

军用飞机电气线路系统战伤模式与抢修技术

赵汉武, 张 涛, 郝 明, 杨 佳

(空军工程大学航空机务士官学校, 河南信阳, 464000)

摘要 战伤抢修是提高飞机生存力与航空兵部队持续作战能力的重要手段。针对军用飞机电气线路系统的战场损伤, 梳理总结了电气线路系统的战伤模式, 分析了损伤可能带来的影响; 在介绍外军、民航有关做法的同时, 给出了我军飞机电气线路系统战伤检测与修复的建议。

关键词 电气线路系统; 战伤抢修; 损伤模式及影响分析; 应急修理

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2020.05.017

中图分类号 V222 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2020)05-0106-06

Research on Damage Assessment and Rush Repair in Battlefield for Electrical Wiring System Damage Mode of Military Aircraft

ZHAO Hanwu, ZHANG Tao, HAO Ming, YANG Jia

(Air Technical Sergeant Academy, Air Force Engineering University, Xinyang 464000, Henan, China)

Abstract Damage Assessment and Rush Repair (BDAR) in battlefield is the most important means by improving aircraft survivability and aviation unit's combat capability. In view of the damage modes of military aircraft Electrical Wiring Interconnection System (EWIS), this paper analyzes the corresponding effects caused to happen. While introducing the experience and practices of foreign military and civil aviation, the paper makes a suggestion on the damage detection and the emergency repair of EWIS for military aircraft.

Key words EWIS; rush repair in battlefield; DMEA; emergency repair

2000 年以来, 航空产业的蓬勃发展和公众对航空安全的极端关注, 使得电气线路及其相关附件等成为研究热点^[1-2]。2007 年, 美国联邦航空局 (FAA) 创造性地将飞机上的所有线路及相关附件等视为一个独立的系统, 称之为“电气线路互联系统 (EWIS)”^[3], 并提出了相关的设计、维护与管理要求。我国民航局也在 2011 年修订相关适航标准, 在适航审查、维护检查等工作中单列了对 EWIS 系统的要求^[4]。

军用飞机上, 美军针对电气线路互联系统, 也出台了多个指南手册等, 如 MIL-HDBK-522A《通用线

路检查标准》、MIL-HDBK-525《EWIS 系统完整性检查大纲》、NAVAIR 01-1A-505-1《飞机电气线路安装及修理手册》等^[5-7]。

为提高航空装备维护保障的针对性和有效性, 我军也开始引进相关理念并开展研究。近年来空军、海军航空兵部队针对电气线路的相关研究中, 逐渐开始使用“电气线路系统”这一术语, 所涉及的研究对象基本与民航领域的 EWIS 一致。海军航空大学肖楚琬^[8]、航空工业综合技术研究所何钟武^[9]等研究了军机 EWIS 标准化相关的问题, 文献^[10~12]讨论了军机 EWIS 维护相关的若干问题, 空军有关部

收稿日期: 2020-04-27

作者简介: 赵汉武(1981—), 男, 河南南阳人, 讲师, 主要从事飞机战伤抢修研究。E-mail: yeaper@126.com

引用格式: 赵汉武, 张涛, 郝明, 等. 军用飞机电气线路系统战伤模式与抢修技术[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2020, 21(5): 106-111. ZHAO Hanwu, ZHANG Tao, HAO Ming, et al. Research on Damage Assessment and Rush Repair in Battlefield for Electrical Wiring System Damage Mode of Military Aircraft[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2020, 21(5): 106-111.

门也制定了电气线路系统完整性检查的指导文件。

战伤抢修是提高飞机生存力与航空兵部队持续作战能力的重要手段^[13]。现代战争中,各种地面防空武器、空导导弹威力强大,对军用飞机造成的战伤不只涉及机体结构,而且包括机体内部的各种系统。其中,电气线路系统作为飞机上的一个重要支持系统,在飞机上承担着为各功能系统提供电力和传输信号与数据的重要功能,其任一部分在遭遇战伤后如果不进行修复,轻则会影响飞机相关功能系统的作战使用,重则会导致严重的飞行安全事故^[14]。因此,对电气线路系统进行抢修是整个飞机战伤抢修中的一项重要内容。

