

民用飞机座舱舒适性影响因素研究综述

周琼瑶^{1,2*} 张哈冰^{1,2}

(1. 上海飞机设计研究院, 上海 201210; 2. 大型客机集成技术与模拟飞行全国重点实验室, 上海 201210)

摘要: 随着客机技术的发展和人民生活水平的提升, 飞机已逐渐成为主流的交通方式之一, 座舱环境舒适性也逐渐受到重视。聚焦于民用飞机舱室舒适性影响因素, 采用文献调研的方式对飞机舱室主要环境参数控制要求、飞机运营中的实测座舱环境参数及运营飞机中乘客机组舒适性主观评价进行研究分析。研究发现, 针对座舱环境参数的标准之间存在较多不一致性, 且现有标准未直接体现出飞机座舱驾乘舒适性; 通过分析飞机实测参数与指标要求及主观评价, 发现座舱环境的整体评价为“较为满意”, 距离“满意”仍有距离, 即座舱环境仍有提升的空间和必要性; 对于乘客, 不同的问卷调查研究结果略有差异, 但均显示噪声是影响乘客整体满意度的最不利因素, 风速和光线的影响最小, 气压、空气品质、温度仍有一定影响; 对于机组, 相对湿度是最不利的环境因素, 其次为空气品质和噪声, 但目前关注机组舒适性问题的研究较少。本文的研究成果能够为飞机舒适性优化及提升技术发展方向提供参考。

关键词: 飞机座舱环境; 运营中; 舒适性; 主观评价; 影响因素

中图分类号: V223

文献标识码: A

OSID:



0 引言

舒适性是人对环境影响的一种主观评价, 飞机座舱封闭空间的环境控制完全依靠环控系统, 且座舱内人员密度高、人员行为受限, 座舱压力会随飞行状态发生变化, 因此飞机舱室舒适性研究是一项复杂的综合性工程, 影响因素包括: 热环境、声环境、光环境、空气品质等。袁领双等人^[1]指出, 在激烈的国际竞争下, 现代民航客机正在向高安全、高舒适、大运力、低消耗的方向发展, 客机的舒适性设计越来越受到人们的关注。

在民用飞机的运营过程中, 进行座舱内环境参数测量和开展舒适性主观问卷调查, 能够获得真实的飞机座舱环境参数特征, 了解机组人员和乘客对真实飞机座舱的满意度。本文从飞机舱室环境影响因素架构、飞机舱室实测环境参数、舒适性主观评价三方面进行了文献调研和研究, 旨在分析民用飞机中舒适性的影响因素, 为后续飞机座舱舒适性

提升技术提供参考。

1 飞机座舱环境参数标准

1.1 热环境参数

热舒适是人对周围热环境所做的主观满意度评价。飞机座舱热环境舒适性的影响因素主要包括温度、风速、压力、湿度。相关标准^[2-6]对座舱内的温度、风速等控制要求如表1所示。

1.2 空气品质

飞机座舱内的污染物来源主要是动力系统引气、座舱内的内饰材料、人员呼吸、人员散发等^[7-9]。污染物的组成和浓度对乘客、乘务员的舒适性和健康具有重要影响, CCAR 25部、FAR 25部、CS 25部等适航标准中提供了常见污染物如CO₂、CO、O₃的舱室浓度值, 俄罗斯适航法规AP 25部中还列举了甲醛、甲苯、汽油蒸气等污染物的浓度值。CO₂、CO、O₃、甲醛等常见污染物的浓度限值要求如表2所示。

* 通信作者. E-mail: zhouqiongyao@comac.cc

引用格式: 周琼瑶, 张哈冰. 民用飞机座舱舒适性影响因素研究综述[J]. 民用飞机设计与研究, 2024(3): 80-87. ZHOU Q Y, ZHANG H B. A review of factors influencing the comfort of civil aircraft cabins[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2024(3): 80-87(in Chinese).

