

引用格式:孙富成,宋文渊,滕红智,等.基于红外热图像的变速箱轴承状态监测与故障诊断[J].电光与控制,2017,24(7):113-117. SUN F C, SONG W Y, TENG H Z, et al. Infrared thermal image based condition monitoring and fault diagnosis of gearbox bearings [J]. Electronics Optics & Control, 2017, 24(7):113-117.

基于红外热图像的变速箱轴承状态监测与故障诊断

孙富成¹, 宋文渊¹, 滕红智², 张鑫¹

(1. 军械工程学院, 石家庄 050003; 2. 中国人民解放军 68129 部队, 兰州 730060)

摘要: 针对运行的变速箱轴承难以采集振动信号进行状态监测与故障诊断的缺点,采用红外热图像对变速箱轴承进行状态监测与故障诊断。利用红外热像仪采集变速箱两端轴承的红外热图像,然后通过二维经验模态分解方法将红外热图像分解成本征模式函数,对其处理后与主成分分析法相结合进行图像融合,得到对比度增强后的图像。最后对原图像与增强后的图像进行特征参数提取,并利用聚类分析对轴承不同状态进行分离。证明了红外热图像可以准确地诊断出轴承故障。

关键词: 红外热图像; 变速箱轴承; 二维经验模态分解; 特征提取; 状态监测; 故障诊断

中图分类号: TH165 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2017.07.024

Infrared Thermal Image Based Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Gearbox Bearings

SUN Fu-cheng¹, SONG Wen-yuan¹, TENG Hong-zhi², ZHANG Xin¹

(1. Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China; 2. No. 68129 Unit of PLA, Lanzhou 730060, China)

Abstract: Considering that it is difficult to collect vibration signal of the running gearbox bearings for condition monitoring and fault diagnosis, we used infrared thermal image to carry out the jobs. Firstly, infrared thermal images of the two end bearings of the gearbox were collected by infrared thermography, and the infrared thermal image was decomposed into intrinsic mode function through bi-dimensional empirical mode decomposition. Then, the image was processed for image fusion with the principal component analysis method, and the image with enhanced contrast was obtained. Finally, feature parameters of the original image and the enhanced image were extracted, and cluster analysis was used to isolate the bearings of different states. It is proved that the infrared thermal image can accurately diagnose the faults of bearings.

Key words: infrared thermal image; gearbox bearing; bi-dimensional empirical mode decomposition; feature extraction; condition monitoring; fault diagnosis

0 引言

随着我军装备逐渐发展,军用装备中的机械设备也越来越具有大型化与复杂化的特点,因此机械设备需要具有更高的可靠性以及较低的维修成本。近年来为了提高机械设备的可靠性和安全性,降低停机时间成本,避免资源浪费,许多不同且有效的基于状态监测的技术逐渐应用起来,例如振动信号分析、油液分析、声发射技术以及红外技术等。这些技术的应用能够及时地检测出机械设备是否存在故障,而振动信号在监

测旋转机械故障中扮演着重要的角色,并且被广泛应用。但利用振动信号对运行中的机械设备进行状态监测与故障诊断,存在振动信号采集困难,信号波动较大,分析效果不理想的问题,而红外技术对机械设备进行状态监测与故障诊断时具有不停机、无接触、操作简单等特点,因此对运行中的机械设备进行状态监测与故障诊断,采用红外热图像分析更加有效与便利。

本文将利用红外技术对某自行火炮变速箱左右两侧的轴承进行状态监测与故障诊断,积累实验数据,并为下一步维修计划打下良好的基础,通过观察所采集的红外图像,根据红外热图像描绘出轴承区域的温度变化趋势,并对红外热图像进行预处理,提取部分特征参数以及将轴承不同状态进行聚类分析。

