

飞机燃油箱可燃性定量分析的燃油箱热参数计算方法研究

郭军亮 周宇穗 王 澍 周 伟

(上海飞机设计研究院动力燃油系统设计研究部,上海 200235)

Study of Fuel Tank Thermal Data Calculating Method for

Aircraft Fuel Tank Flammability Quantitative Analysis

Guo Junliang Zhou Yusui Wang Shu Zhou Wei

(Powerplant and Fuel Systems Department of SADRI, Shanghai 200235, China)

摘要:燃油箱热参数是飞机燃油箱可燃性定量分析的关键输入参数之一。依据燃油箱热量平衡方程,推导得出了燃油箱两个热参数平衡温差与热时间常数的定量关系式。基于该关系式,给出了燃油箱热参数的计算方法。此外,还介绍了燃油平均温度的两种获取方法:燃油箱热模型方法和燃油系统热特性飞行试验方法。

关键词:飞机燃油系统;燃油箱可燃性定量分析;燃油箱热参数

[Abstract] The quantitative equation between Equilibrium Delta Temperature (ΔT) and Thermal Time Constant (τ) is derived based on the fuel tank heat balance equation in this paper. The method based on the quantitative equation between ΔT and τ for calculating the fuel tank thermal data is presented. Furthermore, two kinds of methods for obtaining the fuel bulk temperature are also presented in this paper: Fuel Tank Thermal Model Method and Fuel System Thermal Flight Test Method.

[Key words] aircraft fuel system; fuel tank flammability quantitative analysis; fuel tank thermal data

0 引言

飞机燃油箱爆炸是航空安全的主要威胁之一^[1]。20世纪60年代以来,人们对飞机燃油箱防爆问题开展了一些研究工作^[2-4],尽管取得了一些研究成果,但在很长的时间内燃油箱防爆问题并未受到重视。1996年7月,美国环球航空公司一架波音747飞机起飞后,在爬升时中央翼燃油箱的可燃蒸汽被点燃导致爆炸,造成机上人员全部遇难。这起事故的发生直接促使FAA(美国联邦航空局)开始十分重视燃油箱防爆问题的研究,以减少或避免因燃油箱爆炸导致灾难性事故的发生。

FAA通过对1960年以来全球发生的18起飞机燃油箱爆炸事故的总结研究后发现,引起燃油箱爆炸的原因大多是由于油箱油面上方空间存在的可燃性蒸汽被电缆失效等点火源点燃,从而引发爆炸^[5]。通过多年的研究工作,FAA先后通过发布适航规章修正案、咨询通报等,给出了具体的评估及降低燃油箱可燃性的方法,以提高燃油箱安全性。而燃油箱热参数是FAA规定的燃油箱可燃性定量分析方法的关键输入参数,本文主要对燃油箱热参数的计算方法进行研究。

1 飞机燃油箱可燃性定量分析方法概述

根据FAA在2008年9月颁布的第125号修正

案以及咨询通告AC25.981-2A的补充说明等,评估燃油箱可燃性有定性分析和定量分析两种方法。飞机燃油箱如果可以等效为传统未加热铝机翼油箱,则局方可以接受用定性分析的方法来证明燃油箱可燃性符合要求。定性分析只是一个选择,亦可采用定量分析的方法来证明其符合性。但是,如果油箱采用了FRM(可燃性降低方法),不管油箱是否为传统未加热铝机翼油箱,均只能通过定量分析的方法来证明其可燃性的符合性。

FAA规定的燃油箱可燃性暴露的唯一定量分析方法为,采用FAA于2007年6月28日发布的燃油箱可燃性暴露评估方法V10版(Fuel Tank Flammability Assessment Method V10)对燃油箱可燃性进行评估^[6]。燃油箱可燃性暴露评估方法V10版为Excel表格制作的计算程序,因其使用Monte Carlo(蒙特卡罗)统计方法来确定机队飞行中某些未知变量的可燃性数据,该方法又被称作蒙特卡罗分析。蒙特卡罗分析的输入参数主要包括飞机参数、飞行参数、油箱使用参数、机身油箱输入参数、燃油箱热参数、模拟次数以及FRM输入参数等。

燃油箱热参数是蒙特卡罗分析的关键输入参数,包括平衡温差 ΔT (Equilibrium Delta Temp)和热时间常数 τ (Exponential Time Constant),如图1所示^[6]。 ΔT 表示在给定足够长时间下,燃油箱达到热平衡时的燃油平均温度与外界温度之差。 τ 表示假定燃油按照标准指数函数的规律进行热传递。要

采用蒙特卡罗分析方法对燃油箱的可燃性进行定量分析,必须首先确定燃油箱热参数。

Fuel Tank Thermal Data			
The fuel is assumed to be heated at ambient temperature			
Tank Constants, Ground Conditions:			
Equilibrium Delta Temp	Eng OFF	Eng ON	Deg F
	60	60	
Exponential time Constant - Tank near Empty	200	200	Minutes
Exponential time Constant - Tank near Full	400	400	Minutes
Tank Constants, Flight Conditions:			
Equilibrium Delta Temp			Deg F
	60		
Exponential time Constant - Tank near Empty	200		Minutes
Exponential time Constant - Tank near Full	400		Minutes

