

# CCD 电视跟踪测量光学系统参数 确定方法的探讨

田铁印

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

**摘要** 本文从 CCD 的照度灵敏度以及能够探测到目标所需的信噪比出发, 详细探讨了 CCD 电视跟踪测量光学系统参数的确定方法。

**关键词:** 跟踪测量; 光学系统

## 1 引言

CCD 电视跟踪测量系统光学参数的确定原则主要依据: CCD 的照度灵敏度以及能够探测到目标所需的信噪比。

本文就是在满足作用距离等技术指标, 并兼顾测量精度要求的前提下, 探讨如何选取远距离 CCD 电视跟踪测量光学系统的相对孔径和焦距值等问题。

## 2 光学系统探知目标的前提条件

系统若要探知目标的存在应满足以下条件:

- (1) 目标或背景在接收器上的能量要大于接收器的灵敏度阈值。
- (2) 目标和背景在接收器上的信噪比度要大于接收器的信噪比阈值。这里包括两种情形:  
(a) 目标亮度(加前背景)大于背景亮度, 即对比情况; (b) 目标亮度小于背景亮度, 即负对比情况, 无论是正对比还是负对比, 只要目标和背景亮度有一定差值, 即一定的反衬度, 接收器就能探测到, 并不是说目标比背景暗, 接收器就无法判别目标的存在。
- (3) 目标在接收器上的象点尺寸要有一定大小(大于或等于 2 个 CCD 象元)。这主要是为了有利于 CCD 电视系统的平稳跟踪。

## 3 CCD 电视跟踪测量系统光学参数的确定

### 3.1 系统的信噪比

本文将信噪比定义为:目标信号产生的电流值  $I_m$  与整个背景噪声产生的电流值  $I_{bz}$  之比,即:

$$SN = \frac{I_m}{I_{bz}}$$

目标信号的电流值可用下式表示:

$$I_m = E_m \cdot A_o \cdot t \cdot K_m \cdot S \quad (1)$$

其中  $E_m$  为目标在 CCD 靶面处的照度值,  $A_o$  为单个象元面积,  $t$  为帧积分时间,  $S$  为 CCD 的平均光谱响应度,  $K_m$  为目标信号光谱响应系数。

$I_{bz}$  可写成下面各项之和:

$$I_{bz} = I_{bx} + I_a + I_x \quad (2)$$

式中  $I_{bx}$  为背景信号产生的电流值,  $I_a$  为 CCD 的暗电流,  $I_x$  是噪声电流的均方根值, 其中  $I_{bx}$  可表示为:

$$I_{bx} = E_b \cdot A_o \cdot t \cdot K_b \cdot S \quad (3)$$

$E_b$  为背景在 CCD 靶面处的照度值,  $K_b$  为背景信号的光谱响应系数。  $I_x$  可写成:

$$I_x = (I_1 + I_2 + I_3 + I_4)^{1/2} \quad (4)$$

式中各项依次代表为 CCD 固定图形噪声的均方值, CCD 读出噪声的均方值, 散粒噪声和预放器电子线路噪声的均方值。

散粒噪声  $I_3$  是由信号引起的 CCD 象元中的电荷涨落表现出来的, 其均方根值可写成:

$$I_3 = 2 \cdot e \cdot (I_m + I_{bx} + I_a) \cdot \Delta f \quad (5)$$

其中  $e$  为电子电量,  $\Delta f$  为预放器的带宽。

这样系统的信噪比可写成:

$$SN = \frac{I_m}{I_{bx} + I_a + \sqrt{2 \cdot e \cdot (I_m + I_{bx} + I_a) \cdot \Delta f} + I_1 + I_2 + I_4} \quad (6)$$

### 3.2 CCD 靶面处的反衬度

电视跟踪测量系统要有效地提取目标信号, 达到 CCD 像面的最小背景照度应大于或等于 CCD 的像面最小可用照度  $E_{min}$ , 即:

$$E_b \geq E_{min} \quad (7)$$

本文取等号计算, 由式(3)、(7)可计算出  $I_{bx}$ 。根据电视系统的最小信噪比  $SN$  的要求, 由(6)式则可求出目标信号的电流值  $I_m$ 。

