

石英局部集中应力对数字太阳传感器精度的影响

宋崇金^{1,2}, 席红霞^{1,2}, 曹珺^{1,2}, 曲海波^{1,2}, 陈丽^{1,2}, 刘烟^{1,2}, 安俊洁^{1,2}

¹中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

²中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083

摘要 理论分析了石英材料内应力对数字太阳传感器精度的影响机理,对石英样片进行了应力双折射测试,将不同的石英样片装在数字太阳传感器单机上进行了全视场测试,给出了控制石英材料应力等级的措施。研究结果表明,只有局部内应力集中的石英样片才会产生干扰光斑,这与理论分析结果相吻合。

关键词 材料; 数字太阳传感器; 局部内应力; 应力双折射; 精度

中图分类号 V19 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.061601

Influence of Locally Concentrated Stress in Quartz on Precision of Digital Sun Sensors

Song Chongjin^{1,2}, Xi Hongxia^{1,2}, Cao Jun^{1,2}, Qu Haibo^{1,2},

Chen Li^{1,2}, Liu Yan^{1,2}, An Junjie^{1,2}

¹ Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

² Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

Abstract The influence mechanism of the internal stress in quartz on the precision of digital sun sensors is theoretically investigated. The stress birefringence test of quartz specimens is conducted and the different quartz specimens are mounted on the digital sun sensors for a full visual field test. The means to control the stress level of quartz materials are put forwards. The research results show that there exists interference spots only for the quartz specimens with locally concentrated internal stresses, which is consistent with the theoretical analysis result.

Key words materials; digital solar sensors; local internal stress; stress birefringence; precision

OCIS codes 160.4670; 160.4760; 160.2750

1 引言

基于光学掩模小孔成像的原理,数字太阳传感器利用太阳的平行光实现对太阳角度的测量,具有精度高、视场范围大($128^\circ \times 128^\circ$)、抗干扰能力强等优点,被广泛应用于卫星等航天器的姿轨控制系统中^[1-3]。

数字太阳传感器根据掩模小孔的数量可分为单孔式和多孔式高级成像系统(APS)太阳传感器^[3]。数字太阳传感器的光学元件由衰减片和小孔掩模板组成,石英是这些光学元件的基体材料。本文研究了石英局部集中应力对数字太阳传感器精度的影响,发

现石英局部集中应力是数字太阳传感器产生干扰光斑的主要原因之一,通过对石英样片进行应力双折射测试及数字太阳传感器全视场测试进行了验证。

2 局部应力集中对单机精度的影响

2.1 应力集中影响机理

图1所示为四孔式APS太阳传感器的工作原理图,其中, $X_s Y_s Z_s O'$ 为太阳传感器的基准坐标系, Z_s 轴为瞄准轴。太阳光经过掩模小孔板在探测器上投影4个亮斑,它们组成图形的几何中心偏离原点,其坐标为 (x_s, y_s) 。图1中太阳光线在太阳传感器坐

收稿日期: 2017-11-09; 收到修改稿日期: 2017-12-05

作者简介: 宋崇金(1982—),男,硕士,助理研究员,主要从事太阳传感器的光机结构以及相关地面验证系统设计方面的研究。E-mail: Songchongjin@mail.sitp.ac.cn

标系中的方位角为 a , 俯仰角为 δ , 太阳光线在基准 $X_s O' Z_s$ 平面上的投影与 Z_s 轴的夹角为 ξ , 在基准平面 $Y_s O' Z_s$ 上的投影与 Z_s 轴的夹角为 η 。

