

激光陀螺定位定向系统工作模式机理分析

杨建强¹, 刘 灿¹, 尹中锋², 刘 斌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. 陆军武汉军事代表局, 湖北 武汉 432200;
3. 中国人民解放军 71320 部队装备部, 河南 开封 475003)

摘 要:激光陀螺定位定向系统对增强部队的生存能力、机动能力以及作战能力具有十分重要的作用。为充分发挥激光陀螺定位定向系统快速、机动、准确定位定向的性能优势,本文以系统的工作模式作为出发点,分析了其零速修正原理、误差因素以及不同工作模式的适用条件,对系统的工作模式机理进行了详细探讨,并进行了对比试验验证。试验结果验证了理论分析的正确性,为指导定位定向系统正确使用和维护提供了有效的参考依据。

关键词:激光陀螺;定位定向系统;零速修正;工作模式;惯性导航

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2017.03.015

Working mode analysis of position and direction determining system in RLG

YANG Jian-qiang¹, LIU Can¹, YIN Zhong-feng², LIU Bin³

(1. Military Representative Office in 3303 factory of PLA, Wuhan 430200, China;
2. Military Representative Bureau at Wuhan of PLA Land force, Wuhan 432200, China;
3. Armament Department of 71320 PLA Troops, Kaifeng 475003, China)

Abstract: Position and azimuth determining system of ring laser gyroscope (RLG) is useful for improving survival capacity, mobility and operational capacity of army. In order to take full advantage of quickness, maneuverability and accuracy of the system, starting from the working mode, the theory of ZUPT, error factors and the application conditions of different working modes were analyzed. The mechanism of working modes was discussed and contrastive test was carried out. The experimental results show the validity of theoretical analysis, which provide valid reference for operation and maintenance of position and azimuth determining system.

Key words: RLG; position and azimuth determining system; ZUPT; working mode; INS

1 引 言

机动、快速作战将是陆军特别是炮兵的重要作战方式,随着我军炮兵装备机械化、自行化程度的不断提高,快速、高精度、高可靠测地保障是增强部队快速反应能力的重要前提;同时针对未来信息化作战的需求,炮兵测地装备应能够在复杂电磁环境下工作。高精度定位定向系统可以完全自主、实时确定位置和方位,是快速精密连测和布设战场校准点的重要手段,已成为我军武器装备信息化的重要组成部分,在战场上起着至关重要的作用^[1]。

激光陀螺定位定向系统对准时间短,可以直接安装在载车、武器平台上,具有全自主、全参量、精度高、反应速度快的特点,是国内外炮兵测地车、侦察车、导弹发射车等陆军作战平台的主要导航装备。在高精度炮兵测地应用领域,定位定向系统一般采用零速修正(ZUPT)的方式提高惯导系统的定位精度,作为一种简单而有效的技术,零速修正在国外诸多惯性导航系统中均有应用^[2]。

本文简单介绍了国内某型激光陀螺定位定向系统的组成和工作流程,通过该系统零速修正模式进行

详细分析和对比,对定位定向系统两种工作模式的误差机理、适用条件进行了研究,并通过跑车试验对系统两种工作模式进行验证,证明了理论分析的正确性。

2 激光陀螺定位定向系统

2.1 激光陀螺定位定向系统组成

激光陀螺定位定向系统是一种高精度陆用惯性导航系统,为载车行驶、大地测量及车载武器系统精确打击提供三维地理坐标、航向、水平姿态及速度等导航信息。定位定向系统由惯性测量组件(IMU)、单轴旋转调制转台、伺服控制驱动单元和导航解算模块等组成,其组成如图1所示。

