

惯导系统误差自补偿技术发展综述

陶冶¹, 关劲², 袁书明¹

(1. 海军装备研究院, 北京 100161; 2. 海军装备部, 北京 100841)

摘要: 提高精度与降低成本是惯性技术发展永恒的主题, 误差自补偿技术是符合该主题的重要研究方向之一。惯导系统可通过其特有的旋转机构及其周期性运动, 实现惯性仪表误差的自动补偿, 从而达到提高系统精度和降低系统成本的目的。论文在综合分析国内外大量相关资料的基础上, 重点对国外惯导误差自补偿技术的起源、发展和应用情况进行了研究分析, 同时对国内数家单位的研究工作进行了总结, 供该领域研究工作者参考。

关键词: 惯导; 误差; 自动补偿技术; 旋转调制

中图分类号: U666. 1 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095 - 8110 (2014) 01 - 0008 - 05

Overview for Development of Inertial Navigation System Error Self - compensation Technology

TAO Ye¹, GUAN Jin², YUAN Shu - ming¹

(1. Naval Academy of Armament, Beijing 100161, China; 2. Naval Equipment Department, Beijing 100841, China)

Abstract: To improve the precision and reduce the cost is the eternal theme of inertial technology development, error self - compensation technology is one of the important research directions consistent with the theme. Inertial navigation system can realize error self - compensation for system or inertial device through unique structure (mainly rotating mechanism) and periodic motion, so as to improve the precision of the system and reduce the system cost. Based on comprehensive analysis of a large number of domestic and international references, the origin, development and application of foreign error compensation technology are focused on and analyzed, including Europe and the United States in the early studies, roulette Trojan technology, rotating modulation technology. At the end several domestic research work are summarized. Through summary and comparison of the domestic and international related research work, the paper hopes to provide some ideas and reference value for some related researcher.

Key words: Inertial navigation; Error; Self - compensation technology; Rotation modulation

0 引言

惯性导航技术以牛顿力学为理论基础, 使用陀螺仪和加速度计测量载体的角运动和线运动, 实时解算载体的姿态、速度和位置。惯导系统具有极好的自主性和隐蔽性, 在军事应用中极其重要。

提高精度与降低成本是惯性导航技术发展永恒的主题。采用了误差自补偿技术^[1]的惯导系统, 一般具有独特的结构 (主要是增加了旋转机构), 使得惯导系统对惯性仪表误差不敏感, 在提高系统精度的同时也降低了成本。

误差自补偿技术是惯性技术发展的潜流, 不

像陀螺仪发展那样有明显的换代特征, 但一直伴随着惯性技术的整个发展过程: 20 世纪 50 年代就出现了应用旋转结构消除框架陀螺漂移^[2]; 60—70 年代开始用转子定期反转、H 调制、陀螺监控技术来估计、补偿陀螺漂移^[3-4], 直到现在仍在高精度潜艇惯导中进行应用^[5]; 60 年代中后期, 旋转调制技术应用于平台惯导系统设计^[6-7]; 70 年代, 旋转调制技术应用于捷联惯导^[8-9]和陀螺罗经; 80 年代, 旋转调制技术用于激光陀螺速率偏频, 使得激光陀螺惯导系统精度大大提高^[11-16]; 2000 年以来, 美国全面采用旋转调制激光惯导装备海军舰艇^[18], 双轴旋转激光惯导的重调周期达

收稿日期: 2011 - 11 - 14; 修订日期: 2014 - 06 - 30。

基金项目: 国家自然科学基金 (61104184)

作者简介: 陶冶 (1979 -), 男, 博士, 工程师, 主要从事舰艇导航方面的技术研究。E - mail: ty0455@163.com

到了14 d,大大提高了潜艇的隐蔽性。可见,从提高惯性仪表性能到提高惯导系统精度,误差自补偿技术都是一种非常有效的技术途径;伴随惯性技术的发展,误差自补偿技术也在持续不断的发展。

总体来看,误差自补偿技术以牺牲较小的代价来提高惯导精度。其中,旋转调制技术应用得更为广泛,也更为成功。所谓旋转调制技术,是指利用旋转机构带动惯性仪表旋转,使其相对于某个固定参考框架的等效误差成为近似零均值的周期变化量,从而获得更高的导航精度。