表1 相关标准对座舱内热环境参数的控制要求

环境参数	标准		
	CCAR/FAR/CS 25 部	ASHRAE161-2013	GB9673-1996
夏季温度	/	(1) 巡航和地面运行:18.3~23.9℃	24~28℃
冬季温度	/	(2) 巡航过程中无论舱内的娱乐系统是否开启,控制温度不能超过26.7℃ (3) 在地面时,当飞机上没有娱乐系统或娱乐系统没开启时,控制温度不能超过26.7℃,但所有的娱乐系统均在运行时,不能超过29.4℃	18~20℃
温差	/	水平温差<4.4℃;垂直温差<2.8℃	垂直温差≤3℃
风速要求	/	(1) 坐着的乘客和乘务人员周围风速应小于0.36 m/s (2) 对吹风敏感的裸露的身体部位的风速应小于0.3 m/s(推荐应小于0.2 m/s) (3) 当个性化送风喷嘴关闭时人体头部高度的风速应大于0.1 m/s (4) 个性化送风喷嘴开启时人体头部高度的风速应大于1.0 m/s	≤0.5 m/s
座舱压力	座舱压力高度不超过8 000 ft	座舱压力高度不超过8 000 ft	/
相对湿度	/	/	60% ≥RH ≥40%

表2 相关标准对座舱内的污染物浓度的控制要求^[2-4,6,10]

污染物浓度	标准		
	CCAR/FAR/CS 25 部	EN 4618:2009	GB9673-1996
CO 浓度	最大值不超过50 ppm	最大值:50 ppm 8 h 内平均浓度限值:10 ppm 1 h 内平均浓度限值:25 ppm	≤10 mg/m ³
CO ₂ 浓度	必须表明飞行期间通常有旅客或机组乘坐的舱的二氧化碳浓度不得超过0.5%体积含量(5 000 ppm)	安全限值:5 000 ppm 健康限值:2 000 ppm(15 min 暴露值) 舒适限值:2 000 ppm	≤0.15%
O ₃ 浓度	必须表明飞机在飞行时座舱中的臭氧浓度符合下列要求: (1) 在320飞行高度层(高度相当于9 750 m)以上的任何时刻,不超过0.25/1 000 000(0.25 ppm)体积含量(海平面当量) (2) 在270飞行高度层(高度相当于8 230 m)以上任何三小时期间,不超过0.1/1 000 000(0.1 ppm)体积含量(海平面当量时间加权平均值)	健康限值:最大值不超过0.25 ppm 3 h 内平均浓度不超过0.1 ppm 8 h 内平均浓度不超过0.06 ppm	/
甲醛浓度	/	安全限值:15 min 内平均浓度2 ppm 8 h 平均浓度0.75 ppm 健康限值:30 min 内平均浓度0.08 ppm	/

1.3 声环境参数

声环境是影响人体舒适度的重要环境因素之一。民用飞机舱室内的噪声主要来源于动力装置噪声、辅助动力装置噪声、系统噪声、机体噪声^[11]。声环境舒

适性评价指标包括了响度、噪度、计权声压级、语言干扰级、噪声评价数(noise criterion,简称NC)曲线等。多数噪声相关标准采用A声压级评估噪声,GB 9673-1996中要求飞机座舱内噪声应低于80 dB(A)^[6]。

文献[8]建议民航舱内噪声水平设计目标设定为平均 80 dB(A) 及客舱后部噪声不超过 85 dB(A)。

1.4 光环境参数

光环境对人体舒适性体验有极大的影响,相关的光环境参数包括照度、色温、色彩等。光源颜色的变化会导致人们对热环境心理感知上的差异。Bennett 和 Rey^[12]提出了著名的“Hue-heat Hypothesis(色调热假说)”,即冷色调会让人感觉温度较低,而暖色调会让人感觉温度更高。照度的提升对主观光舒适的改善是有利的,但无节制的增大照度意义不大,工作面的平均照度在 300 lx 或 400 lx 以下即可以使人感到舒适^[13]。相关标准如 GB 9673-1996 和 HB6491-91 中对飞机内照明提出了照度要求,见表 3。

表 3 相关标准中飞机客舱照度要求^[6,14]

单位:美元	
标准	照度要求
HB6491-91	乘客通道(地板上):最小 2 lx;最大 50 lx 乘客舱一般照明:最小 10 lx(地板上);最大 200 lx(地板上方 1.2 m) 空勤舱一般照明:最小 10 lx(地板上);最大 200 lx(地板上方 0.6 m)
GB 9673-1996	飞机客舱 ≥ 100 lx

