文章编号:1002-2082(2012)05-0827-05

红外热波技术在装甲装备故障诊断和缺陷检测中的应用

冯辅周,张超省,张丽霞,闵庆旭

(装甲兵工程学院 机械工程系,北京 100072)

摘　要:针对装甲装备典型故障诊断操作复杂及缺陷检测效率低下等问题,将国外装备维修中广泛应用的红外热波技术引入到装甲装备维修过程中。简要介绍了红外热波技术的基本原理及特点,系统分析了信噪比和热激励 2 个因素对检测效果的影响,并成功实现了装备发动机动力不足的故障诊断和装甲板裂纹的缺陷检测。试验结果表明:该技术能够在不解体的情况下实现发动机动力不足故障的准确定位,同时能够在 3.5 s 之内实现装甲车底板裂纹等缺陷的快速检测。

关键词:红外热波;装甲装备;故障诊断; 缺陷检测

中图分类号:TN219; P206　　**文献标志码**:A　　**doi**:10.5768/JAO201233.0501001

Application of infrared thermal wave technology in fault diagnosis and defect detection for armored equipments

FENG Fu-zhou, ZHANG Chao-sheng, ZHANG Li-xia, MIN Qing-xu

(Department of Mechanical Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China)

Abstract: In order to reduce the operating complexity of fault diagnosis and improve the defecting efficiency of defect detection in armored equipments, the infrared thermal wave technology is introduced to armored equipments of PLA, which has been used widely in equipment maintenance in other countries. Firstly, this paper briefly depicted the basic principles and characteristics of infrared thermal wave. Then, two main factors including signal to noise ratio (SNR) and thermal excitation influencing the detection results were analyzed in detail. Finally, the experiments for fault diagnosis and defect detection were carried out. Experimental results show the engine power insufficiency can be positioned accurately without disassemble and the armored plate crack can be detected fast within 3.5s by means of this method.

Key words: infrared thermal wave; armored equipment; fault diagnosis; defect detection

引言

装甲装备是陆军大型战斗装备的主体,其故障的及时诊断和缺陷的快速检测是保证装甲装备战斗力的前提。目前,装甲装备的故障诊断主要通过在关键部件的适当位置附加传感器获取特定条件下的状态数据并进行相关数据处理的方式来完成,对操作人员的技术水平要求较高,诊断耗时费力;装甲装备零部件的缺陷检测则主要依靠超声波、电涡流、磁粉、X 射线、渗透等常规无损检测手段,但这些传统检测手段普遍存在输出不直观、检测效率低下、便携性差等缺点,难以满足装甲装备训练和野战环境快速检测的需要。针对装甲装备故障诊断和缺陷检测中存在的上述难题,本文尝试将国外装备维修中广泛应用的红外热波技术[1]引入到装甲装备的维修环节,取得了良好的应用效果。

收稿日期:2012-04-17;　**修回日期**:2012-05-01

基金项目:军队计划科研项目

作者简介:冯辅周(1971—),男,湖北黄冈人,博士,教授,主要从事设备状态监测与故障诊断工作。
E-mail: fengfuzhou@tsinghua.org.cn

1 基本原理及特点

通过主动可控激励源激励被测对象,同步获取被测对象表面加热或散热过程的热图像,根据热量随空间和时间变化特征确定被测对象故障和缺陷类型,这就是红外热波技术的基本原理[2]。基于该技术的红外热波检测系统包括信号发生器、激励源、采集控制终端、热像仪等部分,如图1所示。常用的激励源可以是大功率闪光灯、超声、电磁、热风等外加激励设备,也可以是被测对象自身工作生热激励。通常根据所需检测的故障和缺陷类型,以及被测对象的形状、结构、材料等因素可以选择不同的激励源和激励方式。

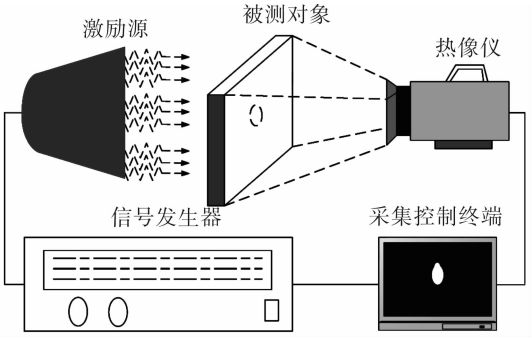

图1 红外热波检测系统的基本构成

Fig. 1 Basic components of infrared thermal wave system

作为一种新型的综合性技术,与传统故障诊断和缺陷检测手段相比,红外热波技术有如下特点:

1) 非接触且安全性高。在被测对象表面检测,有效防止由于拆卸不当带来的损坏;

2) 操作简单且输出直观。激励施加快捷方便,输出结果直观形象;

