



国防科技图书出版基金

圆柱壳体振动陀螺

Cylindrical Vibratory Gyroscope



吴学忠 席翔 肖定邦 吴宇列 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

圆柱壳体振动陀螺

Cylindrical Vibratory Gyroscope

吴学忠 席 翔 肖定邦 吴宇列 著



国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

圆柱壳体振动陀螺 / 吴学忠等著. —北京: 国防工业出版社, 2018.3

ISBN 978-7-118-11429-4

I. ①圆… II. ①吴… III. ①振动陀螺仪—研究
IV. ①TN965

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 041840 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

三河市腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 11 1/4 字数 195 千字

2018 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 88.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

致 读 者

本书由中央军委装备发展部国防科技图书出版基金资助出版。

为了促进国防科技和武器装备发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。这是一项具有深远意义的创举。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在中央军委装备发展部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由中央军委装备发展部国防工业出版社出版发行。

国防科技和武器装备发展已经取得了举世瞩目的成就,国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。开展好评审工作,使有限的基金发挥出巨大的效能,需要不断摸索、认真总结和及时改进,更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员 潘银喜

副主任委员 吴有生 傅兴男 赵伯桥

秘书长 赵伯桥

副秘书长 许西安 谢晓阳

委员 才鸿年 马伟明 王小谟 王群书

(按姓氏笔画排序)

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 巩水利

刘泽金 孙秀冬 芮筱亭 李言荣

李德仁 李德毅 杨伟 肖志力

吴宏鑫 张文栋 张信威 陆军

陈良惠 房建成 赵万生 赵凤起

郭云飞 唐志共 陶西平 韩祖南

傅惠民 魏炳波

前 言

陀螺仪是一种感测运动体旋转的惯性元件,在航天、航空、航海、兵器等许多领域中有着广泛和重要的应用。20 世纪 40 年代,普通滚珠轴承支承的机械式陀螺仪就已经大量应用于航空领域,此后陀螺仪的类型不断更新,性能越来越好,体积越来越小。目前,市场上呈现出了机械陀螺、光学陀螺、振动陀螺以及各类新原理陀螺百花齐放的局面。可以预见在未来很长的一段时间内,应用市场的持续增长仍将促进陀螺技术的不断发展。壳体振动陀螺是振动陀螺中的一类重要分支,已经被证明具有精度高、体积小、稳定性好、抗冲击强等突出优点,适用于精确制导武器尤其是战术武器装备,有着良好的市场前景。因而开展壳体振动陀螺技术研究,对提高我国惯性导航领域的自主研发与创新能力具有重要的实际意义。

圆柱壳体振动陀螺虽然结构形式简单,但其设计和制造技术涉及板壳理论、结构动力学、振动力学、精密机械制造、控制理论等多个知识领域,国内暂时没有系统性的文献著作对其进行较为全面的介绍。本书作者根据多年的科研经验和实践体会,分别从工作原理、理论建模、动力学分析、制造工艺、测试方法和控制策略六大方面系统地阐述了圆柱壳体振动陀螺技术。书中第 2~4 章是理论部分,构建了圆柱壳体振动陀螺的理论体系模型;第 5、6 章涉及谐振子的制造工艺与方法,是实现高性能圆柱壳体振动陀螺制造的基础;第 7、8 章构成圆柱壳体振动陀螺的电路控制与补偿部分,主要包括典型的自激振荡驱动电路、力平衡控制电路,以及针对该陀螺特性设计的相关补偿方法。本书还将圆柱壳体振动陀螺的一些最新成果和进展引入其中,使读者能够尽快了解和掌握该陀螺的基础知识与前沿动态。

本书适合作为陀螺与惯导系统相关研究人员的专业技术参考资料。同时,也可作为机械、导航等学科高年级本科生或研究生的选修课教材。

本书由吴学忠等撰写,在写作过程中,国防科技大学微纳系统实验室的研究生陶溢、朱炳杰、谢迪、张勇猛等对部分章节的内容提供了重要素材和建议;研究生曲洛振和孙江坤对部分章节的绘图工作付出了辛勤的劳动,在此对他们一并表示感谢。