2 运营中民用飞机舱室环境参数实测研究

2.1 运营中民用飞机舱室环境参数实测研究现状

研究人员自上世纪 90 年代开始了民用飞机舱室环境实测研究,早期研究的环境参数主要为热环境参数和以 CO₂ 为代表的气态污染物^[15-17]。自 2010 年起,国内外学者对座舱环境参数进行了更加细致的测试研究。2010 年,周翔^[18]在 8 架次航班上进行实测,在此次座舱污染物浓度测试中测量的污染物种类更加广泛,测试的污染物包括了 CO₂、CO、SO₂、NO₂、O₃、NH₃、总挥发性有机化合物(total volatile organic compounds,简称 TVOC)、甲醛和微生物。

2012 年,在美国联邦航空管理局的支持下,Spengler 等人^[19]对 83 架次航班上的客舱环境进行了检测,监测的空气品质参数包括 CO、CO₂、微粒、O₃、VOC、半挥发性有机化合物(semi-volatile organic compounds,简称 S-VOC)、羰基化合物和磷酸三甲苯酯。研究指出除了低压、偶尔高臭氧浓度、极度干燥的空气和可能稍高的噪声水平外,大多数商用飞

机客舱的空气质量 and 环境状况与办公室、学校和住宅的情况相当或更好。

2014 至 2016 年期间,清华大学在 973 计划的支持下开展了多次舱室环境参数实测研究^[20-21]。清华大学关军等人^[22-23]在清华-波音公司联合研究中心的支持下对 107 次商用飞机航班上的 VOC 种类和水平进行测试,107 架次航班总共检测出 346 种 VOC,并且提出了包含有 29 种高检测率化合物的清单作为座舱 VOC 目标检测物。

2015 年,Giaconia 等人^[24]对 14 架次 A319 中的辐射温度、空气温度和相对湿度进行了测量,并由此计算出从起飞到着陆的过程中预计平均投票(predicted mean vote,简称 PMV)的范围为 -0.16 ~ 0.90,预计不满意百分比(predicted percentage of dissatisfied,简称 PPD)的范围为 5.0% ~ 22.1%。

2016 年,尹英娟^[25]对 10 架次波音 737 客机上的空气温度、相对湿度、辐射温度、压力和 CO₂ 浓度进行了测量。研究发现:座舱内相对湿度、压力和 CO₂ 浓度变化趋势类似,均是飞机起飞时迅速下降,巡航过程中维持在较低水平,着陆时逐渐上升。

2021 年,清华大学、天津大学、中国商飞及波音合作,对 8 种机型共计 56 架航班(包括短途和长途航班)的羰基化合物(C1~C6)和其他挥发性有机物(C6~C16)进行了实测研究^[26]。

2021 年,清华大学、天津大学、中国商飞及普渡大学合作,在 2017 至 2019 年对不同航班类型的 CO₂ 浓度进行测量,发现巡航阶段的 CO₂ 浓度最低,单双通道机型差别不大,随着通风率的提高,30 年内的 CO₂ 浓度呈缓慢下降趋势^[27]。

2022 年,Lee 等人^[28]对主流宽体客机的 A 声级和 C 声级噪声进行了实测。测试结果表明空客 A380-800 的声压级在所选机型中最低,而空客 A350-900 的舱内声压级值最高;飞机之间的分贝水平差异很小,差异在 3 dB 以内。该研究证明了低频噪声的显著存在,且在机舱噪声评价体系中应引入低高频噪声分析。

2022 年,清华大学、天津大学等多所高校合作,调查了总共 46 个航班的 VOCs 浓度、空气温度、相对湿度和 CO₂ 浓度,其中包括 26 个中国国内航班和 20 个国际航班。VOCs 中二甲苯与眼睛、鼻子和喉咙刺激显著相关,因此,机舱中的挥发性有机物,特别是二甲苯和醛类,可能会影响乘客感知的室内空气质量和投诉^[29]。

