

# 飞机燃油箱内漏故障分析

王康\*

(上海飞机客户服务有限公司, 上海 200241)

**摘要:** 民航飞机燃油箱在设计上采用一般对称布置的形式,燃油箱内漏会导致两侧油箱油量存在差异,在飞行中如果油量差异扩大到一定值,会触发燃油量不平衡告警,需要机组依据飞行机组操作手册非正常程序操作,消除异常告警信息,影响机组注意力,不利于飞行安全。针对某型飞机在航线运营过程中出现燃油量不平衡告警信息,首先介绍燃油系统基本架构,然后基于故障树和增强型机载飞行记录器(enhanced airborne flight recorder,简称 EAFR)数据,分析燃油不平衡告警原因,最后提出不影响航线运营的临时解决措施及后续优化建议,为故障处理和飞机设计改进提供参考。

**关键词:** 燃油量不平衡;内漏;故障树;EAFR 数据

中图分类号: V267

文献标识码: A

OSID:



## 0 引言

目前主流民航飞机的油箱大多采用结构油箱,即利用机身、机翼或尾翼的结构部件直接构成的油箱<sup>[1]</sup>,用密封处理的结构内部空间直接作为燃油容积的机翼整体油箱技术,已成为改善飞机性能、减轻结构重量的一项重要措施<sup>[2]</sup>。结构油箱可以充分利用机体内的容积,增大储油量,但是在航线运行中容易出现燃油泄漏问题。朱庆祥和凌云针对油箱结构上的泄漏问题总结了常见的泄漏原因、内外漏点查找方法以及渗漏的排除方法<sup>[3-4]</sup>;牛嘉伟等通过数据分析和排故试验分析了某型飞机因为机械部件安装错误导致的燃油量异常故障<sup>[5]</sup>;姜亮等针对燃油箱串油问题分析了不利影响及常见原因<sup>[6]</sup>;赵春阳等基于故障树分析了某型飞机输油断气活门气塞导致输油平衡的问题<sup>[7]</sup>;张鹏根据地面输油试验分析了因为燃油指示系统异常导致输油不平衡的问题<sup>[8]</sup>。成熟且服役时间较长飞机的油箱泄漏问题多为结构密封破坏导致,发现漏点的方法较成熟。针对系统件工作异常导致的泄漏,本文通过故障树和增强型机载飞行记录器(enhanced airborne flight recorder,简称 EAFR)数据分析,提出

了故障定位分析方法和后续处理建议,保障航线飞机的正常派遣。

## 1 问题描述与燃油系统架构

### 1.1 问题描述

某型飞机在起飞时左侧油箱燃油量比右侧少 180 kg,到空中巡航阶段触发了燃油量不平衡告警(FUEL IMBALANCE),机组实施交输供油后告警消除。该飞机空中双发工作正常,且油耗数据与机队其他飞机无明显差异。FUEL IMBALANCE 触发条件为左右机翼油箱油量差值大于 400 kg 且持续 30 s 以上,直到油量的差异减小到 50 kg 后告警消失。

### 1.2 燃油系统架构

该机型设有三个整体油箱,分别为左翼油箱、右翼油箱与中央翼油箱,中央翼油箱以左、右 6 号肋为边界,左、右机翼油箱以各侧机翼的 6 号肋与 22 号肋为边界,6 号肋为全密封肋,三个油箱物理隔离,可单独加放油和显示油量信息。油箱内部布置有各种系统功能管路、指示系统传感器及线缆、燃油控制相关油泵和控制阀,图 1 为燃油系统原理图。

\* 通信作者. E-mail: wangkang@comac.cn

引用格式: 王康. 飞机燃油箱内漏故障分析[J]. 民用飞机设计与研究, 2024(3):6-10. WANG K. Fault analysis about aircraft fuel tank internal leakage[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2024(3):6-10(in Chinese).

