

民机冲压空气系统流动特性仿真研究

杨艺菲* 王 贇 杨胜华 刘 超

(上海飞机设计研究院,上海 201210)

摘 要: 民机冲压空气系统通过机身蒙皮开口引入外界空气为飞机空调系统、辅助冷却系统和惰化系统提供合适压力与流量的冷源,其性能的优劣影响飞机的经济性与舒适性。冲压空气系统包括了进排气口、换热器、风扇和管路等部件,其内部的复杂流动特性决定了冷源流量在各个用户系统中的分配。为了在冲压空气系统的设计过程中根据各用户系统的需求完成合适的流量分配,需要通过冲压空气系统流动特性的三维仿真计算来获得。针对冲压空气同时受到机外环境和内部部件影响的特点,建立了机外远场和内部各部件仿真计算模型,通过 CFD 方法实现了冲压空气系统内部三维流动趋势的计算,获得了冲压空气系统流量分配结果和流道内的压力分布,为冲压空气系统的整体设计提供了参考。

关键词: 冲压空气;流动特性;数值仿真;流量分配

中图分类号: V211.4

文献标识码: A

OSID: 

0 引言

冲压空气系统是民用飞机的重要组成部分,其功能是为飞机空调系统、辅助冷却系统和惰化系统提供廉价冷源空气,保障飞机座舱温度调节、厨房餐车冷却、燃油箱防爆等功能的正常运行^[1-2]。随着民用飞机载客能力的不断提高,飞机体积及内部各系统越来越庞大,所包括的辐射面积、人员和设备发热量持续提升,导致冲压空气系统重量、尺寸也越来越大^[3]。这不但会占据飞机宝贵的安装空间、增大飞机燃油损耗,同时冲压空气蒙皮开口尺寸增大也会进一步增加飞机的气动阻力,降低飞机运营的经济性。可见,舒适性要求和经济性要求之间的矛盾已成为民用飞机冲压空气系统设计的重大挑战。目前民机多采用集成式设计技术,将冲压空气的各用户集成在一套流道中,实现能源综合利用。为了保障各系统的正常运行且进一步降低飞机能耗,需要针对冲压空气系统气动特性进行仿真研究,获得冷源空气在流道内的分配特性与流阻特性。

现有国内外针对冲压空气系统的研究主要有对于包括冲压空气在内的飞机空调系统的性能仿真计算和对于冲压空气进气口的模拟与试验研究。在已有飞机空调系统的性能仿真计算研究中, Júnior^[4]通过建立飞机空调系统空气循环机的仿真计算模型,获得了各项影响因素(马赫数、座舱高度、座舱温度等)对于空气循环机性能的关系;姚洪伟和王浚^[5]建立了飞机环控系统换热器参数优化模型,得到了包括冲压空气在内的环控系统整体性能变化规律。在已有冲压空气进气口的相关研究中,杨爱玲等人^[6]采用二维 N-S 方程对冲压空气埋入式进气口的性能进行了数值模拟;张田野等人^[7]针对加装引射器的冲压空气进气口进行了流场数值模拟,研究获得了飞行马赫数和冲压空气进气口质量流量之间的关系;Sun Shu 等^[8]通过风洞试验对冲压空气进气口的关键特征参数进行了研究,获得了各参数对冲压空气进气口总压恢复系数等的影响结果;孙姝等人^[9]通过研究得到了冲压空气进气口工作性能的试验数据,并通过模拟方法分析得到了冲压空气进气

* 通信作者。 E-mail: yangyifei1@comac.cc

引用格式: 杨艺菲,王贇,杨胜华,等. 民机冲压空气系统流动特性仿真研究[J]. 民用飞机设计与研究,2022(3):56-60. YANG Y F, WANG Y, YANG S H, et al. Simulation study on flow characteristics of ram air system for civil aircraft[J]. Civil Aircraft Design and Research,2022(3):56-60(in Chinese).

