

飞机电气线路互联系统海洋环境适应性研究

郁大照¹, 温德宏², 王琳¹, 王腾¹, 王泗环¹

(1.海军航空大学 航空基础学院, 山东 烟台 264001; 2.海军装备部航空装备局, 北京 100071)

摘要: 以飞机典型电气线路互联系统 (Electrical Wiring Interconnection System, EWIS) 故障件和线缆及微动开关的南海环境暴晒试验结果为依据, 研究了海洋环境下 EWIS 的腐蚀故障规律、腐蚀类型和形成原因、及电气性能变化规律等。结果表明, 海洋环境下 EWIS 腐蚀失效形式多样, 易导致间歇式故障频发, 电气性能及屏蔽效能下降等。从适海性的角度提出了应从选材、设计、使用维护和故障数据分析利用等方面来提高 EWIS 的海洋环境适应性。

关键词: 电气线路互联系统; 海洋气候环境; 环境适应性; 腐蚀防护

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.04.008

中图分类号: V242; TG172.5 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2019)04-0046-05

Marine Climate Environmental adaptability of Aircraft Electrical Wiring Interconnection System

YU Da-zhao¹, WEN De-hong², WANG Lin¹, WANG Teng¹, WANG Si-huan¹

(1. School of Basic Science for Aviation, Naval Aviation University, Yantai 264001, China; 2. Aeronautical Equipment Department of Naval Equipment Department, Beijing 100071, China)

ABSTRACT: Based on fault results of the Electrical Wiring Interconnection System (EWIS) and the South China Sea environmental exposure test results of the aircraft's typical Electrical Wiring Interconnection System (EWIS), the corrosion failure law, corrosion types and causes, and electrical performance variation law of EWIS in marine environment were studied. The results show that the failure modes of EWIS corrosion in marine environment were various, which can easily lead to frequent intermittent faults and decrease of electrical performance and shielding effectiveness. From the point of view of seaworthiness, it is proposed to improve the marine environmental adaptability of EWIS from material selection, design, operation and maintenance, and analysis and utilization of fault data.

KEY WORDS: electrical wiring interconnection system; marine climate environment; environmental adaptability; corrosion prevention

电气线路互联系统 (Electrical Wiring Interconnection System, 简称 EWIS) 由美国联邦航空局 (FAA) 在 FAR25 部第 123 号修正案中提出, 是指用于在两个或多个终端之间传送电能、数据和信号的各种导线、线路装置或它们的组合, 将原属于各功能系统的电缆、连接器、继电器、开关等连接和控制、保护等部件, 作为一个系统来设计和适航审定。一架飞机有

数以千计的各类 EWIS 组成, 布置在飞机的各个区域位置, 承担着为飞机各功能系统电设备提供电气和信号传输功能, 对飞机的飞行安全具有极其重要的作用^[1-5]。

热带海洋环境具有高温、高湿、高盐雾、强太阳辐射及霉菌生长活跃等特点, 对 EWIS 具有极大的影响, 很容易发生腐蚀、老化等问题, 直接影响了 EWIS

部附件的导电、磁导、电感、电容、电子发射和电磁屏蔽等参量的改变,从而引起腐蚀故障。甚至很轻微的腐蚀都会导致系统或设备级的间歇性故障或完全失效,甚至引起二次故障。通过初步统计,2010—2015年,驻海南飞机的 EWIS 部附件故障率是驻山东服役飞机的 1.9 倍^[6]。张友兰等人^[7]针对环境对 EWIS 部附件的影响,用 3 年时间跟踪了 6 种机型 200 多台套 EWIS 部附件的故障情况。结果发现,在海南地区,EWIS 部附件的故障率是内陆的 2~3 倍。

目前,国内在飞机 EWIS 的腐蚀失效机理与防护控制研究方面,还处于起步阶段,技术基础较薄弱,关键技术突破不多,腐蚀控制无章可循。因此,针对海洋环境特点,开展 EWIS 的海洋环境适应性研究,确定 EWIS 容易发生的腐蚀问题,给出具体解决措施,对于减轻腐蚀对飞机的危害,降低故障率,避免出现重大腐蚀故障,保障飞行安全具有重要意义。

