

文章编号:1002-2082(2018)03-0309-08

陆用高精度激光惯导装备使用维护问题研究

杨建强¹, 艾文宇², 刘洪良³, 杨 林³

(1. 中国人民解放军驻三三〇三厂军事代表室, 湖北 武汉 430200; 2. 华中光电技术研究所 武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430223; 3. 陆军武汉军事代表局, 湖北 武汉 432200)

摘 要:目前国内装备应用单位对陆用高精度激光惯导装备的使用维护保养不当或不规范对惯性装备性能的影响尚无准确的理论分析, 为此, 以某型陆用高精度激光陀螺定位定向系统为研究对象, 结合国内惯性传感器技术水平现状, 详细分析了陆用高精度激光惯导装备对维护保养的需求以及规范维护保养作业的重要性。该型产品通过定期通电和系统定标维护, 故障产品性能恢复, 维护保养前后的水平定位精度典型实测数据分别为 8.35 m(CEP)和 2.9 m(CEP), 以期为国内同类装备的设计、生产以及部队使用提供参考和理论支撑。

关键词:定位定向系统; 惯性导航; 激光陀螺; 加速度计; 维护保养

中图分类号: TN967.2

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO201839.0301002

Research on use and maintenance of land based high-precision laser inertial navigation equipment

Yang Jianqiang¹, Ai Wenyu², Liu Hongliang³, Yang Lin³

(1. Military Representative Office at 3303 Factory of Chinese PLA, Wuhan 430200, China;

2. Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong Institute of Electro-Optics, Wuhan 430223, China;

3. Military Representative Bureau at Wuhan of PLA Land Force, Wuhan 432200, China)

Abstract: At present, there is an insufficient understanding of the use and maintenance of the land based high-performance inertial navigation equipment domestically. Additionally, there is no accurate theoretical analysis on the effects of improper or non-standard maintenance on the performance of inertial equipment. In order to solve the problem, taking a certain type of land-based high-precision laser gyro positioning and orientation system as the research object, combined with the status quo of domestic inertial sensors, the demand for maintenance of land-based high-precision laser inertial navigation equipment and the importance of standard maintenance operations was analyzed in detail. After electricity maintenance and system calibration at regular intervals, the performance of malfunction equipment was restored. The test data shows that, the horizontal positioning accuracy of the system can be typically improved from 8.35 m(CEP) to 2.9 m(CEP) by maintenance. This paper can provide references and theoretical supports for the design and production of similar equipment in domestic, and utilization for army.

Key words: positioning and orientation system; inertial navigation; ring-laser gyroscope; accelerator; maintenance

收稿日期: 2017-12-15; 修回日期: 2018-02-09

作者简介: 杨建强(1982—), 男, 河南新蔡人, 博士, 工程师, 主要从事光电技术、红外技术、导航技术、军械装备质量监督等方面的研究和管理工作的研究。E-mail: yjqyj_qyj@163.com

引言

装备维护是指在装备使用过程中,对其进行必要的维修和保养,以实现其战斗力水平最大化的活动,它是装备全寿命周期中至关重要的一个环节。随着我国武器装备的现代化,相较于机械化时代,武器装备呈现出信息化程度高、可靠性要求高、技术复杂等特点,往往一型装备涉及众多技术领域和学科。针对新型装备使用,目前不少部队官兵或研制厂家对装备规范化的使用维护保养意识有待提高。本文以某型陆用高精度激光陀螺定位定向系统为研究对象,对陆用激光惯导装备的使用维护保养问题进行深入分析^[1-2]。

某型定位定向系统属于国内第一代采用激光陀螺研制的高精度陆用激光惯导装备,其主要任务使命是为载车提供位置、高程、方位和水平姿态等导航信息,配合车上设备完成连测作业,赋予基准射向以及引导部队行军。该型定位定向系统作为一种新型陆用惯性导航系统,与基于卫导、里程计等外部辅助信息的惯性导航系统不同,在不依赖外界速度或位置等参考信息的条件下,采用零速修正技术获取高精度的定位定向信息,对惯性器件性能的稳定性具有较高要求。国外同类陆用定位定向系统如 IPADS

