

示温漆图像等温线提取算法

王 展¹, 杜平安¹, 李 杨², 周 峰³

- (1. 电子科技大学 机械电子工程学院, 成都 611731;
2. 中国航空发动机集团有限公司 四川燃气涡轮研究院, 四川 江油 621703;
3. 中国航空发动机集团有限公司 湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002)

摘 要: 分析示温漆(TIP)图像特征,根据等温线附近产生局部梯度极值的特点,实验对比了 4 种边缘提取算法效果。根据实验结果,选用 Canny 算子提取等温线。提出在边缘提取前进行 K-means 聚类处理,并对 K-means 聚类算法和 Canny 算子进行了改进。提出了两种 K-means 初始聚类中心的选择方法,更适于示温漆图像的分割。改进了 Canny 算子的内核,提升了等温线的质量。结果表明:该算法能够快速提取清晰、连续的等温线,效果良好,满足工程应用要求,已用于示温漆自动判读软件开发。

关 键 词: 温度测试; 示温漆 (TIP); 边缘提取; 聚类算法; 图像处理; 等温线

中图分类号: V235.1 **文献标志码:** A

Temperature indicating paint image isotherm extraction algorithm

WANG Zhan¹, DU Pingan¹, LI Yang², ZHOU Feng³

- (1. School of Mechatronics Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;
2. Sichuan Gas Turbine Establishment, Aero Engine (Group) Corporation of China, Jiangyou Sichuan 621703, China;
3. Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Aero Engine (Group) Corporation of China, Zhuzhou Hunan 412002, China)

Abstract: The feature of isotherm in temperature indicating paints (TIP) images was analyzed, four kinds of edge extraction algorithms were experimented and compared, extracting isotherms with Canny edge extraction was suggested and the K-means clustering algorithm was used before the edge extraction. The K-means clustering and Canny edge extraction were improved. Two methods of choosing the K-means initial centers were proposed, which were more suitable for TIP image segmentation. The Canny algorithm to detect isotherms with higher quality was improved. The algorithm could extract clear and continuous isotherms fast. Experimental results show that the algorithm proposed runs well, and satisfies the engineering application needs. Now it has been well applied in TIP automatic temperature interpretation software development.

Key words: temperature measurement; temperature indicating paints (TIP); edge extraction; clustering algorithm; image processing; isotherm

收稿日期:2016-01-18

作者简介:王展(1988—),博士生,主要从事图像处理,模式识别相关研究。

引用格式:王展,杜平安,李杨,等. 示温漆图像等温线提取算法[J]. 航空动力学报,2017,32(9):2095-2099. WANG Zhan, DU Pingan, LI Yang, et al. Temperature indicating paint image isotherm extraction algorithm[J]. Journal of Aerospace Power, 2017,32(9):2095-2099.

示温漆是一种特殊配方的涂料,它能随外界温度的变化而改变自身颜色,且颜色改变去向固定。因此在被测试件表面涂覆示温漆,利用示温漆颜色的变化便可反推温度的大小,从而形成一种接触式温度测量方法。目前广泛用于航空发动机等热端部件表面温度的测量,图 1 为一受热试件的示温漆图像,由于试件不同部位的温度不同,因此示温漆变化为不同的颜色,根据颜色类型便可判读温度大小^[1-7]。

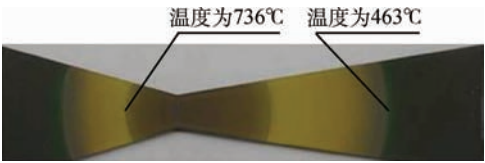


图 1 示温漆等温线

Fig. 1 Isotherm of temperature indicating paints

测试发现,示温漆变色后两种颜色的边界具有相同的温度,即颜色变化交界线为等温线,见图 1。在利用示温漆图像自动判读温度大小时,需要识别出图像中的每一条等温线,并根据等温线的温度值判读等温线之间区域的温度大小。因此,如何提取示温漆图像的等温线,是示温漆测温方法中自动判读温度的关键技术^[1-3]。

本文利用数字图像处理理论,研究示温漆图像等温线的自动提取算法。通过对示温漆图像特征分析,采用边缘提取算法提取等温线;提出聚类算法和边缘提取算法结合,能明显提高等温线质量。通过对聚类算法和边缘提取算法的改进,最终提取出清晰连续的等温线。提取算法已成功用于示温漆图像自动判读软件的开发,判读效率高,精度满足工程应用要求。

