

基于粒子群算法的飞机燃油箱热参数反演

杜明杰, 吕旭飞, 魏锦洲, 姚尚宏

(中国飞行试验研究院 发动机所, 西安 710089)

摘 要: 为获取用于定量评估可燃性的飞机燃油箱热参数, 从集中参数法建立燃油箱热模型的假设出发, 基于粒子群算法和飞行试验数据, 对某型飞机中央油箱热参数的反演进行了探索。选取了 4 种不同的参数作为目标函数, 对比研究了目标函数的选取对热参数反演结果的影响。研究结果显示: 反演得出的燃油箱热参数模型, 其输出值与试验值变化规律一致, 证明了该方法的有效性; 其次以整体均方差为目标函数的反演结果与试验值最为吻合, 模型输出值与试验值最大偏差为 2.62 K; 最后对整体均方差增加惩罚项的措施能够使反演后热参数模型满足适航规章的要求。

关 键 词: 燃油箱热模型; 热特性参数; 粒子群算法; 可燃性评估; 飞行试验

中图分类号: V217

文献标志码: A

Inversion of thermal parameters of aircraft fuel tank based on particle swarm optimization

DU Mingjie, LÜ Xufei, WEI Jinzhou, YAO Shanghong

(Power-Plant Institute, Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

Abstract: In order to obtain the thermal parameters of aircraft fuel tank for quantitative evaluation of flammability, relying on the assumption of establishing fuel tank thermal model with lumped parameter method, the inversion of thermal parameters of a certain aircraft central fuel tank was explored based on particle swarm optimization algorithm and flight test data. Four different parameters were selected as the objective functions to study the influences of the selection of the objective function on the inversion results of thermal parameters. Results showed that the output value of the fuel tank thermal parameter model was consistent with the experimental value, which proved the effectiveness of the method; the maximum deviation between the model output and the experimental value was 2.62 K; finally, adding a penalty term to the overall mean square error could make the inversion thermal parameter model meet the requirements of airworthiness regulations.

Keywords: fuel tank thermal model; thermal characteristic parameters; particle swarm optimization; flammability assessment; flight test

一直以来, 燃油箱爆炸威胁着民用飞机的飞行安全。据统计, 近半个世纪以来全球民用飞机发生过 18 起飞机燃油箱爆炸事件, 造成数百人遇难^[1]。而 1996 年 TWA800 航班飞行事故的原因定位到飞机爬升过程中燃油箱起火引起飞机爆炸, 该事件直接促使 FAA (Federal Aviation Adminis-

tration) 开始重视燃油箱的防火防爆问题^[2]。在对众多的飞行事故调查研究后, FAA 发现引起燃油箱爆炸的原因大多是电缆失效等形成点火源引燃了燃油箱气相空间中存在的可燃蒸汽。因此 FAA 先后以适航规章修正案和咨询通告的形式提出了燃油箱可燃性的定量要求, 即飞机燃油箱

收稿日期: 2021-07-10

作者简介: 杜明杰(1992—), 男, 工程师, 硕士生, 主要从事燃油系统试飞方面的研究。

引用格式: 杜明杰, 吕旭飞, 魏锦洲, 等. 基于粒子群算法的飞机燃油箱热参数反演[J]. 航空动力学报, 2023, 38(1): 250-256. DU Mingjie, LÜ Xufei, WEI Jinzhou, et al. Inversion of thermal parameters of aircraft fuel tank based on particle swarm optimization[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(1): 250-256.

平均可燃性暴露率 FAFE(fluammability average flammability exposure), 同时要求申请人必须采用适航当局规定的蒙特卡洛方法(Monte Carlo)对燃油箱可燃性进行定量分析。2010年, FAA在已有的V10版本基础上, 更新了燃油箱可燃性评估方法V11版 FTFAM(fuel tank flammability assessment method)。该方法也是目前唯一的定量分析燃油箱可燃性暴露率方法。

FAA提出的FAFE的概念以及FTFAM是以众多的理论和试验研究为基础的^[3-7]。采用FTFAM对飞机机队燃油箱可燃性进行定量分析时, 需对每一个单位时间进行可燃性判断, 对于未采用降低可燃性措施(FRM)的油箱, 只采用可燃性界限判据: 即当前时刻燃油温度是否在可燃界限内; 因此, 获取表达燃油箱温度变化规律的热参数对可燃判断至关重要。