口的气体流动状态。

本文为了获得冲压空气系统的整体性能,通过建立冲压空气系统内部件计算模型,研究冲压空气全流道气动特性,为后续民机冲压空气系统以及空调系统的设计提供理论支持。

1 冲压空气系统简介

冲压空气系统的作用是为空调系统、辅助冷却系统和空气准备系统提供冷源。空调系统中的初级换热器和次级换热器、辅助冷却系统中的换热器和空气准备系统中的初级换热器和次级换热器均布置于冲压空气流道中,需要通过具有低温度的冲压空气带走这些系统产生的热量,保障系统安全运行。对于某民用飞机,冲压空气系统的工作原理与运行工况有关,地面工况通过 ACM 风扇将机外空气吸入冲压空气管道并流经各用户系统换热器带走热量,空中工况通过飞机前进运动使机外空气进入冲压空气管道并流经各用户系统换热器带走热量,冲压空气系统架构如图 1 所示。

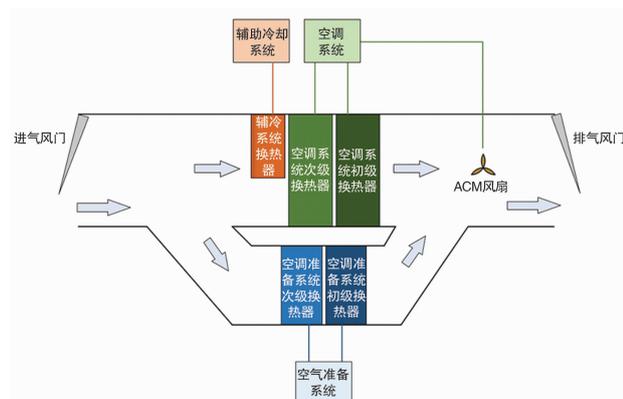


图 1 某飞机冲压空气系统架构示意图

2 仿真计算方法

2.1 几何模型前处理

冲压空气系统既受外界大气环境的直接影响,又受系统内部各子用户复杂部件的影响,因此在针对冲压空气内流道仿真过程中应同时考虑飞机内外流场的耦合作用。本文在几何模型前处理中分别针对飞机外流场和冲压空气内部流道和部件建立了几何模型,并完成了几何模型中细小碎面的修补,创建了同时具有飞机外部流场和冲压空气内部结构的计算域。其中整体飞机计算域如图 2 所示。

