

## H 调制陀螺监控高精度惯性导航系统

熊 崑, 蔡智渊, 齐宇轩, 李德春, 吕善民

(天津航海仪器研究所, 天津 300131)

**摘要:** 对于由单自由度液浮陀螺仪构成的平台式惯性导航系统, H 调制陀螺监控技术可以同时三个导航陀螺分别进行监控和漂移自补偿, 它采用北向和方位 H 调制陀螺监控方案, 在惯性平台台体上加装北向和方位监控陀螺, 对北向和方位导航陀螺进行监控, 实现误差自补偿。监控陀螺采取力反馈工作方式, 其输入轴与相应导航陀螺的输入轴同向平行。通过改变监控陀螺电机的转速, 使其周期性工作在不同的动量矩 H 值上, 并保证不同 H 值之间监控陀螺调制漂移的稳定性。根据不同 H 值下的监控陀螺输出, 即可解算出相应导航陀螺的漂移并随时加以补偿。经过室内试验、码头系泊试验和海上航行试验的考核, 结果表明, H 调制陀螺监控高精度惯性导航系统其定位误差最大值  $< 1.50 \text{ nmile}/72 \text{ h}$ , CEP  $< 0.90 \text{ nmile}/72 \text{ h}$ , 系统重调周期可以延长至 3~5 昼夜。

**关键词:** H 调制; 陀螺监控; 惯性导航系统; 海上试验

中图分类号: U666.1

文献标志码: A

## High-accuracy inertial navigation system with H-modulation gyro monitoring

XIONG Wei, CAI Zhi-yuan, QI Yu-xuan, LI De-chun, LV Shan-min

(Tianjin Navigation Instrument Research Institute, Tianjin 300131, China)

**Abstract:** For the platform INS based on liquid floated single-freedom gyros, H-modulation technology can simultaneously monitor all three navigation gyros and auto-compensate the gyro drifts. This system adopts north and azimuth H-modulation gyro monitoring schemes, i.e. a north-monitoring gyro and an azimuth-monitoring gyro are installed on the platform to monitor north navigation gyro and azimuth navigation gyro respectively. The two monitor gyros work in force-feedback mode. Each input shaft is parallel with the corresponding navigation gyro's input shaft. By changing the gyro motor's rotation speed, the monitor gyros can work periodically on different inertia moments(H). The modulation-drifts among different inertia moments are controlled to be highly stable. According to monitor gyros' outputs on different H, the drift of corresponding navigation gyros can be calculated and timely compensated. The results of laboratory tests, dock mooring tests and marine tests show that, the maximum position error of this system is  $\leq 1.50 \text{ nmile}/72 \text{ h}$ , CEP is  $\leq 0.90 \text{ nmile}/72 \text{ h}$ , and the re-adjustment period can be extended to 3 to 5 days.

**Key words:** H-modulation; gyro monitoring; inertial navigation system; marine navigation test

纵观惯性导航系统的发展历史, 不难看出, 为了提高惯性导航系统的精度、延长系统重调周期, 主要采用三种方法:

第一种方法是提高惯性元件的性能水平。液浮陀螺仪在陀螺电机、悬浮支承、温度控制以及加工装配工艺等各项技术环节上不断完善提高<sup>[1]</sup>。美国麻省理工学院于 1979 年研制完成的永磁电机液浮陀螺仪即第三代高级陀螺仪, 使液浮陀螺仪性能实现重大突破<sup>[2]</sup>。目前国外最高精度液浮陀螺仪的随机漂移率可达  $0.00003 \text{ (}^\circ\text{)}/\text{h}$  以下。其它采用不同原理、不同结构的新型陀螺仪也相继研发出来, 如 20 世纪 70 年代研制的高精度静电陀螺仪, 20 世纪 90 年代研制的高精度激光陀螺仪和目前仍在改进研制中的高精度光纤陀螺仪等等<sup>[3]</sup>。加速度计性能提高的历程也是如此。

收稿日期: 2010-03-26; 修回日期: 2010-07-16

基金项目: 国防科技重点预研项目 (91309010301)

作者简介: 熊崑 (1975—), 男, 高级工程师, 主要从事船用惯性导航系统研究。E-mail: xiongweitrue@163.com

第二种方法是在系统的软、硬件上采取措施，提高惯性元件的测控精度，并为惯性元件创造良好的工作环境条件，使其固有性能水平得到充分发挥。如：研发高精密的配套电子线路；在系统软件中应用卡尔曼滤波技术；完善系统的温度场、振动场、电磁场设计，将工作环境对惯性元件的影响降至最低程度等。

第三种方法是在系统中采用旋转平均或陀螺监控等系统级技术手段，抑制惯性元件自身误差对系统的影响。如：采用某种形式的平台旋转或陀螺旋转技术，以调制掉由陀螺漂移引起的系统误差；采用壳体翻转、动量矩调制（H 调制）等陀螺监控技术监测出导航陀螺的漂移，并予以补偿。表 1 列出了常用的系统级控制手段和各自可作用的陀螺敏感轴方向<sup>[4]</sup>。

