

单通道阻尼用微机械陀螺仪

张增平著



北京邮电大学出版社





“十三五”科学技术专著丛书

国家自然科学基金资助项目(No. 61563038)

内蒙古自治区高等学校创新团队发展计划支持(No. NMGIRT-A1609)

单通道阻尼用微机械陀螺仪

张增平 著



北京邮电大学出版社
[www. buptpress. com](http://www.buptpress.com)

内 容 简 介

本书系统阐述了一种新型硅微机械陀螺,它安装于旋转飞行器上,作为单通道飞行控制系统中阻尼稳定回路的关键器件,用于敏感飞行载体的姿态运动,并改善载体的飞行动态品质。

全书共分为7章:第1章,绪论;第2章,单通道阻尼用硅微机械陀螺仪的结构设计;第3章,单通道阻尼用微机械陀螺仪的运动方程;第4章,硅微机械陀螺仪信号处理电路的设计与分析;第5章,单通道阻尼用微机械陀螺仪性能的测试;第6章,单通道阻尼用微机械陀螺仪误差模型及其补偿;第7章,硅微机械陀螺仪在单通道阻尼回路中的应用。

本书可供从事惯性器件研究的科研人员、工程技术人员以及高等院校相关专业的研究生阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

单通道阻尼用微机械陀螺仪 / 张增平著. -- 北京: 北京邮电大学出版社, 2018.1
ISBN 978-7-5635-5339-6

I. ①单… II. ①张… III. ①微机械陀螺仪—研究 IV. ①U666.12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 310230 号

书 名: 单通道阻尼用微机械陀螺仪

著作责任者: 张增平 著

责任编辑: 刘 颖

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号(邮编:100876)

发行部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷:

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 13.5

字 数: 333 千字

版 次: 2018 年 1 月第 1 版 2018 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-5339-6

定 价: 56.00 元

• 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 •

前 言

随着 MEMS 技术的发展,在硅基上采用 IC 工艺加工制备的微机械陀螺仪具有了体积小、重量轻、成本低、抗冲击能力强等优点。基于这些优点,微机械陀螺仪正被广泛应用于惯性导航和惯性制导领域。

目前,世界上主要发达国家均在进行硅微机械陀螺仪的研究,并相继研制出了各种结构的硅微机械陀螺仪,其中绝大部分属于振动式陀螺仪。它们的敏感质量块在驱动结构的驱动下产生运动。当存在输入角速度时,根据科氏效应,敏感质量块将受到科里奥利力的作用。所以,在科里奥利力的作用下,敏感质量块在与驱动方向相垂直的方向上将产生位移。然后,通过检测位移的大小从而实现输入角速度的敏锐感受。

而本书介绍的单通道阻尼用微机械陀螺仪,是一种新型的硅微机械陀螺仪,它不同于常规的硅微机械陀螺仪,其本身没有驱动结构,只有检测结构。该新型硅微机械陀螺仪安装于旋转飞行载体上,利用载体绕其纵轴旋转获得角动量。当载体发生横向转动时,将产生周期性变化的科里奥利力,使得敏感质量块随着载体的自旋作简谐振动。敏感质量块的这种振动经过差动电容检测,输出一个调幅波信号。该陀螺仪输出的敏感信号的载波频率能够自动调谐载体的自旋频率,而包络与横向输入角速度的大小成比例。

同时,在旋转载体的飞行姿态控制中,常采用单通道飞行控制方式。单通道飞行控制中,阻尼稳定回路用于改善飞行器飞行的动态品质。这就要求姿态敏感器件不仅能够无失真地敏锐感受飞行载体的各种姿态运动,而且能够及时输出敏感信号并反馈至控制系统的控制端。

鉴于此,本书所介绍的这种新型硅微机械陀螺仪,就非常适合于作为单通道控制系统中阻尼回路用的关键敏感器件。

结合作者多年来在单通道阻尼用硅微机械陀螺仪的研制实践,并在张福学教授的指导下,本书才得以完成。

本书完成过程中,参考和引用了国内外许多论文和著作,在此一并表示衷心的感谢!

同时,也要感谢国家自然科学基金资助项目(Supported by National Natural

Science Foundation of China)(No. 61563038)、内蒙古自治区高等学校创新团队发展计划支持(Supported by Program for Innovative Research Team in Universities of Inner Mongolia Autonomous Region)(No. NMGIRT-A1609)的资助,本书才能顺利完成并得以出版。

由于作者本人知识水平有限,书中难免有不妥之处,恳请广大读者和专家批评和指正。

作者

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 单通道阻尼用微机械陀螺仪应用背景及意义	1
1.2 微机械陀螺仪的发展现状	2
1.2.1 MEMS 技术	2
1.2.2 微机械陀螺仪的技术分类	4
1.3 硅微机械陀螺仪在国内外的研究现状	5
1.3.1 硅微机械陀螺仪在国外的研究现状	5
1.3.2 硅微机械陀螺仪在国内的研究现状	7
1.4 单通道阻尼用微机械陀螺仪概述	8
1.4.1 单自由度陀螺仪的工作原理简介	8
1.4.2 单自由度陀螺仪的三种主要类型	9
1.5 单通道阻尼用微机械陀螺仪的特点	10
1.6 本章小结	11
第 2 章 单通道阻尼用硅微机械陀螺仪的结构设计	12
2.1 硅微机械陀螺仪结构设计	12
2.1.1 结构原理	12
2.1.2 工艺制作步骤设计	16
2.2 电容敏感设计	20
2.3 敏感元件扭转梁的设计	23
2.3.1 敏感质量块的转动惯量	24
2.3.2 弹性扭转梁的抗扭转刚度系数	25
2.3.3 敏感元件的固有频率	26
2.4 振动模态的有限元分析与仿真	26
2.4.1 有限元模型的建立	27
2.4.2 有限元求解	29
2.5 敏感元件固有频率测试	30
2.6 本章小结	33

