

(43) 国际公布日
2020 年 3 月 5 日 (05.03.2020)



(10) 国际公布号

WO 2020/042696 A1

(51) 国际专利分类号:
G01V 7/00 (2006.01) G01V 13/00 (2006.01)

名彪(YU, Mingbiao); 中国江苏省南京市玄武区四牌楼二号, Jiangsu 210096 (CN)。

(21) 国际申请号: PCT/CN2019/089302

(74) 代理人: 南京经纬专利商标代理有限公司 (NANJING JINGWEI PATENT & TRADEMARK AGENCY CO., LTD); 中国江苏省南京市鼓楼区中山路179号12楼B座, Jiangsu 210005 (CN)。

(22) 国际申请日: 2019 年 5 月 30 日 (30.05.2019)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
201810985818.1 2018年8月27日 (27.08.2018) CN

(71) 申请人: 东南大学 (SOUTHEAST UNIVERSITY)
[CN/CN]; 中国江苏省南京市玄武区四牌
楼二号, Jiangsu 210096 (CN)。

(81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,

(72) 发明人: 蔡体菁(CAI, Tijing); 中国江苏省南京市玄武区四牌楼二号, Jiangsu 210096 (CN)。喻

(54) Title: DEVICE AND METHOD FOR COMPENSATING FOR ERROR OF MOVING-BASE ROTATING-ACCELEROMETER GRAVITY GRADIOMETER

(54) 发明名称: 一种动基座旋转加速度计重力梯度仪误差补偿装置及方法

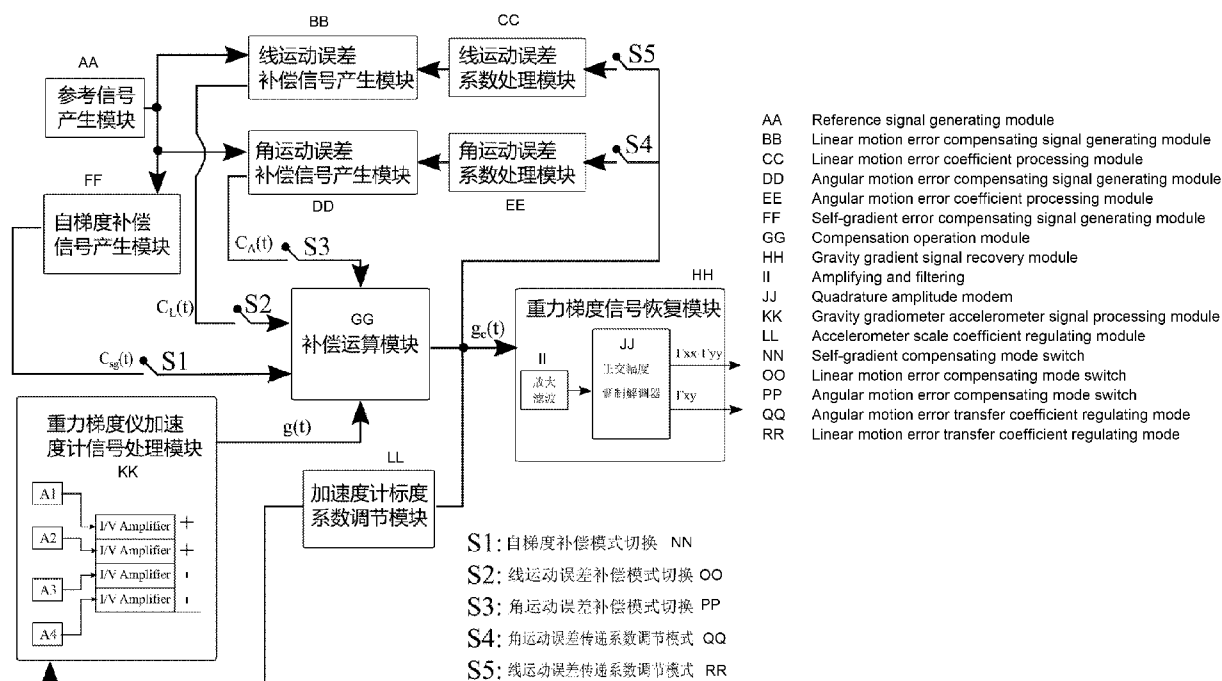


图 1

(S7) Abstract: Disclosed are a device and method for compensating for an error of a moving-base rotating-accelerometer gravity gradiometer. A signal of the gravity gradiometer before demodulation is compensated by calculating an angular motion error, a linear motion error, and a self-gradient of the gravity gradiometer according to the detected angular motion, linear motion, attitude angle of the gravity gradiometer, and based on an analytic model and a self-gradient model of the gravity gradiometer, and performing quadrature amplitude modulation of the angular motion error, the linear motion error, and the self-gradient. The present invention not only

[见续页]

WO 2020/042696 A1

SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG,
US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

- (84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区
保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ,
NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM,
AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG,
CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU,
IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT,
RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI,
CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

- 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

compensates for the angular motion error, the linear motion error, and the self-gradient in an output signal of the gravity gradiometer, but also solves the problems of over-voltage damage and over-voltage saturation of a conditioning circuit at a front end of the gravity gradiometer caused by the angular motion, the linear motion, and the self-gradient of the gravity gradiometer. The compensated signal of the gravity gradiometer is used to feedback and regulate a linear motion error transfer coefficient, an angular motion error transfer coefficient, and an accelerometer scale coefficient, and the influence of environmental factors, such as the temperature and magnetic fields, on the error transfer coefficients of the gravity gradiometer can be offset.

(57) 摘要: 本发明公开一种动基座旋转加速度计重力梯度仪误差补偿装置及方法, 根据检测的重力梯度仪的角运动, 线运动, 姿态角, 基于重力梯度仪解析模型, 自梯度模型, 计算重力梯度仪的角运动误差, 线运动误差, 自梯度, 并将角运动误差, 线运动误差, 自梯度进行正交幅值调制, 对重力梯度仪解调前的信号进行补偿。本发明不仅补偿了重力梯度仪输出信号中的角运动误差, 线运动误差, 自梯度, 还解决了重力梯度仪角运动, 线运动, 自梯度引起的重力梯度仪前端调理电路过电压损坏, 过电压饱和的问题。重力梯度仪补偿后的信号用于反馈调节线运动误差传递系数, 角运动误差传递系数, 加速度计标度系数, 能够抵消温度、磁场等环境因素对重力梯度仪误差传递系数的影响。

一种动基座旋转加速度计重力梯度仪误差补偿装置及方法

技术领域

本发明涉及一种动基座旋转加速度计重力梯度仪误差补偿装置及方法，属于精密测量技术领域。

背景技术

动基座重力梯度勘探是一种低成本、高效率的重力梯度勘探方法；是目前世界上最先进的重力场勘探方式。重力梯度数据广泛应用于地质分析、重力场建模、高精度导航、资源勘探等。重力梯度仪具有极其重要的国防、民用价值。目前国内外在研的重力梯度仪主要有冷原子重力梯度仪、超导重力梯度仪、MEMS 重力梯度仪等。国外已经投入商业应用的重力梯度仪主要有旋转加速度计重力梯度仪及旋转超导加速度计重力梯度仪。我国的重力梯度仪样机正处于研制中。

在动基座重力梯度勘探时，由于重力梯度仪内部的加速度计存在安装误差、加速度计一阶、高阶标度系数不匹配、电路增益不匹配等，导致重力梯度仪的加速度，角速度，角加速度传递到重力梯度仪的输出，造成测量误差。同时重力梯度仪线运动、自梯度、角运动会引起重力梯度仪前端信号调理电路过电压饱和或损坏。本发明提供一种能够实时补偿重力梯度仪线运动误差、角运动误差、自梯度的装置及方法，目前没有关于重力梯度仪线运动误差、角运动误差实时补偿装置及技术的公开的报道。

发明内容

技术问题：本发明提供一种能够反馈补偿重力梯度仪的加运动、角运动、自梯度引起的输出测量误差的动基座旋转加速度计重力梯度仪误差补偿装置，既能抑制温度、电磁场等环境因素对误差传递系数的影响，同时还能避免重力梯度仪的加速度、角速度、角加速度引起的重力梯度仪前端信号调理电路过电压饱和及过电压损坏。本发明同时提供一种具有以上效果、解决了以上问题的动基座旋转加速度计重力梯度仪误差补偿方法。

技术方案：本发明的动基座旋转加速度计重力梯度仪误差补偿装置，包括：

用于产生正交幅度调制载波的参考信号产生模块；

用于实时产生自梯度补偿信号的自梯度补偿信号产生模块；

用于实时产生重力梯度仪角运动误差补偿信号及检测重力梯度仪离心梯度的角运动误差补偿信号产生模块；

用于实时微调角运动误差传递系数的角运动误差传递系数处理模块；

用于实时产生重力梯度仪线运动误差补偿信号的线运动误差补偿信号产生模块；

用于实时微调线运动误差传递系数的线运动误差传递系数处理模块；

用于对安装在旋转圆盘上的加速度计的输出信号求和、求差运算的重力梯度仪加速度计信号处理模块；

用于实时调节加速度计标度系数的加速度计标度系数调节模块；

用于对含有角运动误差，线运动误差，自梯度的重力梯度信号进行补偿的补偿运算模块；

用于从补偿后的重力梯度仪信号解调输出重力梯度信号的重力梯度信号恢复模块；

所述参考信号产生模块的输出连接到自梯度补偿信号产生模块、角运动误差补偿信号产生模块、线运动误差补偿信号产生模块的输入；所述自梯度补偿信号产生模块、角运动误差补偿信号产生模块、线运动误差补偿信号产生模块、重力梯度仪加速度计信号处理模块的输出连接到补偿运算模块的输入；所述补偿运算模块的输出连接到加速度计标度系数调节模块、角运动误差传递系数处理模块、线运动误差传递系数处理模块、重力梯度信号恢复模块的输入；所述线运动误差传递系数处理模块的输出连接到线运动误差补偿信号产生模块的输入；所述角运动误差传递系数处理模块的输出连接到角运动误差补偿信号产生模块的输入；所述加速度计标度系数调节模块的输出连接到重力梯度仪加速度计信号处理模块的输入。

进一步的，本发明装置中，所述参考信号产生模块包括重力梯度仪旋转圆盘轴编码器和信号发生器；所述重力梯度仪旋转圆盘轴编码器检测重力梯度仪圆盘旋转的相位角 ϕ_i ，所述信号发生器根据相位角 ϕ_i ，产生正交幅度调制载波波 $\sin \phi_i$ ， $\sin 2\phi_i$ ， $\cos \phi_i$ ， $\cos 2\phi_i$ ；

进一步的，本发明装置中，所述角运动误差传递系数处理模块包括角运动误差传递系数初值设置模块和角运动误差传递系数调节模块，所述角运动误差传递系数初值设置模块用于设置角运动误差传递系数初值： $k_{ggi}^0, c_{\omega xy}^0, c_{\omega xz}^0, c_{\omega yz}^0, c_{\omega ax}^0, c_{\omega ay}^0, D_{\omega az}^0, D_{\omega}^0$ ；所述角运动误差传递系数调节模块根据反馈的补偿后的重力梯度仪信号产生调节量，微调角运动误差传递系数；角运动误差传递系数处理模块具有两种工作模式，调节模式和非调节模式，当工作在调节模式时，实时调节角运动误差传递系数；当工作在非调节模式时，角运动误差传递系数保持不变。

进一步的，本发明装置中，所述的角运动误差补偿信号产生模块包括角运动误差传递系数输入模块、角运动检测模块、参考信号输入模块、角运动补偿信号产生模块、离心梯度检测模块；

所述角运动误差传递系数输入模块用于输入角运动误差传递系数；所述参考信号输入模块用于输入正交幅值调制载波；所述角运动检测模块包括角速率传感器和低通滤波器，用于检测重力梯度仪的角运动；所述角速率传感器安装在重力梯度仪测量坐标系的 x 轴， y 轴， z 轴，测量重力梯度仪测量坐标系的角速度 $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ 及角加速度 $\omega_{ax}, \omega_{ay}, \omega_{az}$ ；所述低通滤波器则滤除角速度、角加速度信号中的高频噪声；所述角运动补偿信号产生模块根据正交幅值调制载波、角运动误差传递系数、角加速度、角速度产生角运动误差补偿信号；所述离心梯度检测模块有两种工作模式，标定模式和非标定模式，在标定模式下，离心梯度检测单元输出检测的离心梯度，在非标定模式下，离心梯度检测单元无输出。

