

单杆操纵器的特性与跟踪精度

王 连 义*

摘 要

文中对装有零位短路开关的差动变压器式单杆操纵器的原理和结构特性进行了阐述,并给出了实测性能数据以及跟踪精度对比实验情况。

该装置采用陀螺框架和顎式归零机构,在高低温、冲击、振动的情况下,操纵特性与归零性能良好。

单杆输出三种信号(速度、位移、加速度)迭加而成的两路(方位、俯仰)信号,能同时控制仪器的方位与俯仰运转,对测量仪器,在国内首次实现了单人操纵,跟踪精度达 $0.7'$ (均方值),比双手手轮操纵的同类型仪器提高 $2\sim 3$ 倍,成功的用于两种型号的大型测量仪器上。

一、前 言

国内研制的大型测量仪器的半自动跟踪过去一直是采用双人操纵,其中一个操作手通过手轮操纵器控制仪器的方位运动,另一个操作手控制仪器的俯仰运动。一台仪器需要两只瞄准望远镜,两套手轮操纵器和两名操作手,而且跟踪误差较大。随着新技术如:“红外”、“激光”、“电视”不断在大型测量仪器上应用,要求增加镜筒的数量,与两只瞄准望远镜在位置上发生矛盾,而且这些新技术的应用也需要增加相应的操作人员,不但位置紧张,也增大了仪器的转动惯量。特别对船载与机载测量仪器,由于要在平台上工作,平台的负荷能力有限,迫切要求改变操纵方式,减少操作人员,提高跟踪精度,研制新型的单人操纵器。这种新型的单人操纵器被命名为单杆操纵器。瞄准员操纵手柄前后移动时控制仪器的俯仰运动,左右移动时控制仪器的方位运动,斜方向移动时,同时控制俯仰与方位运动。一台仪器只需一名瞄准员操纵控制仪器的方位及俯仰运动,跟踪精度也得到了很大提高。

二、半自动跟踪系统简介

大型测量仪器的主要作用是动态测量飞行物体的准确座标位置,即要求在任何瞬间都能拍摄到飞行目标,而且要保证足够的跟踪精度,对装有激光测距的测量仪器尤属必要,要靠半自动跟踪或自动跟踪来实现。

单杆操纵器是仪器的人工控制部分,它与电路及瞄准望远镜组成半自动跟踪系统。半自

* 本文为单杆操纵器机械部分的研制总结,共研制了两种型号(A型与B型)的单杆操纵器,分别用于两种新型测试仪器上。B型的合作者为何志刚,畅巨明、陈晓参加过环境实验,孙玉珍参加过A型的调试。

动跟踪的过程是：人根据瞄准望远镜中的目标与参考点（十字丝中心）之间的偏差移动手柄，使仪器转动，把目标拉向十字丝中心，并把偏差保持在允许的范围以内，才能使目标不脱靶。这一过程可用图 1 表示。

目标在瞄准镜上观察到的运动情况一般的说，不仅存在位置（角度）和速度，而且也存在加速度。这时只有仪器以目标同样的运动规律运转，才不会出现偏差。

为使操作简单，要求单杆操纵器及其电路不仅能够提供产生角速度的信号，而且也提供产生角加速度的信号，即在瞄准员的一个操纵动作中，应能同时产生两路位移、两路速度和两路加速度信号。

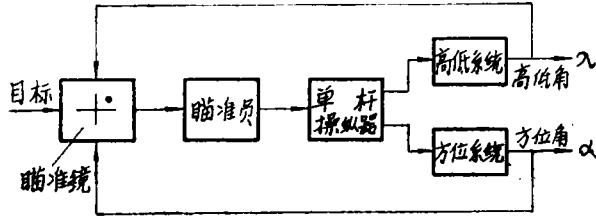


图 1 半自动跟踪示意图

1. 位移信号

在操纵的瞬时产生，其大小与操纵速度成正比。这一信号使仪器产生一角位移，正比于单杆的角位移。手不动时仪器也停止运动，所以称为仪器的位移信号。这一信号由装在单杆操纵器中的直线测速机给出。

