

doi: 10.7690/bgzdh.2020.09.007

飞机 EWIS 故障电弧定位技术研究综述

王希彬¹, 孟庆骁², 戴洪德¹, 肖楚琬³

(1. 海军航空大学航空基础学院, 山东 烟台 264001; 2. 中国人民解放军 91331 部队, 辽宁 兴城 125106;
3. 海军航空大学航空作战勤务学院, 山东 烟台 264001)

摘要: 为实现有效而可靠的在线电弧故障定位, 总结飞机电线电弧故障定位方法。介绍几种电弧故障定位技术, 详细阐述时域、频域和序列时域/扩展频谱时域反射计的电弧故障定位方法, 分析现有故障定位技术的优缺点, 探讨未来的研究和发展情况。结果表明, 实时电弧故障定位的研究仍处于初级阶段。

关键词: 电气线路互联系统; 电弧故障定位; 反射计; 扩展频谱反射计

中图分类号: TP20 **文献标志码:** A

Survey on Arc Fault Location Technology for Electrical Wiring Interconnection Systems of the Aircraft

Wang Xibin¹, Meng Qingxiao², Dai Hongde¹, Xiao Chuwan³

(1. College of Basic Science, Navy Aviation University, Yantai 264001, China; 2. No. 91331 Unit of PLA, Xingcheng 125106, China;
3. College of Combat Service, Navy Aviation University, Yantai 264001, China)

Abstract: This paper provides an overview of arc fault location methods to realize effective and reliable arc fault location online. Several technologies are introduced for arc fault location, time domain, frequency domain and sequence time domain/spread spectrum time domain reflectometer are described in detail for arc fault location reflectometer, the advantages and disadvantages of modern technology of arc fault location are analyzed, and further research and development are discussed. The result shows real-time arc fault location is still on the initial stage.

Keywords: electrical wiring interconnection system (EWIS); arc fault location; reflectometer (TDR); spread spectrum time domain reflectometer (SSTDR)

0 引言

近几年, 老旧飞机上已经观察到大量电弧故障, 飞机线路问题已经被认为是几场空难和损失上千个任务小时的可能原因^[1]。现代和未来的公共运输飞机更多地依赖电力进行飞行控制、环境控制、发动机管理、计算机和通信、乘客服务和娱乐。对电力依赖性的增加使得飞机对线路问题和电弧故障更加脆弱; 因此, 对飞机配电系统而言, 实现有效而可靠的在线电弧故障定位迫在眉睫。

飞机配电系统中电弧故障定位已受到大量研究者的关注。电弧故障如果处理不恰当, 可能会中断供电、损害电气装置、产生火灾, 甚至威胁人类的生命^[2]。电弧故障在任何电气系统中都可能发生, 例如建筑物^[3]、工厂、煤矿^[4]、核电厂^[5]、电信装置^[6]、汽车^[7]、轮船^[8]、潜艇^[9]和宇宙飞船^[10]。

在电气线路互联系统中, 间歇性线路故障的诊断费时又昂贵。间歇故障难于诊断, 因为它们只在特定条件或应力下发生, 并且在地面上难以复现^[11]。

飞机上的间歇故障一般是由于飞行中振动引起绝缘受损的电线彼此接触, 或与机体接触、受腐蚀的连接器松动或水滴到绝缘受损的电线上。飞机故障电弧是典型的间歇性故障, 即使在飞行中可以有效检测并消除电弧故障, 当飞机返回到地面上时, 其根源也可能无法识别。以上特征使得电弧故障定位极具挑战性, 而定位这些故障的最佳时间就是当故障线路正在带电使用时。

为精确定位线路的失效, 有多种可用的技术, 包括最常用的视觉检查和阻抗测量等。文献[12]利用一个以电弧产生的声波传输为基础的装置估计电弧的位置; 脉冲捕获电火花放电诊断方法已被验证能够检测定位导线擦伤、裂纹、针孔和其他绝缘缺陷[13]; 文献[14]利用惰性气体定位细微的线路失效, 使得非接触探针用于间歇线路失效定位成为一个新的研究趋势; 文献[15]基于载波信号行为提出一种间歇故障识别方法, 但需要在线路系统的不同位置安装发送器、接收器和耦合电路。反射计是目

收稿日期: 2020-04-25; 修回日期: 2020-05-29

基金项目: 国家自然科学基金(61437706); 工信部民机专项(MJ-2018-J-75); 山东省自然科学基金(ZR2017MF036)