已经实现了免标定维护,国内目前主要通过定期的维护保养保证其性能稳定。

1 定位定向系统

1.1 基本组成与原理

某型定位定向系统为单轴旋转调制激光惯导系统,主要由惯性测量组件(IMU)、单轴旋转调制转台、电路组件、外罩与基座等组成,其中惯性测量组件为设备的核心。惯性测量组件主要由3个激光陀螺仪、3个石英挠性加速度计、结构本体以及相应的电路模块等组成,激光陀螺和加速度计(统称惯性器件)分别正交固联安装在刚性本体座上,与配套电路安装在同一刚性箱体内存构惯性测量组件,主要功能是敏感载体在惯性系内的角运动和线运动信息,并将该信息通过预处理后进行导航解算。

定位定向系统惯性导航解算原理如图1所示,利用激光陀螺、石英挠性加速度计测量载体相对于惯性系的角运动信息、线运动信息。其惯性导航解算的实质是计算个积分方程:1)以角速度增量为输入的姿态积分;2)以线速度增量和姿态为输入的速度积分;3)以速度为输入的位置积分。

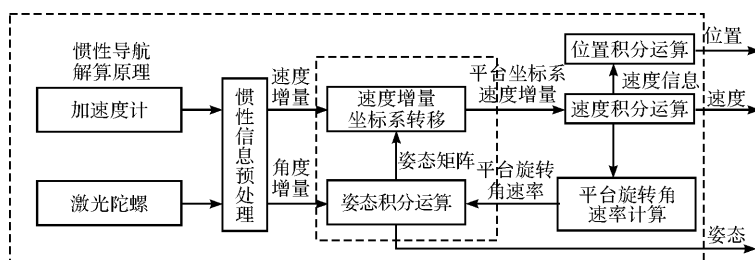


图1 定位定向系统惯性导航解算原理图

Fig. 1 INS solution schematic diagram of positioning and orientation system

具体方程为

$$\dot{C}_b^n = C_b^n (\omega_{ib}^b \times) \quad (1)$$

$$\dot{v}^n(t) = C_b^n(t) f_{sf}^b(t) - [2\omega_{ie}^n(t) + \omega_{en}^n(t)] \times v^n(t) + g^n(t) \quad (2)$$

$$\dot{L} = \frac{1}{R_M + h} v_N^n, \dot{\lambda} = \frac{\sec L}{R_N + h} v_E^n, \dot{h} = v_U^n \quad (3)$$

式中:角速度信息 ω_{ib}^b 包含有陀螺测量信息 ω_{ib}^b (载体坐标系 b 系相对于惯性系 i 系的角速度); f_{sf}^b 为加速度计测量的比力^[3-4]。

1.2 主要误差源

由惯性导航解算原理可知,定位定向系统导航精度主要取决于惯性器件精度:激光陀螺仪和石英

挠性加速度计。惯性器件误差主要包括以下类:

1) 安装误差

由于机械加工和装配误差等原因,惯性测量组件中3只激光陀螺仪和加速度计的敏感轴与理想载体坐标系(b 系)的坐标轴之间往往存在安装偏差角,可达角分量级甚至更大,在捷联导航解算之前必须先进行安装偏差角标定和补偿,定位定向系统在出厂前已对该项误差进行标定和修正。

2) 零偏误差和标度因数误差

零偏、标度因数误差是激光陀螺仪和加速度计的固有误差属性,直接影响惯性器件测量和输出精度,也是影响系统定位定向精度的主要因素

之一。该项误差具有随时间、环境等条件逐渐发生变化的特性,稳定性和重复性是衡量该项误差的主要指标,定位定向系统在出厂前已对该项误差进行标定和修正,但是随着使用时间和使用环境的变化,需要周期性对该项误差进行重新标定。

3) 温度漂移误差

激光陀螺仪和加速度计在工作时均会受到工作温度和温度场的影响,温度环境的变化会造成器件输出特性发生改变,定位定向系统在进行零偏和标度因数误差标定时,会对惯性器件温度特性进行误差拟合,可采用数字补偿的方法进行惯性器件温度漂移误差补偿。但是惯性器件误差温度特性重复性也会随时间发生改变,特别是对于系统采用的石英挠性加速度计,温度模型重复性也是影响其长期精度性能的指标之一,需要周期性进行温度模型修正。

上述3类误差的标定和补偿构成了激光陀螺定位定向系统装备精度保证的体系,其中,零偏、标度因数、温度漂移误差需要周期性对装备进行人为主动修正。因此,激光陀螺定位定向系统维护保养主要是针对惯性器件的维护保养。目前,针对该系统的维护保养的方式主要有2种:定期通电维护和系统定标。

