

文章编号:1674-8190(2020)03-400-08

基于适航审查的飞机实验室气候试验 质量管控模型

尚文

(中国飞机强度研究所 质量安全管理部, 西安 710065)

摘要: 建立并持续优化我国飞机实验室气候试验的质量管控流程和方案,可以满足局方要求和用户需求的质量审查体系。在构建实验室气候试验质量管理制度的基础上,结合实验室气候试验项目的技术要求和特点,通过对《航空器型号合格审定程序》相关条款内容及制造符合性检查要求的分析研究,提出一种飞机实验室气候试验的质量管控模型。经过我国第一项重点民用飞机型号实验室气候试验 10 个低温科目、3 个湿热科目对试验机 3 大系统 8 类结构或分系统进行气候条件下的功能、性能考核,试验项目全寿命周期未出现质量问题,证明该模型的有效性、充分性和符合性,为局方后续介入型号验证试验审查提供实践支撑,对我国气候实验室科研技术发展提供质量保障。

关键词: 飞机实验室;气候试验;适航审查;质量管控模型

中图分类号: V216

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2020.03.015

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



An Aircraft Laboratory Climatic Test Quality Control Model Based on Airworthiness Review

SHANG Wen

(The Department of Quality and Safety Management, Aircraft Strength Research
Institute of China, Xi'an 710065, China)

Abstract: The establishment and continuous optimization of the quality control process and program of aircraft laboratory climatic test can form a quality review system that meets the requirement of the administrator and the needs of the users. Based on the construction of the laboratory climatic test quality management system, and combining with the technical requirement and characteristics of the laboratory climatic test project, a quality control model for aircraft laboratory climatic experiment for the civil aircraft laboratory climatic test is proposed by analyzing and studying the relevant clause and manufacture coincidence check requirement of "Aircraft Type Certification Flight Test Safety Program". After the first key civil aircraft model laboratory climatic environment test in China, including 10 low temperature subjects and 3 damp heat subjects, the function and performance evaluation of the 8 types of structures or sub-systems of the 3 major systems under climatic conditions are tested to show that the whole life cycle of the test project has no quality problems, which proves the validity, adequacy and conformity of the model. The model provides the practical support for the follow-up intervention model verification test of the bureau, and quality assurance for the development of scientific research technology in China's laboratory climatic environment test.

Key words: aircraft laboratory; climatic test; airworthiness review; quality control model

收稿日期:2019-07-20; 修回日期:2019-10-18

通信作者:尚文,oolshangxiao@163.com

引用格式:尚文. 基于适航审查的飞机实验室气候试验质量管控模型[J]. 航空工程进展, 2020, 11(3): 400-407.

SHANG Wen. An aircraft laboratory climatic test quality control model based on airworthiness review[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(3): 400-407. (in Chinese)

0 引言

近年来,民用飞机全球化日趋发展,飞机在运营阶段遭遇低温、湿热、暴风雪、结冰等极端气候的机会也逐年增大^[1-2]。极端气候可引起机体材料和液体物理、化学性质变化,通常会降低飞机性能,甚至使飞机结构、系统以及设备功能丧失,因此引起各大飞机制造商对于民用飞机气候适应性的广泛关注^[3-4]。

由于外场极端气候条件具有特有的时间窗口且持续时间较短,难以控制和捕捉试验节点,对飞机气候适应性的研制工作的进度和成本带来双重压力。气候环境实验室可模拟高温、低温、湿热、淋雨、降雪、吹风、结冰和太阳辐射等典型气候环境,具有试验气候条件设计自由度高(多种气候条件耦合,时间、空间精细化控制)、试验安全性高、周期短、成本低、结果准确的优点,解决了外场试验的诸多风险及不利影响,为我国深入开展飞机极端气候试验提供了新的途径。

