

文章编号: 2095-2163(2021)11-0088-04

中图分类号: V244.1+5

文献标志码: A

# 电脉冲除冰系统积冰检测的数值仿真与分析

潘炜琛, 李清英, 郝路

(上海工程技术大学 航空运输学院, 上海 201620)

**摘要:**为实现防除冰系统一体化,本文提出一种利用低压电脉冲除冰系统作为热激励进行积冰检测的技术,从理论角度论述了基于电路-电磁-传热耦合物理场的原理,并运用有限元数值仿真求解了各物理场状态,得到了积冰表面温度分布状况。同时讨论了设计参数如间距、放电电压、蒙皮厚度这3个参数对积冰表面温度的影响,得出了蒙皮-线圈间距越小、蒙皮厚度越小、放电电压越大,越能有效提高积冰表面温度,可改善积冰检测效果的结论。该方法为防除冰系统一体化设计提供了分析思路。

**关键词:**电脉冲除冰; 积冰检测; 温度分布; 数值仿真; 设计参数

## Numerical simulation and analysis of infrared icing detection in electro-impulse de-icing system

PAN Weichen, LI Qingying, HAO Lu

(School of Air Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**【Abstract】**In order to realize the integration of anti-icing and de-icing system, in this paper, a technology of ice accretion detection using low-voltage electro-impulse de-icing system as thermal excitation is proposed. From a theoretical point of view, this method is based on the principle of circuit electromagnetic heat transfer coupled physical field. The states of each physical field are solved by finite element numerical simulation, and the temperature distribution on the ice surface is obtained. At the same time, the effects of design parameters such as spacing, discharge voltage and skin thickness on the icing surface temperature are discussed. It is concluded that the smaller the skin coil spacing, the smaller the skin thickness and the larger the discharge voltage can effectively improve the icing surface temperature and improve the icing detection effect. This method provides an analytical idea for the integrated design of anti-icing and de-icing system.

**【Key words】**electro-impulse de-icing; Ice accretion detection; temperature distribution; numerical simulation; design parameter

## 0 引言

飞机在飞行过程中会进入云层,云层中的过冷大液滴极易在机翼上形成积冰,极大的影响飞机的空气动力性能,甚至造成重大事故,因此对飞机进行防除冰检测显得尤为重要,各种结冰探测与防除冰系统应运而生<sup>[1]</sup>。电脉冲除冰系统(EIDI)属于机械除冰方式,最早1972年应用于苏联的飞机上<sup>[2]</sup>。该系统由于结构简单、体积小、质量轻、能耗少、运行效率高,受到学者们的关注。结冰探测是防除冰工作的前提条件,准确探知防护表面结冰情况、测量结冰范围与厚度、传递结冰信息到控制器或向工作人员报警,以便采取相应措施,减少结冰损失,降低结冰危害。目前常用的结冰探测方法按照工作原理可以划分为机械式(磁致伸缩式、平膜式)、光学式(光纤式、激光扫描法、摄像法)、热学式(红外辐射)、波

导式(超声导波、超声回波)等方法<sup>[3]</sup>。

在现有结冰探测与防除冰系统的研究中,这两者通常是独立体系。电脉冲除冰系统通过电路对线圈放电,从而使线圈产生脉冲电流,在积冰粘附的蒙皮表面产生涡流电,从而产生瞬态电磁力,该力是积冰去除的主要动力<sup>[4]</sup>。但电磁力产生的同时,会伴随电磁热效应,如果利用红外热像仪记录积冰的电磁涡流温度变化,再通过红外热波图像处理技术进行积冰及残留状态的定量识别<sup>[5-6]</sup>。可在探索积冰探测新途径的同时,实现适时跟踪积冰状态的目标,可为除冰能量视情输出、系统状态监控、系统优化设计、积冰探测与防除冰一体化研究奠定基础。本文基于该思路分析了一种结合电脉冲除冰与红外热波检测进行积冰探测的理论,并通过计算机数值仿真论证该方法的可行性。

