

# 民用飞机整机低温试验中断处理方法研究

杨欣磊<sup>1</sup>, 吴敬涛<sup>2</sup>, 唐扬刚<sup>2</sup>, 王群伟<sup>1</sup>

(1.工业和信息化部电子第五研究所, 广州 510610; 2.中国飞机强度研究所, 西安 710065)

**摘要:** 根据民用飞机整机开展气候类实验室低温环境试验的工程需求与技术特点, 对试验过程中可能出现的中断情况进行了归纳, 并给出了相应的实验室中断处理方法, 形成了实验室操作规程体系。结合相关试验标准归纳的主要中断原因, 基于过试验、欠试验、责任故障、非责任故障等引起的中断情况, 明确其可能造成的影响后果, 并研究了中断后的处理方法。按照所归纳的标准中断情况, 依托某型民用飞机的整机级低温实验室环境试验, 分别研究了中断情况及相应的处理方法, 基于中断的基本过程建立了实验室处理方法体系。针对民用飞机整机级实验室低温试验的中断情况进行相应的处理方法研究, 建立了相应的中断处理方法流程框架, 有助于承试单位有质量地开展大型整机气候试验工作, 对试验过程的合理有效提供应急措施与保障思路。

**关键词:** 整机级低温环境试验; 试验中断处理方法; 流程框架构建

中图分类号: V216.5

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)02-0044-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.02.008

## Study on Interruption Treatment Method of Low-temperature Test of Complete Civil Aircraft

YANG Xin-lei<sup>1</sup>, WU Jing-tao<sup>2</sup>, TANG Yang-gang<sup>2</sup>, WANG Qun-wei<sup>1</sup>

(1. China Electronic Product Reliability and Environment Testing Research Institute, Guangzhou 510610, China;

2. Aviation Industry Aircraft Strength Research Institute, Xi'an, 710065, China)

**ABSTRACT:** According to the engineering requirements and technical characteristics of the low-temperature test of the climate laboratory conducted for the complete civil aircraft, the possible interruptions during the test are summarized, and the corresponding laboratory interruption treatment methods are given to form a laboratory operating procedure system. Based on main interruption causes summarized according to relevant test standards, as well as the interruptions caused by over-tests, under-tests, responsible faults, non-responsible faults, etc., the possible impacts are clarified, and the treatment methods after interruption are studied. According to the summarized standard interruption conditions, and relying on the low-temperature laboratory environmental test of a certain type of complete civil aircraft, the interruption conditions and corresponding treatment methods were studied separately, and a laboratory treatment method system was established based on the basic process of interruption. According to the research on the corresponding treatment methods for the interruption of the low-temperature test of the

收稿日期: 2020-09-21; 修订日期: 2020-10-23

Received: 2020-09-21; Revised: 2020-10-23

基金项目: 工业和信息化部民机科研项目

Fund: Civil Aircraft Research of MIIT

作者简介: 杨欣磊 (1990—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为系统可靠性与环境工程。

**Biography:** YANG Xin-lei (1990—), Male, Master, Engineer, Research focus: system reliability and environmental engineering.

引文格式: 杨欣磊, 吴敬涛, 唐扬刚, 等. 民用飞机整机低温试验中断处理方法研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(2): 044-051.

YANG Xin-lei, WU Jing-tao, TANG Yang-gang, et al. Study on interruption treatment method of low-temperature test of complete civil aircraft [J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(2): 044-051.

complete civil aircraft, a corresponding interruption treatment method process framework is established, which helps the test unit to carry out the large-scale climate test work for the complete civil aircraft in a quality manner, and provides emergency measures and safeguard ideas for the rationality and effectiveness of the test process.

**KEY WORDS:** low-temperature test of the complete civil aircraft; interruption treatment method; process framework establishment

随着航空工业制造技术的日益发展，以及民航运输运营体系的不断成熟，越来越多的订购方或使用者都对民用飞机的通用质量特性提出了更高要求。由于民用飞机在使用过程中经历的气候环境复杂，且易对整机机械结构及关键子系统部附件造成显著劣化影响，因此对民用飞机耐受严酷气候环境适应性的评价考核是整机开展通用质量特性工作过程中的重要环节<sup>[1-7]</sup>。

