

文章编号 1004-924X(2006)05-0847-06

# 机载光电稳定平台检测技术的研究

李 岷, 马 军, 周兴义

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:**给出了机载光电稳定平台的检测技术及方法,并提出了一种动态靶标的结构方案及原理,使其能够进行静态、动态的参数测试,尤其是可见光和红外成像系统同时工作时各种参数的测试。在此基础上为建立测量基准的传递方法、形成系统的光电侦察平台总体检测技术提供必要的准备和基础。着重阐述了机载光电稳定平台的静态、动态时的角度测量方法,首次提出了一种利用光线对接方法,实现可见与红外同时测量。还提出了一种数学计算方法,通过两个角度的测量和空间矢量法计算,得出动态靶标的空间坐标,以此作为机载光电稳定平台的指向坐标的真值,并给出了动态靶标的静态与动态精度的标定方法。

**关键词:**机载光电稳定平台;动态靶标;光线对接;参数测量

**中图分类号:**V556 **文献标识码:**A

## Study of measurement technique on airborne photoelectric stabilized platform

LI Min, MA Jun, ZHOU Xing-yi

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China)

**Abstract:** The measurement technique and method of an airborne photoelectric stabilized platform was described, and the principle and structure design of dynamic target was presented for measurement of static and dynamic parameter, especially for various parameters on platform with visible light and infrared rays system synchronously. To set up transmission measurement method datum to form general measurement technique of systemically photoelectric reconnaissance platform, the static and dynamic angles were measured. A method of using light butt to realize visible light and infrared rays measurement simultaneously was presented and a math calculating method was given also, which can obtains space coordinate of dynamic target for a real value of directional coordinate of the platform by two angles measurement and space vector calculation. The results show that proposed calculation method for dynamic target is efficiency.

**Key words:** airborne photoelectric stabilized platform; dynamic target; light butt; parameter measurement

## 1 引言

现代战争的特点是高技术、多方位、立体、全天候作战,它决定了陆、海、空的协调统一是制胜的关键,尤其是空中侦察、作战的优势显得越来越重要。因此,作为侦察、测量、校射及打击效果评估的重要手段,机载电视侦察平台日益受到重视,目前各国也竞相研制,相继推出了多种与机载摄录系统相类似的电视平台。

对于研制机载电视侦察平台,检测和评价机载光电稳定平台的性能指标是研制过程和验收时必不可少的重要环节。

本文主要阐述一种机载光电稳定平台的综合检测方法,并研制出一套检测设备(动态靶标),使其能够进行静态、动态的参数测试,尤其是可见光和红外成像,激光测距同时工作时各种参数的测试,建立测量基准的传递方法,形成系统的光电侦察平台总体检测技术,杜绝测量中在光电稳定平台上附加基准或传递物,以免影响光电稳定平台的转动惯量。

## 2 动态靶标的结构及原理

### 2.1 结构

动态靶标是按一定规律旋转的远距离目标源,给出目标源的空间坐标,引导被测系统进行捕获跟踪,实现视轴指向,它由两个平行光管(可见、红外),平行光管旋转轴,平面反射镜,标定及调整用激光器,旋转臂,光电轴角编码器,速度控制系统,力矩电机,测速电机,导电环,和具有三维自由度调节(液压调节)的稳定基座组成,如图 1、图 2 所示:

### 2.2 原理

动态靶标按一定规律旋转,能够给出目标源的空间坐标(通过角度测量及理论计算),引导被测系统进行捕获跟踪,实现视轴指向,同时该目标源的空间坐标作为真值,与被测系统的方位、高低角进行比较,实现静态测角;当动态靶标匀速转动时,通过时统系统进行统一,可以得到任一时刻的目标源的空间坐标与被测系统的方位、高低角,实现动态测角。具体方案如下:

为实现红外、电视同时测量,采用并行两台平

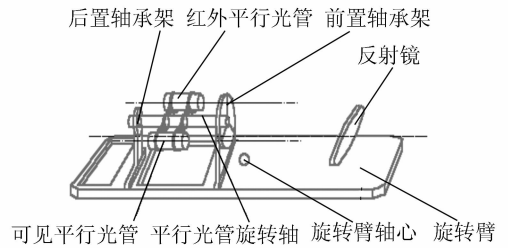


图 1 靶标旋转臂示意图

Fig. 1 Rotating arm of target

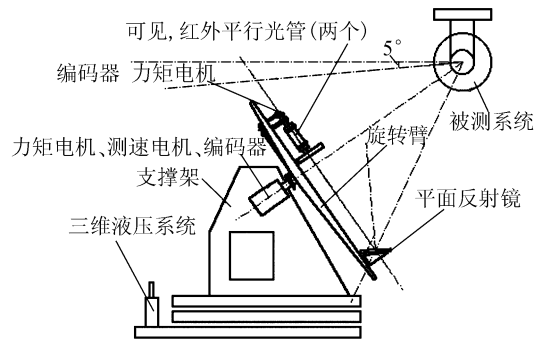


图 2 靶标整体结构图

Fig. 2 Construction of target

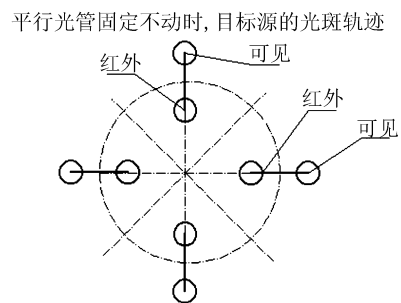


图 3 平行光管无旋转时的光斑轨迹

Fig. 3 Facula pathway on collimator without rotation

行光管,分别作为红外、电视的目标源,如果两台平行光管固定不动,随着旋转臂的旋转,其目标源的光斑轨迹如图 3。

由于被测系统整体有两个旋转自由度,另一个旋转自由度被限制,而恰恰目标源的光斑轨迹在这个被限制的自由度进行旋转。结果会造成其中一个被测光学系统(红外或可见)失去捕捉目标,达不到测量目的。

如果将两台并行的平行光管绕与之平行的轴(小轴)进行旋转(轴上也安装力矩电机及编码器),其旋转角度与动态靶标旋转臂旋转轴(主轴)

平行光管绕平行轴旋转时,目标源的光斑轨迹

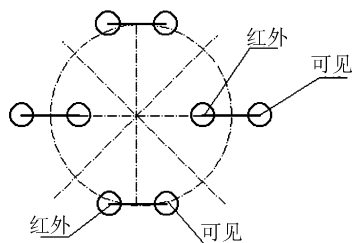


图 4 理论光斑轨迹

Fig. 4 Facula pathway of theory

旋转的角度相同(通过同一个伺服控制系统实现),则目标源的光斑轨迹如图 4。

平行光管绕平行轴旋转时,目标源的光斑轨迹  
主轴与小轴同步误差(10°)

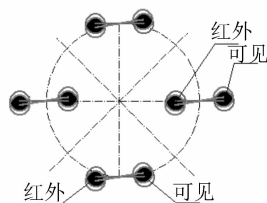


图 5 有误差时光斑轨迹

Fig. 5 Facula pathway with inaccuracy

目标源给出的光斑轨迹,在理论上,满足了被测系统整体的两个旋转自由度的旋转,使得被测光学系统(红外和可见)能够同时进行跟踪。由此可见,采用平行光管与旋转臂同步旋转的这种结构方式,能够达到测量目的。

实际上,旋转臂旋转轴(主轴)与两平行光管旋转轴(小轴)会产生同步误差,如果产生误差(比如,相差 10°),则目标源的光斑轨迹如图 5。

图 5 为主轴与小轴在旋转过程中产生同步误差(实际光斑轨迹)与理想光斑轨迹的比较图。由于目标源给出的是平行光,小轴的旋转移只是 在垂直于指向面上的平行移动,故与指向角无关。因此在测角过程中不给予考虑。

### 3 动态靶标的空间值(真值)的计算

#### 3.1 角度的索取

如图 6 所示:

将动态靶标旋转臂固定在某一位置(最好在编码器输出  $\theta=0^\circ$ )。

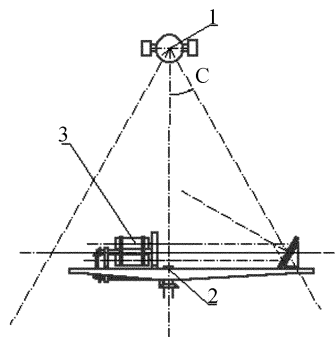


图 6 靶标旋转示意图

Fig. 6 Traversing of target

将半导体激光器固定在动态靶标旋转臂轴心 2 上,其指向与旋转臂旋转轴的轴向基本平行,打开半导体激光器,同时可见平行光管 3 光源也打开,在激光器光点与平行光管光斑交汇处 1 放置自准直经纬仪(精度 0.5")且调平。

取下半导体激光器,再在旋转臂轴心 2 上放置一个高质量的参考反射镜,同时自准直经纬仪瞄准反射镜,捕捉反射回来的十字丝像。

旋转动态靶标,使得两十字丝重合,并无跳动。记下经纬仪高低角  $a$ ;方位角  $c_0$ 。

转动经纬仪(精度 0.5"),瞄准平行光管 3 的星点像,使之落在十字丝中心上,记下经纬仪方位角  $c_1$ 。

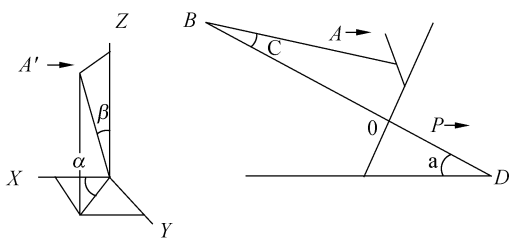
#### 3.2 数学计算

设旋转臂旋转轴的轴向与目标源的指向之间的夹角为  $c$ ,则  $c=c_1-c_0$

设旋转臂旋转轴的轴向与大地的高低角为  $a$  建立大地坐标系图 7(a)

建立靶标与坐标系位置关系图 7(b)

设旋转轴单位矢量  $P$



(a) (b)

图 7 靶标坐标系示意图

Fig. 7 Coordinate system of target

设旋转臂初始位置的矢量  $\mathbf{A}$ , 则

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos a \\ 0 \\ \sin a \end{pmatrix}, \mathbf{A} = \begin{pmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(a-c) \\ 0 \\ \sin(a-c) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

• 设  $\mathbf{A}$  绕  $\mathbf{P}$  转  $\theta$  角(编码器给出)后为矢量  $\mathbf{A}'$

$$\mathbf{A}' = \mathbf{S}\mathbf{A}^{[1]}$$

式中  $\mathbf{A}'$ ——绕  $\mathbf{P}$  轴(旋转轴)旋转后的的矢量  
 $\mathbf{S}$ ——旋转矩阵

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \cos \theta + (1 - \cos \theta)P_x^2 & -P_z \sin \theta + (1 - \cos \theta)P_x P_y & P_y \sin \theta + (1 - \cos \theta)P_x P_z \\ P_z \sin \theta + (1 - \cos \theta)P_x P_y & \cos \theta + (1 - \cos \theta)P_y^2 & -P_x \sin \theta + (1 - \cos \theta)P_y P_z \\ -P_y \sin \theta + (1 - \cos \theta)P_x P_z & P_x \sin \theta + (1 - \cos \theta)P_y P_z & \cos \theta + (1 - \cos \theta)P_z^2 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{A}' = \mathbf{S}\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \cos \theta + (1 - \cos \theta)\cos a & -\sin a \sin \theta & (1 - \cos \theta)\sin a \cdot \cos a \\ \sin a \sin \theta & \cos \theta & -\cos a \sin \theta \\ (1 - \cos \theta)\cos a \cdot \sin a & \cos a \cdot \sin \theta & \cos \theta + (1 - \cos \theta)\sin^2 a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(a-c) \\ 0 \\ \sin(a-c) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{A}' = \begin{bmatrix} [\cos \theta + (1 - \cos \theta)\cos a]\cos(a-c) + [(1 - \cos \theta)\sin a \cdot \cos a]\sin(a-c) \\ \sin a \sin \theta \cos(a-c) - \cos a \sin \theta \cdot \sin(a-c) \\ (1 - \cos \theta)\cos a \cdot \sin a \cos(a-c) + [\cos \theta + (1 - \cos \theta)\sin^2 a] \cdot \sin(a-c) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\mathbf{A}' = \begin{bmatrix} A'_x \\ A'_y \\ A'_z \end{bmatrix},$$