3) 速度快且范围广。安装、测量耗时少,可检测与热形成相关的绝大多数故障和缺陷类型。

2 影响因素分析

影响红外热波技术检测效果的因素有很多,概括来讲主要包含信噪比、热激励、热像仪性能等,对它们的深入研究是制定和优化红外热波检测方案的前提和基础。本文着重对信噪比和热激励两种影响因素展开论述,结合装甲装备故障诊断和缺陷检测的需要,提出相应的改进措施。

2.1 信噪比

热像仪检测到的信号通常包含目标信号和噪声信号两部分,目标信号和噪声信号的比值(即信噪比)是影响红外热波检测效果的重要因素。目标信号是指被测对象表面热辐射产生的信号,其强弱对检测效果有直接影响;噪声信号主要包含可见光、背景红外辐射、气体流动等。表面热辐射率对目标信号影响明显,表面热辐射率低的被测对象即便内部温度变化明显,反映在其表面上的温度变化也非常微弱[3]。另外,当被测对象表面光滑时,表面反射红外信号就会淹没目标信号,增加故障诊断和缺陷检测的不确定性。

针对不同的被测对象及影响场合,采取不同的提高信噪比的措施,常见的信噪比提高措施有:

1) 在热像仪前端加上能够滤除所需波段以外波段成分的带通滤波器,滤除可见光和其他波段的噪声信号;

2) 通过板材或布材架成一个红外暗室,减少可见光、背景红外辐射、红外反射和空气流动等对目标信号的影响;

3) 采用在被测区域涂抹哑光漆的方法,既能提高检测区域表面热辐射率,同时还能抑制可见光、红外反射等噪声信号对目标信号的影响。

值得注意的是:装甲装备的故障诊断通常是在野外环境下进行,因此适合采用在热像仪前段加滤波器和在感兴趣区域涂抹哑光漆的方法来提高信噪比;缺陷检测则通常在保养间内针对车体或分解后的关键零部件进行,采用构建红外暗室的方法会取得更好的效果。

2.2 热激励

如前所述,红外热波技术可以采用多种激励源,不同激励源对不同的故障和缺陷类型具有各自优势,可以根据需要采用两种或多种激励源的组合,甚至可以根据具体故障和缺陷特点设计独特的激励源[4]。另外,在激励源相同的条件下,激励强度、激励位置等激励方式的选择对检测结果也有非常直观的影响[5]。不论采取何种激励源,都要满足以下两个基本条件:一是通过激励能够使被测对象由缺陷所导致的热传递过程的变化在表面产生的温差大于等于热像仪的热灵敏度;二是表面温差持续时间应大于热像仪的响应输出时间。

针对装甲装备故障诊断和缺陷检测的特点,本文选择采用两种热激励:自身工作生热激励和超声激励。以自身工作生热作为激励源的红外热波技术又被称为红外热像技术,通常用来获取被

测对象运行时的温度分布信息并以此实现故障诊断;以超声脉冲作为激励源的红外热波技术又被称为超声红外热波技术[6],通常用来对金属疲劳裂纹、复合材料冲击损伤等缺陷进行检测。

3　实验验证及结果分析

3.1　发动机动力不足

3.1.1　实验描述

由于装甲装备的使用环境条件恶劣、工况复杂及载荷变化大,加之部队维护保养水平的滞后,发动机在使用后期经常出现动力不足。供油管油路不畅或堵塞是发动机动力不足的最主要原因,常常导致发动机在高速运转或爬坡时动力急剧下降。实际上,发动机汽缸内的柴油燃烧会产生大量热量经汽缸壁传播到缸盖表面,因此缸盖表面的热量分布表征相应汽缸的工作状态。通过发动机的自身工作生热激励,利用热像仪获取发动机缸盖表面的温度分布,即可判断初步判断油路不畅或堵塞发生位置。

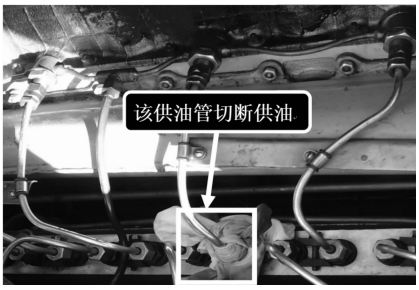

图 2　发动机供油管切断供油

Fig. 2　Fuel supply cut-off of an engine supply pipe

为了对上述分析进行验证,将某型坦克发动机的一个供油管油路切断,模拟供油管油路堵塞引起发动机动力不足的故障,如图 2 所示。根据野外检测的实际情况,笔者选择采用在发动机缸盖表面涂上哑光漆的方法来提高信噪比。

