

基于多尺度影像融合的气缸盖内壁热疲劳损伤检测方法

李泉良, 王肖霞*, 杨风暴

中北大学信息与通信工程学院, 山西 太原 030051

摘要 针对气缸盖内壁热场数据重复率高、冗余大导致的小采样率下影像难以重构的问题, 利用多个单尺度重构影像的融合, 提出一种适用于小样本的气缸盖内壁热疲劳损伤检测方法。该方法首先通过对不同尺度下内壁热场散斑图案与其外壁总辐射能的关联运算, 来获得缸盖内壁的多个重构影像, 然后利用图像融合技术对不同尺度下的内壁重构影像进行融合, 获得缸盖内壁的融合影像。通过对不同采样率下内壁影像重构结果的对比分析, 说明了所提方法在小采样率影像重构中的优势。同时, 还讨论了不同融合权重系数对融合影像的影响。实验结果表明: 所提方法可在较低采样率下实现对内壁热疲劳损伤区域的检测; 当采样次数为 500 时, 较传统关联方法, 所提方法的峰值信噪比和对比度分别提升了 9.62% 和 26.13%; 此外, 所提方法在延缓重构影像质量下降方面也有独特优势, 有效打破实际工程中数据获取有限所导致的热疲劳损伤检测无法实现的困局。

关键词 热疲劳检测; 关联成像; 影像融合; 多尺度

中图分类号 TK428

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222923

Multiscale Image Fusion-Based Thermal Fatigue Damage Detection Method for Cylinder Head Inner Wall

Li Quanliang, Wang Xiaoxia*, Yang Fengbao

School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China

Abstract To solve the issue of complex image reconstruction at a small sampling rate due to the high repetition rate and redundancy of cylinder head inner wall thermal field data, a thermal fatigue damage detection method for cylinder head inner wall with a small sample is proposed via fusion of multiple single-scale reconstructed images. The proposed method begins by correlating the thermal scatter pattern of the inner wall with the total radiant energy of its outer wall at various scales to obtain multiple reconstructed images of the cylinder head inner wall. Then, the image fusion technology is used to fuse the reconstructed images of the inner wall at different scales to obtain the fused images of the cylinder head inner wall. The paper demonstrates the advantageous performance of the proposed method in small sampling rate image reconstruction by comparing the results of inner wall image reconstruction at various sampling rates. The effects of different fusion weight coefficients on the fused images are also discussed. The outcomes of the experiments demonstrate that the proposed method may detect the thermal fatigue damage zone of the inner wall at a lower sampling rate. The peak signal-to-noise ratio and contrast ratio of the proposed method are enhanced by 9.62% and 26.13%, respectively, compared with those of the traditional correlation method when the number of samplings is 500. The proposed method also has the distinct benefit of postponing the deterioration of the reconstructed picture quality, thereby resolving the problem of thermal fatigue damage detection caused by insufficient data gathering in real-world applications.

Key words thermal fatigue detection; correlation imaging; image fusion; multi-scale

1 引言

内燃机为热效率高的动力机械, 随着人们对高效、

高功率需求的大幅提升, 对内燃机的健康监测与管理越来越重要。气缸作为内燃机的动力中心, 工作时会使气缸盖长期受到热载荷和机械载荷的作用, 极易造

收稿日期: 2022-10-31; 修回日期: 2022-11-04; 录用日期: 2022-11-08; 网络首发日期: 2022-11-18

基金项目: 国家重点实验室开放课题基金(skler-202011)、山西省回国留学人员科研资助项目(2021)

通信作者: *wangxiaoxia@nuc.edu.cn

成缸盖内壁出现裂纹、凹陷等疲劳损伤^[1-3],严重影响着内燃机的使用寿命,甚至可能引发重大事故,造成巨大的财产损失和人员伤亡。因此,对内燃机气缸盖进行热疲劳损伤检测成为目前有效提升内燃机使用寿命和避免灾难性事故的必要措施。

随着影像技术和信息技术的迅猛发展^[4-5],研究者们开始采用关联重构内壁影像的方法进行气缸盖内壁热疲劳检测。摒弃传统探测方法的繁琐,利用关联成像的优势,可通过影像的方式直观地辨识出热疲劳损伤的位置。关联成像技术的优势逐渐被应用到很多民用领域,如:夜间行车探测,通过红外热像仪获取路面目标图像,识别行人、车辆等目标,从视觉上提高警示,为夜间行车安全提供保障;气缸盖热疲劳检测^[6],不仅可以在恶劣的高温高压环境下将内壁影像重构出来,同时可以准确识别热疲劳损伤的位置信息。

关联成像方法对气缸盖内壁进行检测时可以避免传统热疲劳检测的缺陷,如传统人工方法检测时的耗费成本、有限元计算模拟进行探测时的高误差率^[7]。然而传统的关联成像方法也有弊端,如在对气缸盖内壁的热疲劳损伤进行检测时,往往需要大量差异性较大的数据才能获得清晰度较高的重构影像。内燃机在某一固定工况下从开始运行至稳定状态下,其热场数

据具有重复率大、冗余大的特性^[8],严重影响了传统关联成像在气缸盖热疲劳检测上的有效性;同时将缸盖内壁热场转换为热场散斑图案时,受到插值方式的影响会产生小部分的白噪声,影响传统关联成像的稳定性^[9]。

