

微机电系统技术与应用丛书

# 微惯性技术

刘俊 石云波 李杰 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

—— 中国微惯性技术 ——

# 微惯性技术

王 强 王 强 王 强 王 强 王 强

中国微惯性技术

中国微惯性技术

微机电系统技术与应用丛书

# 微惯性技术

刘俊 石云波 李杰 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

微惯性技术是在传统惯性技术基础上,随着 MEMS 等技术的发展而新兴和发展起来的一项多学科交叉的前沿技术,是惯性技术的一个主要发展方向。为适应更新教学内容和满足有关科技工作人员的需要,我们编著了本教材。本书系统地介绍了硅微惯性技术,内容主要包括:硅微惯性技术的基础知识;硅微机械惯性仪表的原理、设计及组合技术;硅微惯性器件与系统的测试、标定及评价技术;基于硅微惯性器件的捷联式惯性导航与组合导航技术。

本书注重理论与工程实际的结合,在介绍理论的基础上,还融入了作者及其他研究者近年来的许多实际研究成果,理论与实践并重。

本书可作为高等院校惯性技术、测控技术与仪器及其相关专业的研究生、本科生的教学参考用书,也可供从事惯性技术及传感器与执行器的有关科技人员参阅。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

微惯性技术 / 刘俊, 石云波, 李杰编著. —北京: 电子工业出版社, 2005.11

(微机电系统技术与应用丛书)

ISBN 7-121-01916-7

I. 微… II. ①刘… ②石… ③李… III. 惯性导航 IV. TN96

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 128728 号

责任编辑: 刘志红 特约编辑: 陈 虹

印 刷: 北京天竺颖华印刷厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销: 各地新华书店

开 本: 787×980 1/16 印张: 20.75 字数: 440 千字

印 次: 2005 年 11 月第 1 次印刷

印 数: 3000 册 定价: 39.80 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话: (010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

# 前 言

惯性技术是一项涉及多学科的高新技术，广泛应用于军事武器装备的导航、制导与控制系统和国民经济的诸多领域。微惯性技术是微惯性元件、惯性稳定、惯性导航、惯性制导和惯性测量等技术的总称，是微机电技术在惯性领域的主要应用。

微惯性元件（微加速度计和微陀螺仪）是微惯性系统的核心部件；微陀螺仪作为敏感元件，主要基于哥氏效应的哥氏力为载体提供准确的方位、角速度和角位移等信号，完成对运动体的姿态控制；微加速度计的理论基础主要是牛顿惯性定律。

本书分为 5 章。第 1 章主要叙述了惯性技术特别是惯性器件的发展历程。第 2 章着重讲述了惯性器件在导航控制过程中的理论知识。第 3 章是本书的重点所在，介绍了不同微加速度计、微陀螺仪的设计、仿真与计算的过程与方法，叙述了微型惯性测量组合的原理与组成技术。第 4 章主要描述了微惯性器件在使用前的标定与测试，通过测试，明确惯性器件的性能指标，以及惯性器件的误差耦合与系数的分离。第 5 章主要内容是微型惯性测量组合在捷联式惯性导航中姿态解算的主要应用，重点阐述了利用微惯性测量组合所测的线加速度信息与角速度信息进行姿态解算的算法，最后介绍了 GPS 与惯性导航的组合导航技术。

鉴于微惯性技术在我国属于前沿行业，目前只有大专院校、中科院和研究所相关研究人员从事该领域研究，因此本书既可作为学校教材使用，也可为研究所等相关单位的工程研究人员使用。

