

# 民用飞机燃油箱系统热模型分析研究

## Research on the Thermal Model Analysis of Civil Aircraft Fuel Tank System

张 斌 / Zhang Bin

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

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

### 摘 要:

飞机燃油箱系统热分析是飞机燃油系统设计和适航取证的关键技术之一。首先对燃油箱热模型分析方法进行了阐明,然后在典型热天环境中(地面温度为 327K)对一种典型民用飞机燃油箱结构的热参数进行了工程计算研究。研究表明,外翼油箱、机身油箱以及集油箱内燃油温度分布不均匀;各油箱燃油温度在地面状态均高于巡航状态;燃油的最高温度时刻出现在地面终了状态,而且最高点位置出现在集油箱内。研究结果既可以指导飞机燃油箱设计,也可以为飞机燃油系统的适航取证提供一定技术支持。

**关键词:**燃油系统;民用飞机;热模型;蒙特卡罗

[Abstract] Thermal model analysis of the fuel tank is a key technology of the aircraft fuel system design and airworthiness certification. In this article, the fuel tank thermal model analysis method was clarified firstly, then investigated the thermal parameters of a typical civil aircraft fuel tank structure by engineering calculations in a typical hot day environment (ground temperature is 327K), studies show that the fuel temperature in the wing tank, fuselage tank and collector tank are varied. The temperature of the ground state is higher than the cruise. The maximum temperature reached in the end of ground state, and the highest point appeared in the collector tank. The results can both guide the design of aircraft fuel tanks and provide some technical support for airworthiness.

[Key words] Fuel System; Civil Aircraft; Thermal Model; Monte Carlo

## 0 引言

飞机燃油箱热分析是近年来民用飞机取证的必要技术之一,最新 FAR 25 部 981 条款明确规定,若燃油箱不可以等效为传统未加热的铝机翼油箱,则其燃油箱可燃性必须采用蒙特卡罗分析的方法来证明可燃性符合要求,而燃油箱的热参数是蒙特卡罗分析的关键输入参数。目前,国内在该领域的研究尚处于起步阶段<sup>[1-4]</sup>,本文开展燃油箱工程热分析研究,既可以指导飞机燃油箱设计,也可以为飞机燃油系统的适航取证提供一定技术支持。

## 1 分析对象

大多数支线和干线飞机,其燃油箱的布局基本固定<sup>[5]</sup>,如 A320 系列飞机和波音 737 系列飞机为三油箱结构<sup>[6]</sup>;ERJ170/190 系列和 ARJ21 系列飞机为两油箱结构。本文选取一个典型的飞机油箱

布局进行分析,为了方便简化,选取单侧油箱进行研究。如图 1 所示,飞机燃油箱可以划分为外翼油箱、机身油箱和集油箱。其中,机身内油箱隔间用于向发动机和 APU 供油;时刻处于满油状态的集油箱也单独进行分析研究。

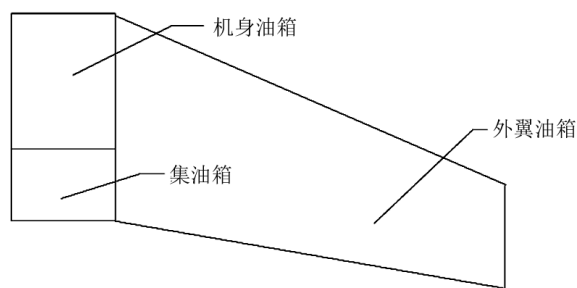


图 1 典型民机油箱区域划分

## 2 边界条件选取

从工程计算角度出发,对于任何模型进行热分

析和建模,都需要对模型及边界条件进行简化。

## 2.1 外翼油箱的数学建模

外翼油箱可以简化为一个六面体模型,上壁面为飞机的上蒙皮,燃油通过蒙皮导热、外壁面的对流换热以及和大气的热辐射进行热传递;下壁面为飞机的下蒙皮,热量传递方式同上壁面;油箱左壁面为内油箱边界,暂不考虑;模型右壁面和通气油箱连接,燃油通过导热、自然对流和外界换热;模型的前壁面和后壁面为前后梁,模型的前后端面通过导热、自然对流和外界换热。

