

基于图像处理和K近邻算法的示温漆判读方法

胡明¹, 葛俊锋², 薛秀生¹, 张宇¹, 高佳祺¹, 张泽鹏¹

(1. 中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015; 2. 华中科技大学 人工智能与自动化学院, 武汉 430074)

摘要: 为了提高示温漆温度判读的精度和效率, 采用图像处理和K近邻算法进行示温漆自动判读。对样板图像颜色空间进行转换, 提取颜色特征, 建立判读模型; 采用基于邻域颜色相似性的多尺度分割算法对试验件图像进行分割和颜色空间转换, 提取颜色特征。通过采用基于K近邻算法和颜色分布特征构建的温度判读模型, 在KN3A示温漆矩形样板上进行了温度判读, 结果表明: 当允许误差在 $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内时, 像素点温度判读准确率达到96%, 区域温度判读准确率达到100%; 在KN8蝶形样板上进行了温度判读, 结果表明: 热电偶附近像素点的温度值与热电偶温度值相比较, 其误差在 $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。

关键词: 示温漆; 图像处理; K近邻算法; 颜色分布; 温度判读

中图分类号: V219

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2021.06.014

Interpretation Method of Thermal Paint Based on Image Processing and K-nearest Neighbor Algorithm

HU Ming¹, GE Jun-feng², XUE Xiu-sheng¹, ZHANG Yu¹, GAO Jia-qi¹, ZHANG Ze-peng¹

(1. AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China; 2. School of Artificial Intelligence and Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to improve the accuracy and efficiency of temperature interpretation of thermal paint, image processing and K-nearest neighbor algorithm were used for automatic interpretation of thermal paint. The color space of the sample image was transformed, the color features were extracted and the interpretation model was established. The multi-scale segmentation algorithm based on neighborhood color similarity was used to segment the test piece image and transform the color space to extract the color features. The temperature interpretation model was constructed based on K-nearest neighbor algorithm and color distribution feature. The temperature interpretation was carried out on the rectangular sample plate of KN3A thermal paint. The results show that when the allowable error is within $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, the accuracy of pixel temperature interpretation is 96%, and the accuracy of regional temperature interpretation is 100%. The temperature interpretation was carried out on the KN8 bow-tie sample plate. The results show that the error between the pixel temperature near the thermocouple and the thermocouple temperature is within $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Key words: thermal paint; image processing; K-nearest neighbor algorithm; color distribution; temperature interpretation

0 引言

在航空发动机试验中, 热端部件壁温测量是非常重要的。由于发动机结构复杂、工况恶劣, 常见的热电偶、红外测温仪等测量方法, 在测量一些转动件和内部复杂构件的壁温时存在困难, 而采用示温漆测温不需进行测试改装, 对发动机流场影响小, 特别适合于发动机转动件、薄壁件、复杂构件的壁温测量^[1-3]。示温漆的温度判读是保证示温漆测试精度的重要步骤, 目前在中国示温漆的温度判读主要依靠人工, 主

观性强, 易受环境光、个人辨色能力影响, 且判读时间较长, 效率低, 易产生视觉疲劳, 造成判读结果的偏差较大。

为了提高示温漆判读的效率和精度, 国内外学者开展了多种示温漆自动判读方法研究。张羽鹏等^[4]采用色彩色差仪、分光光度计等测量得到物体表面某点示温漆的颜色特征值, 与示温漆样板的颜色特征值进行对比, 取色差值最小的样片的温度为该测点的温度值; 张志龙等^[5]利用颜色温度曲线获得示温漆颜色值与温度之间的对应关系, 取计算得到的未知颜色值

收稿日期: 2019-10-23 基金项目: 航空动力基础研究项目资助

作者简介: 胡明(1987), 男, 硕士, 工程师, 主要从事航空发动机测试工作; E-mail: 799906667@qq.com。

引用格式: 胡明, 葛俊锋, 薛秀生, 等. 基于图像处理和K近邻算法的示温漆判读方法[J]. 航空发动机, 2021, 47(6): 80-84. HU Ming, GE Junfeng, XUE Xiusheng, et al. Interpretation method of thermal paint based on image processing and k-nearest neighbor algorithm[J]. Aeroengine, 2021, 47(6): 80-84.

