

# 高帧频面阵 CCD 探测器应用技术研究

王跃明, 刘银年

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

**摘要:**分析了高帧频频转移面阵 CCD 的工作机制, 设计了驱动电路和信号处理电路, 获得了帧频为 130 帧/秒的高清晰图像, 并提出了一种采用遮光板来提高帧频的新方法. 该方法将帧频提高到了 400 帧/秒, 具有较高的有效曝光比, 并进一步改善了图像的质量.

**关键词:**高帧频; 帧转移; 电荷耦气器件; 有效曝光比

**中图分类号:**TN29, 722.4 **文献标识码:**A

## APPLICATIONS OF HIGH FRAME RATE CCD DETECTORS TECHNOLOGY

WANG Yue-Ming, LIU Yin-Nian

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** The operation mechanism of high frame rate frame-transfer CCD array was analyzed. Driver circuits and signal processing circuits were designed. The image with high visibility was acquired by the CCD working on 130 fps. A new method to improve the frame rates was presented. The method introduces a light-proof board, and it has higher ratio of effective exposure, thus the frame rate is raised up to 400fps. Hence, the quality of the image is improved.

**Key words:** high frame rate; frame-transfer; CCD; ratio of effective exposure

### 引言

CCD (Charge Coupled Device) 面阵探测器在天文观测、空间遥感、光谱探测等光电成像领域得到了广泛的应用<sup>[1-3]</sup>. 在一些特殊的领域, 如碰撞试验摄影、动物生态学研究等, 高帧频面阵 CCD 成为关键组件, 高帧频 CCD 应用技术研究十分重要.

面阵 CCD 探测器的工作帧频不仅取决于 CCD 电荷转移的工作频率, 还受限于 CCD 探测器的总像元数. VCCD512H 和 VCCD1024H 是像元数分别为  $512 \times 512$  和  $1024 \times 1024$ , 采用同样结构和工艺的两款 CCD, 其最高工作帧频分别为 400fps 和 150fps. 本文将 VCCD1024H 作为成像探测器展开高帧频面阵 CCD 应用技术研究.

### 1 高帧频面阵 CCD 探测器

VCCD1024H 是背照型帧转移 CCD, 具有高灵敏度低噪声等优点, 具体性能参数见表 1. 在结构上分为 2 个感光区、2 个存储区、32 个串行读出寄存

器, 对称分布, 整个 CCD 被分成 32 个子阵列, 每个阵列占  $512 \times 64$  个像素单元, 各子阵列并行工作, 芯片结构如图 1 所示. 图 2 是 CCD 的信号读出示意图. 其中 A1, A2, A3 为 CCD 感光区控制时序, B1, B2, B3 为存储区控制时序, C1, C2, C3 为串行读出控制时序. Reset 为片内 CDS 电路的复位脉冲, CLAMP 为 CDS 电路的嵌位信号, SAMPLE 为 CDS 电路的采样信号. VR, VGSF, VSSF, VDD 为 CCD 工作的所需要的偏置电压. OUT 为 CCD 芯片输出的视频信号, 信号处理电路对视频信号进行相关处理, A/D 转换后由图像采集处理系统进行处理.

帧转移 CCD 工作帧频的上限取决于帧转移的速度和串行读出的速度. 帧转移时间是 CCD 工作帧频的一个关键影响因素. 尽管 VCCD1024H 已经采用了双边驱动, 也就是驱动信号从存储区和感光区的两侧同时驱动. 但是存储区和感光区的多晶硅线性电阻 R 和电容 C 需要足够的充电和放电时间, 其 RC 时间常数决定了帧转移的速度. 对于双边驱动的情况, 驱动信号在 CCD 的中间区域最差, 因为中间

像元的驱动信号经过了更长距离的传输. VC-CD512H 的帧转移时钟上限是 4MHz, 而 VC-CD1024H 因为有更多的像元, 帧转移时钟是 1MHz. 与帧转移相比, 串行读出的情况就要好多了, 因为串行读出操作和线列 CCD 电荷转移机制十分类似, 因此串行读出的速度一般可以做到很高, 关键就取决于系统的需要和后续处理电路的能力. VCCD512H 和 VCCD1024H 在片上都集成了相关双采样 CDS 电路, 最大带宽为 20MHz.