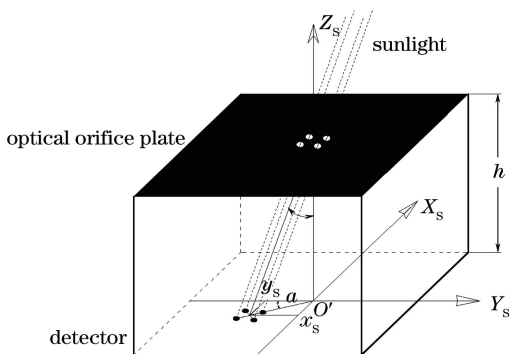


图 1 四孔式 APS 太阳传感器的工作原理

Fig. 1 Working principle for four-holes APS sun sensor
太阳光线投影的夹角与方位角、俯仰角的关系为

$$\tan \xi = \tan \delta \cdot \sin a = \frac{X_s}{h}, \quad (1)$$

$$\tan \eta = \tan \delta \cdot \cos a = \frac{y_s}{h}. \quad (2)$$

太阳光经过小孔掩模板在探测器上所呈现的光斑位置和光斑数量决定了数字太阳传感器单机的精度, 本文采用多孔式 APS 的小孔阵列结构来提高太阳传感器的测量精度^[2-3]。

石英具有优良的光谱特性和稳定的物理特性, 通常将其作为数字太阳传感器入射窗口和小孔掩模板的基体材料。石英玻璃在熔炼后具有很大的内应力, 切割研磨等加工过程以及环境温度的变化也会引入应力。石英玻璃中每一点的折射率与该点的应力相关, 应力分布不均或局部内应力过大会造成玻璃的折射率分布不均匀^[4-9], 使局部区域中的光线传输方向不断变化。如图 2 所示, 太阳光经过以石英为基体材料的衰减片和小孔掩模板, 在探测器上形

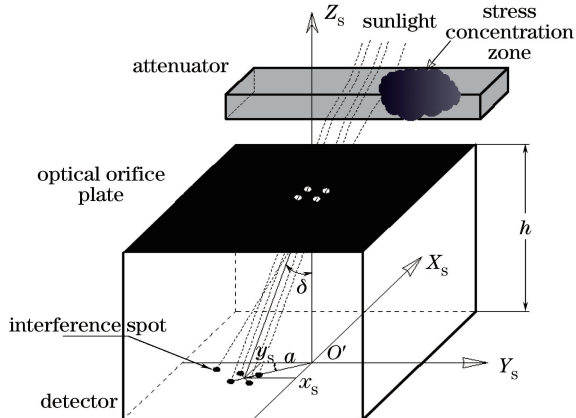


图 2 数字太阳传感器的光学结构示意图

Fig. 2 Schematic of optical structure for digital sun sensor

成 4 个光斑, 当石英片上存在局部内应力集中区域时, 经过该区域的部分太阳光不再平行于入射光, 经过小孔掩模板后形成干扰光斑, 即探测器上出现 5 个或者更多的光斑。

2.2 干扰光斑对单机精度的影响

如图 3 所示, 1 号、2 号、3 号、4 号为正常光斑, 4 个光斑连线交点 O 就是单机在该角度下的质心, 5 号为石英玻璃局部内应力集中所引起的光斑。如果 5 号光斑的能量大于单机的阈值, 就会形成干扰光斑, 单机系统会根据读取光斑的先后顺序选取 5 号, 1 号、2 号、3 号这 4 个光斑来计算出质心 P , 不同的质心位置对应于探测器上不同的地址, 质心位置从 O 点突跳到 P 点会造成该角度地址的突跳, 使单机精度出现跳变甚至异常。

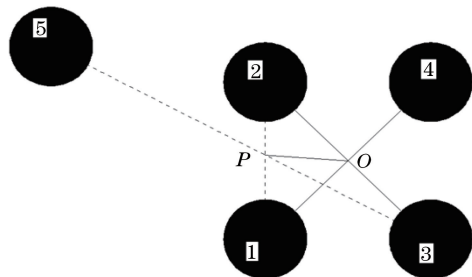


图 3 干扰光斑对质心的影响

Fig. 3 Impact of interference spot on centroid

3 应力双折射测试

3.1 应力与双折射

光学石英玻璃的内应力会引起双折射, 影响光学零件的加工和成像质量。光学玻璃的应力指标以光通过 1 cm 厚的玻璃时, o 光和 e 光所产生的光程差表征。若玻璃的厚度为 d (单位为 cm), 通过该玻璃时, o 光和 e 光的光程差为 Δ' (单位为 nm), 则