2. 速度信号

其大小与单杆操纵器手柄转角 φ 成正比，使仪器按此比例作等速运转，所以称为仪器的速度信号。这一信号由装在单杆操纵器中的差动变压器产生。

最简单的控制线路是采用两种信号（位移、速度），把这两种信号按一定比例相加，就能满足跟踪等速目标的需要。两种信号相加以后的控制特性曲线如图 2。

t_1 ——手动时间（秒）；

t_2 ——手停止在某一位置不动的时间（秒）。

如果飞行目标具有加速度，采用两种信号跟踪时，就需对单杆操纵器手柄进行不停的操纵。

3. 加速度信号

在跟踪变速目标时，为了减轻瞄准员的负担，提高跟踪精度，需要再加一种加速度信

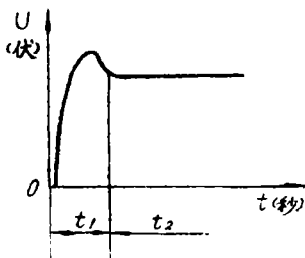


图 2 两种信号控制特性曲线

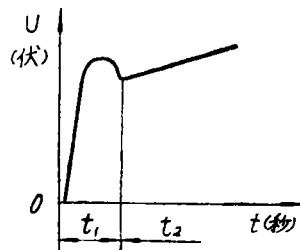


图 3 三种信号控制特性曲线

号。它与时间成正比变化。这一信号在单杆操纵器手柄转角 φ 不变的情况下,使仪器作等加速转动。该信号称为加速度信号,靠积分电路对速度信号积分取得。

三种信号按一定比例相加的控制特性曲线如图3。

三、工作原理

速度信号是由差动变压器产生的,差动变压器的组成如图4。

其活动部分为球面衔铁,由1J79软磁合金制成,可绕固定点0在 $\pm 15^\circ$ 圆锥角内任意活动。固定部分为铁芯和线圈。铁芯由硅钢片制成,由两组叠在一起,呈立体山字形,如图5。

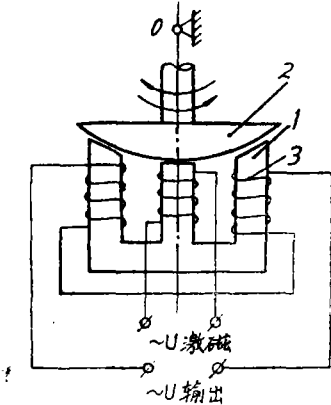


图4 差动变压器组成简图
①铁芯 ②球面衔铁 ③线圈

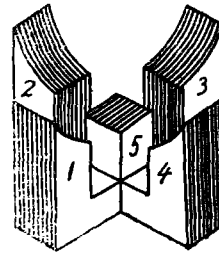


图5 差动变压器铁芯简图

铁芯共有5只脚,中间脚⑤放初级线圈,供差动变压器激磁,其余4只脚放次级线圈。相对应的两只线圈(①、③和②、④)作反向串联输出,分别控制仪器的方位与俯仰运动。

脚①、③(或②、④)上之线圈参数相同,反向串联后相位相差 180° ,球面衔铁处于中间位置时,由于磁路对称,输出电压近似为零。当球面衔铁偏离中间位置时,磁路的对称遭到破坏,产生电压输出。

根据麦克斯威形式的电磁感应定律可以得出差动变压器空载状态下的特性为⁽¹⁾:

$$e_2 = - \left[\frac{d\phi_1(t)}{dt} W_2 f(\varphi) + \phi_1(t) W_2 \frac{df(\varphi)}{d\varphi} \frac{d\varphi}{dt} \right]$$

e_2 ——差动变压器的输出电动势;

$\phi_1(t)$ ——激磁磁通随时间变化的函数(如电源电压按正弦变化,不考虑磁感应的失真时 $\phi_1(t)$ 为正弦函数);

$f(\varphi)$ ——磁链数随球面衔铁转角 φ 变化的函数(也就是表示静特性曲线形状的函数), φ 为手柄转角;