表 1 VCCD1024H 性能参数

Table 1 The specification of VCCD1024H

像元大小 (Pixel Size)	18 × 18 μm
光学填充因子 (Optical Fill Factor)	100%
量子效率 (Optimum Efficiency)	400nm, QE ≥ 45%
	600nm, QE ≥ 70%
	700nm, QE ≥ 65%
	800nm, QE ≥ 55%
读出噪声 (Readout Noise)	35e <sup>-</sup>
帧速率 (Frame Rate)	≤ 150fps
满势阱信号 (Full Well Signal)	240,000e <sup>-</sup>
灵敏度 (Sensitivity)	2.1 μV/e
垂直转移时钟 (Vertical Clock Rate)	≤ 1.5MHz
输出端口 (Output ports)	32 路

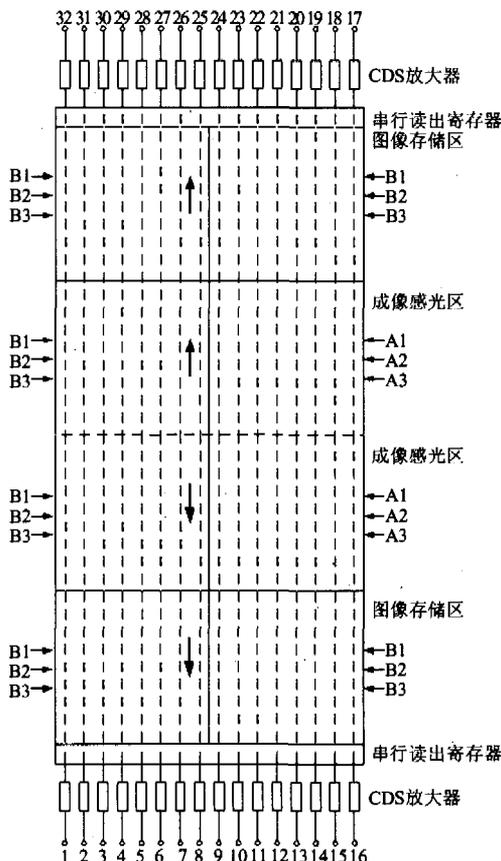


图 1 CCD 芯片结构 Fig. 1 Structure of the CCD chip

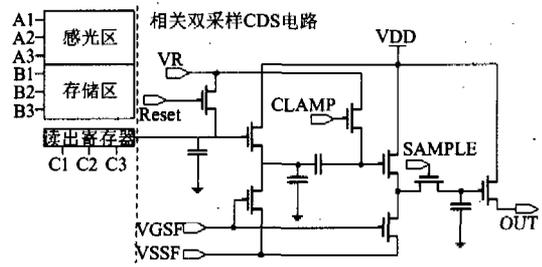


图 2 信号读出原理图 Fig. 2 Principle of signal readout

### 2 驱动与信号处理电路

在高帧频面阵 CCD 应用中, 其驱动技术一直是应用的一个难点. 原因在于面阵 CCD 具有一定的像元规模, 需要驱动电路提供足够的驱动能力. 电路的驱动能力要求足够的驱动电流. 低噪声电源和完善的驱动方案是信号完整性的重要保证.

高帧频面阵 CCD 电路系统包括驱动电路、电源模块、信号处理电路、数字系统如图 3(a) 所示. 其中电源模块需要 7 组, 采用了体积小、重量轻的开关电源, 并采取合理的电磁兼容性设计. 开关电源与线性稳压电源相比, 还具有功耗小、效率高、稳压范围宽的优点. 图 3(b) 是一组 DC/DC 的原理电路. 除了完成电压变换, 还要进行差模、共模、输入、输出滤波, 从而为负载电路提供稳定的电源. DC/DC 输出的电源还会有耦合进来的噪声, 还需经过三端稳压器进行稳压, 如图 4. 图中的 R3 是可调电阻, 根据需要, 调整 R3 可得不同的电压, 表 2 是 VCCD1024H 的典型栅极电压.