1 海洋环境下 EWIS 的腐蚀和故障特点

我国东南沿海和南方是湿热带气候,在湿热季节,平均气温高于 25℃,日温差最大可达 25℃,而平均相对湿度在 80%以上,有的甚至超过 95%。机舱内吸入大量潮气,湿度增大,形成高湿热环境。舱内不通风,极易诱发霉菌的滋生,部附件表面产生霉变,造成性能劣化、元器件失效等故障。由风浪打水形成的由氯化物和微小液滴所组成的气溶胶体,其强盐雾环境极易导致电化学腐蚀,造成电缆绝缘失效、阻抗波动、信号遗失、接触电阻增大等故障模式。

相对于飞机结构用材料,EWIS 材料种类繁多,其中 Cu、Ni、Au、Pd、Ag、Al 及其合金和 Sn 合金,在 EWIS 中获得了广泛的应用,它们主要被用作导电材料、触点或接点材料、插件材料和框架材料。在海洋环境下,多种金属和合金体系会发生电偶腐蚀、缝隙腐蚀、微孔腐蚀、应力腐蚀、杂散电流腐蚀等多种形式的环境失效问题。除了大气环境影响外,EWIS 还承受振动应力、电应力、热应力等,正是电子所用材料和使用环境的多样性及电子材料结构上的特殊性,使得电子材料的环境失效机理非常复杂,EWIS 间歇式故障频发:一是空中出现的故障现象地面通电不复现或地面通电故障现象时有时无;二是参数偏离常值,但在正常范围内,或是参数不稳,随机摆动;三是不明原因的烧保险丝、跳开关,重新打开开关或更换保险丝后工作正常;四是通过串件排故法故障消失,但隔段时间后故障又重复出现。

通过对在南海岛礁环境下使用 3 个月时间的飞机普查发现,已在起落架舱等暴露区域出现元器件腐蚀现象。比如,机上个别负线和搭铁线已经腐蚀,无法起到接地作用,且全机负线、搭铁线未采用铜铝氧

化剂导电膏工艺,易加速腐蚀。多机左起落架舱压力信号传感器插头出现外表和内部腐蚀。前起压缩位置终点开关由于多次插拔,导致插针表面镀层磨损,出现微腐蚀,曾经多次出现断针现象等问题。另外,搭铁短路、接触不良、串电、断线脱焊等腐蚀引起的故障现象也比较突出。几种典型的 EWIS 部件腐蚀现象如图 1 所示。

