

doi: 10.7690/bgzdh.2013.04.023

准直误差对磁浮寻北仪寻北精度的影响分析

谭立龙¹, 仲启媛¹, 黄先祥¹, 王姣², 王亮²

(1. 第二炮兵工程大学兵器发射理论与技术国家重点学科实验室, 西安 710025;

2. 第二炮兵工程大学研究生旅, 西安 710025)

摘要: 从磁悬浮陀螺寻北仪的寻北原理出发, 将地球自转角速度分解到陀螺坐标系上, 分析了存在准直误差的情况下所引起的寻北误差, 推导出了用于补偿运算的准直误差与寻北误差之间的关系表达式, 避免了精确准直消耗时间造成总寻北时间延长的问题。实际应用结果表明: 准直范围由 3" 扩大到 1', 可缩短磁浮闭路时间约 60 s, 通过测量准直误差并补偿, 仪器总寻北精度没有改变。

关键词: 磁悬浮陀螺寻北仪; 准直误差; 二位置寻北; 寻北精度

中图分类号: TP86 **文献标志码:** A

Influence Analysis of Collimation Error on North-Seeking Precision About Magnetic Levitation Gyrocompass

Tan Lilong¹, Zhong Qiyuan¹, Huang Xianxiang¹, Wang Jiao², Wang Liang²

(1. National Key Disciplines Lab of Armament Launch Theory & Technology, Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China; 2. Brigade of Postgraduate, Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

Abstract: From the north-seeking principle of the magnetic levitation gyrocompass north-seeking instrument, the earth's rotation angular velocity is decomposed to the gyro coordinate system. The north-seeking error is analyzed under the existing of collimation error and the relational expression between the collimation error and the north-seeking error is derived which be used for north-seeking accuracy compensation calculation. By this way, the problem of the precise collimation consume time resulting in the total north seeking time extended is avoided. The actual application shows that collimating range from 3" expand to 1', can shorten the magnetic levitation closed time about 60 s, by measuring the collimation error and compensating calculation, but the total north-seeking accuracy has not changed.

Key words: magnetic levitation gyrocompass; collimation error; two-position north-seeking; north-seeking accuracy

0 引言

无论是吊带悬挂方式还是磁浮悬挂方式, 都是通过测量指北力矩测北, 都需要借助于光电准直系统将陀螺主轴放置在参考方向上, 陀螺主轴与参考方向的符合程度对寻北精度和寻北时间有很大影响, 在对寻北时间要求较高的场合, 为节省时间, 不可能达到严格的符合要求, 通过放宽准直精度来缩短寻北时间, 通过准直误差测量, 然后补偿修正来保证总寻北精度不变。笔者分析了准直误差对磁悬浮陀螺寻北仪的精度影响, 建立补偿公式, 为实际应用奠定理论基础。

1 磁浮陀螺寻北仪的寻北原理

磁悬浮陀螺寻北仪结构原理示意图如图 1 所示, 主要由供电单元、运算处理单元、陀螺敏感元件、陀螺电机稳速控制系统、磁悬浮控制系统、力矩反馈控制系统、A/D 采样系统、随动壳体驱动系统、准直测量系统、精密回转角测量系统等组成。

从结构上看, 最外层是本体壳体, 放置在三脚架上, 与地球相对固联。本体壳体参考方向以安装

在其上的棱镜弦面法线确定并有箭头标记, 架设陀螺寻北仪时, 将此箭头标记大概冲向北方, 最终寻北结果表现形式就是给出本体壳体参考方向的方位角。

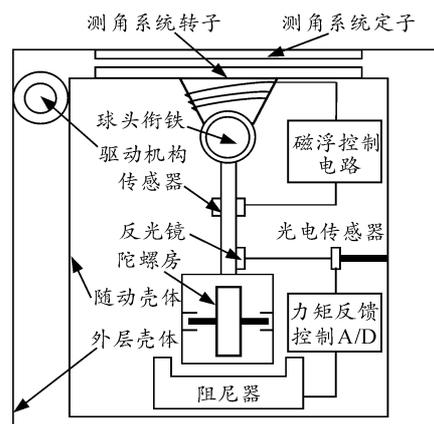


图 1 磁浮陀螺寻北仪结构原理示意图

中间层为随动壳体, 在驱动机构的驱动下, 可相对本体壳体转动, 本体壳体上固定测角系统的定子, 随动壳体上固定测角系统转子, 当随动壳体相对本体壳体转动时, 转过的角度可由高精度测角系

