

# E. O. T. S. 电影经纬仪度盘带动过程的研究

杨 观 廉

**摘要:** 本文用实验测试与理论分析的方法研究 E. O. T. S. 电影经纬仪在工作过程中由于水平度盘方位角位置偏移而造成的误差, 并提出消除或减少误差的方法。文章内容可提供电影经纬仪总体设计参考。

## 一、前 言

电影经纬仪是对空中飞行目标进行连续拍照以记录目标运动轨迹的仪器。目标在空间的位置由每一时刻仪器的角位置及仪器与目标的相对角位置所确定, 而仪器的角位置实际上由电影经纬仪镜筒的视轴与两个度盘(水平度盘与垂直度盘)的相对角位置表达。因此, 电影经纬仪的两个度盘基本上决定了飞行目标的空间座标, 故在仪器工作时引起度盘位置变化的任何因素都将造成仪器的测量误差。本文的目的是研究瑞士 Contraves 公司的 E. O. T. S. 电影经纬仪在工作时由于水平度盘位置偏移而造成的误差, 这个误差我们称之为仪器的度盘带动误差。

## 二、E. O. T. S. 仪器结构与度盘带动误差来源

在图1中表示了 E. O. T. S. 电影经纬仪的机械结构图, 图中细线为转动部份, 粗线为固定部份。垂直度盘 2 通过带导电环 3 的立柱、连结锁紧杠杆 6、弹性薄膜 7 与底座连在一起。方位传动是由电机经过方位传动齿轮箱至行星齿轮、与行星齿轮连结的固定大齿轮 5 与带导电环 3 的柱体固定在一起。弹性膜 7 用于仪器的调平, 通过手轮杠杆将顶在薄膜周缘的三个支点升降在相应的高度上来调整。由于薄膜本身的刚度较差, 加以调整后薄膜的变形, 因而更减少了其刚度。当仪器进行方位方向的转动时, 支承部份与导电环的摩擦力以及电机转子、行星齿轮的惯性力将引起薄膜的扭转变形, 因此水平度盘相对于底座将有一角位移, 于是形成了仪器的度盘带动误差。

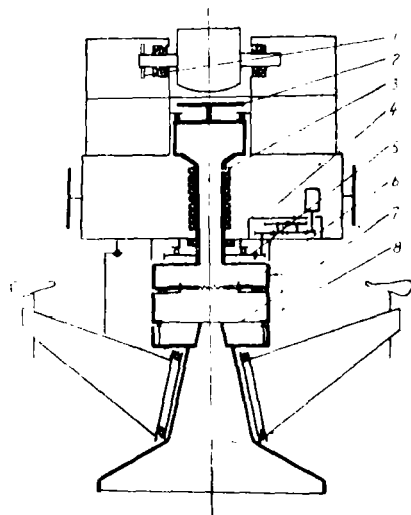


图 1

用自准光管观察贴在仪器 A、B 点(见图 1)处的平镜, 证明, 当仪器进行加速运动时, B 点对 A 点无相对移动, 而根据仪器结构从水平度盘至 D 点成极好的刚性连结, 其动态变形可忽略不计, 因此我们将相对位移测试点 8 选在如图中虚线所示的 B、D 之间。