中国民航规章CCAR-25-R4^[8]的附录N25.3燃油箱可燃性暴露分析章节中明确了获取燃油箱热参数的要求的途径, 即“用于Monte Carlo分析的燃油热特性参数输入值必须由地面和飞行试验数据或经过地面和飞行试验数据验证的油箱热模型获得”。

出于经济性和实用性考虑, 型号申请人通常采用燃油箱热模型分析的方法来获得燃油温度变化规律, 因此相当多的学者进行了类似的研究。张瑞华、刘卫华等^[9]对CCAR 25.981条款变迁历史、内涵与要求进行了系统分析, 总结了油箱可燃性符合验证方法, 认为评估可燃性的难点在于油箱热特性参数的获取。郭军亮等^[10-11]研究了飞机燃油箱可燃性定量分析的燃油箱热参数计算方法, 简要介绍了基于燃油箱热模型和基于飞行试验的两种热参数获取方法; 并对燃油箱热特性开展了数值仿真研究。吕亚国等^[12]建立了基于热网络法的飞机燃油箱非稳态热分析模型。

国内虽然对FTFAM进行了一定的研究, 也对FAFE中涉及的燃油箱热模型进行过计算分析研究, 但是利用飞行试验中产生的大量数据求解燃油箱热特性参数还未有深入的探讨和应用。

粒子群优化算法PSO(particle swarm optimization)属于高级启发式仿生算法, 其基本算法及改进算法已在多个领域有所应用, 如路径规划^[13-14]、神经网络算法优化^[15-16]以及数据挖掘中的参数反演^[17-18]。PSO在上述问题的应用中表现出了良好的适用性。

基于此, 文章以某型飞机中央油箱为研究对

象, 参照FTFAM以集中参数法建立燃油箱热模型思路, 以飞行试验数据为驱动, 通过粒子群算法对热特性参数进行反演分析。尝试以飞行试验数据来求取可用于可燃性评估的飞机燃油箱热模型和热特性参数。

1 计算方法介绍

1.1 集中参数法

现代民用运输类飞机燃油箱一般采用整体式燃油箱结构, 为满足燃油转输的前提下减缓燃油晃动, 通常在内部设置一定数量的肋板。过往的研究表明^[11], 飞行中飞机的姿态变化引起密封肋或半密封肋间的燃油流动, 加上结构振动诱发的掺混, 使得燃油温度基本一致。因此以肋板为参考合理划分的油箱隔舱为热分析单元, 可忽略内部燃油温度的空间分布差异。

针对上述热分析单元, 在FTFAM的计算程序中, 为了简化计算运用集中参数法建立油箱热模型^[3], 即认为燃油内部在同一时刻均处于同一温度下, 对应的能量方程如式(1)所示

$$qA_f - h(T - T_a)A_c = \rho Vc \frac{dT_f}{dt} \quad (1)$$

式中 q 为流入热流, A_f 为等效面积, A_c 为与外界换热面积, T_a 为大气总温, ρ 为燃油密度, c 为比热容, T_f 为燃油温度, V 为体积。

式(1)的解析解为

$$\frac{T_{f,n+1} - T_{f,n}}{(T_{a,n+1} + \Delta T) - T_{f,n}} = 1 - e^{(-\Delta t/\tau)} \quad (2)$$

其中 $\Delta T = \frac{qA_f}{hA_c}$, $\tau = \frac{\rho Vc}{hA_c}$, t 为时间。

FTFAM将外部热源、飞机燃油箱结构和燃油及属性对传热的影响模化到平衡温差(ΔT)和热时间常数(τ)中, 用户通过输入不同状态下的油箱热参数, 即可求取飞行中的燃油温度。可以看出飞行过程中燃油温度的变化符合指数函数的规律。