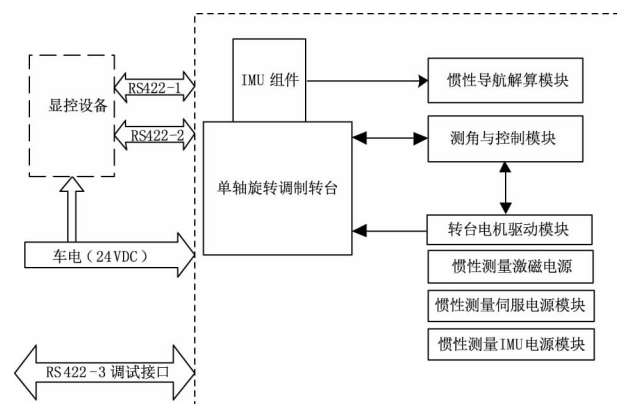


图1 激光陀螺定位定向系统组成图

Fig. 1 Composition chart of RLG position and azimuth determining system

2.2 激光陀螺定位定向系统工作流程

激光陀螺定位定向系统工作流程如图2所示。

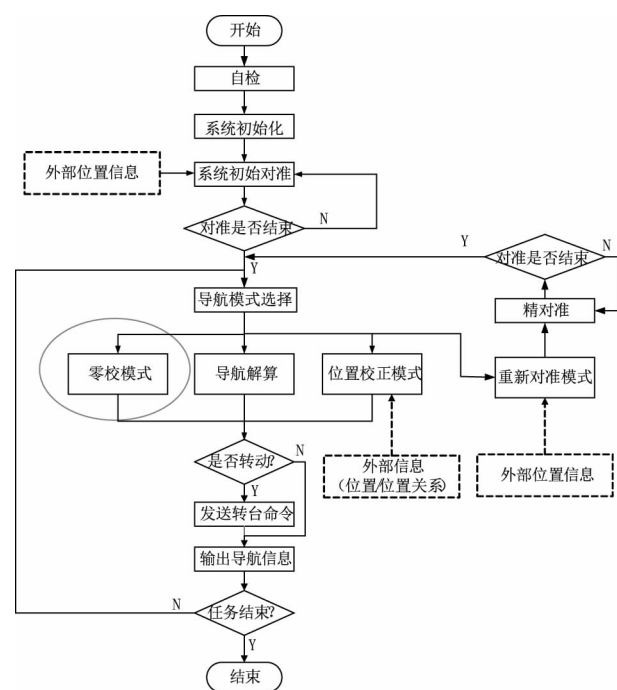


图2 激光陀螺定位定向系统工作流程图

Fig. 2 Work flow chart of RLG position and azimuth determining system

激光陀螺定位定向系统通电启动后,首先进行自检和初始化。自检正常后,利用外部信息进行初始位置装订,随即进入对准状态。对准结束后,载车行驶,系统在动态行驶过程中实时进行导航解算,停车时利用惯性器件检测或人工指令检测停车状态,系统进入零速修正模式,在短时间内(如10s)完成误差补偿,并输出校正后的导航结果。

3 零速修正工作模式

激光陀螺定位定向系统有两种零速修正工作模式:曲线拟合零速修正模式和Kalman滤波零速修正模式^[3]。

3.1 曲线拟合零速修正模式

由于惯性器件误差等的影响,定位定向系统的速度误差近似为舒拉振荡过程,如图3所示。在较短的零修间隔时间内,可采用多项式样条函数拟合系统速度误差曲线,根据拟合出的系统速度误差曲线以及零校时间间隔,通过积分即可得到系统定位误差校正值。

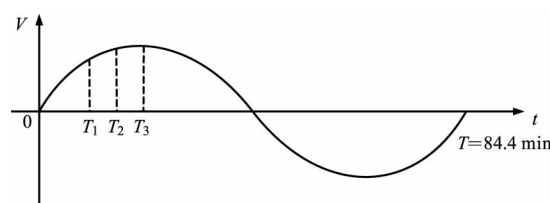


图3 激光陀螺定位定向系统速度误差曲线

Fig. 3 Velocity error curve of RLG position and azimuth determining system

零速修正的曲线拟合法一般公式为:

$$\delta V(t) = k_0 + k_1 t + \dots + k_n t^n (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

