

文章编号: 1671-6612 (2020) 02-251-06

# 民用飞机舱室环境研究现状与思考

周 月<sup>1,2</sup> 张鹤林<sup>1,2</sup> 程定斌<sup>1,2</sup> 胡文超<sup>1,2</sup>

(1. 南京机电液压工程研究中心 南京 211106;

2. 航空机电系统综合航空科技重点实验室 南京 211106)

**【摘要】** 针对影响舱室环境的热环境、空气质量、人机工效和噪音四项核心环境要素,分析了国内外在标准制定和技术研究方面的技术现状与发展趋势。在标准制定方面,国外的民机舱室环境标准相对完善,在民用飞机舱室关键环境要素的技术研究方面,国外已开展了大量研究工作,在民用飞机舱室演示验证的技术研究方面,国外相关研究机构建立了大规模的地面模拟验证设备,并在长期的研究工作中积累了大量的基础验证数据。基于国内外发展差距分析及未来多电飞机发展趋势,分析了未来民机舱室环境的重点研究方向,为国内舱室环境控制系统方案论证和工程研制提供技术支撑。

**【关键词】** 舱室环境;热环境;空气质量;人机工效;噪音;多电飞机

中图分类号 V245 文献标识码 A

## Study and Consideration on Present Situation of Civil Aircraft Cabin Environment

Zhou Yue<sup>1,2</sup> Zhang Helin<sup>1,2</sup> Cheng Dingbin<sup>1,2</sup> Hu Wenchao<sup>1,2</sup>

(1. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Aero Electromechanical System Integration, Nanjing, 211106;

2. AVIC Nanjing Engineering Institute of Aircraft Systems, Nanjing, 211106)

**【Abstract】** Focus on thermal environment, air quality, ergonomic and noise of environment in cabin, it introduced the technology status and development status in standard and technology. In terms of standard system, the foreign civil aircraft cabin environmental standards is relatively perfect; in terms of key environmental elements, a large number of research has been carried out at abroad; in terms of technical research on demonstration and verification of civil aircraft cabin, relevant foreign research institutions have built large-scale ground simulation and verification equipment, and accumulated a large number of basic verification data in long-term research. Based on analysis of gap between home and abroad and the trend on more electrical aircraft, the key research direction of future civil aircraft cabin environment is analyzed. It is very helpful to provide technical support for the environmental control system development for wide-body civil aircraft in China.

**【Keywords】** cabin environment; thermal environment; air quality; ergonomic; noise; more electrical aircraft

## 0 引言

航空工业是战略性高科技产业,是一个国家科技创新能力、工业水平和综合国力的重要标志之一。进入 21 世纪以来,民用航空已经发展成为一个庞大的国际性产业,对一个国家的经济乃至世界经济有着举足轻重的影响。大型民机是国际竞争的

制高点,是大国必争之地。但中国作为一个快速发展的经济和政治大国,大型民机产业才刚起步。自主研制大型民机,发展有市场竞争力的航空产业,对于转变经济增长方式、带动科学技术发展、增强国家综合实力和国际竞争力、加快现代化步伐,具有重大意义。

作者(通讯作者)简介:周 月(1986-),女,硕士,工程师, E-mail: yuehao20103@163.com

收稿日期: 2019-11-23

目前，民机激烈竞争的重点主要体现在安全性、舒适性、经济性、环保性等方面。而民机舱室环境技术与民机的安全性、舒适性、经济性、环保性直接相关。它包括在各种飞行条件下，将舱内空气的压力、温度、湿度、气流速度和洁净度保持在允许范围内，为乘客提供足够的流通空气和新鲜空气，并改善货舱和电子设备舱内的环境条件。舱内舒适的温度环境、合理的压力绝对值、人耳无感觉的压力变化速度、清新的空气和适宜的风速，已经成为现代民机吸引旅客的重要条件。随着机载各系统及其航空电子的高速发展，装备数量的增多，飞机舱室环境愈来愈复杂，且在某种程度上制约着民机型号总体性能和市场竞争力的提高。图 1 表示了从 100 多个航空公司调研中得出购机的“关键因子”图。

目前，以人为本的设计理念已逐渐渗透到飞机研发及市场竞争的各个环节。波音和空客等主要航空公司纷纷将舱室舒适性研究提升到了战略高度，试图以此占据更多的竞争优势。我国正在发展的大型民机计划，创造更为适宜的舱室环境无疑也成为竞争的关键。因此，关于民机舱室环境的相关研究受到越来越多的关注。