试验的目的是把仪器在等加速度时度盘的

带动过程记录下来，并建立加速度与度盘带动误差的关系。为此需要得到下列数据：

1. 经纬仪方位驱动的角加速度
2. 经纬仪水平度盘的相对位移

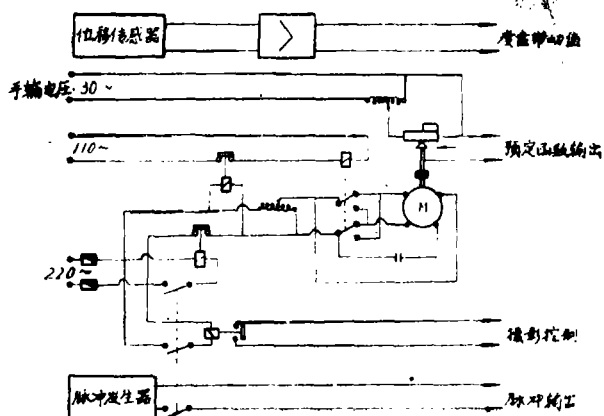


图 2

### 三、试验方法与装置

为了上述目的在试验中装置了由位移传感器、预定函数发生器和脉冲发生器等构成的一整套测试装置，整个装置由控制线路集中控制，该控制线路如图 2 所示。

位移传感器（图 3）是一电阻式的传感器，它由固定螺钉固定在经纬仪  $D$ 、 $B$ （见图 1）点处相连接的角钢支架上（图 4）。传感器经测量放大器将位移信号输出给 8 线示波器把所量测的值记录下来。由定标证明传感器位移量与输出信号的关系是一非常良好的线性关系。

等加速预定函数发生器是由图 4 中的小电机  $M$  带动电位器的电刷以产生线性电压增量，该电压信号通过经纬仪的控制电路输入给方位传动系统的驱动电机，使仪器产生等角加速运动，角加速度的大小用调压器改变电压来实现。为了消除小电机起动时的过渡过程，将电位器的前半部份短路。当电位器转至最大电压值的位置时，由相应的继电器控制小电机反向转动，小电机反向时的过渡过程用小电机本身减速齿轮链的间隙消除之。由于电位器电刷的角位移与输出电压之间成线性关系，所以经纬的方位运动基本上是一个等加速度与等减速的运动。将预定函数发生器的电位器的输出端并联到 8 线示波器，记录其输出电压的变化。

