

DOI:10.16356/j.1005-2615.2019.03.020

机载换热器工作包线计算及试验研究

谭公礼 吴学群 卢建

(中国船舶重工集团公司第七二三研究所,扬州,225101)

摘要:机载环控用气液板翅式换热器,热边为循环冷却液,冷边为冲压空气,其换热量与飞行高度、飞行马赫数息息相关。为了确定换热器满足换热量要求的工作条件,提出一种额定换热器工作包线计算方法,对换热器进行参数计算和优化,最终得到符合技术要求的工作包线和换热器结构。选取工作包线上典型工作点,设计真空舱试验,模拟飞行高度和速度,对换热器换热性能进行测试。试验结果显示各工作点换热器换热量与额定换热量相差 3.2%,表明工作包线计算方法可行、准确,可为同类换热器优化设计和工作包线计算提供参考。

关键词:飞行器环境控制;机载;板翅式换热器;工作包线;真空舱试验

中图分类号:V245.3

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2019)03-0410-07

Calculation and Experimental Study on Working Envelope of Airborne Heat Exchanger

TAN Gongli, WU Xuequn, LU Jian

(The 723 Institute of CSIC, Yangzhou, 225101, China)

Abstract:The air-liquid plate-fin heat exchanger for aircraft environmental control is provided with circulating cooling liquid on the hot side and stamping air on the cold side. Its heat transfer is closely related to the flight height and Mach number. In order to determine the working conditions of the heat exchanger to satisfy the heat transfer requirements, a method for calculating the rated heat transfer work envelope is proposed, then the parameters of the heat exchanger are calculated and optimized, and finally the work envelope and the structure of the heat exchanger are obtained. The vacuum chamber test is designed by selecting the typical working point on the working envelope, the heat exchanger performance is tested by simulating flight height and speed. The experimental results show that the heat transfer of the heat exchanger at each working point is 3.2% different from the rated heat exchange amount, and the results show that the calculation method of work envelope is feasible and accurate, which can provide reference for the optimal design of similar heat exchangers and the calculation of work envelope.

Key words: aircraft environmental control; airborne; plate-fin heat exchanger; work envelope; vacuum chamber test

随着机载电子设备的应用越来越广泛,功率大、集成度高的机载设备的散热冷却是飞机环境控制中的一个关键问题^[1-2]。对于电子设备舱,当热载负荷较大时,多数飞机选取了液体冷却系统,它主要利用冲压空气作为热沉在换热器中与冷却介

质进行换热的二次冷却的液冷形式对电子设备进行冷却。在液冷系统中,换热器是必不可少的核心组件,是热交换的场所,板翅式换热器由于传热面积大、紧凑度高、传热效率高,在机载环境控制领域应用广泛^[3-4]。

收稿日期:2018-06-03;修订日期:2018-11-18

通信作者:谭公礼,男,工程师,E-mail:tandymacnuaa@hotmail.com。

引用格式:谭公礼,吴学群,卢建.机载换热器工作包线计算及试验研究[J].南京航空航天大学学报,2019,51(3):410-416. TAN Gongli, WU Xuequn, LU Jian. Calculation and Experimental Study on Working Envelope of Airborne Heat Exchanger[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(3): 410-416.

国内外对板翅式换热器的研究起于20世纪30年代,目前已研究较为透彻、成熟,包括对换热器的设计、仿真、优化、以及优化算法等。换热器向着体积小、换热效率高的优化方向不断前进^[5-10]。

然而,对于机载冲压液冷环控系统用板翅式换热器的工作条件,目前还未进行系统的、针对性的研究。本文基于国内外对换热器换热性能、优化设计等方面的研究基础,提出一种换热器额定换热量工作包线的计算方法。所谓工作包线,是以飞行马赫数、飞行高度为边界线,用来表示换热器满足额定换热量要求的封闭几何图形,它是衡量机载换热器性能及适用范围的重要参数。工作包线的计算有利于明确换热器的工作条件(飞行速度、高度),对整机飞行包线的研究具有重要意义^[11]。

1 换热器工作包线计算方法

本文所涉及的机载环控系统用板翅式换热器冷边为冲压空气,冲压空气从进气口进入换热芯体,与热边的航空冷却液进行热交换,经降温后的冷却液去冷却电子设备。受安装空间、工作环境及飞行条件等因素约束,机载换热器既要满足飞机全飞行包线的散热能力要求,也要适应空间、重量、流阻限制,同时满足可靠性、耐压性等要求。对换热器额定换热量工作包线进行计算,得到机载换热器的工作条件,对换热器结构优化,得到满足技术要求的换热器工作包线。