W_2 ——次级线圈(①或③、②或④)的匝数。

式中第一项是差动变压器的静特性,第二项表示动态特性,它正比于球面衔铁的移动速度,若磁通按谐波规律变化,则第二项相位移过 90° 。

由于操纵手柄移动速度不大,第二项(动态特性)很小,可以忽略不计。

位移信号由直线测速机给出,为直流永磁式,如图6。

动子①由永久磁钢制成。其外伸端部有 $\phi 7Gd$ 孔,通过单列向心球轴承与操纵杆内的小

轴联接。定子②由线圈及外壳组成。在其端部与动子一样,也有 $\phi 7Gd$ 孔,安装轴承和联接用。

动子①可在定子②中滑动,滑动时产生直流电压信号,其大小与滑动速度成正比。其灵敏度 > 6 毫伏/毫米/秒。

直线测速机共有两只,安装位置相互垂直,分别控制方位与俯仰运动,与操纵手柄联动。

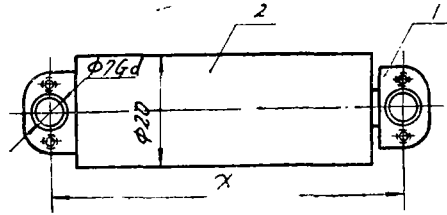


图6 直线测速机简图

中心距: $x_{\text{最小}} = 62$ $x_{\text{最大}} = 82$ ①—动子, ②—定子

四、机械结构

1. 陀螺框架与颚式归零机构: 结构示意图如图7。

为使球面衔铁②能绕一固定点旋转,采用了陀螺框架结构。球面衔铁固定在内框架④的下端,其上端联接操纵手柄⑤,内框架通过滚动轴承固定到外框架③上,外框架通过滚动轴承固定到机壳⑥上。

为使球面衔铁能自动归零(不操纵时自动回到中间位置),采用了颚式弹簧归零机构⑦。共有两个,其一装在外框架上,另一装在内框架上。

2. 零位短路开关及极限开关

手柄在每次操纵后,归零机构不能保证球面衔铁百分之百地回到零位,其归零误差在实验室条件下测得的数据是 $< 1'$,这一误差反映到残压的变化量约为 ± 20 毫伏(解调后),会使仪器造成爬行。除此之外,在温度变化($+60 \sim -35^{\circ}\text{C}$)时残压也有一定变化。为了解决这一问题,在归零机构上装有零位短路开关,如图8。

零位短路开关在不操作时自动闭合,操作时自动分开,接通区域为 $3' \sim 5'$,这就保证了单杆操纵器在零位时输出电压为零,有效地解决了仪器的爬行问题。零位短路开关有两组,一组装在高低方向,另一组装在方位方向。

为使仪器能在最大速度与最大加速度下运转,在手柄转到 $\pm 15^{\circ}$ 时自动接通微动开关(共4只),以得到阶跃信号。

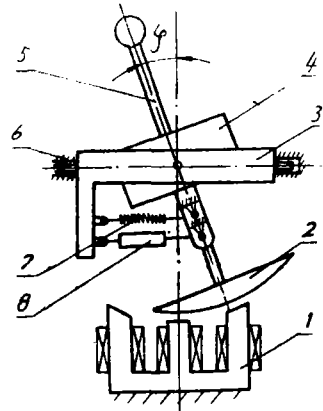


图7 单杆操纵器结构示意图

- ① 立体山字形铁芯线圈 ② 球面衔铁
- ③ 外框架 ④ 内框架 ⑤ 手柄
- ⑥ 机壳 ⑦ 颚式归零机构 ⑧ 直线测速机

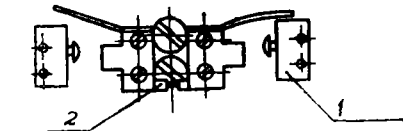


图8 零位短路开关

- ① 极限开关 ② 零位短路开关

五、手柄操纵力的计算与分析

实验表明⁽²⁾，手柄操纵力的大小与性质（各向受力不均匀程度），亦即操作手的力感，是影响半自动跟踪精度的重要因素之一。由陀螺框架及顎式归零机构组成的单杆操纵器的活动部分简化后的受力情况如图9。

