

民机襟翼用滑轨材料磨损 表面图像分析

Wear Surface Image Analysis of Flap Slide Rail Material

胡 毅 左洪福 徐一鸣 / Hu Yi Zuo Hongfu Xu Yiming

(南京航空航天大学, 南京 210016)

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

摘 要:

利用 MZ-4018 滚动轴承滑轨摩擦磨损试验机进行磨损试验,通过体视显微镜和工业相机对襟翼滑轨材料试件磨损表面进行图像采集;采用 wiener 滤波和 Laplace 算子进行预处理,以实现图像平滑,增强图像的边缘和细节信息;迭代法和最大间类方差法确定两阈值,以此作为选取种子点的标准,确定生长准则后进行图像分割;最后利用形态学方法进行磨损边界提取并对磨损面积进行测算;实现了对襟翼滑轨材料磨损特征的定量分析。

关键词: 襟翼;区域生长;磨损;图像分析

[**Abstract**] Use the MZ-4018 wheel-rail friction and wear tester carried on wear test, obtain flap slide rail material wear surface image by microscope and industrial cameras; By the Wiener filter and the Laplace operator method pretreatment method to smooth image and enhance edge and detail information; The iterative method and the maximum between class variance method to determine two threshold, as the standard selection of seeds. Determine growth standards for image segmentation; Finally use morphological methods to extract wear boundary and calculate wear area; Realize the flaps and slats slide rail material wear characteristics of the quantitative analysis.

[**Key words**] Flap; Aregion Grow; Wear; Image Analysis

0 引言

襟翼是飞机上重要的增升机构,近些年来,军用飞机如水轰五、歼 7E,民机如波音 737-300、波音 747、运七等都曾出现过襟翼故障^[1]。民机襟翼运动机构中滚针轴承的磨损性能直接影响民机襟翼运动机构的可靠性。

磨损表面分析是摩擦学研究的重要内容之一。利用 MATLAB 图像处理技术可以很方便地对图像实现平滑、分割、边缘检测等多项处理。图像分割可以将图像中感兴趣的目标区分开来做进一步的研究和分析。基于区域生长的分割方法由于其算法简洁、处理效率高,因而在磨损图像分析中得到了广泛的应用。但由于其种子点和生长阈值的选择很敏感,因此种子点选择的不同而造成的分割效

果差异会很大^[2]。本文在综合迭代法和最大间类方差法基础上,对区域生长法作了一些改进,与传统的区域生长相比,对种子点的选择更加精确,分割的效果和精度也有所提高。使用该分割方法,选取了不同失效特征下的磨损图像进行分析,实现了对襟翼滑轨材料磨损特征的定量分析。

1 试验及磨损失效特征描述

试验采用 MZ-4018 滚动轴承滑轨摩擦磨损试验机,滚轮滑轨结构试验模型如图 1 所示,上面为陪试滚轮,材料为 1Gr17Ni2 不锈钢,内径为 10mm,外径为 25mm,长度为 30mm。下面为钛合金平板试验件,基体材料为 Ti-6Al-4V(即 Tc4),表面处理为火焰喷涂碳化物,涂层经机加工后,涂层厚度为 100um ~ 150um,表面粗糙度 Ra=3.2,基体硬度约 389HV,

涂层硬度约 749HV。滚轮与滑轨的有效接触长度为 400mm,宽度为 40mm,厚度为 5mm。在陪试滚轮上施加垂直载荷,拉力油缸上施加轴向载荷,装夹完毕后,启动试验机,使滚轮以 0.6Hz 频率在钛板试验件上往复滚动。