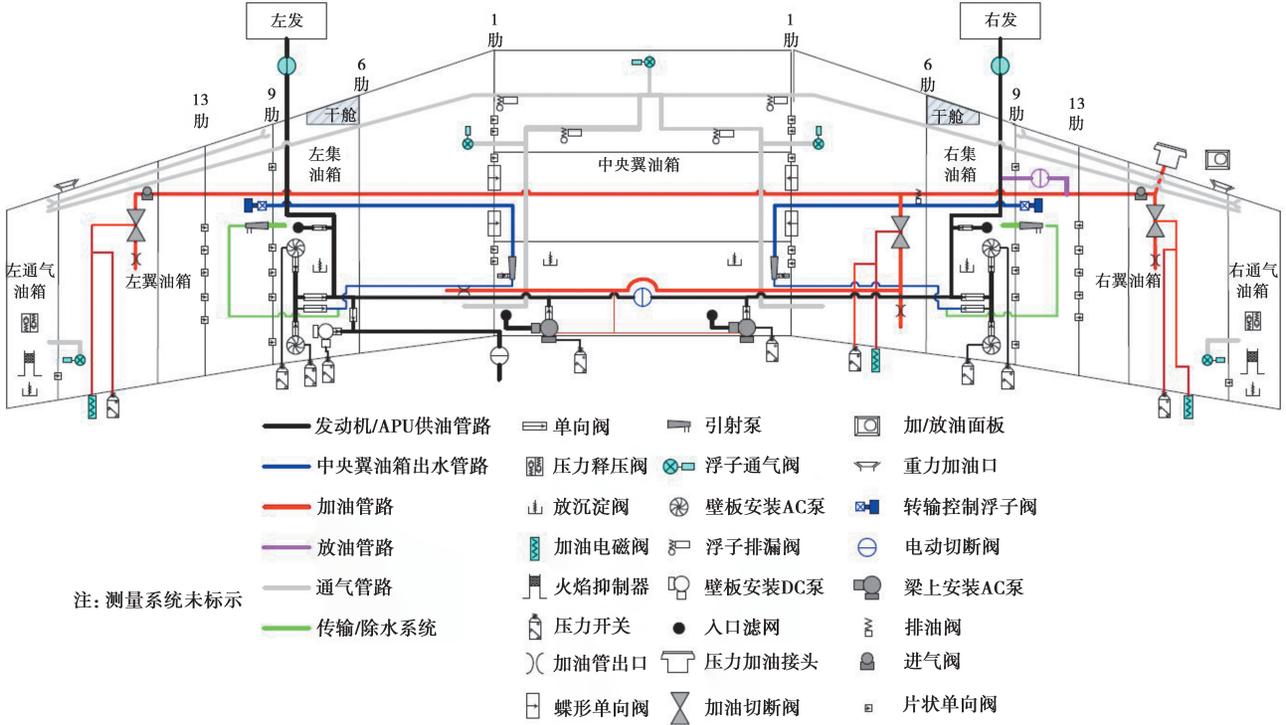


图1 燃油系统原理图

油箱内布置有通气系统,中央翼油箱有两组通气管路,分别通往左、右机翼油箱,通气管路的低点设置有浮子排漏阀,当油箱内燃油液面低于通气管路时,通气管路内聚集的液体可以通过浮子排漏阀重新回到燃油箱。

油箱内除水系统可减少不可用燃油及排除中央翼油箱底部可能存在的积水,在中央翼和外翼布置引射除水管路,当外翼油箱油面低于转输浮子控制阀时,由机翼油泵提供动流,通过中央翼油箱内引射泵,将中央翼油箱内剩余燃油转输至机翼油箱。

加放油口布置在右翼油箱前缘,加放油管路在三个油箱均有出口,具备给所有燃油箱单独加油及同时加油的能力。

左、右发动机供油系统相互独立,每个外翼集油箱内均安装两台机翼油箱燃油泵,为各自侧的发动机独立供油,左、右发动机供油系统通过一段管路相连,该段管路上安装有交输供油阀,在正常工作期间,交输供油阀可将左、右发动机供油系统隔离。APU可通过布置在左翼油箱的DC泵或机翼泵供油。

