出信号, 并以软件的形式实现相敏检波, 然后传输至上位机软件; (2) 根据上位机软件重新设置三个 MEMS 一维电场敏感芯片的工作频率; (3) 在上位机软件给定频率范围和频率步长的条

件下,对 MEMS 一维电场敏感芯片进行扫频,确定其谐振频率。因此,该系统软件的工作流程可以分为 4 部分,分别为初始化部分、采集发送部分、频率设置部分和扫频部分。

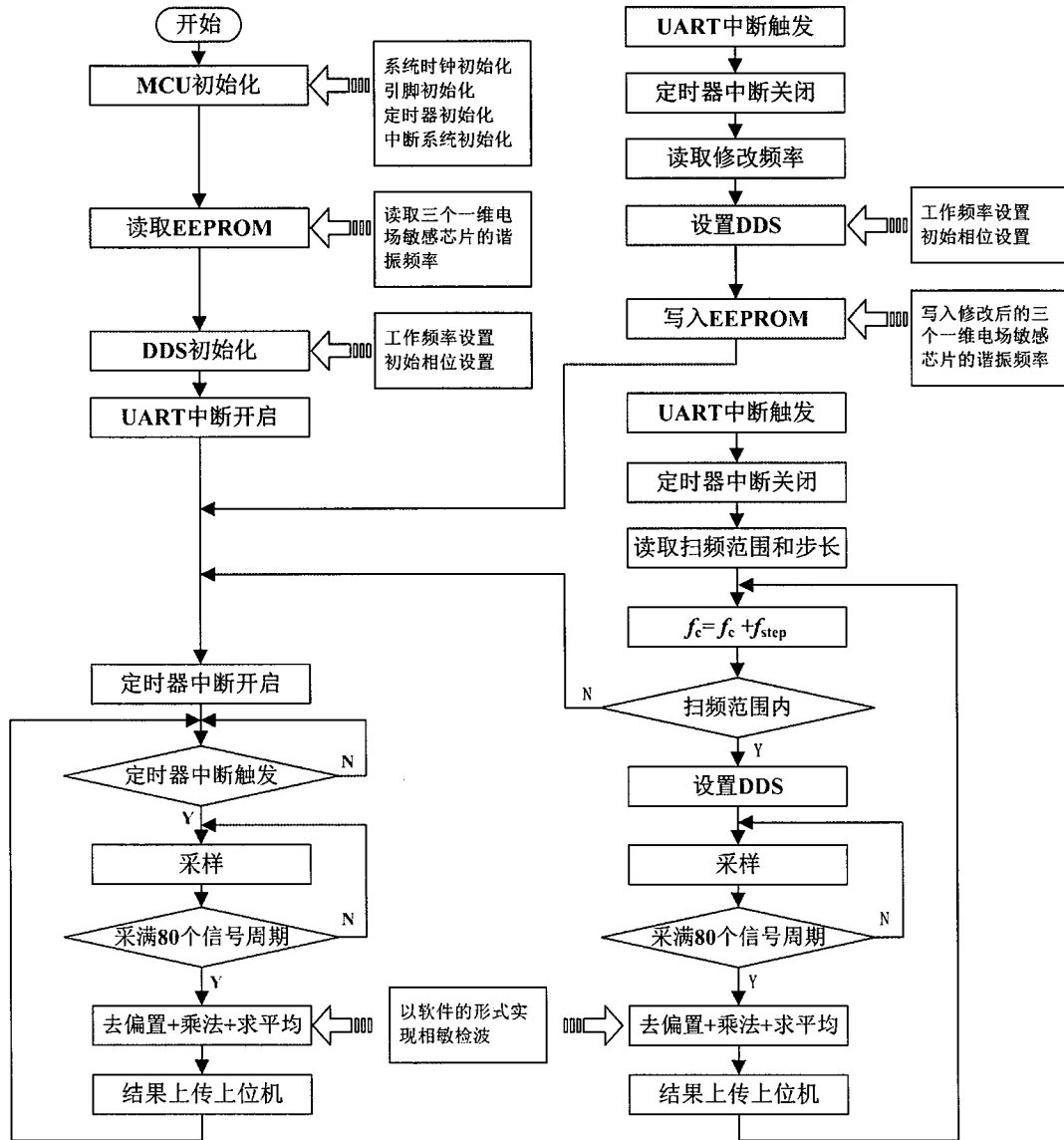


图 3.13 后端控制系统软件工作流程图

Figure 3.13 Flow diagram of software of back-end processing system.

当上位机软件没有下发命令时,该系统的工作流程如图 3.13 的左半部分所示。初始化部分主要分为 MCU 初始化和 DDS 初始化。MCU 的初始化包括设置 MCU 的时钟系统、引脚、定时器和中断系统等。DDS 的初始化包括设置 DDS 产生信号的频率和初始相位。完成初始化后,便开启 UART 中断用于随时等待来自上位机软件下发的命令,且开启定时器中断为了开始执行定时器中断触发

程序。定时器中断触发程序用于信号的周期采集、处理和上传。其中，针对 3 路传感信号和 3 路驱动信号，每一路均同时采集 80 个周期的信号量。把采集到信号依次做去偏置、乘法求和、以及平均处理，从而模拟相敏检波的电路。得到的三个结果分别用以表示三个 MEMS 一维电场敏感芯片的测量结果，且最终将这三个结果上传至上位机软件。需要注意的是 UART 中断的优先级要高于定时器中断的优先级，即若在执行定时器中断程序时 UART 中断被触发，则程序从定时器中断跳出转而去执行 UART 中断程序。在 UART 中断没有触发的情况下，该后端处理系统周而复始地采集、处理和上传结果。

当 UART 中断被触发时，该系统会自动从定时器触发程序中跳出，且关闭定时器中断，其工作流程如图 3.13 的右半部分所示。若是修改 MEMS 一维敏感芯片的工作频率，系统首先会从 UART 读取修改后的工作频率，然后重新给 DDS 赋值，最后将修改后的频率存入 EEPROM，用于下次系统上电后 MCU 自动从 EEPROM 中读取然后赋值给 DDS。完成修改频率工作后，该系统会自动开启定时器中断，随之继续执行定时器中断触发程序。

若是进行扫频操作，系统首先会从 UART 读取扫频范围和扫频步长，然后依次增加敏感芯片的工作频率。图 3.13 中 $f_c = f_c + f_{\text{step}}$ 代表频率的递增，其中 f_{step} 代表扫频步长， f_c 代表上一个测试频率。在每个工作频率下，系统执行一次信号采集、处理和上传。采集的信号包括 3 路传感信号和 3 路驱动信号，每一路均同时采集 80 个周期的信号量。类似地，把采集到信号依次做去偏置、乘法求和、以及平均处理。得到的三个结果分别用以表示三个 MEMS 一维电场敏感芯片的测量结果，且最终将这三个结果上传至上位机。最终绘制出输出信号大小相对于工作频率的响应曲线。完成扫频工作后，该系统也会自动开启定时器中断，随之继续执行定时器中断触发程序。

经过编译，该系统软件共需 16.2KB 的程序存储资源，远小于片上自带的 512KB，因此该后端处理系统所用的 MCU 的程序存储资源满足系统软件的开发。

3.4 标定系统研究

三维电场传感器的标定是三维电场传感器研制的必要环节，其标定研究的关键在于：产生一个低误差且相对于传感器方向可变的电场。由本文 1.2.3

节可知，不同于一维电场传感器的标定，三维电场传感器标定过程中标定电场容易受到标定夹具或导线的干扰，产生较大的误差。因此，研究低干扰的三维电场传感器标定系统，特别是研究降低标定夹具或导线对标定电场的干扰，具有重要的意义。

3.4.1 标定夹具设计

设计的标定夹具的功能在于：（1）支撑起该 MEMS 三维电场传感器，使其固定于标定电场空间的中心处；（2）提供转动自由度；（3）在标定过程中保证三维电场传感器的中心位置不变。

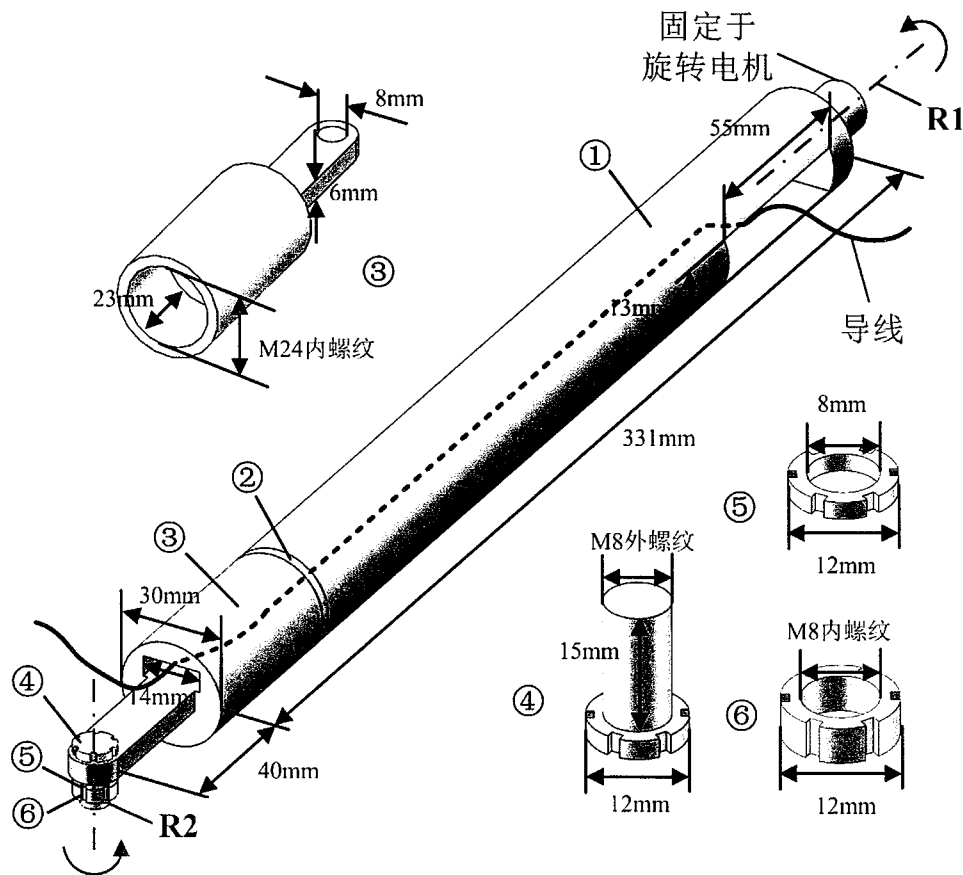


图 3.14 标定夹具结构示意图

Figure 3.14 Schematic view of fixture used for calibration.

设计的标定夹具结构如图 3.14 所示，由聚四氟乙烯（PTFE）加工而成，由 6 个零件组装成杆状，其特点在于：

- 该标定夹具有两个相互垂直的旋转轴 R1 和 R2。其中，R1 为外置的旋转轴，需要外接至固定装置；R2 为内置的旋转轴，位于 MEMS 三维电

场传感器的。绕 R2 轴的旋转只能手动控制，但若 R1 与电机连接，则绕 R1 轴的旋转可由电机控制。

- 导线（包括信号线与电源线）从该杆状标定结构的中心处穿过，用于连接前置放大电路和后端处理系统。由图 3.10 可知，该导线需有 13 根线芯，包括 2 根地信号线、 $\pm 5V$ 的电源信号线、6 根驱动信号线和 3 根测量信号线。
- 在保证标定夹具结构强度的前提下尽量减小标定夹具的尺寸，本章将标定夹具的外径设为 30mm。
- 在保证导线顺利通过的前提下，尽可能减小标定夹具中用于导线通过的内孔的尺寸，本章将标定夹具的内径设为 13mm。

此外，图 3.14 中结构②和⑤为垫片、④为螺栓、⑥为螺母。其中，④、⑤和⑥用于安装和固定 MEMS 三维电场传感器，②为结构①和结构③的连接起到缓冲作用。该标定夹具与三维电场传感器连接后的实物图如图 3.15 所示（此时该传感器上并没有安插 MEMS 一维电场敏感芯片），其中 R1 和 R2 的交点与该 MEMS 三维传感器的中心重合，因此保证了 MEMS 三维电场传感器在旋转时中心位置保持不变。由图 3.15 可知，该 MEMS 三维电场传感器可绕着 R1 轴做 360° 的旋转，绕着 R2 轴做 90° 的旋转。

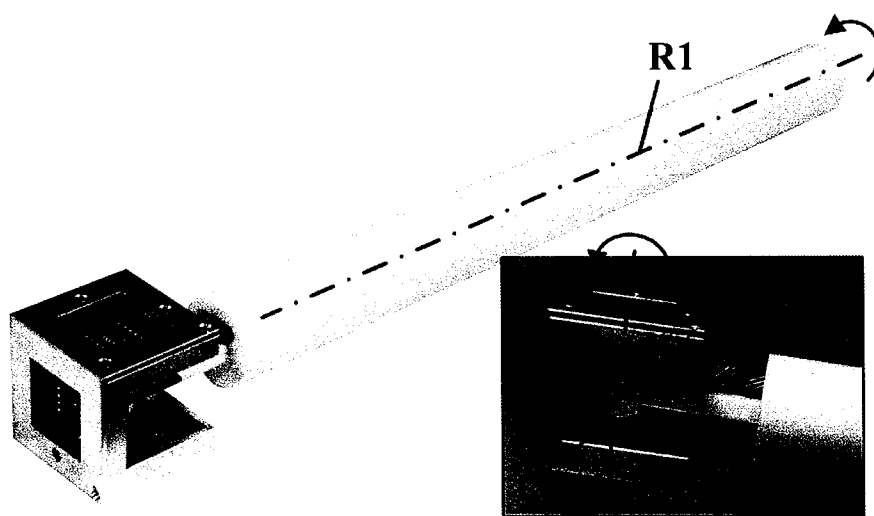


图 3.15 三维电场传感器与标定夹具连接

Figure 3.15 The 3D EFS is fixed on the fixture of calibration.

此外，图 3.14 中结构②和⑤为垫片、④为螺栓、⑥为螺母。其中，④、⑤和⑥用于安装和固定 MEMS 三维电场传感器，②为结构①和结构③的连接起到缓

冲作用。该标定夹具与三维电场传感器连接后的实物图如图 3.15 所示（此时该传感器上并没有安插 MEMS 一维电场敏感芯片），其中 R1 和 R2 的交点与该 MEMS 三维传感器的中心重合，因此保证了 MEMS 三维电场传感器在旋转时中心位置保持不变。由图 3.15 可知，该 MEMS 三维电场传感器可绕着 R1 轴做 360° 的旋转，绕着 R2 轴做 90° 的旋转。

由图 3.15 可知，在三维电场传感器绕着 R2 轴旋转时，导线也会跟着旋转，因此应选用易弯折的导线与传感器连接，此处选用了柔性软排线；而在导线长距离的传输过程中，驱动信号线和感应信号线往往裹成一股，容易产生串扰，因此需要对每个线芯增加接地的屏蔽层。综上所述，本节需要选用合适的接头对两类导线做转接处理。考虑到导线的转接是在标定夹具内完成，因此需要选用最大外径尽可能小的接头。本文最终采用了 LEMO 接头作为转接接头，公头和母头分别选用 EGG 1B14 型号和 PHG 1B14 型号。因此，接头的最大直径为 12mm，小于标定夹具的内径。该导线如图 3.16 所示。

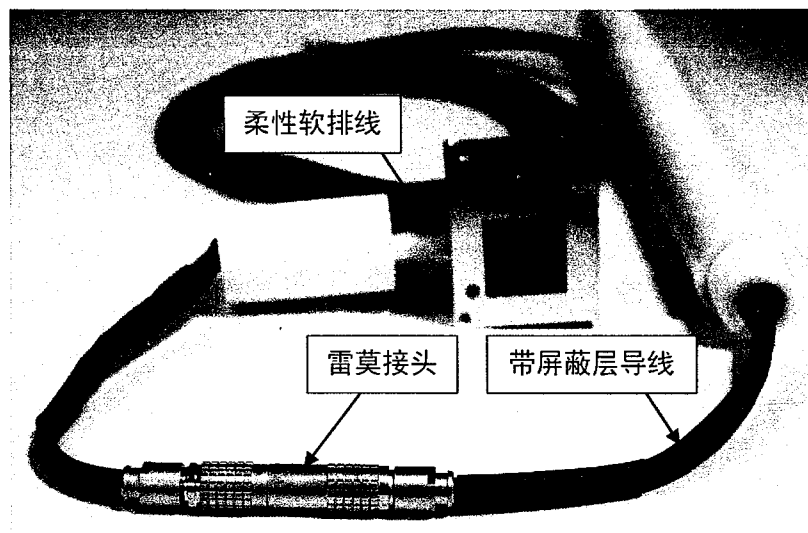


图 3.16 导线和转接接头

Figure 3.16 Wires and connectors.