2 惯性器件对维护保养的需求

2.1 加速度计维护保养需求

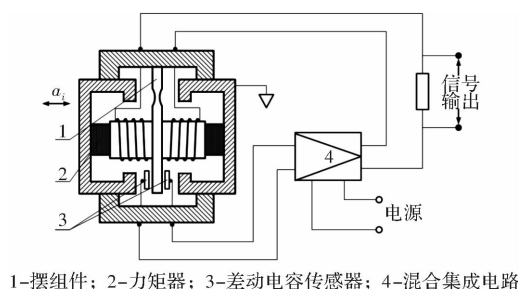
石英挠性加速度计为力平衡式加速度计,主要由摆组件、力矩器以及混合集成电路组成,如图2所示。加速度计在长期贮存过程中不通电维护保养,内部机械结构和伺服电路(图2部件1、2)处于非工作状态。加速度计内部的摆组件(图2部件1)为活动部件通过挠性平桥支撑摆质量,在外界载荷作用下,应力会集中到挠性平桥部位,而该应力会直接反应到加速度计的偏值;永磁材料稳定性也会发生变化,加速度计磁路气隙稳定性随之改变;此外,磁路组成单元位置的稳定性也会发生变化,进而导致力心变化,直接反映到加速度计标度因数^[5-6]。针对加速度计贮存过程维护和不维护情况下,环境载荷变化对加速度计参数的影响进行分析如下:

1) 当环境载荷导致摆组件平衡位置及预负载稳定性变化时,加速度计的偏值稳定性发生变化,预紧力变化20 N时,大约会产生100 μg 偏值影响;

2) 当环境载荷导致磁性材料稳定性发生变化时,加速度计的标度因数稳定性发生变化,2个动圈同时沿输入轴移动0.1 μm ,标度因数变化约 20×10^{-6} ;

3) 当环境载荷导致敏感组件、力矩器组件内部构件位置发生变化时,力心会发生变化,造成影响与2)相同。

贮存过程定期通电维护保养,可以释放应力、稳定磁路,提高力心稳定性,进而提高加速度计参数稳定性。



1-摆组件; 2-力矩器; 3-差动电容传感器; 4-混合集成电路

图2 加速度计原理图

Fig. 2 Schematic diagram of accelerometer

目前,加速度计长期稳定性能是限制惯性导航装备整体性能的主要瓶颈之一,其精度指标直接与时间相关,国内不同应用平台针对高精度惯性导航装备均需要对石英挠性加速度计进行定期维护和标定。

2.2 激光陀螺仪维护保养需求

激光陀螺仪的漂移表现为零点偏置的不稳定度,零漂是影响激光陀螺精度的最直接、最难以控制的一种误差,主要零漂有朗缪尔流动零漂、磁场引起的零漂、多模耦合效应零漂、差分模推斥零漂、非激活介质的流动和电泳引起的零漂、锁区不稳定和顺逆不相等带来的零漂等^[7-10]。

在长期贮存过程中不通电维护保养对激光陀螺性能的影响主要有3个方面:

1) 从物理特性来说,气体的折射率、材料的导热系数、光学器件的光学性质也会随时间、温度发生变化;

2) 从几何特征来说,器件的热胀冷缩、弯曲变形都可造成光路发生变化,谐振系统损耗增加;

3) 长期贮存过程中磁场、温度场的变化会引起气流流场的变化,导致朗缪尔流零偏。

因此,受环境温度变化、应力释放及其长时间的累积效应的影响,激光陀螺仪误差特性会发生变化,抑制误差漂移的有效措施是给激光陀螺仪

进行定期通电维护,通过对激光器、光路以及探测器施加电应力,达到消除陀螺腔体杂散介质沉积的目的,确保陀螺仪长期零偏稳定性。

2.3 国内同类装备使用维护要求和现状

不同精度等级的惯性导航装备、不同应用平台的惯性导航装备对维护保养的要求各不相同,一般意义而言,惯导装备精度性能越高对维护保养要求越严格。表1列举了国内部分采用相同技术体制(激光陀螺和石英挠性加速度计)的激光惯导装备维护保养要求,数据来源于不同研制单位研制的不同应用领域的惯性导航装备使用维护技术要求。

