

# 基于红外热成像技术的发动机故障诊断

宓为建<sup>1</sup>, 沈晴<sup>2</sup>, 刘园<sup>1</sup>, 曹沛<sup>2</sup>, 宓超<sup>1</sup>

(1. 上海海事大学 物流工程学院, 上海 201306; 2. 上海振华重工集团(股份)有限公司, 上海 200125)

**摘要:**为改进现行发动机故障诊断方法的不足,寻找一种半自动或自动的发动机故障诊断方法,在传统发动机故障诊断方法的基础上,提出应用红外热成像技术进行故障诊断的方法.该方法对正常运转和故障运转条件下发动机特殊部位的温度场进行监测;通过对比热像图和绘制温度曲线图,结合图像处理技术,对发动机常见的漏水、漏油、发动异常和缺缸这4类常见故障进行诊断.实验结果验证了该方法的可行性.该方法与现行的振动、压力、能耗、尾气等相应方式相比,具有非接触、无干扰、无损、准确、无需大量仪器、便捷、直观、迅速等优点.故障所对应的温度特征指向性明确.若能结合相应的识别程序对故障进行自动识别,就能在提高诊断效率和精度的同时防止因操作人员操作不当等造成的事故,对实现自动、半自动故障诊断具有重要意义.

**关键词:** 红外热成像技术; 故障诊断; 发动机; 图像处理

**中图分类号:** U472.42; TP391.7

**文献标志码:** A

## Engine fault diagnosis based on infrared thermal imaging technology

MI Weijian<sup>1</sup>, SHEN Qing<sup>2</sup>, LIU Yuan<sup>1</sup>, CAO Pei<sup>2</sup>, MI Chao<sup>1</sup>

(1. Logistics Engineering College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;

2. Shanghai Zhenhua Heavy Industries Co., Ltd., Shanghai 200125, China)

**Abstract:** To improve the shortages of current engine fault diagnosis methods and seek a semi-automatic or automatic engine fault diagnosis method, on the basis of the traditional engine fault diagnosis methods, the method of using the infrared thermal imaging technology for fault diagnosis is put forward. In the method, temperature fields of special positions of engines under the conditions of normal operation and fault operation are monitored; through comparing thermal images and plotting temperature curves, combined with the image processing technology, 4 types of common faults of engines are diagnosed including water leakage, oil leakage, misfiring and cylinder misfiring. The experimental results verify the feasibility of this method. Compared with the existing methods related with vibration, pressure, energy consumption and exhaust gas, this method has advantages such as non-contact, no interference, non-destruction, accuracy, no need of a lot of instruments, convenience, intuitiveness and quickness. Temperature characteristics of faults have clear directivity. If corresponding recognition programs are used to accomplish au-

收稿日期: 2015-10-15 修回日期: 2016-01-25

基金项目: 上海市自然科学基金(15ZR1420200); 上海市青年科技英才扬帆计划(15YF1404900); 上海市科学技术委员会科技创新行动计划(14170501500); 上海市教育委员会科研创新项目(14ZZ140); 上海海事大学研究生创新基金(2014ycx040)

作者简介: 宓为建(1956—), 男, 浙江海宁人, 教授, 博导, 博士, 研究方向为大型物流设备诊断与安全运行控制、物流信息系统与物流企业ERP等, (E-mail) miweij@126.com

automatic identification for faults, the diagnostic efficiency and precision will be improved, and the accidents caused by improper operation from operators will be prevented, which is of great significance for realizing automatic or semi-automatic fault diagnosis.

**Key words:** infrared thermal imaging technology; fault diagnosis; engine; image processing

## 0 引言

热试检测工位对发动机故障的诊断,目前多依据对压力、振动、电控、应变、耗能、尾气等信号分析的结果进行<sup>[1-6]</sup>,获取这些信号均需安装大量传感器或测量设备,且存在一定干扰,使所测信号有失真现象.另外,多数发动机制造厂主要依据仪器所测的相关数据,由操作人员凭经验判断发动机是否出现故障.考虑到操作人员个体差异、标准难规范等因素,利用现行方法获得的诊断结果的稳定性和可靠性不佳,存在误判和漏判的可能.另外,检测工位常伴随有噪声和有毒有害气体,工作环境恶劣,且存在一定安全隐患,因此寻找一种半自动或自动的新方法具有重要意义.