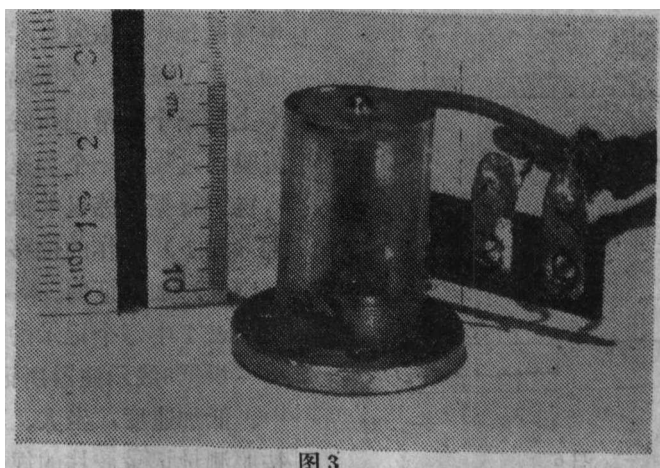


图 3

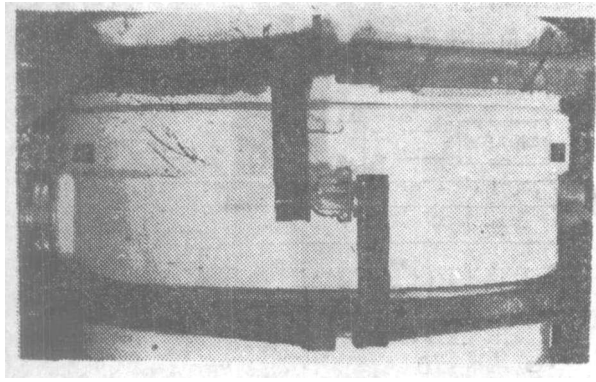


图 4

脉冲发生器的输出信号向经纬仪的控制电路提供摄影脉冲信号，控制闪光灯照明度盘的同时使摄影机快门同步工作，把度盘的瞬时角位置依次摄在胶片上，以记录经纬仪的运动过程。

$t \rightarrow$

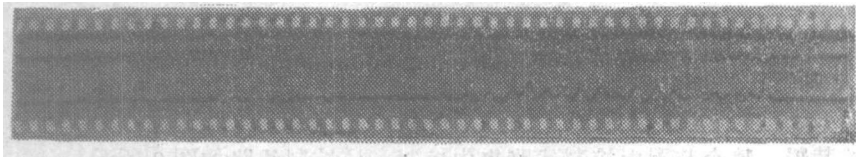


图 5

#### 四、试验结果

我们在五种不同的角加速度条件下并在两种不同载荷（坐人与不坐人）情况下测定了度盘的带动误差，图 5 是其中的一次记录实例。

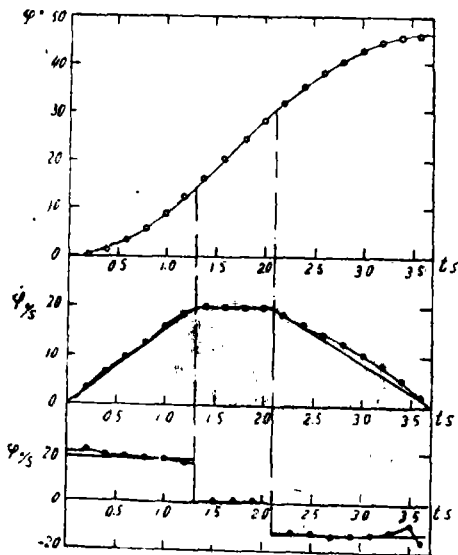


图 6

图的上部是位移传感器的电压信号，它基本上是一个振动波。图的下部是超低频信号发生器的电压信号，它是一个每秒 $60T$ 的正弦波，用来作为计算度盘带动过程的时间参考。图的中部是预定函数发生器的电压信号，它是一个 $50T$ 的正弦波，其振幅随时间变化，包络线基本上是一个光滑的折线，由此可知经纬仪的方位驱动过程是一个加速—匀速—减速的过程，这也可根据经纬仪的摄影机所记录的角位移数据（表 1）所作的位移、速度和加速度的图（图 6）加以证明。

表 1 中每个记录的时间间隔为 $0.1s$ 。

根据 8 线示波器所记录的图形，可分成高、中、低加速度，坐人、不坐人等共六种情况，按照测量记录胶片的规律性可概括成图 7 所示

表1 经纬仪的角位移值 (单位: 度)

0	0.101	0.418	0.901	1.558	2.352	3.310	4.420	5.675	7.085
8.669	10.395	12.245	14.170	16.249	18.130	20.098	22.069	24.035	26.000
27.960	29.866	31.688	33.406	35.031	36.568	38.001	39.346	40.580	41.710
42.730	43.640	44.420	45.065	45.561	45.960	46.062	46.070		

的形式, 图中 a、b、c 为坐人的情况, d、e、f 为不坐人的情况, a、d 为高加速度, b、e 为中加速度, c、f 为低加速度。由图可知度盘带动过程是一振动过程, 在加速度较大时振幅较小且衰减得很快, 在较低的加速度时振幅较大且几乎不衰减。

