航空接地故障电弧损伤影响研究与预测

张铁纯[1],廖茂桥[1],张 波[2],田雷雷[2],司晓亮[2]
(1.中国民航大学航空工程学院,天津 300300;2.合肥航太电物理技术有限公司,合肥 230031)

摘 要:故障电弧是飞机电气线缆互联系统(EWIS, electrical wire interconnect systems)最为常见的失效模式之一。为了研究不同条件参数对电弧损伤的影响,本文根据SAE AS5692标准中的振动实验方法,模拟因飞机振动导致的线束与燃油管路接地故障电弧,开展了机载28 V直流电源、400 Hz/115 V交流电源条件下的接地故障电弧损伤实验研究,并基于流-固-热耦合数值计算方法建立了电弧损伤预测模型。结果表明:交流电源条件下的电弧由于瞬时功率较高造成线束熔断时间相比直流电源条件下更短,其电弧损伤明显小于直流电源条件下的电弧损伤;伴随振动频率增加,线束与管路接触时间延长,电弧损伤与振动频率呈正相关性;将实验与仿真结果进行对比,两者误差较小,有效验证了电弧损伤预测模型的适用性,为飞机EWIS线束安全评估提供一定参考。

关键词:电气线缆互联系统(EWIS);接地故障电弧;故障电弧损伤;流-固-热耦合
中图分类号:TM645 文献标志码:A 文章编号:1674-5590(2025)01-0075-08

Study and prediction of the effect of aviation grounded faults arc damage

ZHANG Tiechun[1], *LIAO Maoqiao*[1], *ZHANG Bo*[2], *TIAN Leilei*[2], *SI Xiaoliang*[2]
(1. *College of Aeronautical Engineering, CAUC, Tianjin* 300300, *China*; 2. *Hefei Hangtai Electrophysics Co., Ltd., Hefei* 230031, *China*)

Abstract: Arc fault is one of the most common failure modes in aircraft electrical wire interconnect systems (EWIS). In order to study the impact of different condition parameters on the arc damage, this paper simulated the grounded fault arc of wire harness and fuel pipeline caused by aircraft vibration according to the vibration experimental method in SAE AS5692 standard. The experimental research on grounded fault arc damage was carried out under the conditions of airborne 28 V direct current (DC) power supply and 400 Hz/115 V alternating current (AC) power supply. And based on the numerical computation method of fluid-solid thermal coupling, an arc damage prediction model was established. The results show that the arc under AC power conditions has a shorter wire harness melting time due to higher instantaneous power compared to DC power conditions, and its arc damage is significantly smaller than that under DC power conditions. As the vibration frequency increases, the contact time between the wire harness and the pipeline is prolonged, and the arc damage is positively correlated with the vibration frequency. Comparing the experimental and simulation results, the error between the two is relatively small, which effectively verifies the applicability of the arc damage prediction model and provides a certain reference for the safety assessment of the aircraft EWIS wire harness.

Key words: electrical wire interconnect systems (EWIS); grounded fault arc; fault arc damage; fluid-solid-thermal coupling

随着多电与全电飞机的应用,航空线缆的需求与日俱增且线缆所处环境恶劣,进一步增加了触发故障电弧的概率,而故障电弧具有高温、高能、瞬时等特性,极易对线束周围重要部件造成热损伤,严重影响飞行安全。

对于电弧的研究,国内外学者早期基于电弧试验做了大量有关电弧模型的研究。Schavemaker等[1]基于Cassie模型和Mayr模型进行改进,提出了Schavemaker电弧模型。郭凤仪等[2]对Mayr模型进行改进,可精确描述电弧的动态特性。以上电弧模型均是根据电弧波形中电流和电压的变化,利用数学模型对电弧波形进行动态分析和优化,但模型并未对电弧的电磁场、温

收稿日期:2024-03-19;修回日期:2024-05-15 基金项目:装备预研航空工业联合基金资助项目(20230044067001)
作者简介:张铁纯(1972—),男,天津人,副教授,硕士,研究方向为飞机结构与持续适航.

度场变化进行分析。随着对电弧进行更深入的研究，研究人员借助数值仿真软件对电弧的温度场、电场、磁场进行分析。Yan 等[3]运用 Phoenics 软件对电弧进行仿真研究，对电弧温度特性以及电场分布进行可视化处理，但该模型只模拟了电弧间隙放电的过程，并未研究电弧对其周围部件的热损伤影响。

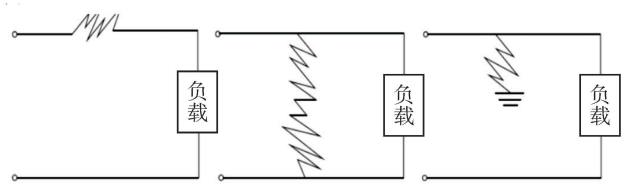
针对电弧损伤方面的研究，国外研究机构的 Linzey 等[4-5]根据飞机线束布局和线束所处环境建立相应的电弧损伤实验平台，并根据实验结果构建电弧损伤模型和数据库，用以评估电弧损伤程度。孙晶等[6]基于流–固–热多物理场耦合研究了电弧对管路的损伤效应，并根据不同损伤类型量化分析了电弧能量，但其仿真模型中设置的故障电流、故障电压、故障电弧持续时间等重要参数均为大致范围，导致仿真结果与实际结果存在较大误差。孟珍等[7]基于不同损伤类型将电弧能量量化分析，进一步得到电弧损伤数学模型，但该研究中缺少实验数据支撑且在研究中并未考虑故障电弧触发方式以及不同环境和材料对故障电弧损伤结果的影响，未能证明该模型的适用性。