表 1 控制导航陀螺仪误差的主要方法  
Tab.1 Main methods to control gyro drift

序号	技术方案	可作用的导航陀螺敏感轴
1	平台台体旋转	X、Y
2	壳体旋转陀螺监控	X、Y
3	壳体翻转陀螺监控	X、Y
4	H 调制陀螺监控	X、Y、Z

我所研制的 H 调制陀螺监控惯性导航系统其设计方案综合采用了上述三种提高系统精度的技术措施：1) 采用本所自研的高精度永磁电机三浮陀螺仪；2) 对系统惯性平台、电子线路及应用软件进行综合改进设计；3) 对北向、方位导航陀螺应用 H 调制陀螺监控技术。该系统经过长期的研究与试验，于近期取得了重大突破。系统室内试验、车载试验和海上试验表明：系统技术指标大幅度提升，重调周期高于现有船用惯性导航系统 5 倍以上。试验结果充分验证了 H 调制陀螺监控技术的可用性和有效性。本文先简要介绍 H 调制陀螺监控惯性导航系统的总体情况，然后对系统的重点技术问题进行阐述，最后给出系统试验结果。

### 1 H 调制陀螺监控的基本原理

所谓 H 调制陀螺监控技术，即在系统平台上加装监控陀螺仪，并令其工作在动量矩（H）周期性变化状态，利用监控陀螺仪调制漂移的长期稳定性和导航陀螺仪漂移的短期稳定性，来实现对导航陀螺漂移的观测及补偿，从而提高系统精度、延长重调周期。

在详述 H 调制陀螺监控法的原理之前，先介绍一下只适用于监控水平导航陀螺的壳体翻转法作为对比，以更好地说明 H 调制陀螺监控技术的特点。

#### 1.1 壳体翻转陀螺监控的基本原理

在惯性导航系统的平台上，增加一套装有一个监控陀螺的旋转机构，并将监控陀螺接成力反馈工作方式。通过旋转机构控制，使监控陀螺输入轴（IA<sub>M</sub>）周期性地分别与东向、北向水平导航陀螺输入轴（IA<sub>E</sub>、IA<sub>N</sub>）同向或反向（如图 1）。根据同向和反向两个状态的监控陀螺输出，解算出相应水平导航陀螺的漂移并补偿。

由图 1 可得式（1）和式（2）：

$$\frac{M_N}{H} = \omega_{PN} + \varepsilon_N + \varepsilon_M \quad (1)$$

$$\frac{M_S}{H} = -\omega_{PS} - \varepsilon_N + \varepsilon_M \quad (2)$$

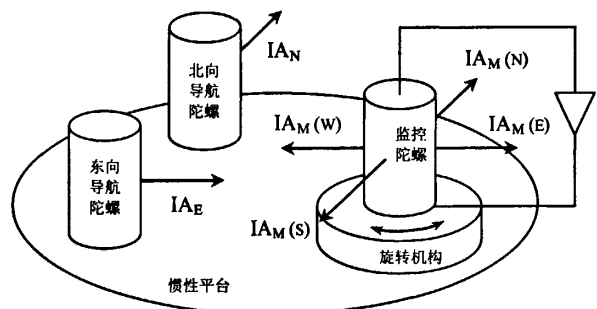


图 1 壳体翻转陀螺监控示意图

Fig.1 Sketch of case reversal gyro monitoring

式中，M<sub>N</sub>、M<sub>S</sub>分别为监控陀螺输入轴指北（IA<sub>M</sub>(N)）、指南（IA<sub>M</sub>(S)）时的反馈输出力矩；H为监控陀螺的动量矩；ω<sub>PN</sub>、ω<sub>PS</sub>分别为两种状态下的平台北向指令角速度；ε<sub>N</sub>为北向导航陀螺的漂移，ε<sub>M</sub>为监控陀螺的漂移（由于测量周期较短，可以假设在两次测量过程中 ε<sub>N</sub>、ε<sub>M</sub> 不变）。则根据式（1）和式（2）即可解算出北向导航陀螺的漂移 ε<sub>N</sub>。同理可以求出东向导航陀螺的漂移 ε<sub>E</sub>。

这种方案的优点是用一个监控陀螺即可实现对两个水平导航陀螺漂移的监测，其缺点是不能用于对方位陀螺漂移的测量。这是因为，若监控陀螺工作在方位姿态，当其输入轴反向时，其输出轴上与重力有关的漂移力矩 M<sub>g</sub> 也会跟着

反向 (如图 2)<sup>[4]</sup>, 因此在两种状态下  $\epsilon_M$  不变的假设不成立, 无法按上述方法解算出方位导航陀螺的漂移。

### 1.2 H 调制陀螺监控的基本原理

壳体翻转陀螺监控技术无法用于监控方位导航陀螺, 而恰恰方位导航陀螺由于其自身姿态受重力影响较大, 长时间的漂移稳定性差于水平导航陀螺, 往往成为惯性导航系统的主要误差源。因此只对水平导航陀螺进行监控的效果很有限, 要想大幅提升系统性能, 必须对方位导航陀螺采取监控措施。H 调制陀螺监控技术正是一种可以对包括方位陀螺在内的所有导航陀螺进行监控的有效手段。

H 调制陀螺监控是一对一的, 即一个监控陀螺监控一个导航陀螺。监控陀螺直接安装在惯性平台上, 采用力反馈工作方式, 其输入轴与被监控的导航陀螺输入轴同向。以方位陀螺监控为例, 如图 3, 其工作过程是: 首先通过转速控制使方位监控陀螺的动量矩稳定在  $H_1$ , 此时其反馈输出力矩为

$$M_1 = H_1(\omega_{p1} + \epsilon_z) + T_{M1} \quad (3)$$

式中,  $M_1$  为  $H_1$  状态下方位监控陀螺的反馈输出力矩;  $\omega_{p1}$  为平台方位指令角速度;  $\epsilon_z$  为方位导航陀螺的漂移;  $T_{M1}$  为  $H_1$  状态下方位监控陀螺的漂移力矩。

