

## 经纬仪定向误差变化的原因及解决方法

韩光宇<sup>1</sup>, 曹立华<sup>1</sup>, 韩光照<sup>2</sup>

- (1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中船重工集团公司第 703 研究所, 黑龙江 哈尔滨 150078)

**摘要:** 方位轴系编码器的定向误差作为光电经纬仪的系统误差, 是在测量前就测试出来并加以修正。但是属于系统误差的定向误差在工作过程中经常发生随机变化, 必然会对测量精度造成很大的影响。文中分析认为调平机构与基座连接时的连接杆与连接孔之间的间隙, 是该误差发生变化的原因; 在分析了早期的解决方案的基础上, 提出了调平机构与抗扭薄膜组合的机械结构模式, 并计算了在调平机构 $\pm 7'$ 的角度范围内, 抗扭薄膜的弯曲应力、剪切应力均能够满足许用应力, 抗扭薄膜内外圆之间的转角小于编码器 $1''$ 的精度, 这样既解决了方位轴线角度调整的问题, 也保证了在 $4\ 000\ \text{N}\cdot\text{m}$ 的力矩作用下, 定向误差没有发生变化。实践证明, 该方法对解决定向误差的变化是行之有效的。

**关键词:** 光电经纬仪; 定向误差; 抗扭薄膜

**中图分类号:** TN216   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1007-2276(2013)03-0699-04

## Cause of varying of theodolite orientation error and its solution

Han Guangyu<sup>1</sup>, Cao Lihua<sup>1</sup>, Han Guangzhao<sup>2</sup>

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. No.703 Research Institute of China Shipbuilding Heavy Industry Corporation, Harbin 150078, China)

**Abstract:** As the systematic error of the optoelectronic theodolite, the orientation error of the azimuth shafting encoder can be numbered and corrected before measuring. But the orientation error, as the systematic error, can constantly vary randomly in the course of work and inevitably make great influence on the measuring accuracy. It is believed that the gap between the joint lever and the switch port, when the leveling gear and the foundation bed are attached to each other, is the cause of error varying. On the basis of analyzing the previous solutions, the mechanical construction model combining the leveling gear and anti-twisting thin film was proposed, and it was found out that within the range of angle  $\pm 7'$ , both the bending stress and shearing stress of anti-twisting thin film were admissible stresses between the internal circle and the external circle of the anti-twisting thin film. The corner was smaller than  $1''$  of the encoder in precision. Thus the problem of azimuth axis angular adjustment was solved and it was assured that no orientation error occurs when it is under the moment of  $4\ 000\ \text{N}\cdot\text{m}$ . Practice has shown that the approach is effective in solving the orientation error varying.

**Key words:** optoelectronic theodolite; orientation error; anti-twisting thin film

收稿日期: 2012-07-05; 修订日期: 2012-08-03

基金项目: 中国科学院三期创新项目

作者简介: 韩光宇(1972-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事光学精密机械设计方面的研究。Email: hanlamost@163.com

## 0 引言

我国从 50 年代开始筹建第一个靶场武器试验场区以来,光学测量设备与无线电外测、无线电遥测成为了靶场测控的支柱系统。光学测量设备是成像探测,所成图像是目标的真实影像,目标的各个部分均清晰可见,其具有两方面的突出用途:一是非常容易进行姿态、摇摆及遭遇参数测量,无线电探测则非常困难;二是由于是目标的真实形状图像,其故障分析以及安控指挥系统的实况图像监视给予非常有利的支持,其他测量手段则无能为力<sup>[1]</sup>。

目前靶场用光电测量设备中,以地基固定方式、采用地平式跟踪架的光电经纬仪最为常见,根据探测距离的实际需求,特别是近几年对深空探测的需要,地基光电测量设备的口径涵盖了从 200 mm 到 1 000 mm,口径越大作用距离也就越远,但是对于仪器机体而言,口径越大,仪器机体就越大,其转动惯量也就越大,为了驱动大口径的光电设备,必须使用大扭矩的驱动元件才能够满足要求<sup>[2-3]</sup>。目前光电经纬仪常用的驱动元件大部分采用力矩电机,尤其是方位轴系的力矩电机,其峰值堵转力矩达到了 4 000 N·m,方位力矩电机的转子与转动部分进行连接,定子与固定端连接,这样方位力矩电机可以驱动转动部分完成围绕方位轴线旋转的运动,但是在驱动过程中,固定端要承受来自定子的反作用力矩,如果基础不牢或有其他的活动环节,在如此大的反作用力矩影响下必然会造成基础变动,从而带来的是测量精度的偏差,影响最大的是方位编码器的定向误差。