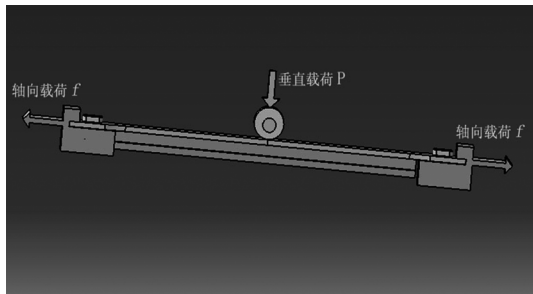


图1 滚轮滑轨模型

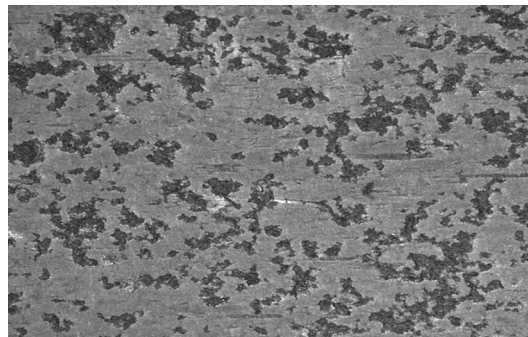
本试验主要是滚动摩擦磨损试验,伴有滑动摩擦,在接触载荷和轴向载荷的作用下,滚轮与滑轨作接触式往复循环运动,所施加的垂直载荷不大,并且运动频率很小,因此,其主要的失效模式是表面接触疲劳失效,其他形式的失效模式可以忽略。由于接触区域表层或次表层的应力状况不同,会产生麻点疲劳剥落、浅层疲劳剥落以及硬化层剥落(即深层疲劳剥落)^[3]。

麻点疲劳剥落主要失效特征是在接触区域,由表面产生裂纹,造成深浅不同的点或豆状凹坑;浅层疲劳失效特征是在接触区域由表面或次表面产生裂纹,造成深浅不同、面积大小不一的片状剥落;硬化层剥落失效特征是经表面强化处理的工件在很大接触应力作用下,由于应力/强度比值 >0.55 ,在强化层过渡区产生平行于表面的疲劳裂纹,造成硬化层压碎,大块剥落。

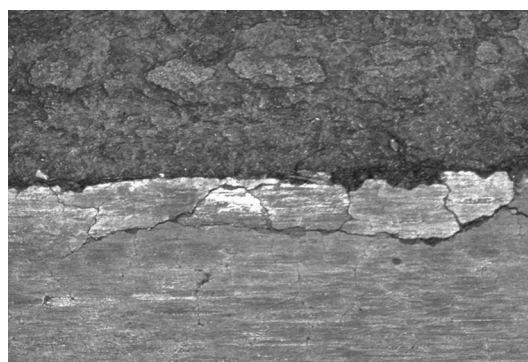
2 图像采集

采用轮廓形貌仪测试时,发现试验件深层剥落面积 $\geq 3\text{mm}^2$;麻点剥落在 10mm^2 面积内麻点率达到15%;界面分层或涂层分层等其他失效,出现任何一种即终止试验。如果在一定应力水平下,没出现上述失效但往复 10^7 次后也停止试验。当试验件磨损程度达到上述标准时,将其从试验机上取下来进行图像采集。为了去除表面的油脂和小颗粒状磨屑,提高观测图像的清晰度,必须在钛板试验件上先用有机溶剂进行清洗,试验中采用的清洗溶剂为添加稳定剂后的三氯乙烯,然后利用 XTL-I 型连续变倍体视显微镜和凯视佳 USB2.0 工业相机进行图像采集。

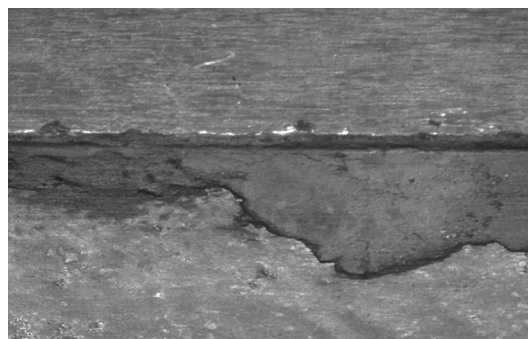
为了对表面接触疲劳的失效特征进行对比分析,分别选取麻点疲劳剥落、浅层疲劳剥落以及硬化层剥落三种不同失效特征下的三幅磨损图像进行分析,如图2所示,三幅图的基本信息如表1所示。



a) 麻点疲劳剥落



b) 浅层疲劳剥落



c) 硬化层疲劳剥落

图2 磨损图像

表1 磨损图像基本信息

	垂直载荷 (MPa)	往复次数 (次)	坑表面硬度 (HV)	图层厚度 (μm)
图2(a)	750	64 051	722	110
图2(b)	1 200	23 227	532	150
图2(c)	1 000	49 941	454	150

