

# 飞机实验室气候试验风险识别及分析

苏杭, 吴学敏, 吴敬涛

(中国飞机强度研究所, 西安 710065)

**摘要:** **目的** 研究飞机实验室气候试验过程中风险的识别及分析问题。**方法** 根据飞机实验室气候试验流程, 针对试验设计、试验准备、试验实施和试验确认等阶段进行风险识别和分析。**结果及结论** 识别并分析出实验室气候试验各阶段的风险, 并在国内首次某民机实验室气候试验中得到应用。

**关键词:** 飞机; 实验室气候试验; 风险识别; 风险分析

**中图分类号:** TJ01      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-9242(2021)07-0038-06

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2021.07.006

## Risk Identification and Analysis of Aircraft Climate Test in Laboratory

SU Hang, WU Xue-min, WU Jing-tao

(Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China)

**ABSTRACT:** This paper aims to study risk identification in and analyze aircraft climate test in laboratory. According to the aircraft climate test procedure in laboratory, the risk identification and analysis were carried out in the test design stage, test preparation stage, test implementation stage, test confirmation stage and so on. The risks of the climate test in laboratory in each test stage was identified and analyzed, and it was applied in the first climate test in laboratory of a civil aircraft in China.

**KEY WORDS:** aircraft; climate test in laboratory; risk identification; risk analysis

我国幅员辽阔、气候类型众多, 仅按温湿度便可分为寒冷、寒温 I、寒温 II、暖温、干热、亚湿热、湿热等 7 个气候带<sup>[1-2]</sup>。飞机面临着多种多样的飞行环境, 尤其军机, 要求具备全天候全疆域的飞行、作战能力。环境适应性是飞机功能、性能指标实现的基础, 关系到飞机全寿命周期服役和完成任务的能力<sup>[3]</sup>。通过高温、低温、湿热、淋雨、降雪、冻雨、积冰和太阳辐射等气候试验, 验证飞机的环境适应性<sup>[4]</sup>, 已经被国外证实是可行的<sup>[5-6]</sup>。因此, 通过气候试验暴露飞机环境适应性问题是在飞机研制过程中不可缺少的项目<sup>[7]</sup>。

飞机实验室气候试验是在实验室内模拟自然气

候环境条件下开展飞机气候环境适应性的试验<sup>[7]</sup>。在我国大型气候环境实验室未建成之前, 通过在自然极端气候环境中试飞、分析、改进的反复过程, 逐步使飞机具备环境适应性<sup>[8]</sup>, 但极端气候条件具有其特有的时间窗口, 持续时间相对较短, 难以复现等限制<sup>[9-10]</sup>, 使得飞机环境适应性试验不易开展。目前, 我国对标美国麦金利气候实验室的大型气候环境实验室已经建成, 并投入使用<sup>[11-12]</sup>。

实验室气候试验的试验机为全状态带油飞机, 这类试验机造价昂贵, 必须确保试验安全, 并且实验室气候试验与飞行试验穿插进行, 试验周期紧张。气候实验室系统复杂, 设备繁多, 试验过程需要保证实验

收稿日期: 2020-03-31; 修订日期: 2020-04-12

Received: 2020-03-31; Revised: 2020-04-12

作者简介: 苏杭 (1991—), 男, 硕士, 主要研究方向为飞机气候环境试验技术。

**Biography:** SU Hang (1991—), Male, Master, Research focus: aircraft climate environment test technology.

引文格式: 苏杭, 吴学敏, 吴敬涛. 飞机实验室气候试验风险识别及分析[J]. 装备环境工程, 2021, 18(7): 038-043.

SU Hang, WU Xue-min, WU Jing-tao, et al. Risk identification and analysis of aircraft climate test in laboratory[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(7): 038-043.

室的结构安全。然而国内飞机实验室气候试验经验缺乏，尤其试验风险管理方面。试验风险识别和分析作为风险管理的重要部分，在试验实施之前识别、分析试验中的风险，并据此开展风险评估和处理<sup>[13-15]</sup>，这不仅是确保实验室结构安全和试验机安全的迫切需要，还是确保试验质量、试验进度，节省试验经费的重要措施。