冬季航路上过低的气候环境常常威胁飞行安全，并对飞机造成永久性的劣化和损伤，对民用飞机开展符合其寿命或运营剖面的气候类环境试验（最常见的即为低温试验）是对环境适应性开展定性与定量评估的重要有效手段<sup>[8-12]</sup>。与单独对民用飞机某个系统或者 LRU 开展低温试验相比，整机级低温试验在试验设备资源、试验程序、检测科目、操作规程等方面都更加繁杂，试验中任何细微的错误都将影响试验的有效性，且对人力、经济、资源等成本造成直接影响，因此该类大型的低温试验也面临着严酷度更高的试验中断风险。

1 研究需求

目前国内环境工程领域实验室均有试验操作规程和作业指导书，其中对试验中断的处理方式及流程进行了具体规划，但这些单位基本不具备开展民用飞机整机级低温环境试验的软硬件能力，因此无法按照飞机整机级试验规模进行试验中断情况分析 & 处理方法研究。由于整机实施低温试验具有持续周期长、检测项目多、试验部署实施工作繁琐等特点，因此试验过程中可能出现导致试验中断无法按

计划进行的各种因素。这些因素可能致使试验条件不符合大纲既定要求，可能导致整机结构或功能发生故障，试验结果失真和无效，甚至可能对实验室或试验人员产生安全性伤害。这些情况的出现对飞行器研制单位、试验承试单位将带来不可预估的资源浪费与经济损害。因此，需要根据民用飞机整机低温试验的试验条件、试验流程、检测项目，结合实验室现场实际工作开展情况和作业规程，在试验设计规划阶段研究分析试验中可能出现的试验中断情况，以及针对特定中断情况继续开展后续试验的处理方法。

2 基于 GJB 150A 的中断情况研究

通过对国内外现有航空装备产品的环境试验标准进行调研梳理可知，当前提及“试验中断”及阐释其处理方式的标准不多，常见标准是 GJB 150A—2009 《军用装备实验室环境试验方法》。该标准于 2009 年 5 月由中国人民解放军总装备部发布，2009 年 8 月开始全面施行，具有试验项目全面、试验方法剪裁灵活、试验条件明确、试验程序可实施性强等特点，已经成为国内环境工程领域的重要试验标准<sup>[13-15]</sup>。

GJB 150A 标准对于试验中断要求相关的内容主要分布于第一部分的通用要求和其他各环境试验项目的具体章节中。该标准将试验中发生的中断分为试验条件参数偏移造成的中断，以及试验过程中发生故障导致的中断。其中试验条件偏移造成的中断细化为过试验中断和欠试验中断，试验过程故障导致的中断细化为责任故障中断和非责任故障中断<sup>[16-18]</sup>。标准常见的中断情况归纳见表 1。

表 1 实验室中断情况归纳  
Tab.1 Summary of laboratory interruptions

| 中断名称   | 中断定义                                                                                                 |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 过试验中断  | 低温试验条件控制参数（如温度、风速）超过了试验大纲规定的上下限值，可能增加试验严酷度，并对被试品造成劣化影响，此时试验人员必须及时中断试验并确保试验条件恢复正常                     |
| 欠试验中断  | 低温试验条件控制参数未达到试验条件规定的数值，使得被试品并未经历所需考核的环境应力，试验过程无效，此时试验人员应及时中断试验并调整试验条件达到所规定的应力范围                      |
| 责任故障中断 | 低温试验过程中，由于被试品工艺设计缺陷、地面专用配套设备故障或相应操作规程局限，导致不能耐受规定的低温环境应力水平，导致外观或功能性能偏离了正常范围，此时试验人员应及时中断试验并开展故障分析与归零流程 |
| 非责任故障  | 整机级低温试验过程中，外接的测试仪器仪表交联关系复杂，人员操作步骤难度较大，由于测试仪器仪表的损坏和人员操作的失误会导致试验的中断，此时试验人员应在保障实验室安全的前提下更换或维修仪器仪表及设备    |

通过对上述4种主要试验中断情况的分析归纳,可为后续以某型民用飞机为对象的整机级低温试验中断情况分析 & 处理方法研究建立理论定义上的基础。

### 3 某型民用飞机实验室低温试验中断情况分析

本试验项目依托航空工业强度所某民机课题,以某型民用飞机作为试验对象,根据该课题项目开展的整机级实验室低温试验进程,研究分析上述4种中断情况对受试对象、试验设备、试验结果造成的影响。根据试验大纲和任务规划,编制出低温试验剖面如图1所示。