对电气线路系统的战伤抢修建立在对其损伤模式分析的基础上。文献[15]对电气线路系统进行了故障模式研究和影响分析,但主要针对老化损伤,没有涉及到战时损伤这一情况;文献[16]对军用装备电缆的战场损伤进行了分类,但未能覆盖飞机电气线路系统的全部要素,而且缺少对损伤影响的分析;文献[11]提出了一种飞机电网战伤的仿真评估系统建模方法,为战伤模式的分类研究提供了基础;文

献[17]则对当前军用飞机上线路布设不规范所造成的风险进行了量化评估。

在上述工作的基础上,本文尝试从军用飞机电气线路系统所包括的全部对象出发,梳理其损伤类型,分析其战伤模式及影响,并在此基础上,给出电气线路系统战伤检测、应急修复的方法建议,为军用飞机战伤抢修、战时保障提供借鉴。

1 电气线路系统战伤模式及影响分析(DMEA)

与飞机上的结构件损伤模式相比,电气线路系统的损伤在表现形式上具有隐蔽性强、形式多样的特点;与此同时,不同的损伤带来的影响也存在多样性,这都给电气线路系统损伤模式的研究增加了难度(参见表 1)。

尽管如此,对电气线路系统的损伤模式进行研究,对于损伤的统计与描述规范化、线路战伤的检测,以及辅助飞机功能系统进行战伤的评估等,仍具有积极的意义。

表 1 电气线路系统损伤模式及影响分析

损伤部位	损伤模式	具体表现	影响分析	严酷度
电线电缆损伤	切断	电线电缆的内导体出现明显的断裂损伤	信号或能量传递中断;存在意外短路的较大风险	I
	过度弯折	电线电缆的弯曲半径不符合规定要求	信号或能量传递受影响;存在进一步损伤的风险	III
	绝缘层损伤	电线的外部绝缘层出现破损、裂口或烧伤、炭化等痕迹	信号传递受一定影响;存在电弧放电的风险	III
	特种线损伤	高频线、热电偶线或滤波线等有特殊功能的线路损伤	信号传输失真、失能;对应系统功能受影响	II
	外护套、防波套损伤	电缆的外护套或者防波套出现磨损、切割、烧伤等	信号传递受影响;有电磁兼容或电磁干扰风险;存在进一步损伤的风险	III
	电线电缆附属物损伤	卡箍、扎带、标识物等的异常	对维护造成影响;存在进一步损伤的风险	IV
电连接器损伤	尾附件损伤	尾附件明显变形、破损;电缆连接处受力异常;	可能会造成电缆电线损伤;存在进一步损伤的风险	III
	接触偶损伤	缩针、歪针,接触偶颜色变深等	接触电阻变大;信号传递受影响;存在短路风险	II
	主体/密封体/屏蔽体损伤	电连接器出现明显的变形、破损	信号传递受影响;可能会造成电缆电线损伤;存在进一步损伤的风险	III
接线端子/端点损伤	接线端子损伤	接线端子出现断裂、松动、炭化等明显变化	供电异常;相关信号传递异常;可能造成电磁干扰;存在短接风险	II
	接线端点损伤	接线柱断裂、螺钉螺母变形、佚失、锈蚀等	供电异常;相关信号传递异常;可能造成电磁干扰;存在短接风险	II
	搭铁线损伤	搭铁线出现断裂、断丝、接头松动等	相关信号传递异常;可能造成电磁干扰;	III

为更大范围地覆盖当前飞机电气线路系统所包含的对象,同时涵盖不同的损伤类型,这里按照损伤对象的不同,将电气线路系统的损伤分为电线电缆

损伤、电连接器损伤、接线端子/接地损伤等几大类,然后再将不同对象的损伤再根据具体类型细分,具体分类详见表 1。同时,根据损伤对象与损伤程度

的不同,进行了初步的影响分析,并按照国家军用标准进行了严酷度分析^[18]。图 1 给出了几种典型的

电气线路系统损伤的实例。



图 1 电气线路系统部分损伤模式示例

损伤模式及影响分析(damage mode and effects analysis,DMEA)是对飞机战伤进行评估的基础,也是故障模式及影响分析(failure mode and effects analysis,FMEA)在战场环境下的延伸。DMEA 指的是确定战斗损伤所造成的损坏程度,以提供因威胁机理所引起的损伤模式对武器装备执行任务功能的影响,进而有针对性地提出设计、维修、操作等方面的改进措施^[18]。