针对上述问题,本文提出了一种基于多尺度影像融合的气缸盖内壁热疲劳检测方法。该方法首先用不同尺度的热场网格划分热场,获得不同大小的热场散斑图案;之后对其与对应气缸盖外壁的总热能值进行关联,重构出多尺度的气缸盖内壁影像;最后通过融合算法获得最终的内壁影像。以峰值信噪比、结构相似性和对比度为量化指标,通过仿真实验对融合的内壁影像与传统关联成像进行对比分析,验证了所提方法的有效性和稳定性。

2 多尺度影像融合的气缸盖内壁热疲劳检测方法

2.1 关联重构原理

传统关联重构原理如图 1 所示,在气缸盖获得燃烧室的热能时,通过热场探测器件获得热场数据进而构造出热场散斑图案。透过内壁的热场能量由外壁总热能探测器获得。

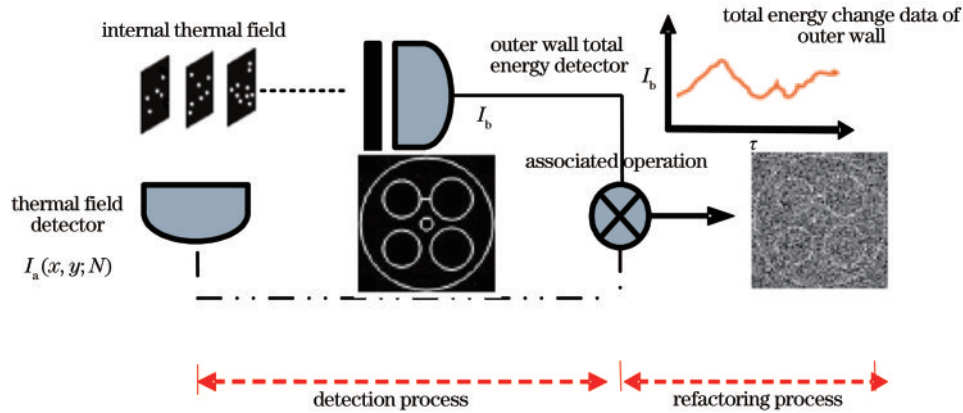


图 1 传统关联重构原理

Fig. 1 Traditional association reconstruction principle

从关联成像的原理^[10]上来说,在内燃机工作时的第 i 时刻,通过对内壁热场进行测量获得内壁热场数据,之后构造出热场散斑图案 $I_a(x, y; i)$,通过对热场散斑图 $I_a(x, y; i)$ 和外壁总热能探测器获得的总热能 $I_b(i)$ 进行关联重构就可获得内壁的影像 G ,即

$$G = \langle I_b(N) \cdot I_a(x, y; N) \rangle - \langle I_a(x, y; N) \rangle \cdot \langle I_b(N) \rangle, \quad (1)$$

式中: N 为总探测次数; $I_a(x, y; N)$ 为 N 个时刻下的内壁热场图案; $I_b(N)$ 为对应 N 个时刻下的透过内壁的总热能值; $\langle \cdot \rangle$ 为相关运算符,即 $\langle I_a(x, y; N) \rangle = \frac{1}{M} \sum_{N=1}^M I_a(x, y; N)$ 。

图 1 所示探测过程为通过热场探测器即热电偶对气缸盖内壁关键位置进行测量的过程。采用扇环插值的方式对测量获得的热场数据构造出热场散斑图案,即 $I_a(x, y)$;之后利用外壁总热能探测器即 NTC 热敏电阻对气缸盖外壁进行探测,获得外壁的总能量值,即 I_b ;最后通过式(1)重构出内壁影像,这一步就为重构过程。

2.2 关联成像结果分析

从内燃机的运行原理^[11-12]可知,当内燃机处于某一固定工况下,从开始机械运行直至内壁热场稳定状态,获取的内壁热场数据的差异程度受到相邻时间间隔的制约。传统的关联成像需要大量的内壁热场数据,此时就需要缩短采样数据之间的时间间隔,这就导

致获得的采样数据重复率大、差异性低,导致重构出来的内壁影像质量差,结果如图 2 所示。图 2(a)为原物体影像,图 2(b)为 $N=500$ 时重构出的影像,图 2(c)为 $N=1000$ 时重构出来的影像,图 2(d)为采样次数 $N=3000$ 时重构出的内壁影像。

由图 2 可知:在低采样次数情况下,传统关联成像不能将裂纹的信息重构出来;在采样次数为 1000 以上情况下,传统关联成像的确可以检测出内壁裂纹位置,但是随着采样次数的增加,内壁的重构影像质量并没有得到显著的提升。可见传统关联成像在低采样次数气缸盖内壁热疲劳检测上难以检测热疲劳损伤。

同时不同尺度下的重构影像也有不同的缺点,如图 3 所示。图 3(a)是像素尺寸为 $1 \text{ pixel} \times 1 \text{ pixel}$ 、 $N=500$ 时的重构影像,图 3(b)是像素尺寸为 $2 \text{ pixel} \times 2 \text{ pixel}$ 、 $N=500$ 时的重构影像,图 3(c)是像素尺寸为 $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ 、 $N=500$ 时的重构影像,图 3(d)是像素尺寸为 $1 \text{ pixel} \times 1 \text{ pixel}$ 、 $N=1000$ 时的重构影像,图 3(e)是像素尺寸为 $2 \text{ pixel} \times 2 \text{ pixel}$ 、 $N=1000$ 时的