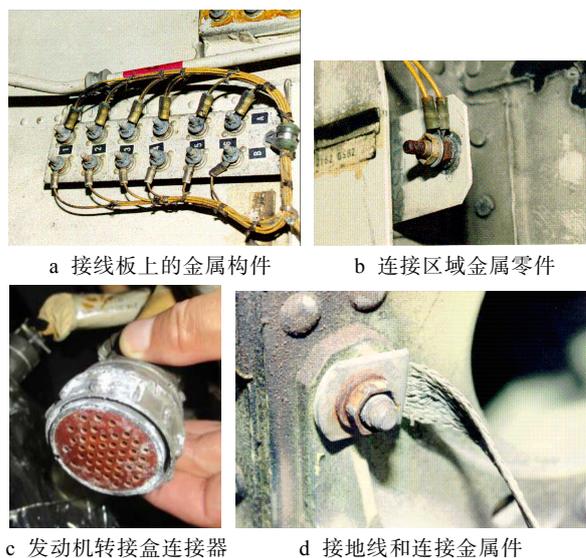


图 1 典型 EWIS 部件腐蚀

2 海洋环境对 EWIS 的影响

根据功能,EWIS 部件主要分为电线、电缆;连接器及附件;开关、继电器;接线端子等。文中主要对易腐蚀和对飞行安全有严重影响的部件进行分析。

2.1 电线、电缆

根据实测,南海地区中午太阳能紫外线占 4%,超出高辐射强度区拉萨市 0.4%,再加上高温、高湿,线缆的护套、绝缘层等高分子材料很容易发生降解和氧化,加速线缆的老化、脱落等现象的发生,致使导体外露,从而造成短路起火,影响飞行安全。对于屏蔽电缆,可造成屏蔽层导通电阻增大,绝缘性能下降。海洋环境也会加速电线、电缆的老化。以万宁站为例,年均气温为 24.6℃,平均相对湿度为 86%,全年 78%的时间相对湿度超过 80%。湿度超过 95%的高湿时间年均 1012 h,占比 11.5%,连续高湿时间可达 70 h。某型飞机屏蔽线缆在海南万宁棚下、黑箱及漠河棚下大气暴露试验 36 个月后,采用西安中峰的导通电阻测试仪进行测量,屏蔽层导通电阻变化趋势如图 2 所示。可以看出,暴露试验 6 个月后,导通电阻开始增大,相对于漠河,南海环境影响较大,特别是模拟飞机设备舱内环境的黑箱暴露试验对导通电阻影响最大。

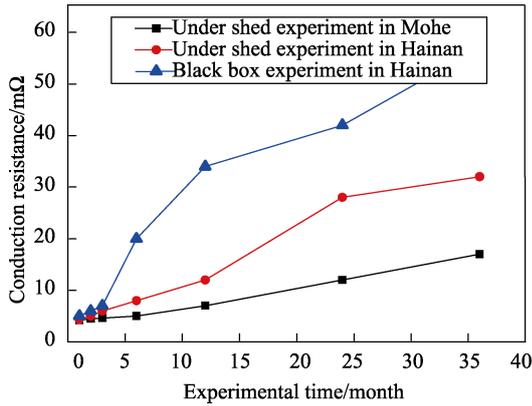


图2 屏蔽电缆屏蔽层导电电阻变化趋势

2.2 电连接器

作为电气、电子接口器件，电连接器在 EWIS 内起着电气连接和信号传输的重要作用。在高温、高湿、高盐雾综合作用下，电连接器极易发生壳体腐蚀、绝缘性能下降、导通电阻增加甚至断路等问题，对于此环境下使用的电气、电子设备来说，电连接器已成为了主要的薄弱环节之一^[8]。

笔者对在沿勃海机场某型号飞机前起落架舱部位使用 4 年的电连接器进行了腐蚀损伤分析。连接器型号为 GJB 599A I 系列，壳体为铝合金镀军绿镉，尾部有螺纹，接触件为铜合金镀金（过渡层为镍），镀金层厚度为 1.27 μm。观察连接器插座端界面，如图 3 所示，绝缘橡胶表面、原插孔处、壳体内表面及弹簧爪表面均有白色颗粒状多余物存在。

插孔内表面典型腐蚀位置 EDS 分析结果如图 4 所示。在该测试位置检测到 Cl 元素，是因为海面盐雾侵入所致，O 元素含量高，说明出现腐蚀产物。由于滑动磨损和微动磨损的存在，腐蚀产物膜容易受到

破坏，腐蚀产物累积不明显。EDS 测试结果中的 Ni、Cu 表明，镀金层局部破坏后，过渡镀 Ni 层和插孔 Cu 基体均在 Au 的加速作用下发生腐蚀，腐蚀产物溢出到插孔表面。插孔内表面疑似腐蚀位置均属于磨损严重区域，虽然镀金层本身亦存在固有微观缺陷，易成为腐蚀萌生位置，但在实际使用状态下，由于插拔、异物侵入、微动磨损等原因造成的镀层破损处更容易成为腐蚀萌生位置。电连接器绝大多数时间处于插入状态，外部水气、腐蚀性介质渗入缓慢，但在维修维护中，插拔操作造成盐雾、灰尘等容易进入内部，加速电接触表面的腐蚀。