式中, $\delta V(t)$ 表示拟合的速度误差; k_i 表示相应时间项的系数。

根据拟合得到的系统速度误差,经积分后即得定位误差校正值:

$$\delta P = \int_t^{t+\Delta t} \delta V(\tau) d\tau \quad (2)$$

式中, δP 表示系统定位误差; Δt 表示零速修正时间间隔。

对于使用高精度的激光陀螺和石英挠性加速度计的车载激光惯导系统而言,舒拉振荡的幅值一般较小,10 min或5 min零速修正时间间隔内的系统速度误差使用低阶曲线拟合即可达到较好的修正效果,所以此法简单、可靠、计算量小。但是曲线拟合误差随零修时间间隔的变长会急剧增加,且需要惯性器件误差在零修间隔时间内保持稳定,因此对惯

性器件精度要求较高。

3.2 Kalman 滤波零速修正模式

Kalman 滤波零速修正是基于惯性导航误差模型和 Kalman 滤波估计算法,以载车停止时系统的输出速度作为系统速度误差的观测量,对定位定向系统导航误差进行估计,零速修正 Kalman 滤波模型如图 4 所示。

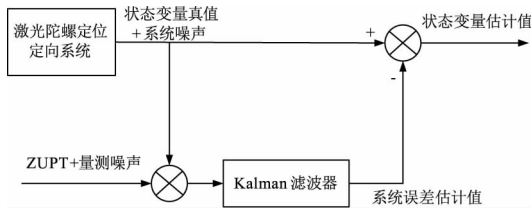


图 4 零速修正 Kalman 滤波模型

Fig. 4 Kalman filtering mode of ZUPT

激光陀螺惯导系统误差模型为:

$$\begin{aligned}\dot{\varphi} &= \varphi \times \omega_{in}^n + \delta\omega_{in}^n - C_b^n \varepsilon^b \\ \dot{\delta V}^n &= f^n \times \varphi^n + \delta V^n \times (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) + V^n \times (2\delta\omega_{ie}^n + \delta\omega_{en}^n) + C_b^n \nabla^b \\ \dot{\delta P} &= \delta V^n \\ \dot{\varepsilon}^b &= 0 \\ \dot{\nabla}^b &= 0\end{aligned}\quad (3)$$

选取系统姿态失准角、速度误差、位置误差、陀螺零偏及加速度计零偏列入系统状态,得到 12 维的状态变量:

$$\begin{aligned}X &= [\varphi_E \quad \varphi_N \quad \varphi_U \quad \delta V_E \quad \delta V_N \quad \delta\lambda \quad \delta L \quad \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \quad \varepsilon_z \quad \nabla_x \quad \nabla_y]^T\end{aligned}\quad (4)$$

取系统状态方程为:

$$\dot{X} = FX + GW\quad (5)$$

式中, F 为系统状态矩阵; G 为噪声转换矩阵; W 为系统噪声矢量。选取系统水平速度误差为观测量,系统量测方程为:

$$Z = HX + V\quad (6)$$

其中,观测矩阵 $H = \begin{bmatrix} 0_{1 \times 3} & 1 & 0 & 0_{1 \times 7} \\ 0_{1 \times 3} & 0 & 1 & 0_{1 \times 7} \end{bmatrix}$; V 表示系统观测噪声。

Kalman 滤波零速修正的优点是状态变量具有明确的物理意义,滤波器可以跟踪系统状态的变化过程,而且考虑了各速度通道(尤其是两个水平通道)间的相互耦合关系。但是 Kalman 滤波器的数学模型只是物理系统的近似,所以实际的滤波器性能都比最优性能有所下降^[4]。

4 激光陀螺定位定向系统工作模式机理分析

激光陀螺定位定向系统零速修正精度的基础是激光陀螺仪零偏稳定性、石英挠性加速度计零偏稳定性及其机械安装结构的稳定性,影响上述稳定性的因素主要是环境温度变化范围、温度变化率及其长时间对惯性器件误差的累积效应^[5]。针对惯性器件误差的特性和两种零速修正工作模式的特点,激光陀螺定位定向系统在实际应用中也对应有两种工作模式:一是 7 天通电 1 次工作模式,以下简称模式一;另一种是 1 个月通电 1 次工作模式,以下简称模式二。

