

固体波动陀螺

(译文集)

(俄) B.A.马特维耶夫 B.И.利帕特尼科夫 A.B.阿廖欣 著
M.A.巴萨拉布 B.Ф.克拉夫琴科

杨亚非 赵辉 译



國防工業出版社

National Defense Industry Press

固体波动陀螺(译文集)

B. A. 马特维耶夫 B. И. 利帕特尼科夫
(俄) A. B. 阿廖欣 著
M. A. 巴萨拉布 B. Ф. 克拉夫琴科
杨亚非 赵辉 译

国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字：军-2008-061 号

图书在版编目(CIP)数据

固体波动陀螺：译文集 / (俄罗斯) 马特维耶夫等著；
杨亚非，赵辉译。—北京：国防工业出版社，2009.6
ISBN 978-7-118-06213-7

I. 固... II. ①马... ②杨... ③赵... III. 陀螺仪-文集
IV. TN965-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 017441 号

V. A. Matveev, V. I. Lipatnikov, A. V. Alekin, grants to National Defence Industry Press the sole and exclusive right during the Licence Period to translate, publish and sell the Simplified Chinese Edition of the Book titled Design of the Solid State Wave Gyro with ISBN 5-7038-1323-9 throughout China.

M. A. Basarab, V. F. Kravchenko, V. A. Matveev grants to National Defence Industry Press the sole and exclusive right during the Licence Period to translate, publish and sell the Simplified Chinese Edition of the Book titled Mathematical modelling of physical processes in Gyro with ISBN 5-88070-072-0 throughout China.

※

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)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 10 字数 260 千字

2009 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 42.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

译 序

想必读者对“固体波动陀螺”一词会比较陌生,但提到“半球谐振陀螺”一词或许会比较熟悉。其实,半球谐振陀螺是固体波动陀螺的一种最常见的结构形式。固体波动陀螺是一种有别于传统的机械转子陀螺的基于新的物理原理的无转子式陀螺。它以精度高、能耗小、结构简单、准备时间短、工作温度范围大、断电后仍能长时间工作、抗电离辐射能力强、对线性过载不敏感、使用寿命长、能实现自动化批量生产等特点越来越成为有发展和应用前景的陀螺。

俄罗斯在固体波动陀螺理论研究和工程研制方面起步较早。译者在俄罗斯莫斯科鲍曼技术大学作访问学者期间,有幸接触到固体波动陀螺理论研究方面颇有建树的鲍曼大学信息学与控制系统系主任马特维耶夫教授,回国后,邀请马特维耶夫教授到哈尔滨工业大学进行了为期两周的关于固体波动陀螺设计方面的讲学,收获颇多。之后,又邀请到马特维耶夫教授的学生巴萨拉布教授来哈进行了为期两周的关于固体波动陀螺数学建模方面的讲学。

译者在对两位专家讲学内容充分理解的基础上翻译了两位专家分别作为第一作者所著的两本书。但由于两本书的主要研究对象均是固体波动陀螺,因此决定将两书的译稿合在一起出版。为了保持原书的风格,分为上、下篇,篇名依然用原书书名。

上篇为固体波动陀螺设计,从固体波动陀螺的基本功能原理图入手,研究了其理论模型构建方法、仪器的性能分析、误差模型、陀螺谐振子的平衡问题,提出了独创性的平衡方法,从不同层面全

方位地展现固体波动陀螺的设计问题。

下篇为陀螺中物理过程的数学建模,研究了原子函数和 R 函数在固体波动陀螺的谐振子的动力学问题、进动系数的求解方法、陀螺误差及其参数辨识问题、半球谐振子稳态和非稳态热力过程的数学模型、热力时间常数的计算,热漂移速率的确定、求解热转移边界等问题中的应用,最后利用 R 函数和原子函数获得了模拟式和数字式低频平峰滤波器和微分滤波器综合的新算法。

