

文章编号: 1672-8785(2022)06-0035-07

基于热力收缩线特征的电接触载荷 衰减状态在线评估方法

于向阳 崔 璨 徐 宁 秦子然 杨雅雯

(海军航空大学青岛校区, 山东 青岛 266041)

摘 要: 提出了一种基于红外特征的在役飞机电接触可靠性在线评估方法。在役飞机长期的振动、腐蚀、高温等环境负荷冲击导致电接触载体表面状况恶化, 其程度往往难以定量评估。通过模型机理分析发现, 斑点化特征引起接触电阻等可靠性指标下降。然后针对某型电接触载体施加一定的扭矩载荷谱, 实时获取电接触部位的“热”信息。在低载荷、临近额定载荷状态下, 随载荷状态变化而出现的斑点化特征较为明显。由此认为, 将热力收缩线区域最高温度、等温线密集程度、连通区域面积及边界模糊化程度等作为表征指标, 能够反映电接触表面施加机械载荷状态的实际衰减程度。因此, 该方法可用作在役飞机接触电阻恶化程度的有效评估方法。

关键词: 红外特征; 电接触; 接触电阻; 在线评估; 在役飞机

中图分类号: V267 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2022.06.005

Online Evaluation Method of Electrical Contact Load Attenuation State Based on Characteristics of Thermal Contraction Line

YU Xiang-yang, CUI Can, XU Ning, QIN Zi-ran, YANG Ya-wen

(Qingdao Branch of Naval Aviation University, Qingdao 266041, China)

Abstract: An online evaluation method for electrical contact reliability of in-service aircraft based on infrared characteristics is proposed. The long-term vibration, corrosion, high temperature and other environmental loads of in-service aircraft lead to the deterioration of the surface condition of the electrical contact carrier, and its degree is often difficult to quantitatively evaluate. Firstly, it is found that the spotty characteristics cause the decrease of contact resistance and other reliability indexes through model mechanism analysis. Then a certain torque load spectrum is applied to a certain type of electric contact carrier, so as to obtain the "thermal" information of the electric contact part in real time. Under the condition of low load and near rated load, the speckle characteristics appear obviously with the change of load state. It is concluded that the maximum temperature in the area of thermal contraction line, the density of isotherms, the area of connected region and the degree of boundary blurring as the characterization indexes can reflect the actual attenuation degree of mechanical load applied on electrical contact surfaces. So it can be used as an effective evaluation method for the dete-

收稿日期: 2022-02-13

基金项目: 军内科研基金项目(425111319)

作者简介: 于向阳(1985-), 男, 吉林榆树人, 讲师, 主要研究方向为航空机电装备保障技术与应用。

E-mail: 13596453841@163.com

rioration degree of contact resistance of aircraft in service.

Key words: infrared characteristics; electrical contact; contact resistance; online assessment; aircraft in service

0 引言

随着飞机电气化、自动化水平不断提升,利用电气器件的精细化与集成化优势解决诸多工程难题的同时,也在系统中预埋了数以千万计的电接触。作为机载系统电能及控制信号传递和配送的重要节点,电接触的可靠性直接影响系统运行质量和安全^[1-4]。电接触一般以不同的接触形式存在于机载设备中。在役飞机内部工作环境的特殊性,导致其不可能像地面电力系统一样长期处于相对稳定的工作状态。经常性的振动、腐蚀、高温等环境负荷冲击,逐渐造成接触不良、接触面收缩等性能退化,使接触电阻突增。如不及及时发现,极易发生因接触部位过热而导致的触点粘连或接触部位烧蚀等恶性事件。接触电阻是衡量电接触可靠性的重要指标。

目前,由于电接触材料及其载体的多样性,国内还没有形成适用性较为广泛的性能试验、监测及评估等方面的研究体系^[5-8]。一般仅在装机前针对材料的电气、环境特性等开展型号试验;装机后则主要集中在更具经济意义的寿命预测等研究方向。目前针对接触电阻等特性参数的性能评估一般需要借助专用仪器(如基于电桥法的微欧计等)进行离位测量,但往往受限于安装环境而难以实现在线诊断。电接触部位的热效应可以作为电能传输稳定性和可靠性的一个重要因素。热成像仪能够精确地读出所检测电气部位的温度分布数据,并提取出状态特征参数,进而判断设备工作情况及其完好性。它具有体积小、效率高、适合大面积在线检测等优势,在电气设备在线检测及故障诊断中发挥了越来越重要的作用^[9-12]。