## 1 飞机实验室气候试验风险识别

GB/T 19000—2016 对风险的解释为：“不确定性的影响”<sup>[16]</sup>。这种影响既可以是正面的，也可以负面的，但除非有特殊说明，一般指负面影响，文中所有的风险指负面影响。GJB 5852—2006 对风险的定义更为具体：“在规定的技术、费用和进度等几个约束条件下，对不利实现装备研制目标的可能性及所导致的后果严重性的度量”<sup>[17]</sup>，同时指出了风险的负面影响及影响程度。飞机气候试验具有明显的阶段性特征<sup>[18]</sup>，风险存在于气候试验的每个阶段。飞机实验室气候试验的流程一般可以分为试验设计阶段、试验准备阶段、试验实施阶段和试验确认阶段等 4 个阶段。准确识别、分析出试验设计、试验准备、试验实施及试验确认阶段的风险，有助于增强试验风险评估的准确性，风险处理的针对性和有效性<sup>[19-20]</sup>。

### 1.1 试验设计

试验设计阶段是根据试验订购方对试验机的要求确定气候试验方案的阶段，包括消化、理解、沟通任务书，环境应力施加方案设计，飞机支持方案设计，试验控制方案设计，实验室及试验机环境参数测量方案设计，试验机功能性能参数测量方案设计等内容，最终形成试验大纲、测量大纲、控制大纲等试验技术文件。试验设计阶段的风险点主要有方案设计、新技术应用等，这些风险如果没有被识别出，将导致后续试验阶段工作无法有效开展，是重要的技术风险。

### 1.2 试验准备

试验准备阶段一般指飞机进入实验室后至试验实施之前的阶段，该阶段是进行试验实施之前的最后准备阶段，包括试验设备准备，人力资源准备，试验过程控制准备，试验安装、检查、调试，试验谱调试，准备状态检查等。其中试验安装、检查、调试包括了技术交底、试验系留、设备检查、非标设备安装检查、测量设备安装检查、测量参数配置及检查、控制参数配置及检查等。试验准备阶段的风险点主要有试验设备、调试、飞机准备状态检查等，这些风险点的识别对试验成功起到至关重要的作用。

### 1.3 试验实施

试验实施是按照试验大纲、测量大纲、控制大纲

等技术文件获取试验数据的整个活动过程，涉及试验机管理、试验条件、试验设备、试验程序、测试和控制设备、试验测量和控制、合格判据、试验数据记录、试验人员等。试验机管理，试验条件偏差，试验人员对试验设备、测量和控制设备的操作熟练程度，测量和控制的精度，对判据的边界理解以及试验数据的记录均会影响试验结果。试验实施阶段的风险点主要有试验机、试验设备、试验人员、实验室结构等，应准确识别该阶段风险点，以保证试验质量和试验数据可靠性。

### 1.4 试验确认

试验确认是试验收尾阶段，包括试验数据处理、试验报告撰写等。在对试验中获取的一系列数据进行处理、分析后得到可信的试验报告。承试方的试验报告应包括详细的试验过程、真实的试验数据、可信的分析以及结论等。试验确认阶段的风险点主要有数据处理和报告撰写，该阶段的风险点若未被识别出，将可能导致试验结论不准确，是严重的技术风险。

根据飞机实验室气候试验的特点，各试验阶段的风险识别如图 1 所示。

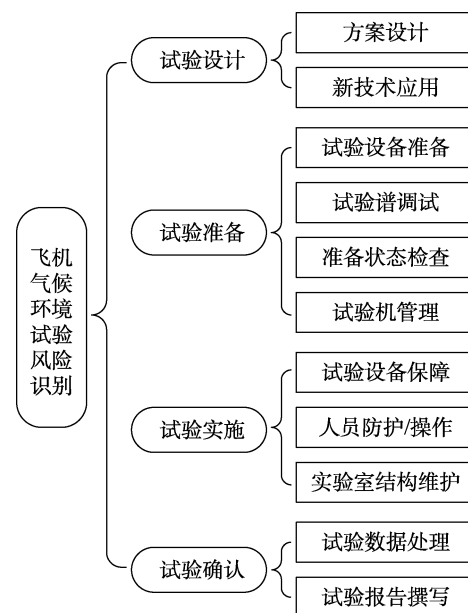


图 1 飞机实验室气候试验的风险识别  
Fig.1 Risk identification for aircraft climate tests in laboratory

