

飞机油面控制器结构优化及试验研究

刘 伟¹, 凡佳飞², 邱恩举¹, 王 璐¹, 任 涛¹, 蔡登安³, 周光明³

(1. 中国航空工业集团公司金城南京机电液压工程研究中心, 南京 211106;

2. 空军装备部驻上海地区军事代表局驻南京地区第三军事代表室, 南京 211106;

3. 南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室, 南京 210016)

摘要: 飞机左右机翼输油不平衡故障将会影响飞机操纵甚至飞行安全。基于某型机的输油控制原理, 对双油面控制器进行结构优化改进。借助 ANSYS 软件对双油面控制器内部流场进行模拟。研究发现, 控制口压力对其性能影响较大; 压力较低时, 燃油从油面控制器钟形活门处流出的形式为“涌出”, 较稳定; 压力较高时, 燃油流出形式为“喷出”, 射流会顺势进入浮子腔, 促使输油过程提前结束, 严重降低结构性能。根据仿真获得的射流喷射轨迹, 在上浮子摇臂上设计了挡板, 阻止燃油进入浮子腔, 使双油面控制器在全包线范围内均能有效拉开输油开始与结束的油面差。试验结果表明, 优化后的双油面控制器带来的油面差是单油面控制器的数倍, 高效解决了输油不平衡的问题。该油面控制器的优化设计可供其他机型推广。

关键词: 输油不平衡; 油面控制器; ANSYS 软件; 油面差; 结构优化

中图分类号: V228.1

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2022)04-0670-08

Structural Optimization and Experimental Study of Aircraft Oil Surface Controller

LIU Yi¹, FAN Jiafei², QIU Enju¹, WANG Lu¹, REN Tao¹, CAI Deng'an³, ZHOU Guangming³

(1. AVIC Nanjing Engineering Institute of Aircraft Systems, Nanjing 211106, China; 2. The Third Military Representative Office Stationed in Nanjing, Military Representative Office of the Air Force Armament Department Stationed in Shanghai, Nanjing 211106, China; 3. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The imbalance of fuel delivery between the left and right wing tanks will affect the aircraft handling and even flight safety. Based on the fuel delivery control principles of a certain type of aircraft, the structure of the double oil surface controller is optimized and improved. The internal flow field of the double oil surface controller is simulated by ANSYS software. It is found that the control port pressure has a large impact on its performance. When the pressure is low, the fuel flows out from the bell valve of the oil surface controller in the form of “gushing out”, which is more stable; but when the pressure is high, the fuel flows out in the form of “spraying out”, and the fuel will follow the trend into the float chamber, which can prompt the end of the fuel delivery process ahead of schedule and seriously reduce the structural performance. According to the fuel injection trajectory obtained by the simulation, a baffle is designed on the upper float rocker arm to stop the fuel from entering the float chamber, so that the double oil surface controller can effectively widen the height difference of the fuel level at the beginning and end of the fuel delivery within the entire envelope range. The test results show that the oil level difference brought by the optimized double oil surface controller is

收稿日期: 2022-03-14; 修订日期: 2022-05-11

通信作者: 周光明, 男, 博士, 教授, 博士生导师, E-mail: zhougm@nuaa.edu.cn。

引用格式: 刘伟, 凡佳飞, 邱恩举, 等. 飞机油面控制器结构优化及试验研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(4): 670-677. LIU Yi, FAN Jiafei, QIU Enju, et al. Structural optimization and experimental study of aircraft oil surface controller[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(4): 670-677.

several times higher than that of the single oil surface controller, which efficiently solves the problem of oil delivery imbalance. The optimization design of the oil surface controller can be promoted for other airplanes.

