

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2019.03.006

基于功率激光修剪绿化带的自动绿篱机设计

王馨梅, 谢冰, 焦欣, 王成城, 杨天阳, 任哲, 牛仁杰, 仝慧紫

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 传统绿篱机使用的是高功率电动刀具修剪绿化带, 工作噪声大且易在绿化带中长距离传播病虫害。本文提出一种基于功率激光束修剪灌木型绿化带的新型绿篱机设计方案, 具备噪声低不扰民、切口碳化防病虫害入侵以及智能避障等优点。对 10.6 μm 、1 064 nm 和 355 nm 的激光器进行了绿植激光切割实验, 论证了用 10.6 μm 远红外功率激光修剪灌木型绿化带的可行性, 并设计了基于电动平移台和振镜组合控制的光路方案、采用图像模式识别的自动避障控制方案以及降温除尘灌溉综合用水的水路方案。该设计可以为生态修剪、公共环境保护工作提供有益参考。

关键词: 激光; 绿化带; 修剪; 绿篱机

中图分类号: TG485

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2019)03-0308-06

An automatic hedge trimmer of cutting greenbelt with a power laser

WANG Xinmei, XIE Bing, JIAO Xin, WANG Chengcheng, YANG Tianyang, REN Zhe, NIU Renjie, TONG Huizi

(School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Since traditional hedge trimmers cut greenbelts based on electric cutters with high-power motors, the application of the traditional trimmers is limited by the two problems of loud vibration noise and pest-disease long-distance infection. In this paper, an automatic hedge trimmer system is proposed for cutting greenbelts with a power laser, which has some merits such as the low operation noise, the wound edge carbonization avoiding for the pest/diseases infection and the intelligent obstacle avoidance. The shrub-cutting effect contrast was experimented using the different laser wavelengths of 10.6 μm , 1 064 nm and 355 nm, and then the feasibility of cutting shrub-type greenbelt with a 10.6- μm -wavelength far-infrared power laser is demonstrated. The scheme of light path controlled with electric translation platforms and a vibrating mirror, the scheme of automatic obstacle avoidance controlled with image pattern recognition and the scheme of comprehensive utilization waterway for cooling device, eliminating smoke and irrigating plant. The novel laser-cutting design is useful to the ecological trim and the public environmental protection.

Key words: laser; greenbelt; trim; hedge trimmer

随着绿色宜居理念的倡导, 灌木型绿化带面积日益增大, 其修剪方式也在不断改进。传统绿篱机使用电动机械刀具, 在修剪过程中会带来严重的噪音污染, 特别不适用于学校、医院、养老院等安静场所。此外, 绿化带内植株品种单一, 个别植株发生的病虫害(例如褐斑病、锈病、红蜘蛛、蚜虫等)极易随机械刀具大面积扩散蔓延, 而在繁忙的马路、学校和医院等场所喷洒农药不利于广大人群的健康。

激光切割不但噪声低, 而且红外波段强激光切割出的枝叶伤口会被瞬间高温碳化, 形成针对细菌、

病毒、害虫入侵的保护层。因此近年来, 国内外开始尝试用激光修剪农作物。Schou 等^[1]用功率激光切割掉植物的上半部分枝茎后测量植株生长量, 并与机械切割后的生长量做对比实验, 证明了用 10.6 μm 波长激光束聚焦切割植物枝茎不会影响植物继续生长。Shah 等^[2]提出了一种新的清除杂草的方法, 用车载摄像机检测杂草并用激光器精准摧毁。Daniel 等^[3]设计了一种卷轴结构的激光割草机并申请了美国专利, 但只能用于草本植物, 不适用于灌木型绿化带。

近年来, 激光技术飞速发展, 2012 年我国首台

收稿日期: 2019-05-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61575158); 西安理工大学大学生创新创业训练计划资助项目(201810700015)

作者简介: 王馨梅, 女, 副教授, 博士, 研究方向为功率激光相关器件及其应用。E-mail: wangxinmei@xaut.edu.cn

1 kW工业光纤激光器研制成功,2016年我国功率达到120 kW的工业级光纤激光器研制成功^[4],2017年中国工程物理研究院激光聚变研究中心实现百太瓦级超短超强脉冲激光关键技术突破,建成了国内首台输出能力高达200TW的SILEX-I超短超强脉冲激光装置^[5]。总之,当前普通高功率激光源的制造成本、维护成本以及体积重量值均正在快速下降,将激光修剪技术应用于农林业等领域已经初步具备商业化开发条件。