综上，针对故障电弧损伤研究中存在的不足，本文首先根据 SAE AS5692 标准[8]中的振动实验方法，设计接地故障电弧损伤实验，开展了机载 28 V 直流电源（DC，direct current）、400 Hz/115 V 交流电源（AC，alternating current）条件下的线束与管路接地故障电弧损伤效应研究，详细分析了电源类型和振动频率对电弧损伤的影响，最后根据实验建立电弧损伤模型用以预测和评估损伤情况，通过对比实验与仿真结果验证了该模型的有效性，为飞机电气线缆互联系统（EWIS，electrical wire interconnect systems）设计和安全评估提供一定的理论支撑。

1　故障电弧理论

1.1　故障电弧类型

在飞机 EWIS 中以线路结构和接线方式对故障电弧分类，可分为串联故障电弧、并联故障电弧和接地故障电弧，3 种故障电弧示意图，如图 1 所示。



（a）串联故障电弧　（b）并联故障电弧　（c）接地故障电弧

图 1　故障电弧分类

Fig.1　Classification of fault arcs

受飞机环境与内部空间影响，在 3 种故障电弧中，接地故障电弧较为常见，一般发生于飞机中一些紧挨机载结构件的线缆，如燃油管路附近和机载设备外壳相邻处的线缆等。当这些线缆绝缘层被破坏时，线缆导体与部件接触会导致短路从而产生电弧，此时线缆为阴极端，而管路、外壳等部件为阳极端，电弧的热效应会直接作用于这些部件，产生的电弧高温造成极大的结构性损伤，严重影响飞行安全。

1.2　故障电弧能量模型

假设 P_{arc} 为故障电弧功率，U_0 为工作电压、I_{arc} 为故障电流、U_{arc} 为故障电压、R_{line} 为线路电阻，则故障电弧功率的表达式为

$$P_{arc} = U_{arc}I_{arc} = U_0 I_{arc} - I_{arc}^2 R_{line} \tag{1}$$

根据故障电弧功率 P_{arc} 与故障电弧持续时间 t，可以得出故障电弧能量 E_{arc}，即

$$E_{arc} = Q_{arc} = \int_0^t U_{arc}I_{arc}\,\mathrm{d}t = \overline{P}_{arc}\,t = \overline{U}_{arc}\,\overline{I}_{arc}\,t \tag{2}$$

式中：$\overline{P}_{arc}$ 为故障电弧平均功率；$\overline{U}_{arc}$ 为平均故障电压；$\overline{I}_{arc}$ 为平均故障电流。通过实验获得故障电流 I_{arc}、故障电压 U_{arc}、故障电弧持续时间 t，经过式（2）计算可得到仿真计算中的故障电弧热源 Q_{arc}。

在实际情况中，电弧会以辐射、对流、散热、金属颗粒物的形式散发到周围介质当中，导致电弧能量不会全部进入到目标物中，将故障电弧总能量乘以分散系数 γ，可计算目标物吸收的电弧能量 E，即

$$E = \gamma E_{arc} \tag{3}$$

2　接地故障电弧损伤实验

2.1　实验设计

接地故障电弧的发生会造成飞机部件损伤，导致飞机部分系统失效，严重影响飞行安全。本文以常见的接地故障电弧为例，模拟因飞机振动导致的线束与燃油管路接触短路产生接地故障电弧，接地故障电弧结构示意图如图 2 所示。

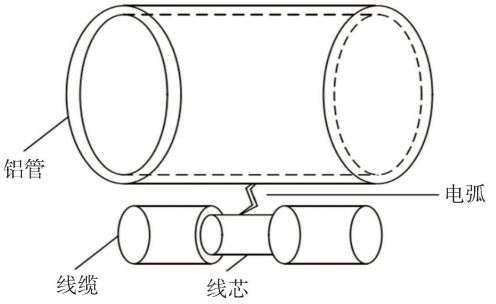


图 2　接地故障电弧结构示意图

Fig.2　Schematic diagram of grounded fault arc structure

接地故障电弧实验平台搭建如图 3 所示，将线束导体裸露部分放置于燃油管路正上方，线束导体与燃油管路的隔离间距为 d[9]。燃油管路接地，线束导体两端分别接入实验电路中，并置于振动平台上，通过振动平台实现线束导体的振动。

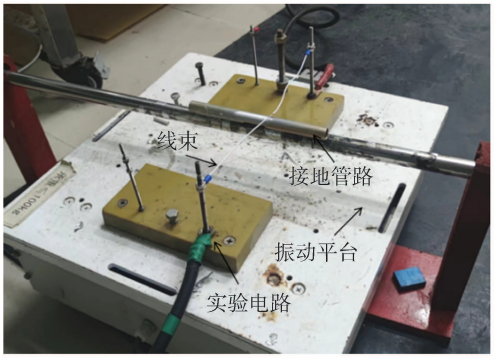


图 3　接地故障电弧实验平台

Fig.3　Grounded fault arc test platform

本文采用的实验线缆为聚酰亚胺复合薄膜/聚四氟乙烯组合绝缘电线，线束选取单芯 16 号线，并在线束中间位置剥去 1 cm 的绝缘胶层，使线束导体裸露，实验布局如图 4 所示。燃油管路所用材质为AL6061–6T 铝合金，其直径、厚度、长度分别为 16.16、1.00、100.00 mm。