1 边缘提取算法及缺陷分析

实验发现,示温漆图像颜色交界线附近的 2 阶导数值极大,近似于边缘提取算法中的边缘信息,因此本文通过边缘提取算法来提取等温线^[4]。以图 2(a)示温漆图像为例,分别采用目前常见的 4 种边缘提取算法进行处理,结果如图 2(b)所示。从处理结果发现,Robert 算子与 Priwitt 算子的边缘提取结果存在过多噪声,Sobel 算子结果的细节丢失严重,只有 Canny 算子在有效抑制噪声的前提下保留了图像中最多的细节,因此本文选用 Canny 算子^[8-13]。

图 3(a)为某型号示温漆图像及 Canny 算子的边缘提取结果。可以看出,示温漆图像存在两

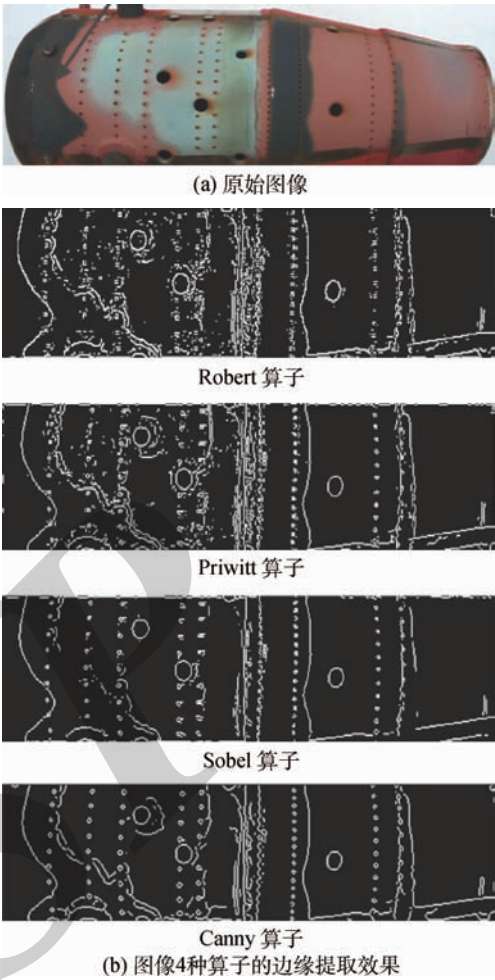


图 2 示温漆图像边缘提取效果

Fig. 2 Results of edge extraction operator for TIP image

类边缘信息,即试件本身的“结构边缘”和“颜色交界线”。两种边缘虽然特征类似,但处理结果差别很大。由图 3(b)可见,“结构边缘”也被 Canny 算子完整地提取出,每条边缘清晰独立,效果良好。但等温线的提取效果却不理想。观察细节不难发现,经 Canny 算子提取的等温线实际上是一组短线与点组成的区域,并不是一条连续的边缘线,这种结果不能作为后续温度自动判读的等温线。

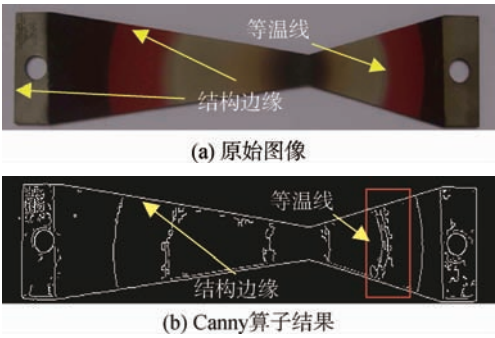


图 3 某示温漆图像的 Canny 算子处理结果

Fig. 3 Result of Canny operator for a certain TIP image

Canny 算子的边缘判别依据主要是 1 阶偏导的有限差分,在像素间体现为卷积算子

$$s_x = \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, s_y = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix}$$

式中 s_x, s_y 分别代表 x, y 方向的 1 阶偏导。对于连续图像,梯度幅值 T 以及梯度方向 θ 分别为

$$T(x, y) = \sqrt{\text{grad}_x^2 + \text{grad}_y^2} \quad (1)$$

$$\theta = \arctan(\text{grad}_y / \text{grad}_x) \quad (2)$$

$$\text{grad}_x = f(x, y+1) - f(x, y) + f(x+1, y+1) - f(x+1, y) \quad (3)$$

$$\text{grad}_y = f(x, y) - f(x, y+1) + f(x, y+1) - f(x+1, y+1) \quad (4)$$

式中 T 为 Canny 算子对于边缘检测的主要依据,当梯度幅值 T 大于阈值时,则会被算法判断为边缘^[5]。

从图 4 可以看出,结构边缘的特征明显,算法的处理结果也较理想。但等温线附近的颜色变化较模糊,即平滑的颜色过渡,这会导致一定范围内像素对应的梯度幅值 T 都可能较高(图中黄线内区域)。所以等温线附近存在大量符合边缘提取特征的像素,从而形成了局部短线与点的集合,其中多数为伪特征点。

