

惯性技术研究现状及发展趋势

王巍¹

摘要 基于惯性系统的运动信息动态精确测量技术是现代各类运载体制导与控制的基础, 惯性技术是在各种复杂环境条件下自主地建立运动载体的方位、姿态基准的唯一有效手段. 本文介绍了惯性技术的发展历程和近年来国内外惯性技术发展与应用现状, 阐述了惯性技术在主要领域的技术研究及应用成果, 分析了我国惯性技术与国际先进水平的差距, 展望了未来惯性技术的发展趋势.

关键词 惯性技术, 惯性导航, 陀螺仪, 加速度计

引用格式 王巍. 惯性技术研究现状及发展趋势. 自动化学报, 2013, 39(6): 723–729

DOI 10.3724/SP.J.1004.2013.00723

Status and Development Trend of Inertial Technology

WANG Wei¹

Abstract Dynamic precise measurement of movement information which is based on inertial system constructs the foundation of guidance and control of various vehicles. The inertial technology is the only independent means to establish the position and attitude reference of a vehicle. The roadmap of inertial technology as well as the application of current inertial technology at home and abroad is reviewed in this paper. At the same time, the research status and the main achievement of inertial technology are given. Moreover, the gap between the level in China and the international leading level of inertial technology is analyzed in the paper. Finally, the foreground of the inertial technology is described.

Key words Inertial technology, inertial navigation, gyroscope, accelerometer

Citation Wang Wei. Status and development trend of inertial technology. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(6): 723–729

1 惯性技术的重要作用及发展需求

惯性技术是惯性敏感器、惯性导航、惯性制导、惯性测量及惯性稳定等技术的统称, 是具有自主、连续、隐蔽特性, 无环境限制的载体运动信息感知技术, 是现代精确导航、制导与控制系统的核心信息源. 在构建陆海空天电(磁) 五维一体信息化体系中, 在实现军事装备机械化与信息化复合式发展的进程中, 惯性技术具有不可替代的关键支撑作用. 惯性技术是涉及到物理、数学、力学、光学、材料学、精密机械学及微电子、计算机、控制、测试、先进制造工艺等技术的一门综合性技术, 是衡量一个国家尖端技术水平的重要标志之一^[1].

惯性导航技术是惯性技术的核心和发展标志, 惯性导航系统(Inertia navigation system, INS) 利用陀螺仪和加速度计(统称为惯性仪表) 同时测量载体运动的角速度和线加速度, 并通过计算机实时解

算出载体的三维姿态、速度、位置等导航信息. 惯性导航系统有平台式和捷联式两类实现方案: 前者有跟踪导航坐标系的物理平台, 惯性仪表安装在平台上, 对加速度计信号进行积分可得到速度及位置信息, 姿态信息由平台环架上的姿态角传感器提供; 惯导平台可隔离载体角运动, 因而能降低动态误差, 但存在体积大、可靠性低、成本高、维护不便等不足^[2]. 捷联式惯导系统没有物理平台, 惯性仪表与载体直接固连, 惯性平台功能由计算机软件实现, 姿态角通过计算得到, 也称为“数学平台”. 惯导系统的基本方程(比力方程) 如式(1) 所示.

$$\dot{\vec{V}}_{ep} = \vec{f} - (2\vec{\omega}_{ie} + \vec{\omega}_{ep}) \times \vec{V}_{ep} + \vec{g} \quad (1)$$

式中, \vec{V}_{ep} 为载体的地速矢量, \vec{f} 是加速度计测量值(比力), $\vec{\omega}_{ie}$ 为地球转速, $\vec{\omega}_{ep}$ 为平台相对地球的转速, \vec{g} 为重力加速度, $2\vec{\omega}_{ie} \times \vec{V}_{ep}$ 为哥氏加速度项, $\vec{\omega}_{ep} \times \vec{V}_{ep}$ 为离心加速度项.

由于捷联系统中惯性仪表要承受载体角运动的影响, 故要求其动态范围大、频带宽、环境适应性好等, 对导航计算机的速度与容量要求较高. 捷联系统具有结构紧凑、可靠性高、质量轻、体积小、功耗低、维护方便、成本低等优点, 也便于与其他导航系统或设备进行集成化、一体化设计, 已成为现代惯性系统技术发展的主流方案^[3–4].

收稿日期 2012-12-31 录用日期 2013-01-09
Manuscript received December 31, 2012; accepted January 9, 2013

国家自然科学基金(61175098), 航天科技创新基金(CASC201102)资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (61175098) and Aerospace Science and Technology Innovation Fund (CASC201102)

本文为黄琳院士约稿

Recommended by Academician HUANG Lin

1. 北京航天控制仪器研究所 北京 100094

1. Beijing Aerospace Control Device Institute, Beijing 100094

与其他导航系统相比, 惯导系统同时具有信息全面、完全自主、高度隐蔽、信息实时与连续, 且不受时间、地域的限制和人为因素干扰等重要特性(见表1), 可在空中、水中、地下等各种环境中正常工作. 在导弹、火箭、飞机等需要机动、高速运行的运载体的导航、制导与控制(Guidance navigation and control, GNC)系统中, 惯性系统因其测量频带宽且数据频率高(可达数百赫兹以上)、测量延时短(可小于1ms), 易于实现数字化, 成为GNC系统实现快速、精确制导与控制的核心信息源, 其性能对制导精度起着关键作用, 例如, 纯惯性制导地地导弹命中精度的70%以上取决于惯性系统的精度. 同时, 惯性技术还促进了最优滤波技术等先进控制理论在工程中实际应用. 作为发达国家严加封锁的国防关键技术, 惯性技术是现代各类运载体GNC系统功能实现的基础, 是制导武器或武器平台的支撑性关键技术^[5-6]. 除军用以外, 目前惯性技术在民用领域也有大量应用, 如大地测量、石油钻井、隧道工程、地质勘探、机器人、智能交通、医疗设备、照相机、手机、玩具等. 因此凡是需要实时敏感或测量物体运动信息的场合, 惯性技术均可发挥重要作用^[7-8].