国外的麦金利作为世界首具备飞机实验室气候试验能力的实验室,基于FAA(美国联邦航空管理局)的相关标准要求及美国军方有关飞机环境适应性的要求,形成了实验室气候试验质量管理体系,构建了完善的试验管理体系^[5-9],但是其体系只针对一种或两种气候试验。国内对于飞机实验室气候试验展开了包括试验管理方面多个维度的预先研究,李冬梅^[10]对气候试验科目进行综合分析,归纳出试验过程控制、试验测试、数据管理、试验监控等多方面综合控制管理功能;张昭^[11]对国内外军标的通用要求^[12-13]进行研究,给出了飞机实验室气候环境试验的具体规划和试验科目顺序;吴相甫^[14]给出了飞机实验室气候试验统一管理试验项目、试验资源、试验数据和数据库的解决方案。然而国内并未系统地从质量控制层面进行全寿命周期试验过程管控研究,且缺乏工程试验的支撑,有关飞机实验室气候环境试验的质量控制研究亟待开展。

随着各大飞机制造商对飞机气候实验室气候实验需求与日俱增,民航当局对于实验室气候试验的适航审查工作被提上日程。为了满足局方适航审查的要求,本文在构建实验室气候试验质量管理体系的基础上,结合实验室气候试验项目的技术要求和特点,通过对《航空器型号合格审定程序:AP-

21-AA-2011-03-R4》(以下简称“程序”)^[15]相关条款内容及制造符合性检查要求的分析研究,提出一种飞机实验室气候实验的质量管控模型,将其应用于我国第一项重点民用飞机型号实验室气候试验的质量管控。

1 气候试验质量管控模型构建

按照试验委托方关于试验各科目任务书及试验技术要求,经过实验室气候试验策划、试验设计和技术开发输出,形成项目试验大纲及各科目实施单,试验包含2个专业项目(低温、湿热),4种试验条件,13个试验科目,其中试验内容及条件如表1所示。

表1 实验室气候试验内容
Table 1 Content of laboratory climatic test

序号	试验项目	试验内容	试验条件
1		空调系统加温考核(工况1)	
2		空调系统加温考核(工况2)	升温
3		空调系统加温考核(工况3)	
4		液压力系统低温考核	
5	低温	电源系统 RAT 低温考核	
6		机身蒙皮区域低温考核	
7		环境舱门低温考核	保持低温
8		燃油系统低温考核	
9		短舱极低温考核	
10		高升力系统高温考核	
11		环控高温冷却考核(工况1)	降温
12	湿热	环控高温冷却考核(工况2)	
13		液压系统高温考核	保持高温

1.1 评审审查

依据“程序”3.4.2 评审组的主要职责第三条中“审查批准验证试验大纲,现场目击重要验证试验”及7.5.3 关键和重要特性第一条中“标识并检验所有的关键和重要特性”的要求,在试验设计和试验准备阶段,确定对试验大纲,APU(辅助运力装置)关键技术应用,试验准备状态进行理论、技术、工艺、工程、质量、安全及标准化等综合性审查。通过评审资料审查,确定评审专业、内容、议题、审查判据及评审组组成,发出评审申请及会议议程;以正式会议的形式分别对上述三项议题进行评议,经研究和质询提出问题、意见,综合研判是否满足进入下一阶段的要求,形成审查结论。

1.2 风险审查

参考“程序”4.5.1.1 工程验证试验第一条第 k 款中“异常情况的处理”及 4.5.1.10 飞行试验风险管理中“通过安全性审查过程确定潜在的危害性情况,并提出规避风险的建议”的要求^[15],在正式试验前对风险辨识的充分性、风险分析的完备性、风险评价的科学性及风险控制措施的可行性进行确认和验证,提出风险审查意见,修订、完善风险控制方案。制定审查要点包括:试验节点划分,风险评估方法,风险等级确定,风险接受准则,风险评价流程,高风险事件的处置措施。

1.3 工艺审查

依据“程序”7.10.2 工艺规程内容的审查中“工程审查代表和制造符合性检查代表应审查工艺规范的基本内容”的要求,结合实验室气候试验的专业特点,从 13 个维度对气候试验工艺文件进行审查,制定的审查要点及基本要求如表 2 所示。

