

文章编号: 1000-8055(2008)10-1753-06

改进的电热除冰系统仿真

常士楠, 艾素霄, 霍西恒, 袁修干

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 建立了电热除冰系统矩形微段的二维简化物理模型, 采用焓法模型建立相变导热问题的微分控制方程, 用控制容积法对该模型的控制方程及其边界、初始条件进行离散, 使用块修正技术对原有的离散方程组的求解方法进行了改进, 得到各个时刻的温度分布及冰的融解情况. 计算结果与文献实验结果吻合, 验证了改进的算法和程序的正确性. 并计算分析了时间步长的选择、网格的划分对计算结果的影响.

关 键 词: 电热除冰; 数值仿真; 焓法; 块修正技术

中图分类号: V244.1⁺⁵

文献标识码: A

Improved simulation of electrothermal de-icing system

CHANG Shi-nan, AI Su-xiao, HUO Xi-heng, YUAN Xiu-gan

(School of Aeronautic Science and Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A two-dimensional rectangular geometry used to simulate the electro-thermal de-icing system was modeled. The enthalpy method was applied to establish heat conduction governing equations considering the phase change. The control volume method was adopted to discretize the governing equations, as well as initial and boundary conditions. The block-correction technique was used to improve the solving of the difference equations system. Comparison was made with previous studies of foreign paper and excellent agreement was achieved, documenting the validity of the improved numerical codes. The effects of time step and grid on the results of the simulation were analyzed.

Key words: electrothermal de-icing; numerical simulation; enthalpy method; block-correction technique

飞机在结冰气象条件下亚声速飞行时, 在一些部件表面容易出现结冰. 部件结冰对飞机气动外形有很大的影响, 从而对飞行安全构成很大的威胁, 因此飞机通常都配备必要的防、除冰系统.

目前已有多种防、除冰方法, 其中常用的一种是电热除冰系统. 电加热除冰系统的目的是使机翼等部件表面的界面温度上升到冰的熔点以上, 从而使表面上的冰融化而形成很薄的液体层, 这样在气动力或离心力作用下冰层从结冰部件表面脱落, 保证了飞机的飞行安全.

为了验证和改善防除冰系统性能, 国外研究机构对电热除冰系统进行了大量的数值模拟计算和实验研究, 获得了许多有价值的数据、资料^[1]. 而我国由于缺少实验手段和先进的试验设备, 在这方面的研究起步较晚, 并且很多时候还运用图解法和估算方法. 本文所研究的课题正是在这样的背景下产生的, 从理论计算上对周期电热除冰系统进行了仿真计算. 与图解法和工程估算法相比, 数值计算方法可以提高除冰系统设计的精确度, 减少过多的能量浪费.

收稿日期: 2007-10-12; 修订日期: 2008-05-20

作者简介: 常士楠(1968 -), 女, 山西榆次人, 副教授, 博士, 主要研究方向为机载热管理, 飞机防/除冰技术.

1 建立模型

1.1 物理模型

电热除冰系统的主要部件是加热器,它安装在蒙皮表面.机翼等迎风部件要有一定的耐雨滴、沙粒等侵蚀的能力,故一般电加热器由耐蚀保护层、加热层、内外绝热层 4 部分组成^[2].本文对于不同物性材料的界面处假设各层材料的物性参数不随环境参数等的改变而变化,层与层之间接触良好,同时对于界面处的当量导热系数按照界面上热流密度连续的原则采用调和平均法计算.如图 1 所示为一种加热条布置方式,即沿机翼前缘展向表面分布有多个加热条,加热条之间存在间距.取加热条中心和间距中心之间的微段作为研究对象,建立电热除冰系统的二维简化物理模型^[3],如图 2 所示.

