



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 103940445 B

(45)授权公告日 2016.08.17

(21)申请号 201410143285.4

(22)申请日 2014.04.10

(73)专利权人 哈尔滨工程大学

地址 150001 黑龙江省哈尔滨市南岗区南通大街145号哈尔滨工程大学科技处知识产权办公室

(72)发明人 孙云龙 高延滨 管练武 杨淳 李绪友 郭慧 许德新 张庆 胡文彬 张帆

(51)Int. Cl.

G01C 25/00(2006.01)

(56)对比文件

- CN 101514899 A, 2009.08.26, CN 101629826 A, 2010.01.20, CN 102620734 A, 2012.08.01, CN 101514899 A, 2009.08.26, CN 101718560 A, 2010.06.02,

- CN 101514899 A, 2009.08.26, CN 101718560 A, 2010.06.02, CN 102221364 A, 2011.10.19, CN 103090866 A, 2013.05.08, US 3925654 A, 1975.12.09, US 2011167893 A1, 2011.07.14, 何泓洋等.《单轴旋转惯导系统误差特性研究》.《计算机仿真》.2013,第30卷(第2期),17-20.

查峰等.《单轴旋转惯导系统旋转性误差分析及补偿》.《中国惯性技术学报》.2012,第20卷(第1期),11-17.

袁书明等.《单轴旋转捷联式惯导系统惯性器件误差指标确定方法研究》.《哈尔滨工程大学学报》.2013,第34卷(第8期),1017-1022.

审查员 阳杨

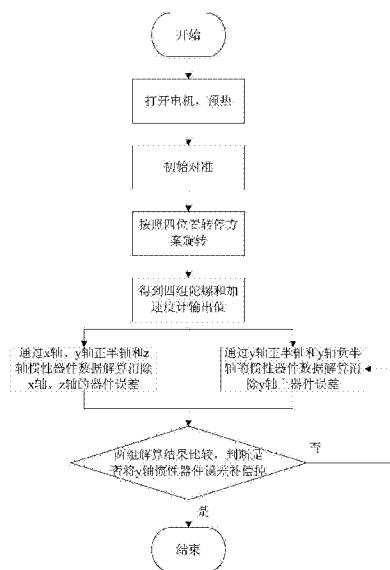
权利要求书2页 说明书7页 附图3页

(54)发明名称

一种单轴旋转惯导系统惯性器件误差补偿方法

(57)摘要

本发明涉及能够消除旋转轴上惯性器件的误差一种单轴旋转惯导系统惯性器件误差补偿方法。将惯性器件固联至旋转机构，惯性器件的y轴与天向重合；旋转机构带动惯性器件以角速度ω_y绕y轴进行正反转停运动，惯性器件采用四个转停次序为一个周期的旋转方式；惯导系统中与旋转轴垂直的惯性器件误差通过读取三个轴正半轴的惯性器件输出值和解算被调制成正余弦变化的信号，从而在导航解算中消除x轴、z轴的器件误差；y轴上的器件误差通过读取旋转轴正负半轴上的惯性器件数据和解算被平均掉。从而达到将惯导系统所有器件误差全部调制掉的目的。本发明增加了一组陀螺和加速度计，提高了系统的冗余性和可靠性。



1. 一种单轴旋转惯导系统惯性器件误差补偿方法,其特征在于,包括以下几个步骤:

步骤一:将惯性器件固联至旋转机构,惯性器件的y轴与天向重合;

步骤二:旋转机构带动惯性器件以角速度 ω_y 绕y轴进行正反转停运动;

惯性器件的一个周期的四个转停次序为:

x_s 、 z_s 代表惯性坐标系水平轴, A_1 、 A_2 、 B_1 、 B_2 表示四个停留位置,其中 A_1 、 A_2 位置重合、位于 x_s 的正半轴, B_1 、 B_2 位置重合、位于 x_s 的负半轴,

次序1,惯导系统从位置 A_1 出发顺时针转动 180° ,到达位置 B_1 ,停位时间长为 t ,

次序2,惯导系统从位置 B_1 出发逆时针转动 180° ,到达位置 A_2 ,停位时间长为 t ,

次序3,惯导系统从位置 A_2 出发逆时针转动 180° ,到达位置 B_2 ,停位时间长为 t ,

次序4,惯导系统从位置 B_2 出发顺时针转动 180° ,到达位置 A_1 ,停位时间长为 t ;

步骤三:读取x轴陀螺输出值 $\tilde{\omega}_{isx}^s$ 、x轴加速度计输出值 \tilde{f}_x^s 、y轴正半轴陀螺输出值 $\tilde{\omega}_{isy_1}^s$ 、y轴正半轴加速度输出值 $\tilde{f}_{y_1}^s$ 、z轴陀螺输出值 $\tilde{\omega}_{isz}^s$ 、z轴加速度计输出值 \tilde{f}_z^s 、y轴负半轴陀螺输出值 $\tilde{\omega}_{isy_2}^s$ 、y轴负半轴加速度计输出值 $\tilde{f}_{y_2}^s$,

惯性器件误差为:

$$\begin{cases} \delta\omega_{is}^n = [\varepsilon_x \cos\alpha + \varepsilon_z \sin\alpha & \varepsilon_y & -\varepsilon_x \sin\alpha + \varepsilon_z \cos\alpha]^T \\ \delta f^n = [\nabla_x \cos\alpha + \nabla_z \sin\alpha & \nabla_y & -\nabla_x \sin\alpha + \nabla_z \cos\alpha]^T \end{cases}$$

其中: $\delta\omega_{is}^n$ 表示导航坐标系下陀螺器件误差, δf^n 表示导航坐标系下加速度计器件误差, ε_x 、 ε_y 、 ε_z 分别表示x轴、y轴、z轴陀螺随机常值误差, ∇_x 、 ∇_y 、 ∇_z 分别为x轴、y轴、z轴加速度计随机常值误差,经单轴旋转调制,与旋转轴垂直的惯性器件误差被调制成正余弦变化的信号,从而在导航解算中消除x轴、z轴的器件误差,同时得到y轴陀螺仪器件误差 ε_y 和y轴加速度计器件误差 ∇_y ;

