

声发射技术的飞机液压导管靠磨损伤检测方法

于春风¹, 王小祥², 王秉卓², 孟欣¹

(1. 海军航空大学青岛校区, 山东青岛, 266000; 2. 91306部队, 上海, 200000)

摘要 为预防因液压导管相互之间, 或与机体结构、设备机箱间靠磨引起的液压导管损伤或破裂, 导致飞机液压系统故障或失效等问题, 提出基于声发射技术的飞机液压导管靠磨损伤检测方法。通过检测导管靠磨损伤的声发射信号, 在时域内进行特征参数分析, 特征提取和损伤模式识别, 从而判断导管是否存在靠磨损伤。在明确了导管靠磨的定义, 介绍了导管靠磨的物理过程和机械损伤机理基础上, 采用关联图分析对声发射信号特征参数进行分析和处理, 并在飞机上进行了振动载荷作用下液压导管靠磨损伤检测实验, 结果证明检测方法可行。

关键词 声发射技术; 飞机液压系统; 靠磨损伤; 检测技术

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2022.02.002

中图分类号 V229; TG115.28 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2022)02-0007-05

A Mechanical Damage Detection Method of Aircraft Hydraulic Pipeline Based on Acoustic Emission Technology

YU Chunfeng¹, WANG Xiaoxiang², WANG Bingzhuo², MENG Xin¹

(1. Navy Aeronautics University Qingdao Branch, Qingdao 266000, Shandong, China;
2. Unit 91306, Shanghai 200000, China)

Abstract Aimed at the problems that damage or rupture of the hydraulic pipe caused by the friction between the hydraulic pipes, or between the hydraulic pipes and the body structure or equipment cabinet can lead to failure of the system, a method is proposed for detecting the frictional damage of the aircraft hydraulic pipe based on acoustic emission technology. A correct judgment of pipes whether there is abrasion damage of the catheter stems from in analyzing the characteristic parameter, feature extraction and damage pattern recognition in the range of time domain through detecting the acoustic emission signal of the abrasion damage of the catheter. In this paper, the definition of pipe grinding is defined, the physical process and mechanical damage mechanism of pipe grinding are introduced in detail, the characteristic parameters of acoustic emission signal are analyzed and processed by using correlation graph analysis, and the damage detection experiment of hydraulic pipe grinding under vibration load is carried out on the aircraft. The results show that the detection method is feasible.

Key words acoustic emission technique; aircraft hydraulic system; mechanical damage; detecting technique

收稿日期: 2021-05-07

作者简介: 于春风(1983—), 男, 山东安丘人, 副教授, 研究方向为航空电气工程。E-mail: hepfive@sina.cn

引用格式: 于春风, 王小祥, 王秉卓, 等. 声发射技术的飞机液压导管靠磨损伤检测方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2022, 23(2): 7-11. YU Chunfeng, WANG Xiaoxiang, WANG Bingzhuo, et al. A Mechanical Damage Detection Method of Aircraft Hydraulic Pipeline Based on Acoustic Emission Technology [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2022, 23(2): 7-11.

飞机液压系统管路作为实现液压传递的重要环节,通常工作在高压状态,且受振动较强,易与相邻导管、机体结构或其它机载设备间发生靠磨损伤乃至破损,若导管断裂导致液压系统泄漏或失效等事故,将严重危及飞行安全。

导致液压导管出现靠磨损伤的可能是多样的:

①导管固定卡箍在振动环境下出现松动,导管振幅增大,与相邻物体间歇接触,从而产生摩擦和碰撞。
②导管在其他设备安装时受到挤压,与相邻机箱接触。
③飞机维修工作不当导致导管安装位置或走向改变,与机体或其他结构接触等。