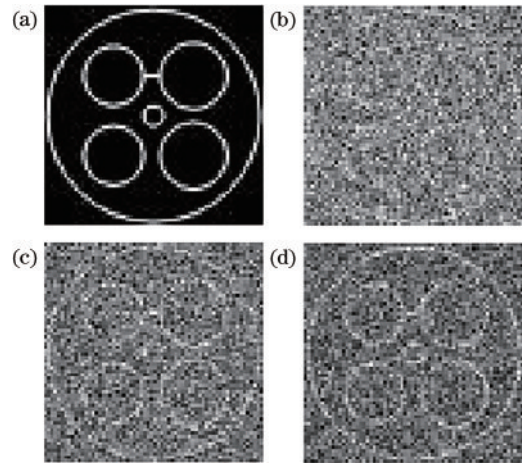


图 2 传统关联成像重构出的内壁影像。(a)原物体影像; (b)~(d) $N=500, 1000, 3000$ 时重构出的影像
Fig. 2 Inner wall images reconstructed by traditional association imaging. (a) Images of original object; (b)~(d) reconstructed images when $N=500, 1000, 3000$, respectively

重构影像,图 3(f)是像素尺寸为 $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ 、 $N=1000$ 时的重构影像。

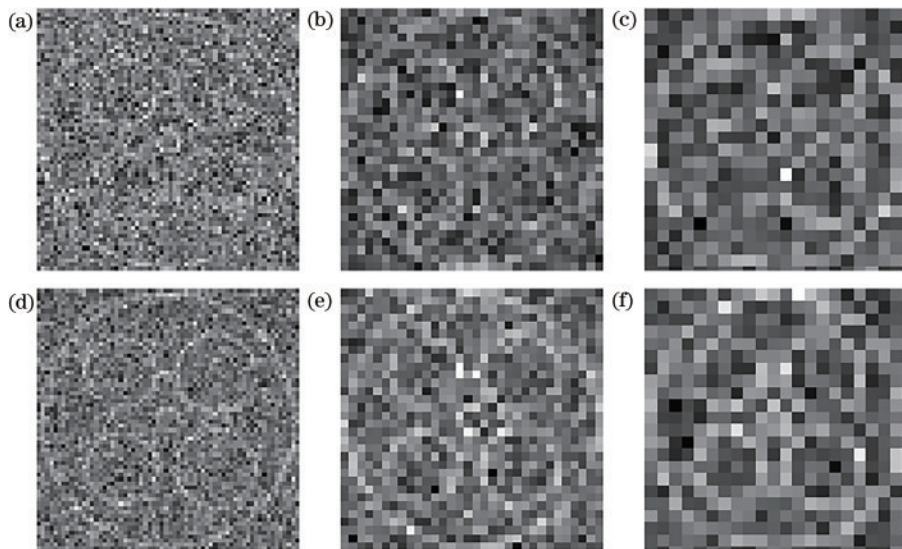


图 3 不同尺度下缸盖内壁的重构影像。(a)~(c) $N=500$ 时,像素尺寸为 $1 \text{ pixel} \times 1 \text{ pixel}$ 、 $2 \text{ pixel} \times 2 \text{ pixel}$ 、 $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ 时重构出的影像;(d)~(f) $N=1000$ 时,像素尺寸为 $1 \text{ pixel} \times 1 \text{ pixel}$ 、 $2 \text{ pixel} \times 2 \text{ pixel}$ 、 $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ 时重构出的影像

Fig. 3 Reconstructed images of cylinder head inner wall at different scales. (a)~(c) Reconstructed images with pixel size of $1 \text{ pixel} \times 1 \text{ pixel}$, $2 \text{ pixel} \times 2 \text{ pixel}$, and $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ when $N=500$, respectively; (d)~(f) reconstructed images with pixel size of $1 \text{ pixel} \times 1 \text{ pixel}$, $2 \text{ pixel} \times 2 \text{ pixel}$, and $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ when $N=1000$, respectively

从图 3 可以看出:在 $N=500$ 时,方法无法检测出裂纹信息;在 $N=1000$ 时,方法虽然可以识别出裂纹信息,仍需仔细检测才能精准判断。内壁重构影像的分辨率随着热场散斑图像素尺寸减小而逐渐增加,主要体现在重建目标的边缘信息上。当像素大小为 $1 \text{ pixel} \times 1 \text{ pixel}$ 时,重构影像具有较好的平滑度和边缘清晰度;当像素尺寸为 $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ 时则相反,即随着散斑图像素尺寸的增加,内壁重构影像出现了严重的块效应。这一现象使得虚像的边缘信息变得模

糊。然而裂纹随着热场散斑图案像素尺寸的增加而逐渐清晰,可以明显地观测出内壁热疲劳损伤位置。当像素大小为 $1 \text{ pixel} \times 1 \text{ pixel}$ 时,重构影像的对比度较小,难以检测出裂纹的位置;当像素大小为 $2 \text{ pixel} \times 2 \text{ pixel}$ 和 $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ 时,可以看出内壁重构影像的对比度明显增加,可以快速地检测出内壁裂纹的位置。通过融合的手段将不同尺度下的内壁重构影像的优点结合起来,在低采样次数下实现对气缸盖内壁影像高质量的重构。

3 基本原理

为了解决热场数据冗余性引起的重构影像质量差的问题^[13],提出一种基于多尺度影像融合的气缸盖内壁热疲劳检测方法,借鉴多尺度图像融合在图像领域方面的优点^[14-15],解决关联成像获得的热场散斑图案数据差异性小、重复度高,在构造热场散斑图案时混入