步骤四:通过y轴正半轴和y轴负半轴的惯性器件数据解算消除y轴上的器件误差,得到补偿y轴陀螺器件误差后的误差值 $\delta\omega_{isy}^n$ 和补偿y轴加速度计器件误差后的误差值 δf^n_y ,将补偿y轴陀螺器件误差后的误差值 $\delta\omega_{isy}^n$ 和步骤三中得到的y轴陀螺随机常值误差 ε_y 比较,将补偿y轴加速度计器件误差后的误差值 δf^n_y 和步骤三中的y轴加速度计随机常值误差 ∇_y 比较,判断误差是否补偿,如果没有补偿,则重新采集y轴正半轴陀螺输出值 $\tilde{\omega}_{isy_1}^s$ 、y轴正半轴加速度输出值 $\tilde{f}_{y_1}^s$ 、y轴负半轴陀螺输出值 $\tilde{\omega}_{isy_2}^s$ 、y轴负半轴加速度计输出值 $\tilde{f}_{y_2}^s$,得到补偿数据,重复步骤三到步骤四,直到误差得到补偿。

2. 根据权利要求1所述的一种单轴旋转惯导系统惯性器件误差补偿方法,其特征在于:所述的分别位于y轴正半轴和y轴负半轴的两个陀螺仪的输出为:

$$\begin{cases} \tilde{\omega}_{isy_1}^s = \omega_y K_{g_{y1}} + \varepsilon_{g_{y1}} + \varepsilon_{ng_{y1}} \\ \tilde{\omega}_{isy_2}^s = -\omega_y K_{g_{y2}} + \varepsilon_{g_{y2}} + \varepsilon_{ng_{y2}} \end{cases}$$

其中, $\tilde{\omega}_{isy_1}^s$ 表示y轴正半轴陀螺输出值、 $\tilde{\omega}_{isy_2}^s$ 表示y轴负半轴陀螺输出值, ω_y 表示旋转角

度, $K_{g_{y1}}$ 、 $K_{g_{y2}}$ 分别表示两个陀螺的标度因数, $\mathcal{E}_{g_{y1}}$ 、 $\mathcal{E}_{g_{y2}}$ 分别表示两个陀螺的随机常值误差, $\mathcal{E}_{ng_{y1}}$ 、 $\mathcal{E}_{ng_{y2}}$ 分别表示两个陀螺的白噪声误差, $\mathcal{E}_{ng_{y1}}$ 、 $\mathcal{E}_{ng_{y2}}$ 近似相等, 不考虑噪声影响, 将两个式子做差, 即可消除y轴上陀螺仪的器件误差;

分别位于y轴正半轴和y轴负半轴的两个加速度计的输出为:

$$\begin{cases} \tilde{f}_{y1}^s = -A_y K_{a_{y1}} + \nabla_{a_{y1}} + \nabla_{na_{y1}} \\ \tilde{f}_{y2}^s = A_y K_{a_{y2}} + \nabla_{a_{y2}} + \nabla_{na_{y2}} \end{cases}$$

其中, \tilde{f}_{y1}^s 表示y轴正半轴加速度计输出值、 \tilde{f}_{y2}^s 表示y轴负半轴加速度计输出值, A_y 表示y轴上的加速度, $K_{a_{y1}}$ 、 $K_{a_{y2}}$ 分别表示两个加速度计的标度因数, $\nabla_{a_{y1}}$ 、 $\nabla_{a_{y2}}$ 分别表示两个加速度计的随机常值误差, $\nabla_{na_{y1}}$ 、 $\nabla_{na_{y2}}$ 分别表示两个加速度计的白噪声误差, $\nabla_{a_{y1}}$ 、 $\nabla_{a_{y2}}$ 近似相等, 不考虑噪声影响, 将两个式子做差, 即可消除y轴上加速度计的器件误差。

3. 根据权利要求1或2所述的一种单轴旋转惯导系统惯性器件误差补偿方法, 其特征在于: 所述的惯性器件包括陀螺仪和加速度计。

一种单轴旋转惯导系统惯性器件误差补偿方法

技术领域

[0001] 本发明属于惯性导航系统消除惯性器件误差方法中的单轴旋转调制技术,特别涉及能够消除旋转轴上惯性器件的误差的一种单轴旋转惯导系统惯性器件误差补偿方法。

背景技术

[0002] 捷联惯导系统基于能够连续输出载体速度、姿态、位置信息的全自主导航系统被广泛应用于航空、航天、航海等领域。其主要是利用陀螺仪和加速度计测量载体的角运动和线运动信息,经过导航解算后得到导航信息。然而,由于惯性组件输出值与测量值总是存在一定常值偏差,导致系统解算定位误差随导航时间的增长而逐渐发散,影响导航精度,制约了捷联惯导系统的长时间导航能力。为了提高系统定位精度,一方面可以提高惯性元件精度,但是受到加工水平的制约,难度很大;另一方面就是采用算法上的提高来抑制误差,自动抵消惯性器件的误差对精度的影响。

[0003] 旋转调制技术作为一种误差抑制技术,主要是通过旋转机构带动惯性器件组件按照既定方案旋转,使得惯性组件常值偏差沿导航系统投影呈周期振荡形式,一个旋转周期内积分结果为零,进而抵消惯性器件常值输出误差对定位误差的影响以提高系统的精度。旋转调制技术的本质就是改变陀螺敏感轴方向,使依附于陀螺敏感轴上的误差方向在导航系中改变,使不同方向上的等效器件引起的系统导航误差相互抵消,从而提高导航精度。

[0004] 单轴旋转调制技术是通过沿单一轴转动不同位置来消除惯性器件误差的方法,但是此方法只能消除非旋转轴方向上的器件误差,目前在核心期刊与专利查询中均未发现能同时消除旋转轴上惯性器件误差的方法。