Key words: unbalanced fuel delivery; oil surface controller; ANSYS software; oil level difference; structure optimization

飞机燃油系统作为整架飞机的核心系统之一,担当着保证飞行安全、激发飞机性能等使命和责任,其主要作用不仅是向发动机持续不断且稳定可靠地提供燃油;同时还扮演调节飞机重心、冷却机载相关设备的角色。伴随着对飞机性能极致的追求,现代飞机燃油系统呈现零件数目多、附件种类杂、构成复杂、维修困难等特点^[1]。

学者对飞机燃油系统的研究也愈发广泛,涵盖技术分析、产品优化设计、地面模拟试验及故障诊断等多方面^[2-4]。杨波等^[5]系统地介绍了燃油系统各模块的工作原理。段福宽等^[6]解决了飞行姿态导致的油量读数偏差这一问题,为油量传感器的设计提供了理论依据。此外,靳国涛等^[7]、高泽海等^[8]分别对左右机翼输油不平衡、供油增压泵叶片磨损导致系统性能退化等故障进行了分析。技术的发展离不开可靠的试验。朱红等^[9]提出了燃油系统全尺寸地面试验边界条件的模拟方法及相关数据测控系统的设计策略,具有极高的工程实用价值。

燃油系统体量庞大,构造复杂。当飞机输油不平衡时,可能会造成左右机翼中油量有很大差异,导致重心偏移,会对飞机操纵造成影响,甚至危及飞行安全。例如某型飞机装挂机翼副油箱飞行,偶发两侧副油箱输油速度不一致问题,最大相差有时可达500 kg。目前的解决措施是设置一个告警点,当左右机翼油量差值超过该值时,发出告警信息,使空勤人员采取提前返航等应急处置措施。如此一来,直接影响飞行任务的执行,降低了效率。

造成输油不平衡的原因有:通气油箱设计时考虑不充分、射流传感器入口管路段漏油、输油控制活门质量等^[10-12],且这些故障模式较为隐蔽,不严重时不易发觉。虽然有一些应对措施,如:定期更换输油活门和射流传感器;合理布置油表数目和安装位置以求精准测量;优化增压输油管路设计,减少弯段,避免堵塞影响正常工作;事后,基于油量的估计区间进行故障诊断^[7],避免再次发生。但这些都只是降低故障发生的概率,不能从根本上解决问题。

采用传统的单油面控制器可以在一定程度上解决上述问题,但由于其关闭和打开油面高度差小,单次输油持续时间很短,仍然在长时间累积后,造成了明显的输油不平衡。

双油面控制器的设计,拉大了输油系统打开油面与关闭油面的高度差,延长了单次输油的持续时间,理论上可降低了左右机翼输油不平衡的风险。

但是,实际应用中仍然发现在某些入口压力下,控制器的实际工作情况和设计目标差异较大等现象。鉴于此,本文在介绍双油面控制器的工作原理基础上,通过CFD计算仿真得到了不同入口压力下3个通道中燃油流量,分析故障可能的原因。在此基础上优化了结构,并通过试验对优化前后的关闭和打开油面差进行了测量。油面控制器的优化改进,从根源上杜绝了故障发生,改善了输油系统的工作稳定性,进一步保障了飞机飞行安全,对后续产品优化有重大借鉴意义。

1 油面控制器的工作原理和存在问题

1.1 工作原理

军用飞机燃油传输系统多采用增压输油技术,某型飞机从左右两机翼副油箱增压输油工作原理如图1所示。燃油从左、右翼副油箱出发,经输油控制活门、加油控制活门后到达供油箱。加油控制活门是否开启受油面控制器控制。

原方案为单浮子结构,构造原理如图2所示,当供油箱内油面高到一定程度时,浮子上浮,钟形活门关闭,使得加油控制活门的控制腔建压关闭,输油中止;随着燃油的消耗,浮子随供油箱油面下落,钟形活门打开,加油控制活门控制腔泄压打开,输油开始。虽然理论上打开、关闭油面为同一油面,但实际受摩擦力、油压、振动、飞行姿态等因素影响,打开油面与关闭油面存在5~10 mm的高度差^[13]。

但是单油面控制器在实际使用中,由于左右机翼管路布置、成品性能存在个体差异,尤其是左右活门打开、关闭过程(通常不超过3 s)的性能表现互异,影响短时输油油量。而该结构下油面上升不超过10 mm即输油中止,单次输油持续时间很短,放大了活门个体差异,长时间累积后,造成了明显的输油不平衡现象。

显然,增加单次输油的持续时间,使活门尽可能工作在全开的稳定状态,可以使单次飞行左右机翼副油箱油量偏差控制在一个较小的、可接受的范围内,实现左右机翼输油的相对平衡。因此,用图