在  $H_1$  状态工作一定时间后, 改变方位监控陀螺的转速, 使其动量矩变为  $H_2$ , 并保持稳定。由于时间较短, 可以假设在两种状态下方位导航陀螺的漂移  $\epsilon_z$  未变, 则此时反馈回路的输出力矩为

$$M_2 = H_2(\omega_{p2} + \epsilon_z) + T_{M2} \quad (4)$$

式中,  $M_2$  为  $H_2$  状态下方位监控陀螺的反馈输出力矩;  $\omega_{p2}$  为平台方位指令角速度;  $T_{M2}$  为  $H_2$  状态下方位监控陀螺的漂移力矩。式 (3) 减式 (4), 经整理可得:

$$\frac{(M_1 - H_1\omega_{p1}) - (M_2 - H_2\omega_{p2})}{H_1 - H_2} = \epsilon_z + \frac{T_{M1} - T_{M2}}{H_1 - H_2} \quad (5)$$

式中,  $\frac{T_{M1} - T_{M2}}{H_1 - H_2}$  定义为监控陀螺的调制漂移。永磁电机陀螺仪的理论特性和实际试验结果表明, H 调制监控陀螺的调制漂移

是稳定可测的, 因此由式(5)即可解算出方位导航陀螺的漂移  $\epsilon_z$  并实施补偿。同理可以实现对水平导航陀螺漂移的监控。

## 2 H 调制陀螺监控惯性导航系统的体系结构

H 调制陀螺监控惯导系统的平台结构与常规的单自由度液浮陀螺惯导系统相比, 只是在平台台体上增加了与被监控的导航陀螺仪相对应的监控陀螺仪。若对系统三个导航陀螺都进行监控, 则需加装三个监控陀螺, 即一共使用六个陀螺仪的全监控方案。本文介绍的是对北向和方位导航陀螺进行监控的五陀螺结构方案, 如图 4 所示。该方案的好处是: 既可以有效地控制惯性平台的体积, 又能达到较好的监控效果。这是因为东向导航陀螺漂移所引起的系统位置误差不随时间累积, 是相对次要的误差源。

### 2.1 系统硬件

较之通用的三环半解析式惯导系统, H 调制陀螺监控惯导系统的硬件变化主要有:

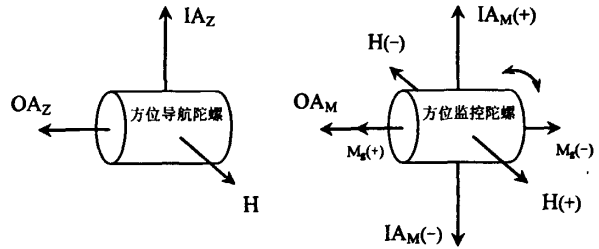


图 2 方位陀螺壳体翻转示意图  
Fig.2 Sketch of case reversal of azimuth gyro

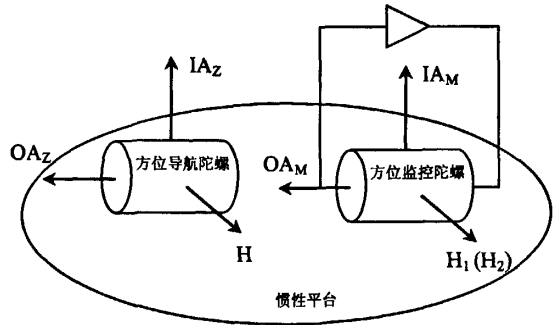


图 3 H 调制陀螺监控示意图  
Fig.3 Sketch of H-modulation gyro monitoring

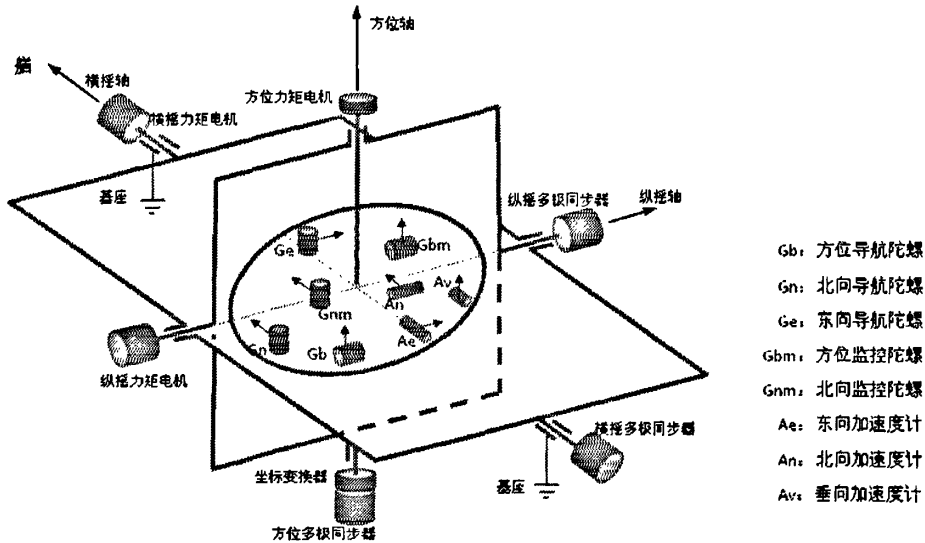


图 4 H 调制陀螺监控惯导系统平台结构配置示意图

Fig.4 Configuration of the platform of the INS with H-modulation gyro monitoring

### 1) 惯性平台

- 在平台台体上增加两个监控陀螺。其中一个输入轴指北，监控北向导航陀螺；另一个输入轴指天，监控方位导航陀螺。
- 对平台结构的热设计作了较大改进，提高平台内部的温控精度，减小温度梯度，改善平台对环境温度的适应性。