B 点为手柄上端，即操纵部位； A 点为弹簧悬挂点； O 点为陀螺框架中心。

Q ——手柄操纵力，由人给出；

P_α 和 P_λ —— α （方位）和 λ （俯仰）方向顎式归零机构上的弹簧作用给手柄轴上的力。

当 B 点受与 α 方向成 θ 角的 Q 力作用后，操纵手柄 BA 转动 φ 角， B 点的位移量为 B_1B ，其在 α 方向与 λ 方向的投影分别为 B_1B' 、 B_1B'' 。

$$B_1B = OB \sin \varphi$$

$$B_1B' = OB \sin \varphi \cos \theta$$

$$B_1B'' = OB \sin \varphi \sin \theta$$

同理 A 点的位移量为：

$$A_1A = OA \sin \varphi$$

$$A_1A' = OA \sin \varphi \cos \theta$$

$$A_1A'' = OA \sin \varphi \sin \theta$$

其中 A_1A' 与 A_1A'' 即为 α 方向与 λ 方向的弹簧位移量。如 α 与 λ 方向的弹簧初变形量 f_0 调到相同，则在 Q 力作用下 α 与 λ 方向的弹簧伸长量 x_α 及 x_λ 为：

$$x_\alpha = f_0 + OA \sin \varphi \cos \theta$$

$$x_\lambda = f_0 + OA \sin \varphi \sin \theta$$

当 α 与 λ 方向的弹簧刚度 P' 选择的相同时，则 α 与 λ 方向的弹簧拉力为：

$$P_\alpha = P' x_\alpha$$

$$P_\lambda = P' x_\lambda$$

弹簧合力 P ：

$$P = \sqrt{P_\alpha^2 + P_\lambda^2}$$

弹簧刚度 P' ：

$$P' = \frac{Gd^4}{8(D-d)^3n}$$

手柄受力 Q ： $Q = \frac{OA}{OB} P$

将上式代入并整理得：

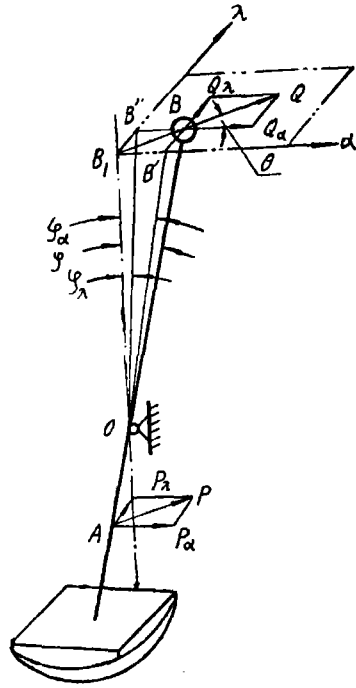


图9 操纵手柄受力图

$$Q = \frac{OA}{OB} \frac{Gd^4}{8(D-d)^3n} \sqrt{2f_0^2 + (OA \sin \varphi)^2 + 2f_0 OA \sin \varphi |\sin \theta + \cos \theta|} \dots\dots (1)$$

OA, OB ——结构尺寸, $OA = 22.5$ 毫米, $OB = 122$ 毫米;

G ——弹簧剪切弹性模数, 对钢材 $G = 8000$ 公斤/毫米²;

D ——弹簧外径;

d ——弹簧钢丝直径;

n ——弹簧有效圈数;

f_0 ——手柄在零位(中间位置)时弹簧的伸长量(装配时调整好);

θ ——手柄位移方向与 α 方向的夹角在水平面上的投影, $\theta = 0 \sim 360^\circ$;

φ ——手柄偏离零位的角度, $\varphi = 0 \sim 15^\circ$ 。

将式①图解(选极坐标)则得出手柄在 $\varphi = 0 \sim 15^\circ$, $\theta = 0 \sim 360^\circ$ 时的受力图。

(1) 手柄偏离零位的角度 φ 相同时, 手柄在不同方向的受力曲线为一梅花瓣形。当 θ 等于 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ 和 270° 时手柄操纵力 Q 为最小值; 当 θ 等于 $45^\circ, 135^\circ, 225^\circ$ 和 315° 时手柄操纵力为最大值。

(2) 手柄在零位时弹簧的伸长量 f_0 。如果调整在 $f_0 = 0$ 时, 则式①右边根号中的第一与第三项为零, 手柄操纵力 $Q = \frac{OA^2}{OB} \frac{Gd^4}{8(D-d)^3n} \sin \varphi$ 为一圆形, 即手柄操纵力的大小只与手柄偏离零位的角度 φ 有关, 而与手柄位移方向 θ 无关。此时各向受力是均匀的。

