

文章编号: 2095-2163(2019)02-0143-05

中图分类号: TP242

文献标志码: A

定向精度误差分析及补偿技术研究

姜茜¹, 李光春², 万洋¹, 曹海波¹

(1 湖北三江航天万峰科技发展有限公司, 湖北 孝感 432000; 2 哈尔滨工程大学 自动化学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 本文简述了一种磁悬浮陀螺定向仪的工作原理, 并对其定向精度误差进行误差源分类及机理分析, 针对误差的影响因素, 提出相应误差补偿方法。

关键词: 定向精度误差; 分析; 补偿

Research on directional accuracy error analysis and compensation technology

JIANG Qian¹, LI Guangchun², WAN Yang¹, CAO Haibo¹

(1 Hubei Sanjiang Aerospace Wanfeng Technology Development Co. Ltd., Xiaogan Hubei 432000, China;

2 College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

[Abstract] This paper briefly describes the working principle of a magnetic levitation gyro directional instrument, and discusses the error source classification and mechanism analysis of its orientation accuracy error. Aiming at the influencing factors of the error, the corresponding error compensation method is proposed.

[Key words] directional accuracy error; analysis; compensation

0 引言

本报告以国防基础科研项目(A0420132202)研发为背景, 针对磁悬浮陀螺定向仪的定向精度进行研究。

磁悬浮陀螺定向仪(以下简称定向仪)作为自主定向技术的核心设备, 主要由陀螺组件(陀螺本体)、控制组件、三角架组成, 三角架是其架设平台, 陀螺组件是其结构工作平台, 控制组件是陀螺组件的控制部分。使用时, 陀螺组件固定在三脚架上, 陀螺组件与控制组件之间通过2根电缆实现电气信号的传输。系统加电后, 按要求输入当地地理纬度, 控制组件会自动控制陀螺组件完成整个寻北过程, 输出陀螺组件基准棱镜入射线法线相对天文北向的角度。

1 定向工作原理

陀螺组件包括陀螺马达 M1、敏感元件、导流丝、磁铁磁悬浮支承、角度传感器、力矩传感器、准直仪、驱动电机 M2 和 M3、壳体等, 其原理简图如图 1 所示。

定向仪按工作原理划分, 主要由加速稳定组件、

控制组件、主控制机组件、随动控制组件、磁悬浮控制组件、敏感元件、自准直仪组件等 7 部分组成, 如图 2 所示。定向仪控制框图如图 3 所示。

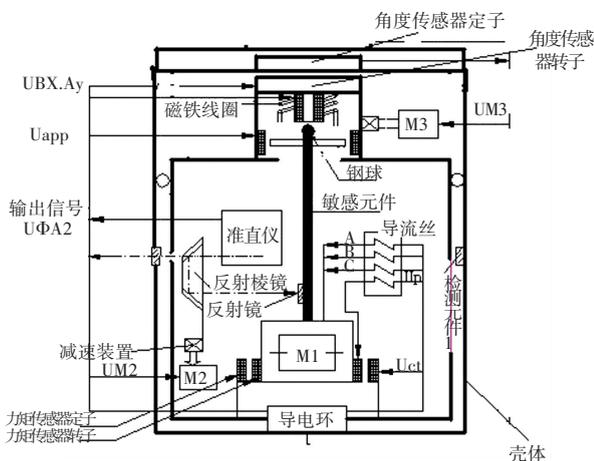


图 1 陀螺组件结构图

Fig. 1 Gyro component structure diagram

定向仪工作时, 系统加电后, 主控制机组件控制加速稳定组件对敏感元件中陀螺电机加电, 当陀螺电机转速稳定到规定值时, 主控制机组件控制随动控制组件, 使敏感元件敏感轴转动到要求位置, 磁悬浮控制组件使敏感元件悬浮, 控制组件通过对自准直仪输出信号进行处理, 给力矩器转子施加一定的

基金项目: 国防基础科研项目(A0420132202)。

作者简介: 姜茜(1973-), 女, 学士, 工程师, 主要研究方向: 机电一体化; 李光春(1967-), 男, 硕士, 教授, 主要研究方向: 自动控制; 万洋(1989-), 男, 学士, 工程师, 主要研究方向: 精密装调; 曹海波(1988-), 男, 学士, 工程师, 主要研究方向: 惯性定位定向。

收稿日期: 2018-11-21

电流,使力矩器产生的力矩与敏感元件进动力矩平衡,从而使敏感元件敏感轴稳定在某一方向上,由于敏感轴与北向的夹角与进动力矩成比例关系,所以可计算出此时敏感轴与北向夹角。

