

## PSD 光学敏感器系统测量目标位置和距离\*

蔡喜平 赵远<sup>√</sup> 孙东松 乔立杰 戴永江  
(哈尔滨工业大学应用物理系, 黑龙江, 哈尔滨, 150001)

V448.222

**A**摘要 在 PSD 光学敏感器系统用于空间飞行器交会对接中, 进行了测量目标相对位置、距离和角度的理论与实验研究, 测距精度为 0.02m, 方位角与俯仰角的测量精度分别为 0.176° 和 0.182°.

关键词 位置敏感探测器(PSD), 光电测量, 对接.

空间飞行器

## 引言

空间飞行器对接操作是航天飞行中一个重要技术领域, 精确提供目标的相对位置和距离及姿态是成功实现飞行器对接的先决条件. 可用于空间飞行器交会对接的敏感器有很多种, 一般在近距离(0~100m)大多采用 CCD(Charged Coupled Device)敏感器<sup>[1]</sup>. CCD 器件是一个线性分割器件, 测量分辨率受像素数的限制, 因此测量精度不是很高; 另外它的信号处理复杂. 位置敏感探测器(PSD)是 80 年代初出现的一种新型敏感器, 它的信号处理非常简单, 几何分辨率(高达 1ppm)远远高于 CCD, 并且具有以下突出特点: 位置分辨率高; 频谱响应宽; 响应速度快; 操作电路简单; 能够同时测量光点的强度和位置; 与光点大小无关等<sup>[2]</sup>, 因此 PSD 是用于近程(10m 以内)实时测量飞行器位置和距离的好敏感器.

利用 PSD 敏感器系统测量目标距离、位置和角度是一个很受重视的课题, 所提出的测量方法很多, 有采用单光源、双光源、三光源方法进行测量的, 也有采用四光源甚至更多光源方法的<sup>[3]~[5]</sup>. 很显然, 所采用的光源越多, 系统结构越复杂、庞大, 而采用光源太少, 却不能很好地同时测量距离、位置和角度等, 因此, 最好的测量方法是采用三个光源的方法, 为此本文进行了三光源法测量目标位置、角度及距离的理论与实验研究.

## 1 测量原理

三个 GaAlAs 激光器放置成正三角形作为合作目标, 激光器的间距为  $2a$ . 直角坐标系  $O-xyz$  如图 1 所示, 图 1 中 A, B, C 分别代表三个光源的位置, O 为 AB 的中点,  $b = |OC|$ . PSD 光敏面为象平面, A', B', C' 分别是 A, B, C 在象平面上的投影, O' 为 A'B' 的中点,  $a'$ ,  $b'$  分别为线段 AO 及 CO 在象平面上的投影长度,  $h$  为 C' 到直线 A'B' 的垂直距离(见图 2).

设有一指向 PSD 的单位矢量  $\vec{p}$ , 其矢端坐标为  $(x, y, z)$ ,  $|\vec{p}| = p = 1$ . 则

$$x^2 + y^2 + z^2 = p^2,$$

\* 国家 863 计划基金资助项目

本文 1996 年 9 月 18 日收到, 修改稿 1996 年 12 月 23 日收到

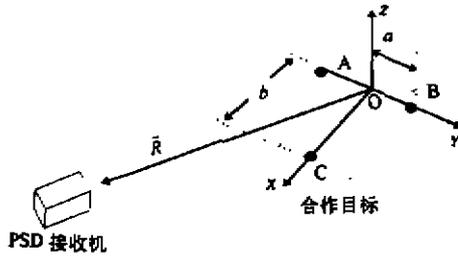


图1 O-xyz 坐标系  
Fig. 1 Coordinate system O-xyz

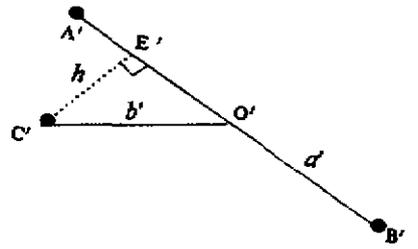


图2 合作目标在像平面上的投影  
Fig. 2 Projection diagram of cooperative target on the image plane

