

# 飞行器引气系统预冷器动态模型搭建及辨识研究

石周正<sup>1,2</sup>, 董明皓<sup>1</sup>, 刘崎<sup>1</sup>, 罗子彦<sup>1</sup>, 王鸿博<sup>1</sup>, 秦现生<sup>1</sup>, 王战玺<sup>1</sup>

(1.西北工业大学 机电学院, 陕西 西安 710072;  
2.航空工业新乡航空工业(集团)有限公司 研发设计院系统所, 河南 新乡 453049)

**摘要:**飞机发动机引气作为热端气体,经引气系统预冷后,用于座舱温度调节及机翼防冰。为了实现数字化智能控制,建立精准的预冷器控制模型,从而提高飞机引气系统的温度控制精度、响应速度和稳定性。重点研究了飞机引气系统中的预冷器动态模型参数辨识,利用有限元法建立了预冷器换热过程偏微分方程,分析了预冷器的换热机理。通过建立预冷器热端、冷边及间壁偏微分方程分析了预冷器换热性能的影响因素。通过辨识36组工况下的预冷器时间常数,搭建36点正交实验,从而拟合预冷器时间常数,并与实测结果进行了对比,验证了动态模型的拟合精度和模型真实性,从而用于仿真实验及控制器设计。

**关键词:**飞行器座舱温度控制系统;预冷器换热机理;有限元分析;动态模型参数辨识

**中图分类号:** V245.3<sup>+</sup>42

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-2758(2024)06-1089-10

飞机引气系统在大型客机温度控制技术中发挥着重要作用。发动机高温引气经引气系统降温后供入舱内多区域,作为气源热端用于下一级温度调控<sup>[1-3]</sup>。引气系统不仅为飞机空调提供气源,同时也起到了机翼防冰<sup>[4-6]</sup>作用,避免舱内电子设备故障<sup>[7]</sup>。飞机引气系统是一个非线性、大迟滞的时变系统<sup>[8-9]</sup>,其运行环境工况极端且变化较快,造成了引气系统动态性能的不确定性。这种不确定因素的产生主要包括以下情况:

1) 控制系统内部结构的不确定性,导致系统数学模型发生变化。比如飞行高度、速度变化引起的引气系统冷端入口气体流量、温度、压强等发生变化;

2) 系统受到外界随机扰动的影响,比如飞机飞行过程中遇到阵风、下雨,空气流速、压强等发生变化;

3) 测量噪声对系统的传感器测量结果的干扰可能会导致数据失真,影响系统的准确性和可靠性,

甚至可能使控制系统失效。

传统PID控制算法无法满足对引气系统温度控制精度和响应时间的要求。因此,需要对引气系统进行动态参数辨识,并根据辨识结果设计控制参数计算器,利用传感器采集到的工况信息变化状况实时地改变控制器参数,实现引气系统的温度伺服自适应控制。利用仿真软件进行虚拟测试和早期验证可以有效提高安全系数和测试效率<sup>[10-11]</sup>,同时还可以避免气源因长时间加热及抽吸引气造成的成本浪费。

Chen等<sup>[12]</sup>将N-S方程引入模糊控制器,利用N-S模糊函数调节系统模糊参数,提高了系统温度控制稳定性。Tu等<sup>[13]</sup>研究了三轮式高压水分离温度控制器数学模型和计算方法,并利用Flowmaster软件建立了飞机引气系统的仿真模型。通过仿真结果,确定了引气系统的动态特性,并采用专家PID控制方法设计了飞机冷却组件温度控制器。美国Gulfstream Aerospace航空公司利用EASY5建立了G500和G550客机的引气系统模型,在该仿真软件下对飞机温度控制系统进行了时间响应分析<sup>[14]</sup>。Jennions等<sup>[15]</sup>设计了名为SESAC-Simscape的环境控制系统仿真框架,用于模拟波音737-800的温度控制系统,研究了飞机环境工况条件变化对预冷器

收稿日期:2023-10-07

基金项目:陕西省科技重大专项(2019zdx01-01-02)与陕西省重点研发计划(2021GY-302,2022ZDLGY03-06)资助

作者简介:石周正(1981—),博士研究生

通信作者:王战玺(1983—),教授 e-mail:zxwang@nwpu.edu.cn

换热性能和飞机温度控制系统出口温度的影响。Mboreha 等<sup>[16]</sup>研究了飞机发动机引气在系统出口的温度稳定性和气流分布情况,采用计算流体力学(CFD)模型在 Fluent 中对波音 767-300 飞机巡航状态下的发动机引气预冷进行了数值模拟。

国内飞机引气系统建模仿真相关研究起步较晚,史璐璐<sup>[17]</sup>针对引气系统多级温度控制结构,利用抗饱和 PID 控制算法搭建了引气系统温度仿真控制器,提高了控制系统的响应及抗干扰能力。任明波等<sup>[18]</sup>提出了一种基于专家 PID 控制的座舱区域四级温度控制系统,并在极端温度环境下进行了飞行实验验证。张国元等<sup>[19]</sup>对飞机座舱温度控制系统进行了建模仿真,并选取了典型工况进行仿真验证,同时对空置率进行了优化。

综上所述,目前国内外学者研究主要集中在温度场仿真,对于极端且多变的飞行工况下预冷器换热性能及动态辨识研究较少。为了设计满足应对极端且变化剧烈的工况需求的控制系统,需要对引气系统进行高精度数学建模与多模态仿真。因此,本文针对包含预冷器调节活门、预冷器以及多种传感

器等核心组件的飞行器引气系统进行了研究,结合实验结果建立引气系统各组件的数学模型,利用先验信息对引气系统进行动态参数辨识,确定动态环境下预冷器的时间常数,搭建换热器数学仿真模型,从而用于预冷器控制器设计。

## 1 预冷器性能分析

为探究预冷器的动态特性,首先需要对影响预冷器换热性能的主要影响因素进行探究。使用有限元分析方法探究预冷器的换热机理,并搭建简化仿真实验平台,探究蝶阀转角对预冷器性能的影响。