收稿日期:2016-06-23

修回日期:2016-07-21

作者简介:孙富成(1991—),男,辽宁营口人,硕士生,研究方向为红外图像处理、机械故障诊断与状态监测。

1 红外热图像采集原理介绍

红外技术在国际标准化组织中(ISO)被定义为通过无接触式的红外仪器设备获得和分析热量信息的一种技术^[1]。文献[2]将红外热成像技术的起源和基本原理进行了详细的描述。随着对红外辐射规律的研究,红外成像技术主要在普朗克黑体辐射定律(Planck's Law)、维恩位移定律(Wein's Displacement Law)和斯特藩—波尔兹曼定律(Stefan-Boltzmann's Law)三大定律下逐渐成熟^[3]。根据红外辐射原理,最先在军事领域生产出比较简单的红外热像仪,随着科学与技术的发展,红外热像仪越来越复杂化与智能化,并逐渐应用于各个领域。各种红外热像仪的组成部分大致相同,如图 1 所示,都是由光学系统、红外探测器、视频放大器以及显示器组成。其红外图像的成像机理是通过将红外探测器接收到的场景的红外辐射映射成灰度值,转化为红外图像,场景中某一部分的辐射强度越大,反映在图像中的这一部分的灰度值越高,也就越亮。运行中的变速箱轴承若发生故障,会因为摩擦增大导致温度发生变化,而红外技术可以简单方便地对其进行检测,及时发现故障并消除故障隐患,防止产生重大事故或者经济损失。

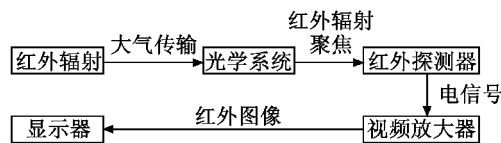


图 1 红外热像仪结构及原理

Fig. 1 Structure and principle of infrared thermography

2 红外热图像状态监测与故障诊断方法

红外热图像与传统的振动信号对机械设备进行状态监测与故障诊断研究方法流程大致相同。通过上述热像仪基本原理的介绍,可以看出红外热图像是通过直接接收物体的红外辐射并把它转换为电信号,即常说的被动式红外成像。红外热像仪所采集的图像为用 R, G, B 这 3 个分量表示 1 个像素的彩色图像,热图像中颜色的不同代表各个像素点上温度的不同,并且温度越高的区域颜色比其他区域更亮。因为图像中颜色仅仅用来区分图像像素点中温度的差别,所以为了计算准确以及量化分析需将图像数据转化为数值之间的灰度图像。

2.1 图像增强技术方法研究

红外热图像在采集过程中,易受其他因素的影响,故需进行图像的预处理。图像增强技术是图像预处理中一种常见的技术手段,其目的是加强图像中人们所感兴趣区域的一些信息,消除或者减弱图像不想要的信息,该方法主要是使原始图像变得更利于人眼观察和方

便计算分析。图像增强技术通常有两种方式^[4],即从图像空域和时域两方面进行增强。本文采用二维经验模态分解(BEMD)方法对图像进行增强处理。经验模态分解是由美籍华人 HUANG 等人在对瞬时频率的概念进行了深入研究之后,创造性地提出了本征模式函数(IMF)的概念,同时证明了任意信号都可以由若干个本征模式函数及一个剩余分量组成,即一维经验模态分解,二维经验模态分解是在其基础上发展起来^[5]。二维经验模态分解具有自适应性以及可以高效处理非稳定、非线性的数据信息,该方法克服传统技术方法的缺陷,提供了有效的图像处理方法,并广泛应用在图像分析的许多领域中,比如图像融合^[6]、图像压缩^[7-8]、纹理分析^[9]以及特征参数提取^[10]等,但二维经验模态分解是随着图像增强技术的发展被人们所了解,秦旭家等人利用二维经验模态分解方法分解医学图像并对其高频分量进行扩充处理来达到图像增强的目的^[11]。CELEBI 等人利用二维经验模态分解方法将水下彩色图像的颜色通道分解为本征模式函数(IMF),并根据每一个通道的本征模式函数的权重重新构建达到图像增强的目的^[12]。本文在图像预处理方面提出了利用二维经验模态分解方法与主成分分析图像融合技术相结合,该方法克服了单独采用二维经验模态分解对图像造成的边缘效应的问题,在对图像进行增强的同时,并没有使图像信息丢失。参考文献[13]中详细介绍了二维经验模态分解的具体公式。采用该方法增强图像的步骤如下:

1) 利用二维经验模态分解将原始图像分解为本征模式函数,在每一个分解过程中,高频分量为本征模式函数,表示图像的纹理信息,低频分量为剩余部分,表示图像的基本内容;

2) 当得到本征模式函数后,为了使其轮廓更加清晰和突出图像中重要部分,需乘以一个因素 K ,取值范围在 $1 < K < 3$,因为 K 取值太大,那么这个高频分量将增强太多而使图像失真,若取值小于 1,效果不是很明显;

3) 利用主成分分析图像融合技术将扩充后的本征模式函数与剩余分量进行图形融合,其具体主成分分析法公式参考文献[14];

4) 重复 1)~3),直到分解过程终止而结束;

5) 最后将融合后各个本征模式函数重构以达到图像增强的目的。

2.2 红外图像的特征参数提取

将增强后的图像作为提取特征参数过程中的输入,求出有用的图像信息。根据参考文献[15]可知,图像的特征包括直方图数值、光谱、纹理和颜色等方面。直方图数值作为统计学中的数值特征能够较好地表征图像

的信息和特点,包括均值、方差、峰度、能量、熵等,因此本文主要提取增强后的图像的直方图特征均值、峰度、能量,该 3 种特征参数可以基本全面概括图像的全部信息。具体求解公式如下。

一幅灰度图像 Y ,那么该图像的直方图概率定义为

$$P_g = N(g)/M \quad (1)$$

式中: M 为图像 Y 的像素总数; $N(g)$ 是图像中灰度级为 g 的像素个数。图像的其他数值特征均值、方差、偏度、峰度以及能量等都是在直方图的基础上求解的。

图像的均值表示整个图像的亮度信息,即图像整体的明暗程度,其算式为

$$\bar{g} = \sum_{g=0}^{L-1} gP(g) \quad (2)$$

式中, L 表示图像范围为 $0 \sim 255$ 灰度级数量。

图像的峰度主要描述的是图像构成的分布的峰值是否突兀或者平坦的描述,其算式为

$$K = \sum_{g=0}^{L-1} \frac{(g - \bar{g})^4}{\delta^4} \quad (3)$$

式中, δ 表示图像的方差。

图像的能量表示图像灰度级如何分布的信息,其最大值为 1,其算式为

$$E = \sum_{g=0}^{L-1} [P(g)]^2 \quad (4)$$

红外热像仪对变速箱轴承进行实时监测,储存各个时间段的红外热图像,然后对每幅图像的均值、峰度以及能量进行计算并记录。

2.3 K 均值聚类分析

变速箱两端轴承的红外热图像在特征参数提取后,利用 K 均值聚类分析^[16] 将其不同状态进行分组。K 均值算法比较简单,但对于分组数少的情况下应用较为广泛。该算法的关键问题在于聚类质量的目标函数的设定,本文使用误差平方和(Sum of the Squared Error, SSE)最小化作为评定标准,其具体形式定义为

$$S_{SSE} = \sum_{i=1}^K \sum_{x \in C_i} dist(c_i, x)^2 \quad (5)$$

式中: $dist$ 是欧几里德空间中两个对象之间的标准欧几里德距离; x 为研究对象; C_i 是第 i 个簇; c_i 是簇 C_i 的质心; K 是簇的个数。K 均值算法流程如图 2 所示。