发动机常见故障往往在温度方面有所反映,通过热传导,机体内部不同部位故障的温度特征在发动机表面会有不同的温度显示.由于传导过程中介质、结构等的复杂性,单凭某几个点的温度值难以准确地进行故障诊断,因此需要对整个温度场的数值及趋势进行分析.红外热成像设备是获取发动机表面实时温度场数据最高效、便捷的设备,其迅速、稳定、非接触、无干扰、无损等优点克服了发动机现行诊断方法的不足,且红外热像设备能与计算机等外部设备连接实现数据的转换、存储、显示、分析等功能,在发动机诊断数据获取方面具有较大应用价值<sup>[7-13]</sup>.

## 1 发动机故障诊断的红外热成像技术

### 1.1 红外热成像原理

根据斯忒藩-玻耳兹曼(Stefan-Boltzman)定律<sup>[10]</sup>,若物体温度高于绝对零度( $-273.16\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),则其要向外辐射能量,且物体红外辐射的总功率与物体本身绝对温度的四次方成正比,即物体温度越高其所辐射的能量也越多.红外热成像系统组成见图1.

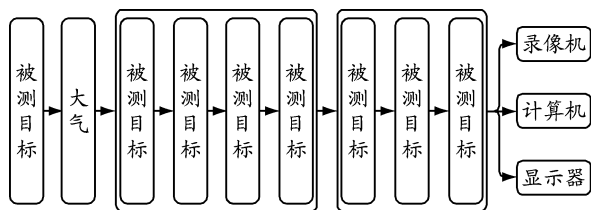


图1 红外热成像系统组成

红外热像仪通过接收被测物体表面发出的红外辐射(处于红外热像仪的工作波段的红外辐射)来测定物体表面温度场,得到反映物体表面温度分布情况的热像图.

不透明被测物体表面的辐亮度(单位: $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ )为

$$L_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} L_{b\lambda}(T_0) + \rho_{\lambda} L_{b\lambda}(T_u) \quad (1)$$

式中:等号右边第一部分为表面光谱辐亮度,第二部分为反射的环境光谱辐亮度; $T_0$ 为被测物体表面温度,K; $T_u$ 为环境温度,K; $\varepsilon_{\lambda}$ 为表面辐射率; $\rho_{\lambda}$ 为表面反射率, $\rho_{\lambda} = 1 - \alpha_{\lambda}$ ,其中 $\alpha_{\lambda}$ 为表面对环境辐射的吸收率.

作用于红外热像仪入瞳的辐射照度(单位: $\text{W}/\text{m}^2$ )为

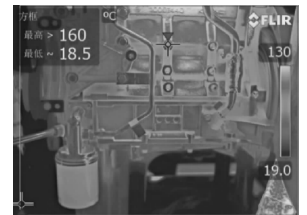
$$E_{\lambda} = A_0 d^{-2} (\tau_{a\lambda} \varepsilon_{\lambda} L_{b\lambda}(T_0) + \tau_{a\lambda} (1 - \alpha_{\lambda}) L_{b\lambda}(T_u) + \varepsilon_{a\lambda} L_{b\lambda}(T_a)) \quad (2)$$

式中: $A_0$ 为红外热像仪最小空间张角对应目标的可视面积, $\text{m}^2$ ; $d$ 为该目标到测量仪器的距离,m; $\tau_{a\lambda}$ 为大气的光谱透射率; $\varepsilon_{a\lambda}$ 为大气辐射率;通常,在一定条件下 $A_0 d^{-2}$ 为一个常值.

实际使用红外热像仪时,只需准确输入相关参数,即可自动得出温度分布图像.需注意,如果参数设置不准确,则会相应地影响拍摄所获得的温度场的准确性<sup>[10]</sup>.

### 1.2 应用红外热成像技术实现发动机故障诊断

红外热成像系统收集发动机上各点的红外辐射,通过光电转换将光电信号变成模拟信号,再对模拟信号进行处理,最终将目标的图像显示在显示屏上.图像反映发动机各点温度的差异,与景物十分相似.图2a和2b分别为发动机同一位置的红外热像图和数码照片.通过分析发动机红外热像图,可以根据不同温



a) 红外热像图



b) 数码照片

图2 红外热像图与数码照片对比

度特征进行发动机泄漏、发动异常、缺缸故障的诊断,具体操作步骤为:(1)进行调研,选定故障潜在区域;(2)确定拍摄设备安装位置,设定红外拍摄参数;(3)提取红外设备在线监测所获数据;(4)结合计算机数据处理技术,对比分析标准情况下与故障时的热像图,提取各故障的温度特征;(5)得出故障诊断结果。

