

2009-2010

*Report on Advances in
Inertial Technology*

中国科学技术协会 主编
中国惯性技术学会 编著

惯性技术
学科发展报告

中国科学技术协会
中国惯性技术学会
编著

中国科学技术出版社



图书在版编目(CIP)数据

2009—2010 惯性技术学科发展报告/中国科学技术协会
主编;中国惯性技术学会编著. —北京:中国科学技术出版社,
2010.4

(中国科协学科发展研究系列报告)

ISBN 978-7-5046-5011-5

I. ①2… II. ①中… ②中… III. ①惯性导航—技术发展—
研究报告—中国—2009—2010 IV. ①TN96—12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 043190 号

本社图书贴有防伪标志,未贴为盗版。

中国科学技术出版社出版

北京市海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码:100081

电话:010-62173865 传真:010-62179148

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

科学普及出版社发行部发行

北京凯鑫彩色印刷有限公司印刷

*

开本:787 毫米×1092 毫米 1/16 印张:12.25 字数:294 千字

2010 年 4 月第 1 版 2010 年 4 月第 1 次印刷

印数:1—2000 册 定价:37.00 元

ISBN 978-7-5046-5011-5/N·40

(凡购买本社的图书,如有缺页、倒页、
脱页者,本社发行部负责调换)

2009—2010
惯性技术学科发展报告
REPORT ON ADVANCES IN INERTIAL TECHNOLOGY

首席科学家 丁衡高

顾问组 丁衡高 陆元九 汪顺亭

专家组

组长 徐 强

副组长 李立新 高钟毓 郑 辛

成员 (按姓氏笔画排序)

宋有山 任德民 陆志东 王 巍 周百令

房建成 赵小明 陈家斌 赵凯嘉

撰写专家 (按姓氏笔画排序)

丁 凯 于湘涛 王 巍 王志强 王常虹

邓忠武 冯丽爽 田 蕊 石志兴 任顺清

全 伟 刘 雨 刘 峰 刘为任 刘建业

刘繁明 吕志清 孙雨南 严小军 吴 涛

吴美平 吴黎明 宋春雷 张 兰 张 海

张亚崇 张春熹 张常云 张菁华 张新岐

张福礼 李 中 李佩娟 李荣冰 杜祖良

杨 军 杨立溪 杨远洪 沈晓蓉 陈家斌

陈淑芳 周 斌 周百令 尚克军 岳步江

房建成 林思刚 欧 黎 罗 晖 范耀祖

胡宝余 姜福灏 赵 龙 赵小明 赵克勇

赵晓萍 赵敦慧 凌林本 唐江河 徐 策

徐 超 徐晓苏 郭琳瑞 顾 英 高钟毓

黄磊 黄 巍 富 立 曾庆化 程建华

董景新 谢 玲 谢莉莉 詹双豪 赖际舟

熊 巍 熊 智 魏宗康

学术秘书 姜福灏 赵克勇 励晓妹 尹文媛

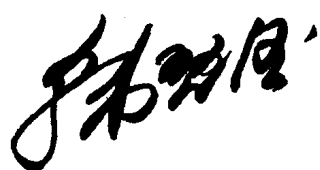
序

当今世界科技正处在一次新的革命性变革的前夜。人类迫切需要创新发展模式和发展途径,创新生产方式和生活方式,开发新的资源。这样的需求和矛盾,强烈呼唤着新的科学技术革命。而全球金融危机所带来的世界经济、产业格局的大变化,很可能会加快新科技革命的到来。学科创立、成长和发展,是科学技术创新发展的基础,是科学知识体系化的象征,是创新型国家建设的重要方面。深入开展学科研究,总结学科发展规律,明晰学科发展方向,对促进学科的交叉融合并衍生新兴学科,继而提升原始创新能力、加速科技革命具有重要意义。

中国科协自 2006 年开始启动学科发展研究及发布活动,连续完成了每个年度的学科发展研究系列报告编辑出版及发布工作。2009 年,中国科协组织中国气象学会等 27 个全国学会分别对大气科学、古生物学、微生物学、生态学、岩石力学与岩石工程、系统科学与系统工程、青藏高原研究、晶体学、动力与电气工程、工程热物理、标准化科学技术、测绘科学与技术、烟草科学与技术、仿真科学与技术、颗粒学、惯性技术、风景园林、畜牧兽医科学、作物学、茶学、体育科学、公共卫生与预防医学、科学技术史、土地科学、智能科学与技术、密码学等 26 个学科的发展研究,最终完成学科发展研究系列报告和《学科发展报告综合卷(2009—2010)》。

