

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107112

机载电子战装备原位深度检测研究

陈波 何丽 郑挺

(中国电子科技集团公司第二十九研究所 成都 610036)

摘要: 原位检测是机载电子战装备完好性的重要保障手段,现行的原位检测模式,主要开展功能的粗略检测,检测覆盖面不全,隐患排查不彻底,难以及时发现装备作战性能下降问题。针对现有原位检测技术的这些短板,提出了机载电子战装备原位深度检测的概念,对其内涵、模式、关键技术进行了研究,在机载电子战装备的原位故障深度诊断、装备性能变化趋势监测、快速测向校准等方面进行了工程实践,可使试点装备的完好率保持在95%以上,结果表明,机载电子战装备原位深度检测技术,对于提升装备完好率有着积极作用。

关键词: 机载电子战装备;原位检测;原位深度检测;装备完好性

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 590.6099

Research on in-situ further detection of airborne EW equipment

Chen Bo He Li Zheng Ting

(The 29th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu 610036, China)

Abstract: In-situ detection is an important means to ensure the readiness of airborne EW equipment, the current in-situ detection mode mainly carries out rough detection of functions, with incomplete detection coverage and incomplete troubleshooting of potential failure, which makes it difficult to find the degradation of equipment operational performance in time. Aiming at these shortcomings, the concept of in-situ depth detection of airborne EW equipment is proposed, and its connotation, mode and key technology are studied. Engineering practice is carried out in the in-situ fault depth diagnosis, equipment performance change trend monitoring and rapid positioning calibration of airborne EW equipment, which can keep the readiness rate of pilot equipment above 95%, the results show that the in-situ depth detection technology of airborne EW equipment plays an active role in improving the readiness rate of equipment.

Keywords: airborne EW equipment; in-situ detection; in-situ further detection; equipment readiness

0 引言

机载电子战装备既是现代军用飞机自卫的主要手段,也是空中突防时的攻击利刃^[1]。其作战对象非常广泛,包括敌方机载火控/预警雷达、地(海)面搜索警戒雷达、目标指示雷达、制导雷达、通信电台、数据链系统、导航系统^[2]等,频域上覆盖了从VHF一直到Ka^[3]等几乎所有常用的电磁频段。随着近几年技术的发展,机载电子战装备在不断地向超大干扰功率、武器级目标定位精度等方向发展,系统日益复杂,维修检测压力日益增大。

机载电子战装备传统的维修层级分为3级,即基层级、中继级、基地级^[4],限于基层级现场的环境、条件及人力配置,其维修工作的开展一般采取原位检测(又称现场检测、在线检测)的方式^[5],所有维修工作在飞机旁边进行,以备件替换式维修为主。为提升基层维修的效率,欧美等国一

般采取两种方式:1)对老旧机型,加强高层级维修人员的投入,以提升人员能力为主;2)对F-35等较新机型,在研制时即提出高标准的测试性、保障性要求,通过提升飞机自诊断能力及部署自主保障信息系统^[6](ALIS)来促使基层级维修的信息化、自决策^[7]。

由于各种原因,目前我国机载电子战装备的基层级维修的效率提升,主要依赖于外部维修设备的发展^[8]。部队现有的检测设备功能较单一、集成度低、庞杂低效,以雷达信号模拟器、辐射检测仪、接口检测仪等零散设备为主,因此,机载电子战装备的原位检测集中在对装备加电自检、接收/干扰功能粗略检测等方面。总体而言,当前的机载电子战装备基层级维修,存在检测覆盖面不全、隐患排查不及时、作战性能下降不掌握等问题,加之电子战装备一般不直接影响飞行安全,其故障容易被忽视,装备带病起飞的现象并非罕见。

收稿日期:2021-06-29

用户对装备实战化能力的要求越来越明确,维修体制从三级向两级简化,取消中继级,将中继级的维修工作向基层、基地两级分解^[9]。与三级体制相比,两级体制下的基层级维修工作,要求其覆盖面、深度都要有极大地提升,基层级维修工作的重心,将从简单的加电检查逐渐向深度诊断、定期性能监控等方向转变,力求全面掌握装备状态。

