文章编号 1674-2915(2013)05-0788-07

拼接式钢带光栅编码器测角误差分析与修正

潘 年[1,2],马文礼[1*]
(中国科学院 光电技术研究所,四川 成都 610209;2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘要:针对望远镜对高精度测角技术的要求,分析了机械安装偏心、加工椭圆度误差、轴系晃动等对新型拼接式钢带光栅编码器测角的影响,并制定了相位差为90°的4读数头软件细分测角方案。在机械安装偏心为10 μm、加工椭圆度为2 μm、轴系晃动为0.6″的实验平台上进行了逆时针和顺时针测角实验,两组实验测角误差RMS值分别为0.393″和0.488″。实验表明:该测角方案能消除机械安装偏心、加工椭圆度误差等对测角数据的影响,实现了亚角秒级测角。

关 键 词:望远镜;编码器;钢带光栅尺;角度测量;误差分析
中图分类号:TH743; TN762 **文献标识码**:A doi:10.3788/CO.20130605.0788

Error analysis and correction of scale tape grating encoder

PAN Nian[1,2], MA Wen-li[1*]
(1. *Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu* 610209, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: mawenli62@yahoo.com.cn*

Abstract: To satisfy rigid performance specifications of goniometry for a telescope, this paper analyzes the impacts of the mechanical installation eccentric, roundness error and the shafting sloshing on angle measurements by an encoder with a scale tape grating, and develops a software subdivision angle measurement program based on 4 reading heads and 90° phase difference. The counterclockwise and clockwise angle measuring experiments are performed on a experimental platform with a mechanical installation eccentric of 10 μm, roundness error of 2 μm and shafting sloshing of 0.6″. The measuring angle error RMS values from two sets of experiments are 0.393″, 0.488″, respectively. The experiments prove that the program can eliminate the angular measurement errors caused by the mechanical installation eccentric, machining roundness error and the shafting sloshing. It achieves arcsecond angle measurements.

Key words: telescope; encoder; scale tape grating; angle measurement; error analysis

收稿日期:2013-07-21;**修订日期**:2013-09-23
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60978050)

1　引　言

高精度地指向是衡量望远镜整体性能的一个重要的指标,根据方位-俯仰设计的望远镜主要通过方位轴和俯仰轴协同运动的方法实现望远镜指向和跟踪,而作为控制反馈的角度编码器就必须安装在望远镜的方位轴、俯仰轴中。现代望远镜的轴系尺寸使得传统的玻璃圆光栅编码器不再适用,而拼接式钢带光栅编码器具有精度高、装调简单、能灵活地改变自身尺寸等优点,已作为新一代角度编码器被广泛地应用在现代望远镜测角系统中。

然而,编码器系统的性能常常会受到机械安装、机械加工误差,随机误差等各类误差因素的影响[1],在测角精度要求为角秒或亚角秒级场合,往往达不到要求。国外很多望远镜项目如 VLT(Very Large Telescopy),LBT(Large Binocular Telescopy),WHT(Willian Herschel Telescopy)[2-6]等都对编码器的类型、测角方案、测角的误差来源以及校正方案做出了详细的理论分析和实验验证;而国内的望远镜项目在此方面的研究还不足,特别对于新型的拼接式钢带光栅尺编码器,目前尚未有关其测角误差分析的文献发表。

本文在分析了影响拼接式钢带光栅编码系统的各种误差之后,制定了详细的修正方案,最后通过测角实验验证了方案的可行性。

2　拼接式钢带光栅编码器测角误差分析与修正

根据编码器安装方式以及编码器测量的基本原理[7-8],影响拼接式钢带光栅编码器测角的因素可以分为 3 种:系统误差,机械安装、机械加工误差,其他误差。

2.1　系统误差

系统误差主要包括光栅刻线误差和由于温度不均匀引起的光栅尺不规则变形。目前成熟的光刻技术可以保证光栅的每米刻线误差在 3 μm[9],并且莫尔条纹对光栅刻线误差具有平均效应[7]。因此,光栅刻线误差引起的测角偏差将忽略不计,在此只分析由于温度不均匀引起的测角误差。

