

基于红外测温的柴油机排气温度不均匀度诊断

杨昆，杨立，苏高，范春利

(海军工程大学 动力工程学院，湖北 武汉 430033)

摘要：设计了柴油机排气红外监测试验台，利用红外热像仪在不同运行工况下测量 6135 柴油机歧管表面温度，得到了由排气管表面温度确定柴油机排烟气体温度的计算方法。分析了各缸排气歧管表面温度不均匀度与排烟温度不均匀度的关系，研究了表面发射率随温度变化的关系，验证了红外监测技术在柴油机排气不均匀度诊断和预测上的可行性和有效性。

关键词：红外测温；不均匀度；柴油机排气温度

中图分类号：TK14 文献标识码：A 文章编号：1001-8891(2014)03-0244-05

Diagnosis of Exhaust Temperature Non-uniformity of Diesel Engine Based on Infrared Temperature Measurement

YANG Kun, YANG Li, SU Gao, FAN Chun-li

(College of Naval Architecture and Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: This paper designs a test-bed which is applied to detect exhaust temperature of a diesel engine by infrared measurement. The exhaust pipe surface temperature of 6135 diesel engine in different operating conditions was measured by infrared thermal imager. The calculating method of the discharge temperature of a diesel engine from the surface temperature of exhaust pipe was obtained. The relationship between discharge temperature non-uniformity and the surface temperature non-uniformity of exhaust pipe was analysed. In addition, the feasibility and effectiveness of infrared inspecting technology which is applied to diagnosis and prediction of the diesel engine exhaust temperature non-uniformity was verified.

Key words: infrared temperature measurement, non-uniformity, diesel engine exhaust temperature

0 引言

柴油机在许多领域都有着广泛的应用，作为一种动力装置的主体部分，对整个系统起着至关重要的作用，在日常运行中要经常对其进行故障的诊断和排除。柴油机运行模式比较复杂，只分析 1 种或几种症状，是很难确定其性能的。为此，研究开发新技术、新仪器和新方法以进行快速而可靠的故障诊断是很必要的。由于许多诊断技术的侵入特性、维护运用耐久性差及缺乏实际经验等，使得运用起来有一定的困难。红外热成像技术作为一种新兴的无损检测技术，在环境温度检测、产品质量控制和监测、设备在线故障诊断和安全保护以及节约能源等方面正发挥着越来越重要的作用。近 20 年来，此项技术得到迅速发展，性能不断完善，功能不断增强，适用范围也不断扩大，电力、石化、冶金等工业部门都首先把红

外诊断技术用作安全生产的重要措施，从而使之发展较快。而在诊断柴油机故障方面，该项技术应用并不广泛，还没有系统的深入的研究^[1-6]。

柴油机的废气温度与缸内燃烧过程存在一定的关系，废气温度的变化反映出柴油机工作状况（调节或喷油系统失灵等）变化，因此柴油机的废气温度成为故障诊断的重要参数之一。柴油机排烟管壁的温度与管内废气温度有关，所以排烟管温度的高低可作为柴油机故障的征兆。利用红外热成像技术对柴油机排烟管壁温度进行检测可为柴油机的故障诊断提供理论依据。本文利用 FLUKE Ti30 红外热像仪，对 6135G-1 型柴油机的排烟歧管进行红外温度测量，研究排气管表面温度与内部烟气温度的关系，给出利用各缸排气歧管外表面温度判断各缸排气温度不均匀度的方法，为判断各缸的工作状态提供依据。

收稿日期：2013-06-08；修订日期：2013-09-12。

作者简介：杨昆（1984-），男，湖北随州人，硕士研究生，主要从事传热、传质、热流体学及其应用的研究。

基金项目：国家自然科学基金，编号：50906099。

1 实验设备与仪器

1.1 实验柴油机

本文实验用 6135G-1 型柴油机（图 1 所示）为四冲程、直接喷射、非增压水冷式高速柴油机，其排烟管由铸铁制成，6 个气缸共用一根主排烟管。主要参数如表 1^[7]所示。