的白噪声等问题。

图 4 为多尺度影像融合方法的原理图。通过对热场进行多尺度划分,从而根据内壁热场探测器获得的热场数据构造出像素点尺寸不同的热场散斑图案;并且对其和外壁的总热能进行关联,重构出不同像素尺寸的内壁影像;最后通过融合算法对内壁影像进行融合,最终得到质量较好的融合内壁影像。

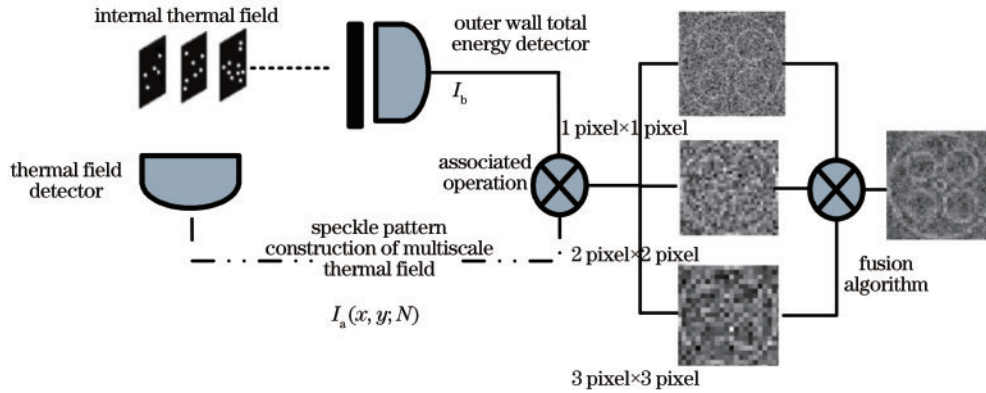


图 4 多尺度影像融合方法原理

Fig. 4 Principle of multi-scale image fusion method

为了实现对内壁热场的有效重构,将内壁热场划分为 64×64 的网格,之后以扇环插值的方式对内壁热场探测器获得的热场数据构造出热场散斑图案,此时热场散斑图案的大小就为 $64 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$ 。以此方式按像素点尺寸比例 1:2:3 对热场进行划分,获得

第 2 和第 3 组内壁热场散斑图案。多尺度热场划分不仅可以提高热场数据的利用率,而且还降低了插值方法引入的噪声影响。图 5(a)~(c) 分别为某一采样时刻下像素点大小为 $1 \text{ pixel} \times 1 \text{ pixel}$ 、 $2 \text{ pixel} \times 2 \text{ pixel}$ 、 $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ 时的内壁热场散斑图案。

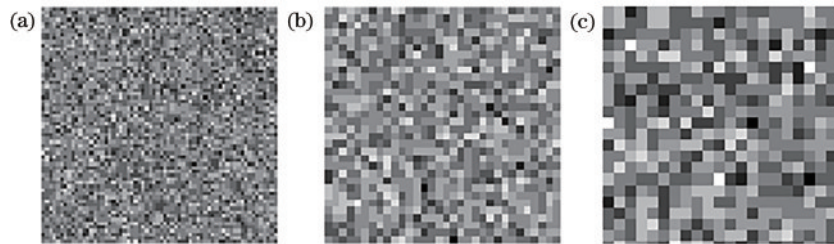


图 5 不同尺度下的内壁热场散斑图案。(a)~(c) 像素尺寸为 $1 \text{ pixel} \times 1 \text{ pixel}$ 、 $2 \text{ pixel} \times 2 \text{ pixel}$ 、 $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ 时的内壁热场散斑图案

Fig. 5 Speckle patterns of thermal field on inner wall at different scales. (a)~(c) Inner wall thermal field speckle patterns with pixel size of $1 \text{ pixel} \times 1 \text{ pixel}$, $2 \text{ pixel} \times 2 \text{ pixel}$, and $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ respectively

以上述所示的方式获取 N 个时刻下的不同尺度的内壁热场散斑图案,同时通过外壁总热能探测器获得其对应的外壁总热能,对不同尺度下的内壁热场散斑图案分别与对应外壁的总热能进行关联重构,即获得不同尺度下的气缸盖内壁重构影像,即

$$G^{k \times k} = \langle I_b^{k \times k}(N) \cdot I_a^{k \times k}(x, y; N) \rangle - \langle I_a^{k \times k}(x, y; N) \rangle \cdot \langle I_b^{k \times k}(N) \rangle, \quad (2)$$

式中: $k \times k$ 为对应的像素点尺寸。

由图 3 可知,不同像素尺寸下的内壁重构影像具有不同的优势。为了能够将这些优势结合起来,提升气缸盖热疲劳损伤检测的效果,采用直接操作像素点

的空间域方法^[16-18]实现图像的融合。通过设置不同的权重系数,来实现对多尺度重构影像的高质量融合,即

$$G' = lG^{1 \times 1} + mG^{2 \times 2} + nG^{3 \times 3}, \quad (3)$$

式中: G' 为融合后的内壁影像; $G^{1 \times 1}$ 、 $G^{2 \times 2}$ 、 $G^{3 \times 3}$ 为从不同像素点尺寸热场散斑图案重构出的内壁影像; l 、 m 、 n 为对应的权重系数,且 $l + m + n = 1$ 。

所提方法具体实施的步骤如下。

1) 通过划分热场的方式,按不同的像素点尺寸对气缸盖内壁热场区域进行划分;