假定光栅尺的热膨胀系数 α,刻线数为 N,栅距为 P,转台或者轴系旋转的弧长为 L,光栅尺与环境之间存在 ΔT 的温度差异,则由于温度不均匀引起的光栅尺出现的局部变形量 δL 和测角偏差 $\delta\theta$ 可以表达为:

$$\delta L = \alpha L \Delta T , \tag{1}$$

$$\delta\theta = \frac{\delta L}{P}\frac{360 \cdot 3600''}{N} . \tag{2}$$

一般而言,钢带光栅尺材料的热稳定性能很好,如海德汉 ERA 系列钢带光栅尺的热膨胀系数为 $10.5 \times 10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1}$[6]。当 $L = P, \Delta T = 1\ \mathrm{K}, N =$ 360 00时,$\delta\theta = 0.004''$。因此,温度偏差对测角误差的影响较小。

2.2　机械加工和安装误差

机械加工和安装误差主要包括光栅尺与轴系之间的安装偏心、光栅尺安装鼓加工椭圆度误差、转台轴系的晃动误差。

2.2.1　偏心误差

在编码器安装时,如果光栅尺与转轴的回转中心之间存在 e 的偏心,如图 1 所示,转台按逆时针方向转动。

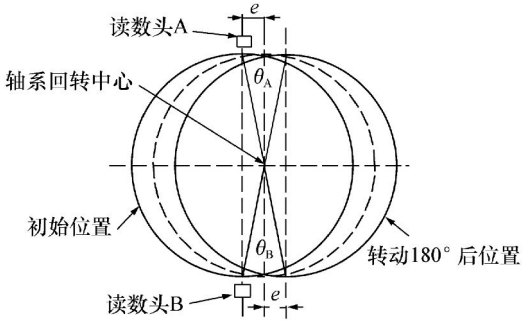


图 1　安装偏心原理图

Fig. 1　Schematic diagram of mechanical installation eccentricity

当转台转动 180°时,读数头 A 的测量角度为(″):

$$\theta_A = (\pi - \frac{4e}{D}) \times \frac{180}{\pi} \times 3600 . \tag{3}$$

而偏心引起读数头 A 测角误差的传递系数

为：

$$\frac{\partial\theta_A}{\partial e} = -\frac{180\times 3600}{\pi}\cdot\frac{4}{D}. \tag{4}$$

偏心引起的测角误差为：

$$\sigma_A = \frac{\partial\theta_A}{\partial e}\cdot e. \tag{5}$$

若在读数头 A 的对径处安装读数头 B，此时读数头 B 的测量角度为(″)：

$$\theta_B = (\pi + \frac{4e}{D})\times\frac{180}{\pi}\times 3600. \tag{6}$$

偏心引起读数头 B 测角误差的传递系数为：

$$\frac{\partial\theta_B}{\partial e} = \frac{180\times 3600}{\pi}\cdot\frac{4}{D}. \tag{7}$$

偏心引起的测角误差为：

$$\sigma_B = \frac{\partial\theta_B}{\partial e}\cdot e. \tag{8}$$

当光栅尺直径 $D=458.112$ mm 时，此时由于机械安装偏心引起的测角误差的传递系数为 $1.8(″)\cdot\mu m^{-1}$。对径安装的读数头 A，B 在不同的机械安装偏心的情况下引起的测角误差如表 1 所示。

表 1 机械安装偏心引起的测角误差

Tab. 1 Angle measurement error caused by mechanical installation eccentric

偏心量/μm	读数头 A 测角误差/(″)	读数头 B 测角误差/(″)
1	-1.8	1.8
2	-3.6	3.6
3	-5.4	5.4
4	-7.2	7.2
5	-9	9
6	-10.8	10.8
7	-12.6	12.6
8	-14.4	14.4
9	-16.2	16.2
10	-18	18

从表 1 可知，机械安装偏心对测角误差的影响很大，当安装偏心为 10 μm 时，测角误差达到 18″。但是，对径安装的读数头 A、B 两点的测角误差值大小相等，符号相反。这样，可以通过对径读数头的方法消除机械安装偏心引起的测角误差。

2.2.2 椭圆度误差

由于加工的原因，光栅尺的安装鼓变成为椭圆形，如图 2 所示。假设 a 为椭圆长轴，b 为椭圆短轴，r 为椭圆上点 (x,y) 到回转中心的距离(等效测量半径)，R 为理想圆光栅的半径，θ 为圆光栅转过的角度，δ_{re} 为椭圆度误差，圆光栅的刻线误差为 δ。