图3 某型号连接器插孔端外观形貌（拆解后）

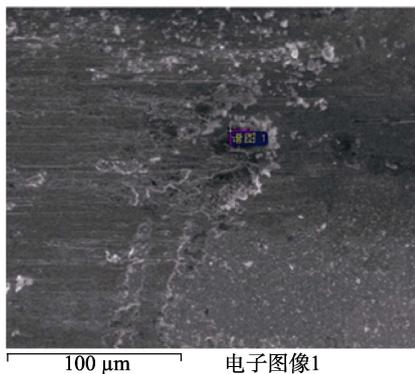


图4 插孔内部典型局部腐蚀位置微观形貌及 EDS 分析

元素	质量分数/%	原子数分数/%
O	43.47	77.36
Mg	5.34	6.26
Cl	1.17	0.94
Ni	18.14	8.79
Cu	6.73	3.02
Au	25.15	3.63
总量	100.00	100.00

2.3 微动开关、继电器类

开关和继电器是构成 EWIS 必不可少的元器件，且使用量大、类型多、范围广，对飞行安全影响较大。

美国空军安全中心针对 1989—1999 年期间，由飞机 EWIS 相关各类元器件引发的故障进行了统计，其中开关和继电器占 10%。我国某型海军飞机的 1600 余条装备故障数据统计分析表明，开关和继电器故障为

130 余条。

为分析海洋环境对两类器件的影响,文献[9]选取航空中使用较为广泛的某型号微动开关,在海南万宁试验站进行了 3 个月的棚下试验。万宁站为我国大气腐蚀性最严酷的区域之一,年均氯离子沉积速率为 $3.25 \text{ mg}/(100 \text{ cm}^2 \cdot \text{d})$,近海场大气腐蚀性为最高的 C5 级。3 个月后微动开关的内外部腐蚀情形如图 5 所示。开关按钮出现动作卡滞,镀银焊接端出现变色现象。测试接触电阻,开关常闭端和常开端的接触电阻全部升高,已超过微欧计的最大量程 $20 \text{ M}\Omega$ 。这主要是因为万宁高温、高湿和高盐环境下,腐蚀性气体进入开关内部,附着在触点表面,形成腐蚀性液膜,铜被腐蚀,并生成导电性差的腐蚀产物,导致开关触点间的接触电阻大幅度提高。

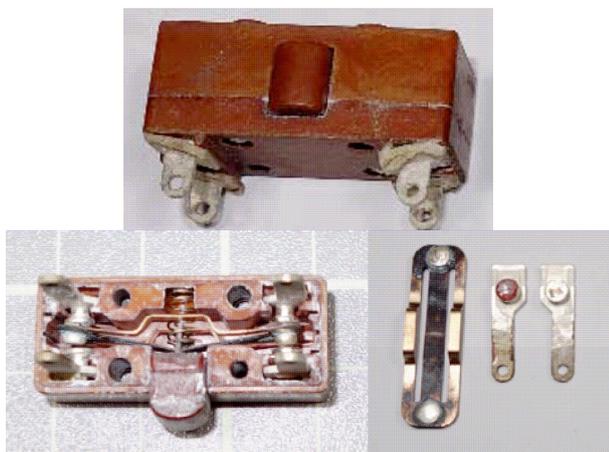


图 5 海南万宁站放置 3 个月后的微动开关内外部腐蚀形貌

2.4 对电磁干扰屏蔽效果的影响

飞机上产生/吸收的电磁能会与航空 EWIS 相互干扰,而产生微处理器位错误、计算机内存丢失、虚假信号和功率损耗等故障。这些故障的结果可能导致飞行安全状况、任务中止或系统/子系统操作失去响应。为了最大限度减少 EMI 引起的故障,所有现代飞机上的航空电子设备都需要某种形式的 EMI 屏蔽,用于保护航空电子设备免受飞行中电磁环境的影响。电磁干扰屏蔽系统通常由夹在外壳和固定底座之间的导电垫片组成,这种垫片要求在外壳/垫片/底座连接处提供足够的导电率。对于服役于海洋环境下的飞机,不可避免地会引起屏蔽材料的腐蚀,特别是由银和铝金属对组成的低电阻接头,非常容易发生电偶腐蚀,从而在连接处产生非导电膜,破坏导电路径,降低 EMI 屏蔽效果,甚至结构的承载能力^[10-11]。EMI 垫片及连接法兰腐蚀前后屏蔽效能对比如图 6 所示,可以看出,腐蚀能够明显降低屏蔽效能。