基于上述原因,当前的原位检测方式已经不能满足用户对装备战斗力常态化保持的需求变化,针对基层级维修的特点,开展快速深度排查、全状态监测的原位深度检测研究,就显得非常有必要了。

1 原位深度检测内涵

根据近几年在多型机载电子战装备维修保障的工作实践,现提出机载电子战装备原位深度检测的概念。机载电子战装备原位深度检测,是指针对机载电子战装备,利用机内自检测、外部检测、数据融合等分析手段,原位开展全面功能检查、性能状态监测、故障深度诊断的一种维修检测方式。原位深度检测是相对于当前的原位检测而言的,是响应军机维修体制由三级向两级转变,在大力强化基层级维修能力的基础上逐渐沉淀而来。

与传统的原位检测相比较,机载电子战装备原位深度检测有如下特点:

- 1) 更强调在原位状态下对机载电子战装备的故障深度诊断,定位更准、虚警更低、诊断更快是其主要目标。
- 2) 更强调在原位状态下对机载电子战装备的性能进行持续、长期监测,对隐患要做到早发现、早处置、早排除。
- 3) 更强调在原位状态下对机载电子战装备的全功能检测,检测要做到频段全覆盖、功能全覆盖、通道全覆盖。

原位深度检测是在当前飞机外场维修工作的基础上进行全面深化提高,根本目标是在外场尽量全面地将故障快速、准确地解决,压缩后送的故障件规模、种类和数量,缩减因故障停飞时间,缩短排故周期和成本。

2 原位深度检测发展现状

欧美等国的军机维修也经历了三级向两级的转变过程^[10],以美国为例,其实行两级维修体制的时间大致为1992年前后^[11]。美国在实施两级维修之初,其基层级的维修能力并无变化,以简单的原位检测为主,结果导致大量的故障/疑似故障件后送,再加上两级间周转链条太长、基地承接能力有限等原因,致使飞机串件率持续攀升,完好率不升反降。有统计数据表明,美国空军所有飞机的平均战备完好率在1993年末92.5%,而在1999年南联盟空袭中仅为86.3%^[12]。为弥补这些不足,美国空军在南联盟空袭战后期实施了代号为“金旗”的基层维修能力提升计划,通过向基层部队派驻高级维修工程师来增加现场的故障判断、处理能力,完成原位深度检测的工作,大幅度减少了后送故障件的数量。通过多年建设,美军已经建立起了较完备的

原位检测能力,并在F-35等机型上进行了成功应用^[13]。

我国原位深度检测的研究也在逐步开展,在相关的技术规范、检测设备、维修流程、备件目录精准匹配等方面开展了相应的工作。

3 原位深度检测关键技术

针对机载电子战装备排故准确率、状态跟踪和变化趋势监测、系统测向精度周期校准^[14]等核心保障问题,提炼出原位故障深度诊断技术、性能监测技术、快速校准技术等一系列关键技术。这是原位深度检测在机载电子战装备领域得以顺利实施并取得成效的技术基础。

3.1 原位故障深度诊断技术

以往原位状态下的故障诊断,主要依靠电子战装备自身的系统自检测(BIT),维修人员在外场根据BIT的提示来进行故障部位判断,并用备件进行替换,但由于BIT存在一定的虚警、漏警,排故工作一次成功的几率不高,甚至于在经过多次备件更换、串件后故障仍然难以排除。