$$\delta_n = n_o - n_e = \Delta' / d, \quad (3)$$

式中 δ_n 为双折射率, n_o 、 n_e 分别为 o 光和 e 光的折射率^[5]。

石英材料共分为 5 个应力等级, 对应的双折射率见表 1^[5]。

表 1 JGS1 石英材料的应力双折射等级^[5]

Table 1 Levels of stress birefringence of JGS1 quartz materials^[5]

Classification	Birefringence $\delta_n / (\text{nm} \cdot \text{cm}^{-1})$
Level I	≤ 2
Level II	2-6
Level III	6-10
Level IV	10-20
Level V	20-50

3.2 双折射的测量方法

双折射的测量采用干涉色法^[5],通过识别干涉色来确定光程差的大小。若玻璃具有双折射率,则出射的 o 光和 e 光具有稳定的光程差,通过检偏器

后将发生干涉,利用干涉色判定光程差来确定玻璃的双折射等级。在对精度要求不高的情况下,可以采用筒式偏光仪法和全波片法;在对精度要求高的情况下,可采用 1/4 波片法,其原理如图 4 所示。

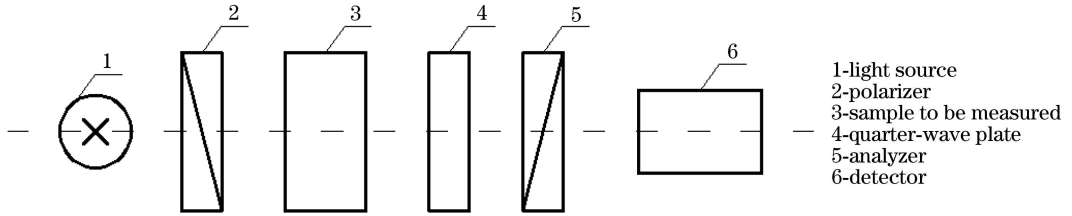


图 4 1/4 波片法光路原理

Fig. 4 Schematic of optical path for quarter-wave plate method

白光经过起偏器得到线偏振光,再经过具有双折射率的试样后得到椭圆偏振光。因沿椭圆长半轴和短半轴的分振动间的相位差为 $\pi/2$,而 1/4 波片的两个主方向的相位差也是 $\pi/2$,故只要使 1/4 波片的两个主方向分别与椭圆长短半轴重合,则椭圆偏振光通过 1/4 波片两分振动间的相位差变为 π 或 0,即合成线偏振光,合成的线偏振光相对于入射的线偏振光已经偏转 θ , θ 仅取决于试样的 o 光和 e 光之间的相位差 ϕ ,即

$$\phi = 2k\pi + 2\theta, k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (4)$$

当检偏器与线偏振光的振动方向垂直时,视场为暗。此时测出检偏器的旋转角 θ ,并以此确定小于 2π 的 ϕ 的值。当 $\phi = 0$ 时,视场中出现黑色条

纹,其他级条纹都是彩色条纹。试样中部测试点的总光程差 Δ 应是改测试点处条纹与零级黑条纹间的光程差,它包括靠近该测试点干涉条纹到测试点的光程差 $\Delta_1 = \theta\lambda/\pi$ 和靠近测试点的干涉条纹 (N 级)到零级黑条纹的光程差 $\Delta_2 = N\lambda$,即

$$\Delta = N\lambda + \theta\lambda/\pi. \quad (5)$$

利用德国 ILIS 公司的 M4-058 型大口径应力双折射仪对 1 # 石英样片进行测试,样片尺寸为 $28.0 \text{ mm} \times 28.0 \text{ mm} \times 3.8 \text{ mm}$,测得最大应力双折射率为 $9.2 \text{ nm} \cdot \text{cm}^{-1}$,视场范围内两侧边缘应力比较集中。另选三个相同尺寸的石英样片进行应力双折射测试,编号为 2 #、3 #、4 #,测得的最大应力光程差分别为 $1.6, 1.6, 2.6 \text{ nm} \cdot \text{cm}^{-1}$,如图 5 所示。