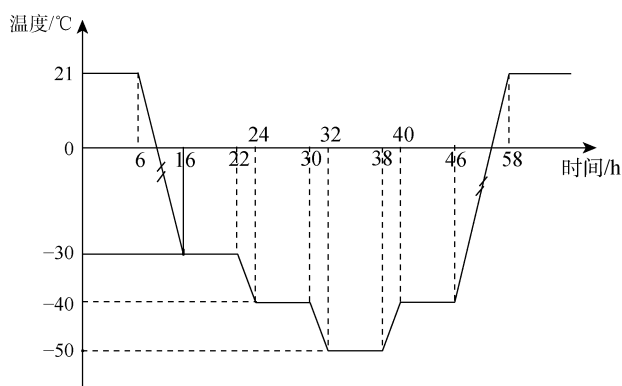


图1 某型民用飞机整机级低温试验剖面

Fig.1 Low-temperature test profile of a complete civil aircraft

通过对试验进程的跟踪与调研,现将某型民用飞机整机开展低温试验过程中已知的中断情况进行归纳分析。

#### 3.1 由于试验条件控制参数发生偏移导致的中断

试验项目所需要的设备控制精度要求高,且由于环境场地较大,整个试验环境平台的搭建都具有不确定度,因此很可能在试验条件控制参数方面出现偏移导致中断情况发生。

1) 过试验中断:由于整机低温试验的试验环境控制参数主要为实验室温度,且对温度的允差数值进行了规定,因此一旦试验过程中实测温度低于设定温度3℃以上,则满足过试验中断的基本要素,实验室相关人员应采取相应措施中断试验。

2) 欠试验中断:与过试验中断的要素相同,当实验室环境温度无法达到规定温度数值,且差值比3℃的允差值还要大时,即满足欠试验中断的条件。为了避免无效时间累积造成资源浪费,实验室相关人员应采取相应措施中断试验。

#### 3.2 由于试验过程发生故障导致的中断

某型民用飞机低温试验的温度环境应力与外场

低温环境气候相比严酷度等级相当,有可能直接造成飞机整机外部结构的故障,如机械活动部件材料的脆化或膨胀、蒙皮材料的硬化等现象。加之飞机系统架构庞大,内部线路繁多,不同低温台阶应力还有可能引发密封失效、机内流体流动性降低、风挡玻璃及机舱透明表面产生静疲劳、燃油燃烧效率降低等故障模式或退化表征,从而导致飞机各项主要功能性能的失效或劣化。此外,在试验过程中有诸多检测科目,需要实验室配备大量的地面保障维护与测试设备,这些设备可能由于自身出现的故障或失效使得相关试验检测科目无法进行。将可能导致责任故障中断和非责任故障中断的试验情况归纳如下:

1) 责任故障导致的中断。当某型民用飞机进行低温试验时,无论任何阶段,一旦相应功能、性能检测出现“既定的功能不能实现或超出允差范围的偏移”、“既定的性能指标不能满足试验大纲合格判据的要求”情况,或者地面专用配套设备(如压力加油车、电源供电车、发动机启动辅助气源等)在低温环境下丧失或偏移工作能力,且这些故障现象是由于严酷低温环境应力作用于整机或地面设备本体,则满足责任故障的发生条件。试验中具体检测要求以相关单位的试验大纲为准,如责任故障发生后,试验方、研制方和使用部门会根据排故流程对试验进行中断处理并开展故障分析归零流程。

2) 非责任故障导致的中断。当开展整机级低温试验时,实验室环境状态和受试飞机技术状态也需要温湿度传感器、秒表、测力计、扭力扳手等仪器仪表工具进行维持。除此之外,试验人员的操作规程必须符合实验室规章制度。上述环节如果出现偏差或失误,就可能引起非责任故障发生。试验中典型非责任故障见表2。

表2 整机级低温试验中典型非责任故障模式

Tab.2 Typical non-responsible fault mode of low-temperature test of complete civil aircraft

| 非责任故障模式              | 故障原因概述                                    |
|----------------------|-------------------------------------------|
| 测试仪器仪表的测试功能失效或计量精度超差 | 仪器仪表自身发生老化、损坏或因长时间未进行计量导致精度降低             |
| 人为违反实验室规章制度          | 不遵守实验室工作规章条例导致试验出现异常无法顺利开展                |
| 人为操作失误导致的各项检测不合格     | 如错误调整电路导致过压、过载、短路等情况,或错误操作地面设备导致功能性能检测不合格 |

### 4 某型民用飞机实验室低温试验中断影响分析

对上述各项具体中断情况进行分析,结合实验室作业操作规程文件以及整机所属各系统的故障模

式及影响分析（FMECA）文件，可以得出不同中断场景对飞机、试验设备、试验人员等造成的影响。对中断影响进行等级划分，以便后续制定相关处理程序及措施<sup>[19-20]</sup>。中断影响等级划分见表 3。根据中断影响等级的划分，将归纳的各类中断影响分析列举于表 4。