海军工程大学的孙丰瑞、杨立等人针对红外技术是否具备诊断机电设备故障的能力及其

影响因素进行了深入研究,并着力于计算方法构建与故障诊断指标提取。国内相关领域学者也越来越重视用高分辨率红外热像仪采集电接触图像,并针对电接触红外热像对比度低、噪声大的特点,积极探索图像去噪方法^[13-17]。

本文针对在役飞机电接触可靠性的影响因素,完成了接触电阻退化机理分析,设计并构建了实际工况下的电接触载体实验平台;在额定电流下进行了通电实验及红外图像在线获取,利用 MATLAB 软件完成了电接触载体表面温度分布的初步处理;针对不同载荷状态衰减程度的红外特征进行了指标提取,并探索了其在线评估方法的有效性。

1 接触电阻退化机理分析

尽管飞机电接触有固定、滑动和可分合三种接触形式,但在实际工况下,过渡区中往往存在着相似且复杂的机械、电和热耦合变化过程。任何电接触载体的表面都无法达到绝对光滑,导致相互接触的金属导体比相同材料、相同尺寸的整块金属的导电及导热性能要差,在微观上表现为一些凸起的点或者面积极小的接触面。电气系统中的电流流过电接触载体时,仅以这些凸点或小接触面为路径。这样就在电接触表面上形成电流的收缩,造成导电“斑点”并产生收缩电阻。由于凸点间隙的存在,空气中各类物质又不可避免地渗入其中,反复的机械、电、热冲击导致在电化学反应作用下形成一层氧化薄膜。这类薄膜的电阻值大于导体本身,被称作膜电阻。对于电接触而言,存在收缩电阻与膜电阻。两类电阻的总和就是接触电阻,即

$$R_j = R_s + R_b \quad (1)$$

式中, R_j 是接触电阻, R_s 是收缩电阻, R_b 是膜电阻。接触电阻与电接触材料、压力、接触

形式、表面状况等有关。在工程上, 接触电阻可以用经验公式计算:

$$R_j = \frac{k}{pm} \quad (2)$$

式中, k 是与接触材料表面状况有关的物性系数, 其值一般由试验确定; P 为电接触载体部位被施加的载荷, 一般为正向压力(单位为 N); m 由电接触受到的压力、结构及接触形式、通电过程中的实际接触面积等因素决定^[18-20]。

在役飞机电接触往往处于频繁的机械振动冲击等极端工况, 再加上热效应的作用, 接触体表面材质易受驱使发生位移, 形成多个离散的、微小面积的非均匀分布的导电斑点。作为接触体之间的相互作用路径, 相互耦合的电接触载体因导电斑点而在接触体表面上形成了微小的间隙。如果这部分间隙的介质是真空或填充介质(如空气、水和油等), 那么其导热系数与本体导热系数相差较大, 从而形成一定的接触热阻。在反复的电、热能量循环及载体机械振动冲击下, 接触体表面不断受到侵蚀, 斑点化加速, 接触电阻突增, 最终导致性能退化甚至功能失效。

为了克服电接触载体的斑点化趋势, 一般用螺栓、接触偶等载体将飞机电接触向外电路延伸, 同时通过其向电接触表面施加一定的机械载荷, 以扭矩或压力值提供接触压力, 增大有效接触面积或克服表面薄膜, 为避免接触电阻恶化提供可靠保证。

由于接触电阻热效应的存在, 电接触载体通有电流时, 其自身温度往往高于环境温度, 可以在线监测电接触区域的温度分布。一旦接触体由于某种原因而出现斑点化异常, 电接触载体表面的温度分布就会呈现不均匀性或一定的温度跳变。因此, 利用热状态特性来评估其可靠性也成为了可能。