本书由中北大学刘俊教授组织编写，第 1 章由石云波编写，第 2 章由石云波、李杰编写，第 3 章由刘俊、唐军编写，第 4 章由刘俊、李杰、祁晓瑾编写，第 5

章由石云波、李杰、刘国营编写。在编写过程中，参考了国内外有关文献和资料，内容重点突出、繁简适度。

本书在编写过程中参考了一些兄弟院校的有关资料，也得到有关院校领导和同行的大力支持和帮助，在此一并表示衷心的感谢！

由于作者水平有限，书中难免存在缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

作 者

2005 年 10 月

# 目 录

|                                |      |
|--------------------------------|------|
| 第 1 章 概述 .....                 | (1)  |
| 1.1 惯性技术及其发展 .....             | (3)  |
| 1.2 硅微惯性技术及其发展 .....           | (7)  |
| 1.2.1 硅微惯性仪表的主要特点 .....        | (7)  |
| 1.2.2 硅微惯性技术及其发展 .....         | (8)  |
| 1.3 惯性技术与微惯性仪表的应用 .....        | (19) |
| 1.3.1 惯性技术在海陆空中的运用 .....       | (19) |
| 1.3.2 硅微惯性仪表在军事上的应用 .....      | (22) |
| 1.3.3 惯性技术与微惯性仪表在民用方面的应用 ..... | (27) |
| 第 2 章 惯性技术的相关知识 .....          | (29) |
| 2.1 地球的形状和重力场特性 .....          | (29) |
| 2.1.1 地球的形状 .....              | (29) |
| 2.1.2 地球参考椭球的曲率半径 .....        | (31) |
| 2.1.3 地球重力场特性 .....            | (31) |
| 2.2 垂线及纬度的定义 .....             | (32) |
| 2.3 地球的自转及角速度 .....            | (33) |
| 2.4 惯性技术中常用坐标系 .....           | (34) |
| 2.4.1 惯性参考坐标系 .....            | (34) |
| 2.4.2 确定运载体相对地球表面位置的坐标系 .....  | (35) |
| 2.4.3 运载体和陀螺仪坐标系 .....         | (37) |
| 2.5 坐标变换及坐标系间的相互关系 .....       | (39) |

|       |                     |       |
|-------|---------------------|-------|
| 2.5.1 | 坐标变换                | (39)  |
| 2.5.2 | 常用坐标系之间的相互关系        | (43)  |
| 2.6   | 动量矩、动量矩定理及欧拉动力学方程   | (45)  |
| 2.6.1 | 定点转动刚体的动量矩          | (45)  |
| 2.6.2 | 动量矩定理               | (49)  |
| 2.6.3 | 刚体定点转动的欧拉动力学方程      | (51)  |
| 2.7   | 哥氏加速度、绝对加速度与比力方程    | (55)  |
| 2.7.1 | 哥氏加速度               | (55)  |
| 2.7.2 | 绝对加速度的表达式           | (58)  |
| 2.7.3 | 加速度计所测量的比力表达式——比力方程 | (60)  |
| 2.7.4 | 在地理坐标系上的绝对加速度分量     | (64)  |
| 2.8   | 惯性导航的基本原理           | (68)  |
| 2.8.1 | 平台式惯性导航的基本原理        | (69)  |
| 2.8.2 | 捷联式惯性导航的基本原理        | (71)  |
| 2.8.3 | 组合式惯性导航的基本原理        | (74)  |
| 第3章   | 硅微机械惯性仪表            | (79)  |
| 3.1   | 硅微机械加速度计            | (79)  |
| 3.1.1 | 概述                  | (79)  |
| 3.1.2 | 压阻式微加速度计            | (79)  |
| 3.1.3 | 电容式加速度计             | (93)  |
| 3.1.4 | 隧道式微机械加速度计          | (109) |
| 3.1.5 | 谐振式加速度计             | (120) |
| 3.1.6 | 热对流式加速度计            | (127) |
| 3.1.7 | 压电式加速度计             | (131) |
| 3.1.8 | 加速度计的单芯片多轴集成        | (134) |
| 3.2   | 硅微机械陀螺仪             | (150) |
| 3.2.1 | 概述                  | (150) |
| 3.2.2 | 框架式微机械陀螺仪           | (152) |

