

南海海洋环境下机载电子设备的腐蚀及 外场防护对策

郁大照¹, 张代国², 王琳¹, 唐庆云³

(1. 海军航空大学 航空基础学院, 山东 烟台 264001; 2. 海军驻洛阳 407 厂军事代表室, 河南 洛阳 471000; 3. 工业和信息化部电子第五研究所, 广州 510610)

摘要: 针对南海海洋大气环境下机载电子设备腐蚀故障率较大的问题, 对现役飞机机载电子设备材料体系、外场故障现象及腐蚀机理进行了系统分析。结果表明, 电子设备及其元器件受到微量的腐蚀就会对其功能、性能产生较大的影响, 现役飞机电子设备的三防设计无法满足南海严酷的环境适应性要求, 开展综合环境加速试验技术、微腐蚀机制及电信号传输与腐蚀间的对应关系等关键技术研究, 是今后的重点研究方向。最后结合腐蚀原因和特点, 给出了飞机外场具体腐蚀防护对策。

关键词: 机载电子设备; 南海环境; 腐蚀防护; 微腐蚀

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.07.002

中图分类号: TJ04;TG172 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2019)07-0008-05

Corrosion of Airborne Electronic Equipment and Field Protection Measures in Marine Environment of South China Sea

YU Da-zhao¹, ZHANG Dai-guo², WANG Lin¹, TANG Qing-yun³

(1. Aviation Foundation College of Naval Aviation University, Yantai 264001, China; 2. Naval Military Representative Office in Luoyang 407 Factory, Luoyang 471000, China; 3. The Fifth Electronic Research Institute of MIIT, Guangzhou 510610, China)

ABSTRACT: Aiming at the problem that the corrosion failure rate of airborne electronic equipment in the marine atmospheric environment of the South China Sea is obviously increased, this paper systematically analyzed the material system, external field failure phenomenon and corrosion mechanism of airborne electronic equipment in active aircraft. The results showed that the micro-corrosion of electronic equipment and its components had a great impact on its functional performance. The three-proof design of aircraft electronic equipment in service can not meet the harsh environmental adaptability requirements of the South China Sea. Key technologies such as integrated environmental accelerated test technology, micro-corrosion mechanism and the corresponding relationship between electrical signal transmission and corrosion are the key research in the future. Finally, combined with the causes and characteristics of corrosion, the specific corrosion protection countermeasures for airplane were given.

KEY WORDS: airborne electronic equipment; marine environment of South China Sea; corrosion protection; micro-corrosion

随着飞机自动化程度的提高, 机载电子设备在飞机各系统的应用越来越多。如果其中某一个器件或设

备发生故障, 将会影响整个系统或几个系统的正常工作。如果是关键电子设备, 甚至会导致飞行安全事故,

收稿日期: 2019-02-25; 修订日期: 2019-03-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51375490)

作者简介: 郁大照(1976—), 男, 山东鄞城人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为机载设备的腐蚀防护与控制。

而腐蚀是造成机载电子设备故障的一个重要因素。在南海高温、高湿、高盐雾，即“三高”环境下，机载电子设备更容易发生腐蚀、老化等问题，直接导致了电子部附件的导电、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。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^[1-7]。

据初步统计，2010—2015 年，驻海南服役飞机的电子设备故障率是驻山东服役飞机的 1.9 倍^[8]。张友兰等人^[9]针对环境对机载电子设备的影响，用 3 年时间跟踪了 6 种机型 200 多台套机载电子设备的故障情况。结果发现，在海南地区机载电子设备的故障率是内陆的 2~3 倍。同一机型的同一种导航设备，在海南的故障率是沧州的 3 倍，其中一个电子设备在沧州使用从未发生故障，而在海南使用时其故障率为 100%。

目前，国内在飞机结构腐蚀方面的研究相对比较成熟^[10]，而在机载设备及其部附件的腐蚀失效机理与防护控制研究方面，还缺乏系统性。特别是在型号研制方面，理论研究支撑还不够，部队对电子设备的腐蚀不知如何防护与控制。因此，针对南海环境特点，开展机载电子设备的腐蚀分析和防护对策研究，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 腐蚀特点