实际保障工作对于液压系统管路的保养维护普遍停留在目视检查阶段,并且部分导管敷设于目视检查不可及的部位,易长期被忽视。受飞机制造、飞行使用、维护工作等各类因素影响,导管靠磨损伤的问题已不同程度地在现役飞机中出现,应得到足够重视。然而,目前对于飞机液压管路检测技术的研究多以导管疲劳裂纹、共振破裂、阀门泄漏等方面为主^[1-3]。

声发射检测是一种无源被动式的无损检测技术,兼具可动态实时监控、检测区域面积大、信号处理方法多样,检测过程不影响设备正常工作等技术优势,应用于飞机结构塑性形变、裂纹扩展、管路泄漏等方面的检测^[4-8]。对此,本文提出基于声发射技术的飞机液压管路靠磨损伤检测方法:提取飞机液压系统导管靠磨损伤的声发射信号,在时域内进行特征参数分析、特征提取和损伤模式识别,从而判断导管是否存在靠磨损伤。

1 导管靠磨损伤机理分析

“靠磨”是各类导管的检查和维护中经常使用的词语,是在飞行装备保障实际工作中实践总结出的,并未有明确的理论释义,本文针对液压导管中的“靠磨”现象做出定义:液压导管与其他各类导管、结构件、线缆、设备机箱等其他除设计之外的物体之间,在相对运动过程中,接触面间因物理接触而导致的非正常机械损伤的总称。“靠磨”所描述的相对运动过程是不确定的,接触形式的不同直接影响振动作用下相对运动的形式,该过程包括因接触分离导致的碰撞损伤和相对滑动产生的摩擦磨损。

1.1 碰撞损伤

碰撞损伤发生在导管静态下未与其他物体发生物理接触(或是接触但两表面间并不存在相互作用力)的情况下。振动载荷作用时,导管以一定周期和规律开始受迫振动,与相邻物体之间发生间歇接触(分离),进而产生碰撞损伤。

如图1所示,导管A相对B不仅存在水平运动,同时存在相对远离和靠近方向上的竖直运动,其合成的运动方向可以是任意的,表现为A与B发生碰撞。需要指出:在该接触形式下损伤以碰撞为主,但通常也伴随有间歇的摩擦磨损。

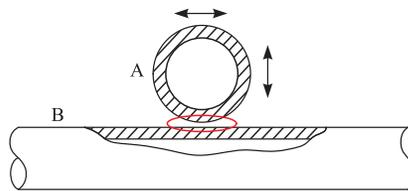


图1 碰撞损伤示意

振动条件下的间歇接触(分离),接触面间存在碰撞,其过程伴随着能量的交换和释放,并以弹性波(应力波)的形式向外辐射,即声发射。

1.2 摩擦磨损

摩擦磨损表现在导管在静态时已经受力 F 与其他物体持续且较为紧密接触的情况下,如图2所示,在一定程度的振动载荷作用下,接触面间将保持接触并产生滑动摩擦磨损。

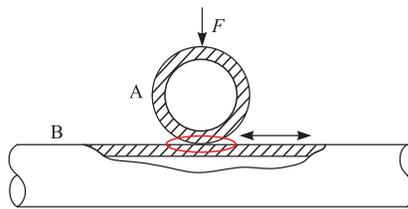


图2 摩擦磨损示意

摩擦磨损是伴随着摩擦而产生的,是相互接触的物体相对运动时,表层材料不断发生损耗的过程或者产生塑性形变的过程。常用摩擦磨损机理分析主要为:黏着磨损、磨粒磨损、疲劳磨损、腐蚀磨损和微动磨损^[9]。导管在连接和敷设中多使用的是紧密配合,振动载荷作用下,多在连接和固定位置产生疲劳磨损和微动磨损。摩擦磨损的主要机理是因相对滑动产生的黏着磨损。

黏着理论可用于解释摩擦磨损机理^[10](图3)。据黏着理论,两接触表面在载荷作用下,某些接触点的单位压力大产生黏结或冷焊,当两表面相对滑动时,黏着点被剪断,剪断这些黏着点的力即为滑动摩擦力。