为大幅度提升故障诊断的准确率,原位深度诊断着重强化了状态数据融合、故障字典在故障诊断中的应用。原位故障深度诊断逻辑如图1所示。

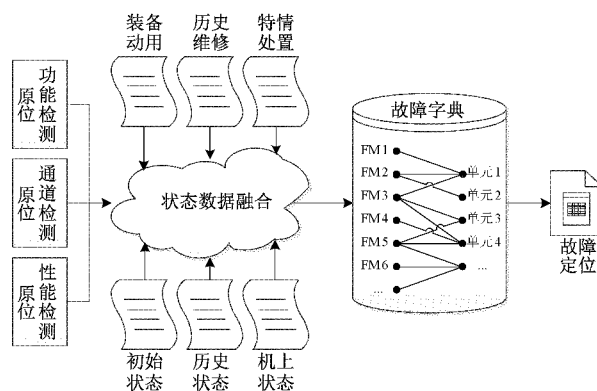


图1 原位深度诊断逻辑

原位深度诊断技术主要体现在如下几个方面:

1) 提升原位检测的覆盖面,在对装备状态信息采集时,增加对装备的原位性能检测(重点针对核心战术技术指标)、原位通道检测(重点覆盖侦、干全孔径,以及光链路等)能力,基本可全面覆盖机载电子战装备的软硬件状态评判要素,避免漏检、缺检。

2) 提升装备状态评估的准确性、全面性,除了尽量全面的采集装备的软硬件状态信息以外,还将每次检测到的状态数据与装备任务动用信息、历史维修维护信息、特情处置信息、装备初始状态信息、装备历史状态信息、机上BIT状态信息等进行融合,综合后的状态信息可以进一步降低由于检测点、特征信号不足所带来的误判、错判概率。

3) 故障诊断过程标准化、显性化,突破以往基于经验的故障诊断方式,以装备的故障模式影响及危害性分析(FEMCA)成果、研制生产过程调试测试数据为基础,采用

故障字典技术建立故障模式与组成单元间的映射关系模型,设定诊断规则,将故障关系予以固化,将故障诊断的推理逻辑标准化。

3.2 原位装备性能监测技术

机载电子战装备内部大量使用了射频、微波等高频的元器件及线缆,相对于数字类电子器件来说,射频微波器材更容易受到自然环境的影响,老化、性能下降、突发失效的概率较高,这直接影响到装备的核心战技指标能否保持,如装备的系统灵敏度、干扰功率,会随着使用年限的增长而出现不同程度的衰减,严重时会影响装备的正常作战效能发挥。

射频微波指标的测试对测试环境有很高的要求,而这些条件基层级维修现场都很难具备,类似的问题是很难发现和处理的。

机载电子战装备的整系统性能测试,主要有注入式和辐射式测试两种方式。

注入式测试是指从天线单元之后往装备注入测试信号,或测量装备发射的干扰信号,测试设备与电子战装备之间的射频信号传输是通过电缆实现的。注入式方法需要对飞机进行一定的拆装,比如打开蒙皮,断开电子战装备天线单元与后端设备之间的连接电缆。注入式测试的优点是实现精确的信号测试,且基本不受周边环境干扰。注入式测试的缺点是测试过程中对飞机的拆装实施难度较高,且拆装动作对装备的通道性能是有一定影响的,对于采用阵列式天线孔径的电子战装备,这种影响尤其明显;另一个缺点是注入式测试未覆盖天线单元,接收/发射天线单元性能情况难以知晓。

辐射式测试是指检测设备将测试信号通过天线发射出去,对电子战装备进行照射,或通过天线接收电子战装备发射的干扰信号。辐射式测试的优点是能对电子战装备进行全状态测试,其测试范围基本上能完整覆盖电子战装备各个组成单元;再者,测试过程中不需要对飞机进行拆装。辐射式测试的缺点是测试精度低于注入式测试,且会受到周围环境的影响,周边设施、建筑、设备以及飞机蒙皮对射频信号都会有反射,信号可能在经过多次反射后入射到天线孔径,这种多径效应很难准确地计算和补偿。

根据外场实际条件,上述所说的注入式和辐射式两种方法都不适合。但电子战装备性能变化又是客观存在的,尤其是在电子战装备大量服役后,因为性能下降而导致任务目标难以达成的情况屡屡出现,对电子战装备性能的监测必要且紧迫。

通过对比注入式和辐射式两种方法,可见辐射式的实施过程更简易,测试效率更高,对维修人员的要求更低。要在基层级维修现场采用辐射式进行装备的性能测试,如下问题需要解决。