惯性导航系统的主要不足是导航误差会随时间积累, 且成本相对较高. 随着其他导航技术尤其是卫星导航技术, 如GPS技术的成熟和广泛应用, 研究人员曾担心惯导技术未来的前景. 但是几次高技术局部战争中, 电子战、导航战、体系化作战模式的出现证明了几乎仅有惯性导航系统都能在强电磁干扰的极端恶劣环境下持续、稳定地工作, 这进一步强化了惯性系统在武器装备中不可替代的地位^[9-10].

应用需求的日益发展, 对惯性技术不断提出了新的更高要求. 比如: 高精度长航时应用对惯性系统可靠性、精度及其保持时间的更高要求; 大动态低精度应用对量程、恶劣环境条件适应性的严苛要求; 宇航应用领域对惯性系统精度、寿命、轻质小型化、低功耗的新要求; 武器装备应用领域对带宽、测量范围、启动时间、环境适应性、长期免标定方面的高要求等. 这些需求对现代惯性技术提出了新的挑战, 也促使惯性技术专业的新原理、新方法、新技术不断

进步和创新^[11].

2 惯性技术的发展历程

惯性技术已经历了百余年发展历程, 主要事件如表2所示^[11].

陀螺仪和加速度计是惯性系统的核心仪表, 其技术指标直接影响GNC系统整体性能, 由于陀螺仪研制难度相对更大, 所以陀螺仪表技术一直是惯性技术的重要标志并受到格外重视. 从国内外发展来看, 干涉型光纤陀螺等新型陀螺仪表已逐步成为当今惯性技术领域的主导陀螺仪表之一, 并得到越来越普遍的应用. 在惯性系统发展方面, 因平台式系统方案可降低对陀螺和计算机性能的要求, 为早期实用化惯性导航系统的发展起到了关键作用; 到上世纪中后期, 随着微型计算机和先进惯性仪表尤其是高精度光学陀螺仪技术的进步, 捷联惯性系统得到了快速发展. 目前, 惯性仪表及系统产品正向着“高性能、小体积、低成本”的方向不断进步^[11].

3 惯性技术的研究现状

概括而言, 惯性技术的核心是要解决惯性仪表及惯性系统在不同应用环境因素(如高/低温、振动、冲击、电磁场干扰、低气压等)综合作用下的长期稳定性和动态测量精度问题, 这主要包括两类技术问题: 一类是克服内因性误差, 即工作原理与机、电、光材料及结构等因素引起的固有误差; 另一类是克服外因性误差, 即应用环境条件和干扰引起的误差.

3.1 惯性系统及其组合导航系统技术

早期的惯性系统主要是基于转子式陀螺的平台惯导系统, 在其关键的平台稳定回路中, 自适应控制等先进控制理论和数字化、智能化控制技术得到成功应用, 平台系统精度及综合性能大幅提高. 上世纪后期, 随着光学陀螺和微计算机技术的日益成熟, 以及先进的误差建模与辨识理论、滤波技术等捷联系统中的应用, 捷联惯性系统性能快速提高, 对平台式惯性系统一直处于统治地位的许多领域(如飞机、

表1 主要导航系统的特点对比

Table 1 Characteristic of different navigation systems

	惯性导航	无线电导航	天文导航	卫星导航系统
自主性	完全自主	非自主	完全自主	非自主
信息全面性	全面	不全面	不全面	不全面
导航误差	随时间积累	随作用范围增加	受气候影响	不随时间积累
抗干扰能力	强	弱	强	弱
实时导航能力	强	弱	弱	弱
成本	较高	较低	高	低

表 2 惯性技术领域主要学术理论、技术突破及应用事件

Table 2 Main theories, technical innovation and applications in the field of inertial technology

