

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2017.03.012

民用飞机风挡防冰性能评估

Performance Analysis for Civil Aircraft Windshield Anti-ice System

徐佳佳 史献林 霍西恒 / XU Jiajia SHI Xianlin HUO Xiheng
(上海飞机设计研究院, 上海 201210)
(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

摘要:

民用飞机适航条款要求在结冰条件下应确保风挡外表面不能结冰,防止影响飞行员视界。因此应确保结冰条件下风挡具有足够的加热功率使其外表面温度高于冰点。根据防冰传热传质机理,利用 CFD 和 Matlab 相结合的方法建立了三维风挡热性能分析模型,对某型民用飞机风挡防冰性能进行评估。具体包括防冰热载荷确定、表面温度评估和关键参数校核三部分,并给出了典型飞行工况下风挡防冰热性能评估算例。

关键词:民用飞机;风挡;对流换热系数;热载荷;表面温度

中图分类号:V244.1⁺5

文献标识码:A

[Abstract] According to civil aircraft airworthiness standards, the windshield surface should avoid icing to ensure the pilot's visual field. A reasonable heating power should be determined to prevent windshield icing. Based on the heat and mass transfer theory, a 3D thermal analysis model has been developed for civil aircraft windshield anti-ice system performance analysis by making use of CFD and Matlab, including anti-ice thermal load determination, surface temperature evaluation and critical parameter modification. Performance calculation of two typical flight cases has been given at the end of this paper.

[Keywords] civil aircraft; windshield; surface temperature; anti-ice; thermal load

0 引言

由于高空云层中过冷水滴的存在,飞机穿过云层时,风挡表面可能会产生结冰,影响飞行员的视界,进而危及飞行安全^[1]。根据适航条款 CCAR 25.1419 和 25.773 的要求,民用飞机必须保证在附录 C 规定的各种结冰条件下,驾驶员在飞机各种正常姿态下沿飞行航迹均有充分宽阔的视界^[2]。因此民用飞机都配备风挡防冰系统,使用电加热的方式防止风挡表面结冰。

风挡防冰系统设计过程中,通常使用计算模拟的方式获得风挡玻璃表面的热载荷,根据热载荷需求设置合适的电加热功率以保证风挡表面在附录 C 规定的各种结冰条件下不结冰。目前,国内外关于防冰热载荷计算的研究已经较为成熟,卜雪琴,林贵平^[3]利用 FLUENT 中的欧拉两相流模型及 UDF

进行防冰热载荷计算和表面温度的预测。针对风挡防冰计算, Ross^[4-5]利用量纲分析的方法对风挡表面温度分布进行预测;韩风华^[6]等提出了一种可用于工程设计的飞机风挡防冰热载荷计算方法;徐佳佳^[7]利用数值模拟的方式进行了风挡玻璃电加热防冰研究。

本文利用 CFD 与 Matlab 自编程相结合的方法建立三维风挡防冰计算模型,对某型民用飞机风挡防冰性能进行初步评估,具体包括防冰热载荷计算、表面温度计算和关键参数校核计算。对于影响加热功率的关键因素对流换热系数,利用低速风洞试验方法测量不同工况下风挡表面对流换热系数,并利用 CFD 方法建立了一个仿真风洞模型,计算试验工况下的风挡表面对流换热系数,通过测量值来校核 CFD 计算值,获得一个修正方法,进行风挡表面对流换热系数校核,并最终使用校核后的对流

换热系数进行防冰热载荷、防冰表面温度计算。

1 计算模型和计算方法

1.1 计算模型建立

计算对象为某型民用飞机机头,采用 ICEM 软件进行机头非结构化网格划分,对近壁面附面层进行局部加密。网格总数 230 万,近壁面第一层网格间距为 0.01mm,网格质量大于 0.2。计算模型网格示意图见图 1,机身定义为壁面边界,机身对称面定义为对称面边界。