学科发展研究系列报告(2009—2010)共 27 卷,约 800 万字,回顾总结了所涉及学科近年来所取得的科研成果和技术突破,反映了相关学科的产业发
展、学科建设和人才培养等,集中了相关学科领域专家学者的智慧,内容深入浅出,有较高的学术水准和前瞻性,有助于科技工作者、有关决策部门和社会公众了解、把握相关学科发展动态和趋势。

中华民族的伟大复兴需要科学技术的强力支撑。中国科协作为科技工作者的群众组织,是国家推动科学技术事业发展的重要力量,应广泛集成学术资源,促进学科前沿和新学科的融合,推动多学科协调发展,广泛凝聚科技工作者智慧,为建设创新型国家做出新贡献。我由衷地希望中国科协及其所属全国学会坚持不懈地开展学科发展研究、学术史研究以及相应的发布活动,充分发挥中国科协和全国学会在增强自主创新能力中的独特作用,推动学科又好又快发展。

A stylized, handwritten signature in black ink, likely belonging to Chen Mofan, positioned above the date.

2010年3月

前 言

惯性技术具有自主、隐蔽、全天候、抗电磁干扰、实时、连续测量优点,可为载体提供角运动和线运动参数,从而在航空、航天、航海、陆地导航、大地测量、机器人等领域得到广泛应用。世界各国源于军事和民用的需求都十分重视惯性技术的发展和應用。

我国的惯性技术经历了从无到有、从弱到强、从落后到先进的发展历程,经历了创业、发展、创新三个阶段,取得了长足的进步。但与国际先进水平相比还有一定的差距,尚不能完全满足国防和国民经济建设对惯性技术的需求。随着科学技术的发展和社会的进步,惯性技术在国防和国民经济建设中的应用越来越多,要求越来越高。加快我国惯性技术的发展,明确发展方向和目标,是制定“十二五”惯性技术发展规划的重要内容之一。中国惯性技术学会作为我国惯性技术的学术共同体,利用跨地区、跨行业、人才荟萃的特点,有责任、有义务组织有关专家和学者研究我国惯性技术的发展问题,为国家和相关单位提供技术咨询服务。

2009年5月,中国科协批准中国惯性技术学会开展《惯性技术学科发展报告》(以下简称《报告》)的研究和编写工作。学会领导对此十分重视,于2009年6月召开了《报告》研究和编写工作会议,徐强理事长亲临指导和动员,发动和邀请了近百位专家和科研生产一线的学术带头人、技术骨干参加撰写工作,先后召开了三次工作会议和四次研讨会,并邀请有关专家和院士进行了两次评审。通过调研、座谈、研讨、形成此《报告》。

《报告》分为综合报告和专题报告两部分,全面分析、研究了近两年来国内外惯性技术的发展现状,阐述了惯性技术在各领域的应用及其成果,客观分析了未来发展趋势和与国外先进水平的差距,为加速我国惯性技术的发展提出了建议、措施和策略。《报告》对我国有关部门和单位编制惯性技术“十二五”发展规划将起到一定的参考、咨询作用;对深入学习实践科学发展观,更好、更快地发展我国惯性技术有着重要意义。

《报告》凝聚了广大专家、学者的辛勤劳动,得到了惯性技术领域多位院士的指导和帮助。借此机会向参与研究编写和指导的各位院士、专家、学者及工作人员表示衷心的感谢!