|       |                    |       |
|-------|--------------------|-------|
| 3.2.3 | 振动式微机械陀螺仪          | (161) |
| 3.2.4 | 加速度计陀螺仪            | (179) |
| 3.3   | 硅微型惯性测量组合          | (186) |
| 3.3.1 | 微惯性测量组合概述          | (186) |
| 3.3.2 | 硅微型惯性测量组合系统        | (187) |
| 3.3.3 | 单片 MIMU 技术         | (190) |
| 第 4 章 | 硅微惯性器件中的测试、标定及评价标准 | (193) |
| 4.1   | 硅微加速度计的测试与标定       | (193) |
| 4.1.1 | 硅微加速度计的静态性能测试      | (193) |
| 4.1.2 | 硅微加速度计的动态性能测试      | (210) |
| 4.1.3 | 加速度计的其他试验          | (213) |
| 4.2   | 陀螺仪的测试与标定          | (215) |
| 4.2.1 | 陀螺仪漂移测试            | (216) |
| 4.2.2 | 陀螺仪重力加速度试验         | (223) |
| 4.2.3 | 高过载试验              | (232) |
| 4.2.4 | 陀螺仪的环境试验           | (234) |
| 4.3   | 硅微惯性测量组合的测试        | (235) |
| 4.3.1 | 测试原理               | (235) |
| 4.3.2 | 惯性测量组合测试方法         | (240) |
| 4.3.3 | 影响测试精度的因素          | (248) |
| 4.3.4 | 测试结果的评估            | (249) |
| 4.4   | 硅微惯性器件评价标准         | (252) |
| 4.4.1 | 硅微加速度计的评价标准        | (252) |
| 4.4.2 | 陀螺仪的性能评价标准         | (254) |
| 4.4.3 | 惯性测量组合的评价标准        | (260) |
| 第 5 章 | 捷联惯导与组合导航技术        | (263) |
| 5.1   | 捷联式惯性导航            | (263) |
| 5.1.1 | 捷联惯导的发展            | (263) |

|       |                     |       |
|-------|---------------------|-------|
| 5.1.2 | 捷联式惯导的基本算法          | (264) |
| 5.1.3 | 四元数法及其在捷联式惯导中的应用    | (266) |
| 5.1.4 | 等效旋转矢量法             | (277) |
| 5.1.5 | 卡尔曼滤波算法在姿态解算中的应用    | (281) |
| 5.1.6 | 捷联惯性仪表配置中的冗余技术      | (284) |
| 5.1.7 | 捷联式惯导系统的初始对准        | (285) |
| 5.1.8 | 捷联式惯导系统的误差分析        | (287) |
| 5.2   | 微惯性测量组合及其一体化技术      | (287) |
| 5.2.1 | 微惯性测量组合及其一体化技术概念描述  | (287) |
| 5.2.2 | 基于有陀螺的嵌入式微惯性测量组合    | (288) |
| 5.2.3 | 基于无陀螺的微惯性测量组合单元     | (296) |
| 5.3   | GPS/INS 组合导航技术      | (306) |
| 5.3.1 | GPS 导航定位的基本原理       | (307) |
| 5.3.2 | GPS/INS 系统组合方式      | (310) |
| 5.3.3 | 深组合 GPS/INS 导航系统    | (311) |
| 附录 A  | $\pm 1g_0$ 试验可能的取向表 | (317) |
| 附录 B  | 单自由度陀螺仪单轴翻滚试验取向表    | (319) |
| 参考文献  |                     | (321) |

# 第 1 章

## 概 述

惯性技术是以牛顿惯性定律为基础,用以实现运动物体姿态和航迹控制的一项工程技术。一般说来,惯性技术是惯性导航技术、惯性制导技术、惯性测量技术、惯性元件、惯性系统与元件测试技术的总称。它是在经典陀螺力学基础上发展起来的,又是综合了当代最新科技成果的多学科、综合性实用尖端技术,在航空、航天、航海、兵器及许多其他方面获得了广泛应用。惯性技术在现代国防科学技术中占有十分重要的地位,并在许多民用领域中发挥越来越大的作用。