## 2 故障定位与分析

### 2.1 故障定位

检查燃油箱外部结构无泄漏情况,通过地面加

油试验,确认燃油指示系统工作正常,排除外漏和指示系统故障。

从EAFR数据提取燃油量数据如图2所示,起飞前右翼油量2 853 kg,左翼油量2 673 kg,右翼比左翼油量多180 kg;8时20分爬升结束,双发由中央翼油箱供油,两侧油量差225 kg。从8时20分至10时13分,右翼油量未变化维持在2 673 kg,左翼油量从2 448 kg减少到2 277 kg,油量差值持续扩大到400 kg以上,触发燃油量不平衡告警。机组采取措施,打开交输活门,关闭中央翼泵和左翼泵,改为右翼油箱供两侧发动机,直至燃油量不平衡告警消失。巡航阶段右翼油箱油量保持不变,排除右翼油箱油量异常增加的因素,初步判断导致燃油量不平衡的原因为燃油箱内漏,燃油从左翼向中央翼漏油。

导致燃油内漏的原因一般为结构密封破坏或系统部件工作异常。根据燃油系统原理图及飞机维修手册,穿过6号肋的系统件有通气管路、加放油管路、中央翼引射管路、发动机/APU供油管路、传感器线缆,6号肋相关的密封部件有6号肋与机翼前后梁及上下壁板密封、管路线缆穿墙密封。分析可能存在泄漏的点,故障树如图3所示。

