

基于AMESim的空-液热交换器仿真分析

马兰*, 李艳娜, 齐社红

中航工业第一飞机设计研究院, 陕西 西安 710089

摘要: 为了计算空-液热交换器的换热量及换热效率, 利用AMESim平台建立空-液热交换器及冷却介质的仿真模型, 并对其进行了仿真分析, 同时与试验结果进行了比较。结果表明, 基于AMESim的空-液热交换器仿真分析结果与试验结果相差较小, 可以满足工程需求。该方法可以用于液体冷却系统的仿真分析。

关键词: 液体冷却系统; 空-液热交换器; AMESim 仿真

中图分类号: V245.1 文献标识码: A 文章编号: 1007-5453 (2016) 12-0038-05

随着机载电子设备热流密度的不断增大,越来越多的电子设备采用液体冷却方式,空-液热交换器是液体冷却系统中的关键部件,其性能的优劣直接关系到液体冷却系统的性能优劣,影响电子设备的散热效果。空-液热交换器的性能主要体现在换热量和换热效率两个方面,准确计算空-液热交换器换热量和换热效率,对空-液热交换器的优化设计以及提高电子设备可靠性及降低系统燃油代偿损失具有重要意义。

空-液热交换器设计目前主要采用试验手段,试验手段具有数据可靠的优点,但是所需周期长,费用高。借助仿真分析手段对空-液热交换器进行优化设计有着缩短研制周期、降低研制成本、降低试验风险、可对多轮次方案进行优化分析的优势。因此,在试验前对其进行仿真分析是十分必要的。国内针对空-液热交换器的仿真分析已开展了大量的工作,文献[1]主要采用Matlab软件对其性能进行仿真;文献[2]采用Fluent等CFD软件对其热设计进行仿真。Matlab软件界面不够灵活,模块自定义较多,对于工程设计人员来说需要耗费较多精力与时间;Fluent等CFD软件主要是针对热设计温度场压力场的模拟。

AMESim是基于图形化的仿真平台,自带多种工程设计模块库,可以进行流体流动、传热、机械、电子等领域的联合建模仿真。为了更好地适应工程应用,本

文基于AMESim平台,对空-液热交换器进行建模和仿真,并与试验结果进行对比,以验证分析方法的准确性。

1 模型的建立

1.1 空-液热交换器数学模型

空-液热交换器是液体冷却系统的关键部件,冷却液将电子设备的热载荷带走,通过空-液热交换器将热量传递给热沉(空气或燃油)。目前,飞机上使用的空-液热交换器多是板翅式热交换器,冷边是空气,热边是液体(65号冷却液),如图1所示。空-液热交换器根据冷流体的流动方向可分为顺流式、叉流式及逆流式,飞机上多使用叉流式空-液热交换器,本文中使用的空-液热交换器换热分析方法适用于所有类型的板翅式空-液热交换器。

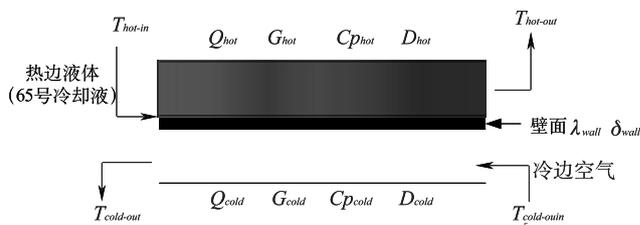


图1 板翅式空-液热交换器示意图
Fig.1 Schematic diagram of a plate-fin air-liquid heat exchanger

收稿日期: 2016-08-12; 退修日期: 2016-09-27; 录用日期: 2016-10-28

* 通讯作者. Tel.: 029-86862721 E-mail: malan_6@163.com

引用格式: MA Lan, LI Yanna, QI Shehong. Simulation of air-liquid heat exchanger based on AMESim [J]. Aeronautical Science & Technology, 2016, 27 (12): 38-42. 马兰, 李艳娜, 齐社红. 基于AMESim的空-液热交换器仿真分析[J]. 航空科学技术, 2016, 27 (12): 38-42.