3.4.2 标定系统构建

标定系统如图 3.17 所示，除了标定夹具之外，该标定系统还包括电场标定箱。电场标定箱由 2 块平行金属电极板、铁丝、直流高压电源和旋转电机组成。该系统的特点在于：

- 通过在两块相互平行的金属电极板上施加相反的直流电压，从而在极板

之间形成了均匀电场空间，该空间为 $60\text{cm} \times 60\text{cm} \times 30\text{cm}$ 的长方体。

- 两个平行金属电极板之间等间距地布置着若干圈铁丝，铁丝围成的形状与金属极板的形状一致，间距为 5cm ，共 5 圈；相邻两圈铁丝间或是金属电极板与其相邻的铁丝间均由阻值为 $1\text{M}\Omega$ 的高压电阻连接，这些电阻用作分压电阻。铁丝和高压电阻均用于减小平行金属电极板之间的边缘效应。
- 该三维电场传感器固定于本章 3.4.1 节介绍的标定夹具上，置于均匀电场空间的中心处。该标定夹具的另一端固定于旋转电机，且该标定夹具平行于金属电极板放置。在旋转电机的控制下，该 MEMS 三维电场传感器绕着 R1 轴旋转，而 MEMS 三维电场传感器绕着 R2 轴旋转需要手动控制。R1 和 R2 的交点与该三维传感器的中心重合，因此保证传感器在旋转时其中心的位置不变。标定过程中，施加电场方向不变，通过旋转传感器实现传感器与标定电场方向的夹角变化。
- 该 MEMS 三维电场传感器与后端处理系统连接。在系统工作中，上位机软件接收、处理和显示 MEMS 三维电场传感器的输出信号，或是下发设定好的 MEMS 一维电场敏感芯片的工作频率，或是对 MEMS 一维电场敏感芯片进行扫频。

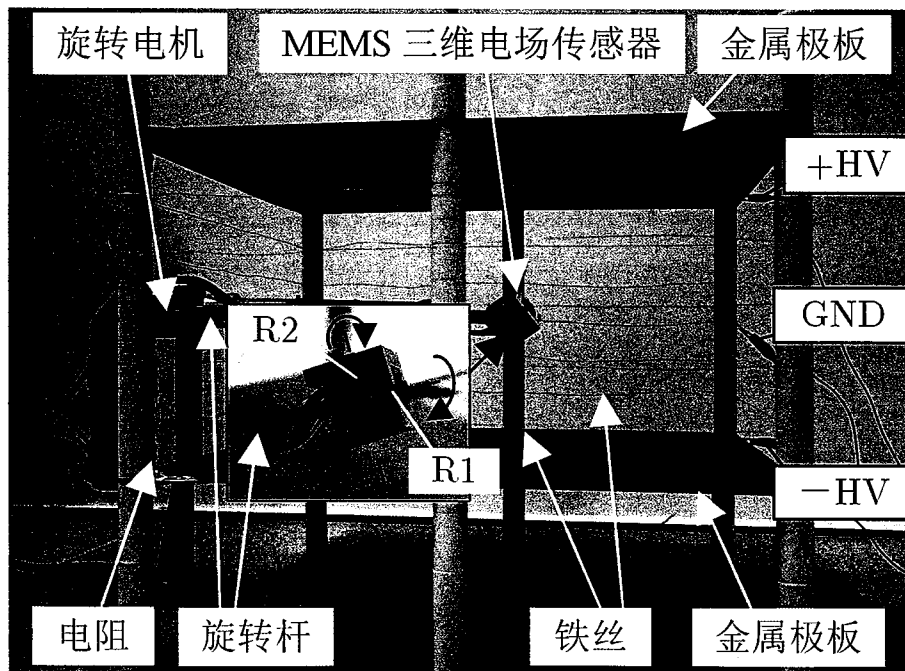


图 3.17 三维电场传感器的测试标定装置

Figure 3.17 Calibration system of 3D EFS.

3.4.3 误差分析

在 MEMS 三维电场传感器标定时，置于标定电场中的标定夹具或导线将不可避免地干扰到标定电场。因此，本节提出了一种基于有限元的标定电场误差分析模型和计算方法，针对本章 3.4.2 节中设计的标定夹具及其内部的导线，研究了其引起的标定电场的误差。

在计算误差时无需考虑 MEMS 三维电场传感器的存在，仅需考虑标定夹具和导线的存在即可；需要提取电场的区域为该 MEMS 三维电场传感器标定过程中，其三个 MEMS 一维电场敏感芯片所有可能出现的位置。本节以有限元分析的方法从理论上分析标定夹具和导线对标定电场造成的相对误差 δ ，所以忽略了平行金属电极板表面平整度、平行金属电极板的平行度公差、高压电阻精度、以及产生静电场的标准高压电源的相对系统误差等所起的实际测量中的误差。该相对误差 δ 可表示为

$$\delta = \left(\left| \frac{\Delta E_x}{E_{\text{ext}}} \right| + \left| \frac{\Delta E_y}{E_{\text{ext}}} \right| + \left| \frac{\Delta E_z}{E_{\text{ext}}} \right| \right) \times 100\%, \quad \dots (3.6)$$

其中， ΔE_x 、 ΔE_y 和 ΔE_z 分别为 E_x 、 E_y 和 E_z 三个电场分量的误差， E_{ext} 为施加的外电场的强度。

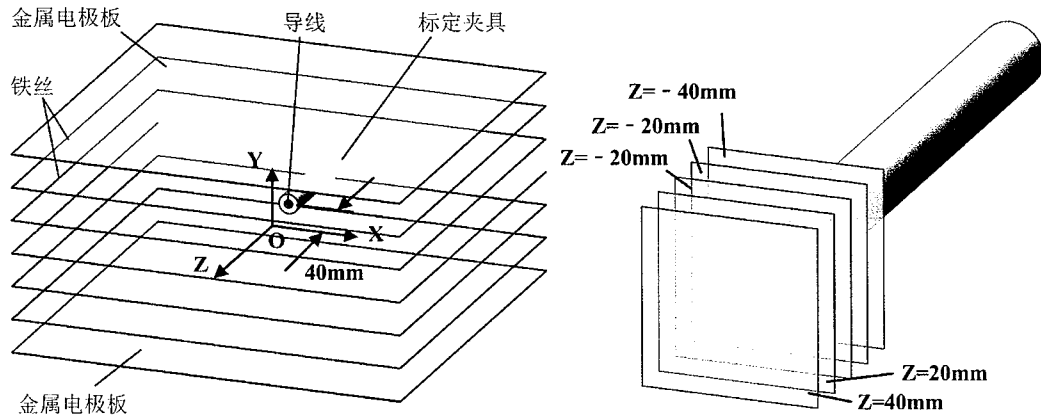


图 3.18 标定电场误差分析的仿真模型

Figure 3.18 Simulation model for deviation analysis of electric field used for calibration.

根据本章 3.4.1 节中研制的标定夹具和 3.4.2 节中研制的电场标定箱建立了等尺寸的分析模型，如图 3.18 所示。该标定电场中只有标定夹具和导线，标定夹具忽略了其前端 40mm 长的连接结构（将其视为三维电场传感器的一部分），并且按照轮廓将其简化为一个空心圆柱，而导线也简化为一个圆柱体填充在空

心圆柱里。该电场空间的中心与坐标的原点重合,假设三维电场传感器的中心也与原点重合,则标定夹具距离原点的距离为 40mm。由于该标定结构在旋转过程中结构形状不变,对标定电场的干扰也不变,因此在无需考虑标定结构的旋转,只需考虑在工作过程中 MEMS 一维电场敏感芯片可能出现的位置即可。

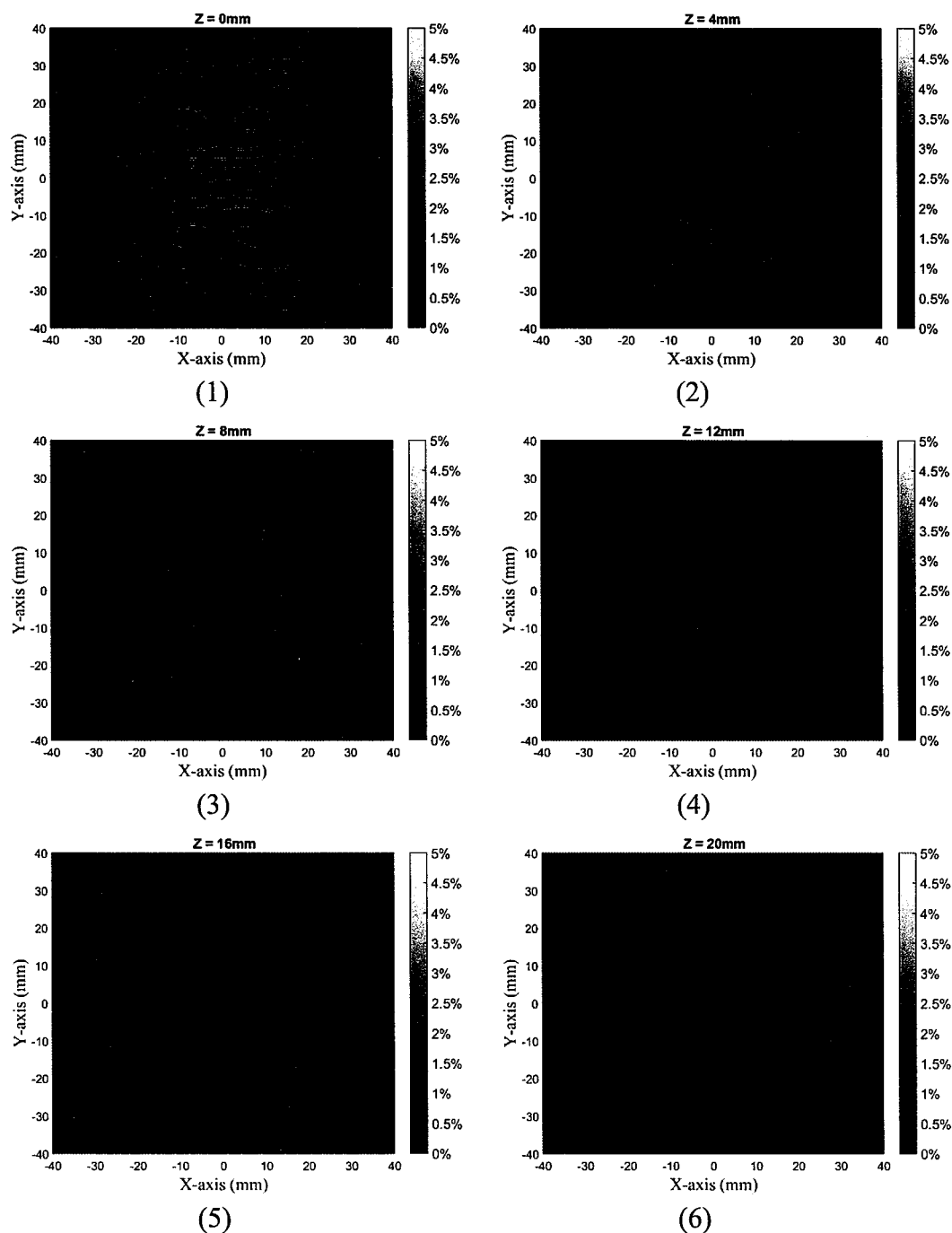


图 3.19 不同断面处的相对误差 δ 的云图; (1) $z=0$ mm; (2) $z=4$ mm; (3) $z=8$ mm; (4) $z=12$ mm; (5) $z=16$ mm; (6) $z=20$ mm

Figure 3.19 Nephogram of relative deviation δ at different cross sections, (1) $z=0$ mm; (2) $z=4$ mm; (3) $z=8$ mm; (4) $z=12$ mm; (5) $z=16$ mm; (6) $z=20$ mm.

本文采用了 ANSYS 有限元分析软件进行仿真分析。完成材料属性赋值和网格划分后,在图 3.18 中的上下两个平行金属电极板上分别施加相反的电势,且在两者之间的铁丝以等差数列的形式施加电势,用于形成 1kV/m 的电场。因为导线外围均包裹了一层接地的屏蔽层,将导线的电势设置为零。本节先将该空间分成若干个断面,然后以读取路径的方式逐行读取并计算出各个断面上不同点处的 ΔE_x 、 ΔE_y 和 ΔE_z ,最终计算出各个断面上不同点处的相对误差 δ 。然后根据 MEMS 一维电场敏感芯片可能出现的位置,提取对应的 ΔE_x 、 ΔE_y 和 ΔE_z 。

图 3.19 罗列了部分断面处的相对误差 δ 的云图。每张云图的 X 轴和 Y 轴分别对应了在图 3.22 上 X 和 Y 的坐标,其标题上的 Z 也对应了在图 3.18 上 Z 的坐标。此时,标定夹具上距离原点最近的那个面的坐标为 $z = -40\text{mm}$ 。云图颜色越亮的区域代表其相对误差 δ 越大,云图中的黑色曲线为等值线。因此,由图 3.19 可知,越接近标定夹具的区域,标定电场的误差就越大。

鉴于 MEMS 一维电场敏感芯片的感应区域尺寸较小,感应区域的不同位置距离 MEMS 三维电场传感器的中心处位置基本一致,因此取 MEMS 一维电场敏感芯片的中心为研究对象,用于研究其运动轨迹上标定电场的最大相对误差 $\delta_{\max}$ 。由本章 3.1 节可知, MEMS 一维电场敏感芯片的中心距离 MEMS 三维电场传感器的中心为 22mm 。在 MEMS 三维电场传感器旋转时, MEMS 一维电场敏感芯片中心点的运动轨迹能构成了一个半径 $\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = 22\text{cm}$ 且 $z \geq 0$ 的半球面(在本次仿真中 MEMS 三维电场传感器的中心与坐标原点重合)。经过计算得 $\delta_{\max} = 2.76\%$,因此经过仿真分析可得标定电场的相对误差 $\delta \leq 2.76\%$ 。

3.5 组件式低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器的标定与测试

基于本章所研发的测试和标定系统,本节对组件式低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器进行了标定与测试,包括扫频测试了其三个 MEMS 一维电场敏感芯片的谐振频率、测试了每个 MEMS 一维电场敏感芯片对平行于该传感器 X 轴、 Y 轴和 Z 轴三个方向电场的灵敏度和线性度、以及测试了其三维电场测量的误差。

3.5.1 传感器标定

通过扫频,本章研制的 MEMS 三维电场传感器上三个 MEMS 一维电场敏

传感器芯片的谐振频率分别为 2220Hz、2240Hz 和 2250Hz。由本文 2.4.2 节可知, 采用 ANSYS 有限元仿真软件获取的该 MEMS 一维电场敏感芯片中谐振结构的固有频率为 2552Hz。仿真计算值和实际测量值之间存在差异的原因在于空气阻尼的影响和仿真计算时对谐振结构的简化。

首先对该 MEMS 三维电场传感器的 X 、 Y 和 Z 三个测量轴进行单轴标定。其中, 传感器标定和测试的环境为室温且标准大气压。旋转 MEMS 三维电场传感器使匀强电场分别平行于该传感器的 X 轴、 Y 轴和 Z 轴三个方向, 每次施加 0~120kV/m 的电场, 且同时记录三个 MEMS 一维电场敏感芯片的输出。通过线性拟合得到了每个 MEMS 一维电场敏感芯片对平行于该传感器 X 轴、 Y 轴和 Z 轴三个方向电场的灵敏度。

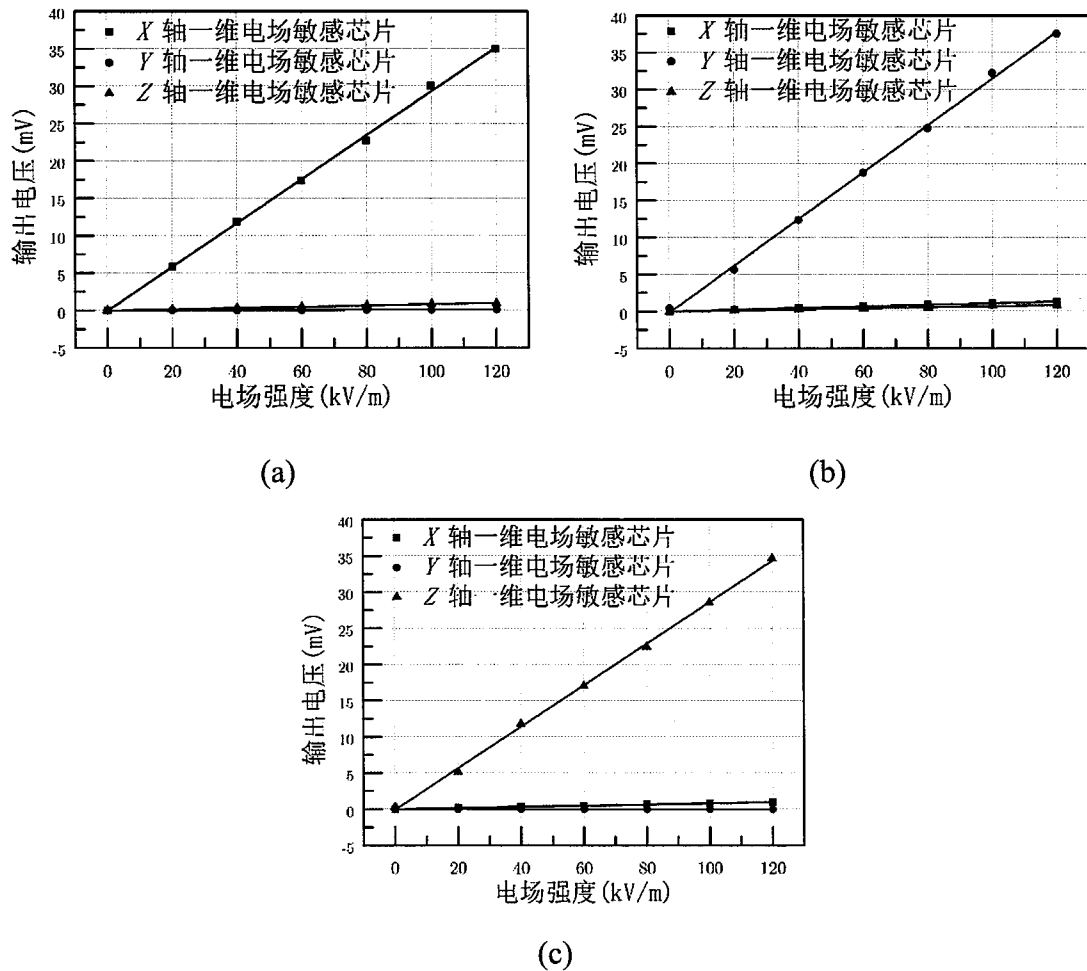


图 3.20 MEMS 三维电场传感器的标定曲线, (a) X 轴方向电场标定; (b) Y 轴方向电场标定; (c) Z 轴方向电场标定

Figure 3.20 Uniaxial electric field calibration for 3D EFS. (a) Electric field is applied along X -axis; (b) electric field is applied along Y -axis; (c) electric field is applied along Z -axis.