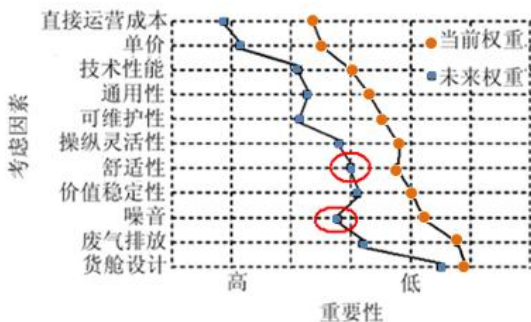


图 1 航空公司购买新机时主要考虑的因素

Fig.1 An airline's main consideration when buying a new plane

### 1 民用飞机舱室环境内涵

舱室环境是指影响乘员健康和舒适程度的各种环境因素主要包括空气环境（如热环境、空气质量等），人机工效（如视觉信息流，人机界面及内饰系统等），声学环境（如噪声）等多方面环境因素，这些因素对舱内人员生理、心理及工作效率起着重要作用<sup>[1]</sup>。舱室环境质量不仅与机载设备性能和可靠性密切相关,更直接关系到旅客和机组人员

的安全性、舒适性和工作效能。

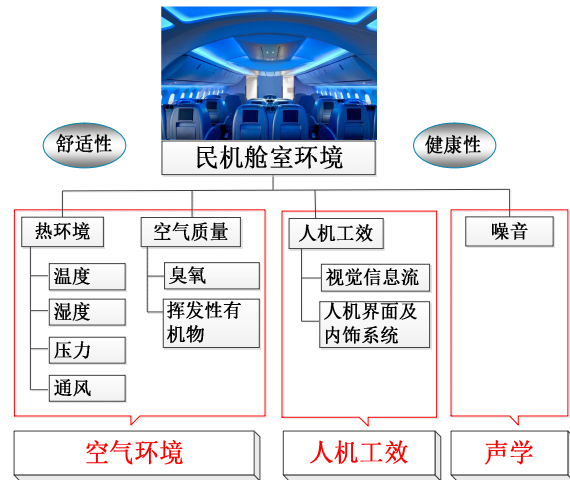


图 2 民机舱室环境主要因素

Fig.2 The main environment factor of civil aircraft cabin

本文针对影响民机舱室环境的热环境、空气质量、人机工效和噪音四项核心环境要素开展研究。通过对现有飞机环境控制标准、国内外研究现状分析和现有飞机设计水平的调研，对比分析国内外在民机舱室环境设计标准制定和技术研究方面的现状，在此基础上提出了目前在民机舱室环境方面所面临的主要问题及相关思考。

## 2 研究现状

### 2.1 国外发展现状及趋势

#### 2.1.1 标准制定方面

目前国外民机舱室环境标准主要包括：

(1) 运输类飞机适航标准，如美国联邦航空条例 FAR25、欧洲联合适航条例 JAR25，是民用飞机进行适航审定的基本依据；

(2) 咨询通告，如 AC20-174、AC25-20、AC20-32b、AC20-133 是民用飞机舱室环境进行适航符合性设计时的参考依据；

(3) 技术规范，如 MIL 美国军标 MIL-B-81365-1966、MIL-H-18325B-1959，SAE 美国汽车工程师学会 SAE AIR1168-6A-2011、SAE AIR1168-7A-2011，ASM 美国金属学会、ASTM 美国试验材料学会规范等，这类规范和标准是一些技术文档，为舱室环境设计提供了设计方法和技术参考。

在国外，美国国家调查委员会（NRC）、国立职业安全与健康研究所（NIOSH），职业安全与保

健管理总署 (OSHA) 及美国工业卫生协会 (ACGIH) 等机构对室内环境都设定了限值。不同机构针对保护对象不同, 所设定的限值差异比较大。在航空工业中, 通常采用 FAA 的相关标准。

美国采暖、制冷与空调工程师协会 (ASHRAE) 成立了 SPC, 建立适用于旅客客舱环境的标准, 并成立了“大型旅客机客舱空气质量研究委员会”开展针对大型飞机空气品质调查实测与评估研究, 主要实施有关航空污染毒性及其对健康的危害等方面的评价研究, 并督促各种舱内空气质量改善措施的实施。