## 2 飞机实验室气候试验风险分析

### 2.1 试验设计风险分析

#### 2.1.1 方案设计

试验承试方在设计阶段需要完成方案设计，方案设计的依据来源于订购方的任务书，但目前承试方和订购方存在脱节。承试方掌握更多的是气候试验的设

计工作,而对于飞机系统专业认知较浅显,订购方恰好相反。双方如果沟通不畅,或者没有充分理解彼此想法,未及时冻结任务书,方案设计存在一定风险。

1) 试验机技术状态。方案设计未能考虑试验机的技术状态,导致方案设计之中的某些系统存在无法完成气候试验的风险。国内某型飞机开展气候试验的时机是在试飞过程中穿插进行,订购方并不清楚试飞方对飞机的改装,给承试方提供的飞机技术状态依然是未改装的试验机。试验机进入实验室后,承试方发现某些系统由于试飞改装并不具备试验的要求,导致最后取消该系统的气候试验。如民机在试飞过程中对服务门改装,以保证试飞过程中出现紧急情况,能顺利打开舱门逃生。方案设计未能考虑试验机在极端环境中技术状态的变化情况,导致方案设计中配套试验机的非标设备存在使用受限的风险,同时试验机本身也存在安全风险。在低温环境中,试验机机翼变形,起落架作动筒缩短,导致试验机技术状态发生变化,配套的登机梯等非标设备无法正常使用。

2) 系留支持。试验中的试验机、设备等需要专用装置系留支持,确保试验机、设备的安全。系留支持方案设计中,须考虑极端环境下,系留支持装置由于环境温度变化而变形,存在对试验机等支持设备造成额外负载的风险。

3) 试验顺序。方案设计必须考虑到试验环境的顺序和试验系统的顺序,订购方对试验环境的要求往往是基于试验机系统提出的,不同的系统对应不同的环境考核要求,合理设计试验顺序能减少试验机的风险以及试验系统之间相互影响的风险。飞机试验环境顺序一般为低温、高温、太阳辐射、淋雨等,再结合受试飞机系统,完成试验系统的顺序。试验系统一般按飞机系统不上电和上电两大类顺序进行。

4) 试验辅助设备。在飞机气候试验过程中,地面辅助设备也同时被考核,在方案设计之初,如果未能考虑辅助设备的耐极端环境能力,使得辅助设备存在极端环境下功能失效的风险。在某民机-40℃低温环境中,需要通过空调车对驾驶舱升温到-15℃以上,方能对飞机上电,但未考虑空调车在低温环境下功能受限的风险,导致驾驶舱升温无法达到-15℃以上,后采取其他升温方式才将驾驶舱温度升到-15℃以上。

### 2.1.2 新技术应用

飞机实验室气候试验是新型试验种类,国内开展次数少,对于现阶段气候试验,绝大多数试验技术或方法均为开创性试验技术方法。这些新技术成熟度较低,应用在气候试验中存在较大风险。目前,气候试验的新技术实施之前,必须通过验证性试验验证、环境调试等环节后方能应用。如在低温环境下某民机实验室APU开车技术的应用,经过验证试验,需在基线温度和-10℃环境下调试后,才能正式应用于低温环境。

## 2.2 试验准备风险分析

### 2.2.1 试验设备准备

试验准备阶段,需要对各类试验设备进行准备,包括环境提供设备的检查、整改;非标设备的安装、检查、调试;测量设备的安装、检查、调试;控制系统的检查、调试等内容。

1) 环境模拟设备检查。在设备检查、整改过程中,设备位置不易到达,人员存在高空作业风险和操作不畅风险。实验室设备间设备种类繁多,数量巨大,空间关系复杂,某些仪表、阀门、保温管道位于高空、狭小等空间,人员检查、整改存在高空作业风险和操作不易的风险。

2) 非标设备安装。设备安装,尤其是非标设备的加工安装均是外协单位负责,存在无法按时完成的风险以及多种设备安装交叉作业的风险。设备安装过程中,设备类型多,步骤繁琐,专业人员少,安装工作量大,且准备阶段周期短,导致安装周期延长和交叉安装作业风险加大。设备安装过程也可能存在设计更改、实际安装偏离设计等风险,非标设备、测量设备等依据设计方案安装,但设计方案可能随着订购方要求更改,导致已安装设备不满足要求;设备实际安装误差过大,偏离设计许可,导致安装不合理。

3) 设备调试。设备安装到位,既需要对单台设备调试,也需要对成套设备调试,保证设备性能满足试验要求。但一方面由于试验操作人员对新设备的功能和性能不熟悉,存在操作不熟练,影响试验周期的风险;另一方面,由于待调试参数要求较高,调试时间可能超出预期,也存在影响试验周期的风险。成套设备调试过程中往往需要多人配合,存在配合默契度欠缺的风险。

