

doi: 10.7690/bgzd.2021.12.005

精确制导武器惯导系统动态对准技术发展综述

李根^{1,2}, 吕卫民¹, 刘陵顺¹, 张天琦¹, 黎东², 臧恒波¹

(1. 海军航空大学岸防兵学院, 山东烟台 264001; 2. 中国人民解放军 77120 部队, 成都 621100)

摘要:为提高精确制导武器惯导系统(inertial navigation system, INS)动态对准的对准性能,对相关技术进行分析。概述国内外精确制导武器动基座传递对准和外界信息辅助的飞行中组合对准的发展现状,并讨论精确制导武器惯性导航系统动态对准技术的发展趋势。该研究结果表明:通过进一步实现滤波方法改进,寻求更有效的挠曲变形和杆臂效应处理方法,充分利用其他导航信息进行辅助对准和结合具体武器平台机动特性,可有效实现精确制导武器动态对准。

关键词: 惯性制导系统; 动态对准; 动基座传递对准; 飞行中对准; 精确制导武器

中图分类号: TJ765.3 **文献标志码:** A

Review on Development of Dynamic Alignment Technology for INS of Precision Guided Weapons

Li Gen^{1,2}, LYU Weimin¹, Liu Lingshun¹, Zhang Tianqi¹, Li Dong², Zang Hengbo¹

(1. College of Coast Guard, Naval Aviation University, Yantai 264001, China;

2. No. 77120 Unit of PLA, Chengdu 621100, China)

Abstract: For improving alignment performance of dynamic alignment for inertial navigation system (INS) of precision guided weapons, analyze the related technology. This paper summarizes the development status of domestic and foreign in-motion alignment and in-flight alignment technologies, and discusses the development trend of the dynamic alignment technologies for INS. The research results show that effectively realize precision guided weapon dynamic alignment by further improvement of filtering methods, seeking for more effective flexure deformation and lever arm effect processing methods, making full use of other navigation information for auxiliary alignment, and combining specific weapon platform maneuvering characteristics.

Keywords: INS; dynamic alignment; dynamic base transfer alignment; in-flight alignment; precision guided weapons

0 引言

精确制导武器主要分为导弹、鱼雷和精确制导的炮弹等,基本上都采用了惯性导航系统(INS)。INS是由陀螺表和加速度计等惯性敏感元件来测定载体方位、位置和速度的自主式制导系统,是精确制导武器发射后实现空中制导的关键系统,具有抗干扰、信息全面等优点。初始对准是精确制导武器惯导系统进入到正式导航工作状态前建立所需导航坐标系的过程,其速度和精度是对准最重要的2个指标^[1]:对准精度直接影响制导系统的工作精度,对准速度直接影响武器发射准备时间^[2]。

动态对准是指在运动状态下实现初始对准的方法。相比于静基座对准,动态对准对环境要求不高,对于降低惯导系统成本有优势,同时惯导误差量的可观测性较好,进而加快对准速度^[3]。未来战争中如果能先于敌人发现、先于敌人打击,就能取得整

个战局的主动。动态对准能够有效减少精确制导武器发射前的静止准备时间,实现动态对准对飞行器、舰艇、战车等作战平台精确制导武器的迅速反应和精确打击影响重大,对于现代战争实现先发制人和提高自身生存能力具有重要意义。

1 精确制导武器动态对准的研究现状

精确制导武器动态对准主要分为动基座传递对准和外界信息辅助的飞行中组合对准。动基座传递对准是武器平台处于运动状态过程时,武器发射平台已对准的主惯导系统将导航信息传递给制导武器子惯导系统进行对准的方法。动基座传递对准的基本原理如图1所示。

外界信息辅助飞行中组合对准是制导武器内的惯导系统利用卫星导航系统、雷达等其他导航系统提供载体位置、速度、姿态信息进行对准的方法。飞行中组合对准的基本原理如图2所示。

收稿日期: 2021-08-26; 修回日期: 2021-09-24

基金项目: 国家自然科学基金(51975580)

