

文章编号:1674-8190(2018)03-447-04

电缆故障在线检测定位装置研究

高闯,王莉,杨善水

(南京航空航天大学 自动化学院,南京 211100)

摘要: 电缆作为飞机电源系统的重要组成部分,实现电缆故障的在线诊断,可以提高其可靠性。采用扩展频谱时域反射法(SSTDR),基于FPGA技术,设计一种板级速率为500 MHz的飞机电缆故障在线检测和定位装置,并进行实验验证。结果表明:该装置能够实现电缆开路、短路以及间歇性电弧的在线检测和定位,具有定位精度高、实时性好等优点;利用该装置在线监测电缆的健康状态,实现难以复现的间歇性故障的检测,能够提高地面运营、维护效率,节省人力物力,具有较高的工程应用价值。

关键词: 飞机电缆故障;电缆故障检测与定位;扩展频谱时域反射法;传输线理论

中图分类号: TH89

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2018.03.022

Research on Cable Fault Online Detecting and Locating Device

Gao Chuang, Wang Li, Yang Shanshui

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211100, China)

Abstract: As an important part of aircraft power supply system, cable is particularly important to realize cable fault online diagnosis. The cable reliability can be improved by using the spread spectrum time domain reflectometry(SSTDR). Based on FPGA technology a cable fault online detecting and locating device with the 500 MHz board level rate is designed and verified by experiment. Results show that the instrument can realize the online detection and location of the open circuit, short circuit and intermittent arc of cables, and has the advantages of high positioning accuracy and good real-time performance. Using this device to monitor the health state of the cable fault on-line and realize the detection of the intermittent fault which is difficult to reappear. It can improve the efficiency of ground operation and maintenance, save a lot of manpower and material resources and has higher engineering value.

Key words: aircraft cable fault; cable fault detection and location; spread spectrum time domain reflectometry; transmission line theory

0 引言

复杂大系统(例如飞机、航天器、核、可再生能源系统等)正飞速发展,与之配套的电力系统需要越来越多的电线电缆来实现功率输送及信号控制。受外界因素,例如水、紫外线、温度、振动、过载及时间等影响^[1-2],电缆会逐步老化并最终导致出现短

路、断路等硬故障及间歇性故障。由于间歇性故障具有难以复现的特点,地面检测率低,亟需一种电缆故障在线检测定位方法,及时排除故障,保证安全运行。

目前,已有多种方法可以用来诊断电缆故障^[2],其中反射法发展迅速。反射法根据入射信号的不同,分为时域反射法^[3]、频域反射法^[4]、序列时域反射法^[5]、扩展频谱时域反射法^[6-7](Spread Spectrum Time Domain Reflectometry,简称SSTDR)、噪声域反射法^[8]等。其中,SSTDR方法因其定位精度高、抗干扰性强、能够实现在线诊断、适用范围广等优势而备受关注。国外,LIVEWIRE公

收稿日期:2018-06-20; 修回日期:2018-07-11

基金项目:国家自然科学基金(51277093)

通信作者:王莉,liwang@nuaa.edu.cn

司的 Spark Chaser II 产品就是利用 SSTDR 实现电缆故障的在线检测定位,且该公司生产了专用 SSTDR 集成芯片 SSTDR ASIC,其定位精度高(±1%),检测周期短(10 ms),诊断范围广^[9]。国内,在该方面的研究相对落后,方联公司的 ME103,其短距离定位精度为 1 m,无法满足电缆故障定位的精度要求。

本文采用 SSTDR 电缆故障诊断技术,基于 FPGA 技术,设计一种板级速率为 500 MHz 的飞机电缆故障在线检测和定位装置,并进行实验验证。

1 电缆故障在线检测定位原理

1.1 传输线理论

当电缆注入高频载波信号,通有高频载波信号的电缆线可以等效为由分布参数组成的均匀传输线模型,等效电路如图 1 所示^[10], L_0 (H/km), R_0 (Ω /km), C_0 (F/km)和 G_0 (S/km)分别为单位长度分布电感,分布电阻,分布电容及分布电导。

