

文章编号: 0494-0911(2012)01-0091-04

中图分类号: P204

文献标识码: B

# 基于高精度基准数据网的陀螺全站仪寻北精度及稳定性评价方法

石震<sup>1</sup> 杨志强<sup>1</sup> 田永瑞<sup>1</sup> 庞尚益<sup>2</sup> 杨 钊<sup>2</sup>(1. 长安大学 测绘与空间信息研究所, 陕西 西安 710054; 2. 陕西测绘仪器计量监督  
检定中心, 陕西 西安 710054)

## A Evaluation Method for Gyro Total Station's North-Seek Accuracy and Stability Based on Reference Data Net

SHI Zhen, YANG Zhiqiang, TIAN Yongrui, PANG Shangyi, YANG Kun

**摘要:**结合我国自主研发的 GAT 磁悬浮陀螺全站仪,提出一种基于高精度 GPS 控制网和高精度全站仪测角网的陀螺全站仪精度评价方法,并利用该方法分别对德国的 Gyromat 2000 和我国的 GAT-05B 磁悬浮陀螺全站仪进行了检定,取得了良好的效果。并通过 GAT 陀螺全站仪在若干大型工程中的成功应用案例验证该方法的可行性。

**关键词:**陀螺全站仪; 寻北精度; 稳定性

### 一、引言

陀螺全站仪(经纬仪)是一种通过敏感地球自转角动量独立测定任意测线真北方位的敏感型定向仪器。由于它不受外界气象条件、时间、季节的影响,可以实现全天候、全天时自主定向测量,而被广泛地应用于矿山测量、大型隧道贯通测量以及城市地铁建设等地下工程中,发挥着不可或缺的重要作用。

早期的陀螺经纬仪主要用于矿山测量领域,定向精度较差,难以满足当前大型地下工程建设的需要。随着测绘技术的不断发展,陀螺的定向精度也在逐步提高,现代高精度陀螺全站仪正在逐步取代传统的陀螺经纬仪。这对于陀螺全站仪的检验、检定提出了更高的要求,因此,需要一套专门针对现代高精度陀螺全站仪(经纬仪)的精度测评体系来客观、真实、全面地反映陀螺全站仪的精度指标。然而目前国内尚没有成熟的、专门针对现代高精度陀螺全站仪的仪器检验、检定规程。本文结合我国自主研发的 GAT 高精度磁悬浮陀螺全站仪,提出一种基于高精度控制网对比法的陀螺精度评定方法,并利用该方法对德国的 Gyromat 2000 和我国的 GAT-05B 陀螺全站仪进行了精度评定,取得了良好的效果。

### 二、磁悬浮陀螺仪定向原理简介

高速旋转的陀螺具有定轴性与进动性,在地球

自转效应的影响下会产生推动陀螺旋转轴绕子午线方向进动的指向力矩,其大小为

$$M = H \cdot \omega_e \cos \varphi \sin \alpha \quad (1)$$

式中,  $M$  为陀螺敏感得到的指向力矩;  $H$  为陀螺的角动量;  $\omega_e$  为地球自转角速度;  $\varphi$  为测站点的地理纬度;  $\alpha$  为陀螺旋转轴(陀螺角动量方向)与子午线北方向的夹角。

在实际测量中,当陀螺灵敏部在竖直方向磁场力的作用下处于悬浮状态,并通过力矩器定、转子之间的水平磁场力使陀螺旋转轴静止指向某一固定方向时,通过力矩器测量得到的力矩值即为指向力矩的大小,再根据式(1)就可推算出陀螺旋转轴(陀螺角动量方向)与子午线北方向的夹角  $\alpha$ 。如图 1 所示,根据  $\alpha$  角即可确定陀螺寻北方向的位置  $OT$ ,再通过陀螺内部的测角系统测量陀螺内部的固定轴线  $OM$  的陀螺方位角  $\angle TOM$ 。陀螺寻北测量结束后,全站仪照准测线方向  $OC$ ,依据方向法测量要求,测量目标方向线与全站仪水平度盘零位  $OL$  之间的夹角  $\angle LOC$ ,测线  $OC$  的陀螺方位角为

$$\alpha_r = \angle TOM + \angle LOC \quad (2)$$

式中,陀螺内部固定轴线方向  $OM$  与全站仪水平度盘零位  $OL$  之间的相对位置关系是保持不变的,可以作为仪器常数一部分,并不影响最终的定向成果。

与传统悬挂带式陀螺仪相比较,由于采用了磁

收稿日期: 2010-12-01; 修回日期: 2011-03-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41074006)

