

民用飞机座舱空气分配 优化设计与试验验证

Optimization Design and Experimental Validation for Cabin Air Distribution of Civil Aircraft

汪光文 吴成云 杨 智 李革萍 辛旭东 / Wang Guangwen Wu Chengyun Yang Zhi Li Geping Xin Xudong
(上海飞机设计研究院,上海 201210)
(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

摘 要:

以仿真分析和试验试飞为手段,对某型客机空气分配进行优化设计。首先建立飞机座舱热载荷动态仿真模型,分析飞机驾驶舱及客舱新的供气需求;其次根据飞机空气分配管路实际构型建立 Flowmaster 仿真模型,并基于模型调节管路构型,以调整各舱室空气分配流量,实现驾驶舱和客舱的流量需求;最后将优化设计应用于民用飞机空气分配系统中,仿真分析和试验试飞验证结果吻合较好,说明了仿真技术手段的合理性。

关键词:民用飞机;空气分配;仿真计算;试验验证;Flowmaster

中图分类号:V245.3⁺44

文献标识码:A

[Abstract] In this paper, simulation analysis and experimental validation are applied for indicating air distribution configuration complied with the requirements. Firstly, the cabin/cockpit heat load dynamic model is set up and air supply requirement is analyzed. Secondly, to fulfill the target of air supply, Flowmaster model for one civil aircraft air distribution system is built and quantity of supplied air is adjusted based on the model. Lastly, ground/flight test is performed to validate simulation result similar with test result, and the air supplied to the cabin and cockpit meets the requirement of air worthiness standard and high level requirement. This attempt is the trial of civil aircraft air conditioning system distribution development and research, and the methods adopted are effectively enhancing the civil aircraft independent research capability.

[Key words] civil aircraft; air distribution; simulation; experimental validation; flowmaster

0 引言

随着民航运输业的快速发展,飞机座舱环境的舒适性受到广泛关注,与座舱舒适性密切相关的空调系统设计至关重要。国内外对飞机座舱流场环境仿真与试验研究^[1-3]、座舱空气品质仿真与试验^[4-5]、空调系统动态性能与试验^[6-8]研究较多,但对于空气分配管流仿真和试验方面研究较少。

民用飞机空气分配系统是空调系统的一部分,包括驾驶舱空气分配管路、客舱空气分配管路和再循环空气管路。它的功能在于将混合腔、配平系统及座舱再循环空气混合成温度、压力适宜的空气,

按设计需求将空气分配到驾驶舱、客舱、厨房及盥洗室,对座舱局部热环境有直接影响。

本文根据某客机座舱空气分配系统构型(原始构型),基于 Flowmaster 仿真平台建立该构型的仿真模型,通过仿真计算对驾驶舱与客舱空气流量进行评估,并通过试验方法验证仿真计算结果,从而表明优化设计构型对适航条款和设计需求的符合性。

1 优化设计需求

1.1 通风与温度要求

适航条款 25.831(a)规定^[9]:在正常操作情况和任何系统发生可能的失效而对通风产生有害影

响条件下,通风系统都必须能能够提供足够量的未被污染的空气,使得机组成员能够完成其职责而不致过度不适或疲劳,并且向旅客提供合理的舒适性。通常情况下通风系统至少应能向每一乘员提供 0.55 lb/min 的新鲜空气。

因此,在正常巡航状态下,空调系统提供给驾驶舱乘员的新鲜空气量应不小于 10ft³/min,当空调系统仅单侧制冷组件工作时的最低新鲜空气量应不低于 0.4lb/min。

为保证民用飞机座舱环境舒适性和航空公司运营的经济性,当前市场主流飞机的顶层设计规范和航空标准对座舱温度设计提出了严格的要求^[10],其中要求最高的一条为地面快速冷却能力,即地面热天状态下(气象温度 40℃,舱内温度 46℃),座舱内无乘客,空调系统运行 30min 后,能将座舱温度降低至 27℃ 并保持稳定。

1.2 原始构型性能

原始构型能满足座舱的通风要求,但驾驶舱温度不能满足地面快速冷却的“运行 30min 后,能将座舱温度降低至 27℃ 并保持温度”的要求(如图 1 所示)。这使得热天条件下,该客机的座舱环境温度舒适性较差。因此,有必要优化改进空气分配设计。