1.1 进气口参数计算

进气口一端与换热器气体侧安装法兰相连,一端在飞机舱外,冲压空气从进气口舱外端进入换热器芯体,发生热交换。在相同飞行高度、飞行速度下,不同冲压进气口尺寸,所能引进的空气流量是不同的^[12]。

$$p_{ex}^* = \delta p_{\infty}^* = \delta p_{\infty} \left(1 + \frac{k-1}{2} Ma_{\infty}^2 \right)^{k/(k-1)} \quad (1)$$

总温 T_{ex}^*

$$T_{ex}^* = T_{in}^* = T_{\infty}^* \left(1 + \frac{k-1}{2} Ma_{\infty}^2 \right) \quad (2)$$

式中: δ 为总压恢复系数,包括进口损失和扩压损失; k 为比热容比;下标“ ∞ ”代表远方来流;上标“*”代表滞止参数; p 代表压力; T 代表温度; Ma 代表飞行马赫数; p_{ex}^* 代表进气口出口总压; T_{ex}^* 代表总温。

根据进气口出口总压及进气口尺寸,依式(3)~(6)计算流过热交换器冷边气体流量 q_m 、进口温度 T_2 、进口密度 ρ_2

$$T_{in} = T_{\infty} \frac{1 + 0.2Ma_{\infty}^2}{1 + 0.2Ma_{in}^2} \quad (3)$$

$$Ma_{in} = (0.3 \sim 0.5) Ma_{\infty}^2$$

$$T_2 = T_{ex} = \frac{T_{ex}^*}{1 + 0.2Ma_{ex}^2} \quad (4)$$

$$\rho_2 = \frac{p_{ex}}{RT_2} \quad (5)$$

$$q_m = \left[\frac{p_{ex}^* - p_0}{\sum_i (C_{f,i} L_i / D_i + \xi_i) / 2\rho_i A_i^2} \right]^{1/2} \quad (6)$$

式中: $C_{f,i}$, L_i , D_i 分别为进气风道、热交换器冷边的摩擦阻力系数,流道长度与直径; A_i 为导管、热交换器冷边或排气口的流通面积; ρ_i 为进气风道、热交换器冷边或排气口前的空气密度; p_0 为排气空间环境的压力,空气排往大气,则 $p_0 = p_{\infty}$; Ma_{in} , Ma_{ex} 分别为进气口进口、出口马赫数。

1.2 换热器传热计算

1.2.1 计算关联式

换热器冷、热边均为单相流,板翅式换热器无相变特征数,流体雷诺数 Re 、普朗特数 Pr 、努塞尔数 Nu 、传热因子 j 、摩擦系数 f 、流动阻力 ΔP 以及对流换热系数 α 计算公式如下^[13]

传热因子

$$J = StPr^{2/3} = f(Re) \quad (7)$$

斯坦特数

$$St = \frac{\alpha}{g_j C_p} \quad (8)$$

普朗特数

$$Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda} \quad (9)$$

雷诺数

$$Re = \frac{g_j d_e}{\mu} \quad (10)$$

努塞尔数

$$Nu = 0.662 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (11)$$

摩擦系数^[14]

$$\ln f = 0.132856 (\ln Re)^2 - 2.28042 \ln Re + 6.79634 \quad (12)$$

流动阻力(只考虑摩擦损失)

$$\Delta P = 4f \frac{L}{d_e} \frac{g_j^2}{2\rho_m} \quad (13)$$

对流换热系数

$$\alpha = \frac{Nu\lambda}{d_e} \quad (14)$$

式中: g_j 为按自由流通截面计算的质量流速, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; α 为对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; C_p 为定压比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; ρ_m 为平均的流体密度, kg/m^3 ; λ 为导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; μ 为动力黏度, $(\text{N} \cdot \text{s})/\text{m}^2$; L 为流道长度, m ; d_e 为当量直径, m 。