惯性导航是利用惯性敏感元件(陀螺仪、加速度计)测量载体相对惯性空间的线运动和角运动参数,在给定的初始条件下,输出载体的姿态参数和导航定位参数。惯性导航系统主要用于能人工操纵的载体上,如飞机、舰船等,其作用相当于一个测量装置。它将导航定位参数提供给驾驶员,使载体按一定的航线航行。它还可以将导航定位参数提供给自动驾驶仪,自动引导载体沿预定的航线到达目的地。惯性导航系统的工作不依赖于任何外界信息,是一种完全自主的导航方法,能全天候工作。

惯性制导的基本内容是研究如何将一个运载体(包括导弹、飞机、潜艇和宇宙飞船)从一个地方引导至另一个地方。惯性制导与其他制导方法(如雷达制导、天文制导等)的基本区别在于惯性制导是完全自主的。这就是说,导弹或潜艇可以在一个完全与外界条件及电磁波隔绝的假想“封闭”空间内实现精确导航。显然,这在军事上很有价值,因为这样做可以不受气候和电子干扰。惯性制导是这样来实现的:通过精密陀螺仪和加速度计测出运载体的旋转运动和直线运动信号,然后输送到飞行器上的模拟计算机或数字计算机中,再由计算机综合这些信号并对它们进行运算。计算机生成导弹的姿态控制系统和推进系统的指令,以实现运载器的惯性制导。

惯性导航系统的工作任务是通过惯性测量和计算给出载体的位置、速度和姿态信息，为驾驶员或飞行控制系统引导载体提供依据。惯性制导系统的工作任务则是根据惯性测量和计算出的实际导航参数，与事先装置的理想参数相比较，并按选定的规律进行计算处理，从而形成制导指令信息传送给姿态控制系统，对飞行轨道不断进行调整，直到命中目标。

惯性测量系统是在惯性导航系统基础上发展起来的，它与惯性导航系统的硬件结构相似，但在软件和方法上不同。它的定位精度更高，对惯性元件的要求更高，设备也更复杂、更昂贵。惯性测量系统可以完全自主、快速地测定经度、纬度、高度、方位角、重力异常和垂线偏差六个大地测量元素。这些特点不仅使它在军事上充分发挥作用，而且在大地测量、石油钻井定位、水下电缆敷设等民用领域得到了广泛的应用。

惯性元件是指陀螺仪和加速度计。陀螺仪用于敏感模拟坐标系相对理想坐标系的偏角或角速度，加速度计敏感载体沿某一方向的比力，它们是各类惯性系统中的核心部件。陀螺仪和加速度计的工作原理、结构及工艺等是惯性元件技术的主要内容。

惯性系统与元件的测试技术主要包括各种测试原理和测试设备，其作用是对惯性系统与元件进行标定、可靠性试验、性能测试等，主要是检验惯性元件与系统的各种性能。

惯性技术是为武器系统定向导航的关键技术。以陀螺仪、加速度计等惯性器件、惯性测量、惯性导航和惯性制导为主要研究内容的惯性技术，是用来实现载体姿态和轨迹控制的完全自主式的工程技术。

在现代航天技术中，惯性技术对实施精确打击有着特殊的地位。大量精确制导武器依靠机载惯性系统的精确定位、弹载惯性制导的精确导引和末制导的精确瞄准。在各种导航系统中，惯性导航/制导系统是可信赖、完全自主式的导航/制导系统。完全自主的惯性系统具有抗干扰能力，无论是精确导航和定位、武器制导和瞄准，还是在防区外精确打击，惯性系统都发挥了保障作用，甚至是关键作用。在当今现代化高技术战争中，惯性技术对武器系统实施精确打击有着不可替代的特殊地位。