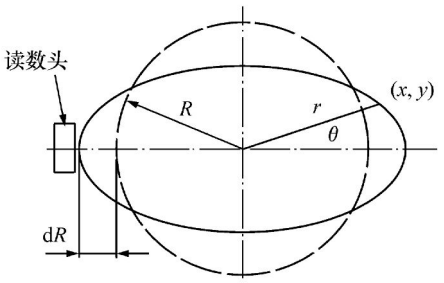


图 2 机械加工椭圆度原理图

Fig. 2 Schematic diagram of roundness error

由加工椭圆度引起的测角误差 σ_θ 可以表达为：

$$\sigma_\theta = \int_{\theta 1}^{\theta 2}\delta\cdot\left[\frac{\sqrt{b^2+\delta_{re}(a+b)\sin^2\theta}}{ab}-\frac{1}{R}\right]\cdot\frac{180}{\pi}\times 3600\cdot d\theta. \tag{9}$$

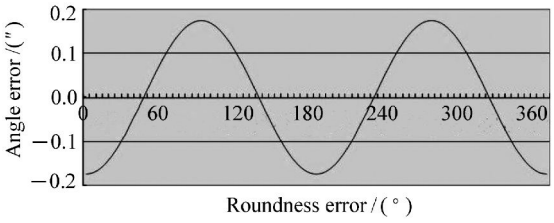


图 3 机械加工椭圆度为 2 μm 时引起测角误差曲线

Fig. 3 Measurement error curve when the roundness error is 2 μm

由图 3 可知，当转台旋转一周时由于加工椭圆度而引起的测角误差具有二次谐波的特性。因此，若安装相位差为 90°的两个读数头就可以消除由于加工椭圆度引起的测角误差。

2.2.3　轴系晃动误差

轴系晃动误差是指在轴系转动过程中,轴系的旋转中心发生了变化,由此引起的测角误差,如图 4 所示。

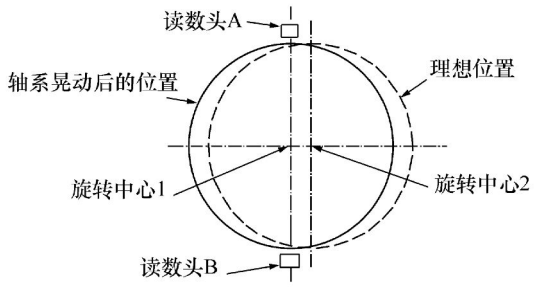


图 4　轴系晃动简图

Fig. 4　Schematic diagram of shafting sloshing

读数头 A,B 的输出信号可以表达为测量角度 θ 的正弦信号,为了简化分析,假设两信号的幅值都为 U,输出信号可以表达为:

$$A = B = U\sin(\theta + \varphi)\ . \tag{10}$$

两信号的和可以表达为:

$$A + B = 2U\sin(\theta + \varphi)\ , \tag{11}$$

式中,φ 为信号的初始相位。

当轴系出现晃动时,假设引起的角度偏差为 $\Delta\theta$,此时 A,B 信号为:

$$\begin{aligned} A &= U\sin(\theta + \Delta\theta + \varphi) \\ B &= U\sin(\theta - \Delta\theta + \varphi) \end{aligned}\ . \tag{12}$$

两信号的和可以表达为:

$$A + B = 2U\cos(\Delta\theta)\sin(\theta + \varphi)\ . \tag{13}$$

式(13)表明当轴系出现晃动时,只会引起读数头输出信号的幅值发生变化,并没有引起所测角度的变化。因此,轴系晃动不会产生测角误差。

2.3　其他误差源

其他的误差包括信号的采集误差和细分误差。光电编码器在信号采集时,往往采用光电扫描法[9],这就保证了信号的采集质量。因而,其他误差源主要来自于细分误差。

读数头的输出信号必须经过细分处理是为了提高编码器的分辨率,然而读数头输出信号的直流分量、噪声、相位偏差等会引起细分误差[10],其中由于信号的相位偏差引起的细分误差纠正难度最大[11]。

为了纠正编码器的细分误差,在进行信号的模数转换之前,可先通过差分放大抑制光电信号的共模干扰,消除信号中的直流分量和偶次谐波成分[10];而对于相位偏差引起的细分误差,目前已经提出了任意相位差的细分误差纠正方案的软件细分算法[11-14]。该算法基本思想是根据两路条纹信号的极性和幅值大小,把一个信号周期分成多个区段,高速地采集两路条纹信号,通过判断信号采样点所处的区段是否跳变对信号幅值交点进行动态跟踪。对不足一个周期的条纹移动,当测量出起点与终点的幅值,并计算出其所在的区段及位置后,结合两路信号的交点,就可实现对任意相位差条纹信号的细分。