作者简介: 王希彬(1985—), 男, 山东人, 博士, 讲师, 从事飞机电气系统研究。E-mail: wangxi_bin@163.com。

前最有前景的电弧定位技术,可分为时域、频域^[16-18]、序列时域^[19]、多载波^[20]、扩展频谱时域^[11]和噪声域反射计^[21]。

笔者总结飞机电线电弧故障定位方法,并探讨现在和未来的研究与发展的机遇和挑战。

1 电弧故障定位技术

目前,大量的技术已被开发和应用于电弧故障定位,包括视觉检查、阻抗测量、脉冲捕获电火花放电、高电压测试、惰性气体及各类反射计等,每种技术都在一定程度上有效,但同时都存在缺点。

1.1 视觉检查法

视觉检查通常是一种非入侵性检查,使用手电筒、镜子和放大镜等简单的工具,检查线路损伤和电弧迹象。一般的视觉检测,可能永远检查不到线路的某些部分,如损伤的绝缘层隐藏在卡箍或拐角附近,或夹杂在多条线束中,而每根线束又包含大量的导线,许多线束铺设在飞机的舱壁内等^[1];因此,某些情形下需要进行详细的视觉检查时,要拆下卡箍并打开线束,用照明和放大镜检查裂纹和裸露的金属导体。由于详细视觉检查需要扭曲电线检查损伤情况,可能会对线缆产生损坏,同时视觉检查繁琐、工作量大;因此,一般不能定位电弧等间歇性线路的失效。

1.2 阻抗测量法

另外一种常用的方法就是从电缆一端到另一端测量阻抗,通常低阻抗意味着电缆“良好”,高阻抗意味着电缆断路。文献^[22]提出一种如图 1 所示的并行电弧故障定位方法。电源和并行电弧故障之间的距离可以通过 $L = (V_{source} - V_{load}) / (I_{source} \tau)$ 计算出来,其中 L 、 V_{source} 、 V_{load} 、 I_{source} 和 τ 分别为距离、电源电压、负载电压、电源电流和单位长度上预设的电阻。该方法对短电线比较有效,不能用分支网络,对于某些类型的未屏蔽电线,敏感电感受短路电线的影响很大,容易产生误差^[16]。

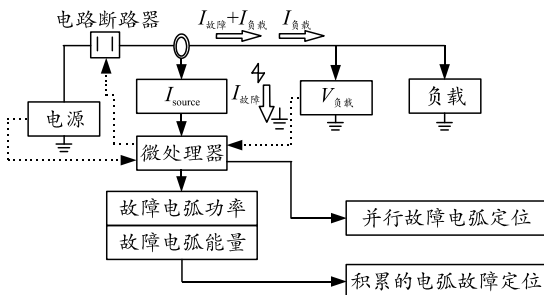


图 1 一种确定并行电弧故障、能量和位置的装置

1.3 声传感器测量法

基于被动声传感器的线路诊断系统,已用于检测和定位损伤和间歇性电弧故障^[23]。如图 2 所示,在线束中通过传感器收集线路故障产生的声音信号,电弧故障的位置可以利用声音传感器估计。 $S(x, y, z)$ 表示电弧故障的位置, $A(x_A, y_A, z_A)$ 、 $B(x_B, y_B, z_B)$ 、 $C(x_C, y_C, z_C)$ 和 $D(x_D, y_D, z_D)$ 表示声音传感器的位置, d_A 、 d_B 、 d_C 和 d_D 为传感器到电弧的距离。声波在 A 、 B 、 C 和 D 点到达的时间分别为 t_A 、 t_B 、 t_C 和 t_D ,可确定声波到达时间差,即 $t^* - t_A$ ($*$ = B, C, D)。媒介中声音传播的速度 v 是已知的,距离可以计算为 $d^* - d_A = (t^* - t_A)v$ 。而且,距离差可以通过 $d^* = \sqrt{(x - x_*)^2 + (y - y_*)^2 + (z - z_*)^2}$ 确定。通过解这些方程,可以确定电弧故障位置 $S(x, y, z)$ ^[12]。