- 1) 电子战装备天线口面的信号功率如何定量换算,且控制在一定的精度范围内。
- 2) 如何解决地面、周围设备、建筑物、飞机蒙皮等多径

反射对测量的干扰。

图 2 所示是一种典型的辐射式测试场景。

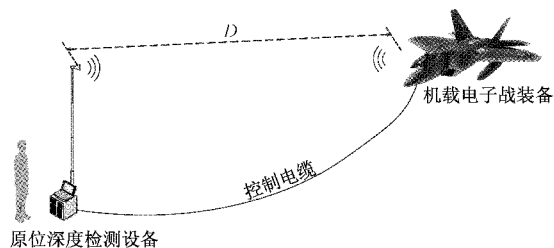


图 2 辐射式测试场景

电子战装备接收天线口面、发射天线口面的信号功率计算公式分别如式(1)、(2)所示。

$$P_r = P_C - L_{极化} - L_{空间} \quad (1)$$

$$P_j = P_M + L_{极化} + L_{空间} \quad (2)$$

其中, P_r 为电子战装备接收天线口面的信号功率(dBm); P_j 为电子战装备发射天线口面的信号功率(dBm); P_C 为检测设备等效辐射功率(dBm); P_M 为检测设备测量到的等效接收功率(dBm); $L_{极化}$ 为检测设备天线与装备天线的极化方向不一致所带来的衰减(dB); $L_{空间}$ 为距离衰减(dB)。 $L_{空间}$ 可以根据电磁波空间衰减公式来计算,如式(3)所示。

$$L_{空间} = 32.45 + 20\lg F + 20\lg D \quad (3)$$

式中: F 是信号频率(MHz), D 是检测设备天线与装备天线之间的距离(km)。

按照式(1)~(3),只要能确定检测设备天线与电子战装备天线之间的距离,就可以根据检测设备天线口面的等效辐射功率/等效接收功率得出电子战装备天线口面功率的理论值,但由于外场环境下的多径效应很复杂,理论值与实际值之间有一定的误差,数学建模进行误差分析的成本过高,且数学模型的适用性差(环境稍有改变就需要重新建模),因此这种误差比较难定量评估。为规避这种困境,可采用比较法测试,即每次都在相同的环境下进行测试,检测设备与被测飞机之间的相对位置关系保持固定,在不同时间进行的多次测试,其结果之间就具备了可比性。

根据上述思路,图 3 所示是某型电子战装备的灵敏度监测情况,从图 3 可看出,在历时 1 年的时间内,该装备 3 050 MHz 的灵敏度监测值波动范围在 ± 2.5 dB 之间(64 次监测数据情况),证明比较法测试的可重复性是很好的,具有较高的可实施性。

总的来说,在装备的服役过程中,使用人员更加关注的是装备性能指标的变化趋势,而非性能指标的精确值。使用人员可在初期,采用上述方法对装备的主要指标进行全面测试,形成基准数据,后期的各次测试结果与基准数据对比后,就可判断出装备性能的变化趋势如何。

3.3 原位快速测向校准技术

干涉仪测向技术自 70 年代出现,目前已经成为国内外电子战装备最广泛应用的测向体制^[15]。

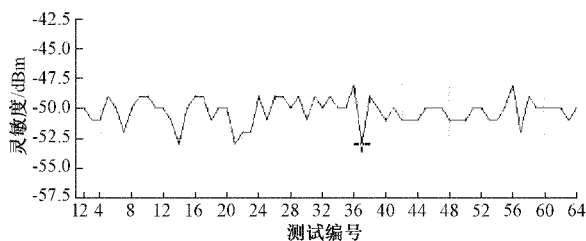


图3 某装备灵敏度监测情况

电子战装备在交付使用前都会在暗室中进行精确的测向校准,但在服役过程中,各种环境因素(如温度、振动、盐雾、霉菌等)会导致测向通道上各种器件的电性能发生偏移,从而体现出相位的偏移,因此干涉仪测向系统在使用过程中,为保证其测向精度,需要定期进行校准,刷新校准表。