激光束作为一种切割工具,不但工作噪声低、不扰民,而且无法将染病植物浆液(含细菌、真菌、病毒、虫卵等)沾染到其它植株上,因此不会成为病原体的传播媒介。有报道称用小功率二氧化碳激光器或红宝石激光器照射,可杀死藏在植物中的卵和幼虫以及螨、蚊等体型小的成虫^[6]。此外,激光切割使植物伤口表面碳化,形成一层天然的保护膜,能够有效地阻挡病毒细菌从切割伤口入侵植物体。因此,本文提出一种基于功率激光束修剪绿化带的新型绿

篱机设计思想,首先基于实验论证何种激光器更适合作为该绿篱机激光源,然后进行该绿篱机系统的修剪、自动避障和降温除尘等方案设计。

1 激光切割实验

CO₂激光器,其主要工作物质是由对人体无毒的二氧化碳、氮气和氦气三种气体组成。一般情况下,工作气体密封存储于硬质玻璃制成的激光管最外层中,冷却水通过激光管的中间层降温,最内一层为放电管。目前它是厚板切割商业化最好的一种激光器,其波长为10.6 μm,位于远红外波段。考虑到CO₂激光器成本低、发射功率大、维护简单,植物对10.6 μm波长的激光吸收率高,且有报道称10.6 μm杂散余光相比于1 064 nm对植物再生影响小^[1],因此初步选择二氧化碳激光器作为激光绿篱机的光源。为了验证CO₂激光器切割灌木的效果,特别是观察伤口碳化效果,选择小叶黄杨、金叶女贞和卫矛(其形貌如图1所示)进行切割实验。



(a) 小叶黄杨

(b) 金叶女贞

(c) 卫矛

图1 三种植物实验样本的照片

Fig. 1 Photographs of three plant experimental samples

小叶黄杨是黄杨科黄杨属,分布于中国安徽、浙江、福建、江西、湖南、湖北、四川、广东、广西等省区;金叶女贞是木犀科女贞属,分布于中国华北南部、华东、华南等地区;卫矛是卫矛科卫矛属,除东北、新疆、青海、西藏、广东及海南以外均有分布。因此,这三种植物能够称作我国绿化带的代表性灌木品种。假设绿化带第一次用电动刀具修剪平整,其后快生

长季节每两至三周用激光绿篱机修剪一次,慢生长季节每四至六周用激光绿篱机修剪一次,则激光绿篱机不需要面对修剪较粗枝条的情境,因此本文取这三种绿化带植物的新鲜小枝条进行切割测试。使用最大平均功率800 W的CO₂激光器进行切割实验,参数如表1所示。

表1 三种常见绿化带灌木的CO₂激光切割实验数据

Tab. 1 Experimental data of cutting three common greenbelt shrubs with a CO₂ laser

品种	位置及尺寸/(mm)	含水量/%	切割功率/%	切割速度/(mm/s)
小叶黄杨	叶片边缘厚 0.1	73.3	25	150
	杆茎直径 4	79.5	80	15
金叶女贞	叶片边缘厚 0.15	76.1	18	180
	杆茎直径 1.7	46.2	40	25
卫矛	叶片边缘厚 0.2	71.6	15	150
	杆茎直径 1.5	43.7	35	25

因为实验中所用 CO_2 激光器的高斯激光束腰瑞利长度很短,所以在切割直径 4 mm 的小叶黄杨杆时,为了实现快速切割而使用了较高的输出功率(640 W)。今后可用衍射光学元件或非涅耳透镜相位采样组合增大焦深^[7-9],从而提高切割效能。该 CO_2 激光器的实验结果表明,枝条和叶片切割面略有碳化(见图 2 和图 3(a)),且切割过程中烟尘现象不明显。



图 2 用 $10.6 \mu\text{m}$ 波长激光切割小叶黄杨木质茎的碳化效果

Fig. 2 Carbonization effect of cutting a woody stem of *Buxus sinica* with a $10.6\text{-}\mu\text{m}$ -wavelength laser