通过 K 均值算法,可以对不同图像中的参数进行分类处理,判断出变速箱轴承的不同状态。

根据上述方法介绍,可以总结出本文研究方法的流程,如图 3 所示。流程分为图像采集、图像预处理、特征参数提取和聚类分析 4 部分。

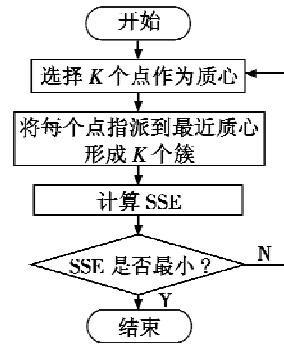


图 2 K 均值算法流程

Fig. 2 Flow chart of K-means algorithm

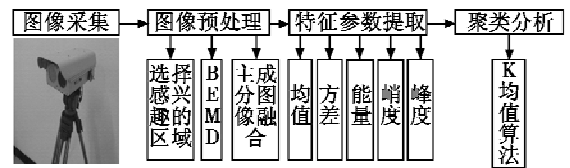


图 3 本文研究方法流程

Fig. 3 Flow chart of our method

3 红外热图像实验研究

3.1 实验设计与图像采集

为了验证利用红外技术对机械设备进行状态监测与故障诊断的有效性,利用红外热像仪对某计划中维修的自行火炮中型底盘变速箱左右两端轴承进行实验研究。变速箱左侧轴承 C_1 是正常状态,没有任何故障,而右侧轴承 C_2 中保持架发生磨损。当被测试的传动机构变速箱启动时,利用红外热像仪分别对轴承左右两端进行图像采集,红外热像仪直接与电脑相连接,通过开发的红外数据采集软件,可将图像数据直接保存到电脑中,如图 4 所示。

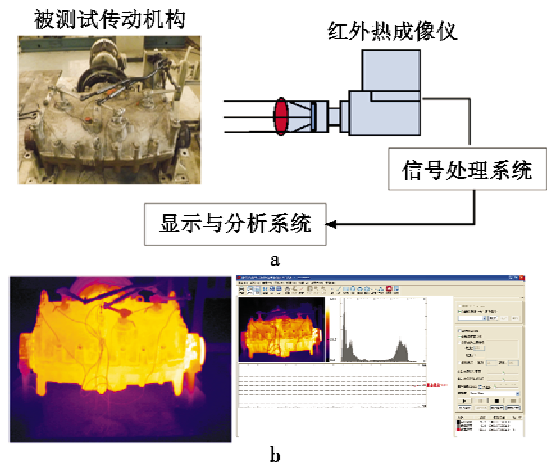


图 4 实验方案

Fig. 4 Experimental scheme

红外热像仪是一种可将物体的热信息瞬间可视化的设备,采集的红外热图像中的每一个点、每一个区域都记录着此时此刻变速箱各个部分的温度信息,本实验共进行 70 min,并且在进行红外测试的过程中,自变速箱启动 20 min 后,每隔 10 min 记录温度,并分别保存两侧轴承的红外热图像。图 5 为变速箱在实验时间为 30 min 时左右两端轴承区域的温度变化,从图中可以知道,右侧轴承 C_2 的温度明显高于左侧轴承 C_1 ;图 6 是实验从开始到结束变速箱两端轴承温度变化曲线图。由于本实验是在室内完成,并且变速箱左右两端轴承基本是在相同环境下进行实验测试的,因此,本文将红外热像仪在采集过程受到环境、被测对象的发射率等因素忽略不计,从图 6 中可以判定右侧轴承确实存在故障。

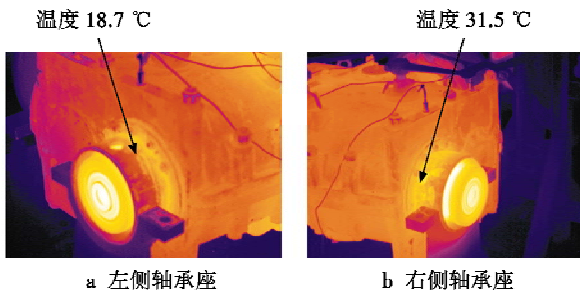


图 5 变速箱轴承在实验 30 min 时的温度
Fig. 5 The temperature of gearbox bearings at the time of 30 minute

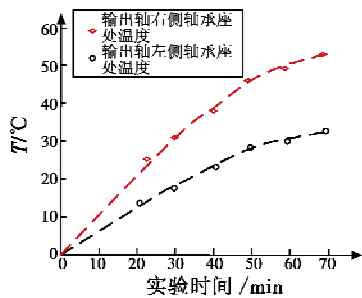


图 6 变速箱两端轴承温度变化对比
Fig. 6 Temperature variation of bearings at two ends of gearbox