第3章 单通道阻尼用微机械陀螺仪的运动方程	34
3.1 硅微机械陀螺仪工作原理	34
3.2 硅微机械陀螺仪运动方程	36
3.2.1 建立坐标系	36
3.2.2 运动方程式的推导	37
3.2.3 敏感元件压膜阻尼系数的分析	42
3.3 硅微机械陀螺仪运动方程的解	46
3.3.1 方程的瞬态解	47
3.3.2 方程的稳态解	48
3.4 本章小结	52
第4章 硅微机械陀螺仪信号处理电路的设计与分析	54
4.1 C/V 转换电路的设计与分析	54
4.1.1 电容拾取电路的设计与分析	55
4.1.2 提高检测灵敏度的改进措施	57
4.1.3 差分放大电路的设计与分析	61
4.2 硅微机械陀螺仪调理电路的设计与分析	62
4.2.1 带通滤波器电路的设计与分析	63
4.2.2 低通滤波器电路的设计与分析	64
4.2.3 相位补偿电路的设计与分析	65
4.2.4 相位补偿电路动态仿真分析	66
4.3 调理电路频率带宽的扩展	68
4.4 本章小结	72
第5章 单通道阻尼用微机械陀螺仪性能的测试	73
5.1 有干扰时硅微机械陀螺仪运动的微分方程式	73
5.1.1 简化后的硅微机械陀螺仪的工作原理	73
5.1.2 有干扰时硅微机械陀螺仪运动的微分方程	76
5.2 硅微机械陀螺仪的静特性及其测试	77
5.2.1 静特性及误差	77
5.2.2 静特性测试	80
5.3 硅微机械陀螺仪的动态特性及其测试	84
5.3.1 频率特性	84
5.3.2 幅频特性测试	86
5.3.3 相频特性测试	89

5.4 硅微机械陀螺仪几个关键动态时域性能	91
5.4.1 抗冲击性能	91
5.4.2 抗舵偏打性能	97
5.4.3 启动时间性能	102
5.5 本章小结	105
第6章 单通道阻尼用微机械陀螺仪误差模型及其补偿	108
6.1 硅微机械陀螺仪输出信号的误差模型	108
6.1.1 误差模型的建立与分析	108
6.1.2 误差模型的实验验证	110
6.2 提高硅微机械陀螺仪标度因数稳定性的补偿算法	112
6.2.1 统计补偿算法	112
6.2.2 微商补偿算法	117
6.3 硅微机械陀螺仪质量偏心分析及其补偿	119
6.4 本章小结	123
第7章 硅微机械陀螺仪在单通道阻尼回路中的应用	125
7.1 旋转飞行器姿态运动	125
7.1.1 姿态运动的轨迹方程	126
7.1.2 姿态运动形式	126
7.1.3 姿态运动形式仿真模拟	131
7.2 硅微机械陀螺仪敏感输出信号模型	135
7.2.1 输入偏航或俯仰角速度时陀螺仪敏感输出信号	139
7.2.2 输入偏航、俯仰合成角速度时陀螺仪敏感输出信号	143
7.3 硅微机械陀螺仪在单通道姿态控制系统中的应用	159
7.3.1 旋转飞行载体的单通道姿态控制系统	159
7.3.2 横向输入角速度解算	163
7.4 本章小结	170
附录A	171
附录B	176
附录C	178
参考文献	202

第 1 章 绪 论

陀螺仪是惯性器件中一个重要的类别,它主要用于测量物体的方向变化。随着微机械(MEMS)加工技术和惯性导航及惯性制导技术的发展,硅微机械陀螺仪以其体积小、重量轻、功耗低、抗过载能力强、能适用于恶劣环境等优点,越来越受到广泛的关注。

目前,世界上许多科研机构、公司都在进行硅微机械陀螺仪的研究。本书将详细介绍一种安装于旋转飞行器上,在单通道飞行控制系统中作为改善飞行器飞行动态品质的阻尼用新型的硅微机械陀螺仪。