实际上不可能把 f_0 调整到零, 因为当 $f_0 = 0$ 时由于摩擦力的影响, 手柄不操作时不能自动归零, 而停止在 φ 等于某一小角度的状态。

为了使手柄各向受力尽量均匀按式①应把 f_0 调整得尽量小, 但以不影响手柄归零为限。因此要求各运动部位尽量采用滚动摩擦, 以减小摩擦力。

调整好以后使用满意的单杆操纵器手柄受力大小的计算值与实测值列于表 1。拉伸弹簧的参数为:

$D = 12$ 毫米, $d = 2$ 毫米, $n = 9$, 材料为弹簧钢丝, 冷绕后回火处理, α 与 λ 两个方向的弹簧参数相同, 装配时调整好 $f_0 = 1.5$ 毫米。

表 1

手柄位移方向 θ 手柄转角 φ	手柄操纵力 Q (公斤)							$\frac{Q_{max} - Q_{min}}{Q_{max}}$	备注
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°		
$1^\circ 10'$	0.809	0.829	0.841	0.846	0.841	0.829	0.809	4%	计算值
	0.68	0.72	0.79	0.80	0.75	0.69	0.67	16%	实测值
$7^\circ 30'$	1.536	1.603	1.645	1.658	1.645	1.603	1.536	7%	计算值
	1.40	1.48	1.50	1.55	1.51	1.47	1.44	10%	实测值
15°	2.451	2.536	2.587	2.605	2.587	2.536	2.451	6%	计算值
	2.11	2.19	2.34	2.49	2.30	2.20	2.14	15%	实测值

将表 1 图解(选极坐标), 则得出手柄搬动角度 $\varphi = 0 \sim 15^\circ$, 手柄位移方向与 α 方向的夹角 $\theta = 0 \sim 90^\circ$ 时的手柄受力曲线, 如图 10。 $\theta = 90 \sim 180^\circ$, $180 \sim 270^\circ$, $270 \sim 360^\circ$ 时的受力曲线与该曲线对称。

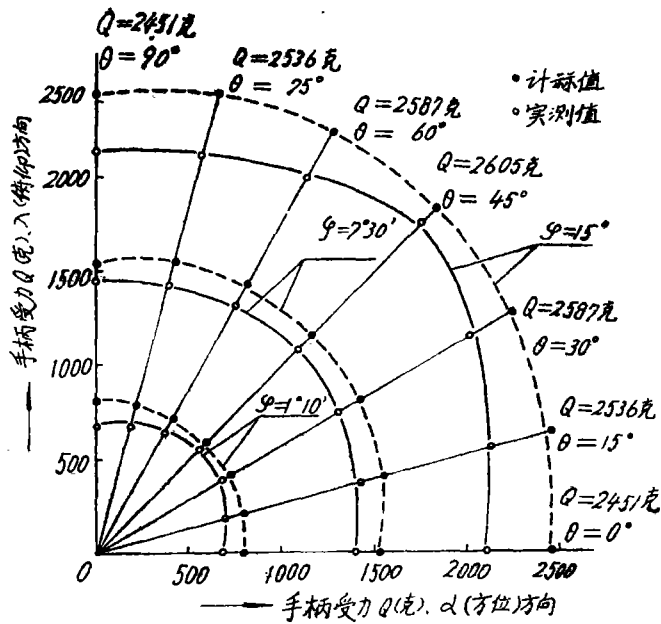


图10 手柄受力曲线

六、技术特性

1. 设计指标及实测值如表2

表2

No	测试项目	设计指标	实测值	备注
1	残压	<100毫伏	<100毫伏	空载测量
2	最大输出	15伏	>15伏	空载测量
3	线性度误差	±4%	±1.5%	空载测量
4	灵敏度	0.5伏/度	>0.5伏/度	空载测量
5	对称性误差	10%	<4%	空载测量
6	相移	≤8°	<6°	加40KΩ负载后无变化
7	手柄活动范围	±15°(锥角)	±15°(锥角)	
8	手柄归零误差	5'	<2'	
9	手柄受力范围	<3公斤	0.25—2.5公斤	
10	手柄各向受力不均匀度	>20%	<16%	$\frac{Q_{max} - Q_{min}}{Q_{max}}$
11	零位短路开关接通区域	<5'	<5'	