文中根据研制某型号经纬仪时,针对方位编码器定向误差发生变化的问题进行了详细的分析,找到了其发生的原因,并提出了解决方案。

## 1 分析定向误差发生变化的原因

方位编码器的定向误差是指方位编码器零位线与大地北定向线之间的夹角,反映的是方位编码器零位线与规定零位线的不一致性,属于系统误差,可以测出并加以修正。系统误差客观上来讲就是一个固定值或者是一个固定的函数关系,可以对其进行误差修正。但是在装调某型号经纬仪过程中,发现驱动力矩电机时,定位误差总是随机发生变化,最大定

位误差值达到了 4',系统误差随机出现,表明系统在结构设计时存在某种隐患,必须加以解决。

光电经纬仪的方位轴系是通过力矩电机直接耦合驱动的,电机转子与转台连接,定子与基座连接,这样就以基座为基础,通过力矩电机带动转子旋转,实现方位轴系的运动。经纬仪力矩电机的连接示意图如图 1 所示。

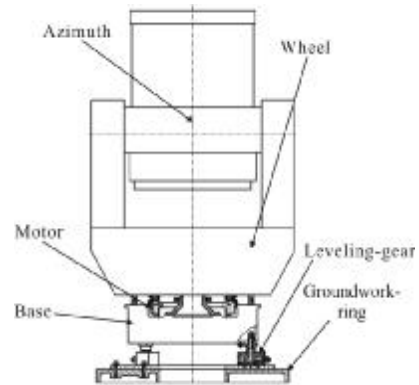


图 1 经纬仪力矩电机连接示意图

Fig.1 Motor of theodolite join base layout

为了保证高精度的测量,需要方位轴系的轴线与大地严格垂直,因此在经纬仪的结构设计中,基座与地基环之间设计有 3 个以 120°均匀分布的楔形调平机构<sup>[4]</sup>,其调整角度范围为 -7'~7'。调平机构如图 2 所示。通过此三点的调整,能够保证方位轴线与大地的垂直度在 0.2"以内。

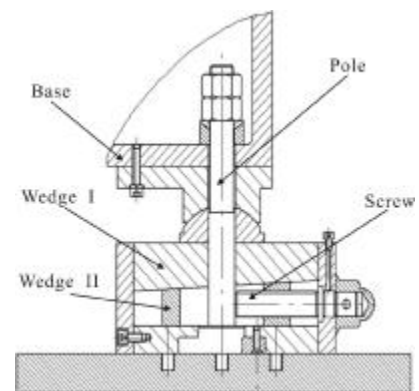


图 2 调平机构

Fig.2 Leveling gear

从图 2 可以看到,调平机构的上下楔形块叠加在一起,通过螺杆的旋转可以驱动下楔形块前后移动,进而带动了上楔形块的上下运动。3 个调平机构的相互配合实现方位轴线的垂直度调整。调平机构的下表面

通过螺钉与地基环连接在一起,并通过连接杆穿入基座内腔,连接杆上端加工有公称直径  $d$  为 30mm 的外螺纹,并用螺母锁紧保证基座与调平机构连接在一起。在调整每个调平机构的过程中,基座会发生小量的倾斜,为了保证在基座与连接杆在倾斜时不发生干涉,设计时基座处的连接孔直径比连接杆外径大 2mm。

基座通过 3 个调平机构与地基环连接在一起,但调平机构中连接杆与基座之间存在间隙,这样当基座承受比较大正转或反转的反作用力矩时,基座会相对调平机构有轻微的串动,由于编码器分别与转台和基座连接,当基座的串动大于方位编码器的精度,就会带来定向误差的变化。

### 2 早期解决方案

早期经纬仪在设计过程中,为了解定向误差的变化,采用了调平机构的支撑方式进行了改进的方法,即将图 2 所示的上、下连接座在设计时采用了两种支撑结构,而且没有连接杆将基座与调平机构固定连接。第一个支撑将上下连接座分别加工有锥孔,锥孔内放置大尺寸钢球;第二个和第三个支撑是将上下连接座分别加工有两个径向 V 形槽,中间也是放置大尺寸钢球,将 3 个支撑结构放置在调平机构上楔形块的上端。经过分析计算,当基座受反作用力矩时,第一个带有锥孔的支撑承受了几乎所有的反作用力矩,由于钢球处于上下两个锥孔内,除锥孔和钢球产生的弹性变形,基座不能移动,因此只要钢球和带有锥孔的支座刚度足够大的情况下,完全解决了定向误差变化的问题。