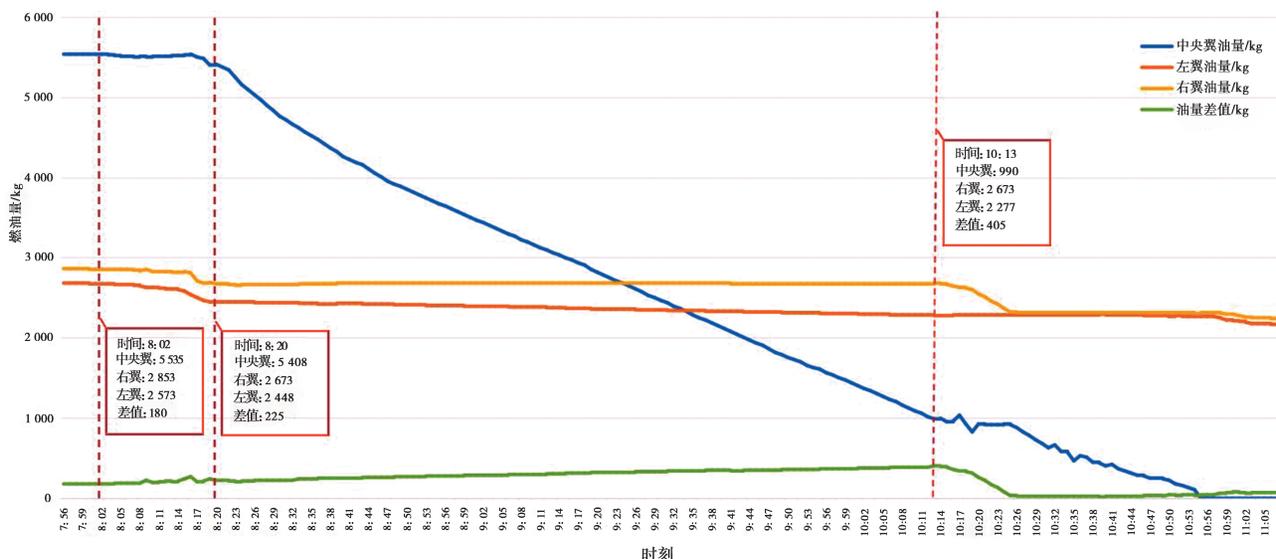


图 2 燃油量数据

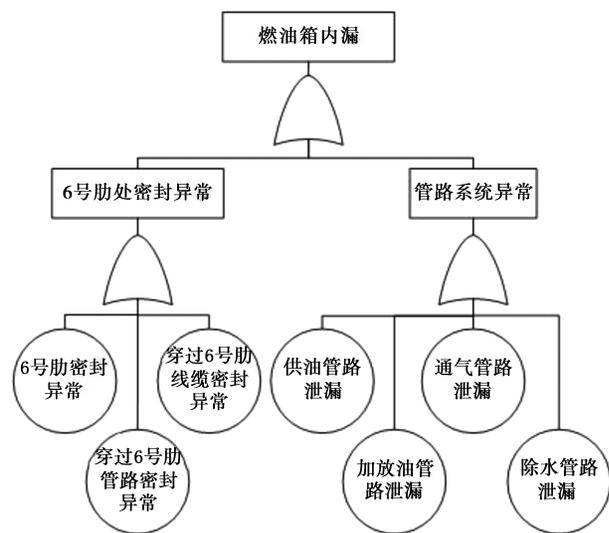


图 3 燃油箱内漏故障树

根据燃油箱内漏故障树,对底事件开展分析。

1) 打开 6 号肋两侧油箱口盖,检查 6 号肋本体结构密封情况、穿过肋板的线缆与管路密封情况,发现密封情况良好,机翼油箱加油后,检查肋板处无泄漏,排除 6 号肋密封异常。

2) 通过供油管路系统泄漏的情况为 6 号肋两侧各有一处柔性接头同时失效,检查 6 号肋外侧发动机供油管路和 APU 供油管路柔性接头无异常,排除供油管路泄漏。

3) 通过加放油管路系统泄漏的情况有 3 种: a) 6 号肋两侧各有一处柔性接头失效; b) 6 号肋外侧有一处柔性接头失效且中央翼油箱油液位低于

排油阀位置; c) 13 号肋外侧进气阀因卡在开位导致失效,且外翼油箱油位高于进气阀位置,中央翼油箱油位低于排油阀位置。目视检查 6 号肋外侧柔性接头与进气阀正常,排除加放油管路泄漏。

4) 通过通气管路系统泄漏的情况有 2 种: a) 6 号肋两侧各有一处柔性接头失效; b) 6 号肋外侧有一处柔性接头失效且中央翼油箱油液位低于浮子排漏阀位置。目视检查 6 号肋外侧柔性接头正常,排除通气管路泄漏。

5) 通过除水管路系统泄漏的情况有 2 种: a) 6 号肋两端各有一处柔性接头失效; b) 引射泵工作异常。目视检查 6 号肋外柔性接头正常,检查引射泵发现其底部单向阀被异物卡住,定位故障原因为除水管路系统泄漏。

## 2.2 泄漏分析

中央翼油箱转输系统的主要部件为安装在中央翼盒段内的两个中央翼引射泵,引射泵包含两个入口(动流入口和吸油入口)及一个出口,如图 4 所示。两个中央翼引射泵工作时分别由左、右机翼油箱燃油泵为其提供动流,动流经引射泵内部喷嘴喷出,带动中央翼引射泵吸油口吸入燃油,吸入的燃油与喷嘴喷出的动流混合后从引射泵出口流出,引射泵出口通过管路连接至机翼油箱 13 肋外侧的运输控制浮子阀,当单侧机翼油量大于 2 200 kg 左右时,相应的运输控制浮子阀关闭,限制混合燃油流出。

左机翼燃油泵工作时,当左机翼油箱油量大于 2 200 kg 左右时,左机翼油箱 13 肋外侧的运输控制

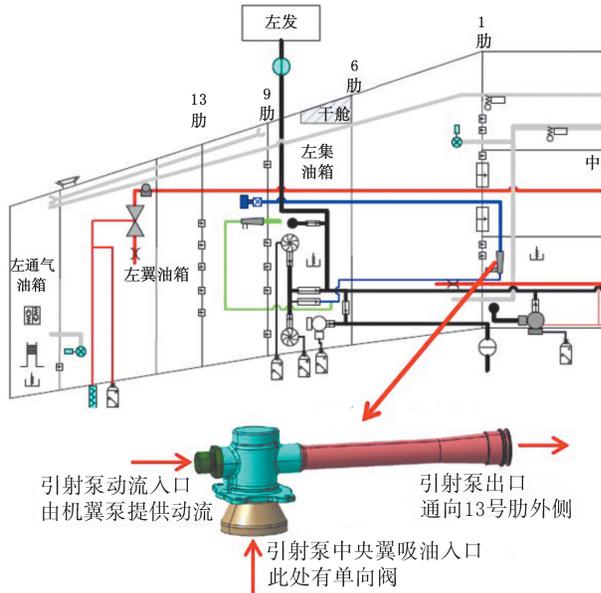


图4 中央翼引射转输系统原理图

浮子阀关闭,若此时中央翼油箱左侧引射泵入口单向阀因异物卡滞无法正常关闭,引射泵出口因转输控制浮子阀关闭产生的背压会高于引射泵吸油口压力,左翼燃油泵提供的动流将直接从引射泵吸油口流入中央翼油箱,导致左翼油箱向中央翼油箱内漏的发生。