1.1 单通道阻尼用微机械陀螺仪应用背景及意义

旋转飞行器是指在飞行过程中,弹体同时绕其纵轴以一定角速度旋转的一类飞行器^[1]。

旋转飞行器绕其纵轴旋转,优点是明显的。其一,弹上控制设备简单,尤其是对于某些小型、近程导弹而言,弹内空间有限,如果能够在控制系统上省去一套或两套控制系统是非常有利的。其二,降低了由于导弹不对称引起的干扰,如发动机推力偏心和气动力偏心等的影响。其三,导弹获得一定的初始旋转角速度,可以减小初始偏差,提高攻击精度。所以,旋转导弹被广泛应用于战术导弹,如反坦克导弹、防空导弹等^[1-11]。世界上各军事强国均对旋转导弹进行了大量的研制和应用,并形成了许多具有代表性的型号。其中,反坦克导弹有美国的“标枪”,俄罗斯的“短号”,英、法、德三国联合研制的中程“崔格特”导弹以及法国和德国的“米兰”(Milan)(转速为 6 r/s)和“霍特”(HOT)(转速为 8~10 r/s)等,它们的弹体均采用了旋转弹体。便携式防空导弹通常都是旋转弹,重点用于超低空飞行目标的防空,如美国的“毒刺”(FIM-92)、苏联的“SAM-7”(转速为 15 r/s)以及俄罗斯的“SAM-18”。我国的“红箭-73”和“红箭-8”也属于绕纵轴旋转的旋转导弹^[1, 12]。

陀螺仪安装于旋转飞行器上,用于测量旋转飞行器的姿态运动。而被测输入角速度是随时间变化的动态信号,这就要求陀螺仪的输出不仅能精确地反映被测角速度的大小,还要正确地同步被测输入角速度随时间变化的规律。所以,一个动态特性好的陀螺仪,其输出将再现输入角速度的变化规律,具有和输入角速度相同的时间函数。

旋转飞行器载体在空间的姿态运动有俯仰、偏航和自旋三个自由度的运动。因此,姿态控制方式通常有单通道控制和多通道控制两种方式。

其中,单通道控制方式是指弹上只有一套控制系统,旋转载体利用其尾翼安装偏角,产生的气动力使其绕纵轴旋转,并通过一对舵面完成俯仰和偏航的控制方式。单通道控制方式是旋转载体控制的一大特色,载体上的控制设备将得到大大的简化^[13-16]。图 1-1 是单通道控制方式的自动驾驶仪原理结构图^[2]。

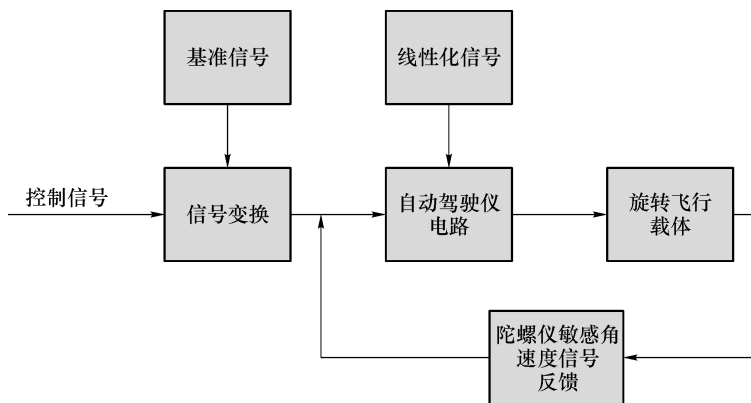


图 1-1 单通道控制方式自动驾驶仪工作原理结构框图

图 1-1 中的陀螺仪敏感角速度反馈信号是用于增加旋转飞行载体的阻尼特性,改善载体的飞行动态品质,并使飞行载体能够按照引导方法,正确引导载体飞向目标^[17-20]。

陀螺仪的敏感输出信号,对于单通道控制系统的阻尼稳定回路来讲,它是一个反馈的阻尼信号。信号的频率与旋转载体自旋频率应相同,而测量值是载体绕其质心转动的横向输入角速度。

目前,常规陀螺仪很难满足上述同频、同相的要求。而本书所阐述的一种新型硅微机械陀螺仪,它自身没有驱动结构,安装在旋转载体上,利用旋转载体的自旋获得角动量,因此能够自动调谐旋转载体的自旋频率。

而且,当载体发生横向角速度转动时,硅微机械陀螺仪的敏感元件将会受到周期性科里奥利力的作用,输出一个敏感的调幅信号,该调幅信号的载波频率与载体的自旋频率相同,振幅与载体输入的横向角速度成比例。因此,非常适合用于单通道控制系统中稳定回路的阻尼。所以,该硅微机械陀螺仪具有重要的理论研究意义和广阔的应用前景。

1.2 微机械陀螺仪的发展现状

1.2.1 MEMS 技术

微电子机械系统(Micro Electro Mechanical Systems, MEMS)技术可以在微米尺度上加工出复杂的结构、器件和系统。MEMS 技术是半导体集成电路(IC)工艺技术的延伸和拓展,这是目前广为使用的名称。欧洲称为微系统技术(Microsystems),强调将多个微型化的传感器、执行器、信号处理电路等元部件集成为一个智能化的有机整体。在精密机械加工方面有传统优势的日本则称其为微机器(Micromachine),利用传统的加工方法,使用大机器制造小机器,然后用小机器制造微机械的方法^[21, 22]。

目前微机械加工技术主要有三种。一是日本的微机器加工工艺,基于金属或非金属的精密机械加工。二是以德国为代表的 LIGA 技术,工艺流程主要利用 X 光深度同步辐射光刻、电铸成型及注塑等三个工艺步骤。其优点是 X 射线具有非常高的平行度、辐射强度大、光谱连续,能够加工出深宽比较高,性能优良的三维立体结构。但由于加工需要 X 光

