

文章编号: 1674-8190(2024)02-101-07

# 民用飞机机载设备的环境鉴定试验研究

王春卉, 翟来娟

(中电科柯林斯航空电子有限公司, 成都 611731)

**摘要:** 民用飞机机载设备的环境鉴定试验是表明设备符合适用的环境标准, 进而满足其适用的技术标准规定(TSO)的重要工作内容, 对机载设备的适航审定具有重要意义。目前, 国内民用飞机机载设备的环境鉴定试验工作还在持续完善阶段。本文以某机载设备的环境鉴定试验为例, 介绍了一套机载设备环境鉴定试验的工作流程, 包括环境鉴定试验计划制定、环境试验规程开发、环境试验执行3个阶段, 并结合设备适用的最低操作性能标准(MOPS)和DO-160标准(机载设备环境条件和试验程序), 详细描述了各阶段的工作内容和重点, 以及适航联络的规划和工作建议。该设备已成功取得TSO证, 表明该流程能够有效应用于机载设备的环境鉴定试验工作开展并支持设备适航审定, 可为后续机载设备的环境鉴定试验工作提供参考。

**关键词:** 民用飞机; 机载设备; 环境鉴定试验; DO-160G; 适航审定

中图分类号: V216.5

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2024.02.11

## Research on civil airborne equipment environmental qualification test

WANG Chunhui, ZHAI Laijuan

(Rockwell Collins CETC Avionics Company, Ltd., Chengdu 611731, China)

**Abstract:** The environmental qualification test of civil aircraft airborne equipment is to demonstrate that the equipment meets the applicable environmental standards, and further meets the technical standards order (TSO), which is of great significance to the airworthiness certification of airborne equipment. At present, the environmental qualification test of civil aircraft airborne equipment in domestic is still in the continuous improvement stage. This paper takes the environmental qualification test of certain airborne equipment as an example, introduces a set of workflow for the environmental qualification test, including three stages: environmental qualification test plan development, environmental test procedure development, and qualification testing. Then combined with the minimum operational performance standard (MOPS) applicable to the equipment and the DO-160 standard (Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment), it describes in detail about the work content and focus of each stage in the workflow, as well as the planning of airworthiness liaison and suggestions. This equipment has got the TSO approval, indicating that this workflow can be effectively applied to the environmental qualification test of airborne equipment and support for the airworthiness certification, and can also provide reference for the environmental qualification test of subsequent airborne equipment.

**Key words:** civil aircraft; airborne equipment; environmental qualification test; DO-160G; airworthiness certification

收稿日期: 2023-02-06; 修回日期: 2023-05-14

通信作者: 王春卉(1987-), 女, 硕士, 中级工程师。E-mail: chunhui\_wang2022@163.com

引用格式: 王春卉, 翟来娟. 民用飞机机载设备的环境鉴定试验研究[J]. 航空工程进展, 2024, 15(2): 101-107.

WANG Chunhui, ZHAI Laijuan. Research on civil airborne equipment environmental qualification test[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(2): 101-107. (in Chinese)

## 0 引言

为保证民用飞机的飞行安全,适航当局对飞机机载设备的适航性规定了一套严格的管理制度,保证其满足针对其编制的技术标准规定(Technical Standard Order,简称 TSO)<sup>[1]</sup>。为机载设备制定的技术标准规定中,通常会规定设备必须满足的最低操作性能标准(Minimum Operational Performance Standards,简称 MOPS)和环境标准,确保该机载设备在航空器上安装后,无论在周围环境条件下还是施加应力的环境条件下,都能够可靠工作。MOPS 一般包括推荐的周围环境条件下的台架试验方法,而施加应力的环境试验则大多引用了 DO-160 标准<sup>[2]</sup>。也可采用 DO-160 标准以外的其他适用于该机载设备的标准环境条件和试验程序,TSO 中不做具体要求。本文将重点讨论基于 DO-160 标准的环境鉴定试验。