收稿日期: 2012-10-09; 修回日期: 2012-11-19

基金项目: 第二炮兵工程大学 2011 年重点基金项目 (XY2011JJA06)

作者简介: 谭立龙(1973—), 男, 江苏人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 从事兵器发射理论与技术研究。

统测量出来。

最内层是陀螺灵敏部，其顶部为球头衔铁，下半部分是陀螺房，在随动壳体上有固定磁悬浮线圈，线圈通电后，球头衔铁带动敏感元件克服其重力向上运动；同时，位置传感器将敏感其上浮的位置，通过反馈，控制磁悬浮线圈中的电流，最终使敏感元件所受磁悬浮的吸力与其重力平衡，并悬浮于要求位置。敏感元件在悬浮状态时，在指北力矩的作用下相对随动壳体可以有小范围转动。球头衔铁和陀螺房中间的连杆上有一平面反光镜，在安装时使平面反光镜的法线方向与陀螺主轴方向一致或成固定角度，在随动壳体内侧安装有准直系统的光源和光电传感器，若准直光经平面镜反射以后是原路返回的，即达到准直状态，自准直系统的光电传感器输出为 0，再借助于测量随动壳体转动位置的高精度测角系统的测量结果，陀螺主轴与本体壳体参考方向位置关系明确^[1]。

在随动壳体和敏感元件底部分别装有阻尼器的定转子，构成力反馈平衡回路。敏感元件在指北力矩的作用下相对随动壳体产生进动时，阻尼器施加外力矩，使之与指北力矩平衡，从而使敏感元件相对随动壳体不能进动而稳定在自准直系统的指定位置，通过检测反馈力矩的量值解算出陀螺主轴与子午面的夹角，通过机械传递，加上仪器常数的修正，就可以获知本体壳体参考方向方位角^[2]。

2 准直误差对寻北精度的影响

磁悬浮陀螺寻北仪精寻北时，在相差 180° 的 2 个位置上寻北，在第 1 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°，再次测量，可抵消陀螺常值漂移的影响，提高寻北精度^[3]。在不考虑任何误差的理想情况下，即不考虑陀螺常值漂移和随机漂移，不考虑调平误差、转位误差和准直误差，陀螺在这 2 个位置 x_g 轴上的输出^[3]为：

$$\omega_{10} = -\omega_{ie} \cos \phi \sin \alpha \quad (1)$$

$$\omega_{20} = \omega_{ie} \cos \phi \sin \alpha \quad (2)$$

$$\omega_{20} - \omega_{10} = 2\omega_{ie} \cos \phi \sin \alpha \quad (3)$$

$$\sin \alpha = \frac{\omega_{20} - \omega_{10}}{2\omega_{ie} \cos \phi} \quad (4)$$

式中： ω_{10}, ω_{20} 是在不考虑误差的理想情况下，陀螺在 2 个位置 x_g 轴上的输出； α 为陀螺主轴与子午面的夹角。

当寻北仪在第 1 位置，即陀螺坐标系 $o_g x_g y_g z_g$ 相对壳体坐标系 $o_b x_b y_b z_b$ 的 z_b 轴转角 $A=0$ ，如图 2

所示，此时壳体坐标系 $o_b x_b y_b z_b$ 到陀螺坐标系 $o_g x_g y_g z_g$ 的坐标变换矩阵^[4]为

$$C_b^g(1) = \begin{bmatrix} \cos 0 & -\sin 0 & 0 \\ \sin 0 & \cos 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

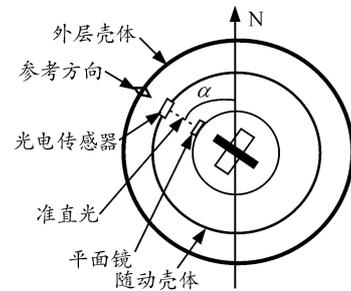


图 2 寻北第 1 位置完全准直时

由于敏感陀螺主轴的位置是通过自准直系统的光电传感器来敏感的，当光线原路返回时，即达到准直状态，光电传感器输出为 0，说明光电传感器的零位即为当前陀螺主轴的位置。但事实上，要使光线完全原路返回，使失准角精确为 0，需要较长的调整时间，而在某些特殊情况下，由于时间有限，是不可能有很长时间用来精细调整的；因此，当失准角不完全为零，即存在准直误差，光线没有精确地原路返回时，必然会影响寻北的精度。