表 3 中断影响等级划分  
Tab.3 Classification of interruption impact levels

| 影响等级        | 严重程度定义                                                      |
|-------------|-------------------------------------------------------------|
| I 级（紧急中断）   | 危及整机及实验室安全，可能引起人员伤亡或造成实验场所严重经济损失，对周围环境造成严重危害                |
| II 级（严重中断）  | 引起整机或各系统主要部位出现不可修复故障，或导致实验室设备出现短期不可维修故障，迫使实验室工作人员不能继续留在现场作业 |
| III 级（一般中断） | 不影响试验安全，整机或各系统普通部位的可处理可修复故障，不影响试验进度的设备仪器故障                  |
| IV 级（轻微中断）  | 对试验运行无实质性影响，试验条件控制参数在允差内或轻微偏离允差范围，但需要通过中断试验来调整回到正确试验控制参数条件下 |

表 4 整机级低温试验典型中断影响分析  
Tab. 4 Typical interruption impact analysis of low-temperature test of the complete civil aircraft

| 中断情况                            | 中断类型    | 中断影响等级 | 中断影响分析                                                                                                               |
|---------------------------------|---------|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 试验温度低于设定最低温度数值 3℃以上             | 过试验中断   | III    | 导致低温应力更严酷，对整机温度敏感部位产生一定温度冲击，可能引起整机或系统部分性能参数的偏移，对试验设备负荷稍微加重，对人员无影响                                                    |
| 试验温度高于最高设定温度 3℃以上               | 欠试验中断   | IV     | 试验温度达不到低温试验要求，属于无效试验，但对被试整机或系统、实验室设备、人员都无影响                                                                          |
| 试验中检测科目出现功能丧失、性能偏移或超差的不合格情况     | 责任故障中断  | II/III | 由于整机或系统受到低温应力的作用，发生故障导致性能指标偏移或超差，严重时可能导致高升力系统、告警系统、环控系统、燃油系统和液压系统产生无法修复的故障并影响实验室现场安全，使得试验人员必须暂时撤离                    |
| 飞机专用配套地面设备出现故障                  | 责任故障中断  | III    | 实验室设备故障可能导致受试飞机或系统的转运并延误试验进度，可能轻微影响受试系统的正常运行，对试验人员无影响                                                                |
| 实验室检测仪器仪表出现故障                   | 非责任故障中断 | III    | 检测仪器仪表故障使得试验中检测科目无法继续进行，对被试品无实质性影响，对试验人员无影响                                                                          |
| 试验人员操作不当造成的被试品或实验室设备或检测仪器仪表故障情况 | 非责任故障中断 | III    | 人员操作失误导致的中断会使得试验进度延误，严重的失误可能会损坏机上各系统，需要花费相当长的修复时间与人力物力                                                               |
| 燃油或液压油发生泄漏                      | 非责任故障中断 | II     | 整机级实验室对飞机燃油和液压系统输送流体的管路发生泄漏，在现场大量通电设备的复杂环境下可能引起较大灾难性事故，低温应力可能不会加速安全灾害的严酷程度，但是很可能导致受试飞机或系统、实验室各设备仪器的损坏，试验人员可能遭受轻微职业伤害 |
| 试验人员受到严酷低温导致的危及生命的影响情况          | 非责任故障中断 | I      | 整机级实验室的空间巨大，试验人员可能会因为操作不慎或错误导致自己受到恶劣的低温伤害，此时应该立刻中断试验并对人员进行救治和撤离                                                      |

5 民用飞机整机级低温试验中断处理方法研究

如果试验过程中出现中断情况，为了尽可能减少试验损失，则应该按照既定步骤对中断情况进行处理。针对上述列举的 4 种不同中断类型及影响后果，

应该采取不同实验室中断处理方法流程。

5.1 过试验中断处理方法

当中断导致受试飞机或系统处于一个更严酷的低温环境时，在停止施加温度试验应力后，首先应对飞机主要外观材料、机械结构和相应系统功能性能进行大致的检查，按照受试飞机或系统的状态来进行相

应的处理措施。

1) 若受试飞机或系统检测无异常状况, 应确定当前状态下已完成的试验时间, 该部分试验时间由于是在更为严酷的试验状态下进行, 所以应当被归纳为有效试验时间。当试验条件控制参数即温度恢复到试验正常数值后, 再进行后续试验的计时, 并依照试验大纲完成后续系统各科目的测试。