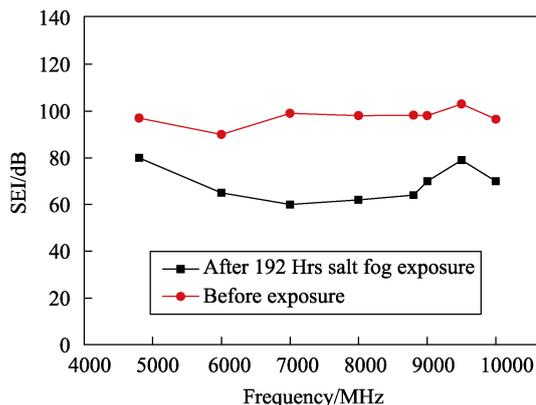


图 6 EMI 垫片腐蚀前后屏蔽效能对比

3 腐蚀防护对策

针对“三高”海洋环境特点,对于飞机 EWIS 的腐蚀防护应从设计和维护两方面进行^[12-15]:一是从设计源头考虑 EWIS 的腐蚀防护与控制,重点考虑 EWIS 部件的选材、安装和环境等方面,从而保证系统的预期功能不会因 EWIS 部件腐蚀而造成降级;另一方面加强使用中的维护技术研究和先进设备、防护材料的研制开发,给出合理有效的检查程序和技术标准要求。保证 EWIS 在海洋环境下工作的可靠性,提高服役于海洋环境下飞机的使用安全与寿命。

1) 重视 EWIS 材料的选择和部件的安装设计。EWIS 材料种类繁多,在触点或接点处很容易发生电偶腐蚀、缝隙腐蚀、微孔腐蚀等,而合理正确的选材能有效防止 EWIS 在海洋环境中腐蚀与老化的发生。如电气接口安装接触部分尽量采用同材料、同镀层,若无法避免,则使用电势差兼容的材料。当选择合适的兼容金属也无法实现时,要施加防护层或进行隔离密封处理。固定线束的紧固件选用经钝化处理的螺钉、螺帽等,与安装结构接触的线束金属支撑件的材质应与安装结构的材质一致,对线束与螺栓的安装接触点进行防护。在选择屏蔽外壳材料时,应尽可能地降低壳体材料与垫圈材料或导电密封胶圈间的电位差,提高环境适应性。安装设计也是提高 EWIS 耐腐蚀、老化的重要一环。如布线应避免被日光直射,不应布置在易受大气和海水直接侵蚀的位置。为防止液体或冷凝水顺电线、电缆流入连接器件,从而造成腐蚀问题,所有下行敷设连接器的线束均应设置滴水环。滴水环应装配于连接器与主固定支撑装置之间,在最低点应设有疏水孔。如无滴水回路,积留水分将流入 EWIS 器件或部件中,造成腐蚀。电连接器和连接器件上的布线应沿敷设方向理顺,不允许有过度弯扭,以防线缆变形,影响绝缘和密封,对线缆造成损坏。

2) 加强使用过程中的检查与维护。飞机的线路系统日趋复杂,由于环境原因导致的线路系统故障也

不断增加,要保证其有更高的安全性和可靠性,在飞机使用中,对EWIS的检查和维修提出了更高的要求。如发生腐蚀故障较多的电连接器,应加强外场使用中电连接器表面的清洗,及时清除表面海盐、灰尘等多余物,尽量降低酸性介质成分在表面的积聚,必要时使用缓蚀剂等防护措施。尽量减少电连接器在外场的插拔操作,特别是在高湿度、高盐雾的强腐蚀性环境中,应尽量避免插拔操作。进一步规范电连接器插拔操作要求,避免人为对插针、插孔的同心度造成损伤。为减小腐蚀对电磁屏蔽的影响,应该定期检查EMI垫圈,来保证它们能够持续提供预期的功能。