本书也是作者承担的国家自然科学基金委员会重点项目(51335011)的部分工作总结,在此对国家自然科学基金委员会给予的长期资助表示感谢。

由于时间与水平有限,本书难免存在纰漏与错误,敬请读者批评指正。

2017年4月

于长沙

目 录

第1章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 科里奥利振动陀螺概述	1
1.3 圆柱壳体振动陀螺的研究概况	4
1.4 国内圆柱壳体振动陀螺研究	8
参考文献	9
第2章 圆柱壳体振动陀螺的工作原理与结构	10
2.1 振动陀螺的科里奥利效应	10
2.2 圆柱壳体振动陀螺的工作原理	12
2.2.1 基本工作原理	12
2.2.2 基于压电电极的激励与检测原理	14
2.3 圆柱壳体振动陀螺的典型结构	21
2.4 圆柱壳体振动陀螺的衍生结构	22
参考文献	23
第3章 圆柱壳体振动陀螺的理论分析与建模	24
3.1 谐振子的基本数学模型	24
3.2 谐振子的刚度分析	28
3.2.1 径向刚度分析	28
3.2.2 轴向刚度分析	33
3.3 谐振子的力学建模	38
3.3.1 集中刚度模型	38
3.3.2 集中质量模型	41
参考文献	44
第4章 圆柱壳体振动陀螺的动力学分析与建模	45
4.1 谐振子的模态分析	45
4.2 谐振子驱动模态的动力学方程	49
4.2.1 驱动模态的稳态响应	52

4.2.2	驱动模态的检测信号	56
4.3	谐振子的科里奥利力	57
4.3.1	振动速度与科里奥利力	57
4.3.2	科里奥利力与等效力矩	59
4.4	谐振子敏感模态的响应	63
4.4.1	敏感模态的稳态响应	63
4.4.2	敏感模态的检测信号	66
4.5	圆柱壳体振动陀螺的灵敏度分析	67
4.5.1	品质因数模型	68
4.5.2	角速度灵敏度模型	73
	参考文献	75
第5章	圆柱壳体振动陀螺的制造	76
5.1	谐振子的材料	76
5.1.1	材料特性	76
5.1.2	材料处理	77
5.2	谐振子的制造工艺	80
5.2.1	基本工艺流程	80
5.2.2	铁镍基恒弹性合金加工方法	82
5.2.3	谐振子的切削	84
5.2.4	加工误差分析	85
5.3	非理想谐振子的修调	88
5.3.1	非理想谐振子的频率裂解	88
5.3.2	非理想谐振子的频率修调	92
5.3.3	非理想谐振子的振型修调	98
5.4	圆柱壳体振动陀螺的装配	100
	参考文献	101
第6章	圆柱壳体振动陀螺谐振子的参数测试方法	103
6.1	谐振子的频率特性测试方法	103
6.2	谐振子的品质因数测试方法	105
6.3	谐振子的振型测试方法	106
6.4	压电电极的参数测试方法	110
6.5	谐振子的简易综合参数测试方法	116
	参考文献	119

第7章 圆柱壳体振动陀螺的全闭环控制	120
7.1 测控电路原理	120
7.2 谐振子的等效电路模型	122
7.2.1 谐振子的等效电路建模	122
7.2.2 谐振子的等效参数识别	126
7.3 驱动控制策略	128
7.3.1 谐振子驱动模态的谐振激励	128
7.3.2 谐振子驱动模态的稳幅控制	132
7.4 检测控制策略	135
7.4.1 谐振子力平衡控制技术	135
7.4.2 角速度信号检测技术	138
7.5 数字化电路简介	138
7.5.1 测控电路总体方案	138
7.5.2 驱动闭环控制原理	139
7.5.3 角速度闭环检测原理	142
7.5.4 驱动和检测环路软件算法流程	143
参考文献	145
第8章 圆柱壳体振动陀螺的误差机理与补偿	146
8.1 圆柱壳体振动陀螺的主要误差源	147
8.1.1 谐振子的参数缺陷	147
8.1.2 温度误差	149
8.2 圆柱壳体振动陀螺的误差模型	150
8.2.1 确定性误差模型	151
8.2.2 随机误差模型	152
8.3 圆柱壳体振动陀螺的温度稳定性提升方法	152
8.4 圆柱壳体振动陀螺的温度误差补偿	153
8.4.1 温度误差补偿方法	153
8.4.2 温度补偿系统构成	154
8.4.3 温度补偿系统的硬件实现	155
8.4.4 基于零偏频率模型的温度补偿系统	158
参考文献	163