1.1 与机体结构腐蚀的区别

机载电子设备和机体结构腐蚀的主要区别是：很轻微的腐蚀在机体结构上往往不会立即产生影响，而对于机载设备却会导致间歇性故障、电学性能紊乱或完全失效。除了承担机械应力外，电子设备还承受电应力，在电流及磁场的影响下，往往导致设备发生腐蚀。多数电子设备虽然采用了“三防”设计，但其内部元件仍然发生微腐蚀，且在日常维护中很难发现。某型军用飞机电子设备内部结构如图 1 所示，拆开口盖后，发现内部托架发生腐蚀，PCB 板局部表面部位防护涂层有腐蚀现象。主要原因是三防漆喷涂工艺质量不高，很容易出现这种局部涂层起皮起泡，导致引脚等金属部位出现腐蚀。电子设备除了金属材料外，还使用许多有机材料，在过热、不恰当使用或固化不完全时会产生气体，这些气体对于电子元件具有腐蚀性，会破坏涂层和绝缘材料。

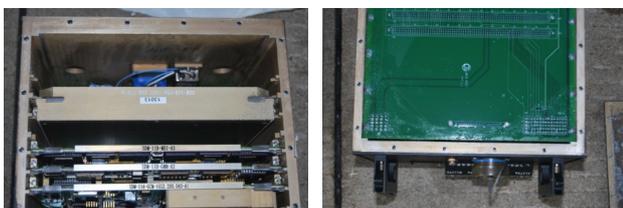


图 1 电子设备内部腐蚀现象

1.2 腐蚀机理复杂

电子材料种类繁多，应用结构复杂，其中 Cu、Ni、Au、Pd、Ag、Al 及其合金和 Sn 合金，在电子材料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。近年来，电子产品向更高集成度、更快运行速度、更低功耗与多功能性发展，在南海严酷的“三高”环境下，损伤速度更快，后果更加严重，而且更加难以预防，导致电子材料的环境适应性问题严重。在高集成度元器件和印制电路构成的多种金属和合金体系中，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。正是电子材料种类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。

2 防腐设计和控制存在的问题

1) 腐蚀防护设计工艺不能满足环境适应性。现役飞机电子设备设计时对严酷的腐蚀环境考虑不足，特别是机载电子设备设计人员为了获得一定的电子性能，在设计中牺牲耐腐蚀性能，选择不适合或易腐蚀的材料，从而导致设备暴露在复杂环境（包括温度、压力、湿度的变化，灰尘、污物和工业污染物等）下腐蚀情况加重。通过对在南海环境下使用 3 个月的飞机普查发现，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（见图 2）。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。

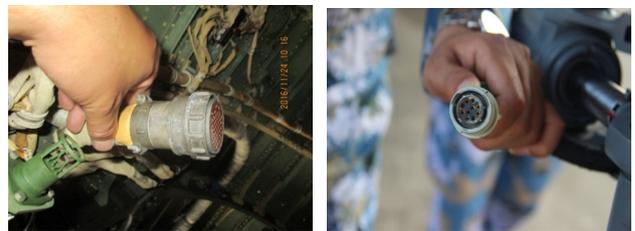


图 2 起落架舱电连接器腐蚀照片

2) 服役环境下腐蚀机理研究相对薄弱。目前飞机成品件厂家对元器件的环境考核以单因素为主，没有考虑环境与其他因素间的耦合作用。环境应力和工作应力等多种因素的综合作用下，元器件可能诱发新的故障模式和机理，发生在陆上使用中未发生的新故障。这些故障的故障模式和机理尚不明确。

3) 缺少合适的防护控制技术和手段。目前对飞机的腐蚀防护还以结构材料为主，配备的电子设

缓蚀剂也只是针对外部壳体材料，对于内部贵金属材料的防护没有考虑。对连接器等经常拆解检查且故障率较高的部件，除了采用缠绕保护带等方式外，尚无其他外场防护产品可用。密集缠绕保护带可降低盐雾的直接腐蚀，但无法阻止湿气的扩散，且阻碍了湿气的祛除，短期内减少了故障，但长期的湿气集聚会造成后期产品故障频出。对于传感器接头等部分，由于连接状态要求，不易涂覆防护层，出现过插针断裂等腐蚀性问题，目前也缺乏相应的技术支撑和技术文件指导，使得飞机在南海环境下服役存在一定的安全隐患。