3 图像处理

图像处理技术在磨损分析中起着至关重要的作用,通过对采集到的磨损图像进行平滑、去噪、图像分割、边界提取、面积测算,可以对襟翼滚轮滑轨机构的磨损失效模式有更加直观的了解,本文图像处理的大致流程如图3所示,并以图2(a)为例对整个流程的图像处理进行说明,并验证改进的区域生长方法的可行性。

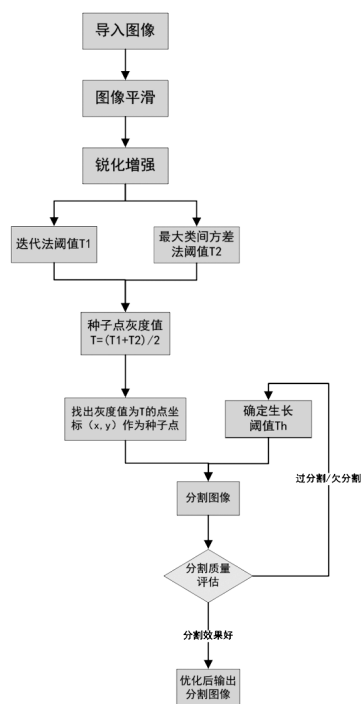


图3 图像处理流程

3.1 图像平滑

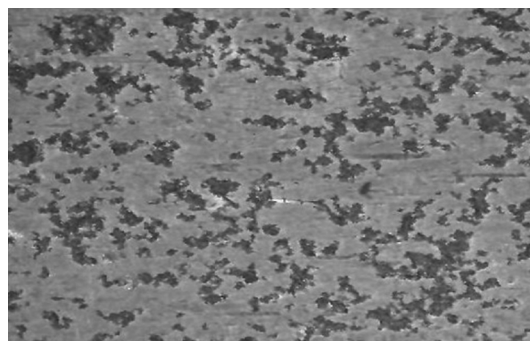
图像平滑主要用于模糊处理和减小噪声,在空间域内,常用的图像平滑方法有:均值滤波、中值滤波和 wiener 自适应滤波。

Wiener 滤波根据图像的局部方差来调节滤波器的输出,滤波效果较好,可以更好地保留图像的边缘和低频细节信息^[4]。基于此,采用 wiener 滤波进行平滑去噪,所得的图像如图4(a)所示。

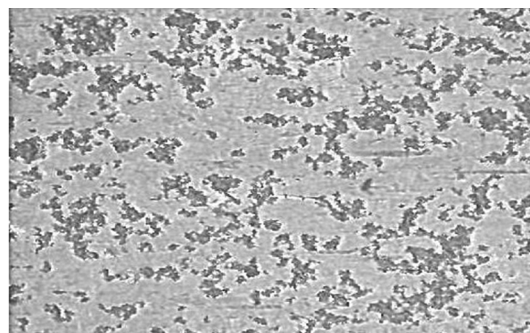
3.2 图像锐化

图像锐化的目的是增强图像边缘,使目标的边缘鲜明,便于提取目标物体的边界,对图像进行分割、目标区域识别和区域形状提取等。空间域内常用的锐化方法有梯度法和 Laplace 算法。

Laplace 算子是各项同性的二阶倒数,比较适合于因为光线的漫反射造成的图像模糊^[4]。采用该方法进行锐化后的图像如图4(b)所示。



(a) 图像平滑



(b) 图像锐化

图4 图像预处理

3.3 图像分割

磨损图像经过平滑、锐化等预处理程序后,就可以对其进行分割。图像分割的目的是将图像分为若干有意义的区域,这些区域对应图像中不同的目标,图像分割结果的好坏直接影响对图像的理解。目前常用的分割方法包括阈值分割(双峰法,迭代法,最大类间方差法)、区域分割(区域生长,区域分裂合并)等^[5]。本文在基于迭代法和最大类间方差法基础上对区域生长法进行改进,改进后的方法可以实现对种子点的精确定位,并且对生长阈值的选择也更加明确,从而提高分割的效率和质量。