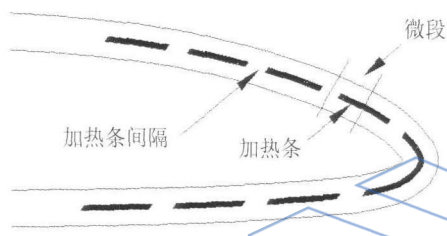


图 1 加热条在机翼前缘的分布

Fig. 1 Cross section of a leading edge with heat pad

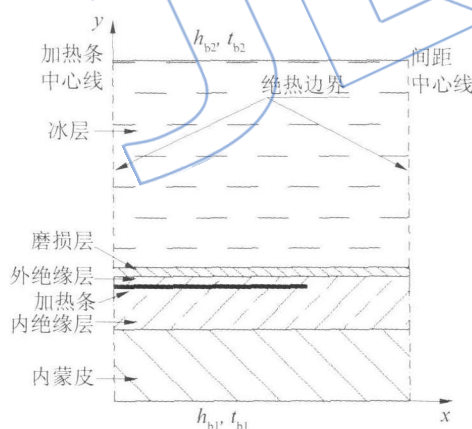


图 2 电热除冰微段的二维物理模型

Fig. 2 Two-dimensional model of de-icer

1.2 数学模型

为了简化,对上述物理模型做如下假设:

- 1) 系统各层材料的物性参数不变;
- 2) 层与层之间接触良好;
- 3) 微段各处冰层厚度一定,事实上冰的厚度沿机翼表面是变化,可由表面的传热传质分析得到^[4];

4) 取与微元内、外表面接触的空气温度 t_{b1} , t_{b2} 和对流换热系数 α_{b1} , α_{b2} 为已知常量,事实上 α_{b2} 也是沿机翼表面变化的,可由传热分析得到^[5].

除冰过程是一个伴随着固液相变的传热问题,各层的二维非稳态导热方程如下^[6]:

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \kappa \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) + q \quad (1)$$

式中 ρ 为密度 (kg/m^3), c 为比热容 ($\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$), t 为温度 ($^\circ\text{C}$), τ 为时间 (s), κ 为导热系数 ($\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$), q 为内热源 (W/m^3).

对于冰层需要考虑相变,通常的做法是利用焓法给出冰层的导热控制方程^[3]

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\kappa \frac{\partial t}{\partial y} \right) \quad (2)$$

式中 H 为焓 (J/kg).

水在相变的过程中 t 与 H 的关系为

$$H = \begin{cases} \rho_s c_s t, & t < t_m \\ \rho_L c_L (t - t_m) + \rho_L (c_s t_m + \lambda), & t > t_m \end{cases} \quad (3)$$

式中下标 s 表示冰,下标 L 表示水; t_m 为冰的相变温度; λ 为相变潜热 (J/kg).

文献[3]针对除冰层以外各层使用方程(1),对冰层使用方程(2),文献[7]对所有层都采用焓法模型,即方程(2).本文则对所有层都使用方程(1),先假设冰层各节点的相,再根据计算得到的各点温度利用式(3)修正各点的相、温度及物性参数,进行下一步的计算.该方法称为 Method of assumed states(MOAS)^[1],它是焓法的应用,使用该法可消除迭代求解用焓法写的能量守恒方程.

使用 MOAS 方法时,电加热过程中冰层融化时吸收的相变潜热假设由一个在极小的温度范围内所吸收的等量显热来代替,其中的比热容是一个很大的值.这样就存在三个相互独立的焓与温度的线性关系式来描述问题的三个状态:冰、液态水,以及冰水平衡混合物.在数值计算的过程中,每个计算点都假定一个相,通过求解用温度作为求解量的离散能量方程,得到每个点的新的温度,然后根据这个新的温度以及各相所对应的温度与焓的关系对各点的物性参数进行更新,使用更新后的物性参数进行下一时刻的温度场计算.只要时间步长足够小,就可以很好的模拟相变过程.这也就是本文采用的电热除冰过程数值模拟的主要特点.由于基于该方法的模型足够精确,被广泛用于融化过程的模拟.

1.3 边界条件

内外表面为对流换热边界

内表面 $-\kappa \frac{\partial t}{\partial y} = h_{b1}(t - t_{b1})$ (4a)

外表面 $-\kappa \frac{\partial t}{\partial y} = h_{b2}(t - t_{b2})$ (4b)

加热条中心和间距中心为绝热边界

$\left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_g = 0, \left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_h = 0$ (4c)

式中下标 g 为间距中心, h 为加热条中心.