我们根据度盘带动过程的波形图经过测定计算, 取其极限值的多次平均值得其结果列于表 2。

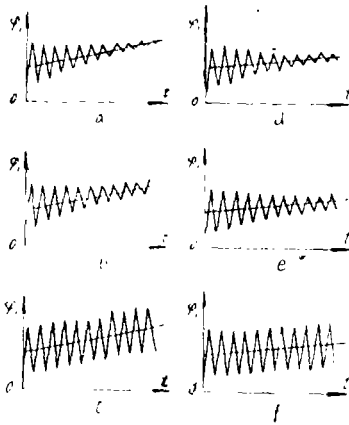


图 7

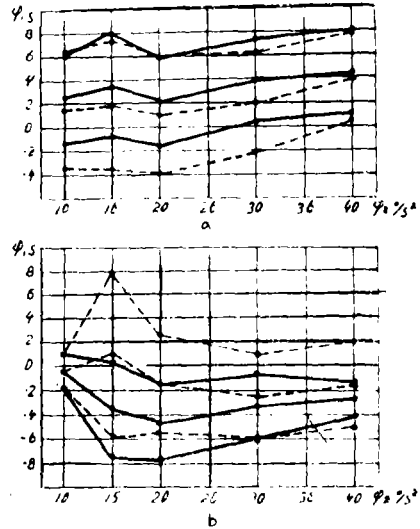


图 8

表2 度盘带动误差极限值

角 加 速 度 值	坐 人		不 坐 人					
	加 速	减 速	加 速	减 速				
10°/s <sup>2</sup>	-1".32	6".29	-1".89	0".85	-3".35	6".52	-1".81	1".06
15°/s <sup>2</sup>	-0".80	7".90	-7".59	0".21	-3".55	7".46	-5".93	7".85
20°/s <sup>2</sup>	-1".61	5".96	-7".69	-1".48	-3".94	6".14	-5".44	2".76
30°/s <sup>2</sup>	0".42	7".23	-5".86	-0".59	-2".05	6".30	-6".19	1".09
40°/s <sup>2</sup>	1".14	8".03	-4".17	-1".25	0".41	7".98	-5".02	2".18

图 8 是根据上述数据所作的曲线， $a$  为加速时的情况， $b$  为减速时的情况，实线表示坐人，虚线表示不坐人，中间线为振动波的中值。

### 五、物理本质的动力学分析

为了更明确地阐明这一过程的物理本质，以下我们从动力学的角度进行分析。

图 9 表示了仪器的传动简图，方位驱动电机经齿轮箱传至行星齿轮从而使仪器产生方位转动，当仪器转动时度盘立柱动力平衡方程式可表示如下：

$$\begin{aligned} (J_1 + J_4)\ddot{\varphi}_1 + f_1(\dot{\varphi}_1) + c\varphi_1 &= i_{41}J_4\ddot{\varphi}_4 + i_{21}J_2\ddot{\varphi}_2 + f_4(\dot{\varphi}_4) \\ &= (i_{41}J_4 + i_{21}i_{24}J_2)\ddot{\varphi}_4 + f_4(\dot{\varphi}_4) \\ &= J_c\ddot{\varphi}_4 + f_4(\dot{\varphi}_4) \end{aligned} \quad (1)$$

- 式中  $J_1$ ——度盘柱体在弹性膜以上部份的转动惯量；  
 $J_2$ ——整个方位传动齿轮箱（包括电机转子）在输出轴 $\varphi_2$ 处的转动惯量；  
 $J_4$ ——方位转动部份绕旋转轴的转动惯量；

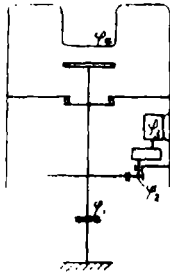


图 9

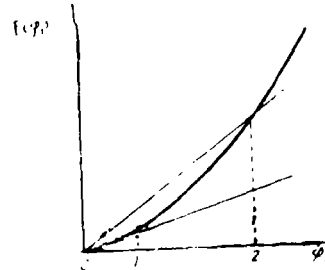


图 10

$i_{41}, i_{21}, i_{24}$ ——各相应轴的速比；

$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_4$ ——各相应轴的角度位移值；

$f_1(\dot{\varphi}_1)$ ——为度盘柱体扭转时的摩擦阻力矩，其具体形式由薄膜变形时材料的内摩擦性质决定之；

$f_4(\dot{\varphi}_4)$ ——为仪器转动部份的摩擦带动力矩，具体形式取决于摩擦性质，按仪器结构可知这部份的摩擦是由导电环部份的乾摩擦与滚珠轴承部份的黏滞摩擦综合而成，根据文献<sup>[1, 2]</sup>上列摩擦力矩可写成如下形式：

$$\begin{aligned} f_1(\dot{\varphi}_1) &= k_1\dot{\varphi}_1^2 \\ f_4(\dot{\varphi}_4) &= k_4\dot{\varphi}_4 + R \end{aligned}$$

式中  $k_1, k_4, R$ ——均为常数。将上两式代入方程式 (1) 可得下列形式：

$$(J_1 + J_4)\ddot{\varphi}_1 + k_1\dot{\varphi}_1^2 + c\varphi_1 = J_c\ddot{\varphi}_4 + k_4\dot{\varphi}_4 + R \quad (2)$$