测试结果如图 3.20 和表 3.1 所示, 该三维电场传感器的轴间耦合灵敏度 $\leq 3.48\%$ 。对比表 1.1 可得, 本文提出的低轴间耦合的 MEMS 三维电场传感器将轴间耦合灵敏度减小至先前最佳结果的 29.5%左右。测试结果表明本文第二章中研制的采用镜面对称设计的 MEMS 一维电场敏感芯片仅对垂直于其对称面方向的电场分量敏感, 实现了设计目标; 将三个该 MEMS 一维电场敏感芯片正交布置构成的三维电场传感器能够有效地减小轴间耦合干扰。残余的轴间耦合灵敏度是可能因为: ①MEMS 一维电场敏感芯片在制备过程中的误差导致的其结构并没有完全的对称、②在组装过程中三个 MEMS 一维电场敏感芯片没有完全正交。此外, X 轴、 Y 轴和 Z 轴 MEMS 一维电场敏感芯片的线性度误差 $\leq 2.1\%$, 这说明该 MEMS 三维电场传感器具有良好的线性度。

表 3.1 X 轴、 Y 轴和 Z 轴 MEMS 一维电场敏感芯片的灵敏度

Table 3.1 Sensitivities of the X -, Y - and Z -axis 1D EFS chips

电场方向	X 轴MEMS一维电场敏感芯片的灵敏度 (mV·m/kV)	Y 轴MEMS一维电场敏感芯片的灵敏度 (mV·m/kV)	Z 轴MEMS一维电场敏感芯片的灵敏度 (mV·m/kV)
沿 X 轴	0.293	0.001	0.008
沿 Y 轴	0.011	0.316	0.007
沿 Z 轴	0.008	0	0.287

因此, 由式 (1.1) 可得, 该三维电场可表示为

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.293 & 0.011 & 0.008 \\ 0.001 & 0.316 & 0.007 \\ 0.008 & 0 & 0.287 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_x - V_{x0} \\ V_y - V_{y0} \\ V_z - V_{z0} \end{bmatrix}。$$

本文中, 该解耦标定矩阵计算为

$$S = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} 3.416 & -0.117 & -0.095 \\ -0.011 & 3.165 & 0 \\ -0.094 & -0.074 & 3.487 \end{bmatrix}。 \quad \dots (3.7)$$

3.5.2 三维电场测量

在本章研制的测试标定装置内旋转该 MEMS 三电场传感器至任意角度, 对比该 MEMS 三维电场传感器测量到的电场与实际施加的电场, 用于验证该传感器的 MEMS 三维电场测量的准确性。旋转传感器至几组不同的角度, 分别施加

50kV/m 和 100kV/m 的电场, 记录三个 MEMS 一维电场敏感芯片的输出值。通过式 (3.7) 计算合成电场, 并与施加电场进行对比, 结果如表 3.2 所示。

表 3.2 组件式三维电场传感器在空间作不同角旋转的输出与计算电场强度

Table 3.2 Outputs of the 3D EFS and calculated strength of electric fields when electric fields are applied with different directions.

旋转角度	施加电场 (kV/m)	X轴一维电场敏感芯片的输出 (mV)	Y轴一维电场敏感芯片的输出 (mV)	Z轴一维电场敏感芯片的输出 (mV)	合成电场 (kV/m)	误差
θ_1	50	0.01	8.67	12.08	49.77	0.46%
	100	0.01	17.51	24.35	100.40	0.40%
θ_2	50	0.01	13.97	6.86	49.84	0.32%
	100	0.04	27.74	13.99	99.56	0.44%
θ_3	50	0.03	-10.08	-11.63	51.08	2.16%
	100	0.05	-20.50	-22.84	101.67	1.67%
θ_4	50	0.04	-1.11	14.09	49.34	1.32%
	100	0.04	-2.29	28.26	99.01	0.99%
θ_5	50	0.02	0.98	-14.13	49.46	1.08%
	100	0.05	2.12	-28.30	99.09	0.91%
θ_6	50	0.03	5.99	-13.27	50.41	0.82%
	100	0.04	11.78	-26.58	100.71	0.71%
θ_7	50	0.01	-5.67	13.42	50.51	1.02%
	100	0.01	-12.13	26.65	101.38	1.38%
θ_8	50	2.56	-13.02	8.57	52.21	4.42%
	100	5.22	-26.73	15.99	104.02	4.02%
θ_9	50	-8.67	9.77	8.49	53.30	6.60%
	100	-16.94	19.32	17.84	107.13	7.13%
θ_{10}	50	-7.31	6.26	11.01	51.02	2.04%
	100	-14.81	12.11	22.50	103.19	3.19%
θ_{11}	50	-6.22	5.79	12.55	52.94	5.88%
	100	-12.57	11.98	24.89	105.89	5.89%
θ_{12}	50	4.03	-11.83	9.59	52.53	5.06%
	100	8.01	-23.02	19.64	104.99	4.99%
θ_{13}	50	7.69	-8.63	10.13	51.82	3.64%
	100	15.37	-17.22	20.13	103.24	3.24%
θ_{14}	50	6.10	-10.03	9.27	50.14	0.28%
	100	12.15	-20.27	19.13	101.97	1.97%

对比表 3.2 中的施加电场与合成电场可知误差 $\leq 7.13\%$, 这说明合成电场与施加电场保持良好的一致性。误差的主要来源是系统误差, 包含平行金属电极

板尺寸误差、平行度误差、标定夹具对标定测试装置中电场的干扰等，MEMS 一维电场敏感芯片的表面温度、湿度和静电荷积累等因素也会造成测量存在误差。

3.6 本章小结

基于本文第二章中提出并制备的低耦合干扰的 MEMS 一维电场敏感芯片，本章研制了一种组件式低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器。该 MEMS 三维电场传感器包含了三个相互正交布置的 MEMS 一维电场敏感芯片从而构成三个相互正交的测量轴。

针对该 MEMS 三维电场传感器，本章分别研制了其传感信号检测电路和后端处理系统。该后端处理系统的优点在于小型化和集成化，简化了该三维电场传感器测试和标定时的工作量。本章详细介绍了传感信号检测电路的工作原理，以及后端处理系统的硬件设计和软件设计。

针对该 MEMS 三维电场传感器，本章研制了其标定系统，包括用于固定传感器和提供旋转自由度的标定夹具，以及用于提供空间电场的电场标定箱。为了实现低误差的三维电场传感器标定，本章论述了该 MEMS 三维电场传感器的标定系统（特别是标定夹具和导线）对电场空间的干扰，提出了一种基于有限元的标定电场误差分析模型和计算方法，计算了标定夹具和导线对电场空间造成的误差。计算得定夹具和导线对电场空间造成的误差 $\leq 2.73\%$ 。

最后，本节在常温常压下对该 MEMS 三维电场传感器进行性能测试，并对结果展开分析和讨论。实验结果表明在 0~120kV/m 电场强度范围内，该 MEMS 三维电场传感器的轴间耦合灵敏度 $\leq 3.48\%$ ，这说明本文第二章中研制的采用镜面对称设计的 MEMS 一维电场敏感芯片仅对垂直于其对称面方向的电场分量敏感，实现了设计目标；将三个该 MEMS 一维电场敏感芯片正交布置构成的三维电场传感器能够有效地减小轴间耦合干扰。此外，三个测量轴的线性度误差 $\leq 2.1\%$ ，说明每个 MEMS 一维电场敏感芯片均具有良好的线性度；测量结果表明，该 MEMS 三维电场传感器的三维电场测量误差小于 7.13%。

第4章 微组装式低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器研究

为了在减小轴间耦合干扰的同时进一步减小传感器的体积,本章在第二章中研制的低耦合干扰的 MEMS 一维电场敏感芯片的基础上提出并研制了一种微组装式低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器,即通过微组装技术将微加工后呈二维平面结构的 MEMS 芯片组装成一个小型化且高集成度的三维结构的 MEMS 芯片,实现低轴间耦合的三维电场测量。

本章详细介绍了该 MEMS 三维电场传感器芯片的结构和实现低轴间耦合的三维电场测量的方法,详细介绍了该芯片微加工工艺流程、版图设计和微组装工艺,以及制备过程中遇到的问题和解决方案。

4.1 微组装式低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器结构设计

由本文 1.2.2 节可知,单芯片式 MEMS 三维电场传感器尽管具有体积小、集成度高、确保三个测量轴相互正交和各个电场敏感单元的振动频率一致等优点,但是也存在着如下缺点:(1)受限于芯片的二维结构,无法对垂直于芯片上表面方向的电场分量做差分处理,导致轴间耦合干扰较大;(2)传感器芯片结构较大且复杂,导致工艺难度较大,导致谐振频率和品质因数较低,从而进一步导致传感器的驱动电压较大和传感器的灵敏度较小。因此,针对上述的问题,本章提出了一种微组装式低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器。对于 MEMS 器件来说,微组装技术是将呈二维平面结构的 MEMS 芯片加工或是组装成一个三维立体结构的 MEMS 芯片的技术的统称。根据已报道的文献资料,微组装技术已在多个领域有所探索,例如三维微电极阵列和磁共振力显微镜(magnetic resonance force microscopy, MRFM)中的探头等。针对不同的 MEMS 器件,其微组装的方法不尽相同,因此对 MEMS 器件的工艺和设计的要求也不尽相同。

图 4.1 为本章提出的 MEMS 三维电场传感器芯片的结构示意图,该 MEMS 三维电场传感器置于基底上,其结构特点在于:

- 该 MEMS 三维电场传感器呈等腰直角三棱状,三个侧面分别为三个低耦合干扰的一维电场敏感单元,三个一维电场敏感单元均垂直置于基底,

分别用于测量 X 、 Y 和 Z 三个正交方向的电场分量。其中， X 轴一维电场敏感单元和 Y 轴一维电场敏感单元分别坐落在直角边对应的侧面； Z 轴一维电场敏感单元坐落在斜边对应的侧面。

- 每个一维电场敏感单元也采用了与本文第二章中所述的低耦合干扰的 MEMS 一维电场敏感芯片一致的镜面对称设计和敏感结构参数(参照表 2.4, 本节不做赘述), 因此在差分电路的配合下该一维电场敏感单元也仅对垂直于其对称面方向的平行电场分量敏感。
- 每个一维电场敏感单元都对应了一个引线底座, 且两者通过金丝导线电气连接, 便于该 MEMS 三维电场传感器与测试系统电气连接。
- 基于柔性薄膜材料的微铰链将上述三个一维电场敏感单元和与他们对应的引线底座连接构成一个整体结构。
- 互锁机构, 由锁槽和锁片组成, 分别位于 X 轴一维电场敏感单元和 Y 轴一维电场敏感单元的外侧。锁槽和锁片互锁连接, 用于固定三个一维电场敏感单元的相互位置, 使其成为等腰直角三棱柱状, 从而使三个测量轴相处垂直。

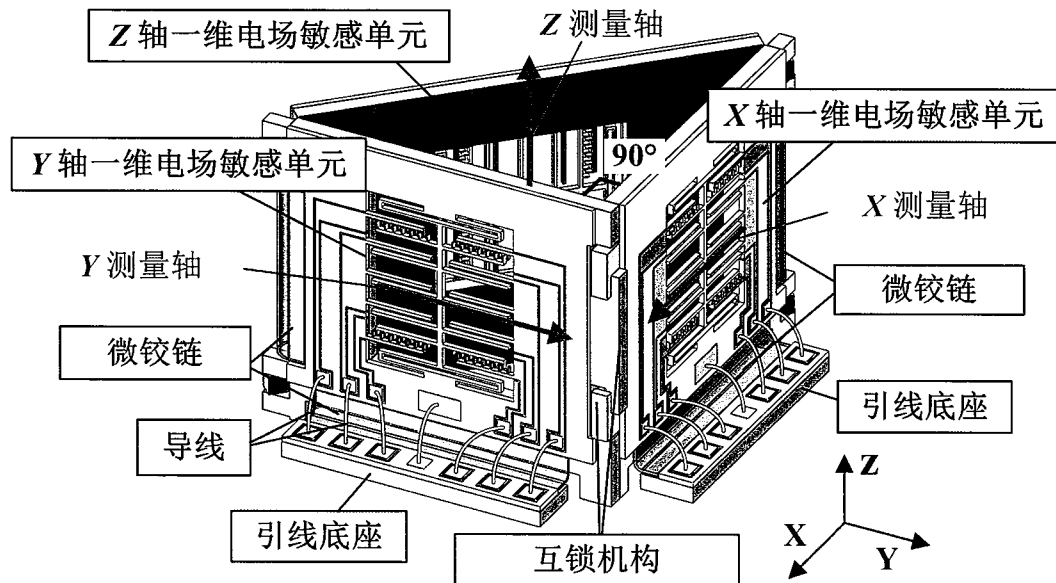


图 4.1 微组装式低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器示意图

Figure 4.1 Schematic view of the microassembled 3D EFS with low cross-axis coupling interference.

该 MEMS 三维电场传感器微加工后为一个可弯折的二维平面结构。其微组装流程如图 4.2 所示, (1) 同时弯折连接三个一维电场敏感单元的微铰链; (2)

使锁槽和锁片相扣,依靠微铰链中的应力实现互锁;(3)在三个一维电场敏感单元的相互连接处涂上粘结剂,用于增强连接处的强度从而固定三个一维电场敏感单元的相对位置。因此,微铰链的存在简化了微组装流程;微铰链和互锁机构共同作用固定了微组装后三个一维电场敏感单元的相对位置,有助于保证三个测量轴相互正交。相较于将三个分立的 MEMS 一维电场敏感芯片贴到等腰直角三棱柱的三个侧面上,本章提出的微组装式 MEMS 三维电场传感器避免了组装过程中引入的操作误差。此外,由图 4.2 可知,在该 MEMS 三维电场传感器芯片进行微组装前,引线底座与各个一维电场敏感单元已通过金丝导线实现电气连接,相较于微组装完成后再进行引线焊接,该措施避免了直接从竖直面引线,降低了引线焊接的难度,且避免了引线焊接过程中对 MEMS 三维电场传感器结构造成破坏的风险。

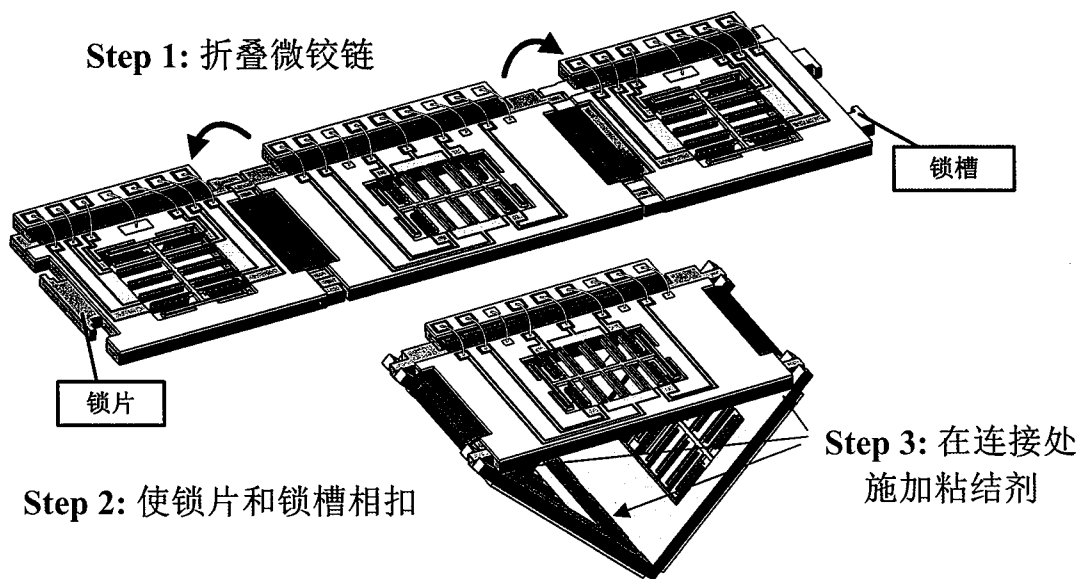


图 4.2 MEMS 三维电场传感器的组装过程示意图

Figure 4.2 Schematic view of microassembly process of the proposed 3D EFS.