3 腐蚀防护研究建议

针对目前国内对机载电子设备服役环境下腐蚀机理认识不足、防护对象不明确、维护方法不科学的现状，对典型电子设备及其部附件腐蚀数据挖掘、海洋环境腐蚀故障模式、腐蚀行为机理、性能退化规律及与腐蚀因素关联性、最佳防护周期确定、“三防”产品筛选与使用等关键技术进行研究，提出南海海洋环境适应性设计建议和腐蚀防护策略等系列成果，明确重点防护对象、防护时机、最佳防护产品和防护策略，如图3所示。

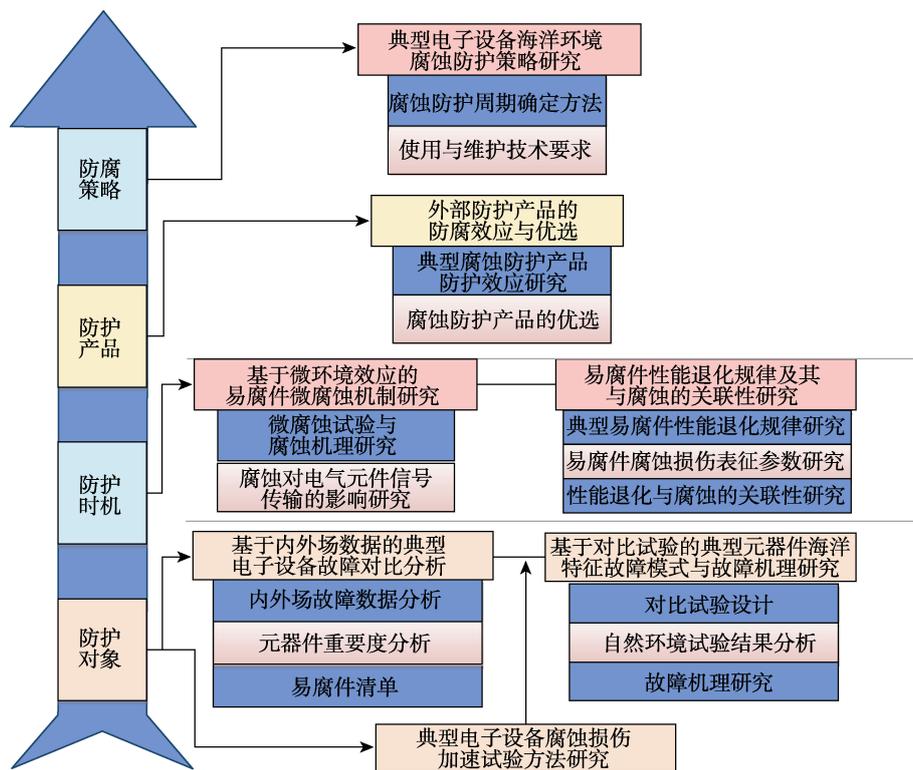


图3 机载电子设备腐蚀防护控制研究内容建议

1) 开展电子设备腐蚀故障数据的收集和分析。对南海海洋环境下服役飞机机载电子设备的腐蚀数据进行收集、分析和挖掘利用，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行，明确技术攻关方向，了解电子设备的腐蚀设计与控制基础。

2) 开展关键技术理论和技术研究。通过加速试验方法研究，获得典型区域及电子产品加速试验基本剖面。通过环境对比试验，确定海洋环境特征故障模式和机理，建立腐蚀关系模型。通过微腐蚀机制研究，完善涉电设备性能的试验和分析方法，建立电信号传输与腐蚀因素关联模型，通过性能退化规律及其与腐蚀的关联性研究，确定典型电子产品岛礁环境下性能退化规律。

3) 开展机载电子设备的腐蚀防护技术全寿命研究。针对当前机载电子产品腐蚀面临的关键性技术应用问题，开展全寿命腐蚀防护控制研究。针对现有“三

防”要求，通过腐蚀故障分析和对比环境试验，确定是否满足腐蚀防护要求，找出薄弱环节，提出三防设计建议。通过防护产品的筛选试验，确定最佳防护材料和使用技术要求。在理论研究的基础上，开展腐蚀防护最佳周期确定方法研究，提出防护技术要求，解决海洋环境下的环境适应性问题。