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Introduction	1
1.2 Summary of Coriolis Vibratory Gyroscope	1
1.3 Research Summary of Cylindrical Vibratory Gyroscope	4
1.4 Domestic Research of Cylindrical Vibratory Gyroscope	8
References	9
Chapter 2 Operating Principle and Structure of Cylindrical Vibratory Gyroscope	10
2.1 Coriolis Effect of Vibratory Gyroscope	10
2.2 Operating Principle of Cylindrical Vibratory Gyroscope	12
2.2.1 Basic Operating Principle	12
2.2.2 Driving and Sensing Principle Based on Piezoelectric Electrodes	14
2.3 Typical Structure of Cylindrical Vibratory Gyroscope	21
2.4 Evolved Structure of Cylindrical Vibratory Gyroscope	22
References	23
Chapter 3 Theoretical Analysis and Modeling of Cylindrical Vibratory Gyroscope	24
3.1 Basic Mathematical Model of Cylindrical Vibratory Gyroscope	24
3.2 Stiffness Analysis of Resonator	28
3.2.1 Radial Stiffness Analysis	28
3.2.2 Axial Stiffness Analysis	33
3.3 Mechanical Modeling of Resonator	38
3.3.1 Concentrated Stiffness Model	38
3.3.2 Concentrated Mass Model	41
References	44

Chapter 4 Dynamic Analysis and Modeling of Cylindrical Vibratory

Gyroscope	45
4.1 Modal Analysis of Resonator	45
4.2 Dynamic Equation of Resonator's Driving Mode	49
4.2.1 Steady State Response of Driving Mode	52
4.2.2 Detecting Signal of Driving Mode	56
4.3 Coriolis Force of Resonator	57
4.3.1 Vibration Velocity and Coriolis Force	57
4.3.2 Coriolis Force and Equivalent Moment	59
4.4 Steady State Response of Resonator's Sensitive Mode	63
4.4.1 Steady State Response of Sensing Mode	63
4.4.2 Detecting Signal of Sensing Mode	66
4.5 Sensitivity Analysis of Cylindrical Vibratory Gyroscope	67
4.5.1 Quality Factor Model	68
4.5.2 Model of Angular Velocity Sensitivity	73
References	75

Chapter 5 Manufacture of Cylindrical Vibratory Gyroscope

5.1 Material of Resonator	76
5.1.1 Properties of Material	76
5.1.2 Treatment of Material	77
5.2 General Machining Process of Resonator	80
5.2.1 Basic Fabrication Process	80
5.2.2 Processing of Nickel Alloy	82
5.2.3 Turning of Resonator	84
5.2.4 Analysis of Fabrication Errors	85
5.3 Mass Balance Process of imperfect Resonator	88
5.3.1 Frequency Split of imperfect Resonator	88
5.3.2 Frequency Trimming of imperfect Resonator	92
5.3.3 Vibration Mode Trimming of imperfect Resonator	98
5.4 Assemblage of Cylindrical Vibratory Gyroscope	100
References	101

Chapter 6 Parameter Test Method of Cylindrical Vibratory

Gyroscope	103
6.1 Frequency Test Method of Resonator	103
6.2 Quality Factor Test Method of Resonator	105
6.3 Mode Test Method of Resonator	106
6.4 Parameter Test Method of Piezoelectric Electrode	110
6.5 A Simple Method for Parameter Test of Resonator	116
References	119

Chapter 7 Closed – loop Control of Cylindrical Vibratory

Gyroscope	120
7.1 Principle of Control Circuit	120
7.2 Equivalent Circuit Model of Resonator	122
7.2.1 Equivalent Circuit Modeling	122
7.2.2 Identification of Equivalent Parameters	126
7.3 Control Strategy of Driving Circuit	128
7.3.1 Oscillation Excitation of Driving Mode	128
7.3.2 Steady Vibration Control of Driving Mode	132
7.4 Control Strategy of Sensing Circuit	135
7.4.1 Force to Rebalance Control of Resonator	135
7.4.2 Technology of Angular Velocity Detecting	138
7.5 Introduction of Digital Circuit	138
7.5.1 General Programme of Control Circuit	138
7.5.2 Principle of Closed – loop Control for Driving	139
7.5.3 Principle of Closed – loop Control for Angular Velocity Detecting	142
7.5.4 Analysis of Fabrication Errors	143
References	145

Chapter 8 Error Mechanism and Compensation of Cylindrical Vibratory

Gyroscope	146
8.1 Error Sources of Cylindrical Vibratory Gyroscope	147
8.1.1 Parameter Defects of Resonator	147