中国惯性技术学会
2010年1月

目 录

序	韩启德
前言	中国惯性技术学会

综合报告

惯性技术发展现状与趋势	(3)
一、引言	(3)
二、我国惯性技术学科领域所取得的进展	(4)
三、我国惯性技术与国外研究的水平差距	(12)
四、惯性技术未来发展趋势和展望	(22)
五、对我国惯性技术发展的措施与建议	(25)
参考文献	(26)

专题报告

陀螺技术发展现状与趋势	(31)
加速度计技术发展现状与趋势	(69)
惯性执行机构技术发展现状与趋势	(89)
惯性系统技术的发展现状与趋势	(97)
惯性基组合系统技术	(112)
惯性测试技术及设备的发展现状与趋势	(133)
惯性应用技术的发展现状与趋势	(145)

ABSTRACTS IN ENGLISH

Comprehensive Report

Overview of Present State and Trends for Inertial Technology	(177)
--	-------

Reports on Special Topics

Development and Survey on Gyroscope Technology	(178)
Development and Survey on Accelerometer Technology	(178)
Development and Trends of Inertia Actuator Technology	(179)
Development and Survey on Inertial System Technologies	(180)
Integrated Navigation System Technology Based On Inertial Technology	(182)
Advances in Testing Technology and Equipment	(183)
The Current Situation and Trend of Application Technologies of Inertial Systems	(184)

综合报告

惯性技术发展现状与趋势

一、引言

惯性技术是利用惯性原理和其他科学原理,自主测量和控制载体角运动、线运动参数的工程技术,包括惯性仪表、惯性系统以及利用它们实现导航、制导、控制、测量等功能的技术,属于交叉学科,涉及数学、力学、光学、原子物理学、材料学、精密机械学、电子技术、计算机技术、控制技术、测试技术、仿真技术、加工制造及工艺技术等多种学科和技术,主要研究惯性仪表和惯性系统的设计、制造、试验、应用、维护的相关原理和方法,广泛应用于航空、航天、航海、陆地导航及大地测量等领域。

惯性技术从最初的原理探究到如今的大量产品研发和应用,经历了漫长的发展历程,取得了跨越式的发展。17世纪,牛顿的力学定律和万有引力定律成为惯性技术的基本原理。1852年法国物理学家傅科发现了陀螺效应,1907年,德国科学家安修茨制造了第一个实用陀螺。1905年爱因斯坦提出狭义相对论后,1913年法国科学家萨格奈克发现了Sagnac效应,20世纪80年代,激光陀螺、光纤陀螺相继实用化,随后各种新型惯性仪表陆续问世。惯性系统以自主、隐蔽、全天候、抗干扰的突出优点,在航空、航天、航海等领域普遍被采用。时至今日,惯性技术已前进了一百多年,期间经历过许多激动人心的发展,从早期德国V2火箭制导采用的原始电子机械装置发展到现代交通工具采用的全固态导航装置,惯性技术和产品早已褪去神秘的面纱,在人们的生产和生活中得到普遍应用。仅以陀螺为例,从传统的浮子式陀螺发展到挠性陀螺、静电陀螺、激光陀螺、光纤陀螺、微机电陀螺等多个类型,在军、民两类市场的引导下,向着“缩减成本、减小体积、满足需求”的方向不断发展,作为研发领域非常活跃的两类产品,光纤陀螺和微机电陀螺以其低廉的价格和广泛的应用,成为未来技术发展的主要方向。利用卫星、星光、景象、地形、重力、地磁等外部信息,实现多传感器的智能信息融合,进一步提高了导航系统的精度和自主性,也使得惯性技术和产品在更多的领域得到应用和推广。

我国的惯性技术经历了从无到有、从弱到强、从落后到先进的发展历程,经历了创业、发展、创新三个阶段,取得了长足的进步,创造了一系列辉煌的成绩。我国自行研制的各类惯性产品已经广泛应用于国防建设和国民经济的各个领域。改革开放以来,惯性技术产品的需求快速增长,伴随着我国计算机技术、信息技术、微电子技术、新材料、新工艺等高新技术的不断进步,惯性技术产业迅猛发展,已成为最具活力的现代工程技术学科之一。

在以信息化为主要特征的21世纪,科技进步日新月异,祖国发展欣欣向荣,面对世界政治经济新形势、国家改革发展新需求,回顾历史,总结现在,展望未来,抓住机遇,进一步推动我国惯性技术的发展,扩大其在国防科技现代化建设和国民经济各领域中的广泛应

用,具有十分重要的意义。

本报告在对我国惯性技术发展历程进行简要回顾的基础上,全面研究近年来国内惯性技术的发展现状,阐述了惯性技术在各领域的应用成果,分析了国际惯性技术发展状况和与国外先进水平的差距,研究提出了未来几年内惯性技术的发展趋势,为加强我国惯性技术学科发展提出建议、措施和策略。