1.2 粒子群算法

PSO算法由Kennedy和Eberhart于1995年提出, 是一种群体智能算法。算法的基本原理是随机初始化一群粒子(初解), 依据目标函数, 通过迭代获取最优解。在迭代计算中, 粒子速度和位置的更新按照式(3)和式(4)计算, 粒子位置的更新规则兼顾了全局搜索和局部搜索, 即粒子既具备沿原搜索轨迹上精细搜索的能力也具有脱离原有路线向新的搜索轨迹搜索的能力。

$$x_{i,j}^{d+1} = x_{i,j}^d + v_{i,j}^d \quad (3)$$

$$V_i = \omega \times V_i + c_1 r_1 \times (p_{\text{best},i} - x_i) + c_2 r_2 \times (g_{\text{best}} - x_i) \quad (4)$$

式中 ω 为惯性权重因子; c_1 、 c_2 为学习因子; $v_{i,j}^d$ 为第 i 个粒子速度的 j 维分量; $x_{i,j}^d$ 为粒子 i 当前位置的 j 维分量; r_1 、 r_2 为 $[0, 1]$ 内的随机数; $p_{\text{best},i}$ 为粒子 i 历史最优位置; g_{best} 为粒子全局最优位置。

2 飞行试验简介

2.1 试验对象

本文的研究对象为某型试验机右侧中央油箱(见图1)。该试验机燃油箱系统对称分布,单侧燃油箱分为中央油箱、机翼油箱和通油箱。随燃油消耗,机翼油箱的燃油在重力和引射泵的作用下经管路和肋板间的通流孔进入中央油箱。

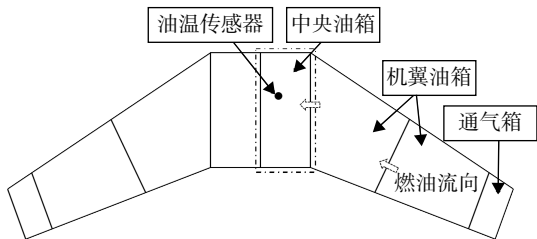


图1 某型燃油箱系统布置示意图

Fig. 1 Layout schematic diagram of an aircraft fuel tank system

适航规章要求,构建燃油箱热模型时,应至少利用两次飞行试验数据进行验证。试验条件应包含长航程和短航程飞行剖面,且应有热气候条件(试验时地面大气温度高于299.8 K)的试验。本文选取9架次试飞数据作为总的数据集,依次命名为Flt-1~Flt-9,各试飞架次的基本信息如表1所示。由表1可知本文所选用的试飞数据集包含了上述长短航程飞行,满足规章要求。

表1 飞行试验基本信息

Table 1 Essential information of flight tests

序号	地面气温/K	巡航时间/min	备注
Flt-1	306.9	28.5	
Flt-2	299.9	1	
Flt-3	305.5	27	短航程
Flt-4	307.2	180	长航程
Flt-5	310.1	28	
Flt-6	294.5	180	长航程
Flt-7	305.1	30	
Flt-8	290.2	28	短航程
Flt-9	287.4	1	

2.2 数据预处理

由于传感器工作环境的复杂性,以及数据采集、传输过程中的误差,使得采集数据通常存在异常点和少量噪声。为保障后续分析的有效性,本文采用式(5)对原始数据进行移动平滑去噪处理,设定滑动窗口长度为240 s。由于燃油温度为缓变量,在数据平滑处理的基础上,每间隔1 min取1个数据点组成建模的数据集。以热天短航程(Flt-3)剖面飞行为例,原始数据及预处理后的数据对比如图2所示,可以看到处理后的数据保留了原始数据的主要特征,屏蔽了局部的高频波动和噪声。