2) 若受试飞机或系统检测当前无异常状况, 但后续继续进行试验时可能暴露出由于过试验导致的故障现象, 则上一段“已经被归纳为有效试验时间”的结论将无效, 应对相关部位进行故障定位与分析, 并终止试验。在上报试验组成员后, 对故障进行修复。排除故障后, 在试验组允许后, 重新进行整机级的低温试验, 直至完成。

3) 若受试飞机或系统检测时就出现了故障现象, 则说明过试验应力已经对被试品产生了劣化影响, 在对相关工作组进行情况说明后, 开展故障定位与分析工作, 并立即停止试验。对故障进行修复, 并排除故障, 在试验组允许后, 重新进行整机级的低温试验直至完成。

其流程体系框架如图2所示。

## 5.2 欠试验中断处理方法

中断发生时, 整机和各系统未经历相应量级的环境应力作用, 整个试验均应被判定为无效的。在停止施加温度应力后, 首先应对飞机主要外观材料、机械结构和相应系统功能性能进行大致的检查, 并判断后续相应开展的处理措施。

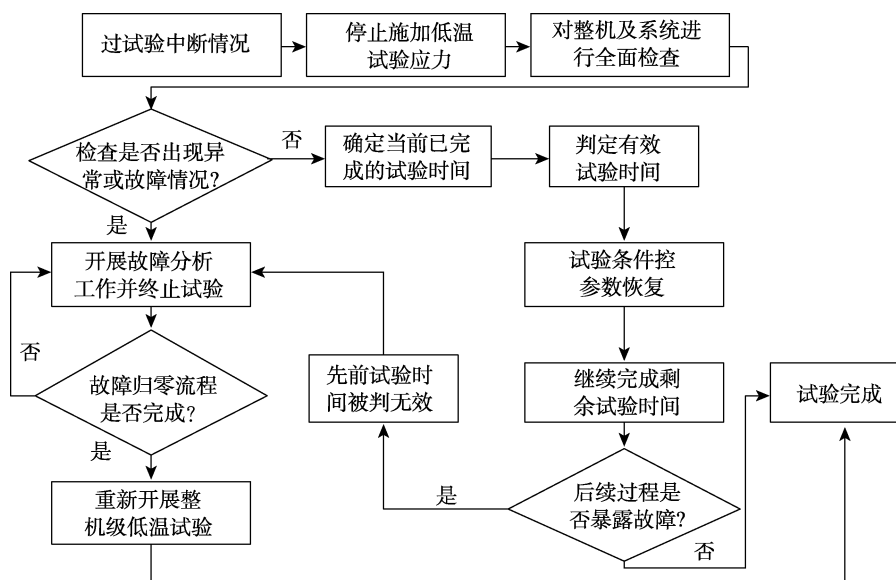


图2 过试验中断处理方法流程

Fig. 2 Interruption treatment method process of over test

1) 若受试飞机或系统在欠试验的环境下检测出故障现象, 则说明相应的功能性能并未达到被试品自身技术协议规定要求, 此时应停止试验, 并开展故障定位与分析工作。经过归零流程后, 再择机重新开展试验。

2) 若对受试飞机的检测未出现任何异常情况, 这是通常应有的表现结果, 此时应将试验环境恢复到应有的低温环境状态, 并观察试验设备的温度(或湿度)应力监测数值记录图表, 找到偏离允差值进入欠试验状态的时间点, 该时间点之前的试验时间均可判为有效时间。当试验环境重新达到低温试验环境要求后, 从此新的时间点开始继续低温试验, 直至总试验时间达到要求。该处理方法应基于“不满足既定试验条件下的试验时间及中断时间均不作为有效试验时间”这一原则开展。