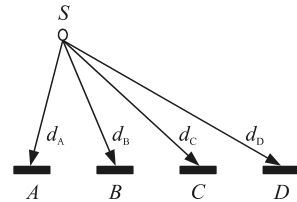


图 2 一种基于声音传感器的电弧故障定位方法

这种方法只能用于确定已被检测为电弧故障的位置,并且声音传感器应设置在电弧故障附近,在许多实际应用中是不现实的。另外,为实现有效的故障检测和定位,这些传感器放置在故障线路周围,影响了飞机配电系统的工作,且飞行中的振动会影响传感器的输出。

1.4 电流测量法

文献^[24]通过测量 2 个临近电流传感器的电流差来定位电弧故障。与文献^[23]类似,该方法需要在飞机线路系统的不同位置安装多个电流传感器。而且,电流传感器应连接到一个特殊的网络中用于故障检查,增加了复杂性、成本和计算负担。

1.5 高电压法

高电压法通过在测试电线上施加高压直流电查找电弧或泄露电流,电线加高压后,电弧发生条件得到增强,使得电弧或电线损伤位置容易发现。然而,高电压可能会从被测试的电线跳到其他电线或触点上,并损伤敏感的电子设备,另外,在存在可燃物、易起火或易爆炸材料的环境中,高电压的火花或电弧具有足够的能量成为点火源。高电压测试带来的这些问题,使其只能在无燃料环境和所有负载都断开的地方应用。

另外一种增强电弧的方法是在线缆周围施加惰性或电离气体或导电液体，尽管非常有效，但用气体或水来增强电弧故障需与电线接触，在物理上难以实现^[11]。

1.6 脉冲捕获电火花放电法

如图3所示，脉冲捕获电火花放电 (pulse arrested spark discharge, PASD) 已经在不同的电弧故障、结构类型和绝缘层上进行了验证，是一种有效的绝缘诊断方法^[13]。PASD 技术利用高电压、低能量和短脉冲在绝缘缺陷处引起电火花放电^[25]。虽然 PASD 被认为不具有破坏性，但也存在高电压测试方法的缺陷，并且它利用了时域反射计技术，是一种包含主动信号的注入性方法。

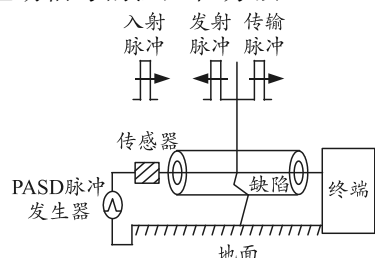


图3 脉冲捕获电火花放电诊断的概念

1.7 小波网络定位法

文献[26]提出一种将离散小波变换和小波网络 (wavelet network, WN) 组合用于电弧故障定位。利用离散小波变换 (DWT) 对单端中继点电压和电流的波形去噪以获得更高信噪比，得到的三相电压和电流基频向量作为特征向量，将不同电弧故障条件的特征向量用于 WN，以便训练和测试。该方法主要用于电弧定位，也可用于永久性故障的定位。

2 基于反射计的电弧故障定位方法

反射计是现在正在使用和发展的技术。所有反射计的共同之处在于沿着电线发送低压高频信号并敏感从电线端返回的信号。根据输入信号的特征，反射计可以分为时域 (time domain reflectometry, TDR)、频域 (frequency domain reflectometry, FDR)、序列时域 (sequential time domain reflectometry, STDR)、扩展频谱时域 (spread spectrum time domain reflectometry, SSTDR)、多载波 (multi-carrier reflectometry, MCR) 和噪声域反射计 (noise domain reflectometry, NDR)。

2.1 时域反射计

TDR 通过沿电线发送一个短矩形脉冲，利用入

射脉冲和反射回波的时间延迟，可以确定电线失效的位置。文献[27]利用希尔伯特黄变换 (HHT) 对时域反射法数据进行去噪；文献[28]设计了基于 SOPC (system on programmable chip) 的手持式航空线缆检测仪；文献[29]设计了基于时域反射法 (TDR) 和时间数字转换 (time to digital convert, TDC) 的航空电缆故障检测仪；文献[30]基于时域反射原理通过现场可编程门阵列 (field programmable gate array, FPGA) 实现对多芯线缆的自动测试和故障定位；文献[31]以时域反射技术为基础研制了一种智能线路故障排除工具；文献[32]采用了小波包变换算法对故障点的时域反射信号进行降噪处理，利用基于偏最小二乘回归分析算法和互相关算法的故障定位方法，确定入射信号与反射信号的时间间隔，实现了导线硬性故障的精确定位。