目前国外标准中针对舱室环境相关指标的限定值<sup>[2-9]</sup>如表 1 所示。

表 1 国外舱室环境主要参数标准要求

Table 1 Foreign standard requirements for main parameters of cabin environment

参数	标准	限定范围
温度	ASHARE	25 (地面)
	Handbook:Aircraft	24 (巡航)
	SAE ARP	18℃~29℃
	85E-1991	
座舱纵向温度变化	SAE ARP	≤2.8℃
湿度	85E-1991(R2007)	
	ASHARE 1992	20%~30%
压力	FAR/JAR 25	≥74kPa (8000ft) 下降速率不超过
	SAE ARP 1270B (2010)	91slm/min (300slft/min) 爬升速率不超过 152 slm/min (500slft/min)
	ASHARE	0.1m/s~0.35m/s
新风供应量	Handbook:Aircraft	
	FAR/JAR 25	≥0.25kg/min/人
二氧化碳	FAR/JAR 25	5000ppm
	ASHARE	1000ppm
一氧化碳	Handbook:Aircraft	
	FAR/JAR 25	50ppm
臭氧	FAR/JAR 25	0.1ppm (3h)
		0.25ppm (8h)
噪音级	AC20-133	≤88dB

在制定更新相关设计标准的同时, 还伴随着客

机型号设计技术的不断提升, 对舱室环境进行着不断完善的仿真计算与试验研究。其中主要是针对进入旅客区的舱室环境指标参数诸如空气流动速度、机舱温度等的变化情况, 并利用 Fluen 等仿真平台进行仿真试验分析, 舱室环境评价标准得到了持续更新完善。

### 2.1.2 技术研究方面

国外研究机构开展了大量的民用飞机舱室安全性与舒适性领域的研究, 取得了丰硕的成果, 这些成果目前都在国外先进的民用飞机中有所应用。目前对民机舱室环境的基础研究和系统开发, 主要集中在波音集团、空客集团和前苏联民用飞机制造企业等机构, 其中以波音公司和欧洲空中客车公司为首, 垄断了世界旅客机市场的最大份额。

国外多家研究机构曾开展了长达数年的飞机客舱质量环境调查和分析工作, 其中影响较大的是欧洲航空客舱环境健康影响项目 HEACE 和客舱空气质量研究计划 Cabin Air, 以及近期的理想客舱环境计划 ICE。

英、德、加拿大、美国等国研究机构为了开展舱室舒适感领域内的深入研究, 不惜重金建立了全尺寸地面模拟试验设施, 以取得第一手舱室环境研究数据, 充分体现了对高品质舱室环境技术研究的重视。

国外在舱室环境相关技术方面的研究趋势体现了对舱室环境舒适性、健康性的追求:

#### (1) 舱室热环境方面

热舒适一直是航空舱室环境的重要研究内容。

##### ① 舱室温度方面

温度的影响其实相对比较成熟, ASHARE 制定的舒适度指标, 室内最适宜的温度在 20℃ 至 24℃。根据航空医学要求, 最舒适的座舱温度为 20℃~22℃, 正常保持在 15℃~26℃ 的舒适区范围内。

民用飞机普遍采用 24℃ 左右的温度设计, 也是沿用借用这些研究的成果, 同时关注 21℃~27℃ 的调节范围, 但是有根据乘客需求适应扩大范围的趋势, 例如 A350 和 A380 先后提出 18℃~24℃ 和 18℃~30℃ 的调节要求。

##### ② 舱室湿度方面

德国和美国在加湿方法和舱壁避免湿积累方面作了大量的前期研究。

A380 用加热的方法使得水份蒸发为水蒸气向驾驶舱加湿。该驾驶系统避免了引用高压气体,更加适用于未来多电飞机的使用要求。B787 通过空调系统将客舱内的湿度维持在 20%~30%,比当前 4%的水平感觉更加舒适,创造出更适合人体健康的客舱空气环境,有助于缓解乘客干涩的症状。

### ③舱室压力方面

由于 B787 飞机采用了复合材料机身,整架飞机复合材料的比例超过 50%,使得机身可以承担更大的内外压差,从而使客舱的压力高度更低。B787 飞机在巡航时客舱压力高度为 6000 英尺,飞机内外压力差高达 9.43Psi,而现役的铝制飞机巡航时的客舱压力高度为 8000 英尺,飞机内外压力差约 8Psi。