相比于单芯片式 MEMS 三维电场传感器,该 MEMS 三维电场传感器在实现体积小、高集成度和确保三个测量轴相互正交的同时,(1)实现了对垂直于基底电场分量(即 Z 方向的电场分量)的差分处理,有助于减小轴间耦合干扰;(2)简化了电场敏感单元的结构,有助于提高谐振结构的谐振频率和品质因数,从而降低传感器的驱动电压和提高传感器的灵敏度。

4.2 微组装式低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器微加工工艺研究

针对本章 4.1 节中设计的微组装式 MEMS 三维电场传感器结构, 本节开发了一种基于 SOI 和 PSPI 的微加工工艺, 即将 PSPI 作为微铰链结构引入传统的 SOI 工艺中, 成功制备了该 MEMS 三维电场传感器。其中, 该 SOI 晶圆为双抛光表面无氧化层, 大小为 4 英寸; 结构体硅厚度为 $25\mu\text{m}$, 衬底硅厚度为 $300\mu\text{m}$, 氧化层厚度为 $1\mu\text{m}$; 结构体硅为 N 掺杂, 其电阻率 $\leq 0.02\Omega\cdot\text{cm}$ 。上述工艺在中国科学院电子学研究所的超净间内完成。

4.2.1 微铰链材料选型

为了实现本章设计的微组装式 MEMS 三维电场传感器的可弯折性能, 本节采用柔性薄膜材料作为其微铰链的材料。考虑到微铰链的形状、与 SOI 工艺兼容中需要承受的各类型工艺条件、和微铰链受力分析 (最大弯折角度为 135°), 本节对微铰链的材料提出如下要求:

- (1) 膜厚接近 $25\mu\text{m}$, 即在提供足够结构强度的同时不能超过 SOI 结构体硅厚度 (详情请见本章 4.2.2 节微加工工艺流程);
- (2) 易于图形化;
- (3) 拉伸强度大, 能承受至少 5% 的形变。

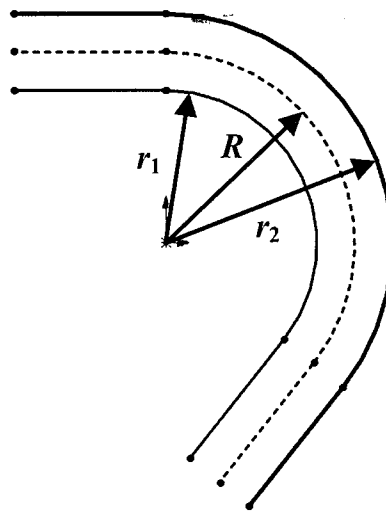


图 4.3 微铰链被弯折 135° 时的模型

Figure 4.3 Model of micro-hinge folded by 135° .

假设微铰链在弯折 135° 过程中, 柔性薄膜呈圆弧状, 且其中心线的长度 L

不变且膜厚 t 不变, 则柔性薄膜的中心线半径 $R = \frac{4L}{3\pi}$ 、柔性薄膜的内径 $r_1 = R - \frac{t}{2} = \frac{4L}{3\pi} - \frac{t}{2}$ 、柔性薄膜的外径 $r_2 = R + \frac{t}{2} = \frac{4L}{3\pi} + \frac{t}{2}$ 。因此其内弧长度 $L_1 = L - \frac{3\pi t}{8}$, 外弧长度 $L_2 = L + \frac{3\pi t}{8}$ 。因此柔性薄膜的应变为 $\varepsilon = \frac{3\pi t}{8L} = \frac{t}{2R}$ 。如果 $t = 10\mu\text{m}$, $R = 300\mu\text{m}$, 则 $\varepsilon = 1.67\%$, 考虑到工程中的安全系数, 此处选用形变至少为 5%。

(4) 耐高温, 在最高 300°C 的温度条件下不碳化 (该温度为 SOI 进行 DRIE 工艺时 SOI 晶圆承受的温度)。

(5) 热收缩性低。

针对上述的要求, 本章选用了 PSPI 作为微铰链材料。PSPI 除了具备 PI 的耐高温、耐酸性腐蚀和强度高等特点, 其光敏性能使其通过普通的光刻工艺既能实现图形化, 简化了图形化过程, 已用作绝缘材料广泛应用于 CMOS 工艺中。。目前, 国内的 PSPI 仅 POME 一家生产, 本节首先采用其生产的 ZKPI-540 为正性光敏型聚酰亚胺进行试验, 实验结果表明该型号 PSPI 亚胺化后的膜厚约为 $1.4\mu\text{m}$, 且材料偏脆。国外的 PSPI 主要有 HD microsystems 公司的 HD 系列, Toray 公司的 PW 系列和 Fujifilm 公司的 FB5410。其中在 HD 的各系列中, HD-4110 的膜厚最厚; 在 PW 系列中 PW-1200 最厚。表 4.1 为 HD-4110、PW-1200 和 FB5410 这三款 PSPI 的对比。

表 4.1 各类型 PSPI 参数汇总

Table 4.1 List of parameters of PSPI

PSPI	拉伸强度 (Mpa)	杨氏模量 (GPa)	亚胺化后厚度 (μm)	伸长量(%)	热缩性 (ppm/ $^\circ\text{C}$)
HD-4110	200	3.3	8~20	45	35
PW-1200	146	3.7	最大 10	20	—
FB5410	160	2.7	最大 10	87	44

考虑到 HD-4110 较难获取, 所以在 PW-1200 和 FB5410 之间选择。其中 FB5410 的杨氏模量更低、拉伸强度更大, 伸长量更高, 因此机械性能更佳。鉴于 FB5410 亚胺化后的膜厚最大为 $10\mu\text{m}$, 因此为了达到厚度尽可能接近 $25\mu\text{m}$, 本章采用旋涂 2 次的方式 (详情请见本章 4.2.2 节)。

4.2.2 微加工工艺

本章的微加工工艺需要6张掩模板，分别为4张用于SOI的掩模板和2张用于制作硬掩膜的掩模板，最终实现PSPI与SOI工艺兼容。其中，4张用于SOI的掩模板分别为金电极焊盘掩模板、结构体硅掩模板、PSPI掩模板和衬底硅掩模板，四者依次用于形成金电极焊盘层、用于结构体硅的图形化、用于形成基于PSPI的微铰链结构、以及用于衬底硅的图形化。2张硬掩膜分别用于旋涂PSPI前正面刻蚀氧化层和释放谐振结构时保护PSPI（详情请见图4.4和图4.5）。金电极焊盘层包含了金丝球焊接所需的焊盘、以及正面和反面套刻所需的基准标记；结构体硅掩模板通过正面对准标记与金电极层对准，结构体硅经图形化后部分区域被刻至氧化层，形成所需的传感器芯片结构；PSPI掩模板在SOI晶圆的正面形成微铰链、衬底硅掩模板通过反面对准标记与金电极层对准，衬底硅除了起支撑作用外，其背面经图形化后被刻穿形成通孔，通孔可减小该芯片的谐振结构振动时的空气阻尼。

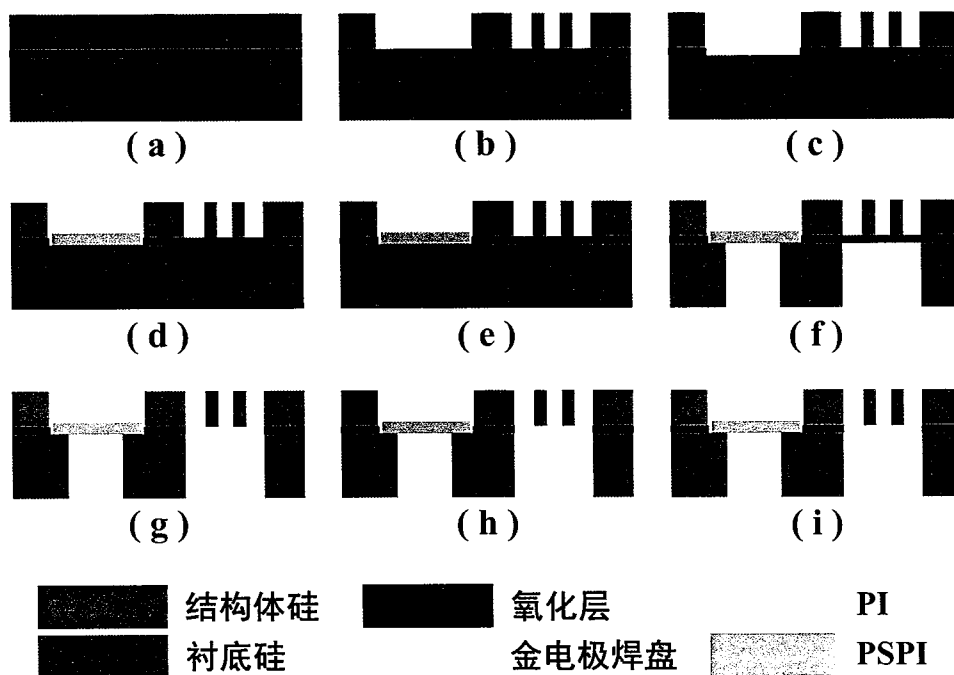


图 4.4 微组装式 MEMS 三维电场传感器制作工艺流程图

Figure 4.4 Fabrication process of microassembled 3D EFS.

该微组装式MEMS三维电场传感器的微加工工艺如图4.4和图4.5所示。需要注意的是：工艺步骤中忽略了硬掩膜制作的过程，因为硬掩膜的制作只是单纯地将普通硅片刻蚀出需要的通孔；多次进行光刻胶的旋涂，每次旋涂工艺过程

均为先在转速800r/min时旋转30s，然后在转速3000r/min时旋转1min；多次PSPI的旋涂，每次旋涂工艺过程均为先在转速300r/min时旋转30s，然后在转速1000r/min时旋转1min；工艺步骤中多次用到光刻机，每次曝光时光刻机的光强功率和光波长均不变，分别为15mW/cm²和365/405nm；工艺步骤中多次在进行DRIE前去除自然氧化层，采用的设备为ICP-98A型等密度等离子体刻蚀机，刻蚀气体选用CHF₃，进气速率为100sccm，上电极功率为500W，下电极功率为50W，刻蚀时间为30s，氧化层的刻蚀速率为1000Å/min。

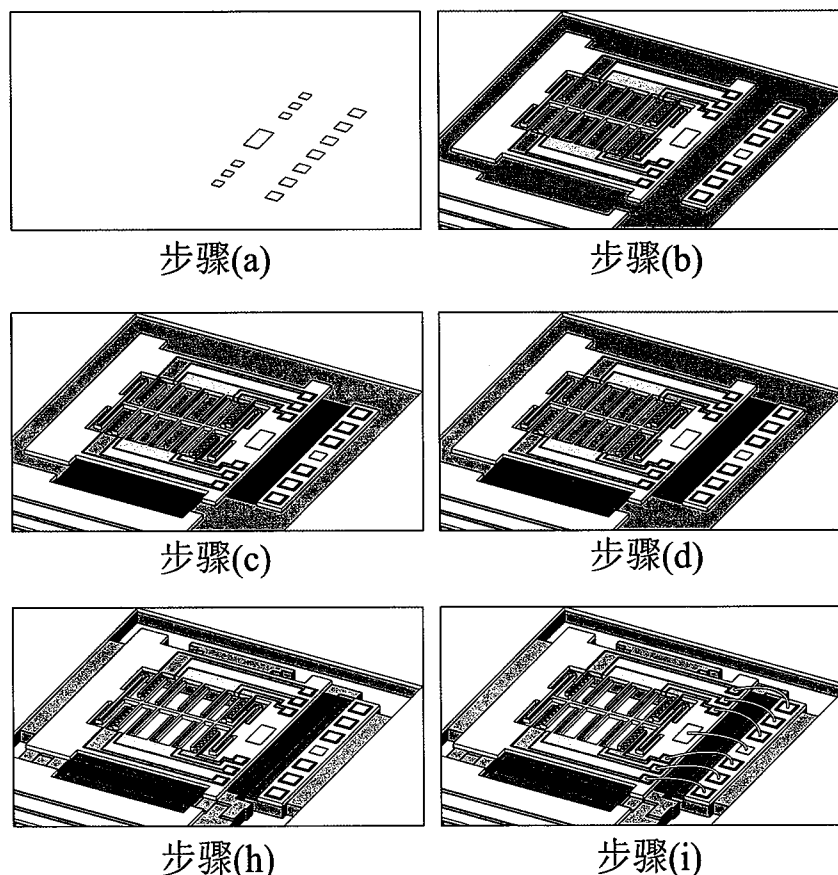


图 4.5 微组装式 MEMS 三维电场传感器工艺示意图

Figure 4.5 3D schematic view of fabrication process of microassembled 3D EFS.

具体步骤如下：

- (a) 使用溅射和 lift-off 工艺在结构体硅的表面制备金电极焊盘。
 - 1) 将光刻胶 AZ5214E 旋涂至 SOI 的结构体硅表面。
 - 2) 将 SOI 放置于 100℃ 的热板上加热 3min30s 用于固化 AZ5214E。
 - 3) 将光刻胶紧贴金电极掩模板，置于光刻机中曝光 4s。
 - 4) 将 SOI 置于 120℃ 的热板上加热 3min 用于反转 AZ5214E 至负胶。

- 5) 将 SOI 置于光刻机中曝光 12s。
 - 6) 将 SOI 置于 AZ300 显影液中图形化光刻胶，留出空窗用于溅射，制备金电极焊盘，测量得光刻胶的平均厚度约为 $1.2\mu\text{m}$ 。
 - 7) 在 SOI 的结构体硅表面依次溅射 $500\text{\AA}$ 的铬和 $2000\text{\AA}$ 的金。
 - 8) 将 SOI 浸泡在丙酮溶液中进行 lift-off 操作，剥离多余铬和金，形成金电极焊盘。
- (b) 使用 DRIE 图形化结构体硅。
- 1) 将光刻胶 AZ1500 旋涂至 SOI 的结构体表面。
 - 2) 将 SOI 置于 80°C 的烘箱中加热 40min，用于固化 AZ1500。
 - 3) 将光刻胶紧贴结构体硅掩模板，置于光刻机中曝光 4s。
 - 4) 将 SOI 置于 AZ300 显影液中图形化光刻胶，为 DRIE 提供掩膜，测量得光刻胶的平均厚度约为 $1.3\mu\text{m}$ 。
 - 5) 去除结构体硅表面的自然氧化层。
 - 6) 采用 Alcatel 的 AMS100 进行 DRIE，用于图形化结构体硅。其具体工艺参数为：反应气体的充气周期为 7s，其中，依次充入 2s 的 350sccm 的 C_4F_8 和 5s 的 350sccm 的 SF_6 ；上电极的功率始终保持为 1500W，下电极依次施加 10ms 的 80W 和 90ms 的 0W，并循环往复。该 DRIE 的时间为 11min、刻蚀深度为 $25\mu\text{m}$ 、经测量 DRIE 的深宽约比为 15:1。
 - 7) 用去胶机去除结构体硅表面多余的光刻胶。
- (c) 在旋涂 PSPI 前使用 CHF_3 搭配硬掩膜从 SOI 的正面去除 PSPI 所处位置的氧化层。实验表明当 FBF410 型号的 PSPI 置于 SOI 的氧化层上时，其在碱性的显影液（1%的 NaOH ）中极易脱落，因此为了不影响后续的步骤，需要将 PSPI 所处位置的氧化层去除。采用 ICP-98A 型等密度等离子体刻蚀机，其刻蚀时间约为 25min，刻蚀气体选用 CHF_3 ，进气速率为 100sccm，上电极功率为 500W，下电极功率为 50W，氧化层的刻蚀速率为 $1000\text{\AA}/\text{min}$ 。
- (d) 在 SOI 结构体硅面旋涂、固化、图形化且亚胺化 PSPI。
- 1) 将 FB5410 旋涂至 SOI 的结构体硅表面。
 - 2) 将 SOI 置于 115°C 的热板（垫上滤纸）上加热 4min，用于固化 FB5410。
 - 3) 将 FB5410 紧贴 PSPI 掩模板，置于光刻机中曝光 20s。