时间	主要事件
1687 年	牛顿 (Newton) 提出了力学三大定理, 奠定了惯性技术的理论基础
1765 年	欧拉 (Euler) 发表的《刚体绕定点运动的理论》, 奠定了转子式陀螺的理论基础
1835 年	哥里奥利 (Coriolis G G) 提出了哥氏效应原理, 奠定了振动陀螺仪的理论基础
1852 年	傅科 (Foucault J) 利用转子式陀螺敏感装置找到了当地北向和纬度, 在地球上验证了地球自转现象
1905 年	爱因斯坦 (Einstein) 提出狭义相对论, 成为光学及其他新型陀螺的理论基础
1908 年	安修茨 (Anschutz H) 在德国研制成功世界上第一台摆式陀螺罗经
1909 年	斯佩里 (Sperry) 在美国研制成功舰船用陀螺罗经
1910 年	舒拉 (Schuler) 发现了“舒拉调谐原理”, 并于 1923 年发表论文《运载工具的加速度对于摆和陀螺仪的干扰》, 进一步阐明了舒拉调谐原理的普遍性, 为现代惯性导航系统奠定了理论基础
1913 年	萨格奈克 (Sagnac) 提出 Sagnac 效应, 成为光学陀螺的基本原理
1942 年	德国在 V2 导弹上率先实现简易惯性制导; 同年美国德雷珀 (Draper) 实验室研制出液浮速率陀螺
1949 年	首次提出了捷联式惯性导航系统的概念
1958 年	美国 Nautilus 号潜艇依靠惯性导航系统在水下行驶 21 天, 成功穿越北冰洋
1959 年	美国利顿 (Litton) 公司制造出液浮陀螺, 并用于飞机与舰船惯导系统
1961 年	第一台 He-Ne 气体激光器问世, 1963 年, 激光陀螺诞生
1968 年	美国奥托内提克斯 (Autonetic) 公司研制出动压支承陀螺, 精度水平达到 $0.005^\circ/\text{h}$
1969 年	美国阿波罗 13 号飞船使用液浮捷联惯导技术, 捷联式惯导系统逐步得到广泛应用
1971 年	波特兹 (Bortz) 和乔丹 (Jordan) 首次提出用于捷联惯导的等效旋转矢量姿态更新算法, 为姿态更新的多子样算法提供了理论依据
1976 年	美国犹他 (Utah) 州立大学瓦利 (Vali V) 和肖特希尔 (Shorthill R) 首次完成了光纤陀螺的试验演示
1980 年后	激光陀螺惯性系统逐步投入使用并可批量生产, 微机电系统 (Micro-electro-mechanical system, MEMS) 领域的理论创新及技术突破为 MEMS 惯性器件的发展奠定了基础
1990 年后	光纤陀螺惯导系统逐步投入使用, 最优数据滤波理论及算法不断改进, 为惯性组合系统实现最佳数据融合创造了条件
2000 年前后	光学陀螺实现批量实用化, MEMS 惯性器件开始投入使用, 之后, 代表当今技术前沿的微光机电 (Micro-opto-electro-mechanical system, MOEMS) 陀螺、原子陀螺等新的陀螺仪表得到日益重视, 关键技术不断取得突破

火箭等) 形成了越来越强的竞争与冲击。目前, 光学陀螺及 MEMS 陀螺捷联系统已大量进入军民应用领域, 典型产品如美国 Sperry 公司的 MK39/49 舰船用激光捷联惯性导航系统, 法国 IXSea 公司先后研制的 PHINS 和 MARINS 船用光纤陀螺捷联惯导系统 (定位精度分别为 0.6 nmile/h 和 $1 \text{ nmile}/24 \text{ h}$ (Circular error probability, CEP)) 等^[12]; MEMS 惯性系统目前主要用于中低精度领域^[13-16]。

近年来, 采用旋转调制方式实现惯性系统误差自补偿技术的光学陀螺惯性导航系统受到普遍重视^[17], 如俄罗斯研制的船用“奥米加 (Omega)” 光纤陀螺单轴旋转惯性导航系统已在某些领域得到实用^[18]。美国则启动了战略核潜艇用高精度光纤陀螺惯导研制计划, 拟采用三轴旋转调制方案补偿光纤陀螺的相关误差, 以满足潜艇导航精度要求^[19-20]。国外陀螺监控技术也较成熟, 广泛用于现役潜艇及水面舰艇的惯性导航系统^[21]。

在组合导航技术及其应用方面, 目前的典型组合方式有以下几类^[22-25]:

1) 捷联惯性/卫星组合系统是目前军民领域应用最广泛的一种高精度低成本导航系统, 但在战场环境下卫星导航系统易受干扰。

2) 惯性/地形或景象匹配组合技术是提高军用飞机、无人机、巡航导弹等武器系统导航精度的重要手段, 在西方国家的许多战机、导弹上都有大量应用。

3) 惯性/星光组合技术已较成熟, 主要用于各类远程、高空、长航时的飞行器。

4) 惯性/地磁或重力场匹配组合技术是当前组合导航技术研究的热点之一, 美国已编制了全球磁力矢量分布图以实现空间、海洋尤其是海底的高精度地磁匹配自主定位。

其他的辅助导航设备还有无线电定位系统、大气数据系统、测速仪/里程计等。为获得更佳的综合性能, 实际中往往同时采用多种设备与惯性系统进行组合, 并利用 Kalman 滤波等最优数据融合手段使各系统充分实现优势互补, 这也使惯性领域成为 Kalman 滤波技术最早得到成功应用的领域之一。为进一步改善实用性能, 随后的自适应滤波、联邦滤

波、 H_∞ 滤波、小波滤波、神经网络等新型滤波技术也在组合导航系统、初始对准尤其是传递对准中得到研究和应用^[26-28]。

另外,为使惯性系统得到推广应用并降低成本,国外的惯性技术产品基本实现了货架化、通用化、系列化,如今国外研制的多类飞机、舰船用标准化光学陀螺捷联惯性系统已在许多国家的军民领域得到普遍采用。