DO-160 标准是目前应用最广泛的民航机载设备环境鉴定试验标准,最新版本为 G,其中涵盖了 5 个方面(气候、机械、电气、电磁和特殊试验),23 项环境试验条件<sup>[2]</sup>。为了表明机载设备符合环境标准,需要进行环境鉴定试验<sup>[3]</sup>,即用实验室试验的方法确定机载设备在其机载使用过程中遇到的典型环境条件下的性能特性。现有的文献中,大多是对基于 GJB-150 的军工类产品的环境鉴定试验进行研究,包括:GJB-150 与 DO-160 标准的对比分析<sup>[4]</sup>,某项或某类环境鉴定试验设计<sup>[5]</sup>,鉴定试验工作管理研究和实施要点分析<sup>[6-7]</sup>,环境鉴定试验的发展现状以及对未来工作的建议<sup>[8]</sup>,也有全流程的环境鉴定试验详细介绍<sup>[9-10]</sup>等,虽与基于 DO-160 的机载设备环境鉴定试验流程大体类似,但缺乏与适航相关的阐述,且不能直接应用于民用飞机机载设备的适航取证。而基于 DO-160 的环境鉴定试验研究较少,包括:某项或某类环境鉴定试验设计<sup>[11-14]</sup>,鉴定试验环境的设计和应用<sup>[15]</sup>,也有全流程的环境鉴定试验研究<sup>[16]</sup>,但缺乏与待鉴定设备的最低性能标准的联系和具体的项目实践案例,且对流程中各阶段的适航数据和适航联络阐述不够详细。

本文以某自动定向仪设备(Automatic Direction Finder,简称 ADF)的环境鉴定试验工作为例,介绍一套完整的、通用的民用飞机机载设备环境鉴定试验流程,包括环境鉴定试验计划制定、环境

试验规程开发、环境试验执行 3 个阶段,结合该设备的最低性能标准 MOPS 和 DO-160 标准,详细描述各阶段的主要工作内容和输出,以及适航联络的规划和工作建议,以期为其他机载设备的环境鉴定试验工作开展提供有益参考。

## 1 环境鉴定试验计划

在机载设备的硬件研发计划阶段,除了 DO-254 中要求的硬件合格审定计划、硬件开发计划、硬件确认和验证计划、硬件配置管理计划和过程保证计划外,还需要开发设备的环境鉴定试验计划(Environmental Qualification Test Plan)。制定该文档的目的是为了捕获机载设备的环境鉴定试验计划,分析或相似性评估活动以及必要的支持过程,以表明设备符合适用的 TSO 中规定的适航要求和标准,最终支持设备获得局方认证。以下详细介绍需要在设备的环境鉴定计划中包含的信息。

### 1.1 设备介绍

首先,提供待鉴定设备的物理和功能描述,物理描述应确定设备的物理组成和特性,功能描述应确定该设备的关键功能,以及该设备与其他机载系统(包括电源)的接口等。ADF 设备是一种无线电导航设备,可提供飞机与选定地面站的相对方位标识和选定地面站的站台号识别。ADF 设备由天线和接收器组成,符合 ARINC 700 的形状、配合和功能特征,通过 ARINC 429 总线与航电系统中其他机载设备相连,并满足 ARINC 600 的机架和冷却要求。该设备由 115 V 变频(360~800 Hz)交流电源供电。

其次,提供待鉴定设备的功能重要性,描述该设备被分配的功能研制保证等级,这是在 ARP4754 系统研制过程中产生的(设备的功能研制保证等级来自于它相关的系统失效状态的危害等级)。ADF 设备的研制保证等级为 C 级。

### 1.2 审定基础和符合性方法

首先,明确待鉴定设备的审定基础,审定基础通常为设备对应的技术标准规定 TSO,最低性能标准 MOPS 和环境标准。ADF 设备的审定基础如下:适航需求为 TSO-C41d A 等级,最低性能标准

为 DO-179,环境标准为 DO-160G。

其次,规划待鉴定设备对应的环境标准中每种环境条件下的鉴定符合性方法和测试级别。符合性方法为将采用的用于评估设备在被测环境条件下符合有关设备性能标准的方法,可选择的方法如表1所示。

表1 符合性方法  
Table 1 Means of compliance

编号	符合性方法	具体方法
1	设备鉴定测试	按照 DO-160 进行测试
2	相似性声明	从之前鉴定成功的硬件项目中获得合格信用
3	测试	实验室测试/仿真
4	工程评估	合规声明/设计评审/分析/评估(安全等)