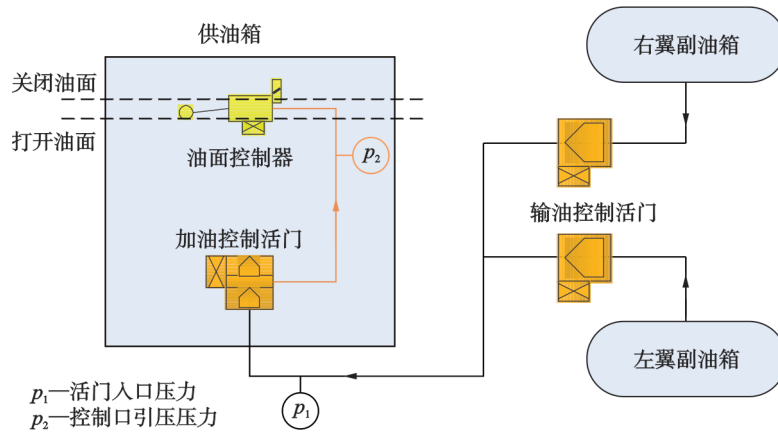


图1 机翼副油箱增压输油原理图

Fig.1 Schematic diagram of pressurized fuel delivery from auxiliary wing tanks

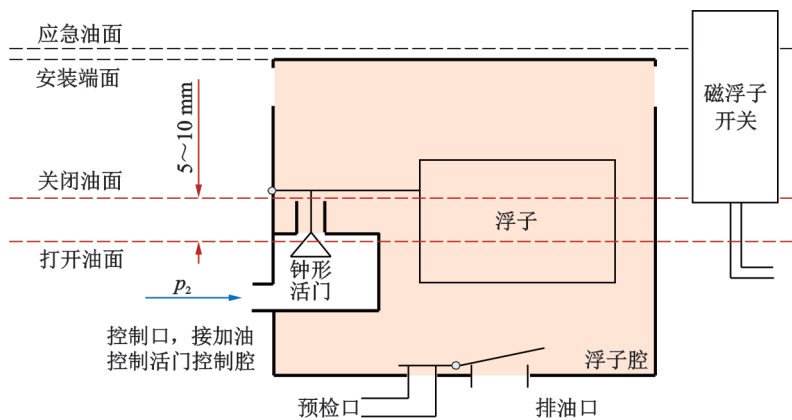


图2 单油面控制器结构原理图

Fig.2 Structural schematic diagram of single oil surface controller

3所示双油面控制器替代单油面控制器理论上可以解决上述问题。

双油面控制器在排油口处新增由下浮子控制的压胶活门组件,使浮子腔不再与供油箱直接连通,下浮子组件用于控制打开油面,上浮子组件用于控制关闭油面,实现打开与关闭油面的单独控制。供油箱初始处于高油位时,随着燃油消耗,油面降低至打开油面,下浮子组件落下,浮子腔内油液经排油口流出至供油箱,于是上浮子组件落下,钟形活门打开泄压,指令加油控制活门开始输油。输油过程持续到供油箱内油面上升至打开油面时,下浮子浮起,排油口封闭;继续输油,油面再上升至关闭油面,燃油通过上窗口进入浮子腔,上浮子组件浮起,钟形活门关闭建压,加油控制活门关闭,输油结束。

双油面控制器下,打开与关闭油面的高度差设计值为40~60 mm,相较于单油面控制器,输油时间增长了近7倍,对解决左右机翼输油不平衡问题有着实质性的帮助。

1.2 实际应用中存在的问题及分析

实际产品中测试显示,副油箱增压上升后,油

面差逐渐减少,当达到某一上限值时,供油箱出现关闭油面控制异常的情况,即油面未上升至关闭油面,输油则提前中止,两油面此时仅保持有10 mm的距离,与单油面控制器相当,远低于设计值。

高入口压力下,输油过程会提前结束,表明上浮子提前浮起。换句话说,下浮子封闭排油口之后,仍然有燃油进入了浮子腔。

测试发现,正常情况下,输入的燃油可以通过双油面控制器的钟形活门涌出,不会进入浮子腔。但如果调高控制口压力 p_2 (见图1)时,会有大量油液受压力作用顺势喷射入浮子腔,随时间累计,出现上浮子提前浮起、输油中止的异常情况^[14]。