进一步的，本发明装置中，所述的角运动误差补偿信号产生模块具有三种工作模式，非补偿模式，正常模式，标定模式；非补偿模式下，产生的角运动误差补偿信号 $C_A(t)$ 为：

$$C_A(t) = 0;$$

在正常模式下，产生的角运动误差补偿信号 $C_A(t)$ 为：

$$\begin{aligned} C_A(t) = & \left[0.5(\omega_y^2(t) - \omega_x^2(t))k_{ggi}^t + \omega_x(t)\omega_y(t)c_{\omega xy}^t \right] \sin 2\phi_t + \left[\omega_x(t)\omega_y(t)k_{ggi}^t - 0.5(\omega_y^2(t) - \omega_x^2(t))c_{\omega xy}^t \right] \cos 2\phi_t \\ & + \left[c_{\omega yz}^t \omega_y(t)\omega_z(t) - c_{\omega xz}^t \omega_x(t)\omega_z(t) + c_{\omega ax}^t \omega_{ax}(t) - c_{\omega ay}^t \omega_{ay}(t) \right] \sin \phi_t \\ & + \left[c_{\omega yz}^t \omega_x(t)\omega_z(t) + c_{\omega xz}^t \omega_y(t)\omega_z(t) - c_{\omega ay}^t \omega_{ax}(t) - c_{\omega ax}^t \omega_{ay}(t) \right] \cos \phi_t \\ & + D_{\omega az}^t \omega_{az}(t) - 0.5D_{\omega}^t (\omega_x^2(t) + \omega_y^2(t) + 2\omega_z^2(t)) \end{aligned}$$

在标定模式下，产生的角运动误差补偿信号 $C_A(t)$ 为：

$$\begin{aligned} C_A(t) = & \left[c_{\omega yz}^t \omega_y(t)\omega_z(t) - c_{\omega xz}^t \omega_x(t)\omega_z(t) + c_{\omega ax}^t \omega_{ax}(t) - c_{\omega ay}^t \omega_{ay}(t) \right] \sin \phi_t \\ & + \left[c_{\omega yz}^t \omega_x(t)\omega_z(t) + c_{\omega xz}^t \omega_y(t)\omega_z(t) - c_{\omega ay}^t \omega_{ax}(t) - c_{\omega ax}^t \omega_{ay}(t) \right] \cos \phi_t \\ & + D_{\omega az}^t \omega_{az}(t) - 0.5D_{\omega}^t (\omega_x^2(t) + \omega_y^2(t) + 2\omega_z^2(t)) \end{aligned}$$

式中 $\sin 2\phi_t, \cos 2\phi_t, \sin \phi_t, \cos \phi_t$ 为 t 时刻输入角运动误差补偿信号产生模块的正交幅度调制载波； $k_{ggi}^t, c_{\omega xy}^t, c_{\omega xz}^t, c_{\omega yz}^t, c_{\omega ax}^t, c_{\omega ay}^t, D_{\omega az}^t, D_{\omega}^t$ 表示 t 时刻输入角运动误差补偿信号产生模块的角运动误差传递系数； $\omega_x(t), \omega_y(t), \omega_z(t), \omega_{ax}(t), \omega_{ay}(t), \omega_{az}(t)$ 表示 t 时刻输入角运动误差补偿信号产生模块的角运动信号。

进一步的，本发明装置中，所述线运动误差传递系数处理模块包括线运动误差传递系数初值设置模块和线运动误差传递系数调节模块，所述线运动误差传递系数初值设置模块用以设置线运动误差传递系数初值： $S_{k5dk2}^0, S_{k6}^0, D_{ax}^0, D_{ay}^0, D_{axaz}^0, D_{ayaz}^0, D_{k2k5}^0, D_{k7}^0, D_{\theta_y k1}^0, D_{k0}^0$ ；所述线运动

误差传递系数调节模块根据反馈的补偿后的重力梯度仪信号产生调节量和微调线运动误差传递系数；线运动误差传递系数处理模块具有两种工作模式，调节模式和非条节模式，当工作在调节模式时，实时调节线运动误差传递系数；当工作在非调节模式时，线运动误差传递系保持不变。

进一步的，本发明装置中，所述线运动误差补偿信号产生模块包括线运动检测模块、线运动误差传递系数输入模块、参考信号输入模块、线运动补偿信号产生模块，所述线运动检测模块包括加速度计和低通滤波器，用于检测重力梯度仪的加速度；所述加速度计安装在重力梯度仪测量坐标系的 x 轴, y 轴, z 轴, 测量重力梯度仪测量坐标系的加速度 a_x, a_y, a_z ；所述低通滤波器则滤除加速度信号中的高频噪声；所述线运动误差传递系数输入模块用于输入线运动误差传递系数；所述参考信号产生模块用于输入正交幅值调制载波；所述线运动补偿信号产生模块根据输入的正交幅值调制载波、加速度信号、线运动误差传递系数产生线运动误差补偿信号。

进一步的，本发明装置中，所述线运动误差补偿信号产生模块具有两种工作模式：非补偿模式，补偿模式；非补偿模式下，产生的线运动补偿信号 $C_L(t)$ 为：

$$C_L(t) = 0;$$

补偿模式下，产生的线运动补偿信号 $C_L(t)$ 为：

$$\begin{aligned} C_L(t) = & \left(a_x(t)a_y(t)S_{k5dk2}^t - 0.5(a_x(t)^2 - a_y(t)^2)S_{k6}^t \right) \sin 2\phi_t + \left(0.5(a_x(t)^2 - a_y(t)^2)S_{k5dk2}^t + a_x(t)a_y(t)S_{k6}^t \right) \cos 2\phi_t \\ & + \left(D_{ax}^t a_x(t) + D_{ay}^t a_y(t) + D_{axaz}^t a_x(t)a_z(t) - D_{ayaz}^t a_y(t)a_z(t) \right) \sin \phi_t \\ & + \left(D_{ay}^t a_x(t) - D_{ax}^t a_y(t) - D_{ayaz}^t a_x(t)a_z(t) - D_{axaz}^t a_y(t)a_z(t) \right) \cos \phi_t \\ & + 0.5D_{k2k5}^t (a_x(t)^2 + a_y(t)^2) + D_{k7}^t a_z(t)^2 + D_{\partial k1}^t a_z(t) + D_{k0}^t \end{aligned}$$

式中 $\sin 2\phi_t, \cos 2\phi_t, \sin \phi_t, \cos \phi_t$ 为 t 时刻输入线运动误差补偿信号产生模块的正交幅度调制载波； $S_{k5dk2}^t, S_{k6}^t, D_{ax}^t, D_{ay}^t, D_{axaz}^t, D_{ayaz}^t, D_{k2k5}^t, D_{k7}^t, D_{\partial k1}^t, D_{k0}^t$ 表示 t 时刻输入线运动误差补偿信号产生模块的线运动误差传递系数； $a_x(t), a_y(t), a_z(t)$ 表示 t 时刻输入线运动误差补偿信号产生模块的加速度信号。

进一步的，本发明装置中，所述补偿运算模块根据自梯度补偿信号产生模块输出的自梯度补偿信号、线运动误差补偿信号产生模块产生的线运动误差补偿信号、角运动误差补偿信号产生模块产生的角运动误差补偿信号，对重力梯度仪加速度计信号处理模块产生的含有自梯度误差、线运动误差、角运动误差的输出进行补偿。

本发明的动基座旋转加速度计重力梯度仪误差补偿方法，包括以下步骤：

1) 根据反馈的补偿后的重力梯度仪信号及线运动误差传递系数处理模块的工作模式，计算 t 时刻的线运动误差传递系数：

$$\text{调节模式: } \begin{bmatrix} S_{k5dk2}^t \\ S_{k6}^t \\ D_{ax}^t \\ D_{ay}^t \\ D_{axaz}^t \\ D_{ayaz}^t \\ D_{k_2k_5}^t \\ D_{k_7}^t \\ D_{\theta_{y,k_1}}^t \\ D_{k0}^t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{k5dk2}^{t-1} \\ S_{k6}^{t-1} \\ D_{ax}^{t-1} \\ D_{ay}^{t-1} \\ D_{axaz}^{t-1} \\ D_{ayaz}^{t-1} \\ D_{k_2k_5}^{t-1} \\ D_{k_7}^{t-1} \\ D_{\theta_{y,k_1}}^{t-1} \\ D_{k0}^{t-1} \end{bmatrix} + \mathbf{F}_1(g_c(t-1)), \text{ 非调节模式: } \begin{bmatrix} S_{k5dk2}^t \\ S_{k6}^t \\ D_{ax}^t \\ D_{ay}^t \\ D_{axaz}^t \\ D_{ayaz}^t \\ D_{k_2k_5}^t \\ D_{k_7}^t \\ D_{\theta_{y,k_1}}^t \\ D_{k0}^t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{k5dk2}^{t-1} \\ S_{k6}^{t-1} \\ D_{ax}^{t-1} \\ D_{ay}^{t-1} \\ D_{axaz}^{t-1} \\ D_{ayaz}^{t-1} \\ D_{k_2k_5}^{t-1} \\ D_{k_7}^{t-1} \\ D_{\theta_{y,k_1}}^{t-1} \\ D_{k0}^{t-1} \end{bmatrix}$$

式中 $S_{k5dk2}^t, S_{k6}^t, D_{ax}^t, D_{ay}^t, D_{axaz}^t, D_{ayaz}^t, D_{k_2k_5}^t, D_{k_7}^t, D_{\theta_{y,k_1}}^t, D_{k0}^t$ 表示 t 时刻的线运动误差传递系数， $S_{k5dk2}^{t-1}, S_{k6}^{t-1}, D_{ax}^{t-1}, D_{ay}^{t-1}, D_{axaz}^{t-1}, D_{ayaz}^{t-1}, D_{k_2k_5}^{t-1}, D_{k_7}^{t-1}, D_{\theta_{y,k_1}}^{t-1}, D_{k0}^{t-1}$ 表示 t-1 时刻的线运动误差传递系数； $g_c(t-1)$ 表示 t-1 时刻补偿后的重力梯度仪信号； $\mathbf{F}_1(g_c(t-1))$ 是 t 时刻线运动误差传递系数的微调量，它是 $g_c(t-1)$ 的函数；

根据反馈的补偿后的重力梯度仪信号及角运动误差传递系数处理模块的工作模式，计算 t 时刻的角运动误差传递系数：

$$\text{调节模式: } \begin{bmatrix} k_{ggi}^t \\ c_{\omega xy}^t \\ c_{\omega xz}^t \\ c_{\omega yz}^t \\ c_{\omega ax}^t \\ c_{\omega ay}^t \\ D_{\omega az}^t \\ D_{\omega}^t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{ggi}^{t-1} \\ c_{\omega xy}^{t-1} \\ c_{\omega xz}^{t-1} \\ c_{\omega yz}^{t-1} \\ c_{\omega ax}^{t-1} \\ c_{\omega ay}^{t-1} \\ D_{\omega az}^{t-1} \\ D_{\omega}^{t-1} \end{bmatrix} + \mathbf{F}_2(g_c(t-1)), \text{ 非调节模式: } \begin{bmatrix} k_{ggi}^t \\ c_{\omega xy}^t \\ c_{\omega xz}^t \\ c_{\omega yz}^t \\ c_{\omega ax}^t \\ c_{\omega ay}^t \\ D_{\omega az}^t \\ D_{\omega}^t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{ggi}^{t-1} \\ c_{\omega xy}^{t-1} \\ c_{\omega xz}^{t-1} \\ c_{\omega yz}^{t-1} \\ c_{\omega ax}^{t-1} \\ c_{\omega ay}^{t-1} \\ D_{\omega az}^{t-1} \\ D_{\omega}^{t-1} \end{bmatrix};$$