$$x(k) = \frac{y(k) + y(k-1) + \dots + y(k-l+1)}{l} \quad (5)$$

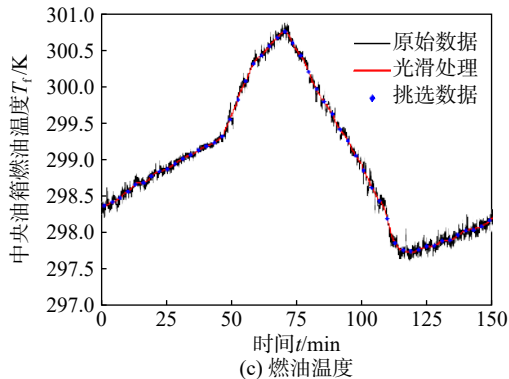
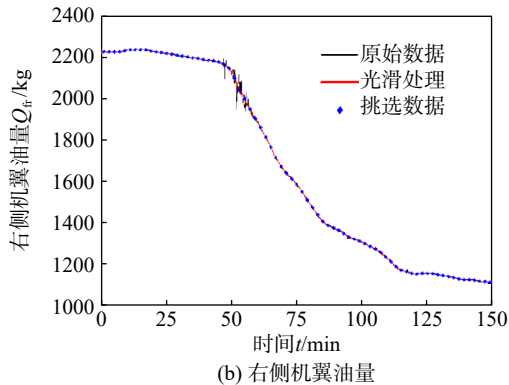
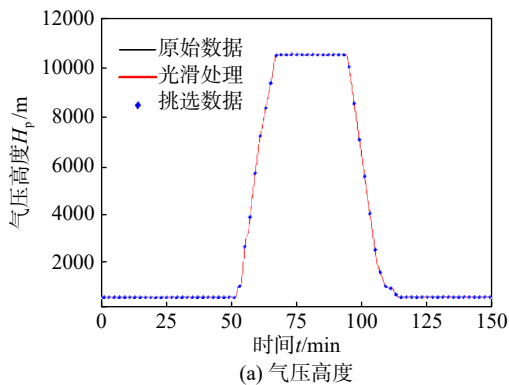


图2 热天短航程数据预处理

Fig. 2 Data preprocessing for short flight in hot weather

其中 $y(k)$ 为原始数据, l 为滑动窗口的长度, $x(k)$ 即为平滑后的值。

2.3 计算参数设置

2.3.1 反演参数设定

本文研究的反演参数分别有平衡温差(ΔT)和热时间常数(τ)。根据式(2), 在定义热特性参数的自变量时, 主要考虑了飞行中气压高度和燃油油量变化等因素。气压高度影响外界空气密度和大气温度, 同时影响表面传热系数进而影响平衡温差和时间常数。而飞机燃油量的变化, 将引起燃油体积、油箱内干湿面的换热面积变化, 进而影响时间常数。同时考虑到该试验机飞行高度范围大, 燃油箱数目多, 以及输油系统将引起油箱间燃油能质交换和掺混等因素, 因此以分段函数形式定义了不同飞行高度和不同燃油量时的反演参数。反演参数 $\mathbf{X} = [X_{(1)}, X_{(2)}, \dots, X_{(21)}]$, 如表 2 所示, $[X_{(1)}, X_{(2)}, \dots, X_{(6)}]$ 分别对应不同气压高度的平衡温差; 如表 3 所示, $[X_{(7)}, X_{(8)}, \dots, X_{(21)}]$ 分别对应不同飞行高度和油量时的热时间常数。其中 H_{cr} 为飞机巡航高度, Q_r 表示右侧机翼油量, H_p 为气压高度, ΔT 为平衡温差。

2.3.2 目标函数

为研究目标函数的选取对燃油箱热参数反演结果的影响, 本文选取了评价模型输出值与试验

表 2 平衡温差变量定义

Table 2 Definition of equilibrium temperature difference

H_p/m	$\Delta T/K$
场高	$X_{(1)}$
609.6	$X_{(2)}$
3 048	$X_{(3)}$
7 620	$X_{(4)}$
9 144	$X_{(5)}$
H_{cr}	$X_{(6)}$

表 3 热时间常数 τ 变量定义

Table 3 Definition of thermal time constant τ s

H_p/m	Q_r/kg				
	0	500	1 000	2 500	满油
场高	$X_{(7)}$	$X_{(8)}$	$X_{(9)}$	$X_{(10)}$	$X_{(11)}$
3 048	$X_{(12)}$	$X_{(13)}$	$X_{(14)}$	$X_{(15)}$	$X_{(16)}$
H_{cr}	$X_{(17)}$	$X_{(18)}$	$X_{(19)}$	$X_{(20)}$	$X_{(21)}$

值吻合度的 4 种统计参数(最大偏差、均方差、架次最大均方差和带惩罚项的均方差)作为目标函数 $J(\Delta T, \tau)$, 具体计算公式见表 4, 分别记为反演分析的条件 1~4; 其中 T_{pq} 为第 p 个试飞架次的 q 时刻的温度试验值, $T_{m,pq}$ 为对应时刻的模型输出温度值。反演过程即为求取目标函数 $J(\Delta T, \tau)$ 的最小值以及对应的最优反演参数。