1.2.2 换热量计算

采用效率-传热单元数法计算换热量。传热系数 k 和传热面积 A 关系为

$$\frac{1}{kA} = \frac{1}{\eta_c F_{l,c} \alpha_c} + \frac{1}{\eta_h F_{l,h} \alpha_h} + \frac{\delta_p}{F_w \lambda_w} \quad (15)$$

式中: α_h, α_c 分别为热边和冷边的对流换热表面传热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; η_c 为气体侧翅片效率; η_h 为液体侧翅片效率; $F_{l,c}, F_{l,h}$ 分别为气体侧和液体侧传热表面积, m^2 ; F_w 为隔板表面积, m^2 ; λ_w 为隔板导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$ 。

传热单元数

$$NTU = kA / W_{\min} \quad (16)$$

热容量比

$$\xi = W_{\min} / W_{\max} \quad (17)$$

传热效率

$$\epsilon = \frac{1}{\xi} (1 - \exp\{-\xi [1 - \exp(-NTU)]\}) \quad (18)$$

换热量

$$q' = \epsilon W_{\min} (T_{h,i} - T_{c,i}) = \epsilon W_{\min} \Delta T_{\max} \quad (19)$$

式中 W_{\min}, W_{\max} 分别为最小与最大水当量, $W/^\circ C$ 。

1.3 工作包线计算方法

机载冲压空气-冷却液换热器, 换热器在不同飞行高度, 随着进气量及进气风温的不同其换热量也不同。换热器额定换热量工作包线: 换热器在不同飞行高度, 满足额定换热量的飞行马赫数范围, 即飞行高度及飞行马赫数范围。

图1介绍了一种换热器额定换热量工作包线的计算方法和流程: 在飞行条件下, 以飞行高度 H 、飞行马赫数 Ma 为迭代参数, 针对已知换热器计算各个飞行高度上满足换热要求的最小、最大飞行马赫数, 生成换热器的 $Ma-H$ 工作包线。

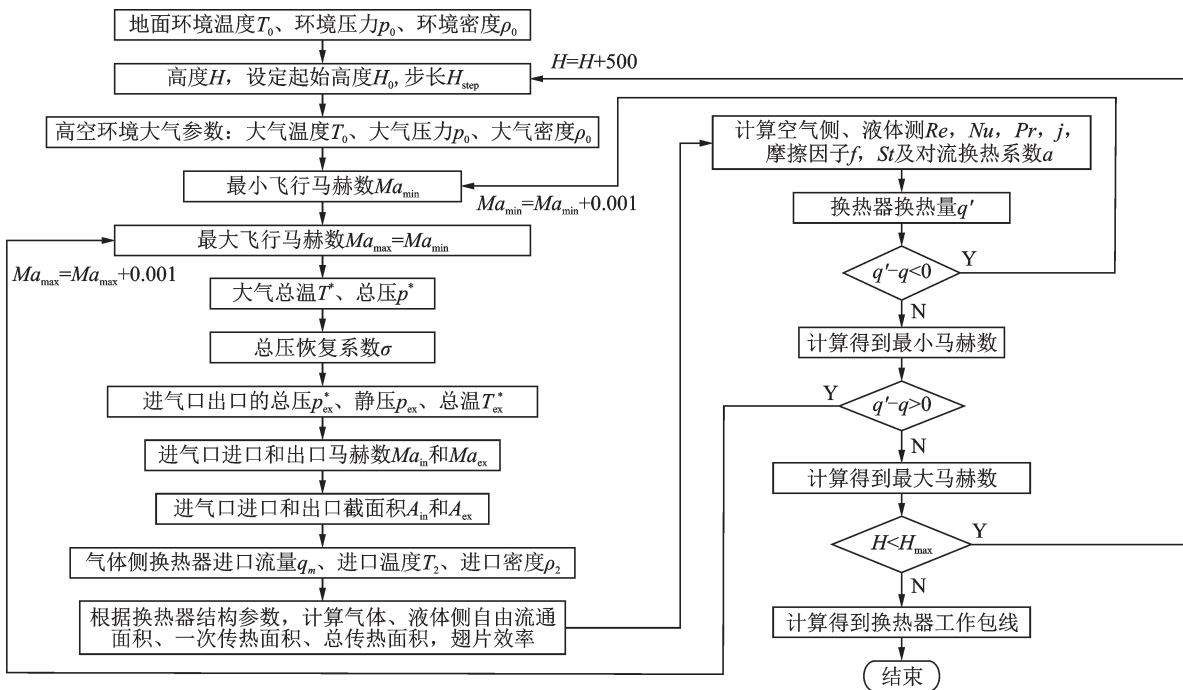


图1 换热器额定换热量工作包线计算流程

Fig.1 A method for calculating the rated heat transfer work envelope of heat exchanger