式中 $k_{ggi}^t, c_{\omega xy}^t, c_{\omega xz}^t, c_{\omega yz}^t, c_{\omega ax}^t, c_{\omega ay}^t, D_{\omega az}^t, D_{\omega}^t$ 表示 t 时刻的角运动误差传递系数， $k_{ggi}^{t-1}, c_{\omega xy}^{t-1}, c_{\omega xz}^{t-1}, c_{\omega yz}^{t-1}, c_{\omega ax}^{t-1}, c_{\omega ay}^{t-1}, D_{\omega az}^{t-1}, D_{\omega}^{t-1}$ 表示 t-1 时刻的角运动误差传递系数； $g_c(t-1)$ 表示 t-1 时刻补偿后的重力梯度仪信号； $\mathbf{F}_2(g_c(t-1))$ 表示 t 时刻角运动误差传递系数的微调量，它是 $g_c(t-1)$ 的函数；t=0 时刻的线运动误差传递系数 $S_{k5dk2}^0, S_{k6}^0, D_{ax}^0, D_{ay}^0, D_{axaz}^0, D_{ayaz}^0, D_{k_2k_5}^0, D_{k_7}^0, D_{\theta_{y,k_1}}^0, D_{k0}^0$ ，角运动误差传递系数 $k_{ggi}^0, c_{\omega xy}^0, c_{\omega xz}^0, c_{\omega yz}^0, c_{\omega ax}^0, c_{\omega ay}^0, D_{\omega az}^0, D_{\omega}^0$ 均通过标定得到；

根据反馈的补偿后的重力梯度仪信号，计算 t 时刻的加速度计标度系数：

$$\begin{bmatrix} k_1^t \\ k_2^t \\ k_3^t \\ k_4^t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1^{t-1} \\ k_2^{t-1} \\ k_3^{t-1} \\ k_4^{t-1} \end{bmatrix} + \mathbf{F}_3(\mathbf{g}_c(t-1))$$

式中 $k_1^t, k_2^t, k_3^t, k_4^t$ 表示安装在旋转圆盘上的四只加速度计在 t 时刻的标度系数， $k_1^{t-1}, k_2^{t-1}, k_3^{t-1}, k_4^{t-1}$ ，表示安装在旋转圆盘上的四只加速度计在 $t-1$ 时刻的标度系数； $\mathbf{g}_c(t-1)$ 表示 $t-1$ 时刻补偿后的重力梯度仪信号； $\mathbf{F}_3(\mathbf{g}_c(t-1))$ 表示 t 时刻加速度计标度系数的调节量，它是 $\mathbf{g}_c(t-1)$ 的函数；

2) 检测旋转加速度计重力梯度仪旋转圆盘在 t 时刻的相位角 ϕ_t ，计算 t 时刻的正交幅度调制载波 $\sin \phi_t$ ， $\sin 2\phi_t$ ， $\cos \phi_t$ ， $\cos 2\phi_t$ ；检测旋转旋转加速度计重力梯度仪在 t 时刻的加速度 $a_x(t), a_y(t), a_z(t)$ ；检测旋转加速度计重力梯度仪在 t 时刻的角速度及角加速度 $\omega_x(t), \omega_y(t), \omega_z(t), \omega_{ax}(t), \omega_{ay}(t), \omega_{az}(t)$ ；

根据下式计算 t 时刻的 3 类线运动误差补偿信号 $C_{L1}(t), C_{L2}(t), C_{L3}(t)$ ：

$$\begin{cases} C_{L1}(t) = (a_x(t)a_y(t)S_{k5dk2}^t - 0.5(a_x(t)^2 - a_y(t)^2)S_{k6}^t)\sin 2\phi_t + (0.5(a_x(t)^2 - a_y(t)^2)S_{k5dk2}^t + a_x(t)a_y(t)S_{k6}^t)\cos 2\phi_t \\ C_{L2}(t) = (D_{ax}^t a_x(t) + D_{ay}^t a_y(t) + D_{axaz}^t a_x(t)a_z(t) - D_{ayaz}^t a_y(t)a_z(t))\sin \phi_t \\ \quad + (D_{ay}^t a_x(t) - D_{ax}^t a_y(t) - D_{ayaz}^t a_x(t)a_z(t) - D_{axaz}^t a_y(t)a_z(t))\cos \phi_t \\ C_{L3}(t) = 0.5D_{k2k3}^t (a_x(t)^2 + a_y(t)^2) + D_{k7}^t a_z(t)^2 + D_{g_1k_1}^t a_z(t) + D_{k0}^t \end{cases}$$

根据下式计算 t 时刻的 3 类角运动误差补偿信号 $C_{A1}(t), C_{A2}(t), C_{A3}(t)$ ：

$$\begin{cases} C_{A1}(t) = [0.5(\omega_y^2(t) - \omega_x^2(t))k_{ggi}^t + \omega_x(t)\omega_y(t)c_{\omega xy}^t]\sin 2\phi_t + [\omega_x(t)\omega_y(t)k_{ggi}^t - 0.5(\omega_y^2(t) - \omega_x^2(t))c_{\omega xy}^t]\cos 2\phi_t \\ C_{A2}(t) = [c_{\omega yz}^t \omega_y(t)\omega_z(t) - c_{\omega xz}^t \omega_x(t)\omega_z(t) + c_{\omega ax}^t \omega_{ax}(t) - c_{\omega ay}^t \omega_{ay}(t)]\sin \phi_t \\ \quad + [c_{\omega yz}^t \omega_x(t)\omega_z(t) + c_{\omega xz}^t \omega_y(t)\omega_z(t) - c_{\omega ay}^t \omega_{ax}(t) - c_{\omega ax}^t \omega_{ay}(t)]\cos \phi_t \\ C_{A3}(t) = D_{\omega az}^t \omega_{az}(t) - 0.5D_{\omega}^t (\omega_x^2(t) + \omega_y^2(t) + 2\omega_z^2(t)) \end{cases}$$

3) 根据线运动误差补偿信号产生模块的工作模式，计算 t 时刻的总的线运动误差补偿信号 $C_L(t)$ ：

非补偿模式时， $C_L(t) = 0$ ；

补偿模式时, $C_L(t) = C_{L1}(t) + C_{L2}(t) + C_{L3}(t)$;

根据角运动误差补偿信号产生模块的工作模式, 计算 t 时刻总的角运动误差补偿信号 $C_A(t)$:

非补偿模式时, $C_A(t) = 0$;

正常模式时, $C_A(t) = C_{A1}(t) + C_{A2}(t) + C_{A3}(t)$;

标定模式时, $C_A(t) = C_{A2}(t) + C_{A3}(t)$;

根据自梯度补偿信号产生模块的工作模式, 计算 t 时刻的自梯度补偿信号 $C_{sg}(t)$:

补偿模式时, $C_{sg}(t) = f_{in}(\theta_x^t, \theta_y^t, \theta_z^t, \mathbf{P}) \sin 2\phi_t + f_{cs}(\theta_x^t, \theta_y^t, \theta_z^t, \mathbf{P}) \cos 2\phi_t$

在非补偿模式时, $C_{sg}(t) = 0$;

式中 $\theta_x^t, \theta_y^t, \theta_z^t$ 是 t 时刻重力梯度仪的姿态角, $\mathbf{P}$ 是自梯度模型的参数, $f_{in}(\theta_x^t, \theta_y^t, \theta_z^t, \mathbf{P})$ 是自梯度模型的 inline 通道的输出, 它是姿态角的函数, $f_{cs}(\theta_x^t, \theta_y^t, \theta_z^t, \mathbf{P})$ 是自梯度模型的 cross 通道的输出, 它是姿态角的函数;

4) 对 t 时刻含有线运动误差、角运动误差、自梯度的重力梯度仪信号 $g(t)$, 根据下式进行线运动误差补偿、角运动误差补偿、自梯度补偿;

$$g_c(t) = g(t) - C_L(t) - C_{sg}(t) - C_A(t)$$

式中 $g_c(t)$ 是 t 时刻补偿后的重力梯度仪信号, $g(t)$ 是 t 时刻含有线运动误差、角运动误差、自梯度的重力梯度仪信号, $C_L(t)$ 是 t 时刻的线运动误差补偿信号, $C_{sg}(t)$ 是自梯度补偿信号, $C_A(t)$ 是角运动误差补偿信号。

在动基座重力梯度勘探时, 由于重力梯度仪内部的加速度计存在安装误差、加速度计一阶、高阶标度系数不匹配、电路增益不匹配等, 导致重力梯度仪的加速度, 角速度, 角加速度传递到重力梯度仪的输出, 造成测量误差, 此外重力梯度仪的线运动误差传递系数、角运动误差传递系数容易受温度、电磁场等环境因素的影响。同时重力梯度仪的加速度, 角速度, 角加速度会引起重力梯度仪前端信号调理电路过电压饱和, 或过电压损坏, 本发明能够解决以上问题。

有益效果: 本发明与现有技术相比, 具有以下优点:

本发明是首次给出旋转加速度计重力梯度仪线运动误差、角运动误差、自梯度实时补偿装置及方法。本发明提供一种能够对重力梯度仪线运动误差、角运动误差、自梯度进行实时补偿的装置和方法，它根据反馈的补偿后的重力梯度仪信号实时微调角运动误差传递系数、线运动误差传递系数、加速度计标度系数，能够抵消重力梯度仪环境因素比如温度、磁场等对重力梯度仪线运动误差传递系数、角运动误差传递系数、标度系数的影响，能够补偿重力梯度仪线运动、角运动、自梯度引起的测量误差，提高重力梯度仪的测量精度。同时，对重力梯度仪线运动误差、角运动误差、自梯度信号进行了正交幅值调制，直接补偿重力梯度仪解调前的信号，因此还能够解决由于重力梯度仪加速度、角速度等引起的前端信号调理电路过电压饱和，过电压损坏问题。

附图说明

图 1 一种旋转加速度计重力梯度仪误差实时补偿装置原理图。

图 2 参考信号产生模块原理图。

图 3 线运动误差传递系数处理模块及角运动误差传递系数处理模块原理图。

图 4 角运动误差补偿信号产生模块及线运动误差补偿信号产生模块原理图。

图 5 角速度率传感器、加速度计安装示意图。

具体实施方式

下面结合实施例和说明书附图对本发明作进一步地说明。

如图 1 所示，本发明一种动基座旋转加速度计重力梯度仪误差补偿装置，包括：用于产生正交幅度调制载波的参考信号产生模块；用于实时产生自梯度补偿信号的自梯度补偿信号产生模块；用于实时产生重力梯度仪角运动误差补偿信号的角运动误差补偿信号产生模块，该模块还能检测重力梯度仪敏感的离心梯度；用于实时微调角运动误差传递系数的角运动误差传递系数处理模块；用于实时产生重力梯度仪线运动误差补偿信号的线运动误差补偿信号产生模块；用于实时微调线运动误差传递系数的线运动误差传递系数处理模块；用于对安装在旋转圆盘上的加速度计的输出信号求和、求差运算的重力梯度仪加速度计信号处理模块；用于实时调节加速度计标度系数的加速度计标度系数调节模块；用于对含有角运动误差，线运动误差，自梯度的重力梯度信号进行补偿的补偿运算模块；用于从补偿后的重力梯度仪信号解调输出重力梯度信号的重力梯度信号恢复模块；

所述参考信号产生模块的输出连接到自梯度补偿信号产生模块、角运动误差补偿信号产生模块、线运动误差补偿信号产生模块的输入；所述自梯度补偿信号产生模块、角运动误差补偿信号产生模块、线运动误差补偿信号产生模块、重力梯度仪加速度计信号处理模

块的输出连接到补偿运算模块的输入；所述补偿运算模块的输出连接到加速度计标度系数调节模块、角运动误差传递系数处理模块、线运动误差传递系数处理模块、重力梯度信号恢复模块的输入；所述线运动误差传递系数处理模块的输出连接到线运动误差补偿信号产生模块的输入；所述角运动误差传递系数处理模块的输出连接到角运动误差补偿信号产生模块的输入；所述加速度计标度系数调节模块的输出连接到重力梯度仪加速度计信号处理模块的输入。

如图 2 所示,所述参考信号产生模块包括重力梯度仪旋转圆盘轴编码器和信号发生器；所述重力梯度仪旋转圆盘轴编码器检测重力梯度仪圆盘旋转的相位角 ϕ_i ，所述信号发生器根据相位角 ϕ_i ，产生正交幅度调制载波波 $\sin \phi_i$ ， $\sin 2\phi_i$ ， $\cos \phi_i$ ， $\cos 2\phi_i$ ；