从图 1 中可以看出：空-液热交换器内部热流传递方式为热边液体和壁面（热液体侧）之间利用强迫对流换热方式进行热交换，壁面（热液体侧）将热边液体中热量带走；壁面（热液体侧）与壁面（冷空气侧）之间通过导热方式进行热传递，热量由壁面（热液体侧）传递到壁面（冷空气侧）；冷边空气和壁面（冷空气侧）之间利用强迫对流换热方式进行热交换，壁面（冷空气侧）热量被冷边空气带走。图 2 给出了空-液热交换器中热流流向示意图。

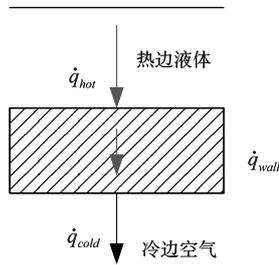


图 2 空-液热交换器中热流流向示意图

Fig.2 Schematic diagram of heat flow direction of air-liquid heat exchanger

热边液体侧雷诺数 Re_{hot} 用公式 (1) 表示：

$$Re_{hot} = \frac{\rho_{hot} V_{hot} D_{hot}}{\mu_{hot}} \quad (1)$$

式中： ρ_{hot} 为热边液体密度； V_{hot} 为热边液体侧翅片内冷却液流速； D_{hot} 为热边液体侧翅片的当量直径； μ_{hot} 为热边液体运动粘度。

热边液体侧努赛尔数 Nu_{hot} 使用经验关联式公式进行计算^[3]：

$$Nu_{hot} = 0.023 (Re_{hot}^{0.8} Pr_{hot}^{0.3}) = \frac{\alpha_{hot} \cdot D_{hot}}{\lambda_{hot}} \quad (2)$$

式中： Pr_{hot} 为热边液体普朗特数； α_{hot} 为热边液体侧液体与换热壁面的对流换热系数； λ_{hot} 为热边液体导热系数。

热边液体侧的冷却液热容量 W_{hot} 表示为：

$$W_{hot} = G_{hot} \cdot Cp_{hot} \quad (3)$$

式中： G_{hot} 为热边液体质量流量； Cp_{hot} 为热边液体定压比热容。

冷却空气侧雷诺数 Re_{cold} 表示为：

$$Re_{cold} = \frac{\rho_{cold} V_{cold} D_{cold}}{\mu_{cold}} \quad (4)$$

式中： ρ_{cold} 为冷边空气密度； V_{cold} 为冷边空气侧翅片内空气流速； D_{cold} 为冷边空气侧翅片的当量直径； μ_{cold} 为冷边空气运动粘度。

冷却空气侧的努赛尔数 Nu_{cold} 计算使用雷德 (Reid) 用

蜂窝状管的试验数据提出的经验关系式^[3]：

$$Nu_{cold} = 6 \left(\frac{Re_{cold}}{1000} \right)^{\frac{2}{3}} = \frac{\alpha_{cold} \cdot D_{cold}}{\lambda_{cold}} \quad (5)$$

式中： α_{cold} 为冷边空气侧空气与换热壁面的对流换热系数； λ_{cold} 为冷边空气导热系数。

冷边空气侧的空气热容量 W_{cold} 表示为：

$$W_{cold} = G_{cold} \cdot Cp_{cold} \quad (6)$$

式中： G_{cold} 为冷边空气质量流量； Cp_{cold} 为冷边空气定压比热容。

壁面热阻 R_{wall} 表示为：

$$R_{wall} = \frac{\delta_{wall}}{\lambda_{wall} A_{wall}} \quad (7)$$

式中： δ_{wall} 为壁面厚度； λ_{wall} 为壁面的导热系数； A_{wall} 为壁面导热面积。

空-液热交换器总传热系数 KA 表示为：

$$\frac{1}{KA} = \frac{1}{(\eta_0)_{hot} \alpha_{hot} A_{hot}} + R_{wall} + \frac{1}{(\eta_0)_{cold} \alpha_{cold} A_{cold}} \quad (8)$$