- 4) 将 SOI 置于 135℃ 的热板（垫上滤纸）上加热 90s，后烘 FB5410。
 - 5) 将 SOI 置于 TMAH 显影液中图形化 FB5410，构成微铰链结构。
 - 6) 将 SOI 置于烘箱中，该烘箱阶梯升温至 300℃，烘烤 10h，亚胺化 FB5410，测量得 FB5410 的平均厚度约为 9.3μm。
 - 7) 重复工艺步骤 1)~6)，测量得 FB5410 的平均厚度约为 17.5μm。
- (e) 在结构体硅表面旋涂聚酰亚胺（polyimide, PI）作为结构体硅的保护层。本章选用的 PI 型号为波米科技的 ZKPI-330I 低温固化型。
- 1) 将 PI 旋涂在 SOI 的结构体硅表面。
 - 2) 将 SOI 放置于烘箱中，该烘箱阶梯升温至 140℃，烘烤 14h，固化且亚胺化 PI。
- (f) 使用 DRIE 图形化衬底硅。
- 1) 将光刻胶 AZ4620 旋涂在 SOI 的衬底硅表面。
 - 2) 将 SOI 置于 80℃ 的烘箱中加热 40min，用于固化 AZ4620。
 - 3) 将光刻胶紧贴衬底硅掩模板，置于光刻机中曝光 15s。
 - 4) 将该 SOI 置于 1% 浓度的 NaOH 显影液中进行显影操作，为 DRIE 提供掩膜，测量得光刻胶的平均厚度约为 5.2μm。
 - 5) 去除结构体硅表面的自然氧化层。
 - 6) 采用 Alcatel 的 AMS100 进行 DRIE，用于图形化结构体硅。其具体工艺参数为：反应气体的充气周期为 9s，其中，依次充入 2s 的 150sccm 的 C₄F₈ 和 7s 的 700sccm 的 SF₆；上电极的功率始终保持为 1800W，下电极依次施加 10ms 的 70W 和 90ms 的 0W，并循环往复。该 DRIE 的时间为 52min，刻蚀深度为 300μm，经测量 DRIE 的深宽约比为 15:1。
 - 7) 用去胶机去除衬底硅表面多余的光刻胶。
- (g) 用 CHF₃ 搭配硬掩膜从 SOI 的背部去除氧化层。采用 ICP-98A 型等密度等离子体刻蚀机，其刻蚀时间约为 25min，刻蚀气体选用 CHF₃，进气速率为 100sccm，上电极功率为 500W，下电极功率为 50W。
- (h) 用 O₂ 搭配硬掩膜先后从 SOI 的正面和背部去除 PI，从而释放可动结构。采用 ICP-98A 型等密度等离子体刻蚀机，其刻蚀时间约为 40min，刻蚀气体选用 O₂，进气速率为 100sccm，上电极功率为 500W，下电极功率为 50W。

- (i) 用金丝压焊电气连接一维电场敏感单元上的焊盘与引线底座上的焊盘。

4.2.3 版图设计

该 MEMS 三维电场传感器的版图设计除了考虑本文 2.6.3 节中所述的因素外, 还需要考虑 PSPI 的应力对 SOI 晶圆造成的形变影响、硬掩膜对准方法和标记设计等。

图 4.6(a)分别为 4 张用于 SOI 微加工的掩模板设计图。该掩模板是针对 4 英寸的 SOI 设计的, 一张 4 英寸的 SOI 上共设计有 6 个 MEMS 三维电场传感器。该掩模板版图采用 L-edit 软件绘制, 蓝紫色区域代表金电极层、红色区域代表图形化后的结构体硅层、绿色区域代表图形化后的 PSPI 层、灰色区域代表图形化后的衬底硅层。其中, 每个一维电场敏感单元的设计均采用本文 2.6.3 节中 MEMS 一维电场敏感芯片的设计, 因此在本节不做赘述。在设计掩模板时还需要注意:

- 为了减小 PSPI 对 SOI 晶圆造成的应力产生的变形且有可能使晶圆破碎, 每个 MEMS 电场传感器尽量分散布置;
- 每个一维电场敏感单元应留有足够的面积用作微组装时的受力点;
- 引线底座上的焊盘应尽量靠近该 MEMS 三维电场传感器的外围, 避免金丝压焊时针头触碰芯片结构;
- 精确计算微铰链的长度和宽度, 在保证结构完整的前提下, 尽可能减小微铰链尺寸;
- 精确计算和设计锁槽和锁片, 确保两者能够互锁;

图 4.6(b)是用于工艺步骤(a)-(d)的单个 MEMS 三维电场传感器的掩模板设计图, 其中淡黄区域为硬掩膜, 用于旋涂 PSPI 前正面刻蚀氧化层的掩模板。由图可见, 该硬掩膜的通孔的尺寸大于微铰链结构的尺寸, 用于确保微铰链结构下无氧化层存在; 图 4.7(c)是用于工艺步骤(d)-(h)的单个 MEMS 三维电场传感器的掩模板设计图, 其中斑点区域为硬掩膜。由图可见, 该硬掩膜的通孔的尺寸大于微铰链结构的尺寸, 用于从 SOI 晶圆背后去除氧化层和 PI (用于释放谐振结构) 时不破坏微铰链结构。

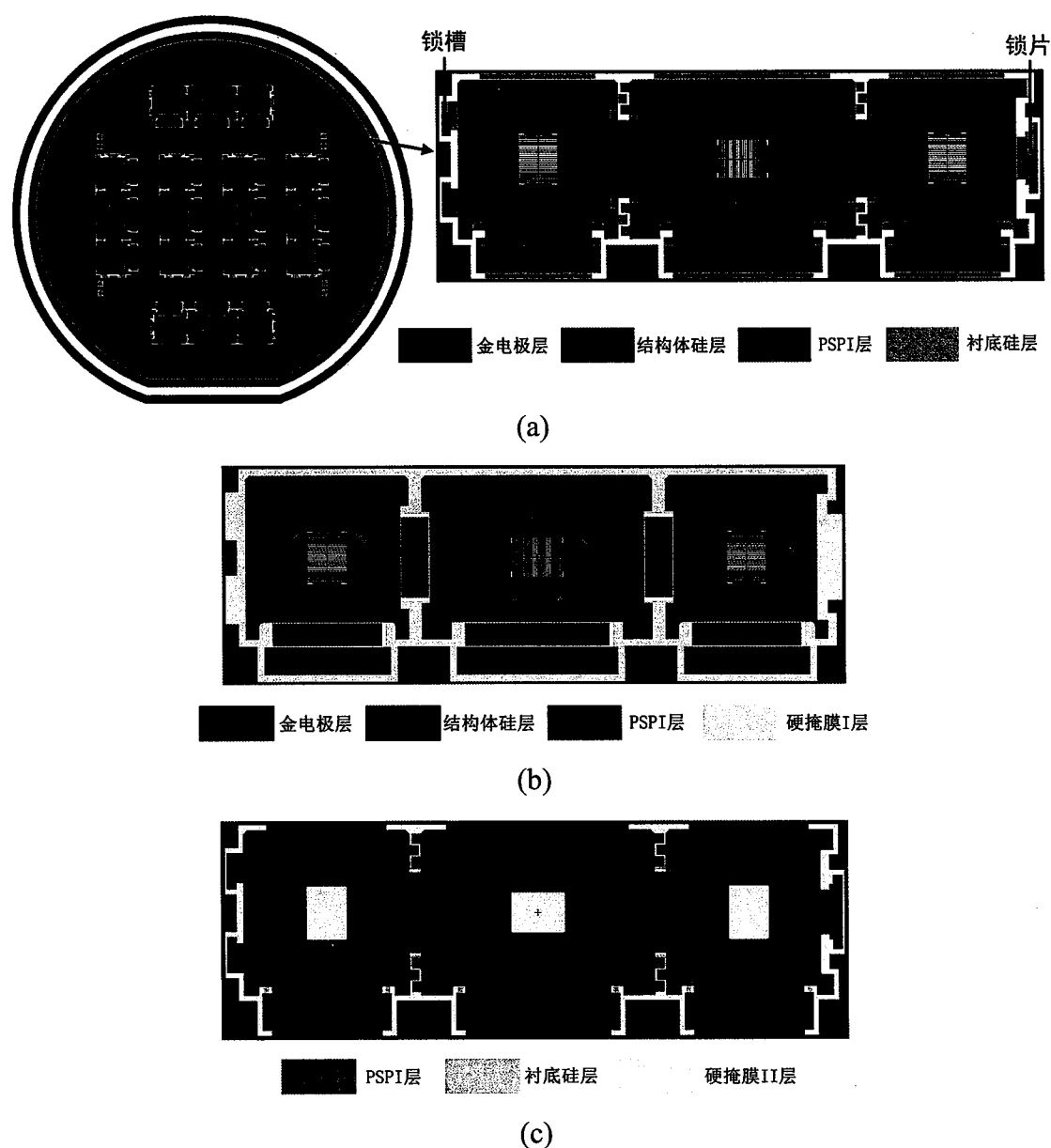


图 4.6 (a)用于 SOI 微加工的掩膜板设计图; (b)用于工艺步骤(a)-(d)的掩膜板设计图; (c)用于工艺步骤(d)-(h)的掩膜板设计图

Figure 4.6 (a)Design drawing of masks used for micromachining of SOI; (b) Design drawing of masks used in fabrication step (a), (b), (c) and (d); (c) Design drawing of masks used in fabrication step (d), (e), (f), (g) and (h).

4.2.4 划片与制备结果

图 4.7 为 SOI 晶圆完成本章 4.2.2 节介绍的微加工工艺后的实物图, 该 4 寸 SOI 晶圆上共布置了 6 个该 MEMS 三维电场传感器。本章 4.2.2 节介绍的微加工工艺关注的重点在于 SOI 与 PSPI 的兼容, 即 (1) 能否顺利将 PSPI 在 SOI 表面图形化, (2) 能否保证在微加工过程中 PSPI 构成的微铰链结构不受到破坏和 (3)

能否保证 PSPI 的引入不会对其后续工艺步骤造成影响。为此，分别在工艺步骤(d)和(h)完成后，在显微镜下观察了 SOI 晶圆，且拍摄了相关的照片。图 4.8 为工艺步骤(d)完成后从结构体硅表面观察的 PSPI，其中墨绿色的 SOI 的氧化层，深棕色的为 FB5410 的 PSPI，淡黄色的为结构体硅和衬底硅。由图可知，在旋涂 PSPI 前，其周围的氧化层已经去除干净，且 PSPI 图形化后的结构边缘清晰，得到了理想的微铰链的形状。因此，PSPI 能够在 SOI 表面图形化。

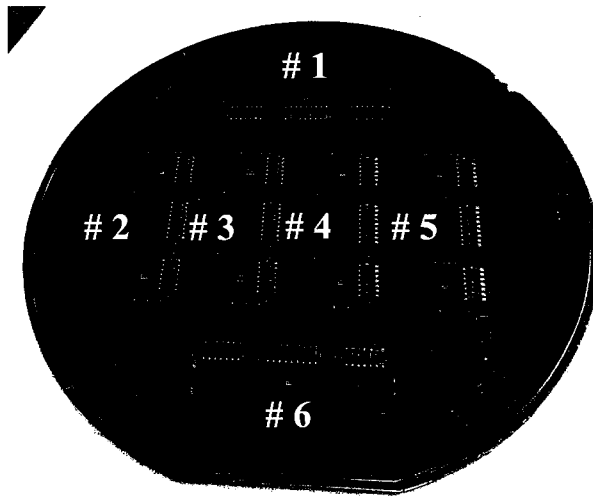


图 4.7 SOI 晶圆完成工艺后的实物图

Figure 4.7 Pictures of SOI wafer after fabrication.

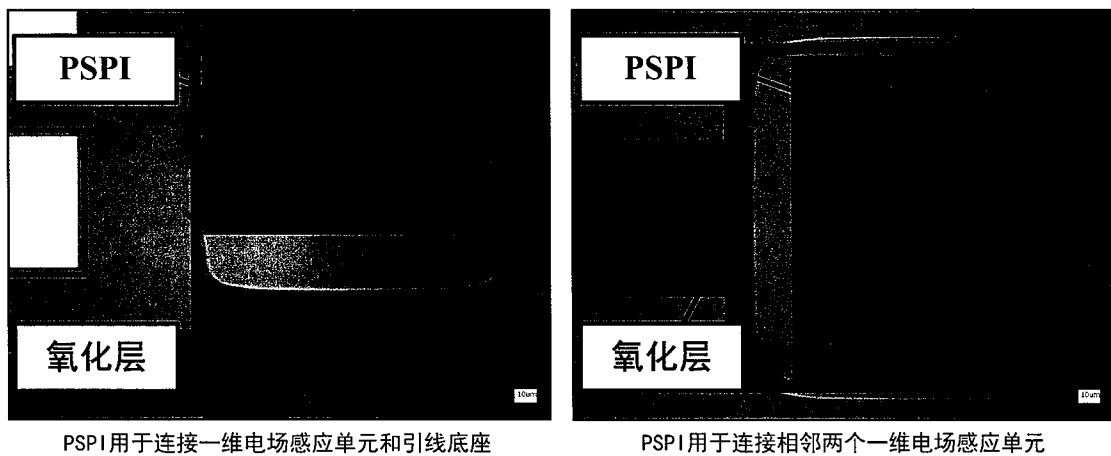


图 4.8 SOI 晶圆完成工艺步骤(d)后的光学显微镜图

Figure 4.8 Pictures of SOI wafer after fabrication step (d) taken by microscope.

图 4.9 为工艺步骤(h)完成后从衬底硅表面观察的 PSPI 和结构体硅形状，其中深棕色的为 FB5410 的 PSPI，淡黄色的为结构体硅和衬底硅。由图可知，PSPI 结构完好且边缘清晰，说明工艺步骤(e)~(f)没有对 PSPI 的微铰链结构造成破坏；

加工于结构体硅的敏感结构清晰，且表面没有墨绿色（即氧化层已经去除干净），说明 PSPI 的引入没有对其后续工艺步骤造成影响。

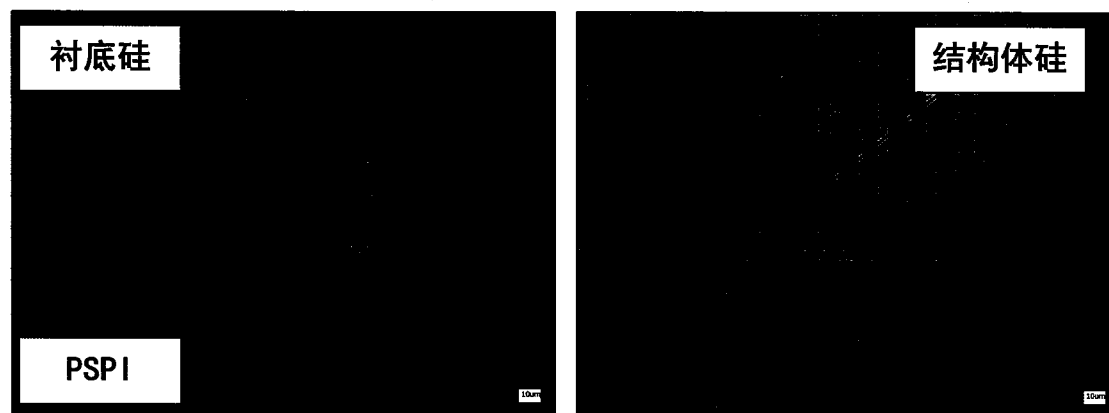


图 4.9 SOI 晶圆完成工艺步骤(h)后的光学显微镜图

Figure 4.9 Pictures of SOI wafer after fabrication step (h) taken by microscope.



图 4.10 微组装式 MEMS 三维电场传感器实物图

Figure 4.10 Picture of microassembled 3D EFS.

