大飞机四轮升压制冷系统焓参数法匹配计算

张兴娟 李 峰 杨春信

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 国外先进民机座舱制冷系统已采用高性能四轮升压式高压除水制冷系统. 针对传统的系统参数匹配方法复杂的特点, 引入焓参数法建立了四轮升压式高压除水制冷系统匹配计算模型, 用所建模型进行了匹配计算, 并分析了流比、风扇功率比参数和涡轮功率比参数对系统性能的影响. 计算结果表明: 用焓代替温度作为系统各附件热力计算的状态参数, 使得物理概念清晰, 匹配过程简单, 编程易于实现. 避免了重复计算各附件连接点湿空气的饱和含湿量, 简化了换热器的热力计算过程. 研究成果为大飞机的研制提供了一定的理论指导.

关 键 词: 飞机; 座舱; 焓; 制冷

中图分类号: V 245.3

文献标识码: A 文章编号: 1001-5965(2010)09-1009-04

Calculating method for matching enthalpy parameter of four-wheel-bootstrap refrigeration system for civil aircraft

Zhang Xingjuan Li Feng Yang Chunxin

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The foreign advanced civil airplane cabin refrigeration system has been developed from three-wheel-bootstrap to four-wheel-bootstrap high pressure water-separation system. The traditional method used for matching the system thermal parameters was complicated. A new model for calculating the enthalpy parameters was proposed and used for the matching calculation. The gas flow ratio, fan power ratio and the turbine power ratio were introduced and their effect on system performance was analyzed. The results show that the use of enthalpy instead of temperature as the state parameter of the system accessories is of a clear physical concept, and can be easily programmed and avoid double counting of the saturated humidity of the connection points between accessories, and can also simplify the heat exchanger thermodynamic calculation and reduce the iteration times of the system. The results can provide a theoretical guidance for civil aircraft researches.

Key words: aircraft; cabin; enthalpy; refrigeration

先进民机座舱制冷系统已由高性能的三轮升压式发展为四轮升压式高压除水制冷系统[1-2]. 波音777飞机和A380飞机均采用了四轮升压式高压除水系统. 相对于以往系统, 制冷系统由三轮变为四轮形式, 结构更加复杂. 在方案设计阶段的热力匹配计算时, 如何寻找一个简捷便利的匹配计算方法是科研工作人员一直追求的目标. 由于飞机环境控制系统通常在湿工况下工作, 相变过程使系统参数匹配变得比较复杂. 传统方法通过引入温度效率, 通过能量平衡方程计算各点焓值, 再通过迭代判断各状态点的温度和含湿量. 即将组成系统的干与湿换热器分开考虑, 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. 本文在文献[3]的基础上, 建立了四轮升压式高压除水制冷系统焓参数匹配模型, 通过引入焓效率, 使得匹配结果大大简化.

1 焓参数法原理

焓作为状态参数表征了两相工质热质交换的

收稿日期: 2009-07-27

作者简介: 张兴娟(1969-), 女, 江苏泰兴人, 副教授, xingjuanzhang@163.com.

动力学特征,是对湿空气的温度和含湿量的综合描述. 在各种湿热交换器的计算方法中,对于无相变换热的干热交换器,空气的显热换热量为进出口的焓差,也可以用焓代替温度描述其换热过程. 计算各位置点湿空气的焓,即可确定其温度.

以 0℃的空气与 0℃的液态水为零参考焓值点,湿空气的焓与温度、含湿量和饱和含湿量有如下函数关系[4]:

$$h = f(t, d, d_{sat}) \tag{1}$$

式中, h 为湿空气的焓, kJ/kg; t 为温度, ℃; d 为含湿量, g/kg; d_{sat} 为饱和含湿量, g/kg.

式(1)按饱和与非饱和状态分别计算,湿空气的饱和含湿量为

$$d_{sat} = 622\frac{P_{sat}}{P - P_{sat}} \tag{2}$$

$$P_{sat} = 602.4 \times 10^{\frac{7.45t}{235+t}} \tag{3}$$

式中, P 为湿空气的压力, kPa; P_{sat} 为 t 所对应的饱和水蒸气分压, kPa.

根据式(1)~式(3)能够实现各状态点湿空气温度与焓的相互转换.

传统的系统参数匹配方法[5]及焓参数匹配法的流程简图分别如图 1和图 2所示.