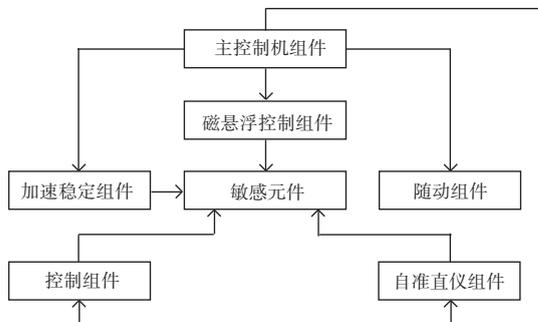


图2 定向仪原理简图

Fig. 2 Directional instrument schematic diagram

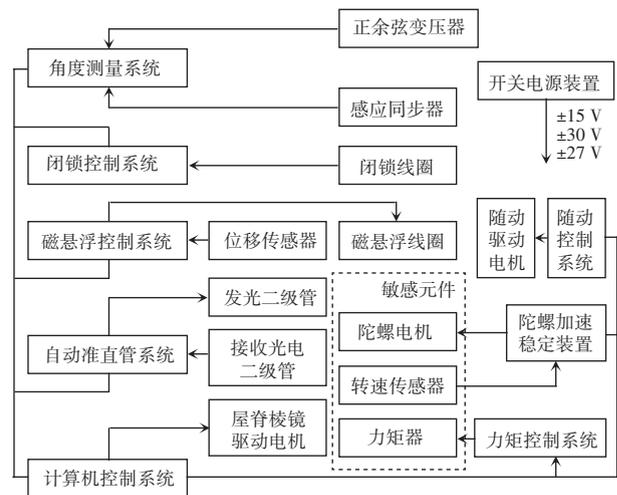


图3 定向仪控制框图

Fig. 3 Directional control block diagram

2 定向精度误差分析

定向仪包含机械、电气、光学、磁学等技术,其定向精度影响因素较复杂,下面主要从定向仪仪器常数、光路误差、与电路相关的随机误差、力矩回路引起的定向误差等方面进行分析。研发分析内容如下。

2.1 定向仪仪器常数的计算与分析

定向仪的仪器常数即为敏感元件陀螺房的陀螺马达轴(H 轴)与固定壳体上反射外法线在水平面投影的夹角 α 。该值由设计和装配过程决定,在成功装配后应为一常值,主要由2个因素组成:马达轴相对于敏感元件反射镜面法线水平投影的夹角 α_1 、自准直装置光轴相对于固定壳体外标镜法线的夹角 α_2 。对此可做设计详述如下。

2.1.1 马达轴相对于敏感元件反射镜面法线水平投影的夹角 α_1

马达轴相对于敏感元件反射镜面法线水平投影的夹角 α_1 ,由马达轴对于陀螺房上安装配合面螺丝孔中心线的偏角 θ_1 、反射镜安装面相对于敏感元件壳体与陀螺房安装通孔中心线的垂直度误差 θ_2 以及装配时壳体与陀螺房相互错位造成的偏转 θ_3 决定,具体分析如下。

(1) θ_1 的计算。由于陀螺房在装配过程中,采用一定的工艺措施,保证马达轴与安装螺孔中心线偏角很小,以工艺轴代替马达轴测量其两端高度差 h (保证螺孔中心线水平),实测中 $h < 0.01 \text{ mm}$, $l < 41 \text{ mm}$,所以得到:

$$\theta_1 < \arcsin \frac{0.01}{41} \times \frac{180}{T_1} \times 60 = 8.4', \quad (1)$$

(2) θ_2 的计算。反射镜安装面与壳体通孔中心线的形位公差按 GB/T1184-1996,9 级校粗计算,则偏差 $\Delta_2 = 0.05 \text{ mm}$,那么可得:

$$\theta_2 = \arcsin \frac{0.05}{22} = 7.8', \quad (2)$$

(3) θ_3 的计算。在装配过程中的极限值应该为:

$$\theta_3 = \arcsin \frac{0.4}{12} \times \frac{180}{77} \times 60 = 114', \quad (3)$$

(4) α_1 的计算。可用如下公式来求值:

$$\alpha_1 = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 = 130.2'. \quad (4)$$