同步辐射源,加工成本太高,目前使用较少^[23]。三是以美国为代表的 MEMS 加工技术,美国在这一方面的研究是在半导体集成电路工艺技术基础上延伸和拓展而来的,使用化学腐蚀或半导体集成电路技术,形成硅基的微机械器件。此加工技术是基于微电子加工的一种微细加工技术。其工艺技术主要有干法刻蚀、湿法腐蚀、光刻、扩散、氧化、薄膜生长和蒸发溅射等。由于和 IC 工艺兼容,易于系统集成和批量制备,成本低,逐渐成为 MEMS 加工技术的主流,也是未来的发展趋势。本书所介绍的单通道阻尼用微机械陀螺仪采用的加工技术属于该种 MEMS 技术。

MEMS 技术具有体积小、重量轻、功耗低以及具有可动、可形变的悬空微结构的特点。图 1-2 显示了某一 MEMS 的结构,并与蚂蚁脚进行了对比^[24]。随着 MEMS 技术的深入研究和快速发展,导致了新兴微机械惯性技术的出现,如 MEMS 组合导航系统(MINS)、微惯性测量单元(MIMU)和 MEMS 惯性器件。

其中,硅微机械陀螺仪与其他类型的陀螺仪相比较,具有价格低、尺寸小、重量轻、耐冲击等优点,已成为最受关注的惯性器件和研发热点。

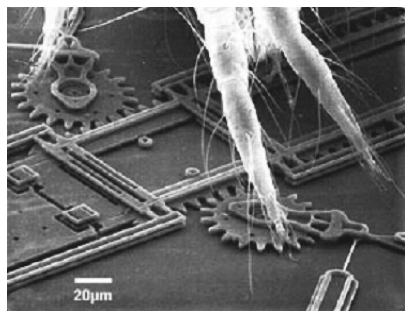


图 1-2 某一 MEMS 的结构

惯性技术领域的一些著名研究机构,如美国的德雷珀实验室(Draper)、加州理工学院喷气推进实验室(JPL)、加州伯克利分校、利顿公司(Litton)、ADI、Honeywell 公司、BEI 公司,德国的 BOSCH 公司、LITEF 公司,法国的 SAGEM 公司,意法半导体公司,俄罗斯 Vector 公司,韩国三星公司等都在硅微机械陀螺仪方面开展了大量的研究,并相继研制出了各种硅微机械陀螺仪,而且已得到了应用^[25-29]。

基于硅微机械加工工艺制作的陀螺仪,绝大部分是利用了科里奥利效应,使陀螺仪结构产生和检测科氏加速度,图 1-3 是通常意义上的硅微机械陀螺仪原理结构示意图^[30]。

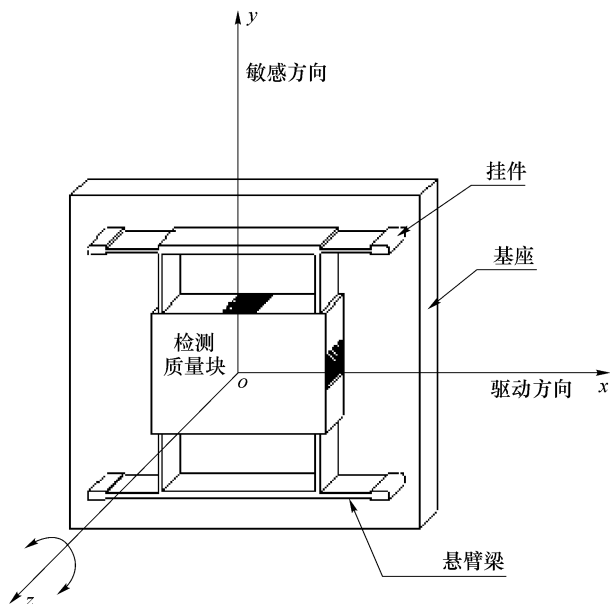


图 1-3 利用科氏加速度的微机械陀螺仪一般原理结构示意图

如图 1-3 所示,陀螺仪的敏感质量块和坐标平面 xoy 固连。假定在 x 轴方向,敏感质量块受到驱动而产生振动,当 xoy 平面绕着 z 轴以一定的角速度转动时,由于科里奥利效应,则沿 y 轴的方向将产生科里奥利力,使得敏感质量块沿 y 轴方向产生运动,该运动位移与 z 轴上的输入角速度大小成比例。最后,通过测量 y 轴方向的位移,就能够检测出输入角速度的大小。