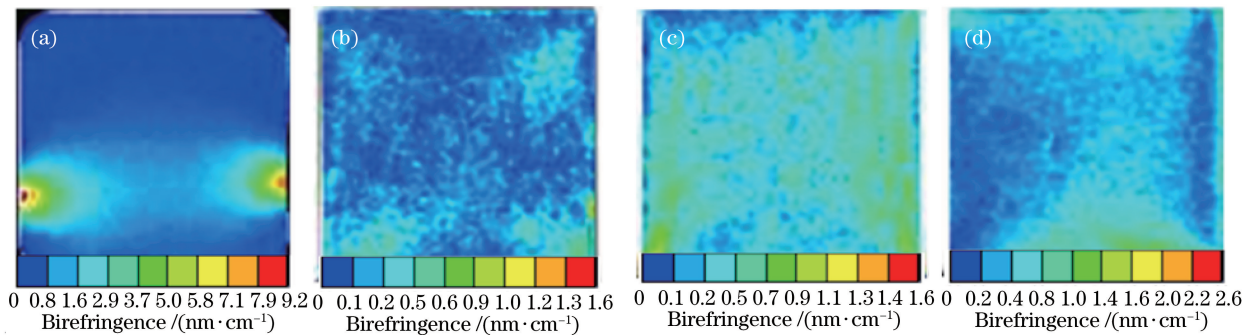


图 5 不同石英样片的应力分布。(a) 1 #;(b) 2 #;(c) 3 #;(d) 4 #

Fig. 5 Stress distribution of different quartz specimens. (a) 1 #; (b) 2 #; (c) 3 #; (d) 4 #

根据测试结果可知,1 # 应力明显比较集中,属于三级应力等级,2 #、3 #、4 # 石英样片应力均属于二级应力等级。

4 精度测试

利用太阳模拟器、转台等专用标定装置对数字太阳传感器测量模型的参数进行测定,如图 6 所示。在进行太阳传感器标定前,需要根据标定装置以及

太阳传感器的成像过程建立太阳传感器的测量模型,即建立太阳光斑质心坐标与入射太阳光矢量间的对应关系,然后利用标定设备获取标定点的坐标和测试点的数据(一组已知精度的转台的位置角度和对应的一组太阳光斑质心坐标),其中标定点的数据用于模型参数的标定,测试点的数据用于太阳传感器的精度测试。将标定点的坐标代入所建立的测量模型中进行优化计算,求解相应的模型参数。最

后将测量点的数据代入已经标定的测量模型中,按照误差统计公式计算相应的精度^[10]。

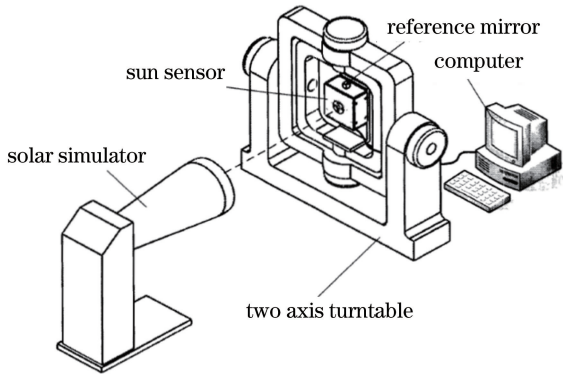


图 6 太阳传感器标定系统示意图

Fig. 6 Schematic of calibration system for sun sensor

将 1#、2#、3#、4# 石英样片分别装在数字太阳传感器上,在全视场 $\pm 60^\circ \times \pm 60^\circ$ 范围内,以 1° 为间隔,对单机进行测试。测试结果表明,只有安装 1# 石英样片的单机会出现干扰光斑,出现干扰光斑的范围见表 2。当方位角为 40° 、俯仰角为 10° 时,光线通过 4 个石英样片和小孔掩模板在探测器上所呈的光斑图像分别如图 7 所示。当方位角为 40° 、俯仰角为 20° 时,光线通过 4 个石英样片和小孔掩模板在探测器上所呈的光斑图像分别如图 8 所示。