综上所述,在进行望远镜编码器安装时,若采用对径安装的读数头的方法能消除由于机械安装偏心引起的测角误差;两相位差为 90°的读数头能校正由于圆度误差引起的测角误差;而轴系的晃动只会引起输出信号的幅值变化,不会产生测角误差;信号采集误差和信号的细分误差可通过电学的方法实现误差校正。因此,为了校正机械加工、安装误差、细分对测角结果的影响,提高测角的精度,制定了相位差为 90°的 4 读数头软件细分测角方案。

3　测角实验与结果

测角实验采用直径为 458.112 mm 的海德汉 ERA8400C 型拼接式钢带光栅尺,使用 1.15 nm[5] 力矩扳手确保光栅尺接缝良好。4 个读数头相位彼此相隔 90°,测角实验原理如图 5 所示,实验装置如图 6 所示。钢带光栅尺安装在光栅鼓上,光栅鼓与转台的偏心为 10 μm,光栅鼓椭圆度误差为 2 μm。在进行测角时,将 23 面体安装在转台上,通过自准直测量法[15],给出旋转的标准角度。角度数据通过如图 7 所示的数据采集电路传递给计算机,并由计算机对 4 路读数头的数据进行补偿、细分、储存,通过与 23 面体以及自准直仪的数据对比来验证测角方案的可行性。

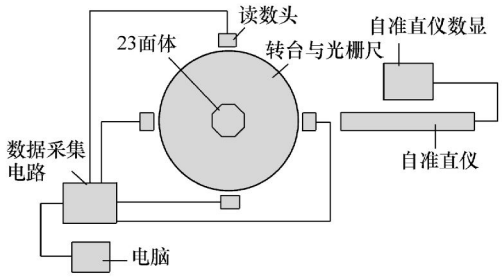
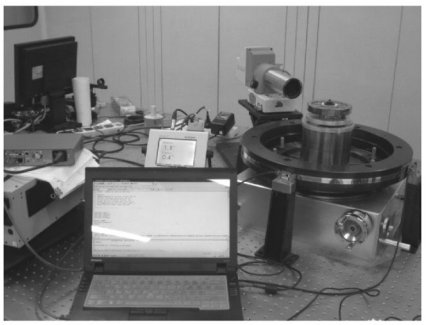


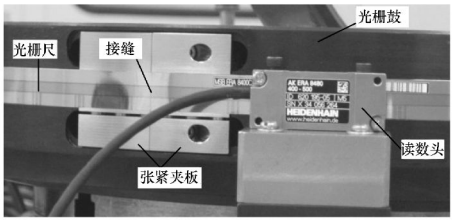
图5 测角实验原理图

Fig. 5 Schematic diagram of angle measuring experiment



(a) 实验装置

(a) Experimental devices



(b) 光栅尺接缝

(b) Juncture of scale tape grating

图6 测角实验装置图与光栅尺接缝

Fig. 6 Experimental devices and the juncture of scale tape grating

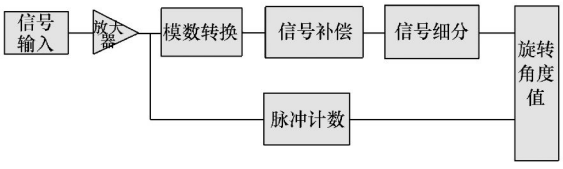


图7 数据处理框图

Fig. 7 Block diagram of data processing

表2 逆时针旋转回零误差

Table 2 Return error for counterclockwise rotation (″)

读数头 A	读数头 B	读数头 C	读数头 D
0.23	0.28	−0.49	−0.47

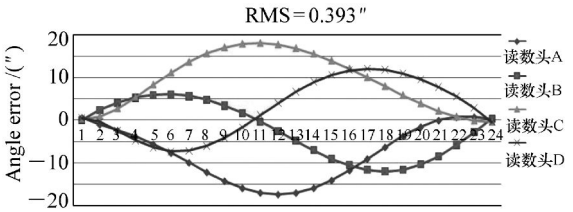


图8 逆时针旋转读数头测角误差曲线

Fig. 8 Angle measurement error curve for counterclockwise rotating

表3 顺时针回零误差

Table 3 Return error for clockwise rotation (″)