本文以惯导系统误差自补偿技术为主题,在分析大量国内外相关文献基础上,综述其关键技术及研究脉络,以期为该领域研究者提供一些思路与参考价值。

1 国外早期的研究工作

早在20世纪50年代末、60年代初,就开始了关于陀螺误差自补偿技术的研究,主要方法是强制陀螺仪框架轴旋转和陀螺仪动量矩矢量换向,即转子反转^[1]。

文献[2]报导了美国Sperry公司采用旋转技术消除框架式机电陀螺的随机漂移,其关键技术是使陀螺框架轴承的外圈绕陀螺旋转轴旋转,且定期旋转换向,以消除由于轴承滚珠尺寸不完全一致、转子不球度及灰尘粒子等原因导致的陀螺随机漂移。通过试验发现,正反整周旋转能带来更高的精度,可将陀螺的随机漂移从原来的 $2\sim 3$ ($^{\circ}$)/h降到了 0.25 ($^{\circ}$)/h,部分产品精度达到了 0.05 ($^{\circ}$)/h。

文献[3]提出“反转”惯性仪表可消除其固定的误差,并将此思想应用于惯性制导系统的误差自补偿(auto-compensation)中,以消除长时间缓慢变化的陀螺漂移和加速度计零偏。针对陀螺,文中提到了两种漂移自补偿方法,并对其作了比较。其一,旋转壳体,使得陀螺漂移向量在空间旋转且均值为零;此方法可补偿与壳体相关的干扰力矩引起的陀螺漂移。第二种方法是令陀螺转子反转,该方法不仅可消除上述“壳体固联(case-fixed)”的干扰力矩,还可消除“空间固联(space-fixed)”的干扰力矩。文中还提到,实际

应用中应注意陀螺漂移变化频率可能与补偿频率相同或相近,这样就会出现“共振效应”,反而使得陀螺性能变坏。文献[3]还提出了加速度计零偏的自补偿方法——反转加速度计敏感轴,每个方向配置两个加速度计,以保证反转过程中仍可测量该方向的比力。

文献[4]介绍了两种消除陀螺漂移的方案。一种方案是三个陀螺按设定规程轮流进行反转,经过一个流程,陀螺漂移造成的平台误差相互抵消,也即达到了消除陀螺漂移的目的。另一种方案中只有两个陀螺反转,利用其提供的精确的参考可估计第三个陀螺的漂移。第一种方案可用于导航过程中,第二种方案可用于陀螺罗经对准及测漂。

H调制技术可谓是转子反转技术的进一步发展,通过改变监控陀螺的转动动量矩来估计受监控陀螺的漂移,文献[5]介绍了具体的原理。目前H调制技术仍用于高精度的舰艇液浮惯导系统中。

综上所述,早期研究主要是将旋转调制思想应用于惯性仪表,也有了向系统方向发展的迹象(加速度计敏感轴换向),主要方法是旋转陀螺壳体、陀螺转子反转以及H调制技术。

2 轮盘木马IV——里程碑式的发展

第一个成功将旋转调制技术应用于系统结构的惯导系统是美国台尔柯(Delco)公司的轮盘木马IV(Carousel-IV, C-IV)平台惯导系统。C-IV采用独特的自由方位机械编排方式^[12],其最主要的特点就是整套水平惯性仪表作为一个刚性装置绕当地地垂线轴旋转,以调制惯性仪表误差的影响,提高系统导航精度。通过采用该项技术,C-IV可方便地进行自标定,提高对准和导航精度。文献[8]研究了轮盘木马系统的误差特性,推导了误差方程,定量分析了平台旋转对水平陀螺漂移的调制作用及调制效果与旋转角速度大小的关系,结论是:当旋转角速度远大于舒拉角速度时,受调制后陀螺漂移造成的导航误差与旋转角速度近似成反比。文献[9]讨论了陀螺壳体旋转与IMU整体旋转的作用,指出整体旋转可调制舒拉回路内的误差项(陀螺漂移、加计零偏等),

但不能调制除舒拉环之外的误差项（如初始对准误差、方位误差等）。文献 [10] 介绍了用于“大力神” III C 上的 C-VB 的陀螺漂移补偿方法和加速度解算方法。文献 [13] 研究了陀螺罗经对准过程中平台旋转对缓变的陀螺漂移的调制作用，通过将陀螺罗经系统简化为一阶惯性环节，设陀螺漂移为指数相关的随机过程，加入旋转调制后为等效的正弦相关的随机过程，将这两种输入下稳态输出值的均方值相比，从而分析旋转调制的作用。其结论为：旋转速度越大，上述比值越大，表明系统输出误差越小；当旋转速度较大时，旋转速度与此比值近似为成正比关系；文中还分析了旋转调制前后陀螺漂移的功率谱密度函数，结果表明，噪声的能量从低频转到了旋转频率，而低频能量相对于未调制前降低的倍数基本与旋转速度的平方成正比，与前面分析相符合。