2 离散微分方程

建立离散方程的方法有:有限差分法、变分法、权余法、有限元法、边界元法和控制容积法等. 本文采用控制容积法对方程(1)进行离散^[6].

对于非稳态问题,方程对时间的离散又分为三种格式:显式,隐式和 Crank-Nicolson 格式. 文献[3]采用了 Crank-Nicolson 有限差分法,文献[7]使用了全隐格式. 当使用显式和 C-N 格式,为了获得具有物理意义的解,最大的时间步长要受到限制,而全隐格式则不存在这个问题,因此本文采用了全隐格式,它能保证在所有的时间步长下均能获得具有物理意义的解^[6].

离散后的方程表示成以下形式

$a_P t_P = a_E t_E + a_W t_W + a_N t_N + a_S t_S + b$ (5)

式中的系数 $a_P, a_E, a_W, a_N, a_S, b$ 的表达式见文献[6].

边界条件的处理采用附加源项法,控制体界面上的当量物性参数用调和平均法确定^[7].

3 块修正技术

方程(1)经离散后得到方程形式为式(5)的代数方程组,其求解方法可以分为直接解法和迭代解法两大类. 文献[7]采用了三对角阵算法(TDMA)和交替方向隐式方法(ADI)相结合的方法求解方程组,本文在此基础上使用块修正技术^[6]对迭代计算的收敛速度进行了加速.

数值计算所得到的收敛的解是能满足各个控制容积守恒要求的解,代数方程的迭代求解过程也就是使计算结果满足守恒方程的过程. 以图 3 所示二维矩形的导热过程为例在迭代求解过程中的一个中间值 $t_{i,j}^*$ 无法使每个控制容积的能量守恒关系得到满足. 现在设想对其中 $i = 1$ 的任一区域,引入一平均修正值 $\bar{t}_i$. 对 $\bar{t}_i$ 的要求是 $(t_{i,j}^* + \bar{t}_i)$ 能从整体上使该块的能量守恒关系得

到满足. 如此反复进行,可以促进迭代收敛速度. 用加入列平均值 $\bar{t}_i$ 或行平均值 $\bar{t}_j$ 来促进代数方程迭代收敛速度的方法称为块修正技术.

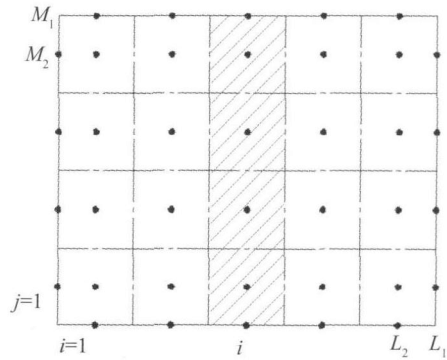


图 3 说明块修正技术的图示

Fig. 3 Block-correction technique

关于块修正值的方程是第一类边界条件下的三对角方程,可以用 TDMA 算法直接求解. 每解一组块修正值的方程并将此修正值与当前值组合形成改进的解后,就相当于把求解区域上个边界的影响在某种平均意义上传到了区域内部,是总体的守恒特性能得到满足,从而加快了收敛速度.

块修正技术并不是一种独立的代数方程解法,它应与其他迭代法(如 ADI 线迭代法)结合使用,这样可望促进迭代收敛速度. 在进行块修正值计算时,块的方位也应横、竖交替使用,且在每一个方向作一次块修正值的计算后就对迭代的当前值作一次修正,然后以改进了的值去开始另一方向的块修正计算.

计算残差的定义为

$$R = \sum a_P t_P - \sum a_E t_E - \sum a_W t_W - \sum a_N t_N - \sum a_S t_S - \sum b$$
 (6)

当 R 趋近于零时,总体的能量守恒关系即得到了满足,可认为迭代趋近于收敛.