不同飞行高度、马赫数下换热量的计算: 利用1.1节公式计算气体侧温度、流量等参数, 液体侧物性参数, 流量, 供液温度已知; 利用1.2节公式计算相关流体传热特征数, 根据换热器结构计算传热面积, 以及相关换热计算公式, 计算换热器的换热量。

按图1流程图计算出换热器的额定换热量工作包线, 分析工作包线的范围, 当前换热器结构是否在飞行包线内符合换热需求, 对比技术要求确定影响参数, 改变参数使额定换热量工作包线窄的区域变宽, 为换热器优化设计提供参考。

1.4 计算结果

根据传热与工作包线计算方法, 分析换热器流

程、翅片型式对换热性能的影响, 以对换热器结构优化。首先对换热器翅片型式进行了研究, 计算三角形、锯齿形两种翅片对换热性能的影响。相同翅高、翅厚、翅间距的三角形和锯齿形翅片, 计算不同额定换热量下的换热器长度(高度、宽度相同), 结果如图2所示。结果表明: 同一换热量下采用锯齿型翅片换热器长度更小, 结构更紧凑, 锯齿型翅片传热因子更大, 传热效果更好。

其次, 对换热器流程数进行了研究, 外形尺寸不变, 改变换热器内部流程数, 计算换热器液体侧出口温度。如图3所示为(3 000 m, 0.35Ma)、(5 000 m, 0.35Ma)两种飞行状态下, 不同流程数对

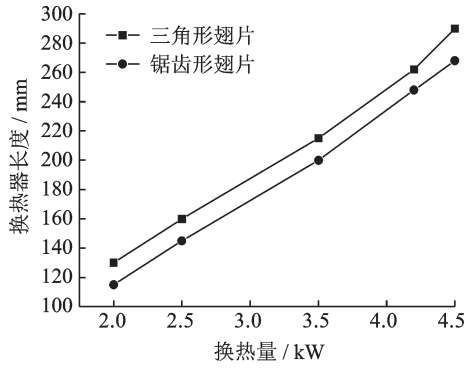


图 2 翅片型式对换热量的影响

Fig.2 Effect of fin form on heat exchange

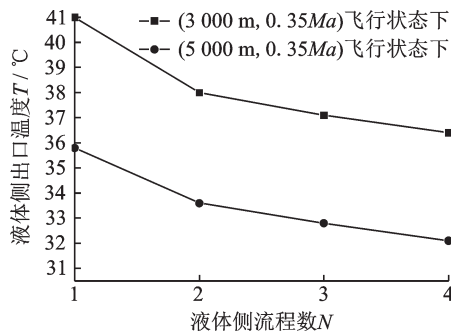


图 3 流程数对换热的影响

Fig.3 Influence of flow number on heat transfer

液体出口温度的影响,结果显示:在相同飞行状态下,流程数越多,液体出口温度越低,冷却效果越好,流程数由 1 至 2,液体出口温度变化较大,由 2 至 4 变化趋于平稳,且随着流程增加会增加液体侧流阻。

某机载换热器,采用冲压空气冷却循环冷却液,额定换热量为 4.2 kW,液体侧体积流量为 15 L/min,介质为 65#航空冷却液,经冷却后的供液温度小于等于 57 °C,气体侧换热器法兰与设计的进、出口相连。经换热器传热计算及流程、翅片型式分析后得到如图 4 所示换热器,其换热芯体尺寸为 194 mm × 122 mm × 248 mm,结构为:气体侧为单流程,采用锯齿形翅片,齿高 9.5 mm,截距 2.5 mm,齿厚 0.2 mm;液体侧为双流程,齿高 3.0 mm,截距 2.0 mm,齿厚 0.2 mm。运用 1.3 节介绍的工作包线计算方法,得到常规飞行高度 1 000~ 10 000 m 换热器的额定换热量工作包线,如图 5 所示:在工作包线内换热器的换热量均大于等于 4.2 kW;在 6 000~ 10 000 m 高空,空气温度低,即使高马赫数飞行,冲压空气进气总温也不高,且飞行速度大,进气流量较大,因此满足换热量的飞行速度范围比较宽广;低空高马赫数,冲压空气进气总温高,达不到冷却效果,因此低空下飞行速度范围较狭窄。