需要说明的是,电气线路系统属于飞机上的一个支持系统,而非功能系统。这就意味着对其影响的分析难以按照标准化的 DMEA 流程,从最低约定层次传递到上一约定层次乃至初始约定层次,也就意味着对飞机的最终影响是不确定的,或者说是和具体所涉及的功能系统相关的。例如,同样的电线切断损伤,如果传递的是关键任务系统的关键信号线路,则损伤的最终影响明显要超过一般情况下的影响。表 1 所示的严酷度是针对通用电气线路对高一约定层次的影响衡量,从Ⅳ级至Ⅰ级表示危险影响程度依次增加。具体对整体系统(初始约定层次,比如飞机)的影响,则需要结合具体功能系统进行分析。

2 电气线路系统战伤的检测

战伤检测的目的是为了判定飞机的状态,找出损伤的位置和性质,以便确定合理的排除方法和修

理所需的工具、材料等^[13]。通常,根据检测实施地点的不同,飞机上的战伤检测分为原位检测和离位检测。对电气线路系统而言,绝大部分的电线、电缆及其组件等无法从飞机上拆卸下来,因此,通常以原位检测为主,同时,设备宜便携易用,便于在战场环境下展开使用。

2.1 外观检查

目视外观检查是航空装备维护中最重要也最基本的检查方法。电气线路系统战伤的原因通常为射弹、破片、高温、应力等,一般都伴有外部损伤或者痕迹,通过目视检查,辅之以常用的工具即可判断出大多数的电气线路系统损伤。

手电筒和反光镜是外场最常用的外观检查工具^[5],如图 2 所示。通过反光镜,可以观察到可达性比较差的区域中电气线路系统的损伤情况。对于使用手电筒和反光镜也无法观察到的区域,还可以借助内窥镜(图 2 右)等进行观察。一些先进的内窥镜具备摄像探头自带光源照明的功能,可根据手柄精确控制探照位置,可拍照、录像、存档,功能更进一步的内窥镜还支持测量计算等。



图 2 外观检查工具

2.2 电参数测量

在外观检查无法确定损伤情况时,需要借助一些通用仪表的电参数测量功能,辅助进行连通性检查。这些仪表一般都是平时维护使用的便携式仪表,如万用表、微欧表、兆欧表等。

还有一些特殊的电缆,常用于传输高频、射频信号,对信号传输的要求非常高。对这类电缆,仅仅测试信号线路的通、断或者阻值是不够的,还需要利用相关设备测试线路上的电压驻波比、插入损耗等参数,这方面可以借助专用的便携式网络分析仪完成。

1553B 总线是飞机电气线路中的另一类常见线路。由于这类线路中间采用了耦合器等,无法通过上述仪表来测试线路的完整性。这种情况需要使用专门的总线检测仪。有些总线检测仪不仅可以测量信号线路的物理特性(连通、绝缘、错线、屏蔽性等),还可以更进一步测试总线通信的误码率。

2.3 损伤的检测定位

线路战伤不同于平时故障的一个重要特征是其损伤位置的不确定性。线路的战斗损伤可能会出现在任何位置,也可能会比较隐蔽,通过外观检查或者普通的电参数测量仪器,可能无法确定到损伤的具体位置,而在抢修时,这又是需要迫切解决的问题。为解决线路损伤/故障的准确检测和定位问题,近年来涌现了多种相关技术^[19-22],比较有代表性的是 X 射线法、巡线法、红外热成像法、电容电感测试法、高压放电法、反射分析法等。其中,反射分析法最适于解决飞机上的线路损伤检测定位难题。还有一些方法如时域反射分析、频域反射分析、扩频时域反射分析法(SSTDTR)、驻波法等可视为反射分析法的变种。表 2 比较了几种典型检测定位方法的特点。

