

文章编号 1004-924X(2012)06-1201-07

## 单轴旋转惯导系统中陀螺漂移的精确校准

于旭东\*, 王宇, 张鹏飞, 谢元平, 汤建勋, 龙兴武  
(国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

**摘要:**基于惯导系统的误差传播特性和轴向陀螺对经纬度误差的影响规律,提出了精确校准轴向陀螺漂移的方法以解决在单轴旋转惯导系统中单轴旋转只能自动补偿与转轴垂直的陀螺漂移,不能补偿轴向陀螺漂移的问题。首先,介绍了单轴旋转惯导系统自动补偿的基本原理。然后,在静基座的条件下分析了轴向陀螺漂移、初始方位和姿态角误差、初始速度误差等对经纬度的影响规律。提出了一种利用经纬度误差作为观测量,采用最小二乘法对轴向陀螺漂移进行精确校准的新方法。最后,利用激光陀螺单轴旋转惯导系统进行了静态导航试验和跑车试验。实验结果显示,该方法对轴向陀螺漂移的辨识精度达到 $0.0005(^{\circ})/h$ ,系统的定位精度优于 $1\text{ nm}/72\text{ h}$ 。该方法能够有效地辨识轴向陀螺漂移,使系统达到较高的导航精度,具有很强的工程实用价值。

**关键词:**单轴旋转;惯导系统;陀螺漂移;精确校准;最小二乘法

**中图分类号:**U666.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122006.1201

## Calibration of RLG drift in single-axis rotation INS

YU Xu-dong\*, WANG Yu, ZHANG Peng-fei, XIE Yuan-ping,  
TANG Jian-xun, LONG Xing-wu

(College of Photo-electric Science and Engineering,  
National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

\* Corresponding author, E-mail: wind0909@163.com

**Abstract:** On the basis of error propagation characteristics of an Inertial Navigation System(INS) and the effect of axial Ring Laser Gyroscope(RLG) on the errors of longitude and latitude, a calibrating method for the RLG drift was proposed to solve the problems that single-axis rotation could compensate the vertical RLG errors automatically, but could not compensate the axial RLG errors in a single-axis rotation INS. First, the auto-compensation principle of the single-axis rotation INS was introduced briefly. Then, the effect of the axial RLG drift, initial heading and attitude error, and initial velocity error on the longitude and the latitude was analyzed on the stationary base. Depending on the errors of longitude and latitude, a new method based on the least squares was proposed to calibrate the RLD drift precisely. Finally, the static and vehicle navigation experiments were performed. The results show that the identification precision reaches  $0.0005(^{\circ})/h$  and radial position error of the INS is less than  $1\text{ nm}/72\text{ h}$ . The axial RLG drift can be calibrated precisely by the least square method proposed and the experiment result of navigation meets practical demands.

收稿日期:2012-01-17;修订日期:2012-03-01.

基金项目:国防科技大学优秀研究生创新基金资助项目(No. B100703)

**Key words:** single-axis rotation; inertial navigation system; Ring Laser Gyroscope(RLG) drift; precision calibration; least square method

## 1 引言

对于长时间工作的惯性导航系统,惯性敏感元件(主要是陀螺)的漂移将引起随时间积累的定位误差,是影响惯性导航系统性能的重要因素<sup>[1-2]</sup>。采用系统旋转或翻转技术可以平衡陀螺的漂移,从而提高系统的长时间导航能力<sup>[3]</sup>。一直以来,Sperry 公司研制的 MK39 系列、MK49 系列和 AN/WSN-7 系列激光陀螺导航仪被选为各国海军的标准导航设备,它们均采用了旋转或翻转的系统技术来消除惯性元件对系统性能的影响<sup>[5-6]</sup>。直到 2003 年,美军逐步利用激光陀螺旋转惯导系统取代气浮陀螺惯导系统(AN/WSN-3)、液浮陀螺惯性导航系统(AN/WSN-5)和静电陀螺惯导系统(ESGN)来装备多种舰只和潜艇<sup>[7]</sup>。