工作时,进入双油面控制器的燃油有3个排出方向,记为Out 1、Out 2及Out 3,标注见图4,仅Out 3方向燃油会进入浮子腔。

经理论计算可知,双油面控制器中上浮子所受浮力与重力平衡时,上浮子需要有75 cm³的体积淹没在油液中,该位置位于双油面控制器安装端面以下34.5 mm处。换算后得出,浮子腔内需再进油140 mL时,可使上浮子刚好浮起关闭钟形活门,结束单次输油过程。

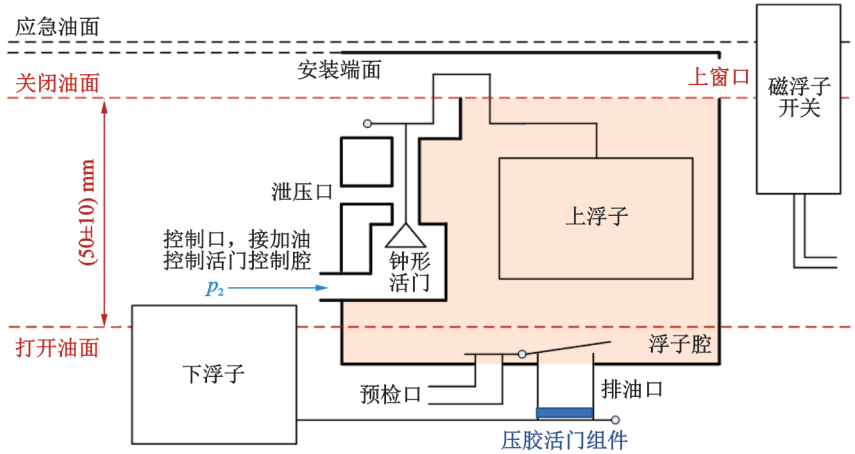


图 3 双油面控制器结构原理图

Fig.3 Structural schematic diagram of double oil surface controller

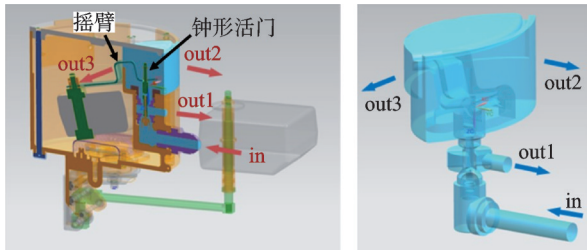


图 4 钟形活门处喷射流道模型

Fig.4 Flow channel model at the bell valve

2 双油面控制器内部流场模拟

2.1 物理模型

选取双油面控制器内腔流道为研究模型,并对该结构作适当的简化,以内壁面为边界,忽略外部结构与壁面厚度。如图 5 所示,结构尺寸见表 1。

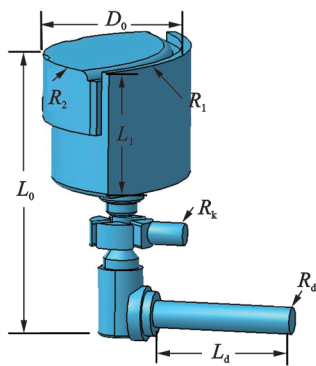


图 5 双油面控制器内腔流道几何模型

Fig.5 Geometric model of the inner chamber flow path of the double oil surface controller

表 1 双油面控制器内腔流道的结构尺寸

Table 1 Structural dimension of the inner chamber flow path of the double oil surface controller

符号	L_0	D_0	L_1	R_1	R_2	L_d	R_d	R_k
尺寸/mm	63	31	27	50	34	31	3	2.5

2.2 数学建模

借助 ANSYS 分析软件,建立燃油流经双油面控制器时的数值模型,以描绘其内部燃油分布和流场特性。

双油面控制器内腔的流动可视为湍流流动,湍流模型采用标准 $k-\epsilon$ 两方程模型,控制方程组的离散格式为一阶迎风,通过耦合解法对离散的方程组进行求解。计算中,固体壁面为无速度滑移和无质量渗透,采用标准壁面函数处理。考虑到结构内部液-气两相共存,基于流体体积 (Volume of fluid, VOF) 模型开展两相流场模拟。