VCCD1024H 片上集成了 CDS 电路, 使 CCD 输

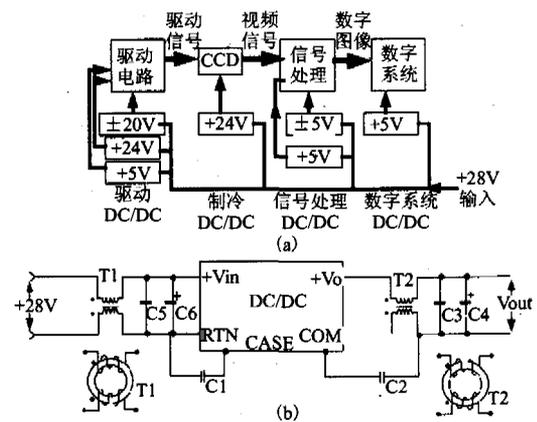


图 3 电源系统 (a) 电流与信号流图 (b) DC/DC 电路 Fig. 3 Power supply architecture (a) current and signal diagram (b) DC/DC circuit

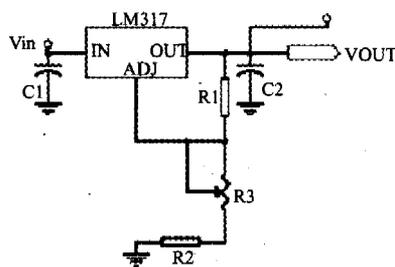


图4 稳压电路  
Fig.4 Voltage regulator circuit

表2 VCCD1024H 各控制信号电压值  
Table 2 The control voltage of VCCD1024H

栅极名称	电压范围(V)	实测电压(V)
A1	-9.30 ~ -9.5	-9.40
A2	+5.00 ~ +5.20	+5.11
A3	-10.45 ~ -10.65	-10.50
B1	-8.90 ~ -9.10	-9.00
B2	+6.40 ~ +6.60	+6.50
B3	-8.80 ~ -9.00	-8.90
C1	-9.35 ~ -9.55	-9.45
C2	-11.10 ~ -11.30	-11.20
C3	-9.25 ~ -9.45	-9.35

出的视频信号能够以较低的噪声水平输出。尽管如此,高品质的信号处理电路仍然十分重要。视频信号处理包括交流耦合、前置放大、低通滤波、增益调整、直流恢复以及 A/D 变换。交流耦合电路将视频信号的直流成份滤除,能够抑制各级电路的温漂,并扩大电路的放大倍数。图 5(a) 所示的 RC 隔直电路传递函数为:

$$H(s) = \frac{sR_1C_1}{1 + sR_1C_1} \quad (1)$$

是典型的一阶高通滤波电路,然而由于电路的寄生参数,特别对于电容这样的无源器件,在电路带

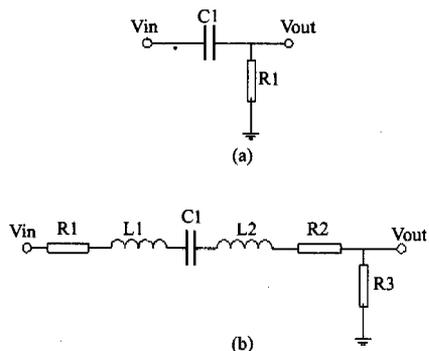


图5 交流耦合电路 (a) R-C 高通模型 (b) RC 寄生参数模型

Fig.5 AC coupled circuits (a) R-C HPL model (b) RC model with parasite parameter

宽比较大的情况下,电容可以等效为 R-L-C 模型,得到隔直电路的分布参数等效模型,如图 5(b) 所示,传递函数为:

$$H(s) = \frac{sR_3C_1}{1 + s(R_1 + R_2 + R_3) + s^2(L_1 + L_2)C_1} \quad (2)$$

$R_1, R_2 \ll R_3$  可以忽略,传递函数简化为:

$$H(s) = \frac{sR_3C_1}{1 + sR_3 + s^2(L_1 + L_2)C_1} \quad (3)$$

可以看出原来的高通滤波器,这里变成了带通滤波器,需要选择合适的  $R_3$  和  $C_1$  的值,以确保带通滤波的高频截止频率高于视频信号的带宽。

CCD 视频信号中包括光子噪声、散粒噪声、肥零噪声、转移噪声、暗电流噪声等。在低频模拟信号处理电路中,一般采用 2 阶巴特沃斯滤波或 2 阶切比雪夫滤波等常用滤波电路即可。但在高帧频 CCD 信号中,带宽较高,因此要取得较好的滤波效果,对滤波器的设计要求很高,需要足够好的通带平坦特性和边缘截止特性。本文设计的单运放 3 阶滤波电路,具有结构简单,幅频特性好的优点,高阶滤波电路所带来的相移在通带内已经越过 180 度自激振荡点,这个问题可以通过相位补偿来解决。式(6)是系统采用的三阶低通滤波器的传递函数,具体电路形式和幅频-相频响应见图 6(a)、(b)。

$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{1}{(1 + sR_1C_1)(1 + sR_3C_3 + sR_2C_3 + s^2R_2R_3C_2C_3)} \quad (4)$$

直流恢复是为了使信号的动态范围能够与 A/D 变换电路的量化范围一致,使信号处理电路具有的动态范围最大化。利用高速采样保持芯片,对视频信号中的暗电平(暗像元)信号进行采样保持,作为基准信号,与采样保持之前的视频信号做减法,完成直流恢复。图 7 是 VCCD1024 的信号处理电路况图。32 路并行处理,视频信号带宽为 10MPixel/s。配上光学成像镜头(口径 50mm,焦距 300mm)与数据采集系统,VCCD1024H 获得了非常清晰的图像(图 8 所示),此时工作帧频为 130fps。高帧频面阵 CCD 工作的功耗与其工作的帧频有相当密切的关系,工作帧频越高,其功耗也越大,产生的热会使 CCD 器件温度升高,暗电流增加。实验证明当工作温度每降低 8℃,CCD 的暗电流就能减少一半。适当的制冷措施对于更高帧频的 CCD 系统是必要的,风扇在大气环

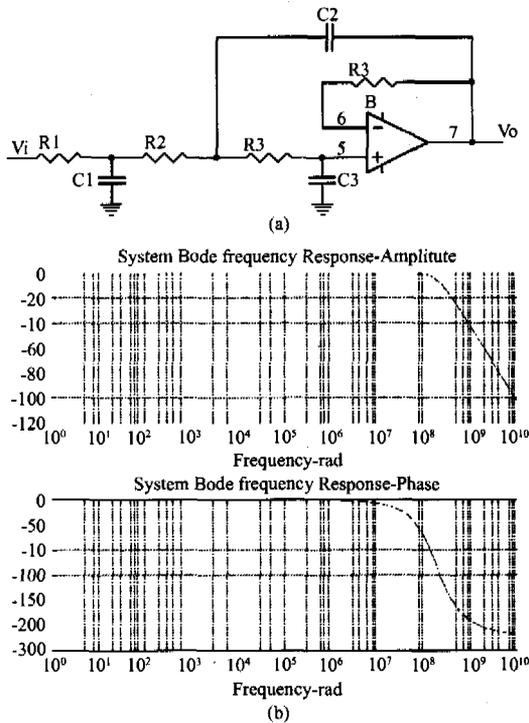


图6 三阶单运放低通滤波 (a) 电路形式 (b) 幅频-相频响应

Fig.6 3-pole LPF with single amplifier (a) LPF circuits (b) Amplitude-frequency and phase-frequency response of the 3-pole LPF