(1) 迭代法

迭代法是对双峰法的改进,可以完成阈值的自动选取。预处理后的图像由迭代算法得出的分割阈值为 172,分割所得的图像如图5(a)所示,可以看出,由于分割阈值较小,图像存在过分割现象。

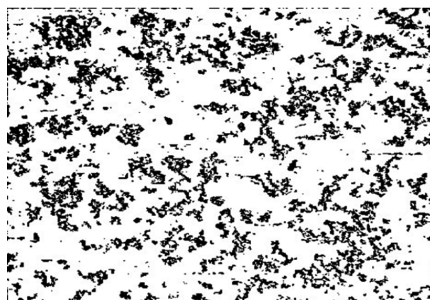
(2) 最大类间方差法

最大类间方差算法是在判决分析最小二乘法原理的基础上推导出来的。由该方法得出的预处理图像的分割阈值为 219,分割的图像如图5(b)所示,可以看出,由于分割阈值较大,图像存在欠分割现象。

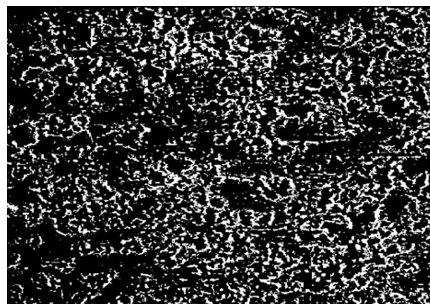
(3) 改进区域生长分割方法

由迭代法和最大类间方差法可以看出,这两种方法都是使用单一的分割阈值对图像进行分割,对于图像对比度非常明显的图像处理效果较好,而对磨损图像的处理效果欠佳;而传统的区域生长法对种子点和生长阈值的选择依赖性很强,因而所造成的分割差异很大^[6],若要得到比较好的分割效果,所耗费时间较长。

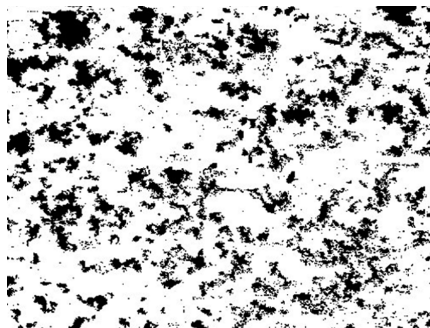
通过迭代法和最大类间方差法分别求出的阈值为 172 和 219,以这两阈值的平均值 195 作为选取种子点灰度值的参照标准,通过 imview 函数在预处理后的图像里找到等于上述灰度值的一点,确定其坐标值为(212,351)。并观察损伤区域和未损伤区域灰度值的大致范围,以确定生长阈值的估计值为 40。最后在区域生长程序中直接输入上述确定的坐标值作为种子点的坐标值,得到的二值化图像结果如图 5(c)所示。



(a) 迭代法分割



(b) 最大类间方差法分割



(c) 改进区域生长分割

图 5 三种分割方法

用上述方法分别对图 2(b) 和图 2(c) 进行分割,分割后的图像如图 6(a) 和图 6(b) 所示。



(a) 浅层失效图像



(b) 硬化层失效图像

图 6 其余两种失效特征图像分割结果

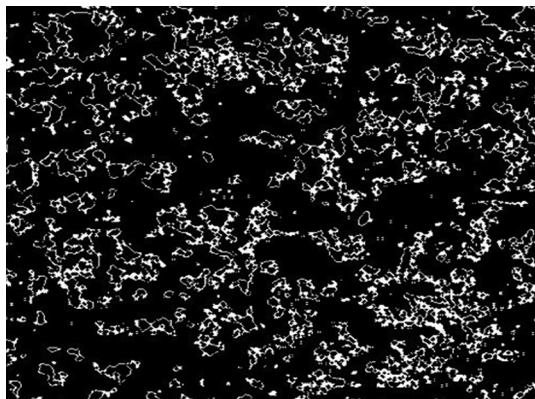
4 后处理及磨损分析

4.1 后处理

图像的边缘信息是很重要的图像特征信息,边缘检测方法在图像分析与识别中非常重要,因此,目前对边缘检测所提出的算法也有很多,常用的算法有 Sobel 算法、Prewitt 算法、Roberts 算法、log 算法、Zerocross 算法以及 Canny 算法等^[7],经过综合比较各种算法的检测结果,采用 Prewitt 算法对磨损图像检测的效果较好。