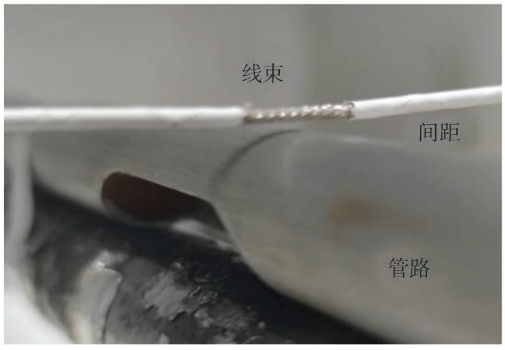


图 4　接地故障电弧实验布局

Fig.4　Layout of grounded fault arc test

实验采用机载 28 V 直流电源和 400 Hz\115 V 交流电源，电路按照图 5 构建接地故障电弧实验电路。

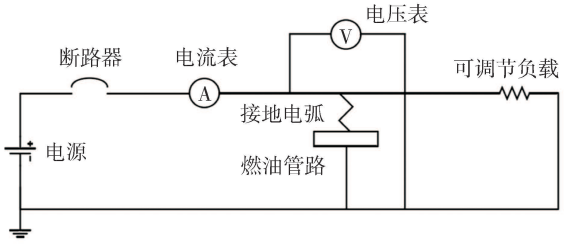
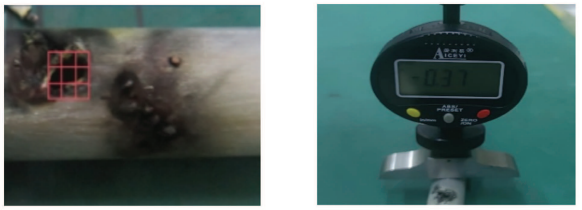


图 5　接地故障电弧实验电路

Fig.5　Grounded fault arc test circuit

2.2　损伤测量

由于电弧对管路的损伤是不规则的，一般采用图 6 所示的方法测量管路的损伤体积[4]。利用网格法计算管路的损伤面积（图 6(a)），对烧蚀区域利用 1 mm^2 方格进行统计，若方格损伤区域占方格面积的 25%及以上，则视为 1 mm^2。利用深度仪测量法获取管路的损伤深度（图 6(b)），可通过测量多处的损伤深度取平均值。基于损伤面积和损伤深度即可计算出故障电弧对燃油管路造成的损伤体积。



(a)网格法　　(b)深度仪测量法

图 6　损伤体积测量方法

Fig.6　Damage volume measurement method

3　实验结果分析

3.1　电源类型影响分析

为研究不同电源类型对故障电弧损伤的影响，实验分别采用机载 28 V 直流电源和 400 Hz\115 V 交流电源，且均通过 15 A 工作电流。参照 SAE AS5692 标准中线束振动频率范围为 20~60 Hz，本文实验中振动平台的频率 f 和垂直振幅 A 分别设为 45 Hz 和 2 mm，隔离间距 d 设置为 1 mm。

图 7 是两种电源条件下产生的故障电弧对燃油管路造成的损伤，两种电源条件下产生的故障电弧均会对燃油管路造成明显的损伤。在线路中，断路器均未跳闸，但线束均被熔断。



(a) 28V DC 15A　　(b)115V AC 15A

图 7　直流与交流电源条件下的故障电弧损伤

Fig.7　Fault arc damage under DC and AC power supply conditions

根据图 6 所示的损伤体积测量方法，将每组实验重复测量 3 次，取平均值得出故障电弧的损伤体积。直流与交流电源条件下的故障电弧损伤体积如表 1 所示。

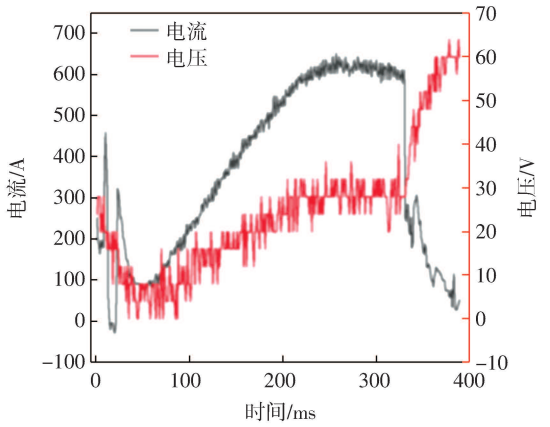
表 1　直流与交流电源条件下的故障电弧损伤体积

Tab.1　Fault arc damage volume under DC and AC power supply conditions

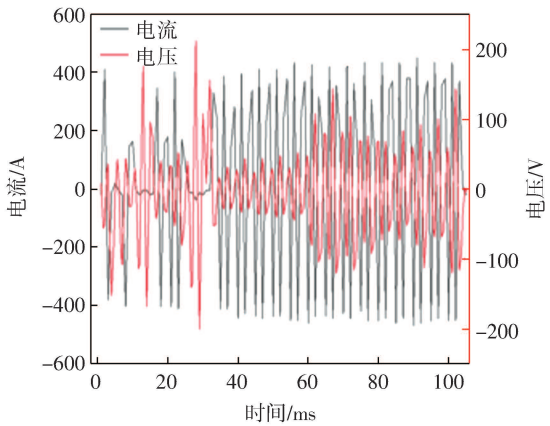
电气参数	故障电弧损伤体积/mm³			
	结果 1	结果 2	结果 3	平均值
28 V DC 15 A	36.63	36.48	35.79	36.30
115 V AC 15 A	19.86	19.93	21.32	20.37