### 1.1 预冷器结构介绍

预冷器是飞机引气系统中的重要组件,其作用是在空气进入引气系统之前对其进行冷却,以供机身防冰及座舱温度调节。它通常位于发动机前部,在高温环境下,通过引入冷却空气来降低进气温度,以确保引气系统正常运行。飞机引气系统及预冷器结构如图 1 所示。

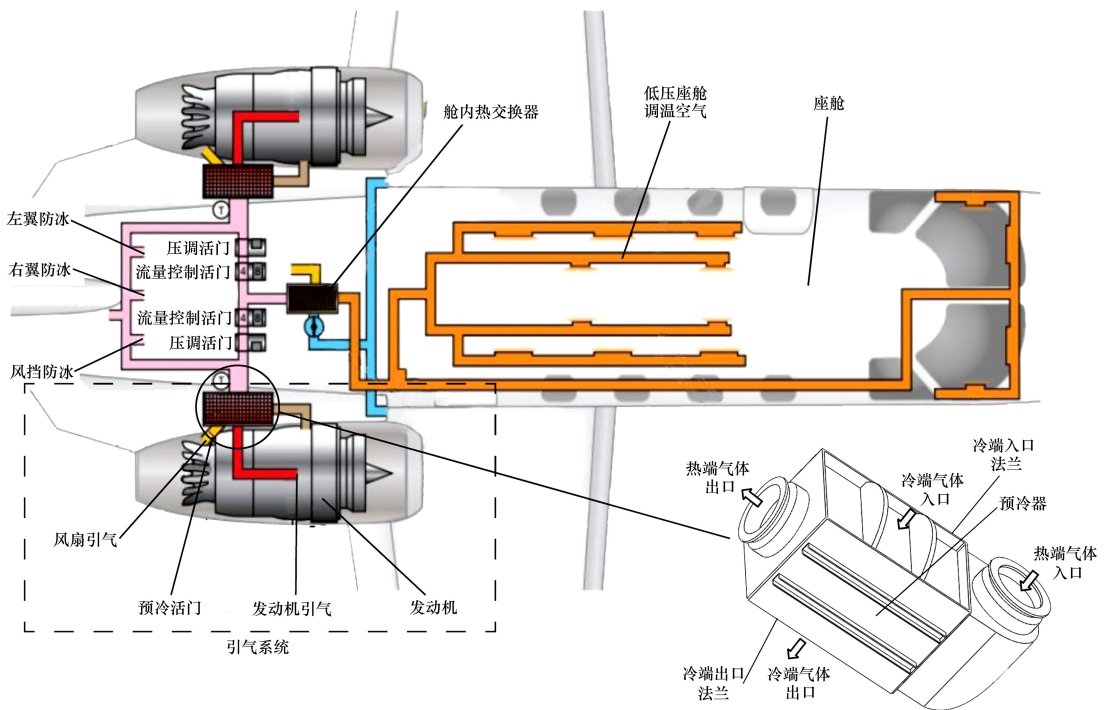


图 1 飞机引气系统及预冷器结构

预冷器本质上是一种换热器,冷端气体和热端气体被固体间壁隔开,热端气体通过预冷器间壁将热量传递到冷端气体,从而达到降低热端气体温度

的目的。

本文所用预冷器属于板翅式换热器,将冷、热 2 种流体介质隔离在固体间壁两边,热量从高温流

体经过间壁传递至低温流体,从而达到换热的目的,具有传热效率高、结构紧凑等优点,被广泛应用于航空工业。

### 1.2 预冷器换热机理分析

#### 1.2.1 预冷器壁面有限元划分

预冷器的换热过程是管内热端气体放热,通过预冷器壁面与管外冷边气体进行非接触式热交换。根据热传导原理,预冷器换热过程包括以下 2 个环节:①预冷器热端气体到预冷器间壁的热量传递;②预冷器间壁到预冷器冷端气体的热量传递。随着时间变化,传递热量的过程也随之发生变化。

将结构离散化是有限元方法的基本思想,有限元网格的划分不仅要考虑变形梯度的描述是否合理,还要考虑对各物体几何形状的准确描述是否准确。利用简化几何单元近似逼近预冷器壁面,然后分析预冷器不同组分之间的热量传递情况,并根据变形协调条件对预冷器不同组分之间的热量传递进行综合求解。

如图 2 所示,本文对预冷器的冷端、间壁和热端进行了有限元划分,其中:  $\dot{m}$  表示流体单元质量流量;  $T$  表示温度;下标 c, h 分别表示冷端和热端;下标 in 和 out 分别表示进口处和出口处。

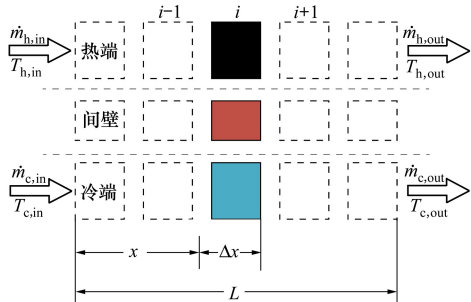


图 2 预冷器有限元划分

预冷器间壁总长为  $L$ ,沿  $x$  轴方向把预冷器划分为  $n - 1$  个单元,每段间隔长度为

$$\Delta x = \frac{L}{n - 1} \quad (1)$$

#### 1.2.2 预冷器热量传递偏微分方程

对于热端流体,根据质量守恒定律,单元格内流体质量保持不变,即进口处的质量流量等于出口处质量流量:

$$\dot{m}_{h,in} + \dot{m}_{h,out} = 0 \quad (2)$$

式中:  $\dot{m}_{h,in}$  为热端入口单元质量流量;  $\dot{m}_{h,out}$  为热端出口单元质量流量。

图 3 所示为有限元划分后,预冷器气体单元流量传递示意图,下标 s 表示间壁。根据能量守恒定律,热端气体单元进口处有一部分热量  $dQ_h$  传递给预冷器间壁,完成热传导过程,其余热量随热端气体流动流入下一单元。