TDR 常用于怀疑电线已存在问题，即电弧故障已经发生，而且其结果的解释需要专业的经验。另外，这种方法还需要一条极其准确的基准线与电弧电线对比。即使是一条航线或军机编队有限的线路，记录和维持基准线的 TDR 数据档案，也是一项巨大而昂贵的任务。在飞机的高振动环境下移动电线可能会使阻抗变化，产生其他故障，使其在实际中难以实施。

2.2 频域反射计

FDR 包括相位检测反射计 (phase detection reflectometry, PDR)、调频连续波 (frequency-modulated continuous wave, FMCW)、驻波反射计 (standing wave reflectometry, SWR) 和混合信号反射计 (mixed signal reflectometry, MSR)^[16]，沿电线发射步进频率正弦信号，传输到电线的一端，并反射回源端^[18]。PDR 通过测量入射和反射波的相位差定位电线的失效。SWR 测量由入射和反射波的叠加产生的驻波的幅值。FMCW 使用了具有斜坡上升频率的一系列高频正弦波，通过测量反射波与斜坡上升频率入射波的频率差、经过的时间确定电线故障距离。文献[16]利用 MSR 分析了入射和反射正弦波的平方和。MCR 与 PDR、MSR 相似，也使用了多频测试信号，但 MCR 以并行模式工作，而 PDR 和 MSR 以串行模式工作。

2.3 STDR/SSTDR

前面提到的方法只能用于定位不带电导线的失效，而 STDR 和 SSTDR 已验证在带电导线上应用

是可行的^[11]。STDR 和 SSTDR 在电线上分别使用非常低的伪噪声 (PN) 码和正弦波调制 PN 码作为测试信号, 与飞机电线信号相比, PN 信号非常小, 并且远低于飞机允许噪声的下限, 但 PN 码相对较长 (例如 1 023 位), 并具有显著可识别的模式。PN 码是自相关的, 能够给出线路系统的特征: 分支、负载、电源等。STDR 和 SSTDR^[33] 的结构如图 4 所示。通过入射和反射信号的互相关性识别故障的类型和位置, 当源端信号 (入射和反射波的组合) 与测试的 PN 码同步时, 可以获得较高的值, 当编码未同步时, 得到一个较低的值。故障距离从互相关数据中可以很容易确定^[34]。

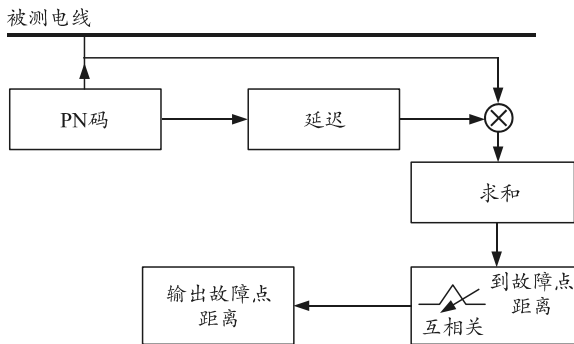


图 4 STDR 测试系统 (对于 SSTDR, 输入信号为调制的 PN 码)

文献[35]利用改进的实序列频域相关算法对 STDR/SSTDR 进行了仿真分析; 文献[36]发现 logistic 混沌映射产生的测试信号应用于 SSTDR 检测系统时, 检测系统的抗噪声能力会得到提高; 文献[37]表明 SSTDR 方法在减小跨接头飞机线缆故障检测误差等方面有良好的改善。

因为 PN 码信号极其小并且看起来像噪声, 可以埋入到一个已存在信号的噪声范围内; 因此, 可以在飞行中实时监控电线而不干扰电线功能。这种互相关性使得 STDR/SSTDR 在带电电线上优于任何其他反射计方法。

图 5 显示了 STDR 对一端短路或开路的 80 英尺电线的响应曲线。反射信号的幅值总是与入射信号相关, 一个反射信号为一个开路, 另一个反射信号为短路, 正峰值表明该反射发生在电线带有高阻抗的地方, 负峰值表明电线的短路端, 峰值的高度表示故障的幅值, 脉冲极性 (正向或负向) 表明它是高阻抗还是低阻抗故障, 它们之间的距离表示故障的距离。硬故障 (开路和短路) 已在阻抗可控的线缆上定位到 3~5 英寸, 在阻抗不可控的电缆上定位在 6~8 英寸^[38]。

