

# 军用飞机二线测试设备现状及发展趋势

肖明清<sup>1</sup>, 方甲永<sup>1</sup>, 王 邑<sup>1</sup>, 钟咏兵<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038; 2. 空军航空大学 航空军械工程系, 吉林 长春 130022)

**摘 要:**分析了美、英、俄军飞机二线测试设备使用情况, 针对二级维修体制已成为下一代飞机维护保障模式的发展方向, 提出了二线测试设备应基于飞机可测试性设计和 PHM 技术, 功能应前移和后推, 故障定位应更强的需求。提出了综合化高、通用性强、管用、好用、耐用是二线测试设备的发展趋势。

**关键词:**军用飞机; 二线测试设备; 维修体制

DOI: 10.3969/j.issn.1009-3516.2010.01.003

**中图分类号:** V271.4; TP306 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2010)01-0011-04

军用飞机二线测试设备是在内场或修理厂用于对飞机机载产品进行离位测试的设备, 在定检和排故修理中发挥重要作用。目前二线测试设备大量装备外军和我军的战机保障单位。如美国空军的“模块化自动测试设备 (Modular Automated Test Equipment 简称 MATE)”, 陆军的“综合测试设备系列 (Integrated Family of Test Equipment 简称 IFTE 系统)”, 海军的“联合自动化支持系统 (Consolidated Automated Support System 简称 CASS 系统)”, 海军陆战队的“第三梯队测试系统 (Third Echelon Test Set 简称 TETS 系统)”<sup>[1]</sup>。

近年来, 国外在新一代作战飞机的设计、生产和使用中广泛应用了故障诊断、预测与健康管理技术, 飞机在飞行过程中可将故障信息发回地面, 着陆后借助于一线测试设备 PMA (Portable Maintenance Aids) 可快速更换故障设备。二线测试设备未来发展方向成为军队建设的一个热点问题。

## 1 外军二线测试设备使用情况

### 1.1 美军二线测试设备使用情况

美军目前的维修体制主要有三级维修体制和二级维修体制, 并且配置了相应的二线测试设备。根据不同的维修体制, 二线测试设备的装备数量和装备单位不同。

美军从 20 世纪 80 年代初实施三级维修体制后, 截至目前已有 100 多套 IFTE 设备交付陆军使用, 海军的 CASS 系统目前也已开发了 2 000 多套<sup>[2]</sup>。20 世纪 80 年代末到 90 年代初, 美国空军为了保持空战优势和快速反应能力, 不断降低后勤保障及维修费用, 开始试行二级维修体制<sup>[3]</sup>。二级维修体制只是取消了中间级二线测试设备的配置, 仍然保留了基地级配置, 并且增加了基地级测试与维修的工作量。为此, 2006 年 4 月美国国防部公布了新版的《空军基地级维修战略》, 明确提出空军基地级的装备维修是美空军的核心能力之一, 并且增加对基地级的资金投入<sup>[4]</sup>。美空军目前建立了 9 个中心修理厂, 分别承担飞机发动机、吊舱和电子设备的修理任务。美空军最新战机 F-35 规定采用 LM-STAR 作为其航空电子设备的自动测试系统, 并且配置在中心修理厂与生产厂<sup>[5]</sup>。

### 1.2 英军二线测试设备使用情况

英国空军曾使用四级维修体制, 其一线维修包括出动保障与维护, 二线维修包括定检、小修和中修, 三线

\*收稿日期: 2009-10-22  
基金项目: 国防预研基金资助项目 (51317030103)  
作者简介: 肖明清 (1963-), 男, 湖南常德人, 教授, 博士生导师, 主要从事机载武器系统检测自动化与智能化研究。  
E-mail: xmqing@sohu.com

维修由军队修理厂负责, 四线维修是基于各种合同。但从 2003 年开始, 英国空军维修体制从四级向二级转变。其主要表现为: 将维修业务集中在主要作战基地。比如旋翼机的维修集中在国防航空修理机构的弗里特兰兹修理站, “狂风”、“鹞”和“台风”的维修工作集中在英国皇家空军的作战基地。

例如英国的鹞式战机, 将保障体制改为由“前方修理”和“深度修理”构成的二线体制。前方修理包括一线的飞行保障和二线的小修, 仍由部队完成。这种体制将中间级维修集中和压后变为“深度修理”的一部分。二线测试设备细化为两种, 简化功能的离线综合测试设备能提供小修中修的测试、校准、验证功能, 更高级的自动测试系统则作为深度修理的一部分, 装备在维修中心。这样一来, 其功能和性能相比现有二线测试设备更加强大。