由表 1 可知，在 28 V 直流电源条件下燃油管路的故障电弧损伤体积平均值为 36.30 mm³，115 V 交流电源条件下燃油管路的故障电弧损伤体积平均值为 20.37 mm³，两者损伤相差 15.93 mm³。

为分析不同电源类型造成的故障电弧损伤差异，图 8 为振动频率 45 Hz 时两种电源条件下的故障电弧波形图。



(a) 28 V DC 15 A



(b) 115 V AC 15 A

图 8　直流与交流电源条件下振动频率 45 Hz 下的故障电弧波形

Fig.8　Fault arc waveform under 45 Hz vibration frequencies of DC and AC power supply conditions

根据式(1)分别计算出直流和交流电源条件下的故障电弧功率。图 9 为直流与交流电源条件下的故障电弧功率对比图。从故障电弧功率对比来看，交流电源条件下的故障电弧功率整体远大于直流电源条件下的故障电弧功率，但交流电源条件下的故障电弧持续时间为仅为 110 ms，明显小于直流电源条件下的故障电弧持续时间 403 ms。

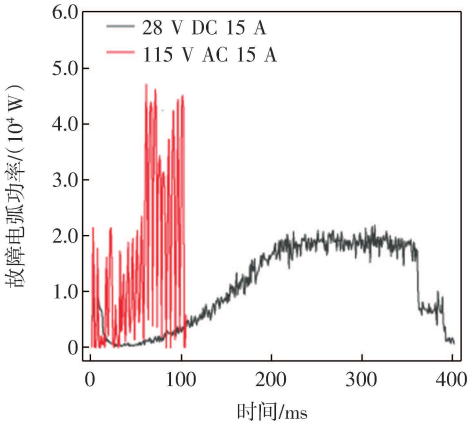


图 9　故障电弧功率对比

Fig.9　Fault arc power comparison

结合式(2)分别计算出两种电源条件下的故障电弧能量和平均功率，直流与交流电源条件下的电弧能量和平均功率结果如表 2 所示。

表 2　直流与交流电源条件下的故障电弧能量和平均功率

Tab.2　Fault arc energy and average power under DC and AC power supply conditions

电气参数	能量/J	平均功率/W	持续时间/ms
28 V DC 15 A	4 267.7	10 590	403
115 V AC 15 A	1 382.9	12 572	110

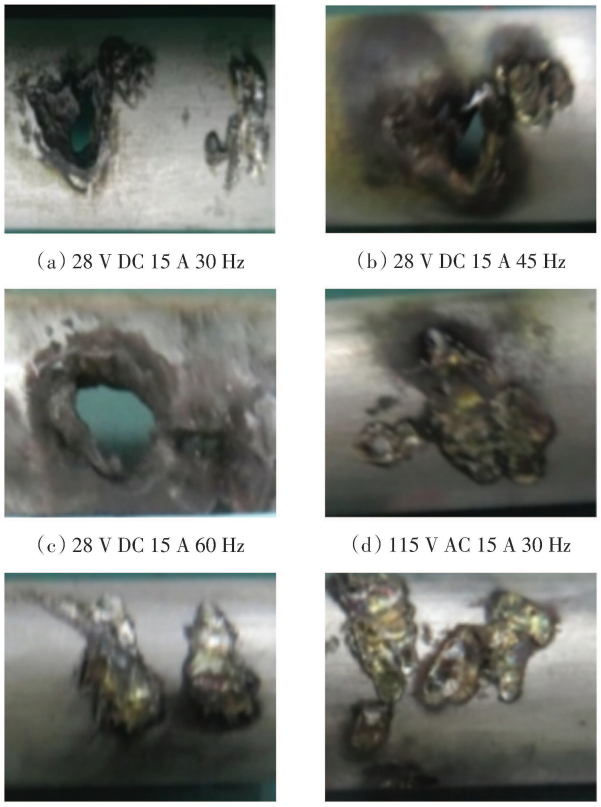
从表 2 可以看出，交流电源条件下的故障电弧平均功率(12 572 W)大于直流电源条件下的故障电弧平均功率(10 590 W)，与图 9 中交流电源条件下的故障电弧功率高于直流电源条件下的故障电弧功率保持一致，但由于交流电源条件下故障电弧功率过高导致线束熔断时间更短，使得交流电源条件下的故障电弧持续时间(110 ms)远低于直流电源条件下的故障电弧持续时间(403 ms)。故障电弧持续时间差异导致交流电源条件下的故障电弧能量(1 382.9 J)远低于直流条件下的故障电弧能量(4 267.7 J)，最终造成的交流电源条件下的故障电弧损伤体积为 20.37 mm³，远低于直流电源条件下的故障电弧损伤体积 36.30 mm³。结合实验与表 2 结果分析，交流电源条件下故障电弧造成的损伤结果低于直流电源条件下故障电弧造成的损伤结果。