作者简介: 李根(1992—),男,四川人,从事导航、制导与控制研究。E-mail: 504123921@qq.com。

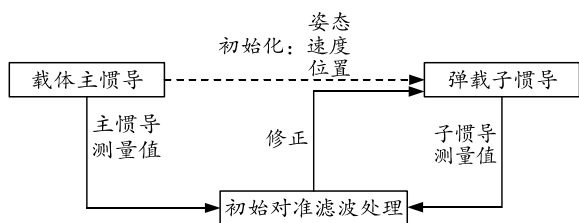


图 1 动基座传递对准基本原理

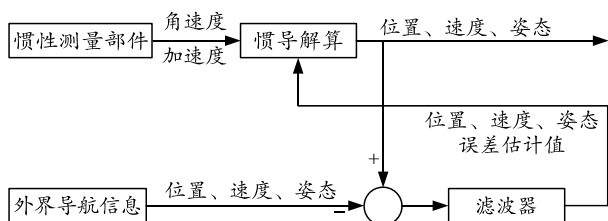


图 2 飞行中组合对准基本原理

动态对准是制导武器的一项重要技术，军事强国对此非常重视。国外在 80 年代以后，重点对快速匹配方法和影响初始对准精度的因素进行研究^[4]。国内动态对准的研究开始时间相对较晚，近些年也取得了一些研究成果。

1.1 国外技术现状

1.1.1 动基座传递对准

动基座传递对准的建模与算法是传递对准非常重要的 2 个方面。

在传递对准模型建立方面，外国学者提出了速度匹配、位置匹配、加速度匹配等经典方法，位置匹配与速度匹配是早期运用得比较多的方法。1989 年 J.E. KAIN 和 J.R. CLOUTIER^[5]首次提出“速度+姿态”的匹配方案，飞机简单进行机翼摇摆就能实现方位对准，对准的时间减少为 10 s；美国军方还将“速度+姿态”匹配方法应用于先进动能导弹，并在对准快速性方面进行了重点研究^[6]；1991 年美国工程师 R.M. ROGERS^[7]对“速度+角速度”匹配方法进行了研究，对准的时间小于 10 s。

在传递对准算法方面，可靠的滤波算法对惯性制导系统对准精度和速度都有重要影响。1965 年，L.D. BROCK^[8]提出了将卡尔曼滤波用于解决平台式惯性导航系统初始对准问题；1967 年，J.F. BELLANTONI^[9]在捷联惯性导航系统初始对准中运用了卡尔曼滤波方法，之后卡尔曼滤波在动基座传递对准中也得到越来越多的运用；德国卡尔斯鲁厄大学^[10]将改进的卡尔曼滤波方法应用于导弹惯导系统的传递对准，并估计导弹行进过程中由于振动导致的误差。卡尔曼滤波在线性模型中使用效果较好，在非线形模型中，扩展卡尔曼滤波 (extended

kalman filter, EKF) 在工程中运用较多，但其求取 Jacobian 矩阵复杂^[11]。

近些年来，国外专家针对传递对准提出了使用无迹卡尔曼滤波 (unscented kalman filter, UKF)、容积卡尔曼滤波 (cubature kalman filter, CKF)、粒子滤波 (particle filter, PF)、 H_{∞} 滤波、Sage-Husa 自适应滤波等非线性滤波算法^[12-16]。国外已经提出多样化的传递对准算法对国内研究具有相当强的借鉴意义。