1.3 俄军二线测试设备使用情况

前苏联空军曾采用四级维修体制为: 大队维护队, 团维护队, 师修理厂、军区修理厂和航空修理企业维修基地。俄罗斯改进了这一维修体制, 将飞机维修划分为小修、中修和大修三个级别, 由各级维修部门组织实施。目前, 苏-27、苏-30 等第三代战斗机都基本建立了基于三级诊断维修方案的故障诊断与维修系统: 第一级为基层级诊断维修(也称外场级诊断维修), 以 BИT (Build In Test) 为基础, 利用相应的测试设备可以将故障隔离到外场可更换单元 LRU; 第二级为中继级诊断维修(也称野战级诊断维修), 采用相应的二线测试设备(ATE)对故障的 LRU 进行测试并将故障隔离到内场可更换单元 SRU (Shop Replaceable Unit); 第三级为基地级诊断维修(也称后方级诊断维修), 采用二线测试设备或更精确的专用自动测试设备将故障隔离到元器件<sup>[6]</sup>。

2 二级维修体制下对二线测试设备的要求

维修体制是装备管理和维修作业体系及其制度的总称, 主要包括装备维修的组织结构、职责权限和任务划分等。维修体制的变革与测试设备的发展密不可分。一方面测试设备是航空维修的重要设备, 不仅能判定飞机的作战性能, 而且直接影响到维修思想、维修方式甚至维修体制的变革。另一方面维修体制的变革势必对测试资源的配置、测试设备的发展产生深刻的影响, 对测试技术和测试人员提出新的要求。

2.1 二级维修建立在飞机可测性设计和 PHM 技术的基础上

二级维修体制要求基层级维修具有更精确、更可靠的维修保障能力。而可测性设计和 PHM (Prognostic and Health Management) 技术是提高基层级维修保障能力的关键支撑技术, 因此也是实施二级维修体制的必备技术。

可测试性 (Testability) 是指产品能及时准确地确定其状态 (可工作、不可工作或性能下降) 并隔离其内部故障的一种设计特性。为了降低测试设备成本, 提高部队诊断与维修能力, 必须在产品设计生产时就考虑可测试性设计的问题。可测试性技术的应用可以极大地提高产品的测试水平, 缩短故障监测和隔离时间, 降低其全寿命周期费用。一方面, 在产品设计阶段, 可以对产品设计原型进行虚拟测试, 验证设计方案, 排除可能的设计缺陷; 在生产阶段, 可以对产品进行全面的测试, 排除产品的潜在故障, 从而降低使用过程中的故障率, 提高其质量和可靠性; 另一方面, 可以缩短产品研制、试验和评价的周期, 减少产品的研制、维护和保障费用, 从而降低全寿命周期费用<sup>[7-8]</sup>。

预测与健康管理技术 (PHM) 是实现视情维修的基础, 是缩减测试设备, 降低维护费用和实现快速保障的关键技术。该技术正成为新一代飞机、舰船和车辆系统设计和使用中的必要组成部分。预测与健康管理包含 2 层含义: 一是预测。即预计性诊断部件或系统完成其功能的状态, 包括确定部件的剩余寿命或正常工作的时间长度; 二是健康管理。即利用诊断和预测信息进行健康状态量化描述、健康状态识别, 并根据可用资源和使用需求对维修活动做出适当决策<sup>[9-10]</sup>。

2.2 二级维修要求二线测试设备功能前移和后推

随着飞机模块化程度的提高和机内测试设备与 PHM 系统的增强, 二线测试设备的功能逐渐被基层级和基地级的测试所覆盖。美军最新的四代战斗机的很多故障检测任务已经从二线测试设备前推至一线和机上测试设备。例如 F-35 战斗机的预测与健康管理系统通过先进传感器、智能算法和智能模型来预测监控和管理装备的健康状况, 完成故障检测、故障隔离、故障预测、剩余寿命预计、部件寿命跟踪、性能降级趋势跟踪、辅助决策和资源管理等主要功能<sup>[11]</sup>。地面维护人员通过数据链或便携式辅助维修设备可以获得飞机的工作状态和故障信息等, 从而在基层级就可将故障进行准确的隔离, 同时对飞机的性能进行预测, 代替了二