3.2 陀螺仪表技术

1) 转子陀螺技术

国外的单轴液浮陀螺精度已达 $0.001^\circ/\text{h}$ (1σ), 采用铍材料浮子后可优于 $0.0005^\circ/\text{h}$ (1σ), 高精度液浮陀螺主要用于远程导弹、军用飞机、舰船和潜艇导航系统中, 中精度液浮陀螺则在平台罗经、导弹、飞船及卫星中得到应用; 国外还发展了三浮陀螺并应用于战略武器和航天领域, 如美国远程导弹制导用浮球平台系统中三浮陀螺的精度优于 $1.5 \times 10^{-5}^\circ/\text{h}$ (1σ); 因工艺及成本等因素的影响, 国外浮子陀螺应用领域正在逐步被新型陀螺替代。动调陀螺具有体积小、重量轻、成本低等优点, 是转子陀螺技术上的重大革新且已得到广泛应用, 国外产品精度可达 $0.001^\circ/\text{h}$ (1σ)。静电陀螺是公认的精度最高的转子陀螺, 典型精度一般在 $10^{-4} \sim 10^{-5}^\circ/\text{h}$ (1σ) 水平, 目前主要用于潜艇等高精度军用领域^[29]。

2) 光学陀螺技术

1975 年, 美国 Honeywell 公司研制出机械抖动偏频激光陀螺, 激光捷联惯性导航系统真正进入了实用阶段, 之后美国又研制出了无机机械抖动的四频差动激光陀螺。激光陀螺良好的标度因数精度及综合环境适应性能, 使其在飞机、火箭等许多领域得到普遍应用, 开始了对转子式陀螺的替代。

1996 年后, 全固态结构、全数字、低功耗的光纤陀螺在国外进入工程应用阶段, 至今已趋于成熟, 覆盖了高、中、低精度范围, 并在海陆空天各领域获得应用, 高精度产品的精度可达到 $0.001^\circ/\text{h}$ (1σ) 的水平^[30-33], 尤其在空间飞行器、舰船等领域有独特应用优势, 在新研制的惯性系统中日益得到广泛采用。光子晶体光纤和聚合物材料等新材料、新技术的应用正在推动光纤陀螺不断向高精度、小型化方向发展。光纤陀螺已成为更新换代的新一代主流陀螺仪表^[30-31]。

3) 振动陀螺技术

20 世纪 80 年代, 美国 Delco 公司研发出了半球谐振陀螺, 它具有质量轻、紧凑、寿命长等优点, 但对材料及精密加工方面要求较高, 目前在海外航天领域有少量应用^[34-35]。

基于 MEMS 工艺的振动陀螺一般可分为石英音叉陀螺和硅微机械陀螺。国外自 1990 年开始生产石英音叉微陀螺, 目前可批量生产。硅微机械面振动

式 MEMS 陀螺经补偿后性能已达到 $1 \sim 10^\circ/\text{h}$ (1σ), 允许的环境温度可达到 $-40^\circ\text{C} \sim 85^\circ\text{C}$, 并可承受强冲击^[36]。BAE 公司研制的谐振环式 MEMS 陀螺性能已达到 $2^\circ/\text{h}$ (1σ)^[37]。2010 年 4 月, 由 3 个硅 MEMS 陀螺构成的速率传感器组合 SiREUS (重量 750 g, 功耗 6 W) 首次在欧空局极地冰层探测卫星 (CryoSat-2) 上作为姿态测量装置得到成功应用, 精度达到 $10 \sim 20^\circ/\text{h}$ (3σ)^[38], 国外硅 MEMS 陀螺在战术武器等中、低精度领域已有批量应用^[39-40]。

4) 新型陀螺技术

近年来, 国外加大了对光子晶体光纤陀螺、MOEMS 陀螺、原子陀螺等新型陀螺的研究力度, 并获得了新的进展。美国将基于冷原子干涉技术的原子惯性仪表技术视为下一代主导型惯性仪表, 斯坦福大学开发的原子陀螺和原子加速度计精度 (1σ) 分别达到 $6 \times 10^{-5}^\circ/\text{h}$ (1σ) 和 $10^{-10} g$ (1σ) 水平, 并希望研制出 5 m/h 的超高精度惯性导航系统^[41-42]。美国还对 MEMS 原子器件进行了研究, 为实现高灵敏度的微小型原子自旋陀螺创造了条件, 目前原理样机的零漂已达 $0.01^\circ/\text{h}$ (1σ) 的水平^[43]。光子晶体光纤陀螺使用光子晶体光纤绕制光纤环, 可显著提升陀螺性能、尤其是环境适应能力。谐振式光纤陀螺也可采用空芯光子晶体光纤消除寄生的误差信号, 提高精度。MOEMS 陀螺的技术关键是实现高质量的微型激光谐振腔, 这些新型陀螺目前基本处于原理探索或样机研制阶段。

3.3 加速度计技术

石英挠性加速度计是机械摆式加速度计的主流产品, 精度可达 $10^{-6} g$ 水平, 技术已成熟且应用最广。摆式积分陀螺加速度计 (Pendulous integrated gyro accelerometer, PIGA) 则利用陀螺力矩平衡惯性力矩的原理来测量加速度, 精度可达 $10^{-8} g$, 在现有加速度计中精度最高, 但结构复杂、体积大、成本高, 主要用于远程导弹等领域。体积小巧的中低精度石英振梁加速度计利用谐振器的力-频率特性来测量加速度, 在国外已有大量应用; 高性能谐振式陀螺加速度计样机的偏置达 $1 \mu g$ 量级, 标度因数精度达 1 ppm 水平, 是今后高精度加速度计的有力竞争者^[44-45]。