### 2.2.2 试验谱调试

为了试验一次成功,承试方一般在准备阶段按照订购方试验环境要求开展空舱调试(预试),包括环境项目调试和整个连续试验谱调试。调试过程中,存在由于环境提供设备突发故障而使调试中断的风险。在调试之前,尽管已对庞大复杂的环境提供设备进行静态检查整改,但某些设备须在工作状态下才能发现问题,进而整改,保证正式试验不会出现由于环境提供设备发生故障而迫使试验中断的风险。

调试过程中,也存在由于外在能源突然停供而迫使调试中断的风险,水力、电力、蒸汽等能源是制造目标环境所必备的前置能源。在某次低温调试过程中,由于其他实验室大功率设备启动,导致气候实验室突发停电,所有设备均停止工作,虽然经过及时抢修供电,但实验室内低温环境依然发生较大幅度波动,波动幅度超出了环境条件的波动要求。

### 2.2.3 准备状态检查

试验开始之前,需要检查试验机的准备状态,确保试验机的初始状态满足试验要求。在准备状态检查过程中,风险主要有以下方面。

1) 试验过程中,订购方对试验机进行修理、加强或更改,存在试验机技术状态不满足或相关质量程序执行不到位的风险。

2) 试验前准备状态检查不到位,APU 进气口或排气口安全距离内有其他物体,APU 正常工作存在风险。

3) 试验机燃油、液压油、滑油渗漏严重,超出渗漏限额。

4) 试验机存在其他系统异常风险,不满足试验需求。

## 2.3 试验实施风险分析

### 2.3.1 试验机管理

气候试验实施过程中,试验机及其考核系统是订购方主要的关注对象,也是承试方检测目标。试验机在环境作用下,尤其是长时间处于极端环境中,发生风险的可能性增大。

1) 试验机检测。试验机系统的功能、性能检测过程中,存在检查、检测不到位、不全面的风险。环境会对整个试验机作用,待考核的试验机系统是订购方根据以往经验总结出可能最容易发生故障的系统,但也存在其他系统发生故障而被忽略的风险;或者环境对于某系统的作用是全方位的,但存在仅部分作用能被了解及检测的风险。某机机在低温环境中,发现机翼下方漏油,这是订购方试验前未预想到的。

2) 系统故障发现。实施过程中,存在试验机关键考核系统突发故障且发现不及时的风险,在极端环境中,被考核的试验机系统会暴露出或大或小的故障,这些故障有的可以被检测设备或目视及时发现,但也有部分故障难以被及时发现。系统出现故障如果没有及时发现,后续环境条件改变,可能会引起故障叠加,更难以分析出故障产生原因。

3) 试验机防护。实施阶段,试验环境项目按顺序进行,试验机在更换环境模拟设备过程中存在防护风险。太阳辐射试验与淋雨试验按顺序进行,太阳辐射试验结束后,需要直接在试验机正上方更换淋雨环境模拟设备,试验机存在被其他掉落设备砸伤的风险。

### 2.3.2 试验设备保障

1) 环境模拟系统。环境模拟系统是提供符合环境条件要求的唯一系统,且环境模拟系统复杂、设备众多,环境模拟关键设备故障将导致试验环境条件失控,存在欠试验或过试验的风险。尽管试验之前已进行调试,但并不能暴露所有环境模拟设备的问题,试

验实施之前的设备再次检查是确保环境模拟系统正常工作的必要手段。实施过程中,供电、供水、供气等供能系统能否持续工作,对试验能否顺利完成至关重要。环境模拟设备耗能大,且为保证环境波动幅度在试验要求范围内,需要环境模拟设备持续不间断地工作,但供能系统不受实验室管理,存在突发停供导致试验意外中止的风险。

2) 辅助设备。辅助设备包括非标设备、测量设备、试验机配套设备等,其主要作用是系留支持试验机、满足试验条件、获取试验数据等。一方面,辅助设备在极端环境下工作,存在适应环境能力不足而无法工作的风险。在低温环境中,试验机配套的电源车、气源车和液压车出现故障,影响后续试验;实验室内辅助给排水管道也存在结冰堵塞的风险。另一方面,存在试验机工作造成辅助设备无法正常工作的风险。试验过程中 APU 排气温度过高,超过尾气排放系统降温能力,可能造成尾气排放系统故障等风险。