2.2 运营中民用飞机舱室环境参数实测结果分析 上述研究的具体测试结果按照热环境参数、空气品质参数、声环境参数和光环境参数进行了梳理,具体见表4、表5和表6。

表4 运营中飞机座舱内热环境参数测试结果

文献	机型	温度/°C	相对湿度/%	风速/m s ⁻¹	巡航压力/kPa
2010 周翔 ^[18]	波音 737/747/777 A320/330	冬季平均:26.3 过渡季平均:25.7 夏季平均:25.5	平均:16 最小/最大:12/23	最小/最大: 0.07/0.15	平均:84.5
2012 Spengler ^[19]	波音 737(-300,700,800) 波音 747/767/777 A340/A380	平均:24±2.0 最小/最大:19/31	平均:11±5 最小/最大:1.7/41	/	平均:80±2.8 最低/最高:76/88.5
2014 崔惟霖 ^[20]	波音 737	平均:24.6~28.7	平均:12.5~31.7 最低:10.4~24.4	平均:0.08~0.17	最低/最高:76.2/88.0
2015 Giaconia ^[24]	A319	平均:23.1~25.0	平均:17.9~27.0 最低:8.7~19.1	/	/
2016 崔惟霖 ^[21]	波音 737/A320	夏季平均:24.6~28.5 过渡季平均:23.0~26.6 冬季平均:24.1~27.2	夏季平均:19.1~27.3 过渡季平均:15.7~20.8 冬季平均:15.4~23.0	/	夏季平均:77.4~83.6 过渡季平均:76.3~88.0 冬季平均:78.0~82.7
2016 尹英娟 ^[25]	波音 737	平均:23~28	平均:15.4~20.8	/	/
2021 YU Nu ^[30]	/	平均:27.4	平均:31.7%	/	92.4
2022 LOU Xinyuan ^[29]	A320/A330/A350/波音 787/波音 777 E190/A320/A330/波音 737	平均:21~31 (国内航班,26.4; 国际航班,24.3)	国际航班平均:10%~35% 国内航班平均:10%~40%	/	/

表5 运营中飞机座舱内污染物测试结果

文献	机型	CO ₂ /ppm	CO/ppm	O ₃ /ppb	VOC/ppb	甲醛
2010 周翔 ^[18]	波音 737/747/777 A320/330	平均:1 591 最小/最大:1 159 ~ 2 267	平均:0	平均:0 ppm	平均:45 最小/最大:0/226	最小/最大: 0.03/0.05 ppm
2012 Spengler ^[19]	波音 737/747/767/777 A340/380	平均:1 404 ± 297 最小/最大:863/2 056	/	平均:16 ± 18 最小/最大: 0/116	/	平均:1.8~2.7 ppb
2014 崔惟霖 ^[20]	波音 737	平均:767~1 981	/	/	/	/
2016 崔惟霖 ^[21]	波音 737/A320	夏季:711.3~987.5 过渡季:887.8~1 326.9 冬季:784.8~1 243.5	/	/	/	/
2016 尹英娟 ^[25]	波音 737	平均:500~2 200	/	/	/	/
2021 YIN Yihui ^[26]	A320/A330/A350/ 波音 737/747/777/787/ E190	/	/	/	VOC(C1~C6)平均浓度:0.3~8.3 μg/m ³ VOC(C6~C16)平均浓度:0~10 μg/m ³	0~20 μg/m ³ (巡航)
2021 HE Junzhou ^[27]	A320/A321/波音 737/ A350/A330/波音 777/波音 787	巡航平均:1 253±164	/	/	/	/

表5(续)

文献	机型	CO ₂ /ppm	CO/ppm	O ₃ /ppb	VOC/ppb	甲醛
2021 YU Nu ^[30]	/	平均:1 440±111	最大值: 1.2	/	/	/
2022 LOU Xinyuan ^[29]	A320/A330/A350 波音 737/777/787 E190	国内航班平均:1 310 国际航班平均:983	/	/	/	/