1.2.2 微机械陀螺仪的技术分类

微机械陀螺仪的种类很多,为了便于比较和分析。可按材料、振动结构、驱动方式、检测方式等几个方面将微机械陀螺仪进行划分^[28, 31]。

(1)根据制作材料的不同,除了硅微机械陀螺仪,较常见的还有压电石英陀螺仪和压电陶瓷陀螺仪。无论是压电石英陀螺仪还是压电陶瓷陀螺仪,它们制作的材料都属于绝缘体。当材料受到电场的作用会发生形变,而当材料发生形变后,表面将溢出电荷,从而具有压电效应。所以,非硅陀螺仪是通过振动质量块上的驱动电极和检测电极来实现驱动模态的激励和检测模态的信号检测。根据石英材料的这一特点,人们采用微加工刻蚀技术加工出了具有不同结构的微机械石英陀螺仪。1990 年,瑞典乌普萨拉大学的 J. Söderkvist^[32, 33]和 J. S. Danel 等人^[34]报道了一种单端音叉结构的石英微陀螺仪,其特点是采用单端音叉结构,加工采用化学刻蚀工艺。该陀螺仪的尺寸为 $3.5\text{ mm} \times 0.5\text{ mm} \times 0.6\text{ mm}$,常温下,工作频率为 37 kHz ,驱动模态和检测模态下的品质因数约为 $13\,700$,刻度因子为 $30\text{ pA}/((^\circ) \cdot \text{s})$,分辨率为 $0.4 (^\circ)/\text{s}$,温度敏感性为 $1(^\circ)/(\text{s} \cdot ^\circ\text{C})$ ^[34]。由此开始了石英微机械陀螺仪的研究热潮^[35-38]。其中,美国和日本的研究水平最高,石英微机械陀螺仪工艺成熟,在汽车安全气囊、飞机辅助导航等领域已进入实用化。具有代表性的如:美国 BEI 公司在 20 世纪 90 年代推出的双端石英微陀螺仪^[39]。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,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隔离的结构,减小了耦合误差。该陀螺仪的最小尺寸为 $8.12\text{ mm} \times 4.2\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$,动态范围为 $\pm 1\,000 (^\circ)/\text{s}$,非线性度小于 0.05% ,带宽大于 60 Hz ,零位稳定性小于 $0.01 (^\circ)/\text{s}$ 。压电陶瓷陀螺仪的工作原理与石英陀螺仪的工作原理大致相同,目前已广泛应用于摄像机防抖动控制及遥控玩具飞机的姿态解算中^[40]。然而,这些非硅微机械陀螺仪的生产加工工艺复杂,成本高,如一只 QRS11 的价格就要上万元人民币,且抗过载能力差,通常石英陀螺仪耐过载能力不到 200 g ,很难被广泛应用^[41]。所以,目前世界上都在展开对硅微机械陀螺仪的研究。

(2)振动式微机械陀螺仪通常有角振动方式和线振动方式两种,角振动陀螺仪的振动元件是绕着固定轴振动,线振动陀螺仪是沿着直线振动。

(3)按驱动结构划分,有无驱动结构微机械陀螺仪和有驱动结构微机械陀螺仪。本书所研究的硅微机械陀螺仪就属于无驱动结构,由于没有驱动结构,只有检测模态,所以加工工艺相对简单,成本也大大降低。有驱动结构微机械陀螺仪的驱动方式通常有静电驱动、电磁驱动和压电驱动。

(4)按检测的物理量来划分,有电容式、压阻式、压电式、光学陀螺仪和隧道陀螺仪等。其中,电容检测陀螺仪是利用了敏感元件引起的电容变化进行检测。

(5)从加工工艺来看,微机械陀螺仪可分为体微机械陀螺仪、表面微机械陀螺仪、LIGA 陀螺仪等。微机械陀螺仪的分类如图 1-4 所示。

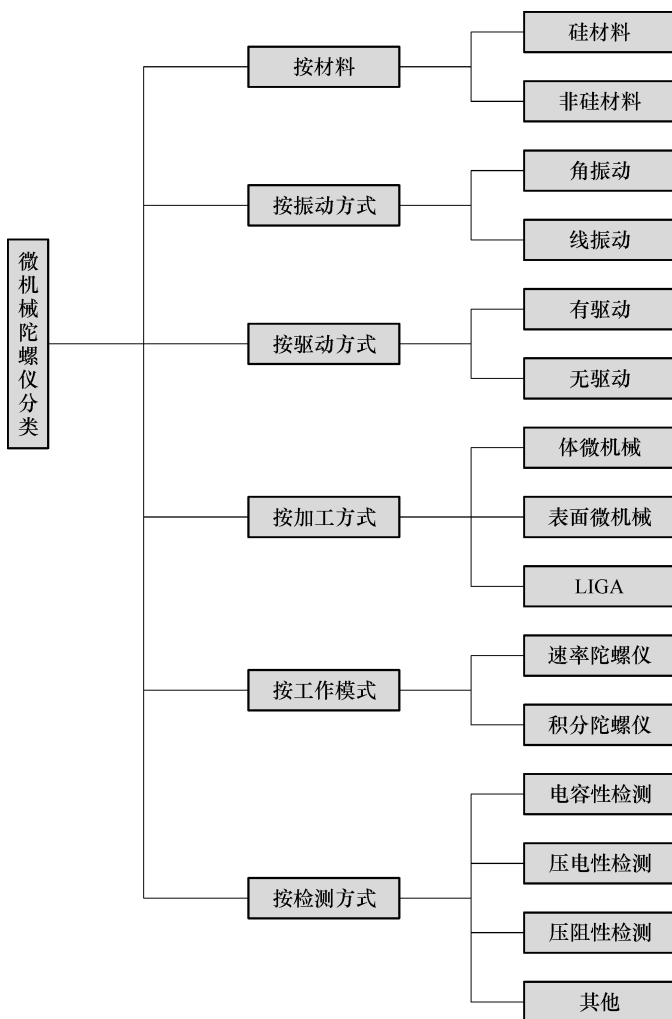


图 1-4 微机械陀螺仪的技术分类

1.3 硅微机械陀螺仪在国内外的研究现状

自 20 世纪 80 年代以来,世界各国的研究机构相继开展了硅微机械陀螺仪的研究,像美国的德雷珀(Draper)、JPL 公司、利顿(LITTON)公司、AD 公司,德国的 LITEF 公司,法国的 SAGEM 公司,俄罗斯的 Vector 公司等。国内的研究起步较晚,始于 20 世纪 90 年代初,主要集中于科研单位和高等院校。