发明内容

[0005] 本发明的目的是提供具有高精度、高冗余性的一种单轴旋转惯导系统惯性器件误差补偿方法。

[0006] 本发明是通过以下技术方案实现的:

[0007] 一种单轴旋转惯导系统惯性器件误差补偿方法,包括以下几个步骤:

[0008] 步骤一:将惯性器件固联至旋转机构,惯性器件的y轴与天向重合;

[0009] 步骤二:旋转机构带动惯性器件以角速度 ω_y 绕y轴进行正反转停运动;

[0010] 惯性器件的一个周期的四个转停次序为:

[0011] x_s 、 z_s 代表惯性坐标系水平轴, A_1 、 A_2 、 B_1 、 B_2 表示四个停留位置,其中 A_1 、 A_2 位置重合、位于 x_s 的正半轴, B_1 、 B_2 位置重合、位于 x_s 的负半轴,

[0012] 次序1,惯导系统从位置 A_1 出发顺时针转动 180° ,到达位置 B_1 ,停位时间长为 t ,

[0013] 次序2,惯导系统从位置 B_1 出发逆时针转动 180° ,到达位置 A_2 ,停位时间长为 t ,

[0014] 次序3,惯导系统从位置 A_2 出发逆时针转动 180° ,到达位置 B_2 ,停位时间长为 t ,

[0015] 次序4,惯导系统从位置 B_2 出发顺时针转动 180° ,到达位置 A_1 ,停位时间长为 t ;

[0016] 步骤三:读取x轴陀螺输出值 $\tilde{\omega}_{ix}^s$ 、x轴加速度计输出值 \tilde{f}_x^s 、y轴正半轴陀螺输出值

$\tilde{\omega}_{isy_1}^s$ 、y轴正半轴加速度输出值 $\tilde{f}_{y_1}^s$ 、z轴陀螺输出值 $\tilde{\omega}_{isz}^s$ 、z轴加速度计输出值 \tilde{f}_z^s 、y轴负半轴陀螺输出值 $\tilde{\omega}_{isy_2}^s$ 、y轴负半轴加速度计输出值 $\tilde{f}_{y_2}^s$ ，

[0017] 惯性器件误差为：

$$[0018] \quad \begin{cases} \delta\omega_{is}^n = [\varepsilon_x \cos\alpha + \varepsilon_z \sin\alpha & \varepsilon_y & -\varepsilon_x \sin\alpha + \varepsilon_z \cos\alpha]^T \\ \delta f^n = [\nabla_x \cos\alpha + \nabla_z \sin\alpha & \nabla_y & -\nabla_x \sin\alpha + \nabla_z \cos\alpha]^T \end{cases}$$

[0019] 其中： $\delta\omega_{is}^n$ 表示导航坐标系下陀螺器件误差， δf^n 表示导航坐标系下加速度计器件误差， ε_x 、 ε_y 、 ε_z 分别表示x轴、y轴、z轴陀螺随机常值误差， ∇_x 、 ∇_y 、 ∇_z 分别为x轴、y轴、z轴加速度计随机常值误差，经单轴旋转调制，与旋转轴垂直的惯性器件误差被调制成正余弦变化的信号，从而在导航解算中消除x轴、z轴的器件误差，同时得到y轴陀螺仪器件误差 ε_y 和y轴加速度计器件误差 ∇_y ；

[0020] 步骤四：通过y轴正半轴和y轴负半轴的惯性器件数据解算消除y轴上的器件误差，得到补偿y轴陀螺器件误差后的误差值 $\delta\omega_{isy}^n$ 和补偿y轴加速度计器件误差后的误差值 δf^n_y ，将补偿y轴陀螺器件误差后的误差值 $\delta\omega_{isy}^n$ 和步骤四中得到的y轴陀螺随机常值误差 ε_y 比较，将补偿y轴加速度计器件误差后的误差值 δf^n_y 和步骤四中的y轴加速度计随机常值误差 ∇_y 比较，判断误差是否补偿，如果没有补偿，则重新采集y轴正半轴陀螺输出值 $\tilde{\omega}_{isy_1}^s$ 、y轴正半轴加速度输出值 $\tilde{f}_{y_1}^s$ 、y轴负半轴陀螺输出值 $\tilde{\omega}_{isy_2}^s$ 、y轴负半轴加速度计输出值 $\tilde{f}_{y_2}^s$ ，得到补偿数据，重复步骤三到步骤四，直到误差得到补偿。

[0021] 本发明一种单轴旋转惯导系统惯性器件误差补偿方法还可以包括：

[0022] 1、分别位于y轴正半轴和y轴负半轴的两个陀螺仪的输出为：

$$[0023] \quad \begin{cases} \tilde{\omega}_{isy_1}^s = \omega_y K_{gy_1} + \varepsilon_{gy_1} + \varepsilon_{ng_{y_1}} \\ \tilde{\omega}_{isy_2}^s = -\omega_y K_{gy_2} + \varepsilon_{gy_2} + \varepsilon_{ng_{y_2}} \end{cases}$$

[0024] 其中， $\tilde{\omega}_{isy_1}^s$ 表示y轴正半轴陀螺输出值、 $\tilde{\omega}_{isy_2}^s$ 表示y轴负半轴陀螺输出值， ω_y 表示旋转角度， K_{gy_1} 、 K_{gy_2} 分别表示两个陀螺的标度因数， ε_{gy_1} 、 ε_{gy_2} 分别表示两个陀螺的随机常值误差， $\varepsilon_{ng_{y_1}}$ 、 $\varepsilon_{ng_{y_2}}$ 分别表示两个陀螺的白噪声误差， $\varepsilon_{ng_{y_1}}$ 、 $\varepsilon_{ng_{y_2}}$ 近似相等，不考虑噪声影响，将两个式子做差，即可消除该轴上陀螺仪的器件误差；

