

# 风挡防冰热性能分析工程模型的建立和验证

## Establishment and Verification of Engineering Model for Windshield Anti-ice Thermal Analysis

史献林 杨胜华 / Shi Xianlin Yang Shenghua

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

### 摘要:

为表明飞行条件和结冰条件所有组合下防冰能力是足够的,分析了风挡的设计需求和流场特性,建立了理论上保守的工程模型,确定了模型的关键系数;通过飞行试验数据修正了关键系数并验证了模型;该模型能够便捷地使用常用的编程语言甚至 EXCEL 内置函数实现对所有组合状态的性能分析,其结果能够支持适航取证及 CFD 计算状态筛选。

**关键词:**风挡;防冰;热性能;验证;工程模型

**中图分类号:**244.1+5

**文献标识码:**A

[Abstract] To indicate the capability of windshield anti-ice is adequate under all combinational cases of flight envelope and icing condition, the design requirement and flow field characteristics of windshield is analyzed, a theoretical conservative engineering model of windshield anti-ice thermal analysis is established. Key coefficient of the model is corrected and verified by flight test data. The model can be implemented by general programming language or EXECL internal function to deal with thermal analysis under all combinational cases. The results could support airworthiness certification or filter CFD cases.

[Key words] windshield; anti-ice; thermal analysis; verification; engineering model

## 0 引言

飞机主风挡通过电加热对外表面进行防冰是保证驾驶舱视界的必要措施,应按 25.1419 条款要求,通过分析表明飞行条件和结冰条件所有组合状态(下文称为全包线)下防冰能力是足够的,且分析必须通过飞行试验验证。

基于以下原因,本文认为建立一个理论上保守,且经过飞行试验数据修正和验证后,其计算结果同样保守的工程模型是十分必要的。

(1) 风挡防冰的加热功率设计需求是使用特定电功率进行均匀加热,即风挡防冰区电功率相同,不需要分区变功率加热,相应的热性能分析时计算一个保守的平均加热功率是可行的;

(2) 全包线的状态至少包括数千种组合,全部使用三维 CFD 分析耗费的时间和人力资源较大,使用理论分析和工程模型对计算状态进行筛选是合适的方法。该模型能够便捷地使用编程语言甚至 EXCEL 内置函数实现,其结果能够支持适航取证及 CFD 计算状态筛选。

本文将通用的热性能分析模型—物理问题具体分析(风挡防冰的特点)—建立工程应用的分析模型—飞行试验数据验证的思路进行描述。

## 1 通用的热性能分析模型

飞机表面防冰状态下的热流项,包括对流散热和气动加热(统称为对流项)、过冷水滴动能转化的热能和加热过冷水滴热流(统称为水滴项)、蒸发散

热和辐射散热。一般认为风挡外表面辐射散热损失很小,可忽略<sup>[1-2]</sup>。

## 2 风挡的设计需求和流场特点

### 2.1 风挡加热功率的设计需求

某型民机风挡防冰是典型的湿态防冰系统,要求以较小的恒定电加热功率(大的加热功率虽然能够获得高的表面温度,但其加载和卸载增加了玻璃的热应力,影响玻璃的服务寿命)对防冰区进行均匀加热,保证全包线下风挡外表面温度高于 $0^{\circ}\text{C}$ <sup>[1-2]</sup>,并不需要对风挡防冰区的不同部位采用不同的加热功率进行加热,这与机翼或短舱的防冰需求是不同的。使用理论上保守的平均对流系数,总水收集系数和湿润系数,求解恒定加热功率,而不必求解风挡外表面加热功率分布。

### 2.2 风挡的流场和水滴撞击特性

某型民机机头为钝头体,风挡位置远离气流滞止区,为充分发展的紊流状态,流场变化较平缓,过冷水滴主要撞击在主风挡左下角的非防冰区,该区在最小视觉范围之外,对于整个风挡防冰区而言,总水收集系数一般在 $10^{-2}$ 级别,本文经过分析和实践认为该风挡的水收集系数不需要进行修正,使用计算值即可。

图1直观地描述了某型民机风挡的水滴撞击特性,可见过冷水滴主要撞击到了左下角的非防冰区(线框内为防冰区),防冰区中水滴撞击范围约占防冰区总面积的五分之一,且水滴收集系数范围在 $0.02 \sim 0.03$ 之间。