2 实验方案

实验方案的确定应考虑测试平台与技术结合的有效性。考虑到电接触表面施加机械载荷的实际衰减程度范围, 选取额定及 5 种非额定工况, 适当配置外部参数, 在线获取实验数据。

实验对象为在役飞机某型控制器件, 其固定连接结构(螺帽和螺栓)为电接触载体。对其施加一定扭矩(无量纲化), 即以 100% 额定值(2.9 N·m)为参考, 将施加扭矩 M_X 与额定值 M_e 之比记为相对载荷状态 P_X 。表 1 列出了电接触相对载荷状态。它与圆孔型接线片构成负载电流直接耦合路径, 并通过两侧接线片分别向外延伸, 与外部控制装置、保护装置、电源及可变功率负载等组成闭合回路。额定工作电压 U_E 为 27.5 ± 1 V (直流), 额定负载电流 I_E 为 10 A。为了避免不同载荷状态的相互影响, 适当延长两组数据的采集间隔。考虑到电接触载体与外界环境的热平衡, 单次连续通电时长为 1 h。

本实验所用的测量仪器为 FLUKE Ti400 型红外热像仪, 其测量精度为 $\pm 2^\circ\text{C}$ 或 2%, 空间分辨率为 20.1 mrad。电接触表面材质的发射率 ϵ 由实验测得, 其设定值为 0.78。环境温度 t_0 为 20~25 $^\circ\text{C}$, 空气湿度为 50%, 室内不考虑太阳辐射、风力等外界环境因素的影响。

3 红外特征分析

在额定电流下通电一定时间后, 电接触区域温升趋于稳定。以热像图为原始图, 以 320×240 分辨率作初步数值化处理。图 1~图 6 为电接触载体的等温线俯视图。其中, 左侧电接触载体所施加扭矩处于不同载荷状态(左侧电接触区域, 图中左侧圆圈标识内), 右侧电接触载体所施加扭矩处于额定载荷状态 P_E (右侧电接触区域, 图中右侧圆圈内)。针对不同载荷状态的衰减程度进行红外特征分析。

表 1 电接触相对载荷状态

相对载荷状态 P_X	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_E
$P_X = M_X / M_e (\%)$	20	40	60	80	90	100
施加扭矩值 $M (\text{N}\cdot\text{m})$	0.6	1.2	1.8	2.4	2.7	2.9