图4所示是在外场条件下的一种快速测向校准方法,其中, a 、 b 是天线基线的两个端点, c 点是校准天线的位置。校准时, c 点应处于经过基线 ab 中点的垂线上。由于垂线只是理论上的一条线,非肉眼可见,也无法事先画定,因此在校准前快速准确的寻找到这条垂线非常重要。其主要步骤为,测量 a 、 b 、 c 3点的空间三维坐标值,计算出 c 点到 a 、 b 两点的距离,不断移动 c 点的校准天线,直到两距离相等,此时 c 点即处于基线 ab 中点垂线上, c 点到基线 ab 的距离 D 需满足远场条件。

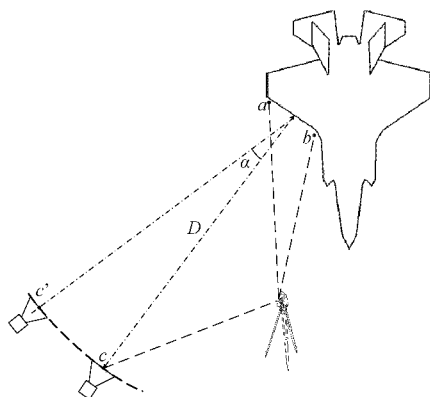
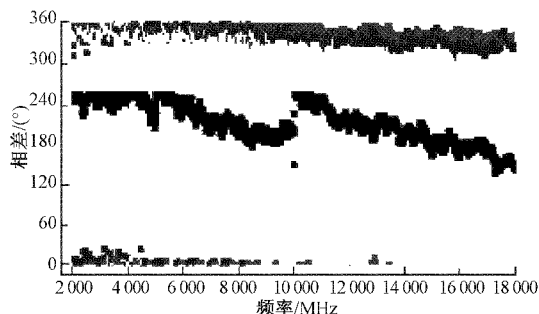
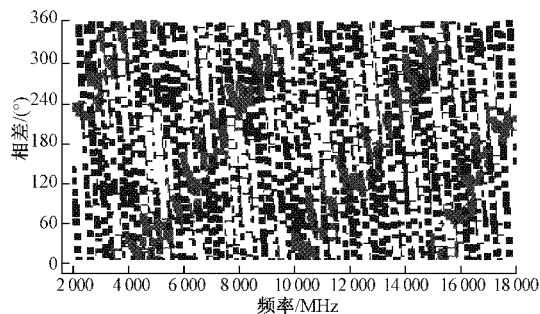


图4 外场干涉仪测向校准场景

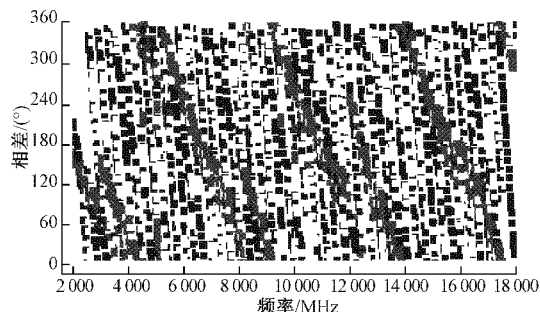
通过 c 点的校准天线向电子战装备辐射校准信号,以 $5\sim 50$ MHz的步进调整信号频率,覆盖全频段。图5所示是干涉仪校准数据图的一个实例。