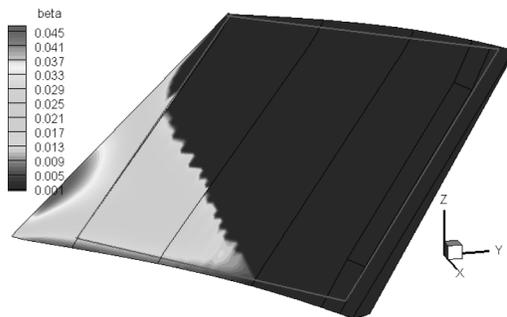


图1 风挡水滴撞击特性示意图

## 3 工程应用的分析模型

根据通用的热性能分析模型,结合风挡加热功率的设计需求和流场特点,建立的工程模型如下。本文将着重说明本模型的特点,对于通用的公

式<sup>[1-2]</sup>将不再展开。

### 3.1 对流热流

考虑气动加热温升后的对流热流,见式(1)。

$$q_{fc} = h(t_s - t_a) \quad (1)$$

其中:

$h$  为平均对流系数,  $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ , 见式(2);  $t_s$  为风挡外表面温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_a$  为总温恢复温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

$$h = K_h \times 1.1538 \times (\rho_{\text{air}} \times V_0)^{0.8} \times T_m^{0.292} \times L_x^{0.8} \quad (2)$$

其中:

$V_0$  为自由来流的速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $\rho_{\text{air}}$  为空气密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $T_m$  为表面温度和自由来流的平均温度;  $L_x$  为主风挡的特征长度, 机头驻点到主风挡中心距离;  $K_h$  为对流系数的修正系数, 用于干空气飞行试验数据修正平均对流系数。

由于风挡外表面大部分为气流加速区, 式(1)中总温恢复温度代替附面层恢复温度, 式(2)中自由来流速度代替了局部速度, 理论上该简化偏保守。

### 3.2 水滴热流

考虑过冷水滴动能转化热能后温升的水滴热流, 见式(3)。

$$q_w = 4187 \times M_w \times (t_s - t_w) \quad (3)$$

其中:

4187 为水的比热,  $\text{J}/\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$ ;  $t_w$  为水滴的总温, 考虑水滴动能转化为热能后引起的动力温升;

$M_w$  为单位面积单位时间的撞击水量,  $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ , 见式(4)。

$$M_w = V_0 \times LWC \times E_m \times (A_f/A_s) \times \cos(AOA) \quad (4)$$

其中:

$LWC$  为自由来流中的液态水含量,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $(A_f/A_s)$  为投影比,  $A_f$  为主风挡在航向方向的投影面积,  $\text{m}^2$ ;  $A_s$  为主风挡面积,  $\text{m}^2$ ;  $\cos(AOA)$  为考虑攻角的影响;  $E_m$  为总水收集系数, 该系数计算方法在参考文献[1-2]中提供。

### 3.3 蒸发热流

蒸发热流, 见式(5)。

$$q_{\text{evp}} = \xi_w \times M_{\text{evp}} \times L_{\text{evp}} \quad (5)$$

其中:

$\xi_w$  为湿润系数, 将通过自然结冰试飞数据进行修正;  $L_{\text{evp}}$  为蒸发潜热,  $2.566 \text{J}/\text{kg}$ ;  $M_{\text{evp}}$  为过冷水滴在单位时间单位面积的理论蒸发量,  $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ , 计算中若该值大于撞击水量, 取撞击水量计算蒸发热流。

