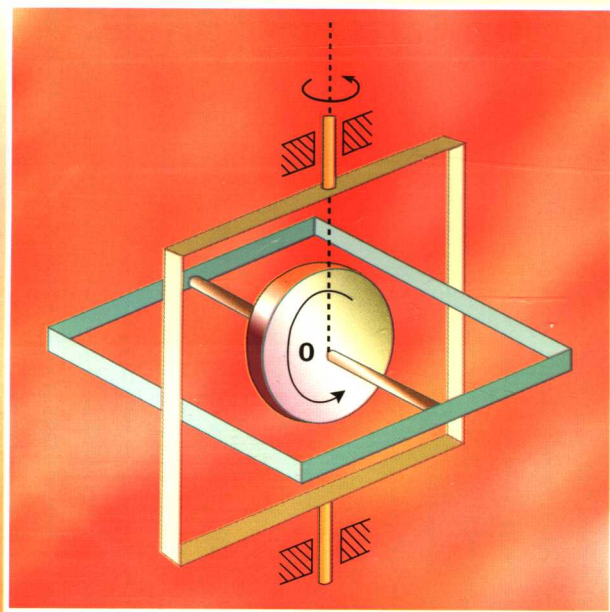


电容式微机械陀螺仪设计

李锦明 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

电容式微机械陀螺仪设计

李锦明 著

国防工业出版社

·北京·

前 言

微机械陀螺具有体积小、重量轻、功耗低、抗过载能力强等特点,可广泛应用于汽车牵引控制系统、行使稳定系统、摄像稳定系统、飞行体姿态控制系统、惯性鼠标等领域。目前,国内外许多院校、科研单位都在进行微机械陀螺仪的研究。

本书着重从电容式微机械陀螺的基本工作原理着手,介绍了陀螺仪的设计、加工,陀螺仪的高信噪比解调算法、电路设计,最后阐述陀螺仪的关键性能测试方法,内容较为全面、具体。

本书结合作者多年来在 MEMS 领域的工程实践和得益于韩国三星综合技术院的技术支持,在张文栋教授和技术院副院长 Sukhan Lee 教授共同指导下完成,同时也得到了韩国三星综合技术院同仁的帮助,在此一并表示感谢。

本书的初稿经过了祖静教授的细致审阅,他给出了许多宝贵的意见,在此表示感谢。本书参考或直接引用了国内外一些论文和著作,在此向这些论文和著作的作者表示谢意。

由于作者水平有限,对于有些领域不是很熟悉,因此,书中不妥之处在所难免,诚恳地希望各位专家和读者不吝指教和帮助。

作者

2006 年 5 月

目 录

第一章 绪论	1
1.1 微机械陀螺的技术分类	1
1.2 微机械陀螺的发展现状	2
1.2.1 压电石英陀螺	4
1.2.2 压电陶瓷陀螺	6
1.2.3 硅微机械陀螺	7
1.3 电容式微机械陀螺的信号处理方法概述	13
1.3.1 驱动电路	13
1.3.2 信号解调处理方法	15
1.4 电容式微机械陀螺中的技术难点	16
1.5 本书主要的研究内容	17
1.6 本书的组织和安排	18
第二章 电容式微机械陀螺的结构设计与加工	20
2.1 电容式微机械陀螺的结构设计	21
2.2 微机械陀螺振动模态研究	23
2.2.1 驱动模态频率的计算	24
2.2.2 检测模态频率的计算	27
2.3 电容式硅微机械陀螺的结构仿真	29
2.4 梳齿电容的计算	34
2.4.1 驱动模态的检测电容	34
2.4.2 检测模态的检测电容	37
2.5 检测模态的电调谐频率的计算	38
2.6 关键工艺的设计	41
2.6.1 微机械陀螺结构加工流程	41

