

基于区域粗定位与 Chan-Vese 主动轮廓模型的 MAG 焊视觉图像熔池边缘提取*

李静^{1,2} 秦小麟¹ 李芳² 朱伟² 钱鲁泓²

(1. 南京航空航天大学信息科学与技术学院 南京 210016;

2. 华恒焊接股份有限公司 昆山 215301)

摘要: 对基于熔化极气体保护焊 (Gas metal arc welding, GMAW) 的管道打底焊过程中通过 CCD (Charge-coupled device) 摄像机与复合滤光技术组成的光学系统实时采集的正面焊缝区域图像进行分析, 实现熔池图像边缘提取。对获取的焊缝区域图像, 首先经过高斯平滑后, 考虑到初始轮廓对 Chan-Vese 主动轮廓模型提取边缘效率的影响, 使用基于阈值的方法, 用矩形标出熔池的初始区域, 即实现熔池区域粗定位, 然后求取矩形区域中心, 以该中心设定一椭圆作为熔池初始轮廓, 最后使用 Chan-Vese 主动轮廓模型提取熔池边缘。借助该模型实现了 GMAW 管道打底焊焊缝区域图像的熔池边缘提取, 与 Sobel 变换等方法比较, 该方法提高了熔池边缘提取的精度。

关键词: 主动轮廓 边缘提取 熔池控制 Chan-Vese 模型

中图分类号: TG316.7

A New Method Based on Region Coarse Localization and Chan-Vese Model for Weld Pool Edge Extraction in GMAW Welding

LI Jing^{1,2} Qin Xiaolin¹ ZHU Wei² LI Fang² QIAN Luhong²

(1. Department of Computer Science & Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016;

2. Huaheng Welding Equipment & Technical Co. Ltd., Kunshan, 215301)

Abstract: In order to extraction the weld pool edge, Analyze the welding seam image gathered by the optical system which was composed of CCD camera and composite filter technology for pipe-line back welding of GMAW. Considering of the initial contour have an effect on Chan-Vese model, extract the rectangle representing the coarse location of molten weld pool using the gray information after Gaussian smoother, and set the initial contour of Chan-Vese model at the center of the rectangle, then use the Chan-Vese model to extract the edge of the weld pool. Comparing with the traditional method, the experimental results show the precision of weld pool extraction is greatly improved.

Key words: Active contour Edge extraction Weld pool control Chan-Vese model

0 前言

随着我国石油工业和管道事业的飞速发展, 高压、高强度、长距离输送队钢管质量的要求越来越高^[1], 同时伴随焊接自动化、智能化研究的深入, 人们越来越注重对焊接过程质量的控制的研究, 而焊接过程熔透控制是焊接质量控制的一个重要方

面, 熔池半长、最大熔宽、熔池后部面积以及后拖角等焊接熔池几何尺寸参数能够在一定程度上反应熔透信息, 因此准确可靠地检测出熔池几何尺寸, 对于实现熔透控制具有重要的意义^[2], 准确提取出熔池边缘则是提取熔池几何参数的首要条件。在目前的研究中, 由于 TIG (Tungsten Inert Gas) 焊易于获得清晰的熔池图像, 国外学者在 TIG 焊熔池形状视觉检测方法做了大量的研究工作^{[3][4]}, 获得了清晰的 TIG 焊熔池表面反射图像, 并对熔池表面形状检测做了探索, 以及在此基础上进行熔宽、熔深的控制,

* 江苏省科技成果转化专项基金项目(BA2007058)。20100825 收到初稿, 20101206 收到修改稿

近年来，MAG(Metal Arc Gas)焊由于其较高的生产效率而引起工程界的重视，但由于 MAG 焊接过程中需要较大的电流使得电弧光非常强烈，加上其焊接过程伴随的熔滴过渡和飞溅干扰，国内外开展该方面的研究成果较少^{[1][5]}，国内产品离工业应用还存在着较远的距离。因此，研究 MAG 焊熔池边缘提取算法对焊接过程质量控制具有非常重要的意义。