2) 利用热场探测器件对缸盖内壁热场进行探测,获取内壁热场数据,对不同划分的热场区域进行探测

时,外壁的总热能探测器件也需同步探测,从而获得对应外壁的总热能;

3)通过扇环插值的方式构造出不同像素点尺寸的缸盖内壁热场图案;

4)通过关联运算,对对应像素尺寸的内壁热场图案和外壁的总热能进行关联,重构出不同像素尺寸的内壁影像;

5)通过设置不同的权重系数,对内壁影像进行融合运算,获得影像效果较好的融合图像。

4 实例验证与分析

4.1 定量指标的选取

为了能够客观地评估重构影像的质量,引入三个定量指标进行分析,分别为峰值信噪比、结构相似性和对比度。

峰值信噪比(PSNR)的公式为

$$R_{\text{PSNR}} = 10 \log_{10} \frac{M^2}{E_{\text{MS}}}, \quad (4)$$

式中:均方误差 $E_{\text{MS}} = \frac{1}{xy} \sum_{i=1}^x \sum_{j=1}^y [G'(i,j) - G(i,j)]^2$;

x 和 y 为内壁重构图像的尺寸,采用的图像分辨率为 256×256 ,所以这里 $x=256, y=256$; M^2 为内壁重构图像的最大灰度值。

结构相似性(SSIM)的公式为

$$S_{\text{SSIM}} = \frac{(2\mu_I \mu_{\hat{I}} + c_1)(2\sigma_{II} + c_2)}{(\mu_I^2 + \mu_{\hat{I}}^2 + c_1)(\sigma_I^2 + \sigma_{\hat{I}}^2 + c_2)}, \quad (5)$$

式中: I 表示原图像信息,即气缸盖实际的热能透过率; \hat{I} 表示重构影像,即内壁重构获得的影像; $c_1 = (K_1 L)^2$,

$c_2 = (K_2 L)^2$ 且 $K_1 = 0.01, K_2 = 0.03, L = 255$; μ_I 和 $\mu_{\hat{I}}$ 为 I 和 \hat{I} 的平均值; σ_I 和 $\sigma_{\hat{I}}$ 为 I 和 \hat{I} 的方差, σ_{II} 为 I 和 \hat{I} 的协方差。

对比度(V)的公式为

$$V = \sum_{\delta} \delta(i,j)^2 P_{\delta}(i,j), \quad (6)$$

式中: $\delta(i,j) = |i - j|$ 为内壁重构影像相邻像素间的灰度差; $P_{\delta}(i,j)$ 为内壁重构影像相邻像素间的灰度差为 δ 的像素概率分布。

4.2 实验结果分析

为了验证所提方法的有效性,以某型号单缸四气门发动机为例,其基本参数如表1所示。通过与传统的关联成像方法重构出的内壁影像进行对比,来说明所提方法在提升缸盖内壁重构质量方面的优势。

表1 某型号单缸四气门内燃机的性能参数

Table 1 Performance parameters of a single-cylinder four-valve internal combustion engine

Parameter	Value
Cylinder diameter /mm	120
Cylinder head stroke /mm	150
Total emissions /L	10.45
Nominal power /kW	162
Calibrated power speed /($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	2200
Maximum torque /($\text{N} \cdot \text{m}$)	844

图6(a)为裂纹缸盖物体原图,图6(b)为传统关联成像在 $N=500$ 时重构出的影像,图6(c)为传统关联成像下多尺度融合权重系数占比为1:1:1时的混合重构影像,图6(d)为裂纹缸盖物体原图,图6(e)为差分关联成像在 $N=500$ 时重构出的内壁影像,图6(f)

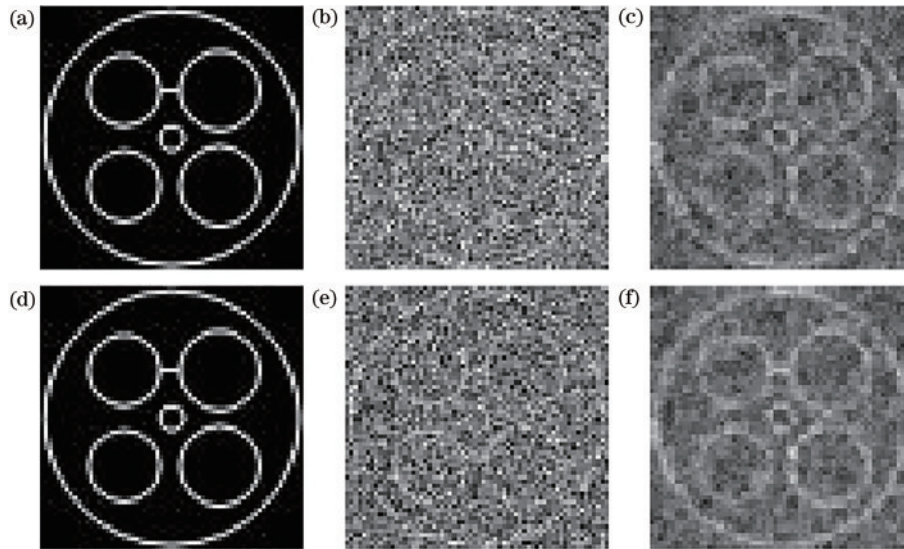


图6 裂纹缸盖内壁影像。(a)(d)原物体影像;(b)(e) $N=500$ 时,传统关联和差分关联重构出的影像;(d)(f)融合权重为1:1:1时传统关联和差分关联融合的影像