### 2.3 故障特征分析

提取燃油量不平衡告警临近的几个航段的EAFR数据,不同时刻油量数据见表1。表中T1为起飞时中央翼泵抑制时刻,T2为中央翼泵结束抑制时刻,T3为着陆时刻。航段3和航段7在T1时刻和T2时刻右翼油箱油量较高,在飞行中触发了燃油量不平衡告警。

适航条款要求每个发动机在起飞阶段有独立的燃油供应,发动机起动2 min后且襟/缝翼构型大于等于1+F时,左、右发动机分别由相应侧机翼油

表1 燃油量数据表

航段	T1	T1左翼油量/kg	T1右翼油量/kg	T1中央翼油量/kg	T2	T2左翼油量/kg	T2右翼油量/kg	T2中央翼油量/kg	T3	T3左翼油量/kg	T3右翼油量/kg	T3中央翼油量/kg	T3左右油箱油量差值/kg	备注
航段1	8:10	2 655	2 853	5 895	8:34	2 349	2 592	5 895	11:00	2 268	2 592	450	324	未告警
航段2	12:37	2 709	2 835	4 788	12:47	2 529	2 646	4 779	15:02	2 313	2 637	0	324	未告警
航段3	8:05	2 664	2 853	5 508	8:18	2 466	2 682	5 490	11:02	2 196	2 259	0	63	告警
航段4	12:25	2 745	2 844	4 131	12:35	2 547	2 646	4 104	14:39	2 304	2 601	0	297	未告警
航段5	8:04	2 736	2 844	5 418	8:26	2 448	2 601	5 463	11:04	2 097	2 439	0	342	未告警
航段6	12:25	2 745	2 844	4 095	12:35	2 565	2 655	4 068	14:35	2 358	2 646	0	288	未告警
航段7	8:08	2 682	2 871	6 516	8:19	2 475	2 664	6 516	10:59	2 268	2 673	540	405	告警
航段8	12:27	2 718	2 844	4 338	12:38	2 502	2 628	4 338	14:37	2 322	2 637	198	315	未告警

箱单独供油,中央油箱泵供油受抑制,飞机爬升至空中且襟/缝翼构型小于等于1时,两台发动机由中央油箱供油。根据油泵工作逻辑及EAFR数据,发现中央翼泵抑制时长平均约10 min,期间右翼油箱油量消耗平均约200 kg。当中央翼泵解除抑制后,由中央翼泵向两侧发动机供油。根据数据,触发燃油不平衡量告警时中央翼油箱油量不为0,由于引射泵作用,左机翼油箱油量基本泄漏至最小值2 200 kg左右。考虑不平衡油量告警阈值400 kg和起飞消耗油量200 kg,如果右翼油箱起飞前油量大于2 800 kg,则容易导致燃油量不平衡告警。

考虑油箱指示系统测量精度,该评估基本符合实际情况,即右翼油箱初始油量较大时更容易触发

燃油量不平衡告警,且起飞排队等待时间较长时会消耗较多右翼油量,因此该运行场景出现燃油量不平衡告警情况会减少。

## 3 处理建议

### 3.1 航线临时建议

出现引射泵卡滞导致的燃油内漏问题时,可通过更换或清洁引射泵消除故障,但是进入油箱执行修理工作需要停场,会影响飞机正常运行。如果维修无法结合定检工作执行,可采取以下方式临时处理:

1) 引射泵冲刷。执行引射泵测试,合理设置中央翼油箱和外翼油箱油量,开启外翼燃油泵,通过引射泵工作时的动流作用对异物冲洗,尝试消除内漏

问题。冲洗后可通过外翼油箱油量加至 2 200 kg 以上时开启外翼油泵检查该措施是否有效。

2) 限制加油量。外翼油箱油量降到 2 200 kg 以下时,对应机翼油箱 13 号肋外侧的转输控制浮子阀会打开,中央翼引射泵可继续从中央翼油箱转输燃油至机翼油箱,来自机翼油箱的动流不会泄漏至中央翼油箱。考虑起飞消耗油量和燃油量不平衡告警阈值,可限制机翼油箱油量不超过 2 800 kg,如保守只考虑告警阈值影响,则建议不超过 2 600 kg,即当左翼油箱油量通过内漏和转输平衡在 2 200 kg 左右时,与右翼油箱油量差值小于告警阈值 400 kg。通过实际验证,该方法可有效避免燃油量不平衡告警。

### 3.2 预防性建议

1) 进入油箱工作时,应注意严格按照要求控制多余物,避免油箱产生外来物导致燃油系统工作异常;

2) 优化引射泵吸油口单向阀设计或引射泵工作逻辑,提高单向阀密封性能或考虑使用动流控制、作动器控制引射管路工作;

3) 在引射泵入口增加滤网装置,避免异物对引射泵正常工作造成不利影响。

## 4 结论

本文通过分析油箱内部结构和系统布置,结合告警现象和燃油量数据,分析了燃油量不平衡告警

的原因,并为后续问题的临时处理提供了可行的建议。对于问题的根本解决也提出了建议,可为后续优化工作提供借鉴和参考。

### 参考文献:

- [ 1 ] 任仁良,张铁纯. 涡轮发动机飞机结构与系统 [M]. 北京:兵器工业出版社,2006:131.
- [ 2 ] 张明星. 经典机型的机翼整体油箱布置分析[J]. 民用飞机设计与研究,2011(3):39-44.
- [ 3 ] 朱庆祥. 飞机结构油箱燃油渗漏的检查及修补[J]. 航空维修与工程,2005(5):60.
- [ 4 ] 凌云. 浅谈飞机整体油箱渗漏点查找方法[J]. 中国高新技术企业,2011(15):72-74.
- [ 5 ] 牛嘉伟,鲁勇帅. 某型民机油量异常故障分析与排除[J]. 航空维修与工程,2019(12):85-88.
- [ 6 ] 姜亮,邓丁奇,高广拓. 浅析飞机燃油箱串油现象对飞机航线运营的影响[J]. 科技视界,2020(19):87-88.
- [ 7 ] 赵春阳,张新珂. 某型飞机左右机翼输油不平衡故障分析[J]. 航空维修与工程,2022(8):101-103.
- [ 8 ] 张鹏. 飞机机翼油箱输油不平衡故障判断[J]. 科技创新导报,2014,11(21):60-61.

### 作者简介

王康男,硕士,工程师。主要研究方向:民用飞机航线工程技术支援。E-mail: wangkang@comac.cc

## Fault analysis about aircraft fuel tank internal leakage

WANG Kang \*

(Shanghai Aircraft Customer Service Co., Ltd. Shanghai 200241, China)

**Abstract:** Fuel tanks of civil aircraft are generally designed with a symmetrical layout, where internal leakage can result in difference in fuel quantities between the two sides. During flight, if the fuel imbalance grows to a certain threshold, the fuel imbalance alarm will be triggered. It requires the crew to eliminate the abnormal alarm information operate according to the abnormal procedures in the flight crew operation manual, which affects the crew's attention and is not conducive to flight safety. For the fuel imbalance alarm information of a certain type of aircraft during route operation. Firstly, the basic structure of the fuel system is introduced. Then, the causes of the fuel imbalance alarm were analyzed based on fault tree and enhanced airborne flight recorder (EAFR) data. Finally, temporary solutions that do not affect route operation and subsequent optimization suggestions are put forward. To provide the reference for troubleshooting and aircraft design optimization.

**Keywords:** fuel imbalance; internal leakage; fault tree; EAFR data

\* Corresponding author. E-mail: wangkang@comac.cc