如图 3 (a) 所示,所述角运动误差传递系数处理模块,由角运动误差传递系数初值设置模块,角运动误差传递系数调节模块组成；所述角运动误差传递系数初值设置模块,用于设置角运动误差传递系数初值： $k_{ggi}^0, c_{\omega xy}^0, c_{\omega xz}^0, c_{\omega yz}^0, c_{\omega ax}^0, c_{\omega ay}^0, D_{\omega az}^0, D_{\omega}^0$ ；所述角运动误差传递系数调节模块,根据反馈的补偿后的重力梯度仪信号产生调节量,微调角运动误差传递系数；角运动误差传递系数处理模块具有两种工作模式,调节模式和非条节模式,当工作在调节模式时,实时调节角运动误差传递系数；当工作在非调节模式时,角运动误差传递系保持不变。

如图 4 (b) 所示,所述的角运动误差补偿信号产生模块由角运动误差传递系数输入模块,角运动检测模块,参考信号输入模块,角运动补偿信号产生模块,离心梯度检测模块组成；所述角运动误差传递系数输入模块用于输入角运动误差传递系数；所述参考信号输入模块用于输入正交幅值调制载波；所述角运动检测模块由角速率传感器及低通滤波器组成,用于检测重力梯度仪的角运动；如图 5 所示,所述角速率传感器安装在重力梯度仪测量坐标系的 x 轴, y 轴, z 轴,测量重力梯度仪测量坐标系的角速度 $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ 及角加速度 $\omega_{ax}, \omega_{ay}, \omega_{az}$ ；所述低通滤波器则滤除角速度、角加速度信号中的高频噪声；所述角运动误差产生模块根据正交幅值调制载波,角运动误差传递系数,角加速度,角速度,产生角运动误差补偿信号；所述离心梯度检测模块,有两种工作模式,标定模式和非标定模式,在标定模式下,离心梯度检测单元输出检测的离心梯度,在非标定模式下,离心梯度检测单元无输出；。

所述的角运动误差补偿信号产生模块具有三种工作模式,非补偿模式,正常模式,标

定模式；非补偿模式下，产生的角运动误差补偿信号 $C_A(t)$ 为：

$$C_A(t) = 0;$$

在正常模式下，产生的角运动误差补偿信号 $C_A(t)$ 为：

$$\begin{aligned} C_A(t) = & \left[0.5(\omega_y^2(t) - \omega_x^2(t))k_{ggi}^t + \omega_x(t)\omega_y(t)c_{\omega xy}^t \right] \sin 2\phi_t + \left[\omega_x(t)\omega_y(t)k_{ggi}^t - 0.5(\omega_y^2(t) - \omega_x^2(t))c_{\omega xy}^t \right] \cos 2\phi_t \\ & + \left[c_{\omega yz}^t \omega_y(t)\omega_z(t) - c_{\omega xz}^t \omega_x(t)\omega_z(t) + c_{\omega ax}^t \omega_{ax}(t) - c_{\omega ay}^t \omega_{ay}(t) \right] \sin \phi_t \\ & + \left[c_{\omega yz}^t \omega_x(t)\omega_z(t) + c_{\omega xz}^t \omega_y(t)\omega_z(t) - c_{\omega ay}^t \omega_{ax}(t) - c_{\omega ax}^t \omega_{ay}(t) \right] \cos \phi_t \\ & + D_{\omega az}^t \omega_{az}(t) - 0.5D_{\omega}^t (\omega_x^2(t) + \omega_y^2(t) + 2\omega_z^2(t)) \end{aligned} \quad \text{在}$$

标定模式下，产生的角运动误差补偿信号 $C_A(t)$ 为：

$$\begin{aligned} C_A(t) = & \left[c_{\omega yz}^t \omega_y(t)\omega_z(t) - c_{\omega xz}^t \omega_x(t)\omega_z(t) + c_{\omega ax}^t \omega_{ax}(t) - c_{\omega ay}^t \omega_{ay}(t) \right] \sin \phi_t \\ & + \left[c_{\omega yz}^t \omega_x(t)\omega_z(t) + c_{\omega xz}^t \omega_y(t)\omega_z(t) - c_{\omega ay}^t \omega_{ax}(t) - c_{\omega ax}^t \omega_{ay}(t) \right] \cos \phi_t \\ & + D_{\omega az}^t \omega_{az}(t) - 0.5D_{\omega}^t (\omega_x^2(t) + \omega_y^2(t) + 2\omega_z^2(t)) \end{aligned}$$

式中 $\sin 2\phi_t, \cos 2\phi_t, \sin \phi_t, \cos \phi_t$ 为 t 时刻输入角运动误差补偿信号产生模块的正交幅度调制

载波； $k_{ggi}^t, c_{\omega xy}^t, c_{\omega xz}^t, c_{\omega yz}^t, c_{\omega ax}^t, c_{\omega ay}^t, D_{\omega az}^t, D_{\omega}^t$ 表示 t 时刻输入角运动误差补偿信号产生模块的角运动误差传递系数； $\omega_x(t), \omega_y(t), \omega_z(t), \omega_{ax}(t), \omega_{ay}(t), \omega_{az}(t)$ 表示 t 时刻输入角运动误差补偿信号产生模块的角运动信号；

如图 3 (b) 所示，所述线运动误差传递系数处理模块，由线运动误差传递系数初值设置模块，线运动误差传递系数调节模块组成；所述线运动误差传递系数初值设置模块，设置线运动误差传递系数初值： $S_{k5dk2}^0, S_{k6}^0, D_{ax}^0, D_{ay}^0, D_{axaz}^0, D_{ayaz}^0, D_{k2k5}^0, D_{k7}^0, D_{\theta_y k1}^0, D_{k0}^0$ ；所述线运动误差传递系数调节模块，根据反馈的补偿后的重力梯度仪信号产生调节量，微调线运动误差传递系数；线运动误差传递系数处理模块具有两种工作模式，调节模式和非条节模式，当工作在调节模式时，实时调节线运动误差传递系数；当工作在非调节模式时，线运动误差传递系保持不变；

如图 4 (a) 所示，所述线运动误差补偿信号产生模块由线运动检测模块，线运动误差传递系数输入模块，参考信号输入模块，组成；所述线运动检测模块由加速度计，低通滤波器组成，用于检测重力梯度仪的加速度；如图 5 所示，所述加速度计安装在重力梯度仪测量坐标系的 x 轴， y 轴， z 轴，测量重力梯度仪测量坐标系的加速度 a_x, a_y, a_z ；所述低通滤波器则滤除加速度信号中的高频噪声；所述线运动误差传递系数输入模块，用于输入线运

动误差传递系数；所述参考信号产生模块用于输入正交幅值调制载波；所述线运动补偿信号产生模块根据输入的正交幅值调制载波，加速度信号，线运动误差传递系数产生线运动误差补偿信号。

所述线运动误差补偿信号产生模块具有两种工作模式：非补偿模式，补偿模式；非补偿模式下，产生的线运动补偿信号 $C_L(t)$ 为：

$$C_L(t) = 0;$$

补偿模式下，产生的线运动补偿信号 $C_L(t)$ 为：

$$\begin{aligned} C_L(t) = & \left(a_x(t)a_y(t)S_{k5dk2}^t - 0.5(a_x(t)^2 - a_y(t)^2)S_{k6}^t \right) \sin 2\phi_t + \left(0.5(a_x(t)^2 - a_y(t)^2)S_{k5dk2}^t + a_x(t)a_y(t)S_{k6}^t \right) \cos 2\phi_t \\ & + \left(D_{ax}^t a_x(t) + D_{ay}^t a_y(t) + D_{axaz}^t a_x(t)a_z(t) - D_{ayaz}^t a_y(t)a_z(t) \right) \sin \phi_t \\ & + \left(D_{ay}^t a_x(t) - D_{ax}^t a_y(t) - D_{ayaz}^t a_x(t)a_z(t) - D_{axaz}^t a_y(t)a_z(t) \right) \cos \phi_t \\ & + 0.5D_{k2k5}^t (a_x(t)^2 + a_y(t)^2) + D_{k7}^t a_z(t)^2 + D_{\partial_y k_1}^t a_z(t) + D_{k0}^t \end{aligned}$$

式中 $\sin 2\phi_t, \cos 2\phi_t, \sin \phi_t, \cos \phi_t$ 为 t 时刻输入线运动误差补偿信号产生模块的正交幅度调制载波；

$S_{k5dk2}^t, S_{k6}^t, D_{ax}^t, D_{ay}^t, D_{axaz}^t, D_{ayaz}^t, D_{k2k5}^t, D_{k7}^t, D_{\partial_y k_1}^t, D_{k0}^t$ 表示 t 时刻输入线运动误差补偿信号产生模块的线运动误差传递系数； $a_x(t), a_y(t), a_z(t)$ 表示 t 时刻输入线运动误差补偿信号产生模块的加速度信号。

所述补偿运算模块，根据自梯度补偿信号产生模块输出的自梯度补偿信号，线运动误差补偿信号产生模块产生的线运动误差补偿信号，角运动误差补偿信号产生模块产生的角运动误差补偿信号，对重力梯度仪加速度计信号处理模块产生的含有自梯度误差、线运动误差、角运动误差的输出进行补偿；

本发明的一种动基座旋转加速度计重力梯度仪误差补偿方法，包括以下步骤：

1) 根据反馈的补偿后的重力梯度仪信号及线运动误差传递系数处理模块的工作模式，计算 t 时刻的线运动误差传递系数：

$$\text{调节模式:} \begin{bmatrix} S_{k5dk2}^t \\ S_{k6}^t \\ D_{ax}^t \\ D_{ay}^t \\ D_{axaz}^t \\ D_{ayaz}^t \\ D_{k_2k_5}^t \\ D_{k_7}^t \\ D_{\partial_y k_1}^t \\ D_{k0}^t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{k5dk2}^{t-1} \\ S_{k6}^{t-1} \\ D_{ax}^{t-1} \\ D_{ay}^{t-1} \\ D_{axaz}^{t-1} \\ D_{ayaz}^{t-1} \\ D_{k_2k_5}^{t-1} \\ D_{k_7}^{t-1} \\ D_{\partial_y k_1}^{t-1} \\ D_{k0}^{t-1} \end{bmatrix} + \mathbf{F}_1(g_c(t-1)), \text{非调节模式:} \begin{bmatrix} S_{k5dk2}^t \\ S_{k6}^t \\ D_{ax}^t \\ D_{ay}^t \\ D_{axaz}^t \\ D_{ayaz}^t \\ D_{k_2k_5}^t \\ D_{k_7}^t \\ D_{\partial_y k_1}^t \\ D_{k0}^t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{k5dk2}^{t-1} \\ S_{k6}^{t-1} \\ D_{ax}^{t-1} \\ D_{ay}^{t-1} \\ D_{axaz}^{t-1} \\ D_{ayaz}^{t-1} \\ D_{k_2k_5}^{t-1} \\ D_{k_7}^{t-1} \\ D_{\partial_y k_1}^{t-1} \\ D_{k0}^{t-1} \end{bmatrix}$$

式中 $S_{k5dk2}^t, S_{k6}^t, D_{ax}^t, D_{ay}^t, D_{axaz}^t, D_{ayaz}^t, D_{k_2k_5}^t, D_{k_7}^t, D_{\partial_y k_1}^t, D_{k0}^t$ 表示 t 时刻的线运动误差传递系数,

$S_{k5dk2}^{t-1}, S_{k6}^{t-1}, D_{ax}^{t-1}, D_{ay}^{t-1}, D_{axaz}^{t-1}, D_{ayaz}^{t-1}, D_{k_2k_5}^{t-1}, D_{k_7}^{t-1}, D_{\partial_y k_1}^{t-1}, D_{k0}^{t-1}$, 表示 $t-1$ 时刻的线运动误差传递系数; $g_c(t-1)$ 表

示 $t-1$ 时刻补偿后的重力梯度仪信号; $\mathbf{F}_1(g_c(t-1))$ 是 t 时刻线运动误差传递系数的微调量,

它是 $g_c(t-1)$ 的函数;