根据投影几何原理,目标与其投影的关系如图3所示,其中BD是B'O'平移后的位置,|BD|=a',CD是C'O'平移后的位置,|CD|=b',CH是C'E'平移后的位置,|CH|=h,图3中:|EF|=y,|OE|=√(x²+z²),|OG|=x,|GF|=√(y²+z²),|GE|=z.由图3可得:

$$\sin\theta = \frac{|OE|}{|OF|} = \frac{\sqrt{x^2+z^2}}{p}, \quad (1)$$

$$\sin\beta = \frac{|GF|}{|OF|} = \frac{\sqrt{y^2+z^2}}{p}, \quad (2)$$

$$\sin\gamma = \frac{|GE|}{|OE|} = \frac{z}{\sqrt{x^2+z^2}}. \quad (3)$$

根据式(1)~(3)及图3可得:

$$a' = a \cdot \sin\theta = a \cdot \frac{\sqrt{x^2+z^2}}{p}, \quad (4)$$

$$b' = b \cdot \sin\beta = b \cdot \frac{\sqrt{y^2+z^2}}{p}, \quad (5)$$

$$h = \frac{z}{\sqrt{x^2+z^2}} \cdot b. \quad (6)$$

定义

$$m = \frac{(a' \cdot b)^2}{(a \cdot b')^2} = \frac{x^2+z^2}{y^2+z^2}, \quad (7)$$

$$n = \frac{b' \cdot (1+m)}{2h \cdot \sqrt{m}} = \frac{p^2+z^2}{2z \cdot p}. \quad (8)$$

由式(8)可得:

$$z^2 - 2n \cdot p \cdot z + p^2 = 0, \quad (9)$$

$$\text{则: } z = (n - \sqrt{n^2 - 1}) \cdot p, \quad x = \sqrt{\frac{m \cdot p^2 - z^2}{1+m}}, \quad y = \sqrt{\frac{p^2 - m \cdot z^2}{1+m}}. \quad (10)$$

设合作目标至 PSD 接收机的相对距离为 r,透镜焦距为 f,则有

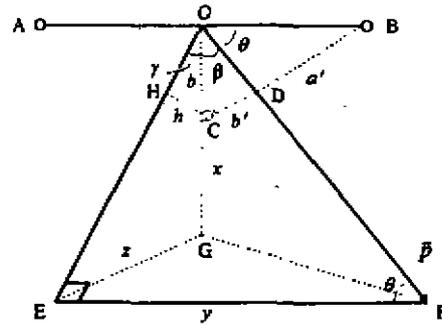


图3 目标与其投影的几何关系  
Fig. 3 Geometric relation between target and its projection

$$\frac{r}{f} = \frac{a \cdot \sqrt{x^2 + z^2}}{a'} \quad (11)$$

PSD 传感器在  $O-xyz$  坐标系中的坐标  $(x', y', z')$  为:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \cdot r \\ y \cdot r \\ z \cdot r \end{bmatrix}, \quad (12)$$

由此可以求出方位角  $\sigma$ , 俯仰角  $\beta$ :

$$\sigma = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right), \beta = \tan^{-1}\frac{-z}{\sqrt{x^2 + y^2}}. \quad (13)$$

## 2 传感器系统研究

PSD 光学传感器系统由目标和接收机组成,接收机部分包括光学头、A/D 转换(接口电路)、计算机处理等(见图 4).

组成合作目标的三个 GaAlAs 激光器必须经过调制,以克服 PSD 传感器不能同时响应两个或多个光点的缺点.调制电路的主要作用是对每个光源进行时序编码,在任一时刻,只有一个光点打开.测量和发光顺序同步,在一个给定时刻可以测量出一个光点的位置.

图 5 是光学头原理图.干涉滤光片的作用是降低背景光在 PSD 上的强度,从而提高系统测量信噪比,同时防止 PSD 达到饱和.PSD 的 4 个管脚的输出均为电流信号,这 4 个信号中  $x$  方向和  $y$  方向各两个.每个信号不仅包含了位置信息,而且包含着所接收到的光点的光强信息.通过计算相关信号的差(包含位置信息与强度信息)与和(只包含强度信息)的商,就可以获得位置信息.这一部分由电流/电压( $I/U$ )转换部分完成.预处理部分主要是将  $U_i$  ( $i=1, \dots, 4$ )限制在  $0 \sim 5V$  之间,以利于进行 A/D 转换.