反射分析法的基本原理类似雷达。利用反射法测试时,首先在线路的其中一端注入信号,信号一般是高宽带信号(以提高损伤定位的精度)。该信号沿着线路传播,当遇到线路上的阻抗不连续点(接头、缺陷、断路、短路、接触不良等)时,信号会产生反射,部分信号能量将返回到信号注入端。分析被反射回来的信号大小、极性以及其相对于入射信号的延时,可以得知阻抗的具体变化情况,从而与具体线路情况对应起来。从表 1 对线路的损伤模式分析可以看出,绝大部分电气线路的战伤模式都可以与阻抗异常对应起来。如电线电缆切断、绝缘层损伤、特种线损伤、电连接器接触偶损伤、接线端子松动等等,都可以在线路阻抗上得到反映。而且,很重要的一点,飞机上复杂的线路拓扑也能通过阻抗反映且有着明显的特征,因此就确定了反射分析法相对于其他线路损伤检测定位方法的优势^[21]。

表 2 损伤检测与定位方法性能比较

方法	优点	缺点
连通性测试	检测速度快	需要电缆电线的两端都可达,无法定位缺陷
X 射线法	可检测各种类型的缺陷,能够定位具体损伤位置	设备笨重
巡线法	可检测绝缘层的损伤	需要全部电缆电线的可达性非常好;不适用于电缆分支网络
红外热成像法	可提供损伤定位	需要复杂的成像系统,有些类型的损伤/故障无法检测
电容电感测试法	设备简单	定位精度有限;不适用于电缆分支网络
高压放电法	可检测定位到绝缘损伤	测试可能会进一步损伤电缆;有一定的安全风险
反射分析法	只需单端测试;可定位损伤位置;可用于复杂线路网络拓扑结构;可小型化应用	对使用人员有一定的技术要求;定位精度需结合实际情况

图 3 是美军在相关手册^[7]中推荐使用的两种时域反射分析仪表,一种是 3M 公司的 900AST 设备(左侧),另一种是 ECLYPSE 公司的 ESP+ 设备(右侧)。这两种设备在民航维修中也有应用。



图 3 美军推荐使用的 2 种 TDR 类仪表:3M 公司 900AST 和 ECLYPSE 公司 ESP+

反射分析法的突出优点是其定位的准确性。其测试结论可告知维修人员线路损伤点距离测试端的准确距离,但其局限也在于此,因为该方法无法反映出损伤点具体在哪一块蒙皮或面板之下,而后者才是维修人员更希望得到的提示。因此,反射分析法往往还需要配合包含有线束三维空间敷设模型的计算机辅助设备等,以便为维护人员提供更有效的提示。其次,线路损伤定位的精度与具体采用的信号样式、处理方法有关。简单的驻波分析实现成本低,但是精度有限,在一般战斗机上意义有限(线路普遍较短,或者损伤点距离测试端点近,容易陷入测试盲区);高级的时域反射分析通过使用大带宽信号和复

杂的信号处理技术,可以获得高分辨力,但是设备成本高,部队人员学习的成本也比较高。

综上所述,在实际应用中,确定电气线路系统的损伤,往往需要采用上述方法中多种方法的综合。同时,部队尤其需要重视一些新技术在平时线路维护中的应用,为战时能力的转换奠定基础。

3 电气线路系统战伤的应急修理

为提高部队飞机电气线路系统的抢修效率,本文着眼当前需求,从抢修方案制定、方法选择、抢修工具选用上给出一些建议,以供参考。

3.1 抢修方案制定

抢修方案制定是指在掌握电气线路系统损伤基本情况的基础上,综合战场环境、任务需求、人力、工具、设备、器材等因素后,做出的修理方法(包括推迟修理)选择。

从电气线路系统在飞机上的作用地位以及其损伤模式考虑,对于电气线路系统的抢修,应该确立 3 个基本的原则:一是恢复损伤的必要功能项目的性能,二是确保非任务必要项目的安全,三是尽可能快地完成修复。

制定抢修方案时可参照图 4 所示的流程图进行。首先根据损伤检查、检测、定位的结果,进行电气线路系统的损伤影响分析,然后根据飞机作战任务必要项目(系统、子系统、部件)需求,确定是否可以推迟修理、是否具备标准修理的条件和可能、是否具备应急修理的条件和可能等,相应地做出推迟修理、标准修理、应急修理的具体方案,或者是放弃修理。