2.1.2 自准直装置光轴相对于固定壳体外标镜法线的夹角 α_2

自准直装置光轴相对于固定壳体外标镜法线的夹角 α_2 ,由测试中各自的安装方式及装配过程决定:自准直装置安装在与轴承固联的壳体1上,壳体1通过轴承与底座相连,而固定壳体安装在底座上,外标反射镜安装在固定壳体上。所以 α_2 主要由自准直装置与壳体孔中心线夹角偏差 θ_4 、壳体1与轴承偏角 θ_5 、轴承与底座偏角 θ_6 、固定壳体与底座偏角 θ_7 、反射镜法线与壳体安装孔偏角 θ_8 决定,具体分析如下。

(1)自准直装置与壳体孔中心线夹角偏差 θ_4 。计算公式为:

$$\theta_4 = \arcsin \frac{0.5}{36.5} = 47', \quad (5)$$

(2)壳体1与轴承偏角 θ_5 。计算公式为:

$$\theta_5 = \arcsin \frac{0.5}{36.5} = 47', \quad (6)$$

(3) 轴承与底座偏角 θ_6 。计算公式为:

$$\theta_6 = \arcsin \frac{0.5}{50.25} = 34', \quad (7)$$

(4) 固定壳体与底座偏角 θ_7 。计算公式为:

$$\theta_7 = \arcsin \frac{1}{87} = 39', \quad (8)$$

(5) 反射镜法线与壳体安装孔偏角 θ_8 。计算公式为:

$$\theta_8 = 6', \quad (9)$$

(6) α_2 的计算。可用如下公式来求出:

$$\alpha_2 = \theta_4 + \theta_5 + \theta_6 + \theta_7 + \theta_8 = 173'. \quad (10)$$

注: 以上结果是通过实际装配过程中的测试数据计算而出。

综上, 定向仪仪器常数 α 为:

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 = 303'. \quad (11)$$

即寻北仪仪器常数 $-5^\circ < \alpha < 5^\circ$ 。

注: 以上分析没有论述角度传感器安装零位对系统输出的影响, 这里是 1:1 的影响关系。

2.2 光路误差

光路误差包含光学传递误差及光学元件安装误差两类。对此可做探讨分述如下。

2.2.1 光学传递误差

光学传递误差主要包括各反射镜、三合棱镜的法线误差及陀螺电机轴的中心线偏、自准直仪光轴的轴线的偏差, 其中反射镜包括敏感组件反射镜、壳体内反射镜、壳体外反射镜。光学传递误差可写作如下数学形式:

$$\Delta = A + B + C_1 + C_2 + H + D. \quad (12)$$

其中, A 表示敏感组件反射镜法线; B 表示自准直仪光轴的轴线; C_1 表示壳体内反射镜法线; C_2 表示壳体外反射镜法线; H 表示陀螺电机轴; D 表示三合棱镜法线(可左右移, 向左移动: 拉开三合棱镜, 自准直轴与壳体内标镜光路对接; 向右移动, 合上三合棱镜, 自准直轴与敏感组件的反射镜光路对接)。

2.2.2 光学元件安装误差

光学元件安装误差主要包括陀螺电机轴 H 与敏感组件反射镜法线 A 之间安装误差 θ_9 、壳体内、外反射镜法线加工误差 θ_{10} 。具体分析如下。

(1) 陀螺电机轴 H 与敏感组件反射镜法线 A 之间安装误差 θ_9 。该误差为仪器常数误差, 即由机械加工保证; 其随机量误差 $\Delta\theta_9$, 主要是稳定性误差, 包括: 逐次启动温度场变化引起的结构形变; 安装螺丝钉长时间形变式运转、冲击; 高低温工作情况下,

由振动等原因引起的结构位移等。

(2) 壳体内、外反射镜法线加工误差 θ_{10} 。该误差为仪器常数误差, 加工保证; 由于一体化加工, 稳定性较好, 其随机误差可忽略。

2.3 与电路相关的随机误差

与电路相关的随机误差主要为自准直光轴与壳体内反射镜法线之间的误差(包括测角误差 θ_{11} 、光电转换误差 U_{AK})。对此可做阐释解析如下。

(1) 测角误差 θ_{11} 。测角分辨率为:

$$\frac{1^\circ}{2^{14}} = 0.219\ 73''. \quad (13)$$

关于自动准直管准直误差, 研究可得在系统中测试稳定性为 $0.6'' \sim 0.8''$ 。

由于正余弦变压器的圆感应同步在安装过程中, 存在同轴度等因素的影响, 实际测量误差要大于 $0.219\ 73''$ 。如果采用精度优于 $2''$ 的回转转台, 精度优于 $1''$ 的自准直仪对测角组件进行测试, 误差补偿, 系统测角精度则优于 $\sqrt{2^2 + 1^2} = 2.24''$, 即测角误差 $\Delta\theta_{11} = 2.24''$ 。