说明:

- (1) 测试条件:
 差动变压器激磁: 30伏, 400赫;
 室温: 12℃—20℃;
 电源波动<2%。

(2) 使用仪器:

真空管毫伏表、1025A型双线示波器、记录仪、直流数字电压表、音频信号发生器, 读数显微镜、分划板和专用夹具。

2. 特性曲线

差动变压器的输出特性每台有少量差别, 但规律相同, 如图11所示。

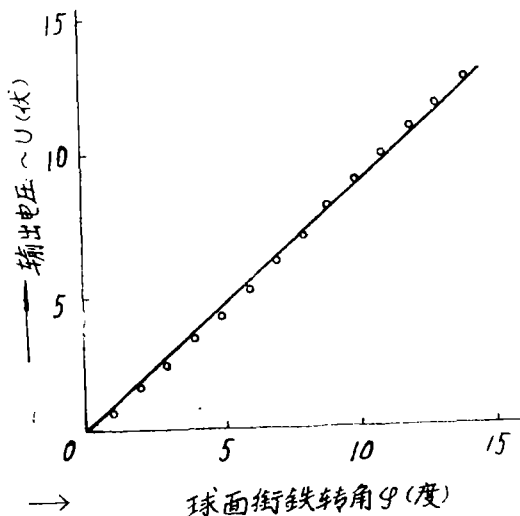


图11 差动变压器输出特性曲线

单杆编号: A-05方位(右)输出特性

工作条件: 输出线圈4400匝 $\phi 0.06$ 漆包线,

激磁线圈2000匝 $\phi 0.13$ 漆包线

激磁: 400赫 30伏, 残压: 19—23毫伏

相移: 6度, 线性度: 2.3%

3. 主要技术指标的稳定性

通过常温下多次测试(一年), 高温(到 $+60^{\circ}\text{C}$)、低温(到 -40°C)、振动(0—33Hz、0.75—1.5g)、冲击(4g), 除残压有一定变化, 灵敏度在低温时稍有提高($<10\%$)外, 其余指标未发现变化。残压变化值列于表3。

表3 残压的稳定性(单杆编号: A-05)

实 验 项 目		残压变化值 (mV)		备 注
		高低 α	方位 λ	
常 温	调好后(交流)	10—20	20—25	空 载 空 载
	1年后(交流)	16.5—21.5	15.5—17.5	
低温至 -40°C	交流变化量	40.5	32	经过二极管门电路
	直流变化量	13.5	23	经过二极管门电路
高温至 $+60^{\circ}\text{C}$	交流变化量	41	48	经过二极管门电路
	直流变化量	11	17	经过二极管门电路

实 验 项 目			残压变化值 (mV)		备 注
			高低 α	方位 λ	
振 动	0.75g	交流变化量	2	0	振动30分钟后测
	0—33Hz	直流变化量	+7	-2.5	振动30分钟后测
	1.5g	交流变化量	2	0	振动30分钟后测
	0—33Hz	直流变化量	7	5	振动30分钟后测
冲 击	4g半小时后	交流变化量	0	3	冲击实验后测
		直流变化量	3.1	2.5	冲击实验后测

仪器交付使用三年后对其中的两台 (A型单杆操纵器) 的主要指标: 手柄受力 ($\varphi = 0^\circ$ 及 $\varphi = 15^\circ$)、残压、最大输出及零位短路开关进行了测试, 有一台由于联接件松动发生变化, 经调正后恢复正常, 另一台的变化量很小, 未超出允许范围。

七、跟踪精度对比实验

为了比较单杆操纵器与手轮操纵器 (双人操纵) 的跟踪性能, 分别在 1 号测量仪器和 2 号测量仪器上进行对比实验。瞄准员对单杆操纵器与手轮操纵器进行短期训练后记录数据。

实验方法是: 瞄准镜对准一固定靶标, 然后用正弦信号引导测量仪器作正弦运行。瞄准员从瞄准镜中看到靶标偏离十字丝中心即操纵单杆手柄或手轮把靶标拉回中心, 同时开动摄影机进行拍摄。分析照片即可计算出跟踪精度。