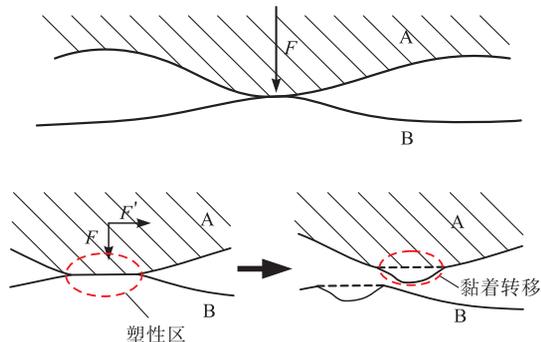


图3 黏着理论微观过程

黏着磨损的本质是一种微观动态的过程,在剪应力作用下,材料原子发生位错是在包含其伯格斯拉矢量的平面上运动,称为位错滑移。位错运动是滑移变形的元过程,当位错运动以足够高的速度运动时,其周边存在的局部应力场即成为声发射源,进而释放能量,从而产生声发射。

需要指出的是,上述损伤形式在导管靠磨损过程通常不是单一存在的,碰撞损伤过程由于接触面之间存在水平方向的相对运动,因此也伴随有摩擦磨损;另一方面,振幅达到一定程度时,摩擦磨损的接触面间也会发生碰撞损伤。本文正是利用碰撞损伤和摩擦磨损二者均会产生声发射向外释放能量的共性,不加区分地对二者声发射信号能量进行检测,进而达到判断靠磨损是否存在的目的。

2 声发射检测技术

材料中局域源快速释放能量产生瞬态弹性波的现象称为声发射(acoustic emission, AE)也称为应力波发射。声发射检测技术是利用声发射检测仪器对声发射波信号进行采集、分析和处理的技术。

2.1 声发射检测原理

靠磨导管在振动载荷作用下产生碰撞或是特定的磨损,并以弹性波的形式向外释放能量,对其进行声发射检测可以找出导管或构件中的声发射源,并确定声发射源的性质,进而判断是否有导管靠磨损发生。

声发射检测的一般原理如图 4 所示。声发射源产生的弹性振动以应力波的形式传播一段距离后,到达材料(导管)的表面,引起材料的表面位移。声发射传感器内置压电元件敏感材料产生的表面位移,受力产生形变,表面出现电荷,从而将被测材料表面振动转换为电信号。典型的声发射检测系统中,声发射传感器将材料表面形变转换为电信号,经前置放大器放大、滤波器滤波、主放大器再放大后,由数据采集卡(模/数转换器)进行采集,送入计算机进行数据处理和分析,判定声发射源的特性。

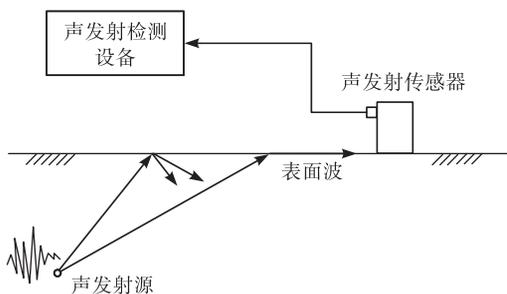


图 4 声发射检测的一般原理

2.2 AE 特征参数分析

AE 特征参数分析是对测得的声发射信号进行初步的处理和整理,变换成不同的声发射信号特征参数,并对这些特征参数加以统计分析,从而对声发射源的特征进行分析和判断的方法^[11]。常用的 AE 信号特征参数有振铃计数、幅值、能量、上升时间、持续时间和撞击数等,如图 5 所示。