2.6.2	微机械陀螺真空封装罩子的加工工艺	46
2.6.3	真空中硅玻璃键合工艺	47
	本章小结	50
第三章	电容式微机械陀螺信号处理方法的研究及仿真	51
3.1	电容式微机械陀螺闭环驱动的研究	54
3.1.1	上电闭环自振荡的基本原理	55
3.1.2	无自动增益控制的闭环驱动	57
3.1.3	自动增益控制的闭环驱动	59
3.2	电容式微机械陀螺关键信号的推导	67
3.2.1	静电驱动力	68
3.2.2	运动质量块的振动速度	70
3.2.3	哥氏力引起的位移	73
3.3	电容式微机械陀螺角速率信号解调算法的推导	75
3.3.1	信号解调的基本原理	76
3.3.2	干扰信号对信号解调的影响	79
3.3.3	高信噪比解调算法的研究	81
3.4	电容式微机械陀螺的系统仿真	86
3.4.1	闭环驱动过程的仿真	86
3.4.2	角速率解调过程的仿真	89
3.4.3	陀螺在冲击环境中的模拟与仿真	92
	本章小结	95
第四章	电容式微机械陀螺接口电路的设计与仿真	96
4.1	电容式微机械陀螺前置放大电路的设计	96
4.1.1	传统的 C/V 转换电路的设计与分析	96
4.1.2	改进的 C/V 转换电路的设计与分析	98
4.1.3	前置 C/V 转换电路的抗驱动信号干扰的设计	102
4.2	电容式微机械陀螺闭环驱动电路的设计	104
4.2.1	高通滤波电路的设计	105
4.2.2	相移电路的设计	106

4.2.3	限幅电路的设计	110
4.2.4	AGC 自动增益电路的设计	112
4.3	电容式微机械陀螺角速率解调电路的设计	117
4.3.1	相位敏感解调电路的设计	119
4.3.2	二阶低通滤波电路的设计	121
本章小结		123
第五章	电容式微机械陀螺的性能测试	124
5.1	电容式微机械陀螺品质因子的测试	124
5.1.1	品质因子测试的基本原理	124
5.1.2	静电激励—电容检测法	127
5.1.3	机械激励—电容检测法	130
5.1.4	静电激励—位移特性间接检测法	132
5.2	陀螺分辨率的测试	146
5.3	陀螺带宽的测试	148
5.4	AGC 静态工作点的选取	150
5.5	陀螺工作状态的测试	152
5.5.1	闭环驱动控制电路中工作状态的测试	153
5.5.2	信号解调电路中工作状态的测试	155
5.6	灵敏度和线性度的测试	156
5.7	带宽和灵敏度的优化	158
本章小结		160
附录一	电容式微机械陀螺的电原理图	162
附录二	电容式微机械陀螺的 SIMULINK 仿真的部分 代码	166
参考文献		176

第一章 绪 论

微机械陀螺是在 20 世纪 80 年代后期发展起来的一种新型陀螺,它具有体积小、重量轻、功耗低、抗过载能力强、能适用于较为恶劣的环境条件等优点。因此,微机械陀螺可广泛应用于汽车牵引控制系统、行驶稳定系统、摄像机稳定系统、飞机稳定系统、计算机的惯性鼠标以及军事等领域。目前,世界上许多研究单位、公司都在结合自己国内的加工手段及信号检测措施对微机械陀螺展开了研究。微机械陀螺有角速率积分陀螺和角速率陀螺两种,本书着重介绍的是角速率陀螺,若无特殊说明,本书所指的微机械陀螺均为角速率陀螺。

1.1 微机械陀螺的技术分类

微机械陀螺的种类很多,为了便于分析,通过查阅大量文献,将微机械陀螺按材料、振动结构、驱动方式、检测方式和工作模式进行了划分。

(1) 按材料可将微机械陀螺划分为硅陀螺(Silicon Gyroscope)和非硅陀螺。非硅陀螺主要为压电石英陀螺和压电陶瓷陀螺(压电陶瓷陀螺不采用微加工工艺,但其需要微光刻技术来保证陀螺的几何尺寸,其尺寸大小与微加工陀螺的尺寸大小相当)。压电石英陀螺(BEI QRS11)具有精度高的特点,它是当前微陀螺产品的主流,但由于这些陀螺的生产加工工艺复杂,成本高,如一只 QRS11 的价格就上万元人民币,且具有抗过载能力差(通常石英陀螺耐过载能力小于 200g)等缺点,很难满足低成本的民用市场的要求,