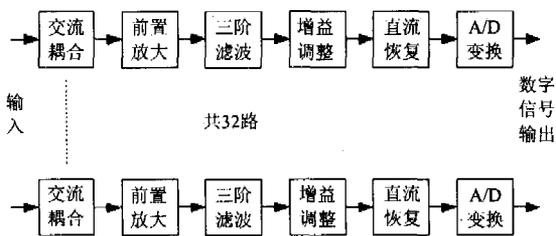


图7 信号处理电路结构框图 Fig.7 The signal processing flow chart

境中可以使用,空间应用则需要考虑半导体制冷方式.

### 3 提高帧频的特殊方法

上面分析并设计了高帧频面阵 CCD 的驱动和信号处理电路,并获得了工作帧频达到 130fps 的成像系统. 在一些应用领域,希望 CCD 能够工作在 200,300 甚至 400 帧/秒的帧频率. 下面给出一种 CCD 部分感光成像(如图 9 所示)的高帧频解决办法.

当帧转移面阵 CCD 部分像元感光成像时,为了提高工作帧频,无效像元可以只做帧转移清空势阱,而不串行读出,这样可以大大的提高帧频. 但是,由

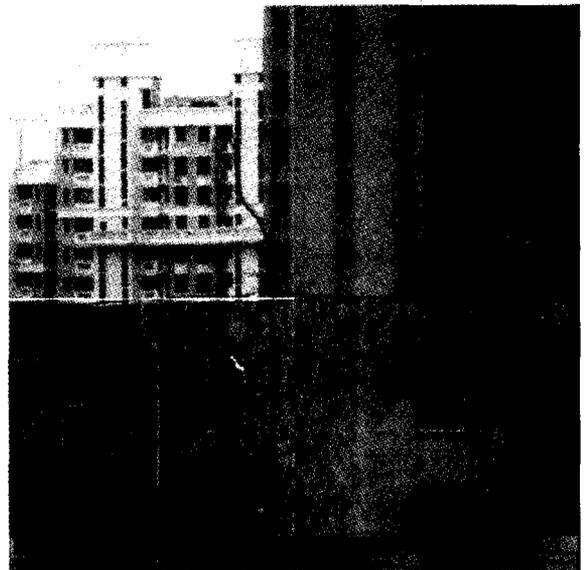


图8 相机所拍摄图像 Fig.8 An image taken by VCCD1024H

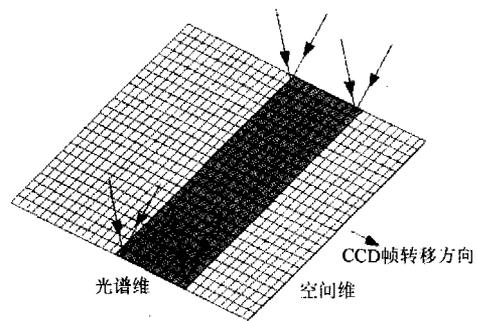


图9 CCD 局部曝光成像 Fig.9 Part of the CCD is exposed for imaging

于从图像感光区到电荷存储区的垂直转移过程中,光敏元仍然在产生光电荷,并被势阱收集,这将造成拖尾现象(影响系统的 MTF, MTF 是衡量成像系统成像质量的一个重要参数,对于 CCD 成像器的 MTF 已有很多研究<sup>[4]</sup>). 拖尾现象是帧转移 CCD 无法避免的一个问题,但可以通过提高 CCD 工作的有效曝光比来改善拖尾问题. CCD 的有效曝光比可以用下式计算:

$$\text{有效曝光比} = \frac{\text{帧周期} - \text{帧转移时间}}{\text{帧周期}} \times 100\% \quad (6)$$

如果在 CCD 的光敏面上增加一块遮光板,则可以将问题大大改善,如图 10 所示. 采用遮光板以后,不再需要将图像感光区的全部电荷转移到电荷存储区,而只需要将曝光区及曝光区与遮光板遮挡部分的过渡区的电荷转移到电荷存储区,因此大大缩短了帧转移时间,如图 11 所示,图中  $T_1$  为帧转移时