图像的边缘提取一直是图像处理的重点与难点，目前不存在统一的分割框架，都是结合具体问题选择相应的技术。在焊缝图像领域仍主要采用 Sobel 算子边缘提取、数学形态学以及图像质心等传统方法^[6]，2009 年，主动轮廓方法引入到该领域中，LIU 等提出一种基于线 Snake 主动轮廓模型的方法来提取 MAG 焊的焊缝^[7]，GOUMEIDANE 等提出一种基于贝叶斯主动轮廓的方法用于识别焊接缺陷^[8]，这两项研究打开了该领域研究的新局面。

本文在 GMAW 管道打底焊监控系统^[8]基础上，利用 CCD 摄像机采集了较清晰地熔池图像，结合焊接过程控制的实时性要求，提出区域粗定位与 Chan-Vese 模型结合的主动轮廓模型提取熔池边缘，作为一种尝试，有助于拓宽熔池图像质量信息识别研究的新思路。

1 熔池图像特征与识别过程

GMAW 管道打底焊监控系统利用 CCD 相机和复合滤光技术组成的光学系统实时获得熔池图像，光学系统采用 CCD 工业黑白相机，分辨率为 768×494 、Computar 焦距为 30mm 的镜头、Imagination 图像采集卡，每秒采集 23 帧图像，同时配备一片超红外滤光片。视觉传感器放置距离焊枪头部 20 厘米，沿管道表面焊接处切线方向观察熔池^[8]。

焊接过程中，经滤光片消除弧光干扰，再通过摄像机获得焊缝熔池区图像，送到计算机进行图像处理，从而实现焊接熔池动态信息的检测。典型熔池图像如图 1 所示。

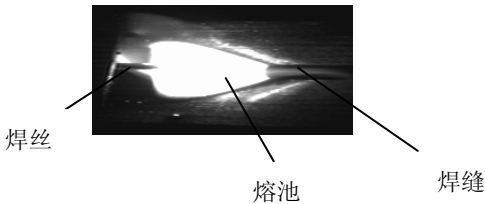


图 1 基于被动光的熔池图像

由图 1 可以看到，熔池图像具有如下特征：

(1) CCD 所获得图像为灰度图像，由于有弧光的强

光照射，使熔池区域与背景区域对比较强烈；(2) 熔池区域形状类似水滴形状，熔池左侧为焊丝区域，右侧为焊缝区域；(3) 熔池与焊缝周围亮色为较强烈噪声。从上述特征可以看出，在熔池提取时应不仅考虑熔池本身的边缘、亮度等信息，还要考虑熔池的几何结构信息，利用他们之间的相互约束，提高熔池边缘提取的准确度和可靠性。本文提出了基于区域粗定位与 Chan-Vese 模型的熔池边缘提取算法，其流程如图 2 所示。

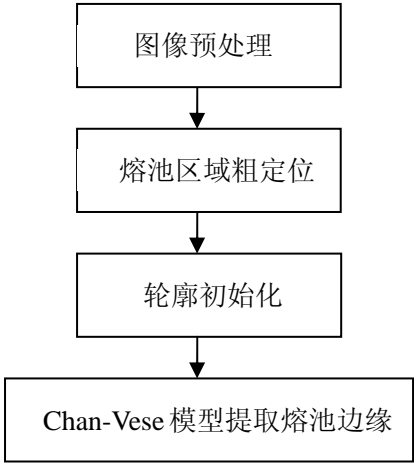


图 2 熔池边缘提取流程

2 基于区域粗定位与 Chan-Vese 模型的熔池边缘提取

2.1 熔池区域粗定位

由图 1 可知，熔池是所获取焊缝区域图像上亮度较高的地方，特征较明显。本文通过设定阈值的方法来获取熔池矩形区域，如图 3 所示，矩形区域中像素点的灰度值特征是像素值大于阈值。使 $I(x, y)$ 表示图像中某点像素值， $threshold$ 为设定阈值，则矩形区域内的像素点的灰度特征为： $I(x, y) > threshold$ 。