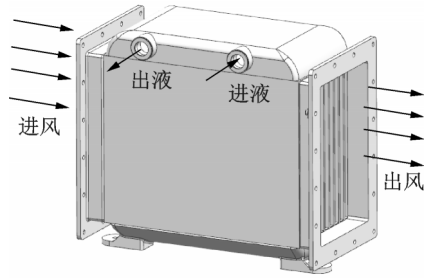


图 4 换热器结构

Fig.4 Heat exchanger structure

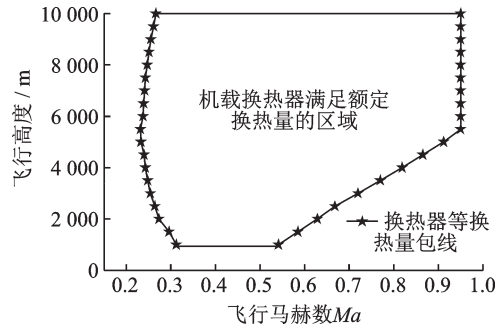


图 5 换热器工作包线计算结果

Fig.5 Calculation results of heat exchanger work envelope

2 试验验证

2.1 试验原理及内容

设计真空舱试验验证换热器性能及工作包线,摸底换热器在不同高度、速度下的换热能力以及流阻特性。试验原理如图 6 所示。通过真空泵抽真空模拟不同飞行高度大气压力。在换热器空气侧回路中,通过供气系统提供不同飞行条件下的冲压空气,进气口设有温度和压力传感器用以监测进气参数,模拟不同飞行马赫数、高度飞行条件;液体侧回路中,通过一个模拟热源给液体加热,气液换热器液体侧前后设置有温度、压力及流量传感器用以监测冷却液参数^[15-16]。

从 1.4 节计算的工作包线选取 10 个典型状态特征点进行试验验证,特征点参数详见表 1。

2.2 试验步骤

按图 6 试验原理图搭建试验平台。液体回路充注 65#航空冷却液,检查模拟热源和液体泵运行状态。开启供气系统活门,调节进气压力、温度到如表 1 所示状态点数值。调整换热器液体路活门,使得经过换热器的流量为 15 L/min,调节模拟热源功率达到额定值;待系统稳定时,记录数值,计算当前状态点下换热器换热量。