方程式 (1) 为一强迫振动方程式，其振动波的形式既取决于干扰力  $J_c\ddot{\varphi}_4$  的形式也取决于仪器角加速度  $\ddot{\varphi}_4$  的形式，若仪器作等角加速度转动时  $J_c\ddot{\varphi}_4$  为常数则方程式 (2) 有以下形式：

$$\begin{cases} (J_1 + J_4)\ddot{\varphi}_1 + k_1\dot{\varphi}_1^2 + c\varphi_1 = J_c\ddot{\varphi}_4 + k_4\dot{\varphi}_4 + R \\ \varphi_4 = \alpha \end{cases} \quad (3)$$

微分方程式 (3) 的解十分复杂，且一般都只能采用图解的方法，因此不能求得具一般

表达式, 为了定性地决定度盘的带动过程, 以下我们近似地求出方程式 (3) 的一般表达式。将方程式中各系数作适当整理可表示为下列式:

$$\ddot{\varphi}_1 + k\dot{\varphi}_1^2 + P\varphi_1 = A + Bt \quad (4)$$

(4) 式中左边第二项的数值与角速度的关系如图10所示, 为了方便起见将角速度 $\dot{\varphi}_1$ 的变化范围分成两部份, 自0至1为低速变化范围, 自1至2为高速变化范围, 每一变化范围用连接二点的直线代替其曲线部份, 这时第二项可用 $k\dot{\varphi}_1$ 代替, 其中 $k$ 为直线的斜率, 这样方程式 (4) 可近似地表示如下:

$$\ddot{\varphi}_1 + k\dot{\varphi}_1 + P\varphi_1 = A + Bt \quad (5)$$

当 $\dot{\varphi}_1$ 在低速范围工作时 $k$ 取小值, 当 $\dot{\varphi}_1$ 在高速范围工作时 $k$ 取大值。简化后的微分方程式很容易求出其一般解, 它有下列两种形式:

$$\text{当 } P \gg k \text{ 时 } \varphi_1 = A_1 + B_1t + c_1 \exp P_1t + c_2 \exp P_2t \quad (6)$$

$$\text{当 } k \gg P \text{ 时 } \varphi_1 = e^{-\alpha t} A_2 [1 + B_2t - \cos(Pt + \alpha)] \quad (7)$$

式中  $A_1, A_2, B_1, B_2, c_1, c_2, P_1, P_2, \alpha$  均为常数, 在图11上表示了公式 (6) 与 (7) 的一般形式, 其中  $a$  为低速范围时的情况, 而  $b$  为高速范围时的情况, 由图可知: 在低速范围时薄膜振动不消振, 在高速范围时薄膜振动很快消除, 而在上述两种情况下振动中心都将随时间而增高, 所有这些结果与我们实验所得的结果基本上是符合的。

从上述情况出发, 我们来分析一下在这种振动情况下所引起度盘带动误差的分布规律。

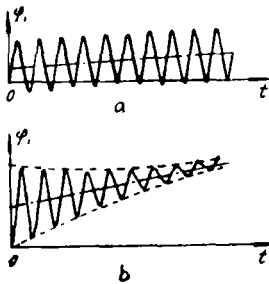


图11

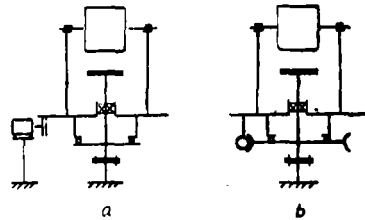


图12

众所周知, 对于一般性的周期函数可写成下列形式:

$$\varphi_1 = \sum_{k=1}^n A_k \cos(P_k t + \phi_k) \quad (8)$$

设经纬仪的摄影频率为  $n$ , 则摄影时间应为  $t = \frac{1}{n}, \frac{2}{n}, \frac{3}{n}, \dots, \frac{i}{n}$ , 与此相应的度盘带动量为:

$$\varphi_1 = \sum_{k=1}^n A_k \cos\left(-\frac{P_k i}{n} + \phi_k\right), \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (9)$$