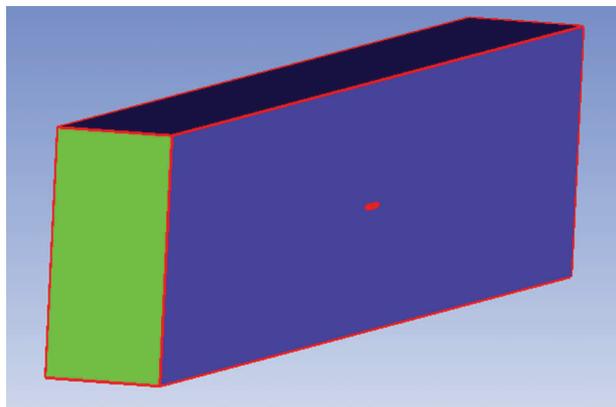


图 2 整体飞机计算域

冲压空气内部流道几何结构如图 3 所示。其中冲压空气内部流道除了管道件之外,还包括了换热器部件和风扇部件。

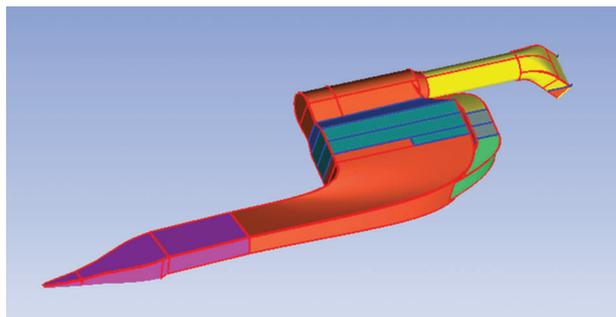


图 3 冲压空气内部流道几何结构

2.2 网格划分与边界条件设置

仿真计算采用结构网格和非结构网格相结合的方式,并对飞机外流场和冲压空气内部流道采用不同的网格尺度进行划分,网格数量总计约 684 万。

由于冲压空气全流道计算包括了飞机外流场和内流道部分,因此边界条件设置需要同时考虑这两方面的物理条件。具体计算边界条件如表 1 所示,计算工况如表 2 所示。

表 1 边界条件

| 边界名称 | 边界类型 |
|---------|--------|
| 飞机外流场入口 | 速度入口 |
| 各换热器 | 多孔介质边界 |
| 风扇 | 风扇边界 |
| 飞机外流场出口 | 压力出口 |

表 2 计算工况

| 序号 | 飞行阶段 | 飞行高度/ft | 飞行马赫数 |
|----|------|---------|-------|
| 1 | 地面 | 0 | 0.00 |
| 2 | 起飞 | 1 500 | 0.39 |
| 3 | 爬升 1 | 10 000 | 0.54 |
| 4 | 爬升 2 | 20 000 | 0.65 |
| 5 | 爬升 3 | 30 000 | 0.79 |
| 6 | 巡航 1 | 35 000 | 0.80 |
| 7 | 巡航 2 | 43 000 | 0.85 |
| 8 | 下降 1 | 30 000 | 0.96 |
| 9 | 下降 2 | 20 000 | 0.65 |
| 10 | 下降 3 | 10 000 | 0.54 |
| 11 | 降落 | 1 500 | 0.39 |
| 12 | 盘旋 | 20 000 | 0.50 |
| 13 | 应急 | 10 000 | 0.40 |

2.3 数值计算模型

冲压空气系统气动特性仿真计算只考虑气体流动过程,不考虑温度的耦合作用,因此计算模型采用的控制方程包括动量方程和连续性方程,如公式(1)和公式(2)所示^[10]。

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} + \rho f_i \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

式中: ρ 表示流体密度; P 为压力值; U 为速度; x 为坐标轴; f 表示单位质量力; i, j 表示空间坐标。

换热器由于结构形式复杂,仿真计算中采用多孔介质简化为阻力源的方式进行模拟,该多孔介质阻力动量源项可由公式(3)计算得出。

$$S_{H, i} = -\left(\frac{\mu}{\beta} v_i + C_2 \frac{1}{2} |v| v_i\right) \quad (3)$$

式中: $S_{H, i}$ 为换热器区域动量源项; v 为速度值; β 为渗透率; C_2 为惯性阻力系数; μ 表示动力粘度。

风扇的模拟计算直接采用模拟风扇域的方式实现,无需对风扇的旋转过程进行模拟,直接采用风扇等效面积和运动特性进行代替。风扇轴向、切向和径向的动量源分别可由公式(4)~公式(6)计算得出。

$$S_{F, a} = \Delta P(Q)/h \quad (4)$$

$$S_{F, t} = \begin{cases} \frac{2W_F r}{c_1 |\Omega_{\text{operating}}|} & \text{for } R_h < r \leq R_{ip} \\ \frac{2W_F R_{ip}^2}{c_1 r |\Omega_{\text{operating}}|} & \text{for } R_{ip} < r \leq R_t \end{cases} \quad (5)$$

$$S_{F, r} = \frac{\rho V_\phi^2}{r} \quad (6)$$

式中: $S_{F, a}$ 表示风扇轴向动量源项; $S_{F, t}$ 表示风扇切向动量源项; $S_{F, r}$ 表示风扇径向动量源项; $\Delta P(Q)$ 表示流量 Q 下的风扇压头; h 表示风扇叶片轴向掠过环面区域的厚度; W_F 表示风扇功率; r 表示风扇旋转轴长度; $\Omega_{\text{operating}}$ 表示风扇工作角速度; R_h 表示风扇外毂半径; R_{ip} 表示基于拐点比的风扇叶片上的点的半径; R_t 表示风扇叶尖半径; V_ϕ 表示当地切向速度。