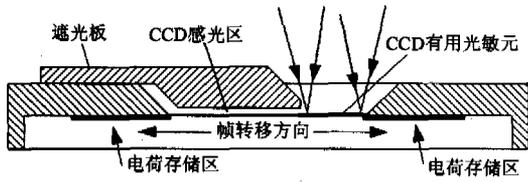


图 10 遮光板  
Fig. 10 Light-proof board

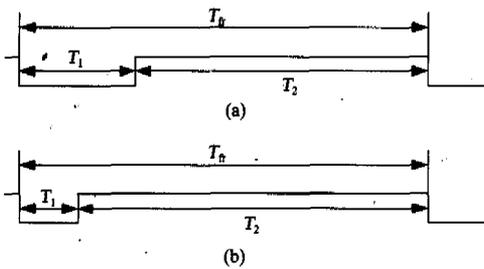


图 11 两种方案的帧周期比较 (a) 未采用遮光板的帧周期 (b) 采用遮光板的帧周期  
Fig. 11 Comparison of the two solutions' frame period  
(a) frame period without light-proof board (b) frame period with light-proof board

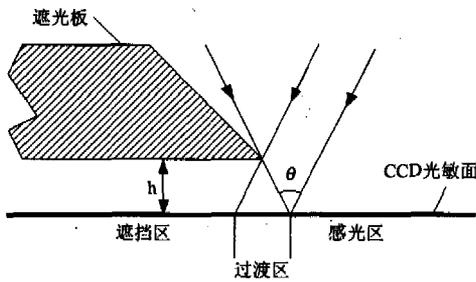


图 12 过渡像元分析  
Fig. 12 Transitional area pixels

间,  $T_2$  为有效曝光时间,  $T_r$  为帧周期. 很容易看出, 采用遮光板后, 有效曝光比大大提高.

采用遮光板来提高面阵 CCD 工作帧频和改善图像质量, 有两点需要注意:

(1) 光学系统都有会聚角(由 F 数决定), 遮光板距离光敏面应该越近越好, 这样曝光区与遮挡区的过渡像元越少, 如图 12 所示, 图中  $h$  为遮挡板与光敏面的距离,  $\theta$  是光学系统的会聚角, 过渡像元个数  $n$  可由下式计算:

$$n = \frac{2htg(\theta/2)}{d} \quad (7)$$

其中  $d$  为探测器的像元间距;

(2) 装配过程中, 采取措施防止遮光板碰触光敏面而致损坏.

结合垂直像元合并 (Verical Pixel Binning) 技

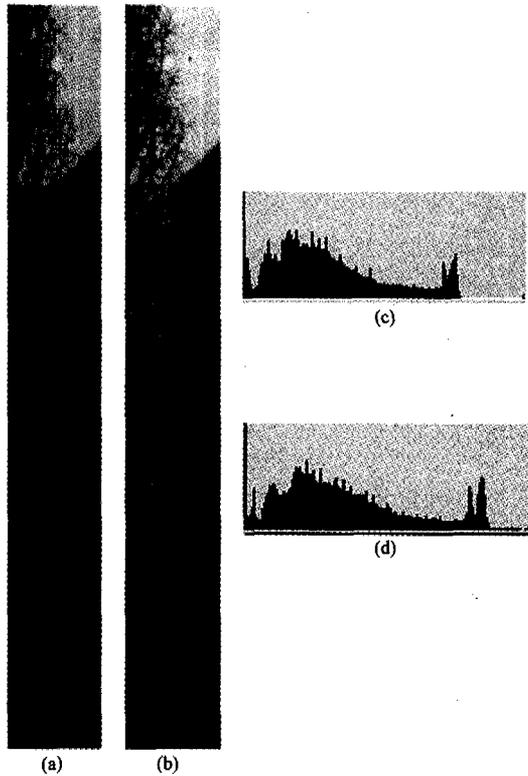


图 13 遮光板效果分析 (a) 无遮光板图像 (b) 有遮光板图像 (c) 图像(a)的直方图 (d) 图像(b)的直方图  
Fig. 13 The effect analysis of the light-proof board (a) image without light-proof board (b) image with light-proof board (c) histogram of image (a) (d) histogram of image (b)