导弹武器精确制导对惯性技术提出了更高的要求，必须重点发展精确制导武器，实现中远程精确打击和非接触作战；大力提高防空、反导、突防、电子和信息作战体系，加强局部作战区域的制空、制海和制电磁权的作战能力。惯性技术是加强武器系统和提高作战能力的关键技术。

## 1.1 惯性技术及其发展

惯性系统技术的发展和惯性元件技术的发展和相辅相成的, 惯性技术的历史始于对陀螺仪应用的探索。1852 年, 法国科学家傅科 (Foucault) 在一次关于“叙述地球运动的学术报告会”上指出: “轴水平放置的陀螺, 在自转的地球上力求使其自转轴与地球子午线保持一致。”利用这一原理, 傅科将一个主轴水平放置的陀螺转子支撑在两个平衡环中, 再配上简单的修正装置和阻尼装置, 试图使陀螺主轴保持在正北方向上, 从而制成了世界上第一台实验用陀螺罗经。从那时到现在, 惯性技术的发展经历了几个代表性的阶段。

航海的导航需要, 促进了陀螺仪在航海中的应用。最早能够实际应用的陀螺仪表是用于海上导航的陀螺罗经。1908 年, 安休茨 (Anschuts) 在德国、1909 年斯伯利 (Sperry) 在美国, 先后制成了用于舰船导航的陀螺罗经, 这可以作为陀螺仪应用技术形成和发展的开端。此后, 航向陀螺仪、陀螺垂直仪及自动驾驶仪等产品相继问世, 以满足火炮控制和航空业的需要。

早期的陀螺罗经在舰船摇摆和机动航行时产生很大的机动误差。1923 年, 德国青年科学家舒拉 (Schuler) 提出, 固有振荡周期为 84.4 min 的机械装置不受其在地球表面运动加速度的影响, 即“舒拉调谐原理”, 从理论和技术上完善了罗经的设计和结构。利用这一原理制成的陀螺罗经的导航精度得到很大提高。20 世纪 50 年代以后, 陀螺罗经的修正方法已由重力摆式发展为电磁摆式, 出现了电控罗经, 并在此基础上发展成为平台罗经。

陀螺仪在航空上的应用比航海稍晚些。从 20 世纪 20 年代起, 在飞机上相继出现了陀螺转弯仪、陀螺地平仪和陀螺方向仪作为指示仪表。20 世纪 30 年代中期, 在飞机驾驶仪中开始使用陀螺仪表作为敏感元件。到了 20 世纪 40 年代, 航空陀螺仪表趋向组合式, 相继出现了陀螺磁罗盘、全姿态组合陀螺仪和陀螺稳定平台。1942 年, 德国在二次世界大战中使用的 V-2 导弹上首次安装了用惯性敏感器组成的制导系统, 除了用陀螺仪测量和控制导弹的姿态外, 还应用了摆式积分陀螺加速度表测量导弹的纵向速度, 并控制发动机的关机时间。虽然 V-2 的惯性制导系统的精度不高, 但它是第一个可供实际使用的惯性制导系统, 为惯性器件的应用开辟了一个新领域。

陀螺 (仪) 和加速度计是惯性技术的两大关键器件。陀螺主要有液浮陀螺、动力调谐陀螺、静电陀螺、激光陀螺、光纤陀螺及半球谐振陀螺、石英音叉陀螺、微机械陀螺等。加速度计主要有摆式积分陀螺加速度计、石英挠性加速度计、液浮摆式加速度计、振梁式