虽然 Canny 算子对 θ 方向(即垂直边缘方向)上的像素进行了非极大值抑制,去除了一部分干扰。但是等温线附近的伪特征点均以离散状态存在。因此非极大值抑制过程只能修正边缘,却不能过滤掉不需要的边缘。示温漆图像中多数的等温线都是十分模糊的,在这种情况下,现有 Canny 算子并不能很好地提取出等温线。

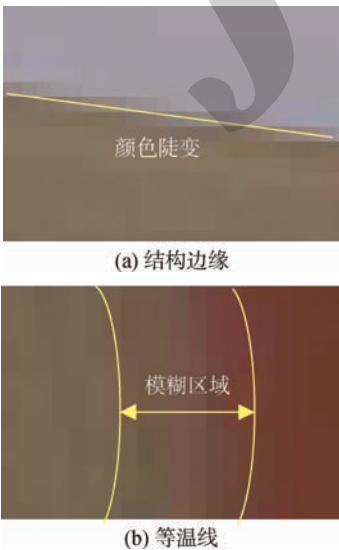


图 4 两种边缘效果对比

Fig. 4 Comparison of two kinds of edge effect

2 K-means 聚类与 Canny 算子结合的边缘提取算法

2.1 聚类算法及改进

等温线处相邻颜色间存在模糊过渡,导致很难确定等温线的确切位置。同一色块中的像素值也并不统一,边缘提取算法偶尔会将其中的突兀噪点作为边缘特征提取出来。为了去除模糊过渡和色块内像素的干扰,本文提出在边缘提取前,首先对示温漆图像进行聚类处理^[14-18]。

K-means 聚类算法的计算效率高,实用性强,目前应用较广。该算法随机选取初始聚类中心(本文中为 RGB(red, green, blue)值),通过多次迭代,直至收敛或误差小于给定阈值,可得到最佳聚类中心,具体流程参考文献[6]。但实验发现,初始聚类中心的随机性会导致等温线提取结果不一致。为此,本文对 K-means 算法初始聚类中心的选取规则进行了改进,具体方法如下:

对于色彩较鲜明的示温漆图像,将初始聚类中心改为在灰度域内的平均分布:给定原始数据集 $D = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 聚类数目 K , 设 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 为初始聚类中心,均为三维向量 (R, G, B) , 令

$$p_n = (n \times 255/K, n \times 255/K, n \times 255/K) \quad n = 1, \dots, K \quad (5)$$

根据欧式距离最小原则,将数据分为 K 类,设分类为 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_k\}$, 计算每类平均值,以代替。

计算 S 值,使得各类中的样本与聚类中心距离最小,即

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{x_j \in s_i} \|x_j - u_j\|^2 \quad (6)$$

实际计算时,收敛条件为满足规定迭代次数,或结果小于阈值即可。迭代收敛后,所得聚类中心 S 即为几个颜色区域中更具代表性的颜色值。然后将相近区域内的颜色统一赋值为聚类中心值。

对于色彩更为接近的示温漆,本文采用半自动聚类方法,即通过人机交互给定初始中心点,并通过 5 像素 $\times$ 5 像素区域内去极值取平均值的方法排除误差。这种情况下,算法后续则不通过迭代,保留一次聚类的结果。

图 5 显示了图像经聚类处理后的效果,可见等温线两侧的区域被分别归类为左右聚类中心的颜色,等温线位置的模糊过渡也随之消失。等温线信息清晰独立。

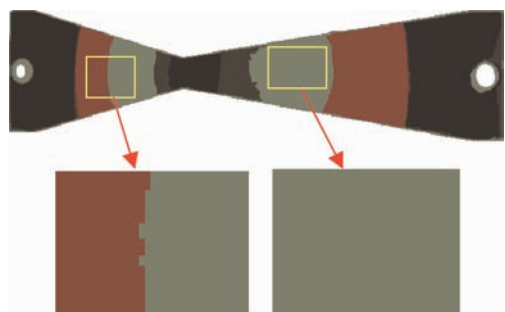


图 5 示温漆图像聚类后的边缘特征

Fig. 5 Edge feature of TIP image after clustering

2.2 边缘提取算法改进

图像经聚类处理后应用边缘提取算法,可以得到较为理想的等温线。但发现存在一定程度的边缘断裂和丢失现象,破坏了等温线的完整性。由于聚类过程中排除了绝大多数干扰信息,因此本文通过提高边缘提取算法的灵敏度,保留更多的边缘信息,防止边缘断裂。