这种支撑结构,钢球上下两个支座分别与基座和调平机构通过螺钉固定在一起,但两个支座之间没有刚性连接,是影响系统刚度的薄弱环节,系统的固有频率会很低。而伺服系统采用闭环控制跟踪目标时,减小滞后误差的主要方法是增加开环放大量和闭环带宽,当速度带宽接近系统的固有频率时,系统就会发生谐振,从而使伺服系统无法工作,因此要求系统的固有频率必须远远大于闭环带宽,当固有频率低于闭环带宽时,经纬仪的方位轴系就会产生扭转振动,无法完成高精度的捕获、跟踪和瞄准<sup>[5-7]</sup>。

### 3 抗扭薄膜的应用

由材料力学可知,对于圆形金属薄板,在其轴向

不受载荷的情况下,围绕其轴线的扭转刚度很大,可以利用圆形金属薄板(简称抗扭薄膜)这一特点来克服基座所受的反作用力矩。现对其分析计算如下<sup>[8-9]</sup>。

根据光电经纬仪的机械结构,可以将抗扭薄膜放置在图 3 所示的基座与地基环之间,抗扭薄膜设计成圆环形状,内圆尺寸能够方便装调和线缆布置,外圆尺寸小于 3 个调平机构所包围的空间。抗扭薄膜是钢制材料,并通过压板、固定座分别与基座和地基环用螺钉固定在一起。

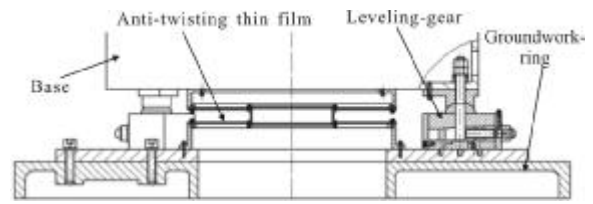


图 3 抗扭薄膜安装示意图

Fig.3 Anti-twisting thin film attaching layout

根据安装空间,并经过多次优化设计,将抗扭薄膜设计成外圆直径为  $\varphi 750\text{mm}$ ,中心孔直径为  $\varphi 290\text{mm}$ ,厚度为 5mm 的环状结构,当抗扭薄膜受到  $4000\text{N}\cdot\text{m}$  的反作用力矩时,其内径处的剪切应力  $\tau$  最大,并且满足公式:

$$\tau_{\max} = M / (2\pi \times r^2 \times d) \leq [\tau] \quad (1)$$

式中: $\tau_{\max}$  为 R 处最大剪切应力,MPa;M 为抗扭薄膜受到的扭力矩, $\text{N}\cdot\text{m}$ ;r 为抗扭薄膜受力半径,mm;d 为抗扭薄膜厚度,mm;[ $\tau$ ]为材料的许用应力值,MPa。经过计算, $\tau_{\max}=6.06\text{MPa}$ ,钢的许用应力值[ $\tau$ ]=103 MPa,远远大于抗扭薄膜所受的最大剪切应力,证明使用抗扭薄膜是安全可靠的。

经纬仪调平机构角度范围是  $-7' \sim 7'$ ,当采用抗扭薄膜时,是否会因为抗扭薄膜由于径向弯曲过大而造成破坏,现对其进行分析。如图 4 所示,当调平倾角

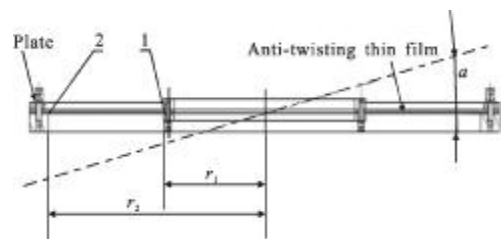


图 4 抗扭薄膜最大倾角示意图

Fig.4 Layout of the maximum angle of inclination of anti-twisting thin film

$\alpha$  达到最大角度  $\pm 7'$  时, 抗扭薄膜在 1 和 2 处的径向弯曲应力达到最大。

由公式(2)计算位置 1 和 2 两处位置的弯曲应力:

$$\sigma_{\max}=(k \times E \times d \times \alpha) / r_i \quad (i=1,2) \quad (2)$$

式中:  $\sigma_{\max}$  为径向弯曲应力, MPa;  $k$  为径向弯曲系数;  $E$  为抗扭薄膜的弹性模量, GPa;  $d$  为抗扭薄膜的厚度;  $\alpha$  为调平最大倾角, rad。经过计算位置 1 和 2 两处的弯曲应力分别为: 94.81 MPa 和 47.5 MPa, 均小于钢制材料的许用弯曲强度 206 MPa, 证明当抗扭薄膜在调平角度达到最大倾角  $14'$  时也是满足使用要求的。