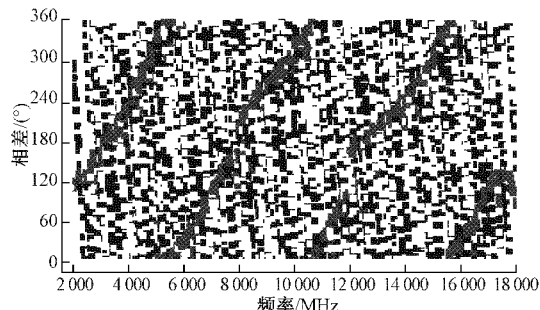
(a) 前左象限相差分布



(b) 前右象限相差分布



(c) 后左象限相差分布



(d) 后右象限相差分布

图5 校准数据图实例

完成校准后,将校准天线移动到 c' 点,与基线 ab 中点垂线形成一定的夹角 α ,对校准效果进行验证。

4 结 论

为提升机载电子战装备基层级的维修检测能力和效率,本文提出了原位深度检测的概念,并采取故障深度诊断、性能监测、快速校准等关键技术对机载电子战装备开展了数年的实践,应用情况表明,原位深度检测可以比较好地满足机载电子战装备的完好性保障需求。

推广了原位深度检测模式的基层维修单位,可依靠自身的技术力和设备资源,自主完成机载电子战装备的原位检修工作,装备完好率得到很大提高,基本实现了装备随时可用的战斗力目标,且由于在外场就开展了深度检测的工作,使得备件规模大幅下降,装备修复周期明显缩短,后送的故障件也基本集中在电路板、功能模块这类层级的组成单元上,明显减轻了周转环节的压力。后续将通过收集的实际维修数据,持续优化状态数据融合模型和故障字典库,进一步提升外场故障诊断效率。

参考文献

- [1] 蒋平虎, 苏萍贞. 关于机载电子战技术发展的思考[J]. 航天电子对抗, 2018, 34(2): 56-60.
- [2] DAVID A. EW101: 电子战基础[M]. 王燕, 朱松, 译. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [3] 陆震, 黄用华. 美俄电子战对抗的现状与分析[J]. 北京邮电大学学报, 2020, 43(5): 1-8.
- [4] 罗智勇, 刘洁, 汪时交, 等. 美军航空装备维修作业体制及其启示[J]. 航空维修与工程, 2020, (10): 29-33.
- [5] 贾绍文, 江志东, 霍立平, 等. 机载无源光电干扰设备外场原位检测仪设计与实现[J]. 电子测量技术, 2018, 41(7): 105-109.
- [6] 王少萍. 大型飞机机载系统预测与健康管理的核心技术[J]. 航空学报, 2014, 35(6): 1459-1472.
- [7] 李兴旺, 江慧云, 沈勇, 等. 飞机综合健康管理系统的研究与应用[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(4): 1069-1079.
- [8] 陈天驰, 李文海, 刘勇. 机载电子对抗装备射频通道性能检测技术综述[J]. 电子设计工程, 2019, 27(4): 122-126.
- [9] 钱征文, 苗学问. 军用飞机维修体制分析[J]. 空军装备研究, 2017, 11(4): 31-34.
- [10] 唐民锋. 美国军用航空装备维修保障体制[J]. 航空维修与工程, 2016(4): 20-23.
- [11] 卢永吉, 王远达, 侯健. 军机维修体制发展方向及关键技术研究[J]. 飞机设计, 2008, 28(4): 73-76.
- [12] 古建勇, 范鑫, 许子利. 美国空军装备维修体制探究[J]. 空军装备, 2006(11): 61-62.
- [13] 秦苟, 李三军. F-35 战斗机的状态预测与健康管理系统[J]. 航空维修与工程, 2017, (4): 33-37.
- [14] 姜文, 梁伟, 吴一戎. 机载顺轨干涉 SAR 时变交轨基线校正算法[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(6): 49-54.
- [15] 杨明洋, 向长波. 相关干涉仪测向算法俯仰角误差分析[J]. 电子测量技术, 2020, 43(18): 1-5.

作者简介

陈波, 高级工程师, 主要研究方向为电子装备综合保障研究、健康管理及故障预测技术研究。

E-mail: 892591466@qq.com

何丽, 高级工程师, 主要研究方向为电子装备测试性设计研究、健康管理及故障预测技术研究。

E-mail: 1351900526@qq.com

郑挺, 高级工程师, 主要研究方向为检测设备设计和通用自动测试系统研究。

E-mail: 22880469@qq.com