实验结果列于表 4 和表 5 (同一瞄准员操纵)。

表4

使用测量仪器	目标速度	目标加速度	单杆跟踪误差		手轮跟踪误差	
			最大值	均方值	最大值	均方值
型号 1	8度/秒	0.6度/秒 ²	4.5'	2.4'	5.9'	2.6'
	8度/秒	1度/秒 ²	6'	2.8'	11.3'	5.1'
	8度/秒	2度/秒 ²	8'	3.7'	15.4'	6.2'
	8度/秒	3度/秒 ²	18'	6.8'	脱靶	脱靶

表5

使用测量仪器	目标速度	目标加速度	单杆跟踪误差		手轮跟踪误差	
			方 位	高 低	方 位	高 低
型号 2	10度/秒	1度/秒 ²	1.39'	1'	3.5'	2.1'
	10度/秒	2度/秒 ²	3.36'	2.48'	4.3'	3.62'
	10度/秒	3度/秒 ²	5'	3.8'	脱靶	脱靶

单杆操纵的与双手轮操纵的同类型大型测量仪器的跟踪精度对比如表6。其中型号09测量仪器由单杆(A型)操纵,其跟踪误差为室内鉴定数据;型号01—08测量仪器均由双手轮操纵,其跟踪误差根据现场实测数据(由用户提供)笔者计算整理。

表6 同类型测量仪器跟踪精度对比

序号	仪器型号	目标速度(度/秒)	目标加速度(度/秒 ²)	跟踪误差(分)			备注
				最大值	均方值	均方值	
1	01	0.8—1.3	<0.3	+7'	-6'	2.5'	手轮操纵
2	02	1—2	<0.2	+5'	-7'	2.0'	手轮操纵
3	03	<0.02	<0.02	+0.9'	-2.6'	1.5'	手轮操纵
4	04	0.6—1.1	<0.4	+3.5'	-15.7'	4'	手轮操纵
5	05	0.01—0.05	<0.035	-4.0'	-8.9'	2.5'	手轮操纵
6	06	<0.4	<0.05	+2'	-12'	4'	手轮操纵
7	07	0.5—1.5		+11'	-3'	4'	手轮操纵
8	08	<0.5		+5'	-5'	3'	手轮操纵
9	09	10	2.25	+3.7'	-2.5'	0.7'	单杆操纵

八、结 语

这种二维单杆操纵器的速度信号由于采用了差动变压器结构,活动部分与固定部分之间属于非接触式,因此使用寿命很长,整个装置活动部分摩擦力很小。位移信号采用永磁式直线测速机,输出信号强,工作稳定,降低了对电路部分的要求。陀螺框架及颚式归零机构,能保证在无人操纵时手柄精确的回到中间位置。

经过环境实验和长期考验证明:这种装有零位短路开关的、采用陀螺框架和颚式归零机构的差动变压器式单杆操纵器,在高低温(+60℃—40℃)变化、冲击、振动的情况下,操纵特性与归零性能良好。

大量的实验和在两种型号的大型测量仪器上的应用表明,采用单杆操纵器不仅比手轮操纵器节省一名操作手和一台瞄准望远镜,而且跟踪精度提高2—3倍,特别在飞行目标具有大的速度与大的加速度时更为明显。

参 考 文 献

- [1] А.А.ОДИНЦОВ, ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОЭЛЕМЕНТОВ ГИРОСКОПИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ГЛАВА3, Москва
- [2] 青木和产·野 木明,人间工学—装置设计者のための,1963,人間と技術社,
- [3] 明石一·橋木宽:“システムと制御”15, No5·419~427 1971
- [4] 小畑秀文、磯部孝:“计测自动制御学会论文集”1970 6 No3,221~227.
- [5] 国外电子工程编辑部·靶场测量设备概论 §3—3, 1973.
- [6] 光学机械 1973年第二期 25—31.

* 表4、表5中的数据为B型单杆操纵器电路部分负责人宋志斌等同志提供;表6序号9中的数据是与A型单杆操纵器电路部分研制者沈阳自动化所韩延鹏、佟巨山共同完成的。该文经过于传瑾同志审阅,谨此致谢。