根据反馈的补偿后的重力梯度仪信号及角运动误差传递系数处理模块的工作模式, 计算 t 时刻的角运动误差传递系数:

$$\text{调节模式:} \begin{bmatrix} k_{ggi}^t \\ c_{\omega xy}^t \\ c_{\omega xz}^t \\ c_{\omega yz}^t \\ c_{\omega ax}^t \\ c_{\omega ay}^t \\ D_{\omega az}^t \\ D_{\omega}^t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{ggi}^{t-1} \\ c_{\omega xy}^{t-1} \\ c_{\omega xz}^{t-1} \\ c_{\omega yz}^{t-1} \\ c_{\omega ax}^{t-1} \\ c_{\omega ay}^{t-1} \\ D_{\omega az}^{t-1} \\ D_{\omega}^{t-1} \end{bmatrix} + \mathbf{F}_2(g_c(t-1)), \text{非调节模式:} \begin{bmatrix} k_{ggi}^t \\ c_{\omega xy}^t \\ c_{\omega xz}^t \\ c_{\omega yz}^t \\ c_{\omega ax}^t \\ c_{\omega ay}^t \\ D_{\omega az}^t \\ D_{\omega}^t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{ggi}^{t-1} \\ c_{\omega xy}^{t-1} \\ c_{\omega xz}^{t-1} \\ c_{\omega yz}^{t-1} \\ c_{\omega ax}^{t-1} \\ c_{\omega ay}^{t-1} \\ D_{\omega az}^{t-1} \\ D_{\omega}^{t-1} \end{bmatrix};$$

式中 $k_{ggi}^t, c_{\omega xy}^t, c_{\omega xz}^t, c_{\omega yz}^t, c_{\omega ax}^t, c_{\omega ay}^t, D_{\omega az}^t, D_{\omega}^t$ 表示 t 时刻的角运动误差传递系数,

$k_{ggi}^{t-1}, c_{\omega xy}^{t-1}, c_{\omega xz}^{t-1}, c_{\omega yz}^{t-1}, c_{\omega ax}^{t-1}, c_{\omega ay}^{t-1}, D_{\omega az}^{t-1}, D_{\omega}^{t-1}$, 表示 $t-1$ 时刻的角运动误差传递系数; $g_c(t-1)$ 表示 $t-1$ 时刻

补偿后的重力梯度仪信号; $\mathbf{F}_2(g_c(t-1))$ 表示 t 时刻角运动误差传递系数的微调量, 它是 $g_c(t-1)$

的函数; $t=0$ 时刻的线运动误差传递系数 $S_{k5dk2}^0, S_{k6}^0, D_{ax}^0, D_{ay}^0, D_{axaz}^0, D_{ayaz}^0, D_{k_2k_5}^0, D_{k_7}^0, D_{\partial_y k_1}^0, D_{k0}^0$, 角运动

误差传递系数 $k_{ggi}^0, c_{\omega xy}^0, c_{\omega xz}^0, c_{\omega yz}^0, c_{\omega ax}^0, c_{\omega ay}^0, D_{\omega az}^0, D_{\omega}^0$, 通过标定得到;

根据反馈的补偿后的重力梯度仪信号, 计算 t 时刻的加速度计标度系数:

$$\begin{bmatrix} k_1^t \\ k_2^t \\ k_3^t \\ k_4^t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1^{t-1} \\ k_2^{t-1} \\ k_3^{t-1} \\ k_4^{t-1} \end{bmatrix} + \mathbf{F}_3(\mathbf{g}_c(t-1))$$

式中 $k_1^t, k_2^t, k_3^t, k_4^t$ 表示安装在旋转圆盘上的四只加速度计在 t 时刻的标度系数， $k_1^{t-1}, k_2^{t-1}, k_3^{t-1}, k_4^{t-1}$ ，表示安装在旋转圆盘上的四只加速度计在 $t-1$ 时刻的标度系数； $\mathbf{g}_c(t-1)$ 表示 $t-1$ 时刻补偿后的重力梯度仪信号； $\mathbf{F}_3(\mathbf{g}_c(t-1))$ 表示 t 时刻加速度计标度系数的调节量，它是 $\mathbf{g}_c(t-1)$ 的函数；

2) 检测旋转加速度计重力梯度仪旋转圆盘在 t 时刻的相位角 ϕ_t ，计算 t 时刻的正交幅度调制载波 $\sin \phi_t$ ， $\sin 2\phi_t$ ， $\cos \phi_t$ ， $\cos 2\phi_t$ ；检测旋转旋转加速度计重力梯度仪在 t 时刻的加速度 $a_x(t), a_y(t), a_z(t)$ ；检测旋转加速度计重力梯度仪在 t 时刻的角速度及角加速度 $\omega_x(t), \omega_y(t), \omega_z(t), \omega_{ax}(t), \omega_{ay}(t), \omega_{az}(t)$ ；

根据下式计算 t 时刻的 3 类线运动误差补偿信号 $C_{L1}(t), C_{L2}(t), C_{L3}(t)$ ：

$$\begin{cases} C_{L1}(t) = (a_x(t)a_y(t)S_{k5dk2}^t - 0.5(a_x(t)^2 - a_y(t)^2)S_{k6}^t)\sin 2\phi_t + (0.5(a_x(t)^2 - a_y(t)^2)S_{k5dk2}^t + a_x(t)a_y(t)S_{k6}^t)\cos 2\phi_t \\ C_{L2}(t) = (D_{ax}^t a_x(t) + D_{ay}^t a_y(t) + D_{axaz}^t a_x(t)a_z(t) - D_{ayaz}^t a_y(t)a_z(t))\sin \phi_t \\ \quad + (D_{ay}^t a_x(t) - D_{ax}^t a_y(t) - D_{ayaz}^t a_x(t)a_z(t) - D_{axaz}^t a_y(t)a_z(t))\cos \phi_t \\ C_{L3}(t) = 0.5D_{k2k3}^t (a_x(t)^2 + a_y(t)^2) + D_{k7}^t a_z(t)^2 + D_{\phi_y k_1}^t a_z(t) + D_{k0}^t \end{cases}$$

根据下式计算 t 时刻的 3 类角运动误差补偿信号 $C_{A1}(t), C_{A2}(t), C_{A3}(t)$ ：

$$\begin{cases} C_{A1}(t) = [0.5(\omega_y^2(t) - \omega_x^2(t))k_{ggi}^t + \omega_x(t)\omega_y(t)c_{\omega xy}^t]\sin 2\phi_t + [\omega_x(t)\omega_y(t)k_{ggi}^t - 0.5(\omega_y^2(t) - \omega_x^2(t))c_{\omega xy}^t]\cos 2\phi_t \\ C_{A2}(t) = [c_{\omega yz}^t \omega_y(t)\omega_z(t) - c_{\omega xz}^t \omega_x(t)\omega_z(t) + c_{\omega ax}^t \omega_{ax}(t) - c_{\omega ay}^t \omega_{ay}(t)]\sin \phi_t \\ \quad + [c_{\omega yz}^t \omega_x(t)\omega_z(t) + c_{\omega xz}^t \omega_y(t)\omega_z(t) - c_{\omega ay}^t \omega_{ax}(t) - c_{\omega ax}^t \omega_{ay}(t)]\cos \phi_t \\ C_{A3}(t) = D_{\omega az}^t \omega_{az}(t) - 0.5D_{\omega}^t (\omega_x^2(t) + \omega_y^2(t) + 2\omega_z^2(t)) \end{cases}$$

3) 根据线运动误差补偿信号产生模块的工作模式，计算 t 时刻的总的线运动误差补偿信号 $C_L(t)$ ：

非补偿模式时， $C_L(t) = 0$ ；

补偿模式时, $C_L(t) = C_{L1}(t) + C_{L2}(t) + C_{L3}(t)$;

根据角运动误差补偿信号产生模块的工作模式, 计算 t 时刻总的角运动误差补偿信号

$C_A(t)$:

非补偿模式时, $C_A(t) = 0$;

正常模式时, $C_A(t) = C_{A1}(t) + C_{A2}(t) + C_{A3}(t)$;

标定模式时, $C_A(t) = C_{A2}(t) + C_{A3}(t)$;

根据自梯度补偿信号产生模块的工作模式, 计算 t 时刻的自梯度补偿信号 $C_{sg}(t)$:

补偿模式时, $C_{sg}(t) = f_{in}(\theta_x^t, \theta_y^t, \theta_z^t, \mathbf{P}) \sin 2\phi_t + f_{cs}(\theta_x^t, \theta_y^t, \theta_z^t, \mathbf{P}) \cos 2\phi_t$

在非补偿模式时, $C_{sg}(t) = 0$;

式中 $\theta_x^t, \theta_y^t, \theta_z^t$ 是 t 时刻重力梯度仪的姿态角, $\mathbf{P}$ 是自梯度模型的参数, $f_{in}(\theta_x^t, \theta_y^t, \theta_z^t, \mathbf{P})$ 是自梯度模型的 inline 通道的输出, 它是姿态角的函数, $f_{cs}(\theta_x^t, \theta_y^t, \theta_z^t, \mathbf{P})$ 是自梯度模型的 cross 通道的输出, 它是姿态角的函数;

4) 对 t 时刻含有线运动误差、角运动误差、自梯度的重力梯度仪信号 $g(t)$, 根据下式进行线运动误差补偿、角运动误差补偿、自梯度补偿;

$$g_c(t) = g(t) - C_L(t) - C_{sg}(t) - C_A(t)$$

式中 $g_c(t)$ 是 t 时刻补偿后的重力梯度仪信号, $g(t)$ 是 t 时刻含有线运动误差、角运动误差、自梯度的重力梯度仪信号, $C_L(t)$ 是 t 时刻的线运动误差补偿信号, $C_{sg}(t)$ 是自梯度补偿信号, $C_A(t)$ 是角运动误差补偿信号;

1.一种动基座旋转加速度计重力梯度仪误差补偿装置，其特征在于，该装置包括：

用于产生正交幅度调制载波的参考信号产生模块；

用于实时产生自梯度补偿信号的自梯度补偿信号产生模块；

用于实时产生重力梯度仪角运动误差补偿信号及检测重力梯度仪离心梯度的角运动误差补偿信号产生模块；

用于实时微调角运动误差传递系数的角运动误差传递系数处理模块；

用于实时产生重力梯度仪线运动误差补偿信号的线运动误差补偿信号产生模块；

用于实时微调线运动误差传递系数的线运动误差传递系数处理模块；

用于对安装在旋转圆盘上的加速度计的输出信号求和、求差运算的重力梯度仪加速度计信号处理模块；

用于实时调节加速度计标度系数的加速度计标度系数调节模块；

用于对含有角运动误差，线运动误差，自梯度的重力梯度信号进行补偿的补偿运算模块；

用于从补偿后的重力梯度仪信号解调输出重力梯度信号的重力梯度信号恢复模块；

所述参考信号产生模块的输出连接到自梯度补偿信号产生模块、角运动误差补偿信号产生模块、线运动误差补偿信号产生模块的输入；所述自梯度补偿信号产生模块、角运动误差补偿信号产生模块、线运动误差补偿信号产生模块、重力梯度仪加速度计信号处理模块的输出连接到补偿运算模块的输入；所述补偿运算模块的输出连接到加速度计标度系数调节模块、角运动误差传递系数处理模块、线运动误差传递系数处理模块、重力梯度信号恢复模块的输入；所述线运动误差传递系数处理模块的输出连接到线运动误差补偿信号产生模块的输入；所述角运动误差传递系数处理模块的输出连接到角运动误差补偿信号产生模块的输入；所述加速度计标度系数调节模块的输出连接到重力梯度仪加速度计信号处理模块的输入。

2. 如权利要求 1 所述的一种动基座旋转加速度计重力梯度仪误差补偿装置，其特征在于：所述参考信号产生模块包括重力梯度仪旋转圆盘轴编码器和信号发生器；所述重力梯度仪旋转圆盘轴编码器检测重力梯度仪圆盘旋转的相位角 ϕ_t ，所述信号发生器根据相位角 ϕ_t ，产生正交幅度调制载波波 $\sin \phi_t$ ， $\sin 2\phi_t$ ， $\cos \phi_t$ ， $\cos 2\phi_t$ 。

3.如权利要求 1 所述的一种动基座旋转加速度计重力梯度仪误差补偿装置，其特征在于：所述角运动误差传递系数处理模块包括角运动误差传递系数初值设置模块和角运动误

差传递系数调节模块, 所述角运动误差传递系数初值设置模块用于设置角运动误差传递系数初值: $k_{ggi}^0, c_{\omega xy}^0, c_{\omega xz}^0, c_{\omega yz}^0, c_{\omega ax}^0, c_{\omega ay}^0, D_{\omega az}^0, D_{\omega}^0$; 所述角运动误差传递系数调节模块根据反馈的补偿后的重力梯度仪信号产生调节量, 微调角运动误差传递系数; 角运动误差传递系数处理模块具有两种工作模式, 调节模式和非条节模式, 当工作在调节模式时, 实时调节角运动误差传递系数; 当工作在非调节模式时, 角运动误差传递系保持不变。