二、我国惯性技术学科领域所取得的进展

我国惯性技术的发展已有 50 余年的历史,经过几代人的不懈努力与奋斗,我国自行设计制造的导弹、卫星、飞船、飞机、舰艇、陆用车辆等所用的惯性仪表与系统已经投入应用。惯性仪表中的陀螺从气浮、挠性、液浮、静压液浮陀螺发展到三浮陀螺、静电陀螺、激光陀螺、光纤陀螺、微机电陀螺等;加速度计从机电式发展到微机械加速度计。惯性系统从早期的平台式惯性系统发展到捷联式惯性系统,从单一的自主惯性系统发展为惯性/多信息组合导航系统。惯性仪表及系统的性能越来越好,体积越来越小,应用范围越来越广。

目前,我国已经基本具备了研制、生产高、中、低精度惯性仪表及系统的能力和条件,由此构成的海、陆、空、天武器的精确打击能力越来越高。随着我国惯性技术的不断发展,各类适用于商业用途的惯性传感器及系统研发工作方兴未艾,相应的产品也正在逐步进入市场,这使得惯性技术为我国国民经济建设发挥的作用越来越大,特别是载人航天工程的圆满成功、探月工程的顺利实施,标志着我国惯性技术的发展已经具有相当的水平。

(一) 惯性仪表技术

惯性仪表技术包括陀螺技术与加速度计技术。按照工作原理的不同,陀螺技术主要分为:以液浮陀螺、三浮陀螺、动力调谐陀螺、静电陀螺为代表的机械转子陀螺技术,以激光陀螺、光纤陀螺为代表的光学陀螺技术,以半球谐振陀螺、微机械陀螺为代表的振动陀螺技术三大类,以及以微光机电陀螺、原子陀螺为代表的新型陀螺技术;按物理原理的不同,加速度计可分为摆式和非摆式两大类,在摆式加速度计里,根据用以平衡惯性力的方式的不同,又可以分为机械摆式加速度计和陀螺摆式加速度计。

在综合国力不断提升与基础工业快速发展的带动下,近年来,我国的惯性仪表技术取得了较大的发展与进步,主要表现在以下方面。

1. 转子陀螺技术

(1) 液浮陀螺技术

经过半个世纪的技术积累,我国液浮陀螺技术取得了长足的进步,在经历了从滚珠轴承电机技术到动压气体轴承电机技术、从磁滞电机技术到永磁电机技术、从普通宝石轴承定中技术到磁悬浮定中技术的发展历程后,液浮陀螺技术在基础材料(铍材料、复合材料)、支承技术(有源磁悬浮技术、半球支承技术、高密度浮液技术)、电气元件、精密温控等多方面取得了技术突破。

目前,我国自主研制生产的单自由度液浮陀螺、双自由度液浮陀螺、静压液浮陀螺、半

液浮陀螺都得到了全面发展,广泛应用于海、陆、空、天各个领域的导航、制导与稳定系统,在国防现代化中发挥了重要作用。

(2)三浮陀螺技术

我国已经掌握了动压气浮轴承技术和磁悬浮支承技术,在三浮陀螺温度场设计技术方面的研究工作也取得一定进展,建立了惯性仪表所需的铍材料加工生产基地,为我国高精度三浮陀螺的发展创造了必要的条件。此外,制约我国三浮陀螺精度水平进一步提高的惯性仪表精密加工及测试技术近年来也取得了进步。

目前,我国已研制出了弹用和船用两种类型三浮陀螺并开始应用,与国外先进水平的差距正在逐步缩小。

(3)动力调谐陀螺技术

近年来,我国的动力调谐陀螺技术围绕产品的优化设计、工艺完善,提高精度、增强环境适应性和性能稳定性、延长寿命、提高可靠性等方面开展工作并取得了丰富的研究成果。在动力调谐陀螺电机轴承的测试与装配技术、力矩器材料的研制与加工及热处理工艺技术、挠性接头的优化设计技术等方面解决了一批技术难题。目前,我国已经形成了动力调谐陀螺系列型谱,可满足高精度平台式惯性系统和捷联式惯性系统的应用需求,具体产品类型上也在不断推陈出新,以适应市场需求。