表 4 目标函数定义

Table 4 Definition of objective function

序号	参数名	计算公式	备注
条件 1	最大偏差	$J(\Delta T, \tau) = \max(T_{pq} - T_{m,pq})$	
条件 2	均方误差	$J(\Delta T, \tau) = \frac{1}{nN} \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^n (T_{pq} - T_{m,pq})^2$	
条件 3	架次最大均方误差	$J(\Delta T, \tau) = \max \left[\frac{1}{n} \sum_{p=1}^n (T_{pq} - T_{m,pq})^2 \right]$	
条件 4	带惩罚项的均方误差	$J(\Delta T, \tau) = \frac{1}{nN} \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^n [a(T_{pq} - T_{m,pq})]^2$	当 $T_{m,pq} - T_{pq} < -1.1$ K 时, a 取 3; 其余情况 a 取 1。

3 结果分析

分别在条件 1~4 的参数设置下, 利用粒子群算法(PSO)反演用于构建油箱热模型的热特性参数。计算过程中算法的参数设置如下: 初始种群为 200 个粒子, 惯性权重 $\omega=0.8$, 自我学习因子 $c_1=0.5$, 群体学习因子 $c_2=0.5$ 。变量限制范围为: 平衡温差为 0~33.3 K, 时间常数为 0~20 000 s;

粒子更新速度范围设置为-1.5~1.5。

图 3 所示为反演迭代计算过程中, 历史最佳目标函数值随迭代步数的变化。由图 3 可知, 计算约迭代 70 次后, 目标函数值趋于稳定。4 种条件下求解的平衡温差和热时间常数结果如表 5~表 6 所示。

适航规章燃油箱热模型验证合格的标准是:

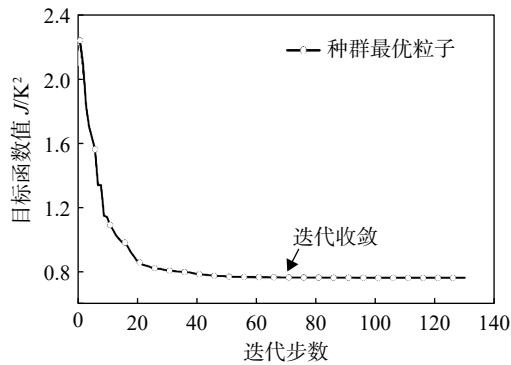


图 3 目标函数随迭代次数变化

Fig. 3 Objective function changes with the iterations

计算所获取的燃油温度与地面/飞行条件下实测的燃油温度变化规律一致,且实测值不大于计算值 1.67 K 或大于 1.67 K 的持续时间不超过 5 min。若计算值比试验值高,则认为热模型更为保守,适航规章允许采用保守的热模型进行可燃性评估。

中央油箱燃油温度的模型输出值与试飞结果对比如图 4 所示。可以看出,模型输出值与试验值变化规律一致,说明利用 PSO 反演的油箱热参数模型能够表达飞行中燃油温度的变化规律。

表 5 平衡温差 ΔT 反演结果Table 5 Inversion results of equilibrium temperature difference ΔT

K

序号	H_p/m					
	场高	609.6	3 048	7 620	9 144	H_{cr}
条件 1	9.67	2.27	6.97	22.91	22.13	7.95
条件 2	0	7.02	10.98	17.60	21.14	10.58
条件 3	5.30	2.44	25.06	20.66	15.62	15.29
条件 4	9.67	2.27	6.97	22.91	22.13	7.95

表 6 热时间常数 τ 反演结果Table 6 Inversion results of thermal time constant τ

s

序号	H_p/m	Q_n/kg				
		0	500	1 000	2 500	满油
条件 1	场高	1 442	1	20 000	18 600	8 510
	3 048	12 990	5 310	18 950	17 790	13 000
	H_{cr}	14 810	8 600	20 000	10 560	2 590
条件 2	场高	13 553	18 905	20 000	5 565	20 000
	3 048	116 701	17 811	20 000	14 438	5 891
	H_{cr}	17 819	13 024	20 000	2 713	15 178
条件 3	场高	16 678	14 329	13 519	7 499	12 388
	3 048	7 765	14 989	17 212	14 432	4 058
	H_{cr}	4 773	1 653	20 000	695.6	15 225
条件 4	场高	2 413	13 398	20 000	3 851	12 687
	3 048	14 124	14 580	20 000	3 281	19 373
	H_{cr}	6 676	9 643	20 000	4 350	12 419

