

文章编号 1004-924X(2003)06-0607-05

CCD 像面旋转引起的脱靶量误差及检测方法

龙华伟,沈湘衡,马 军

(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:分析了光电测量设备电视系统的 CCD 传感器像面旋转这个普遍存在的问题所带来的脱靶量测量误差,建立了一些相关的数学模型,并且讨论了在不同像面旋转角情况下的误差变化规律。简要地介绍了这种测量误差的检测方法以及修正方法。实际检验表明,上述方法不仅能很好地修正 CCD 传感器像面旋转所引起的脱靶量测量误差,显著提高电视系统脱靶量测量精度,而且对于红外电视测量系统也是同样适用的。

关键词:脱靶量;误差修正;CCD 传感器;像面;检测方法

中图分类号:V556.2 **文献标识码:**A

Miss distance error due to rotation of CCD sensor imaging surface and its testing method

LONG Hua-wei, SHEN Xiang-heng, MA Jun

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: The miss distance measurement error due to the rotation of the CCD sensor imaging surface in a video measurement system is analyzed with some relative mathematical models established, and the variation of this kind of error is discussed for different rotation angles of the imaging surface. How this measurement error can be checked and corrected are briefly discussed. Actual inspection shows the ways mentioned above can correct the miss distance measurement error resulting the rotation of the CCD sensor imaging surface and improve the accuracy of miss distance measurement, and it is suitable for an IR video measurement system.

Key words: quantity of miss distance; error-correction; CCD sensor; imaging surface; testing method

1 引言

基于 CCD 传感器构成的电视测量系统,因其

测量精度高,实时性强等特点,已经成为现代靶场光学测量系统中的主要设备。电视测量系统的输出是被测空间目标偏离测量光轴的电视脱靶量。由于电视脱靶量的精度将影响光电测量仪器的最

终测量结果和总体性能指标,从而决定了电视脱靶量的测量是电视测量技术中的关键技术。因此,必须对引起脱靶量精度变化的各种因素进行检测和分析,以便确保光电测量仪器的总测量精度满足用户提出的战术技术指标^[1-4]。

电视测量系统是集光学、机械、电子学和计算机等多学科的复杂系统,各个环节的制造、安装缺陷以及环境和使用上的波动都会带来各种各样的脱靶量误差,从而引起最终测量结果的不确定度。本文主要讨论电视的接收像面(CCD靶面)由于安装位置不准或者由于配重的影响而产生的系统机械变形所导致的电视像面发生旋转而引起的脱靶量测量误差,分析了在不同像面旋转情况下的误差变化规律,建立了误差计算和修正的数学模型(在本文中假定光轴和电轴是重合的)。在某电视脱靶量测量系统的检测过程中,发现了系统的普通电视和高帧频电视的 CCD 靶面均存在着不同程度的旋转,对脱靶量的测量精度有很大的影响,下面将详细地对此误差源加以阐述^[5-7]。

2 误差分析

设脱靶量的线量为 X 、 Y , 将其转换成目标脱靶量角值 A_o 和 E_o , 脱靶量在电视像面上的投影关系如图 1 所示。

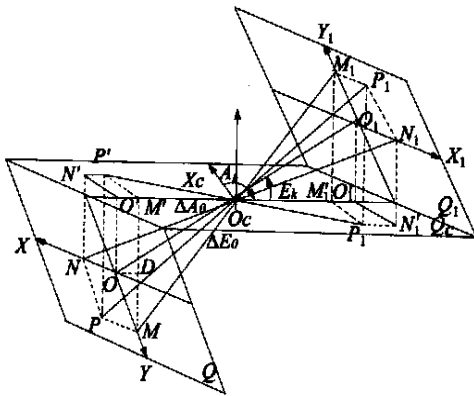


图 1 脱靶量在 CCD 像面上的投影关系

Fig. 1 Projection relationship of miss distance on CCD imaging surface

图 1 中, P_1 是目标在空间的位置; P 是目标在 CCD 像面上的影像; O_c 是经纬仪三轴交点,即测量坐标系的原点; $O O_1$ 是电视系统的主光轴,其对应的角度为 A_k 、 E_k ; $O_c P_1$ 是跟踪观测线,其

对应的角度为 A 、 E ; Q 是 CCD 像面所在的平面; Q_1 是过目标点 P_1 并且与 Q 面相平行的平面; Q_c 是过 O_c 并与测站水平面平行的平面; $O O_c = f$ 是测量电视系统的焦距。