(4)静电陀螺技术

近年来,我国的静电陀螺技术在转子材料及加工技术、静电支承技术、真空维持技术、测角技术、屏蔽技术等方面取得突破的基础上得到了长足的进步,产品精度进一步提高;同时,开展了静电陀螺在多方面的应用研究,如静电陀螺三轴稳定平台、单轴稳定平台、海洋重力仪水平平台、静电陀螺寻北仪以及浪高仪等。

2. 光学陀螺技术

(1)激光陀螺技术

我国的激光陀螺技术已经成熟,并在航空、航天、陆用等多个领域得到了广泛应用。近年来,在低损耗光学镀膜技术、超精密光学加工与检测技术、超高真空获得技术、偏频技术、专用电路技术等方面都取得了较快的发展,相关的技术瓶颈得到突破,陀螺精度有了很大的提高,生产规模进一步扩大。

(2)光纤陀螺技术

我国中等精度的光纤陀螺技术基本成熟,并具备了一定的批量生产能力,高精度光纤陀螺技术已开始进入试用阶段,基于光纤陀螺的系统技术也取得了较大进展,光纤陀螺的批量应用具备了良好的基础。

3. 振动陀螺技术

(1)半球谐振陀螺技术

我国的半球谐振陀螺技术在静电激励技术、电容检测技术、幅度和相位误差控制技术、化学抛光技术、离子束调平技术、电极成膜技术、真空封装和真空保持技术等方面开展了大量的研究工作,取得了丰富的研究成果,解决了制约半球陀螺发展的技术瓶颈。

(2)微机电(MEMS)陀螺技术

近年来,我国的 MEMS 陀螺技术在多种微型传感器、微型执行器和微系统方面有了一定的基础和技术储备,已经初步形成设计、加工、封装、测试的系列平台,在微结构加工一致性和成品率、电路微型化以及产品的温度环境适应性方面进行了深入的研究,取得了一批研究成果,使实验室样机的技术性能指标有了进一步的提高。

4. 新型陀螺技术

(1) 光子晶体光纤陀螺技术

目前,国内已经开展光子晶体光纤陀螺技术的研究。在谐振型光子晶体光纤陀螺技术方面,采用 PCF 掺铒光纤代替传统的掺铒光纤以得到更稳定的光纤光源;采用 PCF 保偏光纤代替传统的保偏光纤得到更稳定的光纤环,并针对光子晶体光纤陀螺的稳定性和光子晶体光纤的抗辐射特性进行相关的理论和实验研究;在干涉式光子晶体光纤陀螺技术方面进行保偏光子晶体光纤陀螺的研究;研究谐振式空心光子晶体光纤陀螺中光的克尔效应,进行仿真试验。

(2) 微光机电(MOEMS)陀螺技术

近年来,我国在微光机电陀螺技术方面的研究取得了一定进展:开展了声表面波和光学读出相结合的微光机电陀螺技术方案的研究;完成了硅基和石英基微光机电陀螺实验样品的研制。开展了微腔结构 MOEMS 惯性仪表技术的研究,在硅基底上制作了微型谐振腔,在结构设计和工艺加工方面也取得了进展。

(3) 原子陀螺技术

目前,我国的原子陀螺技术处于原理探索和初步试验阶段。在原子干涉陀螺研究方面,采用连续冷原子束的空间型马赫-泽德干涉构型的原子陀螺技术,并进行了小型原子自旋陀螺/芯片、原子磁强计方面的理论研究;采用脉冲冷原子团的时间型马赫-泽德干涉构型的原子陀螺技术,已建成实验系统,实现了干涉效应,并开展了原子干涉重力仪的研究。

5. 惯性执行机构技术

在航天飞行器应用背景的推动作用下,我国的惯性执行机构技术近年来发展较快。基于机械轴承支承技术的飞轮式惯性执行机构已经成功应用于“风云”系列气象卫星,基于磁悬浮技术的飞轮和控制力矩陀螺的工程化应用及产品研制工作也已取得突破性进展。在以空间应用为目的的磁悬浮飞轮技术研究方面,国内的多所高校院所开展了一些卓有成效的研究工作,为高性能磁悬浮惯性执行机构的研制奠定了坚实的基础。以磁悬浮变速控制力矩陀螺技术、陀螺/飞轮一体化技术等为代表的先进惯性执行机构技术领域的研究工作也已经开展起来,与国际先进水平的差距正在不断缩小。