### 2) 电子线路

- 增加了两套用于监控陀螺电机启动、转速稳定和定时变速的控制电路及配套电源。
- 增加了两套监控陀螺高精度数字力反馈回路。

## 2.2 系统软件

H 调制陀螺监控惯导系统在软件设计上，增加三项基本功能：1) 增加了对监控陀螺力反馈回路输出进行数据处理和计算导航陀螺漂移的功能；2) 增加了对导航陀螺漂移及系统误差进行补偿修正的功能；3) 在系统初始标定过程中增加了对监控陀螺调制漂移进行测算的功能。

## 3 H 调制陀螺监控惯性导航系统的关键技术

H 调制陀螺监控惯导系统的关键技术涉及三个方面：1) 确保监控陀螺调制漂移的稳定性；2) 使监控陀螺调制漂移具有精确的可测性；3) 保证监控回路在系统静态与动态条件下具有良好的一致性。

### 3.1 监控陀螺调制漂移的稳定性保障

确保监控陀螺调制漂移的稳定性是 H 调制陀螺监控技术的核心。从调制漂移的表达式  $\frac{T_{M1} - T_{M2}}{H_1 - H_2}$  可以看出，要使调制漂移稳定，需要同时保证监控陀螺动量矩  $H_1$ 、 $H_2$  和漂移力矩  $T_{M1}$ 、 $T_{M2}$  的稳定。

#### 1) 永磁电机陀螺仪设计技术

H 调制陀螺监控技术成功应用的关键是：确保监控陀螺由电机转速改变所引起的任何漂移力矩的变化减少到可以忽略的程度，因此对陀螺电机的性能要求很高。H 调制陀螺监控惯导系统的陀螺仪采用了高性能的永磁电机，与常规陀螺仪使用的磁滞电机相比，永磁电机有两个显著特点：一是效率高、功耗低，效率可达 95% 以上，而磁滞电机效率只能达到 50% 左右；二是输入功率稳定、热损耗也稳定，相关的测试数据表明，永磁电机的功率稳定性为百万分之几，逐次启动的功率稳定性比磁滞电机高 200 余倍<sup>[2]</sup>。

### 2) 永磁电机陀螺仪特种工艺技术

永磁电机陀螺仪的特种工艺技术主要包括: 原材料的时效处理工艺、加工工艺、装配工艺、计量调整工艺、存储工艺和测试规程等。

### 3) 陀螺电机转速控制回路设计技术

陀螺电机转速控制回路首先解决永磁电机的换向问题。一般永磁电机采用整流子换向, 但这在陀螺仪中是不允许的, 因此在控制回路中通过测量反电势的方法来实现换向。这种控制方法实际上是一种反电势控制的闭环精确自动控制, 既能保证电机的平稳、刚劲启动和转速稳定, 又能保证电机高低速转换的平稳性, 以及使高低速之间的功耗差值最小。永磁电机的转速控制精度可达  $3 \times 10^{-7}$  r/min。

### 4) 惯性元件及平台温度精确控制技术

液浮陀螺仪对环境温度十分敏感, 因此必须尽力解决惯性元件与惯性平台的温控问题。而用于 H 调制监控的陀螺仪由于工作方式特殊——电机转速周期性变换, 传统的温控回路已经不能解决温控对象的滞后问题。为此, 在其温控线路中采用了内模控制方式, 大幅度提高了温控精度, 在 H 调制工作状态下, 监控陀螺内部的温控精度可达  $0.01^\circ\text{C}$  的量级。对于惯性平台, 其温控系统的改进主要是减小平台内部的温度梯度和提高对环境温度变化的适应能力。

## 3.2 监控陀螺调制漂移的精确测量

在保证了调制漂移自身的稳定性之后, 还要将其精确地测量出来, 才能用于计算导航陀螺的漂移并实施补偿。这也是保证 H 调制陀螺监控技术成功应用的关键环节。

### 1) 系统初始对准与重调技术

H 调制陀螺监控惯导系统的初始对准和重调方案与常规惯导系统的不同点主要在于:

#### a) 初始对准阶段调制漂移的测量

监控陀螺调制漂移的稳定性是指在系统一次启动工作过程中的相对稳定, 但是在逐次启动中还是有变化的, 这种变化可以理解监控陀螺 H 调制状态的逐次启动漂移。因此在系统初始对准阶段, 需要对调制漂移的均值进行精确测量。一般水平监控陀螺逐次启动的调制漂移变化量很小, 甚至可以忽略; 而方位监控陀螺逐次启动的调制漂移变化量相对较大, 对高精度、长重调周期的系统来说不能忽略, 而且在测量过程中必须解决好导航陀螺漂移变化对其影响的问题。