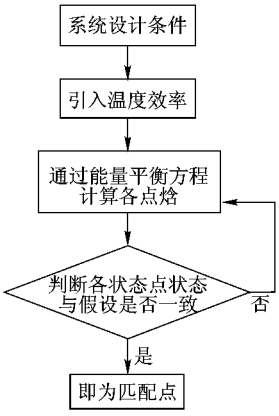


图 1 传统匹配方法流程

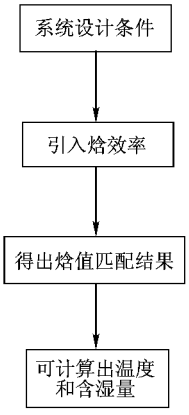
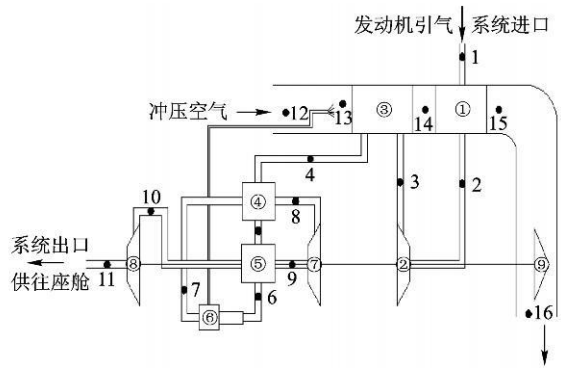


图 2 焓参数法流程

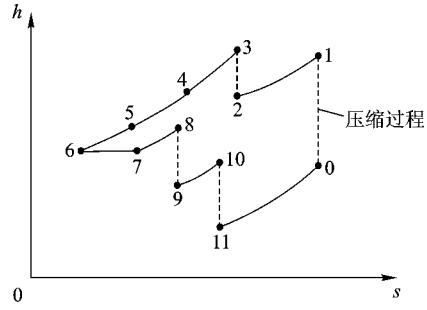
2 焓参数法模型

四轮升压式高压除水制冷系统原理图及热力过程图见图 3. 当忽略热交换器的阻力时,对应的理想热力过程 h-s 图见图 3b. 系统的工作原理为:发动机引气首先经过初级换热器冷却,之后经过压气机压缩提高引气的温度和压力,再经过次级换热器冷却,其中初级换热器和次级换热器的冷边均为风扇驱动的冲压空气冷气流,接着系统引气气流依次经过回热器热边、冷凝器热边和高压水分离器,进一步降低气流温度并且分离出气流中大部分水分,最后引气气流进入第 1级涡轮膨胀降温,并流经冷凝器的冷边后进入第 2级涡轮冷却降温后通向座舱. 为了使系统冷量得到充分利用,高压水分离器排出的水分喷入次级散热器的冷边,用来降低冷边空气的温度. 该系统的主要特点是:四轮升压式高压除水系统采用两级涡轮⑦和⑧降温,第 1级涡轮⑦可以将温度控制在零点以上,这样有效地防止了冷凝器的结冰.



1~16—系统关键状态点; ①—初级换热器; ②—压气机; ③—次级换热器; ④—回热器; ⑤—冷凝器; ⑥—水分离器; ⑦—初级涡轮; ⑧—次级涡轮; ⑨—风扇.

a 系统简图



1~11—系统关键状态点.

b 热力过程图

图 3 四轮升压式高压除水制冷系统原理及热力过程

本文对四轮升压式高压除水制冷系统建立焓参数模型,具体介绍如下.

2.1 系统热路

1) 热交换器. 文中所有热交换器、换热器的冷边流量均大于或等于热边流量,如初级换热器、次级换热器、回热器和冷凝器,焓效率模型为

$$\eta_{HX} = \frac{h_{hi} - h_{ho}}{h_{hi} - h_{li}} \tag{4}$$

式中, η_{HX} 为所有换热器的焓效率; h_{hi} 为换热器热边进口焓值, kJ/kg; h_{ho} 为热边出口焓值, kJ/kg; h_{li} 为冷边进口焓值, kJ/kg.

根据热交换器冷热边换热能量平衡关系有

$$G_h(h_{hi} - h_{ho}) = G_l(h_{lo} - h_{li}) \tag{5}$$

式中, G_h, G_l 分别为换热器热冷边流量, kg/s.

2) 四轮升压式涡轮组件. 根据压气机的效率

特性, 其进出口温度比为

$$\frac{T_3}{T_2} = 1 + \frac{1}{\eta_c}(\pi_c^{0.286} - 1) \quad (6)$$

式中, T_2, T_3为压气机进出口温度, K; η_c为压气机效率; π_c为压气机增压比.

式(6)转化成焓效率的形式, 有

$$\frac{h_3 + 273.15c_p}{h_2 + 273.15c_p} = 1 + \frac{1}{\eta_c}(\pi_c^{0.286} - 1) \quad (7)$$

式中, h_2, h_3分别为压气机进出口焓值, kJ/kg; c_p为干空气的定压比热, kJ·(kg·K)$^{-1}$.