3.2　振动频率影响分析

在实际情况中，故障电弧造成的损伤体积大小不仅受电气参数影响，也受触发故障电弧的环境影响。为研究不同振动频率对电弧损伤影响，在 3.1 节的实

验基础上，分别选取 30、45、60 Hz 3 种振动频率作为实验变量，研究不同振动频率对燃油管路的故障电弧损伤影响。

图 10 是不同振动频率对燃油管路的故障电弧损伤。在 3 种振动条件下，燃油管路表面均会有不同程度的损伤且断路器均未跳闸，线束均被熔断。



(a) 28 V DC 15 A 30 Hz　(b) 28 V DC 15 A 45 Hz

(c) 28 V DC 15 A 60 Hz　(d) 115 V AC 15 A 30 Hz

(e) 115 V AC 15 A 45 Hz　(f) 115 V AC 15 A 60 Hz

图 10　不同振动条件的故障电弧损伤

Fig.10　Fault arc damage under different vibration conditions

使用图 6 的测量方法，测得不同振动频率下的电弧损伤体积，如表 3 所示。

表 3　不同振动频率下的故障电弧损伤体积

Tab.3　Fault arc damage volume under different vibration frequencies

电气参数	振动频率/Hz	故障电弧损伤体积/mm³			
		结果 1	结果 2	结果 3	平均值
28 V DC 15 A	30	30.85	30.03	29.33	30.07
	45	36.63	36.48	35.79	36.30
	60	43.89	45.13	44.39	44.47
115 V AC 15 A	30	18.69	19.16	17.32	18.39
	45	19.86	19.93	21.32	20.37
	60	22.87	23.28	23.24	23.13

根据表 3 中的损伤数据绘制出故障电弧损伤体积平均值随振动频率变化的曲线，如图 11 所示。由图 11 可知，在相同电气参数下，故障电弧损伤体积的平均值随振动频率增加而持续增加，且在直流电源条件下，故障电弧损伤体积随振动频率变化较为明显。

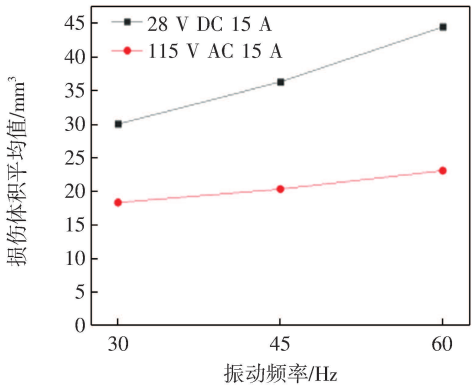
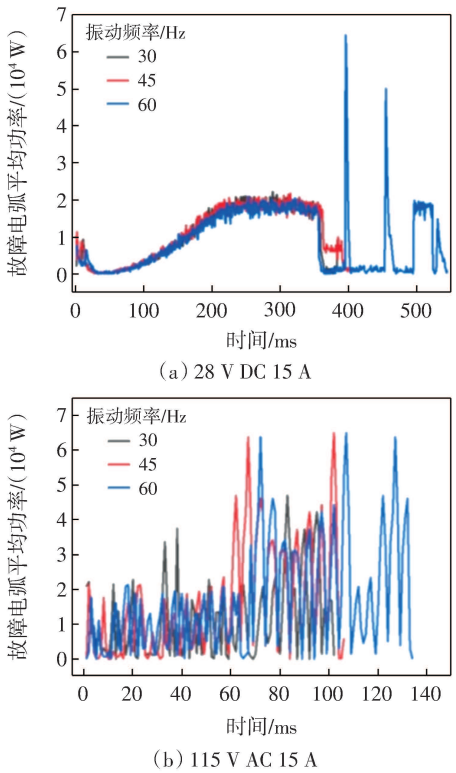


图 11　故障电弧损伤体积平均值随振动频率变化曲线

Fig.11　Average value of fault arc damage volume changes with vibration frequency

根据采集的故障电弧波形，结合式(1)计算出不同振动频率下的故障电弧功率，并绘制出不同振动频率下故障电弧平均功率对比图，如图 12 所示。



(a) 28 V DC 15 A

(b) 115 V AC 15 A

图 12　不同振动频率下的故障电弧平均功率对比图

Fig.12　Comparison of fault arc average power under different vibration frequencies

从图 12 中可看出，在相同的振动频率下，交流电源条件下的故障电弧持续时间均小于直流电源条件下的故障弧持续时间，这一点与 3.1 节的结论一致，但两种故障电弧持续时间均随振动频率呈正相关性，且在振动频率 60 Hz 情况下的故障电弧持续时间整体大于振动频率 45、30 Hz 时的故障电弧持续时间。

结合式(2)计算出不同振动频率下的故障电弧能量与平均功率,结果如表4 所示。

表 4　不同振动频率下的故障电弧能量与平均功率

Tab.4　Fault arc energy and average power under different vibration frequencies

电气参数	振动频率/Hz	能量/J	平均功率/W	持续时间/ms
28 V DC 15 A	30	4 117.9	10 583	389
	45	4 267.7	10 590	403
	60	5 669.9	10 598	535
115 V AC 15 A	30	1 282.1	12 570	102
	45	1 382.9	12 572	110
	60	1 685.7	12 580	134