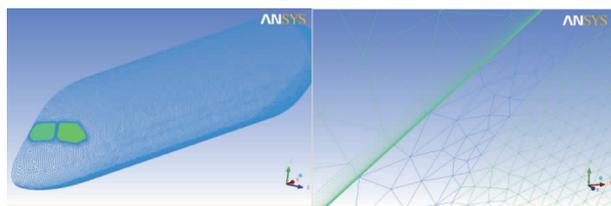


图 1 计算模型网格示意图

本文进行的防冰热载荷、防冰表面温度计算时,在处理玻璃导热问题上作以下假设:加热膜加热功率 90% 用于外表面防冰。

1.2 计算方法概述

风挡防冰性能计算采用 Fluent、FENSAP-ICE^[8] 和 Matlab 自编程序共同完成,分为防冰热载荷确定、表面温度评估和关键参数校核三部分。首先利用 Fluent 软件进行三维机头外部流场计算,得到 C_p 、 HTC 等流场数据;然后结合流场计算结果和结冰气象条件 (LWC 、 MVD) 利用 FENSAP-ICE 软件进行三维机头水滴撞击特性计算,得到局部水收集系数;最后结合流场、水滴计算结果,利用 Matlab 自编程序进行防冰热载荷和表面温度计算。

1.3 计算程序编写

在流场数据和水滴场数据的基础上防冰热载荷计算采用 Matlab 自编程序完成,思路为:给定飞行、结冰条件,防冰表面温度设置为 1.7°C ^[9],计算防冰热载荷。

根据 SAE AIR1168/4,风挡外表面热载荷计算公式为:

$$q = q_h + q_e + q_w - q_v - q_k \quad (1)$$

对流换热热流计算:

$$q_h = h(t_s - t_0) \quad (2)$$

水蒸发散热热流计算:

$$q_e = \xi_w \times h \times 1550 \times \left(\frac{e_s}{P_1} - \frac{e_0}{P_0} \right) \quad (3)$$

式中, ξ_w 为湿润系数,取 0.4; e_s 为饱和水蒸汽压; P_0 , P_1 分别为自由来流的气压和附面层外边界上的气压。温度-饱和水蒸汽压对应关系如图 2 所示。

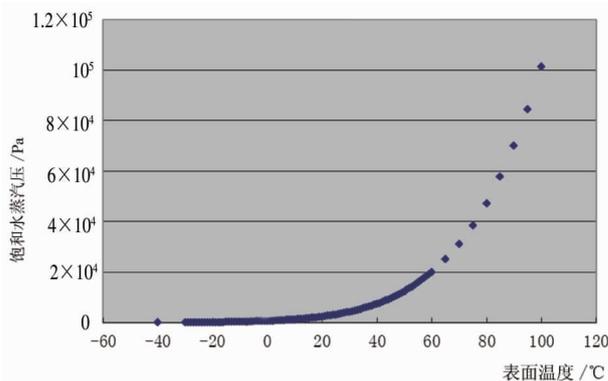


图 2 表面温度与饱和水蒸汽压对应关系

附面层摩擦加热热流计算:

$$q_v = h \times r \times \frac{V_1^2}{2 \times 1005} \quad (4)$$

加热过冷水滴所需的热流计算:

$$q_w = 4187 \times W \times (t_s - t_0) \quad (5)$$

W 为水收集量,计算公式为:

$$W = LWC \times V \times \beta \quad (6)$$

LWC 为液态水含量; β 为水收集系数。

水滴动能转变成的热流计算公式:

$$q_k = W \times \frac{V^2}{2} \quad (7)$$

将式(2)~(7)代入式(1)并化简得到:

$$q = \left\{ \begin{array}{l} (t_s - t_0) \left(4187 \frac{W}{h} + 1 \right) + 1500 \xi_w \left(\frac{e_s}{P_1} - \frac{e_0}{P_0} \right) \\ - \frac{V_0^2}{2010} \left[1 - 0.11 \left(\frac{V_1}{V_0} \right)^2 + 1005 \frac{W}{h} \right] \end{array} \right\} \times h \quad (8)$$