完成微加工工艺后，需要对 SOI 晶圆进行划片从而分离提取出 MEMS 三维电场传感器芯片。由本文 2.7.3 节可知，隐形激光划片技术凭借其非接触式、无需配合水流和无污染产生等，本应该最适用于对本晶圆的划片。然而，目前常用的隐形激光划片设备不能程控设置划片长度，即不能设置理想的划片路径，因此不适用于本章的 SOI 晶圆的划片。相对于砂轮划片，传统激光划片尽管会产生大量的粉尘，但是无需用到水流，并且可以通过设计屏蔽结构的方式保护芯片结构免受粉尘的干扰。因此，本章采用传统激光划片配合屏蔽结构的方法对 SOI 晶圆划片，其屏蔽结构的加工设计方法采用 PCB 电路屏蔽罩的加工设计方法。

图 4.10 为 SOI 晶圆完成划片后提取出的一个 MEMS 三维电场传感器芯片的实物图。基于 PSPI 的微铰链将三个一维电场敏感单元和三个引线底座连接构成了可弯折结构。

4.3 微组装式低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器组装工艺研究

本章 4.1 节简要介绍了该 MEMS 三维电场传感器的微组装工艺流程, 即 (1) 同时弯折连接三个一维电场敏感单元的微铰链; (2) 使锁槽和锁片相扣实现互锁; (3) 在三个一维电场敏感单元的相互连接处涂上粘结剂。然而, 鉴于 MEMS 三维电场传感器芯片结构较小, 如采用纯手工组装的方法, 稍有不慎就会破坏微铰链结构和每个一维电场敏感单元上的谐振结构。因此, 针对本章研制的 MEMS 三维电场传感器, 本节提出了一套用于微组装的机械装置, 用于避免组装过程中对传感器芯片结构造成的破坏, 其机械装置的结构示意图如图 4.11 所示。

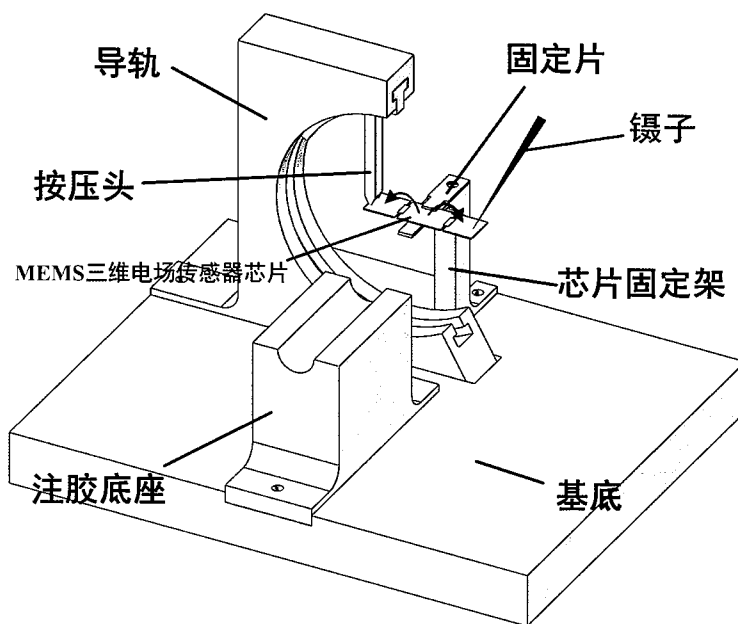


图 4.11 微组装机械装置结构示意图

Figure 4.11 Schematic view of mechanical device for microassembly of 3D EFS.

该机械装置主要分成基座、芯片固定部件（芯片固定架和固定片）、芯片弯折部件（导轨和按压头）和注胶底座（为针筒注射器施加粘结剂时提供支撑）。上述的部件均经过准确设计, 目的是在确保完成微组装工艺的前提下不破坏该 MEMS 三维电场传感器芯片。按照微组装工艺流程, 操作流程如下:

- 1) 将 MEMS 三维电场传感器芯片放置于芯片固定架上, 尽量使两者中的中

心线重合，采用固定片将 MEMS 三维电场传感器芯片的位置固定。

- 2) 不断调整按压头的位置使其沿着导轨做逆时针方向的运动，按压头在运动过程中逐渐触碰到该 MEMS 三维电场传感器芯片中左侧的一维电场敏感元，并使该一维电场敏感单元绕着微铰链旋转，最终使该一维电场敏感单元旋转 135° 左右。
- 3) 以镊子为工具，采用的手工方式将右侧的一维电场敏感单元绕着微铰链旋转 135° 左右，不断调整两个一维电场敏感单元的位置，使锁槽和锁片相交，最终实现互锁，如图 4.12(a)所示。
- 4) 撤去按压头，将填有粘结剂的针筒放置在注胶底座上，分别往三个一维电场敏感单元的相互连接处涂上粘结剂，如图 4.12(b)所示。其中，每施加完一次粘结剂，都需要让该 MEMS 三维电场传感器在室温下静置至少 12h。

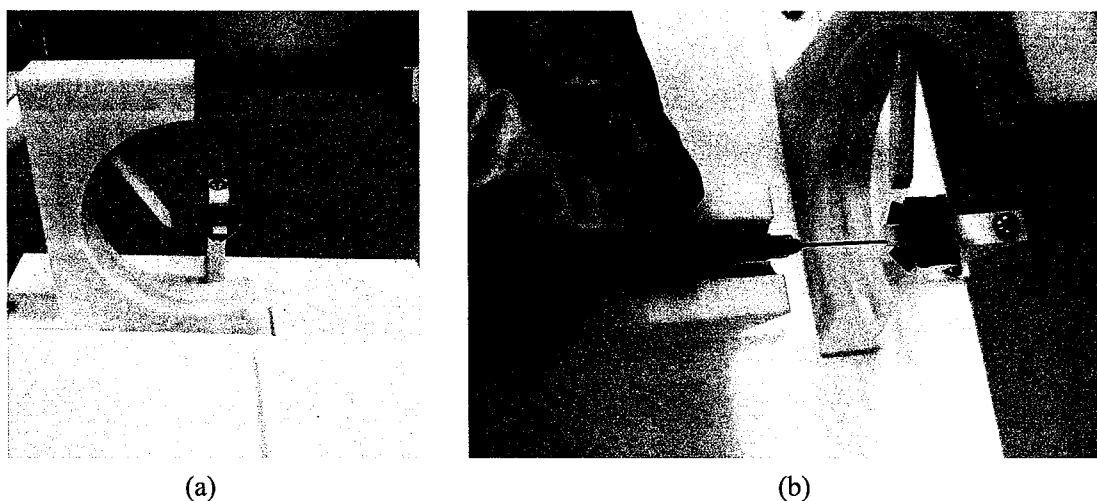


图 4.12 (a)微组装步骤 2)的现场图；(b)微组装步骤 3)的现场图

Figure 4.12 (a) Picture of step 2) of microassembly process; (b) Picture of step 3) of microassembly process.

图4.13为完成微组装后固定在转接电路板上的微组装式MEMS三维电场传感器实物图，其已完成了金丝压焊工艺，通过金丝线与转接电路板电气连接。转接电路板的三边等间距地分布着沉积了金的焊盘，该焊盘与微组装式MEMS三维电场传感器的焊盘一一对应。完成微组装后的MEMS三维电场传感器呈三棱柱状，高度为9mm，其基面为等腰直角三角形，三边的边长分别为9mm、9mm和12.7mm。此外，转接电路板的直径为22mm。

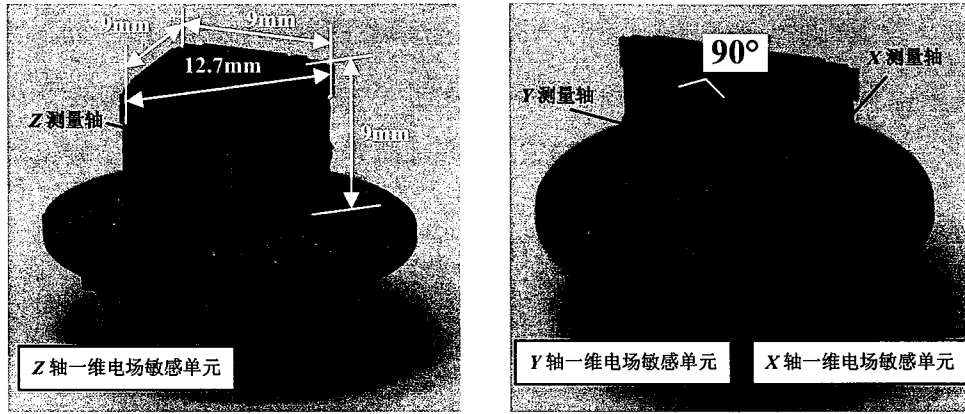


图 4.13 微组装式 MEMS 三维电场传感器实物图

Figure 4.13 Picture of microassembled 3D EFS.

4.4 本章小结

为了在减小轴间耦合干扰的同时进一步减小传感器的体积,本章提出并研制了一种微组装式低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器。

本章介绍了该 MEMS 三维电场传感器的结构和实现低轴间耦合的三维电场测量的方法。该芯片呈等腰直角三棱柱状,三个侧面分别为三个低轴间耦合的一维电场敏感单元,分别用于测量 X 、 Y 和 Z 三个正交方向的电场分量;每个一维电场敏感单元也采用了与本文第二章中所述的低耦合干扰的一维电场敏感芯片一致的镜面对称设计和结构参数,因此在差分电路的配合下该一维电场敏感单元也仅对垂直于其对称面方向的电场分量敏感。基于微铰链将上述三个一维电场敏感单元和与他们对应的引线底座连接构成一个整体结构;互锁机构用于固定三个一维电场敏感单元的相互位置,使其成为等腰直角三棱柱状,从而使三个测量轴相处正交。

本章成功制备了该 MEMS 三维电场传感器,将 PSPI 作为微铰链结构的材料兼容进了传统 SOI 工艺中制备了该 MEMS 三维电场传感器芯片;设计了微组装的流程和相应的微组装机机械装置,从而实现了该 MEMS 三维电场传感器的最终结构。本章详细介绍了该芯片微加工工艺流程、版图设计和微组装工艺,以及制备过程中遇到的问题和解决方案。

第 5 章 微组装式 MEMS 三维电场传感器测试标定系统研究

本章对微组装式低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器进行了测试和标定。为了降低该 MEMS 三维传感器标定过程中引入的误差,本章研制了一种集成化小型测试系统,并设计了一款低干扰的三维电场传感器标定夹具。基于本文第三章中提出的标定电场误差分析模型和计算方法,本章计算了标定夹具对电场空间造成的误差。最后,本章在常温常压下对该 MEMS 三维电场传感器进行性能测试,并对结果展开分析和讨论。

5.1 集成化小型测试系统研究

根据本文 1.2.3 节的介绍,在三维电场传感器标定中,三维电场传感器需要被安装在带有旋转轴的夹具上,且放置在两块平型金属板电极形成的电场空间的中心处。如果该传感器采用有线信号传输和外部电源供电,信号线和电源线均不可避免地放置于电场空间内,从而会干扰标定电场。本文第三章提出了一种组件式 MEMS 三维电场传感器,其导线均包裹接地的屏蔽层,且其设计了特定的标定结构保证了导线始终位于该标定电场零电势附近,然而受限于标定结构的加工精度和标定过程中标定结构位移的移动,导线或多或少会有偏离零电势的位移从而会影响到标定电场的准确度。因此,为了避免标定过程中信号传输线和电源线对标定电场的干扰,针对第四章中提出并研制的微组装式 MEMS 三维电场传感器,本章提出了一种采用无线传输和电池供电的集成化小型测试系统,即将第三章中分立的测试系统集成成为一个小型测量探头,省去了信号传输线和电源线。

由本文第四章可得,微组装式 MEMS 三维电场传感器具有三个独立工作的一维电场敏感单元,分别对应了相互独立的驱动信号和相互独立的检测信号。因此,该集成化小型测试系统的主要功能在于:

- 分别对三个一维电场敏感单元的输出信号进行 I/V 转化、差分放大和带通滤波等。
- 分别为三个一维电场敏感单元提供驱动信号。每个一维电场敏感单元均需要 2 路驱动信号,该驱动信号包括直流偏置电压和交流电压。其中,

两者的直流偏置电压大小相等，交流电压的幅值和频率均相等但有 180° 的相位差。此外，上述的交流电压的幅值和频率均可控。

- 对带通滤波输出的 3 路电压信号和三个一维电场敏感单元中驱动信号的交流电压，共 6 路信号做 A/D 转换。
- 以软件的形式对 A/D 转换后的 3 路测量信号做相敏检波和低通滤波。
- 以无线方式与基站节点通讯，基站节点连接了 PC。基于 PC 的上位机软件，实时显示三个一维电场敏感单元测量的电场强度；重新设置三个一维电场敏感单元的工作频率；在给定的频率范围和频率步长，对一维电场敏感单元进行扫频，确定其谐振频率。

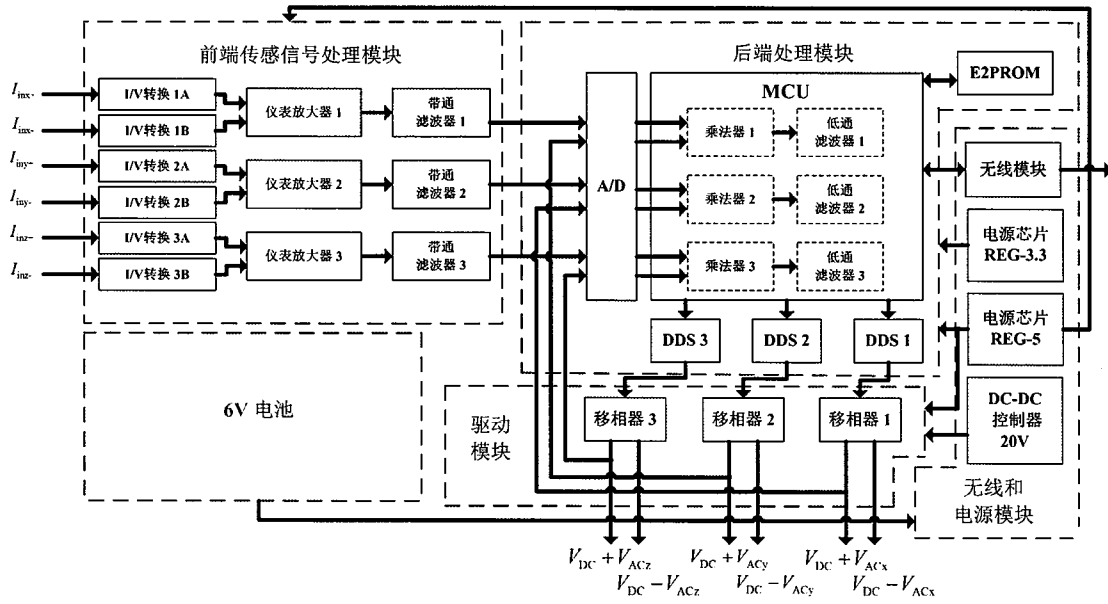


图 5.1 集成化小型测试系统模块图

Figure 5.1 Schematic view of minituized integrated testing system.

图 5.1 为该集成化小型测试系统的模块图，包括前端传感信号处理模块、驱动模块、后端处理模块、无线和电源模块、以及 6V 电池。其中，前端传感信号处理模块集成了 I/V 转换电路、仪表放大器和带通滤波器；驱动模块包含了 3 路移相电路；后端处理模块包含了 MCU、A/D 转换芯片、三个 DDS 和 EEPROM 存储芯片；无线和电源模块包含了 1 个无线模块和电源转换芯片。上述的电路设计和芯片型号均与本文第三章中介绍的测试系统一致。图 5.1 中 V_{DC} 为直流偏置电压， V_{ACq} 为用于驱动 q 轴一维电场敏感单元的交流电压， I_{inq+} 和 I_{inq-} 分别为 q 轴一维电场敏感单元的两路电流输出， q 为 x 、 y 和 z 。图 5.2 为该集成化小型系

统的实物图, 由 6 块多层的 PCB 板组成, 构成一个圆柱形, 且最终封装在一个高度为 62.5mm, 直径为 39mm 的圆柱形铝壳中。将该 MEMS 三维电场传感器安装在该集成化小型测试系统上后构成了一个三维电场测量探头。

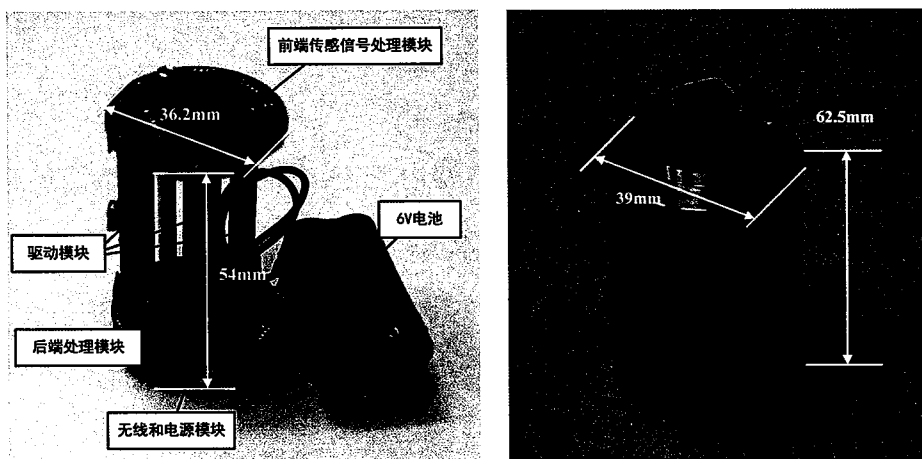


图 5.2 集成化小型测试系统实物图

Figure 5.2 Pictures of minituized integrated testing system.