表 2 工艺审查要点及基本要求

Table 2 Key points and basic requirements of review

审查要点	基本要求
人员要求	a. 责任明确、合理; b. 界面清晰、连贯
工艺要求	a. 原理科学; b. 过程有效
设备要求	a. 设备操作, 检验, 维护要求明确、具体、可执行
原料要求	a. 物理, 化学性质全面、详尽; b. 状态明确、用量精准
引用标准要求	a. 现行适用; b. 融入工艺流程
环境要求	a. 辨识全面; b. 要求明晰
监视测量要求	a. 方法科学; b. 措施有效
过程输入要求	a. 充分全面; b. 控制准确
操作流程要求	a. 科学合理; b. 系统流程
过程输出要求	a. 系统逻辑; b. 判据明确
成文信息要求	a. 内容完善; b. 要求明确
风险控制要求	a. 评价准确; b. 落实到位
文件界面要求	a. 协调事宜; b. 表达准确

1.4 调试审查

参照“程序”4.5.1.1 工程验证试验第四条中“工程审查代表审查制造符合性检查代表的检查结果,以判断试验产品、试验装置状态是否满足开展验证试验的要求”及第六条中“经批准的试验大纲中所规定的试验步骤、试验仪器在试验中采集的数据对于试验是否有效”的要求,对实验室气候试验

进行调试审查,制定调试审查的要点包括:①在正式试验前对试验各系统运行状态进行确认;②对试验载荷谱施加、控制、测量能力进行验证;③对试验指挥流程合理性、工艺规范可行性进行检验。

1.5 技术状态审查

参照“程序”7.1.5 航空器原型机的地面检查中“地面检查的目的之一是实物验证提交审查组进行试飞的原型机满足最低的质量要求,符合型号资料”的要求,结合此实验室气候试验所规定的待考核系统,确定技术状态审查的科目为燃油、液压、发动机短舱、襟缝翼、舱门、机身蒙皮、电源、空调 8 大系统,制定审查要点包括:①检验试验考核的飞机各系统技术状态满足试验任务书和技术状态文件要求;②确认在基线环境条件下,飞机各系统性能参数符合正常状态,能够作为后续环境载荷施加后的基准。

1.6 制造符合性审查

依据“程序”7.2.1 检查范围的确定原则中“必须首先确定检查范围,这取决于申请人的质量方针、质量控制程序、生产经验、检验人员以及生产设施、设备的能力和对供应商的控制和管理”及 7.5 制造符合性检查时应考虑的重点中“无论申请人的经验如何,制造符合性检查代表都要负责确认申请人已进行了完全的制造符合性检查,也要负责确认检查结果得到了正确的记录”的要求,结合“飞机实验室气候试验总大纲”的规定,对循环风、制冷等 6 大基础环境模拟系统、蒸汽等动力系统及隔离门、库板等建安设施进行制造符合性检查;以工艺规范、安装图纸为审查基础对现场安装的最终状态进行检查,考核主要参数为立体坐标系下的安装位置,装置组件之间的配合情况,安装强度的符合性、接地电阻及传感器性能的符合性;依据“实验室气候试验控制大纲”对各工艺控制节点进行现场检查,考核主要参数涉及控制阈值、压力、流量计温度;对组织内人员进行审查,其中内培资质审查包括:试验指挥、试验设计、试验控制系统操作、试验测量系统操作、试验安装操作、各类机械设备运行操作、试验装置安装等,外培资质主要涉及试验相关的特种设备;对外部人员按照相关方管理规定进行资质审查,本项试验涉及航空机械和航空电子两个专业的民用航空器维修人员,审查其资质证书并对其机上操作记录及签字进行核查。

1.7 质量管控模型构建

基于上述对工程、制造符合性的适航要求的分析,结合本次试验项目的范围、特点、考核要求,将适航要求通过质量管控流程,应用于评审、风险、工艺、调试、技术状态、制造符合性 6 个方面融入审查工作,确定审查要点及基本要求,构建基于适航审查的实验室气候试验质量管控模型如图 1 所示。