#### b) 系统重调时对调制漂移变化量的修正

H 调制陀螺监控惯导系统的重调与常规惯导系统相比, 实施起来要容易一些。这是因为导航陀螺得到了监控, 在利用外部信息对系统各项误差进行重调修正时, 可以不考虑导航陀螺的漂移。但是监控陀螺调制漂移在一次启动工作过程中的稳定性也是相对的, 要实现系统长时间导航的高精度, 在系统重调时利用外部信息对调制漂移均值的变化量进行估计与修正是必要的, 也是可以实现的。

### 2) 监控回路数据采集处理及控制补偿技术

监控回路数据采集处理及控制补偿技术指的是监控回路应用软件的设计, 包括 H 调制工作周期的选取, 测量数据的处理, 数字滤波器的设计, 漂移的补偿控制以及与系统工作状态(阻尼、无阻尼)的匹配等多个技术环节。

### 3) 高精度数字力反馈回路技术

高精度数字力反馈回路技术指的是监控回路的硬件设计。由于监控陀螺与加速度计同为力反馈工作模式, 其控制回路的硬件设计与加速度计回路有共同之处, 但也有不小的差异, 需针对监控陀螺的性能特点采取相应的技术措施, 包括回路填充频率的选取, 对噪声和干扰的抑制, 动态特性的调整等等。

### 4) 卡尔曼滤波应用技术

卡尔曼滤波技术在常规惯导系统中已得到成功应用<sup>[5]</sup>, 在 H 调制陀螺监控惯导系统的数据测量中同样可以发挥重要作用, 导航状态下可利用监控陀螺的角速度输出作为观测量对导航陀螺漂移等系统误差进行估计, 得到更好的监测结果。

## 3.3 系统动态特性的技术保障

保证监控回路的性能在系统静态和动态工作条件下具有良好的一致性 H 调制陀螺监控技术成功应用的另一个基本条件。

### 1) 适应瞬态角速度大幅度变化的抗扰动技术

系统惯性平台在稳定回路的作用下，可以隔离载体运动的影响。但在载体摇摆或旋回运动的换向瞬间，惯性平台轴上的摩擦力矩也随之换向，在极短的时间内稳定回路来不及快速反应，因而会对平台产生瞬态角速度大幅度变化的干扰。据仿真计算，瞬时角速度变化量可达每小时几千度，势必造成直接敏感平台运动的监控回路输出饱和而失控<sup>[6]</sup>。若采取加大监控回路测量范围的方法避免回路饱和，又会导致测量精度降低。为此，必须在系统中采取技术措施予以妥善解决。

2) 系统物理保障设计技术

如图 4 所示，H 调制陀螺监控惯导系统的惯性平台上安装有 8 个惯性元件、3 套执行元件、3 套测角元件和一套坐标变换元件，共涉及到 27 条测控电路。这些元件及电路聚集在一起，要保证各自工作的稳定性和动态性能，彼此间必须有很好的相容性和电磁兼容性，同时还要依靠平台设计为其提供一个理想的物理环境。

a) 系统相容性设计

实践证明，诸多测控元件和相关电路安放在空间有限的惯性平台上，只能在有条件下相容工作。在设计时必须为它们提供相容的条件，如：适当选配信号源的频率，调整相应元件的振动参量，调整和控制机电元件的运动参数等。

b) 惯性平台的“四场”设计

惯性平台的“四场”指的是温度场、振动场、磁场和电场，这里把磁场和电场区分开，是要强调电磁环境对系统的影响。由于惯性平台是跟踪地理坐标系的，当载体运动时，平台台体相对平台内、外框架以及外部载体会产生多维的位移，惯性平台的“四场”也会相应发生变化。在平台设计时必须考虑这一点，尽可能提高平台“四场”的稳定性与抗扰性，以降低其变化对系统的影响。

表 2 室内静态鉴定试验结果  
Tab.2 The results of appraisal tests of static navigation

航次	导航时间/h	位置误差最大值/ nmile	备注
第一航次	72	0.75	实际做至 120 h, 最大位置误差 1.41 nmile
第二航次	72	0.78	
第三航次	72	0.54	
第四航次	72	0.81	
第五航次	72	0.62	综校试验航次, 第四航次完成后执行综合一点校, 直接转入本航次
第六航次	72	0.93	
第七航次	72	0.83	
第八航次	72	0.90	实际做至 120h, 最大位置误差 1.15 nmile

4 系统试验结果

H 调制陀螺监控惯性导航系统的工程正样机，已进行了室内静态试验、摇摆试验、车载试验、海上试验和一些专项科研试验。本文主要介绍室内静态鉴定试验、海上鉴定试验及部分专项试验的情况。

4.1 室内静态试验

系统室内静态鉴定试验共进行了 8 个 72 h 航次，定位误差结果见表 2，有代表性的两个航次位置误差曲线见图 5~6。

4.2 海上试验

系统海上鉴定试验共进行了 11 个 72 h 航次，其中 3 个码头系泊航次，8 个航行航次。定位误差结果见表 3、表 4，有代表性的几个航行航次的位置误差曲线见图 7~图 9。在航行试验中，曾遭遇两次九级大风（阵风十级）的恶劣