表 7 统计了 4 个模型计算值与试验值的对比结果。可以看出,条件 2 的计算最大偏差值最小为 2.62 K,条件 1 次之,条件 3 最大;从架次最大均方差来看,条件 3 最小为 1.44 K²,条件 2 次之,条件 1 最大;从整体均方差来看,条件 2 最小为 0.77 K²,条件 3 次之,条件 1 最大。

与此同时,统计了与试验数据对比中不同满足适航精度要求的时间段长度 t_{ns} ,其中条件 1 在

Flt-1、Flt-3、Flt-4、Flt-5 和 Flt-6 中存在不满足适航要求的时间段;条件 2 和条件 3,分别在 Flt-1、Flt-3 和 Flt-5 中存在不满足适航要求的时间段,但对应的时间段持续时间均比条件 1 要短,且条件 3 比条件 2 略短;条件 4 的输出值满足适航要求。以 Flt-3 试验为例,如图 4(c)所示,总体上看,中央翼油箱的热参数模型输出油温在起飞和落地后比试验值高,在巡航阶段略低于试验值,最大误差

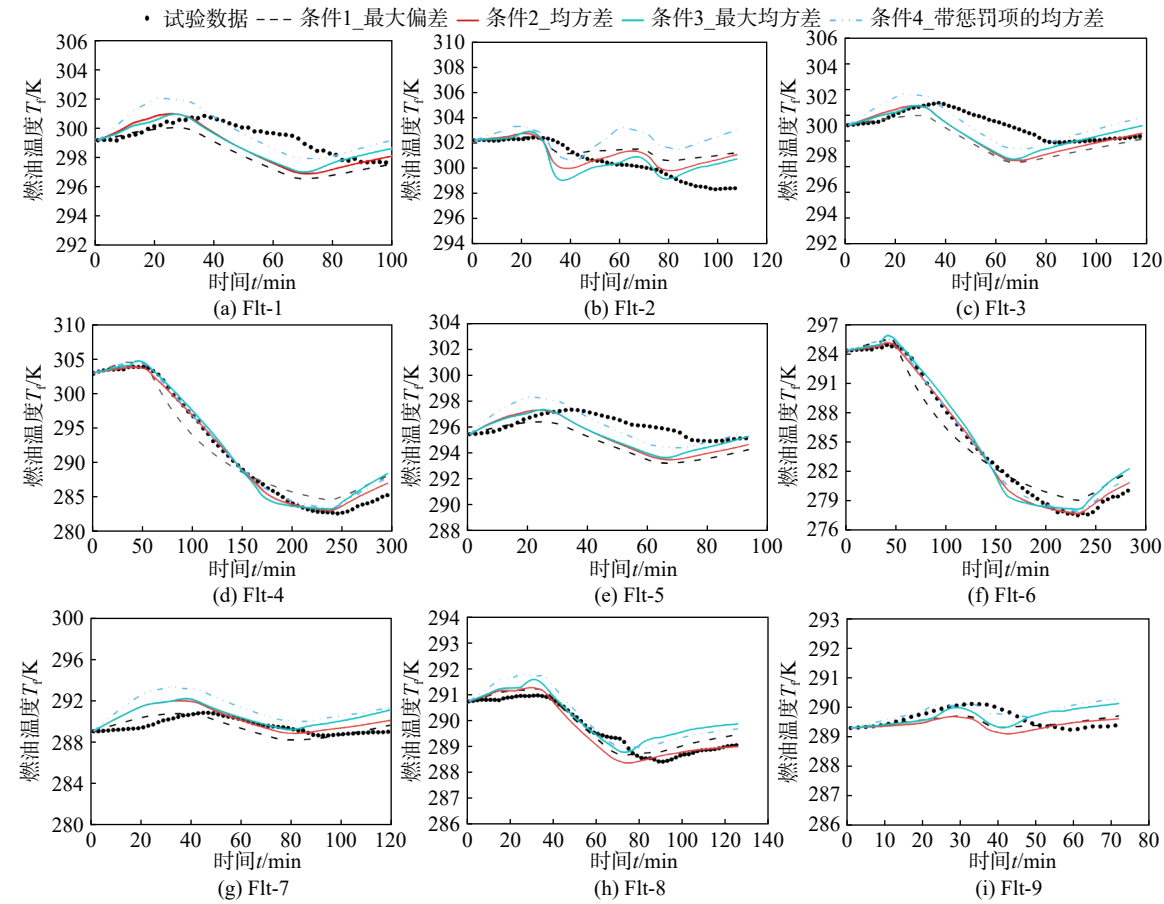


图 4 模型输出与试验燃油温度对比图

Fig. 4 Comparison diagram of fuel temperature between model output and flight test

表 7 模型输出值与试验结果对比分析

Table 7 Comparative analysis of model output values and test results

序号	统计参数	Flt-1	Flt-2	Flt-3	Flt-4	Flt-5	Flt-6	Flt-7	Flt-8	Flt-9
条件 1	最大偏差/K	2.68	2.81	2.81	2.81	2.66	2.28	1.17	0.61	0.68
	架次最大均方差/K ²	1.93	1.78	2.14	3.27	2.53	1.72	0.40	0.09	0.09
	均方差/K ²					1.82				
	t_{ns}/min	32	0	39	62	38	40	0	0	0