鉴于飞机在不同阶段(飞行包线内)的外界环境参数是变化的,所以需要划分不同阶段进行燃油箱热分析,即以时间项为变量进行热分析。为了简化分析,本文选取飞机的两种主要状态,即地面状态和空中状态。

### 2.1.1 地面状态

对于地面状态,外翼油箱的热力学方程为:

$$Q_{wing-fuel} = Q_{up} + Q_{down} + Q_{right} + Q_{front} + Q_{rear} + Q_{eject} + Q_{tube} \quad (1)$$

上壁面:

$$Q_{up} = Q_{out-convection} + Q_{out-radiation} \quad (2)$$

$$Q_{out-convection} = (T_{air} - T_{fuel}) / (\Delta / A\lambda + 1 / Ah) \quad (3)$$

$$Q_{out-radiation} = \varepsilon A\sigma (T_{air}^4 - T_{fuel}^4) \quad (4)$$

式中, $Q_{out-convection}$ 为上壁面和外界通过对流换热的热量、 $Q_{out-radiation}$ 为上壁面和外界通过辐射换热的热量、 $T_{air}$ 为外界环境的总温、 $T_{fuel}$ 为燃油温度、 $\Delta$ 为蒙皮平均厚度、 $\lambda$ 为蒙皮的导热系数、 $h$ 为蒙皮和外界的对流换热系数、 $\varepsilon$ 为蒙皮的反射率、 $\sigma$ 为黑体辐射常数、 $A$ 为蒙皮的表面积。

下、右、前、后壁面分别为:

$$Q_{down} = Q_{out-convection} + Q_{out-radiation} \quad (5)$$

$$Q_{right} = Q_{out-convection} \quad (6)$$

$$Q_{front} = Q_{out-convection} \quad (7)$$

$$Q_{rear} = Q_{out-convection} \quad (8)$$

其中,内热源包括引射泵  $Q_{eject}$ ,以及其它热管路系统(如液压)  $Q_{tube}$ 。

通过上述方程,可以求出地面状态下飞机外翼油箱的总换热量,然后进一步求得燃油温升(温降),由于外翼油箱的燃油主要通过引射泵源源不断地输送到集油箱,所以外翼油量是变化的,根据能量守恒可以得到:

$$mC_p \frac{dT}{dt} = Q(t) \quad (9)$$

由式(9)可以求出地面状态下外翼油箱随时间变化的燃油温度。

### 2.1.2 飞行状态

由于飞行高度和马赫数的变化,大气环境会发生改变,热力学参数也发生改变,主要的环境参数公式如下。

不同高度下的大气近似温度(对流层):

$$T_{air} = T_{ground} - 0.006 \times H \quad (10)$$

不同马赫数下的大气恢复温度:

$$T_{tot-air} = T_{air} \times (1 + (k-1)/2 \times Ma^2) \quad (11)$$

不同高度下的大气密度(对流层):

$$\rho_H = \rho_0 (1 - 0.0065H/T_0) \quad (12)$$

外翼油箱的热力学方程为:

$$Q_{wing-fuel} = Q_{up} + Q_{down} + Q_{right} + Q_{front} + Q_{rear} + Q_{eject} + Q_{tube} \quad (13)$$

$$mC_p \frac{dT}{dt} = Q(t) \quad (14)$$

式中,可以将机翼等效为平板湍流模型换热<sup>[7]</sup>,对蒙皮的对流换热系数  $h$  进行求解,求解方程组为:

$$h = Nu\lambda / dNu = (0.037Re^{0.8} - 871)Pr^{1/3} \quad (15)$$

$$Re = \rho v d / \mu \quad (16)$$

通过上述方程也可以求出飞行状态时外翼油箱的换热量,进而求出外翼油箱随时间变化的燃油温度。

## 2.2 机身油箱的数学建模

对于机身油箱,同样可以进行类似的热力学建模分析。

地面状态:

$$Q_{fuselage-fuel} = Q_{down} + Q_{front} + Q_{eject} \quad (17)$$

$$mC_p \frac{dT}{dt} = Q(t) \quad (18)$$

其中,左壁面为绝热壁面,不参与换热,即热流量为零;右壁面为内部换热,不予考虑。由上式即可求出地面状态机身油箱随时间变化的燃油温度。飞行状态机身油箱空中状态中,除了外界温度会发生变化,外界边界条件基本没有变化,热力学方程也与地面状态相同。

### 2.3 集油箱的数学建模

对于地面状态,集油箱的热力学方程为:

$$Q_{collector-fuel} = Q_{down} + Q_{rear} + Q_{AC} + Q_{DC} + Q_m mC_p \frac{dT}{dt} = Q(t) \quad (19)$$

式中, $Q_{AC}$ 为集油箱内 AC 泵的散热量、 $Q_{DC}$ 为

DC 泵的散热量、 $Q_m$  为集油箱内能变化量。由于集油箱的燃油不断流入和流出,所以集油箱内部燃油会根据不同温度的燃油进出而产生内能变化。对于空中状态,热力学方程也与地面状态相同。

### 3 燃油箱热模型计算方法

完成各油箱的热模型建立后,即可以对各油箱进行热力计算。图 2 给出了计算流程图,本文建立工程计算程序,通过迭代计算,可以算出不同时间点的各燃油箱温度。

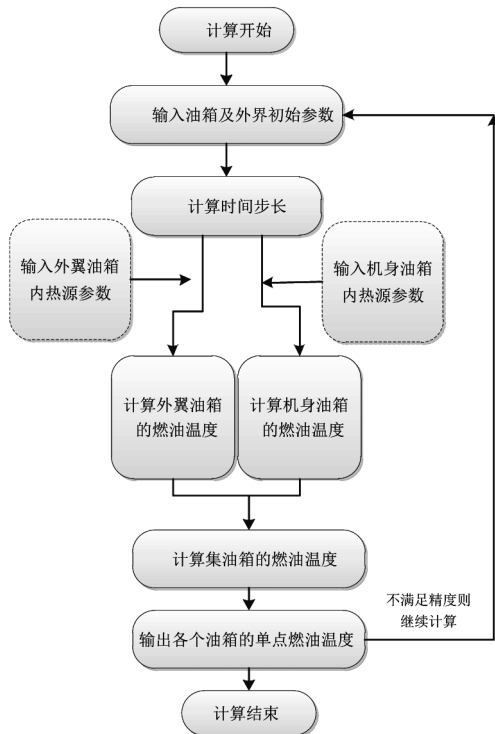


图 2 计算流程图

### 4 计算结果及分析

本文选取了适航条款要求的典型极热天气状况下进行分析计算,即地面温度为 327K。同时选取了地面状态和海拔为 10 000m 的巡航状态两种工况进行热分析。

地面状态时,选取飞机地面泊机时间为 0.5h,燃油初始温度为 298K。

巡航状态时,选取飞行时间为 0.5h,燃油的初始温度为地面状态的终止温度。

图 3 为地面状态时外翼油箱燃油量随时间变化,从图中可以看出,由于地面状态下 APU 的工作,使得燃油消耗量随时间的增加而减少,飞机的耗油量较小。图 4 为地面状态时外翼油箱燃油温度随时