这里将反衬度定义为:  $(E_{最大} - E_{最小}) / E_{最小}$ , 并认为在远距离电视跟踪系统中, 目标是叠加在整个背景之上的, 因此, 由信噪比决定的 CCD 像面处的目标和背景的反衬度为:

$$\frac{E_m}{E_{min}} = \frac{I_m \cdot K_b}{I_{bx} \cdot K_m} \quad (8)$$

### 3.3 光学系统参数的确定

#### 3.3.1 相对孔径的确定

背景在光学系统的像面照度可用下面公式计算:

$$E_b = \frac{(1 - \theta^2) \cdot 4 \cdot \pi \cdot B_b \times 10^4}{4} (D/f')^2 \cdot K_o \cdot K_L \quad (9)$$

这里  $\theta$  是对折反射系统而言的线遮拦比, 透射式系统  $\theta$  为零,  $K_o$  为光学系统的透过率,  $K_L$  为

滤光片对背景的滤光系数,  $B_b$  为天空背景的亮度。

上面已经谈到: 电视跟踪测量系统要有效地提取目标信号, 达到 CCD 像面的最小背景照度应大于或等于 CCD 的像面最小可用照度  $E_{min}$ , 根据这一条件可以确定出光学系统的相对孔径为:

$$D/f' = \left[ \frac{4 \cdot E_{min}}{(1 - \theta^2) \cdot 4 \cdot \pi \cdot B_b \times 10^4 \cdot K_o \cdot K_L} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

### 3.3.2 光学系统焦距的确定

(1) 根据由系统的信噪比所决定的反衬度(8), 求光学系统允许的象点弥散的最大均方根角值

根据光学系统探知目标的前提条件(3), 则目标在接收器上的能量特性, 可用其照度来表征, 目标像面照度由下式表示:

$$E_m = \frac{(1 - \theta^2) \pi B_m \times 10^4}{4} (D/f')^2 \cdot K_o \cdot K_D \cdot K_C \cdot (\sigma_m^2 / \sigma_\Sigma^2) \quad (11)$$

式中:  $B_m$  为等效目标的亮度,  $K_b$  为大气透过率,  $K_c$  为滤光片对目标的滤光系数,  $\sigma_\Sigma$  即为实际象点弥散圆对仪器张角的最大均方根值,  $\sigma_m$  为目标对仪器张角的均方根角值(作用距离  $R$  的函数)。

由(7)、(8)、(9)、(11)式可得到:

$$\sigma_\Sigma = \left[ \frac{B_m \cdot K_D \cdot K_C \cdot I_{bx} \cdot K_m \cdot \sigma_m^2}{B_b \cdot K_L \cdot K_C \cdot I_m \cdot K_b} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

(2) 产生象点弥散的诸因素

(a) 目标的等效直径对仪器张角的方根值  $\sigma_m$ :

$$\sigma_m = \frac{A}{\sqrt{3} \cdot R} \cdot 2 \times 10^6$$

式中  $A$  为目标的等效圆形面积的直径(m),  $R$  为作用距离(m)。

(b) 大气抖动造成的象点弥散与其抖动的均方根角值  $\sigma_D$ 。

(c) 光学系统衍射效应产生的象点弥散的均方根值  $\sigma_Y$ :

$$\sigma_Y = \frac{A_Y}{f'}$$

$$A_Y = \frac{a_0}{3} \cdot 2 \times 10^5$$

式中  $a_0$  为相对孔径一定条件下的衍射斑直径。

(d) 光学系统像差引起角弥散的均方根值。

$$\sigma_x = \frac{A_x}{f'}$$

$$A_x = \frac{a_1}{3} \cdot 2 \times 10^5$$

式中  $a_1$  为光学系统残余像差所引起的象点弥散斑。

(e) 在积分时间内跟踪系统振动造成角弥散的均方根值  $\sigma_z$ :

$$\sigma_z = \frac{A_z}{f'}$$

$$A_z = \frac{a_2}{\sqrt{3}} \cdot 2 \times 10^5$$

式中  $a_2$  为帧积分时间内跟踪系统的最大振动量值。

(f) 像移造成角弥散的均方根值  $\sigma_w$ 。

$$\sigma_w = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \theta \times t \times K \times 3600$$