(2) 光电转换误差 U_{AK} 。在测角系统中, 引入失准角测量 U_{AK} , 其与测角可互补, U_{AK} 分辨率为 $10\ \text{mv}/''$ 。又因为 A/D 分辨率为 $\frac{10\ \text{V}}{2^{12}} = 2.44\ \text{mV}(\pm 5\ \text{V})$, 即光电转换采用分辨率为 $0.244''$, 考虑在实际测试中光电转换器电路等的误差, 其精度优于 $1''$ 。

综上, 与电路相关的随机误差小于 $1''$ 。

2.4 力矩回路引起的定向误差

力矩回路引起的寻北误差影响因素主要包括线路零位漂移、线性零位、采样电阻、温度漂移。这里, 将展开研究论述如下。

2.4.1 线路零位漂移

设线路零位漂移小于 $0.005\ \text{mA}/20\ \text{min}$, 由于采样控制力矩 $M_K = K \cdot I_{\text{定}} \cdot I_{\text{转}}$, 实时采样, 力矩反馈控制, 线路零位漂移不影响寻北精度。

2.4.2 线性零位

线性零位引起常值力矩, 不影响寻北精度。

2.4.3 采样电阻

(1) 转子采样电阻。转子采样电路如图 4 所示。

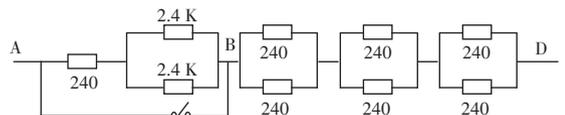


图 4 转子采样电路图

Fig. 4 Rotor sampling circuit diagram

在调试时,准确测定,并记录,在程序中写入小采样电阻 R_{BD} 、大采样电阻 R_{AD} 。设 $\Delta R_{AD} = 1 \Omega$,则:

$$\frac{\Delta R_{AD}}{R_{AD}} = \frac{1}{1800} = 5.6 \times 10^{-4}, \quad (14)$$

$$\frac{\Delta \alpha_{北}}{\alpha_{北}} = \frac{\Delta U_{AD}}{U_{AD}} = \frac{\Delta I_{转}}{I_{转}} = 5.6 \times 10^{-4}, \quad (15)$$

因为 $\alpha_{北} = \pm 30'$, 所以 $\Delta \alpha_{北} = 1.008''$ 。研究可得数学原理公式如下:

$$\frac{\Delta \alpha_{北}}{\Delta \alpha_{I_{转}}} = \frac{K_{T定}}{\omega_{ie} \cos \Phi}, \quad (16)$$

$$\Delta \alpha_{北} = \frac{K_{T定}}{\omega_{ie} \cos \Phi} \Delta I_{转}, \quad (17)$$

$$\frac{\Delta \alpha_{北}}{\alpha_{I_{转}}} = \frac{\Delta I_{转}}{I_{转}}, \quad (18)$$

(2)电阻温度系数。对 $2.4 \text{ K}\Omega$, 240Ω , 15Ω 采样电阻进行了 $-40 \text{ }^\circ\text{C} \sim +40 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度系数测试,测试结果如下:

① $2.4 \text{ K}\Omega$, 温度系数为: $0.0015 \text{ K}\Omega/80 \text{ }^\circ\text{C} = 18.800 \text{ ppm}$

② 240Ω , 温度系数为: $0.004125 \text{ K}\Omega/80 \text{ }^\circ\text{C} = 51.6 \text{ ppm}$

③ 15Ω , 温度系数为: $0.12 \Omega/80 \text{ }^\circ\text{C} = 0.015 \Omega/^\circ\text{C}$ 由此可以得到:

$$\Delta R_{AD} = \frac{1.5}{2} \Omega + 0.004 \Omega + \frac{0.004}{2} \Omega + \frac{0.004}{2} \Omega \times 3 \leq 0.8 \Omega. \quad (19)$$