采用单轴旋转方式可以消除或补偿与转轴垂直方向上的陀螺漂移,但轴向陀螺漂移无法得到补偿,因此对于单轴旋转系统,轴向陀螺的精度和稳定性很大程度上决定了系统的性能。所以研究如何对轴向陀螺漂移进行精确的校准具有十分重要的理论和实践意义。本文从原理上研究了轴向陀螺漂移、初始方位和姿态角误差、初始速度误差等对经纬度的影响规律,提出了一种以经纬度误差作为观测量来校准轴向陀螺漂移和方位误差角的方法。通过静态导航试验和车载导航试验,验证了轴向陀螺初始校准技术的精确性和有效性。

## 2 旋转惯导系统误差补偿的基本原理

激光陀螺单轴旋转惯导系统包括惯性测量组件、转位机构和相应的导航控制解算系统,系统结构如图 1 所示。其中,惯性测量组合安装在转位机构上,转位机构安装在载体上。转台控制系统控制转位机构的转动,导航解算系统的导航算法采用捷联式惯导算法,系统解算出的依然是载体的速度和位置信息,而系统解算出的姿态信息是

惯性测量单元(IMU)的姿态,加上转动机构的转动信息就得到了载体的姿态信息<sup>[7]</sup>。

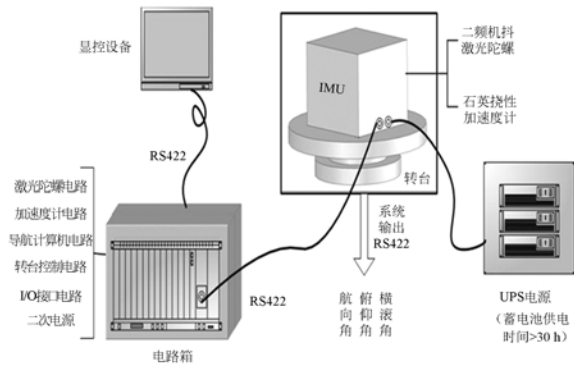


图 1 激光陀螺单轴旋转惯导系统组成示意图

Fig. 1 Schematic representation of single-axis rotation inertial navigation system

单轴旋转惯导系统的误差传播方程和捷联惯导系统的误差方程一致,为:

$$\dot{\phi}^n = -\omega_{in}^n \times \phi^n + \delta\omega_{in}^n - C_b^n \delta\omega_{ib}^b, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \delta\dot{v}^n = f^n \times \phi^n + C_b^n \delta f^b - (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times \delta v^n - \\ (2\delta\omega_{ie}^n + \delta\omega_{en}^n) \times v^n + \delta g^n, \quad (2) \end{aligned}$$

其中  $n$  表示导航坐标系,  $b$  表示 IMU 构成的载体坐标系,  $i$  表示惯性坐标系,  $e$  表示地球坐标系。 $\phi^n$  为计算导航坐标系与真实导航坐标系之间的姿态失准角,  $v$  和  $\delta v$  分别为速度和速度误差,  $\omega$  和  $\delta\omega$  分别为角速度和角速度误差,  $f$  和  $\delta f$  分别为加速度计的比力和比力误差,  $\delta g$  为重力误差,  $C_b^n$  为捷联矩阵。

从式(1)、(2)中可以看出,陀螺误差  $\delta\omega_{ib}^b$  和加速度计误差  $\delta f^b$  是惯导系统的主要误差源,而陀螺和加速度计的误差通过  $C_b^n \delta\omega_{ib}^b$  和  $C_b^n \delta f^b$  在系统起作用,因此在惯导系统上加入转位机构,通过转位机构的旋转,周期性地改变捷联矩阵  $C_b^n$ ,使得在旋转周期内陀螺和加速度计的误差得到调制,尽量平均掉陀螺和加速度计的误差,从而提高系统长时间导航的精度。