通过表 4 数据对比发现:在相同的电气参数下故障电弧平均功率差距较小;随着振动频率由 30 Hz 增加至 60 Hz 后,线束与管路接触时间延长,使得直流与交流电源条件下的故障电弧持续时间分别增加了 146 ms 和 32 ms。在故障电弧平均功率差距较小的情况下,由式(2)可知,此时故障电弧能量受故障电弧持续时间影响较大,其中,直流电源条件下故障电弧能量增加 1 552.0 J, 交流电源条件下故障电弧能量增加 403.6 J,最终导致两种电源条件下的故障电弧损伤体积分别增加 14.40 mm^3 和 4.74 mm^3。结合实验和表 4 故障电弧能量结果分析,在相同的电气参数下,故障电弧损伤体积随振动频率呈正相关性。

4　电弧损伤预测模型

由于故障电弧损伤实验成本较高、场景复现难度较大[10-11],国内外对于故障电弧损伤研究多以仿真预测为主,其中,Linzey 等[4-5]建立的电弧损伤仿真模型可较准确地评估不同实验环境下的故障电弧损伤体积。国内研究多以仿真研究为主[12-15],但由于缺少实验数据作为支撑,导致误差较大[16-17]。因此,本文根据上述实验确认模型的几何参数,并基于流–固–热耦合计算方法建立了电弧损伤预测模型,利用该模型预测不同电源条件、振动频率的故障电弧损伤体积。故障电弧损伤模型有效性验证流程图如图 13 所示。

4.1　几何模型

故障电弧损伤仿真模型构建如图 14 所示, 模型包括燃油管路、电弧热源、空气域,管内无流体,其中,空气域气压为 1.01 Pa,空气流速为 0.2 m/s。

电弧热源与燃油管路的间隔距离为 1 mm。燃油管路所用材质为 AL6061–6T 铝合金,采用 Comsol 软件自适应网格划分。

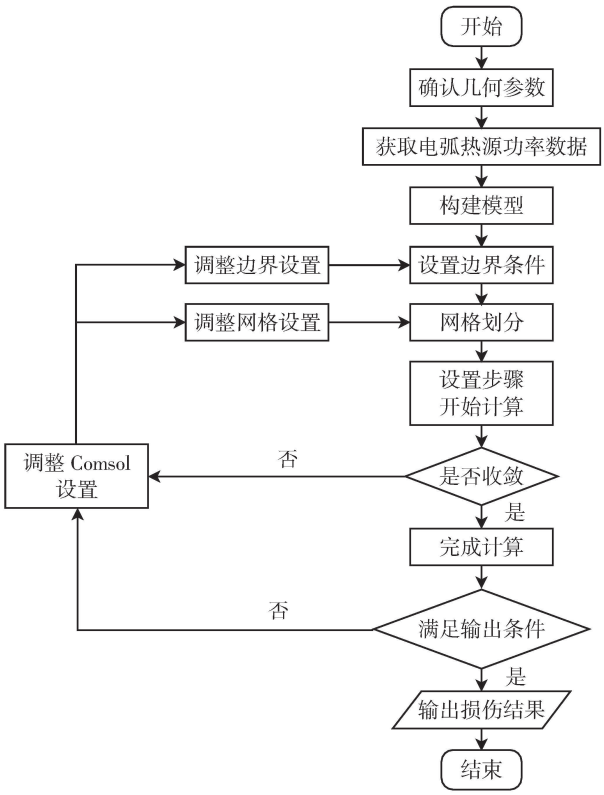


图 13　故障电弧损伤模型有效验证流程图

Fig.13　Flow chart for effective verification of fault arc damage model

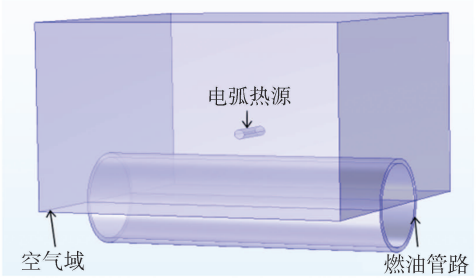


图 14　故障电弧损伤仿真摸型

Fig.14　Fault arc damage simulation model

4.2　基本假设与控制方程

在故障电弧烧蚀周围部件的过程中,电弧能量主要以热传导、对流、辐射 3 种形式进行能量传递。为简化仿真模型,本文选取固体和流体传热模块对故障电弧热源周围空气流场、温度场和燃油管路热损伤进行模拟。

在以往的研究中,由于故障电弧随机性较强,往往因为故障电弧持续时间、故障电弧平均功率等关键数据与实验数据差异较大,导致故障电弧损伤模型的预测结果不准确。为了提高模型的准确性,以表 4 中的故障电弧平均功率作为电弧热源数据,故障电弧持续时间作为计算时长,计算出不同条件下的电弧损伤。

空气的三维流动与传热的微分方程包括:连续性方程、动量方程和能量方程[6-7],即

（1）连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho U) = 0 \tag{4}$$

（2）动量方程

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla\cdot(\rho U \otimes U) = -\nabla\rho + \nabla\tau + S_{\mathrm{M}} \tag{5}$$

（3）能量方程

$$\frac{\partial(\rho h_{\mathrm{tot}})}{\partial t} - \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla\cdot(\rho U h_{\mathrm{tot}}) = \nabla\cdot(\lambda\nabla T) + \nabla\cdot(U\tau) + US_{\mathrm{M}} + S_{\mathrm{E}} \tag{6}$$

式中：ρ 为空气密度；∇为梯度算子；U 为速度；$\rho U \otimes U$ 表示为$-2\rho U+U$ 的运算；τ 为粘性应力；S_{M} 为动量源项；h_{tot} 为比总焓；λ 为导热系数；T 为温度；S_{E} 为能量源项。