[0025] 分别位于y轴正半轴和y轴负半轴的两个加速度计的输出为：

$$[0026] \quad \begin{cases} \tilde{f}_{y_1}^s = -A_y K_{ay_1} + \nabla_{ay_1} + \nabla_{na_{y_1}} \\ \tilde{f}_{y_2}^s = A_y K_{ay_2} + \nabla_{ay_2} + \nabla_{na_{y_2}} \end{cases}$$

[0027] 其中， $\tilde{f}_{y_1}^s$ 表示y轴正半轴加速度输出值、 $\tilde{f}_{y_2}^s$ 表示y轴负半轴加速度计输出值， A_y 表示y轴上的加速度， K_{ay_1} 、 K_{ay_2} 分别表示两个加速度计的标度因数， ∇_{ay_1} 、 ∇_{ay_2} 分别表示两个加速度计的随机常值误差， $\nabla_{na_{y_1}}$ 、 $\nabla_{na_{y_2}}$ 分别表示两个加速度计的白噪声误差， ∇_{ay_1} 、 ∇_{ay_2} 近似相等，不考虑噪声影响，将两个式子做差，即可消除该轴上加速度计的器件误差。

[0028] 2、惯性器件包括陀螺仪和加速度计。

[0029] 本发明的有益效果：

[0030] 1.本发明有效地抑制了陀螺仪三个轴上的所有惯性器件误差，提高了陀螺仪的精度。

[0031] 2.本发明因为增加了一组陀螺和加速度计，系统的冗余性得到提高。系统的稳定性、可靠性也得到提高。

[0032] 3.本发明与传统的单轴旋转调制的方法相比，其优点为能消除原方法不能消除的旋转轴上的惯性器件误差。

附图说明

[0033] 图1旋转调制技术的基本原理

[0034] 图2传统单轴旋转调制陀螺和加速度计安装

[0035] 图3改进后单轴旋转调制陀螺和加速度计安装

[0036] 图4四转位旋转方案

[0037] 图5改进单轴旋转调制流程图

具体实施方式

[0038] 下面结合附图对本发明进行详细说明。

[0039] 本发明是通过在旋转轴负半轴增加一组陀螺和加速度计达到的。惯导系统中与旋转轴垂直的器件误差可以通过读取三个轴正半轴的惯性器件输出值和解算被调制成正余弦变化的信号，从而在导航解算中可以平均掉。旋转轴上的器件误差可以通过读取旋转轴正负半轴上的惯性器件数据和解算被平均掉。从而达到将惯导系统所有器件误差全部调制掉的目的。因为增加了惯性器件，所以系统的冗余性得到提高，稳定性也得到提升。

[0040] 一种新型冗余式单轴旋转惯导系统实现步骤如下：

[0041] 步骤一：将惯性组件固联至旋转机构，惯性组件y轴与天向重合。

[0042] 步骤二：启动电机，充分预热后，自动进行初对准工作，此时需等待数分钟。

[0043] 步骤三：旋转机构带动惯性组件以角速度 ω_y 绕y轴进行正反转停运动，惯性组件采用四个转停次序为一个周期的旋转方案。

[0044] 步骤四：读取x轴陀螺输出值 $\tilde{\omega}_{isx}^s$ 、x轴加速度计输出值 \tilde{f}_x^s 、y轴正半轴陀螺输出值 $\tilde{\omega}_{isy_1}^s$ 、y轴正半轴加速度输出值 $\tilde{f}_{y_1}^s$ 、z轴陀螺输出值 $\tilde{\omega}_{isz}^s$ 、z轴加速度计输出值 \tilde{f}_z^s 、y轴负半轴陀螺输出值 $\tilde{\omega}_{isy_2}^s$ 、y轴负半轴加速度计输出值 $\tilde{f}_{y_2}^s$ 。根据单轴旋转调制原理，设 $\delta\omega_{is}^n$ 表示导航坐标系下陀螺器件误差， δf^n 表示导航坐标系下加速度计器件误差， ε_x 、 ε_y 、 ε_z 分别表示x轴、y轴、z轴陀螺随机常值误差， ∇_x 、 ∇_y 、 ∇_z 分别为x轴、y轴、z轴加速度计随机常值误差，不考虑白噪声测量误差，则惯性器件器件误差为：

$$[0045] \begin{cases} \delta\omega_{is}^n = [\varepsilon_x \cos\alpha + \varepsilon_z \sin\alpha & \varepsilon_y & -\varepsilon_x \sin\alpha + \varepsilon_z \cos\alpha]^T \\ \delta f^n = [\nabla_x \cos\alpha + \nabla_z \sin\alpha & \nabla_y & -\nabla_x \sin\alpha + \nabla_z \cos\alpha]^T \end{cases}$$

[0046] 则与旋转轴垂直的器件误差被调制成正余弦变化的信号，从而在导航解算中可以

平均掉。同时可以得到y轴陀螺仪器件误差 ε_y 和y轴加速度计器件误差 ∇_y 。

[0047] 步骤五:用 $K_{g_{y1}}$ 、 $K_{g_{y2}}$ 分别表示两个陀螺的标度因数, $\varepsilon_{g_{y1}}$ 、 $\varepsilon_{g_{y2}}$ 分别表示两个陀螺的随机常值误差, $\varepsilon_{ng_{y1}}$ 、 $\varepsilon_{ng_{y2}}$ 分别表示两个陀螺的白噪声误差。则y轴陀螺输出为:

$$[0048] \quad \begin{cases} \tilde{\omega}_{isy_1}^s = \omega_y K_{g_{y1}} + \varepsilon_{g_{y1}} + \varepsilon_{ng_{y1}} \\ \tilde{\omega}_{isy_2}^s = -\omega_y K_{g_{y2}} + \varepsilon_{g_{y2}} + \varepsilon_{ng_{y2}} \end{cases}$$

[0049] 因为选用的两个陀螺性质相似,所以 $\varepsilon_{ng_{y1}}$ 、 $\varepsilon_{ng_{y2}}$ 近似相等,不考虑噪声影响,将两个式子做差,即可消除该轴上陀螺仪的器件误差从而得到补偿y轴陀螺器件误差后的误差值 $\delta\omega_{isy}^s$,同时与步骤四中的 ε_y 比较判断误差补偿是否明显,如果效果不理想,则重新采集 $\tilde{\omega}_{isy_1}^s$ 、 $\tilde{\omega}_{isy_2}^s$,得到新的补偿数据,直到补偿效果理想。

