

得系统参数匹配变得比较复杂。

在座舱制冷系统参数选择和性能计算过程中,传统的方法是干与湿热换热器分开考虑,对于三轮空气循环制冷系统等复杂的系统,一般包含多个热交换器,并处于不同的热力状态,在全系统参数匹配过程中需要重复判断热交换器的进出口空气是否饱和,并选择相应的热力计算方法,使计算过程变得复杂不准确。而焓参数匹配法利用焓代替温度作为系统各附件热力计算的状态参数,可以避免重复计算各附件连接点湿空气的饱和含湿量,也避免了在换热器的热力计算时选择不同的方法。

随着计算机仿真技术的发展,座舱制冷系统性能计算可通过仿真软件如 MATLAB/SIMULINK 以及 FLOWMASTER 等进行,而波音公司通过自身研发的 EASY5 软件进行座舱制冷系统性能计算。我国民用飞机研制单位应开发独立的座舱制冷系统性能计算平台,以在试验前对座舱制冷系统的性能进行仿真研究,及早发现并改正设计问题。

本文对民用飞机座舱制冷系统性能计算方法进行了分析研究。

1 理论计算方法

1.1 传统方法^[1-3]

传统方法主要通过合理匹配系统各点的气动参数来确定系统各附件的性能参数,系统各位置点均采用温度作为状态参数,根据附件的效率特性和能量守恒关系建立方程组。系统主要部件数学模型如下所述。

涡轮组件的压比 π_B 为:

$$\pi_B = \frac{P_2}{P_9} = \frac{\theta}{\pi_c} \pi_t = \frac{\theta}{\pi_c} \left[1 - \frac{\delta}{\eta_B} (\pi_c^{0.286} - 1) \right]^{-3.5} \quad (1)$$

式中, η_B 为涡轮组件效率; η_m 为轴传动的机械效率; π_c 为压气机增压比; δ 为压气机入口温度与涡轮入口温度之比; θ 为压气机出口压力与涡轮进口压力之比。

1.2 焓参数匹配方法^[4-5]

焓作为状态参数表征了两相工质热质交换的动力学特征,是对湿空气的温度和含湿量的综合描述。在各种湿热换热器的计算方法中,已经广泛采用湿空气的焓代替温度作为状态参数。焓参数匹配法的实质是实现全系统参数与各位置点状态参数(即焓和温度)的解耦,以简化系统参数匹配。系

统各位置点均采用焓作为状态参数,根据附件的效率特性和能量守恒关系建立方程组。系统主要部件数学模型如下所述。

根据压气机的效率特性,其进出口温度比为:

$$\frac{T_3}{T_2} = 1 + \frac{1}{\eta_c} (\pi_c^{0.286} - 1) \quad (2)$$

式中, η_c 为压气机效率比。

转化成焓效率的形式,有:

$$\frac{h_3 + 273.15c_p}{h_2 + 273.15c_p} = 1 + \frac{1}{\eta_c} (\pi_c^{0.286} - 1) \quad (3)$$

涡轮也有如下关系式:

$$\frac{h_9 + 273.15c_p}{h_8 + 273.15c_p} = 1 - \eta_t (1 - \pi_t^{0.286}) \quad (4)$$

式中, η_t 为涡轮效率比。

2 仿真软件计算

上述计算方法偏重于理论计算,实际工程应用中可采用仿真软件建立座舱制冷系统部件模型,同时可采用部件的实际性能参数。

2.1 FLOWMASTER 仿真软件计算^[6-7]

FLOWMASTER 软件是面向工程的流体系统仿真平台,被广泛运用于设计和分析复杂的飞行器流体系统,其高效的计算效率、精确的求解能力以及完备的模型库为大型流体系统的仿真计算提供了非常便利的条件。

利用 FLOWMASTER 软件建立的三轮高压除水制冷系统仿真模型如图 2 所示。

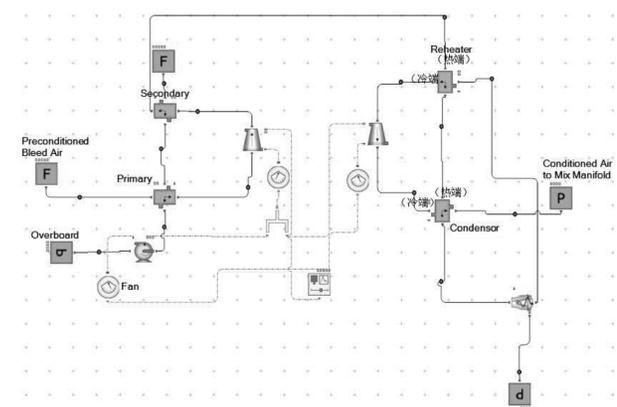


图 2 FLOWMASTER 仿真模型示意图

2.2 MATLAB/SIMULINK 仿真软件计算^[8-10]

应用 MATLAB/SIMULINK 仿真平台,仿真时可以根据系统的实际构成选择模块来连接,具备一定的通用性,用户也可以根据自身需要进行二次开

发,开放性也是其一大特点。

国内何君^[9]等利用 MATLAB/SIMULINK 软件建立了座舱制冷系统各主要部件的数学模型,开发了各部件的仿真模块,用所建模块搭建了不同军用飞机座舱制冷系统的仿真模型,并进行了仿真研究。