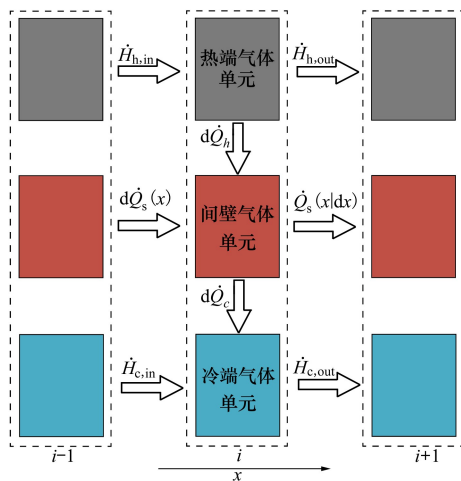


图 3 预冷器气体单元流量传递

每个热端气体单元内储存的能量方程为

$$\left( \frac{dE}{dt} \right)_h = \dot{m}_h \cdot c_{p,h} \cdot \frac{\partial T_h}{\partial t} \quad (3)$$

式中:  $c_{p,h}$  为热端气体比热容;  $\dot{m}_h$  为热端气体质量流量;  $T_h$  为热端气体温度。

假设热交换过程中没有能量损耗,热量由热端气体传递给预冷器间壁过程中,当温度梯度  $\frac{\partial T_h}{\partial t} < 0$  时,热端气体单元热能  $E$  增大,热焓差计算式为

$$dH_h = - \dot{m}_h \cdot c_{p,h} \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial T_h}{\partial x} \quad (4)$$

热端气体与预冷器固体间壁之间的传热效率受到预冷器间壁传热系数、预冷器间壁传热面积以及热端气体与预冷器间壁温差的影响。从热端气体单元传递到预冷器间壁的热量为

$$dQ_h = \alpha \cdot A_{th} \cdot (T_h - T_s) \quad (5)$$

式中:  $A_{th}$  为预冷器间壁传热面积;  $\alpha$  为预冷器传热系数;  $T_s$  为预冷器间壁温度。

忽略在此热交换过程中的热传导,可得热端气体在其流动方向上的偏微分方程,如(6)式所示。

$$\begin{cases} m_h \cdot c_{p,h} \cdot \frac{\partial T_h}{\partial t} = -\dot{m}_h \cdot c_{p,h} \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial T_h}{\partial x} - (\alpha \cdot A_{th}) \cdot (T_h - T_s) \\ \Delta t = \frac{m_h \cdot c_{p,h}}{\dot{m}_h \cdot c_{p,h}} \\ N_h = \frac{\alpha \cdot A_{th}}{\dot{m}_h \cdot c_{p,h}} \\ \Delta t \cdot \frac{\partial T_h}{\partial t} = -\Delta x \cdot \frac{\partial T_h}{\partial x} - N_h \cdot (T_h - T_s) \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $N_h$  为热端气体传热单元数。

令热端气体流速为  $v_h$ , 则有

$$v_h = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (7)$$

由此, 热端的偏微分方程可以改写为

$$\frac{\partial T_h}{\partial t} = -v_h \cdot \frac{\partial T_h}{\partial x} - \frac{1}{T_h} (T_h - T_s) \quad (8)$$

预冷器热端气体单元的热量  $dQ_h$  传递到预冷器间壁, 预冷器间壁的热量  $dQ_c$  再传递到冷端气体单元。传热过程中预冷器间壁温度上升。预冷器间壁偏微分方程推导方法与热端偏微分方程推导方法类似。

忽略预冷器间壁在  $x$  轴方向上的热传导, 热交换过程中能量变化方程可以简化为

$$\begin{cases} \left(\frac{dE}{dt}\right)_s \approx dQ_h - dQ_c \\ m_s \cdot c_{p,s} \cdot \frac{\partial T_s}{\partial t} = (\alpha \cdot A_{th}) \cdot (T_h - T_s) - (\alpha \cdot A_{tc}) \cdot (T_c - T_s) \\ \frac{1}{\tau_{sh}} = \frac{\alpha \cdot A_t}{m_s \cdot c_{p,s}} \\ \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{1}{\tau_{sh}} (T_h - T_s) - \frac{1}{\tau_{sc}} (T_c - T_s) \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $T_c$  为冷端气体温度;  $c_{p,s}$  为预冷器间壁比热容;  $\tau_{s,h}$  为热端气体向预冷器间壁传热的的时间常数;  $\tau_{s,c}$  为冷端气体向预冷器间壁传热的的时间常数。

热端气体热量传递到预冷器间壁, 预冷器间壁再将热量传递到冷端气体。对冷端的分析过程如同热端, 冷端气体单元进口处接受到预冷器间壁传来的热量  $dQ_c$  影响, 完成热传导过程, 热量提高后随冷端气体流动流入下一单元。

冷端气体在流动方向的偏微分方程:

$$\begin{cases} m_c \cdot c_{p,c} \cdot \frac{\partial T_c}{\partial t} = -\dot{m}_c \cdot c_{p,c} \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial T_c}{\partial x} - (\alpha \cdot A_{tc}) \cdot (T_c - T_s) \end{cases} \quad (10)$$

根据能量守恒方程, 冷端的偏微分方程可以改写为

$$\frac{\partial T_c}{\partial t} = -v_c \cdot \frac{\partial T_c}{\partial x} - \frac{1}{T_c} (T_c - T_s) \quad (11)$$

从有限元分析结果可知, 预冷器的换热性能与冷边气体和热端气体的流速、温差条件密切相关。然而温控系统存在高度耦合性, 研究预冷器的换热性能不能只关注冷、热端气体流速和温差大小, 在气道管路内径不变的情况下, 气体流速、出入口压强差、气体流量必然会相互影响, 从而影响预冷器的换热性能。