线测试设备的日常测试和定期测试<sup>[12]</sup>。

二级维修体制只是取消了中间级二线测试设备的配置,而基地级仍然配备二线测试设备。取消中间级后,必然增加基地级测试与维修的工作量。美国国防部明确提出空军基地级的装备维修是美空军的核心能力之一,并且增加对基地级的资金投入。联队只保留一线维修和飞机出动保障任务,当飞机上的部件发生故障后,直接拆下来送到中心修理厂进行修理<sup>[13]</sup>。

### 2.3 二级维修要求二线测试设备具有更强的故障定位能力

取消中间级二线测试设备后,故障组件直接送往基地级修理厂进行维修。因此,基地级的二线测试设备在原 LRU 测试与故障诊断的基础上,还要具备 SRU 级的测试和故障诊断能力。二级维修体制下,补给线延长,备件不足,对基地级的快速维修响应能力提出更高的要求。美国空军指出:可靠的、现代化的、集约的基地级维护、修理与大修能力是整个保障体系的关键要素。由此可见,在二级维修体制下,需要具备强大的基地级维修能力,二线测试设备必须具备更精确更可靠的测试与故障定位能力,同时对操作人员也提出更高的要求。

## 3 二线测试设备的发展趋势

### 3.1 适度集成,以“便于开展维修工作”为准则

综合化是二线测试设备发展的一大主题。二线测试设备的综合化能明显降低设备的数量和成本,例如美军自从启动三军统一的下一代自动测试系统计划(NxTest)后,测试设备硬件压缩了 70%,工程费用减少 70%,测试程序集成时间和成本减少 50%—70%<sup>[14]</sup>。但是二线测试设备的过度集成,也会带来很多问题。首先,造成测试系统体积庞大,给运输和安装带来诸多不便。其次,一套二线测试设备完成多个专业设备测试,容易造成专业维护人员间的操作冲突,影响保障效率。另外,随着测试设备集成度的不断增加,系统的复杂性增大,其工作可靠性必然降低,同时对操作人员的要求也越来越高。二线测试设备的集成度应以便于开展维修工作为准则,不宜过度集成,否则容易形成瓶颈,影响维修工作的进行。

### 3.2 通用性增强,以尽量减少配备种类为原则

通用性是二线测试设备发展的另一大主题。目前的航空综合二线测试设备,虽然都采用了以 VXI 仪器为核心的研制方案,在测试设备的综合化、自动化方面迈出了一大步,但是由于没有系统规划,也没有采用统一的软硬件平台及接口标准,造成了不同自动测试系统之间互不通用,限制了 ATS 的通用化水平。通用测试设备在结构设计上通过各种软、硬件模块实现测试软件的可移植和硬件配置的灵活性要求,以便 ATS 各组成部分之间尽可能地相互独立,从而形成一种开放、通用的体系结构。

增强通用性的一种手段是采用纵向集成测试策略,即从装备设计到维修阶段的测试设备都在工业标准开放体系结构下统一开发。纵向集成策略实现了产品在各个不同阶段测试设备的通用性,减少了配备设备的种类。有了这种纵向测试通用化的基础,军方可以把工厂也纳入装备保障体系,可根据时间和费用要求,妥善地选择工业部门和军方的维修机构。而武器装备制造厂商也可以把装备设计验证、制造缺陷检测与维修测试结合起来,这不仅方便了维修阶段的 TPS(Test Program Set)开发,而且在军方配置 ATS 之前,工厂就完成了维修阶段故障诊断的训练和熟化<sup>[15]</sup>。

### 3.3 降低成本,以管用、好用、耐用为依据

目前,二线测试设备普遍采用新技术、新工艺和新产品集成,导致成本高昂,操作复杂,日常维护保养费用高等问题。原因是在研制时没有以“管用、好用、耐用”为原则,而是一味地追求高新技术,盲目仿效欧美等发达国家产品。如国外一块 VXI 板卡动辄几万元,现在大量的二线自动测试系统都采用 VXI 板卡集成,每台设备数百万元。对于大型的综合测试设备可以适当采用基于 VXI 总线的测试系统,而对于一般的二线测试设备完全可以用 PXI 工控机甚至单片机架构的测试系统代替。这样既降低了设备成本,减小了体积,也提高了系统的实用性。

因此,二线测试设备的研制应根据使用实际及操作维护人员的水平,选用成本低,操作和维护方便的系统架构来构成测试设备,力求达到便宜,管用、好用、耐用的要求。

### 参考文献:

中国知网 <https://www.cnki.net>  
[1] Mike Krayewsky, Mike Bond. LM-STAR Technology Support Solution[C]//Proceedings of IEEE Autotestcon, San Antonio