本译文集旨在起抛砖引玉的作用,期望能够将国内在固体波动陀螺方面的研究引向深入。

译者特别感谢所在团队责任教授——姚郁教授,是他的鼓励和支持给译者极大信心和动力完成这部译文集。感谢哈尔滨工业大学王子才院士和北京航空航天大学房建成教授,是两位专家的大力推荐使译者得以申请到国防工业出版社的装备科技翻译图书基金。感谢国防工业出版社的基金支持,这对该俄文专著的翻译工作无疑是雪中送炭。

由于译者水平有限,如有不妥之处,敬请各位读者和专家批评指正。

译者

于哈尔滨工业大学航天学院控制与仿真中心

2009 年 2 月

目 录

上篇 固体波动陀螺设计

第一章 固体波动陀螺工作原理与结构	6
1.1 带半球谐振子的陀螺的工作原理	6
1.2 固体波动陀螺的结构	8
第二章 固体波动陀螺谐振子数学模型	17
2.1 基于基希霍夫-李雅夫假设的固体波动陀螺谐振子 运动方程的推导	17
2.2 固体波动陀螺谐振子的环形模型	28
2.3 半球谐振陀螺振动的位置激励	30
2.4 固体波动陀螺谐振子振动的参数激励	36
2.5 固体波动陀螺的信息采集系统	41
第三章 谐振子、激励系统和信息采集系统工艺偏差对固体 波动陀螺精度的影响	49
3.1 以圆周角和相位相互正交的两个驻波和形式表示的 固体波动陀螺谐振子的振动	49
3.2 固体波动陀螺由谐振子质量分布不均匀的四次和 二次谐波引起的误差	51
3.3 由基座振动引起的固体波动陀螺的误差	57

3.4	由谐振子品质因数不一致引起的固体波动陀螺的 误差	62
3.5	固体波动陀螺与谐振子激励系统偏差有关的 误差	67
3.6	固体波动陀螺 - 角速率传感器的采样电极 对准误差	69
3.7	对有四次谐波偏差的固体波动陀螺的速率漂移 公式的解释	72
3.8	确定频率裂解值和固有刚性轴的方位	75
第四章	固体波动陀螺频率不一致的谐振子中驻波的 控制原理	77
4.1	频率的相位自动调节系统的工作原理	77
4.2	借助分布电极校正固体波动陀螺谐振子固有 刚性轴的原理	86
第五章	固体波动陀螺谐振子的平衡	91
5.1	平衡一般原则	91
5.2	电平衡	95
5.3	基于幅相频特性描绘的确定固有刚性轴和频率 裂解的方法	97
5.4	通过测定相角特性来确定由密度四次谐波 偏差造成的频率裂解的方法	100
5.5	固体波动陀螺谐振子质量分布不均匀的前四次 谐波的辨识方法	105
5.6	固体波动陀螺的实验结果	115
附录		119
	附录 1 环形谐振子的运动方程的推导	119

附录 2 布勃诺夫 - 加廖尔金法	127
附录 3 研制固体波动陀螺的技术任务书实例	131
参考文献	132

下篇 陀螺中物理过程的数学建模

第一章 固体波动陀螺的功能特性	139
1.1 工作原理	139
1.2 谐振子的环形模型	141
1.3 谐振子的壳体模型	153
1.4 激励系统	157
第二章 固体波动陀螺动力学问题中的原子函数和 R 函数	161
2.1 原子函数和近似方法	161
2.2 利用原子函数解弹性环的动力学问题	166
2.3 解析几何的反问题 R 函数图	168
2.4 瑞利函数的计算与轴对称旋转壳体进动系数的 求解	189
第三章 误差建模和非均质的辨识	199
3.1 误差的基本类型 谐振子的平衡	199
3.2 刚性轴的辨识	204
3.3 谐振子中热力场建模	214
第四章 具有分布参数的振子式陀螺建模问题中的 R 函数法	226
4.1 振子式陀螺的结构	226
4.2 薄片理论边界问题解的结构	229
4.3 梁形扭杆的扭转建模	233