4.1 模式一机理分析

模式一是在惯性器件误差较小,误差补偿模型准确的情况下,采用曲线拟合零速修正模式和特定的对准算法和定标算法对惯性器件误差予以精确补偿,使定位定向系统达到较高的零速修正精度,模式一工作原理如图 5 所示。

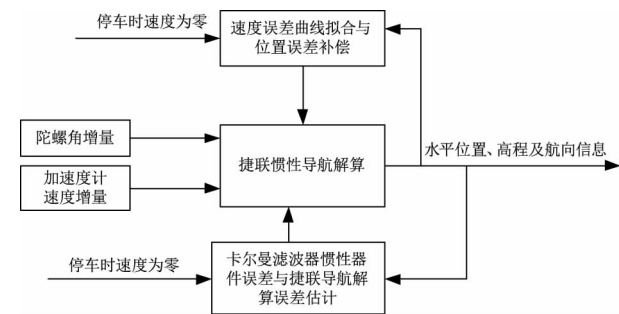


图 5 定位定向系统模式一工作原理图

Fig. 5 Work principle chart of mode 1 on position and azimuth determining system

工作在模式一情况下的定位定向系统虽然可以实现较高的导航精度,但是其对惯性器件精度要求较为苛刻,需每隔 7 天对设备通电 12 h,确保惯性器件随时间累积的综合误差保持在较小的范围以内。若系统长时间不通电,则建立的惯性器件误差模型可能因器件误差的变化与实际情况不符,由此造成对准和定标算法不仅不能精确补偿惯性器件误差,反而因误差模型失效造成对惯性器件误差估计的严重偏离,导致定位定向系统作业时精度超差。

4.2 模式二机理分析

模式二是针对定位定向系统在长期贮存条件下,惯性器件特别是加速度计的关键性能参数会有明显的退化,在进行零速修正时速度误差作为观测信息,通过闭环 Kalman 滤波技术对定位定向系统的惯性器件误差及捷联惯性导航解算误差等误差进行最优估计与补偿^[6],模式二工作原理如图 6 所示。