测试级别通常来源于子系统/设备需求,系统工程师在设备设计阶段,会根据设备的安装位置、周围环境条件、使用限制、经验等来确定设备的环境条件测试级别,并以需求的形式在子系统级/设备级明确提出。

ADF 设备的环境鉴定计划中采用 TSO 环境鉴定测试矩阵的形式,直观地列出环境鉴定试验测试需求及其对应的符合性方法和测试级别,如表2所示(节选部分内容)。

表2 ADF TSO 环境鉴定测试矩阵  
Table 2 ADF TSO environmental qualification testing matrix

环境需求	符合性方法	测试级别
DO-160 第4章 温度和高度	设备鉴定测试	A2F2
DO-160 第5章 温度变化	设备鉴定测试	B
DO-160 第8章 振动	相似性声明	TCC1R,SLML
DO-160 第10章 防水	N/A	X
DO-160 第16章 电源输入	设备鉴定测试	(BZ)XI
DO-160 第26章 防火,可燃性	N/A	X

选择 DO-160 作为环境标准,并非需要对其中的每项环境条件都进行鉴定。对于 ADF 设备,因为它的安装位置和工作环境,流体敏感性试验、沙尘试验和霉菌试验等不适用(在测试矩阵中以 N/A 表示,测试级别为 X),而对于有些特殊机载设备,则可能还要增加一些标准之外的环境条件,

如冰雹、加速度和声振等(这些特殊的环境条件试验,一般由该特定设备性能标准的编写者负责制定)<sup>[2]</sup>。具体某机载设备选择和/或附加哪些环境条件,需要在设备的需求阶段或者环境鉴定试验计划阶段确定,并体现在表2矩阵中。

应特别注意,如果使用相似性声明作为符合性方法,需要介绍将从其中获得合格信用的已鉴定合格的设备,以及可以采取相似性声明进行符合性验证的理由<sup>[16-17]</sup>。本文 ADF 设备的振动环境试验将采用相似性声明的符合性方法,从之前已取得 TSO 的 ADF 设备中获得合格信用,理由是设备的设计改动相较于已取得 TSO 的 ADF 设备,其重量和重心并没有发生变化,也不会改变该装置的机械结构,因此可不进行振动试验。

### 1.3 鉴定测试路径

对于符合性方法为设备鉴定测试的环境条件,通常先进行预测试,再进行正式测试。预测试的目的是为了评估待鉴定设备的设计成熟度,在正式测试之前发现并解决测试设置、待鉴定设备、测试支持设备和测试程序方面的问题。ADF 设备的预测试将使用蓝标版本,用与正式测试相同的测试程序进行,并产生完整的测试报告。预测试中发现的问题都解决修正后,使用设备的红标版本进行正式测试。

### 1.4 实验室测试的考虑

描述实验室执行环境鉴定测试的考虑事项,包括以下4个方面:

1) 待鉴定设备的配置,包括硬件配置,软件配置,软硬件分别应该达到怎样的成熟度;待鉴定设备(软件和硬件)的配置管理,使得后续能够根据这个信息重现实验室测试。ADF 设备的硬件和软件都将按配置管理计划处于适当的配置管理之下,在启动正式鉴定测试之前,需满足红标设计已基线化,软硬件已完成局方的第三阶段评审, MOPS 测试已完成。

2) 待鉴定设备的操作模式,即在进行环境鉴定测试时,设备在什么工作模式下能更好地体现出它对环境的容忍度。ADF 设备在环境鉴定测试时将工作在 ADF 模式、天线模式和 BFO 模式,具体模式根据环境条件而定。

3) 在环境鉴定测试中需要关注的设备性能需

求<sup>[18]</sup>。DO-160 标准中某些环境条件下,明确提出需要“确定是否符合有关设备性能标准”时,需要规定在该环境条件下测试哪些性能需求来证明设备符合其性能规范。具体某环境条件下需要关注哪些性能需求,通常在 MOPS 中有所定义<sup>[16]</sup>。ADF 设备的环境鉴定计划中采用 TSO 环境鉴定需求与性能符合性矩阵的形式,直观地列出各环境鉴定需求中需要测试的性能需求,如表 3 所示(节选部分内容)。N/A 表示该性能不需要关注,D 表示需要在该项环境试验过程中测试性能符合性,A 表示需要在该项环境试验结束后测试性能符合性。