第五章 捷联惯导系统的动力学	238
5.1 结构原理	238
5.2 导航算法	241
5.3 原子函数和 R 函数基础上的数字滤波	244
附录	264
附录 1 布勃诺夫 - 加廖尔金法	264
附录 2 谐振子的盘形模型	272
附录 3 通用壳体理论方程	276
附录 4 原子函数计算算法	286
附录 5 基于原子函数的卡尔曼滤波	289
参考文献	303

上 篇

固体波动陀螺设计

В. А. 马特维耶夫

В. И. 利帕特尼科夫 著

А. В. 阿廖欣

前 言

当前仪器制造的发展很大程度上决定于无转子陀螺:光纤陀螺、激光陀螺、微机械陀螺、固体波动陀螺等的结构趋势。

特别是在航空业众所周知的构建于激光陀螺基础上的精度可达 $0.01^{\circ}/h \sim 0.001^{\circ}/h$ 的导航设备、捷联惯导系统。在高机动性的航空和航天中使用固体波动陀螺以及以它为基础构建捷联惯导系统是非常有前途的。固体波动陀螺的高技术性能可以证实这一点:精度达 $0.001^{\circ}/h$, 过载条件下工作稳定, 准备时间短。固体波动陀螺是新一代陀螺, 但是在 1985 年茹拉夫廖夫 B. Ф. 和克里莫夫 И. М. 的基础性专著《固体波动陀螺》出版以后实际上有关固体波动陀螺的教材就再没有出版过。因此本教学参考书的出版是及时的。

我们注意到本书的传统结构:选择理论模型;为确定仪器的性能分析理论模型;构造仪器的基本功能原理图,并确定其误差模型。

书中以固体波动陀螺的结构图作为插图,描述仪器基本元件、仪器调节与平衡方法,叙述仪器实验方法基础都是为了实现本书的基本目的——展现固体波动陀螺的设计问题。本书的优点在于材料叙述简洁、见解独特,特别是对谐振子的平衡方法的见解、固体波动陀螺速率漂移模型和信息采集系统的实现均具有独创性。

自然,本书不能解决固体波动陀螺设计的所有问题,本书的内

容适用于教学,但毫无疑问,本书对从事固体波动陀螺研制与应用的工程师和科技工作者来说是有益的,并且他们也会对此书感兴趣。

导航与运动控制科学院院士
俄罗斯联邦功勋科学活动家 梅津采夫 A. П.

绪 论

针对定位、导航和运动物体的控制系统的敏感器件提出的高要求导致了基于新的物理原理的非传统意义的陀螺仪表的产生。固体波动陀螺就属于这种仪表,它的工作是基于利用在旋转的轴对称壳体中受激励的驻波的惯性。固体波动陀螺的优点在于:精度高、能耗小、机械部件结构简单、断电时稳定性好、准备时间短、工作温度范围大、抗电离辐射能力强、对线性过载不敏感、使用寿命长^[29,30]、制造固体波动陀螺时可以实现自动化生产。

按作用原理和在各种类型的陀螺系统中的使用情况,固体波动陀螺可以分为工作于角速率传感器方式的固体波动陀螺和工作于积分陀螺方式的固体波动陀螺。角速率传感器-固体波动陀螺的精度不高(随机漂移速率在 $0.01^{\circ}/\text{h}$ 水平)。积分陀螺-固体波动陀螺的精度较高(随机漂移速率可达 $0.0001^{\circ}/\text{h}$ 水平)。积分陀螺-固体波动陀螺是飞机和航天飞行器的捷联惯导系统的有前景的敏感器件。

1890 年旋转的轴对称物体中弹性波的惯性效应是 1890 年由 G. H. Bryan 理论上发现并通过实验证实了的。他证明了在振动的壳体(高脚杯)旋转时由于哥氏惯性力的作用壳体壁的挠性振动主振型的自振频率发生裂解,导致驻波既相对高脚杯又相对惯性空间进动。虽然 Bryan 的研究结果在许多学者的著作中多次被提到^[20],但却长时间没得到实际应用。