如图 1-4 所示,针对本书所研究的单通道阻尼用微机械陀螺仪,下面主要从驱动和检测方式,综述硅微机械陀螺仪在国内外的研究现状。

1.3.1 硅微机械陀螺仪在国外的研究现状

在硅微机械陀螺仪的研究上,目前美国处于世界领先水平。美国德雷珀实验室于 1988

年研制出世界上第一个硅微机械振动式陀螺仪,它采用了平板电容驱动的双框架式结构^[42]。1991年研制出了第一个体硅微机械速率陀螺仪^[43, 44]。它的结构布局是由扭力梁支撑,组成双平衡框架的振动结构。外框以等幅的方式由静电驱动,当有输入角速度时,科氏力引起内框绕其挠性轴摆动,摆动频率和驱动频率相同。德雷珀实验室随后又在1993年报道了一种单晶硅音叉陀螺仪^[45, 46],这种陀螺仪通过静电驱动使一组交叉梳齿产生一定的振幅,检测方式属于电容式,偏差稳定性为 $55(^{\circ})/h$ 。

密歇根大学开发了一种多晶硅环形陀螺仪^[47-50]。该陀螺仪采用了硅体微机械和表面微机械混合加工工艺,获得了比较高的性能,随机游走小于 $0.05(^{\circ})/h^{\frac{1}{2}}$ 。为了利用梳齿式微机械陀螺仪大电容的优点,Delphi Delco Electronics Systems提出了一种混合梳齿环式振动陀螺仪^[51, 52],引入梳齿能明显提高检测信号的强度,使用差动方式可消除温度带来的影响。

伯克利分校研制了直径1 mm的表面微机械 z 轴振动速率陀螺仪^[53],这种陀螺仪通过梳齿状驱动器,以静电驱动方式驱动检测质量达到共振状态,由科氏加速度引起的振动通过交叉梳状齿进行差分检测,分辨率可达 $1(^{\circ})/s$ 。伯克利分校还报道了一种双轴结构的陀螺仪,加工工艺采用了表面微机械工艺,该结构包括一个能旋转共振的多晶硅转盘,转盘沿正交轴方向对称分布。敏感元件可以敏感正交轴上的2个输入角速度,这种陀螺仪的随机游走系数为 $10(^{\circ})/h^{\frac{1}{2}}$,通过频率匹配,分辨率可以达到 $2(^{\circ})/s$ 。

美国JPL与加州大学合作,开发出一种基于空间应用的三叶草形的体硅微机械振动陀螺仪,该陀螺仪的偏差稳定性为 $70(^{\circ})/h$ ^[54]。

其他国家研制的硅微机械陀螺仪种类也很多,下面介绍几种具有代表性的硅微机械陀螺仪。

德国IMT开发了一种H型振动陀螺仪^[28],这是一种玻璃-硅-玻璃的夹层结构,由4个检测质量和连接悬梁构成一个双音叉结构,连接悬梁与位于质心的鞍形结构相连,鞍形结构由一根与基座相连的扭转轴支撑。

德国BOSCH公司于1993年开始研制具有2个检测质量块的准旋转陀螺仪,在10 Hz带宽下,具有 $1.26(^{\circ})/s$ 的分辨率^[55]。

20世纪90年代末期,用多晶硅表面微机械工艺制作的硅微陀螺仪要先进得多,而且种类也较多。德国HSG-IMIT的研究人员,验证了一种表面微机械 z 轴振动陀螺仪MARS-RR1型耦合谐振陀螺仪,其噪声为 $0.27(^{\circ})/h$,灵敏度为 $10\text{ mV}/(^{\circ})\cdot s$,线性度为0.2%,电源电压15 V,电流20 mA,抗冲击力为 $1\,000\text{ g}$ ^[56-58]。

瑞典IMEGO研究机构提出的一种新型硅微陀螺仪^[28, 59],陀螺仪采用单边静电激励和电容检测。因2个检测质量反相振动,减小了偏差,获得了极好的线性度。在50 Hz带宽下,分辨率可达 $0.1(^{\circ})/s$ 。

瑞士Neuchatel大学微技术研究所开发了一种基于2个相互隔离的振动检测质量的硅微共振音叉陀螺仪^[60],该陀螺仪每个音叉由一个四梁桥式悬挂支撑,采用电磁激励和压阻检测。