作者简介: 石震(1982—),男,辽宁沈阳人,博士生,主要研究方向为高精度磁悬浮陀螺全站仪。

悬浮支承技术,磁悬浮陀螺仪消除了悬挂带扭力矩的不良影响,且无需零位观测。在测量方式上通过采用无接触式的力矩测量法,采集海量观测数据,从根本上改变了传统悬挂带式陀螺读取“零星”离散点的定向方式。

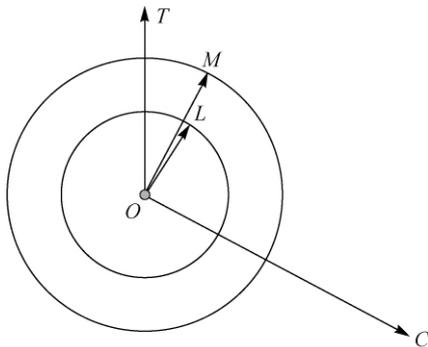


图1 下架式陀螺全站仪轴系结构示意图

### 三、陀螺全站仪定向精度评定方法

对陀螺全站仪的精度评定主要包括两个方面:

① 寻北精度的评定; ② 寻北稳定性的评定。针对这两个方面,本文分别采用与高精度GPS获取的真北方位数据进行比对,以及与高精度全站仪测角网数据进行比对,最后根据大量比对结果的统计规律评定陀螺全站仪的精度指标。

#### 1. 基于高精度GPS基准网的陀螺寻北精度评定方法

陀螺全站仪的寻北精度,即陀螺全站仪一测回寻北所确定真北方位的精度。根据陀螺的寻北原理,陀螺仪直接测量得到的北方位,理论上为测站点的子午线方向。因此,比对的基础数据是以子午线为基准的测线地理方位角。为保证基础数据的准确性,首先采用高精度GPS进行长时间观测,获得网中各点的大地坐标后,即进行高斯投影,计算各点位的高斯平面坐标以及子午线收敛角;然后根据高斯平面坐标和子午线收敛角计算网中各测线

的地理方位角;最后以计算得到的地理方位角作为基准数据,与陀螺全站仪的实测结果进行比对,并根据大量比对结果的统计值对仪器的寻北精度进行评定,流程图如图2所示。

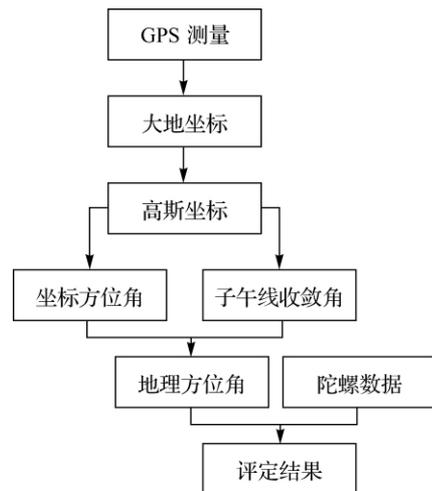


图2 寻北精度评定方法流程图

依据上述方法,对GAT磁悬浮陀螺全站仪进行精度评定。首先在长安大学渭水校区较空旷地区建立12个观测点,点位全部采用强制观测墩,并对所有点位进行高精度GPS长时间观测。内业采用GAMIT/GLOBK高精度软件进行解算,并以控制网内各点位的平均经度作为中央子午线进行高斯投影,再经过坐标方位角计算和子午线收敛角改正后得到各条测线的地理方位角,并以此作为比对的基准数据。

理论上利用陀螺仪所确定的北方向即为地理北方向,陀螺全站仪所测量的方位角即为地理方位角,但由于陀螺全站仪自身的结构等方面的原因,需要对陀螺全站仪的成果进行仪器常数改正,才能得到准确的地理方位角。因此,在进行比对测试之前,首先要对Gyromat 2000陀螺全站仪和GAT磁悬浮陀螺全站仪进行仪器常数标定,利用标定改正后的定向成果与基准数据进行比对,结果如表1所示。

表1 陀螺全站仪寻北精度比对成果表

| 测线        | 地理方位角<br>/(° ′ ″) | GAT 陀螺方位角<br>/(° ′ ″) | 较差值<br>/(″) | Gyromat 2000 陀螺方位角<br>/(° ′ ″) | 较差值<br>/(″) |
|-----------|-------------------|-----------------------|-------------|--------------------------------|-------------|
| WS02—WS01 | 345 25 25         | 345 25 21             | 4           | 345 25 27                      | -2          |
| WS02—WS05 | 84 34 16          | 84 34 3               | 3           | 84 34 20                       | -4          |
| WS02—WS03 | 156 38 33         | 156 38 35             | -2          | 156 38 31                      | 2           |
| WS05—WS09 | 66 52 25          | 66 52 19              | 6           | 66 52 30                       | -5          |
| WS05—WS03 | 221 35 28         | 221 35 24             | 4           | 221 35 27                      | 1           |
| WS10—WS06 | 254 41 47         | 254 41 50             | -3          | 254 41 41                      | 6           |
| WS10—WS07 | 341 21 06         | 341 21 02             | 4           | 341 21 04                      | 2           |