目前大多数国家都在从事硅陀螺的研究。

(2) 按振动方式可将微机械陀螺划分为角振动陀螺(Angle Vibration Gyroscope)和线振动陀螺(Line Vibration Gyroscope)。

角振动陀螺是围绕一个轴来回振动, 线振动陀螺是沿一条线来回振动。

(3) 按驱动方式可将微机械陀螺划分为静电驱动陀螺(Electrostatic Gyroscope)、电磁驱动陀螺(Electromagnetic Gyroscope)和压电驱动陀螺(Piezoelectric 陀螺)等。

静电驱动陀螺是采用在驱动电极上施加变化电压产生变化的静电力作为驱动力; 电磁驱动陀螺是在电场中给陀螺内部的质量块施加垂直于电场方向的变化电流产生的力作为驱动力; 压电驱动陀螺是在陀螺的驱动电极上施加变化的电压, 陀螺随之发生形变。

(4) 按检测方式可将微机械陀螺划分为电容式陀螺(Capacitive Gyroscope)、压阻式陀螺(Piezoresistive Gyroscope)、压电式陀螺(Piezoelectric Gyroscope)、光学陀螺(Optical Gyroscope)和隧道陀螺(Tunnelling Gyroscope)等。

电容式陀螺是在陀螺的检测电极上引起电容变化; 压阻式陀螺是在陀螺的检测端引起电阻变化; 压电式陀螺是在陀螺的检测电极上感应到电荷变化; 光学陀螺是通过光学的方法来检测陀螺的位移变化; 隧道陀螺是在陀螺的检测电极引起隧道电流的变化。

(5) 按加工方式可将微机械陀螺划分为体加工微机械陀螺、表面加工微机械陀螺、LIGA 陀螺等。

上述微机械陀螺的分类归纳如图 1.1 所示。

1.2 微机械陀螺的发展现状

根据图 1.1, 微机械陀螺按材料来分, 主要有硅材料陀螺、石英材料陀螺及陶瓷材料陀螺。石英材料和陶瓷材料均属于绝缘体, 但它们具有压电效应和逆压电效应, 即当材料受到电场的作用会

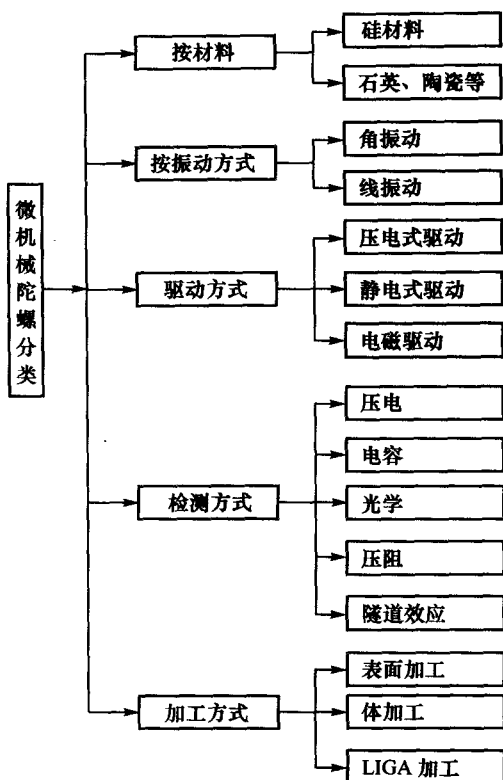


图 1.1 微机械陀螺的分类

发生形变或当材料发生形变后表面将溢出电荷，因此，用石英和陶瓷材料做的陀螺需要在材料的表面贴上驱动电极和检测电极，作用在驱动电极上的变化电压产生变换的电场使结构振荡起来，采用检测电极来拾取材料表面溢出的电荷，所以，它们的驱动方式为电压驱动，检测方式为电荷检测。硅材料属于半导体，通过掺杂工艺可以改变其导电特性，用硅材料加工的陀螺常采用电磁驱动和静电驱动方式，检测方式常采用电阻和电容检测方式。下面就石英陀螺、陶瓷陀螺及硅陀螺的发展现状做一介绍。