Fig. 6 Images of cracked cylinder head inner wall. (a)(d) Images of the original object; (b)(e) images reconstructed by traditional association and differential association when $N=500$, respectively; (d)(f) images fused by traditional association and differential association respectively when the fusion weight is 1:1:1

为差分关联成像下多尺度融合权重系数占比为 1:1:1 时的混合重构影像。由图 6 可知:传统关联成像和差分关联成像在低采样次数下不仅难以检测出缸盖内壁热疲劳损伤,同时也不能将缸盖物体的影像完整重构出来。在相同的采样次数下,所提方法可以将缸盖内壁完整重构出来,可以明显地识别出裂纹的位置。

表 2 和表 3 分别为传统关联成像和差分关联成像与所提多尺度融合方法的参数指标对比。可知,所提方法的 3 种评价指标均优于传统关联成像和差分关联成像,尤其在 PSNR 值和 V 值上,比传统关联成像高了 9.62% 和 26.13%,比差分关联成像高了 7.07% 和 13.04%。结果表明所提方法具有优势。

为了体现所提方法在不同融合权重占比下的优势,通过设置不同的权重系数进行实验分析,如图 7 所示。图 7(a)为权重比例为 2:1:1 时的影像,图 7(b)为权重比例为 3:1:1 时的影像,图 7(c)为权重比例为

表 2 传统关联成像与多尺度融合影像的评价指标比较
Table 2 Comparison of evaluation indexes between traditional association imaging and multi-scale fusion images

Evaluation index	Traditional association	Multi-scale fusion
PSNR	6.6073	7.2429
SSIM	0.9745	0.9790
V	0.1795	0.2264

表 3 差分关联成像与多尺度融合影像的评价指标比较
Table 3 Comparison of evaluation indexes between differential association imaging and multi-scale fusion images

Evaluation index	Differential association	Multi-scale fusion
PSNR	6.9603	7.4523
SSIM	0.9759	0.9812
V	0.2155	0.2436

4:1:1 时的影像,图 7(d)为权重比例为 1:1:2 时的影像,图 7(e)为权重比例为 1:1:3 时的影像,图 7(f)为权重比例为 1:1:4 时的影像。

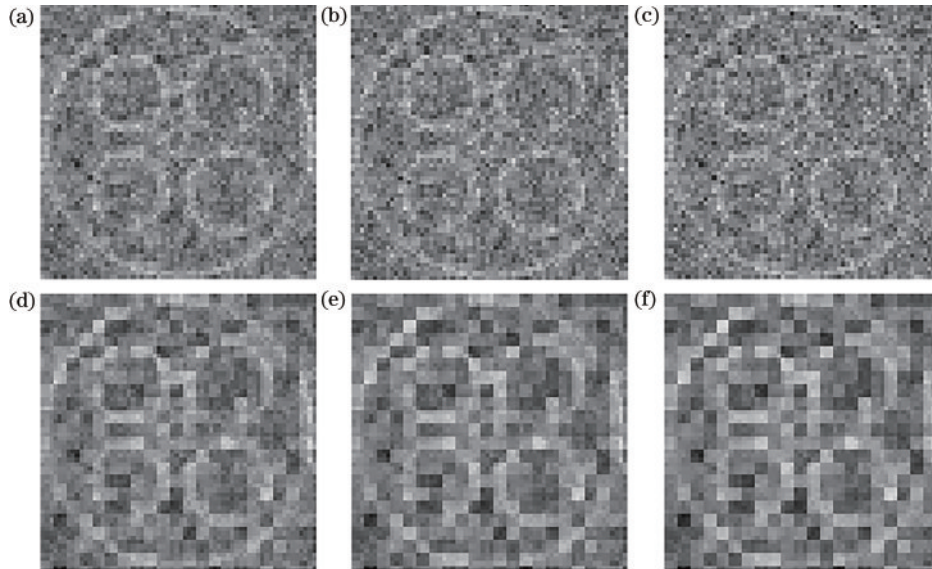


图 7 不同权重占比的融合内壁影像。(a)2:1:1;(b)3:1:1;(c)4:1:1;(d)1:1:2;(e)1:1:3;(f)1:1:4

Fig. 7 Fused inner wall images with different weight proportions. (a) 2:1:1; (b) 3:1:1; (c) 4:1:1; (d) 1:1:2; (e) 1:1:3; (f) 1:1:4

由图 7 可知:当给 1×1 尺寸的内壁重构影像增加占比时,裂纹区域位置的质量明显下降,对于图 7(a)和图 7(b),可以较为明显地识别出裂纹的位置,对于图 7(c),检测裂纹的位置较为困难;给 3×3 尺寸的内壁重构影像增加占比时,可以明显地识别出内壁裂纹所在的位置,但块效应明显加剧,如图 7(d)~(f)所示。表 4 为不同权重占比下的评价指标。

由表 4 可知:随着 1×1 尺寸的内壁重构影像的权重系数增加,PSNR 值和 V 值都减小,而 SSIM 值增加;随着 3×3 尺寸的内壁重构影像的权重系数增加,PSNR 值和 SSIM 值降低而 V 值增加。PSNR 值表示内壁融合影像的质量,SSIM 值表示融合影像与原图的相似度,V 值表示内壁融合影像对比度及检测热疲

表 4 不同权重占比下的评价指标
Table 4 Evaluation indexes under different weight proportion

Weight proportion	PSNR	SSIM	V
2:1:1	7.1358	0.9798	0.2148
3:1:1	7.0536	0.9809	0.2078
4:1:1	6.9917	0.9813	0.2031
1:1:1	7.2429	0.9790	0.2264
1:1:2	7.1960	0.9777	0.2356
1:1:3	7.1462	0.9768	0.2412
1:1:4	7.1043	0.9767	0.2449