目前, 微型加速度计有多种技术方案, 如 MEMS、MOEMS、原子加速度计等, 都要利用集成电路、微机械加工、微弱信号检测等关键工艺和技术。国外中低精度硅 MEMS 加速度计日益成熟, 并大量用于战术武器及民用领域, 目前正在研究更高性能的产品, 其他新型微加速度计也处在研发阶段^[46-47]。

3.4 惯性执行机构技术

惯性执行机构可认为是一种特殊的惯性装置, 主要包括飞轮 (动量轮) 和控制力矩陀螺两类, 主要

用作空间飞行器姿态稳定/控制系统的执行机构, 大扭矩、长寿命、高精度、高可靠是其重点发展方向, 采用磁悬浮轴承是其关键技术途径, 西方国家在该领域有 50 多年的研究历程, 目前已达到较高水平, 如法国 1986 年在“SPOT”卫星上首次采用了磁悬浮飞轮, 成功实现了高精度定姿和定向. 目前的研究方向包括新型磁悬浮、姿控/储能一体化、多自由度控制、陀螺/飞轮一体化等技术.

3.5 我国惯性技术现状

我国惯性技术的发展从无到有, 已取得很大进步, 为我国航天、航空、航海事业及武器装备的发展提供了关键的技术支撑, 做出了重大贡献, 如今已成为控制工程领域最具活力的现代工程技术学科之一. 因受材料、微电子器件、精密及微结构加工工艺等基础工业水平的制约, 我国转子式陀螺及 MEMS 惯性仪表与国际先进水平之间还有一定差距, 体现在仪表的精度、环境适应性、产品成品率及应用水平等方面. 在光学陀螺技术方面, 国内激光陀螺研制从上世纪 70 年代起步, 经过多年发展也已经达到国际先进水平, 在飞机、火箭等多个领域得到成功应用. 在国内光纤通信和光电子器件发展基础上, 我国光纤陀螺发展较早, 进步较快, 目前光纤陀螺性能和应用均已达到国际先进水平^[48-50]. 国内在 MOEMS 陀螺研究方面开展了硅基和石英基样机的研制, 在光子晶体光纤陀螺、原子陀螺、微加速度计等新型惯性仪表方面正加紧原理探索和试验研究, 目前均取得了新的进展.

在惯性系统及组合导航系统方面, 通过深入研究相关理论及误差机理, 我国相关产品综合技术水平近年来取得了显著进步, 在许多领域得到了推广应用, 今后还需在产品的环境适应性、产品一致性、参数长期稳定性等方面不断改进, 同时着力提高惯性仪表水平, 加大对系统误差机理与建模、误差系数精确标定、快速对准、先进导航算法与最优滤波等技术的研究力度, 尤其是惯性导航/卫星导航深组合、地磁场及重力场匹配定位等导航技术方面. 我国对惯性导航系统旋转调制、监控陀螺 H 调制等技术的研究相对较深入, 近年来取得了长足进展, 但在监控陀螺多位置测漂等技术方面的研究还有待加强.

国内惯性执行机构的研究起步相对较晚, 现有航天器主要采用滚珠轴承飞轮, 磁悬浮轴承技术已获得突破, 目前正处于应用研制和搭载试验阶段^[51].

4 惯性技术的发展趋势及展望

各类运动载体对导航、制导与控制系统越来越高的要求是惯性技术进步的主要动力. 根据国内外惯性技术的最新发展及应用情况^[52], 惯性技术的发展趋势可归纳为以下几个方面:

1) 惯性仪表及配套元器件技术: 现有转子式、光学陀螺等惯性仪表及配套元器件的精度、可靠性

等性能还需要进一步提高. 新概念惯性仪表不断提出, 如光子晶体光纤陀螺、MEMS 陀螺、集成光学/MOEMS 陀螺、原子干涉/自旋陀螺及多类新型加速度计等, 研究重点是新原理、新方法、新工艺. 总的来看, 惯性仪表正不断向更高精度(如原子陀螺)、更小型化(如 MEMS 陀螺)等方向发展.

2) 惯性系统技术: 为不断提升竞争力, 惯性系统正向着高精度、小体积、抗恶劣环境、快速启动、标准化、货架式方向发展, 关键技术包括系统的数字化、集成化、通电快速热稳定及动态快速对准(含自主对准和传递对准)等技术^[53-54]. 平台式惯性系统需充分利用最新控制理论和控制技术来进一步改善其稳定回路的性能; 捷联式系统将越来越多地采用数字化固态惯性仪表和系统集成一体化、先进数据滤波等技术, 使其综合性能不断提高. 另外, 随着深空探测任务的逐步实施和惯性技术水平的不断提高, 今后的研究还包括月球、火星等地球外星球表面和行星际航行的惯性导航理论、误差模型及工程实现技术.

