

文章编号 1674-2915(2009)06-0550-07

基于 Vega 的红外仿真的优化和评估

陈灵娟^{1,2}, 李岩¹, 王鹤淇^{1,2}, 董宁宁¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:借助于三维实时视景仿真软件 Vega 的红外模块研究了自建模型的红外效应。介绍了红外仿真原理,给出了详细的红外仿真流程,并详细分析了仿真结果。根据项目对仿真精度的要求,提出了优化仿真过程的方法。结合 Vega 的底层映射机理提出更为精确的长波波段下的辐射量灰度映射关系,同时通过 TMM 的纹理材质映射关系改进,得到更为符合实际的材质反射率计算公式,并为仿真系统重建了传感器模型,使得仿真模型的辐射量偏差缩小为 1.145% ~ 3.358%。此外,初步探讨了仿真系统的校核、验证和确认技术(VV&A),并对仿真过程做了全生命周期的可信性评估,为进一步研究仿真系统的可信性评估提供了参考。

关键词:红外仿真;优化建模;Vega;VV&A;可信性评估

中图分类号:TP391.9 **文献标识码:**A

Optimization and evaluation of infrared simulation based on Vega

CHEN Ling-juan^{1,2}, LI Yan¹, WANG He-qi^{1,2}, DONG Ning-ning¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

Abstract: Infrared effects of created models in this paper are studied via sensor vision and sensor works modules in real-time 3-D emulational software named Vega. The principle of infrared simulation flow is introduced and the simulation results are presented, and then the infrared simulation flow is given. To improve the precision of simulation, some methods are given. In combination with the mapping mechanism of the Vega, a more precise radiation-grey mapping under a far infrared wavelength is presented, meanwhile, a more factual formula of reflectance calculation for materials is obtained by improving the mapping in TMM. Using the established sensor model, the radiation warp is reduced to 1.145% ~ 3.358%. Furthermore, the Verification, Validation and Accreditation(VV&A) of the simulation system are discussed, and the creditability of whole simulation process is evaluated, which provides some references for further researches of the simulation systems.

Key words: infrared simulation; optimizing model; Vega; Verification, Validation and Accreditation(VV&A); evaluating creditability

收稿日期:2009-07-13;修订日期:2009-09-16

基金项目:中国科学院知识创新工程领域前沿项目资助(Supported by CAS Innovation Program)

1 引言

红外成像技术不仅广泛应用于工业、遥感、交通、环境保护、医疗等方面,在军事方面的应用也极其重要。由于应用广泛,红外成像技术越来越受到相关领域的关注,已成为现代国防科技的关键技术之一^[1]。近年来,随着计算机虚拟建模和仿真技术的发展,红外技术在仿真建模领域的需求也进一步提升^[2]。虽然国内在红外仿真研究方面取得了很多成果,但红外仿真模型的精度不够理想,相应的研究迫在眉睫。此外,仿真系统的应用价值必须由可信性评估来做出鉴定,而目前国内对于仿真模型的可信性评估分析研究尚处于比较落后的阶段,研究领域也仅限于大型军事系统,应用范围比较狭窄,因此,在红外仿真领域,针对模型精度而进行的可信性评估具有重要的研究价值和参考价值^[3]。

2 红外仿真原理

红外图像的成像机理与可见光不同,它是通过将红外探测器接收到的场景热辐射量映射成灰度值,转化为可见光图像。除此之外,大气的状态(包括大气辐射、环境辐射和热辐射在传输过程中的衰减)也会对成像产生很大的影响^[4]。这样生成一幅与红外探测器得到的信息相一致的模拟红外图像,涉及以下3个步骤:

(1)根据红外理论,由目标的物理模型计算目标的红外辐射分布;

(2)按照目标和视点间的大气条件,利用大气传输模型,计算目标红外辐射分布经过大气到达视点过程中的衰减,即大气衰减;

(3)模拟红外探测器的特性,计算探测器成像面元对应像素的辐射度。

目标物体的辐射包括表面的自身辐射和表面对周围环境的反射辐射。自身辐射模型主要基于目标纹理材质生成的红外热图像,而表面反射辐射的主要热源为太阳辐射,大气辐射也是不可忽略的表面反射源。