为此,本文将 Canny 算子内核中的 1 阶偏导改为 2 阶偏导,增强边缘特征,使算法对边缘更为敏感。2 阶偏导模板即 8 邻域的 Laplacian 算子内核

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \tag{7}$$

得到卷积模板

$$\nabla^2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -8 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

在中心点 4 个方向上 2 阶导分别为

$$T_{45}(x,y) = [f(x-1,y+1) - f(x,y)] - [f(x,y) - f(x+1,y-1)] \tag{8}$$

$$T_{135}(x,y) = [f(x+1,y+1) - f(x,y)] - [f(x,y) - f(x-1,y-1)] \tag{9}$$

$$T_0(x,y) = [f(x,y+1) - f(x,y)] - [f(x,y) - f(x,y-1)] \tag{10}$$

$$T_{90}(x,y) = [f(x+1,y) - f(x,y)] - [f(x,y) - f(x-1,y)] \tag{11}$$

由以上结果可得幅值 T

$$T = (T_{45} + T_{135} + T_0 + T_{90})/4 \tag{12}$$

再根据新的幅值 T ,判断像素点是否为边缘。

改进算法与原始算法的边缘提取效果对比见图 6,可以发现,原始算法存在的边缘断裂现象得到了修复。

通过对 K-means 算法与 Canny 算子的结合与改进,等温线提取的实际效果如图 7 所示。可见,经本文方法的处理,可以从示温漆图像中自动提取出清晰、连续等温线。

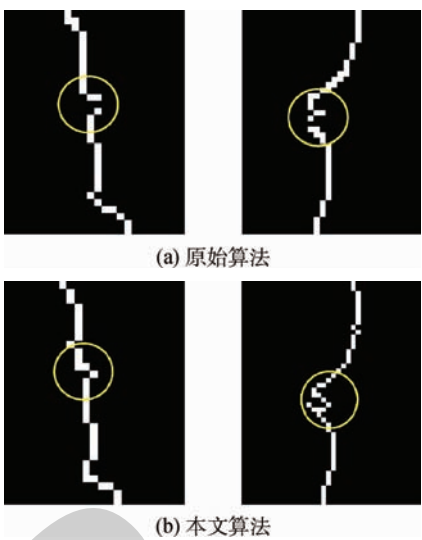


图 6 改进的 Canny 算子与原始算法效果对比
Fig. 6 Comparison of the effects of improved Canny operator and original algorithm

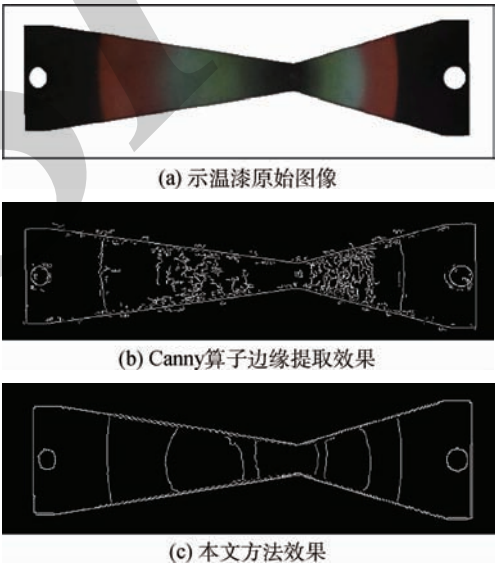


图 7 本文方法与 Canny 算子边缘提取效果对比
Fig. 7 Comparison of the effects of algorithm in this paper and Canny operator edge extraction

3 结 论

本文通过示温漆图像的特征分析,提出一种示温漆图像等温线自动提取算法。针对图像“模糊过渡”、“色块不均匀”等问题,结合 K-means 聚类算法和 Canny 算子边缘提取算法,并对两种算法进行针对性改进,获得了较高质量的等温线。基于本文算法,开发了“示温漆图像自动判读软件”,实现了等温线的自动提取和温度的自动判读,判读精度满足工程要求。示温漆判读系统效果见图 8。

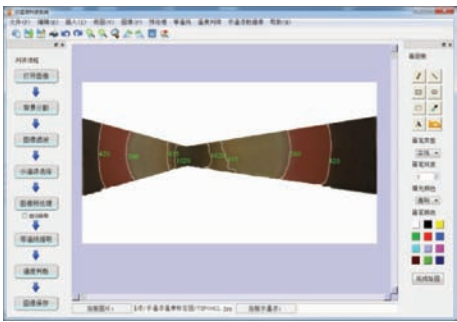


图 8 示温漆判读系统

Fig. 8 TIP temperature interpretation system

参考文献:

[1] 李杨,李志敏,熊兵,等. 航空发动机涡轮叶片温度测量技术现状与发展[R]. 贵阳:第 15 届中国科协年会,2013.