表 2 全视场干扰光斑的范围

Table 2 Range of interference spot in full visual field

Pitch angle $\delta / (^\circ)$	Azimuth angle $a / (^\circ)$
9	39.9179-40.5193
10	39.9000-40.5017
11	39.7906-40.4930
12	39.7902-40.4931
13	39.7988-40.4017
14	39.8163-40.4197
15	39.7422-40.3463
16	39.6770-40.3823
17	39.6208-40.2261
18	39.5737-40.1799
19	39.6369-40.1426
20	39.5069-40.1149
21	39.4875-39.8936
22	39.4775-39.8842
23	39.4771-39.7829
24	39.4864-39.6907
25	39.1983-39.7102
26	39.0214-39.5348
27	38.9564-39.2655
28	38.7978-39.2113
29	38.9595-39.1668

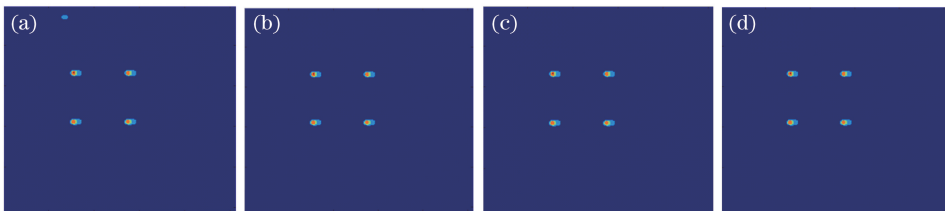


图 7 方位角为 40° 、俯仰角为 10° 时不同石英样片的光斑图像。(a) 1#;(b) 2#;(c) 3#;(d) 4#

Fig. 7 Light spot images of different quartz specimens when azimuthal angle is 40° and pitch angle is 10° .

(a) 1#; (b) 2#; (c) 3#; (d) 4#

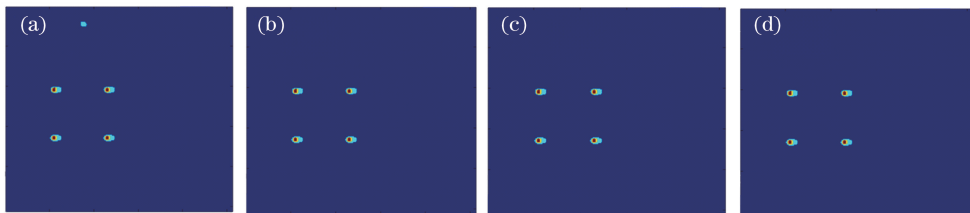


图 8 方位角为 40° 、俯仰角为 20° 时不同石英样片的光斑图像。(a) 1#;(b) 2#;(c) 3#;(d) 4#

Fig. 8 Light spot images of different quartz specimens when azimuthal angle is 40° and pitch angle is 20° .