$$\begin{aligned} A'_x &= [\cos \theta + (1 - \cos \theta)\cos a]\cos(a-c) + [(1 - \cos \theta)\sin a \cdot \cos a]\sin(a-c) \\ A'_y &= \sin a \sin \theta \cos(a-c) - \cos a \cdot \sin \theta \cdot \sin(a-c) \\ A'_z &= (1 - \cos \theta)\cos a \cdot \sin a \cos(a-c) + [\cos \theta + (1 - \cos \theta)\sin^2 a] \cdot \sin(a-c) \end{aligned}, \quad (5)$$

$$\alpha = \arctan \frac{A'_y}{A'_x} \text{ (方位)}, \quad (6)$$

$$\beta = \arctan \frac{A'_z}{\sqrt{A'^2_x + A'^2_y}} \text{ (俯仰)}, \quad (7)$$

通过数学计算, 得出动态靶标本身的一组理论空间坐标值。

$(\alpha, \beta, \theta)$ , 该组坐标值作为被测系统的指向坐标的真值。

### 4 动态靶标的精度标定

将动态靶标旋转到某一位置  $\theta$ (编码器给出) 在激光器光点与平行光管光斑交汇处放置自准直经纬仪(徕卡 0.5'') 且调平。

旋转旋转臂, 每  $n^\circ$  测一点, 共测  $360/n = N$  个点, 得到

$$\begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \beta_1 \\ \theta_1 \end{pmatrix} \dots \dots \dots \begin{pmatrix} \alpha_N \\ \beta_N \\ \theta_N \end{pmatrix}$$

利用数学公式计算, 得到

$$\begin{pmatrix} \alpha'_1 \\ \beta'_1 \\ \theta'_1 \end{pmatrix} \dots \dots \dots \begin{pmatrix} \alpha'_N \\ \beta'_N \\ \theta'_N \end{pmatrix}$$