根据比对结果的统计规律可得,GAT陀螺全站仪寻北精度为 $\pm 3.9''$ ,Gyromat 2000的寻北精度为 $\pm 3.6''$ 。

## 2. 基于高精度全站仪测角网的陀螺稳定性评价方法

陀螺全站仪的稳定性是指同一台陀螺全站仪在某一固定测线上独立进行若干测回的陀螺定向测量,各测回间陀螺方位角的符合程度。它包括陀螺仪寻北的稳定性和全站仪角度测量的稳定性。因此,可以采用比对测量夹角的方法综合评价陀螺全站仪的稳定性。具体方法如下:

首先,利用高精度全站仪测量某夹角值 $\alpha_1$ ,并

以此作为比对基础;然后通过陀螺全站仪分别对该夹角的两边进行独立定向,根据两边的定向值计算该夹角 $\alpha'_1$ ;最后计算两种方法得到夹角值的较差 $V_1 = \alpha'_1 - \alpha_1$ 。依此类推,可以获得一组这样的较差值 $V_1, V_2, \dots, V_n$ ,再参考白赛尔公式,推算陀螺全站仪在某一方位的定向精度为

$$m = \pm \sqrt{\frac{V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_n^2}{2n - 2}} \quad (3)$$

依据上述方法,GAT磁悬浮陀螺全站仪比对成果如表2所示。

表2 陀螺全站仪稳定性精度比对成果表

| 测站点  | 照准方向 | 全站仪测量值<br>/(° ' ") | GAT 测量值<br>/(° ' ") | 较差<br>/(") | Gyromat 2000 测量值<br>/(° ' ") | 较差<br>/(") |
|------|------|--------------------|---------------------|------------|------------------------------|------------|
| WS02 | WS01 | 86 08 30.8         | 86 08 30            | -0.8       | 86 08 34                     | +3.2       |
|      | WS08 |                    |                     |            |                              |            |
|      | WS08 | 12 56 33.9         | 12 56 35            | +1.1       | 12 56 36                     | +2.1       |
|      | WS05 |                    |                     |            |                              |            |
|      | WS05 | 28 30 38.1         | 28 30 44            | +5.9       | 28 30 42                     | +3.9       |
|      | WS06 |                    |                     |            |                              |            |
| WS03 | WS06 | 43 33 43.9         | 43 33 36            | -7.9       | 43 33 40                     | -3.9       |
|      | WS03 |                    |                     |            |                              |            |
|      | WS02 | 64 56 47.3         | 64 56 47            | -0.3       | 64 56 50                     | +2.7       |
|      | WS05 |                    |                     |            |                              |            |
|      | WS05 | 37 28 51.1         | 37 29 02            | +10.9      | 37 28 50                     | -1.1       |
|      | WS06 |                    |                     |            |                              |            |
| WS08 | WS07 | 89 00 49.4         | 89 00 55            | +5.6       | 89 00 45                     | -4.4       |
|      | WS12 |                    |                     |            |                              |            |
|      | WS12 | 91 09 59.1         | 91 09 54            | -5.1       | 91 10 00                     | +0.9       |
|      | WS10 |                    |                     |            |                              |            |
|      | WS10 | 32 44 51.7         | 32 44 55            | +3.3       | 32 44 46                     | -5.7       |
|      | WS09 |                    |                     |            |                              |            |
| WS05 | WS09 | 93 52 44.6         | 93 52 51            | +6.4       | 93 52 54                     | +9.4       |
|      | WS06 |                    |                     |            |                              |            |
|      | WS06 | 60 51 57.0         | 60 51 58            | +1.0       | 60 51 46                     | -11.0      |
|      | WS03 |                    |                     |            |                              |            |
|      | WS03 | 42 58 55.9         | 42 58 52            | -3.9       | 42 58 51                     | -4.9       |
|      | WS02 |                    |                     |            |                              |            |
| WS10 | WS06 | 77 35 15.8         | 77 35 20            | +4.2       | 77 35 20.6                   | +4.8       |
|      | WS09 |                    |                     |            |                              |            |

根据式(3)计算可得,受检测的GAT磁悬浮陀螺全站仪稳定性精度为 $\pm 3.9''$ ,Gyromat 2000陀螺全站仪的稳定性精度为 $\pm 4.0''$ 。