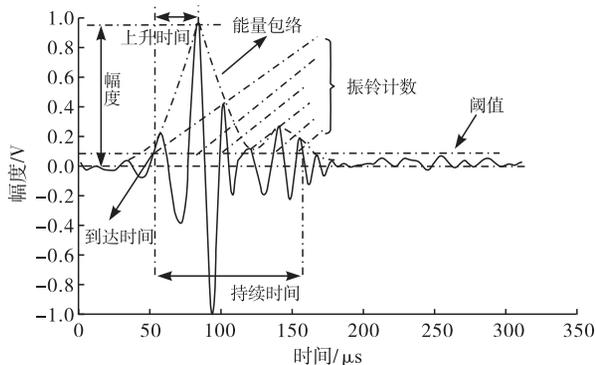


图 5 声发射特征参数定义

特征参数分析可以从不同角度描述同一物理过程的声发射信号的特征。设计该类方法作为模式识别中的特征提取与选择环节,具有对设备硬件的要求较低,分析速度快,易于实现实时监测,数据波形直观易于判断故障模式的优势。选用合适的数据处理方法,可减弱其简化波形所带来的局限性影响。

关联图分析法是声发射信号处理的常用方法之一。关联图通过对声发射信号的任意两个特征参数进行关联处理,可以综合分析声发射源的特征,剔除无用的噪声信号,从而起到降噪、辨别声发射源的作用^[12]。本文分别对实验数据的幅值-时间、能量-时间进行关联分析,并就关联图展示靠磨损的声发射信号特征。

3 损伤特征提取实验设计

3.1 实验方案

机上检测实验方案设计如图 6 所示,将振动加载装置安装于试样导管上,以 6 号硅油作为耦合剂,使用 3D 打印的专用夹具将声发射传感器安装在试样侧表面上。实验过程中,试样与预设靠磨点在振动载荷作用下靠磨损,产生声发射信号,耦合在试样上的声发射传感器采集到声发射信号后,经声发射采集卡传送至外接计算机。计算机记录试样导管在载荷作用下产生靠磨损的声发射信号的特征参数和波形,并进行分析和处理。

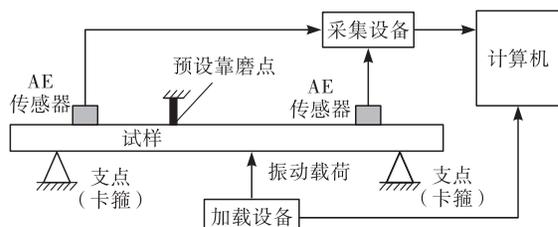


图6 机上检测实验方案

实验选用 Vallen-AMSY-6 型声发射检测仪：①采集设备为 Vallen MB2-V1；②声发射传感器型号为 VS150-M，部分参数如图 7 所示，其响应频率范围 100~450 kHz，中心频率 150 kHz。

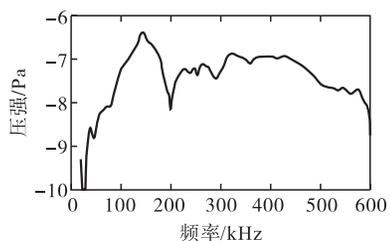


图7 VS150-M 及其频率响应曲线

振动加载装置如图 8 所示。导管夹具使用 SolidWorks 软件设计建模，由树脂材料 3D 打印而成；电机部分选用 N20 小型振动电机，供电范围 1.5~12 V(调速控制)。



图8 振动加载装置

3.2 靠磨损伤检测实验

如图 9 所示，选取机上某舱段内已知的一处靠磨损伤导管作为试样进行实验。两液压导管靠磨部位间填充毛毡作为防护措施，隔离两导管，防止靠磨发生，以便进行对照实验。声发射传感器安装于距导管预设靠磨位置约 30 cm 处，与导管表面填充硅油作为耦合剂。振动加载装置安装于距导管靠磨位置异侧(相对传感器)约 70 cm 处，如图 10 所示。