根据式(8)推导得表面温度计算公式:

$$t_s = \left\{ \begin{array}{l} \frac{q}{h} + \frac{V_0^2}{2010} \left[1 - 0.11 \left(\frac{V_1}{V_0} \right)^2 + 1005 \frac{W}{h} \right] / \left(4187 \frac{W}{h} + 1 \right) \\ - 1500 \xi_w \left(\frac{e_s}{P_1} - \frac{e_0}{P_0} \right) \end{array} \right\} + t_0 \quad (9)$$

式中,未知数为 t_s (表面温度) 和 e_s (饱和水蒸汽压),其中温度-饱和水蒸汽压的关系可以根据图 4 查表插值计算得到,因此可以利用 matlab 编程迭代计算求解表面温度 t_s 。

1.4 关键参数校核

考虑到风挡在机头的安装位置,风挡处的流动处于湍流的充分发展区,对于该区域,水滴蒸发相对于对流换热的热流项较小,所以影响风挡防冰热载荷和表面温度分布的关键因素是表面对流换热系数。为了获得准确的对流换热系数,本文在低速风洞中测量了不同工况下风挡表面对流换热系数,并利用 CFD 方法建立了一个仿真风洞模型,计算试验工况下的风挡表面对流换热系数,通过测量值来校核 CFD 的计算值,获得一个修正方法,确定了对流换热系数的修正系数为 1.2^[10],最终使用这个修正方法计算获得其他工况下的对流换热系数。

2 计算结果

选取典型飞行工况,计算连续最大结冰状态下风挡防冰热载荷与表面温度,状态点见表 1。

表 1 风挡防冰热载荷计算状态点

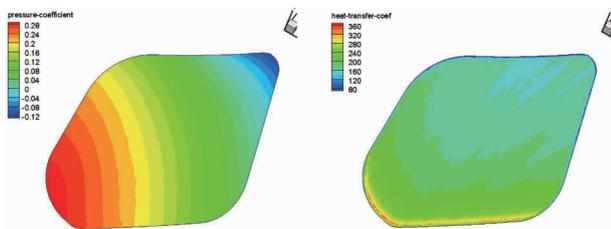
NO.	Altitude (ft)	Amb. T ($^{\circ}\text{C}$)	MVD (μm)	LWC (g/m^3)	Ma	AOA ($^{\circ}$)
1	10 000	-30	20	App. C	0.39	7.4
2	1 500	-9	20	0.35	0.25	4.9

2.1 流场计算结果

利用 Fluent 软件进行 3D 机头流场计算,边界条件设置为:远场边界定义为压力远场,机身定义为绝热壁面边界,机身对称面定义为对称边界,主风挡区域定义为恒热流壁面边界,能量方程开启,湍流模型采用 $S-A$ 模型。

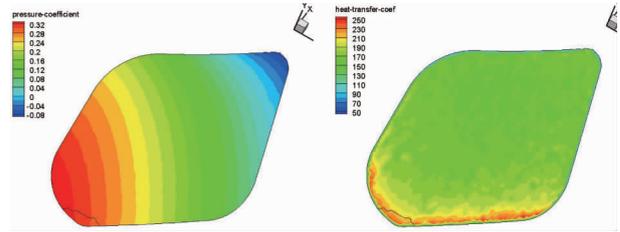
流场计算主要为了得到风挡表面修正的表面对流换热系数(HTC)分布和表面压力系数(C_p)分布,计算结果如图 3 和图 4 所示。

可以看出典型工况下的主风挡表面的对流换热系数在 $130 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K} \sim 250 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ 的范围内,分布较为合理。



(a) 主风挡 C_p 分布 (b) HTC 分布 ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)