4.3　结果对比

为更准确地预测电弧损伤并评估电弧是否对管路造成击穿漏油风险，根据铝合金材料熔化温度为933 K，汽化温度 2 740 K[6-7]，通过设置温度阈值分别计算出电弧对燃油管路造成的电弧损伤体积和最大损伤深度。

以 28 V 直流电源、振动频率 45 Hz 为例，图 15 为该条件参数下的管路损伤区域的仿真图，其中，管路损伤体积为39.5 mm³，最大损伤深度为 1 mm。

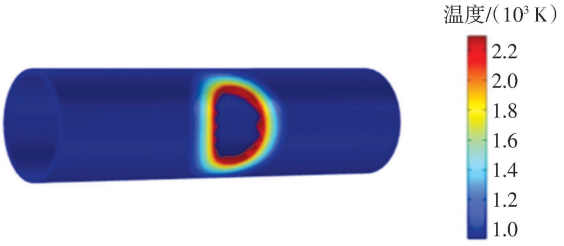


图 15　直流 28 V、振动频率 45 Hz 的管路损伤区域仿真图

Fig.15　Simulation diagram of pipeline damage area with 28 V DC and 45 Hz vibration frequency

根据表 4 中的电气参数和振动频率，采用相同的计算方法模拟计算出其他条件参数下的故障电弧损伤体积和最大损伤深度。故障电弧损伤体积、最大损伤深度结果对比如表 5 和表 6 所示。

根据表 5 和表 6 数据可知：直流电源条件下的故障电弧损伤较大，且均造成管路击穿；交流电源条件下的故障电弧虽然对管路造成一定损伤，但管路均未被击穿。由于模型忽略了重力以及绝缘层等因素影响，使得仿真结果略大于实验结果，但误差较小且损伤变化趋势与实验保持一致。因此，该模型可根据电弧波形，有效预测电弧损伤情况并用以评估故障电弧对燃油管路的击穿风险。

表 5　故障电弧损伤体积对比

Tab.5　Comparison of fault arc damage volume

电气参数	振动频率/Hz	故障电弧损伤体积/mm³		误差/%
		实验结果	仿真结果	
28 V DC 15 A	30	30.07	32.34	7.5
	45	36.30	38.43	5.8
	60	44.47	48.10	4.0
115 V AC 15 A	30	18.39	19.78	7.5
	45	20.37	21.40	5.0
	60	23.13	24.23	4.7

表 6　最大损伤深度结果对比

Tab.6　Comparison of maximum damage depth results

电气参数	振动频率/Hz	最大损伤深度/mm		误差/%
		实验结果	仿真结果	
28 V DC 15 A	30	1.00	1.00	0
	45	1.00	1.00	0
	60	1.00	1.00	0
115 V AC 15 A	30	0.31	0.33	6.4
	45	0.59	0.62	5.0
	60	0.74	0.79	6.7

5　结语

本文首先根据 SAE AS5692 标准中的振动实验方法设计出线束与燃油管路接触的接地故障电弧损伤实验，分析了不同电源类型和振动频率对电弧损伤影响，最后基于流–固–热耦合计算方法建立了电弧损伤模型用以预测电弧损伤情况，可得出以下结论：

（1）在相同振动频率下，由于交流电源条件下的故障电弧功率较高，使得短时间内线束更快熔断形成断路，大幅度减小了故障电弧作用时间，导致交流电源条件下故障电弧能量小于直流条件下的故障电弧能量，其造成的故障电弧损伤体积小于直流条件下损伤体积；

（2）在相同的电气参数下，虽然故障电弧平均功率差距较小，但随着振动频率增加，线束与管路接触时间延长，使得故障电弧持续时间增加，故障电弧能量增加，燃油管路损伤与振动频率呈正相关性；

（3）故障电弧损伤预测模型结果与实验结果变化趋势保持一致且误差较小，该模型可为航空接地故障电弧损伤预测和管路击穿风险评估提供一定参考。

参考文献：

[1] SCHAVEMAKER P H, VAN DER SLUI L. An improved Mayr-type arc model based on current-zero measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(2): 580-584.