6. 加速度计技术

(1) 机械摆式加速度计技术

随着支承技术、检测技术等方面的研究不断深入,我国机械摆式加速度计技术日趋完善,包括液浮摆式加速度计、石英(硅)挠性加速度计、悬丝支承摆式加速度计在内的各种产品在不同的领域得到应用,尤以石英挠性加速度计的应用最为广泛。我国的石英挠性加速度计技术在建模与仿真、磁路、石英材料、伺服电子线路等基础技术方面,在产品的可

靠性和长期稳定性技术方面都开展了大量研究工作,取得了丰硕的成果;在生产工艺设施的建设方面也取得了长足的进步,产品的精度和可靠性得到了进一步提高;目前已经形成石英挠性加速度计的基本型、系列化产品,广泛应用于航天、航空、石油等多个领域,进入了大批量生产和拓展产品适用性阶段。

(2)陀螺加速度计技术

我国的陀螺加速度计技术伴随着我国战略武器系统的发展不断完善提高,经过多年研究,攻克了多项技术难点,已研制出以静压气浮、静压液浮、三浮三类陀螺加速度计系列产品并广泛应用。在材料技术方面已经实现了铍材料零件的研制与生产,在控制电路的集成化、小型化以及磁悬浮控制电路的智能化方面也有了很大的发展,产品的测试与标定技术也得到了提高。

近年来,随着基础工业水平的不断发展进步,我国的陀螺加速度计技术在仪表的精度、体积以及可靠性等指标方面进一步缩小了与发达国家间的差距。

(3)振梁加速度计技术

我国的石英振梁加速度计技术在设计技术、表头加工技术、激振与数字读出控制电路技术、集成技术、装配和测试技术等方面积累了丰富的经验,打下了坚实的基础,产品基本可以满足中精度惯性系统的使用要求。

国内已经开展了硅振梁加速度计的基础理论研究和原理验证工作,近年来主要围绕硅振梁结构设计和仿真技术开展了大量的研究工作,进行了谐振原理的研究,对谐振梁进行理论计算和模态仿真;实现了硅振梁加速度计技术的原理性验证,在硅振梁音叉的力—频率关系及非线性特性等技术领域进行了相关的研究。

(4)微加速度计技术

我国的微加速度计技术研究已经起步,近年来在微加速度计的微结构加工技术、产品的环境适应性技术、电路的小型化技术等方面开展了大量的研究工作,取得了一定的进展,产品的精度水平及可靠性得到了一定的提高。

(二)惯性系统技术

惯性系统技术主要包含平台惯性系统技术和捷联惯性系统技术;此外,以陀螺监控技术为代表的、为提高惯性系统精度而采取的误差分析补偿技术也是惯性系统技术研究的一个主要内容。

1. 平台式惯性系统技术

近年来,我国的平台式惯性系统技术在高精度及超高精度应用需求的牵引和新兴技术的推动下,得到了协调发展。目前,我国自主研发的两框架平台、三框架平台、四框架平台已经成功应用到运载火箭、战略战术导弹、飞机及民用设备上,多品种、系列化的产品研发、生产格局已经形成。

2. 捷联式惯性系统技术

我国捷联惯性系统技术取得了较快的发展;基于激光陀螺的捷联系统技术已经得到了规模应用,且应用领域正在不断扩大;基于光纤陀螺的捷联系统技术也已进入工程应用

阶段;基于 MEMS 陀螺和加速度计的捷联系统技术正处在重点研究突破阶段。

近年来,我国的捷联惯性导航系统技术在捷联惯性传感器技术、导航计算机技术、惯性器件误差标定和补偿技术、初始对准技术、捷联解算算法研究等方面开展了大量的研究工作,取得了长足的进展,捷联惯性导航系统的精度水平有了较大的提高。

3. 陀螺监控技术

近年来,我国在加装监控陀螺技术方面取得了突破性进展,对提高系统长期精度有显著作用,并具备很好的稳定性、可靠性和动态性能。在旋转平均技术方面也取得了进步,目前,国内的高精度长航时光学捷联惯导系统多采用该技术,使系统达到了较高的精度。