式中： $(\eta_0)_{hot}$ 为热边液体侧翅片效率； A_{hot} 为热边液体侧换热面积； $(\eta_0)_{cold}$ 为冷边空气侧翅片效率； A_{cold} 为冷边空气侧换热面积。

传热单元数 NTU 表示为：

$$NTU = \frac{KA}{W_{min}} \quad (9)$$

冷热边流体的热容比 C^* 表示为：

$$C^* = \frac{W_{min}}{W_{max}} = \frac{(G \cdot Cp)_{min}}{(G \cdot Cp)_{max}} \quad (10)$$

式中： W_{min} 、 W_{max} 分别为冷边空气与热边液体热容量的较小值，较大值。

对于叉流式空-液热交换器来讲，换热效率系数 η 可用德雷克 (Drake) 提出的近似关系来计算^[4]：

$$\eta = 1 - \exp \left\{ \frac{NTU^{0.22}}{C^*} \left[\exp(-C^* NTU^{0.78}) - 1 \right] \right\} \quad (11)$$

1.2 冷却介质物性参数模型

文中使用的冷却介质是 65 号冷却液，其热物理性质如表 1 所示。

AMESim 里进行自定义物性参数建模主要有两种方法：一种方法是通过修改脚本数据，使用自带的转换程序将其转换成 AMESim 可用的物性参数系数数据文件，供仿真计算使用；另一种方法是通过 AMESim 自带的 MPA 工具完成可供 AMESim 直接使用的物性参数建模，目前这两种方法虽然形式不一样，但结果都一样。图 3、图 4 分别给出了使

表 1 65 号冷却液的热物理性质
Table 1 Thermal physical properties of No.65 coolant

T/°C	ρ / (kg/m ³)	C_p / (kJ / (kg · °C))	$\lambda/10^2$ (W/m · °C)	Pr	$\nu/10^6$ (m ² /s)
-20	1116	2.694	32.2	458	48.1
0	1102	2.847	32.9	139	14.6
20	1089	2.999	33.7	61.2	6.3
40	1076	3.151	34.3	32.7	3.3
60	1062	3.303	35.9	19.8	2.0
80	1048	3.455	36.1	13.1	1.3
100	1034	3.608	36.3	10.2	0.99
120	1011	3.760	36.2	8.18	0.78

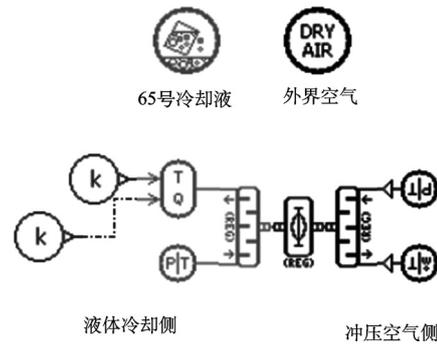


图 5 基于 AMESim 的空 - 液热交换器仿真模型
Fig.5 Simulation model of air-liquid heat exchanger based on AMESim

2 仿真结果与试验结果对比分析

2.1 仿真结果

以某型飞机为例,其空 - 液交换器的几何参数如表 2 所示,选取的 5 种计算状态如表 3 所示,对应计算得到空 - 液热交换器的换热性能输出结果如表 4 所示。

表 2 空 - 液热交换器几何参数
Table 2 Geometrical parameters of air-liquid heat exchanger

板间距	热边翅片 (锯齿形) /mm			冷边翅片 (三角形) /mm			芯体尺寸 / (mm × mm × mm)
	翅片节距	翅片厚度	错列间距	板间距	翅片节距	翅片厚度	
3.0	1.4	0.15	3	4.0	2.7	0.12	490 × 286.5 × 200

表 3 输入参数表

Table 3 Input parameters

计算状态	冷边供气流量 / (kg/h)	冷边空气进口温度 / °C	热边供气流量 / (L/min)	热边冷却液进口温度 / °C
1	6051	5.4	235	42.1
2	7054	5.4	238.4	41.9
3	8262	5.6	242.8	42
4	8536	5.6	230.1	42.2
5	9070	5.4	233.8	41.8