8.1.2	Temperature Error	149
8.2	Model of Non – ideal Cylindrical Vibratory Gyroscope	150
8.2.1	Models of Deterministic Errors	151
8.2.2	Models of Random Errors	152
8.3	Temperature Performance Improvement of Cylindrical Vibratory Gyroscope	152
8.4	Temperature Error Compensation of Cylindrical Vibratory Gyroscope	153
8.4.1	Compensation Methods of Temperature Error	153
8.4.2	Compensation System for Temperature Error	154
8.4.3	Hardware of Compensation System	155
8.4.4	Compensation System Based on Zero Bias – Frequency Model	158
References		163

第1章 绪 论

1.1 引 言

惯性导航系统是不依赖外界信息、不向外界辐射能量、不易受到外界干扰的自主式导航系统,应用涉及精确制导导弹、军用飞机、水面舰艇、陆地战车、单兵系统等武器装备,对武器装备的精度、可靠性、机动性、快速性等战术技术指标起决定性作用。

陀螺是惯性导航系统的关键器件,它直接决定惯性导航系统的成本和性能。按照工作原理可以将目前主要的陀螺分为三大类:①机械转子陀螺,如液浮陀螺、动力调谐陀螺、气浮陀螺以及静电陀螺等;②科里奥利振动陀螺,如半球壳体振动陀螺、圆柱体压电陀螺、微机电谐振环陀螺、音叉陀螺等;③光学陀螺,如激光陀螺、光纤陀螺和集成光学陀螺等。按照零偏漂移的大小程度,陀螺又可以分为:①惯性级陀螺,零偏漂移小于 $0.01(^{\circ})/h$,主要应用于宇航器、大型船舶以及潜水艇导航等高精度场合;②战术级陀螺,零偏漂移 $0.1 \sim 10(^{\circ})/h$,主要应用于民用飞机、卫星、中近程导弹等中等精度场合;③速率级陀螺,零偏漂移大于 $10(^{\circ})/h$,主要应用于短期导航、低成本机器人与车辆姿态传感等低精度场合。

本书介绍的圆柱壳体振动陀螺是一类重要的科里奥利振动陀螺,它通过回转壳体驻波振动的科里奥利效应实现角速度检测,由于没有磨损元件,在使用寿命方面具有天然优势。此外,由于高度的结构对称性,壳体类振动陀螺还具备精度高、工作温度范围大、启动时间短、对冲击过载不敏感等突出特点^[1],近年来受到广泛关注。

1.2 科里奥利振动陀螺概述

科里奥利振动陀螺是一种无转子陀螺,它用振动元件取代传统陀螺的机械转子,实现角速度的检测。在1998年德国召开的陀螺技术研讨会上,美国陀螺专家 D. D. Lynch 认为科里奥利振动陀螺不仅具有所有的惯性品质,而且与另外两种固态陀螺(激光陀螺和光纤陀螺)相比,具有小型化的优势^[2]。随后国际电子电气工

程师协会陀螺和加速度计专门小组(IEEE GAP)编制了科里奥利振动陀螺规范格式指南和试验程序。至此,科里奥利振动陀螺已被列为具有极大发展潜力的新一类固态陀螺,受到国际惯性技术界的重视。

科里奥利振动陀螺按基体材料可分为硅材料陀螺和非硅材料陀螺;按照驱动方式可分为静电式、电磁式、压电式驱动陀螺等;按照检测方式可分为电容检测、压阻检测、压电检测、光学检测、隧道效应检测陀螺等;按照工作模式可分为速率陀螺和速率积分陀螺;按照加工方式可分为体微机械加工、表面微机械加工、LIGA 法成型的陀螺等。一般地,按照振动结构的不同,大致可分为振动梁陀螺、振动音叉陀螺、振动壳体陀螺与振动平板陀螺等。

1. 振动梁陀螺

振动梁式微陀螺的基本振动元件是一根直梁,其典型结构如图 1-1 所示,梁的中轴线是角速度输入轴,通过梁的振动感测输入角速度。压电驱动压电检测是这种结构陀螺最常见的驱动检测方式,其主要代表产品是日本 Murata 公司开发的 Gyrostar 陀螺。该陀螺结构简单,工作可靠,易于制造,但敏感模态与驱动模态耦合严重,不易检测,存在灵敏度不高的问题。

