

陀螺经纬仪精度分析

张 葆

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130021)

摘要 就我所研制的新型陀螺经纬仪, 对信息量输入到输出的各中间环节, 进行了精度分析。从中得出进一步提高整机的定向精度的措施及存在的问题。

关键词: 精度分析; 陀螺经纬仪

1 前 言

由于精度是精密测量设备的最重要指标之一, 同时完全消除误差是不可能的, 误差愈小, 生产愈不经济, 因此合理地分配精度, 可以减少不必要的经济损失, 使设计即经济又能满足精度要求。

系统的精度是通过对系统中, 各误差环节产生的误差分量进行合成表现出来的。详细地分析各环节误差大小, 分布及对总误差的贡献, 才可能有的放矢地采取措施, 提高系统的精度, 满足设计要求。

2 陀螺经纬仪总体介绍

研制的自动定向陀螺经纬仪是一种新型自主、快速、高精度定向设备。它不仅可作为定向基准, 而且可与经纬仪完成方位角度的传递及定向测量; 它不仅可用于现代武器定向, 而且可用于野外地质和建筑勘测等。该仪器具有测量自动化程度高, 定向作业时间短等特点。集光学、机械学、电子学、微机技术等一体, 特别采用电子技术和新的信息处理方法, 使整台仪器的各项指标均满足设计要求。它的基本组成框图见图1。

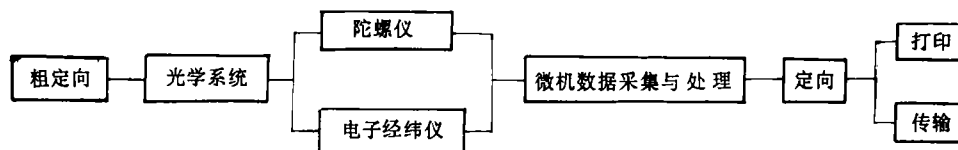


图1 陀螺经纬仪基本组成框图

3 误差分析

3.1 陀螺仪误差

陀螺仪的误差主要由漂移引起的

$$\Delta\theta = \omega_{\text{漂}} \times t$$

根据 $\omega = M/H$, 可以得出是由力矩引起的。

根据本系统的具体情况。主要由以下几种因素:

- | | | |
|------------------|--------------------|-------------------------------|
| a. 不平衡力矩 | $M_1/H = \omega_1$ | $\Delta\theta_1 = \omega_1 t$ |
| b. 摩擦力矩 | $M_2/H = \omega_2$ | $\Delta\theta_2 = \omega_2 t$ |
| c. 非等弹性力矩 | $M_3/H = \omega_3$ | $\Delta\theta_3 = \omega_3 t$ |
| d. 弹性力矩 | $M_4/H = \omega_4$ | $\Delta\theta_4 = \omega_4 t$ |
| e. 章动: 它是由惯性量造成的 | | |

$$\Delta\theta_5 = - \frac{\omega_r M_{r0}}{H(\omega_x^2 - \omega_y^2)} \cos\omega_r t$$

上述四种力矩和一个惯性项并非单一线性地产生漂移, 而是综合作用于陀螺上。根据参考文献^[1], 陀螺漂移的数学模型为:

$$\omega_d = D_0 + D_x a_x + D_y a_y + D_{xx} a_x^2 + D_{yy} a_y^2 + D_{xy} a_x a_y + D_{yx} a_y a_x + D_{xx} a_x a_x$$

上述各种参数均可通过固定位置法和翻滚法试验来确定。

$$\Delta\theta_a = 30''$$

该项误差服从正态分布, 所以

$$\sigma_a = \pm 30/3'' = \pm 10''$$

除了系统漂移外, 还有随机漂移。随机漂移的因素很多, 如外界电磁干扰、温度的波动、随机振动以及电子学的噪声等

$$M_r = B\omega + \omega$$

式中 M_r ——陀螺随机干扰力矩 B ——状态方程矩阵

ω ——白噪声向量

随机漂移可以通过转台伺服法或力矩平衡法测出。可用卡尔曼滤波器补偿, 但是此系统无法做到这一点, 故作为一项随机误差来处理。

$$\omega_{\text{漂移}} = 0.2^\circ / \text{小时}$$

$$\begin{aligned} \Delta\theta_b &= \omega_{\text{漂移}} \times T = 0.2 \times 3600/60 \times 1.25 \\ &= 15'' \end{aligned}$$