表 4 计算结果

Table 4 Output result

计算状态	冷边空气出口温度 / °C	热边冷却液出口温度 / °C	换热量 / (kW)	空 - 液热交换器效率
1	32.962	38.609	46.536	0.76
2	32.289	37.984	52.924	0.746
3	31.836	37.607	60.482	0.73
4	31.767	37.425	62.323	0.724
5	31.217	36.870	65.338	0.718



图 3 使用第一种建模方法生成的 65 号冷却液模型

Fig.3 No.65 coolant model using the first modeling method

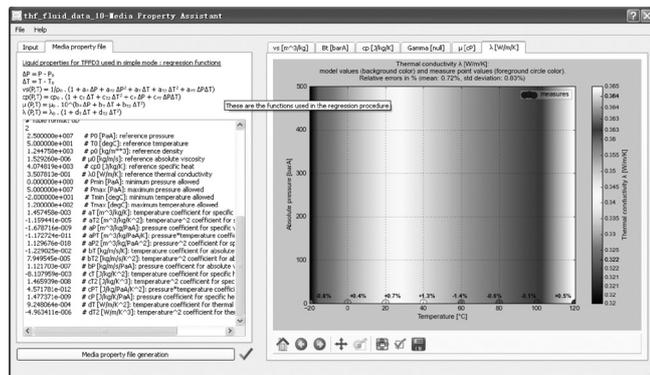


图 4 使用第二种建模方法生成的 65 号冷却液模型

Fig.4 No.65 coolant model using the second modeling method

用第一种、第二种建模方法建模生成的 65 号冷却液物性参数模型。

1.3 仿真模型

使用 AMESim 平台搭建空 - 液热交换器模型并嵌入 65 号冷却液物性参数模型后如图 5 所示。

2.2 试验设计与试验结果

(1) 试验设计

空-液热交换器试验原理如图6所示。给定空-液热交换器冷边进口流量、冷边进口温度、热边进口流量。通过调节电炉使空-液热交换器热边出口温度达到预定要求(供液温度),记录电炉功率及空-液热交换器热边温度。通过数据整理可得空-液热交换器的换热量及换热效率。

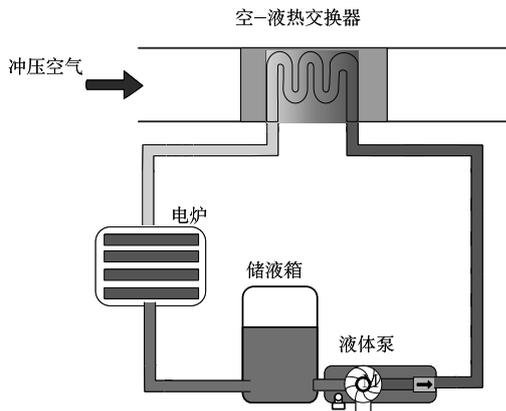


图6 空-液热交换器试验原理图

Fig.6 Test schematic diagram of air-liquid heat exchanger

(2) 试验结果

利用表3中的5种输入参数条件进行试验,得到试验结果如表5所示。

表5 试验结果
Table 5 Test results

试验状态	冷边空气出口温度/℃	热边冷却液出口温度/℃	换热量/kW	空-液热交换器效率
1	32.962	38.609	45.183	0.729
2	32.289	37.984	53.878	0.75
3	31.836	37.607	63.081	0.752
4	31.767	37.425	63.686	0.731
5	31.217	36.870	67.292	0.731

2.3 结果对比

将表4中的仿真结果与表5中的试验结果进行对比分析,可以得到空-液热交换器换热量与换热系数的对比曲线,分别如图7、图8所示。

从图7和图8中可以看出,利用AMESim平台搭建的空-液热交换器模型换热量及换热效率的仿真计算结果与试验结果几乎吻合,其误差分别在 $\pm 5\%$ 和 ± 0.031 之内,完全可以满足工程建模需求。