1.1.2 外界信息辅助的飞行中组合对准

在基于卫星导航、雷达等外界信息辅助下的飞行中组合对准方面，国外专家学者进行了大量研究。美国雷声公司^[17]针对舰载对空多功能拦截导弹飞行中对准问题进行了研究，导弹简单初始化后发射，利用融合雷达信息和全球卫星导航系统 (GNSS) 信息辅助拦截导弹弹载惯导系统飞行中对准，并进行了实际飞行测试以及精度评估；波兰学者 W. PIEKOSZCZUSKI 等^[18]研究了 INS/GNSS/罗兰 C 导航系统的多信息融合飞行中对准技术；美国海军水面战中心^[19]为美国海军舰载对空导弹 SM-3 研究开发了 GNSS/雷达/INS 的飞行中对准技术，采用了 GNSS/雷达/INS、GNSS/INS、雷达/INS 3 种集成模式，并指出 GNSS/雷达/INS、GNSS/INS 2 种集成模式设计裕度大，成功拦截目标的概率高；英国学者 P. GROVES^[20]研究了机载武器系统利用 INS/GNSS 进行空中对准和导航的方法；2017 年，韩国首尔国立大学^[21]提出了一种适用于无初始姿态参考的多阶段飞行中对准方法，并在 UH-60 直升机上进行飞行测试，证明其提出的多阶段飞行中对准方法对比传统的陀螺罗经校准有更显著的位置误差改进。

飞行中组合对准的工程实现有一定难度，国外正处于不断深入研究阶段，其成熟之后在军事领域应用前景广阔。

1.2 国内技术现状

1.2.1 动基座传递对准

在国外成熟的传递对准理论基础上，国内学者重点针对传递对准模型、平台机动特点以及误差校正方法等进行改进。其中航天一院、航天三院、哈工大、北航、西工大等科研院所对传递对准技术进行了大量研究。中航 618 所^[22]使用“速度+姿态”的匹配方式在国产运七飞机上进行了飞行试验；航

天 33 所^[23]提出了利用速度匹配方案成功应用于空射反舰导弹, 随后又利用了“速度+姿态角”的匹配方法针对导弹动基座对准系统进行了研究; 此外, 陈凯等^[24]针对传递对准的姿态匹配优化算法做了研究, 对比了 4 种姿态匹配方式的不同特点; 刘斌等^[25]研究了 2 种快速传递对准状态模型, 并研究了安装角和陀螺零偏双滤波器并行使用的方案; 钱伟行等^[26]研究了比力积分匹配模式下的惯性导航传递对准算法; Cheng J 等^[27]研究了基于 UKF 的传递对准滤波方法; 蒋新磊等^[28]针对车载武器系统提出了把导弹的液压起竖过程中用作运动条件, 并研究了“速度+角速度”传递对准匹配算法; 王跃钢等^[29]研究了车载导弹武器利用导弹发射前发射车的刹车, 起竖导弹发射架等机动条件下实现传递对准的方案; 马志强等^[30]提出了在匀速和北向加速机动条件下速度匹配的传递对准方案; 2016 年, 周启帆^[31]设计了利用车辆加减速和颠簸路面的行进间动基座传递对准方案以及利用起竖导弹机动过程的动基座传递对准方案, 并研究了结合这 2 种对准方案的融合对准方法。

目前的动态对准研究主要是基于舰艇和飞机, 对于车载精确制导武器的动基座传递对准相对较少。对车载精确制导武器而言, 其地面机动情况相对复杂, 如飞机简单的摇翼机动、舰艇简单的摇鳍机动等, 在地面上很难实现; 因此, 针对车载精确制导武器, 利用发射车的地面加减速运动、上下坡运动、武器发射架液压起竖等机动过程的传递对准是一个重要研究方向。

1.2.2 外界信息辅助的飞行中组合对准

进入 21 世纪, 李文钦等^[32]提出了舰载导弹利用卫星导航、雷达等外部参考信息辅助弹上捷联惯性导航系统实现导弹飞行中组合对准是一条有效的研究路线, 并且也对导弹空中组合对准滤波算法进行了研究; 周本川等^[33]研究了空空导弹飞行中的对准问题, 飞行过程中载机对导弹进行简单快速的初始化, 导弹发射后导弹接收北斗卫星的相关导航信息对弹载惯性制导系统实现飞行中组合对准, 并通过数学仿真验证了方法可行; 姚艳生等^[34]提出了导弹地面发射前直接装订 3 个初始姿态角, 再利用其他导航系统对导弹运动的测量信息实现空中校准的方法。2018 年, 王聪^[35]研究了滑翔增程炮弹飞行中对准方法, 提出炮弹发射后利用 GPS 信息粗略装订姿态矩阵实现粗对准, 在 GPS 辅助下进一步应用卡