图 4 给出了迭代计算的残差与迭代次数的关系. 如图所示,在相同的网格和初始、边界条件下,不使用块修正技术对迭代计算进行加速时,求解一个方程组需要迭代计算将近 700 步,而使用块修正技术对其加速后,只需迭代不到 100 步即可收敛. 由此可见本文中使用的块修正技术可以很好的加速迭代计算的收敛速度.

图 5 给出了本文所使用的程序的运算时间与网格数目的变化关系. 如图所示,在相同的初始、边界条件下,本文所使用的程序的运算时间随着网格数目的增加而增加,且当对迭代计算进行加速时,运算时间随网格数目的变化率近似等于不

对迭代计算加速时的变化率的 0.5 倍. 网格越多, 对迭代加速而节省的运算时间越多, 块修正技术的好处得以体现.

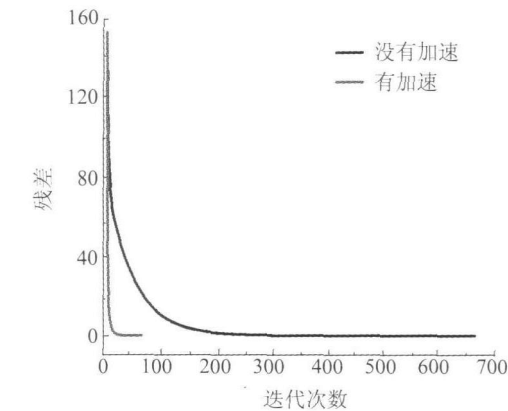


图 4 单次计算的残差收敛图

Fig.4 Convergence of residual for a single iterative step calculation

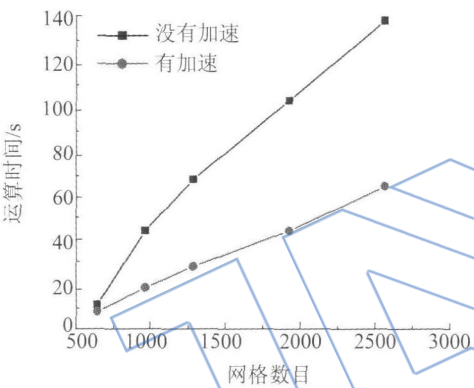


图 5 程序运算时间与网格数目的关系

Fig.5 Variation of execution time with grid number

4 结果分析

为了方便与文献[3]的结果进行比较, 计算过程中采用了文献中所采用的物理参数(见表 1),

表 1 系统各层结构尺寸和物性参数

Table 1 Physical construction and thermal properties of materials of electro-thermal deicer				
层名称	厚度尺寸/ 10 ⁻³ m	导热系数/ (W/(m·°C))	比热容/ (J/(kg·°C))	密度/ (kg/m ³)
内蒙皮	2.210	115	963	2800
内绝缘层	1.270	0.38	963	1760
加热片	0.102	13.2	448	8250
外绝缘层	0.254	0.38	963	1760
磨损层	0.305	15.1	494	7930
结冰层	冰	2.45	2102	919.5
		水	0.554	4174

冰的相变潜热、内外表面换热系数的取值也与文献相同. 冰的相变潜热 L 取 333.6 kJ/kg , 内表面对流换热系数 α_{b1} 取 $5.7 \text{ W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$, 外表面 α_{b2} 取 $5.7 \times 10^6 \text{ W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$. 实际应用时换热系数由传热分析得到^[5].

4.1 与参考文献的比较

从图 6 可以看出, 本文的计算结果与文献的计算结果基本吻合, 证明了文本所采用的算法和模型的正确性. 加热条中心处的温度稍微有些差别, 这主要是由于计算时网格划分及网格节点数的区别引起的^[3].