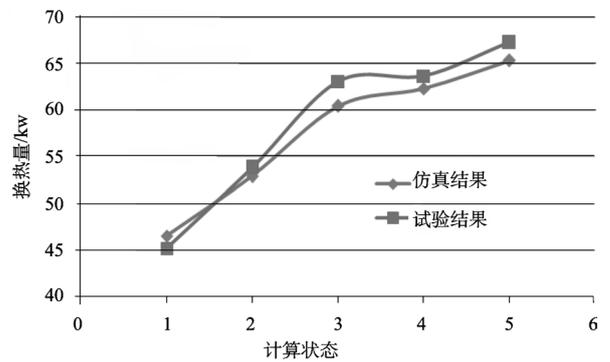


图7 仿真结果与试验结果的换热量对比

Fig.7 Comparison of air-liquid heat exchanger heat flux between simulation and test

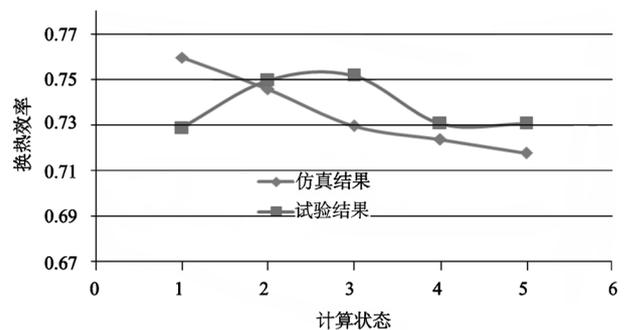


图8 仿真结果与试验结果的换热效率对比

Fig.8 Comparison of air-liquid heat exchanger heat efficiency between simulation and test

3 结束语

利用AMESim平台对液体冷却系统的关键部件空-液热交换器及所使用的冷却介质(65号冷却液)进行了仿真建模,并将仿真计算结果和试验数据进行了对比。对比结果显示,基于AMESim平台建立的空-液热交换器及所使用的冷却介质65号冷却液模型准确有效,换热量计算与试验数据误差在5%之内,满足液体冷却系统仿真建模需求,可被液体冷却系统设计与仿真借鉴使用。

AST

参考文献

- [1] 高峰,袁修干. 高性能战斗机燃油热管理系统[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(11): 1353-1356.
GAO Feng, YUAN Xiugan. Fuel thermal management system of high performance fighter aircraft [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(11): 1353-1356. (in Chinese)
- [2] 丁顺利,朱春玲,张泉,等. 环形散热器应用于液冷的数值研究[J].

飞机设计, 2014, 34 (1): 23-27.

DING Shunli, ZHU Chunling, ZHANG Quan, et al. The analysis of applying circular radiators to liquid-cooled system [J]. Aircraft Design, 2014, 34 (1): 23-27. (in Chinese)

- [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.

SHOU Rongzhong, HE Huishan. Aircraft environmental control [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2004. (in Chinese)

- [4] 余建祖. 换热器原理与设计 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.

YU Jianzu. Heat exchanger theory and design [M]. Beijing:

Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2006.

作者简介

马兰 (1980—) 女, 硕士, 高级工程师。主要研究方向: 飞机环境控制系统和液体冷却系统的设计与研究。

Tel: 029-86862721

E-mail: malan_6@163.com

李艳娜 (1981—) 女, 硕士, 高级工程师。主要研究方向: 飞机环境控制系统和液体冷却系统的设计与研究。

齐社红 (1965—) 女, 学士, 研究员。主要研究方向: 飞机环境控制系统和液体冷却系统的设计与研究。

Simulation of Air-liquid Heat Exchanger Based on AMESim

MA Lan*, LI Yanna, QI Shehong

AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China

Abstract: In order to calculate heat flux and heat efficiency of air-liquid heat exchanger, simulation models of air-liquid heat exchanger were built based on AMESim. The comparison of air-liquid heat exchanger heat flux and efficiency between simulation and test shows that the difference of result between simulation and test is very small and the simulation model can meet engineering requirement and can be applied to liquid cooling system simulation analysis.

Key Words: liquid cooling system; air-liquid heat exchanger; AMESim simulation