式中 T 为工作时间

该项误差分布服从正态分布, 所以

$$\sigma_b = \pm 15''/3 = \pm 5''$$

3.2 经纬仪的误差

经纬仪的误差来源主要反映在视准差、横轴倾斜误差、竖轴倾斜误差、对中误差以及光电轴角编码器、光学系统等方面的误差。这些误差综合反映为经纬仪一测回的测角误差，此项误差包括：

a. 对中误差

当测线边长 $d=20\text{m}$ （发射点距瞄准点的距离），取对中极限偏差 $e_T=0.5\text{mm}$ ，则觇标对中误差 med 和仪器对中误差 met 为：

$$med = met = 2\rho e_T / \sqrt{2} d = 3.64'' \times 2 = 7.29''$$

此项误差服从等概率分布

$$\sigma_{ed} = \sigma_{eT} = \pm \Delta / \sqrt{3} = 4.2''$$

b. 测线一测回的平均值中误差

$$mh = \pm 6''$$

测前测后的测回平均值中误差

$$m_{\mp} = \pm 6'' / \sqrt{2} = \pm 4.24''$$

则经纬仪总误差

$$\sigma_c = \pm \sqrt{4.2^2 + 4.2^2 + 4.24^2} = \pm 7.3''$$

3.3 上架陀螺仪与电子经纬仪的连接误差

由于陀螺的三轴与经纬仪的三轴很难调到完全重合的程度，这样便产生联结误差。根据仪器加工水平和装调工艺，三轴不重合度为 $\alpha=\beta=\gamma=1^\circ$ 。分析如下：

两个坐标系的相对位置如图 2 所示

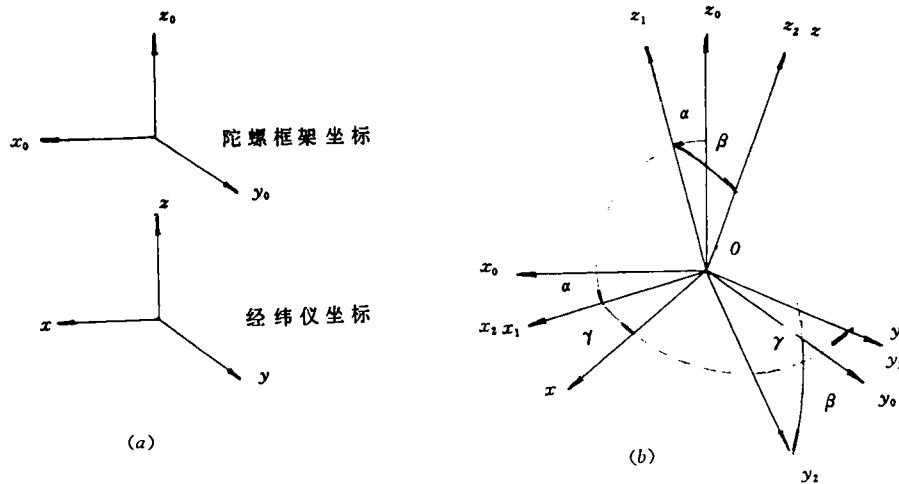


图 2 两坐标系相对位置图

经过三次转轴，变换关系到表于 1、2、3。

表 1

	x_0	y_0	z_0
x_1	$\cos\alpha$	0	$-\sin\alpha$
y_1	0	1	0
z_1	$\sin\alpha$	0	$\cos\alpha$

表 2

	x_1	y_1	z_1
x_2	1	0	0
y_2	0	$\cos\beta$	$-\sin\beta$
z_2	0	$\sin\beta$	$\cos\beta$

表 3

	x_2	y_2	z_2
x	$\cos\gamma$	$\sin\gamma$	0
y	$\sin\gamma$	$\cos\gamma$	0
z	0	0	1

$$\text{则 } \begin{vmatrix} x \\ y \\ z \end{vmatrix} \quad \text{简化后} \quad \begin{vmatrix} 1 & \gamma & -\alpha \\ -\gamma & 1 & -\beta \\ \alpha & \beta & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{vmatrix}$$

