

多光谱 - 声谱原位载流摩擦测试仪器

马志超^{1,*}, 李超凡¹, 赵宏伟¹, 任露泉^{2,3}

(1. 吉林大学机械与航空航天工程学院 长春 130022;

2. 辽宁材料实验室结构化材料技术研究所 沈阳 116001;

3. 吉林大学威海仿生研究院 威海 264402)

Email: zcma@jlu.edu.cn

摘要: 明确载流摩擦失效和变量之间耦合机制是载流摩擦研究要解决的核心问题。本研究通过开发载流摩擦试验仪, 集成红外热成像仪、高速相机和声发射传感器, 研发了多光谱-声谱原位载流摩擦测试系统。原位模块可时时监测温度场信息、载流摩擦副微粒脱落现象、瞬态电弧现象和声学信号等。仪器采用摆头式设计(磨损半径可调)以充分利用盘形试样的摩擦表面, 并提出了与该设计对应的计算摩擦系数的数学模型。接着, 基于法向初始载荷, 载流电流值、磨损半径作为原始三变量, 进行了三因素三水平正交试验。最后, 基于载流信号和载荷信号的相关性, 建立了z轴载荷信号的时频图作为输入的卷积神经网络模型来监测载流信号稳定性。模型的最高监测精度为97.73%, 此模型可仅使用力传感器信号监测载流信号的稳定性。

关键词: 机械系统; 仪器; 状态监测; 人工智能; 原位测试; 载流摩擦

1、研究背景

世界上有超过30%的能源消耗于摩擦, 有80%的机械零件由于磨损而失效^[1]。摩擦在生产 and 生活中普遍存在。原位载流摩擦测试仪的缺失极大的限制了载流摩擦问题的研究, 因此迫切需要开发用于复杂载流摩擦现象观测的原位测试仪器, 以获取更多时时观测到的信息来推动载流摩擦失效机理和变量之间耦合关系的研究。高速相机可捕捉电弧的瞬态现象, 红外可采集载流摩擦副附近的温度信息。声发射传感器能够采集到材料表面发生破损时产生的声学信号。Alan H等人使用声发射传感器采集黏着磨损和磨粒磨损对应的信号, 为声发射识别摩擦副磨损机制提供支撑^[2]。然而对于声发射监测载流摩擦的研究鲜有提及。另外, 对于商用的和实验室开发的载流摩擦测试仪也鲜有考虑到通过改变磨损半径以充分利用盘状试样和节约成本的问题。同时, 载流信号的稳定性会极大的影响到电气设备的使用寿命, 因此迫切需要开发载流稳定性监测模型, 以保证实际使用中的载流部件的及时调整和更换。

在本研究中, 开发了多光谱-声谱原位载流摩擦磨损测试系统, 该系统的能同时获取多种监测信息。且磨损半径可调, 可充分利用盘状试样。接着, 进行了三因素三水平正交试验。最后, 受载荷信号与载流信号的相关性的启发, 开发了基于载荷信号监测载流信号稳定性的人工智能监测模型。

2、研究内容

在本研究中，通过开发载流摩擦测试仪和集成红外热成像仪、高速相机和声发射传感器等原位监测模块，开发了多光谱 - 声谱原位载流摩擦磨损测试系统，如图 1 所示。与仪器适配的两个对摩试样为销形试样（ $\Phi 7 \times 22$ mm）和盘形试样（ $\Phi 53 \times 8$ mm）。支撑轴仅保留 z 轴的移动自由度，z 轴轴向方向与摩擦幅的法相方向一致，通过气压缸向下压控制摩擦副的法向载荷加载。盘状试样及其夹具被电机通过带传动带动回转实现摩擦副相对运动的加载。可编程电源的一级直接和销形试样相连接，电流通过销形试样流到盘型试样，然后再通过夹紧螺钉传递到盘形试样夹具，再通过电刷流到电源的另外一级，形成导通回路。

多光谱 - 声谱原位监测模块可观测到多种丰富的信息。如，在 z 轴力比较小的情况下（销形试样刚刚接触到盘形试样），高速相机可观测到电弧响应乃至摩擦副起电弧及其引起的迸溅现象。红外热成像仪可观测到摩擦副的温度场云图，也可观测到销形试样底部微小的温度较高的微粒，这些微粒可能是摩擦幅黏着磨损脱落的微小粒子，也可能是电弧迸溅出来的铁水。声发射传感器也可感知到摩擦和没有摩擦条件下的区别，如在低频段（0-100 MHz）有明显的升高。综上，上述原位监测模块可较为系统的监测摩擦副的时时信息。

为了充分利用盘状试样表面，测试系统采用摆头式设计，销形状试样可绕立柱转动并且可以固定二者之间的相对位置进而可以调整销形试样在盘状试样上的磨损半径 r 以充分利用盘状试样的表面。力传感器测量的横向力是摩擦力的分力，所以开发了对应的可基于立柱与销形试样的特征尺寸以及磨损半径导出摩擦力转换系数 Y（力传感器横向力与摩擦力的商）的算法。为了削弱盘状试样的轴向跳动和增加测试的可靠性，盘状试样采用了多步装夹的方式进行装夹，首先使用盘形试样夹具三螺钉定位夹紧组件定位盘状试样，然后使用盘状试样法向夹紧零件将盘状试样法向进行夹紧，之后使用三螺钉定位夹紧组件将盘状试样夹紧，最后卸下盘状试样法向夹紧件让出摩擦副。