表 3 ADF TSO 环境鉴定需求与性能符合性矩阵  
Table 3 ADF TSO qualification testing and performance compliance

环境需求	MOPS 需求		
	调谐分辨率 DO-179 2.2.1	灵敏度 DO-179 2.2.4	方位精确度 DO-179 2.2.5
低温工作温度 DO-160 第 4.5.2 节	N/A	D	D
高度 DO-160 第 4.6.1 节	N/A	A	D, A
振动 DO-160 第 8 章	N/A	N/A	N/A
防火,可燃性 DO-160 第 26 章	N/A	N/A	N/A
电源输入 DO-160 第 16.6 节	D	D	D

4) 除此之外,还有测试台(如有)的介绍和配置;测试机构介绍(包括资质信息);测试安排,需要几套待鉴定设备,每套设备上将进行哪些环境条件试验等;测试计划,时间安排等;测试中发现问题如何记录和报告等。ADF 设备的环境鉴定试验中将使用到测试台,由 PXI 模块、接线盒、射频信号发生器、天线模拟器和直流电源组成。环境鉴定预测试将在中国开展,正式测试在美国开展。鉴定试验中将用到两套 ADF 设备,分别用于 ENV 鉴定测试和 EMI 鉴定测试,这两种测试同时开展,预计 10 个月内完成。

### 1.5 符合性数据

规划在整个环境鉴定试验工作开展过程中将产生哪些符合性记录文件,以支持设备的适航审

定。ADF 设备的符合性数据将包括:环境鉴定试验计划,环境鉴定测试规程,相似性评估报告(如有),环境鉴定测试报告,环境鉴定表(Environmental Qualification Forms)以及计划/测试规程/报告的评审和配置管理数据等。其中,环境鉴定表可参考 DO-160 标准的附录,它作为环境鉴定试验的一个总结,通常产生于环境鉴定试验完成后,在设备进行适航认证时,需作为认证包的一部分提交给局方。客户也需要使用这个文件来正式声明设备按预期运行所需的环境类别。

### 1.6 适航联络规划

规划邀请局方介入环境鉴定试验工作过程的时机,确保最大限度地提高测试质量,降低项目风险和成本,减少潜在的机载设备缺陷。ADF 设备将在:①环境鉴定试验计划内部评审完成后提交局方正式评审;②环境鉴定测试规程和相似性评估等报告内部评审完成后提交局方正式评审;③环境鉴定正式测试时,申请局方进行符合性审查和测试目击等;④鉴定测试完成后,将 1.5 节中提到的所有符合性数据和其他必要的过程数据提交局方审查。

环境鉴定试验计划完成后需进行评审,评审严格遵守硬件研制计划阶段定义的通用评审流程即可,对评审产生的过程数据及最终输出进行配置管理。内部评审完成后,将环境鉴定试验计划和内部评审的过程数据一起提交局方正式评审。

## 2 环境鉴定试验测试规程开发

环境鉴定计划得到局方批准后,进入环境试验测试规程开发阶段。对于表 2 中符合性方法为相似性声明或工程评审的环境条件,不需要开发测试规程,但需要提供相似性分析报告或工程评审报告,详细论证该项环境条件能够通过相似性声明或工程评审证明符合性的合理性<sup>[17-18]</sup>。对于表 2 中符合性方法为实验室测试或仿真的环境条件,需要开发相应的测试仿真规程,具体内容不在本文赘述。

对于表 2 中符合性方法为设备鉴定测试的环境条件,需开发测试规程,可根据表 1 中计划的测试级别,参考 DO-160 中相应的试验程序,针对性开发待鉴定设备的环境试验测试规程。在此之

前,需要先描述通用的信息和操作等,如标准的实验室环境的定义(温度、湿度、气压范围等),待鉴定设备工作和不工作的温度稳定定义(对应 DO-160 中提到的“设备温度达到稳定”要求),测试过程中使用的所有测试仪器的信息,输入电源规定,设备的预热时间规定,常规的测试设置等。ADF 设备的环境试验测试规程中的通用信息(节选部分内容)如图 1 所示。