2.3 试验结果与误差分析

按表 1 所列状态点参数进行试验,各个状态点测得试验数据如表 2 所示。

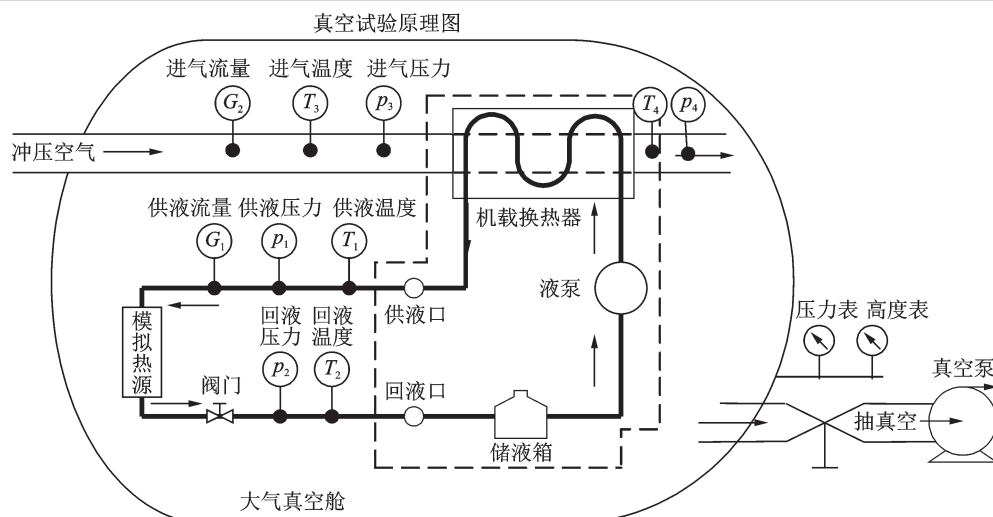


图6 试验原理图
Fig.6 Test schematic

表1 试验特征点参数

Tab.1 Test feature point parameters

序号	飞行高度/m	马赫数 Ma	大气压/kPa	冲压空气温度/ $^{\circ}\text{C}$	冲压空气总压/kPa
1	1 000	0.35	89.8	37.8	93.9
2	1 000	0.50	89.8	44.3	102.3
3	2 000	0.65	79.5	46.2	101.3
4	3 000	0.35	70.1	24.5	73.2
5	3 000	0.75	70.1	46.1	97.7
6	4 000	0.82	61.6	44.2	92.0
7	5 000	0.35	54.0	11.2	56.4
8	5 000	0.88	54.0	41.8	85.8
9	6 000	0.95	47.1	40.3	80.9
10	8 000	0.95	35.6	25.3	61.1

表2 试验结果

Tab.2 The test results

序号	高度/m	马赫数 Ma	空气侧实测参数				液体侧参数				换热量 Q/W
			流量 $G_2/$ ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$)	进气 压力 $p_3/$ kPa	出气 压力 $p_4/$ kPa	进气 总温 $T_3/$ $^{\circ}\text{C}$	出气 温度 $T_4/$ $^{\circ}\text{C}$	进液 温度 $T_2/$ $^{\circ}\text{C}$	出液 温度 $T_1/$ $^{\circ}\text{C}$	体积 流量 $q_v/$ ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)	
1	1 000	0.35	1 115	93.6	92.7	37.7	51.3	55.5	50.7	15.2	4 209
2	1 000	0.50	1 486	93.9	92.0	44.7	54.9	54.1	49.3	15.2	4 209
3	2 000	0.65	1 666	88.4	86.3	46.4	55.5	55.5	50.7	15.3	4 237
4	3 000	0.35	600	70.9	70.6	24.5	51	43.2	38	14.8	4 440
5	3 000	0.75	1 558	78.9	76.9	46.3	56	54.8	50	15.2	4 209
6	4 000	0.82	1 457	70.7	68.8	44.2	54.7	53.4	48.5	15.1	4 268
7	5 000	0.35	445	54.7	54.5	11.4	49.7	39.1	33.6	15.0	4 759
8	5 000	0.88	1 335	62.4	60.5	42.3	54.2	51.2	46.1	15.0	4 413
9	6 000	0.95	1 333	56.6	54.8	40.2	51.8	50.1	45.1	14.9	4 298
10	8 000	0.95	762	39.9	39.2	25.3	46.7	36.6	41.9	14.9	4 556

将试验测得流量、流阻值与计算方法计算值进行对比,结果如图7所示,图中数字1~10为表1特征状态点序号。可以看出,各状态点流阻计算值略

偏大,偏差最大值为状态点2:相差120 Pa, 6.5%;流量计算值略偏小,偏差最大值为状态点10:相差60 kg/h, 6.7%。各状态点流量、流阻试验与计算

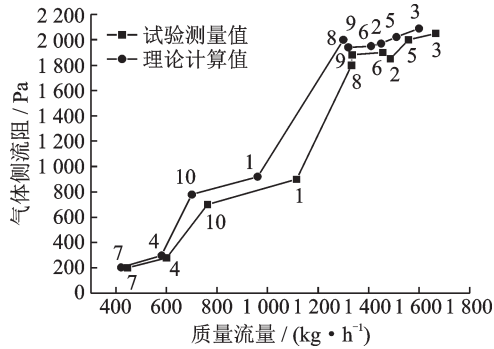


图7 试验与计算结果对比

Fig.7 Comparison of test and calculation results

值接近,说明本文换热器传热模型准确、计算方法可信。

从表2中试验测试结果可以看出,供液温度 T_1 满足要求,各个试验状态点换热量均略大于计算值4.2 kW,各状态点平均换热量为4.36,平均误差为3.2%,误差较小,个别状态点最大换热量为4.7 kW,误差为11.9%。实际换热量与计算值基本一致。

试验结果表明,在各个状态点,换热器换热性能符合要求,工作包线计算方法合理准确,图5所示额定换热量工作包线为图4所示换热器的4.2 kW工作包线。误差来源主要为计算时流体阻力系数采用的是经验数值,试验时气体侧实际流阻比计算流阻小,导致换热器空气流量偏大,换热量偏大,后续可以根据试验数据进行总结,对计算经验参数进行修正。