所以 $z - z_0 = \Delta z = \sin 1^\circ \times 120'' = 2.09''$
等概率分布:

$$\sigma_d = \pm 2.09'' / \sqrt{3} = \pm 1.2''$$

3.4 噪声误差

信号电荷包在 CCD 内存贮和转移时,与外界是隔离的。因此从本质上说 CCD 是一低噪声器件,但仍有影响。主要有以下几种噪声。

a. 光注入噪声

当用光照法,向 CCD 注入信号电荷时,由光源本身辐射光子数的涨落引起的光子噪声生成也同时注入到 CCD 势阱中。光子噪声归结为玻色-爱因斯坦统计分布的起伏,当 $h/kT \gg 1$ 时,可以忽略光子之间相互作用而将光子辐射过程作为 1 的松过程处理即光子波长 $\lambda \ll h \ll \lambda/kT$ 时,光源辐射光子数起伏的方均值 ΔN_s^2 等于辐射光子数的平均值 \bar{N}_s :

$$\Delta N_s^2 = \bar{N}_s$$

它是有散粒噪声的表达式,所以当光注入 CCD 势阱中产生的自由载流子数目为 n ,则光注入产生的噪声光子数为 $\sqrt{n_s}$ 。

b. 转移噪声

电荷传入到 CCD 以后,定向转移过程中,被填充的界面态就释放电荷,这个过程具有随机性,设界面态释放电荷的概率为 P ,则不释放的概率为 $1-P$ 。由于释放电荷的界面态数目的起伏在一次转移过程引入的噪声载流子数目的平均值:

$$\Delta N_n^2 = \int_0^{E_s/2} AN_n(E)_P(1-p)dE$$

$$= 2k_T AN_n \ln 2$$

N_n 界面态密度

A 栅极面积

c. 输出噪声

噪声电子数 $\Delta N = 400 \sqrt{C}$

C ——浮置扩散区噪声,若 $C=0.4\text{pF}$,则 $\Delta n=253$ 个电子,可见输出噪声是不可忽

略的。

总之根据同类器件目前可达到的器件噪声为 60mV。其分析如图 3 所示。

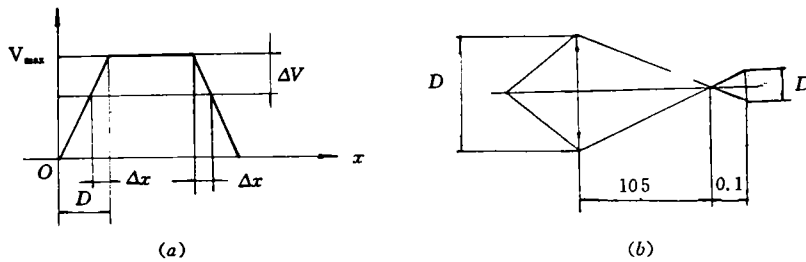


图 3 器件噪声分析图

$$D' = 8.5\text{mm}, l' = 105, \Delta = 0.1$$

所以 $D = 8.09\mu$

$$\Delta_s = \frac{D}{V_{\max}} \times \Delta V \times P = 1.5''$$

该项误差服从等概率分布

$$\sigma_s = \pm \Delta / \sqrt{3} = \pm 0.85''$$

3.5 量化误差

线阵 CCD 的一个重要作用是线位移测量。但由于它是不连续测量元件因必须有量化误差，它服从等概率分布。所以

$$\sigma_f = \pm P/2 \sqrt{3} = \pm 2''/2 \sqrt{3} = \pm 0.57''$$

3.6 原理误差

由于在透镜后焦面上采用了线阵 CCD 作为接收器的测量系统，因而存在一定的非线性误差。假设 CCD 接收器是一球面装置就能减少或消除此项误差，下面对此误差做了分析，见图 4。

理论上 θ 角所对应的 CCD 的长度为 $D\theta$ ，实际上 θ 角所对应的 CCD 的长度为 $D \operatorname{tg}\theta$ 。

$$\Delta = D(\operatorname{tg}\theta - \theta) = D\theta^3/3$$

从上式看出原理误差随 D 、 θ 的增大而增大。

因此在实际使用过程中，在满足分辨率要求和测量范围的条件下尽量减少焦距 D 和视场角 θ 。

$$D = 105\text{mm} \quad \theta = \pm 2.5^\circ$$

$$\Delta = 105/3 \times (2.5^\circ)^3 = 2.91\mu$$

它服从正态分布

$$\sigma_g = \pm \frac{\pm 2.91 \times p}{3} = \pm 2.9''$$

3.7 离焦误差

为了保证测量精度，对于投影式的光学系统，考虑问题是使它的放大率保持不变，这就要求 CCD 光敏面与物镜的距离为常数。显然，此时测量精度很大程度上取决于像面和 CCD 光