3.1 标准实验室条件

除非另有规定,否则所有标准设备性能测试均在以下环境条件下进行:

表 3-1 标准实验室条件

温度	工厂环境温度 (+15° C 至 +35° C)
相对湿度	工厂环境温度 (不大于 85%)
压力	工厂环境温度 (25 至 31 英寸汞柱)

3.2 温度稳定

3.2.1 设备不工作

当受试产品具有最大热惯性的功能部件的温度与达到规定试验温度相差在 3°C 以内时,则认为设备达到温度稳定。ADF 的稳定时间为 1 小时。

3.2.2 设备工作

当受试产品具有最大热惯性的功能部件的温度变化 < 2°C/h 时,则认为设备达到温度稳定。ADF 的稳定时间为 1 小时。

3.3 测试仪器

ADF 环境鉴定测试中使用的所有测试设备均由计量中心控制。计量中心根据制造商建议的校准周期和设备性能确定所需的校准周期。在开始任何测试之前,检查所有使用的设备的校准到期日,以确保在任何设备超过其校准期之前完成测试。由于有内部控制流程确保设备在校准有效期内,因此下表中未列出校准到期日。

表 3-2 主要测试仪器

类型	型号	序列号
信号发生器	Agilent E4434B	xxx-xxx-xxx
音频分析仪	HP 8903B	xxx-xxx-xxx
万用表	Agilent 34401A	xxx-xxx-xxx
示波器	LeCroy LA314	xxx-xxx-xxx

3.4 输入功率

除非另有规定,ADF 的输入电压将为 27.5 V<sub>dc</sub> ± 0.5 V<sub>dc</sub>, 功率最大为 18W。

3.5 预热时间

除非另有规定,通常 15 分钟预热期用于功率和温度稳定。

3.6 常规测试设置

1. 将 VOR、LOC 和 MB 射频信号发生器直接连接到适当的射频端口。
2. 通过天线将 ADF 射频信号发生器连接到适当的射频端口模拟器。

图 1 测试规程的通用信息

Fig. 1 General information in test procedures

通用信息之后,参考环境鉴定计划中表 2 和表 3 的信息,为适用的每项环境条件开发测试规程,包括以下内容。

1) 测试介绍:简要介绍这项测试主要测试设备的什么能力,需要关注设备性能还是结构完整性等,如果关注是否符合设备性能规范,需要在测试中还是测试后。

2) 测试需求:①列出这项环境条件在子系统级/设备级定义的测试需求;②列出在本项环境条件下需要测试的设备性能需求,参考环境鉴定计划中的表 3。

3) 测试条件:列出这项环境条件测试的一般要求,如测试环境如何搭建,是否需要校准,具体的校准步骤,待测设备如何安装,具体的测试剖面图,遵循的测试曲线,是否需要循环几个周期,性能测试在哪个阶段,是否需在待测设备上安装必

要的测试工具(例如加振动试验中的速度计)等。

4) 测试步骤:详细描述这项环境条件测试的操作步骤,每一步需要记录什么信息,测试什么性能,什么情况表示测试失败等。

以 ADF 设备的温度和高度试验为例,测试规程(节选部分内容)如图 2 所示。

4 温度和高度试验 (DO-160G, 第 4 节)

这个试验用以确定设备在规定的适用类别的温度、高度和压力下的性能特征,在试验过程中确定是否符合有关设备性能标准。

表 4-1 测试级别 A2F2 的最坏情况要求

环境试验	标准
低温工作试验	-55°C
高温工作试验	+70°C
短时高温工作试验	+70°C
地面低温耐受试验	-55°C
地面高温耐受试验	+85°C
高度试验	55,000 英尺
欠压试验	55,000 英尺
过压试验	-15,000 英尺

4.1 温度试验 (DO-160G, 第 4.5 节)

4.1.1 需求

ADF 设备应按照 DO-160G 第 4 节 A2F2 类设备的要求进行温度测试。

在温度测试过程中,应满足以下性能要求:

1. 灵敏度(RTCA/DO-179, Section 2.2.4)
2. 方位精确度(RTCA/DO-179, Section 2.2.5)

4.1.2 测试条件

1. 将 ADF 设备安装在温度测试室内,并连接电缆和仪器。
2. 测试剖面如图 4-1 所示,温度变化和低温/高温测试将作为组合测试进行。
3. 根据 DO-160G 第 4.5.2 段注释 2,省略了短时工作高温试验(短时温度和高温相同)。
4. 根据 DO-160G 第 5.3 节,地面低温耐受,低温工作、地面高温耐受、短时高温工作和高温工作试验可与第 5.0 节的温度变化试验相结合。
5. 根据温度变化试验的要求,试验温度水平之间的温度变化率至少为每分钟 5 摄氏度。
6. 当结合第 5.0 节“温度变化”时,如果温度变化期间的时间不允许完全确定是否符合适用的设备性能标准,则应完成足够数量的循环,以确定是否完全符合。

4.1.3 测试步骤

1. 在 ADF 断电的情况下,将试验箱温度调节至 -55°C (见图 4-1 第 1 段)。
2. 使 ADF 温度稳定在 -55°C 持续 1 小时(第 2 段)。稳定后,将腔室温度保持在 -55°C 持续至少 3 小时(第 3 段)。

图 2 ADF 温度和高度试验测试规程

Fig. 2 ADF temperature & altitude test procedure

在开发阶段完成的相似性分析报告、工程评审报告、测试仿真规程和环境试验测试规程都需要进行评审。评审严格遵守硬件研制计划阶段定义的通用评审流程即可,对评审产生的过程数据及最终输出进行配置管理。内部评审完成后,将环境试验测试规程、相似性分析等报告和内部评审的过程数据一起提交局方正式评审。

### 3 环境鉴定试验测试执行

环境鉴定试验的测试规程等经局方评审通过,且待鉴定设备达到环境试验鉴定计划中提到的成熟度后,可进入测试执行阶段。如计划文档中所述,一般先用待鉴定设备的蓝标版本进行预测试,其中发现的问题都解决修正后,再使用设备的红标版本进行正式测试。正式测试执行过程中,按照环境鉴定计划中的适航联络规划邀请局

方进行符合性审查和测试目击。符合性审查是指为了使用环境鉴定测试的结果成功地认证待鉴定设备,测试物品及其测试装置需要符合特定的配置,并在正式的环境鉴定测试之前和之后进行检查。

环境鉴定测试执行时,需严格遵守测试规程中的步骤,尽量详细记录测试结果。正式测试过程中出现任何异常和故障,立即通知项目负责人和局方工作人员,并在项目使用的故障报告系统中详细记录<sup>[19-20]</sup>故障信息,具体包括故障的确切性质,故障发生时的条件和配置,故障的表现形式,任何相关的测试或数据文件,待测设备的配置标识等。然后项目负责人与工程师讨论出故障的纠正措施,将其记录在故障报告系统中,并报告给局方工作人员。如果纠正措施涉及到设备的设计变更,理论上之前进行的所有测试都需要重新进行,除非能够证明先前进行的测试或部分测试的结果的有效性不会因设计变更而受到影响。项目负责人需与局方人员共同协商,确定先前进行的测试的有效性。

每项环境条件测试完成后,都需产生一个详细的测试结果报告(也可多项环境条件的测试结果合并到一个测试结果报告中),其中应包括以下信息:测试日期,测试地点,测试执行人员,待鉴定设备的软硬件配置,使用的测试仪器的校准数据,测试环境搭建的框图和照片,实际的测试数据(输入和输出)波形,性能需求的测试结果,测试是否通过,测试过程中的任何异常记录等。应注意,任何屏幕截图和照片都最好带有日期和时间戳。

以 ADF 设备的温度试验测试第 5 段为例,测试结果(节选部分内容)如图 3 所示。

-55°C, 低温工作第 5 段

设备类型: ADF  
 操作人员: xxx  
 日期: 2021-10-20  
 测试地点: 四川成都  
 序列号: FBMB  
 配置管理: Rev A

ADF 结果:

ADF 方位 (°)	0°	359.78	PASS
	45°	45.31	PASS
	90°	89.78	PASS
	135°	134.52	PASS
	180°	179.65	PASS
	225°	224.82	PASS
	270°	269.96	PASS
	315°	314.69	PASS

70 uV/m 灵敏度 (dB)                      -12.2                      PASS

图 3 ADF 温度试验测试结果(部分)

Fig. 3 ADF temperature test result (partial)

所有的环境鉴定试验完成后,将每项环境条件的测试结果汇总形成一个测试摘要总结,对所有的测试结果进行总结,如表 4 所示(节选部分内容)。然后将 1.5 节提到的所有符合性数据和其他必要的过程数据提交局方审查。

表 4 ADF TSO 环境鉴定测试结果总结  
 Table 4 ADF TSO environmental test result summary

环境需求	符合性方法	测试级别	测试结果
DO-160 第 4 章 温度和高度	设备鉴定测试	A2F2	PASS
DO-160 第 5 章 温度变化	设备鉴定测试	B	PASS
DO-160 第 8 章 振动	相似性声明	TCC1R, SLML	通过相似性 声明
DO-160 第 10 章 防水	N/A	X	N/A
DO-160 第 16 章 电源输入	设备鉴定测试	(BZ)XI	PASS
DO-160 第 26 章 防火,可燃性	N/A	X	N/A

## 4 结束语

机载设备的环境鉴定试验需尽早计划,并就计划与适航当局达成一致意见,然后严格按照计划实施,适时邀请局方参与评审和目击,并保留完整的过程数据,供局方审查。本文介绍的机载设备环境鉴定试验流程来自于 ADF 项目实践,此设备已顺利取得 TSO,表明该流程有效可行,易于工程实现,流程中各阶段工作内容和输出描述非常详细,可为后续机载设备的环境鉴定试验工作提供借鉴和参考。

## 参考文献

- [1] 中国民用航空局. 民用航空产品和零部件合格审定规定: CCAR-21-R4[S]. 北京: 中国民用航空局, 2013. Civil Aviation Administration of China. Civil aviation products and parts certification requirements: CCAR-21-R4 [S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2013. (in Chinese)
- [2] RTCA. Environmental conditions and test procedures for airborne equipment: DO-160G[S]. Washington, DC, USA: RTCA, 2010.
- [3] 陈星星, 冯铭瑜. 航天产品应用于航空装备开展鉴定试验探讨[J]. 航空标准化与质量, 2018(6): 33-35. CHEN Xingxing, FENG Mingyu. Discussion on carrying out qualification test for space product applying to aviation