表1 国内同类装备使用维护要求
Table 1 Maintenance requirement of domestic equipments of similar type

名称	应用平台	维护要求
某型陆用激光陀螺定位定向系统	车载	定期通电:1个月;系统定标:3个月。
某型舰艇激光惯性导航系统	舰载	离舰标定,标定周期大于2年。
某型潜艇激光惯性导航系统	潜艇	具备系泊状态下的自标定功能。
某型机载激光惯性导航系统	机载	标定周期6个月,每隔3年定期维护。
某型弹载激光惯性导航系统	弹载	定期通电:每季度通电一次;全面维护:每3年进行一次惯导系统全面维护。

由表可知,目前国内高精度激光惯导装备均提出了定期通电或标定的维护要求和贮存要求,其中某型陆用激光陀螺定位定向系统维护要求主要是基于加速度计月综合误差和3月综合误差的精度指标,结合系统实际测试和应用情况而提出的。其目的在于最大化提升装备的作战效能,通过人为主动使用和维护,避免装备由于长期存放出现性能下降的情况。

3 维护保养对定位定向系统性能的影响

定期的维护保养对定位定向系统的作用主要体现在2个方面:

1)定期通电维护可以保证惯性器件性能稳

定性;

2)定期的系统定标维护可以对惯性器件误差进行重新标定。

定期通电和定标维护保养对高精度定位定向系统精度性能有重要影响,尤其是在长期不通电贮存条件下,如未按照装备维护使用说明书规范进行维护保养工作,可能会导致惯性器件精度出现下降,直接影响装备性能。

3.1 通电维护保养的影响

定位定向系统定向误差可表示为

$$\phi_u = \frac{\epsilon_e}{\omega_{ie} \cos L} + \frac{\nabla_e}{g} \tan L + \frac{d\nabla_n}{g \cdot \omega_{ie} \cos L} \quad (4)$$

式中: ϕ_u 表示方位误差; ω_{ie} 表示地球自转角速度; L 表示纬度; ϵ_e 东向陀螺零偏; $d\nabla_n$ 表示加速度计零偏的北向分量 ∇_n 随时间的微小变化; g 表示重力加速度。

1)加速度计影响

上述分析表明,加速度计在长期不通电维护保养情况下,其零偏稳定性发生变化,取纬度 $L=45^\circ$ 时,根据(4)式计算北向加速度计15 min零偏变化 $d\nabla_n$ 对方位对准误差的影响,如图3所示。

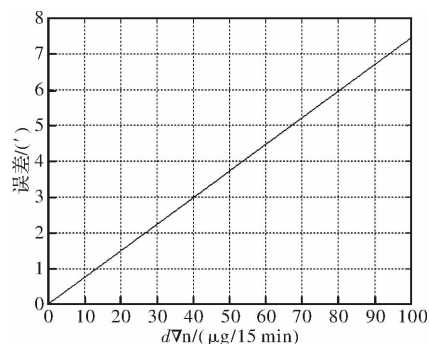


图3 北向加速度计15 min零偏变化 $d\nabla_n$ 造成的方位对准误差

Fig. 3 Azimuth error caused by north accelerometer bias changed in 15 min

图3表明,北向加速度计15 min内零偏变化大于 $40 \mu\text{g}$ 即可造成定位定向系统 $3'$ 定向误差。加速度计零偏不稳定时,其造成定位定向系统精度下降严重,特别是对于高精度应用的场合,这对装备作战性能的发挥具有致命的影响。