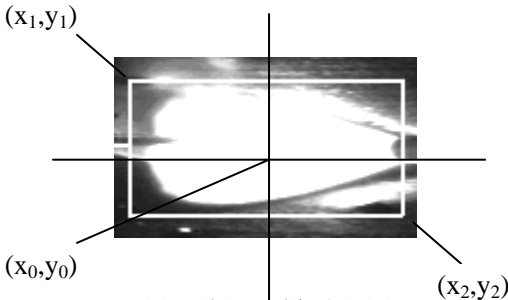


图 3 熔池区域粗定位图

为了获取适当的阈值，需对焊缝区域的直方图进行研究，焊缝区域图像直方图如图 4 所示。从图中可以看出，像素值的分布中分为光强较大的熔池和光

强较弱的熔池以外地方。直方图的两个波峰正好与之相应，两个波峰之间有一些被熔池照亮，或经飞溅物照亮，或噪声引起其亮度值的分布，而第二个波峰对应的即为熔池区域。通过实验，设定熔池区域亮度阈值 threshold 值为 200~240 之间即可。

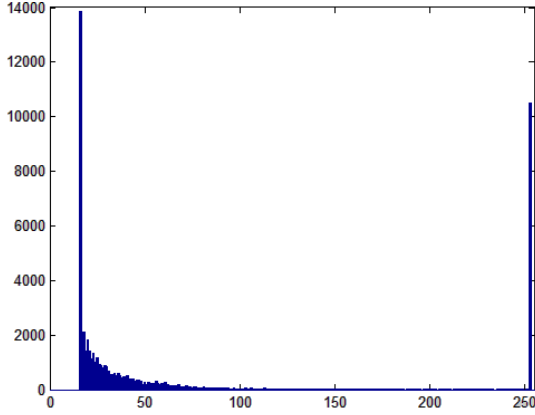


图 4 焊缝区域图像直方图

以图 4 中获取的矩形区域坐标为基础，计算矩形区域中心，即熔池“质心”，经计算可得 (x_0, y_0) ：

$$\begin{aligned} x_0 &= ((x_2 - x_1) / 2 + x_1) \\ y_0 &= (y_2 - y_1) / 2 + y_1 \end{aligned} \quad (1)$$

由于受到噪声影响，该“质心”通常不是熔池的真正质心，但 Chan-Vese 模型只要求“质心”能落在熔池内部即可。

2.2 熔池边缘提取

2.2.1 Chan-Vese 主动轮廓模型

Chan-Vese 模型^[9]简称 VC 模型，是 Tony Chan 和 Luminita Vese 提出的一种主动轮廓方法，与其他主动轮廓模型^{[10][11]}的区别是对图像进行分割时不依赖图像的梯度信息，是一种基于曲线的演化、Mumford-Shah 模型和水平集理论的图像分割方法。

设定义域为 Ω 的图像 $u_0(x, y)$ 被闭合轮廓 γ 划分为内部和外部两个不同质区域，区域内的平均灰度分别为实数 c_1 和 c_2 ，构造如下能量函数：

$$\begin{aligned} F(\gamma, c_1, c_2) &= \mu \cdot |\gamma| + v \cdot S(\gamma) \\ &+ \lambda_1 \int_{\text{inside}(\gamma)} |u_0 - c_1|^2 dx dy \\ &+ \lambda_2 \int_{\text{outside}(\gamma)} |u_0 - c_2|^2 dx dy \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $|\gamma|$ 为轮廓曲线 γ 的长度， $S(\gamma)$ 为 γ 所包围区域的面积， $u \geq 0$ 、 $v \geq 0$ 、 $\lambda_1, \lambda_2 > 0$ 为各能量项的权重系数，在该模型中，各个参数的取值是 $v=0, \lambda_1=\lambda_2=\lambda$ 。当闭合轮廓 γ 位于两同质区域的边界时，(2)式取得极小值。从而达到边缘提取

与图像分割的目的。

该能量函数可以形式化为水平集方法：设 ϕ 为根据闭合曲线 C 构造的水平集函数，即 $\{z = \phi(x, y)\}$ ，并设 ϕ 为符号距离函数。其中 Ω 为图像和水平集函数的定义域，定义 Heaviside 函数 H 与 Dirac 量测 δ ：

$$H(z) = \begin{cases} 1, & z \geq 0 \\ 0, & z < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\delta(z) = \frac{dH(z)}{dz} \quad (4)$$