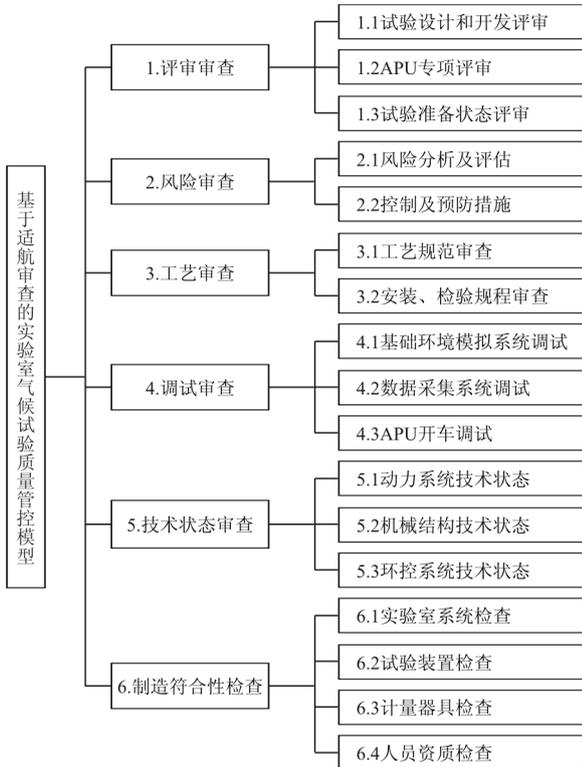


图 1 基于适航审查的实验室气候试验质量管控模型

Fig. 1 An aircraft laboratory climatic test quality control model based on airworthiness review

2 气候试验质量管控模型运行实践

根据本文试验内容组织成立由各专业副总师、适航员、技术员、工艺员、检验员、技术工组成的审查组,下设试验评审、试验风险、试验工艺、试验调试、技术状态、制造符合性专业组,采用基于适航审查的实验室气候试验质量管理模型,对我国第一项重点民用飞机型号实验室气候试验进行质量管控实践。

2.1 实验室气候试验评审审查

本项试验设计阶段的评审审查包括:试验大纲、APU 专项。试验准备阶段的评审审查为试验准备状态评审,具体评审审查情况如表 3 所示。

2.2 实验室气候试验风险审查

本项试验的风险审查涉及试验设计、试验技术状态管理、试验系统(设备)运行、试验装置安装、试验调试和试验实施等 6 个过程。所选用的风险辨识、评估方法为危险性与可操作性分析法、故障树分析法及风险矩阵法的优化组合,经分析确定飞机燃油、液压油、滑油渗漏严重等 37 项风险事件,其高风险事件($R>15$)9 项,对高风险事件进行控制措施详细审查,确认事故原因辨识与分析全面、合理、到位,检查控制措施的充分性、有效性和可行性。

2.3 实验室气候试验工艺审查

本项试验按照确定的工艺文件审查要点及基本要求进行,各工艺规范均经 5 级审查,形成审查意见通知书,给出详细修订要求,对 39 份工艺规范提出 179 项审查意见。