### 2.3.3 人员防护/操作

1) 人身安全。在试验实施阶段,进入试验现场的人员包括机务、气候试验工程师、质量控制人员、现场设备操作人员、摄像记录人员等。试验人员进入试验现场工作,存在人身安全风险,尤其是极端环境,比如低温环境、湿热环境、太阳辐射等环境下,人身安全风险增加。一方面,环境直接对试验人员造成危害,低温试验时,试验人员存在冻伤等风险;太阳辐射和高温试验时,试验人员存在灼伤等风险。试验人员长时间处于极端环境,人身安全风险持续增加。另一方面,在环境对试验人员作用基础上叠加其他现场危害,淋雨试验时,地面或机体表面湿滑,现场安装滑倒风险、高空作业风险增大;太阳辐射和高温试验时,地面、机体表面或夹具表面温度较高,现场安装灼伤风险、高空作业风险增大。

2) 人员操作。由于试验周期长,试验、值班人员流动性大,存在试验方案不熟悉或试验制度执行不到位的风险,容易出现操作失误。如试验数据记录不完整、不及时或不准确,试验操作顺序异常,机务误触其他按钮等带来的风险。试验异常处理不及时、不正确,可能导致严重的质量事故,带来较大的技术风险。

### 2.3.4 实验室结构维护

实验室作为气候试验的环境容纳载体,承受各种极端环境负载,并保持环境状态,直至试验结束。一方面,在试验过程中,极端环境不止作用于试验机和试验设备,还会对实验室的建安设施和结构造成影响,实验室四周库板和大门长时间处于极端环境中,存在结构损坏的风险。另一方面,试验机在密闭实验室内 APU 开车存在风险。实验室内 APU 开车需要足够的吸气量,导致室内微正压无法控制,超出室内环

境保持要求。实验室内APU开车需要安装专用的尾气排放管道,试验机布置或者管道固定、连接位置存在风险,导致APU排气未能完全通过尾气排放系统排出实验室,高温尾气进入实验室,造成室内烟气浓度过高,同时影响室内环境条件。试验机长时间处于密闭实验室,其携带的燃油自然挥发,导致室内油气浓度增加,存在闪爆或火灾风险。

## 2.4 试验确认风险分析

### 2.4.1 试验数据处理

试验实施完成后,需要处理试验数据,数据处理方法对试验结果有重要的影响,不同的处理方法有可能得出不同的结果。试验数据处理通常在专用软件工具上进行,但如果对处理原理不清楚,盲目选择处理方法,就有可能造成数据处理不准确,导致后续试验结果分析及试验结论获得存在风险。

### 2.4.2 试验报告撰写

基于处理后的试验数据,撰写试验报告,试验报告中最重要的一项就是对试验结果进行判定,得出试验结论。既需要对承试方提供的试验条件是否满足试验要求进行判定,也需要对试验结果是否合格进行判定。判定标准的不科学、不明确,将不能分析出试验条件与试验结果之间的关系,存在试验结论不可信的风险。如低温环境造成舱门开关卡滞、阻力大,需要分析温度影响舱门哪个结构/机构发生了物理变化,只有将影响关系理清,才能得出正确的试验结论。

## 3 结语

开展试验风险识别和分析的研究对于实验室气候试验风险管理具有重要意义。该研究成果在国内首次某型民机实验室气候试验中得到应用,对该试验风险管理起到重要作用,同时也发现了研究成果的不足,为继续完善该成果提供了实践基础。随着我国大型气候环境实验室的建成,飞机、高铁、特种车辆等大型装备的气候试验需求越来越多,试验机本身结构系统的差异,试验项目的差异,导致气候试验难度与风险越来越大。本研究可为未来大型装备的实验室气候试验风险管理提供技术基础。

### 参考文献:

- [1] 李继红,文静,徐勇,等.我国自然环境低温分布统计分析[J].装备环境工程,2015,12(2):87-90.  
LI Ji-hong, WEN Jing, XU Yong, et al. Statistical analysis on distribution of natural low temperature in China[J]. Equipment environmental engineering, 2015, 12(2): 87-90.
- [2] GB/T 4797.1—2005, 电工电子产品自然环境条件 温

度和湿度[S].

GB/T 4797.1—2005, Environmental conditions appearing in nature of electric and electronic products—Temperature and humidity[S].