## 2 实验数据获取

### 2.1 实验对象

本文以上海某发动机制造厂 A 型号发动机为实验对象,使用 FLIR T620 红外拍摄设备,对发动机泄漏、发动异常、缺缸等 3 类故障及其对应的标准情况进行红外热像图和视频拍摄,获得实验数据。

### 2.2 实验参数

基于红外热成像原理,参考文献[7],结合实验验证,确定拍摄发动机热像图所用的红外热像仪的主要参数,见表 1。

表 1 红外热像仪参数设置

参数	数值	参数	数值
辐射率	0.98	大气透射率	0.99
大气温度	20 ℃	反射温度	20 ℃
大气相对湿度	0.5	热范围	设备自动控制
图像帧频	30 Hz	拍摄距离	1 m

辐射率的设置需根据所拍摄对象的表面材料而定,这里设置为 0.98;大气温度、反射温度、大气相对湿度、大气透射率、拍摄距离这 5 个参数均需根据拍摄环境的实际情况设置;热范围根据发动机检测过程中不同故障特征的温度变化范围设置,达到凸显滤波和故障特征的效果;图像帧频选用默认值 30 Hz,理论和实验均证明其能够满足对常见的 3 种故障采样的要求。此外,实验也证明红外设备的测温精度  $\pm 0.1$  ℃ 能满足故障判断的精度要求。

### 2.3 实验组设置

数据的获取实验采用七定方针<sup>[14]</sup>与设备测量影响因素相结合的方法,即在定人员、定设备、定仪器、定部位、定参数、定量程和定周期的基础上,加上照明条件、环境温度、环境湿度和反射情况,从而保证数据的可靠性和实验结论的有据性。

实验针对发动机检测过程中的常见故障及其标准情况共拍摄了 9 组相关视频。详细的实验组设置和热像图数量见表 2。

表 2 实验组设置

组号	描述	热像图数量/帧
1	漏水位置故障热像图	240
2	漏水位置标准情况热像图	240
3	漏油位置故障热像图	12 640
4	漏油位置标准情况热像图	12 640
5	发动异常故障热像图	3 600
6	发动异常故障热像图拍摄位置的标准情况热像图	3 600
7	缺一缸故障热像图	12 640
8	缺两缸故障热像图	12 640
9	缺缸热像图拍摄位置的标准情况热像图	12 640

## 3 实验数据分析与讨论

### 3.1 泄漏故障

对漏水、漏油故障的分析基于实验数据中的第 1~4 组,热像图拍摄区域为泄漏可能发生的位置。通过在泄漏位置设置测温线(见图 3 中  $L_1$ ,在  $L_1$  上从上到下取 50 个点),发现在故障组对应的热像图上温度均存在有规律的突变现象(由泄漏液体的下落造成的)。图 4 仅显示了  $L_1$  上 40 个点的温度变化:稳定情况下测温线对应的温度曲线如图中曲线所示;泄漏发生时,在连续的 3 个采样时间点(时间间隔为  $(1/30)$  s)上能依次捕捉到 3 个最大温度值(如图中“○”所示)。这是因为泄漏液体温度(油:26~70 ℃;水:60~99 ℃)高于发动机相应位置表面温度,当泄漏液体滴落时,测温线表面温度最大值为泄漏液体表面温度,且泄漏液体在滴落过程中持续散热、降温。

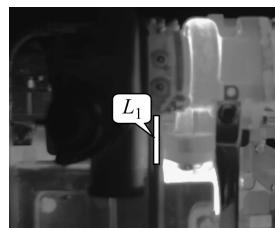


图 3 测温线位置

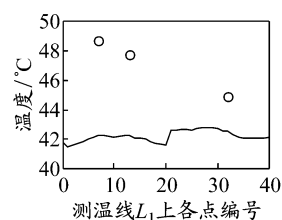


图 4 泄漏时温度最大值突变现象

对第 1,2 组实验,根据由多次实验获得的数据得出测温线上温度最大值与最小值的差约为 42.8 ℃,而相应标准情况下(即无泄漏),测温线上温度最大值与最小值的差约为 11.6 ℃,即漏水时测温线上温度最大值与最小值的差的平均值是标准情况下

的3.69倍.这是由于泄漏的水温度高于测温线 $L_1$ 位置的发动机表面温度,漏水发生时测温线上温度最大值为泄漏的水温度(60~90℃),即高于无漏水发生时测温线上温度最大值(约43℃),而测温线上温度最小值不变.

对第3,4组实验,通过MATLAB对图像进行处理,可找到漏油点处温度偏低区域(图5椭圆内),即通过图像分析相关技术可准确确定是否有漏油发生及漏油位置.