2)激光陀螺影响

定位定向系统采用的高精度激光陀螺仪,零偏稳定性优于 $0.005^\circ/\text{h}$,同型号的激光陀螺仪在长期不通电维护保养情况下进行测试,其中首次

通电出现过的问题现象测试数据如图4所示。

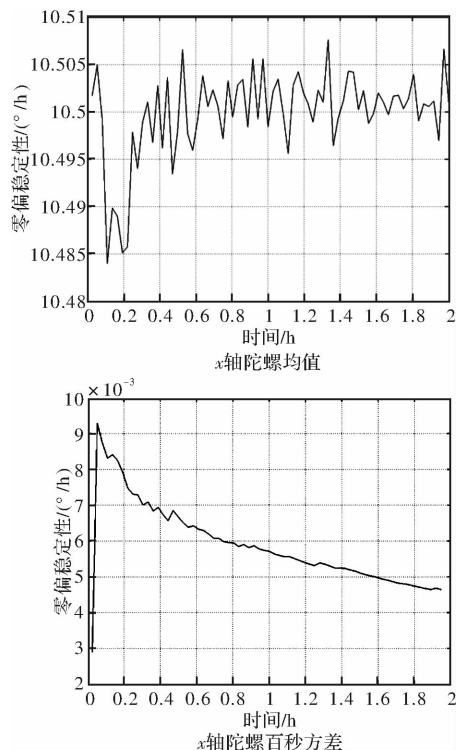


图4 激光陀螺仪输出曲线

Fig. 4 Curve of RLG output

可以看出,激光陀螺在上电初始一段时间内出现零偏不稳定的情况,零偏变化约 $0.01^{\circ}/\text{h}$ 。随着通电时间的延长,输出逐渐稳定,零偏稳定性(百秒方差)降低到精度指标范围以内。

由(4)式可知,东向陀螺零偏 ϵ_e 会造成定位定向系统定向误差,取纬度 $L=45^{\circ}$ 时,将 $\epsilon_e=0.01^{\circ}/\text{h}$ 代入(4)式可得方位误差 $\phi_u=3.2'$ 。因此,激光陀螺仪长期未通电维护的情况下,同样会造成定位定向系统精度严重下降。

3.2 系统定标维护的影响

系统定标主要解决定位定向系统惯性器件误差随时间、温度等环境因素变化的问题。系统定标依靠系统的自身条件和特性来完成惯性器件误差系数的标定和分离,无需依靠任何外部转台等辅助设备,因此采用系统定标有助于缩短IMU的测试标定时间,提高定位定向系统的使用精度,原理如图5所示。

周期性的系统定标主要解决系统以下几个方面的问题:

- 1) 无需更换元器件维修或维护,依靠系统自身性能恢复,提升装备维护性;
- 2) 与大多数惯导装备拆卸返厂或采用专用维

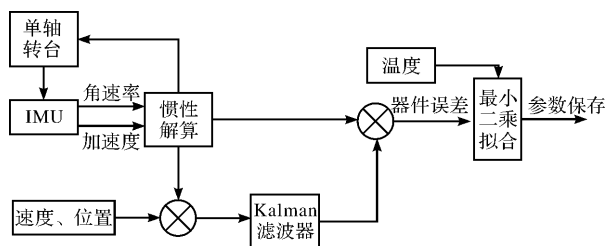


图5 系统定标技术原理框图

Fig. 5 Schematic diagram of system calibration

护设备进行标定维护的方式不同,系统定标可实现在车状态下操作,极大减少维护成本和时间;

3) 系统定标基于激光陀螺仪和石英挠性加速度计误差特性,以导航误差作为观测量对系统误差参数进行辨识,通过卡尔曼滤波估计出加速度计和陀螺仪的零偏、标度因数以及温度系数等误差参数。

系统定标作为定位定向系统的一项重要维护技术手段,在惯性器件零偏误差较大或温度重复性精度较差的情况下,通过周期性的系统定标操作,无需拆卸和更改技术状态自动完成对惯性器件误差进行估计补偿,是一种快速可行的解决惯性器件误差随时间、环境等因素变化的有效途径。

3.3 维护保养问题案例分析

由于对新型陆用激光惯导装备维护保养要求认识不足,某型定位定向系统在产品交付后,出现过维护保养不规范和维护保养不当的问题,直接导致惯性器件精度下降,造成定位定向系统无法满足规定技术指标。经分析发现,问题产品激光陀螺仪暂未出现明显性能异常,而加速度计存在输出不稳定的现象,具体表现如下:

- 1) 加速度计输出出现“跳变”现象,如图6所示;
- 2) 加速度计输出漂移过大,如图7所示($1\text{e}^{-5}\text{m/s}^2=1\mu\text{g}$)。