(a) 1#; (b) 2#; (c) 3#; (d) 4#

由图 7、8 可知:1) 在全视场测试过程中,只有 1# 石英样片出现干扰光斑,且干扰光斑只有当单机方位角 a 为 $38^\circ \sim 40^\circ$,俯仰角 δ 为 $9^\circ \sim 29^\circ$ 时会出

现,这与 1# 石英样片在该区域的应力集中有关;2) 干扰光斑的光强明显小于 4 个正常光斑,这与折射率变化有关。为了消除干扰光斑,需要控制石英光

学元件的应力等级,主要措施为:1)从源头上控制石英光学元器件原材料的应力等级;2)在加工过程中对材料进行应力均匀优化处理^[11];3)对加工后的光学元器件进行应力双折射测试筛选;4)在石英光学元器件装配过程中避免夹紧力和温度剧烈变化。

5 结 论

阐述了四孔式数字太阳传感器的工作机理,分析了光学石英片内应力局部集中对数字太阳传感器精度的影响。选取不同石英样片分别装在数字太阳传感器单机上进行应力双折射测试,测试结果表明:只有局部内应力较大的石英样片会产生干扰光斑,且产生干扰光斑的区域与应力集中的区域重合,验证了石英内部应力局部集中对数字太阳传感器精度的影响机理。最后提出了消除数字太阳传感器干扰光斑的措施。

参 考 文 献

- [1] Xi H X. Large field and high precision digital sun sensor[J]. *Infrared*, 2003(1): 25-29.
席红霞. 大视场、高精度数字式太阳传感器[J]. 红外月刊, 2003(1): 25-29.
- [2] Zheng Z M, Ding T H. Optical system design for a micro digital sun sensor[J]. *Optical Technique*, 2006, 32(2): 240-243.
郑志敏, 丁天怀. 小孔阵列式太阳传感器的光学系统设计[J]. 光学技术, 2006, 32(2): 240-243.
- [3] Zheng Z M, Ding T H, Zhang J F. Characteristics of aperture-array diffraction and its application[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(2): 294-299.
郑志敏, 丁天怀, 张建福. 小孔阵列衍射特性与应用[J]. 光学学报, 2006, 26(2): 294-299.
- [4] Wang L F, Zhao M Y. *Optical glass technology*[M]. Beijing: Arts Press, 1995.
王连发, 赵墨砚. 光学玻璃工艺学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1995.
- [5] Zhou Y M, Li J F, Wang J, *et al.* *Optical measurement technology*[M]. Xi'an: Xi'an Electronic and Science University Press, 2013: 73-77.

周言敏, 李建芳, 王君, 等. 光学测量技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2013: 73-77.

- [6] Jiang J B, Ma J J, Liu J N. Effect of refractive index inhomogeneity on backscattering of laser gyros[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(6): 061402.
蒋军彪, 马家君, 刘建宁. 折射率非均匀性对激光陀螺背向散射的影响分析[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(6): 061402.
- [7] Gu Q Z, Li Q H. Novel photonic crystal fiber with high birefringence and low loss[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(6): 060603.
谷芊志, 励强华. 一种高双折射、低损耗的新型光子晶体光纤[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(6): 060603.
- [8] Jian Y D, Tang J X, Wu S Y, *et al.* Model for rapid reverse determination of the refractive index bulk inhomogeneity of thin films at oblique incidence[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(1): 0131001.
简钰东, 汤建勋, 吴素勇, 等. 斜入射下薄膜体折射率不均匀度快速反演模型[J]. 光学学报, 2016, 36(1): 0131001.
- [9] Ding J W, Liang B M, Jiang Q, *et al.* Phase characteristic of near zero refractive index material and its application[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(3): 031603.
丁俊伟, 梁斌明, 蒋强, 等. 近零折射率材料相位特性及应用[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(3): 031603.
- [10] Wei X G, Zhang G J, Fan Q Y, *et al.* Calibration of transform matrix between sun sensor measurement and cubic prism coordinate systems[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(4): 849-853.
魏新国, 张广军, 樊巧云, 等. 太阳传感器测量坐标系与立方镜坐标系转换矩阵的标定[J]. 光学精密工程, 2009, 17(4): 849-853.
- [11] Cui J Y. *Optical machinery fundamentals optical materials and processing technics* [M]. Second Edition. Beijing: Tsing Hua University Press, 2014: 54-57, 216-219.
崔建英. 光学机械基础: 光学材料及其加工工艺[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2014: 54-57, 216-219.