4.如权利要求 1、2 或 3 所述的一种动基座旋转加速度计重力梯度仪误差补偿装置, 其特征在于: 所述的角运动误差补偿信号产生模块包括角运动误差传递系数输入模块、角运动检测模块、参考信号输入模块、角运动补偿信号产生模块、离心梯度检测模块;

所述角运动误差传递系数输入模块用于输入角运动误差传递系数; 所述参考信号输入模块用于输入正交幅值调制载波; 所述角运动检测模块包括角速率传感器和低通滤波器, 用于检测重力梯度仪的角运动; 所述角速率传感器安装在重力梯度仪测量坐标系的 x 轴, y 轴, z 轴, 测量重力梯度仪测量坐标系的角速度 $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ 及角加速度 $\omega_{ax}, \omega_{ay}, \omega_{az}$; 所述低通滤波器则滤除角速度、角加速度信号中的高频噪声; 所述角运动补偿信号产生模块根据正交幅值调制载波、角运动误差传递系数、角加速度、角速度产生角运动误差补偿信号; 所述离心梯度检测模块有两种工作模式, 标定模式和非标定模式, 在标定模式下, 离心梯度检测单元输出检测的离心梯度, 在非标定模式下, 离心梯度检测单元无输出。

5.如权利要求 1、2 或 3 所述的一种动基座旋转加速度计重力梯度仪误差补偿装置, 其特征在于: 所述的角运动误差补偿信号产生模块具有三种工作模式, 非补偿模式, 正常模式, 标定模式; 非补偿模式下, 产生的角运动误差补偿信号 $C_A(t)$ 为:

$$C_A(t) = 0;$$

在正常模式下, 产生的角运动误差补偿信号 $C_A(t)$ 为:

$$\begin{aligned} C_A(t) = & \left[0.5(\omega_y^2(t) - \omega_x^2(t))k_{ggi}^t + \omega_x(t)\omega_y(t)c_{\omega xy}^t \right] \sin 2\phi_t + \left[\omega_x(t)\omega_y(t)k_{ggi}^t - 0.5(\omega_y^2(t) - \omega_x^2(t))c_{\omega xy}^t \right] \cos 2\phi_t \\ & + \left[c_{\omega yz}^t \omega_y(t)\omega_z(t) - c_{\omega xz}^t \omega_x(t)\omega_z(t) + c_{\omega ax}^t \omega_{ax}(t) - c_{\omega ay}^t \omega_{ay}(t) \right] \sin \phi_t \\ & + \left[c_{\omega yz}^t \omega_x(t)\omega_z(t) + c_{\omega xz}^t \omega_y(t)\omega_z(t) - c_{\omega ay}^t \omega_{ax}(t) - c_{\omega ax}^t \omega_{ay}(t) \right] \cos \phi_t \\ & + D_{\omega az}^t \omega_{az}(t) - 0.5D_{\omega}^t (\omega_x^2(t) + \omega_y^2(t) + 2\omega_z^2(t)) \end{aligned}$$

在标定模式下, 产生的角运动误差补偿信号 $C_A(t)$ 为:

$$C_A(t) = \left[c_{\omega_{yz}}^t \omega_y(t) \omega_z(t) - c_{\omega_{xz}}^t \omega_x(t) \omega_z(t) + c_{\omega_{ax}}^t \omega_{ax}(t) - c_{\omega_{ay}}^t \omega_{ay}(t) \right] \sin \phi_t \\ + \left[c_{\omega_{yz}}^t \omega_x(t) \omega_z(t) + c_{\omega_{xz}}^t \omega_y(t) \omega_z(t) - c_{\omega_{ay}}^t \omega_{ax}(t) - c_{\omega_{ax}}^t \omega_{ay}(t) \right] \cos \phi_t \\ + D_{\omega_{az}}^t \omega_{az}(t) - 0.5 D_{\omega}^t \left(\omega_x^2(t) + \omega_y^2(t) + 2\omega_z^2(t) \right)$$

式中 $\sin 2\phi_t, \cos 2\phi_t, \sin \phi_t, \cos \phi_t$ 为 t 时刻输入角运动误差补偿信号产生模块的正交幅度调制载波； $k_{ggi}^t, c_{\omega_{xy}}^t, c_{\omega_{xz}}^t, c_{\omega_{yz}}^t, c_{\omega_{ax}}^t, c_{\omega_{ay}}^t, D_{\omega_{az}}^t, D_{\omega}^t$ 表示 t 时刻输入角运动误差补偿信号产生模块的角运动误差传递系数； $\omega_x(t), \omega_y(t), \omega_z(t), \omega_{ax}(t), \omega_{ay}(t), \omega_{az}(t)$ 表示 t 时刻输入角运动误差补偿信号产生模块的角运动信号。

6.如权利要求 1、2 或 3 所述的一种动基座旋转加速度计重力梯度仪误差补偿装置，其特征在于：所述线运动误差传递系数处理模块包括线运动误差传递系数初值设置模块和线运动误差传递系数调节模块，所述线运动误差传递系数初值设置模块用以设置线运动误差传递系数初值： $S_{k5dk2}^0, S_{k6}^0, D_{ax}^0, D_{ay}^0, D_{axaz}^0, D_{ayaz}^0, D_{k2k5}^0, D_{k7}^0, D_{\theta_{jk1}}^0, D_{k0}^0$ ；所述线运动误差传递系数调节模块根据反馈的补偿后的重力梯度仪信号产生调节量和微调线运动误差传递系数；线运动误差传递系数处理模块具有两种工作模式，调节模式和非条节模式，当工作在调节模式时，实时调节线运动误差传递系数；当工作在非调节模式时，线运动误差传递系保持不变。

7.如权利要求 1、2 或 3 所述的一种动基座旋转加速度计重力梯度仪误差补偿装置，其特征在于：所述线运动误差补偿信号产生模块包括线运动检测模块、线运动误差传递系数输入模块、参考信号输入模块、线运动补偿信号产生模块，所述线运动检测模块包括加速度计和低通滤波器，用于检测重力梯度仪的加速度；所述加速度计安装在重力梯度仪测量坐标系的 x 轴， y 轴， z 轴，测量重力梯度仪测量坐标系的加速度 a_x, a_y, a_z ；所述低通滤波器则滤除加速度信号中的高频噪声；所述线运动误差传递系数输入模块用于输入线运动误差传递系数；所述参考信号产生模块用于输入正交幅值调制载波；所述线运动补偿信号产生模块根据输入的正交幅值调制载波、加速度信号、线运动误差传递系数产生线运动误差补偿信号。

8.如权利要求 1、2 或 3 所述的一种动基座旋转加速度计重力梯度仪误差补偿装置，其特征在于：所述线运动误差补偿信号产生模块具有两种工作模式：非补偿模式，补偿模式；非补偿模式下，产生的线运动补偿信号 $C_L(t)$ 为：

$$C_L(t) = 0;$$

补偿模式下，产生的线运动补偿信号 $C_L(t)$ 为：

$$\begin{aligned}
C_L(t) = & \left(a_x(t)a_y(t)S_{k5dk2}^t - 0.5(a_x(t)^2 - a_y(t)^2)S_{k6}^t \right) \sin 2\phi_t + \left(0.5(a_x(t)^2 - a_y(t)^2)S_{k5dk2}^t + a_x(t)a_y(t)S_{k6}^t \right) \cos 2\phi_t \\
& + \left(D_{ax}^t a_x(t) + D_{ay}^t a_y(t) + D_{axaz}^t a_x(t)a_z(t) - D_{ayaz}^t a_y(t)a_z(t) \right) \sin \phi_t \\
& + \left(D_{ay}^t a_x(t) - D_{ax}^t a_y(t) - D_{ayaz}^t a_x(t)a_z(t) - D_{axaz}^t a_y(t)a_z(t) \right) \cos \phi_t \\
& + 0.5D_{k2k5}^t (a_x(t)^2 + a_y(t)^2) + D_{k7}^t a_z(t)^2 + D_{\partial_y k_1}^t a_z(t) + D_{k0}^t
\end{aligned}$$

式中 $\sin 2\phi_t, \cos 2\phi_t, \sin \phi_t, \cos \phi_t$ 为 t 时刻输入线运动误差补偿信号产生模块的正交幅度调制载波； $S_{k5dk2}^t, S_{k6}^t, D_{ax}^t, D_{ay}^t, D_{axaz}^t, D_{ayaz}^t, D_{k2k5}^t, D_{k7}^t, D_{\partial_y k_1}^t, D_{k0}^t$ 表示 t 时刻输入线运动误差补偿信号产生模块的线运动误差传递系数； $a_x(t), a_y(t), a_z(t)$ 表示 t 时刻输入线运动误差补偿信号产生模块的加速度信号。

9. 如权利要求 1、2 或 3 所述的一种动基座旋转加速度计重力梯度仪误差补偿装置，其特征在于：所述补偿运算模块根据自梯度补偿信号产生模块输出的自梯度补偿信号、线运动误差补偿信号产生模块产生的线运动误差补偿信号、角运动误差补偿信号产生模块产生的角运动误差补偿信号，对重力梯度仪加速度计信号处理模块产生的含有自梯度误差、线运动误差、角运动误差的输出进行补偿。

10. 一种动基座旋转加速度计重力梯度仪误差补偿方法，其特征在于，该方法包括以下步骤：

1) 根据反馈的补偿后的重力梯度仪信号及线运动误差传递系数处理模块的工作模式，计算 t 时刻的线运动误差传递系数：

$$\begin{aligned}
& \text{调节模式:} \begin{bmatrix} S_{k5dk2}^t \\ S_{k6}^t \\ D_{ax}^t \\ D_{ay}^t \\ D_{axaz}^t \\ D_{ayaz}^t \\ D_{k2k5}^t \\ D_{k7}^t \\ D_{\partial_y k_1}^t \\ D_{k0}^t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{k5dk2}^{t-1} \\ S_{k6}^{t-1} \\ D_{ax}^{t-1} \\ D_{ay}^{t-1} \\ D_{axaz}^{t-1} \\ D_{ayaz}^{t-1} \\ D_{k2k5}^{t-1} \\ D_{k7}^{t-1} \\ D_{\partial_y k_1}^{t-1} \\ D_{k0}^{t-1} \end{bmatrix} + \mathbf{F}_1(g_c(t-1)), \text{ 非调节模式:} \begin{bmatrix} S_{k5dk2}^t \\ S_{k6}^t \\ D_{ax}^t \\ D_{ay}^t \\ D_{axaz}^t \\ D_{ayaz}^t \\ D_{k2k5}^t \\ D_{k7}^t \\ D_{\partial_y k_1}^t \\ D_{k0}^t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{k5dk2}^{t-1} \\ S_{k6}^{t-1} \\ D_{ax}^{t-1} \\ D_{ay}^{t-1} \\ D_{axaz}^{t-1} \\ D_{ayaz}^{t-1} \\ D_{k2k5}^{t-1} \\ D_{k7}^{t-1} \\ D_{\partial_y k_1}^{t-1} \\ D_{k0}^{t-1} \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

式中 $S_{k5dk2}^t, S_{k6}^t, D_{ax}^t, D_{ay}^t, D_{axaz}^t, D_{ayaz}^t, D_{k2k5}^t, D_{k7}^t, D_{\partial_y k_1}^t, D_{k0}^t$ 表示 t 时刻的线运动误差传递系数，

$S_{k5dk2}^{t-1}, S_{k6}^{t-1}, D_{ax}^{t-1}, D_{ay}^{t-1}, D_{axaz}^{t-1}, D_{ayaz}^{t-1}, D_{k2k5}^{t-1}, D_{k7}^{t-1}, D_{\partial_y k_1}^{t-1}, D_{k0}^{t-1}$ ，表示 $t-1$ 时刻的线运动误差传递系数； $g_c(t-1)$ 表