表 6 运营中舱室噪声水平、照度实测结果

文 献	机 型	A 声级噪声/dB(A)	C 声级噪声/dB(C)	照度/lx
2010 周翔 ^[18]	波音 737/747/777 A320/A330	最小/最大:71.5/80 平均:75.4	/	/
	波音 737-300	75.7	/	
	波音 737-700	75.8	/	
2012 Spengler ^[19]	A380	67.9	/	/
	波音 747	74.2	/	
	波音 767	71.9	/	
	波音 777	75.5	/	
2014 崔惟霖 ^[20]	波音 737	平均:70~80	/	平均:72~425
	A330-300ER	巡航阶段平均:71.3	巡航阶段平均:85.6	/
	A350-900	巡航阶段平均:74.9	巡航阶段平均:87.9	/
2022 Lee ^[28]	A380-800	巡航阶段平均:69.5	巡航阶段平均:83.7	/
	波音 777-200ER	巡航阶段平均:73	巡航阶段平均:86.5	/
	波音 777-300ER	巡航阶段平均:74.1	巡航阶段平均:86.7	/
	波音 787-900	巡航阶段平均:72.7	巡航阶段平均:86.9	/

表 4 为座舱内热环境参数测试结果。由表 4 可见:座舱平均温度分布范围为 20~31 ℃,分布范围较广,不同测试结果具有较大差异。与 ASHRAE161-2013^[5]定义的舱室温控范围 18.3~23.9 ℃相比,大部分测试结果中的平均温度均超出该范围。座舱内的相对湿度较低,大部分实测得到的平均相对湿度均低于 40%,最低相对湿度仅为 1.7%,国内航班的平均相对湿度较国际航班高;大部分飞机座舱内的相对湿度低于 GB 9673-1996《公共交通工具卫生标准》^[6]中规定的相对湿度范围:60% ≥ 相对湿度 ≥ 40%;座舱内的平均风速均低于 0.2 m/s;座舱内的巡航压力范围均满足适航条款的规定,即在正常操作条件下最低舱内压力不应低于 75.3 kPa。

表 5 为座舱内污染物测试结果。由表 5 可见,舱室内的 CO₂ 浓度测试最为广泛,测试的 CO₂ 浓度满足适航条款规定的限制 5 000 ppm,大部分测得的平均 CO₂ 浓度低于 2 000 ppm,即满足 EN 4618-

2009 中提供的健康舒适限值;其余污染物如 CO、O₃、甲醛等浓度相比标准限值低。

表 6 为舱室噪声水平、照度实测结果。由表 6 可见,大部分座舱内的噪声水平均低于 80 dB(A),基本满足 GB 9673-1996^[6]规定的 80 dB(A)限值。近年来对座舱内照度的实测研究较少,实测数据反映客舱内平均照度变化较大,其主要原因是乘客在航行过程中因为休息而把舷窗的挡光板拉下挡光,或乘务员为避免打扰乘客休息而调低壁灯光照造成的。

3 运营中民用飞机舱室舒适性主观评价研究

为乘客和乘务人员营造健康舒适的座舱环境是座舱舒适性研究的目标,乘客和乘务人员在真实飞行过程中的舒适感,以及对座舱环境的主观评价是获得座舱舒适性关键影响因素的主要来源之一。主观问卷主要收集乘客、机组人员对机舱微环境的

主观评价,包括对热环境、声环境等参数的感知及不适症状等。

2010年,周翔^[18]对8架次国内航班的乘客进行了问卷调查,了解他们对座舱环境热感觉、总体满意度、不适感等主观评价。乘客对座舱环境的整体满意度接近“刚好满意”,距离“满意”仍有差距。此外,乘客反映的不适症状中,“乏力、头疼、无精神”的比例最大,其次为“眼睛干燥、发痒、流泪”。噪声是最影响总体满意度的环境因素,其余依次为空气品质、温度、压力、湿度、振动,而风速和光线无影响,如图1所示。

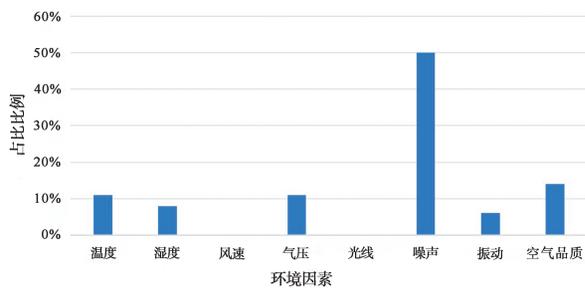


图1 最影响座舱总体满意度因素的占比^[18]