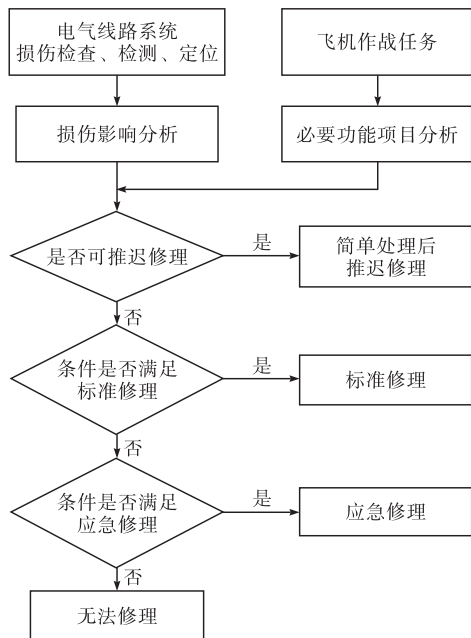


图 4 电气线路系统抢修方案制定流程图

3.2 应急修理方法

只要不带来直接的安全威胁,制定方案时可视情采用以下一种和几种方法的综合:推迟、拆换、重构、原位修复、现场制配等。

对于备用系统的线路,或者非任务必要系统的线路损伤,可采用简单的绝缘和屏蔽处理后,推迟修理;对于通用性强、同时又易于拆下的电缆如高频线、1553B 总线短截线,或者卡箍、端子等,可以采用拆换的方法,快速完成抢修;对于某些接线盒或配电板损伤,可以采用死接头短接两端线路的方法,绕过损伤的接线部件,实施重构抢修(图 5);对于可达性较好的普通低频电线,可以实施原位修复(如图 6 和图 7 所示,分别对应普通电线和屏蔽电缆的修复);对于同轴电缆损伤、电连接器损伤、总线损伤等,还可以采用现场制配的方法。



图 5 重构修复接线盒损伤示例

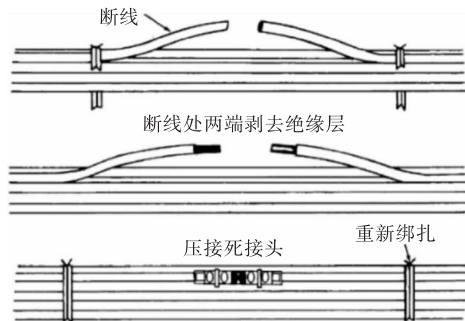


图 6 原位修复普通电线

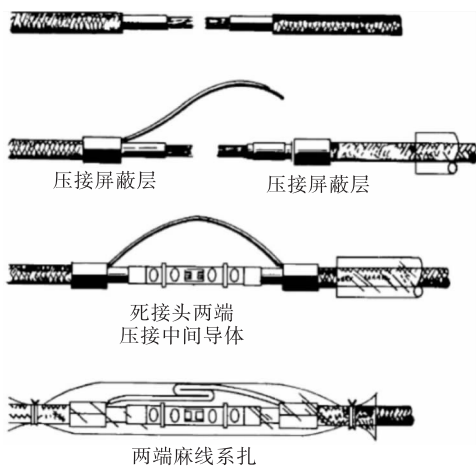


图 7 原位修复屏蔽电缆

3.3 修理工具

在电气线路修理方面,通常应使用专用的工具箱。工具箱配备齐套的工具与材料,便于外场和战场条件下展开使用。由于不同的飞机使用了不同种类的电连接器、接触件、端子等,所以各机型对应的

线路修理工具也不完全相同。例如,DMC 公司为美军推出了适用于各型军用飞机的线路修理专用集成式工具箱。这些工具箱便于携带,既可用于平时修理,也用于战伤抢修,避免了战时工具临时更换带来的麻烦。

同时,在一些工具设备选用上,也应有相应的规范,以确保安全性和有效性。一个典型的例子是加热工具(焊接导线、加热热缩套管两用)的选用。美军在进行电气线路修理时,区分了内场修理、外场修理、有油液暴露(油箱破损、油箱内作业、油路损伤等情况)时的修理几种不同情况,每种情况分别选用何种类型的加热工具,在美军的相关规范^[7]中都有明确,这种规范性的做法值得借鉴。

4 结语

从系统的观点来研究飞机上电气线路相关的问题,可提升其整体的维修性、可靠性与保障性水平。本文尝试对电气线路系统的战伤模式进行分类和规范,并完成了初步的 DMEA 分析,其结论可作为其他机载系统战伤评估的基础。对于电气线路系统的战伤检测与定位难题,对比了相关方法的优缺点,重点介绍了反射分析法在线路检测定位上的应用。最后,对于电气线路系统的应急修理,给出了抢修方案制定的原则与流程,也介绍了一些应急修理的方法与工具,可为当前航空兵部队相关保障提供支持。