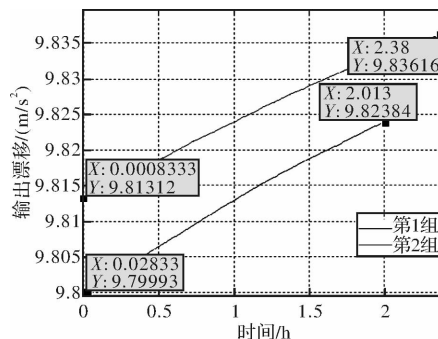


图6 加速度计输出漂移曲线

Fig. 6 Curve of accelerometer's drift

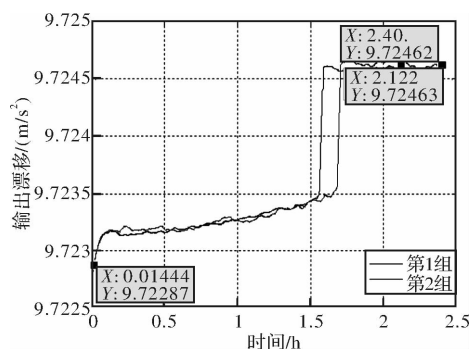


图7 加速度计输出“跳变”曲线

Fig.7 Curve of accelerometer's step change

测试数据表明,问题产品加速度计均存在较为严重的精度下降,部分产品加速度计漂移达到mg级别,同时部分产品加速度计出现大于100 μg的“跳变”现象,不能满足定位定向系统对加速度计的性能指标要求。经过核查问题产品的定标参数,发现产品存在维护保养不规范的情况,在对问题产品进行通电或定标保养维护后,产品性能恢复,其中该型产品维护保养前后水平定位精度的典型实测数据分别为8.35 m(CEP)和2.9 m(CEP)。经过军方机关组织的质量问题归零评审,最终产品问题原因定位为产品在长期贮存时,未按要求进行规范的通电或定标维护保养,造成加

速度计性能下降,引起产品定位或定向精度超差。上述案例分析进一步表明,维护保养对于定位定向系统精度性能具有重要意义。

4 降低维护保养要求的思考

结合前文的分析,定位定向系统定期维护保养要求主要受制于国内惯性传感器件整体水平,装备经常性定期维护保养会对部队日常训练使用造成不便,特别是在当前高科技、高性能新型装备逐渐列装,而部队和研制厂家“重购置轻维护”的维护保养观念尚未完全转变的现状下,必须从提升装备综合性能入手,降低维护保养要求。

4.1 提升惯性传感器技术发展水平

21世纪以来,国内惯性传感器技术发展迅速,特别是激光陀螺和石英挠性加速度计技术的进步,使国内惯性导航技术的发展踏上了新的台阶。但是在高精度陆用惯性导航领域,国内惯性传感器技术水平与世界顶尖水平相比仍存在差距。例如,美国陆军装备的定位定向系统(IPADs)已经实现免周期性标定,其采用Honeywell公司研制的qa系列加速度计与国内某型高精度加速度计指标对比如表2所示。

表2 加速度计性能对比表

Table 2 Comparison of performance of different accelerometers

某型高精度加速度计	指标	Honeywell 公司 QA3000	指标
量程	±20 g	量程	±60 g
偏置	≤5 mg	偏置	≤4 mg
偏置温度系数(全温)	≤30 μg/℃	偏置温度系数(全温)	≤15 μg/℃
偏置月综合误差(1δ)	10 μg	偏置年综合误差	40 μg
偏置三月综合误差(1δ)	30 μg		
标度因数温度系数(全温)	≤60 ×10 ⁻⁶ /℃	标度因数温度系数(全温)	≤120 ×10 ⁻⁶ /℃
标度因数月综合误差(1δ)	≤20 ×10 ⁻⁶	标度因数年综合误差	80 ×10 ⁻⁶
标度因数三月综合误差(1δ)	≤50 ×10 ⁻⁶		

由表2可以看出,国内加速度计3月综合误差水平与国外年综合误差水平相当,在长期稳定性上与国外先进水平有差距。IPADs采用的RL-34激光陀螺精度为0.000 5°/h,根据文献[11]的测试结果,其精度最高可达0.000 2°/h。

因此,提升惯性传感器技术水平是进一步降低定位定向系统维护要求的关键之一,其中长期稳定性、长期重复性以及环境适应性是惯性传感

器件技术发展的重点。

4.2 定位定向系统技术体制的提升

如图8所示,保证定位定向系统零速修正精度的重点是系统速度误差变化趋势保持稳定,减小零速修正后的位置残余误差(即减小图中阴影部分面积),其解决方法如表3所示。表3为东北天坐标系惯性器件投影等效误差稳定下的情况。