间变化,从图中可以看出燃油温度随时间的增加而升高,但增幅较小,这是由于地面状态时外翼和外界热环境有一定换热量,但主要依靠热辐射和导热,所以增幅较小。

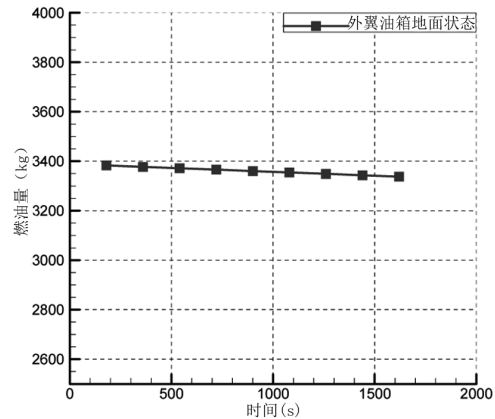


图 3 外翼油箱地面状态燃油量随时间变化

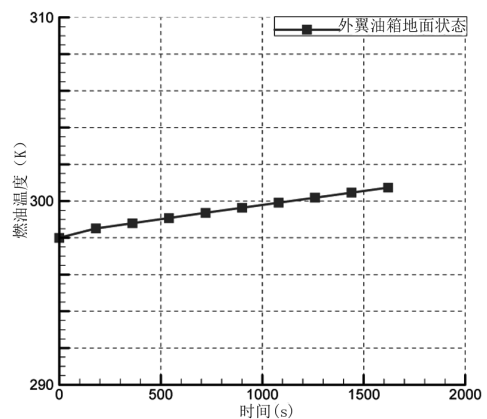


图 4 外翼油箱地面状态燃油温度随时间变化

图 5 为巡航状态时外翼油箱燃油量随时间变化。从图中可以看出燃油消耗量随着时间的增加而减少,相比地面状态其变化较大,主要是由于发动机工作而产生的。

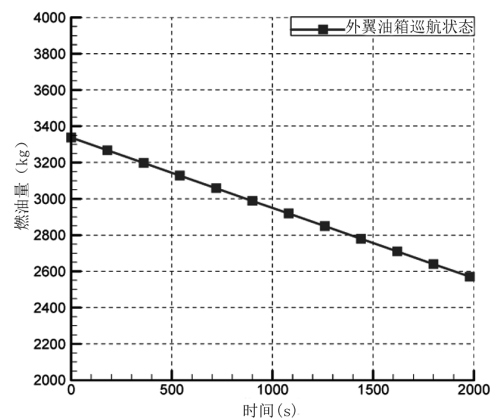


图 5 外翼油箱巡航状态燃油量随时间变化

图6为巡航状态时外翼油箱燃油温度随时间变化。从图中可以看出温度随时间增加而下降。开始时段,由于巡航状态时,外界大气环境温度急剧下降,同时外翼和外界环境的换热变为强烈的对流换热,因此温度变化趋势大。随着换热的继续进行,油箱内外温差变小,换热量变小,曲线趋于平缓。

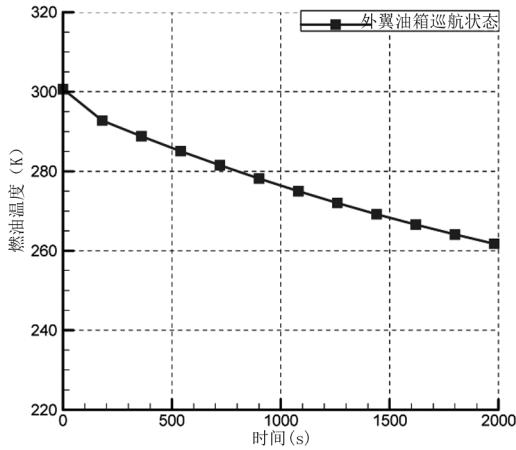


图6 外翼油箱巡航状态燃油温度随时间变化

图7为地面状态时机身油箱燃油温度随时间变化。从图中可以看出温度随时间的增加有所上升,但是增幅较小,这是由于地面状态时机身油箱和外界热环境有一定换热量,但主要依靠单纯导热,所以温度增幅较小。图8为巡航状态时机身油箱燃油温度随时间变化。从图中可以看出温度随时间的增加有所降低,但变化较小,这是由于油箱主要依靠单纯的导热,所以温度降幅较小。