### 1.3 预冷过程流体仿真

上述的有限元分析中只关注了气体流速、温度对预冷器的换热性能的影响, 并未研究预冷器调节活门的开度给预冷系统出口温度带来的变化以及系统耦合性造成的影响, 为了进一步了解引气系统整体的工作特性, 在仿真软件中对简化的引气系统模型进行了流体仿真, 初步对影响预冷器出口温度的因素进行定性分析。

利用四面体网格对引气系统流道模型进行网格划分, 并在冷端气体出口及入口、热端气体出口及入口、预冷器与管路连接处进行了局部网格加密。引气系统流道模型及其网格划分的效果如图 4 所示。将网格化后的模型加载到 Fluent 中, 需要对仿真参数进行设置。为了模拟实际情况, 流体材料选择空气, 设置  $k-\varepsilon$  湍流模型, 由于引气预冷过程涉及到热量交换, 还需要打开物理模型中的能量方程。

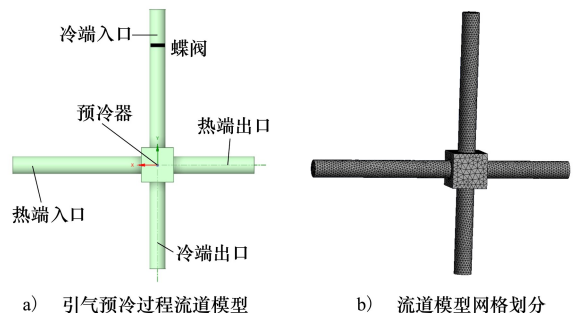


图 4 引气预冷过程模型

根据表 1 设置仿真初始参数, 观察仿真结果变

化,并通过改变各参数定性分析影响换热器工作特性的因素。求解器使用 Coupled,通过调整迭代次数、松弛条件和松弛因子进行仿真。

表 1 流体仿真初始参数

冷端入口压强/ kPa	热端入口压强/ kPa	空气密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	冷端流量/ ( $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ )	冷端入口温度/ $^{\circ}\text{C}$	热端入口温度/ $^{\circ}\text{C}$	热端流量/ ( $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ )
62	1 382	1.293	2 740	121	483	1 412

设置迭代次数为 150 次,可以利用残差曲线来检测仿真的收敛,仿真残差如图 5 所示。

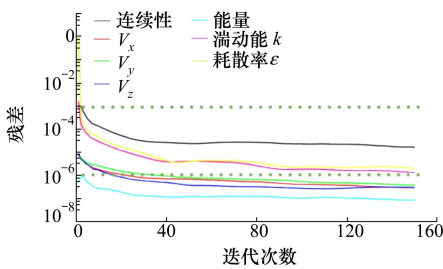


图 5 引气系统仿真残差图

仿真残差下降 3 个量级可以确保计算过程已经至少达到了定性收敛的条件,而且流场主要的特征已经形成。仿真的能量残差收敛标准为低于  $10^{-6}$  以下,可以确定仿真计算过程已经达到收敛。

完成计算后,生成引气系统简化模型流场分布云图,如图 6 所示。从图 6 流速仿真结果分析可知在动态仿真过程中,流道内流速和温度分布有变化,但变化并不明显。其原因是预冷器换热的动态过程存在响应时间,当前蝶阀转角映射下的系统温度并未达到稳态。即使如此,在蝶阀快速转动的动态过

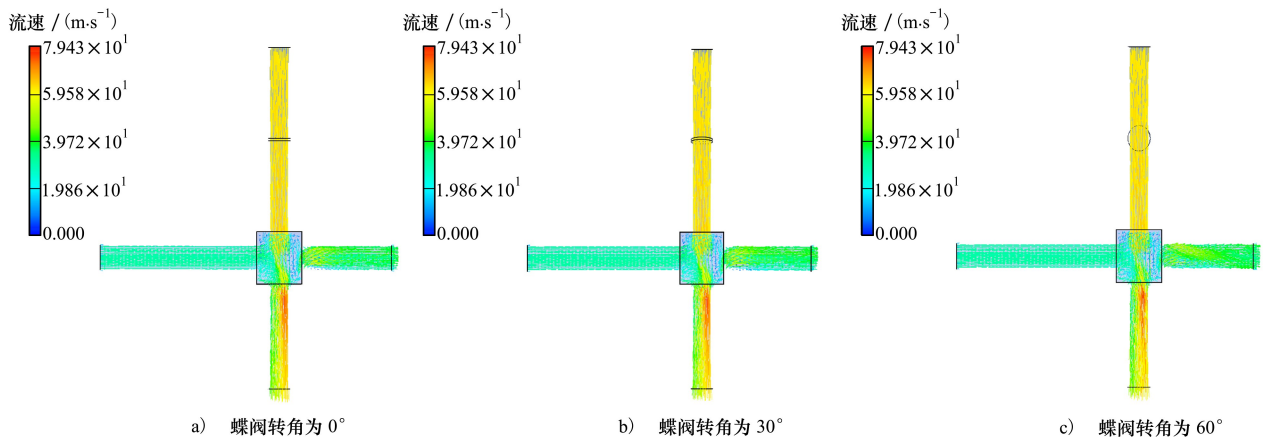


图 6 引气系统流速仿真结果

程中仍能观察到,当蝶阀转动角度为  $30^{\circ}$  和  $60^{\circ}$  时,预冷器对热端气体的冷却效果有所降低,可见蝶阀的转角能够改变冷端管路气体流量和流速,气体雷诺数会受到流速的影响,从而改变换热效率。从流速分布图来观察,热端气体和冷端气体在发生热交换之后,气体流速也发生了变化,而且产生了径向速度分量;除此之外,由于管路截面积不会发生变化,所以气体的流量必然会随着流速发生变化。这 2 个