示 $t-1$ 时刻补偿后的重力梯度仪信号； $\mathbf{F}_1(g_c(t-1))$ 是 t 时刻线运动误差传递系数的微调量，

它是 $g_c(t-1)$ 的函数；

根据反馈的补偿后的重力梯度仪信号及角运动误差传递系数处理模块的工作模式，计算 t 时刻的角运动误差传递系数：

$$\text{调节模式: } \begin{bmatrix} k_{ggi}^t \\ c_{\omega xy}^t \\ c_{\omega xz}^t \\ c_{\omega yz}^t \\ c_{\omega ax}^t \\ c_{\omega ay}^t \\ D_{\omega az}^t \\ D_{\omega}^t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{ggi}^{t-1} \\ c_{\omega xy}^{t-1} \\ c_{\omega xz}^{t-1} \\ c_{\omega yz}^{t-1} \\ c_{\omega ax}^{t-1} \\ c_{\omega ay}^{t-1} \\ D_{\omega az}^{t-1} \\ D_{\omega}^{t-1} \end{bmatrix} + \mathbf{F}_2(g_c(t-1)), \text{ 非调节模式: } \begin{bmatrix} k_{ggi}^t \\ c_{\omega xy}^t \\ c_{\omega xz}^t \\ c_{\omega yz}^t \\ c_{\omega ax}^t \\ c_{\omega ay}^t \\ D_{\omega az}^t \\ D_{\omega}^t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{ggi}^{t-1} \\ c_{\omega xy}^{t-1} \\ c_{\omega xz}^{t-1} \\ c_{\omega yz}^{t-1} \\ c_{\omega ax}^{t-1} \\ c_{\omega ay}^{t-1} \\ D_{\omega az}^{t-1} \\ D_{\omega}^{t-1} \end{bmatrix};$$

式中 $k_{ggi}^t, c_{\omega xy}^t, c_{\omega xz}^t, c_{\omega yz}^t, c_{\omega ax}^t, c_{\omega ay}^t, D_{\omega az}^t, D_{\omega}^t$ 表示 t 时刻的角运动误差传递系数， $k_{ggi}^{t-1}, c_{\omega xy}^{t-1}, c_{\omega xz}^{t-1}, c_{\omega yz}^{t-1}, c_{\omega ax}^{t-1}, c_{\omega ay}^{t-1}, D_{\omega az}^{t-1}, D_{\omega}^{t-1}$ ，表示 $t-1$ 时刻的角运动误差传递系数； $g_c(t-1)$ 表示 $t-1$ 时刻补偿后的重力梯度仪信号； $\mathbf{F}_2(g_c(t-1))$ 表示 t 时刻角运动误差传递系数的微调量，它是 $g_c(t-1)$ 的函数； $t=0$ 时刻的线运动误差传递系数 $S_{k5dk2}^0, S_{k6}^0, D_{ax}^0, D_{ay}^0, D_{axaz}^0, D_{ayaz}^0, D_{k2k5}^0, D_{k7}^0, D_{\theta,k1}^0, D_{k0}^0$ ，角运动误差传递系数 $k_{ggi}^0, c_{\omega xy}^0, c_{\omega xz}^0, c_{\omega yz}^0, c_{\omega ax}^0, c_{\omega ay}^0, D_{\omega az}^0, D_{\omega}^0$ 均通过标定得到；

根据反馈的补偿后的重力梯度仪信号，计算 t 时刻的加速度计标度系数：

$$\begin{bmatrix} k_1^t \\ k_2^t \\ k_3^t \\ k_4^t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1^{t-1} \\ k_2^{t-1} \\ k_3^{t-1} \\ k_4^{t-1} \end{bmatrix} + \mathbf{F}_3(g_c(t-1))$$

式中 $k_1^t, k_2^t, k_3^t, k_4^t$ 表示安装在旋转圆盘上的四只加速度计在 t 时刻的标度系数， $k_1^{t-1}, k_2^{t-1}, k_3^{t-1}, k_4^{t-1}$ ，表示安装在旋转圆盘上的四只加速度计在 $t-1$ 时刻的标度系数； $g_c(t-1)$ 表示 $t-1$ 时刻补偿后的重力梯度仪信号； $\mathbf{F}_3(g_c(t-1))$ 表示 t 时刻加速度计标度系数的调节量，它是 $g_c(t-1)$ 的函数；

2) 检测旋转加速度计重力梯度仪旋转圆盘在 t 时刻的相位角 ϕ_t ，计算 t 时刻的正交幅度调制载波 $\sin \phi_t, \sin 2\phi_t, \cos \phi_t, \cos 2\phi_t$ ；检测旋转旋转加速度计重力梯度仪在 t 时刻的加速度 $a_x(t), a_y(t), a_z(t)$ ；检测旋转加速度计重力梯度仪在 t 时刻的角速度及角加速度

$\omega_x(t), \omega_y(t), \omega_z(t), \omega_{ax}(t), \omega_{ay}(t), \omega_{az}(t)$;

根据下式计算 t 时刻的 3 类线运动误差补偿信号 $C_{L1}(t), C_{L2}(t), C_{L3}(t)$:

$$\begin{cases} C_{L1}(t) = (a_x(t)a_y(t)S_{k5dk2}^t - 0.5(a_x(t)^2 - a_y(t)^2)S_{k6}^t)\sin 2\phi_t + (0.5(a_x(t)^2 - a_y(t)^2)S_{k5dk2}^t + a_x(t)a_y(t)S_{k6}^t)\cos 2\phi_t \\ C_{L2}(t) = (D_{ax}^t a_x(t) + D_{ay}^t a_y(t) + D_{axaz}^t a_x(t)a_z(t) - D_{ayaz}^t a_y(t)a_z(t))\sin \phi_t \\ \quad + (D_{ay}^t a_x(t) - D_{ax}^t a_y(t) - D_{ayaz}^t a_x(t)a_z(t) - D_{axaz}^t a_y(t)a_z(t))\cos \phi_t \\ C_{L3}(t) = 0.5D_{k2k5}^t (a_x(t)^2 + a_y(t)^2) + D_{k7}^t a_z(t)^2 + D_{\partial_y k_1}^t a_z(t) + D_{k0}^t \end{cases}$$

根据下式计算 t 时刻的 3 类角运动误差补偿信号 $C_{A1}(t), C_{A2}(t), C_{A3}(t)$:

$$\begin{cases} C_{A1}(t) = [0.5(\omega_y^2(t) - \omega_x^2(t))k_{ggi}^t + \omega_x(t)\omega_y(t)c_{\omega xy}^t]\sin 2\phi_t + [\omega_x(t)\omega_y(t)k_{ggi}^t - 0.5(\omega_y^2(t) - \omega_x^2(t))c_{\omega xy}^t]\cos 2\phi_t \\ C_{A2}(t) = [c_{\omega yz}^t \omega_y(t)\omega_z(t) - c_{\omega xz}^t \omega_x(t)\omega_z(t) + c_{\omega ax}^t \omega_{ax}(t) - c_{\omega ay}^t \omega_{ay}(t)]\sin \phi_t \\ \quad + [c_{\omega yz}^t \omega_x(t)\omega_z(t) + c_{\omega xz}^t \omega_y(t)\omega_z(t) - c_{\omega ay}^t \omega_{ax}(t) - c_{\omega ax}^t \omega_{ay}(t)]\cos \phi_t \\ C_{A3}(t) = D_{\omega az}^t \omega_{az}(t) - 0.5D_{\omega}^t (\omega_x^2(t) + \omega_y^2(t) + 2\omega_z^2(t)) \end{cases}$$

3) 根据线运动误差补偿信号产生模块的工作模式, 计算 t 时刻的总的线运动误差补偿信号 $C_L(t)$:

非补偿模式时, $C_L(t) = 0$;

补偿模式时, $C_L(t) = C_{L1}(t) + C_{L2}(t) + C_{L3}(t)$;

根据角运动误差补偿信号产生模块的工作模式, 计算 t 时刻总的角运动误差补偿信号 $C_A(t)$:

非补偿模式时, $C_A(t) = 0$;

正常模式时, $C_A(t) = C_{A1}(t) + C_{A2}(t) + C_{A3}(t)$;

标定模式时, $C_A(t) = C_{A2}(t) + C_{A3}(t)$;

根据自梯度补偿信号产生模块的工作模式, 计算 t 时刻的自梯度补偿信号 $C_{sg}(t)$:

补偿模式时, $C_{sg}(t) = f_{in}(\theta_x^t, \theta_y^t, \theta_z^t, \mathbf{P})\sin 2\phi_t + f_{cs}(\theta_x^t, \theta_y^t, \theta_z^t, \mathbf{P})\cos 2\phi_t$

在非补偿模式时, $C_{sg}(t) = 0$;

式中 $\theta_x^t, \theta_y^t, \theta_z^t$ 是 t 时刻重力梯度仪的姿态角, $\mathbf{P}$ 是自梯度模型的参数, $f_{in}(\theta_x^t, \theta_y^t, \theta_z^t, \mathbf{P})$ 是自

梯度模型的 inline 通道的输出,它是姿态角的函数, $f_{cs}(\theta_x^t, \theta_y^t, \theta_z^t, \mathbf{P})$ 是自梯度模型的 cross 通道的输出,它是姿态角的函数;

4) 对 t 时刻含有线运动误差、角运动误差、自梯度的重力梯度仪信号 $g(t)$, 根据下式进行线运动误差补偿、角运动误差补偿、自梯度补偿;

$$g_c(t) = g(t) - C_L(t) - C_{sg}(t) - C_A(t)$$

式中 $g_c(t)$ 是 t 时刻补偿后的重力梯度仪信号, $g(t)$ 是 t 时刻含有线运动误差、角运动误差、自梯度的重力梯度仪信号, $C_L(t)$ 是 t 时刻的线运动误差补偿信号, $C_{sg}(t)$ 是自梯度补偿信号, $C_A(t)$ 是角运动误差补偿信号;

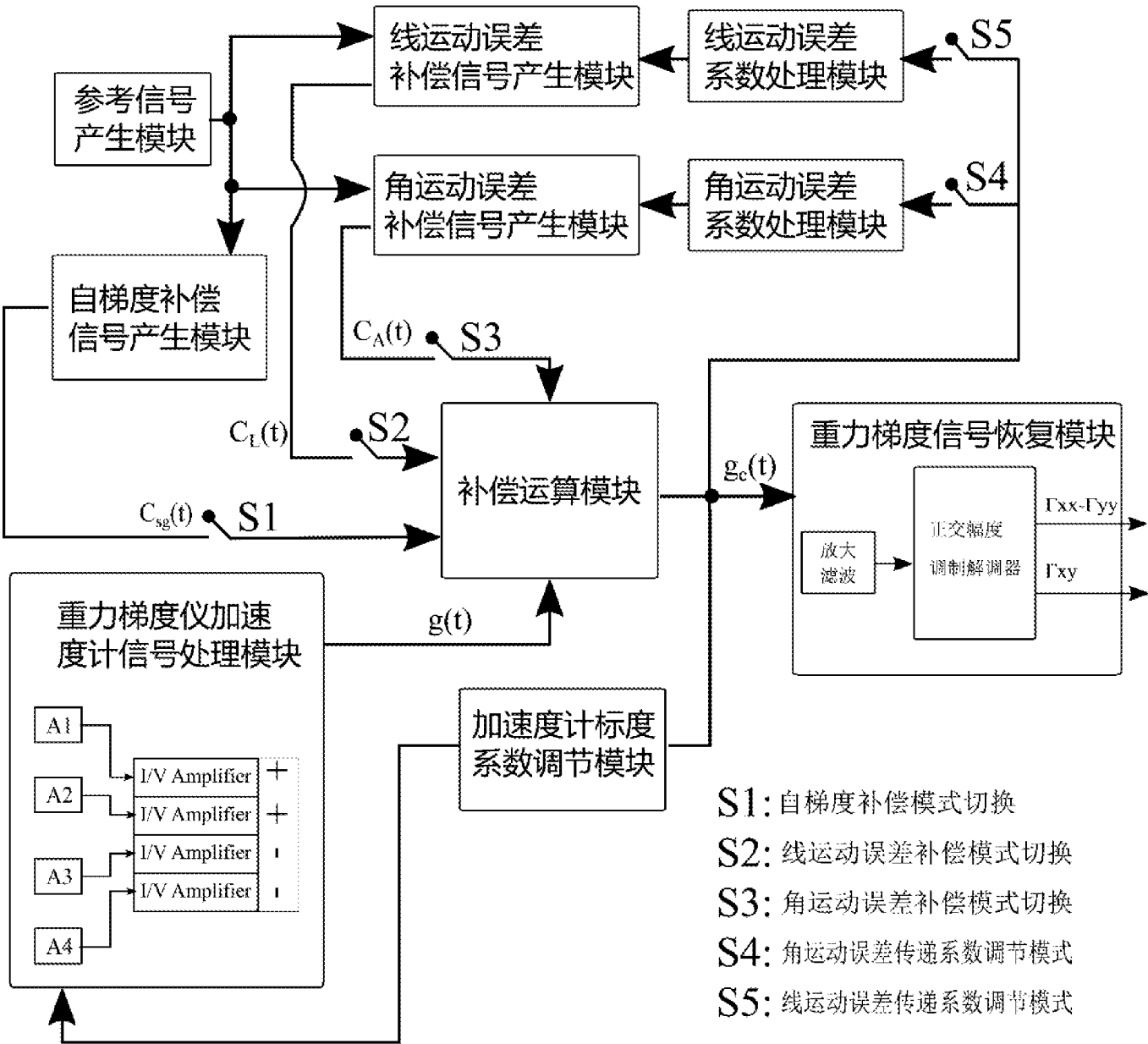
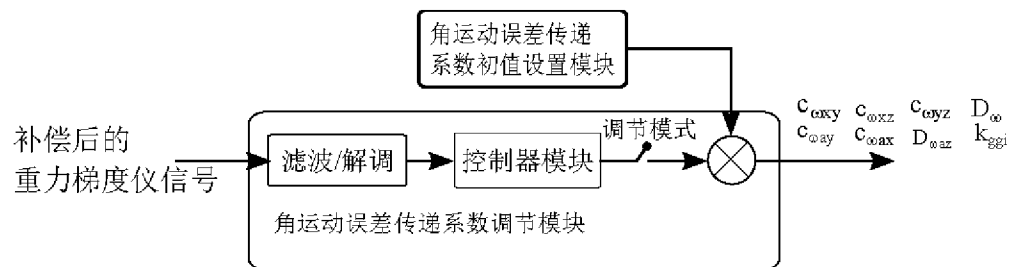