- equipment[J]. *Aeronautic Standardization & Quality*, 2018(6): 33-35. (in Chinese)
- [4] 魏艳娟, 明志茂. 机载设备气候类环境试验标准分析[J]. *环境技术*, 2015, 35(1): 55-61.  
WEI Yanjuan, MING Zhimao. Standard analysis on climatic environmental test for airborne equipment[J]. *Environmental Technology*, 2015, 35(1): 55-61. (in Chinese)
- [5] 徐静, 赵毅, 潘勇, 等. 基于 GB/T 38924—2020 民用轻小型无人机系统环境试验方法浅析[J]. *装备环境工程*, 2022, 19(2): 78-84.  
XU Jing, ZHAO Yi, PAN Yong, et al. Simple analysis of environmental test method for civil light and small unmanned aerial vehicle system based on GB/T 38924—2020 [J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2022, 19(2): 78-84. (in Chinese)
- [6] 曹瑶琴, 韩志忠, 谌广昌. 某型直升机成品环境鉴定试验工作管理[J]. *装备环境工程*, 2010, 7(6): 42-45.  
CAO Yaoqin, HAN Zhizhong, CHEN Guangchang. Management of environmental qualification tests for certain type helicopter products[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2010, 7(6): 42-45. (in Chinese)
- [7] 李健, 李果, 翟疆, 等. 军工产品设计定型环境鉴定试验实施要点分析[J]. *装备环境工程*, 2017, 14(11): 44-47.  
LI Jian, LI Guo, ZHAI Jiang, et al. Key points of design finalization environmental qualification test for military product [J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2017, 14(11): 44-47. (in Chinese)
- [8] 安海军, 臧兵. 航空军工产品实验室环境鉴定试验分析[J]. *机械工程师*, 2015(4): 256-257.  
AN Haijun, ZANG Bing. Analysis of the laboratory environmental qualification test for military aircraft products[J]. *Mechanical Engineer*, 2015(4): 256-257. (in Chinese)
- [9] 洪翔. 机载设备环境试验设计[J]. *科技创新导报*, 2018, 15(11): 110-111.  
HONG Xiang. Airborne equipment environmental test design[J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2018, 15(11): 110-111. (in Chinese)
- [10] 张培跃, 钱思宇. 航空类军工产品设计定型环境鉴定试验概述[J]. *电子产品可靠性与环境试验*, 2016, 34(5): 57-60.  
ZHANG Peiyue, QIAN Siyu. Introduction to the environmental qualification test for the design finalization of aeronautical military products[J]. *Electronic Product Reliability and Environmental Testing*, 2016, 34(5): 57-60. (in Chinese)
- [11] 闫光巍, 张健, 伍峰. 某大型水陆两栖飞机机载设备环境试验研究[J]. *中国新技术新产品*, 2022(4): 12-16.  
YAN Guangwei, ZHANG Jian, WU Feng. Research on airborne equipment environmental test for certain type large amphibious aircraft[J]. *New Technology & New Products of China*, 2022(4): 12-16. (in Chinese)
- [12] 毛旭明. DO-160 温度环境试验应用研究[J]. *科技视界*, 2017, 37(11): 50-26.  
MAO Xuming. Application research of DO-160 temperature environment test [J]. *Science & Technology Vision*, 2017, 37(11): 50, 26. (in Chinese)
- [13] SEO J W, PARK J S, YOON C B, et al. Development and verification of aircraft controller and transceiver considering lightning induced transient susceptibility[J]. *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, 2018, 29(8): 583-593.
- [14] MASHRIKI I M, RAZAVI S M J, ARMAKI S H M. Electromagnetic and circuit modelling of a modified design of bulk current injection probe calibration jig[J]. *IET Science, Measurement & Technology*, 2020, 14(9): 715-721.
- [15] 刘艳, 陈经纬. C919 民用飞机飞控系统鉴定试验环境设计[J]. *航空工程进展*, 2021, 12(6): 153-160.  
LIU Yan, CHEN Jingwei. Environment design of qualification test of C919 civil aircraft flight control system[J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2021, 12(6): 153-160. (in Chinese)
- [16] 章光灿. 民用飞机设备合格鉴定试验(MC9)研究[J]. *民用飞机设计与研究*, 2020(1): 24-28.  
ZHANG Guangcan. Qualification test for civil aircraft equipment[J]. *Civil Aircraft Design & Research*, 2020(1): 24-28. (in Chinese)
- [17] 陈亮. 浅析环境鉴定试验类比分析在型号项目中的应用[J]. *环境技术*, 2022, 40(4): 89-92.  
CHEN Liang. Analysis on the application of environmental identification test analogy analysis in model project[J]. *Environmental Technology*, 2022, 40(4): 89-92. (in Chinese)
- [18] 安海军, 臧兵, 尉明. 机载电子设备环境试验的类比[J]. *机械工程师*, 2015(5): 279-280.  
AN Haijun, ZANG Bing, WEI Ming. Analogy of the environmental test for airborne electronic products[J]. *Mechanical Engineer*, 2015(5): 279-280. (in Chinese)
- [19] 舒伟发, 朱海青, 唐为国, 等. 机载产品实验室环境鉴定试验故障分析[J]. *质量与可靠性*, 2020(5): 8-10, 16.  
SHU Weifa, ZHU Haiqing, TANG Weiguo, et al. Analysis for failures of airborne products in laboratory environmental qualification tests[J]. *Quality and Reliability*, 2020(5): 8-10, 16. (in Chinese)
- [20] 彭望舒, 于晴. 直升机机载产品环境鉴定试验故障分析[J]. *装备环境工程*, 2019, 16(1): 73-76.  
PENG Wangshu, YU Qing. Failures of helicopter airborne product in environmental qualification tests [J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2019, 16(1): 73-76. (in Chinese)

(编辑:马文静)