## 四、工程案例及实测精度

笔者将被检测的GAT磁悬浮陀螺全站仪多次

应用于实际工程,检验该方法是否能够真实客观地反映陀螺全站仪的精度指标。两年多来,GAT陀螺全站仪先后应用于西安地铁、成都地铁、山西安家岭特大煤矿、南水北调中线穿黄隧洞、厦门翔安海底隧道等20余项重、特大工程,取得了令人满意的

成果,其中已有部分隧道、隧洞顺利贯通。表3为成都地铁仪器常数精度评定计算表,依据表3的计算方法,对GAT磁悬浮陀螺全站仪在部分工程应用的

精度情况进行统计,如表4所示。结果表明,实践中得到的实测精度优于仪器的标称精度 $\pm 5''$ ,与通过该方法评定的仪器精度相符合。

表3 成都地铁仪器常数精度评定计算表

| 测线      | 真北方位角<br>/(° ′ ″) | 陀螺方位角<br>/(° ′ ″) | 仪器常数 $\Delta$<br>/(″) | V        | VV |
|---------|-------------------|-------------------|-----------------------|----------|----|
| ZD6—ZD4 | 105 32 17         | 105 33 09         | -52                   | -1″      | 1  |
|         |                   | 105 33 08         | -51                   | -2″      | 4  |
|         |                   | 105 33 08         | -51                   | -2″      | 4  |
|         |                   | 105 33 14         | -57                   | +4″      | 16 |
|         |                   | 105 33 13         | -56                   | +3″      | 9  |
|         |                   | 105 33 06         | -49                   | -4″      | 16 |
|         | 平均值               |                   | -53                   | $\Sigma$ | 50 |

一次测定中误差  $m_{\Delta} = \pm \sqrt{\frac{[VV]}{n-1}} = \pm \sqrt{\frac{50}{6-1}} = \pm 3.2''$

仪器常数最或是值的中误差  $M = \frac{m_{\Delta}}{\sqrt{n}} = \pm 1.3''$

表4 GAT磁悬浮陀螺全站仪部分大型工程仪器常数精度统计表

(″)

| 序号 | 项目名称       | 成果精度      | 序号 | 项目名称         | 成果精度      |
|----|------------|-----------|----|--------------|-----------|
| 1  | 山西汾西矿业     | $\pm 3.1$ | 7  | 西安家岭特大煤矿1号井  | $\pm 4.8$ |
| 2  | 南水北调       | $\pm 1.8$ | 8  | 西安家岭特大煤矿2号井  | $\pm 3.1$ |
| 3  | 西安地铁2号线    | $\pm 3.5$ | 9  | 陕西铜川崔家沟煤矿    | $\pm 3.9$ |
| 4  | 太白山区引红济石隧洞 | $\pm 3.5$ | 10 | 广深港高速铁路狮子洋隧道 | $\pm 3.7$ |
| 5  | 山东枣庄三河口煤矿  | $\pm 4.0$ | 11 | 安徽淮北桃园煤矿     | $\pm 4.2$ |
| 6  | 重庆中吕水江矿业   | $\pm 3.3$ | 12 | 成都地铁         | $\pm 3.2$ |

### 五、结束语

近年来,随着我国各类大型海底、江底隧道以及长达隧洞等地下工程项目的不断增多,陀螺全站仪已经成为确保隧道、隧洞顺利贯通不可或缺的重要仪器设备。随着新型高精度陀螺定向仪器的发展,也应制定相应的仪器检定规程及测量规范。经过实践证明,本文所提出的陀螺全站仪精度评定方法能够客观、真实地反映陀螺全站仪的寻北精度指标和稳定性情况。

根据多次工程实践的应用情况,陀螺全站仪的寻北精度指标与稳定性指标相比,后者显得更为重要一些。除了少数的几个特殊工程需要陀螺全站仪精确测量真北方位,绝大多数的隧道、隧洞贯通工程在经过地面仪器常数比对后,即可凭借陀螺全站仪的稳定性消除寻北偏差的影响。

本文所提出的陀螺全站仪检定方法是依据统计规律建立在多次测量的基础之上的,因此应对测回数以及测回间较差等方面进行定量的规定,制定严格的检测规范。

### 参考文献:

- [1] 张国良. 矿山测量学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社 2007: 75-103.
- [2] 石震. GAT陀螺全站仪精度评定方法研究[D]. 西安: 长安大学 2008.
- [3] 杨志强, 杨建华, 石震, 等. 新型磁悬浮陀螺全站仪: 中国, ZL201020110125.7 [P]. 2010-10-06.
- [4] 杨志强, 田永瑞, 石震. 测绘工程类陀螺全站仪精度评定方法: 中国. ZL200810018048.X [P]. 2010-08-18.
- [5] 杨志强. GAT高精度磁悬浮陀螺全站仪系统研制报告[R]. 西安: 长安大学测绘与空间信息研究所 2008.