- IEEE Press 2004; 129—135.
- [2] Gilberto García Brad Bravo José Cifredo Automation Tools for Cass and Rtcass[C]//Proceedings of IEEE Autotestcon Salt Lake City; IEEE Press 2008; 7—12.
- [3] George LD. Two—level maintenance: how do you get there[C]//Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium. Orlando; IEEE Press 1991; 397—399.
- [4] Department of Defense Depot Maintenance Transformation [EB/OL]. [2008—09—30]. <http://www.afmc-mil.wpafb.afm il/HQ-AFMC/LG/lap>
- [5] Steven J O'Donnell Albino Cucco TPS REHOST FROM CASS TO LM—STAR[C]//Proceedings of IEEE Autotestcon Baltimore; IEEE Press 2007; 97—102.
- [6] 卢永吉,王远达,侯健.军用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.  
LU Yongji WANG Yuanda HOU Jian Research on the Development Direction and Key Technologies of Maintenance System for Military Aircraft [J]. Aircraft Design, 2008, 28(4); 73—76. (in Chinese)
- [7] 田仲,石君友.系统测试性设计分析与验证[M].北京:北京航空航天大学出版社, 2003; 13—21.  
TIAN Zhong SHI Junyou System Testability Design Analysis and Verification[M]. Beijing Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press 2003; 13—21. (in Chinese)
- [8] 温熙森,邱静,刘冠军.装备可测性设计与评估技术综述[J].国防科技, 2009, 30(1); 1—5.  
WEN Xisen QIU Jing LIU Guanjun A Review of Equipment Design for Testability and Assessment Technology[J]. National Defense Science Technology, 2009, 30(1); 1—5. (in Chinese)
- [9] Barton Paul H. Ogden Robert Stirling Cryocooler Prognostics and Health Management (PHM) [C]//Proceedings of IEEE Autotestcon Anaheim; IEEE Press 2009; 78—81.
- [10] Chen S L Craig M. Callan R. Use of Artificial Intelligence Methods for Advanced Bearing Health Diagnostics and Prognostics [C]//Proceedings of the IEEE Aerospace Conference Big Sky; IEEE Press 2008; 178—186.
- [11] 孙博,赵宇,黄伟.电子产品健康监测和故障预测方法的案例研究[J].系统工程与电子技术, 2007, 29(6); 1012—1016.  
SUN Bo ZHAO Yu HUANG Wei Case Study of Prognostic and Health Management Methodology for Electronics[J]. Systems Engineering and Electronics, 2007, 29(6); 1012—1016. (in Chinese)
- [12] Hess A. Fila L. Prognostics from the Need to Reality—from the Fleet Users and PHM System Designer/developers Perspectives[C]//Proceeding of IEEE Aerospace Conference New York; IEEE Press 2002; 2791—2797.
- [13] Michael Malesich New Direction for The DoD A ts Framework [C]// Proceedings of IEEE AUTOTESTCON. Anaheim; IEEE Press 2009; 64—68.
- [14] Bill Rose U S DoD Automatic Test Systems Strategies[EB/OL]. [2003—07—21]. <http://140.229.102.110>
- [15] O'Donnell Steven J Albino Zarcone Managing Evolving Hardware and Software Requirements[C]//Proceedings of IEEE Autotestcon Anaheim; IEEE Press 2009; 130—135.

(编辑:徐敏)

## Present Situation and Prospect of Military Aircraft Depot Test Equipment

XIAO Ming—qing<sup>1</sup>, FANG Jia—yong<sup>1</sup>, WANG Yi<sup>1</sup>, ZHONG Yong—bing<sup>2</sup>

(1. Engineering Institute Air Force Engineering University Xi'an 710038, China; 2. Ordnance Institute Aviation University of Air Force Changchun 130022, China)

**Abstract:** As new technology is adopted in the design, manufacture and use process of aircraft, the development tendency of depot test equipment has become a focus or a hot issue attracting people's attention. The paper analyzes the application of the depot test equipment in foreign army. Aimed at the actual issue of military aircraft depot test equipment, the important status and role of the depot test equipment in our army are discussed. The development of the depot test equipment under two—level maintenance system is also discussed. Finally, the development tendency of the depot test equipment is explored, which is of reference value to the development of our military aircraft depot test equipment.

**Key words:** military aircraft depot test equipment; maintenance system