图 1 6135G-1 型柴油机

Fig.1 6135G-1 diesel engine

表 1 6135G-1 型柴油机主要参数表

Table 1 The main parameters of 6135G-1 diesel engine

气缸数	6	排气总管温度	$\leq 550^{\circ}\text{C}$
压缩比	17	进水最低温	$\geq 55^{\circ}\text{C}$
活塞总排量	12 L	出水最高温	$\leq 95^{\circ}\text{C}$
气缸直径	135 mm	喷油提前角	$23^{\circ} \sim 25^{\circ}$
冷却方式	水冷	活塞行程	140 mm

1.2 FLUKE Ti30 红外热像仪

FLUKE Ti30 热像仪（图 2 所示）是非制冷微测辐射热计焦平面红外热像仪，采用当代技术最先进的轻型手握式红外热像仪，可及时、准确地对目标进行热成像并获得其温度值。可在液晶显示器上选择灰色、铁虹或彩虹 3 种调色板进行图像显示，可选择自动、半自动或手动 3 种测量模式。热像仪配备应用程序 InsideIR，可以显示、检查、分析图像和数据，发现与目标相关的定量及定性趋势。FLUKE Ti30 热像仪主要性能参数如下：温度测量范围为 $0 \sim 250^{\circ}\text{C}$ ；温度测量精度为 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ；温度指示分辨率为 0.1°C ；光学频谱范围为 $7 \sim 14 \mu\text{m}$ 。

2 测量方法

2.1 排烟歧管表面温度测量步骤

柴油机的排烟管在设计时，通常是几个缸连在一起的，出口总管对称或不对称布置，因此在测量排烟温度时会受到干涉，无法在歧管处准确测量各缸排烟温度。为此，在测量时采用以下方法：①在用红外



图 2 FLUKE Ti30 红外热像仪

Fig.2 FLUKE Ti30 infrared thermal imager

测温仪测量时，用光斑对准与气缸盖直接连接的排烟歧管，按从第 1 缸到第 6 缸的顺序测量，读数并记录，并始终用这种顺序；用红外热像仪测量时，将热像仪垂直对准排气管道，可根据热像仪视场的大小，一次获取 6 缸排气歧管的热图或分几次依次获取各缸热图。②由于红外测温仪测量的是表面温度，为了消除气缸盖高温部位对排烟歧管表面温度带来的影响，测量时可用一硬纸板挡住。③各缸歧管上的测点尽量相同，尽可能反映单缸的温度。④由于热传导的影响，正常实测中，越是靠近总管的气缸的温度越高。⑤在升温阶段，排烟歧管温度逐渐上升，各缸彼此的热传导较弱，各缸之间的温差在这个阶段差异较大且不断变化。为了准确得到各缸排气的不均匀度，应在柴油机负荷稳定后测量。⑥每一阶段每一缸进行多次测量并取平均值，以减小误差。

2.2 测量温度的修正

在红外热像仪所测辐射温度的基础上，进行发射率的修正，得到排烟歧管外表面温度。由于排烟歧管外表面不是黑体，故热像仪的辐射温度不等于排烟歧管外表面温度，需要对现场采集的温度数据进行修正，这里主要进行发射率的修正。为了现场获得排烟管外表面发射率随温度的变化规律，本文采用双温度法^[8]，即被测试件与参考体保持相同的温度，在 2 个不同的温度 T_1 和 T_2 时，同时用热像仪测量它们的辐射能。实现这一方法有很多途径，最简单的一种是在试件上涂一小块已知发射率的涂料，本文采用胶带。在温度为 T_1 时，用热像仪测量排烟歧管外表面和胶带的辐射能，热像仪输出信号对应的辐射温度分别为 T_{s1} 和 T_{r1} ，在温度为 T_2 时，用热像仪测量排烟歧管外表面和胶带的辐射能，热像仪输出信号对应的辐射温度为 T_{s2} 和 T_{r2} ，如表 2 所示。