[0050] 用 A_y 表示y轴上的加速度, $K_{a_{y1}}$ 、 $K_{a_{y2}}$ 分别表示两个加速度计的标度因数, $\nabla_{a_{y1}}$ 、 $\nabla_{a_{y2}}$ 分别表示两个加速度计的随机常值误差, $\nabla_{na_{y1}}$ 、 $\nabla_{na_{y2}}$ 分别表示两个加速度计的白噪声误差。则y轴加速度计输出为:

$$[0051] \quad \begin{cases} \tilde{f}_{y_1}^s = -A_y K_{a_{y1}} + \nabla_{a_{y1}} + \nabla_{na_{y1}} \\ \tilde{f}_{y_2}^s = A_y K_{a_{y2}} + \nabla_{a_{y2}} + \nabla_{na_{y2}} \end{cases}$$

[0052] 因为选用的两个加速度计性质相似,所以 $\nabla_{a_{y1}}$ 、 $\nabla_{a_{y2}}$ 近似相等,不考虑噪声影响,将两个式子做差,即可消除该轴上加速度计的器件误差从而得到补偿y轴加速度计器件误差后的误差值 δf_y^s ,同时与步骤四中的 ε_y 比较判断误差补偿是否明显,如果效果不理想,则重新采集 $\tilde{f}_{y_1}^s$ 、 $\tilde{f}_{y_2}^s$ 得到新的补偿数据,直到补偿效果理想。至此,x轴、y轴、z轴的惯性器件误差全部消除。

[0053] 结合图1,图中 Ox_s 、 Oy_s 、 Oz_s 代表惯性坐标系, ε_N 、 ε_U 、 ε_E 为导航系中等效北向、等效天向和等效东向陀螺误差, ω_U 表示天向轴旋转角度, ω_N 表示北向轴旋转角度, $\pm 180^\circ$ 表示陀螺正反转 180° ,定义如下的坐标系:惯性传感器坐标系s系:原点为三个陀螺敏感轴相交的点,坐标轴为三个陀螺敏感轴约束的正交轴,表示为 Ox_s 、 Oy_s 、 Oz_s 并且 Oy_s 与旋转轴一致;

[0054] 载体坐标系b系:坐标轴沿载体的横摇轴、航向轴和纵摇轴,表示为 Ox_b 、 Oy_b 、 Oz_b ;

[0055] 导航坐标系n系:当地地理坐标系,坐标轴为北向轴、天向轴和东向轴;

[0056] 在工程实际中,即使经过高精度标定的IMU也会存在误差。IMU测量误差根据对陀螺和加速度计误差建模的不同而不同,一般来说,在标定时,激光陀螺IMU误差主要包括陀螺和加速度计的常值零偏、标度因数误差、安装误差和白噪声等。在理想角速度 ω_{is}^s 和比力 f^s 的激励下,IMU中陀螺和加速度计的测量输出可表示为:

$$[0057] \quad \begin{cases} \tilde{\omega}_{is}^s = (I + \delta K_g)(I + \delta C_g)\omega_{is}^s + \varepsilon + \varepsilon_n \\ \tilde{f}^s = (I + \delta K_a)(I + \delta C_a)f^s + \nabla + \nabla_n \end{cases} \quad (1)$$

[0058] 其中, $\tilde{\omega}_{is}^s$ 、 \tilde{f}^s 分别为激光陀螺和加速度计的输出值, δK_g 、 δK_a 为激光陀螺和加速度计比例因子误差矩阵, δC_g 、 δC_a 为激光陀螺和加速度计的安装关系误差矩阵, ω_{is}^s 、 f^s 为激光陀

螺和加速度计的真实输入值, ε 、 ∇ 为激光陀螺和加速度计的随机常值误差, ε_n 、 ∇_n 为激光陀螺和加速度计的白噪声测量误差。

[0059] 将式1展开,略去二阶小量,可得陀螺和加速度计的测量误差为:

$$[0060] \quad \begin{cases} \delta\omega_{is}^s = (\delta K_g + \delta C_g)\omega_{is}^s + \varepsilon + \varepsilon_n \\ \delta f^s = (\delta K_a + \delta C_a)f^s + \nabla + \nabla_n \end{cases} \quad (2)$$

[0061] 其中, $\delta\omega_{is}^s$ 表示陀螺测量误差, δf^s 表示加速度计测量误差。为了方便分析旋转调制基本原理,不妨假设初始时刻s系、b系和n系重合,则在导航系中等效陀螺漂移为:

$$[0062] \quad \varepsilon_N = \varepsilon_x, \varepsilon_U = \varepsilon_y, \varepsilon_E = \varepsilon_z \quad (3)$$

[0063] 其中, ε_x 、 ε_y 、 ε_z 为x陀螺、y陀螺和z陀螺的随机常值误差。

[0064] 忽略IMU与转动机构之间的安装误差,假设IMU以角速度 ω_c 绕载体的航向轴旋转。旋转过程中,载体静止,经过时间t, b系相对s系的方向余弦阵为:

$$[0065] \quad C_b^s = \begin{bmatrix} \cos\omega_c t & 0 & -\sin\omega_c t \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\omega_c t & 0 & \cos\omega_c t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

[0066] 其中, $\theta = \omega_c t$ 为IMU相对载体转过的角度。

[0067] 载体系相对惯性系的理想角速度和比力分别为 ω_{ib}^b 和 f^b , IMU相对载体没有线运动,所以IMU相对载体没有加速度,则陀螺和加速度计的理想输入为:

$$[0068] \quad \begin{cases} \omega_{is}^s = C_b^s \omega_{ib}^b + \omega_{bs}^s \\ f^s = C_b^s f^b \end{cases} \quad (5)$$