与压气机类似, 涡轮也有如下关系式:

$$\frac{h_9 + 273.15c_p}{h_8 + 273.15c_p} = 1 - \eta_{t1}(1 - \pi_{t1}^{-0.286}) \quad (8)$$

$$\frac{h_{10} + 273.15c_p}{h_{11} + 273.15c_p} = 1 - \eta_{t2}(1 - \pi_{t2}^{-0.286}) \quad (9)$$

式中, h_i (i= 8, 9, …, 11)为各工况点的焓值, kJ/kg; η_{t1}, η_{t2}分别为初级涡轮和次级涡轮的效率; π_{t1}, π_{t2}分别为初级涡轮和次级涡轮的膨胀比.

引入涡轮功率比参数 γ, 有下式:

$$h_{10} - h_{11} = \gamma(h_8 - h_9) \quad (10)$$

风扇的焓参数模型如下:

$$\pi_F = \left(1 + \eta_F \frac{h_{16} - h_{15}}{h_{15}}\right)^{3.5} \quad (11)$$

式中, π_F为风扇的增压比; η_F为风扇效率.

涡轮、压气机和风扇同轴安装, 其中涡轮和压气机流量相等, 引入风扇功率比参数 β, 得到

$$(1 - \beta)(1 + \gamma)(h_8 - h_9) = (h_3 - h_2) \quad (12)$$

$$(h_{15} - h_{14}) = \beta(1 + \gamma)(h_8 - h_9) \quad (13)$$

3) 高压水分离器. 液态水的显热量在湿空气焓中所占比例很小, 可认为高压水分离器进出口的湿空气焓近似相等, 即

$$h_7 = h_6 \quad (14)$$

2.2　系统冷路

1) 冲压空气进口焓值 h_{12}. 冲压空气入口焓值可用其总焓值近似代替:

$$h_{12} = h_\infty + \frac{V_\infty^2}{2} \quad (15)$$

式中, h_∞为前方来流空气焓值, kJ/kg; V_∞为来流空气流速, m/s.

2) 冷凝水喷入冷边. 冷凝水喷入冷边的传热过程近似为定焓过程:

$$h_{13} = h_{12} \quad (16)$$

$$t_{13} = t_{12} - \frac{(d_1 - d_{11})\eta_J r}{c_p \zeta} \quad (17)$$

$$d_{13-16} = \frac{(d_h - d_c)\eta_J}{\zeta} + d_{12} \quad (18)$$

式中, η_J为喷水效率; r为 0℃饱和水蒸气的焓值, kJ/kg; ζ为流比; d_i (i= 1, 2, …, 16)为 1~16点的含湿量, g/kg; d_h, d_c分别为系统入口和出口含湿量, g/kg.

3　计算结果

根据上面介绍的焓参数模型, 性能代偿损失 ΔM 选用起飞总质量法计算, 设计工况点见表 1. 计算结果见表 2和表 3.

表 1　系统工况点参数列表

工况点参数	飞行高度/km	马赫数	系统供气流量/(kg·s^{-1})	环境空气温度/℃	热边入口湿度/(g·(kg干空气)$^{-1}$)
数值	0	0.19	1.4	38	19.0

工况点参数	热边入口压力/kPa	系统出口温度/℃	出口湿度/(g·(kg干空气)$^{-1}$)	热边入口温度/℃
数值	350	≤7	≤7	220

表 2　关键部件设计参数列表

参数	π_c	π_f	η_t	π_{t2}
数值	1.52	1.03	0.77	1.97
参数	η_{shx}	ζ	η_{h_cds}	η_{t_cds}
数值	0.65	1.7	0.48	0.35
参数	η_c	η_f	π_{tl}	γ
数值	0.72	0.25	2.47	0.75
参数	η_{phx}	β	η_{h_hui}	η_{t_hui}
数值	0.80	0.15	0.13	0.51

注: η表示效率; 下标 phx表示初级换热器; shx表示次级散热器; cds表示冷凝器; hui表示回热器.

表 3　四轮式系统计算结果

工况点	焓值/(kJ·kg^{-1})	含湿量/(g·(kg干空气)$^{-1}$)	压力/kPa	温度/℃
1	276.20	19	350	220
2	167.94	19	340	115.8
3	256.39	19	557.6	200.95
4	113.28	19	547.6	63.26
5	106.00	19	537.6	58.26
6	57.42	6.2	527.6	37.71
7	57.42	3	526.29	49.42
8	64.70	3	516.29	56.63
9	5.24	1.7	209.14	0.82
10	53.81	3	199.14	45.85
11	9.22	3	101	1.70
12	89.19	19	101.0	40.09
13	65.57	28.1	101	17.36
14	149.75	28.1	100	75.17
15	213.43	28.1	99	135.46
16	222.62	28.1	103.54	144.15

4 关键部件对系统性能影响分析

组成四轮升压式高压除水制冷系统的主要部件为热交换器和涡轮冷却器. 本文用焓参数法分别分析流比、风扇功率比参数和涡轮功率比参数3个参数对系统性能的影响.