图1 蒙特卡罗分析燃油箱热参数输入表

由图1可知,蒙特卡罗分析需要输入3个不同飞行阶段的平衡温差 ΔT 以及6个不同飞行阶段的热时间常数 τ 。

2 燃油箱热参数计算方法

2.1 平衡温差与热时间常数关系推导

假设所选取的飞行阶段飞行时间为 n 分钟,燃油温度为 T ,外界环境总温为 T_a ,单位时间内输入燃油箱的热量为 Q ,单位时间内燃油箱向外界环境的换热量为 H 。并且,令 $UA = H/(T - T_a)$, $MC = M_f C_f + M_s C_s$,其中 M_f 、 C_f 、 M_s 和 C_s 分别表示燃油及燃油箱结构的质量和导热系数。

根据能量守恒定律,可得燃油箱热量平衡方程为:

$$MC \frac{dT}{dt} = Q - UA(T - T_a) \quad (1)$$

令 $\tau = MC/UA$,代入式(1)中,则有:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Q}{MC} - \frac{T - T_a}{\tau} \quad (2)$$

在平衡状态时 $\frac{dT}{dt} = 0$,则有:

$$T_s - T_a = \frac{Q\tau}{MC} \quad (3)$$

式(3)中 T_s 表示在选取的飞行阶段内燃油箱达到热平衡时的燃油平均温度, T_s 为常数。因此,式(2)可以被改写为:

$$\frac{d(T - T_s)}{dt} = \frac{T_s - T_a}{\tau} - \frac{T - T_a}{\tau} = \frac{T_s - T}{\tau} \quad (4)$$

$$\text{即: } \frac{d(T - T_s)}{T - T_s} = -\frac{dt}{\tau} \quad (5)$$

对式(5)在 $0 \sim i$ 分钟的时间段内进行积分,可得:

$$\int_0^{T_i} \frac{d(T - T_s)}{T - T_s} = \int_0^{t_i} -\frac{dt}{\tau} \quad (6)$$

式(6)中 T_i 为第 i 分钟时燃油温度,展开可得:

$$\frac{T_s - T_i}{T_s - T_0} = e^{-\frac{t_i}{\tau}} \text{ 即:}$$

$$\frac{T_i - T_0}{T_s - T_0} = 1 - e^{-\frac{t_i}{\tau}} \quad (7)$$

根据平衡温差 ΔT 的定义, $\Delta T = T_s - T_a$,将上式代入式(7)中,可得平衡温差与热时间常数的关系式:

$$\frac{T_i - T_0}{\Delta T + T_a - T_0} = 1 - e^{-\frac{t_i}{\tau}} \quad (8)$$

2.2 燃油箱热参数计算方法

联立式(3)和式(7),可得燃油平均温度与热时间常数的关系式:

$$T_i = \left(\frac{Q\tau}{MC} + T_a - T_0 \right) (1 - e^{-\frac{t_i}{\tau}}) + T_0 \quad (9)$$

因为式(9)中 Q 、 MC 、 T_a 及 T_0 为已知或可通过计算获得平均值,所以给定热时间常数后即可获得燃油平均温度的理论计算值。将燃油平均温度的理论计算值与实际值进行比较,通过迭代求解,即可获得满足误差要求的热时间常数。FAA规定燃油平均温度的理论计算值误差要求为不超过 3°F 。需要说明的是,如果不能获得满足上述误差要求的热时间常数,蒙特卡罗分析也可以选用比实际值大的燃油平均温度理论计算值所对应的热时间常数。

3 燃油平均温度获取方法

3.1 燃油箱热模型方法

燃油箱热模型方法通过对燃油箱的热特性进行模拟,主要计算燃油温度、气相空间温度和燃油箱壁面温度等。建立燃油箱热模型是通过飞机燃油系统的分析,简化出一些典型的系统部件和热源,对各部件所涉及的流动和换热问题进行分析,建立各部件间以及与热源间的换热关系。在相关仿真软件的基础上,建立各部件的仿真模型,然后通过系统集成,建立系统仿真模型。利用数字仿真分析系统实现在各种飞行状态下的动态仿真计算,得到每个油箱隔间的动态温度参数。需要说明的是,应采用部分地面和飞行试验数据对计算得到的温度数据进行校核。燃油箱热模型方法的主要流程如图2所示。

3.2 燃油系统热特性飞行试验方法

燃油系统热特性飞行试验是通过在燃油箱内布置温度传感器,在飞行试验时测得燃油的平均温度、燃油箱内气相空间的平均温度以及燃油箱壁面温度。通过分析飞机燃油箱的结构、燃油消耗和流动情况,初步确定燃油箱的隔舱划分(隔舱内各处的温度基本一致),并在每个隔舱内布置温度传感器。然后,至少分别在标准天气和热天气两种天气条件