尔曼滤波算法实现精对准; 2019 年, Sun L 等^[36]提出了一种基于遗传算法优化 Elman 神经网络算法的制导炮弹飞行中对准方法, 并得到了较好的仿真效果; 2020 年, 鲁正隆^[37]提出了一种基于梯度下降的空中对准姿态快速估计算法对初始姿态进行计算, 用以实现制导炮弹的空中对准。

目前国内对于精确制导武器飞行中的对准研究相对较少, 且大多停留在数学仿真阶段, 展开相关物理实验验证的相对较少, 还有待国内学者进一步深入研究。

2 动态对准技术发展趋势

2.1 对准速度快速化

动态对准的快速性对于精确制导武器实际作战效能具有重要作用。在动基座传递对准中, 国内早期较多采用速度匹配+方位装定的方案, 随着技术发展和对武器性能要求的提高, 逐步采用了速度匹配的方案。为了缩短对准时间, 使用了“速度+姿态”的匹配方法, 有的武器系统也采用“速度+位置”的匹配方法。匹配方法的发展促进了对准快速化的发展。此外滤波算法的选取对于动态对准的速度同样具有重要作用。未来动态对准的快速化将是一个重要趋势。

2.2 参考信息多样化

技术不断发展进步, 很多武器平台上不仅有主惯导, 而且安装有卫星导航接收机、雷达等系统, 精确制导武器弹体本身也可装配卫星导航、雷达、高度表等设备, 国内外对这些导航信息辅助武器进行飞行中组合对准做了相应研究, 比如针对舰载导弹, 利用卫星导航或雷达信息的飞行中组合对准不仅摆脱了导弹在舰艇传递对准受复杂海面状况的限制, 而且可与舰上对准互为备份。使用多种参考信息辅助以提高动态对准性能, 是动态对准技术研究的重要趋势。

2.3 滤波算法新型化

随着惯导计算机的不断进步, 一些新型滤波算法在精确制导武器动态对准上应用更加容易实现。综合运用传统滤波算法以及对现有算法进行改进, 是今后的发展方向之一。另外, 运用神经网络、模糊逻辑和小波去噪等新技术方法也是未来新的发展方向。随着新技术方法的不断发展, 滤波方法也将变得更加多样、实用, 在适用性、准确性、鲁棒性和快速性等方面也将取得更加使人满意的效果。

3 结束语

动态对准是实现制导武器精确打击的一项关键技术。精确制导武器对准的精度和速度将一直是重点考虑的指标, 仍然有许多理论与工程应用相关的问题需要作深入研究。进一步实现滤波方法改进, 寻求更加有效的挠曲变形和杆臂效应处理方法, 充分利用其他导航信息进行辅助对准和结合具体武器平台机动特性实现动态对准, 是提高对准性能的有效手段。

参考文献:

- [1] 刘锡祥, 程向红. 捷联式惯性导航系统初始对准理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [2] 钱伟行. 捷联惯导与组合导航系统高精度初始对准技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [3] 宋嘉钰, 杨黎明, 李东杰. 惯性导航传递对准技术发展现状与趋势[J]. 兵器装备工程学报, 2016(2): 139-143.
- [4] 郑辛, 武少伟, 吴亮华. 导弹武器惯导系统传递对准技术综述[J]. 导航定位与授时, 2016(1): 1-8.
- [5] KAIN J, CLOUTIER J. Rapid Transfer Alignment for Tactical Weapon Applications[C]. Guidance, Navigation and Control Conference. Boston, MA, U.S.A, 1989: 3581.
- [6] TARRANT D, ROBERTS C, JONES D, et al. Rapid and Robust Transfer Alignment[C]. Aerospace Control Systems, 1993. Proceedings. The First IEEE Regional Conference on. IEEE, Westlake Village, CA, 1993: 758-762.
- [7] ROGERS R M. Weapon IMU Transfer Alignment Using Aircraft Position from Actual Flight Tests[C]. Position Location and Navigation Symposium. IEEE, Atlanta, Georgia, 1996: 328-335.
- [8] BROCK L D. Application of Statistical Estimation to Navigation Systems[M]. Cambridge, U.S.A: MIT, 1965.
- [9] BELLANTONI J F, DODGE K W. A Square Root Formulation of the Kalman-Schmidt Filter[J]. Journal of AIAA, 1967, 5(7).
- [10] WENDEL J, METZGER J, TROMMER G. Rapid Transfer Alignment in The Presence of Time Correlated Measurement and System Noise[C]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. Honolulu, Hawaii, 2004: 4778.
- [11] TANIZAKI H, MARIANO R S. Nonlinear Filters based on Taylor Series Expansions[J]. Communications in Statistics, 1996, 25(6): 1261.
- [12] JULIER S, UHLMANN J, DURRANT-WHYTE H F. A New Method for the Nonlinear Transformation of Means and Covariances in Filters and Estimators[J]. IEEE Transactions on Automatic Control AC, 2000, 45(3): 477-482.
- [13] ZHOU Z, GAO Y, CHEN J. Unscented Kalman filter for SINS Alignment[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2007, 18(2): 327-333.
- [14] DMITRIYEV S P, STEPANNOV O A, Shepel S V. Nonlinear filtering methods application in INS alignment[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1997, 33(1): 260-272.
- [15] ZHANG Y, HUANG Y, NING L, et al. SINS initial alignment based on fifth-degree Cubature Kalman Filter[C]. IEEE International Conference on Mechatronics & Automation. Takamatsu, Japan. 2013.
- [16] NARASIMHAPPA M, RANGABABU P, SABAT S L, et al. A Modified Sage-Husa Adaptive Kalman Filter for Denoising Fiber Optic Gyroscope signal[C]. India Conference. IEEE, Mumbai, India, 2013.
- [17] ORNEDO R S, FARNSWORTH K A, SANDHOO G S. GPS and Radar Aided Inertial Navigation System for Missile System Applications[C]//Position Location and Navigation Symposium, IEEE, Palm Springs, CA, USA, 1998: 614-621.
- [18] PIEKOSZEZUSKI W, SZCZEREK M, TUSZYNSKI W. Application of Multi-sensor Information Fusion Technique in a Warship Integrated Navigation System[J]. Journal of East China Ship building Institute, 2001, 7(3): 219-228.
- [19] OHLMEYER E J, HANGER D B, PEPITONE T R. In-flight Alignment Techniques for Navy Theater Wide Missiles[C]. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, Montreal, Canada, 2001. A01-37312.
- [20] GROVES P, LANGRISH C, LONG D. Alignment and Integration of Weapon INS/GPS Navigation Systems[J]. Arthritis & Rheumatism, 2002, 60(3): 738-749.
- [21] WOONSEON H, CHAN G P. A Multistage In-flight Alignment with No Initial Attitude References for Strapdown Inertial Navigation Systems[J]. International Journal of Aeronautical and Space Sciences, 2017, 18(3): 565-573.
- [22] 陈璞, 雷宏杰. 弹载捷联惯性制导系统传递对准技术试飞验证[J]. 中国惯性技术学报, 2007, 15(1): 9-11.
- [23] 王武剑. 船用光纤捷联系统传递对准技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
- [24] 陈凯, 鲁浩, 闫杰. 传递对准姿态匹配的优化算法[J]. 航空学报, 2008, 29(4): 981-987.
- [25] 刘斌, 穆荣军, 张新. 两种快速传递对准方法在航空制导武器中的应用[J]. 中国惯性技术学报, 2016, 24(2): 141-147.
- [26] 钱伟行, 刘建业, 赵伟. 基于转动基座的 SINS 初始对准方法研究[J]. 宇航学报, 2008, 29(3): 928-931.
- [27] CHENG J, WANG T, GUAN D, et al. Polar Transfer Alignment of Shipborne SINS with a Large Misalignment Angle[J]. Measurement Science & Technology, 2016, 27(3): 035101.
- [28] 蒋新磊, 王跃钢, 杨家胜. 车载惯导系统传递对准匹配算法研究[J]. 现代防御技术, 2015, 43(5): 88-93.