3.2.1　结果分析

发动机开始运行后经历 200 s 后停止运行,获取发动机从开始运行时刻至停止运行时刻一段时间内油路堵塞汽缸对应缸盖的温度分布。以激励初始时刻获取的热图像为背景图像,后续图像序列减去背景图像得到减背景热图像序列,可以剔除温度不变的信号。图 3 为发动机停止运行时刻减背景热图像,颜色越暗表示温度越低,可以看出发生油路堵塞的汽缸位置温度明显偏低。

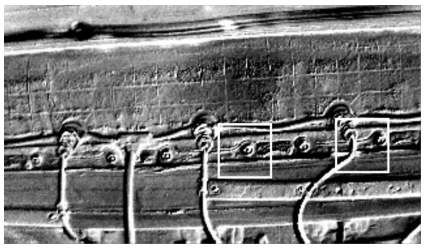

图 3　发动机停止运行时刻热图像(减背景)

Fig. 3　Thermal wave image when engine stops running (background subtraction)

分别选定供油不足汽缸和正常供油汽缸对应缸盖相同位置的特定区域,对比 2 个区域平均温度随时间的变化,如图 4 所示。可以看到,供油不足汽缸对应缸盖位置的温度一直低于正常供油汽缸对应缸盖位置的温度,由于噪声影响,温差并不成线性增长,但可以预见温差必然随供油不足程度的增加而加大,这将是今后研究工作的重点之一。

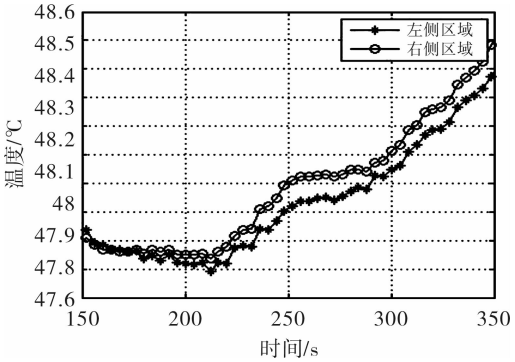

图 4　发动机缸盖温度曲线

Fig. 4　Temperature curves of cylinder heads

3.2　装甲板底板裂纹

3.2.1 实验描述

通过对某型两栖步战车车体的裂纹进行统计分析发现,车体易出现裂纹的区域如下:

1) 应力集中区域,如装甲车底板拐角区域(如图 5 所示);

2) 交变力作用区域,如各桥之间;

3) 车体承重区域,如发动机、传动箱下方对应位置。

装甲车底板裂纹是装甲车辆常见缺陷,尤其对两栖装甲车辆的安全性构成严重威胁。由于装甲车底板结构复杂、整体庞大,传统检测手段难以在野外或原位状态下实施。超声红外热波技术对疲劳裂纹、冲击损伤效果良好[7],且超声脉冲容易获取和控制,因此可以尝试采用该技术对装甲车

底板裂纹进行检测。针对装甲车底板裂纹检测的需要,本文研发了一套便携式、大功率超声激励系统,适合野外环境使用,最大功率可达1 200 W。另外,现场利用黑色纸板构建了一个简易红外暗室来提高信噪比。

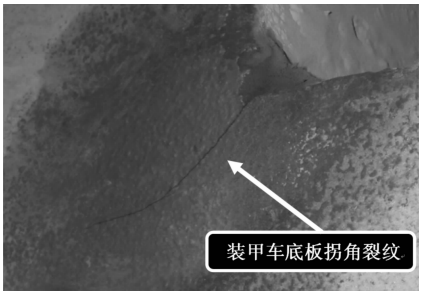

图 5 装甲板底板裂纹区域

Fig. 5 Crack region of armored floor board

3.2.2 结果分析

裂纹附近适当位置施加强度为600 W、时间为2 s、频率为20 kHz的超声脉冲,获取裂纹区域从激励开始到激励结束1 s后的表面温度分布。图6是在图5所示裂纹区域热图像减背景的基础上,采用基于控制标记符的图像分割算法提取的发热区域[8],其中1为凹凸区域,2、3、4为裂纹区域,5为边缘区域。不难发现:超声激励下裂纹区域摩擦生热、塑性变形等导致发亮,正常区域也因表面不平整、应力集中等导致发亮。因此,超声激励下车底板发热区域不仅包含裂纹区域,还包括凹凸区域和边缘区域(统称亮点区域)。

图 6 超声激励结束时刻热图像(减背景)

Fig. 6 Thermal wave image when ultrasonic excitation stops (background subtraction)