因素都会引起系统压强变化。由于热交换过程本质上是热端气体的热量传递到冷端气体,所以热端气体和冷端气体的温差大小必然会影影响换热器效率。

根据图 7 温度仿真结果可以看出,引气系统是一个高度耦合的系统,因此推测温度、压强、流量等因素都会影响两路气体发生热交换后预冷器出口温度。

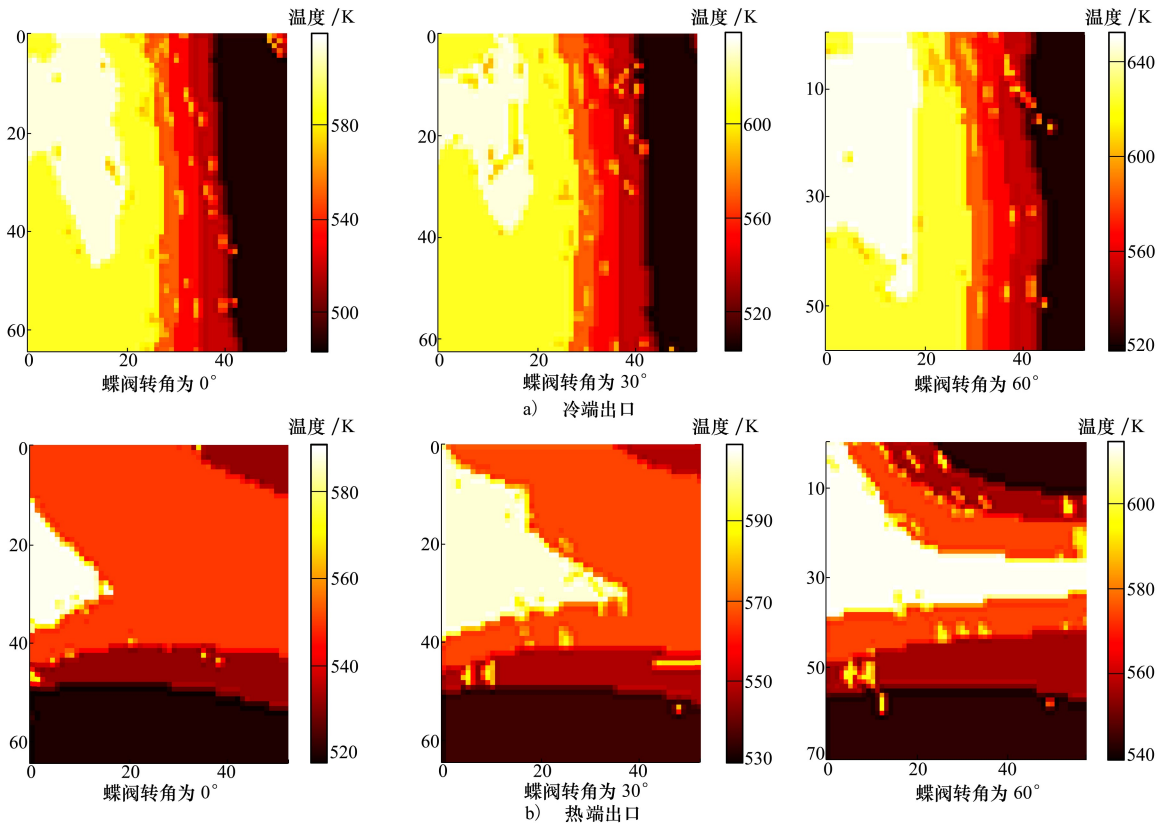


图 7 引气系统温度仿真结果

## 2 预冷器动态参数辨识

针对预冷器 36 组工况下的工作特性测试实验, 搭建预冷器动态模型。预冷器动态模型动态参数辨识系统如图 8 所示。

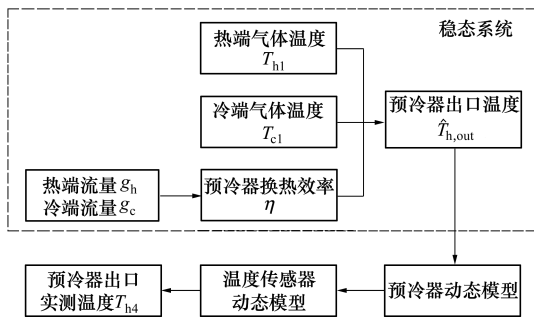


图 8 预冷器动态模型参数辨识过程

参数识别过程中引入稳态系统的作用是合并多个变量对系统的影响。为了简化辨识过程, 仅使用折合后的稳态温度作为预冷器的输入。由冷热端流

量比拟合计算获得预冷器换热效率  $\eta$ ; 由换热效率  $\eta$  和冷热端温度按定义计算获得稳态温度  $\hat{T}_{h,out}$ 。

由于引气系统的出口温度只能由温度传感器测出, 在辨识预冷器模型时, 试验数据不可避免地包含了温度传感器的动力学特性影响。所以预冷器过程模型由一阶系统和延迟环节组成, 该模型形式为

$$G(s) = \frac{K_3}{1 + T_{h,in} \cdot s \cdot e^{-T_d s}} \quad (12)$$

式中:  $K_3$  为预冷器模型增益;  $T_d$  为延迟环节时间。

为了解决温度传感器动力学特性影响预冷器模型参数辨识的问题, 对辨识的输入信号施加温度传感器滤波, 以滤波后的信号作为输入, 温度传感器测量数据作为输出。改进后的辨识系统如图 9 所示。

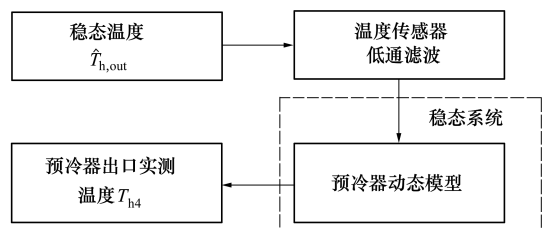


图 9 改进后的预冷器动态模型参数辨识过程

通过对传感器的时间常数的指数曲线拟合,可以建立温度传感器的一阶模型。将稳态信号  $\hat{T}_{h,out}$  通过该一阶系统做低通滤波(LPF),低通滤波表达式为

$$y_n = \alpha x_n + (1 - \alpha)y_{n-1} \quad (13)$$

式中:  $\alpha$  为低通滤波系数;  $x_n$  为本次采样值;  $y_{n-1}$  为上一采样时间低通滤波输出值;  $y_n$  为本次低通滤波输出值。