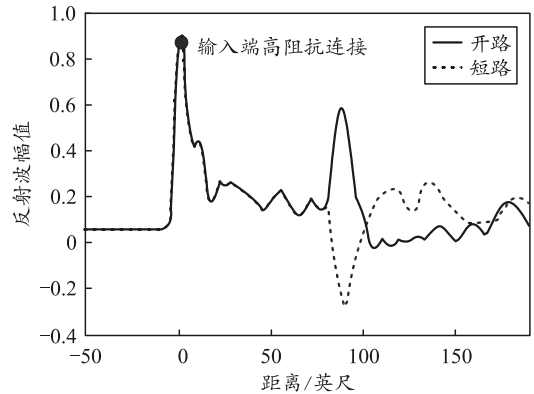


图 5 一端短路或开路的 80 英尺电线的 STDR 响应

SSTDR 的小型化使其应用在正在研发的飞机电弧断路器、电气控制系统、航电箱和电连接器等, 为将 SSTDR 方法融入固态功率控制器 (SSPC) 或飞机配电系统 (PDS), 还需要其他硬件, 如 STDR 补充的金属氧化物半导体传感器、SSTDR 专用集成电路芯片、乘法器和模数转换器 (ADC) 等。PN 码的耗电等级必须在毫瓦或微瓦, 才能不干扰飞机配电系统。文献[34]将电弧故障断路器 (arc fault circuit breaker, AFCB) 与 SSTDR 组合起来实现电弧的在线检测和定位, 但 AFCB 的一个巨大的挑战在于它阻止或限制了电弧的程度; 因此, 线路损伤太小以致难于定位和修理。这是可能降低 AFCB 技术的可接受性和广泛的实施^[39]。

尽管这些主动反射计技术非常有前景, 但也存在一些问题: 由于在阻抗不可控的线束内会出现多个小的反射, 响应并不是平滑的。这些小反射及其变化的传播速度, 某种程度上降低了方法的精度。而且, 沿电线传输很长的距离时注入的信号会衰减, 并且该主动噪声会埋入电线传输的信号中。噪声域反射计 (noise domain reflectometry, NDR) 族利用了时域自相关函数的特性, 能够用于确定独立时间延迟或分支网络的多反射。NDR 优于其他形式的反射计在于不需要传输一个特定的测试信号, 而是利用电线中已存在的信号或噪声作为测试信号。换句话说, 对于被测试媒介的其他使用者, NDR 可以完全“静默”。相比于与电线导体直接接触的传统技术, 使用反射计的电线故障定位技术可以通过非接触探针实现, 易使用、质量轻和免维护^[14]。

3 现有故障定位技术分析

上面讨论的现有线路失效定位技术, 仅在处理“硬”故障 (短路和断路) 时有效, 对线缆磨损和擦伤等“软”故障的定位仍然难以查找^[40]。在磨损的

电线变成开路或断路前，找到微小的异常之处具有重大意义。导线绝缘受损会使阻抗产生非常小的变化，TDR 得到的反射信号依赖于阻抗的不连续性，会导致一个淹没在测量噪声中非常小的反射出现。

TDR 通常在去掉线束的连接和设备后，用于辅助地面维护。STDR 和 SSTDR 尽管在带电导线上非常有前景，但也存在缺点：首先，嵌入线路系统的入射伪噪声可能坏处大于益处；其次，获取数据和处理噪声引入沉重计算负担，从复杂的线路系统中实时发送、检测和分析入射与反射信号并不现实。此外，嵌入信号的强度难以确定，信号强，导线中传输的有用信息可能被干扰；嵌入的信号太弱，反射信号不能有效识别，又会降低定位方法的精度。

理想的线路故障定位方法应能准确定位线路故障，既不干扰线缆中原始信号的传输，能在“硬”故障发生前在线定位线缆失效，价格又不能太昂贵，数据采集和信号处理的计算量也不能太大。

4 故障电弧定位发展方向

电弧故障现象非常复杂并且其特征难以提取。目前，在飞机线路系统的间歇电弧故障建模方面研究较少，往往一种有效的模型能够表现电弧故障的主要特征，可以与正常的操作相区分，这样电弧故障才可以被有效检测、定位而无虚警。