劳损伤的能力。表 4 中 PSNR 值最高的权重占比为 1:1:1,SSIM 值最高的权重占比为 4:1:1 但对应的 V

值最低, V 值最高的权重占比为 1:1:4 但对应的 SSIM 值最低。可见在权重占比为 1:1:1 时, 融合后的影像质量较好。

为了能够更好地说明所提方法的有效性, 在不同的探测次数(500~3000)下, 在融合权重占比为 1:1:1 时分别对关联成像方法和所提方法进行重复实验, 并记录下对应的 PSNR 值、SSIM 值和 V 值, 结果如图 8

所示。

从图 8 可以看出, 随着采样次数的增加, 传统关联方法会出现重构影像质量下降的问题, 而所提方法受采样次数的影响较小。这说明传统关联方法受内燃机热场数据的影响较大, 而所提方法可以降低内燃机内壁热场数据对检测影像的影响。从图 8 各个指标曲线来看, 所提方法明显优于传统关联方法, 稳定性比较好。

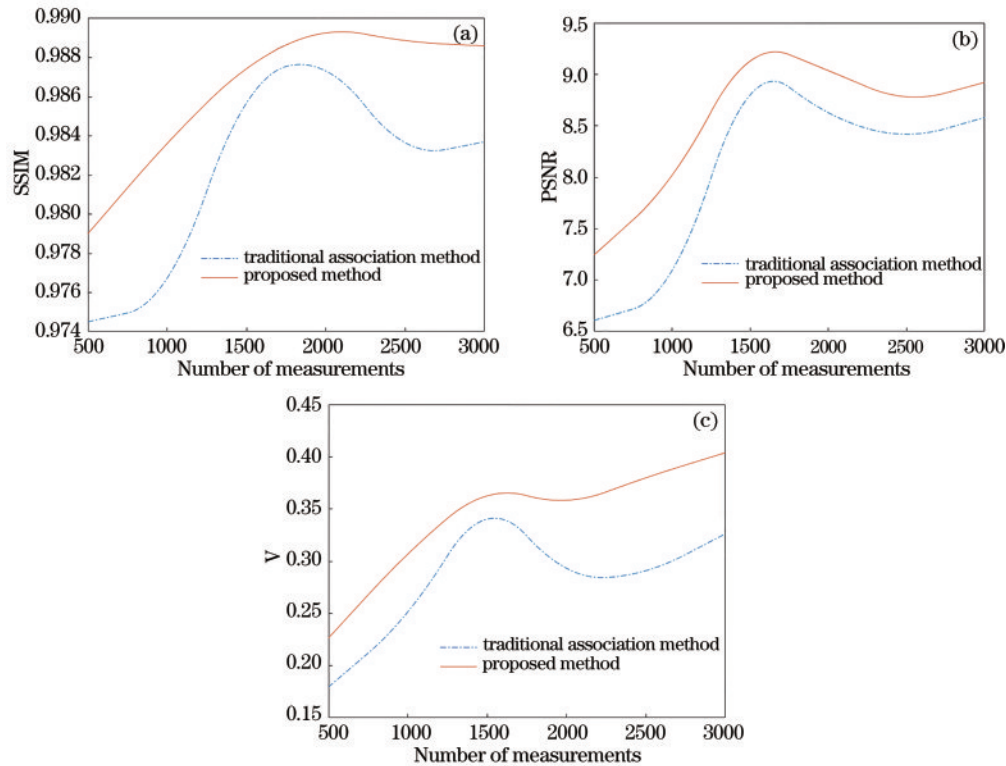


图 8 不同测量次数下影像的定量指标变化曲线。(a)平均 SSIM 值;(b)平均 PSNR 值;(c)平均 V 值

Fig. 8 Change curves of quantitative index for images under different measurement times. (a) Average SSIM value; (b) average PSNR value; (c) average V value

5 结 论

在传统关联方法的基础上, 提出了一种基于多尺度影像融合的气缸盖内壁热疲劳检测方法, 并进行了理论分析和实验例证。所提方法通过对内壁热场进行划分, 获得多尺度的内壁热场散斑图案, 进而对其与对应的外壁总热能进行关联重构, 获得多尺度的缸盖内壁影像, 再对获得的多尺度内壁重构影像进行融合, 获得最终的气缸盖内壁融合影像。通过对传统关联方法和所提方法重构出的内壁影像进行比较, 对差分关联成像和其对应的多尺度融合方法进行对比, 分析了不同融合权重系数对融合影像质量的影响。结果表明, 多尺度影像融合的内壁影像要好于传统的关联方法重构出的内壁影像, 并且在融合权重系数为 1:1:1 时, 融合产生的影像综合质量最好。所提方法要明显好于传统关联方法, PSNR 值提高了 9.62%, V 值提高了 26.13%。多尺度影像融合气缸盖内壁热疲劳检测方法有效地提高了对缸盖内壁热疲劳损伤区域位置的探

测效率, 可在低采样次数下实现对内壁热疲劳损伤区域的精准探测, 极大地节约了热疲劳检测的时间, 并且所提方法对其他领域的探测具有一定的借鉴作用。

参 考 文 献

- [1] 刘鑫, 乔逸飞, 董少静, 等. SiC_f/SiC 陶瓷基复合材料涡轮导叶热疲劳试验研究与损伤分析[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2020, 33(4): 26-30.
Liu X, Qiao Y F, Dong S J, et al. Thermal fatigue test and damage analysis of SiC_f/SiC ceramic matrix composite turbine guide vane[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2020, 33(4): 26-30.
- [2] 张福明. 冷热冲击对发动机缸盖损伤机理分析与实际应用[J]. 内燃机与配件, 2022(15): 75-77.
Zhang F M. Establishment and application of low cycle fatigue damage model for engine cylinder head[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2022(15): 75-77.
- [3] 刘立强, 赵永生, 刘婧, 等. 某型柴油机缸盖缩松缺陷分析及解决措施[J]. 中国铸造装备与技术, 2022, 57(4): 68-70.