两式经过数学计算, 取其均方根, 得出动态靶标的精度。

### 5 实验结果

根据上述论证进行了实验, 利用 TM5100 徕卡经纬仪, 其精度为 0.5''(标准偏差), 对动态靶标进行了标定, 其结果如表 1 所示。

表 1 动态靶标定数据及误差

Tab.1 Data and errors of dynamic targets

	编码器值	标定值			理论值		偏差	
	$\theta$	$\beta$	$\alpha$	$\beta'$	$\alpha'$	$\Delta\beta$	$\Delta\alpha$	
1	0.0000	62°30'47.2"	0°0'0"	62°30'47"	0°0'0"	-0.2"	0"	
2	10.0000	61°59'42.3"	7°47'58.7"	61°59'42"	7°47'56"	-0.3"	-2.7"	
3	18.4953	60°47'12.7"	13°47'54.6"	60°47'12"	13°47'51"	-0.7"	-3.6"	
4	19.9997	60°30'22.6"	14°46'9.3"	60°30'23"	14°46'5"	0.4"	-4.3"	
5	30.0000	58°12'43.2"	20°23'1"	58°12'44.5"	20°22'56"	1.3"	-5"	
6	40.0000	55°19'0.4"	24°29'18.4"	55°19'1"	24°29'13"	0.6"	-5.4"	
7	49.1922	52°17'33.4"	27°0'27.3"	52°17'34"	27°0'22"	0.6"	-5.3"	
8	50.0000	52°00'52.2"	27°10'37"	52°0'54.5"	27°10'30"	2.3"	-7"	
9	60.0000	48°28'14"	28°38'26.8"	48°28'17"	28°38'22"	3"	-4.8"	
10	70.0000	44°49'4.8"	29°5'6.5"	44°49'7.5"	29°5'1"	2.7"	-5.5"	
11	71.4736	44°16'39.7"	29°4'0.6"	44°16'41"	29°4'27"	1.3"	-3.6"	
12	80.0000	41°09'51"	28°41'11.2"	41°9'54"	28°41'8"	3"	-3.2"	
13	90.0000	37°35'52.8"	27°35'21.5"	37°35'57"	27°35'19"	4.2"	-2.5"	
14	100.0000	34°11'44.1"	25°54'20"	34°11'48"	25°54'19"	3.9"	-1"	
15	110.0000	31°01'25.2"	23°43'33.3"	31°1'27"	23°43'32"	1.8"	-1.3"	
16	120.0000	28°08'25.1"	21°7'23"	28°8'27"	21°7'22"	1.9"	-1"	
17	130.0000	25°36'00.6"	18°9'37"	25°36'1.5"	18°9'38"	0.9"	1"	
18	140.0000	23°26'59.3"	14°53'49.7"	23°27'1"	14°53'51"	1.7"	1.3"	
19	143.9467	22°43'06.4"	13°32'23"	22°43'6"	13°32'22"	-0.4"	-1"	
20	146.7283	22°14'08.6"	12°33'41"	22°14'39"	12°33'41"	0.4"	0"	
21	150.0000	21°43'53.9"	11°23'27.1"	21°43'54"	11°23'27"	0.1"	-0.1"	
22	160.0000	20°28'42.5"	7°41'55.8"	20°28'42"	7°41'55"	-0.5"	-0.8"	
23	170.0000	19°42'58.1"	3°52'52"	19°42'58"	3°52'51"	-0.1"	-1"	
24	180.0000	19°27'37.4"	0°0'0.3"	19°27'37"	0°0'0"	-0.4"	-0.3"	
25	190.0000	19°42'58.4"	356°7'8.4"	19°42'58"	356°7'8"	-0.4"	-0.4"	
26	200.0000	20°28'42.6"	352°18'4.2"	20°28'42"	352°18'4"	-0.6"	-0.2"	
27	209.0422	21°35'28.6"	348°57'18.9"	21°35'28"	348°57'19"	-0.6"	0.1"	
28	210.0000	21°43'53.9"	348°36'32.7"	21°43'54"	348°36'32"	0.1"	-0.7"	
29	220.0000	23°27'0.5"	345°06'08"	23°27'1"	345°6'8"	0.5"	0"	
30	223.3669	24°7'41.2"	343°58'23.9"	24°7'41"	343°58'25"	-0.2"	1.1"	
31	230.0000	25°36'1.8"	341°50'20.6"	25°36'2"	341°50'21"	0.2"	0.4"	
32	240.0000	28°8'26.6"	338°52'36.4"	28°8'27"	338°52'37"	0.4"	0.6"	
33	241.4228	28°31'54.7"	338°28'58.3"	28°31'53"	338°29'0"	-1.7"	1.7"	
34	250.0000	31°01'27"	336°16'27"	31°1'27"	336°16'27"	0"	0"	
35	260.0000	34°11'48"	334°5'39.4"	34°11'48"	334°5'40"	0"	0.6"	
36	270.0000	37°35'55.6"	332°24'40.4"	37°35'57"	332°24'40"	1.4"	-0.4"	
37	280.0000	41°9'53"	331°18'50.7"	41°9'54"	331°18'51"	1"	0.3"	
38	282.8267	42°11'32.4"	331°7'30.5"	42°11'33"	331°7'30"	0.6"	-0.5"	
39	290.0000	44°49'4.8"	330°54'56.4"	44°49'7"	330°54'58"	2.2"	1.6"	
40	300.0000	48°28'14.6"	331°21'37"	48°28'17"	331°21'37"	2.4"	0"	
41	310.0000	52°0'53"	332°49'26"	52°0'54.5"	332°49'29"	1.5"	3"	
42	320.0000	55°19'0.6"	33°30'43.6"	55°19'1"	335°30'46"	0.4"	2.4"	
43	328.5519	57°49'30.3"	338°55'43.6"	57°49'32"	338°55'48"	1.7"	4.4"	
44	330.0000	58°12'43.5"	339°37'0"	58°12'44"	339°37'3"	0.5"	3"	
45	340.0000	60°30'23.5"	345°13'50"	60°30'23"	345°13'54"	-0.5"	4"	
46	350.0000	61°59'43.6"	352°11'59.6"	61°59'42"	352°12'3"	-1.6"	3.4"	
47	360.0000	62°30'48.3"	359°59'59.2"	62°30'47"	0°0'0"	-1.3"	0.8"	