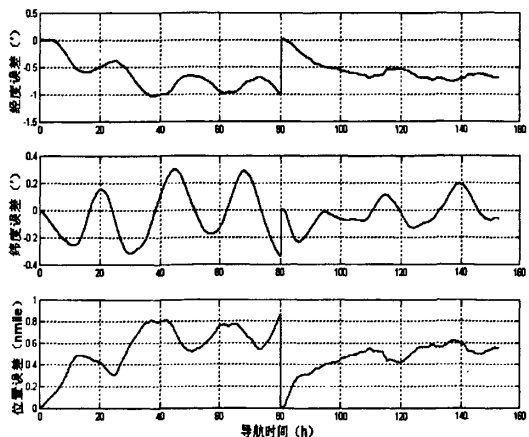


图 5 静态鉴定试验第四、五航次位置误差曲线 (第 80 h 执行综合一点校)

Fig.5 Position errors of no.4 and no.5 appraisal tests of static navigation (calibrated at 80 h)

海况, 系统依然正常稳定工作, 表现出良好的动态特性和环境适应性。此外, 航行试验中由于试验船机动及性能考察的需要, 系统曾多次长时间工作在无阻尼状态, 其中最长的—次连续无阻尼工作时间达 33.5 h, 单航次无阻尼时间总计最长超过 45 h。

表 3 系泊鉴定试验结果

Tab.3 Results of appraisal tests of mooring navigation

航次	导航时间/h	位置误差最大值/ nmile	备注
第一航次	72	1.04	
第二航次	72	0.80	
第三航次	72	0.62	

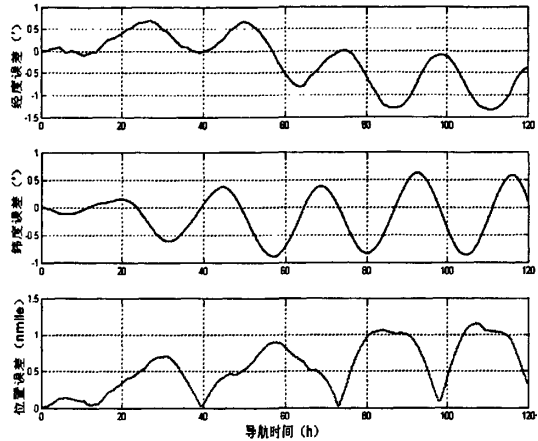


图 6 静态鉴定试验第八航次位置误差曲线

Fig.6 Position errors of no.8 appraisal test of static navigation

表 4 航行鉴定试验结果

Tab.4 The results of appraisal tests of marine navigation

航次	导航时间/h	位置误差最大值/ nmile	备注
第一航次	75	0.59	
第二、三航次	170	1.35, 1.02	连续导航 170 h, 其中海上工作 129 h (第 26~155 h)。以 90 h 为界计为两个航次
第四航次	74	1.50	
第五航次	75	0.84	跨纬度远航, 由葫芦岛至舟山
第六航次	73	1.21	跨纬度远航, 由舟山至葫芦岛
第七航次	74	1.01	海上综校试验航次, 第六航次完成后执行海上综合一点校, 直接转入本航次
第八航次	75	0.52	备件考核航次, 更换备用监控陀螺仪

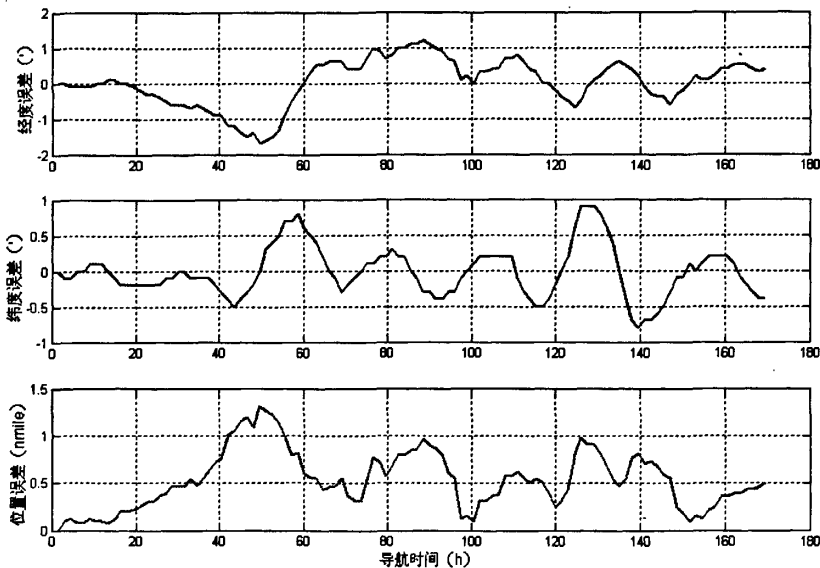


图 7 航行鉴定试验第二、三航次位置误差曲线

Fig.7 Position errors of no.2 and no.3 appraisal tests of marine navigation

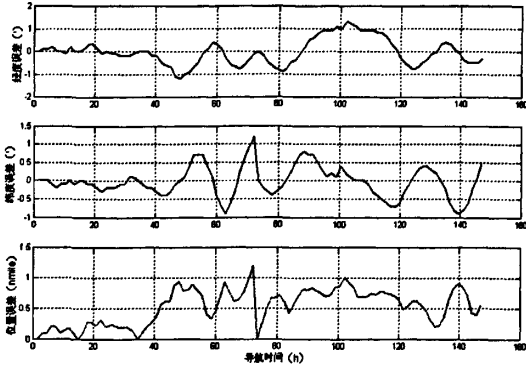


图 8 航行鉴定试验第六、七航次位置误差曲线  
(第 73 h 执行海上综合一点校)