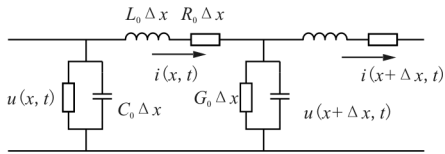


图 1 均匀传输线分布参数模型

Fig. 1 Distributed parameter model of uniform transmission line

根据基尔霍夫电压定律及电流定律,得电缆上任一点距始端距离为 x 的电压电流方程为

$$\begin{cases} -\frac{\partial u}{\partial x} = R_0 i + L_0 \frac{\partial i}{\partial t} \\ -\frac{\partial i}{\partial x} = G_0 i + C_0 \frac{\partial u}{\partial t} \end{cases} \quad (1)$$

根据边界条件可以求出该方程的解,得出入射信号在电缆 x 点处的反射系数 ρ 为

$$\rho = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (2)$$

式中: Z_L 为 x 点处的负载阻抗; Z_0 为电缆特性阻抗。

当电缆 x 点处发生开路故障时($Z_L = \infty$),反射系数为 1,反射信号与入射信号极性相同;当电缆 x 点处发生短路故障时($Z_L = 0$),反射系数为

-1,反射信号与入射信号极性相反。

1.2 SSTDR 电缆故障检测原理

SSTDR 的实现结构示意图如图 2 所示,主要分为 3 步:①信号源将由伪随机信号(PN 码)与正弦波调制的扩频检测信号注入待测电缆,②检测系统采集故障点处由于阻抗不匹配而反射的信号,③将入射信号与反射信号进行相关运算,根据反射信号相对于入射信号的幅值和延迟特性,判定故障类型及故障距离。

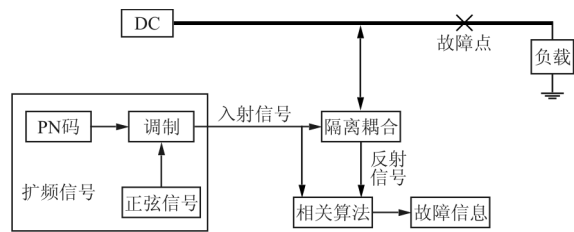


图 2 SSTDR 电缆故障诊断结构示意图

Fig. 2 Diagram of cable fault diagnosis with SSTDR

其相关运算后的故障诊断波形图如图 3 所示,可以看出:采用 SSTDR 实现电缆故障定位遵循传输线原理,开路故障,反射波头为正;短路故障,反射波头为负;根据相关入射波和反射波之间的距离可以判定故障距离;无反射波头时,电缆无故障。

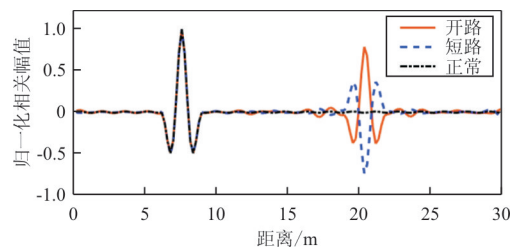


图 3 电缆故障诊断波形

Fig. 3 Diagram of cable fault diagnosis figure

2 装置硬件设计及性能指标

2.1 装置硬件设计

高速 SSTDR 故障检测装置的整个硬件电路如图 4 所示,主要包括 7 部分:FPGA 最小系统、时钟发生模块、DA 转换模块、高速采集模块、多路通道选择模块、隔离耦合模块和通信接口模块。

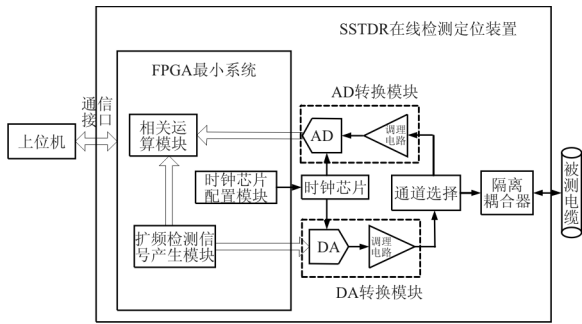


图 4 SSTDR 电缆故障在线检测定位装置硬件框图
Fig. 4 Hardware block diagram of SSTDR cable fault online detection and location device