下进行短航程和长航程飞行试验。根据飞行试验温度数据,修正燃油箱隔舱划分数量及温度传感器布

置位置,并重新进行飞行试验。燃油系统热特性飞行试验方法的主要流程如图3所示。

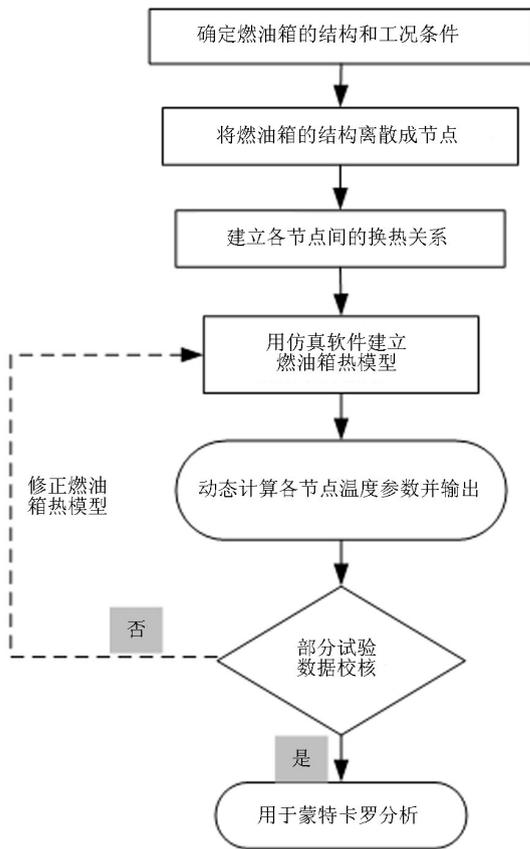


图2 燃油箱热模型法主要流程

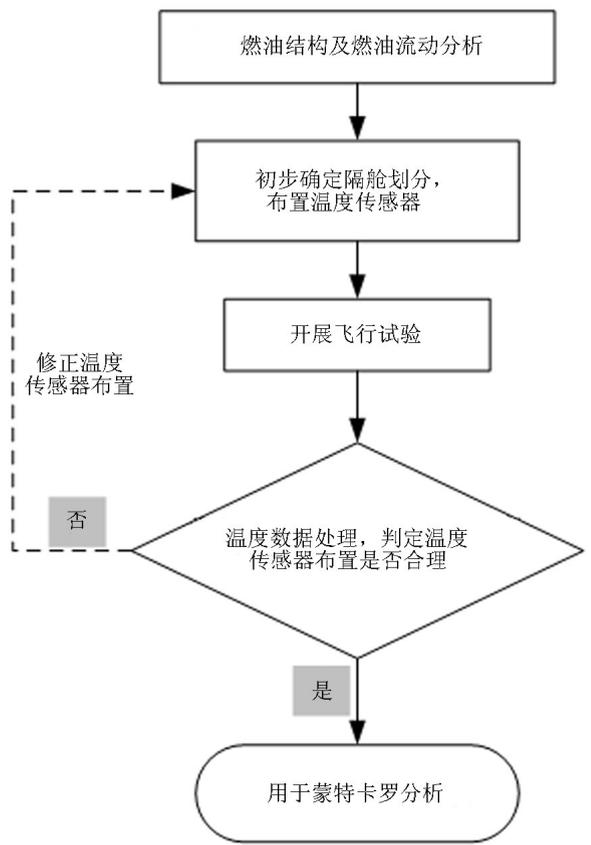


图3 燃油系统热特性飞行试验法主要流程

4 结论

本文对飞机燃油箱可燃性定量分析的燃油箱热参数计算方法进行了研究,其主要过程如下:

(1)利用燃油箱热模型方法或者燃油系统热特性飞行试验方法获得燃油平均温度、气相空间温度和燃油箱壁面温度。

(2)根据与热时间常数的关系式求得燃油平均温度的理论值,并与燃油平均温度实际值进行比较,通过迭代求解获得符合误差要求的热时间常数。

(3)根据平衡温差与热时间常数的定量关系式,即可求得燃油箱可燃性定量分析所需的不同飞行阶段的平衡温差。

参考文献:

[1]William M. C. Developing a fuel - tank inerting system [J]. Aircraft Survivability , Published by the Joint Aircraft

Survivability Program Office , 2005 , 20-23.

[2] Richard A. Nichols. Fuel Tank Inerting System: US, 1969843667A [P]. 1971. 12. 21.

[3]Warella Browall,etal. Feasibility of adapting a thin film permeable membrane to jet transport fuel tank inerting system [R]. ADA003799. Federal aviation administration, January, 1975.

[4]Anderson,C.L. . Vulnerability. Methodology and Protective Measures for Aircraft Fire and Explosion Hazards. Volume 3. On-Board Inert Gas Generator System (OBIGGS) studies. Part 1. OBIGGS Ground Performance Tests [R]. ADA167357, January, 1986.

[5]14 CFR Parts25, 26, 121 et al. Reduction of Fuel Tank Flammability in Transport Category Airplanes. Final Rule. Federal Aviation Administration, July21, 2008.

[6]Fuel Tank Flammability Assessment Method(Monte Carlo Model) Version10, Federal Aviation Administration, June 28, 2007.