3) 惯性测试与试验技术: 测试技术是准确标定惯性仪表及系统误差系数、提高惯性系统使用性能的关键技术, 深入研究误差机理、探索新的测试方法(如国外已有的系统全参数一体化测试方法等)并研制先进而精密的测试设备, 是惯性技术持续发展的重要基础和保障. 试验技术是验证、确认惯性技术产品性能的主要途径, 尤其是各类地面的精度或环境试验、实物/半实物仿真试验等, 是确保航空、航天产品性能天地一致性并最终完成任务的关键环节. 因此不断提高测试和试验技术水平是惯性技术发展的一个重要趋势^[55-57].

4) 新器件和新材料应用技术: 采用新器件、新材料向来是提高惯性仪表及系统性能的重要手段, 比如热、比刚度特性优异的铍材的应用, 使转子式陀螺和惯导平台系统的性能大幅提升; 美国 GP-B 探测卫星用于验证广义相对论效应, 所用静电陀螺的球体采用纯天然熔融石英后, 精度指标达到前所未有的 $10^{-11}^{\circ}/h$ 的水平^[58]; 而光纤陀螺目前正逐渐采用光子晶体光纤等. 所以应关注并发展各类新器件、新材料技术, 用来推进惯性技术的跨越式发展.

5) 横向领域的推广与应用技术: 其他学科技术的发展一直是惯性技术发展的重要基础, 如控制理论、精密加工、微电子、光电子、MEMS 等技术对惯性技术发展的推动作用十分明显; 而惯性技术的成果同时也可推广应用于其他工业领域, 如光纤电流互感器、光纤水听器等动态测量与控制设备在许多工业部门都有重要应用前景和推广价值.

References

- 1 King A D. Inertial navigation-forty years of evolution. *GEC Review*, 1998, 13(3): 1-15
- 2 Lu Yuan-Jiu. *Inertial Device (I & II)*. Beijing: China Astro-