采用单轴旋转方式可以消除或补偿与转轴垂直方向上的陀螺漂移,但轴向陀螺漂移却无法得到消除或补偿。因此,在实际的导航系统中需要

对轴向陀螺漂移进行精确校准。

### 3 轴向陀螺漂移精确校准

#### 3.1 惯导系统的误差分析

惯导系统的对准过程往往是在准静态下进行

$$\begin{bmatrix} \delta\dot{L} \\ \delta\dot{v}_N \\ \delta\dot{v}_E \\ \dot{\phi}_N \\ \dot{\phi}_E \\ \dot{\phi}_U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1/R & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2\omega_{ie}\sin L & 0 & g & 0 \\ 0 & 2\omega_{ie}\sin L & 0 & -g & 0 & 0 \\ -\omega_{ie}\sin L & 0 & 1/R & 0 & -\omega_{ie}\sin L & 0 \\ 0 & -1/R & 0 & \omega_{ie}\sin L & 0 & -\omega_{ie}\cos L \\ \omega_{ie}\cos L & 0 & \tan L/R & 0 & \omega_{ie}\cos L & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta L \\ \delta v_N \\ \delta v_E \\ \phi_N \\ \phi_E \\ \phi_U \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \nabla_N \\ \nabla_E \\ \epsilon_E \\ \epsilon_N \\ \epsilon_U \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式(3)、(4)中  $R$  为地球半径,  $\lambda, L$  为当地经纬度,  $\epsilon_E, \epsilon_N, \epsilon_U$  为陀螺漂移,  $\nabla_E, \nabla_N$  为加速度计零偏。

通过对系统特征方程的研究分析系统误差的振荡特性, 列阵  $\mathbf{X}(t)$  表示误差方程(4)中的误差列向量,  $\mathbf{F}$  表示系数阵,  $\mathbf{W}(t)$  表示陀螺和加速度计的误差源, 则式(4)可简化为:

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{F}\mathbf{X}(t) + \mathbf{W}(t). \quad (5)$$

相应的拉氏变换方程为

$$\begin{cases} s\mathbf{X}(s) = \mathbf{F}\mathbf{X}(s) + \mathbf{X}_0(s) + \mathbf{W}(s) \\ \mathbf{X}(s) = (s\mathbf{I} - \mathbf{F})^{-1}[\mathbf{X}_0(s) + \mathbf{W}(s)] \end{cases}, \quad (6)$$

式中  $\mathbf{X}_0(s)$  为初始误差阵列。

通过对式(6)的求解, 再对结果进行反拉氏变换, 可以求得各种误差源对系统经纬度的影响规律。

根据单轴旋转激光陀螺惯导系统的误差调制原理<sup>[10]</sup>, 单轴旋转可以调制与转轴垂直方向上惯

的, 系统的定位误差容易观测, 因此可以利用经纬度的误差信息来精确观测轴向陀螺的漂移, 从而实现轴向陀螺漂移的精确校准<sup>[8-9]</sup>。静基座下捷联惯导系统的误差方程为:

$$\delta\dot{\lambda} = \frac{\sec L}{R}\delta v_E, \quad (3)$$

性器件的误差, 因此表 1 只给出了静基座下轴向陀螺漂移, 初始方位误差角、初始姿态误差角和初始速度误差等对经纬度的影响规律。

从表 1 中可以看出, 初始方位角和初始北向速度对纬度的影响规律为正弦函数, 初始东向速度误差对经度误差的影响规律为正弦函数, 轴向陀螺漂移对纬度的影响规律为余弦函数, 轴向陀螺漂移对经度的影响规律随时间增长。经过 12 h 的导航, 对纬度影响为正弦函数的项变为零, 故不用考虑初始方位角和初始北向速度的影响。而加速度计零偏和初始水平误差角  $\phi_N, \phi_E$  经过多位置初始对准后可以精确测定, 对纬度误差的影响很小。故可以认为在 12 h 导航后产生的纬度误差主要是由于轴向陀螺漂移引起的。而在 12 h 导航后产生的经度误差主要是由轴向陀螺漂移和初始方位误差耦合产生的。

表 1 静基座下各种系统误差源对经纬度的影响规律

Tab. 1 Effect of system errors on longitude and latitude on stationary base

	经度 $\delta\lambda$	纬度 $\delta L$
轴向陀螺漂移 $\epsilon_U$	$-\sin L \cdot t + \frac{\sin L \sin(\omega_e t)}{\omega_e}$	$-\frac{\cos L}{\omega_e} + \frac{\cos(\omega_e t) \cos L}{\omega_e}$
初始方位角误差 $\phi_U$	$(\cos(\omega_e t) - 1) \sin L$	$-\sin(\omega_e t) \cos L$
初始水平角误差 $\phi_N$	$\frac{\cos(\omega_e t)}{\cos L} - \frac{\cos(\omega_e t) \sin^2 L}{\cos L} + \cos L$	$\sin L \sin(\omega_e t)$
初始水平角误差 $\phi_E$	$\sin(\omega_e t) \tan L$	$\cos(\omega_e t) - \cos(\omega_e t)$
初始速度误差 $\delta v$	$\delta v_E \sin(\omega_e t) \omega_e / (g \cos L)$	$\delta v_N \sin(\omega_e t) \omega_e / g$