(三) 惯性基组合系统技术

惯性基组合系统技术是指以惯性技术为基准,以外界信息(卫星、地形、地磁、天文)为辅助的组合技术。主要包括惯性/卫星组合系统技术、惯性/地形组合系统技术、惯性/地磁组合系统技术、惯性/星光组合系统技术、惯性/视觉组合系统技术。

1. 惯性/卫星组合系统技术

作为一种典型的组合导航系统,惯性/卫星组合导航系统在我国受到了相当的重视。目前,在惯性/卫星组合导航的理论与算法研究方面与国外的差距已经不大。

2. 惯性/地形组合系统技术

近年来,我国在地形匹配理论、算法及仿真技术等方面进行了卓有成效的研究,取得了一批科研成果。我国自主开发的惯性/地形辅助导航系统已获得了成功应用。

3. 惯性/地磁组合系统技术

近年来,我国的地磁测量和地磁导航技术发展很快。在地磁匹配导航技术方面的研究已经起步,开展了相关技术的研究,取得了积极的成果。

4. 惯性/星光组合系统技术

近年来,我国空间技术、航海技术的发展推动了国内的星光导航技术进步,在星敏感器技术、星图识别技术、气动光学效应及抑制技术、CCD 技术等多个方面开展了大量的研究工作,取得了一批科研成果。目前,国内自主研发的多型星光导航系统已经成功应用于我国制造的卫星、舰船。

5. 惯性/视觉组合系统技术

我国的视觉导航技术处于起步阶段。在景象匹配技术方面,近年来获得了可喜的研究成果,且随着新的图像处理与匹配算法的出现又有了新的发展。在飞行器视觉姿态估计技术、视觉航路跟踪与着陆技术、视觉同时定位与地图创建技术方面也开展了大量的研究工作,在无人机、机器人等领域获得了应用。

(四) 惯性技术领域测试技术与设备

1. 惯性测试技术

惯性测试技术是研究如何通过测试设备获得惯性仪表及系统的技术参数、如何建立

模型方程以准确评价其性能以及如何通过误差补偿措施进一步提高产品精度的技术,是惯性仪表及系统研制生产过程中不可缺少的环节。当惯性仪表及系统生产量较大,可能导致性能在大范围内变化时,测试还可以对仪表和系统的性能进行分级,将他们列入合适的应用范围中。

(1)陀螺仪测试技术

测试设备的空间指向精度是国内陀螺伺服测漂试验的主要瓶颈之一。随着伺服测试转台的研制成功,国内逐渐加强陀螺伺服试验的研究,部分高校院所针对静电陀螺和静压液浮陀螺开展了伺服试验研究。

近年来,随着激光、光纤等光学陀螺的快速发展,一些主要针对这类陀螺的测试技术及设备相继出现,如带温控箱的速率位置转台。速率、位置实验用于测试标定零偏和标度因数。温度实验主要考察不同恒定温度以及不同温度梯度对陀螺仪输出特性的影响,用于标定陀螺中与温度有关的各个系数。

(2)加速度计测试技术

近年来,国内针对加速度计重力场多位置翻滚试验开展了大量的试验研究,同时研究了重力场试验设备误差的分离方法。目前,我国在加速度计重力场试验方法上与国外相比差距不大,但是在测试设备、实验室条件(如设备基础)建设方面落后于发达国家。

(3)惯性测量装置(IMU)级测试标定技术

近年来,我国在 IMU 的分立标定技术方面取得长足的进步,国内多家科研单位在通过速率试验改善陀螺安装误差的标定技术方面开展了大量的研究工作,在全参数一体化标定技术方面,分别实现了静态和线振动下惯性平台系统的参数一体化的标定方法,利用三组 6 位置静态测试的方法,以速度、姿态和位置作观测量,以系统误差作状态量进行卡尔曼滤波估计,再用解析方法分离出 24 项误差参数的测试标定方法。

(4)惯性系统级标定测试技术

随着我国惯性系统技术的发展,国内在惯性系统级标定测试技术方面也开展了大量的工作,在惯性平台系统的自标定技术、捷联惯性系统的辅助信息标定技术、故障和状态实时监测技术等方面都进行了较为深入的研究,并在工程上得到了应用。