台尔柯公司的轮盘木马惯导系统首次成功的将旋转调制思想应用于惯导系统设计，在精度、成本以及可靠性方面有独特的优势，堪称为惯性技术发展史上的杰作。

3 旋转调制式捷联惯导系统

20 世纪 70 年代，台尔柯公司研制了旋转调制式捷联惯导系统的代表性产品为“轮盘木马”（C-400）系列和 LCINS 惯性导航系统 [13]。其中，LCINS 采用 2 个 Incosym 公司的双轴调谐陀螺和 2 个双轴加速度计，捷联平台在内部以 1r/min 的速度旋转，一方面调制水平陀螺和加速度计的误差，改进导航精度、对准精度及允许在系统加热阶段进行对准；另一方面允许系统不必从载体上拆卸即可完成自标定。LCINS 的位置精度为 2 ~ 4n mile/h，速度误差增长率 0.7 (m/s)/h，姿态误差增长率 0.1mrad/h，航向误差增长率 1mrad/h。

上述的捷联惯导系统都是采用单轴旋转以调制水平陀螺/加速度计的误差，但天向陀螺误差不受调制。文献 [13] 介绍了台尔柯提出的多余度“轮盘木马”捷联制导系统，该系统的突出特点有二：其一，采用了三个旋转的捷联平台，旋转轴相互正交安装，从而调制了所有方向的陀螺/加速度计误差；其二，通过冗余配置，提高了系统的可靠性。

1980 年，Sperry 公司利用磁镜偏激光陀螺研制了单轴旋转惯导系统，系统采用四位置转、停方案 [13]。由于磁镜偏激光陀螺精度较低，该公司随后开展了二频机抖激光陀螺单轴旋转惯导系统研制，并在 20 世纪 90 年代研制出 MK39 系列激光惯导系统，已经被 24 个国家海军选用于各种舰船平台，随后在 MK39-Mod3c 的基础上又发展了 AN/WSN-7B 系统 [14-16]，装备美国海军辅船及护卫舰。

1989 年，Sperry 公司的 MK49 型双轴旋转式激光陀螺惯导系统经过海试后被选为北约的船用标准惯性导航系统，装备了大量的潜艇和水面舰艇 [17]。MK49 采用三个 Honeywell 公司的 GG1342 型机械抖动激光陀螺，Honeywell 官方公布的 GG1342 陀螺零偏稳定性 0.0035 (°)/h，角度随机游走为 0.0015 (°)/√h。MK49 系统采用双轴翻转技术，利用双轴转位器（外部为横摇、内部为方位）定期为惯性敏感器装置绕横摇轴和方位轴进行 180°定序，以消除所有 3 个轴上的陀螺漂移和其它误差源，并且转位机构还用来对系统进行自校准、隔离外界的横滚和方位运动等。Sperry 公司在 MK49 的基础上发展了 AN/WSN-7 (7A) 双轴激光陀螺旋转调制系统，其水下型重调周期可达 14 d。

1994 年，由于干涉型光纤陀螺（IFOG）性能有了突破性进展，表明光纤陀螺有可能取得技术进步和性能提高，具有满足战略潜艇系统需要的潜力。美国启动光纤陀螺战略核潜艇导航计划，由 Pennsylvania 州立大学应用研究实验室、海军研究实验室等机构合作执行。此系统采用了三轴连续旋转方案，理论上可使光纤陀螺的比例因子、安装轴的不稳定性以及常值漂移在旋转过程中得到很大程度的抵消 [18]。该光纤陀螺三轴旋转调制系统已于 2005 年初步研制出来，所用的光纤陀螺的随机游走系数为 0.00006 (°)/√h。

美国研制此三轴旋转 IFOG 惯导系统的目的是希望能够作为静电陀螺惯导的备份用于战略武器。由于静电陀螺系统造价昂贵，维护费用不菲，并且当前美国使用的部分静电陀螺惯导系统已快到其服役期限，而原来的一些静电陀螺制造工艺基础即将丢失，原有系统的可维护性越来越差，

同时光学陀螺旋转调制式惯导系统的成本较低,系统结构也相对简单,理论上系统的精度仅仅受限于光学陀螺的随机游走系数,所以受到美国军方的大力重视。

在误差自补偿技术的发展过程中,除了使用旋转机构对陀螺/加速度计误差进行调制之外,在某些特定情况下,载体的旋转也可对其进行调制,如弹体高速旋转的导弹和载体不断旋转的石油管道探测装置。文献[19]介绍的管道探测器(常称为“管道猪”,用来测绘管道行程或探测管道伤痕)即属于后者。在石油/天然气输送管道内,管道猪在油或气的推动下旋转前进,这种旋转可调制管道猪内的惯导系统的陀螺/加速度计误差,提高了管道猪的定位精度。