**作者简介:**潘炜琛(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向:飞机防除冰技术与红外无损检测;李清英(1982-),女,博士,讲师,主要研究方向:

飞机防除冰技术与红外无损检测;郝路(1996-),男,硕士研究生,主要研究方向:红外无损检测与飞机防除冰技术。

**通讯作者:**李清英 Email: liqy\_2013@163.com

收稿日期: 2021-09-09

## 1 低压电脉冲除冰系统积冰探测理论

低压电脉冲除冰系统积冰探测包括除冰系统和红外热波检测系统两部分, 是一个电路-电磁-结构-传热的多物理场耦合系统, 如图 1 所示。当触发电脉冲除冰系统, 脉冲电流经过电磁涡流线圈, 产生一个瞬态的电磁涡流场, 同时伴随电磁热的形成, 该温度场是红外热像仪记录红外图像并用于图像分析处理的依据。

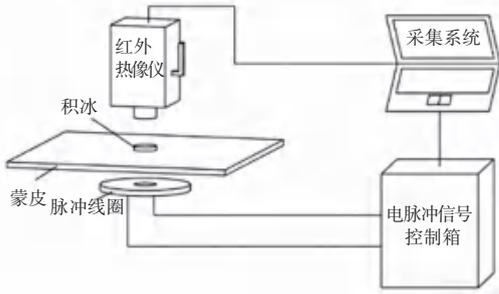


图 1 电脉冲除冰系统积冰红外热波检测示意图

Fig. 1 Schematic diagram of infrared thermal wave detection of EID

本文为保证检测到原始积冰冰形, 将电脉冲除冰系统的除冰电压设定在低电压状态, 主要研究该系统电路-电磁-传热物理场的耦合情况, 并按间接耦合法分析各物理场作用, 以求解积冰的温度分布。

电脉冲除冰系统的控制电路可简化为 RLC 振荡电路, 电流控制方程的表达式如式(1):

$$LC \frac{d^2 I}{dt^2} + RC \frac{dI}{dt} + I = 0 \quad (1)$$

式中,  $L$  为电感;  $C$  为电容;  $R$  为电阻;  $I$  为源电流;  $t$  为脉冲时间。

依据式(1)中得到的电流求得源电源密度, 源电源密度方程如式(2):

$$J_s = \frac{I}{S} \quad (2)$$

式中,  $S$  为物体的表面积。

将式(2)中得到的源电源密度  $J_s$  带入电磁涡流场的控制方程如式(3):

$$J_e + \tilde{\mathbf{N}} \times \frac{\partial \tilde{\mathbf{A}}}{\partial t} - \frac{\sigma_e}{\sqrt{\mu_e \varepsilon_e}} \times (\tilde{\mathbf{N}} \times \mathbf{A}) = \sigma_e \frac{U_{coil}}{2\pi r_{coil}} + J_s \quad (3)$$

式中,  $\mathbf{A}$  为矢量磁位;  $\sigma_e$  为积冰粘附基板的电导率;  $J_e$  为涡流密度;  $J_s$  为源电源密度;  $\mu_e$  为基板的磁常

数;  $\varepsilon_e$  为基板的介电常数;  $U_{coil}$  为线圈电势;  $r_{coil}$  为线圈有效半径。

由式(3)中得到的涡流密度  $J_e$  可以得到有感应电磁涡流场所产生的热效应, 其基本表达式(4)为:

$$Q_e = \frac{1}{\sigma_e} |J_e|^2 = q_e A_s \Delta T \quad (4)$$

式中,  $Q_e$  为涡流产生的焦耳热, 是与积冰粘附基板电物性参数及电路电流相关的函数;  $A_s$  为传热面积;  $\Delta T$  为传热温差;  $q_e$  为电磁涡流焦耳热的热流密度。

分析脉冲线圈产生的热之后, 对传热进行分析: 积冰的传热特性, 其三维瞬态导热非线性模型的传热表达式(5)如下:

$$\rho(T) c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (5)$$

式中,  $T$  为积冰的瞬态温度值;  $\rho$  为密度;  $\lambda$  为导热系数;  $c$  为比热容。

积冰下表面为与蒙皮接触部分, 该部分接受由蒙皮产生的涡流热, 属于第二类边界条件, 其表达方程(6)为:

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} + \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} + \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} = q_e \quad (6)$$

积冰上表面及侧表面为与空气接触部分, 与空气进行传热, 属于第三类边界条件, 其表达方程(7)为:

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} + \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} + \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} = h(T_{\infty} - T) \quad (7)$$

电脉冲除冰系统的积冰检测激励来源于储能电容的放电电压, 分析式(1)~(6)各物理场的参数间的耦合关系, 相继计算出电路电流, 再进一步通过积冰的有限元数值模拟可获得积冰的温度分布值。

## 2 积冰探测的数值模拟

针对积冰探测研究, 联合运用三维软件 UG 和有限元分析软件 ANSYS Workbench 建立积冰的有限元耦合分析模型。首先, 在三维软件 UG 中建立系统的 3D 模型, 包括积冰、脉冲线圈与粘附蒙皮, 其中积冰的直径为 40 mm, 厚度为 4 mm, 蒙皮大小为 300×300 mm<sup>2</sup>, 厚度为 1 mm, 脉冲线圈内径为 18 mm, 外径为 78 mm, 线圈高度为 5 mm; 将模型导入到有限元分析软件 ANSYS Workbench 中, 运用六面体八节点单元划分这 3 个物体, 如图 2 所示。



图2 积雪检测有限元分析模型

Fig. 2 Finite element analysis model of icing detection

根据测量,脉冲线圈的参数如下:  $R = 98.8 \text{ m } \Omega$ ,  $L = 140 \text{ } \mu\text{H}$ ,  $C = 1\ 000 \text{ } \mu\text{F}$ , 给定放电电压为200 V。根据上述参数,在 Workbench 中对每个部件完成材料属性的设置,其材料属性见表1。在进行电脉冲电磁耦合分析时,积雪为非导体,可先将其材料属性设为真空。

表1 电磁场中材料属性表

Tab. 1 Material properties in electromagnetic field

材料	相对磁导率	导电性 $s/m$
粘附蒙皮(铝)	1	$3.774 \times 10^7$
脉冲线圈(铜)	1	$5.8 \times 10^7$

根据上述模型以及激励条件,可利用电磁场涡流分析法计算得到粘附蒙皮表面电磁涡流密度,如图3所示;再进一步根据计算得到的欧姆热损耗运用到积雪的热场仿真中,从而获得积雪表面的温度分布云图,如图4所示;沿蒙皮截面中心线取相应节点,读取其温度变化值,可得其分布及变化趋势,如图5所示。