假设在第 1 位置存在准直误差，失准角为 $\mu(1)$ ，如图 3 所示，则由壳体坐标系 $o_b x_b y_b z_b$ 到陀螺坐标系 $o_g x_g y_g z_g$ 的坐标变换矩阵^[4]为

$$C_b^g(1) = \begin{bmatrix} \cos \mu(1) & -\sin \mu(1) & 0 \\ \sin \mu(1) & \cos \mu(1) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

因为 $|\mu(1)| \leq 60''$ ，认为失准角是一个小角度，所以上式可简化为

$$C_b^g(1) = \begin{bmatrix} \cos \mu(1) & -\sin \mu(1) & 0 \\ \sin \mu(1) & \cos \mu(1) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 1 & -\mu(1) & 0 \\ \mu(1) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

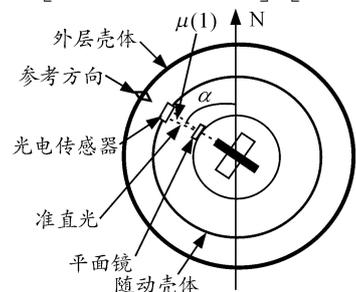


图 3 寻北第 1 位置有准直误差 $\mu(1)$ 时

忽略调平及转位误差，则在第 1 位置陀螺坐标系 x_g 轴上的输出为：

$$\omega(1) = -\omega_{ie} \cdot \cos \phi \sin \alpha - \mu(1) \cdot \omega_{ie} \cdot \cos \phi \cos \alpha + \varepsilon_x + \varepsilon_x(1) \quad (8)$$

式中: ω_e 为地球自转角速度, ϕ 为寻北仪架设点的纬度, α 为陀螺主轴与子午面的夹角, $\mu(1)$ 为第 1 位置时准直测量误差, ε_x 为陀螺敏感轴 x_g 轴在第 1 位置的常值漂移, $\varepsilon_x(1)$ 为陀螺敏感轴 x_g 轴在第 1 位置的随机漂移误差。

陀螺转到第 2 位置, 假设仍存在准直误差, 失准角为 $\mu(2)$, 如图 4, 则第 2 位置壳体坐标系 $o_b x_b y_b z_b$ 到陀螺坐标系 $o_g x_g y_g z_g$ 的坐标变换矩阵^[6]为:

$$C_b^g(2) = \begin{bmatrix} \cos(\pi + \mu(2)) & -\sin(\pi + \mu(2)) & 0 \\ \sin(\pi + \mu(2)) & \cos(\pi + \mu(2)) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} -1 & \mu(2) & 0 \\ -\mu(2) & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

忽略调平及转位误差, 则第 2 位置陀螺坐标系 x_g 轴上的输出为

$$\omega(2) = \omega_{ie} \cdot \cos \phi \sin \alpha - \mu(2) \omega_{ie} \cdot \cos \phi \cos \alpha + \varepsilon_x + \varepsilon_x(2) \quad (10)$$

式中: $\mu(2)$ 为第 2 位置时准直测量误差, $\varepsilon_x(2)$ 为陀螺敏感轴 x_g 轴在第 2 位置的随机漂移。

根据式 (10) 减去式 (8), 并将式 (3) 代入可得:

$$\omega(2) - \omega(1) = (\omega_{20} - \omega_{10}) + [\mu(1) - \mu(2)] \cdot \omega_{ie} \cdot \cos \phi \cdot \cos \alpha \quad (11)$$

假设由准直测量误差引起的寻北误差为 $\Delta\alpha_\mu$,

根据公式 (4) 和公式 (11) 可得:

$$\sin(\alpha + \Delta\alpha_\mu) = \frac{\omega(2) - \omega(1)}{2\omega_{ie} \cos \phi} = \quad (12)$$

$$\frac{\omega_{20} - \omega_{10} + [\mu(1) - \mu(2)] \omega_{ie} \cos \phi \cos \alpha}{2\omega_{ie} \cos \phi}$$