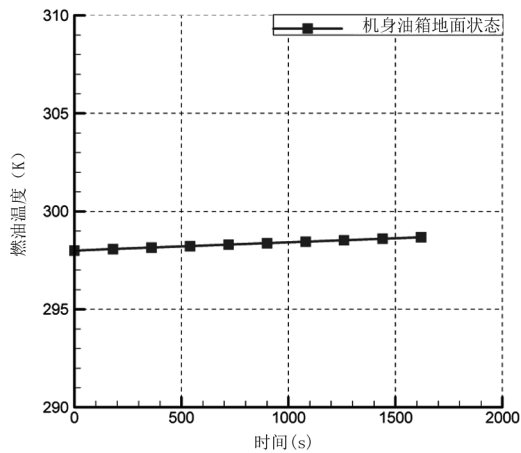


图7 机身油箱地面状态燃油温度随时间变化

图9为地面状态时集油箱燃油温度随时间变化。从图中可以看出,燃油的温度随时间的增加而上升,这是由于地面状态时集油箱和外界热环境有一定换热量,同时内热源散热导致温度上升。图10

为巡航状态时集油箱燃油温度随时间变化,温度随时间的增加而急剧下降,这主要是由于巡航状态时集油箱和外翼油箱进行大量的内能交换,以致较冷的外翼油温进入集油箱,同时内部换热器停止工作,导致温度急剧下降。

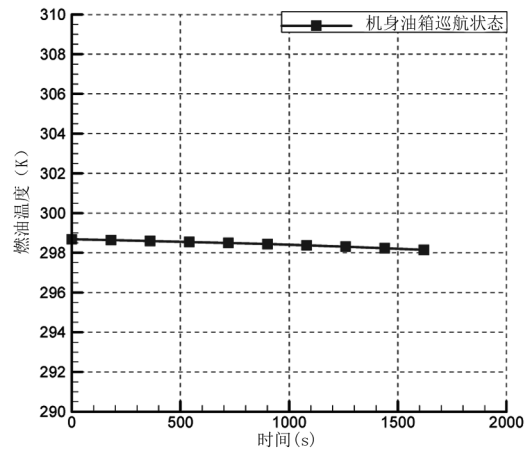


图8 机身油箱巡航状态燃油温度随时间变化

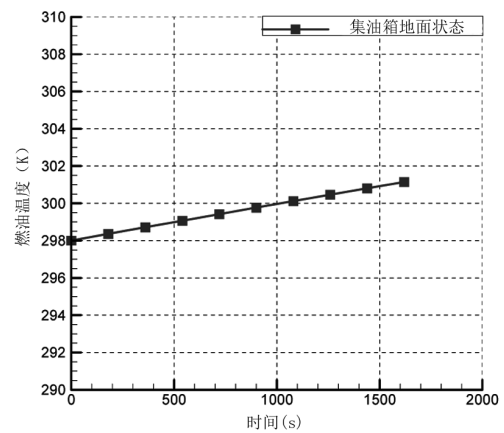


图9 集油箱地面状态燃油温度随时间变化

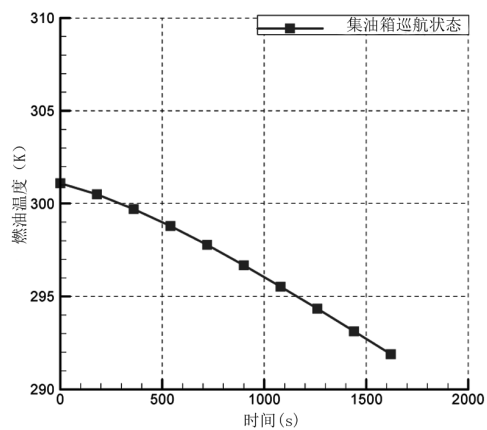


图10 集油箱巡航状态燃油温度随时间变化

(下转第36页)

[4] 刘刚. MATLAB 数字图像处理[M]. 北京:机械工业出版社,2008.  
[5] 许录平. 数字图像处理学习指导[M]. 北京:科学出版社,2009.  
[6] 夏晶,孙继银. 基于区域生长的前视红外图像分割方法

[J]. 激光与红外,2011,41(1):107-111.  
[7] 安新军,刘太安,闫长青. 改进区域生长的医学超声图像分割方法研究[J]. 计算机工程与设计,2009,30(6):1512-1514.