抗扭薄膜在承受反作用扭矩的时候, 虽然其最大剪切应力小于许用应力, 但是从微观角度来讲, 抗扭薄膜的内外圆会有相对转角变形, 其变形量要小于编码器的最小分辨率, 这样经纬仪的定向误差才不会发生变化, 下面对其进行分析。

从图 2 可以看到, 调平机构上端的连接杆通过两个公称直径  $D$  为 30 mm 的螺母将调平机构与基座连接在一起, 当拧紧螺母时, 3 个调平机构也承受一定的反作用力矩。由于调平机构在调试过程中需要经常调整, 所以在螺母锁紧时不能有很大的预紧力, 设计要求每个连接杆上的螺母采用 10 000 N 的预紧力, 3 个调平机构的摩擦力矩则承受了 2 700 N·m 的反作用力矩。

由公式(3)计算抗扭薄膜在剩余反作用力矩作用下内外圆的相对转角变形:

$$\varphi=M / (2 \times \pi \times d \times G \times r_1 \times r_2) \quad (3)$$

式中:  $\varphi$  为内外圆的相对转角变形, " ;  $M$  为抗扭薄膜所受反作用力矩, N·m;  $d$  为抗扭薄膜厚度, mm;  $G$  为钢的剪切模量, MPa;  $r_1$ 、 $r_2$  分别为抗扭薄膜内外圆半径, mm。经过计算抗扭薄膜内外圆的相对转角变形为  $1.98''$ 。经纬仪使用的方位轴角编码器精度为  $1''$ , 显然转角变形大于编码器的精度, 所以在设计时用了两个抗扭薄膜上下排列, 放置在基座与地基环之间, 每个抗扭薄膜的转角变形为  $0.99''$ , 能够满足编码器的精度要求, 因此不会产生方位编码器的定向误差。

## 4 定向误差检测

将抗扭薄膜与调平机构按照图 3 方式分别与地基环和基座进行连接, 使经纬仪光学系统对准平行光管并成像, 记录编码器数值, 驱动方位力矩电机,

依次增加每次的驱动力矩, 每次驱动后, 均将经纬仪对准平行光管成像, 并观测方位编码器的数值变化情况。经试验结果表明, 在经纬仪增加了抗扭薄膜和调平机构后, 即使在力矩电机达到 4 000 N·m 时, 方位编码器的数值均没有变化。

## 5 结论

针对光电经纬仪在调试过程中发现的方位编码器定向误差发生变化的问题, 分析了其产生变化的原因, 提出了采用调平机构和两个抗扭薄膜上下排列的放置这种相互配合的机械结构, 经实践证明, 方位力矩电机在最大扭矩 4 000 N·m 驱动情况下, 没有发现方位编码器产生定向误差的变化, 既实现了垂直轴线角度调整的功能, 同时也解决了方位编码器定向误差发生变化的问题。

## 参考文献:

- [1] Zhao Xueyan, Li Yingchun. Optical Measurement in Shooting Range [M]. Beijing: Institute of Command and Technology, 2001. (in Chinese)
- [2] Paul R Yoder Jr. Opto-Mechanical Systems Design [M]. Beijing: China Machine Press, 2008. (in Chinese)
- [3] Zhao Yongzhi, Zhang Jingxu, Wu Xiaoxia, et al. Modification of altitude axis errors for 1 m aperture telescopes [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(10): 2401-2405.
- [4] Du Junfeng. Design of the wedge leveler [J]. Optics and Precision Engineering, 2003, 11(3): 301-304. (in Chinese)
- [5] Wang Tao, Zhu Mingchao, Yan Shengli. Analysis of LOS pointing error derived from precision of shafting in stabilization mechanism [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(11): 2265-2269. (in Chinese)
- [6] Yang Zhen, Li Guangyun, He Lei. Measurement methods and precision analysis of optical collimation [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(2): 282-286. (in Chinese)
- [7] Zhou Xiaoyao, Fan Dapeng, Zhang Zhiyong, et al. Analysis and design of multi-loop IMC controller for electro-optical serve control systems [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(10): 2020-2027. (in Chinese)
- [8] Liu Hongwen. Mechanics of Materials [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004. (in Chinese)
- [9] Gao Fuhui. Analysis for torsion distortion of an anti-twisting thin film [J]. Opto-Electronic Engineering, 1999, 26(4): 1-5. (in Chinese)