将公式 (4) 带入公式 (12), 经化简可得:

$$2 \sin(\alpha + \Delta\alpha_\mu) = 2 \sin \alpha + (\mu(1) - \mu(2)) \cos \alpha \quad (13)$$

从而有:

$$\Delta\alpha_\mu = \frac{\mu(1) - \mu(2)}{2} \quad (14)$$

即由准直测量误差引起的寻北误差为 2 个位置准直误差差的一半。

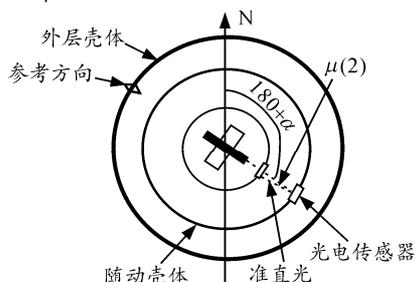
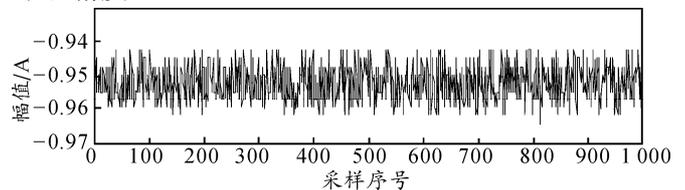
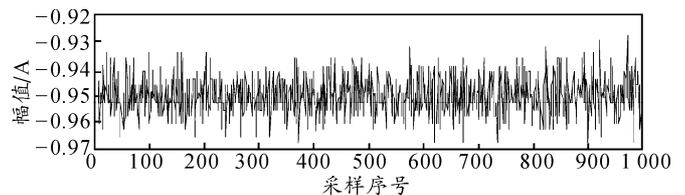


图 4 寻北第 2 位置有准直误差 $\mu(2)$ 时

为了比对存在准直误差前后陀螺输出信号的变化及其产生的寻北误差, 首先进行理想情况下的寻北试验, 即将磁悬浮陀螺寻北仪架设在实验室的隔振基座上, 对基座进行精确调平, 忽略转位误差, 对实验室的基准棱镜(方位角是已知的)进行寻北测量。在寻北第 1 位置, 首先精确准直(误差 3" 以内), 选择采样时间为 10 ms, 采样 10 组数据, 每组 1 000 个数据, 取其中的任意一组, 如图 5(a) 所示, 再将准直误差范围调整为 20", 认为不需要再做精细调整, 仍采样 10 组数据, 每组 1 000 个数据, 取其中的任意一组, 如图 5(b) 所示。显然, 存在准直误差时陀螺输出数据有较大波动, 该组信号的标准方差为 4.7041×10^{-5} , 而理想情况下的标准方差为 2.6030×10^{-5} , 存在准直误差时的标准差是无准直误差时的近 2 倍。显然, 准直误差会影响陀螺的输出, 进而影响寻北精度。



(a) 无准直误差时陀螺输出的原始信号



(b) 存在准直误差时陀螺输出的原始信号

图 5 陀螺输出的原始信号对比

同样的方法, 在第 2 位置寻北时, 仍然忽略转位误差, 首先在精确准直时采集数据, 然后将准直误差调整为 10", 再采集数据, 得到的结论和第 1 位置相同。

已知基准棱镜的方位角为 $1\ 280\ 527.2''$, 在无准直误差的理想情况下, 利用采样数据, 根据上面的寻北公式计算棱镜的方位角为 $1\ 280\ 523.5''$, 微小误差 $3.7''$ 是由电路白噪声引起的。在存在准直误差的情况下, 如果不进行补偿, 直接利用上面的公式 (4) 计算得到的方位角为 $1\ 280\ 510.8''$, 误差为 $16.4''$, 如果将测得的 2 个位置的准直误差角 $20''$ 和 $10''$ 代入公式 (14), 计算出寻北误差再进行补偿, 则方位角为 $1\ 280\ 515.8''$, 误差为 $11.4''$ 。

表 1 是对基准棱镜进行 5 次寻北测量, 在存在不同的准直误差时, 将准直结果放宽至 $1'$, 在缩短磁浮闭路时间约 60 s 的情况下, 对寻北结果进行补偿前后的数据对比, 补偿后寻北精度基本与精确准直时的精度一致, 属于角秒级范围。