### 3.2 轴向陀螺精确校准

轴向陀螺漂移校准的具体实现方法为:单轴旋转惯性导航系统经过 4 h 的初始对准后,精确地估计出水平陀螺漂移和加速度计零偏后对其进行修正;然后转入导航状态,经过 12 h 导航后,观测系统的纬度变化量,采用最小二乘拟合方法进行精确辨识,扣除掉轴向陀螺漂移、修正方位角误差后再次转入导航状态,进行系统导航解算。根据表 1 中的误差传播规律,利用经纬度误差建立一组误差方程,从而对轴向陀螺漂移和方位误差角进行精确校准,误差方程为:

$$\begin{bmatrix} \delta\lambda \\ \delta L \end{bmatrix} = [A_{2 \times 1}] \epsilon_U + [B_{2 \times 1}] \phi_U + [C_{2 \times 2}] \begin{bmatrix} \delta v_E \\ \delta v_N \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中  $A_{2 \times 1}$ 、 $B_{2 \times 1}$ 、 $C_{2 \times 2}$  如表 1 中所示。

利用最小二乘法对  $C = [\epsilon_U \quad \phi_U \quad \delta v_E \quad \delta v_N]^T$  进行参数辨识<sup>[11]</sup>,选择不同的时间间隔,可以获得参数的最优估计为

$$C = (F^T F)^{-1} F^T Y, \quad (8)$$

其中  $F$  为  $A_{2 \times 1}$ 、 $B_{2 \times 1}$ 、 $C_{2 \times 2}$  在不同时间点构成的系数矩阵, $Y$  为经纬度误差构成的误差阵。通过式(8)可以实现轴向陀螺漂移  $\epsilon_U$  和方位误差角  $\phi_U$  的精确校准。

在轴向陀螺漂移校准的过程中,选择的时间间隔要尽可能长,以增加系统的滤波作用,减少舒拉周期对校准精度的影响。同时在校准过程中,尽量减小外界环境变化对系统的影响<sup>[12]</sup>。

## 4 实验与结果

为了验证轴向陀螺漂移校准方法的有效性和精确性,本文利用实际的单轴旋转激光陀螺惯导系统进行了静态导航试验和跑车试验,系统如图 2 所示。系统主要包括惯性测量组件、电控箱、显控单元和 UPS 电源等。惯性测量单元安装于单轴转台上,周期性的绕旋转轴往复旋转来抑制惯性器件的误差,利用监控计算机来监测系统的精度。惯性测量单元由 3 个实验室研制的高精度机抖激光陀螺和 3 个石英挠性加速度计构成,其中水平激光陀螺的一次通电零偏稳定性优于  $0.003$  ( $^\circ$ )/h,轴向陀螺的一次通电零偏稳定性优于  $0.002$  ( $^\circ$ )/h。

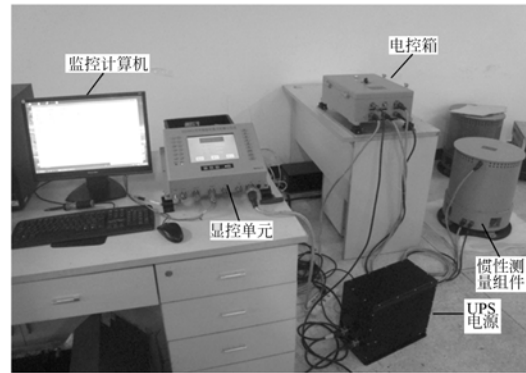


图 2 激光陀螺单轴旋转惯导系统实物图

Fig. 2 Diagram of single-axis rotation inertial navigation system

表 2 轴向陀螺漂移测试结果

Tab. 2 Experimental measurement results of axial RLG drift ( $^\circ$ )/h

	试验 1	试验 2	试验 3
轴向陀螺漂移	-0.003 19	0.001 8	0.002 1
	试验 4	试验 5	试验 6
轴向陀螺漂移	0.000 6	0.000 26	-0.001 0