[2] 李杨,陈洪敏,熊庆荣. 不可逆示温涂料的发展及应用[J]. 中国涂料,2010,25(5):16-19.

LI Yang, CHEN Hongmin, XIONG Qingrong. Development and application of irreversible temperature indicating coatings[J]. China Coatings,2010,25(5):16-19. (in Chinese)

[3] LANG W,GARDNER A D,Mariappan S,et al. Boundary-layer transition on a rotor blade measured by temperature-sensitive paint,thermal imaging and image derotation[J]. Experiments in Fluids,2015,56(6):1-14.

[4] 邓进军,李凯,王云龙,等. 航空发动机内壁高温测试技术[J]. 微纳电子技术,2015,52(3):178-184.

DENG Jinjun,LI Kai,WANG Yunlong, et al. High temperature measurement technology of aero-engine internal surface [J]. Micronanoelectronic Technology, 2015, 52 (3):178-184. (in Chinese)

[5] LORENZ M,HORBACH T,SCHULZ A,et al. A novel measuring technique utilizing temperature sensitive pain; measurement procedure, validation, application, and comparison with infrared thermography[J]. Journal of Turbomachinery,2013,135(3):420-431.

[6] LEE J J,DUTTON J C,JACOBI A M. Application of temperature-sensitive paint for surface temperature measurement in heat transfer enhancement applications[J]. Journal of Mechanical Science and Technology ,2007,21(8):1253-1262.

[7] IRELAND P T,JONES T V. Liquid crystal measurements of heat transfer and surface shear stress[J]. Measurement Science and Technology,2000,11(7):969-986.

[8] CANNY J. A computational approach to edge detection [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,1986,8(6):679-698.

[9] 李俊山,马颖,赵方舟,等. 改进的 Canny 图像边缘检测算法[J]. 光子学报,2011,40(增刊 1):50-54.

LI Junshan,MA Ying,ZHAO Fangzhou. et al. A novel arithmetic of image edge detection of Canny operator[J]. Acta Photonica Sinica,2011,40(Suppl. 1):50-54. (in Chinese)

[10] XU Q,VARADARAJAN S,CHAKRABARTI C,et al. A distributed canny edge detector:algorithm and FPGA implementation[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2014,23(7):2944-2960.

[11] RAY K. Unsupervised edge detection and noise detection from a single image[J]. Pattern Recognition,2013,46(8):2067-2077.

[12] PAN X,YE Y,CHENG J,et al. Composite derivative and edge detection [J]. Signal Image and Video Processing, 2014,8(3):523-531

[13] ZHANG X,LIU C. An ideal image edge detection scheme [J]. Multidimensional Systems and Signal Processing, 2014,25(4):659-681.

[14] 王荣华,杜平安,黄明镜,等. 基于等温线温度识别的示温漆温度自动识别算法[J]. 电子测量与仪器学报,2010,24(6):542-547.

WANG Ronghua, DU Pingan, HUANG Mingjing, et al. Automatic recognition algorithm for temperature-sensitive paint's temperature based on isotherm temperature identification[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument,2010,24(6):542-547. (in Chinese)

[15] 熊忠阳,陈若田,张玉芳. 一种有效的 K-means 聚类中心初始化方法[J]. 计算机应用研究,2011,28(11):4188-4190.

XIONG Zhongyang,CHEN Ruotian,ZHANG Yufang. Effective method for cluster centers 'initialization in K-means clustering[J]. Application Research of Computers,2011,28(11):4188-4190. (in Chinese)

[16] 黄震华,向阳,张波,等. 一种进行 K-means 聚类的有效方法[J]. 模式识别与人工智能,2010,23(4):516-521.

HUANG Zhenhua, XIANG Yang, ZHANG Bo, et al. An efficient method for K-means clustering[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence,2010,23(4):516-521. (in Chinese)

[17] ARTHUR D,VASSILVITSKII S. K-means++: the advantages of careful seeding[R]. New Orleans, Louisiana: The 18th Annual Association for Computing Machinery-Society for Industrial and Applied Mathematics (ACM-SIAM) Symposium on Discrete Algorithms, 2007.

[18] JUANG L H,WU M N. MRI brain lesion image detection based on color-converted K-means clustering segmentation [J]. Measurement,2010,43(7):941-949.

(编辑:王碧琚)