双油面控制器内腔流道结构复杂,为确保计算精度,必须赋予高质量的网格。选用六面体和四面体相结合进行网格划分,在流动变化较剧烈的地方对其局部网格加密,保证了数值模拟具有良好的收敛性。生成的网格如图 6 所示。

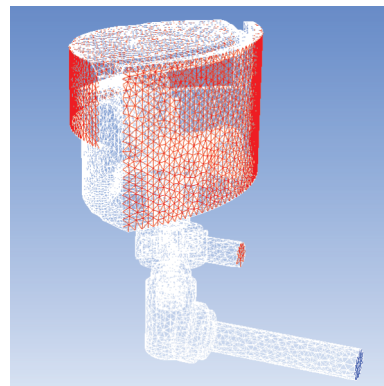


图 6 网格划分图

Fig.6 Mesh generation

2.3 仿真结果及分析

通常加油控制活门处于打开状态时,活门入口压力 p_1 典型值在 40~50 左右,到达双油面控制器控制口的压力 p_2 略低于 5 kPa。以下按 $p_2 =$

5 kPa 进行计算流体动力学 (Computational fluid dynamics, CFD) 多相流仿真分析^[15-16], 内腔流道

的燃油体积分数随时间的变化情况如图 7 所示。

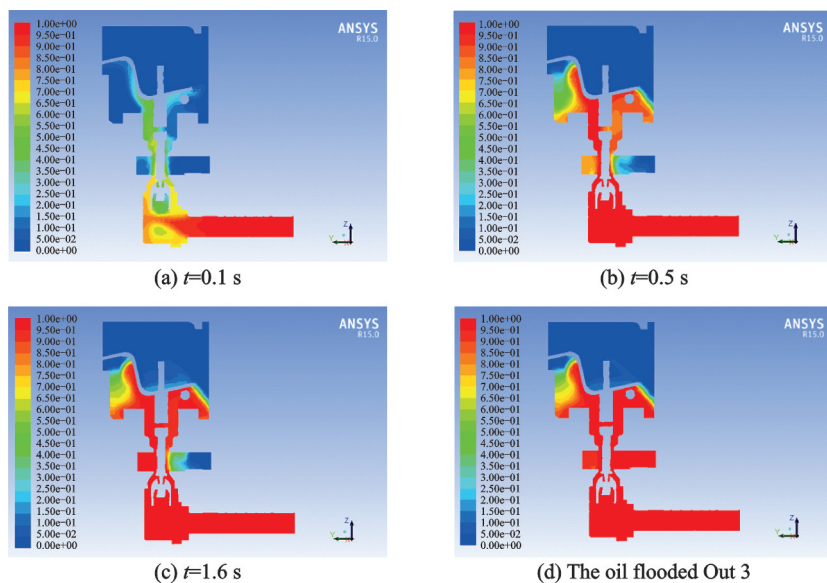


图7 $p_2=5$ kPa 时燃油体积分数变化情况

Fig.7 Change of fuel volume fraction when $p_2=5$ kPa

流场稳定后, 3 个排出方向的流量列于表 2, 约有 16% 的燃油进入浮子腔, 流量为 4.4 mL/s。小孔处 (Out 1) 流出量较小, 是因为钟形活门处流速较大, 起到了类似引射泵的效果, 使燃油不易从小孔流出。

表 2 稳定后钟形活门喷射出的油量分布 ($p_2=5$ kPa)
Table 2 Distribution of the oil quantity injected by the bell valve after stabilization ($p_2=5$ kPa)

位置	In	Out 1	Out 2	Out 3
说明	燃油入口	小孔	进入油箱	进入浮子腔
流量/($\text{mL}\cdot\text{s}^{-1}$)	26.5	0	22.1	4.4
占比/%	100	<1	84	16