利用现场工况通过(14)式可以计算出温度传感器时间常数

$$\tau_{TS} = 38.02v^{-0.394} \quad (14)$$

式中,  $v$  为空气流速。

滤波系数  $\alpha$  可以通过温度传感器模型时间常数  $\tau_{TS}$  的和,即系统采样周期  $T_s$  计算得出

$$\alpha = \frac{T_s}{\tau_{TS} + T_s} \quad (15)$$

将低通后的信号作为预冷器的辨识输入信号,对输入输出信号去除均值,从而消除稳态温度估测对动态系统参数辨识的影响。

真实模型响应曲线与灰箱辨识结果的响应曲线的对比如图 10 所示,其中蓝色曲线为辨识后的预测模型,灰色曲线为真实模型。

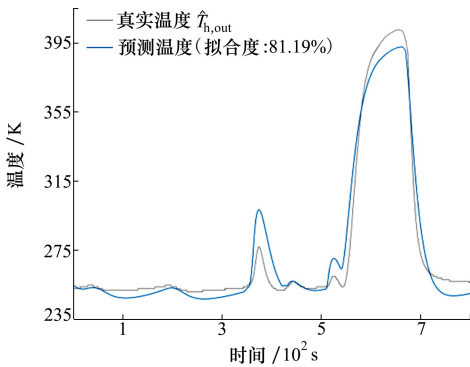


图 10 特定工况辨识结果

对预冷器时间常数表的时间常数进行拟合,建立预冷器工况-时间常数模型,以便在与正交实验下 36 种不同工况下估测预冷器动力学特性。先后试验了冷热端流量、温度、温差等多种因素组合,目前获得的最优因素为一体化流量  $g_{eq}$ ,  $g_{eq}$  由冷端流量  $g_c$  和热端流量  $g_h$  获得,其表达式为

$$g_{eq}(t) = g_h(t) + 0.54g_c(0) \quad (16)$$

式中:  $g_c(0)$  为冷端激励施加前的稳态冷端流量。

在  $g_c$  持续变化条件下,可令

$$g_c(0) = g_c(t - \Delta t) \quad (17)$$

式中,  $\Delta t$  为冷端激励的时间延迟,本次辨识取  $\Delta t = 25$ 。

预冷器稳态出口温度  $\hat{T}_{h,out}$ ,在  $T_{h,out}$  持续变化条件下,可令

$$\hat{T}_{h,out} = T_{h,out}(t - \Delta t) \quad (18)$$

预冷器模型时间常数  $\tau$  对应一体化流量  $g_{eq}$  及预冷器稳态出口温度  $\hat{T}_{h,out}$  的关系可以利用二次曲面拟合,其表达式为

$$\begin{aligned} \tau = & 0.320\ 461\ \hat{T}_{h,out} - 32.193\ 4g_{eq} + \\ & 0.035\ 992\ 1\ \hat{T}_{h,out}g_{eq} - 34.431\ 7 + \\ & 3.776\ 22g_{eq}^2 - 0.000\ 424\ 207\ \hat{T}_{h,out}^2 \end{aligned} \quad (19)$$

二次曲面对实际测量数据的拟合度为 88.2%,拟合后的时间常数曲面与原数据比较结果如图 11 所示。

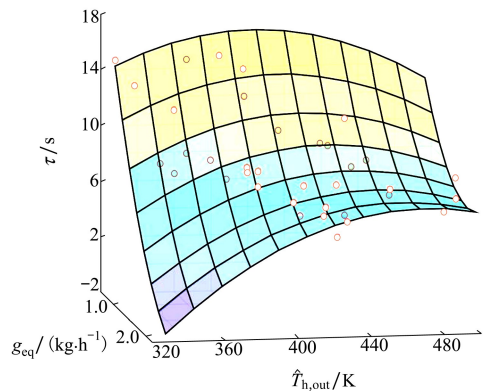


图 11 预冷器模型时间常数二次曲面拟合

根据时间常数拟合二次曲面可知,预冷器时间常数的变化符合 2 个趋势:①在稳态出口温度  $\hat{T}_{h,out}$  不变的前提下,随着一体化流量  $g_{eq}$  增大,预冷器时间常数  $\tau$  减小;②在一体化流量  $g_{eq}$  不变的前提下,稳态出口温度  $\hat{T}_{h,out}$  增大,预冷器模型时间常数  $\tau$  也增大,但当超过最高点(400 K, 16 s)后,  $\tau$  开始减小。

其中,趋势①符合工程直观认识,由于冷端初始流量  $g_c(0)$  不变,一体化流量  $g_{eq}$  增大表示热端流量  $g_h$  在增大,这必然会加快预冷器的换热速度,预冷器响应时间也会随之减小;趋势②在上升段符合直观认识,下降段时间常数减小的可能原因有:预冷器自身温度上升后,与环境的对流散热速度加快;预冷器自身温度增加,辐射散热速度显著提升。拟合

得到的预冷器时间常数二次曲面的上升及下降趋势符合预冷器的动力学特性。

使用二次曲面作时间常数预测计算,与辨识结果比较,可以获得预冷器时间常数的预测误差如图 12 所示,其中最大误差约为 2.82 s,误差绝对值的均值为 0.7 s,预测结果较为理想。

通过实验,依次计算预冷器稳态出口温度及预冷器、温度传感器时间常数。通过离散系统迭代方法,在动态模型拟合结果下计算出温度传感器输出,并与实际温度测量值进行比较。表 2 为实验测得的部分数据。