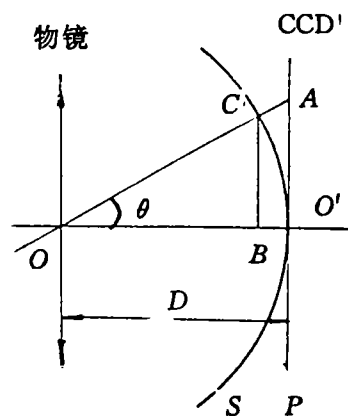


图 4 原理误差分析图

敏面的重合精度。在实际情况下，由于温度变化，狭缝将偏离物面位置，造成调焦误差导致测量误差。分析如图 5。

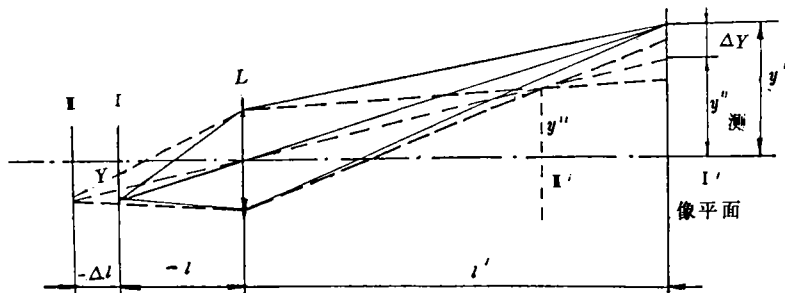


图 5 离焦误差分析图

根据物像几何关系推得：

$$\frac{y'}{y} = \frac{l'}{l}$$

微分得：

$$dy' = -\frac{y'}{l} dl$$

$$\Delta y = -\frac{y'}{l} \Delta l$$

所以：

$$y_{\text{测}} = y' - \frac{y'}{l} \Delta l$$

$$\Delta_{\text{调焦}} = -\frac{y'}{l} \Delta l = \frac{1.3}{80} \times 0.10$$

$$\Delta_{\text{调焦}} = 1.72 \times \rho = 3.75''$$

此项误差服从等概率分布

$$\sigma_h = \pm 3.75 / \sqrt{3} = \pm 2.1''$$

3.8 CCD 的位置误差

由于 CCD 接收器的法线与光轴不能完全重合，因而会产生 CCD 的位置误差，它服从等概率规律。具体分析如图 6。

图 6 (a)、(b) 为 CCD 安装时，可能存在的误差。设其前后、左右的角分别为 α 、 β ，二者均为 $10'$ ，则带来的误差为：

$$\Delta_1 = D \cdot \text{tg}\theta \left(\frac{1}{\cos\alpha} - 1 \right) \times \rho = 0.047''$$

$$\Delta_2 = D \cdot \text{tg}\theta \left(\frac{1}{\cos\beta} - 1 \right) \times \rho = 0.047''$$

$$\sigma_i = \pm \Delta / \sqrt{3} = \pm 0.027''$$

3.9 CCD 本身的几何尺寸误差

此误差服从等概率分布，

$$\Delta = 0.002\text{mm} \times \rho = 2\mu \times \rho = 6.15''$$

$$\sigma_k = \pm 6.15'' / \sqrt{3} = \pm 3.5''$$

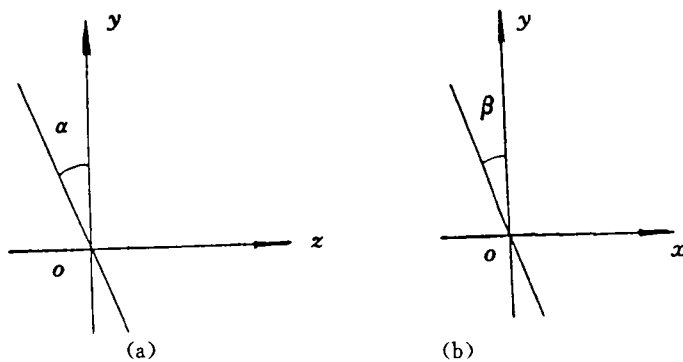


图 6 位置误差分析图

3.10 环境误差

由于实标情况千差万别, 为防止意外情况发生和为保险起见, 特设环境误差为 $2''$ 。

$$\sigma_1 = \pm 2.0''$$

3.11 数据拟合的算法误差

该项误差主要包括模型误差、观测误差、截断误差、舍入误差等, 但主要是截断误差和舍入误差。经数据拟合程序验证此项误差为 $(5/10000)P$, 它服从正态分布

$$\sigma_m = \pm \frac{5}{10000} \times \frac{P}{3} = \pm 5.1 \times 10^{-3}''$$

3.12 动态误差

由于 CCD 接收器是在一个光积分时间内, 输出一组数, 而光标象无时不动。因而有 $\theta = \omega t$, 所以 $\sigma_n = \pm 0.11$ 。