### ④舱室通风方面

B787 飞机的空调系统为飞机的驾驶舱和客舱提供 0.25kg/min/人的新鲜空气(客舱温度 75°F,约 24°C),并且能够通过空调控制组件根据需求精确控制空调的输出空气流量。降低能量损耗以达到最高的经济效益。

由于上述研究的积累,使得最新研制的 A380 和 B787 在舱室热环境方面有了长足进步,尤其 B787 巡航座舱高度降低为 6 千尺,减少了头疼与头昏。但飞机研制成功后,随飞行包线的全程热舒适控制还没有被系统研究。德国的 FTF 试图开展真实飞行环境下的热舒适研究工作,但就如何改善与控制目前还处于研究阶段。

### (2) 舱室空气污染方面

美国组建了多领域专家组成的民机舱室空气质量协会,主要实施有关航空污染毒性及其对健康的危害等方面的评价研究。美国普渡大学等学者针对飞机舱室密闭空间气体污染源辨识进行了深入的研究。此外微量有害气体向无害物质的分解方法也成为目前研究的热点。

B787 飞机除了装备当前飞机使用的用于消除细菌、病毒与真菌的高效空气过滤器(HEPA)之外,空调系统中还额外引入了一种新型气体过滤系统(Gaseous Filtration),用以去除异味、刺激物与气态污染物。在 B787 飞机空调空气循环清洁系统中,从飞机的下舱收集到的再循环空气比上舱的再循环空气多经过了一道气体净化气滤,过滤掉了空气中含有的刺激性气味,使得再循环空气更为清

新,乘客感觉更舒适。避免了传统依靠增大新风量稀释空气污染浓度的方式带来的巨大经济性代价。

### (3) 舱室人机功效方面

为了降低乘客长途飞行的不适感,目前国外航空公司均投入巨大研发力量进行该方面的面向实际的应用技术研究。

B787 飞机在客舱照明、舱顶和舷窗构型以及舱内空间等方面做出了很多改进,在人机工效设计研制方面得到很大提升。

空客 A380 舱室采用了全双层宽体机舱设计更高空间舒适性,能够享受更多的自然光。

### (4) 舱室噪音方面

国外在民用飞机噪音领域发展迅速。早期以改善飞机乘坐舒适性为目标的舱室噪音被动控制方法研究为主,近年来,为了满足 FAR 36 部适航噪音要求及更具竞争力的舱内噪音水平,进行了低噪音发动机、低噪音喷流和低噪音机体结构主被动降噪相结合的新技术研究。

美国 NASA 研究机构和波音等航空公司投入了大量的人力和巨额资金,使民机降噪设计技术发展到了分析结果比较准确,材料和结构声学设计数据充足,声学设计体系完整,设计、分析过程规范,试验验证采用全尺寸部段级机身结构、声载荷模拟真实环境(声学风洞、发动机激励)的阶段。

国外主要的环控系统供应商也纷纷开展了针对环控系统部件降噪技术的研究,如优化制冷组件风扇叶片,在冲压空气排气活门外加装消声器等。同时,各主要飞机制造商及环控系统供应商,如波音、空客、Honeywell 也在不断通过尝试新的模拟和试验方法。

### (5) 验证技术方面

英、德、加拿大、美国等国研究机构为了开展舱室领域的深入研究,不惜重金建立了全尺寸地面模拟试验设施,以取得第一手舱室环境研究数据,充分体现了对舱室环境技术研究的重视。

## 2.2 国内发展现状及趋势

### 2.2.1 标准制定方面

目前国内民机舱室环境标准主要有:

(1) 中国民用航空局颁布的 CCAR 25 是我国运输类飞机适航基本标准;

(2) 技术规范,如 2001 年我国制定出 HB 7489,其特点是从安全性、舒适性、可靠性、舒适

性等方面阐释对民用飞机环境控制系统的通用要求, 并与波音公司的 B757、B767 和 A340 机型的舒适性设计要求基本吻合; 我国 1994 颁布的 HB 7123 为民机舱室噪音测量制定了依据。此外, 还有 HB6497-1991 等, 为舱室环境设计提供了方法和技术参考;