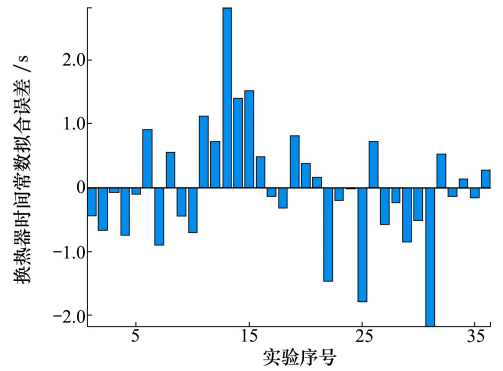


图 12 预冷器时间常数预测误差

表 2 预冷器模型正交实验辨识结果

编号	$T_{h1}/^{\circ}\text{C}$	$g_h/(kg \cdot h^{-1})$	$T_{c1}/^{\circ}\text{C}$	$g_c/(kg \cdot h^{-1})$	$\tau/s$	拟合度/%
1	300	2 500	82	5 780	7.70	91.21
2	340	3 300	112	1 700	8.26	92.48
3	380	4 100	52	5 780	7.11	93.06
4	420	4 900	82	1 700	6.81	93.55

根据表 2 测得的数据对预冷器模型进行拟合,最终获得的拟合结果对比如图 13 所示,其中蓝色曲线为拟合曲线,红色曲线为实际测量曲线。上述拟合-实测对比表明,构建的模型能够较好地贴近实测的响应曲线形状。预冷器对稳态温度激励的响应

曲线可以使用一阶系统近似,近似精度在 85% 左右。预冷器时间常数与一体化流量和稳态出口温度有关,可用二次曲面拟合,拟合精度不低于 88%,可用于控制器设计。

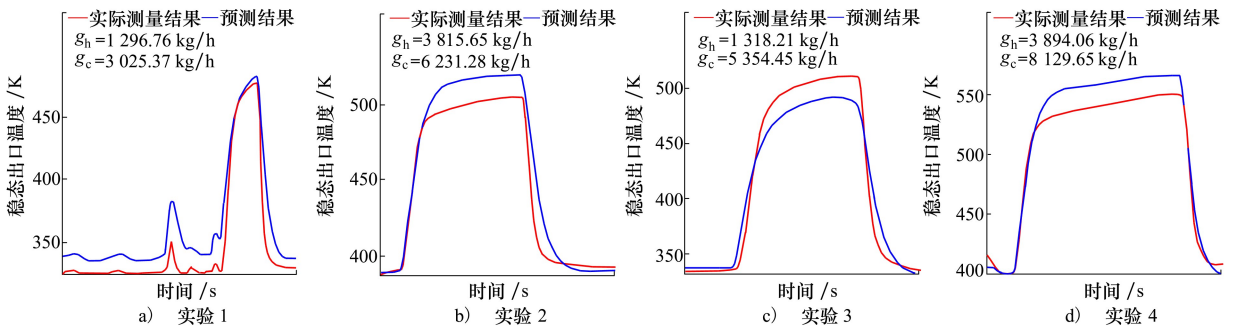


图 13 预冷器模型拟合对比

### 3 结 论

本文首先研究了引气系统的组成,以及各组成部分在引气系统温度控制中的功能,结合偏微分方程对预冷器的换热机理进行了有限元分析。同时建立了引气系统的简化流道模型,利用仿真软件完成

了对引气系统的流体仿真,定性地分析了影响引气系统工作特性的工况因素。之后基于预冷器的数学建模以及仿真实验验证分析,利用实验测定的预冷器调节活门稳态实验数据,对 36 组正交实验数据进行灰箱辨识获得了不同工况下的预冷器调节活门时间常数,利用瞬时加热法实验数据对温度传感器时间常数进行了指数曲线拟合,对传感器噪声低通滤波后利用二次曲面拟合了预冷器模型的时间常数。



与实测结果的对比验证了模型的拟合精度和真实性,为控制器设计提供了依据。主要结论如下:

1) 本研究通过预冷器壁面有限元划分和流体仿真分析,分析了预冷器换热过程的机理,识别了影响换热性能的关键因素,如气体流速、温差条件等。分析了蝶阀转角对冷端管路气体流量和流速影响,从而改变气体雷诺数,进而影响换热器换热效率,为系统分析和控制优化提供了理论支持。

2) 构建了飞机引气系统预冷器的动态模型,并利用36组工况对模型参数进行了动态参数辨识。

模型拟合精度达到了88.2%,为飞机引气系统的控制器设计及仿真提供了依据。同时识别了预冷器时间常数的变化趋势,结果符合实际工况。

鉴于飞行工况的多变性,未来需要研究更丰富和复杂的工况下预冷器的换热性能,以确保模型的广泛适用性和准确性。同时基于本文所提出的预冷器模型,未来可进一步研究并优化控制器控制策略,以满足飞行器引气系统对高效、高性能、高可靠性的迫切需求。