由此可得排烟管表面发射率^[8]：

$$\varepsilon_s = \varepsilon_R \frac{T_{s2}^n - T_{s1}^n}{T_{r2}^n - T_{r1}^n} \quad (1)$$

式中: ε_R 为胶带的发射率, $\varepsilon_R=0.95$; ε_s 为排烟歧管外表面的实际发射率; 对波长为 $7\sim14\text{ }\mu\text{m}$ 的热像仪指数 n 取 4。拟合可得到发射率随温度变化的关系:

$$\varepsilon_s = -0.0018T + 0.5386 \quad (2)$$

根据排烟歧管外表面的实际发射率就可以计算出表面修正温度 T_0 ^[8]:

$$T_0 = \left\{ \frac{1}{\varepsilon_s} \left[T_r^n - (1 - \varepsilon_s) T_u^n \right] \right\}^{1/n} \quad (3)$$

式中: T_u 为环境温度 27°C ; T_r 为热像仪测得辐射温度; 对波长为 $7\sim14\text{ }\mu\text{m}$ 的热像仪指数 n 取 4。

表 2 排气管不同表面状态下的辐射温度

Table 2 Radiation temperatures of exhaust manifolds under different surface conditions

次数 i	辐射温度/℃	
	贴胶带处 T_{ti}	排气管 T_{si}
1	51.4	49.4
2	54.7	51.8
3	58.6	54.2
4	61.9	55.7
5	65.2	57.3
6	73.5	64.0
7	81.1	70.3
8	89.2	76.6
9	96.8	80.6
10	102.0	84.9

2.3 烟气温度的计算

下面根据热量传递的 3 种形式^[9], 计算出排气管内烟气的温度。

管内烟气散失的传导热流量:

$$\Phi_\lambda = \lambda A \frac{(T_{w1} - T_{w2})}{\delta} \quad (4)$$

管内对流换热热流量:

$$\Phi_{C1} = h_{C1} A (T_{fl} - T_{w1}) \quad (5)$$

管外对流换热热流量:

$$\Phi_{C2} = h_{C2} A (T_{w2} - T_{r2}) \quad (6)$$

管外辐射换热热流量:

$$\Phi_r = \varepsilon_s \sigma_b A (T_{w2}^4 - T_{r2}^4) = h_r A (T_{w2} - T_{r2}) \quad (7)$$

式中: T_{w1} 、 T_{w2} 、 T_{fl} 、 T_{r2} 分别为排气管内、外壁温度、烟气温度和环境温度; h_{C1} 、 h_{C2} 分别为管内和管外对流换热系数; λ 为管壁导热系数; δ 为管壁厚度; A 为

传热面积; h_r 为管外壁传热系数; σ_b 为黑体辐射常数, $\sigma_b = 5.67 \times 10^{-5} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$ 。

因排气管烟气对外散失的热量等于排气管外壁与环境的对流和辐射换热能量之和, 即 $\Phi_{C1} = \Phi_\lambda = \Phi_{C2} = \Phi_r$, 通过排气管传热模型, 可得烟气温度计算公式:

$$T_{fl} = \frac{\Phi_{C2} + \Phi_r}{\lambda A} \delta + T_{w2} + \frac{\Phi_{C2} + \Phi_r}{h_{C1} A} \quad (8)$$

计算时取 $\delta = 0.0064 \text{ m}$, 排气管内强迫对流传热系数:

$$h_{C1} = 0.023 \left(\frac{\nu_f d}{\nu} \right)^{0.8} \left(\frac{\eta c_p}{\lambda} \right)^{0.4} \frac{\lambda}{d} c_t c_i c_R$$

式中: 运动粘度 $\nu = 2.154 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$; 动力粘度 $\eta = 2.04 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$; 烟气流速 $v_f = 10 \text{ m/s}$; 管壁导热系数 $\lambda = 3.13 \times 10^{-2} \text{ W/(kg}\cdot\text{K)}$; 定压比热容 $c_p = 1.068 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$; 管内直径 $d = 0.03 \text{ m}$; 短管修正系数 $c_l = 1.5$, 温度修正系数 $c_t = 1$, 弯管修正系数 $c_R = 1$ ^[9]。