分别把恒定电流值 I，z 向初始载荷值 F_z 和铜饼试样上的磨损半径 r（内圈、中圈和外圈）作为三个变量，选取每个变量中等间距的三个水平进行正交试验，摩擦时间统一定为 3000s，共计 27 组试验。销试样采用 7075 铝合金制作，盘形试样采用纯铜制作。实验的详细参数如表 1 所示。通过试验可以发现，载流信号电压 U，电流 I 和电阻 R 开始相对平稳，中段波动很大，后半段相对平稳。 F_z 和 F_x 的波动具有同时性。前半段载荷信号波形尖端波动比较大，形状会变化比较大，而在磨损的后半段载荷波形尖端形状会相对稳定和均一。摩擦系数 f 在磨损前期表现出数值大且波动大的特点，而在后期波动和数值都逐渐降低。这些变化可能是由于摩擦副微粒脱落和电弧迸溅的发生和平衡又关系。

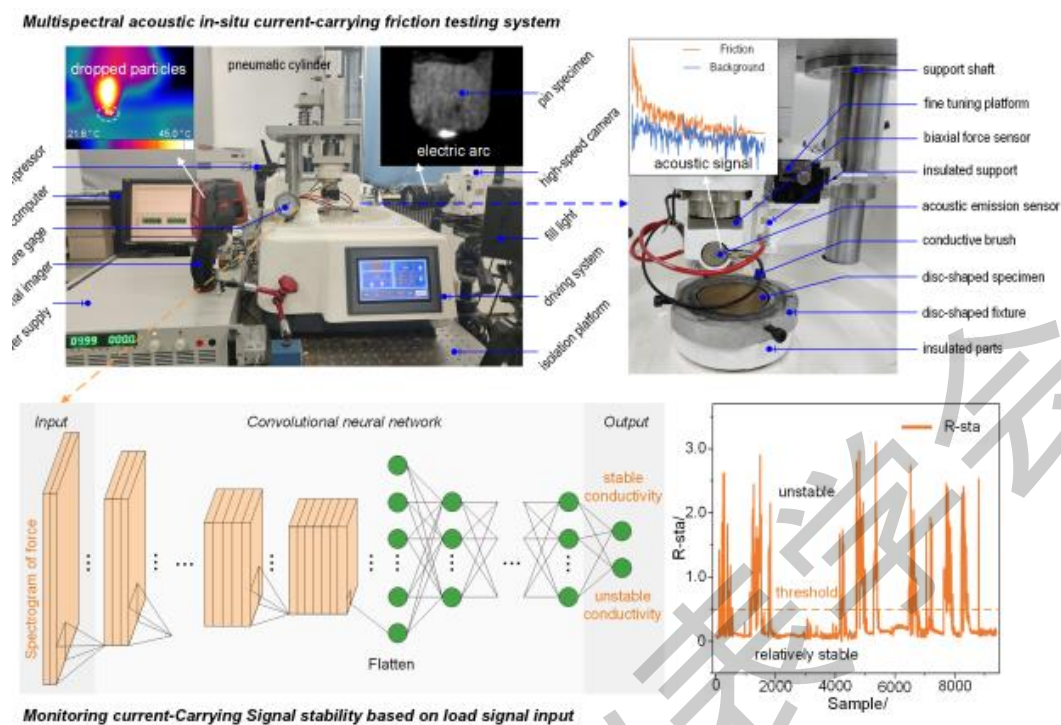


Fig.1 The structure of the instrument and monitoring model

从试验结果来看，载荷信号具有相关性。因此可将 x 轴载荷信号和 z 轴载荷信号转化的时频率图输入的卷积神经网络来监测载流信号的稳定性。建立数据集所使用的载流信号和载荷信号按照长度为 50s，步长为 5s 进行切分。如图 1 所示，神经网络的输出为动态电阻 R 是否稳定，把电阻稳定性 $R\text{-sta}$ (标准差除以方差) 低于 0.5 界定义为稳定，把 $R\text{-sta}$ 高于 0.5 定义为不稳定。所建立的数据集按 7 比 3 的比例切分训练集和验证集。使用 z 轴载荷信号作为输入的基于 AlexNet, VGG-Net, GoogleNet, ResNet 以及 DenseNet 网络的监测模型被分别被建立，这些模型对应的最高验证分类精度分别为 97.55%、97.16%、95.42%、97.52%、97.73%。上述模型的学习率为 0.001，优化器为使用 Adam 优化器，Epoch 设置为 500。

Table 1 The factors used in the experiment and levels

Original 3 variables	Value 1	Value 2	Value 3
Constant Current I/A	2	6	10
Z-direction initial load Fz/N	2	5	8
Wear radius r	Inner ring	Center circle	Outer ring

3、结 论

在本研究中，通过开发载流摩擦测试仪以及集成红外热成像仪、高速相机和声发射传感器，研发了多光谱 - 声谱原位载流摩擦磨损测试系统。仪器最大加载法相初始载荷为 8N，最大磨损速度为 100 r/min。仪器采用摆头式设计，销形试样在盘形试样上的磨损半径可调，所以所设计的仪器可充分利用盘状试样的摩擦表面，并提出了与该设计对应的计算摩擦系数的数学模型。同时，基于多步装夹法装夹盘状试样可以削弱盘状试样的轴向跳动。接着，进行了三因素三水平正交试验。典型载流信号与载荷信号的相关性分析表明，载荷信号与载流信号强相关。基于此，建立了基于 z 轴载荷信号时频图作为输入的卷积神经网络（DensenNet 修改版）监测模型来监测载流稳定性，最高监测精度为 97.73%。

参考文献

- [1] Dasic P, Franek F, Assenova E, et al. International standardization and organizations in the field of tribology[J], Industrial Lubrication And Tribology, 2003 55 (6): 287-291. Hase A, Wada M, Mishina
- [2] H. Scanning electron microscope observation study for identification of wear mechanism using acoustic emission technique[J], Tribology International, 2014 72: 51-57.