与曲线之间的最近距离对应的温度作为未知颜色值的温度;Griffin等^[6-7]、马春武等^[8]和于坤林等^[9-10]分别在RGB、Lab、HSI不同颜色空间利用颜色温度曲线判读,示温漆颜色值可以是像素颜色值,也可以是区域平均颜色值;Lempereur等^[11-12]获得与各段变色点间颜色相对应的区域,进而确定各区域的温度范围,并在HSI空间中用颜色值与温度对应关系曲线对每个像素点对应的温度进行判读;王展等^[13-14]和王荣华等^[15]将采用图像处理方法提取的示温漆图像中等温线两侧区域的颜色统计特征作为判读依据,通过与示温漆蝶形样片上提取的等温线颜色特征库进行对比,获得被测等温线对应的温度值。虽然上述算法可以提高示温漆判读精度和效率,但还存在一些不足。例如:仪器测量法不能获得示温漆温度分布的判读结果;基于颜色温度曲线采用单个颜色值作为判读依据,受环境影响大,判读精度和稳定性低;基于等温线的判读方法受示温漆等温线数量的限制,温度测量的分辨率低,不能用于只有渐变颜色而无等温线的示温漆的温度判读。

为了进一步提高示温漆温度判读的效率和准确性,本文提出了一种基于图像处理和K近邻算法的示温漆温度判读方法。

1 示温漆温度自动判读

1.1 自动判读流程

示温漆的温度判读是通过对被测样件与样板的颜色对比来获得样件温度。为尽可能去除光照对判读的影响,需在相同的条件下对待测样件与样板进行拍摄,然后对样片图像进行颜色空间转换,提取温度对应的颜色分布特征,通过K近邻算法建立温度判读模型。然后依据邻域颜色相似性对被测样件图像进行多尺度图像分割,划分成颜色相近的若干区域。再对被测样件图像进行颜色空间转换,提取各图像区域的颜色特征,利用温度判读模型对温度进行判读,获得各区域和像素点的温度。示温漆温度自动判读流程如图1所示。

1.2 图像分割算法

图像分割算法是将示温漆图像按照颜色的不同划分成若干不同区域,其结果直接影响示温漆判读的准确性,因此图像分割算法通常需要人工交互式设置

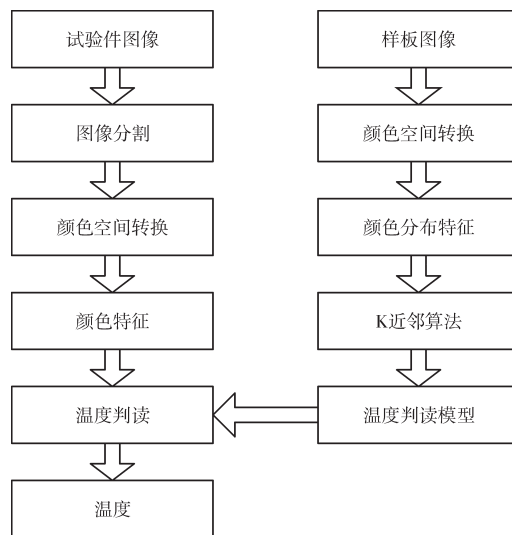


图1 示温漆温度自动判读流程

参数。传统的彩色图像分割算法如区域生长法和聚类方法等,在计算颜色相似性时,通常只考虑像素的颜色特征,而忽略了颜色的位置信息。结合示温漆图像按局部进行判读的特点,本文采用所提出的一种考虑区域相关性的邻域颜色相似性度量,通过迭代方式实现从小区域逐渐合并到大区域的多尺度图像分割算法。

1.2.1 邻域颜色相似性度量

考虑示温漆图像的2个相邻区域,是否将2个邻域合并为1个区域,与2个邻域的颜色差异和相互关系有关。如果2个区域的颜色差异相同,那么优先合并的是2个重合边界多的邻域;如果2个区域重合边界也相同,那么优先合并2个面积差异大的区域。

基于上述原则,提出一种新的2个邻域的颜色相似性度量,定义为

$$S = -\frac{n_1 \cdot n_2 \cdot (\Delta R^2 + \Delta G^2 + \Delta B^2)}{(n_1 + n_2)} + R \cdot \left(D + P \cdot e^{-\min(n_1, n_2)} \right) \quad (1)$$

式中: n_1 、 n_2 为2个区域的大小; ΔR 、 ΔG 、 ΔB 分别为2个区域平均颜色的差值; D 为2个区域的公共边界长度; R 为尺度参数; P 为常数。

S 越大表明2个邻域的颜色相似性越高。邻域颜色相似性度量既考虑了区域平均颜色差异,也考虑了2个领域的相互关系。由于该度量只用于计算相邻区域的颜色相似性,为了实现图像分割,需要通过迭代方式对区域进行多尺度合并。