3.13 狭缝像倾斜误差

由于平面镜、透镜、棱镜的制造误差和安装位置误差的综合反映, 会引起狭缝的象倾斜, 从而给测量带来误差, 分析如图 7。

$$x = L \cdot \varphi \quad L \text{ 非测量方向位移} \quad \varphi$$

狭缝的倾角

$$\text{所以 } \sigma_0 = \pm 2.8''.$$

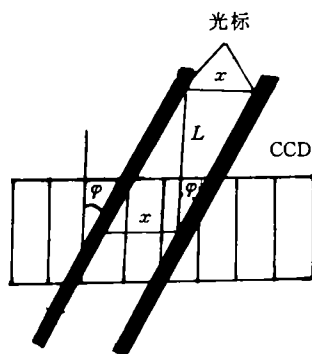


图 7 狭缝像倾斜误差分析图

4 误差的合成

误差的合成方法大致分以下几种:

概率卷积定理、绝对值和法、方和根法、均匀分布合成法、系统误差与随机误差合成法。本系统根据实际情况采用比较接近实际的方法——广义方和根法。

$$\sigma = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2} = 14.4'' \quad \therefore U_{0.01} = \pm K_{0.01} \times 14.4'', K_{0.01} = 2.52.$$

5 减少误差的几点设想

(1) 修正定值系统误差

由于陀螺本身有一漂移速度 ω 、时间 T 可测量, 则漂移量 $\Delta\theta = \omega t$, 测量值 - 漂移量 = 实际测量值。漂移补偿就是把这个零位漂移存储在系统内, 每次处理的最后结果中剔除掉下漂移部分。另外也可采用谐波分析法或最小二乘法求出误差系数, 加以补偿。

(2) 减少零位误差

零位偏差很大, 将影响初始计算基准。原因有悬带的干扰力矩、悬带夹持点、结构塑性变形、受力大小方式、热变形以及陀螺敏感器、磁场干扰等。悬带总反作用力矩

$$D_B = \frac{bh^2Ga}{3l} + \frac{Fb^2a}{12l} + \frac{Eh^2b^5a^3}{360l^3}$$

选择矩形面积, 合理的宽 b 、厚 h 最佳比值, 取

$$b = 0.53, h = 0.044, b/h = 12$$

选用 Co40NCrMo 和 NI38.4 材料, 它具有较高的弹性极限和抗拉强度, 弹性后效小, 机械零位将会有更大改进。

(3) 减少磁性力矩的干扰

一方面避免在陀螺周围用磁性材料减少内部辐射剩余磁场, 另一方面在陀螺敏感的周围采用高导磁率的磁屏蔽罩以隔绝磁场, 有效地降低磁性力矩。

采用高导磁率材料制成的屏蔽筒, 可以使大部分干扰磁通, 限制在罩壁中, 形成旁路。

选用高导磁率材料的坡莫合金 IJ79 或铁镍软磁合金, 厚度 δ 取 0.5~1mm。把陀螺马达壳体屏蔽, 由池组件屏蔽再把整个传感器用三层屏蔽罩屏蔽, 效果明显, 基本上隔绝了磁场。

(4) 减少离焦误差

此项误差的比重较大, 可采用物方远心光路和电子学方法予以消除。

(5) 采用数字滤波技术或对实验数据平滑处理使一些随机漂移误差得以消除

采集的信息过程常会受到干扰, 为了提高采样的可靠性, 减少虚假信息的影响, 采用了数字滤波技术。连续进行多次测量, 去掉其中最大值和最小值, 然后求剩下数据的平均值。

6 结 束 语

根据上述分析结果, 陀螺部分的误差影响较大, 而且它取决于该仪器选购的陀螺传感器的精度。如果进一步提高整机精度, 必须在陀螺传感器的精度上有所提高。经实验测定总机寻北精度达 $\pm 15''$ (均方差), 与上述分析情况基本吻合。

本文曾得到毛英泰教授、武克用研究员的指导和帮助, 在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] 胡恒章, 陀螺仪漂移测试原理及其实验技术. 国防工业出版社, 1981
- [2] 万德钧, 陀螺仪器结构与计. 国防工业出版社, 1981
- [3] 肖明耀, 误差理论与应用. 机械工业出版社, 1985
- [4] Determining an azimuth with a gyrotheodolite. ETL, october 1986
- [5] 张葆, 陀螺经纬仪定向技术研究与设计. 长春光机学院硕士论文, 1994

Accuracy Analysis for the Gyrotheodolite

Zhang Bao

(Changchun Institute of Optics and fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130021)

Abstract

Accuracy is analyzed for the processes of transmitting information on the gyrotheodolite, in order to look for method of advancing accuracy and existent problem.

Key Words: Accuracy analysis, Gyrotheodolite.