其流程体系框架如图3所示。

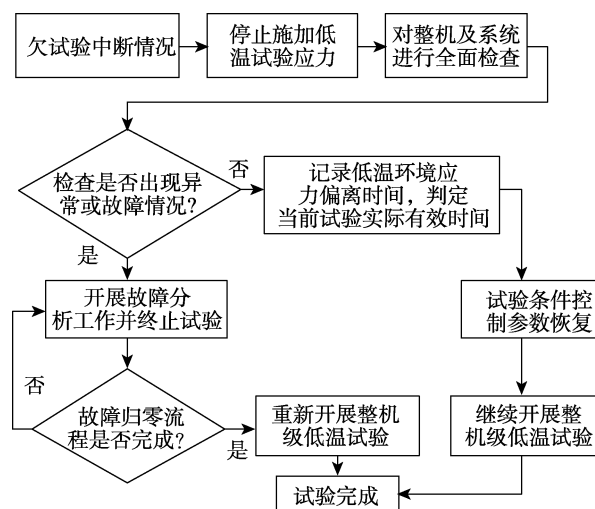


图3 欠试验中断处理方法流程

Fig.3 Interruption treatment method process of under test

### 5.3 责任故障中断处理方法

责任故障导致的中断发生后, 应该按照试验大纲的要求, 对责任故障发生时的相关信息记录, 包括故障发生时间、实时的环境应力数值、受试飞机的工作状态、电应力大小、相关流体流量大小等。随后将低温试验环境恢复至常温并保持稳定, 同时注意清理因温度变化而导致的过重湿气和水质, 对受试飞机或系统进行故障定位与原因分析, 对排故现场进行记录并上报故障情况。

对于能够现场定位解决的故障, 应在试验工作组各方人员的现场目击下进行故障分析与修复工作; 对于现场无法解决的故障, 经参试各方共同分析判断, 确认故障不会对后续试验产生影响的情况下, 在做好相应记录后, 转场完成故障分析与修复工作, 并确认故障前的有效试验时间。最后按照故障归零流程开展故障归零工作, 并上报试验工作组择时重新开展整机低温试验或从中断前的有效试验时间点开始继续试验。

其流程框架如图 4 所示。

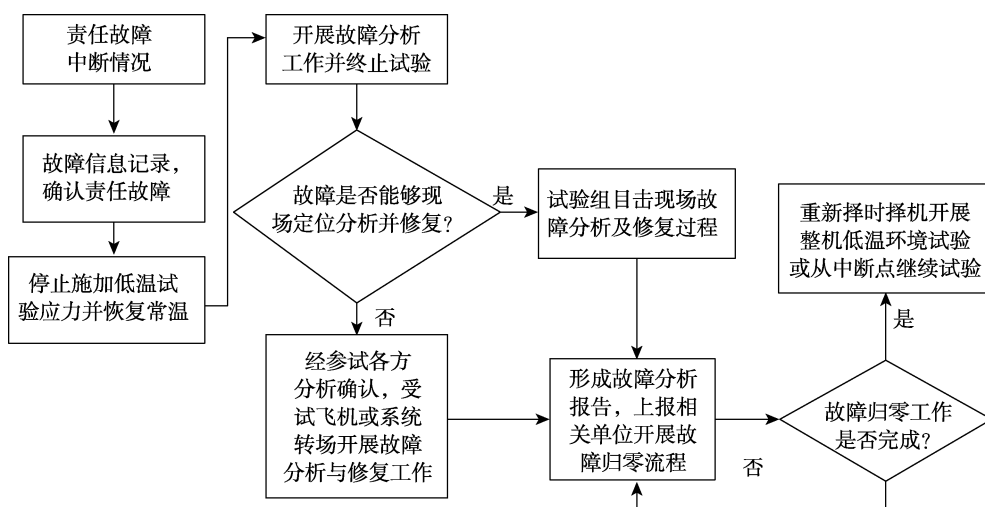


图 4 责任故障中断处理方法流程

Fig.4 Interruption treatment method process of responsible fault

### 5.4 非责任故障中断处理方法

非责任中断情况发生时, 应及时明确故障来源, 断开故障源与被试品之间的交联, 并避免该非责任故障对被试飞机及各系统产生任何影响。随即应将实验室低温环境恢复到常温, 并保持稳定, 同时注意清理因温度变化而导致的过重湿气和水质, 并对故障仪器仪表进行维修或直接更换。如非责任故障时由于人员操作不当引起, 则应加强对试验人员的培训与宣贯力度。如受试飞机或系统自身未出现异常, 则中断时间点之间的试验时间可算作有效试验时间, 后续再将未完成试验部分进行补全。

当出现影响等级严酷的中断情况时, 要首先保证实验人员及场所的安全。如通油管路泄漏时应立即切断所有通电设备和供油设施并停止试验, 所有人员应转移至安全区域, 确认试验现场无安全隐患后再对现场进行修复处理。当人员不慎受到严酷环境伤害时, 应立即将人员转移撤出实验室并进行相关救治, 避免出现安全性事故。