综上所述,继台尔柯公司研制旋转调制式捷联惯导系统之后,Litton 等公司利用激光陀螺及各种形式的误差自补偿技术研制了高精度的捷联惯导系统,这些技术包括激光陀螺速率偏频、单轴指向技术、双轴指向技术,各有特色;利用载体旋转调制陀螺/加速度计误差是误差自补偿技术在特定环境下的应用。

4 结论

国内自2000年左右开始高度重视误差自补偿技术研究,目前已取得可观的研究成果^[20-26]。

国防科大具有激光陀螺仪技术优势,在国内较早开展旋转调制激光惯导的研究^[23]。针对速率偏频激光陀螺的应用,从系统角度对激光陀螺速率偏频系统中存在的特有问題,诸如速率偏频三轴激光陀螺输出的调制方程、角速率解调的条件方程以及有关参量的精度、偏频速率的选择、偏频台回转加速度的确定、偏频台回转定位等方面进行了研究探讨,并通过比较提出了“偏频台导航系统”方法。

文献[24]比较了器件级和系统级旋转调制方式的工程可实现性,提出一种连续8次翻转180°的旋转方案,确保一个调制周期平均掉所有误差项。目前国内多家大学及研究所在从事旋转调制式捷联惯性导航系统技术研究。

国外的旋转式惯导系统从最初的平台式系统到目前多种捷联式系统,已经发展了半个世纪,

国外舰艇惯导系统标配含有电磁/多普勒计程仪,精度和性能都有大幅度提高。而我国由于激光陀螺仪技术成熟较晚,旋转调制式捷联惯导系统技术研究刚刚成熟,目前正处于工程化试验阶段。

总体来说,国内对误差自补偿技术的应用已经开始,目前大家更多关注旋转调制方案等单项技术研究,缺乏系统级技术研究及试验,比如舰艇惯导与电磁/多普勒计程仪变阻尼技术、码头自标定技术,牵引启动技术等研究还不够深入。

误差自补偿技术,尤其是旋转调制技术,可以以较低的成本换取较高的系统精度,特别适合舰艇(潜艇)这类需要长时间自主导航的低动态航行载体,也可为某些精度要求甚高的系统提供一种技术方案,相应的还可缩短系统准备时间,故有广阔的应用前景,值得我们深入研究。

参考文献

- [1] C·M·谢列托维奇等.陀螺系统仪表误差的自动补偿[M].国防工业出版社.1986 C. M. Semyon Leto Vecchi. The Automatic Compensation of Gyroscope Instrument Errors. National Defense Industry Press. 1986.
- [2] Klass J. Gyro Drift Cut by Bearing Technique. Aviation Week. 1958. February 17. vol. 68. N7. pp. 79-81.
- [3] Slater J. M. Autocompensation of Errors in Gyros and Accelerometers, Control Engineering. May. 1961. Vol. 8. N5. pp. 121-122.
- [4] French N. E. Gyro Wander Correction by Periodic Reversals of Gyro Spin. Navigation. U. S. A. vol. 15. N 2. Summer 1968. pp. 214-218.
- [5] C. San Giovanni. JR. and E. Levinson, H-Modulation for Long Endurance Marine Inertial Navigation. Navigation; Journal of the Institute of Navigation. Vol. 22. No. 2. Summer 1975.
- [6] Geller E. S. Inertial System Platform Rotation, IEEE Trans on AES, July, 1968. vol. AES-4, N 4, pp. 557-568.
- [7] Smith J. M. Reduction of the Effect of Component Errors in Inertial Navigation Systems. The Journal of the Institute of Navigation. July. 1969. vol. 22. N 3. pp. 35-374.
- [8] A. C. Liang and D. L. Kleinbub Drift. Compensation and Accelerometer Resolution of a Rotating Platform IMU. J. Spacecraft, vol. 11. No. 8, August, 1974.
- [9] E. M. Oshika and A. J. Parziale. Redundant Carousel Strap-down Guidance System, IEEE PLANS 1976.
- [10] 陀螺仪与惯性导航专业情报网.国外惯性技术手册[M].国防工业出版社,1983. 5 Gyro and Inertial Navigation Specialized Information Network, Handbook of Foreign Inertial