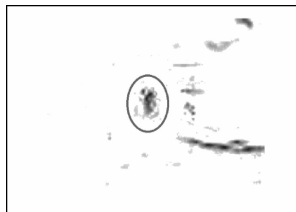


图5 漏油相关分析结果

通过对比泄漏点的温度值和泄漏位置,可进一步判断是漏水故障还是漏油故障.图5椭圆中所示即为发动机表面捕捉到的泄漏的油.

### 3.2 发动异常故障

对发动异常故障的分析是基于第5和6组实验数据的,热像图拍摄位置区域为发动机整机,通过分析得出标准情况下和发动异常时发动机从启动30 s到启动60 s的过程中温度平均值增量,见表3.

表3 标准情况下和发动异常时发动机指定区域温度比较  
℃

发动机状况	启动30 s时 平均温度值	启动60 s时 平均温度值	温度增量
标准情况	37.2	44.6	7.4
发动异常	33.3	33.5	0.2

从表3可知,发动异常时发动机启动后温度上升极缓慢(增量为0.2℃),相比标准情况下的7.2℃基本可以忽略不计,这是因为发动异常时发动机气缸内未燃烧产热.

### 3.3 缺缸故障

对缺缸故障的分析是基于第7~9组实验数据的,热像图拍摄位置区域为发动机整机.在缺缸时和标准情况下,发动机缸体外围四缸对应区域温度最大值随时间变化的曲线见图6,不同缺缸程度的整体热像图温度最大值随时间变化的曲线见图7.由图6可知,缺两缸时发动机选定区域温度上升到最大值所需时间为4 min(缺缸后温度不大可能达到相同的温度),而标准情况下所需时间为2 min.缺缸程度在温度上有一定的体现,缺缸越严重温度上升越慢,且不同缺缸程度对应的温度上升差值较大.

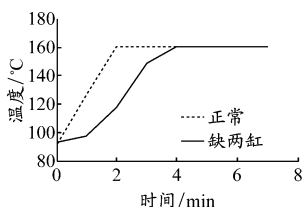


图6 标准情况下与缺缸时温度最大值随时间变化比较

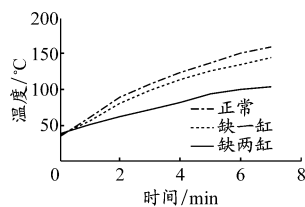


图7 不同缺缸程度的温度最大值随时间变化比较

## 4 结论

本文在分析传统发动机故障诊断方法的基础上,提出使用红外热成像技术进行发动机常见故障诊断的新思路.通过理论分析和实验验证了使用红外热成像技术进行发动机漏水、漏油、发动异常、缺缸等4类故障诊断的可行性,并获得故障温度特征,得出故障诊断的依据.

通过使用红外热像仪获得了不同故障及标准情况下发动机表面不同检测时刻的温度场数据.通过分析各热像图上特定点、线、区域,整图温度的最大值、最小值、均值,以及温度最低和最高点位置、趋势等信息,结合MATLAB图像处理中图像配准、相关分析、滤波处理等技术,提取了漏水、漏油、发动异常、缺缸等4类常见发动机故障的温度特征,即总结出发动机内部故障与表面温度之间的对应关系:(1)在泄漏位置设置的测温线上,若出现突变情况,则说明有泄漏发生,通过分析测温线上温度最大值与最小值的差以及比较泄漏位置即知泄漏类型;(2)分析发动机从启动30 s到启动60 s的过程中指定区域温度的增量即可判断发动机是否有发动异常;(3)分析发动机从发动到检测完成时温度的上升速度,即可得出发动机是否存在缺缸故障及相应的缺缸程度信息.通过将红外热像仪拍摄的结果与现有故障诊断方法得出的结果的比较,发现两者吻合,即证明了新方法的可行性.