- nautic Publishing House, 1990. 1–121
(陆元九. 惯性器件 (上、下). 北京: 宇航出版社, 1990. 1–121)
- 3 Qin Yong-Yuan. *Inertial Navigation*. Beijing: Science Press, 2006. 3–42
(秦永元. 惯性导航. 北京: 科学出版社, 2006. 3–42)
 - 4 Titterton D H, Weston J L. *Strapdown Inertial Navigation Technology (Second edition)*. UK: The Institution of Electrical Engineers, 2004. 1–7
 - 5 Wan De-Jun. Prospect of FOG's application in marine navigation. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2002, **10**(1): 1–5
(万德钧. 展望 FOG 在舰艇导航中的应用. 中国惯性技术学报, 2002, **10**(1): 1–5)
 - 6 Gyurosi M. Russia develops strapdown inertial systems for missiles. *Jane's Missiles and Rockets*, 2006
 - 7 Luo Bing, Wang An-Cheng, Wu Mei-Ping. A drive control scheme based on phase-control for silicon micromechanical gyroscopes. *Acta Automatica Sinica*, 2012, **38**(2): 206–212
(罗兵, 王安成, 吴美平. 基于相位控制的硅微机械陀螺驱动控制技术. 自动化学报, 2012, **38**(2): 206–212)
 - 8 Lee P M, Jun B H, Choi H T, Hong S W. An integrated navigation systems for underwater vehicles based on inertial sensors and pseudo LBL acoustic transponders. In: Proceedings of the 2005 MTS/IEEE. South Korea: IEEE, 2005. 555–562
 - 9 Bi Lan-Jin, Liu Yong-Zhi. The application and development tendency of precision guided weapon in modern war. *Tactical Missile Technology*, 2004, (6): 1–4
(毕兰金, 刘勇志. 精确制导武器在现代战争中的应用及发展趋势. 战术导弹技术, 2004, (6): 1–4)
 - 10 Schmidt G T. INS/GPS technology trends. *Advances in Navigation Sensors and Integration Technology*, 2008
 - 11 Wang Wei. *Fiber Optic Gyroscope Inertial Navigation System*. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2010. 1–212
(王巍. 光纤陀螺惯性系统. 北京: 中国宇航出版社, 2010. 1–212)
 - 12 Ixsea Military Fiber Optic Gyroscope Technology, Navigation sensor systems [Online], available: <http://www.armedforces-int.com/Suppliers/Ixsea.html>, November 11, 2012
 - 13 Lim Y C, Lyou J. Transfer alignment error compensator design using H_∞ filter. In: Proceeding of the 2002 American Control Conference. Anchorage, AK: IEEE, 2002. 1460–1465
 - 14 Feng Shao-Jun, Yuan Xin. H_∞ filtering and its application in INS ground alignment. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 1998, **30**(4): 383–387
(冯绍军, 袁信. H_∞ 滤波及在惯导地面自对准中的应用. 南京航空航天大学学报, 1998, **30**(4): 383–387)
 - 15 Carvalho H, del Moral P, Monin A, Salut G. Optimal nonlinear filtering in GPS/INS integration. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1997, **33**(3): 835–850
 - 16 Aggarwal P, Syed Z, El-Sheimy N. Hybrid extended particle filter (HEPF) for integrated civilian navigation system. In: Proceedings of the 2008 Symposium on Position, Location, and Navigation. Monterey, CA: IEEE, 2008. 984–992
 - 17 Yang Guo-Liang, Wang Wei, Xu Ye-Feng, Feng Pei-De. Research on installation error analysis and calibration for LSINS based on rotation modulation. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, **32**(2): 302–308
(杨国梁, 王玮, 徐烨烽, 冯培德. 旋转调制式激光捷联惯导安装误差分析与标定. 仪器仪表学报, 2011, **32**(2): 302–308)
 - 18 Products of Fiber-Optic Inertial Navigation System "OMEGA" in the State Research Center of the Russian Federation – Concern CSRI Elektropribor, JSC. 30, Malaya Posadskaya Str., Saint Petersburg, Russian [Online], available: http://www.elektropribor.spb.ru/prod/rmiins_vog_3, June 21, 2012
 - 19 Li Wen-Bai, Liu Ming-Yong, Li Hu-Xiong, Chen Xue-Yong. Localization performance analysis of cooperative navigation system for multiple AUVs based on relative position measurements with a single leader. *Acta Automatica Sinica*, 2011, **37**(6): 724–735
(李闻白, 刘明雍, 李虎雄, 陈学永. 基于单领航者相对位置测量的多 AUV 协同导航系统定位性能分析. 自动化学报, 2011, **37**(6): 724–735)
 - 20 Morrow R B Jr, Heckman D W. High precision IFOG insertion into the strategic submarine navigation system. In: Proceedings of the 1998 Symposium on Position Location and Navigation. Palm Springs, CA: IEEE, 1998. 332–338
 - 21 Liu Fei, Ma Lin. Status quo and trends of marine inertial navigation technology. *Shipbuilding of China*, 2011, **52**(4): 282–293
(刘飞, 马林. 舰艇惯性导航技术现状及发展趋势. 中国造船, 2011, **52**(4): 282–293)
 - 22 Hassanain M A, Reda Taha M M, Noureldin A, El-Sheimy N. Automization of an INS/GPS integrated system using genetic optimization. In: Proceedings of the 5th International Symposium on Intelligent Automation and Control Seville. Spain, 2004. 347–352
 - 23 Caron F, Duflos E, Pomorski D, Vanheeghe P. GPS/IMU data fusion using multisensor Kalman filtering: introduction of contextual aspects. *Information Fusion*, 2006, **7**(2): 221–230
 - 24 Hide C, Moore T, Smith M. Adaptive Kalman filtering for low-cost INS/GPS. *Journal of Navigation*, 2003, **56**(1): 143–152
 - 25 Mooij E, Chu Q P. Tightly-coupled IMU/GPS re-entry navigation system. In: Proceedings of the 2002 AIAA Guidance Navigation and Control Conference and Exhibit. Monterey, CA, 2002
 - 26 Loebis D, Chudley J, Sutton R. A fuzzy Kalman filter optimized using a genetic algorithm for accurate navigation of an autonomous underwater vehicle. In: Proceedings of the 6th IFAC. 2003
 - 27 Ahn H S, Won C H. Fast alignment using rotation vector and adaptive Kalman filter. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, **42**(1): 70–83
 - 28 Zhao Lin, Wang Xiao-Xu, Ding Ji-Cheng, Cao Wei. Overview of nonlinear filter methods applied in integrated navigation system. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2009, **17**(1): 46–52, 58
(赵琳, 王小旭, 丁继成, 曹伟. 组合导航系统非线性滤波算法综述. 中国惯性技术学报, 2009, **17**(1): 46–52, 58)
 - 29 Yu H, Yang T C, Rigas D, Jayawant B V. Modelling and control of magnetic suspension systems. In: Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Control Applications. Glasgow, UK: IEEE, 2002. 944–949
 - 30 Wang Wei. *Interferometric Fiber Optic Gyroscope Technology*. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2010
(王巍. 干涉型光纤陀螺仪技术. 北京: 中国宇航出版社, 2010)
 - 31 Sanders G A, Szafraniec B, Liu R Y, Laskoskie C L, Strandjord L K, Weed G. Fiber optic gyros for space, marine, and aviation applications. *SPIE*, 1996, **2837**: 61–67
 - 32 Pavlath G A. Fiber optic gyros: the vision realized. In: Proceedings of the 18th International Conference on Optical Fiber Sensors, 2006
 - 33 Divakaruni S P, Sanders S J. Fiber optic gyros: a compelling choice for high precision applications. In: Proceedings of the 18th International Conference on Optical Fiber Sensors Conference, 2006
 - 34 Rozelle D M. The hemispherical resonator gyro: from wineglass to the planets (AAS 09-176). In: Proceedings of the 19th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting. AIAA, 2009