4 腐蚀防护与控制措施

美国对机载机载电子设备的腐蚀防护控制技术十分重视^[11-13]，通过制订专用标准对航空电子元件和组件腐蚀防护控制设计进行了明确的规定，对电子元件的材料选择、金属镀覆层的选择、各种连接方法的选择、电路连接和接地以及密封^[14]等进行了详细的研究，并研发了相应的产品。国内目前应用较多的是 DJB-823 固体薄膜保护剂和 TFHS-20 湿膜润滑缓蚀剂。

4.1 工作流程与内容

成功的机载电子设备防护与控制依赖于一个协调全面的预防性维修程序。在机载电子设备维护、维修和操作方面，每一个相关人员都必须关注腐蚀、清理、检查、预防和训练等方面的问题。预防性维护程序的一个目的是在电子设备性能严重下降发生以前，对腐蚀进行及时处理，其一般流程如图 4 所示。工作内容主要包括腐蚀处理训练、腐蚀识别和控制训练、检查技术要求、腐蚀损伤检查、腐蚀损伤报告、及时完成清理、处理、预防和润滑。

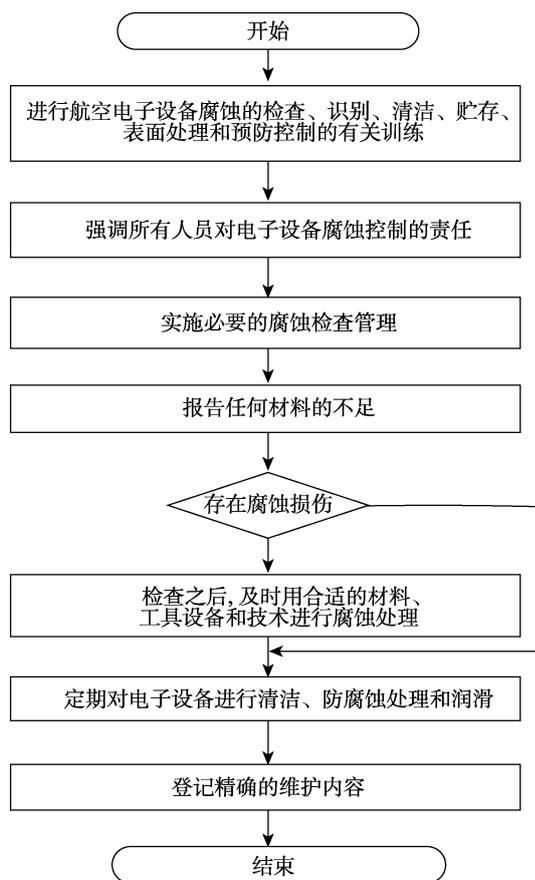


图 4 机载电子设备腐蚀检查与控制一般流程内容

4.2 外场处理措施

4.2.1 正确清洗

污染物沉积是造成机载电子设备腐蚀问题的根本原因，及时清洗可以预防很多这类问题，在检查之后第一个合理步骤就是进行清洗工作。清洗对维持航电系统功能完整性和可靠性十分重要。污渍有可能导电，也有可能是绝缘的。如果是导电的，它将形成不良的电气路径；如果是绝缘的，它将干扰正常运行。

为了确保适当的去污，在实践中最好采用最温和的清洁方法。同样重要的是，使用正确的清洗液和清洗材料才能使机载电子设备和部件避免损坏。涉及焊接点和保形涂层的清洗操作需要使用去离子水或者

蒸馏水，酸性清洁剂不得用于机载电子设备。

4.2.2 干燥除湿

雨水疏漏和潮湿空气是导致电子设备工作不正常以及各系统故障率高的主要因素。除湿干燥是严酷环境下飞机预防性措施中的一项重要措施，对减少机载设备故障率，提高飞机完好率具有重要作用。对座舱、设备舱、起落架舱、外翼内腔等部位，可采用空调车或其他除湿干燥设备进行除湿干燥处理。除湿时应将过滤净化处理后的干燥空气，通过送风管对准水分和潮湿空气容易渗入的缝隙和“死角”进行持续吹风。需要注意的是，吹风干燥过程中应将温湿度表的湿度传感器放置吹风部位，待相对湿度下降至 60% 以下时方可停止干燥除湿。