在设计该集成化小型测试系统的 PCB 时还需要注意以下几点, 其目的均在于减小系统内的耦合噪声干扰:

- 每个一维电场敏感单元输出端与 I/V 转换电路要尽量靠近, 以及 I/V 转换电路的输出端与差分电路也要尽量靠近, 用于减小电流信号和电压信号传输过程中受到的噪声干扰。
- 每个一维电场敏感单元对应的 I/V 转换电路、仪表放大器和带通滤波器均有各自的接地的屏蔽罩保护起来, 避免空间中噪声的干扰。
- 每个一维电场敏感单元的驱动信号应尽量线远离前置放大电路, 驱动信号线周围和前置放大电路周围都要覆铜, 且分别接驱动地信号和感应地信号; 在驱动信号线周围的覆铜上布置过孔, 用于其对感应信号的干扰。
- DDS 应尽量靠近与其连接的移相电路。
- 将该系统的地信号分为模拟地信号、数字地信号、三个 DDS 芯片的各自的地信号、3 路移相电路的各自的地信号、以及 3 路带通滤波器的各自的地信号, 共 11 路地信号。他们之间只通过 0Ω 电阻电气连接, 用于尽量减小各个芯片或是电路之间的耦合噪声干扰。
- 电源模块采用低误差的低压差线性稳压器芯片, 用于减小电源噪声干扰, 或是供电电压不稳对感应信号的干扰。

此外，该集成化小型测试系统的软件采用设计与本文 3.3.2 节一致，本节不做赘述。

5.2 标定系统研究

5.2.1 标定夹具设计

相较于本文第三章中介绍的组件式 MEMS 三维电场传感器需要在设计标定夹具时考虑导线的处理，微组装式 MEMS 三维电场传感器的测试系统采用无线传输和电池供电，省去了导线，因此简化了标定夹具的设计。本节设计的标定夹具的功能在于：（1）支撑起该 MEMS 三维电场传感器，使其固定于标定电场空间的中心处；（2）提供转动自由度；（3）在标定过程中保证三维电场传感器的中心位置不变。

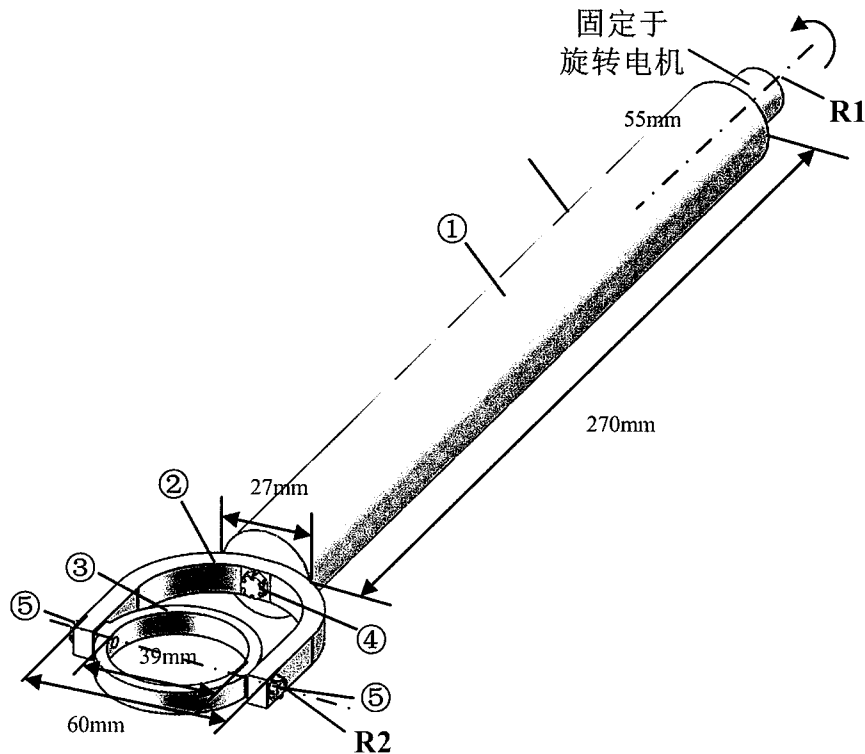


图 5.3 标定夹具结构示意图

Figure 5.3 Schematic view of fixture used for calibration.

设计的标定夹具结构如图 5.3 所示，由聚四氟乙烯（PTFE）加工而成，由 5 类零件组装成杆状。其中，三维电场测量探头安装在夹具③上，夹具②为该三维电场测量探头提供了转轴 R2，螺钉④用于将夹具②固定于标定杆①上，螺钉⑤

用于将夹具③固定于夹具②上。该标定夹具有两个相互垂直的旋转轴 R1 和 R2。其中, R1 为标定杆①的中心线, 需要外接至固定装置; R2 为夹具③的直径。绕 R2 轴的旋转只能手动控制, 但若 R1 与电机连接, 则绕 R1 轴的旋转可由电机控制。在保证标定夹具结构强度的前提下尽量减小标定夹具的尺寸, 本章将标定杆的外径设为 27mm。

5.2.2 标定系统构建

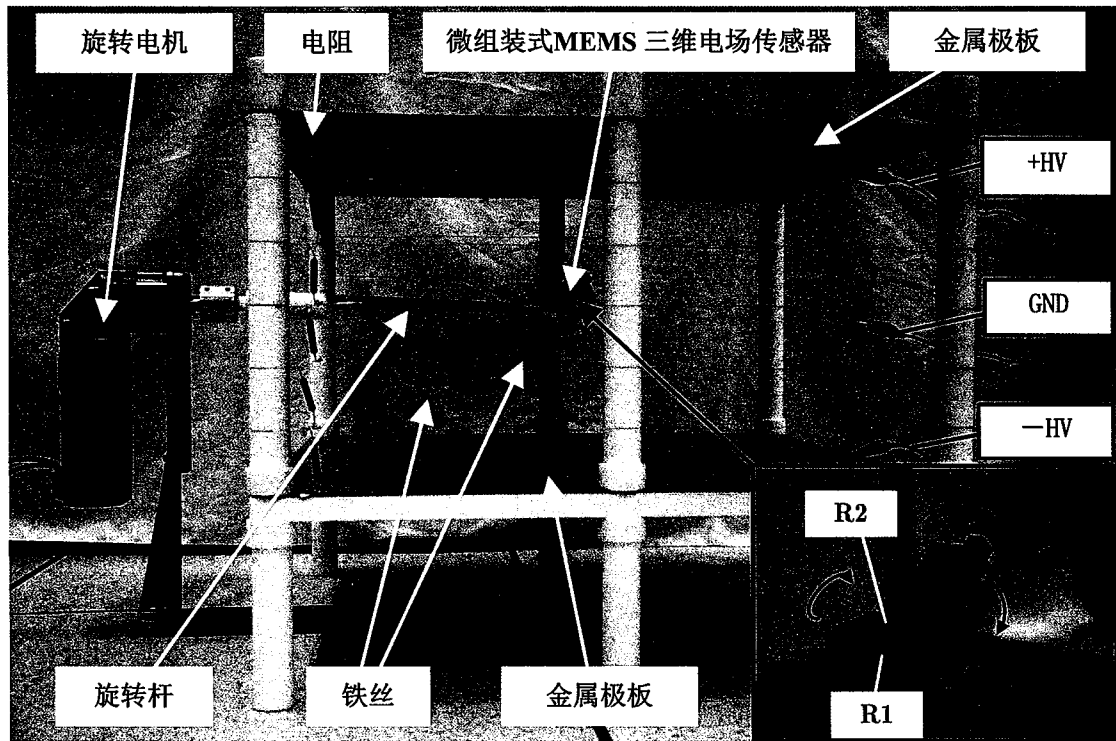


图 5.4 MEMS 三维电场传感器的测试标定装置

Figure 5.4 Calibration system of 3D EFS.

标定系统如图 5.4 所示, 该系统与本文 3.4.3 节中介绍的标定系统类似。除了标定夹具之外, 该标定系统还包括电场标定箱。电场标定箱由 2 块平行金属电极板、铁丝、直流高压电源和旋转电机组成。该系统的特点在于:

- 通过在两块相互平行的金属电极板上施加相反的直流电压, 从而在极板之间形成了均匀电场空间, 该空间为 60cm×60cm×30cm 的长方体。
- 两个平行金属电极板之间等间距地布置着若干圈铁丝, 铁丝围成的形状与金属极板的形状一致, 间距为 5cm, 共 5 圈; 相邻两圈铁丝间或是金属电极板与其相邻的铁丝间均由阻值为 1MΩ 的高压电阻连接, 这些电

阻用作分压电阻。铁丝和高压电阻均用于减小平行金属电极板之间的边缘效应。

- 该三维电场传感器固定于本章 3.4.2 节介绍的标定夹具上，置于均匀电场空间的中心处。该标定夹具的另一端固定于旋转电机，且该标定夹具平行于金属电极板放置。在旋转电机的控制下，该 MEMS 三维电场传感器绕着 R1 轴旋转，而 MEMS 三维电场传感器绕着 R2 轴旋转需要手动控制。R1 和 R2 的交点与该三维传感器的中心重合，因此保证传感器了在旋转时其中心的位置不变。标定过程中，施加电场方向不变，通过旋转传感器实现传感器与电场矢量的夹角变化。
- 该三维电场测量探头通过无线的方式与 PC 上位机通信。在系统工作中，PC 上位机软件接收、处理和显示 MEMS 三维电场传感器的输出信号，或是下发设定好的一维电场敏感单元工作频率，或是对一维电场敏感单元进行扫频。

5.2.3 误差分析

与本文 3.4.4 节类似，本节针对本章 5.2.1 节中设计的标定夹具，研究了其引起的标定电场的误差。在计算误差时无需考虑三维电场测量探头的存在，仅需考虑标定夹具的存在即可；需要提取该 MEMS 三维电场传感器在标定过程所处空间位置的电场强度。本节以有限元分析的方法从理论上分析标定夹具对标定电场造成的相对误差 δ ，所以忽略了平行金属电极板表面平整度、平行金属电极板的平行度公差、高压电阻精度、以及产生静电场的标准高压电源的相对系统误差等所起的实际测量中的误差。由 3.4.4 节可知，该相对误差 δ 可表示为

$$\delta = \left(\left| \frac{\Delta E_x}{E_{\text{ext}}} \right| + \left| \frac{\Delta E_y}{E_{\text{ext}}} \right| + \left| \frac{\Delta E_z}{E_{\text{ext}}} \right| \right) \times 100\% ,$$

其中， ΔE_x 、 ΔE_y 和 ΔE_z 分别为 E_x 、 E_y 和 E_z 三个电场分量的误差， E_{ext} 为施加的外电场的强度。

根据本章 5.2.1 节中研制的标定夹具和 5.2.2 节中研制的电场标定系统建立了等尺寸的分析模型，如图 5.5 所示。不同于本文 3.4.3 节中的标定夹具，本节的标定夹具在绕着 R1 和 R2 旋转不同角度的过程中标定夹具本身的形状不一，对标定电场造成的误差也不一，因此本节需要针对不同转角下的标定夹具分析相对

误差 δ 。图 5.5 中针对标定夹具建立了三维局部坐标系 $X'Y'Z'$ ，根据实际标定过程中 MEMS 三维电场传感器与标定零件③的相对位置，该 MEMS 三维电场传感器置于 $X'Y'Z'$ 坐标系中的 $(0,0,0.06)$ 位置处，即该 MEMS 三维电场传感器距离 $X'Y'Z'$ 坐标系原点位置为 60mm，且在旋转过程中两者相对位置保持不变。在初始状态时三维局部坐标系 $X'Y'Z'$ 与全局坐标系 XYZ 重合，然后将标定零件③绕着 R2 轴旋转角度 θ ，再将标定杆①绕着 R1 轴旋转角度 φ ，因此 θ 和 φ 不同组合对应着标定夹具不同的形状。为了尽量减小标定的误差，在满足标定过程能够提供足够的传感器输入输出关系的前提下，MEMS 三维电场传感器要尽量远离标定杆，因此 θ 取 $0^\circ \sim 90^\circ$ ；其考虑到标定结构的对称性， φ 取 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。

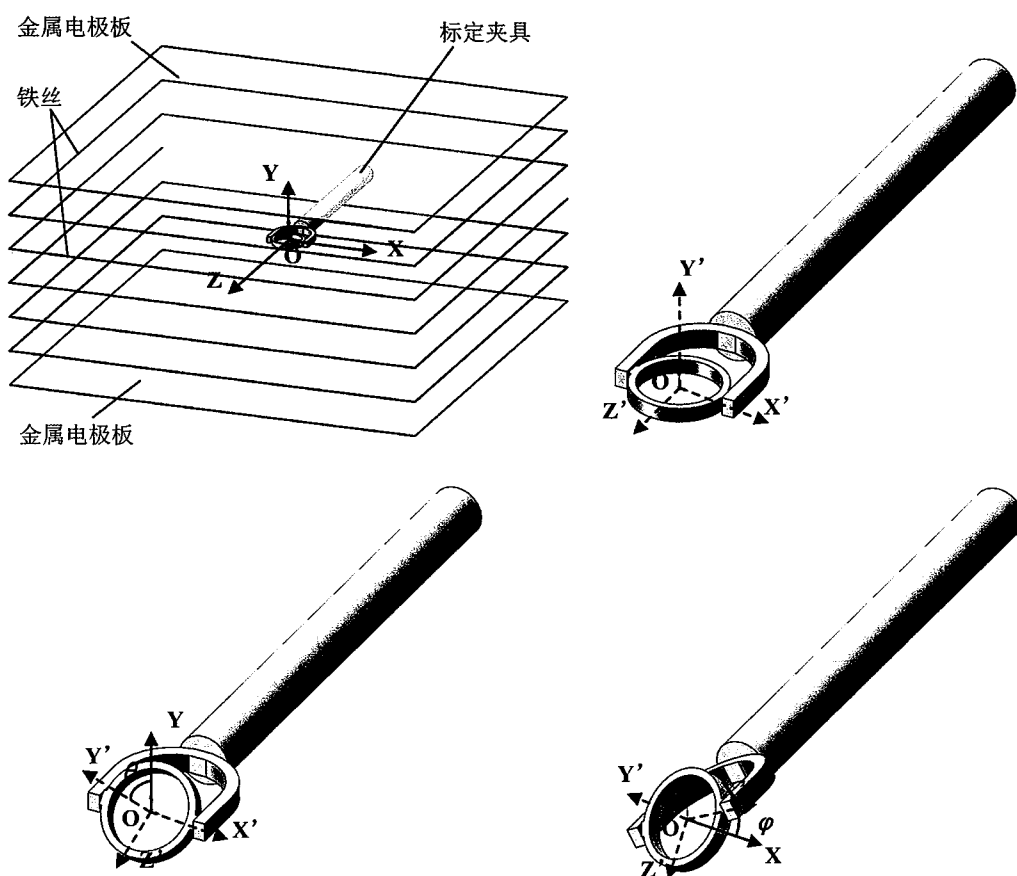


图 5.5 标定电场误差分析的仿真模型

Figure 5.5 Simulation model for deviation analysis of electric field for calibration.

本文采用了 ANSYS 有限元分析软件进行仿真分析。完成材料属性赋值和网格划分后，在图 5.5 中的上下两个平行金属电极板上分别施加相反的电势，且在两者之间的铁丝以等差数列的形式施加电势，用于形成 1kV/m 的电场。然后，计算出 MEMS 三维电场传感器所处的空间坐标，从而该点处的 ΔE_x 、 ΔE_y 和 ΔE_z ，

最终计算出相对误差 δ 。不同的 θ 和 φ 组合对应不同的仿真模型,本节采用 ANSYS 批处理功能,计算不同 θ 和 φ 情况下的相对误差 δ 。其中, θ 和 φ 的取值范围均为 $0^\circ \sim 90^\circ$,步长均为 15° 。结果如图 5.6 所示,在 θ 为 0° 、 φ 为 15° 时相对误差 δ 最大为 1.12%。因此,该标定夹具对标定电场造成的干扰 $\leq 1.12\%$,也小于本文 3.4.4 节中组件式 MEMS 三维电场传感器的标定夹具造成的误差,原因之一在于微组装式 MEMS 三维电场传感器标定过程采用无线传输和电池供电,避免了传输导线对标定电场的干扰。

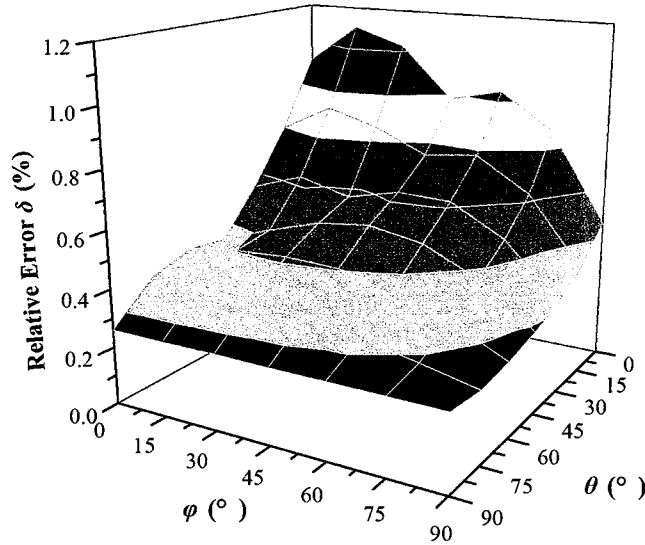


图 5.6 不同 θ 和 φ 情况下的相对误差 δ

Figure 5.6 Relative deviation δ versus θ and φ .