- [3] 高贵福,王刚,孙建亮,等.飞行器环境适应性设计方法研究与实践[J].装备环境工程,2017,14(6):49-54.  
GAO Gui-fu, WANG Gang, SUN Jian-liang, et al. Research and practice of environmental worthiness design of flying object[J]. Equipment environmental engineering, 2017, 14(6): 49-54.
- [4] GJB 150A—2009, 军用装备实验室环境试验方法[S].  
GJB 150A—2009, Laboratory environmental test methods for military material[S].
- [5] HULBUT J Alba. Climate testing of the C-5A[R]. AD/A045257, 1973.
- [6] FORD A James. Environmental test of the F-15 in the air force climatic laboratory[C]// Society of Flight Test Engineers sixth annual symposium proceedings. [s. l.]: Society of Flight Test Engineers, 1975.
- [7] 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.
- [8] GJB 4239—2001, 装备环境工程通用要求[S].  
GJB 4239—2001, General Requirements for Materiel Environmental Engineering[S].
- [9] 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,2017,127(4):123-126.  
WANG Tao, MI Yi. Research on airliner climatic laboratory test[J]. Civil aircraft design & research, 2017, 127(4): 123-126.
- [10] 李飞,汝枫,赵军贵,等.导弹武器全天候自然环境实验室研究[J].导弹与航天运载技术,2016(3):40-43.  
LI Fei, RU Feng, ZHAO Jun-gui, et al. Research of missile weapon's full-weather natural environment laboratory[J]. Missiles and space vehicles, 2016(3): 40-43.
- [11] 郝伯雅.埃格林空军基地的麦金利气候实验室简介[J].导弹与航天运载技术,1983(2):78-82.  
XI Bo-ya. McKinley climate laboratory at Eglin air force base[J]. Missile and space launch technology, 1983(2): 78-82.
- [12] 张惠,吴敬涛,刘海燕,等.大型气候环境实验室上部运输系统的方案设计[J].装备环境工程,2017,14(9):39-42.  
ZHANG Hui, WU Jing-tao, LIU Hai-yan, et al. Schematic design of equipment support system for large climatic environmental test facility[J]. Equipment environmental engineering, 2017, 14(9): 39-42.
- [13] 郝立敏.装备研制试验风险管理与评价方法研究[J].质量与可靠性,2012(3):34-38.  
HAO Li-min. Research on risk management and evaluation methods of equipment development test[J]. Quality and reliability, 2012(3): 34-38.
- [14] 冷述振,吴建业.试验风险辨识与评估方法研究[J].舰

- 船电子工程, 2018, 38(10): 160-164.  
LENG Shu-zhen, WU Jian-ye. Research on identification of test risk and evaluation method[J]. Ship electronic engineering, 2018, 38(10): 160-164.
- [15] 刘汉荣, 臧骏, 高化猛. 装备试验流程中的风险管理及实证分析[J]. 装备学院学报, 2013(3): 118-121.  
LIU Han-rong, ZANG Jun, GAO Hua-meng. Risk management in equipment test process and its demonstration analysis[J]. Journal of academy of equipment, 2013(3): 118-121.
- [16] GB/T 19000—2016, 质量管理体系 基础和术语[S].  
GB/T 19000—2016, Quality management systems — Fundamentals and vocabulary[S].
- [17] GJB 5852—2006, 装备研制质量风险分析要求[S].  
GJB 5852—2006, Risk analysis requirements for materiel development[S].
- [18] 孙威, 高庆华, 翟怡. 航天器环境试验流程中技术风险管理实践[J]. 质量与可靠性, 2017(2): 41-45.  
SUN Wei, GAO Qing-hua, ZHAI Yi. Technology risk management practice in spacecraft environmental test process[J]. Quality and reliability, 2017(2): 41-45.
- [19] 洛刚, 文良浒, 李崖. 装备定型试验风险识别及管理措施[J]. 装备学院学报, 2012(3): 106-110.  
LUO Gang, WEN Liang-hu, LI Ya. Distinguish and management measure on risk of equipment approval test[J]. Journal of academy of equipment, 2012(3): 106-110.
- [20] 洪亮, 张福光, 邱立军. 海军导弹环境试验的风险源辨识分析[J]. 装备环境工程, 2018 15(4): 38-43.  
HONG Liang, ZHANG Fu-guang, QIU Li-jun. Risk source identification of navy missiles environmental test[J]. Equipment environmental engineering, 2018 15 (4): 38-43.