现在很多有关红外成像的研究都是基于8~

12 μm 和 3~5 μm 两个大气窗口,本文在计算过程中则只选用了 8~12 μm 波段。主要理由是,在较长的波段内,材料的发射系数更趋近于常数,而近似计算过程中采用的材料发射系数一般被认为常数值;在 3~5 μm 波段内大气透过率的波动显著,特别在 4.2 μm 处,由于二氧化碳的吸收作用导致大气衰减量最大,使取积分均值为参考值的大气辐射计算误差很大^[5,6]。

3 利用 Vega 软件仿真红外图像

Vega 是美国 MultiGen Paradigm 公司推出的先进的软件环境,主要用于虚拟现实技术中的实时视景仿真、声音仿真以及科学计算可视化等领域。它支持快速复杂的视觉仿真程序,为用户提供一种处理复杂仿真时间的便捷手段;把常用的软件工具和高级仿真功能结合起来,使用户以简单的操作迅速地创建、编辑和运行复杂的仿真程序。由于 Vega 大幅度地减少了源代码,从而大大地提高了工作效率,且具有友好的图形用户界面和大量的 API 接口,可以迅速创建各种实时交互的三维环境,以满足各种用户的需要。但由于

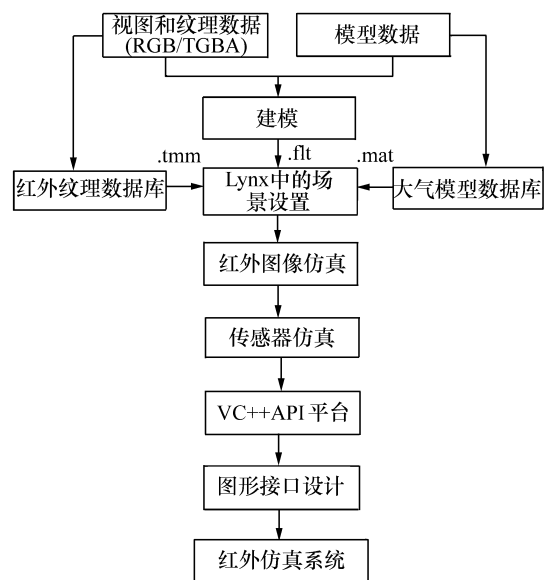


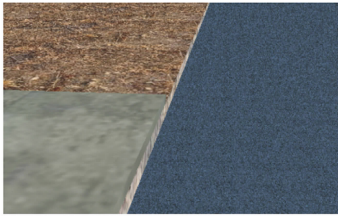
图1 红外仿真流程图

Fig. 1 Flowchart of infrared simulation

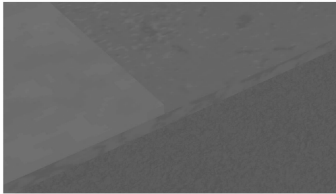
Vega 的一些关键模块对国内禁售,导致了该软件一些技术上的缺陷,进而无法发挥它的潜力。本文继承了中国科学技术大学的部分研究成果并继续对仿真软件的内部映射机理进行探索,仿真结果在一定条件下的精度也完全符合要求。利用 Vega 软件进行红外仿真的流程图如图 1 所示。

对图 1 的仿真流程的具体实现步骤如下:

- (1) 建立目标的几何模型;
- (2) 创建目标的纹理材质模型数据库,并利



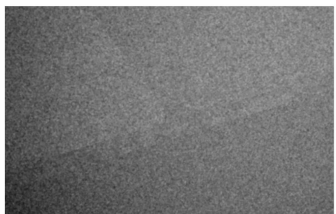
(a) 视景仿真
(a) Visual image



(b) 不考虑传感器噪声的仿真结果
(b) Simulation image without sensor effect



(c) 红外仿真结果
(c) Final simulation image



(d) 校正后的红外仿真结果
(d) Final revised simulation image

图 2 仿真结果

Fig. 2 Simulation images

(3) 利用 MAT 计算工具计算真实的大气环境数据;

(4) 启动 Vega LynX 面板,设置系统和窗口、图形和环境配置(System, Windows, Graphics);