2014年,崔惟霖等人^[20]在14架次波音737中调查了乘客对热环境参数、噪声、振动、座椅舒适度、空气品质以及整体环境的评价。乘客对座舱环境较为满意,空气品质、噪声、振动、座椅舒适性对总体满意度影响最大,压力、气流、温度影响稍弱,但是湿度影响不显著,可能原因是人体对湿度变化不敏感,且国内航班飞行时间较短。

以往研究均主要关注乘客的舒适性和满意度,很少关注乘务人员的健康和舒适度。尹英娟^[25]在10架次波音737客机上对乘客和乘务人员均开展了舒适性问卷调查。对于乘客,噪声是影响整体满意度最重要的环境因素,其次为座椅舒适度、空气品质、振动、温度、压力、湿度、风速和照明。乘务人员对座舱环境的评分值明显低于乘客(见图2),其中乘务人员对相对湿度和空气品质的评分值显著低于乘客。乘务人员普遍抱怨座舱内空气湿度太低,问卷的建议一栏中,多数乘务人员提出希望能加大座舱内空气湿度,提高座椅舒适度和柔软性等建议。

国内与国际航班上乘客的乘坐体验和主观评价也会有差异。2017年,吴丹等人^[31]在34个国际航班和103个国内航班上进行了问卷调查。乘客对

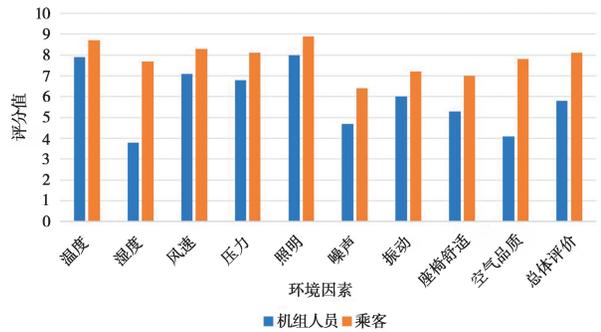


图2 机组人员和乘客对环境的主观评价^[25]

总体环境比较满意,其中最影响整体满意环境因素的占比如图3所示,与图1一致,噪声均是最不利因素,风速光线的影响最小。此外,研究显示乘客对空客座舱环境的整体满意度均优于波音,但是乘客在波音飞机中感受到的湿度舒适性要优于空客飞机。乘客对国内和国际航线的总体满意度基本一致,国内航线在照明、空气品质、冷热感受方面的满意度明显高于国际航线,这可能是由于国际航班飞行时间较长且活动空间狭小造成了不舒适感。噪声仍为国内外航线的主要不满意因素。

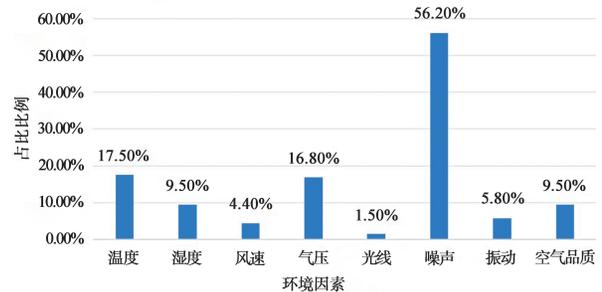


图3 最影响座舱总体满意度因素的占比^[31]

4 结论

本文从飞机舱室环境影响因素架构、运营中飞机舱室实测环境参数、舒适性主观评价三方面对民用飞机座舱舒适性影响因素进行了研究,结果如下:

1) 环境温湿度、气流、噪声等重要参数在适航类标准中无具体要求;而其他针对座舱环境参数的标准之间存在较多不一致性,且现有标准未直接体现出飞机座舱驾乘舒适性。

2) 飞机实测的环境参数中座舱压力、噪声、常见气态污染物满足相关标准要求,平均座舱温度和相对湿度明显超出相关标准的控制要求,但是乘客对温度和相对湿度的评价都较为满意,对噪声最不