为了对比效果,还分别用普通钢质刀片、波长 1 064 nm 的掺钕钇铝石榴石(neodymium-doped yttrium-aluminum garnet, Nd:YAG)红外激光器、波长 355 nm 的光纤紫外激光器对小叶黄杨叶片进行切割,结果分别如图 3(b)、(c)和(d)所示,普通钢质刀片和紫外激光对应的切口完全无碳化,而用 1 064 nm 红外激光可获得与用 $10.6 \mu\text{m}$ 远红外激光相似的切口碳化效果。但是考虑到 1 064 nm 红外激光比

$10.6 \mu\text{m}$ 远红外激光波长短一个数量级,因此在枝条中吸收深度浅,会导致切割速度相对较慢,并且考虑到 1 064 nm 激光辐射有碍植物再生长速度^[1],所以在本绿篱机方案中优选 $10.6 \mu\text{m}$ 远红外激光。

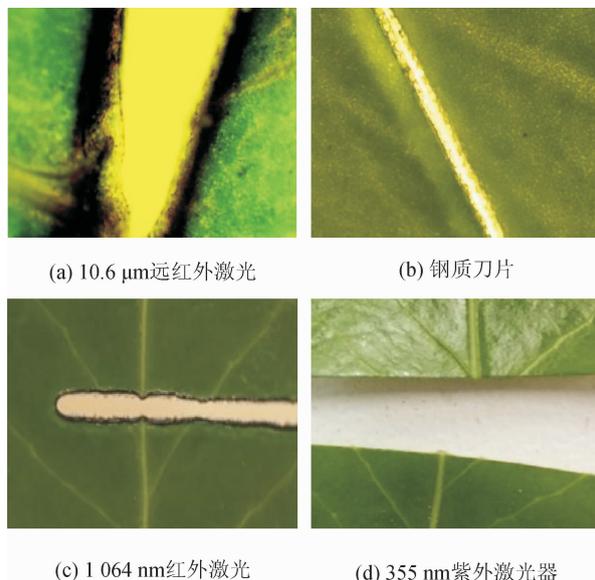


图 3 四种切割方式的叶片切口效果对比

Fig. 3 Effect comparison of four different leaf cutting method

2 系统设计

本绿篱机为一个车载系统,主要由激光源、振镜光路系统、智能避障控制系统、降温降尘水路系统等部分组成。基本功能如图 4 所示。

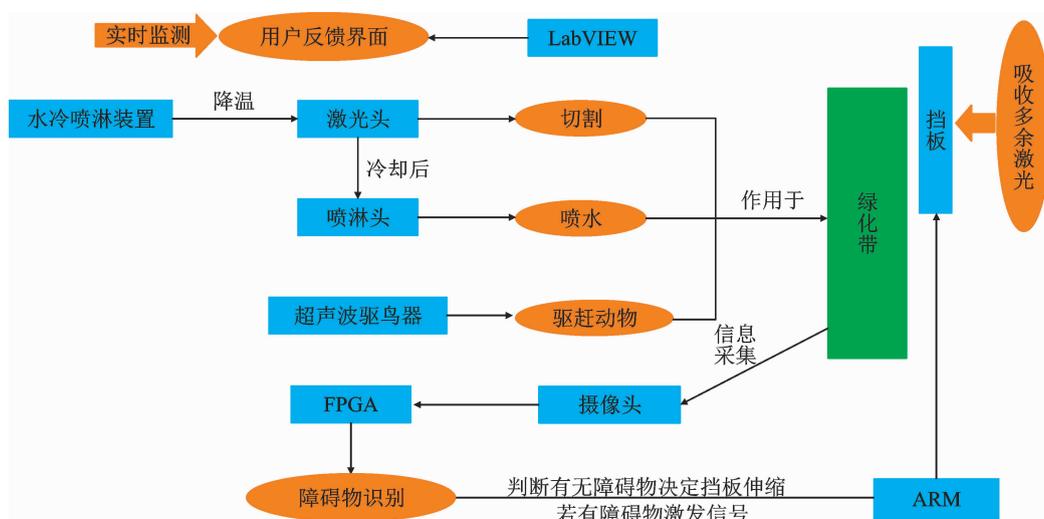


图 4 激光绿篱机系统功能说明图

Fig. 4 Function declaration of a laser hedge trimmer system

整体视觉效果如图 5 所示,车顶是一个网格型太阳能电池板,既能遮挡阳光延缓内部系统老化,也能将太阳能转变为电能,驱动风扇为内部系统降温。系统的工作流程是:首先将承载绿篱机系统的环卫工程车开到紧邻待修剪绿化带的左侧,展开伸缩杆,使余光吸收板位于绿化带右侧外边缘,将激光头高度通过升降电机调整到合适的修剪高度;然后在车沿着绿化带缓慢行驶的过程中,激光通过振镜光路系统修剪绿化带;同时,车外摄像头传输修剪视频给系统用户界面,便于司机在驾驶室内了解当前修剪实况。