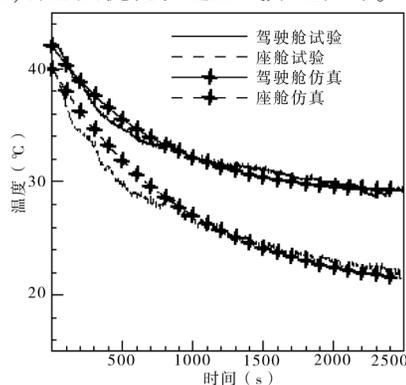


图 1 原始构型冷却试验与仿真

2 空气分配构型和优化方案

驾驶舱温度目标要求驾驶舱流量尽可能大,以提高驾驶舱内的冷却能力(目标一);而客舱新鲜空气量目标又要求客舱流量尽可能大,保证客舱内人均新鲜空气量满足适航条款(目标二)。通过新鲜空气量分析和座舱热载荷分析可知,合理增大驾驶舱主管和客舱主管供气流量分配比例(地面正常状态下驾驶舱主管总占比 14%~15%)可以实现满足座舱新鲜空气流量和座舱温度的双重要求。

根据典型支线客机的空调系统原理、空气分配系统的低压管路构型和空气流动情况,影响供气流量分配比例的主要因素有:(1)混合腔构型;(2)低压管路限流环尺寸;(3)驾驶舱主供气口格栅。综

合工程应用特点,更改低压管路限流环尺寸可操作性强,工作量相对小,易于实施。如图 2 所示。

具体优化设计过程描述如下:

(1)利用前期地面试验和单、双空调组件试飞结果校准仿真计算模型。

(2)利用验证的仿真计算方法调整限流环尺寸,得到满足目标一和目标二要求的驾驶舱流量分配方案,确定目标流量分配下的限流环尺寸。

(3)通过机上地面试验和飞行试验测试限流环构型更改后的实际座舱流量。

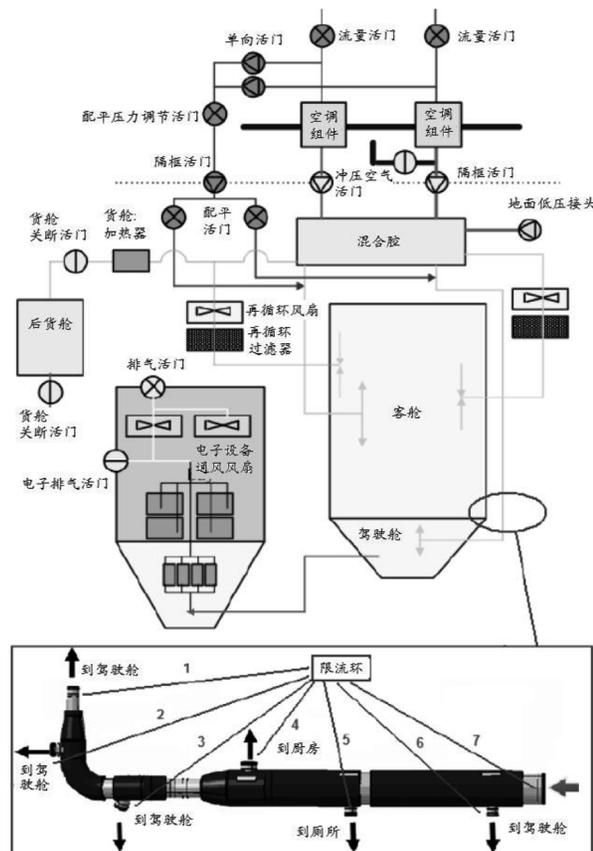


图 2 空调系统原理及驾驶舱管路限流环布置

3 仿真计算

采用 Flowmaster 软件建立空气分配系统仿真模型的关键在于设定模型的输入参数,对于圆管、弯管、缩放管路、分流管路、压力和流量源、限流环等部件,Flowmaster 软件已有多种数学模型供选择,且具备一定的工程数据支持。

但 Flowmaster 软件中没有混合腔和驾驶舱主供气格栅模型,因此需要通过三维 CFD 仿真获取该部件的流量压力曲线等重要特性,并根据 CFD 计算特性建立了一维 Flowmaster 混合腔和格栅模型,最后分别建立驾驶舱管路、客舱管路、混合腔、再循环管路的 Flowmaster 模型并进行联合仿真计算,如图 3~图 5 所示。