[0069] 其中, $\omega_{bs}^s = [0 \quad \omega_c \quad 0]^T$,表示惯性系比力。

[0070] 将式4和式5代入式2,并将陀螺和加速度计的测量误差投影到导航系,可得:

$$[0071] \quad \begin{cases} \delta\omega_{is}^n = C_s^n \left[(\delta K_g + \delta C_g)(C_b^s \omega_{ib}^b + \omega_{bs}^s) + \varepsilon + \varepsilon_n \right] \\ \delta f^n = C_s^n \left[(\delta K_a + \delta C_a)C_b^s f^b + \nabla + \nabla_n \right] \end{cases} \quad (6)$$

[0072] 其中, $C_s^n = C_b^n C_s^b$, $C_s^b = (C_b^s)^T$ 。均表示状态转移矩阵。

[0073] b系和n系重合,则 $C_b^n = I$ 。如果不考虑陀螺和加速度计的比力因子误差和安装误差,式6可化简为:

$$[0074] \quad \begin{cases} \delta\omega_{is}^n = C_s^b (\varepsilon + \varepsilon_n) \\ \delta f^n = C_s^b (\nabla + \nabla_n) \end{cases} \quad (7)$$

[0075] 不考虑噪声的影响,将式(4)代入式(7),展开可得:

$$[0076] \quad \begin{cases} \delta\omega_{is}^n = [\varepsilon_x \cos\alpha + \varepsilon_z \sin\alpha \quad \varepsilon_y \quad -\varepsilon_x \sin\alpha + \varepsilon_z \cos\alpha]^T \\ \delta f^n = [\nabla_x \cos\alpha + \nabla_z \sin\alpha \quad \nabla_y \quad -\nabla_x \sin\alpha + \nabla_z \cos\alpha]^T \end{cases} \quad (8)$$

[0077] 其中, $\delta\omega_{is}^n$ 表示导航坐标系下陀螺器件误差, δf^n 表示导航坐标系下加速度计器件误差。 ε_x 、 ε_y 、 ε_z 分别表示x轴、y轴、z轴陀螺随机常值误差, ∇_x 、 ∇_y 、 ∇_z 分别为x轴、y轴、z轴加

速度计随机常值误差可见,经单轴旋转调制,与旋转轴垂直的器件误差被调制成正余弦变化的信号,从而在导航解算中可以平均掉,而与旋转轴方向重合的器件误差没有变化,不能被调制。

[0078] 结合图2、图3,为了消除与旋转轴方向重合的器件误差在原单轴旋转调制基础上,在 $-y_s$ 轴上增加一组与 y_s 轴上性能相近的陀螺和加速度计。则该轴上两组陀螺仪输出如下:

$$[0079] \quad \begin{cases} \tilde{\omega}_{isy_1}^s = \omega_y K_{g_{y1}} + \varepsilon_{g_{y1}} + \varepsilon_{ng_{y1}} \\ \tilde{\omega}_{isy_2}^s = -\omega_y K_{g_{y2}} + \varepsilon_{g_{y2}} + \varepsilon_{ng_{y2}} \end{cases} \quad (9)$$

[0080] 其中, $\tilde{\omega}_{isy_1}^s$ 、 $\tilde{\omega}_{isy_2}^s$ 分别表示两个陀螺的输出值, ω_y 表示y轴旋转角度, $K_{g_{y1}}$ 、 $K_{g_{y2}}$ 分别表示两个陀螺的标度因数, $\varepsilon_{g_{y1}}$ 、 $\varepsilon_{g_{y2}}$ 分别表示两个陀螺的随机常值误差, $\varepsilon_{ng_{y1}}$ 、 $\varepsilon_{ng_{y2}}$ 分别表示两个陀螺的白噪声误差。因为选用的两个陀螺性质相似,所以 $\varepsilon_{ng_{y1}}$ 、 $\varepsilon_{ng_{y2}}$ 近似相等,不考虑噪声影响,将两个式子做差,即可消除该轴上陀螺仪的器件误差。

[0081] 同理,该轴上两组加速度计的输出如下:

$$[0082] \quad \begin{cases} \tilde{f}_{y_1}^s = -A_y K_{a_{y1}} + \nabla_{a_{y1}} + \nabla_{na_{y1}} \\ \tilde{f}_{y_2}^s = A_y K_{a_{y2}} + \nabla_{a_{y2}} + \nabla_{na_{y2}} \end{cases} \quad (10)$$

[0083] 其中, $\tilde{f}_{y_1}^s$ 、 $\tilde{f}_{y_2}^s$ 分别表示两个加速度计的输出值, A_y 表示该轴上的加速度, $K_{a_{y1}}$ 、 $K_{a_{y2}}$ 分别表示两个加速度计的标度因数, $\nabla_{a_{y1}}$ 、 $\nabla_{a_{y2}}$ 分别表示两个加速度计的随机常值误差, $\nabla_{na_{y1}}$ 、 $\nabla_{na_{y2}}$ 分别表示两个加速度计的白噪声误差。因为选用的两个加速度计性质相似,所以 $\nabla_{a_{y1}}$ 、 $\nabla_{a_{y2}}$ 近似相等,不考虑噪声影响,将两个式子做差,即可消除该轴上加速度计的器件误差。

[0084] 结合图5,下面对本发明的具体实施步骤进行详细说明:

[0085] 步骤一:将惯性组件固联至旋转机构,方向如图4所示,惯性组件y轴与天向重合。

[0086] 步骤二:启动电机,充分预热后,自动进行初对准工作,此时需等待数分钟。

[0087] 步骤三:按照图4所示以角速度为 ω_y 的四转位转停方案控制转台。图中①、②、③、④表示四个旋转过程, A_1 、 A_2 、 B_1 、 B_2 表示四个停留位置,其中 A_1 、 A_2 位置重合, B_1 、 B_2 位置重合。 x_s 、 z_s 代表惯性坐标系水平轴。具体操作为:

[0088] 次序1,惯导系统从位置 A_1 出发顺时针转动 180° ,到达位置 B_1 ,停位2分钟。

[0089] 次序2,惯导系统从位置 B_1 出发逆时针转动 180° ,到达位置 A_2 ,停位2分钟。

[0090] 次序3,惯导系统从位置 A_2 出发逆时针转动 180° ,到达位置 B_2 ,停位2分钟。

[0091] 次序4,惯导系统从位置 B_2 出发顺时针转动 180° ,到达位置 A_1 ,停位2分钟。

[0092] 惯导系统照此转动循环进行。

[0093] 步骤四:读取x轴陀螺输出值 $\tilde{\omega}_{isx}^s$ 、x轴加速度计输出值 \tilde{f}_x^s 、y轴正半轴陀螺输出值 $\tilde{\omega}_{isy_1}^s$ 、y轴正半轴加速度计输出值 $\tilde{f}_{y_1}^s$ 、z轴陀螺输出值 $\tilde{\omega}_{isz}^s$ 、z轴加速度计输出值 \tilde{f}_z^s 、y轴负半轴陀螺输出值 $\tilde{\omega}_{isy_2}^s$ 、y轴负半轴加速度计输出值 $\tilde{f}_{y_2}^s$ 。通过式1-8以及 $\tilde{\omega}_{isx}^s$ 、 \tilde{f}_x^s 、 $\tilde{\omega}_{isy_1}^s$ 、 $\tilde{f}_{y_1}^s$ 、 $\tilde{\omega}_{isz}^s$ 、 \tilde{f}_z^s 可以消除x轴陀螺器件误差 ε_x 、x轴加速度计器件误差 ∇_x 、z轴陀螺器件误差 ε_z 和z轴加速

度计器件误差 ∇_z 。同时可以得到y轴陀螺仪器件误差 ε_y 和y轴加速度计器件误差 ∇_y 。

[0094] 步骤五:通过式9和式10以及 $\tilde{\omega}_{isx_1}^s$ 、 $\tilde{f}_{y_1}^s$ 、 $\tilde{\omega}_{isy_2}^s$ 、 $\tilde{f}_{y_2}^s$ 可以得到补偿y轴陀螺器件误差后的误差值 $\delta\omega_{isy}^n$ 和补偿y轴加速度计器件误差后的误差值 δf_y^n 。将 $\delta\omega_{isy}^n$ 和步骤四中得到的 ε_y 比较,将 δf_y^n 和步骤四中的 ∇_y 比较,判断误差补偿是否明显,如果效果不理想,则重新采集 $\tilde{\omega}_{isx_1}^s$ 、 $\tilde{f}_{y_1}^s$ 、 $\tilde{\omega}_{isy_2}^s$ 、 $\tilde{f}_{y_2}^s$,得到新的补偿数据,直到补偿效果理想。至此,x轴、y轴、z轴的惯性器件误差全部消除。

[0095] 该方法利用单轴旋转调制即消除了三个轴上的惯性组件的器件误差。虽然会引入新的陀螺和加速度计的安装误差,但是实践表明,标度因数误差影响达到80%,因此即使引入新的安装误差,系统精度也会大幅提高。