假设油箱油面上升速度约为 5 mm/s, 油面高度差为 50 mm, 则期间浮子腔内进油量为

$$Q_1 = 4.4 \text{ mL/s} \times 10 \text{ s} = 44 \text{ mL}$$

计算结果表明, Q_1 远低于 140 mL, 因此上浮子不会提前浮起。该结论与地面试验及多数装机试验情况相一致。

进一步分析发现, 3 个出口位置的流量与控制口压力 p_2 密切相关。控制口进油压力 p_2 越低, 小孔流出 (Out 1) 占比越大; 反之 p_2 越大, 喷射进入浮子腔内 (Out 3) 的燃油越多。图 8 为控制口压力 p_2 分别在 1 和 20 kPa 时燃油体积分数云图。当控制口压力为 1 kPa 时, 小孔位置处 (Out 1) 云图显示为红色, 表明该处流量较大; 反观图 8(b), 在控制口压力达到 20 kPa 时, Out 3 位置处燃油流量较大, 而 Out 1 位置处基本没有燃油流出, 证实了上述结论。

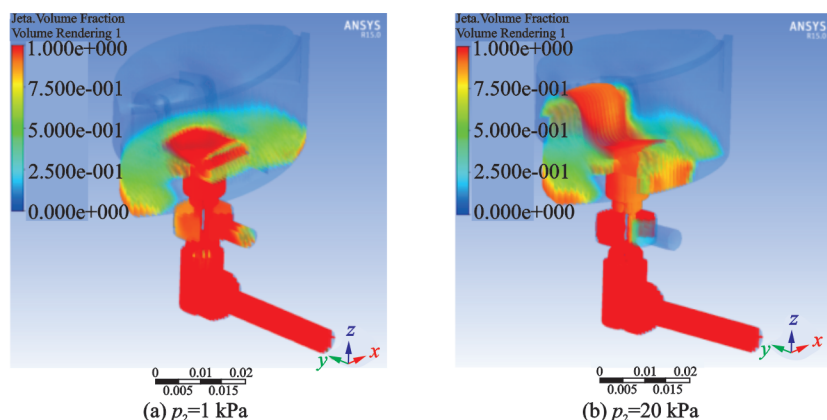


图 8 不同控制口压力下的燃油体积分数云图

Fig.8 Contour maps of fuel volume fraction under different control port pressures

当控制口压力 p_2 分别为 10 和 20 kPa 时,进入浮子腔的燃油流量分别为 16.5 和 27.8 mL/s,在输油时间为 10 s 的前提下,上浮子均将提前浮起。仿真结果表明,进入浮子腔的燃油流量随双油面控制器控制口压力的增大而加快;当压力达到一定值,浮子腔内燃油率先积累至临界值,上浮子浮起,输油过程提前中止,即出现前文所述的异常情况。

3 结构优化及试验验证

从图 8 可知, p_1 (或 p_2) 低时,燃油从钟形活门处流出的形式是“涌出”; p_1 (或 p_2) 压力高时为“喷出”。

“涌出”时流场较为稳定,几乎没有燃油会越过壳体上的隔板进入浮子腔;“喷出”时则会有大量的燃油顺着上浮子摇臂进入浮子腔。因此可在燃油喷射路径上设置障碍,如摇臂零件处增设阻隔板(图 4)。

试验验证是保证输油系统正常工作的重要前提。组建了燃油系统综合模拟试验台,来对双油面控制器的性能进行验证。试验测试原理如图 9 所示,增压加油组件可实现对入口压力的调节,透明试验油箱的设置方便观察燃油流动轨迹和记录油面高度差,试验结束后,燃油受回油组件控制流入初始油箱。仪器参数见表 3。

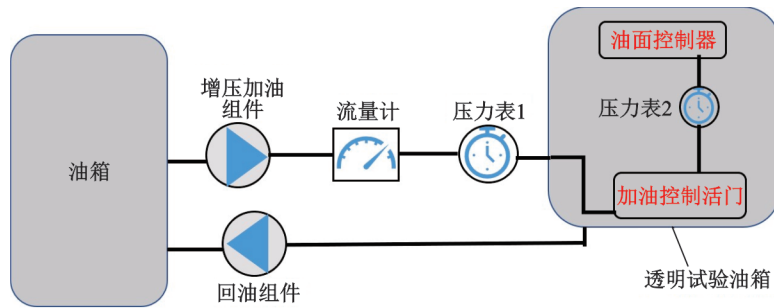


图 9 试验原理图

Fig.9 Test schematic diagram

表 3 试验仪器参数

Table 3 Test instrument parameters

设备名称	测量范围	准确度等级
压力表 1	0~0.1 MPa	0.4 级
压力表 2	0~0.05 MPa	0.4 级
流量计	0~40 000 L/h	0.5 级
秒表	0~60 min	±0.3 s/15 min