满意,对空气品质的满意度也较低。其主要原因是人体对温湿度的耐受能力较强,可以通过人体热调节或其他自调节行为如开闭个性化送风、增减衣物等方式改善热舒适性;另一方面,飞行时间短也会导致人体对低湿环境暴露不敏感,从而导致湿度对乘客的主观评价影响不显著。

3) 不同的问卷调查研究结果略有差异,但乘客对座舱环境的整体满意度均为“较为满意”,座舱环境舒适性仍有提升的空间和提升的必要性;且均显示噪声是影响乘客整体满意度的最不利因素,风速和光线的影响最小。

4) 目前对机组人员舒适性的关注度较小,相关研究较少。对于机组人员,相对湿度是最不适的环境因素,其次为空气品质,然后是噪声,这与乘客的主观评价结果具有较大差异。

参考文献:

- [1] 袁领双,庞丽萍,王浚. 大型客机座舱舒适性发展分析[J]. 航空制造技术, 2011(13):64-67.
- [2] Federal Aviation Regulations. Airworthiness standards: transport category airplanes: FAR Part 25[S]. U. S. : Federal Aviation Regulations,2016.
- [3] European Aviation Safety Agency. Certification specification and acceptable means of compliance for large aeroplanes: CS-25[S]. European; EASA,2020.
- [4] 中国民用航空局. 中国民用航空规章 第 25 部:运输类飞机适航标准: CCAR-25-R4[S]. 中国:中国民用航空局,2011.
- [5] ASHRAE. Air quality within commercial aircraft: ANSI/ASHRAE Standard 161-2013[S]. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc. , 2013.
- [6] 国家技术监督局. 公共交通工具卫生标准:GB9673-1996[S]. 北京,中国标准出版社,2005.
- [7] 陆义,裴晶晶,韩旭,等. 客机座舱气态污染物及其净化技术现状[J]. 暖通空调, 2014,44(7):1-8.
- [8] 刘小强,王彪明. 某型发动机燃油喷嘴渗漏导致飞机座舱引气污染故障研究[J]. 航空维修与工程, 2020(12):100-102.
- [9] 杨建忠,王振斌,陈希远. 飞机座舱内呼吸性污染物浓度分布实验研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(30):361-364.
- [10] The Aerospace and Defence Industries Association of Europe-Standardization. Aerospace series-aircraft internal air quality standards, criteria and determination methods:BS EN 4618: 2009 [S]. UK:British Standards Institution, 2009.
- [11] 陈玲,夏语. 民用飞机舱内噪声标准及控制方法综述[J]. 科技视界, 2015(27):130,244.
- [12] Bennett C A, Rey P. What's so hot about red? [J]. Human Factors, 1972, 14(2):149-54.
- [13] 辛淞,胡松涛,刘国丹. 基于主观评价和生理脑电的光舒适评价研究[J]. 青岛理工大学学报, 2020,41(1):75-80,106.
- [14] 中华人民共和国航空航天工业部. 飞机内部照明设备通用要求:HB 6491-1991[S]. [S.l. :s. n.],1991.
- [15] HAGHIGHAT F, ALLARD F, MEGRI A C, et al. Measurement of thermal comfort and indoor air quality aboard 43 flights on commercial airlines[J]. Indoor and Built Environment, 1999, 8(1):58-66.
- [16] 梁朝晖,孙文平,冯超宇. 10架 A320 客机客舱微小气候卫生状况调查分析[J]. 广东卫生防疫, 1999(2):74-76.
- [17] LEE S C, POON C S, LI X D, et al. Indoor air quality investigation on commercial aircraft [J]. Indoor air, 1999, 9(3):180-187.
- [18] 周翔. 大型客运飞机舱内热环境及污染物关键参数设计范围的界定研究[D]. 上海:同济大学, 2010.
- [19] SPENGLER J D, VALLARINO J, MCNEELY E, et al. In-flight/onboard monitoring: ACER's component for ASHRAE 1262, Part 2:RITE-ACER-CoE-2012-6[R]. National Air Transportation Center of Excellence for Research in the Intermodal Transport Environment(RITE), 2012.
- [20] 崔惟霖,欧阳沁,鲍东旭,等. 国内大型客机座舱环境测试及乘客舒适性调查[J]. 暖通空调, 2014, 44(10):57-61.
- [21] 崔惟霖. 大型客机座舱热舒适的影响因素及评价方法研究[D]. 北京:清华大学, 2016.
- [22] GUAN J, GAO K, WANG C, et al. Measurements of volatile organic compounds in aircraft cabins: part I: methodology and detected VOC species in 107 commercial flights[J]. Building and Environment, 2014, 72:154-161.
- [23] GUAN J, WANG C, GAO K, et al. Measurements of volatile organic compounds in aircraft cabins: part II: target list, concentration levels and possible influencing factors [J]. Building and Environment, 2014, 75:170-175.
- [24] GIACONIA C, ORIOLI A, DI GANGI A. A correlation linking the predicted mean vote and the mean thermal vote based on an investigation on the human thermal comfort in short-haul domestic flights[J]. Applied Ergo-