- 35 Lynch D D. HRG development at Delco, Litton and Northrop Grumman, Anniversary Workshop at Yalta. In: Proceedings of the 2008 Anniversary Workshop at Yalta. Ukraine, 2008. 19–21
- 36 Hanse J G. Honeywell MEMS Inertial Technology & Product Status. In: Proceedings of the 2004 Symposium on Position Location and Navigation, 2004, 43–48
- 37 Gription A. The application and future development of a MEMS SiVS[®] for commercial and military inertial products. In: Proceedings of the 2002 Symposium on Position Location and Navigation. Palms Springs, CA: IEEE, 2002. 28–35
- 38 Benedict Olivier. The SiREUS MEMS rate sensor program. In: Proceedings of the 59th IAC International Astronautical Congress. Glasgow, Scotland, UK, 2008
- 39 Wang Wei, He Sheng. Development of MEMS inertial instrument technology. *Missiles and Space Vehicles*, 2009, (3): 23–28
(王巍, 何胜. MEMS 惯性仪表技术发展趋势. 导弹与航天运载技术, 2009, (3): 23–28)
- 40 Zhang Liang-Tong, Li Ying. Recommend the use of IEEE standard of Coriolis vibration gyros and other inertial sensor. *Ship Navigation*, 2003, (3): 1–9
(张良通, 李影. 推荐使用的 IEEE 哥氏振动陀螺仪标准和其它惯性传感器标准. 舰船导航, 2003, (3): 1–9)
- 41 Durfee D S, Shaham Y K, Kasevich M A. Long-term stability of an area-reversible atom-interferometer Sagnac gyroscope. *Physical Review Letters*, 2006, **97**(24): 240801
- 42 Kasevich M, Chu S. Measurement of the gravitational acceleration of an atom with a light-pulse atom interferometer. *Applied Physics B*, 1992, **54**(5): 321–332
- 43 Zhang Xue-Feng, Xu Jiang-Ning, Zhou Hong-Jin. Atom laser gyroscope. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2006, **14**(5): 86–88
(张学峰, 许江宁, 周红进. 原子激光陀螺. 中国惯性技术学报, 2006, **14**(5): 86–88)
- 44 Deng Hong-Lun. Overview of quartz vibrating beam accelerometer. *Control Technology of Tactical Missile*, 2004, **21**(4): 52–57
(邓宏论. 石英振梁加速度计概述. 战术导弹控制技术, 2004, **21**(4): 52–57)
- 45 Le Traon O, Janiaud D, Muller S, Bouniol P. The VIA vibrating beam accelerometer: concept and performance. In: Proceedings of the 1998 Position Location and Navigation Symposium. Palm Springs, CA: IEEE, 1998. 25–29
- 46 Killen A, Tarrant D, Jensen D. High acceleration, high performance solid state accelerometer development. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 1994, **9**(9): 20–25
- 47 Hopkins R, Miola J, Sawyer W, Setterlund R, Dow B. The Silicon oscillating accelerometer: a high-performance MEMS accelerometer for precision navigation and strategic guidance application. In: Proceedings of the 61st Annual Meeting of the Institute of Navigation. Cambridge, MA: ION, 2005. 1043–1052
- 48 Wang W, Wang J L. Study of modulation phase drift in an interferometric fiber optic gyroscope. *Optical Engineering*, 2010, **49**(11): 114401
- 49 Wang Wei, Yang Qing-Sheng, Wang Xue-Feng. Application of fiber-optic gyro in space and key technology. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(5): 509–512
(王巍, 杨清生, 王学锋. 光纤陀螺的空间应用及其关键技术. 红外与激光工程, 2006, **35**(5): 509–512)
- 50 Wang W, Wang X F, Xia J L. The influence of Er-doped fiber source under irradiation on fiber optic gyro. *Optical Fiber Technology*, 2012, **18**(1): 39–43
- 51 Liu Hu, Fang Jian-Cheng, Liu Gang. Research on the stability of magnetic bearing system in magnetically suspended momentum wheel under on orbit condition. *Journal of Astronautics*, 2009, **30**(2): 625–630
(刘虎, 房建成, 刘刚. 在轨条件下磁悬浮动量轮磁轴承系统稳定性研究. 宇航学报, 2009, **30**(2): 625–630)
- 52 Zhu Bin, Zheng Juan. The development of US inertia navigation and guidance technology. *Aerospace China*, 2008, (1): 43–45
(祝彬, 郑娟. 美国惯性导航与制导技术的新发展. 中国航天, 2008, (1): 43–45)
- 53 Wang Si, Deng Zheng-Long. Technique review of transfer alignment for inertial navigation systems on moving base. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2003, **11**(2): 61–67
(王司, 邓正隆. 惯导系统动基座传递对准技术综述. 中国惯性技术学报, 2003, **11**(2): 61–67)
- 54 Chaudhuri S K, Nandi P K. Transfer alignment for space vehicles launched from a moving base. *Defense Science Journal*, 2005, **55**(3): 245–252
- 55 Chen Xun, Wen Xi-Sen. The situation summarization of environment experiment technology and integration environment stress experiment & analysis system. *Journal of National University of Defense Technology*, 1998, **20**(6): 78–82
(陈循, 温熙森. 环境试验技术的现状综述与集成环境应力试验分析系统. 国防科技大学学报, 1998, **20**(6): 78–82)
- 56 Hu J M. Life prediction and damage acceleration based on the power spectral density of random vibration. *Journal of the IES*, 1995, **38**(1): 34–40
- 57 Krishnan K S, Lahti D G, Smith W D, Averett T M. Optical fiber attenuation in proton radiation. *SPIE*, 1996, **2811**: 95–104
- 58 Ding Heng-Gao, He Xiao-Xia, Gao Zhong-Yu. *The Application of Inertial Technology for Testing General Relativity*. Beijing: Tsinghua University Press, 2005
(丁衡高, 贺晓霞, 高钟毓. 应用惯性技术验证广义相对论. 北京: 清华大学出版社, 2005)



王巍 博士, 研究员. 主要研究方向为惯性技术、光机电一体化测量与控制。
(WANG Wei Ph. D., professor. His research interest covers inertial technology, measurement, and control of integrative optics-mechanics-electrics.)