1.2.1 压电石英陀螺

结合石英材料的特点，日本 Panasonic 公司和美国 BEI 公司采用微加工刻蚀技术加工出了具有不同结构的石英陀螺。日本 Panasonic 公司采用如图 1.2 所示的结构，在该结构中包含有两个石英梁，每个梁由两个相互垂直的平面结构构成，在每个平面上均贴有电极，在靠近梁根部的两个平面上贴的电极作为陀螺驱动模态的驱动电极和检测电极，在远离梁根部的两个平面上贴的电极作为陀螺检测模态的检测电极。如图 1.3 所示是 Panasonic 公司石英陀螺的管芯结构。

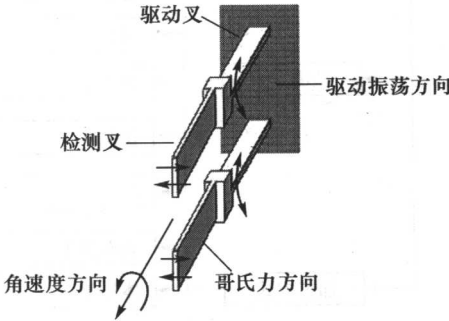


图 1.2 Panasonic 公司的石英陀螺结构

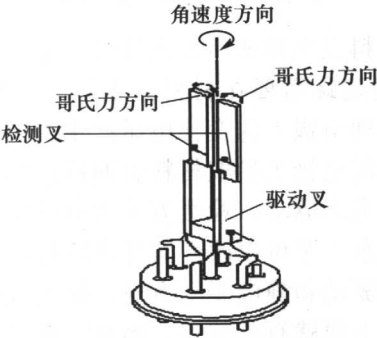


图 1.3 Panasonic 公司石英陀螺的管芯结构

美国 BEI 公司采用的是如图 1.4 所示的石英陀螺结构，该结构中包含有四根梁，上面的两根梁上贴有驱动模态的驱动电极和检测电极，下面的两根梁上贴有检测模态的检测电极，这种将驱动模态和检测模态分开的设计可大大降低驱动模态对检测模态的干扰。如图 1.5 所示是美国 BEI 公司的 LCG50 的石英陀螺。

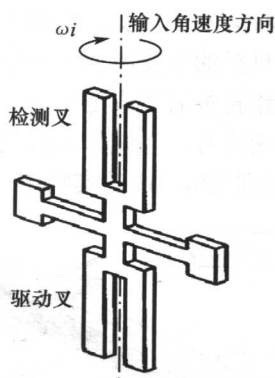


图 1.4 BEI 公司的石英陀螺结构

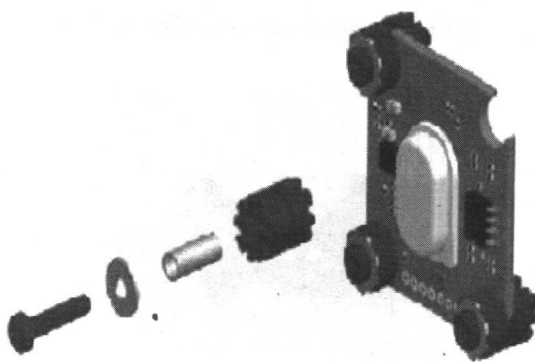


图 1.5 BEI 公司的石英陀螺(LCG50)