图7为图6所示分割区域温升随时间的变化曲线,所有分割区域温升在激励开始到结束的2 s内迅速上升,激励结束后开始缓慢下降。通过对比不难发现:裂纹区域和亮点区域的温升趋势相似且总体高于亮点区域,但是裂纹区域4的温升接近亮点区域1和5。因此,如果依靠肉眼识别裂纹区域,则极易出现误判。目前,上述问题已经通过如下途径得到解决:提取分割区域的形状和灰度分布特征,结合裂纹与亮点区域样本不均衡及类别重要性不同的特性,采用加权支持向量机分类算法实现裂纹自动识别,当裂纹区域权重 s_{+1} 对亮点区域权重 s_{-1} 之比 $s_{+1}/s_{-1}\geqslant 2.9$ 时,裂纹识别准确率达到95%,单次检测可在3.5 s内实现。

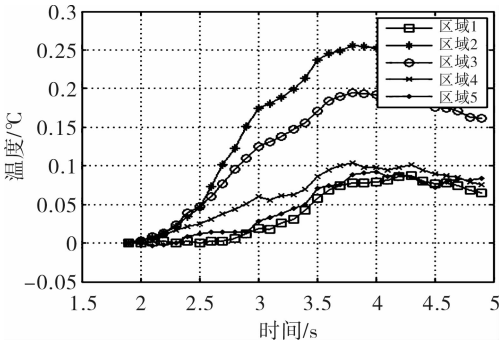

图 7 分割区域温升曲线

Fig. 7 Temperature rise cures of segmented regions

4 结论

红外热波技术作为一项非接触、直观性强、检测速率快的综合性技术,已经应用于大到航空航天、小到纤维薄膜等众多领域。本文简要介绍了红外热波技术的基本原理和特点,针对其在装甲装备故障诊断和缺陷检测中的应用,分析了2个主要影响因素及相应的改善措施;最后,结合发动机动力不足和装甲车底板裂纹设计了相应的验证实验,证明了该技术在装甲装备故障诊断和缺陷检测领域具有广阔的应用前景。

由于实验环境和条件所限,本文仅以发动机汽缸供油管油路堵塞和装甲车底板肉眼可见裂纹为例,开展了红外热波技术在装甲装备的故障诊断和缺陷检测中的应用研究,但在信噪比控制严格、热激励施加恰当、热像仪性能允许的情况下,本文实验方法和结论可以推广到其他故障类型和亚表面微裂纹缺陷的现场检测。

致谢:感谢首都师范大学红外热波联合实验室和FLIR公司在试验设备上提供的大力支持。

参考文献:

[1] 王迅,金万平,张存林,等.红外热波无损检测技术及其进展[J].无损检测,2004,26(10):497-501.

WANG Xun, JIN Wan-ping, ZHANG Cun-lin, et al. Actuality & evolvement of infrared thermal wave nondestructive imaging technology[J]. Nondestructive Testing,2004,26(10):497-501.(in Chinese with an English abstract)

[2] FAVRO L D, NEWAZ G M, THOMAS R L, et al. Progress in thermosonic crack detection for nondestructive evaluation [C]. USA, Virginia, 2002.

[3] MALDAGUE X P,CIELO P, POUSSART D, et al. Transient thermography NDE of turbine blades[J]. SPIE, 1990,1313:161-171.

[4] 谢兴盛,颜芳,陆佳佳.红外热波无损检测技术在涡轮叶片探伤中的应用[J].红外技术,2007,29(9):552-555.
XIE Xing-sheng, YAN Fang, LU Jia-jia, et al. The applications of thermal wave NDT in turbine blades testing [J]. Infrared Technology, 2007,29(9):552-555. (in Chinese with an English abstract)

[5] RENSHAW J,CHEN J C, HOLLAND S D, et al. The sources of heat generation in vibrothermography [J]. NDT&E International, 2011, 44:736-739.

[6] FAVRO L D, HAN X, OUYANG Z, et al. Infrared imaging of defects heated by a sonic pulse [J]. Review of Scientific Instruments, 2000, 71 (6): 2418-2421.

[7] 赵石彬,赵佳,张存林,等.红外热波无损检测中材料表面下缺陷类型识别的有限元模拟及分析[J].应用光学,2007,28(5):559-563.
ZHAO Shi-bin, ZHAO Jia, ZHANG Cun-lin, et al. Finite element simulation and analysis for type identification of defects under material surfaces in infrared thermal wave nondestructive detection[J]. Journal of Applied Optics, 2007,28(5):559-563. (in Chinese with an English abstract)

[8] 冯辅周,张超省,袁建,等.超声红外热像技术中裂纹的识别和重构,[J].无损检测.2011,26(5): 11-19.
FENG Fu-zhou, ZHANG Chao-sheng, YUAN Jian, et al. Identification and reconstruction of cracks in ultrasonic IR imaging[J]. Nondestructive Testing, 2011,26(5): 11-19. (in Chinese with an English abstract.