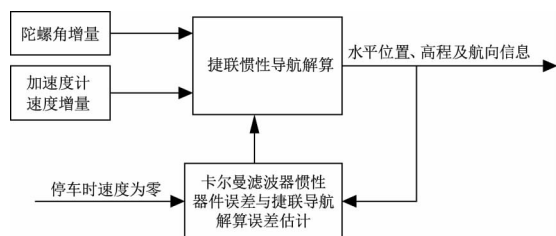


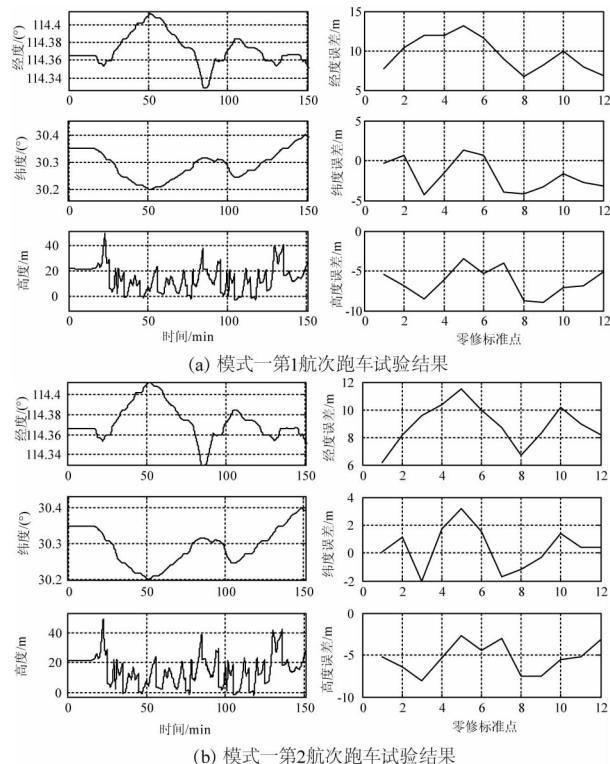
图6 定位定向系统模式二工作原理

Fig. 6 Work principle chart of mode 2 on position and azimuth determining system

工作在模式二情况下的定位定向系统,降低了系统维护的要求,根据器件随时间累积的综合误差指标,可以1个月对系统通电1次。由于模式二采用Kalman滤波零速修正,在对准和零速修正过程中估计的陀螺零偏、加速度计零偏、水平姿态误差和航向误差等导航误差予以实时反馈补偿,因此该模式在系统长时间未通电维护的情况下,零速修正仍能保持较高精度,工作稳定性和可靠性要高于模式一。

5 试验验证

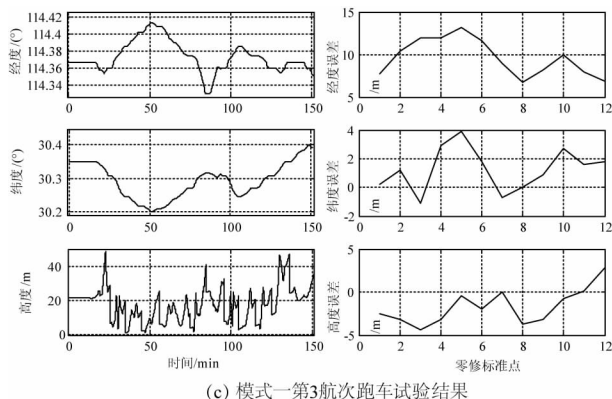
通过跑车试验对激光陀螺定位定向系统两种工作模式进行对比验证,选取未通电时间超过1个月的激光陀螺定位定向系统作为试验设备。选定跑车路线后,以行车9~10 min为标准在跑车路线上选出12个零修标准点,使用高精度差分GPS(水平定位精度达0.1 m,高程定位精度达0.5 m)测量12个零修标准点的精确坐标作为位置真值,两种工作模式各进行3个航次跑车试验。定位定向系统导航结果和零修标准点定位误差如图7、8所示。