另外,假设 $\{O - X, Y\}$ 为 CCD 像面上的 CCD 像面坐标系, M 、 N 为 P 在 CCD 像面坐标系中的坐标,即两个脱靶量分量 $X = ON$ 和 $Y = OM$,而 O 、 P 、 M 、 N 在平面 Q_c 上的投影点记为 O 、 P 、 M 、 N 。再假设 $\{O_1 - X_1\}$ 为目标平面坐标系, P_1 为在目标平面坐标系中的坐标,记为 M_1 、 N_1 ,而 O_1 、 P_1 、 M_1 和 N_1 在平面 Q_c 上的投影点分别记为 O_1 、 P_1 、 M_1 、 N_1 。

A_o 、 E_o 为由记录脱靶量转换成目标脱靶量的角值。由图 1 几何关系推导出 $\tan A_o$ 的表达式如下:

$$\tan A_o = \frac{X}{f \cos E_k (1 - Y/f) \tan E_k}$$

对上式进行 E_k 泰勒级数展开,并取前两项,考虑到 A_o 一般为小量,则有

$$A_o \quad \tan A_o = \frac{X}{f \cos E_k} + \frac{X Y \sin E_k}{f^2 \cos^2 E_k}$$

上式就是脱靶分量的角度量 A_o 的计算公式。

同理可以推导出脱靶分量的角度量 E_o 的计算公式如下:

$$E_o \quad \frac{Y}{f} - \frac{X^2}{2f^2} \tan E_k$$

下面分析 CCD 像面旋转引起的测量系统误差。像面的旋转示意图如图 2。

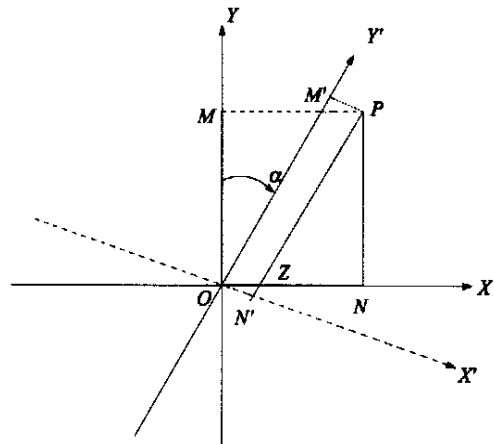


图 2 像面旋转

Fig. 2 Rotation of imaging surface

图 2 中,CCD 靶面旋转了 α 角, P 为目标像点在像面上的影像点; M 、 N 是 P 点在 $\{O-X, Y\}$ 坐标系中的投影,即两个脱靶分量 $X = ON$ 和 $Y = OM$; M 、 N 为 P 点在 $\{O-X, Y\}$ 坐标系中的坐标,即两个脱靶分量 $X = ON$ 和 $Y = OM$; Z 是 OX 轴与投影线 PN 的交点。由图 2 中几何关系可以看出:

$$X = ZN + OZ = \frac{X}{\cos \alpha} + (Y - X \tan \alpha) \sin \alpha, \quad (1)$$

$$Y = PZ \cos \alpha = Y \cos \alpha - X \sin \alpha. \quad (2)$$

因为, α 一般为小量,所以

$$\frac{X}{\cos \alpha} \approx X + \frac{X^2}{2f^2} \sin^2 \alpha, \quad (3)$$

$$Y \cos \alpha \approx Y - X \sin \alpha. \quad (4)$$

那么,CCD 像面旋转之后,脱靶量分量变化量为:

$$\Delta X = X - X = \frac{X^2}{2f^2} \sin^2 \alpha, \quad (5)$$

$$\Delta Y = Y - Y = -X \sin \alpha. \quad (6)$$

如果 ΔX 、 ΔY 的值小于 CCD 传感器的线性分辨率(一般是 CCD 传感器的一个像元乘以某个系数,通常取这个系数为 1.4),那么,CCD 传感器像面的旋转便可以忽略。但是,如果 ΔX 、 ΔY 较大,这种旋转就得根据具体精度要求进行综合考虑了。