2.3 EASY5 仿真软件计算^[11-13]

波音公司在大量地面和空中飞行试验的基础上,进行了大规模的座舱制冷系统的动态模型研究和实验,研制了包括座舱制冷系统仿真在内的商用软件 EASY5。EASY5 软件包含座舱制冷系统常用的模型组件,用户只需按照系统原理示意图,选择组件,进行连接,即可建立系统模型,省去了用户自行开发组件的不便。

国外 A. J. P. Lloyd^[12]等利用 EASY5 软件建立了不同飞机座舱制冷系统仿真模型,并进行了仿真研究,国内董素君^[13]等利用 EASY5 软件建立了蒸发循环制冷系统仿真模型,并进行了仿真研究。

3 结果对比

3.1 算例已知数据

采用表 1 中的算例分别用焓参数匹配法以及 FLOWMASTER 仿真软件对座舱制冷系统性能进行计算,并进行了对比,如表 2 所示。

表 1 算例所选取的状态参数列表

$H(\text{ft})$	0	$d_{10}(\text{kg/kg})$	0.002 9
M_H	0	$P_1(\text{kPa})$	280.8
$d_h(\text{kg/kg})$	0.019	$T_1(^{\circ}\text{C})$	200
$T_h(^{\circ}\text{C})$	40	$P_{10}(\text{kPa})$	104.7
$G_1(\text{kg/s})$	0.329	$T_{10}(^{\circ}\text{C})$	-3.3

3.2 结果对比

表 2 计算结果对比

状态点	焓参数法 计算结果	Flowmaster 计算结果
T_2	116.4	110.1
T_3	168.4	171
T_4	33.2	38.4
T_5	28.6	33.8
T_6	8.7	24.0
T_7	8.7	24.0
T_8	47.2	35.9
T_9	-12.7	-18.5

4 结论

本文对民用飞机座舱制冷系统性能理论计算与仿真计算进行了阐述,得出如下结论:

(1) 民用飞机座舱制冷系统性能计算理论方法包括传统方法与焓参数匹配方法,同时可通过 FLOWMASTER 等仿真软件进行计算;

(2) 传统计算方法与焓参数方法主要偏重于理论计算,而采用仿真软件计算可应用系统部件的实际性能参数。

参考文献:

- [1] 王仙,张兴娟. 三轮环控系统的设计计算及性能研究 [C]//中国航空学会第七届学术年会人体工程、航医、救生分会论文集. 北京:2006:133-137.
- [2] 刘良文,张兴娟. 现役国外民用客机制冷系统的性能分析 [C]//中国航空学会 2007 年学术年会论文集. 深圳:中国航空学会,2007.
- [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.
- [4] 王安良,杨春信,胡创利. 飞机环境控制系统的焓参数匹配方法 [J]. 工程热物理学报,2003,24(2):325-327.
- [5] 张兴娟,李峰,杨春信. 三轮升压式高压除水系统焓参数法性能计算 [J]. 航空动力学报,2010,25(9):1938-1941.
- [6] 李楠,屠毅. 三轮高压除水环境控制系统仿真 [J]. 计算机测量与控制,2013.
- [7] 简夕忠,况薇. 基于 FLOWMASTER 软件的民用飞机空调制冷系统仿真分析 [J]. 科技信息,2013.
- [8] 宋俊斌,袁修干. MATLAB 在飞机环境控制系统仿真中的应用 [J]. 北京航空航天大学学报,2002,28(1):43-46.
- [9] He Jun, Zhao Jin-quan. Dynamic Simulation of the Aircraft Environmental Control System [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2001, 14(3): 129-133.
- [10] 杨锋,袁修干. 基于 Matlab 的飞机环境控制系统动态仿真 [J]. 系统仿真学报,2002.
- [11] A. J. P. Lloyd, V. K. Rajpaul. Dynamic Analysis Environmental Control System the "EASY" Way [R]. ASME, 77-ENAS-6.
- [12] G. L. Hoffman. Environmental Control System Simulation Using EASY5 As Applied to the F-14 [R]. SAE, 851318;
- [13] 董素君,封正纲. EASY5 仿真软件在制冷系统仿真中的应用 [J]. 低温工程,2003,3:34-41.