1.2.2 多尺度图像分割算法

多尺度图像分割算法通过不断调整尺度参数,对相邻区域进行迭代合并,实现对示温漆图像的分割。尺度参数的上限决定了最终的区域分割结果,通过修改尺度参数上限可以调整分割结果,进行人工交互分割,避免过分割和欠分割。同时在局部分割效果不佳时,可以对局部区域调整尺度参数,实现对该区域的二次图像分割。

多尺度图像分割算法的流程如图2所示。具体步骤如下:

- (1)将图像中的每个像素点作为初始种子点;
- (2)遍历每个种子点,设定像素色差的阈值 T_1 ,采用区域生长法将图像分割为多个初始分割区域;
- (3)分析初始区域的邻接关系,设定尺度参数上限 $R_{\max}$;
- (4)在尺度参数 $R=1\sim R_{\max}$ 范围内,按步长 S 计算相邻区域的颜色相似性,对相似度大于阈值 T_2 的区域进行合并;
- (5)当 R 达到设定值 $R_{\max}$ 时,停止循环,获得最终分割结果。

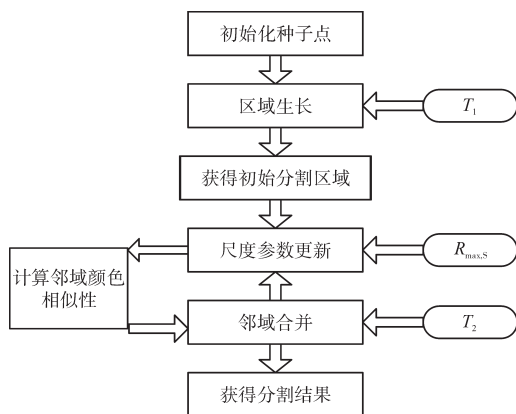


图2 多尺度分割算法的流程

1.3 温度判读算法

基于颜色温度曲线的判读方法采用样板的单个颜色值来建立温度判读模型,在判读时,也常采用单个像素的颜色值和区域的平均颜色值作为特征,因此判读结果易受光照和测试环境影响,判读精度低,稳定性差。为了提高示温漆判读的精度,本文采用颜色统计特征,即颜色分布特征作为判读依据,将样板上每个温度对应于1个颜色分布,建立基于颜色分布的温度判读模型。

K 近邻算法是一种非参数模式识别方法,可用于

分类和回归任务。其核心思想是多数表决法,未知样本的类别由与其最近的 K 个训练样本的类别众数决定,即把 K 个训练样本中出现最多的类别作为未知样本的预测结果。 K 近邻算法建模只需把训练样本直接保存,训练时间开销为零。

为了建立颜色分布特征与温度的判读模型,首先采集不同温度样板上的相同大小的区域,比如 20×20 ,然后提取区域内像素点颜色值并进行滤波,滤波方法用于计算各像素点颜色值到区域平均颜色值之间的距离,按距离从小到大对各像素点排序,按一定比例(如80%)选取距离小的像素点颜色值作为训练样本,去掉距离大的噪声点。最后将每个温度对应的1组像素点颜色值作为其颜色分布特征,用 K 近邻算法建立基于颜色分布特征的温度判读模型。通常上述颜色值采用受光照影响较小的Lab颜色空间。

对示温漆区域温度进行判读时,首先在Lab空间中提取待判读区域的颜色信息,按照建模时相同的滤波方法进行过滤,去掉噪声点。然后将区域像素点的颜色特征输入 K 近邻温度判读模型,得到与每个像素点颜色特征对应的温度值。最后统计每个像素点对应的温度值,将出现次数最多的温度值作为区域温度值。

对示温漆像素点温度进行判读时,首先选取像素点周围的邻域,如 3×3 ,然后利用区域温度判读方法得到像素点对应的温度值。

如果 K 近邻算法中选择 $K=1$,并且用每个样板的平均颜色值作为特征建立模型(不考虑颜色分布),则在温度判读时,将选择与待判读颜色值距离最相近的样板颜色对应的温度作为判读结果,等效于基于颜色温度曲线的判读方法。

2 试验与分析

为了验证图像分割算法和温度判读算法的性能,在试验件图像、矩形样板图像和蝶形样片图像上分别进行图像分割及温度判读试验,采用牌号为KN3A和KN8的示温漆进行试验。多尺度图像分割算法中的参数选择为: $P=50$ 、 $T_1=10$ 、 $S=0.1$ 、 $T_2=0$ 、 $R_{\max}$ 根据需要进行人工交互设定。在试验件图像上的图像分割结果如图3所示。