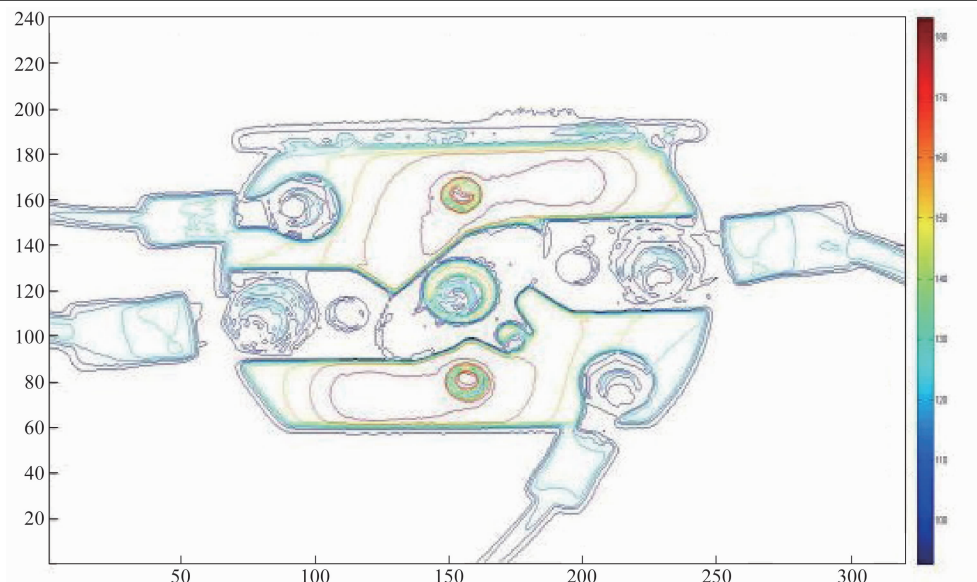


图1 电接触载体载荷状态 $P_1=20\%$ 时的表面温度谱

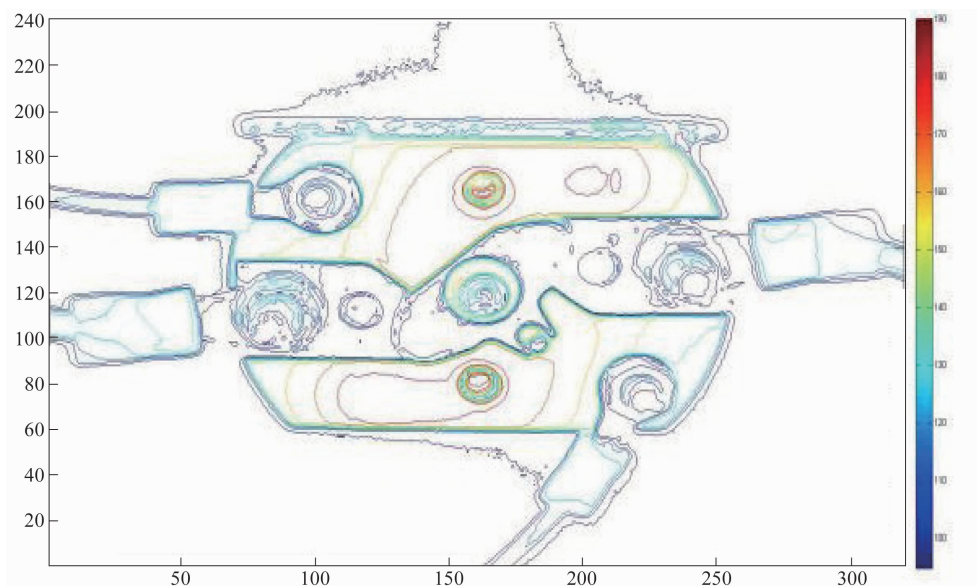
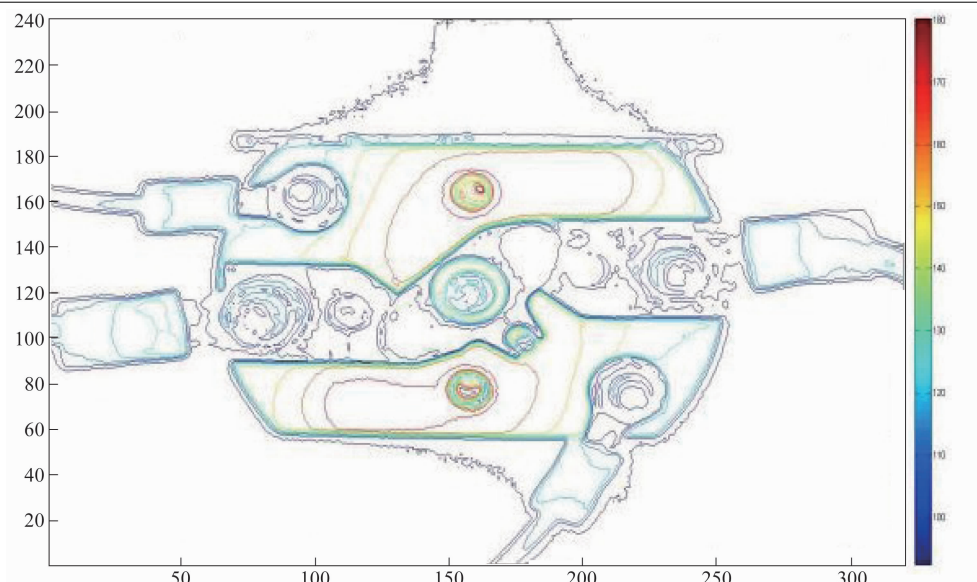
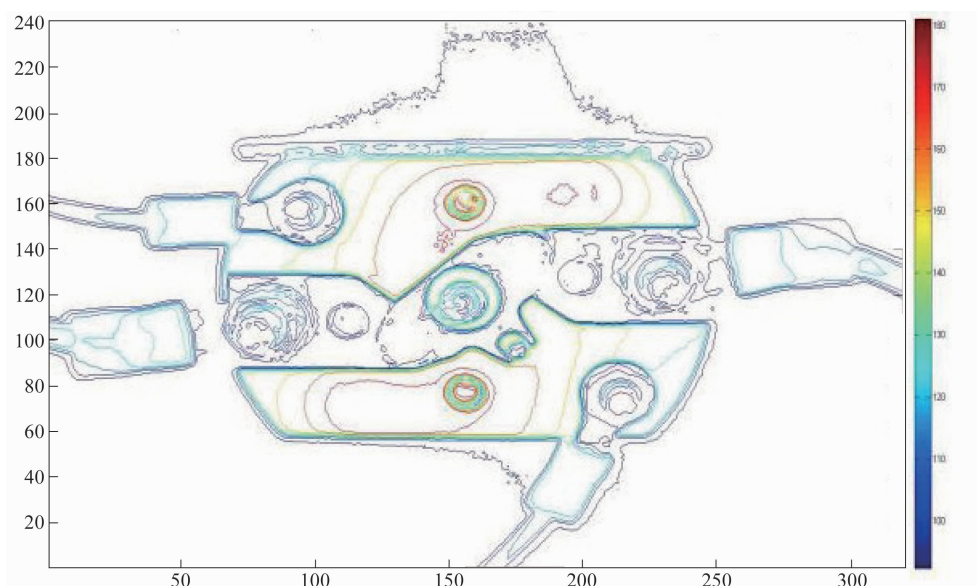