制造角速率传感器-固体波动陀螺的最初尝试是在 20 世纪 60 年代。制成了几种方案的角速率传感器。用作其角速率敏感

元件(谐振子)的有环、圆柱体^[1,25,26]、半球壳体^[3,24,28]。在谐振子中被激励的驻波转动某一与输入角速率在其对称轴上的投影值成一定比例的角度。这时,Bryan 效应不能够完全表现出来,因为为了保持谐振子振动采用位置激励^[3],因而限制了驻波的转角。

20 世纪 80 年代中期,由于工艺和电子学的水平的提高,能够制造出积分陀螺-固体波动陀螺。在参考文献[30]中描述了美国 Delco Electronics 公司的仪器,其研究人员通过选择半球谐振子的高品质材料和用参数激励代替位置激励的方法^[3]成功地制造出积分式固体波动陀螺(积分陀螺-固体波动陀螺)。

在我国(注:指俄罗斯),高精度的固体波动陀螺的实验样机由拉明斯克仪表制造设计局的企业制造出。除了制造陀螺仪的实验样机外,还研制了基于个人电子计算机的用于谐振子测试及借助激光进行谐振子动平衡的自动化转台,用于固体波动陀螺高精度测试的半实物仿真试验台,同样研究了如电极与谐振子间间隙的不均匀性、谐振子自振频率的裂解、品质因数不一致值等参数的估计方法,并将它们应用于生产中。

固体波动陀螺的理论分析基础在参考文献[11,12]中论述。书中指出,Bryan 效应是在环状谐振子以交变角速率旋转时才得以保持。在参考文献[10]中研究了环状谐振子的运动方程的平均方法,分析了理想陀螺的作用理论。在参考文献[16]中分析了固体波动陀螺谐振子的壳体模型。

本书涉及固体波动陀螺设计的基本问题。从弹性系统振动理论和波动过程统一的观点阐明了各种条件下的仪器的功用问题。研究了固体波动陀螺的方法误差和工具误差,分析了陀螺中驻波控制系统的工作。论述了固体波动陀螺的谐振子的平衡问题,提出了独创性的平衡方法。

第一章 固体波动陀螺工作原理与结构

本章叙述了固体波动陀螺的工作原理并研究了该陀螺已知结构。

1.1 带半球谐振子的陀螺的工作原理

假定谐振子中被激励的振动为驻波形式,其波腹位于 A 、 B 、 C 、 D 各点上(图 1.1(a))。

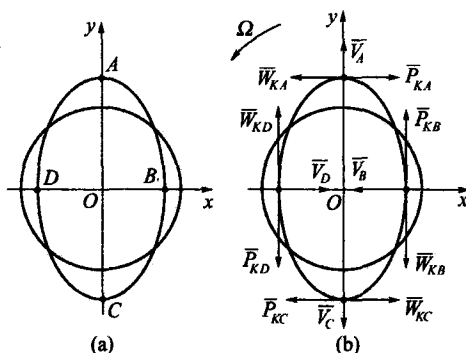


图 1.1 驻波振动形成机理

(a) 不转动的谐振子($\Omega=0$)；(b) 转动的谐振子($\Omega\neq 0$)。

半球以角速率 Ω 绕对称轴旋转时, A 、 B 、 C 、 D 各点完成复杂的运动:以速度 $\bar{V}_A$ 、 $\bar{V}_B$ 、 $\bar{V}_C$ 、 $\bar{V}_D$ 的相对运动和以角速率 $\bar{\Omega}$ 的牵连运动。在 A 、 B 、 C 、 D 各点,质量单元产生的哥氏加速度分别表示为 $\bar{W}_{KA}$ 、 $\bar{W}_{KB}$ 、 $\bar{W}_{KC}$ 、 $\bar{W}_{KD}$ 。加于 A 、 B 与加于 C 、 D 点的哥氏惯性力 $\bar{P}_{KA}$ 、