式中  $\theta$  为精跟踪误差(度/秒),  $t$  为帧积分时间,  $K$  为不同跟踪状态时的系数。

(g) CCD 接收器引起角弥散的均方根值

$$\sigma_c = \frac{A_c}{f'}$$

$$A_c = \frac{a_3}{\sqrt{3}} \cdot 2 \times 10^5$$

式中  $a_3$  为 CCD 象元尺寸。

(3) 光学系统焦距的确定

由对影响实际象点弥散的诸因素的分析可知,  $\sigma_{\Sigma}^2$  可写成:

$$\sigma_{\Sigma}^2 = \sigma_m^2 + \sigma_D^2 + \sigma_Y^2 + \sigma_X^2 + \sigma_Z^2 + \sigma_w^2 + \sigma_c^2 \quad (13)$$

上面的分析告诉我们:  $\sigma_m$ 、 $\sigma_D$ 、 $\sigma_w$  与系统的焦距无关, 根据已知条件可以分析并求出其量值;  $\sigma_Y$  当相对孔径一定时, 和焦距成反比; 其它  $\sigma_X$ 、 $\sigma_Z$ 、 $\sigma_c$  由其表达式可看出均与焦距成反比, 这样可得到满足信噪比要求的光学系统焦距的表达式:

$$f' = \left[ \frac{A_Y^2 + A_X^2 + A_Z^2 + A_C^2}{\sigma_{\Sigma}^2 - \sigma_m^2 - \sigma_D^2 - \sigma_w^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

通过以上过程, 就可求解出了满足一定作用距离要求的电视跟踪测量系统的相对孔径和焦距值。然后, 与满足系统测量精度所要求的焦距值进行权衡, 并根据适当的宽裕系数, 最后得到合适的光学系统参数。

## 4 几点说明

(1) 背景的减光问题

本文确定系统的相对孔径正是以工作条件下的最小背景亮度为依据的。而实际情况下, 背景亮度很可能会高于此值, 这样, 系统像面上的目标和背景的反衬度将会下降, 影响仪器的跟踪距离, 这就要求在实际背景亮度大于所要求的最小亮度时, 应采取减光措施, 可采用以下方法: a、降低光圈; b、采用中性变密度盘; c、采用电子学控制的自动调光(例如采用电子快门); d、加消除背景光滤光片。

(2) 对于高对比  $1:0$ , 即背景亮度可忽略不计的情况, 可采用(11)式以及下式来确定系统的参数:

$$d = f' \cdot \sigma_{\Sigma} / 2 \times 10^5 \quad (15)$$

其中  $d$  值为系统平稳跟踪及电子学细分所要求的象点尺寸, 由于即使是夜间观测, 天空也有一定的背景亮度, 故此这种情况很少存在。

(3) 对于主动式目标, 多都携有曳光弹, 给定的是发光强度  $I$ , 可以用下式计算目标在像面处的照度:

$$E_m = \frac{(1 - \theta^2) \times I}{R^2} (D/f')^2 \cdot K_o \cdot K_D \cdot K_C \cdot (1/\sigma_{\Sigma}^2) \quad (16)$$

本文是在尤英奇研究员的指导下完成的,王立生等老师也给予了耐心的指导,在此表示衷心的感谢。

### 参 考 文 献

- [1] 田铁印,典型光学系统总体研究及结构分析. 长春光机所硕士论文,1993  
[2] 朱焕文,电视跟踪器作用距离方程式及其分析. 光学工程,1982

## Consideration for the Parameters of Optical System in CCD TV Tracking and Measuring

Tian Tieyin

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

### Abstract

This paper produces the method about determining the parameters of CCD TV tracking-and-measuring optical system in details according to CCD the intensity of illumination sensitivity and the signal noise ratio essential for the detectable object.

**Key words**, Tracking and measuring; Optical system