曲线内部区域面积通过 Heaviside 函数的积分计算，Heaviside 函数的梯度定义了曲线，因此整个区域的积分可得到轮廓的长度，因此 (2) 式能量函数可改写成：

$$\begin{aligned} F(\phi, c_1, c_2) &= \mu \int_{\Omega} \delta(\phi) |\nabla \phi| dx dy + v \int_{\Omega} H(\phi) dx dy \\ &+ \lambda_1 \int_{\Omega} |u_0 - c_1|^2 H(\phi) dx dy \\ &+ \lambda_2 \int_{\Omega} |u_0 - c_2|^2 (1 - H(\phi)) dx dy \end{aligned} \quad (5)$$

Chan 和 Vese 根据欧拉—拉格朗日方法推导 (5) 式极小化的水平集函数 ϕ 满足的偏微分方程，通过计算可得到 c_1 与 c_2 ：

$$c_1 = \frac{\int_{\Omega} u_0(x, y) H(\phi) dx dy}{\int_{\Omega} H(\phi) dx dy} \quad (6)$$

$$c_2 = \frac{\int_{\Omega} u_0(x, y) (1 - H(\phi)) dx dy}{\int_{\Omega} (1 - H(\phi)) dx dy} \quad (7)$$

在能量函数最小化时，普遍采用的方法是在欧拉—拉格朗日方程上执行梯度下降方法，得到

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi}{\partial t} &= \delta(\phi) [uK(\phi) |\nabla \phi| - v - \lambda_1 (u_0 - c_1)^2 \\ &+ \lambda_2 (u_0 - c_2)^2] \end{aligned} \quad (8)$$

$\phi(0, x, y) = \phi_0(x, y)$ ，其中， K 是水平集函数的平均曲率，其值为：

$$K(\phi) = \frac{\phi_{xx}\phi_y^2 - 2\phi_{xy}\phi_x\phi_y + \phi_{yy}\phi_x^2}{(\phi_x^2 + \phi_y^2)^{3/2}} \quad (9)$$

ϕ_x 与 ϕ_{xx} 为 $\phi(x, y)$ 对于 x 的一阶与二阶偏导， ϕ_y 与 ϕ_{yy} 是 $\phi(x, y)$ 对于 y 的一阶与二阶偏导^[9]。

2.2.2 算法的实现

初始化: $n=0$; numIteration 为设置的最大迭代次数;

步骤 1: 熔池区域粗定位, 检测出左下角 (x_1, y_1) 与右上角坐标 (x_2, y_2) , 根据式 (1) 求出熔池质心, 定义水平集合函数 p ;

步骤 2: 如果 $n > \text{numIteration}$, 转步骤 8;

步骤 3: 通过式 (6) (7) 离散化方式计算 c_1 与 c_2 ;

步骤 4: 计算 $\phi_x, \phi_y, \phi_{xx}, \phi_{yy}, \phi_{xy}$ 值; 使用式 (9) 计算 K 的值;

步骤 5: 根据式 (5) 计算 F ;

步骤 6: 更新水平集函数 $p = p + \delta_t F$; $n++$;

步骤 7: 转步骤 2;

步骤 8: 结束。

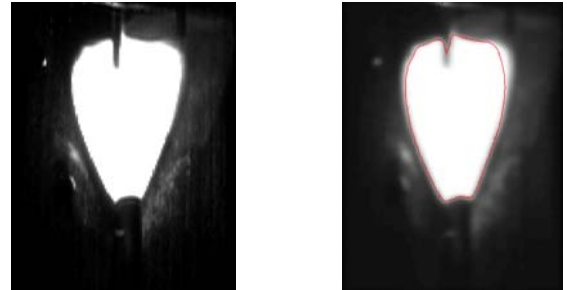
3 实验结果与分析

为了验证本文方法的有效性, 采用基于 CCD 被动光的 MAG 打底焊系统采集的焊缝区域图像, 在 AMD Athlon II X4 620 处理器, 内存为 2.60GHz, 2.00GB 的个人计算机上, 用 Matlab7.0 作为开发工具, 对本文所提方法进行了边缘提取实验, 首先对熔池图像进行高斯平滑预处理, 焊缝区域图像大小为 384×144 像素; 在熔池区域粗定位中 $\text{threshold} = 220$, 以获取矩形区域为新的处理对象, 尺寸不一, 求出矩形区域的中心点坐标。为了提高 Chan-Vese 模型的收敛速度, 考虑到当前熔池图像形状倾向于椭圆, 初始轮廓定义为一椭圆^[12], 要保证该椭圆在真正熔池的内部即可, 经过试验, 设置该椭圆的水平集合函数为:

$$p = \sqrt{(x - x_0)^2 + 10 * (y - y_0)^2} - \text{radius}, \quad \text{radius}$$