$\overline{P}_{KB}$ 、 $\overline{P}_{KC}$ 、 $\overline{P}_{KD}$ 指向相反, 并形成力偶。力偶 $\overline{P}_{KA} - \overline{P}_{KC}$ 与 $\overline{P}_{KB} - \overline{P}_{KD}$ 在指向上相反(图 1.1(b)), 其和为哥氏惯性力的合力偶, 其模正比于基座旋转角速率值。这一力偶引起波场(驻波)相对谐振子在惯性空间旋转(进动)。确定驻波相对仪器壳体的位置就可以得到有关固体波动陀螺基座在惯性空间转动的角度信息。

对于按基本振型(图 1.2)确定谐振子的振型图相对壳体的方位角 $\vartheta(t)$ 有如下关系式^[10-12]:

$$\vartheta(t) = -K \int_0^t \Omega(t) d\tau = -k\Delta\psi$$

式中 $\Omega(t)$ ——输入角速率;

K ——固体波动陀螺的比例系数;

$\Delta\psi$ ——基座的转角。

在输入角速率与波场相对于惯性空间的方位角间也存在类似的关系式:

$$\vartheta_*(t) = k \int_0^t \Omega(t) d\tau$$

式中 $k = 1 - K$ 。

参考文献[30]中列出了实验结果。实验发现, 当谐振子转动 90° 时, 驻波相对惯性空间转动约 63° , 这与驻波相对于谐振子转动了 27° 相符, 也就是 $K \approx 0.3$ 。

图 1.3 示出了谐振子的最重要的固有振型。零阶振型($n = 0$)对应的是拉压振动, 在研究固体波动陀螺的动力学问题时不考

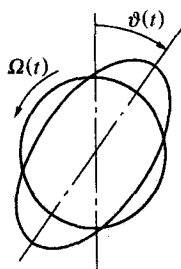


图 1.2 波场相对谐振子的进动

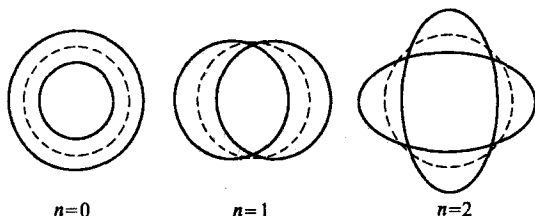


图 1.3 谐振子的固有振型

考虑此振动,因为谐振子的拉伸变形与弯曲变形比较起来要小。一阶振型($n=1$)对应的是作为刚体的谐振子的位移,在解固体波动陀螺的运动方程时必须考虑,因为这一振型是由谐振子支脚的变形激励的。二阶振型($n=2$)用作工作振型,它是半球谐振子弯曲振动的最低阶固有振型。

1.2 固体波动陀螺的结构

正如上面提到的,根据功用,固体波动陀螺分为工作于角速率传感器方式的固体波动陀螺(角速率传感器-固体波动陀螺)和工作于积分方式的固体波动陀螺(积分-固体波动陀螺)。后者输出陀螺基座转角增量信息。固体波动陀螺的双重应用使其结构形式和功能电路多样化。

图 1.4 示出了 Marconi 公司的振动圆筒型角速率传感器-固体波动陀螺的原理图。均质的金属或石英圆筒型谐振子 2 一端固定在基座 3 上。通过在圆筒的边缘上特殊布置传感器 1 的方法使圆筒的自由端在谐振频率上产生弯曲振动。传感器可以是电容的、电磁的或是压电的。在前两种情况,在圆筒与传感器启动部件的电极之间存在工作间隙,在最后一种情况,传感器直接安装在圆

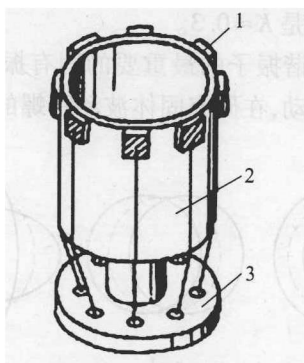


图 1.4 振动圆筒型角速率传感器-固体波动陀螺

1—压电传感器; 2—圆筒型谐振子; 3—基座。