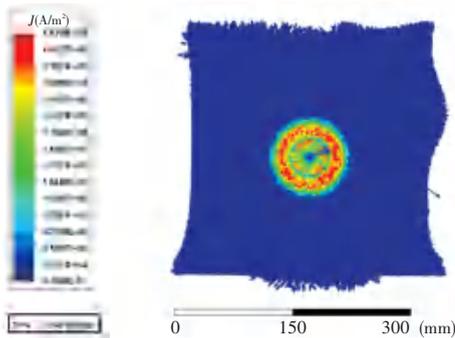


图3 蒙皮表面涡流分布云图

Fig. 3 Cloud diagram of eddy current distribution on skin surface

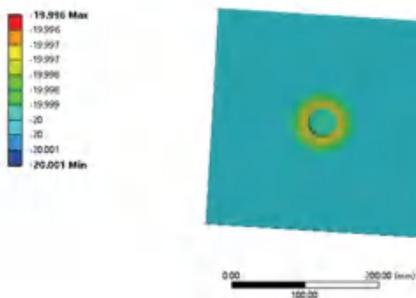


图4 积雪表面温度分布云图

Fig. 4 Cloud diagram of ice surface temperature distribution

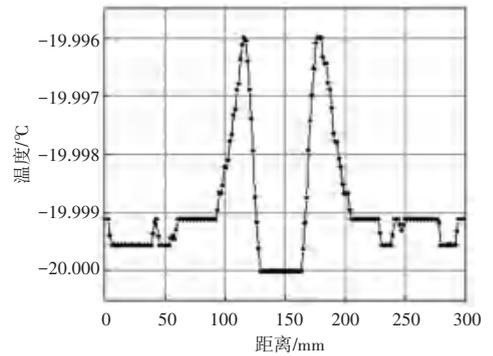


图5 蒙皮截面中心处的温度分布值

Fig. 5 Temperature distribution at the center of skin section

由图3~图5可以看出,脉冲线圈电磁涡流密度及温度分布趋势呈中心低、两端高的双驼峰形状,且沿线圈半径的1.5倍位置外影响几乎可以忽略不计,温度分布与电磁涡流密度分布趋势一致,高温区集中在线圈上方的内外径中间部位。

### 3 参数分析

采用数值仿真方法可以求解积雪的电路-电磁-传热耦合分析模型,并得到积雪表面的温度值。为进一步研究不同设计参数如蒙皮-铝板的间距、蒙皮厚度及电压对积雪温度分布的分布规律,在保持与仿真模型所述参数一致的前提下,仅改变其中一个设计参数,求解得到积雪表面温度随参数的变化情况。为便于统一分析比较,采用归一化公式将有限元分析得到的温度值进行归一化处理,其公式(8)为:

$$X(i) = \frac{x(i) - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad (8)$$

式中,  $x(i)$  为所选点处温度值;  $\min(x)$  为最小温度值;  $\max(x)$  为最大温度;  $X(i)$  为归一化后的数据集。

运用有限元分析方法,得到蒙皮-铝板的间距、蒙皮厚度及电压对积雪温度的影响,如图6~8所示。

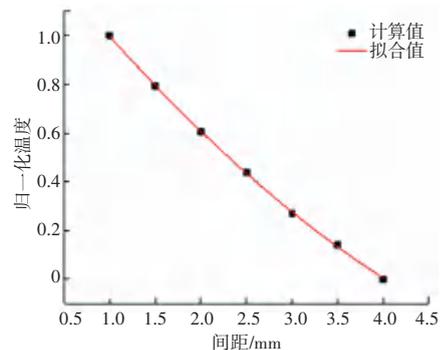


图6 温度随蒙皮-线圈间距的变化关系

Fig. 6 Variation of temperature with skin coil spacing

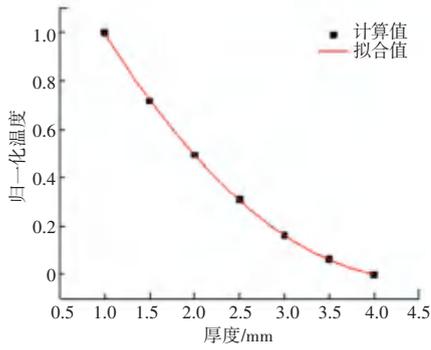


图 7 温度随厚度的变化关系

Fig. 7 Variation of temperature with thickness

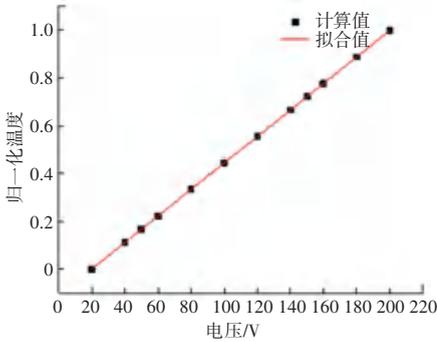


图 8 温度随电压的变化关系

Fig. 8 Variation of temperature with voltage

由图 6~8 可知,随着间距的增大,积冰表面的温度随之减小;当蒙皮厚度增加时,积冰表面的温度呈下降趋势;但随着放电电压的增加,积冰表面的温度值随之增大。其原因在于这 3 个设计参数均会影