下位机采用 ARM 微处理器,上位机用户界面基于 LabVIEW 平台开发,图像识别基于现场可编程门阵列 (field-programmable gate array, FPGA) 实现。



图 5 激光绿篱机系统的车载示意图
Fig. 5 Diagrammatic sketch of laser hedge trimmer system on a truck

2.1 振镜光路系统

从激光器出射的高斯光,经一个六倍率的硒化锌 (ZnSe) 扩束镜扩束后,近似为一束平行光,经过一个固定全反镜和一个可旋转全反镜(本文称之为

一维振镜,其工作原理参见激光雕刻机中的二维振镜系统^[4]转光路方向后经 14 cm 直径凸透镜(也称场镜)聚焦,如图 6 所示。每种灌木因含水率、反光率、韧皮部厚度、木质部厚度等参数的不同而有不同的切割能量密度最小阈值。设距激光焦点 L 处的光能密度,恰好等于切割所需的光能密度阈值,则该激光可视为一把长为 $2L$ 的“光刀”,在工程车前进运动以及图 6 所示电动平移台和振镜电机运动的共同作用下,该光刀切割轨迹可遍历整个绿化带。

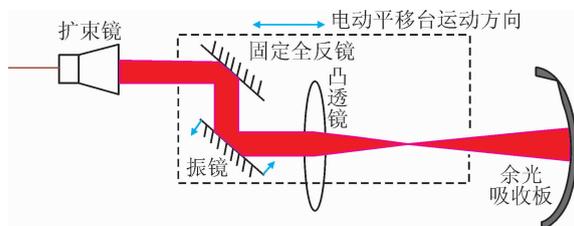


图 6 激光焦点扫描控制示意图
Fig. 6 Diagrammatic sketch of laser focus scanning control

2.2 智能避障控制系统

由于激光系统工作噪声低,所以需要安装定向超声波驱鸟器驱逐绿化带中休憩的鸟类和松鼠等小动物。此外,绿化带中通常耸立电线杆、路牌或树木等障碍物,为此通过摄像头动态采集图像数据并进行模式识别^[10-11]。发现障碍物后,启动避障操作,即振镜、场镜所在的电动平移台向车内收回一段距离,余光吸收板先上抬 10 cm 再向车内收回一段距离,待绕开障碍物之后再伸出。具体控制方案已经样机验证,电路各模块关系如图 7 所示。