大量研究工作已经关注电弧故障检测、电弧故障隔离和线路故障定位，以便完成有效的线路修理和维护。现有技术通常需要复杂的数据处理和大量的计算，阻碍了实际应用。随着通信和传感器等技术的提升，飞机配电系统中包括智能接触器和固态功率控制器的增强智能技术^[41]，已将处理电弧故障和飞机线路问题拓展到一个全新的领域。在具有多级保护结构的配电系统中，远程功率控制器、内嵌电弧故障定位功能的协调及线路系统的健康管理和故障诊断^[25]，将会成为未来研究和发展的重点。

5 结论

飞机配电系统电弧故障定位是重要而又富有挑战性的课题。定位电弧故障或定位灾难性故障早期的间歇性问题，可以极大地降低维修成本和时间并提高安全性。笔者总结了现有的飞机故障电弧定位技术，分析了这些方法的优缺点，但从根本上说，实时电弧故障定位的研究仍处于初级阶段，如飞机配电系统中保护装置和内嵌电弧故障定位装置的协调，以及整个飞机线路系统的健康监控和诊断等，

成为未来研究和发展的新课题。

参考文献：

- [1] FURSE C, HAUPT R. Down to the wire[Z]. IEEE Spectrum, 2001: 34-39.
- [2] CRNKO T, DYRNES S. Arc fault hazards and safety suggestions for design and maintenance[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2001, 7(3): 23-32.
- [3] GAMMON T, MATTHEWS J. Instantaneous arcing-fault models developed for building system analysis[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2001, 37(1): 197-203.
- [4] LI J, KOHLER J L. New insight into the detection of high-impedance arcing faults on DC trolley systems[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 1999, 35(5): 1169-1173.
- [5] LAND H B, EDDINS C L, GAUTHIER L R, et al. Design of a sensor to predict arcing faults in nuclear switchgear[J]. IEEE Trans. on Nuclear Science, 2003, 50(4): 1161-1165.
- [6] KEENAN J, PARKER M. Arc detectors[C]//in Proc. of the 20th IEEE Telecommunications Energy Conference, 1998: 710-715.
- [7] NAIDU M, SCHOEPF T J, GOPALAKRISHNAN S. Arc fault detection scheme for 42-V automotive DC networks using current shunt[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2006, 21(3): 633-639.
- [8] MOMOH J A, ISHOLA-SALAWU A S. A new arcing fault modeling and detection technique for navy IPS power system[C]//in Proc. of IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2006: 7-13.
- [9] LAND H B. III, Sensing switchboard arc faults[J]. IEEE Power Engineering Review, 2002, 22(4): 18-20, 27.
- [10] FERGUSON D C, VAYNER B V, GALOFARO J T, et al. NASA GRC and MSFC space plasma arc testing procedures[J]. IEEE Trans. On Plasma Science, 2006, 34(5): 1948-1958.
- [11] FURSE C, SMITH P, SAFAVI M, et al. Feasibility of spread spectrum sensors for location of arcs on live wires[J]. IEEE Sensors J., 2005, 5(6): 1445-1450.
- [12] SIDHU T S, SINGH G, SACHDEV M S. Microprocessor based instrument for detecting and locating electric arcs[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1998, 13(4): 1079-1085.
- [13] SCHNEIDER L, HOWARD K, GLOVER S, et al. A new capability to detect and locate insulation defects in complex wiring systems[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2005, 21(4): 14-20.
- [14] WU S, FURSE C, LO C. Noncontact probes for wire fault location with reflectometry[J]. IEEE Sensors J., 2006, 6(6): 1716-1721.
- [15] KIM C. Detection and location of intermittent faults by monitoring carrier signal channel behavior of electrical interconnection system[C]//In Proceedings of the IEEE Electric Ship Technologies Symposium, Baltimore, MD, Apr. 2009: 449-455.