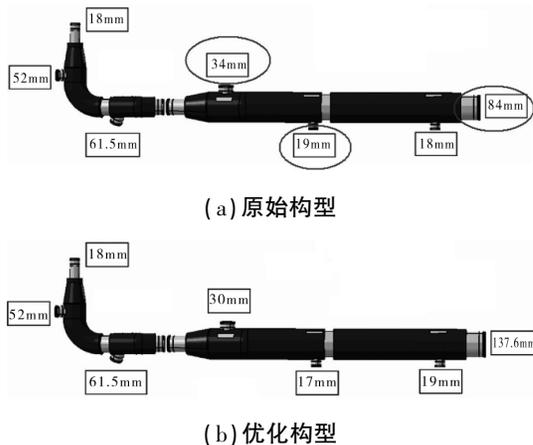


图6 原始构型与优化构型

管流量测试装置及再循环管路流量测试装置组成。

对比仿真计算与试验结果可知:(1)仿真结果与试验结果吻合较好;(2)空调系统正常工作状态下,优化构型所得驾驶舱主管流量基本均达到优化目标,如表1和表2所示。

表1 仿真计算与地面试验结果比对

Items	Duct	comparison	Cockpit%	Error
1	Initial	Simulation	13.59	0.7%
		Test	13.69	
2	Initial	Simulation	12.28	3.8%
		Test	12.76	
3	Initial	Simulation	12.76	0.8%
		Test	12.66	
4	Optimal	Simulation	15.03	3.2%
		Test	14.57	
5	Optimal	Simulation	13.97	0.6%
		Test	13.91	
6	Optimal	Simulation	15.22	0.2%
		Test	15.19	

表2 仿真计算与飞行试验结果比对

Items	Alt (ft) duct	comparison	Cockpit%	Error
1	9000, Initial	Simulation	11.50	5.5%
		Test	12.17	
2	26500, Initial	Simulation	10.63	3.9%
		Test	11.06	
3	36000, Initial	Simulation	11.02	0.36%
		Test	11.06	
4	13000, Optimal	Simulation	14.93	2.2%
		Test	14.61	
5	13000, Optimal	Simulation	15.36	4.5%
		Test	14.70	
6	20000, Optimal	Simulation	14.53	0.5%
		Test	14.60	

同时,地面冷却试验表明优化构型满足座舱新鲜空气流量要求和驾驶舱温度要求(其中 Cockpit%表示驾驶舱主管流量与总流量之比)。

5 结论

本文利用仿真计算方法对客机空气分配系统进行了优化设计,并采用地面试验和飞行试验对仿真算例进行验证,得出如下结论:

(1)本文仿真计算结果与试验结果吻合较好,说明所应用的座舱热载荷模型、空气分配系统模型能较准确地预测空调系统性能。

(2)提高驾驶舱的冷却能力的优化使得驾驶舱新鲜空气供气量略有增加,客舱新鲜空气供气量略有减少,但是仍然满足 CCAR 25.831(a)的规定。

(3)本文经过验证的仿真计算模型,可用于民用飞机后续机型的空气分配系统方案权衡、性能预测等。

参考文献:

- [1]Zhang, T., Li, P., Wang, S. A personal air distribution system with air terminals embedded in chair armrests on commercial airplanes[J]. Building and Environment,2012,47(1): 89-99.
- [2]Zitek P, Vyhlídal T, Simeunovi G. Novel personalized and humidified air supply for airliner passengers[J]. Building and Environment 2010,45(11):2345-2353.
- [3]Mo H, Hosni M, Jones B. Application of particle image velocimetry for the measurement of the airflow characteristics in an aircraft cabin[J]. ASHRAE Transactions, 2003, 109(2): 101-110.
- [4]Zhang, T., Lin, C. H., Chen, Q. Optimal sensor placement for airborne contaminant detection in an aircraft cabin[J]. HVAC&R Research,2007,13(5):683-696.
- [5]Nagda, N. L., Hodgson, M. Low relative humidity and aircraft cabin air quality[J]. Indoor Air,2001,11:200-214.
- [6]C. Müller, D. Scholz, T. Giese. Dynamic Simulation of Innovative Aircraft Air Conditioning. CEAS-2007-466.
- [7]邹斌,等. 飞机环境控制系统计算机仿真模型库的开发[J]. 计算机仿真,2006,23(3):19-23.
- [8]姚洪伟,等. 飞机环控系统建模与换热器参数优化研究[J]. 系统仿真学报,2005,17(12):3040-3042.
- [9]刘剑锋,等. CCAR-25-R3 运输类飞机适航标准[S]. 2001.05.
- [10]SAE-ARP85E. Air Conditioning Systems for Subsonic Airplanes[S]. 2006.06.