- Liu L Q, Zhao Y S, Liu J, et al. Analysis and solutions for shrinkage defects of some diesel engine cylinder head [J]. *China Foundry Machinery & Technology*, 2022, 57(4): 68-70.
- [4] 陶鑫, 鲍君华, 何卫东. 缸盖低压检测站结构与仿真研究[J]. *机械工程与自动化*, 2022(4): 76-78.
Tao X, Bao J H, He W D. Structural design and simulation research of cylinder head low pressure detection station[J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2022(4): 76-78.
- [5] 李奔, 周井锋, 王艺, 等. 10 kW 矩形光斑激光空间合束器光学透镜的有限元热分析[J]. *光子学报*, 2022, 51(2): 0251213.
Li B, Zhou J F, Wang Y, et al. Finite element thermal analysis of optical lenses in 10 kW rectangular spot laser space combiner[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(2): 0251213.
- [6] 张皓宇, 杨风暴, 王肖霞. 基于关联成像的气缸盖内壁影像检测方法研究[J]. *内燃机工程*, 2021, 42(6): 30-36.
Zhang H Y, Yang F B, Wang X X. Research on image detection method of cylinder head inner wall based on correlation imaging[J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2021, 42(6): 30-36.
- [7] 刘苹, 张小平, 匡斯建, 等. 电机温度场分析中三维有限元模型网格划分方法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2019, 33(8): 173-178.
Liu P, Zhang X P, Kuang S J, et al. 3D finite element model mesh division method in motor temperature field analysis[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2019, 33(8): 173-178.
- [8] 李维, 陈佩, 赵勇琪, 等. 天然气发动机燃烧性能模拟分析[J]. *国外电子测量技术*, 2021, 40(2): 34-38.
Li W, Chen P, Zhao Y Q, et al. Simulation analysis of combustion performance about natural gas engine[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2021, 40(2): 34-38.
- [9] 王安泉, 李盈盈, 李晨, 等. 阵列探头电容成像玻璃钢无损检测系统[J]. *电子测量技术*, 2021, 44(4): 149-154.
Wang A Q, Li Y Y, Li C, et al. Capacitive imaging system with arrayed probe for the non-destructive evaluation (NDE) of glass fibre reinforced polymer (GFRP)[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2021, 44(4): 149-154.
- [10] 李能菲, 黄见. 高空间分辨率关联成像技术研究[J]. *量子电子学报*, 2022, 39(4): 549-557.
- Li N F, Huang J. Research on high spatial resolution ghost imaging technology[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2022, 39(4): 549-557.
- [11] 徐亦卿, 陆海澎. 基于扩张状态观测器的发动机转速双闭环自适应控制系统设计[J]. *计算机测量与控制*, 2022, 30(7): 123-128.
Xu Y Q, Lu H P. Design of engine speed double closed-loop adaptive control system based on extended state observer[J]. *Computer Measurement & Control*, 2022, 30(7): 123-128.
- [12] 李延骁, 徐传燕, 刁立福, 等. MATLAB/Simulink 在《发动机原理》课程实训教学中的应用[J]. *内燃机与配件*, 2021(24): 254-256.
Li Y X, Xu C Y, Diao L F, et al. MATLAB/Simulink in practical teaching of Engine Principle course[J]. *Internal Combustion Engine & Parts*, 2021(24): 254-256.
- [13] Zhang H B, Liang G, Qiao X Q, et al. Experimental and numerical study of inelastic behavior based on simulated cylinder head specimen under thermal cycling conditions [J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2022, 44(8): 372.
- [14] Ma K D, Duanmu Z F, Zhu H W, et al. Deep guided learning for fast multi-exposure image fusion[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2020, 29: 2808-2819.
- [15] Azam M A, Khan K B, Salahuddin S, et al. A review on multimodal medical image fusion: compendious analysis of medical modalities, multimodal databases, fusion techniques and quality metrics[J]. *Computers in Biology and Medicine*, 2022, 144: 105253.
- [16] Xing Y H, Yang S Y, Feng Z X, et al. Dual-collaborative fusion model for multispectral and panchromatic image fusion[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 5400215.
- [17] Bellam K, Krishnaraj N, Jayasankar T, et al. Adaptive multimodal image fusion with a deep pyramidal residual learning network[J]. *Journal of Medical Imaging and Health Informatics*, 2021, 11(8): 2135-2143.
- [18] 王新赛, 冯小二, 李明明. 基于能量分割的空间域图像融合算法研究[J]. *红外技术*, 2022, 44(7): 726-731.
Wang X S, Feng X E, Li M M. Research on spatial domain image fusion algorithm based on energy segmentation[J]. *Infrared Technology*, 2022, 44(7): 726-731.