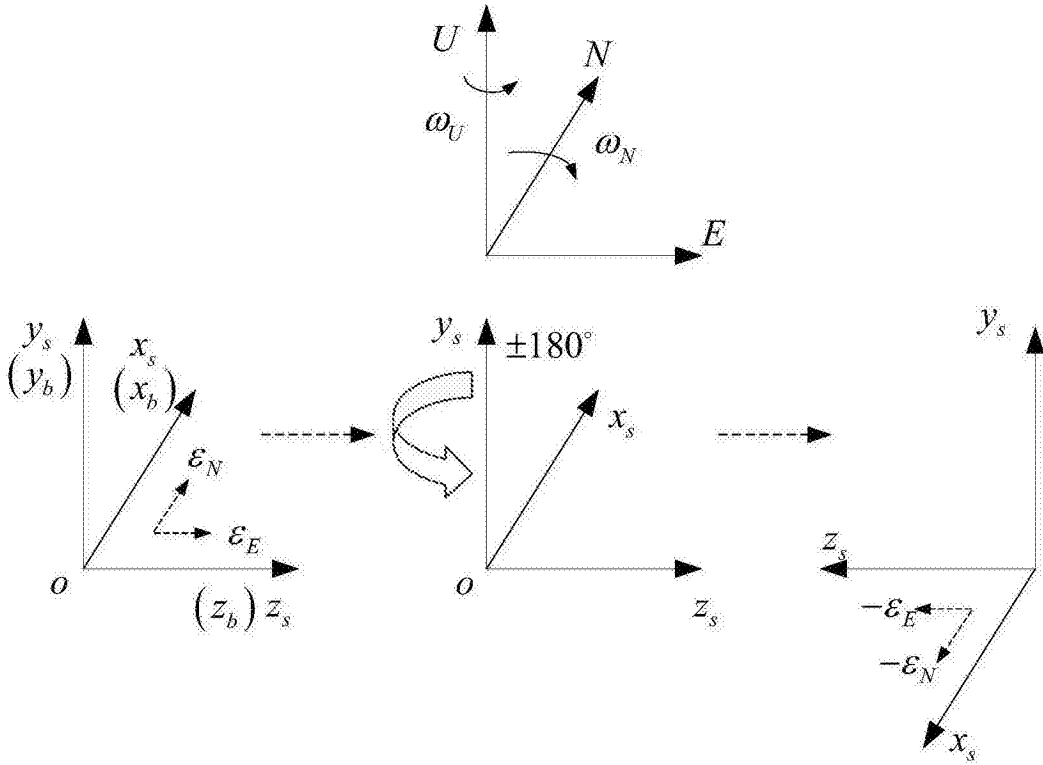


图1

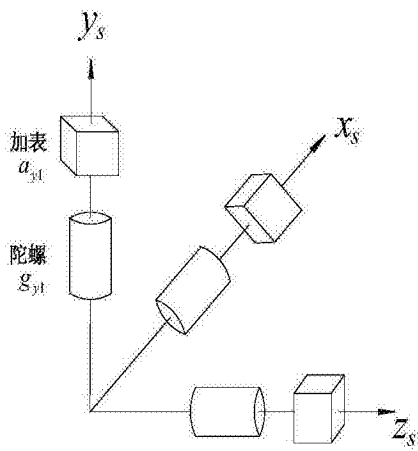


图2

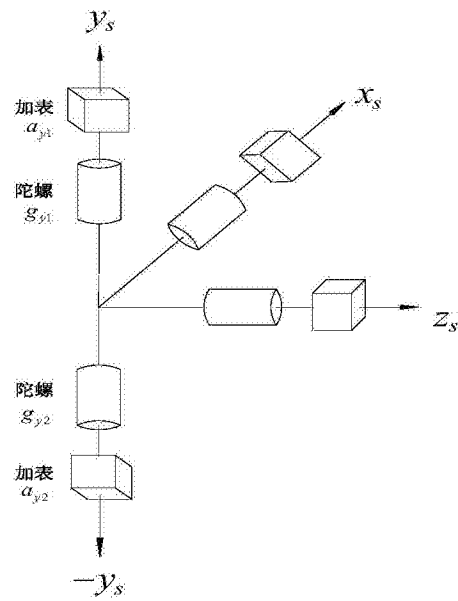


图3

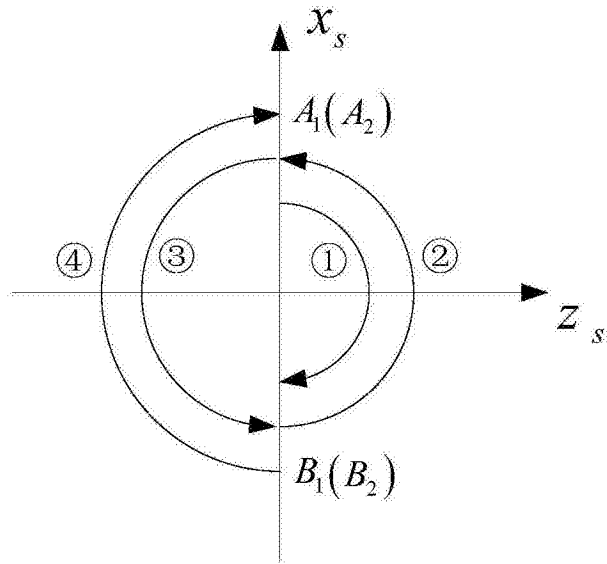


图4

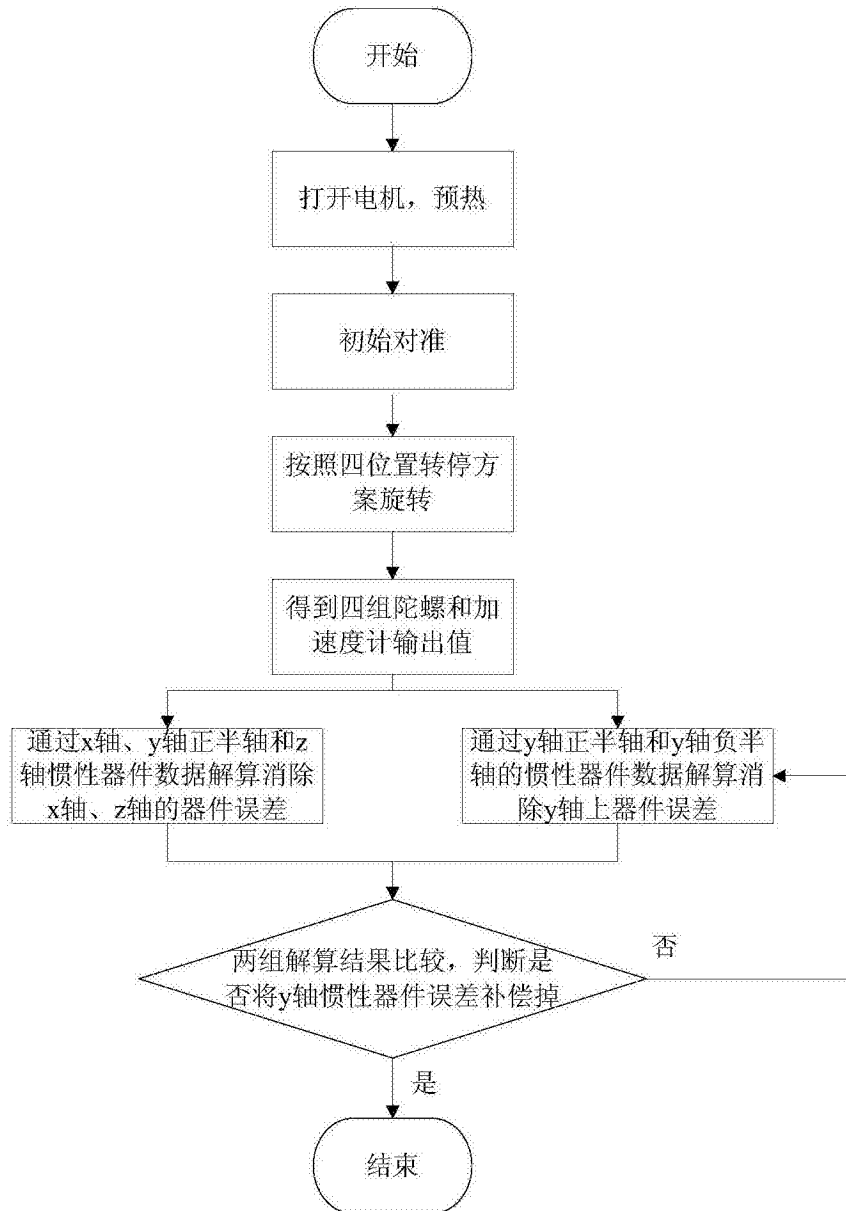


图5