术, VCCD1024H 获得了 400 帧/秒的工作帧频, 成像区大小为  $1024 \times 128$ , 像元速率为  $5MPixel/s$ . 图 13 是采用遮光板和未采用遮光板的两幅图像的对比, 明显可以看出, 采用遮光板的图像具有更好的 MTF, 从直方图(图 13 中的(c)、(d))也可以看出采用遮光板的图像有较好的对比度.

### 4 结论

高帧频面阵 CCD 具有很广的应用领域, 高速摄影、科学实验等都需要面阵 CCD 有很高的工作帧频. 全面了解帧转移 CCD 的工作机制是灵活应用高帧频面阵 CCD 的基础. CCD 的驱动设计和信号处理电路是获得高信噪比的必要条件. 针对具体应用, 可以充分利用 CCD 的电荷转移机制和相应的光学机械结构, 获得更高的工作帧频, 并使 CCD 工作在最佳状态.

### REFERENCES

[1] Groom D E. Recent Progress on CCDs for astronomical ima-

- ging[J]. *SPIE*, 2000, 634—637.
- [2] LI Hong-Bo, SHU Rong, XUE Yong-Qi. Pushbroom hyperspectral imager and its potential application to oceanographic remote sensing[J]. *J Infrared Millim. Waves.* (李红波, 舒嵘, 薛永祺. PHI 超光谱成像系统及其海洋遥感应用前景分析. *红外与毫米波学报*), 2002, 21(6): 429—433.
- [3] GUO Qiang, XU Jian-Min, CHEN Gui-lin. Study on improving image spatial resolution of optical instruments with linear sensors in three-axis body-stabilized platform[J]. *J Infrared Millim. Waves.* (郭强, 许健民, 陈桂林. 三轴稳定平台下提高线列探测器光学遥感器图像空间分辨率的方法研究. *红外与毫米波学报*), 2005, 24(1): 39—44.
- [4] HAN Xin-Zhi. Discussion on CCD Modulation Transfer Function of The pushbroom Space Remote Sensor along Track[J]. *J Infrared Millim. Waves.* (韩心志. 推帚式航天遥感器 CCD 航向调制传递函数的讨论. *红外与毫米波学报*), 2002, 21(2): 145—147.

## 中国光学学会 2006 年学术大会

### 2006' General Congress of Chinese Optical Society

会议时间: 2006 年 9 月 3 日 ~ 5 日

会议地点: 中国·广州

主办单位: 中国光学学会

承办单位: 华南师范大学, 广东省光学学会

展馆地点: 中国·深圳 (2006 年 9 月 6 日—9 月 9 日)

协办单位: 清华大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 广州光学学会, 深圳光学学会, 中国光学学会国际会议展览工作委员会, 中国国际光电博览会(深圳), 广州光学光电子行业协会, 深圳光学光电子行业协会

#### 会议宗旨:

两年一次的中国光学学会年会, 将于 2006 年 9 月 3 日 ~ 5 日在广州举行。由华南师范大学和广东省光学学会具体承办。本次会议将总结交流我国光学、光子学和工程光学领域的最新成果, 展望 21 世纪的发展方向, 为新老学者提供探讨新思想、交流新技术的讲台, 促进本领域的科技创新和成果转化。本次会议将与光学、光电子新技术和新产品大型国际展览会——中国国际光电博览会及中国光电产业高级论坛同期举行。

会议名誉主席: 王大珩(中国科学院)

会议主席: 母国光(南开大学)

节目委员会主席: 金国藩(清华大学)

组织委员会主席: 刘颂豪(华南师范大学)

大会秘书长: 邢 达(华南师范大学)