引起寻北误差 $\Delta \alpha_{北} = 1''$ 。

2.4.4 定子采样电阻

定子采样电路如图5所示。

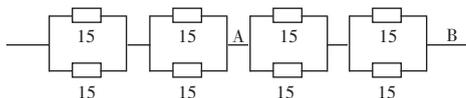


图5 定子采样电路图

Fig. 5 Stator sampling circuit diagram

在调试时,准确测定 U_{AB} , 并记录。在程序中写入时,设 $\Delta R_{AB} = 0.1 \Omega$ (ΔR_{AB} 为温漂等漂移阻值)。研究中将用到的数学公式表述如下:

$$R_{AB} = \frac{15}{2} + \frac{15}{2} = 15 \Omega, \quad (20)$$

$$\frac{\Delta R_{AB}}{R_{AB}} = \frac{0.1}{15} = 6.7 \times 10^{-3}, \quad (21)$$

$$\frac{\Delta \alpha_{北}}{\Delta \alpha_{I_{转}}} = \frac{K_{T定}}{\omega_{ie} \cos \Phi}, \quad (22)$$

$$\Delta \alpha_{北} = \frac{K_{T定}}{\omega_{ie} \cos \Phi} \Delta I_{转}, \quad (23)$$

$$\frac{\Delta \alpha_{北}}{\alpha_{北}} = \frac{\Delta I_{定}}{I_{定}} = \frac{\Delta R_{AB}}{R_{AB}} = 6.7 \times 10^{-3}. \quad (24)$$

因为 $\alpha_{北} = \pm 30'$, 所以 $\Delta \alpha_{北} = 12.06''$ (该项影响太大,换漂移小的电阻 RX70,选 $5 \sim 10 \text{ ppm}$)。

若 $\Delta R_{AB} = 0.01 \Omega$, 则 $\Delta \alpha_{北} = 1.206''$ 。

2.4.5 温度漂移

15Ω 温度漂移为: $0.015 \Omega - \Delta \alpha_{北} = 1.8''$ 。

2.5 计算机控制 A/D 转换精度引起定向误差

(1)分辨率。基础数学公式为:

$$\frac{10 \text{ V}}{2^{12}} = 2.4414 \text{ mV} (\pm 5 \text{ V}), \quad (25)$$

① 转子电流分辨率。其数学公式为:

$$\frac{2.4414}{1800} = 1.356 \times 10^{-7} \text{ A}, \quad (26)$$

② 定子电流分辨率。其数学公式为:

$$\frac{2.4414}{15} = 1.63 \times 10^{-4} \text{ A}, \quad (27)$$

③ 寻北仪角度分辨率。其数学公式为:

$$\arcsin \frac{333 \times 1.356 \times 1.63 \times 10^{-11}}{4000 \times 15.041 \times \cos 53^\circ} = 4.1 \times 10^{-8} ("). \quad (28)$$

(2) A/D 转换误差: ± 1 个字, 即: $\pm 2.4414 \text{ mV}$ 。其引起的寻北误差为:

$$\Delta I_{定} = \frac{2.4414 \text{ mV}}{15 \Omega} = 1.63 \times 10^{-4} \text{ A}, \quad (29)$$

$$\Delta I_{转} = \frac{2.4414 \text{ mV}}{1800 \Omega} = 1.356 \times 10^{-7} \text{ A}, \quad (30)$$

$$\Delta \alpha_{北} = \frac{\alpha_{\alpha_{北}}}{\alpha_{I_{定}}} + \frac{\alpha_{\alpha_{北}}}{\alpha_{I_{转}}}, \quad (31)$$

所以,力反馈回路影响为:

$$\Delta \alpha_{北} = \alpha_{北} \times \frac{\Delta I_{定}}{I_{定}} + \alpha_{北} \times \frac{\Delta I_{转}}{I_{转}} = \alpha_{北} \times$$

$$\left(\frac{\Delta I_{定}}{I_{定}} + \frac{\Delta I_{转}}{I_{转}} \right) = 30' \times \left(\frac{1.63 \times 10^{-4}}{6.4 \times 10^{-2}} + \frac{1.357 \times 10^{-7}}{18/1800} \right) \approx 4.6''. \quad (32)$$

注:主要是定子电流影响大,改善措施加大定子采样电阻,若定子采样电阻为 120Ω , 则 $\Delta \alpha_{北} \approx 0.9''$ 。

3 定向精度误差补偿

由磁悬浮陀螺定向仪定向精度误差分析可知,定向精度误差分为随机误差(与电路相关的测角误差、光电转换误差等)和固定误差(光学元件安装及

传递误差、仪器常数误差等)两种。

随机误差主要通过多次测量进行算术平均,从而减小误差。如测角误差,可采用精度较高的回转台机自准直仪对测角组件进行多次测试,并对测试的误差结果进行算术平均计算。

固定误差中涉及到的光学元件的安装及光路传递误差,可通过光学标定,测出其安装误差系数及光路传递误差常数。通过软件,将安装误差系数及光路传递误差常数写入定向软件,通过相应程序补偿到定向结果中。