3 试验分析

实验中, 柴油机逐渐加载, 由转速 800 r/min 负载工况逐渐加载到转速 1500 r/min , 65 kg 负载工况。其中第 6 组数据为达到 1500 r/min 、 65 kg 负载工况的温度测量值, 见表 3。

利用(2)和(3)式, 可计算出柴油机排气管外表面修正温度, 见表 4; 利用(8)式可计算出排气管内烟气的温度, 见表 5。

由于柴油机第 1 缸最接近排气总管, 为了验证计算所得数据的准确性, 在实验过程中, 利用热电偶在距第 1 缸 30 cm 远的排气总管处测得烟气温度为 396°C , 比表 5 中第 6 次的数据 359.7°C 高 36.3°C , 造成此差值的原因是烟气汇集到总管后温度要比各排气歧管的烟气温度高; 另外, 由于总管处烟气流速比歧管处烟气流速小, 温度有所上升。因此可以说通过反推法计算出的烟气温度其误差是比较小的。在诊断故障时, 采用相对温差法, 各缸之间进行比较, 此误差不会对诊断结果造成明显影响。

根据国家军用标准 GJB1069.1-1069.2-91《水面舰艇用高速柴油机》、GJB2473-95《水面舰艇用中速柴油机通用规范》、GJB1094.1-1094.2-91《潜艇柴油机》和 CB/T3254.2-1994《船用柴油机台架试验方法》, 柴油机在持续工况运转时, 柴油机各支管允许排气温度不均匀度要求见表 6, 超过规定值就存在燃烧故障。

表 3、表 4 和表 5 中, 对各缸外表面红外辐射温度、外表面修正温度和计算得到的各缸烟气温度与对

应的平均值的偏差进行了计算。

由表3、表4和表5可知,各缸排气管表面测得的红外辐射温度、排气管外修正后的温度和计算得到的管内烟气温度与相应的平均温度的偏差规律是相似的。排气管外修正后的温度和计算得到的管内烟气温度与对应的平均值的偏差几乎是相同的。因此,在利用柴油机各缸排气温度的相对温度限制判别柴油

机燃烧故障时,可利用外表面温度的不均匀度进行判别。而利用各缸外表面红外辐射温度进行判别时,偏差将比实际的要小一些。因此,在现场利用红外热像仪监测柴油机排气温度时,发现某一缸温度偏离平均值的百分比接近规定的8%限制时,就要对该缸进行密切关注。由表4和5可知,第1、3和6缸排气不均匀度超过了8%,应检查该缸是否存在故障。

表3 6135G-1型柴油机在升温过程中排气管外表面辐射温度

Table 3 Radiation temperature in the heating process of outer surface of exhaust manifolds on 6135G-1 diesel engine

次数	测量各缸排气管外表面温度/℃ (环境温度 $T_0=27^\circ\text{C}$)						
	1	2	3	4	5	6	平均值
1	109.5	83.7	65.7	60.0	71.9	100.8	81.9
2	148.8	131.9	119.6	108.0	105.8	129.6	124.0
3	164.0	151.5	140.0	128.0	124.5	146.2	142.4
4	186.0	162.4	159.4	150.2	147.9	161.1	161.2
5	201.2	204.0	205.5	180.7	167.1	175.5	189.0
6	228.4	207.2	229.7	202.1	195.6	187.1	208.4
偏差	9.6%	-0.6%	10.2%	-3.02%	-6.14%	-10.2%	

表4 6135G-1型柴油机在升温过程中排气管外表面实际温度

Table 4 Actual temperature in the heating process of outer surface of exhaust manifolds on 6135G-1 diesel engine