系统在实验室内进行初始对准,对轴向陀螺漂移进行精确校准后进入导航状态,整个实验过程中系统暴露于自然温度下。共进行了 6 次静态导航试验,表 2 给出了 6 次试验测定的轴向陀螺漂移结果。试验测得的轴向陀螺漂移是相对于系统标定时的陀螺漂移。图 3 给出了试验 1 中轴向陀螺漂移标校前后系统的定位误差曲线。

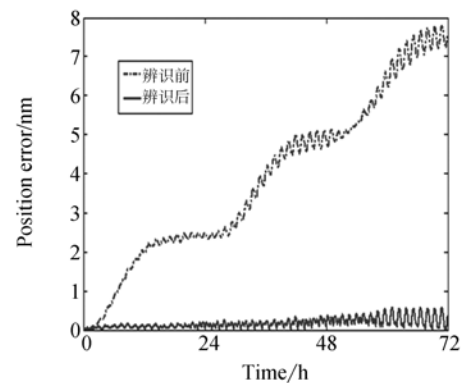


图 3 轴向陀螺漂移校准前后的定位误差曲线

Fig. 3 Position error comparison before and after correction of axial RLG drift

从图 3 可以看出,经过最小二乘法辨识轴向陀螺漂移后,系统定位精度由 8 nm/72 h 提高到 0.5 nm/72 h,提高了 15 倍。图 4 给出了试验 2~5 四组静态导航试验的定位误差曲线,系统定

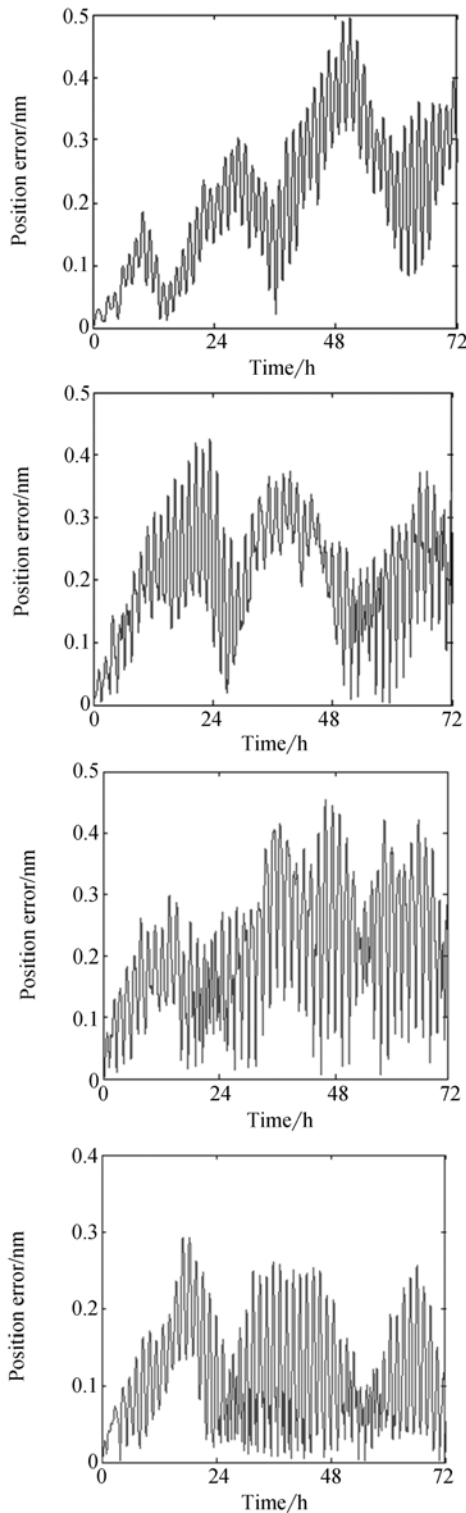
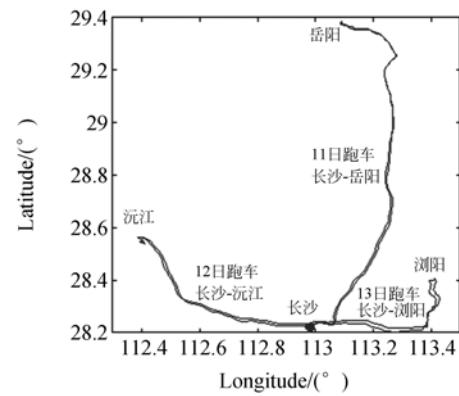