在 FPGA 最小系统中将 PN 码与正弦信号调制, 实现扩频检测数字信号的产生。产生的数字信号被送入 DA 转换模块中进行数模转换, 并根据实际电路的需要调节信号的幅值大小。DA 需要高频时钟驱动, FPGA 自身的时钟信号无法满足, 因此采取外扩高频时钟芯片, 相应的配置在 FPGA 中实现, 为 DA 和 AD 的芯片提供工作时钟。最终产生的模拟入射信号通过通道选择模块, 在隔离耦合器的作用下, 注入相应的通道中, 对该通道的电缆进行故障诊断。其中多通道选择模块实现检测装置对多路电缆分时循环发送信号, 实现对多路电缆的故障检测; 当入射信号遇到由故障点引起的阻抗不匹配点时会产生反射信号, 反射信号在隔离耦合器的作用下送入高频信号采集模块, 通过调理电路进行信号幅值的调节, 利用 AD 芯片转换成数字信号送入 FPGA 中。FPGA 最小系统对入射信号和反射信号进行相关运算处理, 并提取故障信息, 通过串口通信传输到上位机进行故障信息显示。

2.2 性能指标

高速 SSTDR 板卡硬件测试板卡性能指标:

- (1) 测试方法: SSTDR;
- (2) 测试电缆拓扑类型: 单支路或分支电缆;
- (3) 测试故障类型: 能够实现开路、短路以及间歇性电弧故障检测定位;
- (4) 检测定位精度: $\leq \pm 0.2 \text{ m}$;
- (5) 单次故障检测周期: $< 200 \mu\text{s}$;
- (6) 测试电缆型号: 电力电缆与信号电缆。

3 实验验证

以航天器电源系统为例, 建立基于 SSTDR 的电缆故障测试平台, 其结构如图 5 所示。

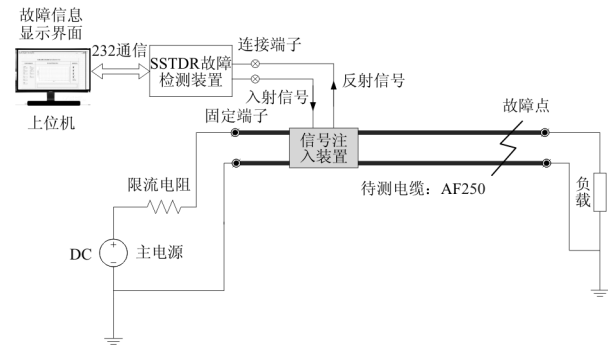
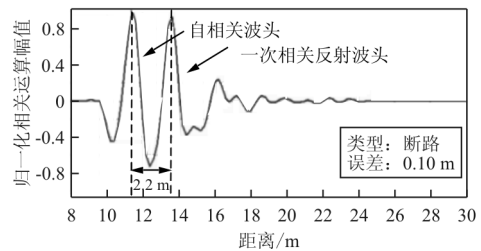


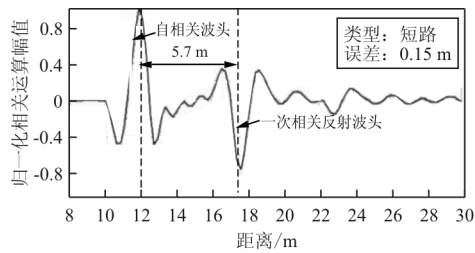
图 5 电缆故障在线检测定位装置实验平台
Fig. 5 Experimental platform of cable fault on-line detection and location device

主功率电源、限流电阻、待测电缆及负载用于模拟功率回路。在待测电缆 AF250 上设置故障, 用于模拟开路、短路及电弧故障, SSTDR 故障检测定位装置发送一组检测信号通过信号注入装置将其注入待测电缆中, 并将反射回来的信号接收至 SSTDR 装置中, 在其中进行一定的算法运算, 将故障信息通过 232 串口发送至上位机, 在 Labview 界面显示故障信息及故障距离。