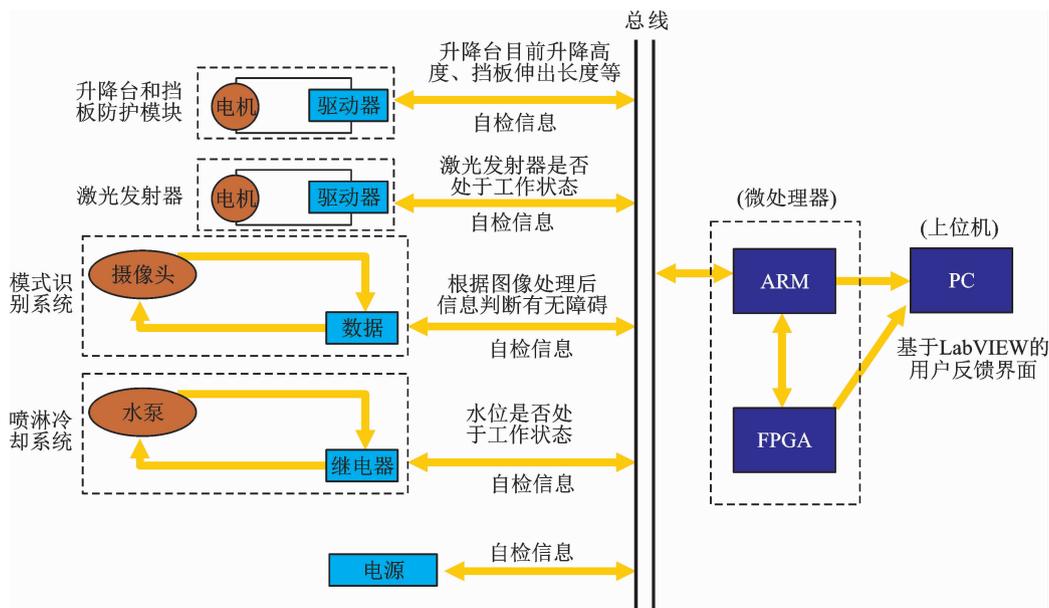


图 7 激光绿篱机的数据传输与智能控制模块图
Fig. 7 Module diagram of data transmission and intelligent control on a laser hedge trimmer

FPGA 持续对采集的图像进行处理并将路况信息传递给 ARM, ARM 会持续更新各个模块的工作状态并将信息输入到上位机用户图形界面上供司机查看。当 FPGA 检测到有障碍物出现且伸缩杆与障碍物接近到预定距离时,就传送一个信号给 ARM, ARM 接收到信号后,立即控制伸缩杆缩回,避开障碍物。此过程中, FPGA 对障碍物持续监测,当修剪系统离开障碍物后,将信息反馈给 ARM,使 ARM 控制伸缩杆伸出,继续工作。在行进过程中,各模块仍将持续自检,当出现问题时(比如水箱水位过低、摄像头采集不到图像、伸缩杆无法正常伸缩等), ARM 立即反馈给上位机,绿篱机急停且用户界面出现错误提示。

图像高速采集是基于同步动态随机存取内存(synchronous dynamic random-access memory, SDRAM)和两个先进先出芯片(first input first output, FIFO)硬件实现的,其中 SDRAM 为 FPGA 的片外板载资源, FIFO 为 FPGA 内部的 IP 核调用所生成的资源^[12]。图像采集采用双 FIFO 的乒乓算法^[12],目的是为了降低图像显示延迟,提高图像切换速度。SDRAM 控制器按照图像的帧数对指定 FIFO 进行刷新和重装载,采集到的数据一路经过薄膜晶体管控制器直接传送到显示屏界面,另一路送往图像处理单元。

图像处理单元首先对采集到的数据进行平滑滤波,目的是滤除由于背景所带来的一些不必要的噪声,然后根据像素的 R、G、B 分量的差异变化提取出绿化带对象(绿色为主的部分),并将绿化带整体以外的部分进行剔除,再通过 Sobel 算子对剔除后的图像进行边界的提取,得到当前绿化带的大致轮廓,最终依据边界曲线的线性、平滑与否进行障碍物判定。若所提取的边界曲线为连续线性则说明无障碍物;若存在边界的跳跃则说明存在障碍物,再根据取景的宽度和跳变点的关系换算出障碍物的位置,同时产生触发信号,通过总线传递到 ARM 进行后续的控制。其中,模式识别的训练采用的是聚类思想,先将无障碍物的绿化带和有障碍物的绿化带的图像进行特征提取与抽象,从而得到每类情况下的特征,将此特征进行记录并作为后续识别的判断依据。

2.3 水路系统

储水箱作为本车载系统最大的负载,综合用水可有效减轻系统载荷。因此,将 CO₂ 激光器散热系统设计为由内外两层组成:内层是一个小型低功耗的去离子水密闭循环系统,接 CO₂ 激光管中间层;外层是一个开放式的水箱,用于给内层水冷系统降温。

储水箱里的水被水泵驱动经滤网过滤后,首先进入激光器外水冷箱,带走激光器工作热量,然后喷淋在刚被激光修剪过的绿化带处,沉降激光烧灼产生的烟尘,并且给植物补充生长用水,从而实现“一水三用”的效果。