加速度计、微机械加速度计等。

液浮陀螺、静电陀螺和动力调谐陀螺是目前应用广泛、技术成熟的3种自旋质量陀螺,具有惯性系统所要求的低噪声和低偏置误差。

在20世纪20年代初期,人们开始探索液浮支撑技术。到1956年,用铍材作为液浮陀螺的主要材料,大大提高了陀螺的工作稳定性。采用三浮支撑技术、精密温度控制、直流永磁同步电机等一系列措施后,陀螺漂移提高到 $0.001^{\circ}$ 量级。洛克威尔公司研制的G7B单自由度液浮速率积分陀螺零偏稳定性为 $0.001^{\circ}/h \sim 0.0005^{\circ}/h$ ,斯佩里公司研制的MKI Mod3单自由度液浮陀螺零偏稳定性为 $0.001^{\circ}/h$ 。由高精度液浮陀螺和液浮加速度计组成的稳定平台系统,在中远程导弹、飞机、舰船中获得了广泛应用,如“雷神”中程地-地导弹、“大力神”洲际地-地导弹、“北极星”及“海神”中程潜-地导弹、“Mx”陆基洲际导弹及“三叉戟”潜-地洲际导弹等。1958年“缸鱼”号潜艇从珍珠港附近潜入深海,依靠惯导系统穿过北极到达英国波特兰港,历时21天,航程8146 n mile (1 n mile=1852m)。这表明惯性导航技术在20世纪50年代已趋于成熟。

20世纪60年代初期,出现了比液浮陀螺仪结构简单、成本较低的动力调谐陀螺仪,由于其具有成本低、反应快、尺寸小的特点,因而在大多数战术和商业应用中占领了很大的市场。至20世纪80年代初,动力调谐陀螺已相当成熟。利顿公司为舰船惯性系统研制的高精度K-400动力调谐陀螺逐日漂移达 $0.003^{\circ}/h$ ,K-295捷联式动力调谐陀螺逐日漂移 $0.013^{\circ}/h$ 。目前,有些国家仍十分重视其发展,研究重点主要放在提高精度、动态性能和工作寿命,减小噪声与功耗,实现小型化和陀螺、线路一体化。利铁夫公司向市场推出的LKS-91陀螺系统产品,将陀螺、再平衡线路、信号处理电路、电源组合成一体,既有模拟输出,也有数字输出。动力调谐陀螺惯性导航与制导系统已在许多领域得到应用。以色列GONS火炮定向导航系统方位瞄准精度小于1密位(mil)( $1\sigma$ ),水平定位精度小于行程(CEP)的0.15%。

自20世纪50年代初期美国伊利诺斯大学A. Nordsick教授提出静电陀螺设想以来,静电陀螺技术有了飞速发展。美国霍尼韦尔公司研制的平台式静电陀螺SPIN-Gyro,常值漂移速度优于 $0.0004^{\circ}/h$ ,洛克威尔公司研制的捷联式静电陀螺随机漂移小于 $0.01^{\circ}/h$ 。霍尼韦尔公司1970年研制成功的AN/ASN-101平台式机载静电陀螺导航系统的定位精度为0.1 n mile/h,1976年将该系统改成标准化系统SPN-GEANS,主要装备B52战略轰炸机,系统长时间定位误差达0.02 n mile/h。增加专用软件后,SPN-GEANS可用于大地测量,称为

GEO-SPIN 精密标准静电陀螺大地测量系统,其水平和高程定位精度优于 0.5m。该系统可同时完成重力测量,相对重力测量精度  $2'' \sim 4''$ ,重复性为  $0.1'' \sim 0.5''$ 。奥特奈蒂克斯公司 1974 年研制成功静电陀螺监控器 (ESGM)。1979 年装备于第一艘三叉戟核潜艇。捷联式静电陀螺导航仪 MICRON 主要装备飞机和飞航导弹,其发展型 N2000 可供水面舰艇使用, N73H 捷联系统定位精度为 0.1 n mile/h。