次数	各缸排气管外表面实际温度/℃ (环境温度 $T_0=27^\circ\text{C}$)						
	1	2	3	4	5	6	平均值
1	139.4	104.0	80.2	72.8	88.3	127.2	102.0
2	197.3	171.7	153.7	137.3	134.2	168.3	160.4
3	221.3	201.5	183.8	165.9	160.8	193.3	187.8
4	258.1	218.7	213.9	199.4	195.9	216.6	217.1
5	285.2	290.3	293.1	249.0	226.3	240.2	264.0
6	338.0	296.3	340.7	286.8	275.0	260.0	299.5
偏差	12.85%	-1.07%	13.8%	-4.24%	-8.18%	-13.2%	

表5 6135G-1型柴油机在升温过程中排气管内烟气温度

Table 5 Flue gas temperature in the heating process in exhaust manifolds on 6135G-1 diesel engine

次数	各缸排气管内烟气温度/℃ (环境温度 $T_0=27^\circ\text{C}$)						
	1	2	3	4	5	6	平均值
1	147.4	109.8	84.6	76.8	93.2	134.5	107.7
2	209.1	181.8	162.7	145.1	141.9	178.2	169.8
3	234.8	213.6	194.7	175.7	170.2	204.8	199.0
4	274.1	232.0	226.9	211.4	207.6	229.8	230.3
5	303.1	308.7	311.6	264.4	240.1	255.0	280.5
6	359.7	315.1	362.6	304.9	292.3	276.2	318.5
偏差	12.9%	-1.07%	13.85%	-4.27%	-8.23%	-13.28%	

表6 柴油机各支管允许排气温度不均匀度(额定负荷)

Table 6 Unevenness of flue gas temperature allowed in exhaust manifolds on diesel engine(rated load)

	各缸排气温度不均匀度	外表面温度不均匀度
水面舰艇高速柴油机(转速>1000 r/min)	排气平均温度±8%	排气平均温度±8%
中速柴油机(300 r/min<转速<1000 r/min)	排气平均温度±8%	排气平均温度±8%
潜艇柴油机	排气平均温度±8%	排气平均温度±8%

4 结论

1) 研究了红外监测诊断柴油机排气温度的方法。

首先对排气管的发射率进行修正,求出不同温度下的发射率,得出发射率随温度升高而减小的结论;然后利用传热原理,由红外热像仪实测的排气管外表面辐射温度推算出排气管内烟气的温度,得出了各缸外表面红外辐射温度、表面修正温度和计算得到的缸内烟气温度的关系。

2) 给出了利用各缸排气歧管外表面温度判断各缸排气温度不均匀度的方法。各缸排气管外测量的红外辐射温度、排气管外修正后的温度和计算得到的管内烟气温度与对应的平均温度的偏差规律是相似的。排气管外修正后的温度和计算得到的管内烟气温度与对应的平均值的偏差几乎是相同的。因此,在利用柴油机各缸排气温度的相对温度限制判别柴油机燃烧故障时,可利用外表面温度的不均匀度进行判别。而利用各缸外表面红外辐射温度进行判别时,偏差将比实际的要小一些。

参考文献:

- [1] 吕事桂,李东臻,杨立,等. 动力系统热负荷红外在线监测定量识别[J]. 红外技术,2012,34(7): 408-415.
- [2] 张宝霞,寸立岗,安永祥,等.机车柴油机排气支管红外测温方法的研究[J]. 兰州交通大学学报:自然科学版,2004,23(6): 119-121.
- [3] 王广武. 浅谈东风4系列机车柴油机排气管发红的故障处理[J]. 内燃机车,1999(6): 45-46.
- [4] 蒙绪武. 柴油机排气温度过高的原因分析和解决措施[J]. 船海工程,2003(6): 37-38.
- [5] 张希海. 6300 柴油机组排气及出水温度异常故障排除[J]. 柴油机,2008,30(4): 52-53.
- [6] 孙天. 红外测温技术在发动机故障诊断中的应用[J]. 工程机械,2006,37: 60-61.
- [7] 135系列柴油机使用保养说明书[R]. 上海:上海柴油机厂,1986.
- [8] 杨立,杨桢. 红外热成像测温原理与技术[M]. 北京:科学出版社,2012.
- [9] 霍尔曼. 传热学[M]. 北京:机械工业出版社,2011.