- Technology [M]. National Defense Industry Press, 1983. 5.
- [11] K. R. Britting. Effects of Azimuth Rotation on Gyrocompass Systems. Annual Meeting of the Institute of Navigation. June 27. 1978.
- [12] Levinson, E. and San Giovanni. C. Laser Gyro Potential for Long Endurance Marine Navigation. IEEE PLANS 1980.
- [13] Engebretson. H. J. System Concepts Using Ring Laser Gyros, IEEE PLANS 1980.
- [14] Fulfrost. J. and Checco. W. J. Ring Laser Gyro Navigator for Surface Combatant Ships. IEEE PLANS 1984.
- [15] Levinson. E. and Majure. R. Accuracy Enhancement Techniques Applied to the Marine Ring Laser Inertial Navigator (MARLIN). Navigation; Journal of The Institute of Navigation. 1987. 34 (1): 64 - 86.
- [16] Mathew. A. and H. Welter, Cost - Effective. High - Accuracy Inertial Navigation. Navigation 36. p. 157 - 172. 1989.
- [17] Levinson D. E. Horst J. T. The Next Generation Marine Inertial Navigator is Here Now [C]. The IEEE Position Location and Navigation Symposium. 1994; 121 - 127.
- [18] N. Barbour. Inertial Components - Past. Present. and Future. AIAA 2001 - 4290. 2001 AIAA Guidance. Navigation and Control Conference. Montreal. Canada.
- [19] 徐海刚. 旋转调制式捷联惯导系统研究. 北京航空航天大学博士论文. 2009 Xu Hai - gang. Rotating Modulation Type Strapdown Inertial Navigation System. Doctoral Dissertation of Beihang University. 2009.
- [20] 徐焯烽. 基于旋转调制技术的制导. 导引头稳定一体化设计技术研究. 北京航空航天大学博士论文. 2010 Xu Ye - feng. Guidance / Seeker Stable Integration Design Technology Based on Rotating Modulation Technology. Doctoral Dissertation of Beihang University. 2010.
- [21] 查峰. 许江宁. 黄寨华. 单轴旋转惯导系统旋转特性误差分析及补偿 [J]. 中国惯性技术学报. 2012. 20 (1): 11 - 17 ZHA Feng. Xu Jiang - ning. Huang Zhai - hua. Rotation Characteristics Error Analysis and Compensation of Single Axis Rotating Inertial Navigation System [J]. Journal of Chinese inertial technology. 2012, 20 (1): 11 - 17.
- [22] 孙枫. 孙伟. 基于单轴旋转的光纤捷联惯导系统误差特性与实验分析 [J]. 宇航学报. 2010. 30 (4): 1070 - 1077. SUN Feng. SUN Wei. Error Characteristic and Experiment Analysis of Fibre - optical SINS Based on Signal - axis Rotation [J]. Journal of Astronautics. 2010. 30 (4): 1070 - 1077.
- [23] 袁保伦. 饶谷音. 光学陀螺旋转惯导系统原理探讨 [J]. 国防科技大学学报. 2006. 28 (6): 76 - 80. YUAN Bao - lun. Rao Gu - yin. Discussion on the Principle of Optical Gyro Rotating Inertial Navigation System [J]. Journal of National University of Defense Technology. 2006. 28 (6): 76 - 80.
- [24] 翁海娜. 陆全聪. 黄昆等. 旋转式光学陀螺捷联惯导系统的旋转方案设计 [J]. 中国惯性技术学报. 2009. 17 (1): 9 - 14. WENG Hai - na, LU Quan - cong. HUANG Kun. et al. Rotation Scheme Design for Rotary Optical Gyro SINS [J]. Journal of Chinese Inertial Technology. 2009. 17 (1): 8 - 14.
- [25] 龙兴武. 于旭东. 张鹏飞等. 激光陀螺单轴旋转惯性导航系统. 中国惯性技术学报. 2010. 18 (2): 149 - 153 LONG Xing - wu. YU Xu - dong. ZHANG Peng - fei. et al. Single - rotating Inertial Navigation System with Ring Laser Gyroscope [J] Journal of Chinese Inertial Technology. 2010. 18 (2): 149 - 153.
- [26] 陆志东. 王晓斌. 系统级双轴旋转调制捷联惯导误差分析及校标 [J]. 中国惯性技术学报. 2010. 18 (2): 136 - 141. LU Zhi - dong, WANG Xiao - bin. Error Analysis and Calibration of Systematic Dual - axis Rotation - modulation SINS [J]. Journal of Chinese Inertial Technology. 2010. 18 (2): 136 - 141.