与现行的振动、压力、能耗、尾气等相应方式相比,使用红外热成像技术进行发动机常见故障诊断的方法具有非接触、无干扰、无损、准确、无需大量仪器、便捷、直观、迅速以及对故障所对应的温度特征指向性明确等众多优点.若该方法能与相应的识别程序结合来实现对故障的自动识别,就能在提高诊断效率和精度的同时防止操作人员因操作不当等原因造成的事故,对实现自动、半自动故障诊断具有重要意义.然而,自动诊断需要建立在大量数据统计的

基础上,这也是使用红外热成像技术进行发动机故障诊断的难点所在。

## 参考文献:

- [1] 耿辉,张素明,安雪岩.一种基于聚类分析的液体火箭发动机稳态过程故障诊断方法[J].火箭推进,2014,40(5):86-91.
- [2] 肖云魁,乔龙,张玲玲,等.基于小波奇异性检测的发动机故障诊断方法研究[J].汽车工程,2014,36(11):1405-1409.
- [3] 何细鹏.汽车电控发动机的故障诊断方法研究[J].汽车维修,2014(3):14-15.
- [4] 王平,雷沫枝,王金舜.中小型航空发动机转静子碰摩故障诊断的一种方法[J].测控技术,2014,33(7):57-58.
- [5] 杜灿谊,丁康,杨志坚.基于有限元与多体动力学仿真发动机失火故障特征提取研究[J].振动与冲击,2012,31(9):18-23.
- [6] 谢小鹏,肖海兵,冯伟.基于能量耗损的发动机故障诊断方法研究[J].润滑与密封,2011,36(5):1-3.
- [7] 杨叔子,丁洪,史铁林.机械设备诊断学的再探讨[J].华中理工大学学报,1991,19(2):1-7.
- [8] 冉鑫,任蕾.基于可见光视频图像处理的水上弱小目标检测方法[J].上海海事大学学报,2010,31(2):11-17.
- [9] 郭月娥.海洋平台起重机液压系统故障诊断专家系统研究[D].大连:大连理工大学,2013.
- [10] 杨立,杨楨.红外热成像测温原理与技术[M].北京:科学出版社,2012:18-48.
- [11] HUDA A S N, TAIB S, GHAZALI K H, *et al.* A new thermographic NDT for condition monitoring of electrical components using ANN with confidence level analysis[J]. ISA Transactions, 2014, 53(3): 717-724.
- [12] ZOU Hui, HUANG Fuzhen. A novel intelligent fault diagnosis method for electrical equipment using infrared thermography[J]. Infrared Physics & Technology, 2015, 73: 29-35.
- [13] 于泽奇.红外热成像技术在轮机故障诊断中的应用[D].大连:大连海事大学,2013.
- [14] 邓建平,王国林,黄沛然.用于高温测量的红外热成像技术[J].流体力学实验与测量,2001,15(1):43-47.

(编辑 赵勉)

## 致 谢

2016年的选稿离不开以下专家(按姓名拼音字母顺序排列)的审稿,在此表示衷心感谢!

安博文	鲍君忠	鲍其莲	曹其新	曹志英	陈飙松	陈进	戴余良	党坤	丁国良
董达善	董槐林	杜兰	樊治平	范厚明	方磊	付玉慧	干宏程	辜勇	顾阿伦
关克平	郭晨	郭萍	郭晓合	郭子坚	韩皓	韩立新	何军良	侯淑波	胡甚平
胡松杰	胡以怀	胡志华	胡志武	黄立文	吉阿兵	计明军	贾晓惠	简文彬	蹇令香
江资斌	靳志宏	匡海波	兰培真	黎飞	李帮义	李娟	李品友	李铁山	李万莉
李序颖	刘翠莲	刘广钟	刘贵杰	刘建林	刘敬贤	刘坤	刘明俊	刘伟	刘伟华
刘寅东	刘志雄	卢春霞	陆悦铭	罗卫华	吕靖	吕林	吕强	马士华	宓为建
缪国平	倪计民	裴小兵	彭传圣	齐国清	钱平	钱伟文	秦天保	曲仕茹	冉鑫
单红军	邵俊岗	邵哲平	沈荣瀛	沈小平	沈智鹏	施朝健	施伟锋	史国友	宋永欣
孙琦	索继东	田刚	田征	汪传旭	王飞	王海燕	王杰	王诺	王如云
王锡淮	王晓远	王志明	翁凤翔	吴冰	吴俊云	吴兆麟	谢少军	谢卫	谢新连
徐锋	徐国祥	徐连胜	杨超	杨杰	杨静蕾	杨明	杨宁	杨神化	杨智应
杨忠振	姚佼	易余胤	殷明	尹传忠	尹勇	应士君	尤庆华	于德新	余建星
余永华	袁章新	曾庆成	张国伟	张华歆	张婕姝	张明	张培林	张庆年	张维竞
张旭梅	张英俊	张煜	张智勇	章学来	赵朝会	赵宁	赵亚鹏	郑黎黎	郑士源
郑中义	钟铭	周建勤	周鹏飞	周强	朱建华	朱齐丹	庄晋财		