3 计算结果与分析

3.1 空气流动压力分布结果

空中巡航状态下机身外表面压力分布如图所示,其中冲压空气内流道压力分布如图5所示。根据仿真计算结果可知,空中巡航状态下机身外部的机头以及机翼前端直接与来流高速气流接触,导致局部压力较高;冲压空气内流道部分高速气流流经换热器区域之后,压力明显下降,表明压力损失主要集中在换热器区域。地面状态下风扇处局部压力分布如图6所示。根据仿真结果可知,在地面状态下,风扇为驱动冲压空气流动的动力源,风扇区域的整

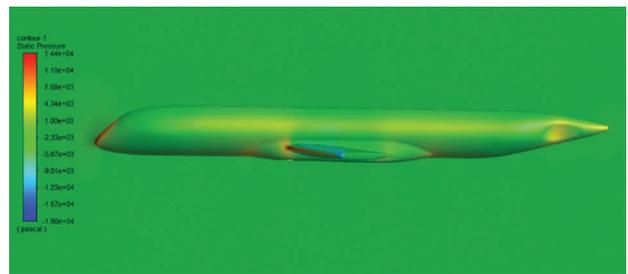


图 4 空中巡航状态下机身压力分布图

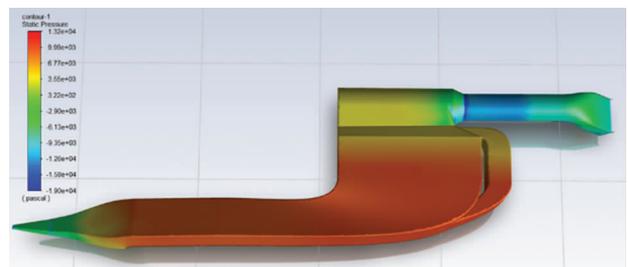


图 5 空中状态冲压空气内流道压力分布图

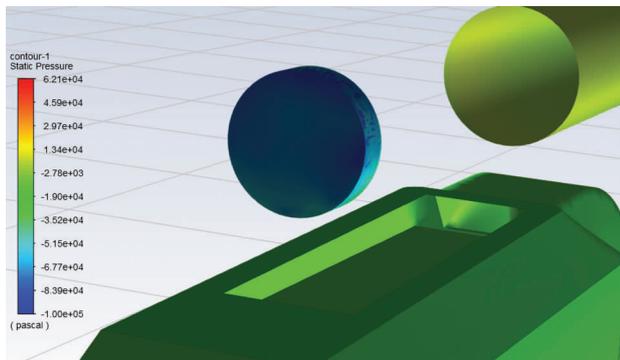


图6 地面状态下风扇处局部压力分布图

体压力分布均匀,冲压空气流经冲压腔内的风扇区域后,由于风扇的作用,空气压力有一定程度的上升。基于上述计算结果可以获得冲压空气通道内的压力分布,并计算得出整个冲压空气流道的阻力值,用于全机能耗评估。

3.2 流量分配仿真计算结果

不同飞行阶段下各换热器的流量分配结果如图7所示。由于空调系统初级和次级换热器同处一个流道且截面积相同,同时空气准备系统初级换热器和次级换热器也同处一个流道且截面积相同,因此空调系统初级换热器与次级换热器通过的流量一致,空气准备系统初级换热器与次级换热器通过的流量也一致。根据计算得出的流经不同换热器的冲压空气流量,对比各系统换热器散热量要求,可以得出目前冲压空气流道设计可以满足各用户系统的需求。