(3) 建筑室内空气调节标准要求, 如 GB 18883-2002, 为舱室环境设计提供了参考和借鉴。

表 2 国内舱室环境主要参数标准要求

Table 2 Domestic standard requirements for main parameters of cabin environment

参数	标准	限定范围
驾驶舱和客舱温差	CCAR 25	$\leq 3^{\circ}\text{C}$
压力	CCAR 25	正常运行时, 座舱压力高度 $\leq 2438\text{m}$ 失效时, 座舱压力高度 $\leq 4572\text{m}$
新风供应量	CCAR 25	$\geq 0.25\text{kg}/\text{min}/\text{人}$
臭氧浓度	CCAR 25	飞行高度大于 8230m 时, 任何 3 小时期间浓度 $\leq 0.1\text{mL}/\text{m}^3$ 飞行高度大于 9750m 时, 任何时刻浓度 $\leq 0.25\text{mL}/\text{m}^3$
挥发性有机物浓度	GB/T 18883-2002	$\leq 0.6\text{mg}/\text{m}^3$ (8 小时平均)

### 2.2.2 技术研究方面

随着我国 Y8 及 ARJ21、C919 项目的进行, 国内进行了部分舱室环境品质相关研究工作。C919 参考 B787 为提高舒适度而增加湿度, 降低巡航高度等。

然而, 不足的是舱室环境相关研究还没有提升到战略高度。因此, 为了提供更好更健康的舱室环境, 我国需要大力发展具有自主知识产权的舱室环境相关研究。目前, 国内在舱室环境技术方面研究涉及相对较少:

#### (1) 舱室热环境方面

在整舱热环境舒适性研究方面基本上还没有考虑, 只在目前舱室通风系统设计中参考了 Airbus 关于温度场和舱室压力要求, 满足通风、调温、增压要求。

在气流组织设计方面国内没有开展针对具体机型的气流组织优化试验研究。ARJ21 只计算了温

度、气流控制、流量面积、排气格栅等。

#### (2) 舱室空气污染方面

国内在舱室空气污染控制设计中, 未能实现经济高效的污染物控制, 大多是在制冷量设计时考虑满足新风量基本要求, 未能有效稀释空气污染物浓度, 最终影响了座舱的空气品质。

南京机电在创新基金项目研究中已开展了除臭氧器研究, 并研制原理样机, 完成了对该样机的验证试验。

#### (3) 舱室人机工效方面

我国民机设计中除了空气质量和热感不尽人意外, 另一个倍受关注的问题是舱室内部空气几何布局问题, 普遍存在空间几何不舒适, 主要体现在空间狭小、座椅尺寸不舒适等方面。

就目前现状来看, 与光环境设计相关的飞机座舱信息显示方面的研究比较零散, 未形成系统化的理论, 主要偏重于探讨某单一光学要素对人的视觉影响和对驾驶舱的工效作用, 例如通过对仪表盘“扫视”与照明均匀性的分析研究仪表照明亮度不均匀对飞行员判读时间的影响; 通过不同照明光色进行短时暗适应的比较; 通过试验分析得到不同光色照明下仪表的判读时间与正确率, 从而得到不同光色照明判断正确率与亮度的关系曲线; 通过对瞳孔直径随适应时间变化曲线的分析, 研究照明均匀度对视觉的影响; 通过视觉功能曲线、对比敏感度与背景亮度的关系、仪表盘不同亮度强光照射后的恢复时间研究飞行员的视觉功能等。西北工业大学提出了基于 GL STUDIO 软件的飞机座舱仪表仿真及基于 SPEOS CAA 软件的飞机座舱内饰仿真的方法和应用。北京航空航天大学人机与环境工程系在飞机驾驶舱光学模拟及其对显示界面认读绩效的影响方面也开展了相关研究工作。

#### (4) 舱室噪声方面

我国在飞机舱室噪音方面的研究起步相对较晚, 远不能满足民机发展的需要。尤其对于大型客机研制, 噪音控制方法的研究是未来发展不可或缺的重要分支。

上海飞机设计研究院已经开展了针对通风管路的降噪技术前期研究工作。中国飞机强度研究所(航空 623 所)在噪声控制方面也提出了多项主动和被动噪声控制方法, 收到较好的降噪效果, 但需要进一步研究。