图 3 case1 流场计算结果

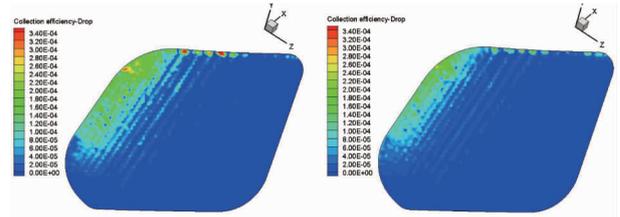


(a) 主风挡 C_p 分布 (b) HTC 分布 ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)

图 4 case2 流场计算结果

2.2 水滴撞击特性计算

基于流场的计算结果,采用 FENSAP-ICE 软件的 DROP3D 模块进行机头 3D 水滴撞击特性的计算,边界条件与机头流场计算时相同,同时增加结冰气象参数(LWC 和 MVD),机头局部水收集分布的计算结果如图 5 所示。



(a) case1 局部水收集分布 (b) case2 局部水收集分布

图 5 水滴撞击特性计算结果

计算结果显示,风挡表面的水撞击区域基本位于靠近中间窗框处,且风挡上边缘的水收集较下边缘多,而且整体水收集量较小。这与该型飞机机头形状有一定关系,机头类似钝头体,水滴撞击主要集中在雷达罩附近,风挡的安装处水收集量较小。

2.3 热载荷与表面温度计算

得到风挡表面水滴撞击特性结果后,利用 1.3 节的各项热流公式,采用 Matlab 编程进行防冰热载荷与表面温度计算,具体思路为:

- 1) 在保证外表面不结冰的条件下 ($t_s > 1.7^{\circ}\text{C}$) 计算风挡防冰热载荷,如图 6 所示;
- 2) 在给定的加热功率(额定功率 $7752 \text{ W}/\text{m}^2$) 条件下计算风挡表面温度,如图 7 所示。

case1 和 case2 的防冰热载荷与表面温度分布计算结果分别如图 8 和图 9 所示。

根据图 8 和图 9,在满足主风挡表面温度不低于 1.7°C 的防冰要求时,case1 与 case2 的防冰热载荷需求在 $2000 \text{ W}/\text{m}^2 \sim 3400 \text{ W}/\text{m}^2$ 左右。主风挡

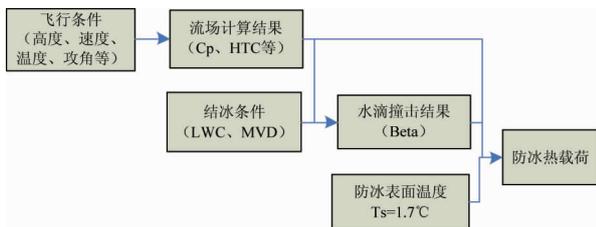


图6 风挡防冰热载荷计算流程图

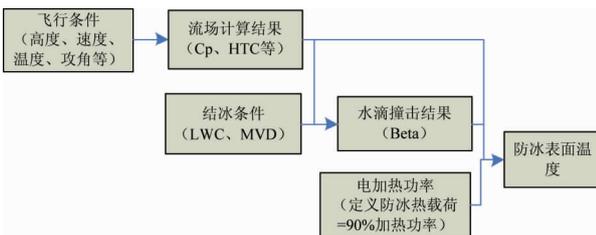
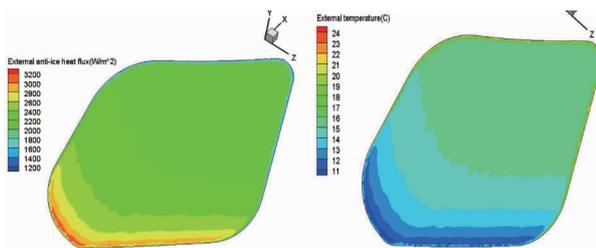
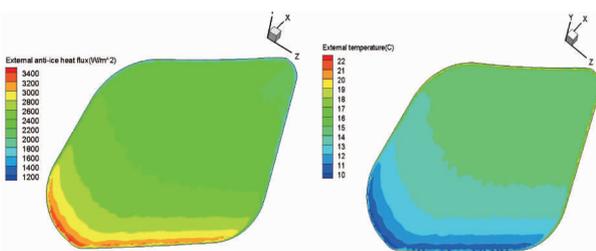