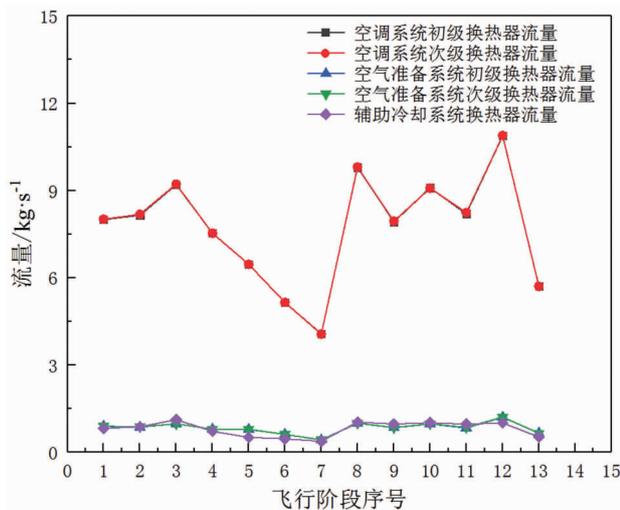


图7 不同飞行阶段下各换热器的流量分配结果

4 结论

1) 采用多孔介质模型等效替代了具有复杂几何结构的换热器部件,采用虚拟风扇域替代了实际风扇的动态运动特性。

2) 通过三维稳态数值模型针对冲压空气系统实现了全流道气动特性计算,考虑了机外空气流动和管道内空气流动的耦合作用。

3) 获得了空中和地面不同运行状态下冲压空气流动压力分布结果,以及不同飞行阶段下各换热器的流量分配结果。

参考文献:

- [1] 王赟,李志茂,裴后举,等. 民机冲压空气进气口设计研究进展[J]. 航空精密制造技术, 2020, 56(1): 31-35,39.
- [2] 汪光文. 基于仿真技术的空调系统冲压空气能耗研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2015(3): 16-19.
- [3] 寿荣中,何慧珊. 飞行器环境控制[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004: 50-58.
- [4] JUNIOR J, ANDRADE C, ZAPAROLI E. Numerical analysis of typical aircraft air conditioning air cycle machines[J]. 20th International Congress of Mechanical Engineering, 2009: 15-20.
- [5] 姚洪伟,王浚. 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.
- [6] 杨爱玲,郭荣伟. 二维埋入式进气道的数值分析[J]. 航空学报, 1999, 20(5): 450-454.
- [7] 张田野,孙智,孙建红,等. 冲压空气引射进气道流场数值模拟[J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51(4): 486-492.
- [8] SUN S, GUO R W. Numerical analysis and experimental validation of a submerged inlet on the plane surface[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2005, 18(3): 199-205.
- [9] 孙姝,郭荣伟,伍贻兆. 一种平面埋入式进气道的地面工作特性及流态特征[J]. 航空动力学报, 2007, 22(3): 390-395.
- [10] 约翰 D. 安德森. 计算流体力学基础及其应用[M]. 吴颂平,刘赵森,译. 北京: 机械工业出版社, 2007: 24-41.

作者简介

杨艺菲 女,博士,工程师。主要研究方向:冲压空气系统性能仿真及验证。E-mail: yangyifei1@comac.cc

王 贇 男,硕士,工程师。主要研究方向:冲压空气系统一体化集成设计及验证。E-mail: wangyun@comac.cc

杨胜华 男,博士,高级工程师。主要研究方向:系统仿真计算。E-mail: wangyun@comac.cc

刘 超 男,硕士,高级工程师。主要研究方向:环控系统综合性能设计与验证。E-mail: wangyun@comac.cc

Simulation study on flow characteristics of ram air system for civil aircraft

YANG Yifei * WANG Yun YANG Shenghua LIU Chao

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

Abstract: The ram air system of civil aircraft brings the environmental air through the inlet apparatus on the aircraft skin and applies the cool air with applicable pressure and air flow rate for air condition system, supplemental cooling system and auxiliary propulsion system, which affects the economic and comfortable performance of the aircraft. The ram air system consists of the inlet apparatus, the outlet apparatus, the heat exchangers and the fan and the ducts. The complex flow characteristics determine the cool air flow distribution for each user. In order to obtain the proper air flow distribution of ram air, the three-dimension simulation method needs to be established. Because the aircraft outside environment and the inside components were affect the performance of the ram air performance, the numerical models for outside part and inside part were established. CFD method was used to calculate the flow trend in the ram air channel, and the flow distribution results of the ram air system and static pressure distribution in the channel were obtained, which can provide an example for the global design of ram air system.

Keywords: ram air; flow characteristics; numerical simulation; flow distribution

* Corresponding author. E-mail: yangyifei1@comac.cc