表 3 实验室气候试验评审审查

Table 3 Meeting review of laboratory climatic test

审查文件	审查意见
试验大纲评审 - 实验室气候低温试验大纲 - 实验室气候试验控制大纲 - 实验室气候试验采集大纲	1. 试验大纲内容全面、目的明确,飞机技术要求清晰,环境条件施加、控制、测量方法合理可行、试验判据合理,能满足试验任务书的要求; 2. 试验大纲制定的风险控制措施、无损检测方案、应急响应装置完备,可以保证飞机、人员和设备安全; 3. 试验大纲等技术文件及图纸完整,审签手续完备。
APU 专项评审 - APU 开车技术方案 - APU 开车安全方案	1. APU 开车技术方案提出的技术路线清晰、方法可行; 2. APU 尾气排放装置设计合理,制造、装配合格,经调试可实现高温尾气完全引流至外界,对实验室内环境条件无影响; 3. APU 开车安全方案风险辨识充分,控制措施完备,但缺少专项消防预案及其演练。
试验准备状态评审 - 试验准备工作总结 - 试验调试报告	1. 飞机技术状态符合试验任务书及大纲要求; 2. 试验所用技术文件、图纸、工艺规程均经审签完备; 3. 所用测控设备、计量器具均经校准鉴定合格,在有效期内; 4. 参试人员均经培训考核合格、持证上岗; 5. 基础环境模拟系统、动力系统、建安设施、数据采集系统经调试运行正常,控制功能可靠,测试数据准确。

2.4 实验室气候试验调试审查

本项试验针对实验室基础环境模拟系统、数据采集系统、APU 尾气排放系统,制定了专项调试方案及对应的指挥流程,其中基础环境模拟系统调试涉及-30、-40、-50、40 °C 高湿及基线环境条件 5

个调试科目;数据采集系统涉及 128 个温度测量分系统、36 个湿度测量分系统、42 个气压测试分系统单系统及联合调试;APU 技术尾气排放系统调试包括:实验室非密封状态、密封状态低温及密封状态高温湿热 3 个调试科目,调试审查情况如表 4 所示。

表 4 实验室气候试验调试审查

Table 4 Commissioning review of laboratory climatic test

系 统	审查意见
基础环境模拟系统	1. 低温调试的目标温度均达到环境谱要求,升降温速率 $<3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$,温度允差 $<2\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2. 湿热调试的目标温度和湿度均达到环境谱要求,绝对含湿量波动 $<2\text{ g}/\text{kg}$; 3. 各分系统运行正常,总控系统控制指令反馈精准。
数据采集系统	1. 数据采集系统主控机、交换机、UPS、上下位机等运行正常; 2. 测控软件功能交互良好,运行稳定; 3. 各传感器通道配置准确、运行正常、反馈灵敏、测量准确。
APU 尾气排放系统	1. APU 尾气排放系统排气参数均满足试验要求,入口温度 $<500\text{ }^{\circ}\text{C}$,出口温度 $<60\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2. APU 排气口附近环境压力 $<100\text{ Pa}$; 3. 实验室补齐及压力调节均满足 APU 开车试验科目的要求,室内的微正压 $<70\text{ Pa}$

2.5 实验室气候试验技术状态审查

本项试验针对飞机的燃油、液压、发动机短舱、襟缝翼、舱门、机身蒙皮、电源、空调 8 大系统/结构

的功能、性能进行技术状态审查,依照试验任务书中的考核科目,根据技术状态审查要点逐项进行确认,审查情况如表 5 所示。

表 5 实验室气候技术状态审查

Table 5 Technology status review of laboratory climatic test

系 统	审查意见
燃油系统	1. 放沉淀阀动作灵敏,功能实现良好; 2. 排漏阀动作灵敏,燃油箱周围未发现泄露或渗漏严重的情况。
液压系统	1. 液压系统 CAS 告警信息的功能实现正常;操作电动泵的开启和关闭性能正常; 2. 操作电动泵的开启和关闭性能正常。
发动机短舱	1. 风扇罩和反推罩的打开和关闭在正常范围,未出现急速动作或卡滞,阻尼性能好; 2. 把锁的开锁力均在正常范围内(20~30 lbs)。
襟缝翼系统	1. 操纵伸出/收回功能正常; 2. 襟缝翼超控开关、液压系统上压、发动机指示与机组告警系统功能正常。
舱门系统	1. 登机门、电子电气舱门、前货舱门、后货舱门在开关过程中顺畅; 2. 舱门与周边结构无干涉、密封件完好,舱门内侧手柄力正常。
机身蒙皮	1. 温度达到稳定状态后,各区域温度允差 $<1\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2. 通过超声波无损检测,蒙皮区域裂纹或无损伤。
电源系统	1. RAT 功能释放平均时间为 1.96 s,符合平均时间 $<3.63\text{ s}$ 的要求。
空调系统	1. 空调系统相关性能参数及舱内温度正常; 2. 空调系统稳态、快速调温正常。