(a) 模式一第1航次跑车试验结果

(b) 模式一第2航次跑车试验结果

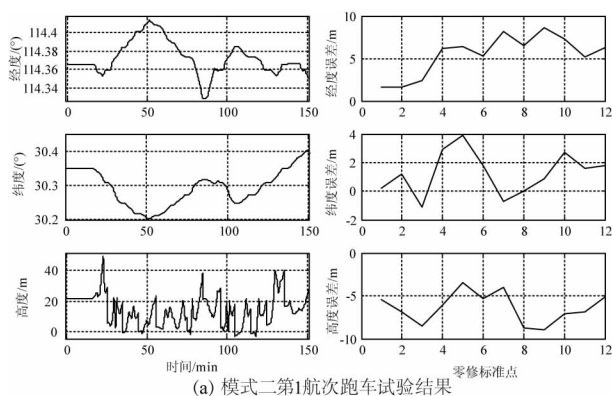
(c) 模式一第3航次跑车试验结果



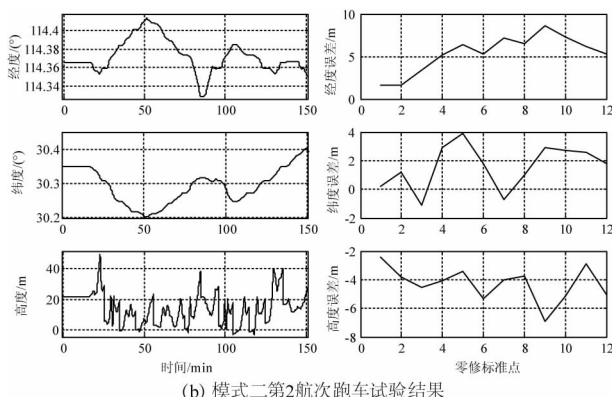
(c) 模式一第3航次跑车试验结果

图7 模式一3航次跑车试验结果

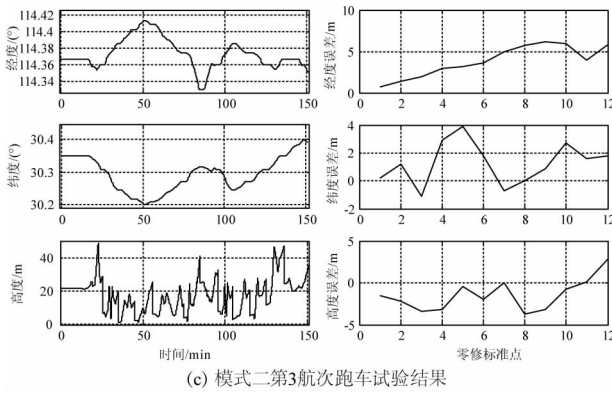
Fig. 7 The results of 3 vehicle tests under mode 1



(a) 模式二第1航次跑车试验结果



(b) 模式二第2航次跑车试验结果



(c) 模式二第3航次跑车试验结果

图8 模式二3航次跑车试验结果

Fig. 8 The results of 3 vehicle tests under mode 2

分别对两种模式3个航次跑车试验结果进行统计,模式一定位误差为8.1 m(CEP),模式二定位误差为4.3 m(CEP)。跑车试验结果表明,在定位定向系统较长时间未通电维护的情况下,采用模式二工作方式比模式一工作方式更加可靠稳定。

6 结 论

本文对激光陀螺定位定向系统工作模式机理进行深入研究,通过对系统两种零速修正模式的适用特点和系统对应的两种工作模式进行了分析,进行跑车试验验证了分析结论:系统零速修正的精度主要取决于惯性器件零偏稳定性,在模式一条件下零速修正可以达到较高的精度,但是需要经常性对系统进行通电维护以确保惯性器件误差在要求范围以内;模式二降低了对系统通电维护的要求,在满足作战效能的前提下更加符合实际的使用需求。本文的研究结论具有较高的工程实用价值和指导作用,为激光陀螺定位定向系统的充分发挥其作战效能提供了参考依据。

参考文献:

- [1] YAN Gongmin. Study on autonomous position and azimuth determining system[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006. (in Chinese)
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.
- [2] LIU Zhanrong, LIU Quan. Discussion on position and azimuth determining method of autonomous weapon system [J]. Intelligence Command Control and Simulation Techniques, 2003, 1: 33 - 36. (in Chinese)
刘占荣, 刘全. 自行武器系统的定位定向方法探讨 [J]. 情报指挥控制系统与仿真技术, 2003, 1: 33 - 36.
- [3] FENG Qinqi. Study on integrated navigation and ZUPT technology of RLG strapdown inertial navigation system [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009. (in Chinese)
冯庆奇. 激光陀螺捷联惯性导航系统组合导航及零速修正技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2009.
- [4] ZHOU Pinghuang, ZHENG Zhichao. Filtering mode design of height channel of RLG strapdown inertial navigation system [J]. Opticals and Photoelectronic Technology, 2013, 11(5): 75 - 78. (in Chinese)
周平璜, 郑志超. 激光捷联惯导系统高程通道滤波模型设计[J]. 光学与光电技术, 2013, 11(5): 75 - 78.
- [5] GAO Zhongyu, WANG Jin, DONG Jingxin, et al. ZUPT estimation methods of inertial survey system [J]. Journal of Chinese Inertial Technology Journal, 1995, 3(2): 24 - 29. (in Chinese)
高钟毓, 王进, 董景新, 等. 惯性测量系统零速修正的几种估计方法[J]. 中国惯性技术学报, 1995, 3(2): 24 - 29.
- [6] WANG Yu. Preliminary exploration of dithering RLG strapdown inertial navigation system [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005. (in Chinese)
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.