总精度: $\sigma_{\beta}=1.5''$ , $\sigma_{\alpha}=2.7''$

## 6 结 论

(1)利用动态靶标检测机载光电稳定平台(被测设备)的指向精度和跟踪精度是一种简洁而可靠的方法,动态靶标本身的精度经过试验验证完全能够满足要求。

(2)可见、红外平行光管,能够分别充满可见与红外系统,不在光电稳定平台上附加基准或传递物,减去了配重带来的不良影响。

(3)通过平行光管的旋转,实现光线对接。使得可见、红外被测光学系统能够同时进行跟踪,减少了检测步骤,提高了检测效率。

## 参考文献:

- [1] 连铜淑. 反射棱镜共轭理论[M]. 北京理工大学出版社.  
LIAN T SH. *Conjugate theory of reflection prism*[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press. (in Chinese)
- [2] 王之江. 光学技术手册[M]. 机械工业出版社.  
WANG ZH J. *Technique directory of optics*[M]. China Machine Press. (in Chinese)
- [3] 张波, 贺庚贤, 沈湘衡, 等. 可编程动态靶标标定方法[J]. 光学精密工程, 2003, 11(2): 176-180.  
ZHANG B, HE G X, SHEN X H, *et al.* Calibration of programmable dynamic target[J]. *Optical and Precision Engineering*, 2003, 11(2): 176-180.
- [4] 杨李成, 凌宁. 利用平面止推轴系研制高精度定心仪[J]. 光电工程, 2005, 6: 39-42.  
YANG L CH, LING N. Development of a high precision eccentricity error measurement instrument with a thrust-shaft system[J]. *Opt-Electronic Engineering*, 2005, 6: 39-42. (in Chinese)
- [5] 王家骥, 金光, 颜昌翔, 等. 机载光电测量设备的目标定位误差分析[J]. 光学精密工程, 2005, 13(2): 105-116.  
WANG J Q, JIN G, YANG CH X. Orientation error analysis of airborne opto-electric tracking and measuring device[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, 13(2): 105-116. (in Chinese)
- [6] 常山, 曹益平, 陈永权, 等. 五棱镜的运动误差对波前测量的影响[J]. 光学仪器, 2005, 27(2): 12-16.  
CHANG SH, CAO Y P, CHEN Y Q, *et al.* Kinematic error effect of pentagonal prism on wavefront measurement [J]. *Optical Instruments*, 2005, 27(2): 12-16. (in Chinese)
- [7] 陈曦, 汪岳峰, 樊东. 多光轴光学系统光轴平行度野外试验方法[J]. 应用光学, 2002, 23: 46-48.  
CHEN X, WANG Y F, FAN D. Field test method about optical axis parallelism of multi axial system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2002, 23: 46-48. (in Chinese)

**作者简介:**李 岷(1966—),女,吉林长春人,工作于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所检测中心,主要从事光学检测及检测技术的研究。E-mail:limin-660704@sina.com

马 军(1960—),男,吉林长春人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所检测中心研究员,主要从事工程结构设计及检测技术的研究。

周兴义(1966—),男,吉林长春人,工作于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所检测中心,主要从事光学检测、检测仪器设计及检测方法的研究。