图2 电接触载体载荷状态 $P_2=40\%$ 时的表面温度谱

如图1所示,将载荷状态 P_1 与额定载荷状态 P_E 相比,该区域的等温线相对密集,形成较多的热力收缩线。各收缩线形成的封闭区域面积相对较小,最外层等温线与结构边界走势一致,且边缘分界清晰。左侧区域内热力收缩线的最高温度 T_{\max} 为 53.0°C ,位于封闭区域(圆)的正上方,呈扁平状。右侧区域内热力收缩线的最高温度 T_{\max} 为 50.0°C ,靠近几何中心上方,也呈扁平状。右侧区域内热力收缩线形成较大的连通区域,分布沿径向且呈现一定对称性,边缘分界模糊。

如图2所示,将载荷状态 P_2 与额定载荷状态 P_E 相比,该区域的等温线相对密集,边缘分界清晰。将图2与图3对比后发现,靠近载体边缘热力收缩线形成的封闭区域面积增加,且已开始连通。区域内热力收缩线左侧最高温度 T_{\max} 为 52.0°C ,右侧最高温度 T_{\max} 为 50°C 。区域内的温度分布未发生较大变化。

如图3~图5所示,将载荷状态 P_3 、 P_4 、 P_5 与额定载荷状态 P_E 相比,该区域的等温线仍旧表现出较大的相对密集程度。与之前的载荷状态相比,大部分热力收缩线边缘分界清晰,

图 3 电接触载体载荷状态 $P_3 = 60\%$ 时的表面温度谱图 4 电接触载体载荷状态 $P_4 = 80\%$ 时的表面温度谱

但部分边界热力收缩线形成的封闭区域(圆)开始破碎并模糊化。区域内热力收缩线左侧最高温度 T_{\max} 为 50.0°C , 右侧最高温度 T_{\max} 为 50.0°C , 二者已经趋于一致。区域内的温度分布未发生较大变化。

如图 6 所示, 电接触载体载荷状态 ($P_E = 100\%$) 达到额定状态时, 左右两侧区域的温度分布特征相似, 均出现面积较大的热力收缩线封闭区域以及“大块”连通区域(边界不再清晰)。

热力收缩线的发展变化情况在一定程度上

体现了不同载荷状态的温度分布特征。与额定载荷状态相比, 在低载荷状态 P_1 、 P_2 下, 由于接触压力降低, 凸点间隙未得到较好的抑制, 斑点化特征明显, 接触电阻增加, 热力收缩线呈现为大量较为密集的等温线, 各收缩线封闭区域面积相对较小, 且收缩线最高温度明显高于额定状态。在临近额定载荷状态 P_3 、 P_4 、 P_5 下, 由于接触压力逐渐增加, 凸点间隙在一定程度上得到抑制, 斑点化趋势变弱, 接触电阻趋于有所降低。与低载荷状态相比, 边界热力收缩线开始破碎并模糊化, 收缩线封闭