3 结 论

本文介绍了一种机载换热器额定换热量工作包线的计算方法,并设计真空舱试验模拟工作包线典型工作点状态,对换热器的换热量进行了测试。测试换热量与额定换热量大体一致,平均误差在3.2%左右,表明,换热器工作包线计算方法准确、可靠。通过工作包线计算方法可以得到满足工作条件的最优换热器结构,校核已知换热器工作包线是否满足技术要求,可为同类机载换热器设计、开发提供参考。

参考文献:

[1] 朱春玲,宁献文.用于机载大功率电子设备的新型液冷环控系统研究[J].南京航空航天大学学报,2005,37(2):203-207.
ZHU Chunling, NING Xianwen. Liquid cooling system for high-powered avionics[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2005, 37(2): 203-207.

[2] BIELSKI S, MALINOWSKI L. An analytical method for determining transient temperature field in a parallel-flow three-fluid heat exchanger[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2005, 32(8): 1034-1044.

[3] 李俊.机载多股流板翅式换热器性能研究[D].南京:南京航空航天大学,2015.
LI Jun. Study on performance of air borne multi-stream plate-fin heat exchanger[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.

[4] PAVEL B I, MOHAMAD A, BDULMAJEED A. An experimental and numerical study on heat transfer enhancement for gas heat exchangers with a pair of block shape vortex generators[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47: 4939-4952.

[5] 朱岩泉,袁相勇.机载换热器设计[J].电子机械工程,2015,31(4):24-27.
ZHU Yanquan, YUAN Xiangyong. Design of air-borne heat exchanger[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2015, 31(4): 24-27.

[6] MISHRA M, DAS P K, SARANGI S. Second law based optimization of cross flow plate-fin heat exchanger design using genetic algorithm[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(14): 2983-2989.

[7] 李俊,蒋彦龙,王瑜,等.机载三股流板翅式冷凝器数值计算与实验研究[J].南京航空航天大学学报,2017,49(3):382-388.
LI Jun, JIANG Yanlong, WANG Yu, et al. Numerical calculation and experimental investigation on air-borne three-stream plate-fin condenser[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(3): 382-388.

[8] SELBAS R, KIZILKAN Ö, REPPICH M. A new design approach for shell-and-tube heat exchangers using genetic algorithms from economic point of view[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2006, 45(4): 268-275.

[9] PENG H, LING X. Optimal design approach for the plate-fin heat exchangers using neural networks cooperated with genetic algorithms[J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(5): 642-650.

[10] 汪艳萍,路智敏,刘晓霞,等.板翅式换热器优化设计[J].内蒙古工业大学学报,2004,23(4):261-264.
WANG Yanping, LU Zhimin, LIU Xiaoxia, et al. Optimization design of the plate-fin heat exchanger[J]. Journal of Inner Mongolia University of Technology, 2004, 23(4): 261-264.

[11] 赵安家,孟哲理,高洪权,等.飞行包线对飞行安全影响研究[J].飞机设计,2017,37(1):11-16.
ZHAO Anjia, MENG Zheli, GAO Hongquan, et al.

- The research on the flight envelope of aircraft effecton on safety of fligh[J]. Aircraft Design, 2017, 37(1): 11-16.
- [12] 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: 228-229.
SHOU Rongzhong, HE Huishan. Aircraft environment control[M]. Beijing: Beihang University Press, 2004: 228-229.
- [13] FAKHERI A. Heat exchanger efficiency[J]. Journal of Heat Transfer, 2007, 129(9): 1268-1276.
- [14] 钱文颂. 换热器设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
QIAN Wensong. Heat exchanger design handbook [M]. Beijing: Chermical Industry Press, 2002.
- [15] 党晓民, 庞丽萍, 林贵平. 基于地面实验的蒙皮换热器高空换热性能分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(4): 474-477.
DANG Xiaomin, PANG Liping, LIN Guiping. High-altitude heat transfer performance analysis for skin heat exchanger based on ground experiment[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(4): 474-477.
- [16] 刘鑫鑫. 某型吊舱环控系统组件的研制及性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
LIU Xinxin. Development and performance research on the environmental control system components for a certain type of pod[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.

(编辑: 胥橙庭)