韩国三星公司研制出一种 z 轴振动速率陀螺仪,振动质量块是通过4个鱼钩形的弹簧支撑,并产生共振。该陀螺仪在2 Hz的带宽下具有 $0.1(^{\circ})/s$ 的分辨率,工作带宽为100 Hz,量程为 $90(^{\circ})/s$,1%的线性度^[61]。韩国三星还采用多晶硅表面微机械工艺,加工制造出一种双轴

的陀螺仪^[62],其结构是基于4个平板角振动并采用闭环速率检测的工作原理,由于振动结构会受到空气的阻尼,因此需要真空封装,该陀螺仪的等效噪声输出为 $0.1(^{\circ})/s$ 。

随着成本的下降,尺寸和重量的减小,MEMS陀螺仪在航空工业、军事、汽车工业、电子消费品市场具有广泛的应用前景。

MEMS陀螺仪在汽车工业应用多种多样,如用于先进的自动安全系统、高性能导航、驾驶稳定系统以及下一代安全气囊和ABS;在电子消费品市场,用于防抖动相机、虚拟现实产品、惯性鼠标和游戏等。微型化的陀螺仪也让诸如微型卫星、微型机器人等领域进入了一个全新的发展阶段。

Draper 和 Rockwell International 从1993年开始合作,将 Draper 的硅微音叉陀螺仪应用到汽车领域,其他公司也纷纷将各种类型的微机械陀螺仪推向了实用化。目前,已实用化的硅微陀螺仪产品如表1-1所示。

表 1-1 实用化的硅微陀螺仪产品

陀螺仪产品	机构名称
“GyroChip”系列微机械陀螺仪	BEI Systron Donner Intertial Division
“Microring”硅微机械音叉振动陀螺仪	Irvine Sensors-MicroSensors
单轴音叉陀螺仪	韩国三星公司
“MicroGyro100”双轴速率陀螺仪	Gyration 公司
“RRS75”微机械共振速率陀螺仪	Inertial Science 公司
“VG”振动陀螺仪	GrossBow 公司
“ENV”系列微机械陶瓷压电振动速率陀螺仪	日本 MURATA 公司
“CRS”系列环形振动陀螺仪	Silicon Sensing Systems 公司
“ARS”压电振动陀螺仪和“VSG”振动壳型压电陶瓷陀螺仪	Watson Industries 公司

1.3.2 硅微机械陀螺仪在国内的研究现状

国内 MEMS 惯性器件的研究工作较欧美发达国家起步较晚,公开报道的系统性能和具体应用较少。

但是,在国家的重视和大力扶持下,许多研究单位都在借鉴国外的经验,进行了大量的研究,并取得了长足的进步。从1995年末开始,国家投入了大量的经费用于惯性器件的基础性研究,而且将硅微机械陀螺仪技术已纳入国家高技术研究发展计划(“863”计划)。

近年来据公开发表的文献表明,国内高校和科研单位相继研制出了各种类型的硅微机械陀螺仪,下面就具有代表性的硅微机械陀螺仪分别进行介绍。

清华大学报道了一种振动轮式微机械陀螺仪^[63-66],其敏感元件是一个由4根十字形细梁连接在一个中心节点上的圆环。敏感元件由静电驱动,当在振动平面内存在输入角速度时,产生科氏加速度。在科里奥利力的作用下,敏感元件沿检测轴振动。振动可以由敏感元件和淀积在基片上的电容电极检测,得到与输入角速度成正比的信号。

中国科学院上海微系统与信息技术研究所开发了一种栅结构振动式微机械陀螺仪^[67-71]。该陀螺仪结构中,在固定电极上具有栅的敏感元件块和弹性梁相连。

复旦大学研制出了一种正交复合梁压阻微机械陀螺仪,在此基础上,于2001年又研制

了具有矩形梁式质量块结构的微机械陀螺仪^[72, 73]。

哈尔滨工业大学微电子中心报道了一种梁式硅微机械陀螺仪,该陀螺仪在玻璃衬底上有两个测试电极和一个振动梁,梁的一端固定在衬底上作为敏感元件^[74]。

中国科学技术大学设计并制备了一种四梁式压电薄膜的微机械陀螺仪,该陀螺仪的结构原理是利用压电反效应,在谐振频率上用 0.3 V 的交流信号驱动,利用压电正效应,敏感输入角速度^[75]。

西北工业大学报道了一种振动音叉式微机械陀螺仪,驱动模态采用了梳齿电容式驱动,检测模态利用平板式电容检测。静态性能指标为测量范围 $\pm 320 (^{\circ})/\text{s}$,灵敏度 $1.78 \text{ mV}/((^{\circ}) \cdot \text{s})$,分辨率 $0.36 (^{\circ})/\text{s}$,非线性度 0.65% ^[76-78]。

北京大学报道了一种体微工艺制备的对称结构微机械陀螺仪^[79, 80],驱动模态和检测模态均采用了滑膜阻尼,灵敏度为 $0.9 \text{ mV}/((^{\circ}) \cdot \text{s})$,等效噪声为 $0.008 4 (^{\circ})/(\text{s} \cdot \text{Hz}^{\frac{1}{2}})$ 。

北京航空航天大学公开了一种自解耦高灵敏度谐振硅微机械陀螺仪,其特征主要为轴对称图形的双质量块结构,内外质量块呈“回”字形,两者通过折叠梁对称连接,可实现结构解耦。随后又公开了一种高性能谐振硅微机械陀螺仪^[81]。