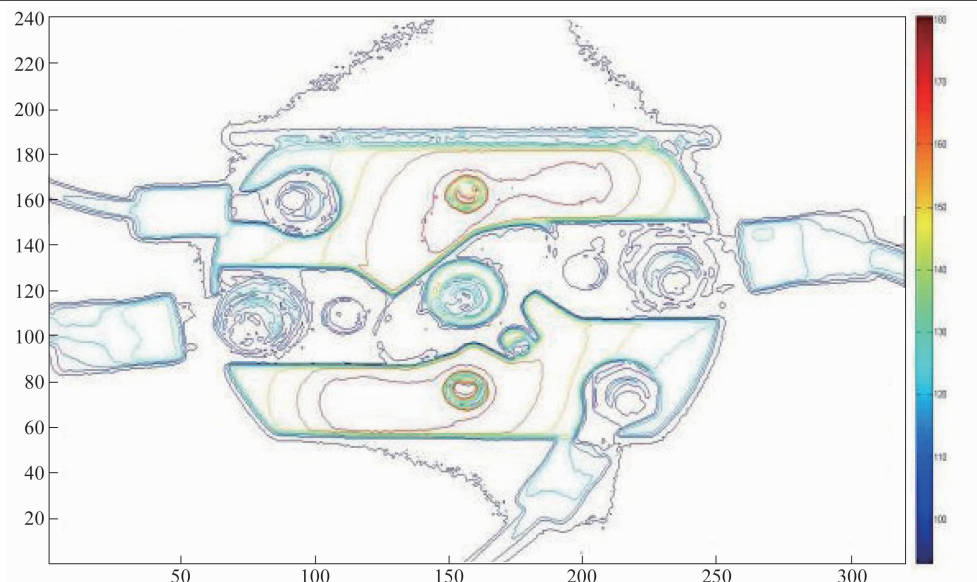


图5 电接触载体载荷状态 $P_s = 90\%$ 时的表面温度谱

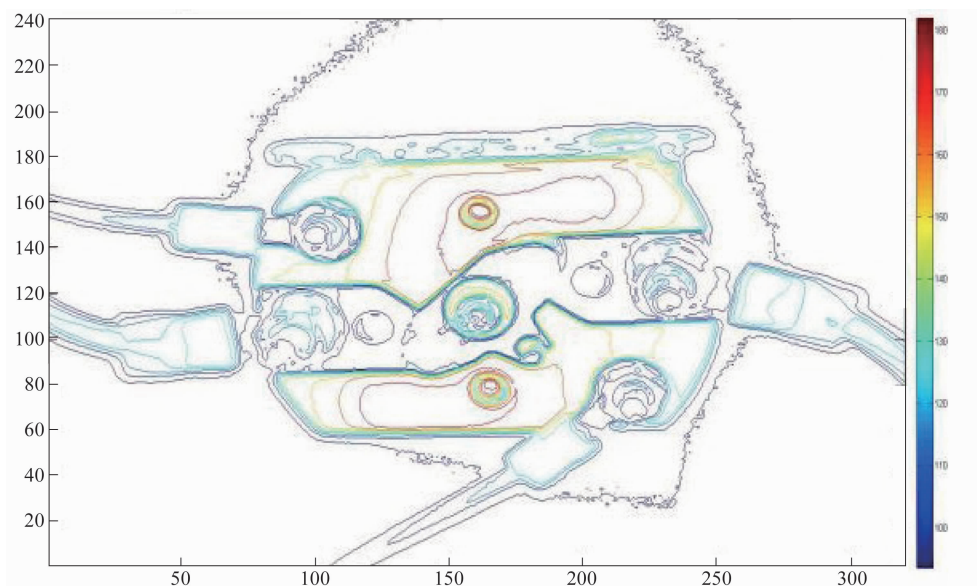


图6 电接触载体载荷状态 $P_e = 100\%$ 时的表面温度谱

区域逐渐向“大块”连通区域趋势发展，边界也不再清晰；热力收缩线最高温度与额定状态下一致，此时该指标缺乏辨识度。

从图1~图6中可以看出，在低载荷、临近额定载荷状态下，电接触载体表面温度谱随载荷状态变化而出现的斑点化特征较为明显。所显现的分布特征可以通过热力收缩线区域最高温度、等温线密集程度、连通区域面积及边界模糊化程度等表征信息来加以定性和定量区分。