1.2.2 压电陶瓷陀螺

压电陶瓷陀螺的工作原理与石英陀螺的工作原理大致相同，但其加工成本比石英陀螺的低，目前已广泛应用于摄像机防抖控制及遥控玩具飞机的姿态解算中。图 1.6 所示是 Murata 公司 ENC-03 陀螺所采用的结构，在该结构的最下面贴有驱动电极，在结构的上表面对称地贴了两条检测电极，在驱动电极上施加电压后，压电陶瓷材料将会发生形变，结构上表面的两条检测电极会检测到因压电陶瓷材料的形变所溢出的电荷，这两条电极所拾取的电荷分别经过电路转换后变成电压信号，这两路电压信号相加作为驱动模态的检测信号，相减作为检测模态的检测信号。图 1.7 所示是压电陶瓷陀螺 ENC-03 的实物图。

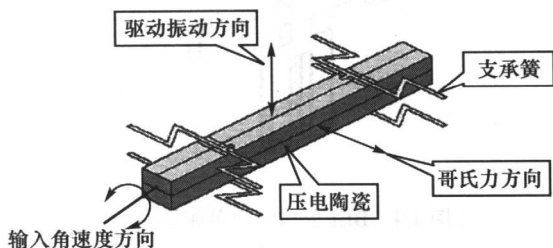


图 1.6 Murata 公司的压电陶瓷陀螺结构

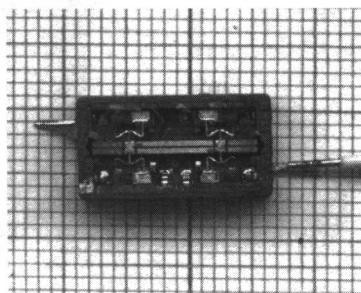


图 1.7 Murata 公司的 ENC-03 陀螺

1.2.3 硅微机械陀螺

20 世纪 80 年代以来, Draper(德雷珀)实验室(美)、JPL 公司(美)、LITTON(利顿)公司(美)、LITEF 公司(德)、SAGEM 公司(法)、AD 公司(美)、Vector 公司(俄)等相继开展了硅微机械陀螺的研究。根据图 1.1 中微机械陀螺的分类, 从驱动和检测方式来看, 目前主要有电磁驱动—电阻检测陀螺、电磁驱动—电容检测陀螺和静电驱动—电容检测陀螺等, 下面对这几类具有代表性的硅微机械陀螺进行介绍。

1.2.3.1 电磁驱动—电阻检测陀螺

电磁驱动的基本原理是通电导线在磁场中将受到洛伦兹力的作用(通电导线的方向与磁场的方向垂直时受到的洛伦兹力最大)。图 1.8 所示是电磁驱动—电阻检测陀螺的结构, 该结构的外框架为固定框架, 外框架内有两个悬浮质量块, 每个质量块通过四根梁与外框架相连, 在这四根梁中, 有两根梁上贴有压阻材料, 另外两根根梁作为通电导线, 磁场 B 的方向垂直于外框架平面。从图 1.8 中还可得知, 框架内通电导线的电流方向相反, 因此, 两个悬浮质量块作相对运动, 当通电导线内流过的是变换的电流时, 这两个悬浮质量块就作水平振荡, 引起梁上压敏电阻的阻值发生变化。