响蒙皮表面的涡流密度,从而改变粘附在其上的积冰的热耗散量,进而改变积冰表面温度值,温度值的下降会增大红外热像仪的数值读取的难度。为检测到积冰冰形,适当增大放电电压、减小间距和蒙皮厚度会提高积冰表面温度,从而有效改善红外热图质量。

## 4 结束语

本文提出利用低压电脉冲除冰系统作为热激励进行积冰检测的技术,从理论与数值仿真的角度论证了该方法的可行性,并探讨了设计参数对积冰检测的影响,该技术可用于指导系统的设计与优化。

## 参考文献

- [1] LEVIN I A. USSR electric impulse de-icing design[J]. Aircraft Engineering, 1972, 44(7): 7-10.
- [2] Endres M, Sommerwerk H, Mendig C, et al. Experimental study of two electro-mechanical de-icing systems applied on a wing section tested in an icing wind tunnel [J]. CEAS Aeronautical Journal, 2017, 8(3): 429-439.
- [3] 高珂, 张永杰, 朱永峰, 等. 机翼电脉冲除冰效果的仿真分析[J]. 空气动力学学报, 2016, 34(6): 725-731.
- [4] MUÑOZ C Q G, MÁRQUEZ F P G, TOMÁS J M S. Ice detection using thermal infrared radiometry on wind turbine blades [J]. Measurement, 2016, 93: 157-163.
- [5] 易贤, 王斌, 李伟斌, 等. 飞机结冰冰形测量方法研究进展[J]. 航空学报, 2017, 38(2): 18-29.
- [6] WANG Y, XU Y, HUANG Q. Progress on ultrasonic guided waves de-icing techniques in improving aviation energy efficiency [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 79: 638-645.

(上接第 87 页)

- [8] SCARSELLI F, GORI M, TSOI A C, et al. The graph neural network model[J]. IEEE transactions on neural networks, 2008, 20(1): 61-80.
- [9] VELIKOVI P, CUCURULL G, CASANOVA A, et al. Graph attention networks[J]. arXiv preprint arXiv:1710.10903, 2017.
- [10] Huang Y, Bi H, Li Z, et al. Stgat: Modeling spatial-temporal interactions for human trajectory prediction [C]//Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. 2019: 6272-6281.
- [11] GUPTA A, JOHNSON J, FEI-FEI L, et al. Social gan: Socially acceptable trajectories with generative adversarial networks [C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2018: 2255-2264.
- [12] MESSAOUD K, YAHIAOUI I, VERRONST-BLONDET A, et al. Non-local social pooling for vehicle trajectory prediction [C]//2019 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). IEEE, 2019: 975-980.
- [13] MESSAOUD K, YAHIAOUI I, VERRONST-BLONDET A, et al. Attention based vehicle trajectory prediction [J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2020, 6(1): 175-185.
- [14] KATHAROPOULOS A, VYAS A, PAPPAS N, et al. Transformers are rnns: Fast autoregressive transformers with linear attention

[C]//International Conference on Machine Learning. PMLR, 2020: 5156-5165.

- [15] KITAEV N, KAISER Ł, LEVSKAYA A. Reformer: The efficient transformer[J]. arXiv preprint arXiv:2001.04451, 2020.
- [16] SUNDERMEYER M, SCHLÜTER R, NEY H. LSTM neural networks for language modeling [C]//Thirteenth annual conference of the international speech communication association. 2012: 194-197.
- [17] Bello I. Lambdanetworks: Modeling long-range interactions without attention[J]. arXiv preprint arXiv:2102.08602, 2021.
- [18] SCHNEIDER N, GAVRILA D M. Pedestrian path prediction with recursive bayesian filters: A comparative study [C]//German Conference on Pattern Recognition. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013: 174-183.
- [19] KUEFLER A, MORTON J, WHEELER T, et al. Imitating driver behavior with generative adversarial networks [C]//2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). IEEE, 2017: 204-211.
- [20] MESSAOUD K, YAHIAOUI I, VERRONST-BLONDET A, et al. Non-local social pooling for vehicle trajectory prediction [C]//2019 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). IEEE, 2019: 975-980.