(5) 设置对象、通道、观察者等;

(6) 设定 Vega 的环境及其特效面板, Sensor Vision, Sensor Works 与 Isector 相结合;

(7) 预览并得到红外仿真效果如图 2 所示。

4 红外仿真结果分析

本文采用当前流行的仿真系统校核、验证与确认技术(Verification Validation and Accreditation, VV&A)来评估目标的仿真模型。VV&A 的核心是解决仿真系统的可信性问题,即用户能在模型中看到适合自己使用的性能,并且对该仿真模型能够为自己服务拥有信心^[3,7,8]。可信性问题主要由模型逼真度和仿真逼真度决定,模型逼真度是在研究目的限定的条件下,模型相对于仿真对象的近似程度;仿真逼真度是对仿真对象某个侧面或整体的外部状态和行为的复现程度。模型验证可得到数学模型的逼真度,而模型校核可解决仿真模型逼真度问题。

必须根据以下原则对仿真系统进行 VV&A 验证和校核:相对正确原则、全生命周期原则、有限目标原则、必要不充分原则、全局性原则、程度性原则、创造性原则、良好计划与记录原则、分析性原则和数据正确性原则。美国 DMSO 的 VV&A 建议实践指南给出了可用于建模与仿真 VV&A 的 4 大类共 76 种校核与验证方法^[3,7],这里仅选用非正式方法中的审查法和表面验证法;静态方法中的控制分析法;正式方法中的逻辑推理法和动态自底向上法进行模型验证和校核。

根据以上仿真系统评估分析原则和已选用的方法,接下来对仿真模型进行了全周期验证与校核,具体工作计划如图 3 所示。

将平均大气透过率与 MAT 计算出的辐射量相结合,可以得到以下仿真中的实际辐射量与红外相机捕捉图像对应材质的辐射量对比,如表 1 所示。

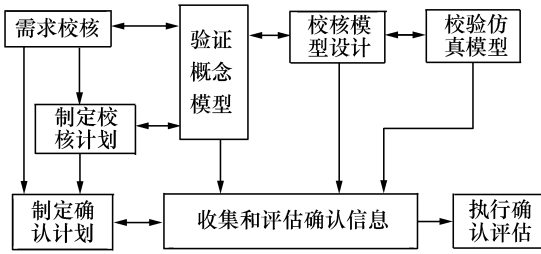


图3 VV&A 评估设计流图

Fig.3 Flowchart of VV&A evaluation

表1 仿真结果灰度值比较

Tab.1 Grey-value comparison of simulation results and captured infrared pictures

材质	仿真灰度值	捕获图灰度值
玻璃	119	134
红砖	158	124
金属	128	136
塑料	147	145

表2 仿真辐射量与捕获图的对比

Tab.2 Radiant comparison of simulation results and captured infrared pictures

材质	仿真辐射量	捕获图辐射量
玻璃	38.721 0	43.684 5
红砖	51.626 1	40.375 5
金属	41.699 1	44.015 4
塑料	47.986 2	47.986 2

一定大气状况下,根据目标物体的材质和温度可计算出目标的辐射量。在 Vega 的 Sensor Vision 模块中反复试验,并根据最小二乘法原理得到辐射量-灰度映射关系,由表1的灰度值可以计算表2中相应的辐射量。由此可以看出,除了几何模型的逼真度不够高之外,模型中材质对应的局部仿真结果辐射量偏差为 1.36% ~ 21.52%,模型逼真度及仿真精度都需要进一步提高。另一方面,仿真精度除了与几何模型的相似性有关外,还在很大程度上依赖于虚拟纹理的逼真度和纹理映射关系的准确设置,这两个因素限制了模型纹理的精细程度,并最终影响仿真精度。因此,本文进一步建立了更加精细的纹理映射模型,校正原有的辐射量-灰度映射关系,并模拟光

电器件产生的噪声,以期进一步提高仿真的精度。

5 优化建模技术

5.1 纹理优化

本文基于 Vega 软件,由该软件的底层机理提出了红外仿真过程中离不开的目标模型的纹理材质映射关系。确定红外图像中各个区域的材质之后,检索材质库文件,并最终获取材质各层的红外热属性和厚度等信息。对于单一材料的区域,根据热属性数据和仿真时的气象条件,采用一维传热模型估算材料的温度值,进而确定红外辐射值。对于混合材料区域,处理较为复杂。