Fig.8 Position errors of no.6 and no.7 appraisal tests of marine navigation (calibrated at 73 h)

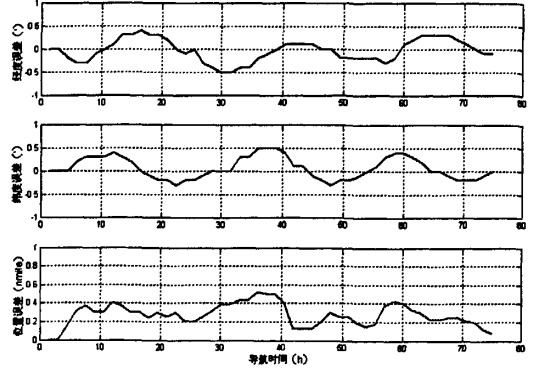


图 9 航行鉴定试验第八航次位置误差曲线  
(更换备用监控陀螺仪)

Fig.9 Position errors of no.8 appraisal test of marine navigation (replaced by standby monitor gyros)

4.3 无监控对比试验

为了进一步验证 H 调制陀螺监控技术的应用效果,在码头系泊状态下进行了系统无监控补偿的对比试验。试验中监控陀螺及监控回路仍正常工作,以保持系统内部工作环境不变,但对监测出的导航陀螺漂移不进行补偿。试验结果表明,无监控状态下系统定位误差的发散要比监控状态下的快得多(未做满 72 h 即中止),而监控回路所测导航陀螺漂移与系统定位误差之间有很好的对应关系。试验结果见表 5。

表 5 无监控对比试验结果

Tab.5 The results of navigation test without H-modulation gyro monitoring

导航时间/h	最大位置误差/ nmile	北向导航陀螺漂移 监测总量/(°/h)	方位导航陀螺漂移 监测总量/(°/h)	备注
24	1.48	-0.0012	0.0072	导航陀螺漂移监测 总量为对应时间内 的累计和
48	4.80	-0.0023	0.0094	
52.5	6.81	-0.0029	0.0096	

4.4 室内长时间精度考察试验结果

为考察系统的技术潜力,在室内对系统进行了十昼夜的静态精度考察试验,系统位置误差最大值:九昼夜(216 h)为 1.72 nmile、十昼夜(240 h)为 2.23 nmile。试验结果见图 10 和表 6。

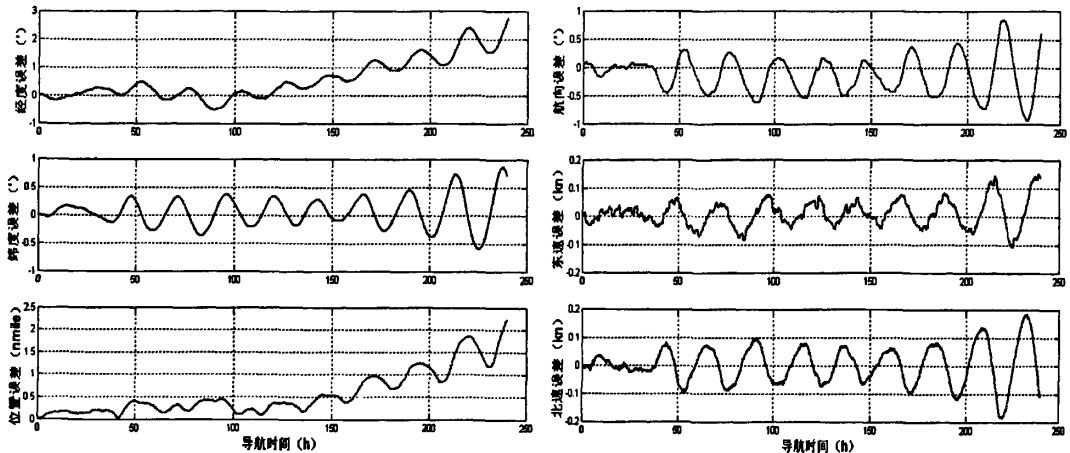


图 10 长时间精度考察试验系统误差曲线

Fig.10 System errors of long-term navigation test



表 6 长时间精度考察试验结果

Tab.6 The results of long-term navigation test

导航时间/ h	经度误差最 大值/(')	纬度误差最 大值/(')	位置误差最大 值/nmile)	航向误差 RMS 值/(')	东速误差 RMS 值/kn	北速误差 RMS 值/kn
24	-0.19	0.16	0.17	0.08	0.02	0.02
48	0.26	0.33	0.38	0.17	0.02	0.03
72	0.47	0.33	0.41	0.23	0.03	0.04
96	-0.52	0.37	0.45	0.27	0.03	0.05
120	-0.52	0.37	0.45	0.28	0.03	0.05
144	0.60	0.37	0.53	0.28	0.03	0.05
168	1.12	0.38	0.92	0.28	0.04	0.05
192	1.48	0.45	1.21	0.29	0.04	0.05
216	2.08	0.73	1.72	0.31	0.04	0.06
240	2.73	0.86	2.23	0.36	0.05	0.07

## 5 结论

H 调制陀螺监控惯性导航系统经过室内鉴定试验、海上鉴定试验等多种试验的考察验证,证明系统具备良好的长期精度、可靠性和工程实用性。应用 H 调制陀螺监控技术可以显著延长系统重调周期,是利用中精度陀螺实现高精度惯性导航系统的有效手段。