若 (9) 式中  $P_k$  与  $n$  无公约数时  $\varphi_1$  的概率分布函数是一组多个反余弦分布的组合, 对于单个反余弦分布来说, 用来表徵概率分布特性的两个系数即相对不对称系数  $\alpha$  与相对分散性系数  $\lambda$  相应为<sup>[3]</sup>:

$$\alpha = 0, \quad \lambda = 0.71 \quad (\text{其中 } \lambda \text{ 取用 } \frac{\sigma}{\delta} = \lambda)$$

由于经纬仪在实际工作时并非在恒定的等加速度 (或等减速度) 情况下, 其振动波的幅

度随着速度的变化而变化。设仪器在上述加速度范围内工作时，其幅度的变化值在相应于上述加速度时极限偏差范围内变动，则中误差值的变化将相应于极限偏差的0.71倍的变化范围内变动。按相对分散性系数求出各种加速度情况下中误差值，然后再按这些数值求出其总的平均值，显然，度盘带动的中误差必将接近于这个平均值，因此我们按上述原则求得度盘带动的中误差为3"。此外我们又按表2的数值求得了度盘带动的平均值约为0".36。

## 六、减少度盘带动误差的方法

为了减少度盘带动误差的影响在结构与使用时都应加以考虑，这一方面可以增加薄膜的厚度，另一方面可减少薄膜三个调平点在厚度方向的偏移量，从而增加了薄膜的刚度减少了度盘的带动误差。如果在设计时尽量使薄膜部份不受或少受驱动力矩的作用可减少度盘带动误差，在图12上表示了两种结构设计方案，其中a为滚轮传动方案（也可用齿轮传动），b为蜗轮蜗杆传动方案（也可用齿轮传动），在a的方案里电机基座与经纬仪不连接，度盘带动只受滚珠轴承部份的摩擦力矩影响，这部份的力量是很小的。在b的结构方案中由于电机基座装在仪器上这样当电机有加速度时其反作用力矩由薄膜承受从而产生度盘带动误差。

减少度盘带动误差的另一途径可用补偿或修正的方法。就是在仪器工作的同时记录度盘带动过程中每一方位记录时刻的带动误差以便在实时输出时加以修正，这对于仪器在作更精密的测量工作时是有现实意义的。

## 七、几点基本结论

1. 电影经纬仪的度盘带动误差是指仪器在工作时由于水平度盘位置偏移而造成的误差，这个误差主要是由于惯性力矩与摩擦力矩引起的。
2. 度盘带动过程是一振动过程，这个过程在较高的加速度时其振幅较小且衰减得很快，在较低的加速度时振幅较大并且几乎不衰减。
3. 实验与分析证明：E.O.T.S.电影经纬仪方位度盘带动误差的概率分布函数是一组多个反余弦分布的组合，在仪器一般工作条件下其中误差约为3"，平均值约为0".36。
4. 在进行电影经纬仪的总体结构设计时必须考虑减少度盘带动误差对测量精度的影响，对于存在度盘带动误差的经纬仪来说，在作精密测量时必须采取减少误差的措施，减少误差最有效的方法是在仪器工作同时记录度盘带动误差在实时输出时进行修正。

陈淑珍同志与原八一二〇部队孔祥焱同志参加了实验工作，本文的原始工作报告曾经唐九华同志审阅，在此一并致谢。

参 考 文 献

- [ 1 ] Пановко Я.Г., Основы прикладной теории упругих колебаний, Машгиз, 1957.
- [ 2 ] Пановко Я.Г., Внутреннее трение при колебаниях упругих систем, Физматиздат, 1960.
- [ 3 ] Коротков В.П. и Тайц Б.А., Основы метрологии и точности механизмов приборов, Машгиз, 1961.

**Research for the Drift Process of the Graduation  
Disk in E.O.T.S. Cinetheodolite**

Yang Guanlian

**Abstract**

This paper discusses the error caused by azimuth drift of the horizontal graduation disk during the working process of E. O. T. S. Cinetheodolite using experiments and theoretical analysis, and puts forward a method for eliminating or reducing the error. This paper may provide a reference for total design of the cinetheodolite.