[2] 郭凤仪，王　鑫，刘艳丽. 基于 Mayr 模型改进的适用于串联故障电

弧的新模型[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(2): 67–71.
[3] YAN J D, FANG M T C, HALL W. The development of PC based CAD tools for auto–expansion circuit breaker design[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(1): 176–181.
[4] LINZEY W, TRASKOS M, BRUNING A, et al. 1 development of an arc damage modeling tool[G]. Sterling, VA: Lectromechanical Design Company, 2007.
[5] LINZEY W, TRASKOS M, MAZZUCHI T. Development of the electrical wiring interconnection system risk assessment tool[G]. Sterling, VA: Lectromechanical Design Company, 2010.
[6] 孙　晶, 王　莉, 孟　珍. 基于流固热耦合模型的并行电弧损伤影响分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2015, 47(6): 917–923.
[7] 孟　珍, 王　莉, 孙　晶, 等. 航空并行电弧失效影响模型[J]. 电工技术学报, 2015, 30(22): 263–268.
[8] SAE. ARC fault circuit breaker (AFCB), aircraft, trip–free single phase 115 VAC, 400 Hz–Constant Frequency: SAE AS5692—2007[S]. US: SAE, 2007.
[9] SAE. Test Methods for Insulated Electric Wire: SAE AS4373D—2010 [S]. US: SAE, 2010.
[10] ZHANG X, REN W B, WANG S J. Experimental investigation of contact welding characteristics of electromechanical relays[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(9): 8531–8539.
[11] HUANG X Y, NAKAMURA Y. A review of fundamental combustion phenomena in wire fires[J]. Fire Technology, 2020, 56(1): 315–360.
[12] 江　军, 李　威, 李　波, 等. 电流频谱 Hurst 指数在串联电弧故障检测中的应用[J]. 控制理论与应用, 2022, 39(3): 561–569.
[13] 卢静雅, 翟术然, 张兆杰, 等. 基于电流模式分解的非人户式故障电弧识别[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(6): 206–211.
[14] 孟　羽, 李兴文, 吴子豪, 等. 光伏系统直流故障电弧时频域特性及其复合模型研究[J]. 高压电器, 2022, 58(5): 23–30, 40.
[15] 侯福生, 原　野. 民用飞机电弧故障分析与研究[J]. 航空科学技术, 2014, 25(4): 42–45.
[16] 任　亮, 张天平, 吴先明, 等. 真空电弧推力器技术发展现状及趋势[J]. 真空与低温, 2016, 22(5): 265–270.
[17] 郭　江. 航空故障电弧损伤效应及特征分析方法研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2020.

（责任编辑：　孟　欣）

（上接第 66 页）

参考文献：

[1] 房冠成, 贾大鹏, 刘毅飞, 等. 基于飞行参数数据挖掘的军机健康评估技术[J]. 航空学报, 2020, 41(6): 289–299.
[2] ZHAO W Z, LI L S, ALAM S, et al. An incremental clustering method for anomaly detection in flight data[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2021, 132: 103406.
[3] 彭　宇, 何永福, 王少军, 等. 飞行数据异常检测技术综述[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(3): 1–13.
[4] 王志刚, 王业光, 杨　宁, 等. 基于 LSTM 的飞行数据挖掘模型构建方法[J]. 航空学报, 2021, 42(8): 255–264.
[5] KONG Y X, MAHADEVAN S. Aircraft landing distance prediction: A multistep long short–term memory approach[J]. Journal of Aerospace Information Systems, 2022, 19(5): 344–354.
[6] 张其霄, 董　鹏, 王科文, 等. 基于贝叶斯优化 LSTM 的发动机剩余寿命预测[J]. 火力与指挥控制, 2022, 47(4): 85–89.
[7] FU J M, SUN C, YU Z, et al. A hybrid CNN–LSTM model based actuator fault diagnosis for six–rotor UAVs[C]//2019 Chinese Control and Decision Conference (CCDC), June 3–5, 2019, Nanchang, China. IEEE, 2019: 410–414.
[8] 段照斌, 杜海龙, 张　迪, 等. 基于 KPCA 和 ELM 的新型民机舵机系统故障诊断[J]. 计算机仿真, 2022, 39(1): 25–28, 55.
[9] 白玉轩, 杨建忠, 孙晓哲, 等. 基于 GA–BP 的机电作动系统传感器故障诊断研究[J]. 机床与液压, 2021, 49(15): 188–194.
[10] QIN H, YANG R F, GUO C X, et al. Fault diagnosis of electric rudder system using PSOFOA–BP neural network[J]. Measurement, 2021, 186: 110058.
[11] 金晓航, 许壮伟, 孙　毅, 等. 基于 SCADA 数据分析和稀疏自编码神经网络的风电机组在线运行状态监测[J]. 太阳能学报, 2021, 42(6): 321–328.
[12] ZHANG W S, FU J, FU Y L, et al. System performance analysis for trimmable horizontal stabilizer actuator focusing on nonlinear effects: based on incremental modelling and parameter identification methodology[J]. Sensors, 2021, 21(19): 6464.
[13] 宫淑丽, 马广佑, 邓华佳, 等. QAR 数据飞行级异常检测研究[J]. 机械设计与制造工程, 2021, 50(10): 68–73.
[14] KIRANYAZ S, AVCI O, ABDELJABER O, et al. 1D convolutional neural networks and applications: a survey[EB/OL]. (2019–05–09)[2023–02–10]. http://arxiv.org/abs/1905.03554.
[15] 段照斌, 刘颖欣. CNN–SVM 在民机升降舵故障诊断中的应用[J]. 电光与控制, 2021, 28(12): 97–101, 115.
[16] 刘建伟, 宋志妍. 循环神经网络研究综述[J]. 控制与决策, 2022, 37(11): 2753–2768.
[17] 马　敏, 李继伟, 曾　田. 基于双通道混合网络融合支持向量机的电容层析成像流型辨识[J]. 电子测量技术, 2022, 45(4): 153–159.
[18] ZHANG J W, LING Y, FU X B, et al. Model of the intrusion detection system based on the integration of spatial–temporal features[J]. Computers & Security, 2020, 89: 101681.
[19] ZHONG J, ZHANG Y J, WANG J Y, et al. Unmanned aerial vehicle flight data anomaly detection and recovery prediction based on spatio–temporal correlation[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2022, 71(1): 457–468.
[20] 熊斌华, 赵红华, 朱晓炜. 基于 WQAR 数据的飞机系统性能监控及预测维修[J]. 航空维修与工程, 2021(9): 66–69.

（责任编辑：明　月）