(上接第 26 页)

通过对各个油箱的计算分析,图 11 给出了三个油箱地面状态时燃油温度随时间的变化,从图中可以看出油箱在地面状态时温度均有升高,集油箱的温度增幅最大,机身油箱温度增幅最小,外翼油箱处于中间状态。图 12 给出了三个油箱巡航状态时燃油温度随时间的变化,从图中可以看出油箱在巡航状态时温度均有降低,其中外翼油箱温度降幅最大。

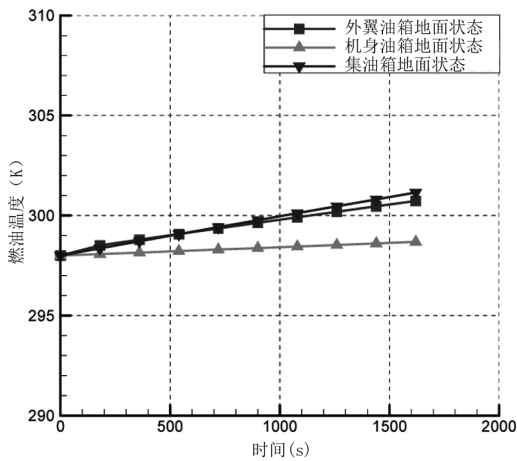


图 11 三油箱地面状态燃油温度随时间变化

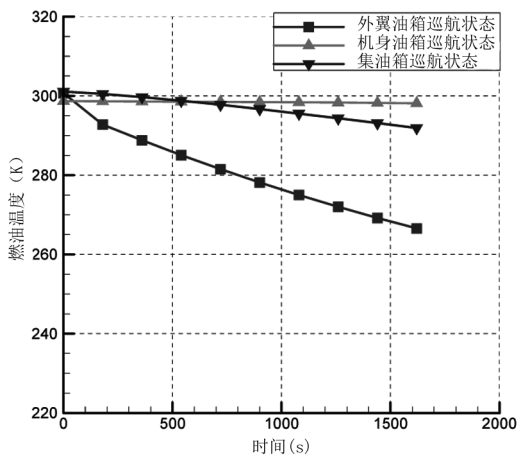


图 12 三油箱巡航状态燃油温度随时间变化

## 5 结论

通过上述分析,本文可以得出以下结论:

- (1) 燃油箱内燃油温度区域分布不均匀,外翼、机身以及集油箱的温度各不相同,计算时应划分不同单元进行研究;
- (2) 燃油箱内燃油温度在地面状态和巡航状态各不相同,在典型的热天环境中,各油箱地面燃油温度均要高于巡航状态温度;
- (3) 在典型的热天环境中,燃油的最高温度时刻出现在地面终了状态,而且最高点出现在集油箱内,分析研究时应重点关注集油箱内燃油的温度变化情况。

## 参考文献:

[1] 李占国. 未来飞机燃油系统设计和仿真技术[J]. 航空科学技术,1996(3):23-26.  
[2] 徐志英,庄达民. 飞机燃油系统热管理研究[J]. 航空动力学报,2007,22(11):1833-1837.  
[3] 冯震宙,高行山,刘永寿,岳珠峰. 某型飞机燃油系统数值建模方法与仿真分析[J]. 飞机设计,2007,14(5):65-71.  
[4] 王震. 飞机燃油箱防爆及抑爆材料应用技术[J]. 航空科学技术,2002(3):33-35.  
[5] Sforza P M. Commercial Airplane Design Handbook[M]. USA: University of Florida,2007.  
[6] Boeing company. B737-700/800 System Schematic Manual[G].  
[7] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社,1998.