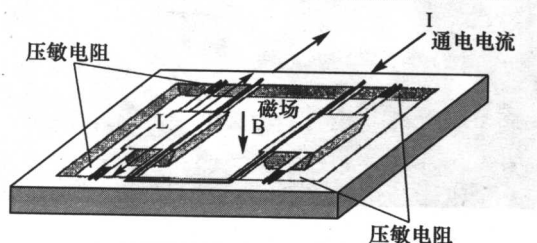


图 1.8 电磁驱动—电阻检测陀螺

1.2.3.2 电磁驱动—电容检测陀螺

图 1.9 所示是采用电磁驱动—电容检测陀螺的结构, 在该结构中, 中间圆形空间是磁铁的位置。它的基本原理与前面所讲的

电磁驱动—电阻检测陀螺的驱动原理相同，不同的是，其信号检测方式是通过检测电容的变化。图 1.10 所示是利用该原理加工的陀螺实物。

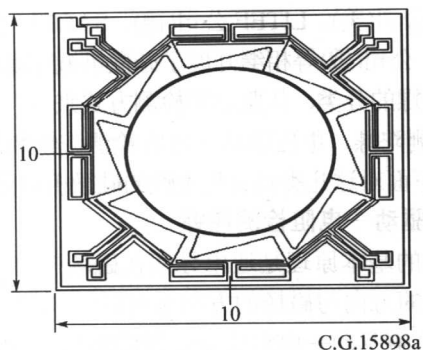


图 1.9 电磁驱动—电容检测陀螺的结构

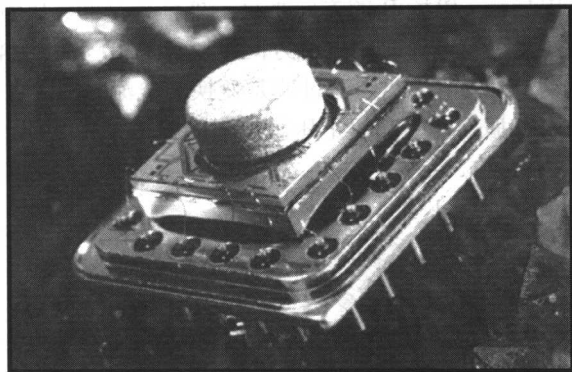


图 1.10 电磁驱动—电容检测陀螺的实物

1.2.3.3 静电驱动—电容检测陀螺

前面讲到的电磁驱动陀螺的结构比较简单，即使在大气中，驱动模态和检测模态的振动品质因子均能达到很高，陀螺不需要真空封装就能实现自激振荡，但其需要外加磁场，容易受到外部

磁场的干扰。而静电驱动陀螺不存在这种干扰,通常,靠静电驱动的微机械陀螺常需要真空封装或高的驱动电压(常在 10V 以上),这是因为其驱动方式是在电容的两端施加电压作为静电驱动力,由静电力 F_e 的计算公式 $F_e = \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \cdot V^2$ 可知:静电力 F_e 的

大小与朝运动方向电容的变换 $\frac{\partial C}{\partial x}$ 成正比,电容的变换 $\frac{\partial C}{\partial x}$ 又与电

极板的个数成正比,为了提高静电力的大小,常常需要提高电极板的个数,电极板个数的增多将导致陀螺结构复杂,结构越复杂,陀螺运动的阻力就越大,振动的品质因子就会减小,陀螺就很难实现自激振荡,通常需要采用真空封装技术以提高陀螺振动的品质因子,实现陀螺上电自激振荡。

常见的几种静电驱动—电容检测陀螺有振动轮式、环型振动和线振动,下面对这几种陀螺的情况进行介绍。

1) 振动轮式

图 1.11 所示是振动轮式陀螺工作原理的示意图,在该图中,上面盘型的质量块通过弹簧与衬底相连,在衬底的表面上加工有两块哥氏力检测电极。盘型质量块在静电驱动力作用下(静电驱动梳齿图中未画),盘型质量块将围绕 z 轴摆动,当绕 y 轴输入角速度信号时,盘型质量块与衬底上检测电极之间的电容将发生变化,通过检测电容的变化就能检测出陀螺绕 y 轴输入的角速度大小。

