# 某种叉流板翅式热交换器动态性能的计算[1)]

宋俊虢 袁修干 林贵平
(北京航空航天大学 飞行器设计与应用力学系)

**摘 要** 对某型飞机上应用的一种叉流板翅式热交换器的动态性能进行了计算研究,分别用数值计算方法和参数集中方法进行了计算,给出了计算比较的结果. 结果表明,这 2 种方法计算所得的结果很接近,但是参数集中法计算程序更为简结,适合用于系统模拟的情况.

**关键词** 动态性能; 集中参数; 数值解; 热交换器
**分类号** TK 172

板翅式热交换器因为其结构紧凑、体积小、换热效率高而有着广泛的应用. 在很多环境控制系统中,需要对它进行动态分析. 目前的动态分析方法有分析法、数值法和参数集中法 3 种.

分析法由于具有很大的局限性,很少用于系统模拟. 一般都采用了数值方法和参数集中法. 本文对这 2 种方法作了比较.

## 1 方程推导

采用分布参数法建立数学模型. 在推导能量方程时作如下假设[1]:

1) 流动气体按一维处理. 因为本文研究的热交换器流道截面积很小,而流道很长,作为一维处理能够反映实际流动的情况.

2) 忽略气体与壁面的纵向热传导. 应用于飞机上的热交换器中,气流速度极高,动态过程进行很快,可以忽略纵向热传导.

3) 忽略热交换器壁面热阻,并认为热交换器与环境绝热. 典型工作状态下,流动气体的对流热阻是导热热阻的几十到上百倍.

最后,对于参数集中法,每个单元的壁面温度被认为只是时间的函数.

由以上假设,利用能量守恒原理可以得到以下 3 个方程:

$$\left(\frac{Gc_pL}{u}\right)_h\frac{\partial T_h}{\partial t}+(Gc_pL)_h\frac{\partial T_h}{\partial x}=(h\eta F)_h(T_w-T_h) \tag{1}$$

$$\left(\frac{Gc_pL}{v}\right)_c\frac{\partial T_c}{\partial t}+(Gc_pL)_c\frac{\partial T_c}{\partial y}=(h\eta F)_c(T_w-T_c) \tag{2}$$

$$Mc_w\frac{\mathrm{d}T_w}{\mathrm{d}t}=(h\eta F)_h(\overline{T}_h-T_w)+(h\eta F)_c(\overline{T}_c-T_w) \tag{3}$$

式中 $G$——空气流量; $c$——比热; $L$——长度; $u$、$v$——空气流速; $T$——温度; $h$——换热系数; $\eta$——面积效率; $F$——面积; $M$——热交换器质量; $t$——时间. 下标 h、c、p、w 分别代表热交换器热边、冷边、空气以及壁面.

因为气流速度很高, $Gc_pL/u$, $Gc_pL/v$ 与 $Gc_pL$ 相比为小量,可忽略不计. 则方程(1)和(2)可写成

$$(Gc_pL)_h\frac{\partial T_h}{\partial x}=(h\eta F)_h(T_w-T_h) \tag{4}$$

$$(Gc_pL)_c\frac{\partial T_c}{\partial y}=(h\eta F)_c(T_w-T_c) \tag{5}$$

方程(3)、(4)、(5)联立构成封闭方程组. 补充以下气体特性和换热系数方程后可以求解热交换器的动态过程.

气体比容[2]:

$$C_p=1003+0.02t+4\times10^{-4}t^2 \tag{6}$$

气体粘性系数[2]:

$$U=1.50619\times10^{-6}\frac{(t+273)^{1.5}}{t+395} \tag{7}$$

雷诺数[2]: $Re=\dfrac{Gd_e}{F_cU}$ (8)

肋片换热效率: $\eta=\dfrac{\mathrm{th}(ml)}{ml}$ (9)

式中 $d_e$——水当量直径, m; $F_c$——最小自由流通面积, $m^2$; $m=\sqrt{\dfrac{2h}{\lambda\delta}}$; $h$——肋片对流换热系数, $W/(m^2\cdot K)$; $\lambda$——肋片导热系数, $W/(m\cdot K)$;

收稿日期: 1998-05-15 第一作者 男 26 岁 博士生 100083 北京
1) 航空科学基金(97E51043)资助项目

$\delta$——肋片厚度,m.