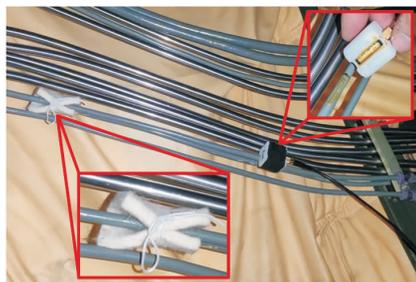


图9 导管靠磨点和声发射传感器相对位置

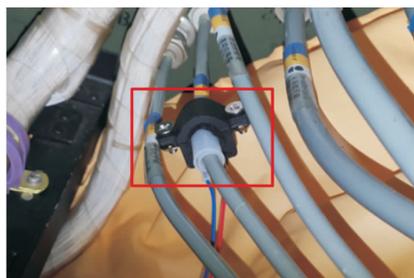


图10 振动加载装置安装

3.3 实验数据分析

在相同振动载荷作用下，分别检测试样导管在导管隔离(无靠磨损伤)和导管靠磨损伤所产生的声发射信号。图 11、图 12 为声发射幅值-时间关联图，图 13、图 14 为声发射能量-时间关联图，其中黑色为导管隔离实验，红色为导管靠磨损伤实验。

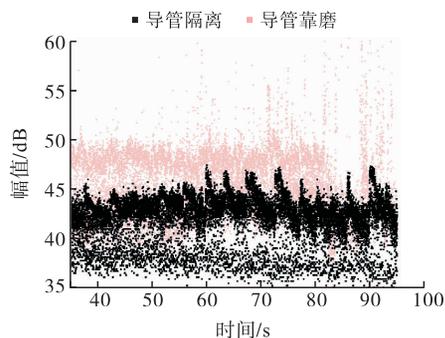


图11 声发射幅值-时间关联图(导管隔离)

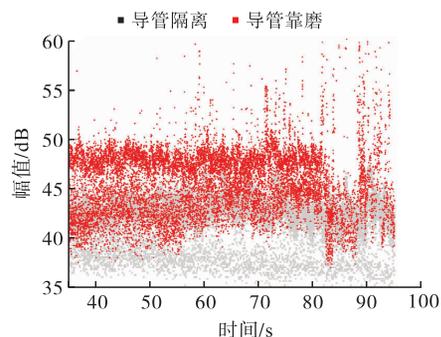


图12 声发射幅值-时间关联图(导管靠磨)

对比图 11、图 12，在相同振动载荷条件下，导管靠磨损伤实验的声发射信号幅值明显高于导管隔离实验，且存在大量高幅值散点分布于声发射幅值总体的上方。这些存在于声发射幅值总体的上方的大量高幅值散点可认为是导管靠磨因其间歇碰撞损伤的声发射幅值-时间特征。但是实际检测工作是为了发现导管是否存在靠磨损伤的情况，首先建立上述对照实验是不现实的；其次在电子干扰信号较强的检测环境中，检测得到的声发射信号幅值也可能呈现出图 12 的幅值-时间特征。因此，仅通过时间-幅值相关图并不能达到识别靠磨损伤声发射信号特征的目的，需进一步对能量-时间作相关处理来辅助模式识别。

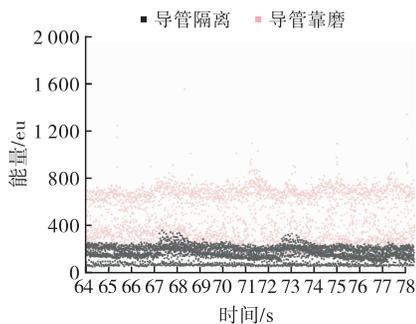


图13 声发射能量-时间关联图(导管隔离)

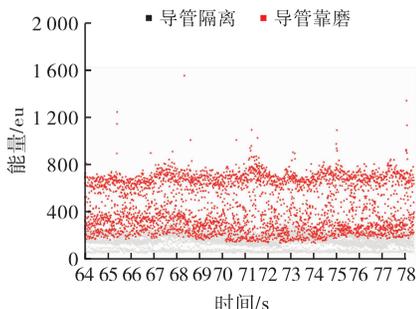


图14 声发射能量-时间关联图(导管靠磨)