- [16] TSAI P, LO C, CHUNG Y, et al. Mixed-signal reflectometer for location of faults on aging wiring[J]. IEEE Sensors J., 2005, 5(6): 1479–1482.
- [17] CHUNG Y, FURSE C, PRUITT J. Application of phase detection frequency domain reflectometry for locating faults in an F-18 flight control harness[J]. IEEE Trans. On Electromagn. Compat., 2005, 47(2): 327–334.
- [18] FURSE C, CHUNG Y, DANGOL R, et al. Frequency-domain reflectometry for onboard testing of aging aircraft wiring[J]. IEEE Trans. On Electromagn. Compat., 2003, 45(2): 306–315.
- [19] SHARMA C R, FURSE C, HARRISON R R. Low-power STDR CMOS sensor for locating faults in aging aircraft wiring[J]. IEEE Sensors J., 2007, 7(1): 43–50.
- [20] NAIK S, FURSE C M, FARHANG-BOROJENY B. Multicarrier reflectometry[J]. IEEE Sensors J., 2006, 6(3): 812–818.
- [21] LO C, FURSE C. Noise-domain reflectometry for locating wiring faults[J]. IEEE Trans. on Electromagn. Compat., 2005, 47(1): 97–104.
- [22] ZUERCHER J C, MCCLANAHAN D L. Apparatus and method for real time determination of arc fault energy, location and type: US Patent 7068045[P]. 2006.
- [23] HICKMAN G, GERARDI J, FIELD S, et al. An acoustic-based wiring diagnostic system for aircraft[C]. Presented at the Aerospace Technology Conference and Exposition, SAE Technical Paper, Nov. 2009: 1046–1057.
- [24] ORTON H E. Method for diagnosing degradation in aircraft wiring: U.S. Patent 6909977[P]. 2005–6–21.
- [25] LIU G J, CAO Y N, LIU Y G, et al. A Survey on Arc Fault Detection and Wire Fault Location for Aircraft Wiring Systems[J]. SAE Int. J. Aerosp, 2009, 1(1): 903–914.
- [26] SADEGH J, NAVID G. A new method for arcing fault location using discrete wavelet transform and wavelet networks[J]. EUROPEAN TRANSACTIONS ON ELECTRICAL POWER, 2012, 22(5): 601–615.
- [27] 翟禹尧, 郭纲. 航空电缆 TDR 数据去噪与故障定位新方法[J]. 现代防御技术, 2016, 44(6): 128–134.
- [28] 汪兴海, 马同刚, 王远强. 基于 SOPC 的手持式航空线缆检测仪设计[J]. 电子设计工程, 2017, 25(24): 55–58.
- [29] 岳城亮. 基于 TD 和 TDC 的航空电缆故障检测仪设计[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2014: 53.
- [30] 汪兴海, 刘凯. 基于时域反射的多芯线缆检测装置设计[J]. 计算机与数字工程, 2018, 342(4): 838–841.
- [31] 何超. 基于时域反射的飞机线路故障定位方法研究[J]. 电子测试, 2018(15): 53–54.
- [32] 刘晓琳. 飞机导线故障诊断与定位方法研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2013: 46.
- [33] FURSE C, CHUNG Y C, LO C, et al. A Critical Comparison of Reflectometry Methods for Location of Wiring Faults[J]. Smart Structure and Systems, 2006, 2(1): 25–46.
- [34] CHRISTIAN V P, THOMAS E P, SRINI C S, et al. Aircraft Electrical System Monitoring with Arc Fault Circuit Protection and Automatic Fault Location[C]. Power Systems Conference, Louisiana, 2016: 1–5.
- [35] 陈卫, 王莉. 航空电缆故障在线检测与定位技术研究[J]. 飞机设计, 2010, 30(2): 62–67.
- [36] 涂俊杰. 基于混沌测试信号的飞机线缆故障定位研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2003: 58.
- [37] 李晓辉. 基于 SSTDR 的飞机线缆故障定位方法研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2014: 55.
- [38] SMITH P, FURSE C, GUNTHER J. Fault location on aircraft wiring using spread spectrum time domain reflectometry[J]. IEEE Trans. Elec- tromagn. Compat., 2005, 47(2): 306–315.
- [39] FURSE C, SMITH P, SAFAVI M, et al. Feasibility of spread spectrum sensors for Location of arcs on live wires[J]. IEEE Sensors, 2005, 6(5): 1445–1450.
- [40] GRIFFITHS L A, PARAKH R, FURSE C, et al. The invisible fray: a critical analysis of the use of reflectometry for fray location[J]. IEEE Sensors J., 2006, 6(3): 697–706.
- [41] ANIL Y, CAO Y N, LIU G J, et al. Aircraft Electric System Intermittent Arc Fault Detection and Location[J]. IEEE TRANSACTIONS ON AEROSPACE AND ELECTRONIC SYSTEMS, 2015, 51(1): 40–51.