从图3(b)中可见,多尺度图像分割算法分割的结果与人眼分割结果较一致,未受图中小孔洞影响,大大简化了区域划分的复杂度;从图3(c)中可见,可

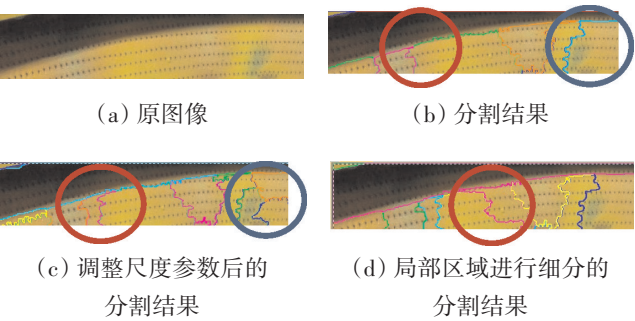


图3 多尺度图像分割结果

以通过调整 $R_{\max}$ 对图像重新分割,直到达到满意的分割效果为止。对局部分割效果不佳的区域,还可以通过减小 $R_{\max}$ 进行区域细分,细分结果如图3(d)所示。

为了验证温度判读算法的精度,在KN3A示温漆矩形样板图像上,对每个温度随机采集400个像素点作为训练样本,并随机采集400个点作为测试样本,取 $K=20$ 。每个温度像素点判读的错误率如图4所示。图中包括判读允许误差控制在0、 ± 10 、 ± 20 、 $\pm 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 4种不同情况下的错误率。

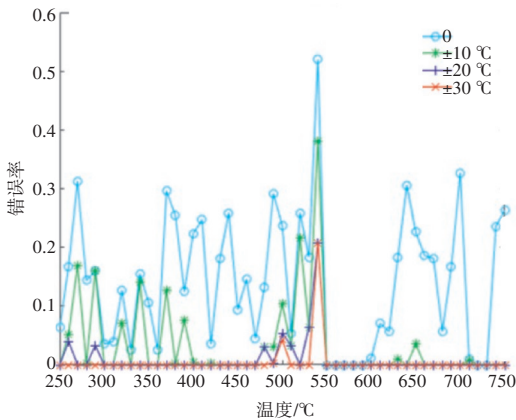


图4 KN3A矩形样板各温度像素点判读错误率

为了与基于颜色温度曲线的判读方法进行对比,取 $K=1$,并采集每一温度的平均颜色值作为训练样本。采用2种方法得到的温度判读准确率见表1。从表中可见,基于颜色分布特征的像素点判读准确率明显优于传统方法的。

表1 KN3A矩形样板像素点温度判读准确率				
K	准确率/%			
	判读允许误差			
	0 $^{\circ}\text{C}$	$\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 30\text{ }^{\circ}\text{C}$
20	0.8227	0.9595	0.9898	0.9956
1	0.6966	0.8163	0.8668	0.8947

为了验证不同的滤波参数对判读精度的影响,采用相同方法对像素点温度进行判读,在不同的滤波参数下,取 $K=20$,像素点判读的准确率见表2。从表中可见,滤波参数越小,数据离散性越小,测试准确率越高。

表2 KN3A样板不同滤波参数下像素点温度判读准确率				
滤波参数/%	准确率/%			
	判读允许误差			
	0 $^{\circ}\text{C}$	$\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 30\text{ }^{\circ}\text{C}$
100	0.7954	0.9470	0.9837	0.9936
80	0.8227	0.9595	0.9898	0.9956
60	0.9019	0.9793	0.9953	0.9966
40	0.9415	0.9889	0.9956	0.9968

对KN3A矩形样板图像进行区域分割和区域温度判读,其分割结果与判读结果如图5所示。从图中可见,所有的样片区域都可以准确分割。温度判读完全正确的区域数占88%,当允许误差在 $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内时,区域温度判读准确率为100%。

以KN8示温漆矩形样板为训练样本,对KN8蝶形样片图像进行区域分割和像素点温度判读,其结果如图6所示。图中的蝶形样片是在标准板表面喷涂要标定的示温漆,根据焦耳效应原理,当标准板通过一定电流时,样板某处的温度与宽度存在一定的比例关系,同时通过标准板表面贴敷热电偶获得并记录不同宽度处的最高温度。通过调整 $R_{\max}$,可将蝶形样板上的示温漆区域在变色点处完全分割,将热电偶附近像素点的温度值与热电偶温度值进行比较,误差为 $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。