据悉,全飞行包线范围内加油控制活门入口压力 p_1 理论最大值可能达到 80 kPa,故将模拟试验中入口压力 p_1 考核值设置为 50、60、70 和 80 kPa 四个等级。

传统的单油面控制器首先被测试,结果记录于表 4。数据显示,在单油面控制器作用下,输油开始与停止界面的高度差始终为 9 mm。短暂的输油过程,极易造成左右机翼输油不平衡问题;不仅如此,输油活门和控制附件频繁的工作也会导致自身寿命的减少,降低系统的可靠性。

对优化前的双油面控制器进行测试,油面位置的测量值列于表 5。显然,当 $p_1 \leq 60$ kPa 时,油面差可达到约 70 mm,能够大大延长输油时间,符合设计期望。而 $p_1 \geq 70$ kPa,对应进油压力 $p_2 \geq 11$ kPa 时,部分燃油受高压作用喷射入浮子腔,上浮子提前浮起,输油中止,此时油面的高度差缩小至

表 4 单油面控制器性能测试数据

Table 4 Performance test data of the single oil surface controller

p_1 /kPa	p_2 /kPa	上油面位置/ mm	下油面位置/ mm	高度差/ mm
50	5	97	88	9
60	7	98	89	9
70	11	98	90	8
80	17	99	90	9

10 mm 以内,双油面控制器退化为单油面控制器,无法再拉开期望的油面差。对于优化前的双油面控制器,其是否能正常工作的转折点发生在 $p_1 \approx 65$ kPa ($p_2 \approx 9$ kPa) 处。

同样,对优化后的双油面控制器进行测试,详细的测量值被列于表 6。在测试范围内,上下油面

表 5 优化前双油面控制器性能测试数据

Table 5 Performance test data of double oil surface controller before optimization

p_1 /kPa	p_2 /kPa	上油面位置/ mm	下油面位置/ mm	高度差/ mm
50	5	128	60	68
60	7	130	61	69
70	11	79	70	9
80	17	73	68	5

表6 优化后的双油面控制器性能测试数据

Table 6 Performance test data of double oil surface controller after optimization

p_1/kPa	p_2/kPa	上油面位置/ mm	下油面位置/ mm	高度差/ mm
50	5	128	60	68
60	7	130	60	70
70	11	129	69	60
80	17	131	67	64

的控制距离稳定在60~80 mm;高入口压力试验中观察到燃油受到摇臂零件上挡油板的阻挡,几乎不再喷射入浮子腔。优化后的双油面控制器在全包线范围内达到预期效果,形成稳定的油面差。

综上所述,优化后的双油面控制器功能逻辑符合实际需求。试验再次证实双油面控制器内部流场的分布最直接的影响因素为加油控制活门入口压力 p_1 。相较于单油面控制,优化后的双油面控制器在全包线范围内延长了输油控制系统的工作时间,有效消除左右机翼输油不平衡问题,保障了飞行安全。

4 结 论

为彻底解决某型机左右机翼输油不平衡故障,本文基于其输油控制原理,对双油面控制器进行优化改进,取得良好效果。经过分析与试验,得出如下结论:

(1)传统的单油面控制器输油系统引发左右机翼输油不平衡的原因可归结为打开与关闭油面高度差较小,导致单次输油时间极短。较短的时间内,左右输油控制活门未能及时地处于完全打开状态,形成输油差异并随时间累积。

(2)基于CFD的仿真分析表明,双油面控制器钟形活门处排油有“涌出”与“喷出”两种形式,与控制腔引压压力相关。引压压力低时,排油表现为“涌出”,引压压力高时,排油表现为“喷出”。

(3)试验表明,优化措施有效、可靠。在上浮子摇臂上设计阻隔板,解决了高入口压力下双油面控制器失效的问题。优化后的控制器,在全飞行包线范围内均能拉开期望的油面差,是单油面控制器的数倍,大大延长了单次输油时间,消除了左右机翼输油不平衡问题,值得其他机型推广借鉴。

参考文献:

[1] 乔亚琼. 飞机燃油系统智能化故障诊断方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.