读数头 A	读数头 B	读数头 C	读数头 D
−0.32	−0.35	−0.13	−0.48

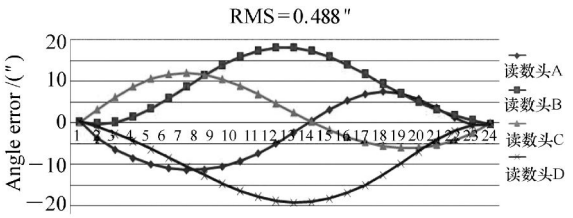


图9 顺时针旋转读数头测角误差曲线

Fig. 9 Angle measurement error curve for clockwise rotating

从表2和表3顺时针和逆时针测角时4个读数头的回零误差数据中得知,所有读数头的回零误差均小于0.5″,这既表明系统的测角重复性高,也表明了测角数据可靠;理论分析指出当光栅尺的机械安装偏心为10 μm,加工椭圆度引起的测角误差为0.2″,引起的总误差为18.2″,顺时针与逆时针旋转读数头测角误差曲线如图8和图9所示,而两组测角误差数值最大分别为18.16″,19.16″,表明理论分析模型与实际情况较为接近;两组测角误差RMS值分别为0.393″,0.488″,见图8、图9,表明4读数头两两90°相位安装测角方

案,能消除由于机械安装偏心和加工椭圆度引起的测角误差,结合软件细分实现了亚角秒级测角。

4　结　论

本文首先从理论的角度分析了机械安装偏心、加工椭圆度、轴系晃动等对编码器测角的影响,然后制定了相位差为 90°的 4 读数头软件细分测角方案。最后在机械安装偏心为 10 μm,加工椭圆度为 2 μm,轴系晃动为 0.6″的实验平台上进行了逆时针和顺时针测角实验,两组实验测角误差 RMS 值分别为 0.393″,0.488″。实验表明:该方案能消除由于机械安装偏心、加工椭圆度等引起的测角误差,实现了亚角秒级测角,对后续大口径地基望远镜测角技术的分析研究有一定的指导意义和借鉴作用。

参考文献:

[1] MANCINI D,CASCONE E,SCHIPANIL P. Galileo high-resolution encoder system[J]. *SPIE*,1997,3112:328-334.

[2] RAVENSBERGEN M,MERINO R,WANG C P. Encoders for the altitude and azimuth axes of the VLT[J]. *SPIE*,1995,2479:322-328.

[3] WARNER M,KRABBENDAM V,SCHUMACHER G. Adaptive periodic error correction for heidenhain tape encoders[J]. *SPIE*,2008,7012:123-131.

[4] CALLAHAN S,ASHBY D,HAIR T,*et al*.. The large binocular telescope main axis encoders:mounting hardware, read heads, and tape installation[J]. *SPIE*,2006,6267:62673B.

[5] ASHBY D S,SARGENT T,COX D. The Large Binocular Telescope azimuth and elevation encoder system[J]. *SPIE*,2008,7019:201-210.

[6] FISHER M. A high resolution incremental tape encoder on the William Herschel Telescope[J]. *SPIE*,1994,2199:889-900.

[7] 张玉莲. 传感器与自动检测技术[M]. 2 版. 北京:机械工业出版社,2012:80-81.
ZHANG Y L. *Sensor with Automatic Detection Technology*[M]. 2nd ed. Beijing:China Machine Press,2012:80-81. (in Chinese)

[8] 王明佳,武治国,徐大鹏,等. 精确自动识别莫尔条纹方向的算法[J]. 中国光学,2011,4(5):509-513.
WANG M J,WU ZH G,XU D P,*et al*.. Accurate and automatic recognition of Moire fringe angle[J]. *Chinese Optics*,2011,4(5):509-513. (in Chinese)

[9] Heidenhain Product introduction: angle encoder[EB/OL]. [2013-04-07]. http://www. heidenhain. com. cn.

[10] 徐晓丹. 增量式光电编码器细分技术研究[D]. 长春:长春理工大学,2009.
XU X D. Research of electronic subdivision of incremental shaft encoder[D]. Changchun:Changchun University of Science and Technology,2009.