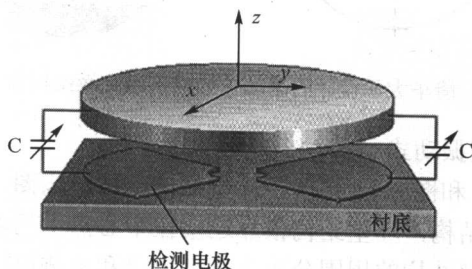


图 1.11 振动轮式陀螺工作原理的示意图

图 1.12 和图 1.13 分别显示德国 HSG-IMIT 大学和清华大学设计的振动轮式微机械陀螺结构。

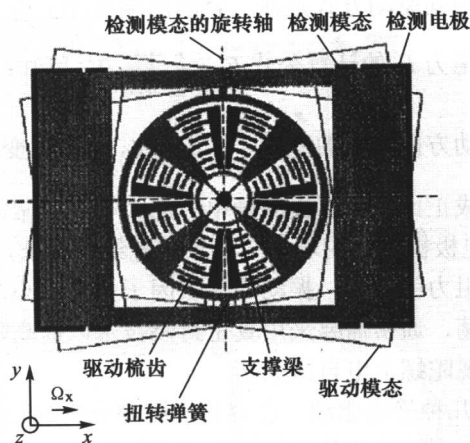


图 1.12 德国 HSG-IMIT 大学设计的振动轮式微机械陀螺的结构

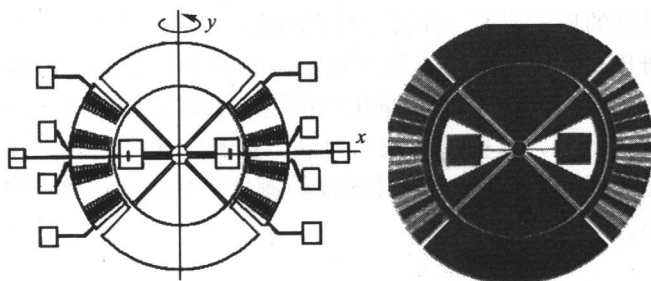


图 1.13 清华大学设计的振动轮式微机械陀螺结构和 SEM 图

2) 环型振动式

图 1.14 和图 1.15 是两种环型振动陀螺结构图。这两种陀螺均采用环型结构，环型结构依靠连接在中心点上的若干根弹簧作支撑，在环型结构的周围分布有驱动电极和检测电极。陀螺的驱动模态采用静电驱动，运动方式为椭圆形振动，检测模态为电容

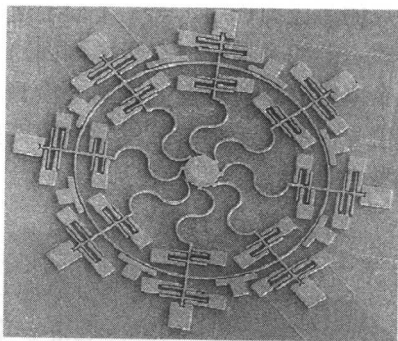


图 1.14 环型振动微机械陀螺(1)

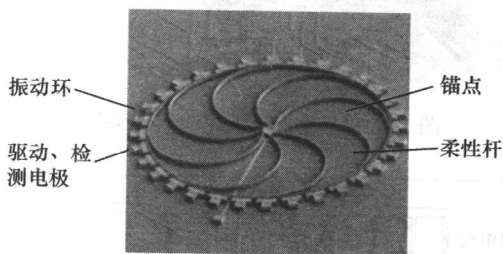


图 1.15 环型振动微机械陀螺(2)

检测。为了提高陀螺的信噪比，这两种陀螺均采用真空封装技术。

3) 线振动式

图 1.16 和图 1.17 所示的微机械陀螺属于线振动式陀螺，这类陀螺驱动模态的振动方向是在同一条直线上。如图 1.16 所示的陀螺是三星公司设计的具有解耦结构的双框架陀螺，外框架通过四个鱼钩型的弹簧与衬底相连。在外框架的四周，均设计有驱动模态的驱动梳齿和检测梳齿。在外框架内，设计有内框架，内框架通过两边的扭转簧与外框架相连，在内框架下面，设计有检测模态的检测电极。图 1.17 所示是 Micro SenseTM 公司设计的双驱动质量块的陀螺，在这个结构中，两个驱动质量块的驱动方向始终相反，若存在绕 y 轴的角速率信号输入，左右的两个运动质量块