图 1

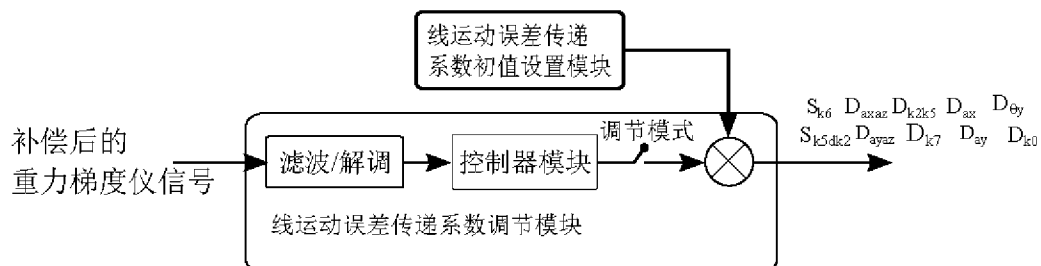


参考信号产生模块原理图

图 2

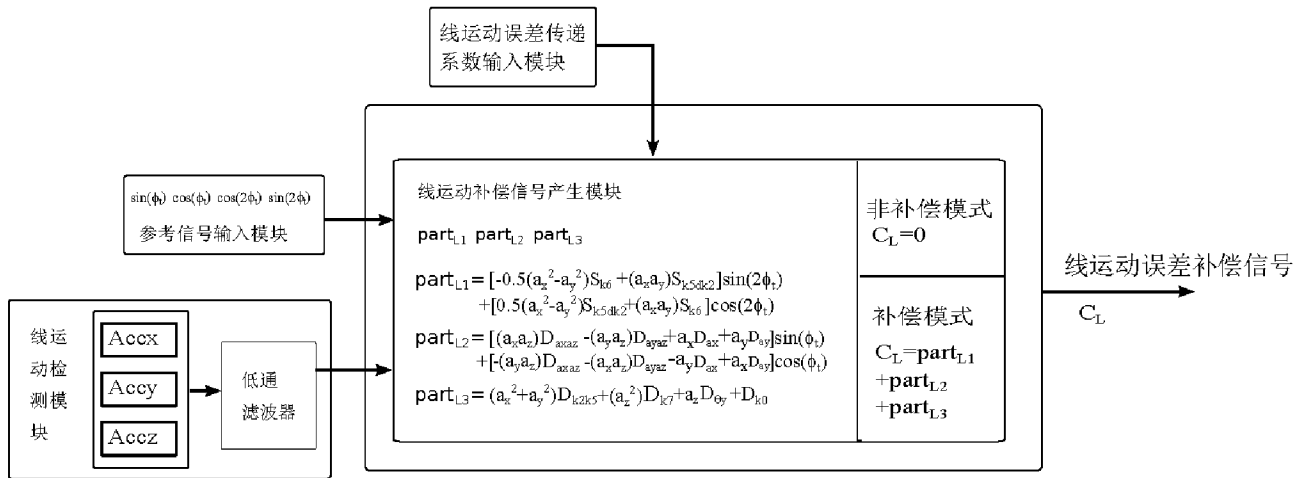


(a)角运动误差传递系数处理模块原理图

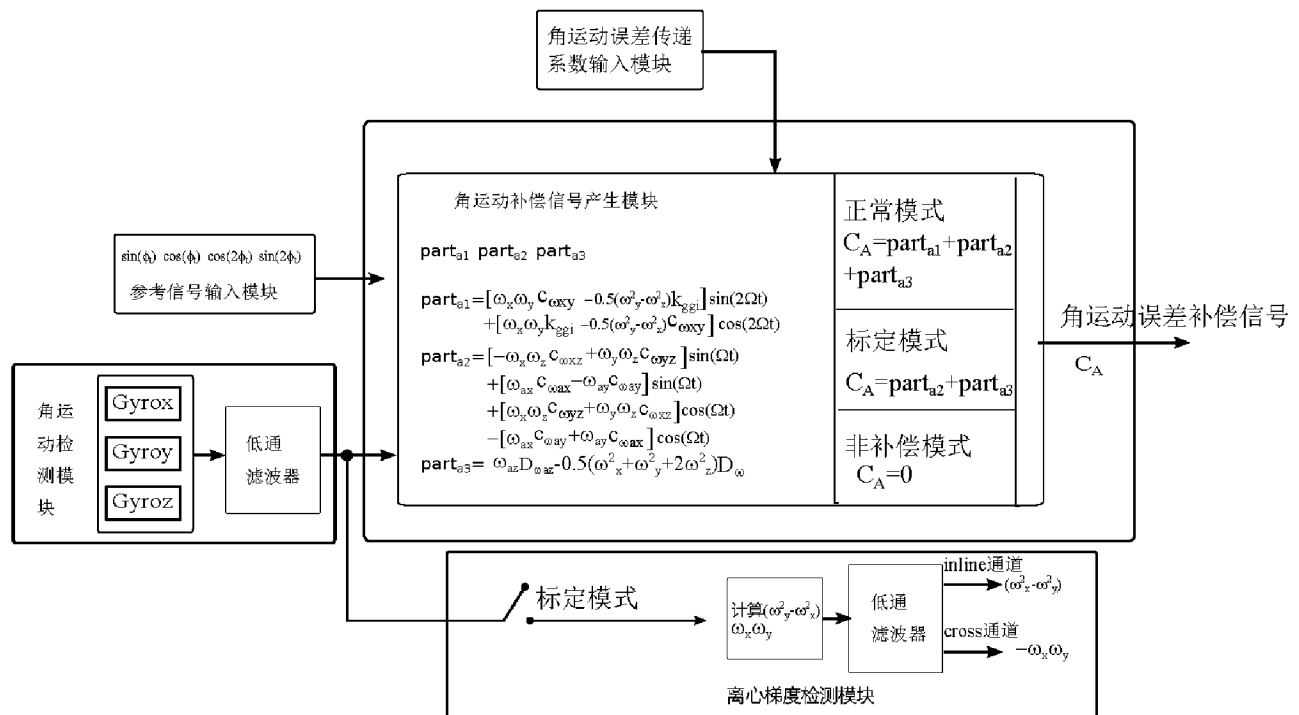


(b)线运动误差传递系数处理模块原理图

图 3



(a) 线运动误差补偿信号产生模块原理图



(b) 角运动误差补偿信号产生模块原理图

图 4

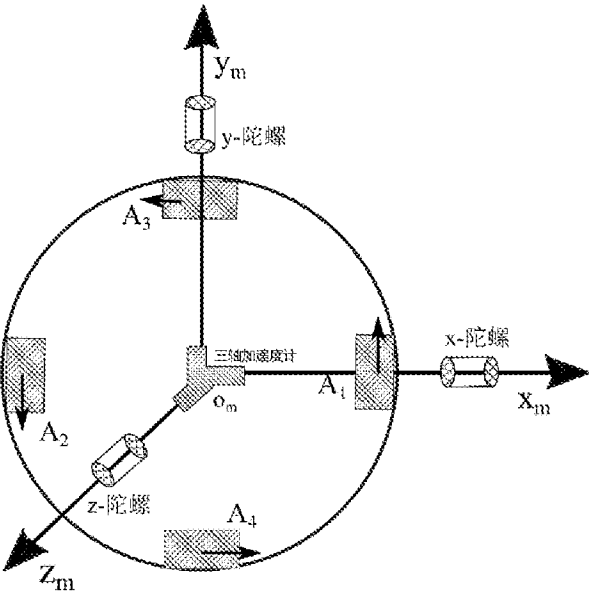


图 5

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2019/089302

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01V 7/00(2006.01)i; G01V 13/00(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01V

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNABS; CNTXT; CNKI; 万方, wanfang; 超星, chaoxing; VEN; USTXT; EPTXT; IEEE: 东南大学, 重力梯度, 补偿, 姿态, 蔡体菁, 线运动, 误差, 角运动, 加速度计, 旋转, 传递系数, 信号, gravit+, accelerometer, error, gradiometer, compensat+, signal

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 109212620 A (SOUTHEAST UNIVERSITY) 15 January 2019 (2019-01-15) description, paragraphs [0005]-[0067]	1-10
A	CN 107870371 A (SOUTHEAST UNIVERSITY) 03 April 2018 (2018-04-03) description, paragraphs [0037]-[0085]	1-10
A	CN 105717553 A (SOUTHEAST UNIVERSITY) 29 June 2016 (2016-06-29) entire document	1-10
A	US 7181967 B2 (BHP BILLITON INNOVATION PTY) 27 February 2007 (2007-02-27) entire document	1-10



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

20 July 2019

Date of mailing of the international search report

19 August 2019

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing
100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2019/089302

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	109212620	A	15 January 2019	None			
CN	107870371	A	03 April 2018	CN	107870371	B	30 April 2019
CN	105717553	A	29 June 2016	CN	105717553	B	16 January 2018
US	7181967	B2	27 February 2007	WO	03079052	A1	25 September 2003
				US	2005160815	A1	28 July 2005
				AU	2003209818	A1	29 September 2003

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2019/089302

A. 主题的分类

G01V 7/00(2006.01)i; G01V 13/00(2006.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

G01V

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

CNABS;CNTXT;CNKI;万方;超星;VEN;USTXT;EPTXT;IEEE:东南大学, 重力梯度, 补偿, 姿态, 蔡体菁, 线运动, 误差, 角运动, 加速度计, 旋转, 传递系数, 信号, gravit+, accelerometer, error, gradiometer, compensat+, signal

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
PX	CN 109212620 A (东南大学) 2019年 1月 15日 (2019 - 01 - 15) 说明书第[0005]-[0067]段	1-10
A	CN 107870371 A (东南大学) 2018年 4月 3日 (2018 - 04 - 03) 说明书第[0037]-[0085]段	1-10
A	CN 105717553 A (东南大学) 2016年 6月 29日 (2016 - 06 - 29) 全文	1-10
A	US 7181967 B2 (BHP BILLITON INNOVATION PTY) 2007年 2月 27日 (2007 - 02 - 27) 全文	1-10

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2019年 7月 20日

国际检索报告邮寄日期

2019年 8月 19日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局 (ISA/CN)
中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

传真号 (86-10)62019451

受权官员

周群

电话号码 86- (0512) -88997268

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2019/089302

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	109212620	A	2019年 1月 15日	无			
CN	107870371	A	2018年 4月 3日	CN	107870371	B	2019年 4月 30日
CN	105717553	A	2016年 6月 29日	CN	105717553	B	2018年 1月 16日
US	7181967	B2	2007年 2月 27日	WO	03079052	A1	2003年 9月 25日
				US	2005160815	A1	2005年 7月 28日
				AU	2003209818	A1	2003年 9月 29日

表 PCT/ISA/210 (同族专利附件) (2015年1月)