20 世纪 70 年代,以静电陀螺仪构成的高精度平台式惯导系统进入实用阶段。由于科技的进步,使激光陀螺仪也达到惯性级精度,还相继出现了光纤陀螺仪和半球谐振陀螺仪。在此期间,还大力开展了捷联式惯导系统的研制工作。激光陀螺和光纤陀螺是没有自旋质量的固态陀螺。从 1961 年提出激光陀螺的概念至 1983 年进入批生产,研制周期长达 20 年。世界上生产激光陀螺的公司主要集中在美国,俄罗斯、日本、法国也有自己的产品。1983 年霍尼韦尔公司已经可以批量生产精度为  $0.003^\circ/\text{h}$  的激光陀螺。激光陀螺惯性导航系统已开始用于军事和民用领域。霍尼韦尔公司军用型组件式定位定向系统——MAPS 在海湾战争中应用效果很好。美国军用飞机标准惯性导航系统 H-764G,定位误差小于 0.54n mile/h,水平定位误差小于 3.3m。加拿大卡尔加里大学研制的测量型激光陀螺系统达到了测后定位误差小于 1m 的水平。光纤陀螺是全固态陀螺,目前采用的技术方案主要是干涉型和谐振腔型。近年来,干涉型光纤陀螺有了很大的发展,已进入生产阶段并投入使用。德国利顿技术公司研制的 LCR-92uAHRS 光纤陀螺捷联基准系统已于 1994 年取得美国联邦航空局 (FAA) 适航证,美国宇航局 (NASA) 已将 LCR-92H 用于训练宇航员用的改进型 T-38 教练机。日立公司研制的 HOFG-3 陀螺用于商用轿车导航系统, HOFG-3000 用于钻井测量,陀螺零位漂移为  $0.05^\circ/\text{h}$ 。利顿公司 1995 年公布的光纤陀螺新样机用于波音 777 飞机。闭环干涉型光纤陀螺在一定的环境条件下其偏值稳定性可达  $0.01^\circ/\text{h} \sim 0.005^\circ/\text{h}$ 。谐振腔型光纤陀螺采用一个短的闭环光纤作为谐振光波导,与干涉型光纤陀螺仪相比,具有体积小、成本低的优点,但目前精度较低。此外,深冷型光纤陀螺和布里渊环形激光陀螺也在研制中。

20 世纪 80 年代,以激光陀螺仪构成的捷联式惯导系统获得了工程应用,这是惯导技术发展的又一重大进步。捷联式惯导系统将惯性传感器直接固联于载体,用“数学平台”取代了复杂的陀螺机械稳定平台,因此,它具有结构简单、成本低等许多优点。当代计算机技术,尤其是微型计算机的优良性能,为捷联式系统提供了实时高效的运算工具;而光学陀螺仪的出现又为它提供了比较理想的敏感元件。因此,捷联式惯导系统具有十分广阔

的发展和前景。

20 世纪 90 年代以来, 继微米/纳米技术成功应用于大规模集成电路制作后, 采用微电子机械加工技术 (MEMT) 制造的各种微传感器和微机电系统 (MEMS) 脱颖而出, 平均年增长速度达到 30%。微机电系统是一项实用技术, 其真正价值在于, 有可能将简单的微结构技术同微电子技术相结合, 产生一种既能收集和传送信息, 又能按信息采取行动的机器。微结构传感器是微机电系统的重要组成部分, 而微结构惯性传感器又是微传感器中目前发展最快、最具有实用性的产品之一。

惯性导航和制导是上述各类高精度惯性器件在实际中的主要应用。平台式惯性系统广泛应用于航空、航天、航海及兵器、测量等领域。随着新技术的不断出现, 捷联式惯性系统已日益引起人们的重视并得到迅速发展, 在大量的战术武器上已采用捷联式惯性装置, 除了显著降低成本外, 在采用余度敏感器实现容错设计方面, 捷联式系统比平台系统更为有效。惯性组合系统是导航与制导系统发展的大趋势。应用一个或多个辅助敏感器, 如多普勒雷达、罗兰 C 导航系统、数字地图、星体跟踪器、大气数据计算机以及 GPS、GLONASS 等, 与惯性系统组合, 使陀螺漂移产生的位置误差达到有界, 从而提高系统的性能。惯性组合系统将向深组合、多传感器容错组合、多模态多功能组合及智能化方向发展。