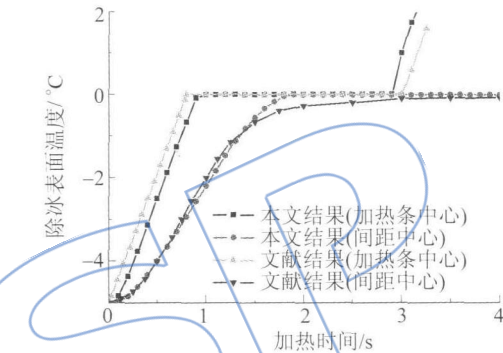


图 6 本文计算结果与参考文献结果的比较

Fig.6 Comparison with literature

4.2 时间步长对结果的影响

图 7 给出了采用不同的时间步长所得到的翼型除冰表面驻点处的温度随时间的变化关系. 由图 7(a)可知, 当时间步长为 1 s 或 0.1 s 时, 在发生相变的时间里, 除冰表面温度会有一个突变, 这个突变出现在相变结束的时间段里. 当时间步长为 0.01 s 时, 这个突变会消失, 得到的温度曲线是连续的, 这与实际情况相符.

由此可见, 由于相变过程发生在极短的时间里, 为了很好的模拟相变过程, 让计算结果更精确, 选取的时间步长应小于等于 0.01 s. 当时间步长为 0.005 s 时, 得到的结果与时间步长为 0.01 s 得到的结果非常近似, 如图 7(b) 所示, 因此取时间步长为 0.01 s 就可使得到的结果足够精确了.

4.3 x 方向网格数目对结果的影响

图 8 给出了 x 方向不同的网格数目对应的某一时刻的除冰表面各点温度沿 x 方向的分布. 由图可知, 当 x 方向网格数目为 10 时, 与网格数目为其他值所得到的间距中心附近的温度结果相差较大; 当网格数目为大于等于 20 时, 网格数目的变化对结果的影响变小. 因此在满足计算精度的

前提下,取 x 方向网格数为 30 即可。

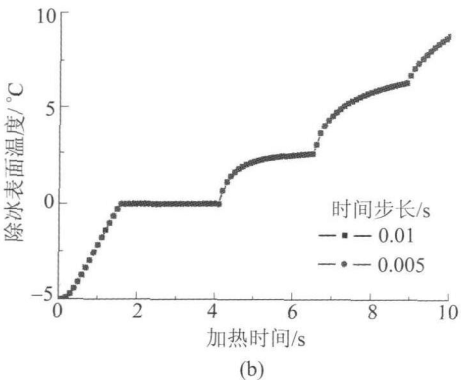
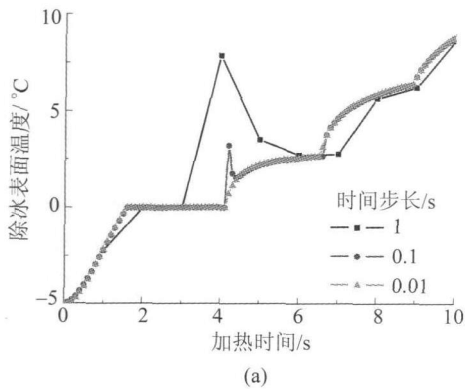


图 7 时间步长对除冰表面温度的影响
Fig. 7 Effect of time step on surface temperature

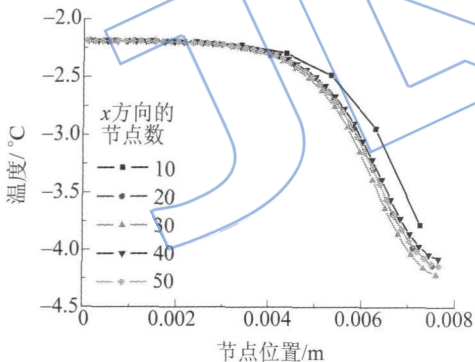


图 8 x 方向网格数目对结果的影响
Fig. 8 Effect of grid numbers in x -direction

图 9 给出了不同的结冰层 y 方向网格数目对应的某一时刻的加热条中心处 y 方向上各节点的温度。由图可知,冰水层的 y 方向网格数目的变化主要影响磨损层、磨损层与冰水层交界面附近的节点温度,对其他位置的节点的温度的影响很小,可以忽略。在磨损层与冰水层交界面附近的节点的温度随着网格数的增加而降低,且幅度越来越小。这是由于网格数增加时的交界面附近的网格进一步细化,能更好的模拟在小范围内发生的相变过程,使得结果更接近真实情况。因此在