图7 风挡防冰热载荷计算流程图



(a) 防冰热载荷分布 (W/m^2) (b) 表面温度分布 ($^{\circ}C$)

图8 case1 防冰热载荷和表面温度分布



(a) 防冰热载荷分布 (W/m^2) (b) 表面温度分布 ($^{\circ}C$)

图9 case2 防冰热载荷和表面温度分布

在 $7752W/m^2$ 的额定加热功率下,外表面温度均高于 $0^{\circ}C$,平均温度在 $13^{\circ}C \sim 22^{\circ}C$ 左右,主风挡外表面加热区域内不会结冰,满足风挡加热系统的性能需求。

在通常情况下,对于大部分结冰条件,风挡加热功率输出 $3W/in^2 \sim 4.5W/in^2$ ($4650W/m^2 \sim 6975W/m^2$) 足够为风挡提供很好的防冰保护^[9],而该型飞机主风挡的加热功率为 $5.5W/in^2$ ($7752W/m^2$),可以认为系统设计是偏保守的。

3 结论

本文通过热流分析方法建立风挡防冰热力学模型,利用 CFD 和 Matlab 自编程相结合的方法进行防冰防冰热载荷计算和表面温度评估。对于影响计算结果的关键因素对流换热系数,利用低速风洞试验进行修正,并给出两个典型飞行工况下风挡防冰热载荷与表面温度的算例。计算结果表明:在设定的额定加热功率下,风挡防冰性能满足设计要求。该工程算法可用于指导风挡防冰系统设计及性能分析。

参考文献:

[1] 裘燮纲,韩风华. 飞机防冰系统[M]. 航空专业教材编审组出版,1985年6月。
 [2] 中国民航局. CCAR25-R3 中国民用航空规章第25部:运输类飞机适航标准[S]. 中国:中国民用航空局,2001。
 [3] 卜雪琴,林贵平. 基于 CFD 的水收集系数及防冰表面温度预测[J]. 北京航空航天大学学报,2007,33(10):1182-1185。
 [4] Ross R. The use of similitude in analyzing aircraft windshield anti-icing performance[C]// AIAA Aircraft systems And Technology meeting, 1979, AIAA-79-1822。
 [5] Ross R. Analysis of an airplane windshield anti-icing system[C]// AIAA 9th Atmosphere Flight Mechanics Conference, 1982, AIAA-82-1372。
 [6] 韩风华,左颜声,李东亮. 飞机风挡防冰热载荷计算[J]. 航空学报,1995,16(1):33-37。
 [7] 徐佳佳. 飞机风挡玻璃电加热防冰研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2012。
 [8] Baruzzi G, Tran P, Habashi W G. Actuator disk implementation in FENSAPICE, a 3D Navier Stokes in-flight icing simulation system[R]. 2003, AIAA-2003-0619。
 [9] Ice, Rain, Fog and Frost Protection: SAE AIR 1168/4[S]. U. S. A: Society of Automotive Engineers, 1990。
 [10] 徐佳佳,史献林,王向转. 民用飞机风挡表面对流换热系统的校核[J]. 民用飞机设计与研究,2015,1:87-90。

作者简介:

徐佳佳 男,硕士,工程师。主要研究方向:民用飞机防冰除雨系统设计。Tel: 021-20866882, E-mail: xujiajia@comac.cc
 史献林 男,硕士,高级工程师。主要研究方向:民用飞机防冰除雨系统设计。Tel: 021-20866876, E-mail: shixianlin@comac.cc
 霍西恒 男,硕士,高级工程师。主要研究方向:民用飞机防冰除雨系统设计。Tel: 021-20866874, E-mail: huoxiheng@comac.cc