参考文献

- [1] FURSE C, HAUPT R. Down to the Wire: The Hidden Hazard of Aging Aircraft Wiring[J]. IEEE Spectrum, 2001, 38(2):34-39.
- [2] 马麟龙,唐长森. 民机电气线路互联系统(EWIS)维修性设计研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2016(1): 39-44.
- [3] Federal Aviation Administration. Transport Category Airplanes: FAR25[S]. Washington D C: Department of Defence, 2016: 37-50.
- [4] 中国民用航空局. 运输类飞机适航标准:CCAR 25-R4 [S]. 北京:中国民航局,2011.
- [5] U S Department of Defense. Guidelines for Inspection of Aircraft Electrical Wiring Interconnect Systems: MIL-HDBK-522A [S/OL]. (2016-02-10) [2020-05-10]. http://everyspec.com/MIL-HDBK/MIL-HDBK-0500-0599/MIL-HDBK-522A_53903/.
- [6] U S Department of Defense. Electrical Wiring Interconnect System (EWIS) Integrity Program: MIL-HDBK-525[S/OL]. (2013-06-25) [2020-05-10]. http://everyspec.com/MIL-HDBK/MIL-HDBK-0500-0599/MIL-HDBK-525_47242/.
- [7] US Naval Air System Command. Installation and Repair Practices Volume I-Aircraft Electric and Electronic Wiring: NAVAIR 01-1A-505-1 [S/OL]. (2009-09-15) [2020-05-10]. <https://vibdoc.com/queue/navair-01-1a-505-1.html>.
- [8] 肖楚琬,孙阳,王希彬. 军用飞机 EWIS 适航性研究[J]. 飞机设计, 2018, 38(6):38-41.
- [9] 何钟武,张向前,许艳. 航空装备电气线路互联系统技术的研究与应用[J]. 航空标准化与质量, 2017(5): 42-46.
- [10] 周珺,邓健,杨阳. 舰载机电线路互联系统腐蚀问题分析及解决措施[J]. 航空科学技术, 2017(28):46.
- [11] 马建卫,严东超. 飞机电网络战伤抢修研究[J]. 航空维修与工程, 2008(4):47-49.
- [12] 于向阳,于守森,于春风,等. 飞机 EWIS 战伤抢修能力形成及保障体系研究[J]. 飞机设计, 2020, 40(1): 32-35.
- [13] 张建华. 飞机战伤抢修工程学[M]. 北京:航空工业出版社, 2007.
- [14] National Transportation Safety Board. Aircraft Accident Report, In-Flight Breakup over the Atlantic Ocean, Trans World Airlines Flight 800, Boeing 747-141, N93119 [R/OL]. (2000-08-23) [2020-05-10]. <https://www. ntsb. gov/investigations/AccidentReports/Pages/AAR0003.aspx>.
- [15] MOFFAT B G, ABRAHAM E, DESMULLIEZ M P Y, et al. Failure Mechanisms of Legacy Aircraft Wiring and Interconnects[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(3):808-822.
- [16] 方强,陈希林,季新源. 军用装备电缆战场损伤及抢修研究[J]. 四川兵工学报, 2015(9):56-59.
- [17] 王希彬,肖楚琬,孙阳,等. 军用飞机 EWIS 风险评估技术研究[J]. 飞机设计, 2018, 38(3):60-64.
- [18] 总装备部. 故障模式、影响及危害性分析指南:GJB/Z 1391-2006[S]. 北京:总装备部军标出版发行部, 2006.
- [19] 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.
- [20] 于向阳,于守森,于春风,等. 基于红外技术的线束敷设故障在线诊断方法[J]. 飞机设计, 2018, 38(6):74-80.
- [21] FURSE C, CHUNG Y C, LO C, et al. A Critical Comparison of Reflectometry Methods for Location of Wiring Faults [J]. Smart Structures and Systems, 2006, 2(1):25-46.
- [22] CHUNG Y C, FURSE C, PRUITT J. Application of Phase Detection Frequency Domain Reflectometry for Locating Faults in an F-18 Flight Control Harness[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2005, 47(2):327-334.

(编辑:姚树峰)