2. 惯性系统测试及运动仿真设备

国内对惯性系统测试及运动仿真设备与技术的研究工作起步于 20 世纪 60 年代,与惯性系统测试设备相关的精密轴系、角度测量、低转速驱动与控制等专项基础技术在 20 世纪 90 年代取得突破,并建设了一批半实物仿真系统和惯性系统测试实验室。随着应用范围的拓展,惯性系统测试设备的种类和生产规模也逐步增加和扩大。

目前,我国已经具备研制包括各类转台、角振动台、线振动台、精密离心机、六自由度仿真设备、复合环境测试设备在内的所有惯性系统测试及运动仿真设备的能力。

(五)惯性系统应用技术

1. 航天领域

我国惯性技术发展历程与惯性技术在航天领域的应用情况密切相关,既得益于航天

领域需求的牵引,同时也推进了航天技术的发展。国内有多所高校与科研院所从事航天领域惯性技术研究与应用研究,研制了包括早期的气浮陀螺平台系统、动调陀螺平台系统及目前“神舟”系列飞船、新型导弹、运载火箭采用的惯性仪表在内的多型惯性系统,为我国航天与导弹事业的发展做出了卓越贡献。

目前,我国的火箭运载器用惯性系统正在经历从平台系统向捷联系统特别是光学陀螺捷联系统过渡的过程,捷联系统以其小体积、低重量、不受限制的全姿态机动能力、易于实现的冗余设计等特点,将越来越广泛地应用于运载火箭等具有超高可靠性要求的领域,为提高精度、减低成本而采用的组合导航技术也将得到越来越广泛的应用。

2. 航海领域

航海领域惯性系统的研制和发展源自潜艇的装备需要,其作用是为长期在水下潜航的潜艇连续提供安全航行和发射导弹所需的导航参数和艇体运动参数。潜艇采用惯性导航技术可以增强长时间隐蔽性,也可提高导弹发射的命中概率。此后,随着惯性导航系统成本的不断降低和中等精度舰船惯性导航系统的出现,许多载有导弹武器的水面舰艇也装备了惯性系统。

我国舰船惯性导航系统的发展始于 20 世纪 50 年代,经过了以基于传统机电陀螺仪的平台罗经、平台式惯导为代表的早期发展阶段,近年来在高精度系统方面取得了较大的进展,在追求性价比方面也进行了有益的尝试:液浮惯性导航系统精度不断提高,静电陀螺监控器技术日趋完善,激光惯性导航系统逐渐成熟,光纤罗经也已开始应用。

3. 航空领域

航空惯性导航系统是应军用飞机的需要研制发展起来的。随着 20 世纪我国自行研制的第一代机载惯导系统开始装备军用飞机,我国航空惯性技术的应用和研制水平得到了大幅提升。同时,以基于动力调谐陀螺的捷联惯导系统为核心,综合卫星、多普勒雷达及磁传感器等导航设备的信息,采用冗余配置和多传感器信息融合技术的惯性基组合导航系统也形成了系列化产品,应用于中低精度领域。

近年来,随着国内激光陀螺生产水平的不断提高和捷联惯性系统技术的不断进步,激光捷联惯导系统已完成定型并开始形成装备产品,以其准备时间短、快速反应能力强、导航精度高等优点成为新机型研制和老机型改造的首选惯导产品。随着新型载体对导航精度要求的不断提高,更高精度的航空惯导系统也已开始研制,以满足日益增长的长航时、高精度导航需求。

4. 陆用领域

陆用惯性导航系统是应现代地面战争条件下新的作战方式的要求而产生的,这种作战方式要求部队能在广阔的作战地域内快速准确机动,并能够迅速投入战斗;要求坦克、装甲战车等地面作战平台不仅要具有高机动性和运动中射击能力,还能够随时掌握自己、友军、敌军的位置以便协同作战;要求自行火炮之类的作战车辆必须具备频繁且随机地机动与快速瞄准射击的能力,并能够迅速转移到新的射击阵地。所有上述特征都需要地面作战平台具备地面自主导航能力,即在复杂的战场环境下、在无法依赖外部信息的条件下能够自主实时测量自身位置的变化,准确确定当前的位置,精确保持动态姿态基准。此