### (5) 验证技术方面

目前 ARJ21 完成了通风管路地面流量分配均匀性试验。试飞院完成了成品机的温度场测量,并发现了低温环境启动时舱室温度场严重不均匀问题,影响到舱室的热舒适性和空气质量。

在地面试验研究方面,由于上海飞机设计研究院刚刚组建进行工作,所以目前主要的试验能力均在中航第一飞机设计研究院。该院在关于高空环境与舱室环境控制方面的研究起步较早,建有高空环境模拟试验平台。

南京机电建有高空环境模拟试验平台,主体结构是 200m<sup>3</sup> 的模拟大气舱,试验台采用自动控制手段,具备数据采集功能。该平台能够满足环境系统的高空环境模拟试验要求。

北京航空航天大学在舱室环境验证方面开展了一系列的研究工作,拥有飞机座舱环境模拟舱和民机座舱工效评价试验台,已开展了舱室热舒适性、污染控制和人机工效相关的验证工作。

## 3 存在的问题与思考

在标准制定方面,国外的民机舱室环境标准相对完善,主要包括运输类飞机适航标准、咨询通告和技术规范等;国内在此方面的标准体系尚不完善,相关设计与评价工作较多依据国军标、卫生学标准和地面室内环境标准,难以从整个过程上保证舱室环境设计符合民用航空的相关管理要求,因此亟需开展民机舱室环境设计与评价标准研究。

在民用飞机舱室关键环境要素的技术研究方面,国外已开展了大量研究工作,取得了丰硕成果,相关的技术成果已成功运用于 A380 和 B787,有利改善了舱室的环境品质;而国内对高品质舱室的研究处于起步阶段,尚未达到战略高度,相关研究深度不够,在舱室关键环境要素方面的研究还不完善,相关设计指标仅能满足最低安全性设计要求,尚无法适应高品质舱室环境的发展方向,因此,亟待开展民机舱室关键技术研究。随着民用航空业快速发展,多电飞机成为未来民用飞机的发展方向。传统臭氧转化装置的工作环境要求主要定位在发动机常规引气条件下,该工况是高温、高压环境,对催化剂来说,是十分理想的工作环境,因而除臭氧的转化效率相对比较高,但随着 B787 等多电化飞机的出现,取消了发动机引气这一常规引气模

式,而是采用了电动压气机引气<sup>[10]</sup>,电动压气机引气的效率非常高,造成压气机引气出口的温度很低,高空臭氧环境下,引气出口温度大部分情况下都处于 90℃ 以下,这样的引气温度,对发动机常规引气下工作的臭氧转化装置的效率影响非常大。因此,为了适应国内未来民机多电化的发展需求,需要开展低温条件下臭氧转化技术研究。同时,由于多电飞机取消了传统飞机的引气系统,使得基于高压引气输送的加湿系统不再适用,因此,续开展基于电加热的加湿技术研究。此外,温、湿度、压力、噪音、污染物的智能探测也是提高舱室环境的重要研究方向。

在民用飞机舱室演示验证的技术研究方面,国外相关研究机构建立了大规模的地面模拟验证设备,并在长期的研究工作中积累了大量的基础验证数据,为舱室环境品质的验证评估及舱室设计方案的优化改型工作奠定了良好的试验基础;国内在此方面的验证一方面是主机厂所基于军机验证平台进行改进而来,另一方面是在高校开展的模拟舱验证工作,虽能满足部分指标的验证,但随着大型民机验证要求的日益提高,现有的验证手段将无法满足验证需要。因此,需要开展民机舱室环境验证技术研究。

## 4 结论

为了缩小与国外的技术差距,提升我国民机自主研发技术能力,亟需在舱室环境方面开展一系列的研究工作,主要包括以下几个方面:

(1) 民机舱室环境设计与评价标准研究,建立指导我国民机舱室环境自主设计研制的标准体系;

(2) 民机舱室环境关键技术研究,深入分析影响民机舱室环境品质的热环境、空气污染、人机工效和噪音等因素,开展系统级和部件级关键技术研究 and 关键设备研制工作,具体包括低温条件下臭氧转化技术研究、基于电加热的加湿技术研究以及温、湿度、压力、噪音、污染物的智能探测;

(3) 民机舱室环境验证技术研究,搭建民机舱室环境地面演示验证技术平台,实现对舱室环境的演示验证,进一步开展关键设备的适航取证工作。

(下转第 282 页)