把式(3)和式(4)代入 A_o 和 E_o 的表达式中,并舍去 α 的二次项,得

$$A_o = \frac{X + Y}{f \cos \alpha} + \frac{(X^2 \sin^2 \alpha - X^2 + Y^2) \sin \alpha}{f^2 \cos^2 \alpha}, \quad (7)$$

$$E_o = \frac{Y - X}{f} - \frac{X^2 + 2XY}{2f^2} \tan \alpha. \quad (8)$$

把 ΔX 和 ΔY 代入 A_o 和 E_o 的表达式中,可以得到:

$$A_o = \frac{X}{f \cos \alpha} + \frac{X^2 \sin^2 \alpha}{f^2 \cos^2 \alpha}, \quad (9)$$

$$E_o = \frac{Y}{f} - \frac{X^2}{2f^2} \tan \alpha. \quad (10)$$

那么,电视脱靶量测量误差为:

$$\Delta A_o = A_o - A_o = \frac{X}{f \cos \alpha} + \frac{(Y^2 - X^2) \sin \alpha}{f^2 \cos^2 \alpha}, \quad (11)$$

$$\Delta E_o = E_o - E_o = -\frac{X}{f} - \frac{X^2}{f^2} \tan \alpha. \quad (12)$$

从式(11)和式(12)可以看出,脱靶量的测量误差

取决于光学系统焦距 f 和像面旋转角度 α 以及目标像点偏离视场中心的远近。

这里,讨论一种特殊情况。即 $E_k = 0$,也就是系统主光轴的高低角为零,那么式(11)和式(12)可简化为:

$$\Delta A_o = A_o = \frac{Y}{f}, \quad (13)$$

$$\Delta E_o = E_o = -\frac{X}{f}. \quad (14)$$

从式(13)和式(14)可以看出,当 X 和 Y (即目标像点偏离视场中心越大)以及旋转角 α 越大时,电视脱靶量测量误差就越大;而光学系统的焦距 f 越大,这个误差就越小。所以,对于长焦距、小视场的系统来说,这个误差对脱靶量精度的影响相对较小;而对小焦距、大视场的系统而言,这个误差的影响则较大。

在某电视脱靶量测量系统中,普通电视的 CCD 传感器的像元尺寸为 $\Delta x = 0.006 \text{ mm}$, CCD 传感器靶面像元素为 768×586 。当 $f = 200 \text{ mm}$,即光学系统处于长焦的状态下,CCD 传感器的理想分辨率应为 8.7。那么,在不同的电视视场,方位脱靶量测量误差与像面旋转角度 α 之间的关系如图 3 所示。

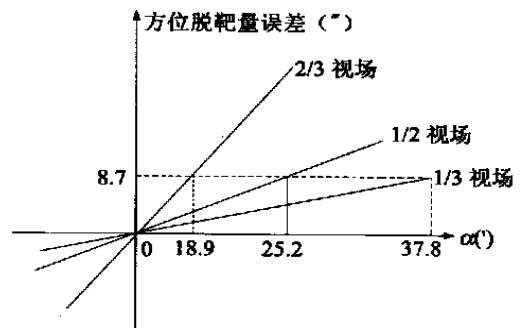


图 3 方位脱靶量误差与旋转角度 α 的关系

Fig. 3 Relationship between azimuth error of miss distance and rotation angle

从图 3 中可以看出,在 1/3 视场内像面旋转角度 α 只要不大于 37.8,像面的旋转就可以忽略;在 1/2 视场以内,旋转角度 α 只要不大于 25.2,这种旋转也可忽略不计;对于 2/3 视场,也有类似的情况。高低脱靶量误差与像面旋转角度 α 之间的关系类似于方位脱靶量测量误差与像面旋转角度 α 之间的关系,这里不再赘述。

3 检测方法

如何检测 CCD 传感器像面是否发生旋转呢? 经过 CCD 传感器像面原点向视场某一边缘做水平扫描(或者垂直扫描)。在水平扫描(或者垂直扫描)的过程中,如果测量电视系统显示器上显示的高低角(或者方位角)大小没有变化,就可以说明像面没有发生旋转;如果高低角(或者方位角)大小有变化,则说明电视像面发生了旋转。而视场边缘处的高低角(或者方位角)的绝对值(一般为码值)应最大。这个值除以 CCD 传感器像面水平(或者垂直)尺寸的一半,便是像面旋转角度的正切值。

4 误差修正及结果分析

在检测过程中,如果发现存在这种由于 CCD 传感器像面旋转而带来的误差时,有两种方法可以减小或消除这种误差。第 1 种方法是软件修正,也就是根据检测出来的像面旋转角度修正电

视脱靶量的计算公式,使之达到消除误差的目的。这种方法易于操作,误差修正效果也好。第 2 种方法是硬件修正,即重新安装调试 CCD 像面坐标系,使之与光学系统坐标轴系重合。这种方法操作起来比较困难,可能要经过多次反复地调试才能达到精度要求。考虑到设备的互换性问题,多数情况下应采取第 2 种方法来消除这种误差。