经验表明,先计算单一材质的辐射量后按各组成百分比进行混合后的辐射量与先计算按比例混合材质后的反射率再计算混合材质的辐射量结果是一致的。利用 TMM 工具选取采样点,确定区域中纯种材料的颜色值,各种材料的混合系数 α_i ,可由下式得出:

$$\alpha_i = \omega_1 \cdot \beta_i + \omega_2 \cdot \varepsilon_i + \omega_3 \cdot (1 - \varepsilon_i), \quad (1)$$

其中 β_i 为颜色空间高斯距离比重, ε_i 为发射率, $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 分别为高斯距离、发射、反射比重。绘制时可以将生产的表面纹理映射到相应表面,并与灰度图混合,生成最终的红外场景图像,使用公式:

$$G_{\text{final}} = I_{\text{texture}} \alpha + G_{\text{surface}} (1 - \alpha), \quad (2)$$

其中 α 为混合系数,调节该系数尽量保障红外场景的重要特征。

5.2 灰度辐射映射关系优化

参考文献[10]提供了一种灰度辐射量映射方法,但仔细研究后发现其存在不妥之处,结合对 Vega 的传感器效应的理解将之校正改进如下:

对某一温度计算的辐射量,首先是反射率问题,参考表3可知材质的发射率与计算的波段唯一相关,即必须根据选用波段考虑发射率,不可一概而论;其次是转换因子 Convert factor 是 Vega 底层辐射灰度值量化时必不可少的,也就是与辐射量映射有重要关系的量。利用混合材质在远红外波段下的综合反射率,根据 Cotes 公式计算辐亮度,并采用此纹理映射得到红外模块中不同转换因子情况下的映射关系如图4所示。

表3 不同波段下的材质反射率

Tab.3 Material reflectivity on different wave-bands

Materials	Wave band(μm)			
	3~5	7~12	8~12	8~14
Titanium	0.690 82	0.772 19	0.788 95	0.796 67
Metal roof	0.793 12	0.863 21	0.873 12	0.875 83
Off white	0.107 66	0.056 96	0.044 69	0.036 64
Olive green	0.092 70	0.053 41	0.053 78	0.047 97
Aluminum	0.763 31	0.817 31	0.806 44	0.812 31

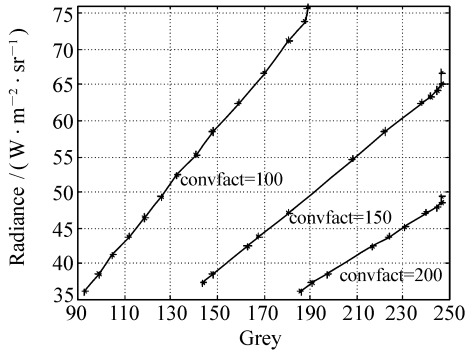


图4 不同转换因子下的灰度辐射映射关系

Fig. 4 Grey-radiance mapping under different convert factors

表4 不同温度下的灰度值及辐射度值

Tab.4 Grey and radiance under different temperatures(Convert factor = 150)

温度值	辐射度	灰度值
270	58.682 0	73
271	59.862 4	75
273	62.269 1	77
274	63.495 3	79
275	64.737 0	80
276	65.994 2	82
277	67.266 8	83
278	68.555 0	85
279	69.858 9	87
280	71.178 5	88
281	72.513 8	90
282	73.864 8	91
283	75.231 7	93
284	76.614 5	95

根据上述结论,选择玻璃为实验灰体得到表4中的结果。在转换因子为 $150 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 的情况下,根据表4的灰度值和辐射值由最小二

乘法得到其映射关系式为

$$R = 0.830 6 \cdot G - 2.000 6, \quad (3)$$

由式(3)即可在以后的工作中根据不同环境状况下的仿真灰度得到目标体的辐亮度值,并可相应地考察各种单独目标几何体模型的可信性。

5.3 传输关系优化

红外热辐射需要经过大气传输到光学系统的聚焦,探测器把聚焦后的辐射量转换为电信号,视频信号放大器最后把电信号转换为图片信号并最终生成目标红外图像^[10]。这个过程如图5表示。