4.2.3 缓蚀剂防腐

防腐是机载电子设备修理维护工作的重要环节。应当对清洗后、封存前、沉浸过腐蚀溶液和腐蚀防护系统失效等电子元器件喷涂防腐剂。部位一般包括电气接头和插座，接线端子板、汇流条和接线盒，非保形涂层的焊接点，共轴连接器的内、外表面，接地线圈和电线等。如果需要，可用压敏胶带密封无需防腐保存的元件部位，确保完全覆盖异种金属表面接触区域、裂缝和容易积水的区域，避免过度操作。使用防腐剂的时候，在 30 min 后进行二次涂覆。大多数防腐剂会形成绝缘膜，起到隔离两个配合面的作用。例如，继电器触点上的防腐剂会使其继电功能下降。应当在使用说明的帮助下，只有在其应用和维护不妨碍电路或元件运行时，才使用防腐剂。

5 结论

机载电子设备的腐蚀研究涉及力学、电化学、电学、材料学和热学等多个学科，试验和测试分析较为复杂，目前国内研究基础相对比较薄弱。文中主要从机载电子设备的腐蚀特点、防护工作存在的问题、工作建议和使用维护策略等方面进行了分析，并得出一些有益的结论。

1) 电子设备及其元器件受到微量的腐蚀就会对其功能性能产生较大的影响，甚至导致故障和失效，对试验应力条件施加要求比较苛刻。在南海严酷环境下，损伤速度更快，后果更加严重，而且更加难以预防，导致电子材料的环境适应性问题严重。

2) 现役飞机电子设备的三防设计无法满足南海严酷的环境适应性要求，且缺乏有效的使用防护手段和技术。

3) 确定机载电子设备腐蚀防护薄弱环节，开展综合环境加速试验技术、微腐蚀机制及电信号传输与腐蚀间的对应关系等关键技术研究，是今后的重点研究方向。

4) 电子设备的腐蚀防护比较复杂, 应针对电子设备的材料及电性能特点进行防护控制, 以免造成元器件的二次损伤。

参考文献:

- [1] 曹立荣, 佟文清. 电子装备南海环境适应性改进设计研究[J]. 环境技术, 2013(6): 21-24.
- [2] 穆山, 李军念, 王玲. 海洋大气环境电子设备腐蚀控制技术[J]. 装备环境工程, 2012, 9(4): 59-63.
- [3] 刘成臣, 张洪彬, 赵连红, 等. 机载电子设备灌封材料在西沙环境下的耐老化性研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14(8): 95-98.
- [4] 李敏伟, 傅耘, 李明, 等. 典型航空印刷电路板盐雾环境腐蚀损伤规律研究[J]. 装备环境工程, 2012, 9(6): 29-35.
- [5] 李贤灵, 李高生. 某航空电子设备的 HALT 方案设计与实施[J]. 装备环境工程, 2016, 13(4): 117-123.
- [6] 何俊, 刘丽红. 几种有机硅电子灌封材料西沙热带海洋大气环境效应研究[J]. 环境技术, 2017, 35(2): 45-49.
- [7] 宁文涛, 冯皓, 赵钺. 印刷线路板在复合环境下的腐蚀[J]. 环境技术, 2010, 31(6): 30-32.
- [8] 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.
- [9] 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, 1998.
- [10] 张丹峰, 谭晓明, 陈跃良. 海洋环境下飞机结构腐蚀疲劳研究现状[J]. 装备环境工程, 2009, 6(2): 5-8.
- [11] 孙志华, 汤智慧, 李斌. 海洋环境下飞机的全面腐蚀控制[J]. 装备环境工程, 2014, 11(6): 35-39.
- [12] 刘世兴, 杜洪增, 白杰. 老龄飞机腐蚀问题研究[J]. 中国民航大学学报, 2004, 22(S1): 72-76.
- [13] 陈群志, 房振乾, 康献海. 军用飞机外场腐蚀防护方法研究[J]. 装备环境工程, 2011, 8(2): 72-76.
- [14] 姜国杰, 杨勇进, 王强, 等. YTF-3 硬膜缓蚀剂应用研究[J]. 装备环境工程, 2016, 13(1): 19-23.