2.6 实验室气候制造符合性审查

对试验准备阶段形成的安装、检验、运行、检查、操作所保留的成文信息、计量器具清单、试验人员资质进行审查,证明以上工作符合相应试验大纲、工艺规范、操作规程、工程图纸及相关标准要求,并确保实验室系统、试验装置的安装状态、试验机技术状态、现场计量器具、岗位人员与文件资料相符。本次共审查73份成文信息,9套工程图纸,261份传感器校准鉴定证书,31个内部人员资质,3个外部人员资质。

3 审查问题及改进

3.1 风险审查

经检查发现试验实施阶段的高风险事件“航空煤油燃气燃爆”的风险处置意见和措施不够完备,需要进一步细化和补充,审查改进意见如下:(1)对于航空煤油蒸汽泄露后的流场仿真分析补充低温状态下的环境载荷;(2)对于报警器调试介质应选择接近燃油蒸汽爆炸下限的气体;(3)在飞机的接地保护基础上,应确认实验室内测量系统的保护措施;(4)补充应急情况下具体的指挥流程和口令。审查组下发“技术单”,明确责任单位、改进期

限和验证判据。

3.2 工艺审查

对检查提出的179项审查意见进行统计分类分析,归纳共性问题三类:(1)个别工艺条件、性能参数、控制要求、操作步骤的规定不够具体、全面,状态、周期、程度、判据不够明确;(2)操作、运行、检查、维护过程中形成的成文信息内容不完善,文件中规定的要求和步骤无法体现,要求不明确,可能产生个别信息无法准确追溯;(3)工艺规范与质量体系程序文件、单位标准等相关规定产生不协调情况,且并未给予相关说明或指定处理措施。审查组向编制单位下发修订通知书,并在规定期限内对改进过程进行跟踪、监督和技术支持。经过多轮迭代审查和修订,工艺规范均满足要求。

3.3 成文信息的制造符合性

经检查发现成文信息的制造符合性检查问题13项,针对问题进行分析,确定6类问题,按照“不合格及纠正措施控制程序”的相关要求逐一制定归零措施(如表6所示),实施并验证后确保正式试验前满足试验大纲和工艺规范等要求。

表6 制造符合性成文信息检查问题分析及处理

Table 6 Analysis and treatment of manufacturing conformity information inspection problems

问题类型	涉及表单	归零措施
检验结论缺乏定量检验判据	飞机接地试验装置安装检验记录表;飞机系留试验装置安装检验记录表	通过“技术单”分别对电阻及预留量等信息进行说明,作为安装检验记录的附件
检查或操作项未进行记录	试验技术状态基线及偏离控制清单;报警记录配置表;环模水系统检查表;压缩空气系统检查表;管道加热器检查表	对清单进行动态补充,对未填写信息进行说明,写明原因及保障措施
记录内容与工艺操作文件偏离	空调地面加热试验科目技术状态确认表	按照工艺规范相关要求进行处理,通过“技术协调单”对不符合项进行修订,并由当值试验机操作人员会签
记录内容与现场实际情况不符	循环风系统检查表	对照工艺规范确认记录错误,现场状态正确,通过“技术单”对错误内容进行修正
记录内容不符合成文信息(记录)控制程序相关要求	积液包信号检查表;燃油系统低温警告试验技术状态确认表	通过“技术单”对不符合内容进行修订
对故障或异常情况的处理描述不完备、未说明	全自动切换氮气汇流排系统检查表;蒸汽系统检查表	对处理判定结果进行补充描述完备;按操作规程要求对处理结果进行描述