5.3 微组装式低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器的标定与测试

基于本章所研发的测试和标定系统,本节对微组装式 MEMS 三维电场传感器进行了标定与测试,包括扫频测试了其三个一维电场敏感单元的谐振频率、测试了每个一维电场敏感单元对平行于该传感器 X 轴、 Y 轴和 Z 轴三个方向电场的灵敏度和线性度、以及测试了其三维电场测量的误差。

5.3.1 传感器标定

通过扫频,微组装式 MEMS 三维电场传感器上 X 轴、 Y 轴和 Z 轴一维电场敏感单元的谐振频率分别为 2270Hz、2245Hz 和 2210Hz。

首先对该 MEMS 三维电场传感器的 X 、 Y 和 Z 三个测量轴进行单轴标定。其中,传感器标定和测试的环境为室温且标准大气压。旋转三维电场传感器使匀

强电场分别平行于该传感器的 X 轴、 Y 轴和 Z 轴三个方向，每次施加 0~120kV/m 的电场，且同时记录三个一维电场敏感单元的输出。通过线性拟合得到了每个一维电场敏感单元对平行于该传感器 X 轴、 Y 轴和 Z 轴三个方向电场的灵敏度。

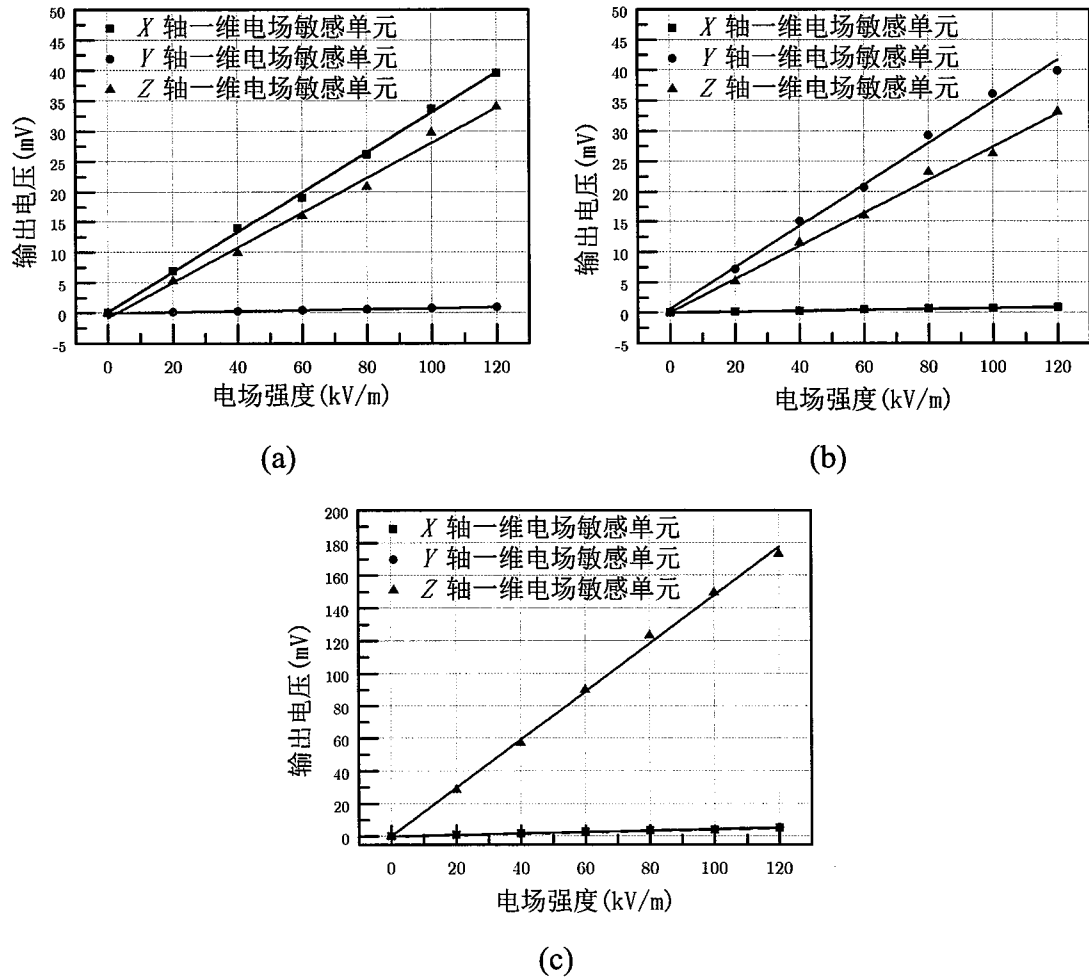


图 5.7 MEMS 三维电场传感器的标定曲线，(a) X 轴方向电场标定；(b) Y 轴方向电场标定；
(c) Z 轴方向电场标定

Figure 5.7 Uniaxial electric field calibration for the 3D EFS. (a) The electric field is applied along X -axis; (b) electric field is applied along Y -axis; (c) electric field is applied along Z -axis.

表 5.1 X 轴、 Y 轴和 Z 轴一维电场敏感单元的灵敏度

Table 5.1 Sensitivities of the X -, Y - and Z -axis 1D electric field sensing elements

电场方向	X 轴一维电场敏感单元 的灵敏度 (mV·m/kV)	Y 轴一维电场敏感单元 的灵敏度 (mV·m/kV)	Z 轴一维电场敏感单元 的灵敏度 (mV·m/kV)
沿 X 轴	0.330	0.008	0.289
沿 Y 轴	0.007	0.342	0.273
沿 Z 轴	0.043	0.044	1.479

测试结果如图 5.7 和表 5.1 所示, 该 MEMS 三维电场传感器的轴间耦合灵敏度 $\leq 19.54\%$ 。对比表 1.1 可得, 相较于先前报道的单芯片式 MEMS 三维电场传感器, 微组装式 MEMS 三维电场传感器的轴间耦合灵敏度减小至 34.51%。这是因为该 MEMS 三维电场传感器的 Z 轴一维电场敏感单元也采用了镜面对称设计, 在差分处理的配合下 Z 轴一维电场敏感单元抑制了部分耦合干扰。但是, 相较于第三章中研制的组件式低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器, 其轴间耦合灵敏度仍较大, 残余的轴间耦合灵敏度主要来自于 Z 轴一维电场敏感单元。这是因为受到集成化小型测试系统、传感器自身的引线和引线底座的影响, 在沿着 X 轴或 Y 轴方向的电场作用下, Z 轴一维电场敏感单元的两个感应电极阵列上的电通量并不一致, 因此两个感应电极阵列的感应电流输出也不一致, 差分处理后仍存在耦合干扰。此外, 由图 5.7 和表 5.1 可知, 微组装式 MEMS 三维电场传感器的 X 轴、Y 轴和 Z 轴一维电场敏感单元的线性度误差 $\leq 4.3\%$, 这说明该 MEMS 三维电场传感器具有良好的线性度。

因此, 由式 (1.1) 可得, 该三维电场可表示为

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.330 & 0.007 & 0.043 \\ 0.008 & 0.342 & 0.044 \\ 0.289 & 0.273 & 1.479 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_x - V_{x0} \\ V_y - V_{y0} \\ V_z - V_{z0} \end{bmatrix}。$$

本文中, 该解耦标定矩阵计算为

$$S = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} 3.110 & 0.009 & -0.091 \\ 0.006 & 2.995 & -0.089 \\ -0.609 & -0.555 & 0.710 \end{bmatrix}。 \quad \dots (5.1)$$

5.3.2 三维电场测量

在本章研制的测试标定装置内旋转该 MEMS 三电场传感器至任意角度, 对比该 MEMS 三维电场传感器测量到的电场与实际施加的电场, 用于验证该传感器的三维电场测量的准确性。旋转传感器至几组不同的角度, 分别施加 50kV/m 和 100kV/m 的电场, 记录三个一维电场敏感单元的输出值。通过式 (5.1) 计算合成电场, 并与施加电场进行对比, 结果如表 5.2 所示。

对比表 5.2 中的施加电场与合成电场可知, 其三维电场测量误差 $\leq 9.33\%$, 与第三章中研制的组件式低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器的三维电场测量误差大致相当 (三维电场测量误差 $\leq 7.13\%$)。误差的主要来源是系统误差, 包含平

行金属电极板尺寸误差、平行度误差、标定夹具对标定测试装置中电场的干扰等，一维电场敏感单元表面温度、湿度和静电荷积累等因素也会造成测量存在误差。

表 5.2 微组装式 MEMS 三维电场传感器在空间作不同角旋转的输出与计算电场强度

Table 5.2 Outputs of microassembled 3D EFS and calculated strength of electric fields when electric fields are applied with different directions.

旋转 角度	施加电场 (kV/m)	X轴一维电场敏 感单元的输出 (mV)	Y轴一维电场敏 感单元的输出 (mV)	Z轴一维电场敏 感单元的输出 (mV)	合成电场 (kV/m)	误差
θ_1	50	6.00	16.59	28.29	50.45	0.90%
	100	12.03	33.22	57.31	101.01	1.01%
θ_2	50	-15.42	4.65	0.99	50.49	0.98%
	100	-30.80	9.32	2.46	100.96	0.96%
θ_3	50	4.23	-16.07	0.87	50.38	0.76%
	100	8.37	-32.26	-1.02	100.62	0.62%
θ_4	50	13.44	11.08	28.28	50.25	0.50%
	100	26.72	21.98	50.47	100.14	0.28%
θ_5	50	6.33	15.98	25.41	49.16	1.68%
	100	12.68	31.99	50.92	98.44	1.56%
θ_6	50	-13.58	-8.88	-8.59	49.45	1.10%
	100	-27.10	-17.80	-17.76	98.69	1.31%
θ_7	50	8.45	-13.60	18.78	51.39	2.78%
	100	16.87	-27.24	36.94	102.69	2.69%
θ_8	50	15.57	7.86	41.82	51.42	2.84%
	100	31.08	15.67	82.19	102.51	2.51%
θ_9	50	-6.59	13.77	43.13	52.09	4.18%
	100	-13.17	27.55	86.35	104.25	4.25%
θ_{10}	50	9.94	11.89	70.85	53.71	7.42%
	100	19.87	23.76	141.54	107.33	7.33%
θ_{11}	50	-7.24	3.84	61.39	54.11	8.22%
	100	-14.51	7.64	122.09	107.85	7.85%
θ_{12}	50	9.35	-1.04	75.77	54.42	8.84%
	100	18.67	-2.08	152.36	109.33	9.33%
θ_{13}	50	-2.18	-0.16	69.07	52.55	5.10%
	100	-4.36	-0.32	137.74	104.83	4.83%
θ_{14}	50	2.13	2.18	73.25	49.53	0.94%
	100	4.25	4.35	146.32	98.93	1.07%

5.4 本章小结

针对本文第四章中提出并制备的低轴间耦合的微组装式 MEMS 三维电场传感器,本章提出了一种集成化小型测试系统。该测试系统采用无线传输和电池供电,且将第三章中分立的测试系统集成成为一个小型测量探头,省去了信号传输线和电源线,避免了标定过程中信号传输线和电源线对标定电场的干扰。该测试系统最终被封装在一个高度为 62.5mm,直径为 39mm 的圆柱形铝壳中。

针对该 MEMS 三维电场传感器,本章研制了其标定系统,包括用于固定传感器和提供转角的标定夹具,以及用于提供空间电场的电场标定箱。本章通过本文第三章中提出的标定电场误差分析模型和计算方法计算了标定夹具对电场空间造成的误差,计算发现该标定夹具对电场空间造成的误差 $\leq 1.12\%$ 。

最后,本文对该 MEMS 三维电场传感器进行性能测试,并对结果展开分析和讨论。实验结果表明在 0~120kV/m 电场强度范围内,该 MEMS 三维电场传感器的轴间耦合灵敏度 $\leq 19.54\%$ 。相较于先前报道的单芯片式 MEMS 三维电场传感器,其轴间耦合灵敏度减小至 ~~34.58~~ %左右。这说明该 MEMS 三维电场传感器在保证体积小、高集成度和确保三个测量轴相互正交的同时,有效地减小轴间耦合干扰。 X 轴、 Y 轴和 Z 轴一维电场敏感单元的线性度误差均 $\leq 4.3\%$,这说明该 MEMS 三维电场传感器具有良好的线性度。测量结果表明,该 MEMS 三维电场传感器的三维电场测量误差 $\leq 9.33\%$ 。

第6章 总结与展望

为了研制微型化、高性能的三维电场传感器,本文基于 MEMS 技术,开展了低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器研究。

6.1 论文完成的主要工作

1、提出并研制了一种低耦合干扰的 MEMS 一维电场敏感芯片。该敏感芯片采用镜面对称结构设计,结合差分电路,可测量垂直于对称面方向的电场分量,并能够消除正交于测量轴方向电场分量的耦合干扰。本文介绍了该芯片的工作原理和基本结构;对该芯片的感应结构进行了优化,包括芯片的尺寸参数、电极的尺寸参数、以及电极的布置方式;分析了该芯片中谐振结构的工作模态和固有频率;介绍了该芯片的微加工工艺流程,以及制备过程中遇到的问题和解决方案。

2、研制了一种组件式低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器。该 MEMS 三维电场传感器由三个低耦合干扰的 MEMS 一维电场敏感芯片正交布置构成,形成了三个相互正交的测量轴。本文介绍了该 MEMS 三维电场传感器的基本结构,并且研制了相应的测试标定系统;提出了一种基于有限元方法的标定电场误差分析模型和计算方法,并计算证明了设计的标定夹具和导线对标定电场造成的干扰 $\leq 2.76\%$;在常温常压下对该 MEMS 三维电场传感器进行性能测试,并对结果展开分析讨论。实验结果表明在 $0\sim 120\text{kV/m}$ 电场强度范围内,组件式低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器的轴间耦合灵敏度 $\leq 3.48\%$,三个测量轴的线性度误差 $\leq 2.1\%$;三维电场测量误差 $\leq 7.13\%$ 。

3、在减小轴间耦合干扰的同时进一步减小传感器的体积,提出了一种微组装式低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器,并研究了其微加工工艺和微组装工艺。该 MEMS 三维电场传感器呈等腰直角三棱柱状,三个侧面分别为三个一维电场敏感单元,分别用于测量 X 、 Y 和 Z 三个正交方向的电场分量。每个一维电场敏感单元也采用镜面对称设计,因此仅对垂直于对称面方向的电场分量敏感。三个一维电场敏感单元通过微铰链连接构成一个整体结构,互锁机构固定了三者的相对位置保证了三个测量轴相互正交。作者将 PSPI 作为微铰链结构的

材料,成功实现了与 SOI 微加工工艺的兼容制备;设计并研制了微组装机机械装置,用于实现微组装式低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器的构建。制备出的 MEMS 三维电场传感器的体积仅为 364.5mm^3 。

4、针对微组装式低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器,研制一种集成化小型测试系统。该测试系统采用无线传输和电池供电,使该测试系统集成为一个被封装在一个高度为 62.5mm ,直径为 39mm 的圆柱形壳中的小型测量探头。本文研制了其标定系统,计算得到设计的标定夹具对标定电场造成的干扰 $\leq 1.12\%$;在常温常压下对该 MEMS 三维电场传感器进行性能测试,并对结果展开分析讨论。实验结果表明在 $0\sim 120\text{kV/m}$ 电场强度范围内,微组装式低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器的轴间耦合灵敏度 $\leq 19.54\%$,三个测量轴的线性度误差 $\leq 4.3\%$;三维电场测量误差 $\leq 9.33\%$ 。

6.2 主要创新点

本论文的创新点主要包括如下几个方面:

1. 提出并研制了一种低耦合干扰的 MEMS 一维电场敏感芯片。该敏感芯片采用镜面对称结构设计,结合差分电路,可测量垂直于对称面方向的电场分量,并能够消除正交于测量轴方向电场分量的耦合干扰。

2. 提出了一种微组装式低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器。该芯片呈等腰直角三棱柱状,三个侧面分别为三个镜面对称的一维电场敏感单元,分别用于测量 X 、 Y 和 Z 三个正交方向的电场分量。三个一维电场敏感单元通过微铰链连接构成一个等腰直角三棱柱状的整体结构;互锁机构固定了三个敏感芯片的相对位置,从而保证了三个测量轴相互正交。

3. 研制了一种面向微组装 MEMS 器件的微加工工艺和微组装方法。本文将 PSPI 作为微铰链结构的材料成功兼容进了传统 SOI 工艺中,制备了一体化且可弯折组装的 MEMS 器件。本文具体实验探究了该 MEMS 器件的划片方案和引线方案;研究了微组装的流程和相应的微组装机机械装置,从而实现了三维结构的 MEMS 器件。

4. 提出了一种基于有限元的标定电场误差分析模型和计算方法,用于指导标定结构设计和测试系统设计,以减少 MEMS 三维电场传感器标定时测试标定系统对标定电场造成的干扰。

6.3 未来工作展望

本文提出并研制了一种低耦合干扰的 MEMS 一维电场敏感芯片。在此基础上,本文研制出组件式和微组装式两种低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器。鉴于时间关系,本文还有一些设计和实验工作有待于完成。因此,本文基于当前完成的情况,对未来工作进行如下展望:

1. 设计低耦合干扰的 MEMS 一维电场敏感芯片的封装,包括结构设计和优化、材料选型、加工工艺、并对封装后的 MEMS 一维电场敏感芯片进行三维电场下的标定和测试。

- 2 设计微组装式低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器的封装,包括结构设计和优化、材料选型、加工工艺、并对封装后的微组装式低轴间耦合 MEMS 三维电场传感器进行三维电场下的标定和测试。