其流程框架如图 5 所示。

结合上述民用飞机整机级低温环境试验流程框架, 结合实验室实际工作流程规范, 即可充分应对试验过程中的各种中断现象, 为试验的合理性有效性建立保障支撑。

## 6 结语

文中开展了以某型民用飞机为研究对象的整机级低温环境试验中断情况及中断处理方法研究。基于军用产品环境试验标准 GJB 150A 对试验中断的定义, 研究了低温试验中断的 4 种基本情况并加以概述。根据某型民用飞机开展整机低温环境试验的环境剖面, 分析研究了实验室试验过程中 4 种中断类型发生时的具体情况及原因, 分别列举了研究中断对试验人员、设备、被试品造成的影响。针对中断基本信息给出了相应的实验室处理方法, 并结合试验过程, 构建了整机实验室低温试验中断处理方法流程框架, 使得试验设计与操作人员能够根据流程框架内相关条目开展相应处理实施工作。

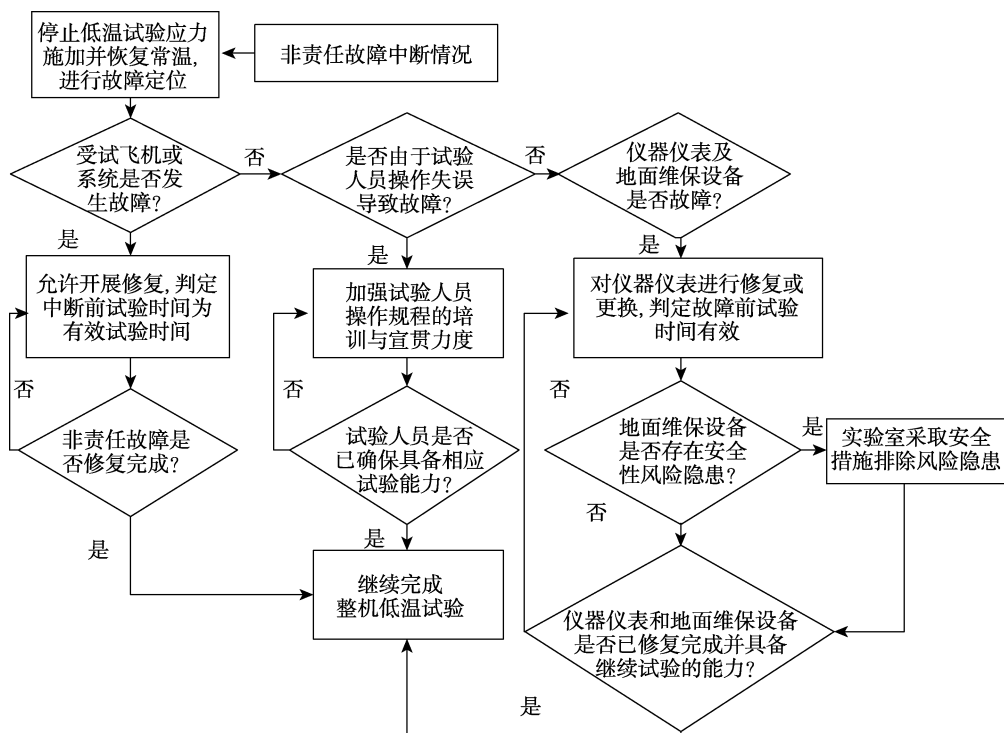


图5 非责任故障中断处理流程

Fig.5 Interruption treatment method process of non-responsible fault

## 参考文献:

- [1] 王涛, 米毅. 大型客机气候实验室试验研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2017(4): 117-120.  
WANG Tao, MI Yi. Research on airliner climatic laboratory test[J]. Civil aircraft design & research, 2017(4): 117-120.
- [2] 白东乔. 飞机气候环境试验准备项目研究[J]. 科技创新导报, 2018, 15(22): 4.  
BAI Dong-qiao. Research on aircraft climate environment test preparation project[J]. Science and technology innovation herald, 2018, 15(22): 4.
- [3] 张昭, 唐虎, 成竹. 军用飞机实验室气候环境试验项目分析[J]. 装备环境工程, 2017, 14(10): 87-91.  
ZHANG Zhao, TANG Hu, CHENG Zhu. Laboratory climatic test items of military aircraft[J]. Equipment environmental engineering, 2017, 14(10): 87-91.
- [4] 唐虎, 李喜明. 飞机气候试验[J]. 装备环境工程, 2012, 9(1): 60-65.  
TANG-Hu, LI Xi-ming. Climatic test of aircraft[J]. Equipment environmental engineering, 2012, 9(1): 60-65.
- [5] 张昭, 吴敬涛, 唐虎. 军用飞机实验室气候试验管理[J]. 装备环境工程, 2018, 15(4): 65-69.  
ZHANG-Zhao, WU Jing-tao, TANG Hu. Military aircraft laboratory climatic test management[J]. Equipment environmental engineering, 2018, 15(4): 65-69.
- [6] 任红云, 李冬梅. 飞机实验室气候环境适应性试验专业发展方向浅析[J]. 科技与创新, 2019(22): 83-86.  
REN Hong-yun, LI Dong-mei. Analysis on the professional development direction of aircraft laboratory climate environment adaptability test[J]. Science and technology & innovation, 2019(22): 83-86.
- [7] 张惠, 吴敬涛. 极端气候环境条件下民用飞机典型飞行事故研究[J]. 科技与创新, 2019(15): 132-136.  
ZHANG Hui, WU Jing-tao. Research on typical flight accidents of civil aircraft under extreme climate conditions[J]. Science and technology & innovation, 2019(15): 132-136.
- [8] 吴相甫. 航空装备实验室温度环境试验剪裁探讨[J]. 装备环境工程, 2018, 15(1): 74-79.  
WU Xiang-fu. Tailoring of laboratory temperature environment test for aviation equipment[J]. Equipment environmental engineering, 2018, 15(1): 74-79.
- [9] 蔡良续, 龙德中, 宋小燕, 等. 温度环境试验及其标准综述(一)温度对装备的影响及温度试验的重要性[J]. 环境技术, 2014(8): 93-96.  