随着国内激光陀螺惯性导航双轴调制技术的

成熟,采用双轴技术可实现产品在车状态的自标定,解决惯性测量组件长周期维护需要拆卸返厂标定的问题,达到免拆卸标定的目的;同时可利用双轴转位结构隔离载车转弯、上下坡等外界角运动,提高系统定位定向精度稳定性,降低对惯性器件精度要求,从而延长维护周期。因此,定位定向系统技术体制的提升可从系统层面降低定位定向

系统维护要求,进一步简化部队维护保养操作。

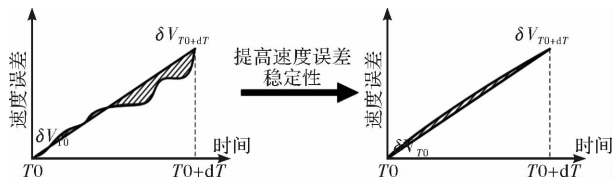


图 8 零速修正误差原理示意图

Fig. 8 Schematic diagram of ZUPT

表 3 技术体制提升解决措施

Table 3 Methods for enhancing technological regimes

问题	具体措施	适用范围
惯性器件自身误差为小量误差	(一)定期通电、定标,防止惯性器件出现粗大误差; (二)初始对准进一步补偿,使惯性器件误差为小量误差。	适用于单轴或双轴惯性定位定向系统。
IMU 与东北天坐标系投影关系保持稳定	(一)双轴转位辅助对准,修正惯性器件各项粗大误差; (二)双轴转位隔离载车转弯、上下坡对投影关系的影响。	适用于双轴惯性定位定向系统。

5 结束语

规范的使用维护保养对于陆用高精度激光惯导装备具有十分重要的意义,在国内现有惯性传感器技术水平现状下,定期的维护保养是保证装备性能长期稳定的有效手段,特别是在非正常使用的长期库存条件下,必须要制定详细的系统维护保养措施。某型产品维护保养前后的水平定位精度典型实测数据分别为 8.35 m(CEP)和 2.9 m(CEP)。本文为国内同类装备的设计、生产以及部队使用提供参考和理论支撑,具有十分重要的工程意义。

参考文献:

[1] TAN Jing,WANG Jun,SUN Zhang. Equipment maintenance technology of the western highland areas [J]. Journal of Xihua University(Natural Science), 2014,33(4):34-37.
谭靖,王军,孙章. 西部高原地区装备维护保养技术 [J]. 西华大学学报(自然科学版), 2014, 33(4): 34-37.
[2] LI Changqing,MA Shining. Research on the technology system of equipment maintenance[J]. China Surface Engineering,2013,26(5),111-116.
李长青,马世宁. 装备维修体系初探[J]. 中国表面工程,2013,26(5):111-116.
[3] YAN Gongmin. Study on autonomous position and azimuth determining system[D]. Xi,an;Xi,an North-western Polytechnical University,2006.
严恭敏. 车载自主定位定向系统研究[D]. 西安:西北

工业大学,2006.
[4] WANG Yu. Preliminary exploration of dithering RLG strapdown inertial navigation system [D]. Changsha: National University of Defense Technology,2005.
王宇. 机抖激光陀螺捷联惯导系统的初步探索[D]. 长沙:国防科技大学,2005.
[5] HE Tiechun,ZHOU Shiqin. Accelerometer in inertial navigation [M]. Beijing: National Defence Industry Press,1983.
何铁春,周世勤. 惯性导航加速度计[M]. 北京:国防工业出版社,1983
[6] DENG Fengli. Research on the varying parametric mechanism and model of accelerometer under temperature stress[D]. Beijing:School of Reiability and Systems Engineering in Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2010.
邓泮鹏. 温度应力作用下的加速度计参数变化机理及模型研究[D]. 北京:北京航空航天大学可靠性与系统工程学院,2010
[7] QIN Yongyuan. Inertial navigation[M]. Beijing: Beijing Science Press,2006.
秦永元. 惯性导航[M]. 北京:科学出版社,2006.
[8] YANG Weiguang. Research on the dynamic error calibration and compensation algorithms of SINS[D]. Changsha:National University of Defense Technology,2009.
杨伟光. 捷联惯性导航系统动态误差标定与补偿算法研究[D]. 长沙:国防科技大学,2009.