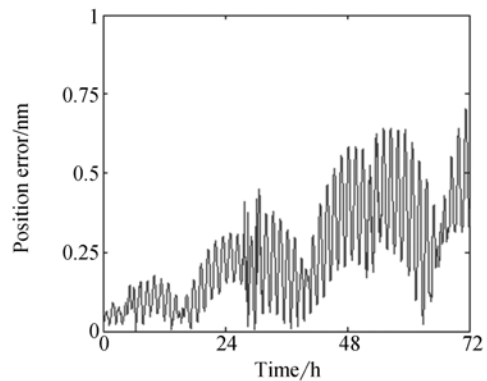
图 4 四组典型静态导航试验的定位误差曲线  
Fig. 4 Four typical curves of position errors on stationary base

位误差优于 1 nm/72 h。由文献[13]可知,该系统可以很好地抑制轴向陀螺漂移,对轴向陀螺漂移的辨识精度达到  $\Delta\epsilon_0 < 0.0005 (^\circ)/h$ 。

为了进一步验证校准方法的有效性,本文对单轴旋转惯导系统进行了大量的跑车试验。系统启动对准 16 h,精确标校轴向陀螺漂移后,进行跑车试验,图 5 给出了其中一组跑车试验路线图和定位误差曲线。从跑车试验的结果可以看出,定位误差优于 1 nm/72 h,采用最小二乘法可以对轴向陀螺漂移进行精确校准,极大地提高了系统的定位精度。



(a) 跑车试验路线  
(a) Track of vehicle experiment



(b) 跑车试验系统定位误差曲线  
(b) Position error of vehicle experiment

图 5 单轴旋转惯导系统跑车试验

Fig. 5 Vehicle experiment of single-axis rotation inertial navigation system

### 5 结 论

采用单轴旋转的惯导系统水平方向上的陀螺

漂移可以得到自动补偿,轴向陀螺漂移却只能依靠自身的精度来保证。本文利用惯导系统的误差传播特性,根据轴向陀螺漂移对经纬度误差的影响规律,对轴向陀螺漂移进行了精确校准,陀螺漂移引起的系统误差得到了很好的抑制,使得惯导

系统具有长时间导航的能力。静态导航和跑车试验测试结果表明:选用经纬度误差作为观测量对轴向陀螺漂移进行精确校准的方法是有效的,轴向陀螺漂移测量精度能达到  $\Delta\epsilon_U < 0.0005$  ( $^\circ$ )/h。