4.1 流比对系统性能影响

图4为系统流比对性能代偿损失的影响曲线(在计算中初级散热器焓效率为0.85,次级散热器效率为0.8). 在最佳流比之前,性能代偿损失随流比的增加而降低,之后又随流比的增加逐渐增大.

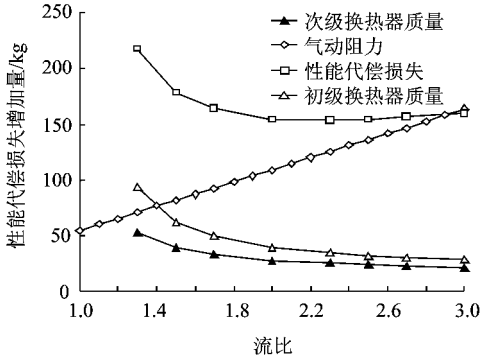


图4 流比对系统性能的影响

4.2 风扇功率比参数的影响

图5为风扇功率比参数对涡轮冷却器性能的影响. 由图可以看出,随着风扇功率比参数的增大,单级涡轮膨胀比降低(计算中取两级涡轮膨胀比相同),涡轮冷却器的性能降低. 要满足系统同样的制冷效果,需要加大发动机的引气量,造成系统性能代偿损失增大.

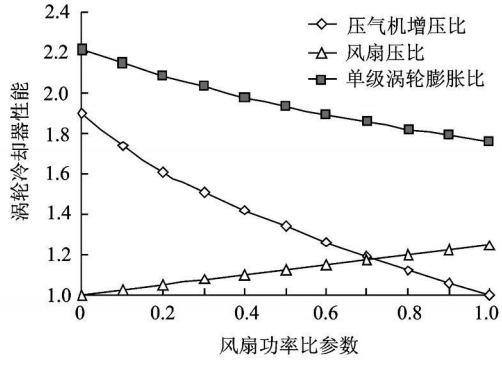


图5 风扇功率比参数对涡轮冷却器性能的影响

4.3 涡轮功率比参数的影响

涡轮功率比 γ 对系统性能的影响如图6所示. 当 γ 为0时,系统变成一个三轮升压式高压除水系统,其性能代偿损失明显大于四轮式的性能代偿损失. 当 $\gamma=1.0\sim1.1$ 时系统性能代偿损失有最小值.

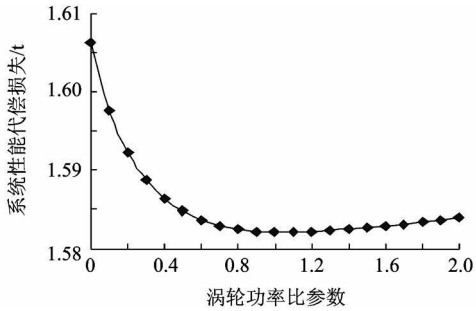


图6 涡轮功率比参数对系统性能的影响

5 结 论

1) 采用焓参数代替传统的温度作为系统各附件热力计算的状态参数,避免了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. 其优点是: ①物理概念清晰,编程易于实现; ②系统迭代次数减少,匹配过程简单.

2) 系统流比、风扇功率比和涡轮功率比等参数对四轮升压式高压除水系统性能的影响有最优值,在系统设计计算时要分析其参数值,使得匹配出的系统实现经济节能.

参考文献 (References)

[1] 张兴娟,杨春信,袁修干. 民用大型飞机座舱制冷技术的发展[J]. 国际航空, 2009(6): 70-71
Zhang Xingjuan, Yang Chunxin, Yuan Xiugan. The development of civil aircraft cabin refrigeration technology [J]. International Aviation, 2009(6): 70-71(in Chinese)

[2] De Francesco G L. Condensing cycle air conditioning system [R]. SAE-93-2056, 1993

[3] 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
Wang Anliang, Yang Chunxin, Hu Chuangli. A methodology for matching enthalpy parameters of environmental control system [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003, 24(2): 325-327(in Chinese)

[4] 廉乐明. 工程热力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007
Lian Yueming. Engineering thermodynamics [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007(in Chinese)

[5] 寿荣中,何惠姗. 飞行器环境控制[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004
Shou Rongzhong, He Huishan. Environmental control on aircraft [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2004(in Chinese)

[6] 王仙. 民用客机座舱制冷系统性能研究[D]. 北京: 北京航空航天大学航空科学与工程学院, 2007
Wang Xian. Research of the refrigerating system for commercial aircraft cabin [D]. Beijing: School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007(in Chinese)

(编 辑: 李 晶)