1) 系统长期精度高,定位误差最大值 $\leq 1.50$  nmile/72 h,重调周期可延长至 3~5 天。

2) 系统可靠性高、重复性好、工程实用性强,大量静、动态试验以及更换核心惯性敏感器的试验表现出系统良好的技术状态一致性和环境适应能力。

3) 数次综合一点校试验的成功,表明系统具备利用一点外参考信息进行综合校准的能力。

4) 根据长时间静态精度考察试验的结果以及系统静、动态试验表现的一致性可见,本系统还有相当的技术潜力和提升空间。此外,在系统误差补偿方案上仍有改进的余地,如可以在补偿导航陀螺漂移的基础上对由该漂移引起的系统误差也进行定期修正,以进一步抑制系统误差的发散。

## 参考文献(References):

- [1] Lawrence A. Modern inertial technology - Navigation, guidance and control[M]. 2nd Ed. New York: Springer Publishing Company, 1998.
- [2] Bouchard J R, Ray R E. The reality of wheel speed modulation[C]// Guidance and Control Conference, 1981: 217-222.
- [3] Titterton D H, Weston J L. Strapdown inertial navigation technology[M]. 2nd Ed. Lexington, Massachusetts, USA: the American Institute of Aeronautics and Astronautics and the Institute of Electrical Engineers, 2004.
- [4] Giovanni C San, Levinson E. H-modulation for long endurance marine inertial navigation[J]. Navigation, 1975, 22(2): 135-151.
- [5] Rogers M R. Applied Mathematics in integrated navigation systems[M]. 3rd Ed. Reston, Virginia: AIAA Inc, 2007.
- [6] 刘为任, 张宗洵, 陈亚灵. 差动输入在 H 调制误差自补偿惯导系统中的应用[J]. 中国惯性技术学报, 1999, 7(1): 1-4. LIU Wei-ren, ZHANG Zong-xun, CHEN Ya-ling. Application of differential input to the h-modulation error auto-compensation INS[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 1999, 7(1): 1-4.

# H调制陀螺监控高精度惯性导航系统

作者: [熊巍](#), [蔡智渊](#), [齐宇轩](#), [李德春](#), [吕善民](#), [XIONG Wei](#), [CAI Zhi-yuan](#), [QI Yu-xuan](#),  
[LI De-chun](#), [LV Shan-min](#)  
作者单位: [天津航海仪器研究所, 天津, 300131](#)  
刊名: [中国惯性技术学报](#)   
英文刊名: [JOURNAL OF CHINESE INERTIAL TECHNOLOGY](#)  
年, 卷(期): 2010, 18(4)  
被引用次数: 0次

## 参考文献(6条)

1. Lawrence A [Modern inertial technology-Navigation, guidance and control](#) 1998
2. Bouchard J R, Ray R E [The reality of wheel speed modulation](#) 1981
3. Titterton D H, Weston J L [Strapdown inertial navigation technology](#) 2004
4. Giovanni C San, Levinson E [H-modulation for long endurance marine inertial navigation](#) 1975(2)
5. Rogers M R [Applied Mathematics in integrated navigation systems](#) 2007
6. [刘为任](#), [张宗洵](#), [陈亚灵](#) [差动输入在H调制误差自补偿惯性导航系统中的应用](#) 1999(1)

## 相似文献(2条)

1. 期刊论文 [刘为任](#), [徐晓明](#), [曲全福](#), [张玉龙](#), [熊正南](#), [LIU Weiren](#), [XU Xiaoming](#), [QU Quanfu](#), [Zhang Yulong](#), [Xiong Zhengnan](#) [HMGINS/ENC/BM组合导航系统研究](#) -[中国惯性技术学报](#)2001, 9(2)

根据H调制陀螺监控惯性导航系统(GMINS)、电子海图(ENC)以及测深测潜仪(BM)的不同特点,提出了一种HMGINS/ENC/BM组合导航系统.该组合系统是一种完全自主式导航系统,不需任何外部信息,在水下即可完成对惯导的校正和对导航陀螺漂移的补偿.同时还针对该组合导航系统提出了一种优化组合算法.理论分析和仿真结果表明:采用该优化算法后,潜艇的重调周期可延长到120 h.

2. 会议论文 [刘为任](#), [张玉龙](#), [熊正南](#) [H-M-GMINS/ENC/BM组合导航系统研究](#) 2001

H调制陀螺监控惯性导航系统(H-M-GMINS)延长了潜艇的重调周期,但就国内目前惯性元件的技术水平,单纯的H调制技术很难使系统的定位精度有较大幅度的提高;本文根据H调制陀螺监控惯性导航系统、电子海图(ENC)以及测深测潜仪(BM)的不同特点,提出了一种H-M-GMINS/ENC/BM组合导航系统,该组合系统是一种完全自主式导航系统,不需任何外部信息,在水下即可完成对惯导的校正和对导航陀螺漂移的补偿,同时,本文针对该组合导航系统还提出了一种优化组合算法,理论分析和仿真结果表明,采用该优化算法后,潜艇的重调周期可延长到120小时.

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_zgqxjsxb201004001.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_zgqxjsxb201004001.aspx)

授权使用: 上海交通大学(shjtdxip), 授权号: 4dda5e23-0b29-48dd-a8c4-9e9700ce315b

下载时间: 2011年2月27日