## 2　方程求解

1) 数值法求解

对方程(3)、(4)、(5)进行离散化得到如下的一组方程:

$$T_{w(t+1)} = \left[1 - \Delta t \cdot \frac{(h\eta F)_h}{Mc_w} - \Delta t \cdot \frac{(h\eta F)_c}{Mc_w}\right] \cdot T_{w(t)} + \Delta t \cdot \frac{(h\eta F)_h}{Mc_w} \cdot T_{h(t)} + \Delta t \cdot \frac{(h\eta F)_c}{Mc_w} \cdot T_{c(t)} \tag{10}$$

$$T_{h(i+1)} = \left[1 - \Delta x \cdot \frac{h\eta F}{Gc_p L}_h\right] \cdot T_{h(i)} + \Delta x \cdot \left(\frac{h\eta F}{Gc_p L}\right)_h \cdot T_{w(t)} \tag{11}$$

$$T_{c(j+1)} = \left[1 - \Delta y \cdot \left(\frac{h\eta F}{Gc_p L}\right)_c\right] \cdot T_{c(j)} + \Delta y \cdot \left(\frac{h\eta F}{Gc_p L}\right)_c \cdot T_{w(t)} \tag{12}$$

式中　$t$——时间网格. 对以上方程组求解时选择的步长应满足单步法的收敛条件.

2) 参数集中法求解

引入以下参数推导参数集中方程[3]:

$$\left.\begin{aligned} n &= \frac{x}{L} \\ m &= \frac{y}{W} \\ a_h &= \frac{(h\eta F)_h}{(Gc_p)_h} \\ a_c &= \frac{(h\eta F)_c}{(Gc_p)_c} \end{aligned}\right\} \tag{13}$$

式中　$L$——长度;$W$——宽度.

则方程(4)可以写成

$$\frac{\partial T_h}{\partial n} = a_h(T_w - T_h) \tag{14}$$

解上述方程有

$$T_h(n,t) = T_w(n,t) + (T_h(0,t) - T_w(n,t))e^{-a_h n} \tag{15}$$

式中　$T_h(0,t)$——热空气进口温度.

第一单元热边平均温度和出口气体温度分别为

$$\bar{T}_h = \int_0^1 T_h(n,t)\,dn = T_w(1,t) + (T_h(0,t) - T_w(1,t))\frac{1 - e^{-a_h}}{a_h} \tag{16}$$

$$T_h(1,t) = T_w(1,t) + (T_h(0,t) - T_w(1,t))e^{-a_h} \tag{17}$$

同理可得冷边气体第一单元平均温度和出口温度为

$$\bar{T}_c = \int_0^1 T_c(m,t)\,dm = T_w(1,t) + (T_c(0,t) - T_w(1,t))\frac{1 - e^{-a_c}}{a_c} \tag{18}$$

$$T_c(1,t) = T_w(1,t) + (T_c(0,t) - T_w(1,t))e^{-a_c} \tag{19}$$

式中　$T_c(0,t)$——冷空气进口温度.

最后将所得方程代入方程(3)中有

$$\frac{dT_w(1,t)}{dt} = \frac{(Gc_p)_h}{Mc_w}(T_h(0,t) - T_w(1,t)) \cdot (1 - e^{-a_h}) + \frac{(Gc_p)_c}{Mc_w}(T_c(0,t) - T_w(1,t))(1 - e^{-a_c}) \tag{20}$$

由此可得单元壁面温度方程为

$$\frac{dT_w(i)}{dt} = \frac{(Gc_p)_h}{(Mc)_w}(T_{hi}(i) - T_w(i)) \cdot (1 - e^{-a_h}) + \frac{(Gc_p)_c}{(Mc)_w}(T_{c0}(i) - T_w(i))(1 - e^{-a_c}) \tag{21}$$

利用公式(17)、(19)、(21)可以求出每个单元的出口温度. 整个热交换器气体的出口温度用出口侧各个单元的出口温度算术平均来表示.

## 3　计算结果及分析

用 2 种方法对某型飞机上的单程叉流式热交换器进行了计算,分别对应 2 种流量和 2 种温度输入共 4 个状态进行了计算比较,计算结果如图 1～图 4 所示.

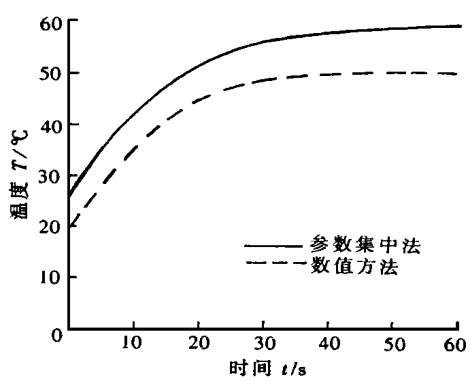



图 1　阶跃响应

($G_h$ = 500 kg/h;　$T_h(0,t)$ = 150 ℃;　$G_c$ = 1 000 kg/h;　$T_c(0,t)$ = 15 ℃)