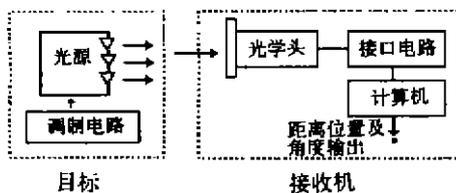


图 4 PSD 光学传感器系统结构图

Fig. 4 Structure diagram of PSD sensor system

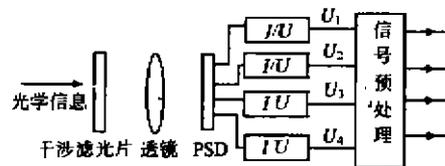


图 5 光学头原理图

Fig. 5 Diagram of optical head

## 3 实验及结果

合作目标装在一个目标模拟器上以模拟目标的三维运动,并可以由模拟器准确给出角度实际值.实际距离值可由预先设定的标尺给出.通过将测量值与真实值比较,可计算出距离与角度的测量精度.光源为 CW GaAlAs 激光器,波长为  $811\text{nm}$ ,平均功率为  $100\text{mW}$ ,PSD 光学传感器系统的作用距离  $\leq 10\text{m}$ ,距离测量精度为  $0.02\text{m}$ ,方位角与俯仰角的测量精

度分别为  $0.176^\circ$  及  $0.182^\circ$ 。表 1 是所使用的 PSD 的特性参数。

表 1 PSD 的特性参数  
Table 1 Performance of PSD sensor

参数	典型值	参数	典型值
有效感光面(mm)	$8 \times 8$	探测误差(75%内)( $\mu\text{m}$ )	$\pm 250$
光谱响应峰值波长(nm)	925	位置分辨率( $\mu\text{m}$ )	10
灵敏度(A/W)	0.45(白光)	上升时间( $V_R=5V$ )( $\mu\text{s}$ )	10

#### 4 结语

PSD 是目前飞行器交会对接研究中很受重视的敏感器,它具有位置分辨率高,信号处理简单等特点。本文进行了利用 PSD 敏感器系统测量的理论与实验研究,系统作用距离  $\leq 10\text{m}$ ,测距精度为  $0.02\text{m}$ ,方位角与俯仰角的测量精度分别为  $0.176^\circ$  和  $0.182^\circ$ 。

#### 参考文献

- 1 Kunkel B. *Rendezvous and Docking Navigation Sensors*, IAF-85-265, New York: International Astronautical Federation, 1985, 1~4
- 2 Schroer G. *Optical sensor for Space Rendezvous and Docking*, IAF-89-385, New York: International Astronautical Federation, 1989; 1~8
- 3 赵远. 用于飞行器自主交会对接光电敏感器的研究. 哈尔滨工业大学博士学位论文, 1992
- 4 李俊春. 三维非接触式光学传感器的研究及其在测量中的应用. 清华大学博士学位论文, 1990
- 5 Masaaki M, Isao K. *Engineering Test Satellite VI Rendezvous and Docking Optical Sensor System*, A-IAA-94-3689-CP, New York: America Institute of Aeronautics and Astronautics, 1994, 6~8

### DETERMINATION OF TARGET RELATIVE POSITION AND RANGE BY PSD OPTICAL SENSOR SYSTEM\*

Cai Xiping Zhao Yuan Sun Dongsong Qiao Lijie Dai Yongjiang

(Department of Applied Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract** Theoretical and experimental studies on the determination of the spacecraft relative position, range and angle for the spaceflight rendezvous and docking were conducted by PSD optical sensor system. The accuracy of ranging is  $0.02\text{m}$ , and those of the azimuth and angle determination are  $0.176^\circ$  and  $0.182^\circ$ , respectively.

**Key words** position sensitive detector(PSD), optoelectronic measurement, docking.

\* The project supported by the National High Technology (863) Foundation of China