对磨损图像进行边缘检测后,为了对边缘信息进行优化,可以采用形态学方法进行处理,其基本思想是用具有一定形态的结构元素去度量和提取图像中对应形状,以达到图像分析和特征识别的目的。为了填充磨损图像目标中的细小空间和裂缝,连接断开的临近目标^[4]。本文采用闭运算的方法进行处理,该运算方法的基本原理为:使用结构元素先对图像进行膨胀运算,然后再对膨胀结果进行

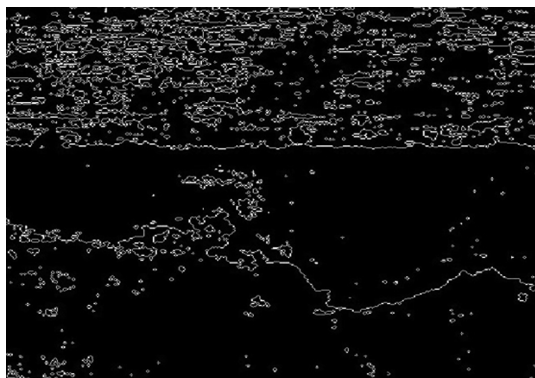
腐蚀运算。在形态学的处理中,结构元素的选取对处理的效果影响较大,经综合比较,选用的结构元素类型为 disk, R 为 1。边缘检测所得结果如图 7 所示。



(a) 麻点疲劳剥落边缘检测



(b) 浅层剥落边缘检测



(c) 硬化层剥落边缘检测

图 7 边缘检测结果

4.2 图像分析

由图 5(c) 和图 7(a) 可以看出,在载荷为 750MPa,往复运动 64 051 次后,滑轨材料表面发生了麻点疲劳剥落,表面产生了大小深浅不一的凹坑。白色曲线包括的区域基本代表了磨损区域。并且磨损有向凹坑周围扩大的趋势。此外,图像中

还有轻微刮伤的痕迹,可能是由外来异物或磨粒反复挤压所造成的。

由图 6(a) 和图 7(b) 可以看出,在载荷为 1 200MPa,往复运动 23 227 次后,滑轨材料表面发生了浅层疲劳剥落,图像中还可以明显的分成完全磨损区域、过渡区域和未磨损区域,过渡区域产生了大小不一的片状剥落,并且剥落会随着裂纹逐渐向未磨损区域扩展。

由图 6(b) 和图 7(c) 可以看出,在载荷为 1 000MPa,往复运动 49 941 次后,在滚轮滑轨接触区域边缘由于应力集中,使涂层发生累积塑性变形,在硬化层与心部的交界处,切应力/剪切强度的比值达到最大,产生疲劳裂纹,裂纹经扩展到达表面即发生深层剥落,表面涂层基本完全剥落。

最后对图像进行面积测算,所得的结果如表 2 所示。

表 2 磨损图像表面信息

	损伤面积 (像素点)	未损伤面积 (像素点)	最大损伤面积 (像素点)	损伤比 (%)
图 2(a)	46 630	169 502	4 587	21.6
图 2(b)	103 336	112 451	93 136	52.1
图 2(c)	75 740	114 736	59 661	39.8

5 总结

利用 MZ-4018 滚动轴承滑轨摩擦磨损试验机在大量试验的基础上,选取几种典型失效特征进行分析。通过分析,实现了以下的目的:

(1)在迭代法和最大类间方差法基础上,验证了改进区域生长方法的可行性,该方法对种子点的选取更加精确,分割的质量和效率也有了较大的提高。

(2)对接触疲劳失效的几种典型失效特征图片进行了分析,通过去噪,增强,分割,边缘检测及形态学分析,对磨损特征机理有一个定量的分析。

参考文献:

- [1]谷鸣,左洪福,吕德峰. 民机缝翼滑轨机构磨损分析研究[J]. 飞机设计,2008,28(5):10-14.
- [2]尹云峰,陈真诚,任智新. 一种用于 MR 脑图像分割的改进区域生长方法[J]. 桂林电子科技大学学报,2011,31(6):477-479.
- [3]温诗铸. 摩擦学原理[M]. 北京:清华大学出版社,2010.