的选取需考虑熔池粗定位中提取的熔池区域可能有噪声的影响, 而 radius 若太小, 会增加迭代步骤, 经过试验, radius 的值以略小于 $(|y_2 - y_1|)/2$ 为最佳, 使用本文方法所得到的熔池边缘提取效果如图 5 所示。图 5(a)为原始图像, 图 5(b)为本文算法一步迭代后熔池边缘提取结果, 从图中可以看出, 利用 Chan-Vese 模型经过一次迭代可以得到较精确熔池的边缘。为了对本文方法的有效性进行进一步验证, 首先对初始轮廓的选取位置进行了实验, 实验结果如图 6 所示: 图 6(a)为初始轮廓为熔池外部矩形区域时熔池边缘提取效果, 表现出对噪声较敏感, 迭代时间较长的特点; 图 6(b)为本文设计的初始轮廓为熔池内部椭圆的结果。考虑到目前在熔池与焊缝提取中, 该领域采用的方法主要是 Sobel 算子等边缘提取算法, 因此将本文算法与传统方法进行了对

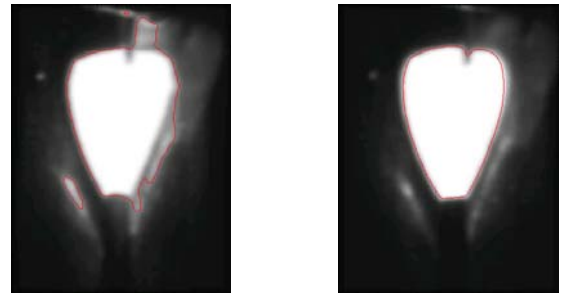
比实验, 所得结果如图 7 所示。图 7(a)为原始图像, 图 7(b)为 Sobel 算子边缘提取; 图 7(c)为 Canny 算子边缘提取; 图 7(d)为本文算法边缘提取结果; 从图中可以看出, Sobel 算子与 Canny 算子容易提取出伪边缘, 后续处理耗时间, 影响正确率, 不适合焊接领域的实时、准确的需求。



(a) 为原始图像

(b) 熔池边缘提取结果

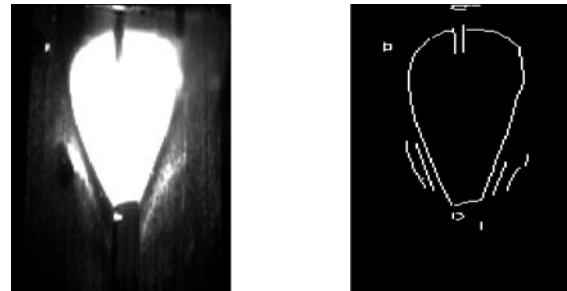
图 5 本文方法一步迭代提取熔池边缘结果



(a) 初始轮廓在熔池外

(b) 本文方法边缘提取结果

图 6 初始轮廓位于熔池外与熔池内的边缘提取结果比较

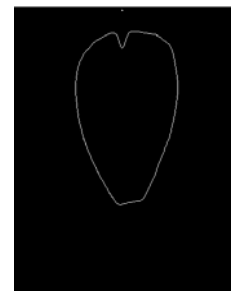


(a) 原始图像

(b) Sobel 算子熔池边缘提取



(c) Canny 算子熔池边缘提取



(d) 本文方法熔池边缘提取

图 7 不同方法熔池边缘提取效果比较

同时, 本文对本文方法与其他边缘提取算法的运行时间进行了比较, 如表 2 所示。

表 2 熔池边缘提取算法使用时间 (50 帧平均执行时间)