4 结束语

以某型通用电气控制元件为电接触载体，将实际工况中不同相对载荷状态作为实验输入变量来获取表面实时温度谱。结果表明，电接触载荷程度与表面红外特征具有一定的关联性。在可靠性明显降低的低载荷与临近额定载荷状态下，指标评估方法更为有效。所提取的在线定量评估关联性指标对在役飞机电接触可靠性监测具有一定的技术牵引和借鉴价值。

参考文献

- [1] 郭凤仪, 陈忠华. 电接触理论及其应用技术 [M]. 北京: 电力出版社, 2008.
- [2] Slade P G. *Electrical Contacts: Principal and Application (Second Edition)* [M]. New York: CRC Press, 2014.
- [3] 刘新龙. 电接触条件下的微动磨损性能影响因素研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [4] 杜永英, 孙志礼, 王宇宁, 等. 基于热分析的电连接器的温度应力研究 [J]. 机械设计与制造, 2013, 50(10): 15-16.
- [5] 王芳, 蒋丽. 飞机电缆典型故障分析 [J]. 航空维修与工程, 2017, 62(6): 89-90.
- [6] 李欢, 王永兴, 邹积岩, 等. 航空线缆的绝缘的加速老化试验研究 [J]. 电器与能效管理技术, 2017, 59(7): 15-19.
- [7] 刘晓琳, 袁昆. 基于互相关算法的飞机导线故障诊断与定位系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(12): 3903-3905.
- [8] 周博, 王晓娟, 张琦, 等. 基于电接触接触热阻的传热新模型研究 [J]. 电工材料, 2019, 47(3): 21-24.
- [9] 赵斌, 王建华. 基于 PSO-PB 的红外温度传感器环境温度补偿 [J]. 传感器与微系统, 2015, 34(2): 47-49.
- [10] 丁健. 红外在线测温装置在电力系统中的应用 [J]. 合肥学院学报(自然科学版), 2011, 21(3): 40-43.
- [11] 王星宇, 杨立. 热像仪在机舱蒸汽管路巡检中的应用 [J]. 红外, 2017, 38(3): 37-40.
- [12] 于向阳, 姚凌虹, 赵时, 等. 基于红外特征的飞机导线绝缘层隐性故障在线诊断方法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(10): 157-164.
- [13] 何怡刚, 琚天公, 李兵, 等. 基于温度梯度的电力设备红外图像盲元块补偿 [J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(5): 1-8.
- [14] 成军昌, 刘继勇, 刘星. 基于关联信息的红外微波复合探测技术研究 [J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(10): 6-9.
- [15] 王吉军, 周校, 李岩. 便携式红外热像仪测温误差分析及修正 [J]. 红外, 2017, 38(3): 37-40.
- [16] 贾文抖, 范春利, 孙丰瑞, 等. 基于红外测温的内部点热源的识别 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(3): 837-844.
- [17] 吕事桂, 杨立, 范春利, 等. 基于对面红外检测的缺陷混沌-LM 混合识别算法 [J]. 工程热物理学报, 2013, 34(7): 1352-1356.
- [18] Wu X F, Zhou Z, Zhou W M. Electrical contact resistance in filaments [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(19): 193115.
- [19] 任万滨, 崔黎, 翟国富, 等. 电连接器接触件插拔特性与接触电阻的仿真分析 [J]. 机电元件, 2012, 32(3): 40-44.
- [20] 吴少雷, 冯玉, 吴凯, 等. 基于有限元的三维粗糙表面电接触模型构建与仿真分析 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2018, 41(11): 1441-1445.