#### 参考文献:

- [1] TITTERTON D H, WESTON J L. *Strapdown Inertial Navigation Technology* [M]. Second Edition. United Kingdom: Institution of Electrical Engineers, 2004.
- [2] LAWRENCE A. *Modern Inertial Technology: Navigation, Guidance, and Control* [M]. New York: Springer-Verlag, Inc., 1998.
- [3] LEVINSON E, MAJURE R. Accuracy enhancement techniques applied to the marine ring laser inertial navigator (MARLIN) [J]. *Navigation: Journal of The Institute of Navigation*, 1987, 34(1):64-86.
- [4] LEVISON E, TER H J, WILLCOCKS M. The next generation marine inertial navigator is here now [C]. *IEEE Position Location and Navigation Symposium*, 1994:121-127.
- [5] TUCKER T, LEVISON E. The AN/WSN-7B marine gyrocompass/navigator[C]. *Anaheim, CA U. S. A. ION NTM*, 2000:348-357.
- [6] STAFF J. Master positioning, navigation, and timing plan[S]. *Washington D. C.*, March 31, 2003.
- [7] 张荣辉,贾宏光,陈涛,等. 基于四元数法的捷联式惯性导航系统的姿态解算[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(10):1963-1970.
- ZHANG R H, JIA H G, CHEN T, *et al.*. Attitude solution for strapdown inertial navigation system based on quaternion algorithm [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(10):1963-1970. (in Chinese)
- [8] 吕少麟,谢玲,陈家斌. 晃动基座下激光陀螺捷联导航系统初始对准的预滤波[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(10):2520-2527.
- LÜ SH L, XIE L, CHEN J B. Prefiltering for initial alignment of ring laser gyroscope SINS on rocking base [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(10):2520-2527. (in Chinese)
- [9] 冯培德,李魁,王伟,等. 一种新的舰载惯导系统综合校正方法[J]. *中国惯性技术学报*, 2011, 19(4):427-437.
- FENG P D, LI K, WANG W, *et al.*. New comprehensive calibration method of carrier-based inertial navigation system [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2011, 19(4):427-437. (in Chinese)
- [10] 于旭东,王宇,张鹏飞,等. 单轴旋转对惯导系统误差特性的影响[J]. *中国惯性技术学报*, 2008, 16(6):551-556.
- YU X D, WANG Y, ZHANG P F, *et al.*. Influence of single-axis rotation on INS error characteristics [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2008, 16(6):551-556. (in Chinese)
- [11] 陈渝,周璐,钱方. 数值方法[M]. 北京:电子工业出版社, 2002.
- CHEN Y, ZHOU L, QIAN F. *Numerical Method* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. (in Chinese)
- [12] 葛文涛,陈明刚,林玉荣,等. 三轴激光陀螺温度误差动态建模及补偿技术[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(10):1509-1515.
- GE W T, CHEN M G, LIN Y R, *et al.*. Dynamic modeling and compensation for thermal error of three-axis ring laser gyro [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(10):1509-1515. (in Chinese)
- [13] 于旭东. 二频机抖激光陀螺单轴旋转惯性导航系统若干关键技术研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2011.
- YU X D. *Research on some key technologies for single-axis rotation inertial navigation system with mechanically dithered ring laser gyroscope* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)

## 作者简介:



于旭东(1982—),男,吉林长春人,讲师,2005年、2011年于国防科技大学分别获得学士、博士学位,主要从事旋转惯性导航技术及机抖激光陀螺的研究。E-mail:wind0909@163.com



谢元平(1971—),男,湖南邵阳人,副教授,1993年、2000年于国防科技大学分别获学士、博士学位,主要从事激光捷联惯导系统设计及激光陀螺方面的研究。E-mail:xyp99999@139.com



王宇(1974—),男,天津人,副研究员,1998年、2005年于国防科技大学分别获学士、博士学位,主要从事惯性导航方面的研究。E-mail:batu@tom.cn



汤建勋(1972—),男,湖南醴陵人,研究员,1994年、2000年于国防科技大学分别获学士、博士学位,主要从事激光捷联惯导系统设计及激光陀螺方面的研究。E-mail:tangjianxun@sina.com



张鹏飞(1976—),男,山西人,副研究员,2000年、2006年于国防科技大学分别获学士、博士学位,主要从事惯性器件及惯性导航方面的研究。E-mail:zhangpengfei0309@163.com



龙兴武(1958—),男,湖南湘潭人,教授,博士生导师,1982年于华中科技大学获得学士学位,1993年于国防科技大学获得博士学位,主要从事光学工程及惯性技术研究。E-mail:xwlong110@sina.com

## ● 下期预告

## 电子束泵浦准分子激光放大器 双程光路自动准直

王大辉,赵学庆,张永生,孙显薇,赵军

(西北核技术研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室,陕西 西安 710024)

为保证光束在放大器中按预定方向传输,并使多路光束稳定精确地照射到靶面上,介绍了一种电子束泵浦准分子激光放大器双程光路准直方法。首先,鉴于准分子放大器中无天然准直基准的问题,提出了利用双叉丝像传递光路来进行准直的方法,把输入光束叉丝基准作为“近场点”,把输出光束叉丝基准作为“远场点”,并进行了放大器准直光路的设计及软件的编写。然后,现有实验室条件下开展了电子束泵浦准分子激光放大器双程光路的自动准直实验。最后,对该方法进行了相关影响因素及准直精度的分析。实验及分析得知,设计的准直系统在较短时间内实现了预定传输光路的自动准直,系统自身精度为  $0.63 \mu\text{rad}$ ,光束最大复位误差  $13.75 \mu\text{m}$ 。该方法能够满足电子束泵浦准分子激光放大器双程光路自动准直的要求。