熔池边缘提取算法	处理时间(/s)
Sobel 算子	0.095743s
Canny 算子	0.126152s
本文方法	0.135502s

由表 2 中给出了三种算法 50 帧耗时的平均时间, 可以看出, 三种算法的时间在同一个量级中, 因此, 本文方法可以满足熔池边缘提取中实时的要求。

4 结论

(1)针对有强噪声干扰的焊缝区域图像在熔池边缘提取上存在伪边缘的问题, 提出了一种基于熔池区域粗定位与 Chan-Vese 主动轮廓模型的熔池边缘提取方法。

(2)利用该算法对通过对 GMAW 管道打底焊中通过 CCD 获取的图像, 使用该方法实现了对熔池边缘进行实时提取的目的, 取得了较好的实验效果。

参 考 文 献

- [1] 李云峰, 赵熹华, 黄滨安, 杨雄英. 视觉传感螺旋管埋弧焊内焊缝自动跟踪系统[J]. 机械工程学报, 2008,44(7):237-240.
Li Yunfeng, Zhao Xihua, HUANG Binan, YANG Xiongying. Visual sensor for automatic weld seam tracking system to submerged arc inner welding of spirally steel tubes[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering.2008,44(7):237-240.
- [2] 高进强, 王德民, 武传松. 基于视觉的 MAG 焊接熔池的标定[J]. 焊接学报 2009, 30(2):34-36.
Gao Jingqiang, WANG Demin, WU Chuansong. Calibration of weld pool size for MAG arc welding based on vision[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(2):34-36.
- [3] Zhang Y M, Kovacevic R. Real time sensing of sag geometry during GTA welding[J]. Transactions of the ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1997,119(5):151-160
- [4] KOVACEVIC R, ZHANG Y M, LI L. Monitoring of weld joint penetration based on weld pool geometrical appearance[J]. Welding Journal, 1996,75(10):317~320.
- [5] 岳建峰, 李亮玉, 王天琪, 武宝林. 基于正面焊接多信息融合的 GMAW 融透控制[J], 机械工程学报, 2009,45(11):283-287.
- YUE Jianfeng, LI Liangyu, WANG Tianqi, WU Baolin. Penetration control of GMAW based on multi-informational fusion from the front surface[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009,45(11):283-287.
- [6] 高向东,陈章兰, 陈永平. 图像质心算法的焊缝识别理论与试验研究[J], 机械工程学报,2007,43(3):172-176.
GAO Xiangdong, CHEN Zhanglan, CHEN Yongping. Theoretical and experimental study on seam center detection based on welding visual image centeroid arithmetic[J], Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007,43(3):172-176.
- [7] LIU J, FAN Z, OLSEN S. Using active contour models for feature extraction in camera-based seam tracking of arc welding[C/CD].// Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '09). 2009,5948-5955.
- [8] GOUMEIDANE A B, KHAMADJA M, NACEREDDINE N, Bayesian Pressure Snake for Weld Defect Detection[C/CD], Proceedubgs of Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems ACIVS'09, Bordeaux, France, Lecture Notes in Computer Science 5807, 2009,309-319.
- [8] 王勇, 王丁贺, 方帅, 廖建雄. GMAW管道打底焊视觉监控系统研究[J]. 电焊机, 2009,39(4):42-46.
Wang Yong, Wang Ding-he, Fang Shuai, Liao Jian-xiong. Research on a visual monitor system for GMAW backing welding of pipeline[J]. Electric Welding Machine. 2009,39(4): 42-46
- [9] CHAN T, VESE L. Active contours without edges[J], IEEE Transaction Image Processing. 2001,10(2):266-277
- [10] KASS M, WITKIN A, TERZOPOULOS D. Snakes: active contour models[J]. International Journal of Computer Vision. 1988,1(4):321-331
- [11] OSHER S, FEDKIW R P. level set method: an overview and some recent results[J]. Journal of Computational physics, 2001,169(2):463-502.
- [12] FITZGIBBON A W, PILU MAURIZIO, FISHER RB. Direct least square fitting of ellipses[J]. IEEE transactions on Pattern analysis and Machine Intelligence, 1999,21(5):476-480.

作者简介: 李静(通信作者), 女, 1976 年出生, 副教授, 华恒焊接股份有限公司博士后. 主要研究方向为基于机器视觉的焊接过程质量控制。

E-mail: lijing@nuaa.edu.cn