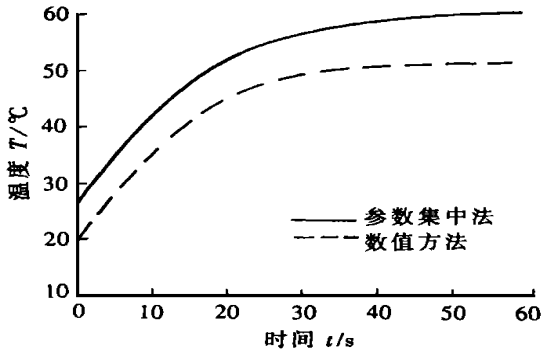



图 2 斜坡响应

($G_h$ = 500 kg/h; $T_h(0,t)$ = (150 + 0.1$t$) ℃;
$G_c$ = 1 000 kg/h; $T_c(0,t)$ = 15 ℃)

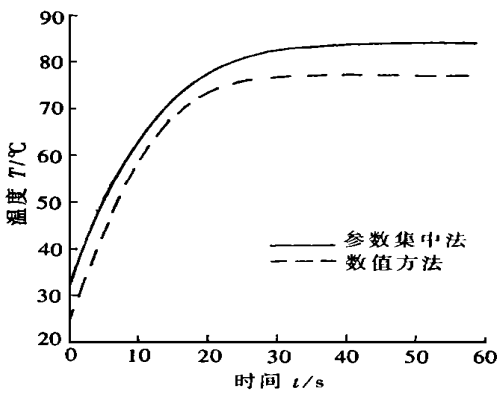



图 3 阶跃响应

($G_h$ = 1 000 kg/h; $T_h(0,t)$ = 150 ℃;
$G_c$ = 1 000 kg/h; $T_c(0,t)$ = 15 ℃)

从图 1～图 4 可以看出,用数值解法和参数集中法对 4 种状态的计算动态过程比较接近. 从参数集中法与实验的比较[4]中可以看出,动态过程的实验值将落在这 2 种计算方法所得的结果之间,即这 2 种方法的计算结果在工程上都是可信的. 但是数值方法的计算程序要更为复杂,计算时间随网格数的增加而迅速增加. 相对而言,参数集中法的计算程序要简明,计算时间也要短得多,对单元进行细分时尤其如此. 由此可见,对于大系统中的热交换器动态模拟,采用参数集中法更为可取.

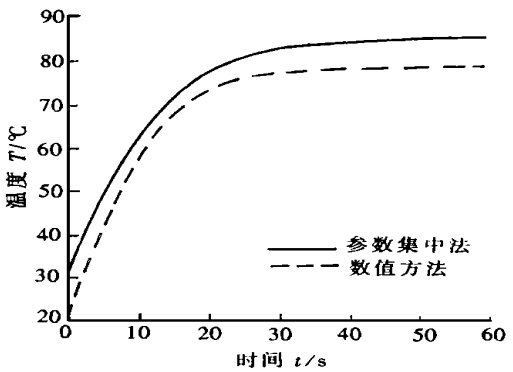



图 4 斜坡响应

($G_h$ = 1 000 kg/h; $T_h(0,t)$ = (150 + 0.1$t$) ℃;
$G_c$ = 1 000 kg/h; $T_c(0,t)$ = 15 ℃)

## 参 考 文 献

1 Duleba G S, Lloyd A J P. Modeling heat exchanger as apart of a large system simulation. ASME, 77-ENAs-9, 1997

2 齐 铭. 制冷附件. 北京:航空工业出版社, 1992

3 宋俊虎. 飞机环控系统引气分系统动态性能分析. 北京航空航天大学学报, 1997, 23(5): 560～564

4 宋俊虎. 飞机环控系统引气分系统动态特性分析:[学位论文]. 北京:北京航空航天大学飞行器设计与应用力学系, 1997

# Transient Performances Calculation of a Gas-to-Gas Crossflow Heat Exchanger

Song Junxiao Yuan Xiugan Lin Guiping

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Dept. of Flight Vehicle Design and Applied Mechanics)

Abstract The dynamic performance of a single pass gas-to-gas crossflow heat exchanger with high speed air flow that is used in airplane has been calculated with both lumped parameter model and numeric method model. The calculation results under typical conditions of these two methods are very similar, but the lumped parameter model is more simple than numeric method and easy to be used in programming. It also has satisfying precision and can meet the demand of system simulation.

Key words dynamic properties; lumped parameters; numerical solutions; heat exchangers