北京市传感器重点实验室研制了一种无驱动结构的硅微机械陀螺仪,其结构只有检测模态,敏感元件巧妙地利用了旋转载体的自旋获得角动量^[82-86]。

1.4 单通道阻尼用微机械陀螺仪概述

单通道阻尼用微机械陀螺仪是一种新型的单自由度陀螺仪。相对于两自由度陀螺仪而言,在结构方面,取消了两自由度陀螺仪的外框架,而把内框架通过梁与壳体相连,陀螺仪的转子轴对壳体的相对运动只限于绕内框架轴运动。这样,单自由度陀螺仪就不存在定轴性,而只有进动特性了。

虽然单自由度陀螺仪本身相对于惯性空间没有定向作用,但是,我们可以根据自动控制的方法,用单自由度陀螺仪和其他必要的设备,组成一个起定向作用的系统。例如,组成稳定平台,来实现对惯性空间或者对地理坐标系起定向作用。

一般来说,两自由度陀螺仪的内、外框架梁都做成高精度是比较困难的,而用两个单自由度陀螺仪代替一个两自由度陀螺仪达到同样使用目的,则只需将单自由度陀螺仪的进动轴做成高精度就可以了。多年来,国内外对单自由度陀螺仪做了大量的研制工作,在惯性导航系统也得到了广泛的应用。

1.4.1 单自由度陀螺仪的工作原理简介

我们知道,两自由度陀螺仪内、外框架的功用,相当于一个万向支架。当载体有转动时,不会带动陀螺仪转子一起转动。从理论上讲,不管载体如何运动,陀螺仪转子的方向在惯性空间保持不变。

单自由度陀螺仪则不然,如图 1-5 所示。设 y 轴为陀螺仪的输出轴, x 为输入轴, z 为转子轴。

当载体绕 y 轴或 z 轴转动时,不会直接影响陀螺仪转子的运动。若载体绕 x 轴以角速度 ω_x 转动时,将强迫陀螺仪转子绕同一转轴以相同的角速度 ω_x 进动。

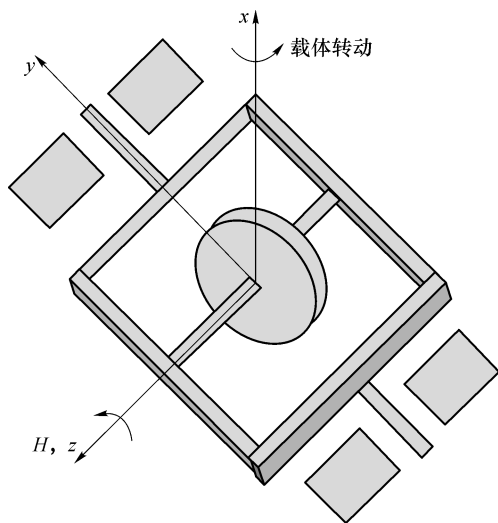


图 1-5 单自由度陀螺仪的结构示意图

因而,沿着输出轴 y 方向,必然有进动力矩作用在陀螺仪上。该进动力矩,可以由下列力矩来平衡:由于陀螺仪绕输出轴 y 具有角加速度时产生的惯性力矩;具有角速度时,阻尼器产生的阻尼力矩;具有角度时,扭转梁产生的弹性力矩。

总之,当载体绕陀螺仪输入轴 x 有强迫转动时,其结果是引起陀螺仪的转子绕输出轴产生进动运动,使角动量 H 方向趋向与载体角速度 ω_x 的方向重合。

由此可见,单自由度陀螺仪具有敏感绕其缺少自由度方向的转动角速度的特性。这就是说,单自由度陀螺仪的输入是绕 x 轴的角速度,输出是转子绕输出轴 y 的进动运动。

1.4.2 单自由度陀螺仪的三种主要类型

单自由度陀螺仪的运动问题,实际上是指转子绕输出轴的运动问题。这种运动,属于刚体绕定点的运动,可以用欧拉动力学方程来推导其运动方程式,得到如式(1.1)所示的运动方程。

$$J_b \ddot{\beta} + C_b \dot{\beta} + K_b \beta = H \omega_x \quad (1.1)$$

其中, J_b , C_b , K_b 分别为转子绕输出轴的转动惯量、阻尼系数和刚度系数, β 是转子绕着输出轴转过的角度。这样,方程式即简化为一个典型的二阶常系数线性微分方程式了。

从式(1.1)出发,根据陀螺仪所受的约束不同,来区分它的类型。

(1) 积分陀螺仪

这种类型的单自由度陀螺仪的框架轴上,只安装有阻尼器,而没有扭转弹簧,于是式(1.1)即变成

$$J_b \ddot{\beta} + C_b \dot{\beta} = H \omega_x \quad (1.2)$$

则稳定状态时,式(1.2)的解为

$$\beta = \frac{H}{C_b} \int \omega_x dt \quad (1.3)$$

由式(1.2)可见,稳定状态时,陀螺仪力矩是由阻尼力矩来平衡的,输出角速度 $\dot{\beta}$ 与输入角速度 ω_x 成正比。