3)开展EWIS外场腐蚀故障数据的收集和分析。对海洋环境下服役飞机EWIS的腐蚀数据进行收集、分析和挖掘利用,不断积累故障信息,分析故障成因,确定腐蚀防护薄弱环节、易腐蚀部位、易腐蚀电子部附件类型,避免盲目维修,对典型故障采取有针对性的预防措施,进而降低线路系统的故障率。

4 结论

EWIS的腐蚀问题已成为飞机海洋环境适应研究的重要问题之一,直接影响着EWIS的可靠性和飞行安全。通过腐蚀影响和防护对策分析,得到以下结论。

1)在海洋环境下,由多种金属和合金体系构成的EWIS会发生电偶腐蚀、缝隙腐蚀、微孔腐蚀、应力腐蚀、杂散电流腐蚀等多种环境失效问题,间歇式故障频发。

2)海洋环境会加速线缆保护层的老化,屏蔽层导通电阻增大,绝缘性能下降,明显降低EWIS部件的屏蔽效能。

3)典型EWIS部件极易发生壳体腐蚀、绝缘性能下降,腐蚀性气体进入部件内部,附着在触点表面,形成腐蚀性液膜,铜等基体被腐蚀,并生成导电性差的腐蚀产物,导致开关触点间的接触电阻大幅度提高。

4)在设计过程中,需要综合考虑电气逻辑和机械连接两方面的因素。选择耐腐蚀性能更高的材料体系,为飞机制定合理的定期维修检查程序和技术要

求,注重腐蚀故障数据的收集和分析。

参考文献:

- [1] CCAR-25-R4,中国民用航空规章第25部,运输类飞机适航标准[S].
- [2] 汪常林.民用飞机典型EWIS部件失效研究[D].南京:南京航空航天大学,2013.
- [3] 周珺,王茜.舰载机电气线路互联系统腐蚀问题分析及解决措施[J].航空科学与技术,2017,28(12):43-46.
- [4] 刘岩东.EWIS设计中的适航要求分析[J].沈阳航空航天大学学报,2013,30(4):23-27.
- [5] 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.
- [6] 陈群志,鞠明,余文波,等.严酷环境下飞机外场腐蚀防护对策与措施[J].装备环境工程,2017,14(3):1-7.
- [7] 张友兰,李树华.海洋环境条件对机载电子设备的影响[C]//中国电子学会电子产品防护技术1998研讨会论文集.庐山:中国电子学会电子制造与封装技术分会,1998.
- [8] 王玲,杨万均,张世艳,等.热带海洋大气环境下电连接器环境适应性分析[J].装备环境工程,2012,9(6):5-9.
- [9] 朱蒙,李明,李刚,等.不同环境下微动开关腐蚀形貌及接触电阻变化对比分析研究[C]//2018年第五届装备环境工程发展论坛论文集.哈尔滨:重庆五九期刊社,2018.
- [10] 谢义水.舰载电子设备的三防设计[J].机械工程学报,2007,1:83-86.
- [11] 贺泽邦,杨敏娜,卢琳,等.海洋环境下磁场对电磁屏蔽涂层保护性能的影响[J].功能材料,2017,48(1):1084-1089.
- [12] 周珺,王茜.飞机电气线路互联系统设计标准体系构建研究[J].中国标准化,2018(6):211-217.
- [13] GJB 2635A—2008,军用飞机腐蚀防护设计和控制要求[S].
- [14] 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.
- [15] 申天海.基于EWIS的飞机线路检查与维修方法分析[J].科技资讯,2017(35):223-226.