### 3.4 加热热流

加热热流为上述各项热流之和,并考虑适当的向内传热比,一般取5%<sup>[1]</sup>。根据加热热流和风挡防冰区面积即可确定电加热功率。

## 4 模型的验证

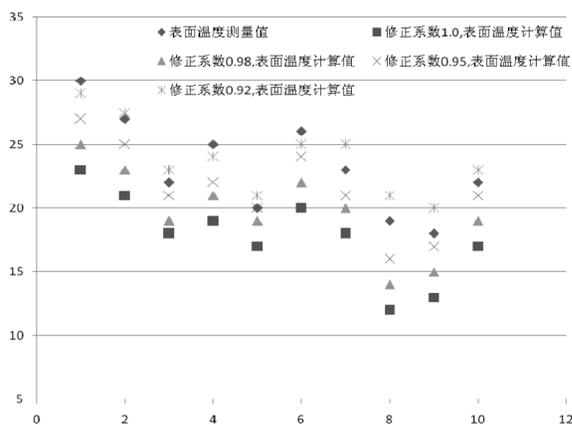
### 4.1 验证思路

热性能分析模型的验证主要是确定对流系数,水滴收集系数和湿润系数。对流系数影响对流项,水滴收集系数影响水滴热流项,对流系数影响传热系数继而影响理论蒸发量,湿润系数表征防冰区中的水滴撞击范围与防冰区总面积的占比,用于确定实际蒸发量继而影响蒸发散热。

干空气试飞数据是对流项作用的结果,通过其数据确定对流换热系数,即验证了蒸发项;自然结冰试飞数据是对流项、水滴项和蒸发项的综合结果,因为对流换热系数已验证,所以除了水滴项和蒸发项中的理论蒸发量外,需要对水滴项和蒸发项中的实际蒸发水量,通过自然结冰试飞数据确定湿润系数来进行验证。

### 4.2 对流系数的确定

以干空气试飞的飞行条件和风挡的实际加热功率为输入,式(2)中的修正系数分别取1.0、0.98、0.95和0.92试算,获得计算的风挡外表面平均温度,如图2所示;按计算偏差较小且保守的原则,可见修正系数取0.95是合适的,0.92偏差较大但部分状态下计算值高于测量值。



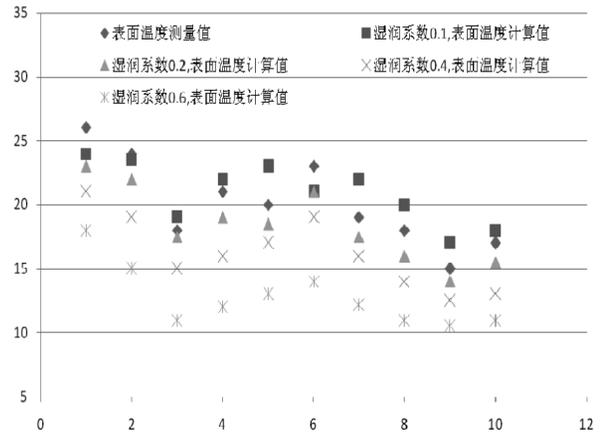
(注:数据仅用于说明本文的验证方法,非真实的试飞数据。)

图2 对流系数的确定示意图

### 4.3 湿润系数的验证

以自然结冰试飞的飞行条件和结冰条件,以及风挡的实际加热功率为输入,湿润系数分别取0.1、0.2、

0.4和0.6试算,获得计算的风挡外表面平均温度,如图3所示;按计算偏差较小且保守的原则,可见湿润系数取0.2是合适的。如果能够获得结冰条件下风挡的水滴撞击特性或结冰照片,根据水滴撞击或结冰范围与防冰的占比,可初步确定湿润系数用于试算。



(注:数据仅用于说明本文的验证方法,非真实的试飞数据)

图3 湿润系数的确定示意图

## 5 实现

该模型以飞行条件(飞行高度和飞行速度)、结冰条件(液态水含量和水滴直径、温度)、风挡特征参数和加热功率为输入条件,能够获得某型飞机飞行包线和结冰条件所有组合状态的风挡平均温度及各热流项。该模型能够便捷地使用编程语言甚至EXCEL内置函数实现。

## 6 结论

本文针对某型民机风挡防冰热性能分析的适航需求,建立了一个理论上保守,并能够对飞行条件和结冰条件所有组合状态进行风挡热性能分析模型,并提供了飞行试验数据对模型关键系数的修正方法,确定了适用于某型民机风挡防冰热性能分析的工程模型,该模型的计算结果能够支持适航取证及CFD计算状态筛选。

### 参考文献:

- [1] SAE AIR 1168-4, Ice, Rain, Fog, and Frost Protection [S]. USA: SAE Aerospace, 2004. 6.
- [2] 裘燮纲, 韩风华. 飞机防冰系统[M]. 航空专业教材编审, 1985.