经过近一个世纪的发展, 惯性技术已经发展成为集经典的基础理论和近、现代物理、自动控制、电子技术、精密工艺、精密测量、微电子及计算机于一体的、多学科的、综合性的尖端技术, 形成了一门重要的学科。

我国的惯性技术研究开始于 20 世纪 50 年代, 经历了从技术引进和对国外的惯性元件、仪表的仿制, 到改型提高和创新开发过程。经过多年艰苦不懈的努力, 自行研制的惯性传感器和惯性系统已经成功地应用于现代军事装备和国民经济领域中, 如各种型号的卫星准确入轨、洲际导弹精确命中目标, 以及核潜艇和测量船的精确导航定位均需要高新的惯性技术作为保证。目前, 从事惯性技术的科技机构和科技工作者, 正在为缩短与国际水平的差距而积极努力。

回顾惯性技术的发展历史, 它经历了从单个仪表至单一系统、综合系统的发展过程。本世纪初, 装甲军舰需要磁罗盘和六分仪以外的可靠的导航仪器, 因而陀螺罗经和航海时钟成为研制的热点, 陀螺产业开始形成。二次大战及战后, 导弹、卫星的出现及飞机、舰船和战斗车辆的发展, 为惯性技术的发展提供了原动力。现代精密制造工艺、计算机及大规模集成电路技术的飞速发展, 为惯性系统实现小型化及提高惯性敏感器的精度提供了技

术基础。随着高运算速度和大存储容量计算机的出现,以及现代控制理论的发展和误差处理技术的应用,使多传感器组合技术得以实现,从而体现了以惯性系统为主的综合信息管理的优越性。

## 1.2 硅微惯性技术及其发展

20 世纪 70 年代的惯性测量装置已经能满足大多数军用航空器、地面车辆等的导航、制导、稳定要求。其中的陀螺,无论是早期的滚珠轴承陀螺,还是后来发展起来的液浮陀螺、挠性陀螺和静电陀螺,都有一个共同的特点,就是采用高速转子。由于高速转子容易产生质量不平衡问题,容易受到加速度的影响,而且需要一段预热时间,转速才能达到稳定,因此研制没有高速转子的陀螺一直是人们极为关心的问题。另一方面,随着作战平台和武器系统的不断发展,其惯性导航系统、惯性制导系统及平台稳定系统对惯性测量装置提出了更高的要求,即减少系统的体积、质量、功耗、采购费用,增加可靠性(平均故障间隔时间),降低维修费用,从而减少其寿命周期成本。军用惯导系统和平台稳定系统更高的使用要求,以及“转子”陀螺本身不能克服的缺陷,促使非“转子”陀螺应运而生。这些新型陀螺,如激光陀螺、光纤陀螺等光子型陀螺、半球谐振陀螺、石英音叉陀螺、微机械陀螺等振子型陀螺,都摒弃了“转子”,实际上是一种具有陀螺功能的光电装置或机电装置。另一种惯性器件——加速度计也向振子型、光子型和电子型的方向发展。在这些新型惯性器件中,有一类惯性器件采用的原理或制造技术涉及 MEMS 技术,材料涉及单晶硅,因此本书将它们归为硅微惯性技术范畴。

### 1.2.1 硅微惯性仪表的主要特点

微机械惯性传感器是集微型精密机械、微电子学、半导体集成电路工艺等新技术于一身的世界前沿性新技术,它的出现将使惯性技术产生一次新的飞跃。硅微惯性器件的工作原理仍然是经典力学中的牛顿定律,但是与传统惯性器件相比较,具有无可比拟的优点。同时,微米量级的特征尺寸使其可以完成某些传统惯性传感器所不能实现的功能。

与传统惯性器件相比,硅微惯性器件的具有以下一些优点。

(1) 器件微型化、集成化,尺寸达到微米数量级,因而体积小,重量轻,成本低,适