3.4 试验装置安装的制造符合性

经审查发现试验装置安装的制造符合性问题 8 项,仅涉及测量系统,包括 7 个温度传感器及 1 个湿度传感器,均为立体坐标系下的安装位置超差,其中气候实验室传感器 3 个,机上客舱内 4 个,机上驾驶舱内 1 个,依据“飞机实验室气候试验过程误差控制规定”的判据进行返工安装,并进行检

验和调试。

3.5 实验室系统状态的制造符合性

经审查发现问题涉及制冷系统、载冷系统及动力系统(氮气),对问题类型和影响程度进行评判,针对性制定问题归零措施(如表 7 所示),实施并验证后确保正式试验前满足试验大纲和工艺规范等要求。

表 7 制造符合性实验室状态检查问题分析及处理

Table 7 Analysis and treatment of manufacturing conformity laboratory status inspection problems

涉及系统	问题描述	对系统的影响程度	归零措施
制冷系统	制冷机组(A3)压缩机平衡活塞供油总阀最佳开度为 28°,经测量与实际偏差 3°。	依据制冷机组工艺要求,压缩机平衡活塞供油总阀为关键控制点,其运行超差为中度影响。	对系统进行检查,排除调试影响,并对其重新调节,确保精度满足工艺要求。
载冷系统	载冷机组(B2)输入管道的吸气总阀关闭状态,按照工艺要求应为 100%,而现场实际情况为预留约 10%。	依据载冷机组工艺要求,吸气总阀开度对旁系机组试运行效率有影响,在调试阶段为轻微影响。	对 B2 吸气总阀进行修正关闭,实现 100%关闭状态,并对试运行 B3 机组进行检查,验证其效率值。
动力系统	氮气系统(D)汇流排输出压力为 70.3 MPa,不符合试验前正常压力值(90~120 MPa)。	由于 A/B/C 汇流阀输出压力在 100 MPa 左右,因此在调试阶段几乎无影响。	更换 D 汇流排中氮气不足的气瓶。

4 结 论

(1) 基于适航审查的质量管控模型实现了试验方对实验室气候试验项目全寿命周期的有效管控,通过 6 个维度、17 个方面、51 个审核项目的详细审查与问题归零,为局方审查代表对型号资料审查提供路径和基础支持,为申请人提交制造符合性声明提供数据支撑和结论判据。

(2) 截至目前,我国第一项重点民用飞机型号实验室气候试验已顺利完成,经过 10 个科目的低温试验、3 个科目的湿热试验对试验机的 3 大系统 8 类结构或分系统进行气候条件下的功能、性能考核,试验项目全寿命周期未出现质量问题,证明了基于适航审查的质量管控模型的有效性、充分性和符合性。

(3) 基于适航审查的质量管控模型的构建与应用,为我国在研民用飞机型号开展实验室气候试验筑牢体系基础,为局方直接介入型号验证试验审查工作提供实践支撑,对我国气候实验室科研技术发展突破提供质量保障。

参考文献

- [1] 唐虎,李喜明.飞机气候实验[J].装备环境工程,2012,9(1):60-65.
TANG Hu, LI Ximing. Climate test of aircraft[J]. Equipment Environment Engineering, 2012, 9(1): 60-65. (in Chinese)
- [2] 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. (in Chinese)
- [3] 张昭,吴敬涛.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 Jingtao. Military aircraft laboratory climatic test management[J]. Equipment Environment Engineering, 2018, 15(4): 65-69. (in Chinese)
- [4] 刘海燕,马建军.大型气候实验室高低温模拟系统关键技术研究[J].装备环境工程,2018,15(11):79-83.
LIU Haiyan, MA Jianjun. Research on key technologies of high and low temperature simulation system in large climatic laboratory [J]. Equipment Environment Engineering, 2018, 15(11): 79-83. (in Chinese)
- [5] DRAKE C W. Environment test capabilities of the air force Mckinley climatic laboratory: AIAA-85-0089[R]. Reno: AIAA, 1985.
- [6] RUSSELL A A. The air force flight test center artificial ic-