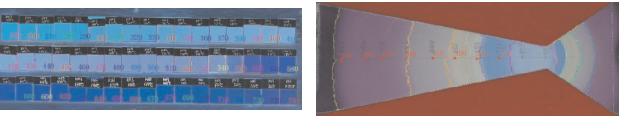


图5 KN3A矩形样板区域 图6 KN8蝶形样片图像分割和温度判读结果

3 结论

(1)基于邻域颜色相似性的多尺度图像分割算法可通过设置分割参数达到预想的分割效果,可将KN3A样板所有的样片区域准确分割,区域划分的效率高。

(2)基于K近邻算法的温度判读方法,在像素点温度判读准确率上明显优于传统方法的,在KN3A矩形样板上的区域温度判读准确率达到88%,将KN8蝶

形样板上的像素点温度值与热电偶温度值进行比较,误差为 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 以内,判读精度高,稳定性好。

上述结果在光照条件一致的情况下获得,光照条件变化及其它牌号示温漆的温度判读还需作进一步研究。

参考文献:

- [1] 张兴,薛秀生,陈斌,等.示温漆在发动机测试中的应用与研究[J].测控技术,2008(1):21-23.
ZHANG Xing, XUE Xiusheng, CHEN Bin, et al. Research and application of thermal indicating paint in aeroengine test[J]. Measurement and Control Technology, 2008(1):21-23. (in Chinese)
- [2] 李杨,陈洪敏,熊庆荣.不可逆示温漆的发展及应用[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] Arulprakasajothi M, Rupesh P L. Surface temperature measurement of gas turbine combustor using temperature-indicating paint[J]. International Journal of Ambient Energy, 2020, (3):1-4.
- [4] 张羽鹏,刘忠奎,张玉新.基于分光测色计的示温漆温度判读方法[C]//航空试验测试技术学术交流会议论文集.北京:测控技术编辑部,2015,456-458.
ZHANG Yupeng, LIU Zhongkui, ZHANG Yuxin. Method of thermal paint temperature interpretation based on spectrophotometer[C]//Collected Work of the Academic Symposium on Aeronautical Test Technology. Beijing: Measurement and Control Technology Editorial Department, 2015, 456-458. (in Chinese)
- [5] 张志龙,曹承侗.示温漆颜色温度特性分析与温度识别系统[J].计算机自动测量与控制,2001(3):20-21.
ZHANG Zhilong, CAO Chengti. Thermopaint color temperature property analysis and temperature recognition system[J]. Computer Automated Measurement Control, 2001(3):20-21. (in Chinese)
- [6] Griffin A, Dittler J, Windeatt T, et al. Techniques for the interpretation of thermal paint coated samples[C]//International Conference on Pattern Recognition. Vienna: IEEE, 1996(3):959-963.
- [7] Griffin A, Windeatt T, Stoddart A J, et al. A Markov random fields approach for interpreting thermochromic paint [C]//Proceedings of International Conference on Pattern Recognition. Brisbane: IEEE, 1998: 1741-1743.
- [8] 马春武,姜斌,陈复扬.示温漆温度自动判读与数字图像处理系统[J].航空发动机,2007,33(2):12-14.
MA Chunwu, JIANG Bin, CHEN Fuyang. Automatic temperature interpretation and digital image processing systems of temperature sensitive paints[J]. Aeroengine, 2007, 33(2):12-14. (in Chinese)
- [9] 于坤林.基于图像融合的航空发动机温度场检测技术研究[J].计算机与数字工程,2013,12:1906-1908.
YU Kunlin. Temperature aero-engine field detection technology based on image fusion[J]. Computer & Digital Engineering, 2013, 12: 1906-1908. (in Chinese)
- [10] 林茂松,陈念年.示温漆色彩量化及其图像分割算法研究[J].西南科技大学学报,2006,21(2):48-53.
LIN Maosong, CHEN Niannian. Research on color quantization and image segmentation of thermal paint[J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2006, 21(2):48-53. (in Chinese)
- [11] Lempereur C, Andral R, Prudhomme J Y. Surface temperature measurement on engine components by means of irreversible thermal coatings[J]. Measurement Science & Technology, 2008, 19(10):105501.
- [12] Guérin S, Lempereur C, Brevet P. 3D temperature mapping of turbo-shaft components using thermal paints and color recognition [C]//SPIE Proceedings: Image Processing: Machine Vision Application. Burlingame: United States Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2012:8300H-1-11.
- [13] 王展,杜平安,李杨,等.基于FCM聚类的示温漆图像分割算法[J].航空动力学报,2018,33(3):604-610.
WANG Zhan, DU Ping'an, LI Yang, et al. Segmentation algorithm for temperature indicating paint image based on FCM clustering[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(3):604-610. (in Chinese)
- [14] 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 Ping'an, LI Yang, et al. Temperature indicating paint image isotherm extraction algorithm[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(9):2095-2099. (in Chinese)
- [15] 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 Ping'an, 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)

(编辑:刘 静)