条件 2	最大偏差/K	2.32	2.62	2.62	1.72	2.37	1.53	2.03	0.88	0.83
	架次最大均方差/K ²	1.28	1.40	1.63	0.50	1.74	0.33	0.94	0.11	0.14
	均方差/K ²					0.77				
	t_{ns}/min	17	0	31	0	26	0	0	0	0
条件 3	最大偏差/K	2.21	2.90	2.52	3.11	2.22	2.21	2.07	0.97	0.72
	架次最大均方差/K ²	1.16	1.44	1.44	1.44	1.39	1.10	1.44	0.33	0.17
	均方差/K ²					1.17				
	t_{ns}/min	17	0	28	0	23	0	0	0	0
条件 4	最大偏差/K	0.88	1.87	0.92	0.61	0.83	0.47	1.74	0.49	0.29
	架次最大均方差/K ²	1.02	5.22	1.06	0.83	0.96	0.33	3.65	0.31	0.18
	均方差/K ²					1.30				
	t_{ns}/min	0	0	5	0	0	0	0	0	0

出现在巡航接近结束时。对于条件1,最大误差为2.81 K,燃油温度试验值比计算值高1.67 K的时间段持续时间为39 min,相应的条件2的持续时间为31 min,条件3的持续时间为28 min,条件4的持续时间为5 min,可以看出条件4的计算值满足适航规章的误差要求。对于本文中央油箱热参数的反演问题,从条件2和条件4的反演结果对比说明通过对整体均方差进行适当的处理,能够使计算值与试验值变化规律一致性的基础上,满足适航规章对于热模型的要求。

4 结 论

1) 以飞行试验数据为驱动,基于PSO反演得出了燃油箱热参数模型,其模型输出值与试验值变化规律一致,证明了该方法的有效性;本文所做工作可为从试验数据出发反演油箱热参数提供参考。

2) 对于本文研究的中央油箱,以不符合适航要求持续时间等统计参数作为参考,对整体均方差增加惩罚系数的处理,能够使反演后的模型计算值与试验值在变化规律一致性的基础上,满足适航规章对于热模型的要求。

参考文献:

- [1] 魏书有.飞机燃油箱可燃性暴露评估研究[D].天津:中国民航大学,2013.
WEI Shuyou. Aircraft fuel tank flammability exposure evaluation research[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2013. (in Chinese)
- [2] Federal Aviation Administration. Reduction of fuel tank flammability in transport category airplane: Amendment Nos. 25-125[S]. Washington DC: Federal Register, 2008: 14-15.
- [3] Aviation Rulemaking Advisory Committee. Fuel tank harmonization working group final report[R]. Washington DC: Aviation Rulemaking Advisory Committee, 1998.
- [4] Federal Aviation Administration. A review of the flammability hazard of jet fuel vapor in civil transport aircraft fuel tanks[R]. DOT/FAA/AR-98/26, 1998.
- [5] SUMMER S M. Mass loading effects on fuel vapor concentration in an aircraft fuel tank ullage[R]. DOT/FAA/AR-99/65, 1999.
- [6] SUMMER S M. Ground and flight testing of Boeing 737 center wing fuel tank inerted with nitro-gen-enriched air[R]. DOT/FAA/AR-01/63, 2001.
- [7] CAVAGE W M, SUMMER S A. A study of flammability of commercial transport airplane wing fuel tanks[R]. DOT/FAA/AR-08/8, 2008.
- [8] 中国民用航空局. 运输类飞机适航标准: CCAR-25-R4[S]. 北京: 中国民用航空局, 2011: 256.
- [9] 张瑞华, 刘卫华, 刘春阳, 等. 运输类飞机燃油箱可燃性适航符合性方法[J]. 航空动力学报, 2020, 35(5): 1099-1108.
ZHANG Ruihua, LIU Weihua, LIU Chunyang, et al. Flammability and airworthiness compliance method of fuel tank for transport aircraft[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(5): 1099-1108. (in Chinese)
- [10] 郭军亮, 周宇穗, 王澍, 等. 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[J]. 民用飞机设计与研究, 2011(3): 20-22.
GUO Junliang, ZHOU Yusu, WANG Shu, et al. Study of fuel tank thermal data calculating method for aircraft fuel tank flammability quantitative analysis[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2011(3): 20-22. (in Chinese)
- [11] 郭军亮. 民用飞机燃油箱热特性数值仿真[J]. 航空计算技术, 2013, 43(1): 65-68.
GUO Junliang. Numerical simulation on fuel tank thermal characters for civil aircraft[J]. Aeronautical Computing Technique, 2013, 43(1): 65-68. (in Chinese)
- [12] 吕亚国, 任国哲, 刘振侠, 等. 飞机燃油箱热分析研究[J]. 推进技术, 2015, 36(1): 61-67.
LÜ Yaguo, REN Guozhe, LIU Zhenxia, et al. Thermal analysis of fuel tank for aircraft[J]. Journal of Propulsion Technology, 2015, 36(1): 61-67. (in Chinese)
- [13] 祖伟. 基于粒子群优化算法的水下潜器实时路径规划技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.
ZU Wei. Real-time path planning system based on PSO for underwater vehicles[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2008. (in Chinese)
- [14] 韩颜, 许燕, 周建平. 粒子群-蚁群融合算法的机器人路径规划[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020, 62(2): 47-50.
HAN Yan, XU Yan, ZHOU Jianping. A fusion algorithm of particle swarm and ant colony optimization for robot path planning[J]. Modular Machine Tool and Automatic Manufacturing Technique, 2020, 62(2): 47-50. (in Chinese)
- [15] 刘坤, 谭营, 何新贵. 基于粒子群优化的过程神经网络学习算法[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2011, 47(2): 238-244.
LIU Kun, TAN Ying, HE Xingui. Particle swarm optimization based learning algorithm for process neural networks[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2011, 47(2): 238-244. (in Chinese)
- [16] CHRISTOPHER K M, KEVIN D, SEPPIJ. Bayesian optimization models for particle swarms[R]. New York, US: the Conference on Genetic and Evolutionary Computation, 2005.
- [17] 王峰, 周宜红, 赵春菊, 等. 基于混合粒子群算法的特高拱坝不同材料热学参数反演分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(7): 747-755.
WANG Feng, ZHOU Yihong, ZHAO Chunju, et al. Thermal parameter inversion for various materials of super high arch dams based on the hybrid particle swarm optimization method[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(7): 747-755. (in Chinese)
- [18] 王乐洋, 靳锡波, 许光煜. 断层参数反演的动态惯性因子的粒子群算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(4): 510-519.
WANG Leyang, JIN Xibo, XU Guangyu. Particle swarm optimization algorithm with dynamic inertia factors for inversion of fault parameters[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(4): 510-519. (in Chinese)

(编辑: 王碧琨)