3 结语

本文提出一种基于功率激光器实现激光修剪灌木型绿化带的车载系统,并实验论证了该系统采用二氧化碳功率激光器的合理性。这种激光修剪方法可以实现低工作噪声,同时能使植物伤口碳化,失去生物活性,有效防止病虫害借修剪操作而蔓延。在样机上设计并实现了能提高激光焦点扫描线速度的光路方案、基于 FPGA 图像模式识别的自动避障方案以及冷却降尘浇灌综合利用的水路方案。随着居民对安静无污染的绿色生活环境的需求增长,这种基于激光修剪绿化带的方法会具有越来越高的商业化开发价值。

参考文献:

- [1] SCHOU J, HEISEL T, NORDSKOV A, et al. Quantitative laser cutting of plants[C]//Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers. International Symposium on High-Power Laser Ablation 2002, April 22-26, 2002, Taos, New Mexico. Bellingham: SPIE, 4760: 734-742.
- [2] SHAH R, LEE W S. Precision agriculture '15[M]. Wageningen: Wageningen Academic Publishers, 2015, 307-312.
- [3] BLANCHARD D R. Reel type laser lawn mower: US6374584 [P/OL]. 2002-04-23. <https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?CC=US&NR=6374584&KC=&FT=E#>.
- [4] 王狮凌,房丰洲. 大功率激光器及其发展[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(9): 090005.
WANG Shiling, FANG Fengzhou. High power laser and its development[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(9): 090005.
- [5] 魏晓峰,郑万国,张小民. 中国高功率固体激光技术发展中的两次突破[J]. 物理, 2018, 47(2): 73-83.
WEI Xiaofeng, ZHENG Wan'guo, ZHANG Xiaomin. Two breakthroughs in the development of high power solid-state laser technology in China[J]. Physics, 2018, 47(2): 73-83.
- [6] 付三玲,韦志仁,张伏,等. 激光技术在农业上的应用及趋势[J]. 农机化研究, 2006, (8): 189-190, 212.
FU Sanling, WEI Zhiren, ZHANG Fu, et al. Application and development trend of laser technology in agri-

- culture[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2006, (8): 189-190, 212.
- [7] 杜团结,王涛,吴逢铁. 轴棱锥对无衍射光束的线聚焦特性[J]. *物理学报*, 2013, 62(13): 134103.
DU Tuanjie, WANG Tao, WU Fengtie. Line focusing characteristics of axicon illuminated by non-diffracting Bessel beam [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(13): 134103.
- [8] 陶少华,田永红,陈培锋,等. 利用衍射光学元件增加出射光束的焦深[J]. *光学精密工程*, 1998, 6(3): 70-73.
TAO Shaohua, TIAN Yonghong, CHEN Peifeng, et al. Methods of improving a laser beam's depth of focus with diffractive optical elements[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1998, 6(3): 70-73.
- [9] 王仲勋,潘一鸣,尹韶云,等. 长焦深、高分辨激光加工聚焦透镜[J]. *光学学报*, 2013, 33(2): 0222004.
WANG Zhongxun, PAN Yiming, YIN Shaoyun, et al. Laser processing lens of long focal depth and high resolution[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(2): 0222004.
- [10] 杨帆,李鹏飞,刘庚,等. 橘子采摘机器人目标识别定位方法与实验研究[J]. *西安理工大学学报*, 2018, 34(4): 460-467.
YANG Fan, LI Pengfei, LIU Geng, et al. A new identification and location method and experiment research on a kind of orange harvesting robots[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2018, 34(4): 460-467.
- [11] 范彩霞,朱虹. 非重叠多摄像机目标识别方法研究[J]. *西安理工大学学报*, 2013, 29(2): 138-143.
FAN Caixia, ZHU Hong. Object recognition algorithm of non-overlapping cameras[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2013, 29(2): 138-143.
- [12] 翟炯. DCT域图像水印算法的FPGA实现[D]. 西安: 西安科技大学, 2012.
ZHAI Jiong. FPGA implementation of image watermarking algorithm in DCT domain[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2012.

(责任编辑 周 蓓)