下面将着重阐述一种快速提高磁悬浮陀螺定向仪定向精度的方法—二位置寻北法,此方法可有效减少导流丝、力矩传感器等的影响。

磁悬浮陀螺定向仪利用陀螺仪敏感地球自转角速率分量,并由此计算出载体参考轴向与真北方向的夹角。二位置寻北方案是采用相差 180° 的两点上采样相互抵消陀螺常值漂移的方法,由于转动位置少,陀螺随机漂移影响更小。

设载体的姿态角为 α 、 θ 和 γ ,分别表示航偏角、倾斜角和俯仰角。建立如下坐标系:地理坐标 $OX_n Y_n Z_n$,其方向分别为东、北、天; $X_1 Y_1 Z_1$ 和 $X_2 Y_2 Z_2$ 坐标系,是坐标系转换过程中引入的计算坐标系;载体坐标系 $X_b Y_b Z_b$,分别为载体首尾线水平面及水平面法线方向,其中载体纵轴与 OX_b 轴重合,陀螺坐标系与之重合,即陀螺敏感轴与 OX_b 轴重合。

在地球上经度 λ ,纬度 L 的一点 O 处,与载体固联放置一台定向仪,其参考方向与载体坐标 $OX_b Y_b Z_b$ 的 Y_b 轴向重合(平行)。在寻北开始时陀螺处于第一位置,陀螺坐标系 $OX_g Y_g Z_g$ 与 $OX_b Y_b Z_b$ 重合;而当寻北仪在这一位置对敏感器件输出采样完成后,由转动机构带动陀螺组件旋转 180° ,并停止在那里。此时,陀螺坐标系相对载体系有绕 Z_b 向的夹角 $\psi = \pi$ 。

假设起始的地理坐标系与陀螺坐标系对应各轴重合。 $OX_n Y_n Z_n$ 绕 Z 轴转动角 α 得到 $X_1 Y_1 Z_1$,再绕 X_1 轴转动 θ 得到 $X_2 Y_2 Z_2$,最后绕 Y_2 轴转动 γ 得到 $X_b Y_b Z_b$ 。 α 、 θ 和 γ 逆时针为正。最终可求得:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{\omega_{ie}^g + K_x \omega_{ie} \gamma \sin L}{K_x \omega_{ie} \cos L}\right), \quad (33)$$

上述公式为考虑安装倾斜后的二位置寻北计算公式。若不考虑安装倾斜时,两位置寻北计算公式则为:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{\omega_{ie}^g}{K_x \omega_{ie} \cos L}\right). \quad (34)$$

由于在陀螺电机轴与真北之间夹角较大时,通过力矩器进行力矩平衡的算法得到的夹角结果无法达到所需要的精度,故而采用多次测量逐渐向真北逼近的方法提高测量精度,通过进行粗寻北将寻北位置转动到精寻北角度范围以内。

通过对敏感元件靠近北向和南向运动时的运动轨迹上动平衡的稳定位置和不稳定位置的确定结果进行平均,实现由敏感元件和壳体(敏感元件悬挂在其内)相互作用的有害力矩所产生的误差的自补偿,获得高精度寻北值。

具体工作过程为:陀螺敏感元件被悬浮起来后,由于地球自转角速度的影响,陀螺敏感元件将产生进动,陀螺敏感元件上的反光镜使内部的自准直仪光信号发生变化,经光学探测器产生电信号,经放大、校正后驱动力矩器产生阻尼力矩,使陀螺电机轴逐渐静止,由计算机检测阻尼力矩的大小,通过计算机处理计算得到陀螺电机轴与北向之间夹角 α 。

4 结束语

本文简述一种磁悬浮陀螺定向仪的工作原理,对其定向精度误差进行机理分析,针对误差的影响因素,提出相应误差补偿方法,对定向仪定向精度的提高具有很强的指导意义。

参考文献

- [1] 许江宁,边少锋,殷立吴. 陀螺原理[M]. 北京:国防工业出版社,2005.
- [2] 于来法. 陀螺定向测量[M]. 北京:解放军出版社,1988.
- [3] 卜继军,魏贵玲,吕志清. 二位置陀螺寻北仪静态误差分析[J]. 压电与声光,2000,22(5):309-312.