CAI Liang-xu, LONG De-zhong, SONG Xiao-yan, et al. Review of temperature tests and relevant standards (part one) influence of temperature on equipment and importance of temperature tests[J]. Environmental technology, 2014(8): 93-96.
- [10] 祝耀昌, 李明. 谈谈环境工程剪裁和环境试验剪裁[J]. 航天器环境工程, 2012, 29(5): 479-484.  
ZHU Yao-chang, LI Ming. Environmental engineering tailoring and environmental test tailoring[J]. Spacecraft environment engineering, 2012, 29(5): 479-484.
- [11] 林琳, 张熙川, 叶涛. MIL-STD-810F 低温试验方法研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2010, 28(2): 5-8.  
LIN Lin, ZHANG Xi-chuan, YE Tao. Research on the low temperature test in MIL-STD-810F[J]. Electronic

- product reliability and environment testing, 2010, 28(2): 5-8.
- [12] GJB 1172—1991, 军用设备气候极值[S].  
GJB 1172—1991, Climatic extremes for military equipment[S].
- [13] GJB 150A—2009, 军用装备实验室环境试验方法[S].  
GJB 150A—2009, Laboratory environment test methods for military materiel [S].
- [14] 王忠, 陈晖, 张铮, 等. 环境试验[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.  
WANG Zhong, CHEN Hui, ZHANG Zheng, et al. Environment test[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015.
- [15] 祝耀昌. 产品环境工程概论[M]. 北京: 航空工业出版社, 2003.  
ZHU Yao-chang. Introduction to product environmental engineering[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2003.
- [16] 熊伊, 姚珂, 江露. 浅谈 GJB150A 和 MIL-STD-810G 中的“试验中断”[J]. 环境技术, 2017, 35(4): 151-155.  
XIONG Yi, YAO Ke, JIANG Lu. Discussion on test interruption in GJB150A and MIL-STD-810G[J]. Environmental technology, 2017, 35(4): 151-155.
- [17] 张文娟. 对温度试验过程中“试验中断”和“试验中断处理”的认识[J]. 现代测量与实验室管理, 2010, 5: 40-41.  
ZHANG Wen-juan. Understanding for test interruption and treatment method of temperature test[J]. Advanced Measurement and laboratory management, 2010(5): 40-41.
- [18] 宋洪波. 温度试验中断处理的依据[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2001(1): 46-47.  
SONG Hong-bo. Treatment of interruption during temperature testing[J]. Electronic product reliability and environment testing, 2001(1): 46-47.
- [19] 曾声奎, 赵廷弟, 张建国等. 系统可靠性设计分析教程[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001.  
ZENG Sheng-kui, ZHAO Yan-di, ZHANG Jian-guo, et al. Tutorial of system reliability design analysis[M]. Beijing: BUAA Press, 2001.
- [20] 章国栋, 陆廷孝, 屠庆慈, 吴真真. 系统可靠性与维修性的设计与分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1990.  
ZHANG Guo-dong, LU Ting-xiao, TU Qing-ci, WU Zhen-zhen. Design and analysis of system reliability and maintainability[M]. Beijing: BUAA Press, 1990.