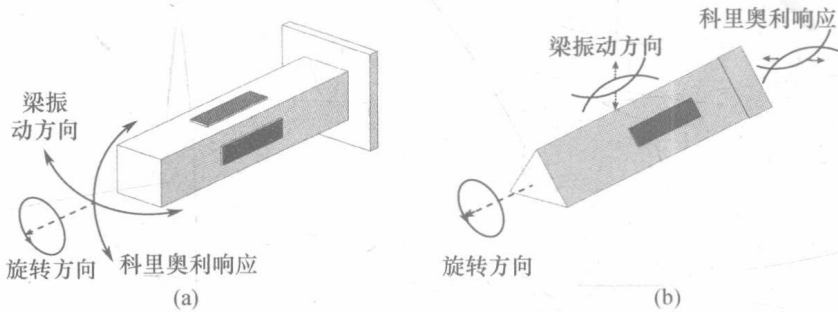


图 1-1 振动梁式陀螺
(a) 矩形梁结构; (b) 三角形梁结构。

2. 振动音叉陀螺

音叉式微陀螺的工作原理和振动梁式微陀螺类似,不同的是振动元件采用音叉结构(图 1-2),一般单个石英晶片即可刻蚀出整个音叉和支撑结构,振荡器驱动音叉彼此方向相反运动,当有角速度输入时,音叉将感受科里奥利力的扭矩而产生敏感模态的振动,该结构将陀螺的驱动模态和敏感模态分离,易于信号检测。美国 BEI Systron Donner 公司以研发该结构的陀螺为主。

3. 振动壳体陀螺

振动壳体陀螺最大特点是具有中心对称的回转壳体结构(图 1-3),如半球结构、圆筒结构、环形结构等。对于这种陀螺,其振动壳体的横截面上任意相互正交的两轴都可做驱动轴和敏感轴。半球壳体振动陀螺(HRG)包含半球谐振子、激励

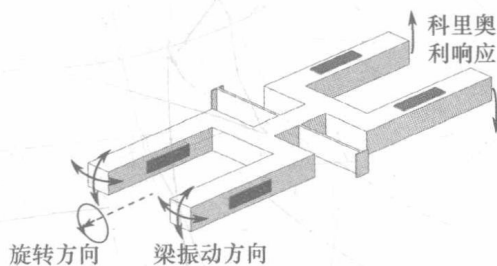


图 1-2 音叉式陀螺

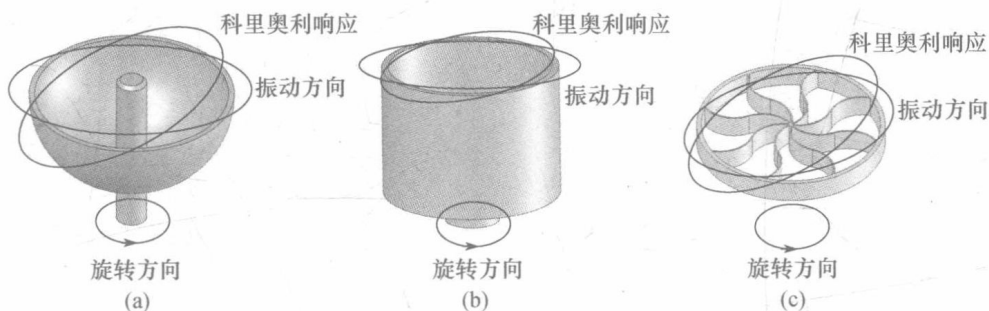


图 1-3 振动壳体陀螺

(a) 半球结构;(b) 圆筒结构;(c) 环形结构。

罩和读出基座三部分,利用静电力作用驱动半球谐振子产生驻波振动,读出基座表面和半球谐振子内表面间的电容变化,计算谐振子位移,从而得出陀螺的旋转角度^[3]。日本 Silicon Sensing Systems 公司开发过一种电磁驱动电磁检测的振动环形结构陀螺,其微结构上面设置一个永磁体,当电流流过导电支架时将产生使环形结构谐振的力,科里奥利力使环形结构运动,带动支架切割磁场,产生角速度检测电压。

4. 振动平板陀螺

振动平板陀螺(图 1-4),其振动元件虽然是平板结构,但由于振动平板的形状不同、振动形式多样,其工作方式也多种多样,故该结构的陀螺发展也很快,主要研发单位有美国 Draper 试验室、Analog Device 公司和挪威 Sensoror 公司等。美国 U. C. Berkeley 传感与执行器中心设计的表面加工工艺制造的振动轮式陀螺,只通过一个圆盘结构就可以检测两个方向的角速度输入。线振平板结构采用梳齿结构用于驱动检测,具有简单可靠、低功耗和易于集成等特点,在市场上采用该结构的陀螺较多。

表 1-1 总结了部分具有代表性的科里奥利振动陀螺产品性能。