QIAO Yaqiong. Intelligent diagnosis method research on airplane fuel system [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007.

- [2] 李征鸿, 王亚盟, 刘静, 等. 燃油跨多隔舱流动及晃动特性分析[J]. 航空学报, 2021, 42(8): 396-403.
LI Zhenghong, WANG Yameng, LIU Jing, et al. Characteristics of fuel flowing and sloshing in crossing multi-compartments tank[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(8): 396-403.
- [3] REEVES J, REMENYTE-PRESCOTT R, ANDREWS J, et al. A sensor selection method using a performance metric for phased missions of aircraft fuel systems[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2018, 180: 416-424.
- [4] GAO Zehai, MA Cunbao, SONG Dong, et al. Deep quantum inspired neural network with application to aircraft fuel system fault diagnosis[J]. Neurocomputing, 2017, 238: 13-23.
- [5] 杨波, 郑捷. 飞机机电综合管理框架下燃油系统建模与仿真[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(7): 880-884.
YANG Bo, ZHENG Jie. Modeling and simulation of aircraft fuel system under the framework of electromechanical integrated management[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(7): 880-884.
- [6] 段福宽, 揭裕文, 许应虎, 等. 飞机燃油系统油量计算与误差分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2005, 37(6): 811-815.
DUAN Fukuan, JIE Yuwen, XU Yinghu, et al. Aircraft fuel calculation and attitude error analysis [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2005, 37(6): 811-815.
- [7] 靳国涛, 解海涛, 丁舸. 基于油量区间估计的飞机左右机翼油箱输油不平衡故障诊断[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2021, 22(1): 45-49.
JIN Guotao, XIE Haitao, DING Ge. A fault diagnosis of unbalanced fuel delivery of aircraft left and right wing tanks based on fuel quantity interval estimation [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2021, 22(1): 45-49.
- [8] 高泽海, 马存宝, 宋东. 飞机燃油供油系统性能退化与故障预测[J]. 西北工业大学学报, 2015, 33(2): 209-215.
GAO Zehai, MA Cunbao, SONG Dong. Aircraft fuel feeding system performance degradation and failure prediction [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2015, 33(2): 209-215.
- [9] 朱红, 刘苏彦, 佟兴嘉. 飞机燃油系统全尺寸地面模

- 拟试验[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(S1): 145-151.
- ZHU Hong, LIU Suyan, TONG Xingjia. Full-scale ground simulation test for aircraft fuel system[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(S1): 145-151.
- [10] CHATO D J, MARTIN T A. Vented tank resupply experiment: Flight test results [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2006, 43(5): 1124-1130.
- [11] 张洪. 基于射流理论的液动输油技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- ZHANG Hong. Research on fluid-flow fuel transfer technology based on jet flow theory[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2011.
- [12] 苏志善, 李华聪, 廖盛祝, 等. 等增益比燃油计量活门型孔设计计算[J]. 航空动力学报, 2021, 36(6): 1206-1212.
- SU Zhishan, LI Huacong, LIAO Shengzhu, et al. Design and calculation of equal gain ratio fuel metering valve hole[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(6): 1206-1212.
- [13] ROY L, CHUCK C, MARTIN H, et al. Aircraft fuel systems[M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2009.
- [14] ZAPOROWSKA A, LIU Haochen, SKAF Z, et al. A clustering approach to detect faults with multi-component degradations in aircraft fuel systems[J]. IFAC-PapersOnLine, 2020, 53(3): 113-118.
- [15] LI Wei, LIU Daoming, DESBRUN M, et al. Kinetic-based multiphase flow simulation[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2020, 27(7): 3318-3334.
- [16] ZHOU Bo, LIU Hui, WANG Yihan, et al. Numerical investigation on the cavity dynamics and multiphase flow field evolution for water entry of vertical cylindrical shell[J]. Journal of Fluids and Structures, 2021, 103: 103268.

(编辑:夏道家)