[11] 熊文卓,孔智勇,张炜. 光电轴角编码器光电信号正交性偏差的相量校正方法[J]. 光学 精密工程,2007,15(11):1746-1748.
XIONG W ZH,KONG ZH Y,ZHANG W. Phase correction of quartering deviation of photoelectric rotary encoder[J]. *Opt. Precision Eng.*,2007,15(11):1746-1748(in Chinese).

[12] 吕孟军,郭琪,吕印晓. 莫尔条纹信号相位误差补偿[J]. 光学 精密工程,2009,17(7):1694-1700.
LÜ M J,GUO Q,LÜ Y X. Signal phase error compensation of Moire fringe[J]. *Opt. Precision Eng.*,2009,17(7):1694-1700. (in Chinese)

[13] 楚兴春,吕海宝,杜列波,等. 任意相位差条纹信号细分方法的研究[J]. 光学学报,2005,25(4):497-500.
CHU X CH,LÜ H B,DU L B,*et al*.. Research on subdividing method for random phase difference fringe signals[J]. *Acta Optica Sinica*,2005,25(4):497-500. (in Chinese)

[14] 李江国,宣明,王一凡. 莫尔条纹细分中相位误差的软件补偿方法[J]. 光学 精密工程,1995,3(1):69-72.
LI J G,XUAN M,WANG Y F. Soft ware compensation method of phase error in moire strip division[J]. *Opt. Precision*

Eng., 1995, 3(1): 69-72. (in Chinese)

[15] 邓立新, 杨建坤, 戴穗安, 等. 莫尔条纹技术的三维测角方法研究[J]. 光学与光电技术, 2010, 8(3): 39-41.
DENG L X, YANG J K, DAI S A, *et al*.. 3-Dimensional angular measurement method based on moire fringe[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2010, 8(3): 39-41. (in Chinese)

作者简介:

潘 年(1987—),男,重庆忠县人,博士研究生,2010年于重庆邮电大学获得学士学位,主要从事大尺寸光栅测角技术方面的研究。E-mail: wopannian@163.com

马文礼(1962—),男,吉林四平人,硕士,研究员,博士生导师,1993年于电视大学获得学士学位,2003年于电子科技大学获得硕士学位,主要从事微电子检测设备、线阵和面阵CCD光学拼接、低温光学系统、真空远红外光谱测量仪、空间相机内方位元素测量仪等方面的研制工作。E-mail: mawenli62@yahoo.com.cn

向您推荐《液晶与显示》期刊

- 中文核心期刊
- 中国液晶学科和显示技术领域的综合性专业学术期刊
- 中国物理学会液晶分会会刊、中国光学光电子行业协会液晶分会会刊
- 英国《科学文摘》(INSPEC)、美国《化学文摘》(CA)、俄罗斯《文摘杂志》(AJ)、美国《剑桥科学文摘》(CSA)、"中国科技论文统计源期刊"等20余种国内外著名检索刊物和文献数据库来源期刊

《液晶与显示》材料物理和化学、器件制备技术及器件物理、器件驱动与控制、成像技术与图像处理等栏目集中报道国内外液晶学科和显示技术领域中最新理论研究、科研成果和创新技术,及时反映国内外本学科领域及产业信息动态,是宣传、展示我国该学科领域和产业科技创新实力与硕果,进行国际交流的平台。其内容丰富,涵盖面广,信息量大,可读性强,是我国专业学术期刊发行量最大的刊物之一。

《液晶与显示》征集有关液晶和各类显示材料及制备方法、材料物理和化学; 液晶光学与光子学、生物液晶;液晶显示、有机电致发光显示、等离子体显示、发光二极管显示、电致发光显示、场发射显示、3D显示、微显示、真空荧光显示、电致变色显示及其他新型显示等各类显示器件物理和制作技术;各类显示新型模式和驱动技术、显示技术应用;显示材料和器件的测试方法与技术;各类显示器件的应用;与显示相关的成像技术与图像处理等研究论文。

《液晶与显示》热忱欢迎广大作者、读者广为利用,踊跃投稿和订阅。

地 址:长春市东南湖大路3888号
《液晶与显示》编辑部
邮 编:130033
电 话:(0431)6176059
E-mail: yjyxs@126.com

国内统一刊号:CN 22-1259/O4
国际标准刊号:ISSN 1007-2780
国内邮发代号:12-203
国内定价:40元/期
网 址:www.yjyxs.com