3.2 图像预处理

对红外热像仪所采集到的左右两端轴承图像进行定量分析。将保存的两端轴承红外热图像进行对比分析,图 7 为右侧轴承 C_2 中的一幅热图像,对所保存的图像进行增强技术处理,因为本实验红外热像仪像素大小为 288×384 ,为了计算方便,选择图像中所感兴趣的轴承区域图像,通过图像分割技术最后得到像素大小为 147×142 的图像,对其进行图像增强技术处理,将分割后的图像进行二维经验模态分解与主成分分析图像融合方法结合,本文的分解级数为 3,最后得

到重构后的图像,如图 8 所示。图 8 为原图像经过 BE-MD 与主成分分析相结合的图像处理过程以及与图像增强后的对比,从图中可以观察到,经过图像处理,图像轮廓相比于原图像更加清晰,对比度也得到了增强,而轴承外圈处的亮度也更加明显。

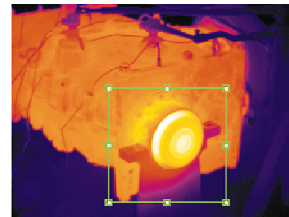


图 7 图像分割

Fig. 7 Image segmentation

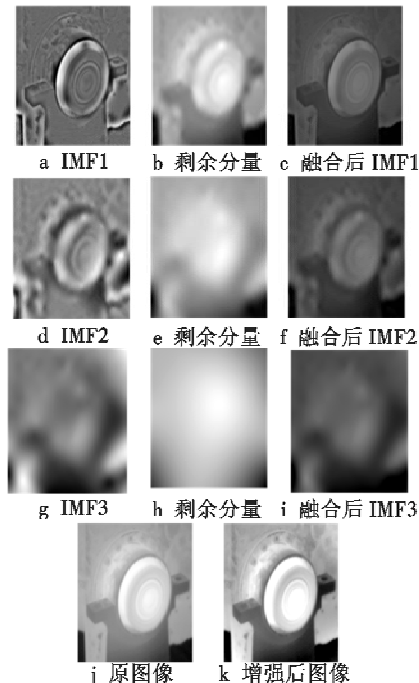


图 8 图像处理与对比

Fig. 8 Image processing and comparison

对实验中的变速箱两端轴承在 30 min 的红外热图像进行采集,每隔 10 min 保存一次红外热图像,直到实验结束为止,即时间为 70 min。分别获取变速箱左右两端轴承的 5 幅热图像,并利用 BEMD 对左右两端轴承进行图像增强处理,对比如图 9 所示。

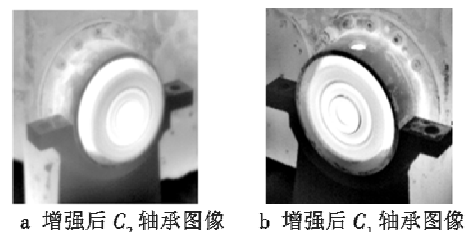


图 9 两端轴承增强后图像对比

Fig. 9 Enhanced images of two end bearings

3.3 特征参数提取与聚类分析

将原图中的轴承 C_1 和 C_2 以及增强后的灰度图像分别计算其均值、偏度和能量 3 个特征参数。采用 K 均值聚类分析的方法对原图中和增强后的图像进行分析研究,如图 10 所示。从图 10a 中可以看出,在未对图像进行增强前,轴承 C_1 和 C_2 的特征参数聚类效果并不是很好,并且两种轴承状态没有很好地分离出来。从图 10b 中可以看出,在对图像增强处理后,正常轴承与保持架磨损轴承的特征值很好地分离。