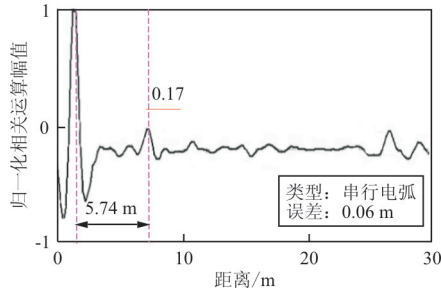
在待测电缆 2.10、5.55、5.68、5.80 m 等处分别设置开路、短路、串行电弧、并行电弧故障。电缆故障在线检测定位装置诊断出的结果如图 6 所示, 可以看出: 该装置能够在相应的定位精度 ($\pm 0.2 \text{ m}$) 范围内对电缆故障进行正确的检测与定位, 其中, 对电缆开路、短路硬故障的检测率可达 95% 以上, 对间歇性串行电弧、并行电弧的检测率能够达到 90% 以上。



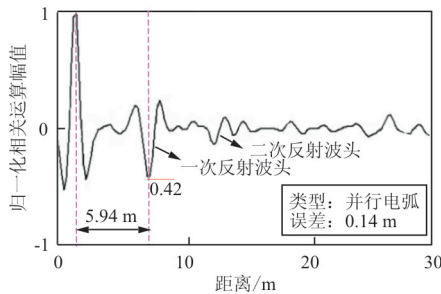
(a) 2.10 m 处开路故障



(b) 5.55 m 处短路故障



(c) 5.68 m 处串行电弧故障



(d) 5.80 m 处并行电弧故障

图6 电缆故障检测定位结果

Fig. 6 The result of cable fault diagnosis

4 结论

(1) 本文设计的飞机电缆故障在线检测定位装置,能够对电缆各类型故障进行精确定位,检测率高,具有较高的工程应用价值。

(2) 该装置能够实现电缆在线状态监测,对难以复现的间歇性故障具有较好的诊断效果。

参考文献

- [1] 谈勇. 飞机线路故障问题及其对策[J]. 航空维修与工程, 2006(2): 62-63.
Tan Yong. Aircraft wiring malfunction and its solutions [J]. Aviation Maintenance and Engineering, 2006(2): 62-63. (in Chinese)
- [2] National Science and Technology Council Committee on Technology Wire System Safety Interagency Working Group. Review of federal program for wire system safety [R]. USA, 2000: 23-44.
- [3] Paulter N G. Long-term repeatability of a TDR-based printed wiring board dielectric constant measurement system [J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 1999, 47(6): 1469-1473.
- [4] Furse C, You C C, Dangol R, et al. Frequency-domain reflectometry for on-board testing of aging aircraft wiring[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2003, 45(2): 306-315.
- [5] Smith P, Furse C, Gunther J. Analysis of spread spectrum time domain reflectometry for wire fault location[J]. Sensors Journal, 2005, 5(6): 1469-1478.
- [6] Smith P S. Spread spectrum time domain reflectometry [D]. Logan, USA: Utah State University, 2003.
- [7] 毛健美, 王莉, 高闯, 等. 感性非接触式电缆故障在线诊断方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(7): 1579-1588.
Mao Jianmei, Wang Li, Gao Chuang, et al. Research on inductive non-contact online cable fault diagnosis method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(7): 1579-1588. (in Chinese)
- [8] Lo C, Furse C. Noise-domain reflectometry for locating wiring faults[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2005, 47(1): 97-104.
- [9] Sharma C R. Low power CMOS sensor for detecting faults in aircraft wiring [D]. USA: The University of Utah, 2009.
- [10] 冯慈璋, 马西奎. 工程电磁场导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
Feng Cizhang, Ma Xikui. Introduction of engineering electromagnetic fields[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. (in Chinese)

作者简介:

高闯(1992-),男,硕士研究生。主要研究方向:故障检测与定位技术。

王莉(1969-),女,博士,教授。主要研究方向:航空航天电源系统、故障检测与定位技术、电力电子在电力系统中的应用、数字电源控制技术、新型 SiC 电力电子器件及应用。

杨善水(1969-),男,博士,副教授。主要研究方向:发电系统、配电系统、智能电网、航空航天供电系统、系统建模仿真技术。

(编辑:马文静)