- nomics, 2015, 48:202-213.
- [25] 尹英娟. 民航客舱环境舒适性的实测与分析研究[D]. 青岛:青岛理工大学, 2016.
- [26] YIN Y H, HE J Z, PEI J J, et al. Influencing factors of carbonyl compounds and other VOCs in commercial airliner cabins; on-board investigation of 56 flights[J]. Indoor Air, 2021, 31(6): 2084-2098.
- [27] HE J Z, YIN Y H, YANG X D, et al. Carbon dioxide in passenger cabins: spatial temporal characteristics and 30-year trends[J]. Indoor air, 2021, 31(6): 2200-2212.
- [28] LEE H P, KUMAR S, GARG S, et al. Assessment of in-cabin noise of wide-body aircrafts [J]. Applied Acoustics, 2022, 194: 108809.
- [29] LOU X Y, SUN Y X, LV D C, et al. A study on human perception in aircraft cabins and its association with volatile organic compounds[J]. Building and Environment, 2022, 219: 109167.
- [30] YU N, ZHANG Y, ZHANG M Y, et al. Thermal condition and air quality investigation in commercial airliner cabins[J]. Sustainability, 2021, 13(13): 1-15.
- [31] 吴丹,肖晓劲,杨智,等. 民用飞机客舱舒适度调查与分析[J]. 民用飞机设计与研究,2017(1):110-113.

作者简介

周琼瑶 女,硕士,工程师。主要研究方向:民用飞机舱室综合环境设计与验证。E-mail: zhouqiongyao@comac. cc

张晗冰 女,硕士,工程师。主要研究方向:民用飞机舱室综合环境设计与验证。E-mail: zhanghanbing@comac. cc

A review of factors influencing the comfort of civil aircraft cabins

ZHOU Qiongyao^{1,2*} ZHANG Hanbing^{1,2}

- (1. Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China;
2. State Key Laboratory of Airliner Integration Technology and Flight Simulation, Shanghai 201210, China)

Abstract: With the development of aircraft technology and the improvement of living standards, airplanes have gradually become one of the mainstream modes of transportation, and the comfort of the cabin environment has also been gradually valued. This article mainly focuses on the factors influencing the comfort of civil aircraft cabins. Through literature research, the main environmental parameter requirements of aircraft cabins, measured cabin environmental parameters during aircraft operation, and subjective evaluation of comfort are studied and analyzed. Research has found that there is significant inconsistency between standards for cabin environmental parameters, and existing standards do not directly reflect the aircraft cabin comfort. By analyzing the measured parameters and indicator requirements of the aircraft, as well as subjective evaluation values, it is found that the overall evaluation of the cabin environment is ‘relatively satisfactory’, and there is still a distance from ‘satisfactory’, indicating that there is still room and necessity for improvement in the cabin environment. For passengers, there are slight differences in the results of different questionnaire surveys, but all show that noise is the most unfavorable factor affecting overall passenger satisfaction, with wind speed and light having the least impact, while air pressure, air quality, and temperature still have some influence. For the crew, relative humidity is the most unfavorable environmental factor, followed by air quality and noise, but there is currently less research on the comfort of the crew. The results of this study can provide reference for the development direction of aircraft comfort optimization and improvement technology.

Keywords: aircraft cabin environment; in operation; comfort; subjective evaluation; influence factor

* Corresponding author. E-mail: zhouqiongyao@comac. cc