在对本套测量跟踪系统的 3 号测量站的检测过程中,发现系统的普通测量电视的 CCD 像面旋转了 6 个像素,也就是旋转角度 大约等于 53.7。从上面的分析可知,这样大的旋转角度是不能忽略的。经过重新安装调试,像面旋转只有一个像素了,也就是旋转角度 大约是 9.0。从上面的分析可知,这样的旋转角度值基本上可以忽略。检测之后,得表 1 数据。表 1 中,方位角读数和高低角读数^[1]表示 21 位恒光源轴角编码器方位角和高低角的读数;方位角读数和高低角读数^[2]是测量电视的方位角和高低角的实际读数;方位测量误差表示方位脱靶量测量的绝对误差,高低角测量误差表示高低角脱靶量测量的绝对误差。表 1 中数据的单位均是角秒()。

表 1 测量电视修正后的检测数据

Tab. 1 Measuring data after the measuring video was amended Unit: ()

视场 像限	1/2 视场				2/3 视场			
	1	2	3	4	1	2	3	4
方位角读数 ^[1]	1 289	- 1 331	- 1 259	1 275	1 751	- 1 765	- 1 754	1 806
高低角读数 ^[1]	991	876	- 954	- 922	1 215	1 306	- 1 327	- 1 272
方位角读数 ^[2]	1 260	- 1 316	- 1 242	1 244	1 714	- 1 735	- 1 725	1 762
高低角读数 ^[2]	985	855	- 932	- 900	1 201	1 291	- 1 296	- 1 248
方位测量误差	29	15	17	31	37	30	29	44
高低角测量误差	6	21	22	22	14	15	31	24

从表 1 中数据可以看出,方位最大误差是 44,达到了精度要求(指标要求是 68);高低角最大误差是 24,同样达到了指标要求。

5 结 论

在检测该电视测量系统的过程中,发现 4 台设备的电视靶面都存在着不同程度的旋转。根据上述方法,对其中几台重新进行了安装调试。经

过检测计算,系统的脱靶量测量精度都达到了要求。在设备重新安装调试之前,曾尝试使用软件消除的方法来消除误差,经实际检验后,系统的脱靶量精度也能很好地达到指标要求。

采用该方法,不仅能对电视测量系统的 CCD 传感器像面旋转进行很好的修正,对红外电视测量系统也同样适用。实践表明,文中结论对指导 CCD 传感器的安装、调试很有意义。

参考文献:

- [1] 何照才,胡保安. 光学测量系统[M]. 北京:国防工业出版社,2002.
HE ZH C, HU Bao-an. *Optical measurement system* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [2] 刘利生. 外弹道测量数据处理[M]. 北京:国防工业出版社,2002.
LIU L SH. *Trajectory measurement data processing* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [3] 李佳列,丁国清,颜国正,等. 采用 CCD 的非接触测量中提高精度的一种方法[J]. 光学 精密工程, 2002, 10(3): 281-284.
LI J L, DING G Q, YAN G ZH, *et al.* Method for improving in noncontact measurement by linear CCD[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(3): 281-284. (in Chinese)
- [4] 张启衡,彭先蓉,单承建,等. 高帧频电视跟踪系统的特点与关键技术研究[J]. 光电工程, 1998, 26(6): 66-69.
ZHANG Q H, PENG X R, SHAN CH J, *et al.* Features and the key techniques for high frame TV tracking system[J]. *Optoelectronic Engineering*, 1998, 25(6): 66-69. (in Chinese)
- [5] 王家骥. 光学仪器总体设计[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械研究所,1998.
WANG J Q. *Overall design of optical instruments* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 1998. (in Chinese)
- [6] 佟首峰,阮锦,郝志航. CCD 图像传感器降噪技术的研究[J]. 光学 精密工程, 2002, 10(2): 140-145.
TONG SH F, RUAN J, HAO ZH H. Noise reducing scheme on output of CCD [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 10(2): 140-145. (in Chinese)
- [7] 陈晓钟,孙华燕. 一种自然纹理背景下的图像目标检测方法[J]. 光学 精密工程, 2000, 8(5): 421-424.
CHEN X ZH, SUN H Y. An image target testing method under natural texture background [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(5): 421-424. (in Chinese)

作者简介:龙华伟(1979 -),男,广西人,2002年毕业于武汉测绘科技大学,学士学位,主要研究方向为光学设计,虚拟检测技术,基于数字图像处理的智能检测仪器的研究与开发,计算机仿真技术研究等,E-mail:opt-long@163.com;
沈湘衡(1952 -),男,吉林人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究员,硕士研究生导师,主要研究方向为电学系统的检测及相关检测设备的研究开发。