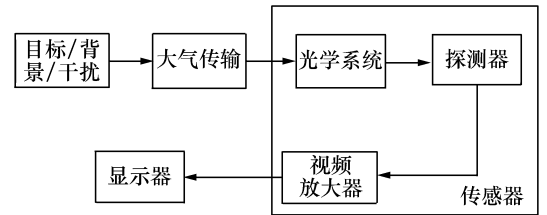


图5 红外热辐射图像流程图

Fig. 5 Flowchart of infrared radiant picture

由于探测器等光电器件在通电情况下会产生噪声,如热噪声、散粒噪声、暗电流噪声、温度噪声等^[9]。因此,传感器的等效噪声即为各类噪声之和,可以用假想电阻产生的热噪声来等效,则电路总的输出噪声的均方根值可用下式表示。

$$E_{n0} = \sqrt{4kTR_{eq}\Delta fA_v^2}, \quad (4)$$

其中, R_{eq} 为等效噪声电阻, Δf 是噪声带宽, A_v 是电压放大倍数, k 是玻尔兹曼常数。

在有图像信号时,噪声与图像信号迭加。由于该等效传感器噪声符合高斯分布,实验中输入一组 $M \times N$ 的随机数组成 $M \times N$ 的矩阵,与每一帧图像的每个像素迭加,即可得到经光学系统、探测器等传输的仿真结果图。最后,根据红外相机实际拍摄图像与仿真结果进行比较,在实时仿真过程中根据校正参数修正等效热噪声的方差。

6 评估结果分析

本文还分析评估结果并反馈校正参数,重新定位后建立了校正后的仿真模型。以玻璃模型为

例,由于建立映射关系时采用的是混合材质的玻璃(clear glass 90%, sky blue 10%),根据建立的映射关系验证该数学过程,得到真实情况与仿真模型的偏差在 283 K 时为 8.318×10^{-4} ,在 270 K 时仅为 1.791×10^{-4} ,而且该映射关系用于其他情况时产生的最小偏差为 1.145%,最大为 3.358%,可见该仿真模型的逼真度基本满足要求。根据 VV&A 的相对性原则和程度性原则,可以得出结论:该模型满足仿真模型可信度要求。

7 结 论

由于在建立辐射量与灰度的映射关系时只考虑了 270 ~ 284 K 之间的情况,故当温度过高时可能需要修正该映射关系;且对于确定混合材质的发射率问题,采用的方法没有经过专家验证,虽然

仿真辐射度比较相似,但是混合材质发射率的确定也可能与几何模型的纹理模型有关,所以该工作也需要进一步地确认。对于红外目标的数字仿真,当前建立的模型基本满足可信性要求,有一定的使用范围和精度范围,本研究工作对红外数字仿真的深入研究及应用有很积极的意义。

另一方面,VV&A 的复杂性较高,相关校验原则和技术方法很多且有些模糊。本研究只是取其很小的一部分来校核模型,一定程度上提高了仿真的可信性,也降低了人为因素的影响。但是目前人们对 VV&A 的概念还未形成统一的认识,特别是对可信度理论和方法还没形成统一的标准,因此,不仅要加强仿真可信度的理论研究,而且要进行可信度标准化和规范化研究,并积极推广 VV&A 在仿真系统研究开发中的应用,使仿真技术在工业和军事领域中发挥更大的作用。

参考文献:

- [1] 江照意. 典型目标场景的红外成像仿真研究[D]. 杭州:浙江大学,2007.
JIANG ZH Y. Study on infrared image synthesis for typical target scenes[D]. *Hangzhou: Zhejiang University*, 2007. (in Chinese)
- [2] 吴晗平. 掠海红外动态点目标图像仿真系统[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(8): 1275-1279.
WU H P. Image simulation system of dynamic infrared point targets sweeping on sea surface[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8): 1275-1279. (in Chinese)
- [3] 唐应兵, 查亚兵, 李革. 仿真 VV&A 研究综述[J]. 计算机仿真, 2006, 11: 82-85.
TANG J B, ZHA Y B, LI G. An overview of research on VV&A in simulation[J]. *Computer Simulation*, 2006, 11: 82-85. (in Chinese)
- [4] 郭齐胜, 董志明. 战场环境仿真[M]. 北京:国防工业出版社, 2005.
GUO Q SH, DONG ZH M. *Simulation of Battlefield*[M]. Beijing: National Defence and Industry Press, 2005. (in Chinese)
- [5] DUONG N, WEGENER M. Sensor vision radiometric equation version 2.2[R]. Melbourne: Weapons Systems Division, Aeronautical Maritime Research Laboratory, 1998.
- [6] 吴北婴. 大气辐射传输实用算法[M]. 北京:气象出版社, 1999.
WU B Y. *An Applied Algorithm of Atmospheric Radiation Transmission*[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1999. (in Chinese)
- [7] 刘兴堂, 刘力, 孙文. 仿真系统 VV&A 及其标准规范研究[J]. 计算机仿真, 2006, 3: 61-66.
LIU X T, LIU L, SUN W. Simulation system VV&A and its standard/principle research[J]. *Computer Simulation*, 2006, 3: 61-66. (in Chinese)
- [8] 李伯虎, 柴旭东, 朱文海, 等. 现代建模与仿真技术发展中的几个焦点问题[J]. 系统仿真学报, 2004, 9: 1871-1878.
LI B H, CAI X D, ZHU W H, et al.. Some focusing points in development of modern modeling and simulation technology [J]. *J. System Simulation*, 2004, 9: 1871-1878. (in Chinese)
- [9] 王学伟, 沈同圣, 周晓东. 红外热像仿真中传感器的模拟方法研究[J]. 半导体光电, 2004, 25(4): 317-319.
WANG X W, SHEN T SH, ZHOU X D. Simulation of the sensor in the infrared image generation[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2004, 25(4): 317-319. (in Chinese)
- [10] 笪邦友, 桑农, 张天序. 一种利用 Vega 软件的长波红外图像仿真方法[J]. 红外与激光工程, 2007, 6: 333-337.

DA B Y, SANG N, ZHANG T X. . LWID image simulation method using Vega software[J]. *Infrared Laser Eng.*, 2007, 6:333-337. (in Chinese)

[11] 刘永进, 朱红, 赵亦工. 基于红外焦平面阵列读出结构的非均匀校正算法[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(1): 128-133.

LIU Y J, ZHU H, ZHAO Y G. Nonuniformity correction focal plane array algorithm based on infrared readout architecture [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(1): 128-133. (in Chinese)

作者简介: 陈灵娟(1984—), 女, 河南洛阳人, 硕士研究生, 主要从事计算机仿真与虚拟现实方面的研究。

E-mail: juan00a@126.com

李岩(1970—), 男, 吉林舒兰人, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事光电对抗 C³I 系统建模、仿真与算法方面的研究。E-mail: liyan@ciomp.ac.cn

向您推荐《液晶与显示》期刊

- 中国最早创办的液晶学科专业期刊
- 中国惟一的液晶学科和显示技术领域综合性学术期刊
- 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》(SA)、美国《化学文摘》(CA)、俄罗斯《文摘杂志》(PЖ)、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
- 中文核心期刊, 影响因子为 1.156

《液晶与显示》由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所和中国光学光电子行业协会液晶专业分会主办, 科学出版社出版。

《液晶与显示》以研究报告、研究快报和综合评述等栏目集中报道国内外液晶学科和显示技术领域最新理论研究、科研成果和创新能力, 及时反映国内外本学科领域及产业信息动态, 内容丰富, 涵盖面广, 信息量大, 可读性强, 是我国专业期刊发行量最大的刊物之一。

《液晶与显示》为双月刊, 国内定价 30.00 元。国内邮发代号: 12-203; 国外发行代号: 4868BM。

地址: 长春市东南湖大路 3888 号

《液晶与显示》编辑部

邮编: 130033

E-mail: yjxs@ciomp.ac.cn

国内统一刊号: CN 22-1259/04

国际标准刊号: ISSN 1007-2780

电话: (0431) 6176059

网址: www.yejingyuxianshi.org