通过能量-时间关联可区分出具有较高幅值,但能量却很小的噪声信号,对比图13、图14,可以看到:在振动载荷周期变化过程中,无靠磨导管的声发射能量值总体跟随载荷变化呈周期性变化,且能量数值整体稳定在0~400 eu之间,各时刻的能量值分布密集且均匀。相比之下,导管靠磨损伤的声发射能量值相差很大,总体分布于0~800 eu之间,且能量值集中在200~400 eu和600~800 eu两段范围内,呈平行带状分布。平行带的上半部分是导管靠磨损伤的声发射特征信号,能量源于靠磨损伤过程中导管间接触与分离产生碰撞损伤释放的动能,以及摩擦磨损微观位错运动应力场释放能量,致声发射能量将明显高于同振动载荷条件下于导管隔离实验数值。

通过对实验数据的特征参数相关分析,能够实现对于导管靠磨损伤的声发射信号特征的提取,证明了基于声发射技术检测飞机液压系统导管靠磨损伤的方法是可行的。

4 结论

本文明确了导管靠磨损伤的定义,分析了导管靠磨的物理过程和机械损伤机理,提出基于声发射技术的飞机液压导管靠磨损伤检测方法,通过机上实验证明了该技术路径对飞机液压导管靠磨损伤进行检测的可行性,并得出以下结论:

1) 振动载荷作用下,导管因物理接触所产生的靠磨损伤,其过程包含的碰撞损伤、摩擦磨损,使声发射幅值、能量参数明显高于正常数值。

2) 导管靠磨损伤的声发射信号特征是:能量参数散点分布呈平行带状分布;幅值参数有较多高幅值散点分布与幅值总体上方。

参考文献

- [1] 何毓明,彭利坤,宋飞. 基于特征参数和功率谱分析的液压滑阀内漏声发射检测实验研究[J]. 液压与气动, 2019(4):113-120.
- [2] 邓爱东,童航,张如洋,等. 基于模态分析的转子碰摩声发射特征[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40(6):1232-1237.
- [3] 樊保圣. 金属材料损伤过程声发射特征参数及损伤模型研究[D]. 南昌:南昌大学, 2012:2-4.
- [4] 杨瑞峰,马铁华. 声发射技术研究及应用进展[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2006, 27(5):456-461.
- [5] 刘镇清,刘骁. 超声无损检测的若干新进展[J]. 无损检测, 2000, 22(9):403-405.
- [6] SER'EZNOV A N, STEPANOVA L N, LAZNENKO A S, et al. Static Tests of Wing Box of Composite Aircraft Wing Using Acoustic Emission and Strain Gaging [J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2020, 56(8): 611-619.
- [7] JAMES R, JOSEPH R P, GIURGIUTIU V. Impact Damage Ascertainment in Composite Plates Using In-Situ Acoustic Emission Signal Signature Identification [J]. Journal of Composites Science, 2021, 5(3): 79-79.
- [8] MEDINA-ARENAS M, SOPP F, STOLLE J, et al. Measurement and Analysis of Inadequate Friction Mechanisms in Liquid-Buffered Mechanical Seals Utilizing Acoustic Emission Technique [J]. Vibration, 2021, 4(1):263-283.
- [9] 孙志礼,闫玉涛,杨强. 机械磨损可靠性设计和分析技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2020:11-15.
- [10] 侯文英. 摩擦磨损与润滑[M]. 北京:机械工业出版社, 2012:61-63.
- [11] 沈功田,耿荣生,刘时风. 声发射信号的特征分析[J]. 无损检测, 2002, 22(2):72-77.
- [12] 阳能军,姚春江,袁晓静,等. 基于声发射的材料损伤检测技术[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2016: 30-32.

(编辑:姚树峰)