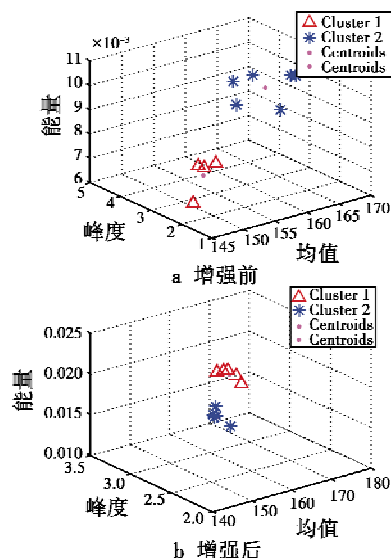


图 10 图像增强前后的聚类分析对比

Fig. 10 Comparison of cluster analysis before and after image enhancement

4 总结

本文利用红外技术对变速箱两端轴承进行状态监测与故障诊断分析,二维经验模态分解进行图像增强处理,以及 K 均值聚类分析进行图像特征值的分类研究。可以得出结论:1) 红外技术不仅可以有效地对机械设备进行定性的状态监测与故障诊断,也可以对其进行系统化的定量分析,具有一定的工程应用价值;2) 用增强后的图像对其故障模式分类比直接用原图进行分类的准确性高很多,可见图像预处理对利用红外技术对机械设备进行状态监测与故障诊断的重要性。

本文的不足之处在于,仅仅对轴承保持架磨损与正常情况的两种状态进行分析研究,并且分析的图像数量比较少,影响了诊断的准确性。下一步将模拟多种机械设备的故障模式,并且保留和获得更多的实验数据,以及采用其他的模式识别方法对故障进行区分。

参考文献

- [1] ISO/TC 108/SC 5 Condition Monitoring and Diagnostics of Machine Systems. ISO 18434-1:2008 condition monitoring and diagnostics of machines—thermography[S]. Geneva:ISO, 2008.
- [2] CAROSEN M. Infrared thermography recent advances and future trends[M]. Potomac: Bentham eBooks, 2012.
- [3] 由富田. 辐射测温原理及检定[M]. 北京: 中国计量出版社, 1990.
- [4] GONZALEZ R C, WOODS R E. Digital image processing [M]. 3rd ed. Boston: Addison-Wesley, 1993.
- [5] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society A Mathematical Physical & Engineering Sciences, 1998, 454(1971): 903-995.
- [6] HARIHARAN H, GRIBOK A, ABIDI M, et al. Image fusion and enhancement via empirical mode decomposition [J]. Pattern Recognition Res, 2006(1): 16-32.
- [7] LINDERHED A. 2D empirical mode decomposition in the spirit of image compression [J]. Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering, 2002, 4738(7): 1-8.
- [8] LINDERHED A. Compression by image empirical mode decomposition [C]//IEEE International Conference on Image Processing, 2005: 553-559.
- [9] NUNES J C, GUYOT S, DELECELLE E, et al. Image analysis by bi-dimensional empirical mode decomposition [J]. Image & Vision Computing, 2003, 21(12): 1019-1026.
- [10] WAN J, REN L, ZHAO C. Image feature extraction based on the two-dimensional empirical mode decomposition [C]//Congress on Image and Signal Processing, 2008: 627-631.
- [11] QIN X, LIU S, WU Z, et al. Medical image enhancement method based on 2D empirical mode decomposition [C]//The International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, 2008: 2533-2536.
- [12] CELEBI A T, ERTURK S. Empirical mode decomposition based visual enhancement of underwater images [C]//The 2nd International Conference on Image Processing Theory Tools and Applications (IPTA), 2010: 221-224.
- [13] VAN T T, YANG B S, GU F S. Thermal image enhancement using bi-dimensional empirical mode decomposition in combination with relevance vector machine for rotating machinery fault diagnosis [J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2013, 38(2): 601-614.
- [14] NAIDU V, RAOL J R. Pixel-level image fusion using wavelets and principal component analysis [J]. Defence Science Journal, 2008, 58(3): 338-352.
- [15] UMBAUGH S E. Digital image analysis and process [M]. Boca Raton: CRC Press, 2005.
- [16] 范明, 范宏建. 数据挖掘导论 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011.