## 参考文献:

- [1] POLLOK A, CASELLA F. Comparison of control strategies for aircraft bleed-air systems[J]. IFAC Papers Online, 2017, 50(1): 14194-14199
- [2] MERZVINSKAS M, BRINGHENTI C, TOMITA J T, et al. Air conditioning systems for aeronautical applications: a review[J]. The Aeronautical Journal, 2020, 124(1274): 499-532
- [3] 王利敏, 黄河源, 米百刚, 等. 飞行器内埋式通风冷却系统四边形进排气口格栅气动特性分析研究[J]. 西北工业大学学报, 2021, 39(6): 1179-1187  
WANG Limin, HUANG Heyuan, MI Baigang, et al. Aerodynamic characteristics analysis of quadrangle inlet and exhaust grille for embedded ventilation cooling system of aircraft[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2021, 39(6): 1179-1187 (in Chinese)
- [4] HUANG Xiaodan. Study on the measurement technology of temperature field at the outlet of the precooler in the bleed air system of civil aircraft[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2066(1): 012114
- [5] WEI H, DONG W, YANG X, et al. Experimental studies on the frosting and defrosting performance of compact heat exchanger under moderate humidity condition[J]. Energy Reports, 2022, 8: 1321-1338
- [6] 赵宾宾, 黎先平, 李杰, 等. 前缘角冰几何参数对翼型失速特性的影响分析研究[J]. 西北工业大学学报, 2023, 41(1): 39-46  
ZHAO Binbin, LI Xianping, LI Jie, et al. Influence of geometric parameters of leading edge horn-ice on stall characteristics of airfoil[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2023, 41(1): 39-46 (in Chinese)
- [7] PANG L, LI P, CAO X, et al. Experimental study of the changes in thermal expectation during simulated flights in a civil aircraft cabin mockup[J]. Indoor and Built Environment, 2020, 29(9): 1277-1288
- [8] 杨建忠, 王振斌, 陈希远, 等. 飞机座舱温度扰动实验研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(31): 364-368  
YANG Jianzhong, WANG Zhenbin, CHEN Xiyuan, et al. Experimental investigation on temperature disturbance in aircraft cabin[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(31): 364-368 (in Chinese)
- [9] 周月, 张鹤林, 程定斌, 等. 典型空气循环制冷系统仿真研究[J]. 化工学报, 2020, 71(增刊1): 341-345  
ZHOU Yue, ZHANG Helin, CHEN Dingbin, et al. Simulation study on four-wheel booster refrigeration system[J]. CIESC Journal, 2020, 71(suppl 1): 341-345 (in Chinese)
- [10] ZHANG M, ZHANG W, CHEN X, et al. Modeling and simulation of temperature control system in plant factory using energy balance[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2021, 14(3): 66-75
- [11] 戚美, 王立夫, 赵见龙, 等. 双腔室自激振荡脉冲喷嘴空化射流外部流场的数值模拟[J]. 机械科学与技术, 2019, 38(4): 515-521  
QI Mei, WANG Lifu, ZHAO Jianlong, et al. Numerical simulation of external flow field self-excited oscillating pulsed cavitation jet of dual chamber nozzle[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2019, 38(4): 515-521 (in Chinese)
- [12] CHEN Z Y, MENG Y, WANG R, et al. Systematic fuzzy navier-stokes equations for aerospace vehicles[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2022, 94(3): 351-359
- [13] TU Y, LIN G P. Dynamic simulation of aircraft environmental control system based on flowmaster[J]. Journal of Aircraft, 2011, 48(6): 2031-2041

- [14] CHEN L J, ZENG W L, XU Z F, et al. A novel anomaly detection method for aircraft trajectory in terminal airspace[C]//20th COTA International Conference of Transportation Professionals, 2020: 3181-3193
- [15] JENNIONS I, ALI F, MIGUEZ M E, et al. Simulation of an aircraft environmental control system[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 172: 114925
- [16] MBOREHA C A, TYTELMAN X, NWAOKOCHA C, et al. Numerical simulations of the flow fields and temperature distribution in a section of a Boeing 767-300 aircraft cabin[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 47: 4098-4106
- [17] 史璐璐. 大型民用飞机座舱区域多级温度控制系统的研究[J]. 化工学报, 2020, 71(增刊1): 322-327  
SHI Lulu. Research of multi-stage temperature control system in large-sized aircraft cabin zone[J]. CIESC Journal, 2020, 71(suppl 1): 322-327 (in Chinese)
- [18] 任明波, 王娟, 李荣军, 等. 大型飞机座舱温度控制系统控制律设计[J]. 航空学报, 2017, 38(增刊): 15-23  
REN Mingbo, WANG Juan, LI Rongjun, et al. Control law design for temperature control system of large-scale aircraft cabin[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(suppl): 15-23 (in Chinese)
- [19] 张国元, 于宗玲, 郑权义, 等. 基于 AMESim 的空气循环温控系统建模及控制优化[J]. 自动化应用, 2020, 5: 7-9  
ZHANG Guoyuan, YU Zongling, ZHENG Quanyi, et al. Modeling and control optimization of air circulation temperature control system based on AMESim[J]. Automation Application, 2020, 5: 7-9 (in Chinese)

## Study on construction and identification of dynamic model of precooler in aviation bleed air system

SHI Zhouzheng<sup>1,2</sup>, DONG Minghao<sup>1</sup>, LIU Qi<sup>1</sup>, LUO Ziyan<sup>1</sup>, WANG Hongbo<sup>1</sup>,  
QIN Xiansheng<sup>1</sup>, WANG Zhanxi<sup>1</sup>

(1.School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;  
2.Research and Design Institute, AVIC Xinxiang Aviation Industry (Group) Company Limited, Xinxiang 453049, China)

**Abstract:** The bleed air from the aircraft engine, serving as the hot-end gas, is pre-cooled through the bleed air system, and subsequently used for cabin temperature regulation and wing anti-freezing. To implement digital intelligent control and enhance the aircraft bleed air system's performance, the identification of dynamic parameters in the system's precooler model is studied. The finite element method was used to establish the partial differential equation of the heat exchange mechanism, and the heat exchange mechanism of the precooler was analyzed. By establishing the partial differential equations of the heat side, cold side, and partition of the precooler, the influencing factors of the heat exchange performance were analyzed. Finally, by identifying the time constants of the precooler under 36 working conditions, a 36-point orthogonal experiment was constructed to fit the time constant of the precooler, which was then compared with the actual measured results. This verified the fitting accuracy and realism of the dynamic model, which can be used for simulation experiments and controller design.

**Keywords:** aircraft cabin temperature control system; precooler heat exchange mechanism; finite element analysis; dynamic model parameters identification

**引用格式:** 石周正, 董明皓, 刘崎, 等. 飞行器引气系统预冷器动态模型搭建及辨识研究[J]. 西北工业大学学报, 2024, 42(6): 1089-1098

SHI Zhouzheng, DONG Minghao, LIU Qi, et al. Study on construction and identification of dynamic model of precooler in aviation bleed air system[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2024, 42(6): 1089-1098 (in Chinese)