- ing and rain testing capability upgrade program; AIAA-93-0295[R]. Reno: AIAA, 1993.
- [7] BELL J D. Icing at the Mckinley climatic laboratory; AIAA-2014-735[R]. Reno: AIAA, 2004.
- [8] ROBERT F J, PHILIP A, RONALD D. Artificial icing tests of the S-92A helicopter in the Mckinley climatic laboratory; AIAA-2004-737[R]. Reno: AIAA, 2004.
- [9] MARK A. F-35B forty below hot-cold test[J]. Air International, 2015(3): 7-9.
- [10] 李冬梅. 大型气候环境实验室综合控制管理系统网络结构设计[J]. 装备环境工程, 2018, 15(6): 11-16.
LI Dongmei. Architecture design of control management system for aircraft climatic environment test facility[J]. Equipment Environment Engineering, 2018, 15(6): 11-16. (in Chinese)
- [11] 张昭. 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. Military aircraft laboratory climatic test management [J]. Equipment Environment Engineering, 2017, 14(10): 87-91. (in Chinese)
- [12] AMSC. Aircraft structural integrity program: MIL-STD-1530D[S]. US: AMSC, 2004.
- [13] Secretary of the Air Force. Air force instruction, operational test and evaluation: 99-102[S]. US: Secretary of the Air Force, 1998.
- [14] 吴相甫. 气候实验室气候环境试验数据管理系统设计[J]. 测控技术 2017, 36(9): 114-118.
WU Xiangfu. Design of test data management system for aircraft climatic environment test in laboratory[J]. Measurement & Control Technology, 2017, 36(9): 114-118. (in Chinese)
- [15] 中国民用航空局. 航空器型号合格审定程序: AP-21-AA-2011-03-R4[S]. 北京: 中国民用航空局, 2011.
CAAC. Aircraft type certification flight test safety program: AP-21-AA-2011-03-R4[S]. Beijing: CAAC, 2011. (in Chinese)

作者简介:

尚文(1989—),男,硕士,工程师。主要研究方向:飞机地面试验质量适航管理。

(编辑:丛艳娟)

(上接第 393 页)

- [11] BRUHN E F. Analysis and design of flight vehicle structures[M]. Cincinnati: Jacobs Publishing Inc. , 1973.
- [12] 孙侠生. 民用飞机结构强度刚度设计和验证指南[M]. 北京: 航空工业出版社, 2012.
SUN Xiasheng. Guidelines for structural strength and stiffness design and verification of civil aircraft[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2012. (in Chinese)
- [13] BOMBARDIER R. Stress and fatigue, strength of metallic structures-buckling thin skin stringer panels in compression: BM7024[R]. [S. l. : s. n.], 2004.
- [14] Von KARMAN T, SECHLER E E, DONNELL L H. The strength of thin plates in compression[J]. Transactions of ASME, 1932, 54(2): 53-57.
- [15] WINTER G. Stress distribution in and equivalent width of flanges of wide thin-wall steel beams[R]. [S. l.]: National Advisory Committee for Aeronautics, 1940.
- [16] 牛春匀. 实用飞机结构应力分析及尺寸设计[M]. 北京: 航空工业出版社, 2009.
- NIU Chunyun. Airframe stress analysis and sizing[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2009. (in Chinese)
- [17] 孙为民, 童明波, 董登科, 等. 加筋壁板轴压载荷下屈曲稳定性试验研究[J]. 实验力学, 2008, 23(4): 333-338.
SUN Weimin, TONG Mingbo, DONG Dengke, et al. Post-buckling and stability studies of curved stiffened panels subjected to an axial compression load[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2008, 23(4): 333-338. (in Chinese)

作者简介:

吴存利(1963—),男,博士,研究员。主要研究方向:计算结构力学、结构强度和一般力学。

聂小华(1972—),女,硕士,研究员、副总工程师。主要研究方向:计算结构力学、虚拟试验。

(编辑:丛艳娟)