[4]刘刚. MATLAB 数字图像处理[M]. 北京:机械工业出版社,2008.

[5]许录平. 数字图像处理学习指导[M]. 北京:科学出版社,2009.

[6]夏晶,孙继银. 基于区域生长的前视红外图像分割方法

[J]. 激光与红外,2011,41(1):107-111.

[7]安新军,刘太安,闫长青. 改进区域生长的医学超声图像分割方法研究[J]. 计算机工程与设计,2009,30(6):1512-1514.

(上接第 26 页)

通过对各个油箱的计算分析,图 11 给出了三个油箱地面状态时燃油温度随时间的变化,从图中可以看出油箱在地面状态时温度均有升高,集油箱的温度增幅最大,机身油箱温度增幅最小,外翼油箱处于中间状态。图 12 给出了三个油箱巡航状态时燃油温度随时间的变化,从图中可以看出油箱在巡航状态时温度均有降低,其中外翼油箱温度降幅最大。

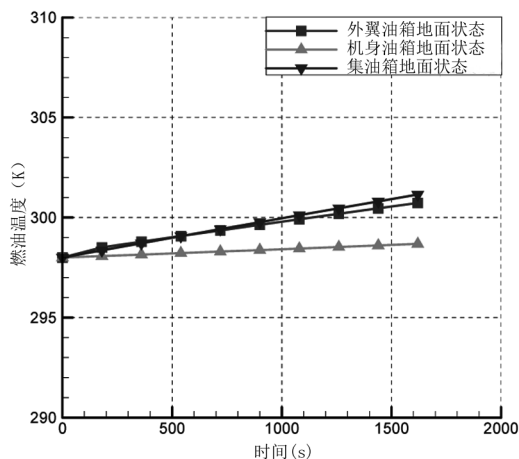


图 11 三油箱地面状态燃油温度随时间变化

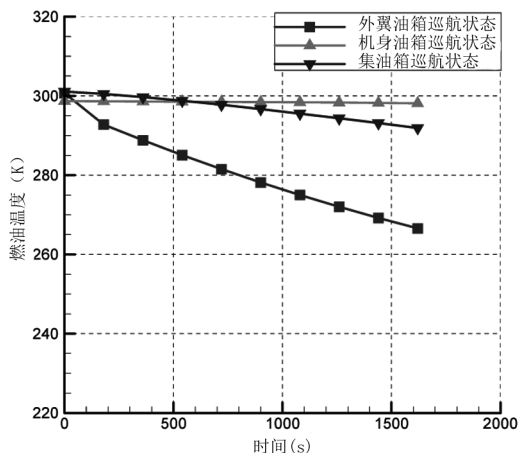


图 12 三油箱巡航状态燃油温度随时间变化

5 结论

通过上述分析,本文可以得出以下结论:

(1)燃油箱内燃油温度区域分布不均匀,外翼、机身以及集油箱的温度各不相同,计算时应划分不同单元进行研究;

(2)燃油箱内燃油温度在地面状态和巡航状态各不相同,在典型的热天环境中,各油箱地面燃油温度均要高于巡航状态温度;

(3)在典型的热天环境中,燃油的最高温度时刻出现在地面终了状态,而且最高点出现在集油箱内,分析研究时应重点关注集油箱内燃油的温度变化情况。

参考文献:

- [1]李占国. 未来飞机燃油系统设计和仿真技术[J]. 航空科学技术,1996(3):23-26.
- [2]徐志英,庄达民. 飞机燃油系统热管理研究[J]. 航空动力学报,2007,22(11):1833-1837.
- [3]冯震宙,高行山,刘永寿,岳珠峰. 某型飞机燃油系统数值建模方法与仿真分析[J]. 飞机设计,2007,14(5):65-71.
- [4]王震. 飞机燃油箱防爆及抑爆材料应用技术[J]. 航空科学技术,2002(3):33-35.
- [5]Sforza P M. Commercial Airplane Design Handbook[M]. USA: University of Florida,2007.
- [6]Boeing company. B737-700/800 System Schematic Manual[G].
- [7]杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社,1998.