满足计算精度的前提下,取冰水层 y 方向网格数为 50 即可。

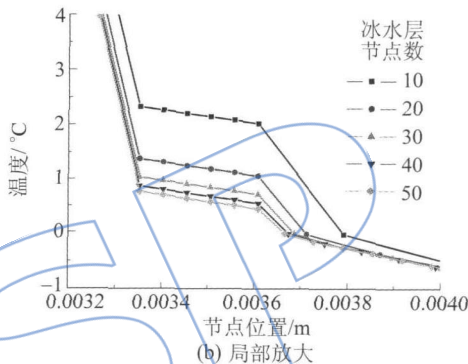
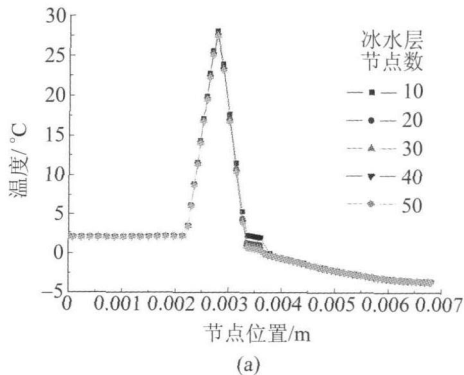


图 9 冰水层 y 方向网格数目对结果的影响
Fig. 9 Effect of grid numbers of ice layer in y -direction

5 结 论

本文给出了周期电热除冰系统的简化物理模型,用控制容积法对该模型的控制方程及其边界、初始条件进行离散,采用 ADI 与块修正技术相结合的方法求解离散后的方程组,得到各个时刻的温度分布。通过对比使用块修正技术对迭代进行加速与不使用该技术的迭代残差和运算时间,说明使用该技术有利于缩短计算时间。通过与参考文献的对比计算,验证了本文所采用的算法和模型的正确性。在此基础上分析了时间步长的选择、网格的划分对计算结果的影响,由此确定时间步长为 0.01 s, x 方向网格数为 30,冰水层 y 方向网格数为 50 时,可使计算结果更接近于真实情况,且运算时间较少。

本文的后续工作 将考虑冰的厚度、外表面换热系数沿结冰表面的变化情况,对整个电热除冰表面的工作进行模拟。

参考文献

[1] Thomas S, Cassoni R, Macarthur C. Aircraft anti-icing and deicing techniques and modeling [R]. AIAA-96-

- 0390,1996.
- [2] 裘燮纲,韩风华. 飞机防冰系统[M]. 北京:航空专业教材编审组,1985.
- QIU Xiegang, HAN Fenghua. Aircraft anti-icing system [M]. Beijing: Compilation and Examination Group of Aero Specialized Teaching Materials, 1985. (in Chinese)
- [3] De Watt K J, Keith T G, Chao D F, et al. Numerical simulation of electrothermal de-icing system [R]. AIAA-83-0114,1983.
- [4] 陈余. 飞机机翼表面结冰过程数值仿真[D]. 北京:北京航空航天大学,2006.
- CHEN Yu. Numerical simulation of ice accretion on airfoil surface[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2006. (in Chinese)
- [5] Brown J, Watterson J K, Raghunathan S R, et al. Heat transfer correlation for de-icing systems[R]. AIAA-2001-0837.
- [6] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2 版. 西安:西安交通大学出版社,2001.
- TAO Wenquan. Numerical heat transfer[M]. 2nd ed. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001. (in Chinese)
- [7] 常士楠,候雅琴,袁修干. 周期电加热控制律对除冰表面温度的影响[J]. 航空动力学报,2007,22(8):1247-1251.
- CHANG Shinan, HOU Yaqin, YUAN Xiugan. Influence of periodic electro-heating pulse on deicing surface temperature [J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22 (8) : 1247-1251. (in Chinese)