

基于运行场景的民用飞机低油量告警分析

唐慧娟*

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

摘要: 油箱内可用燃油量在驾驶舱显示是民用飞机燃油系统的重要功能之一, 飞行员应在整个飞行过程中知悉油箱内的可用燃油量。正常情况下, 燃油箱内的可用燃油量应可支持飞机抵达目的地, 如果可用燃油量不足以支持飞机飞抵目的地, 将被视为不安全状态。通过分析 CCAR-25 部、FAR 25 部、CS-25 部中关于低油量告警的设置要求, 和 CCAR-121 部中对航空公司/飞行员宣布“最低油量”的要求, 引入民用飞机设置低油量告警的必要性和低油量告警阈值计算原则。基于民用飞机运行场景, 以某干线民机为例计算两种场景下的低油量告警阈值, 并经过分析得到最终的低油量告警阈值, 提出飞机触发低油量告警后飞行员操作建议, 可为民用飞机燃油系统开展低油量告警的需求分析提供参考。

关键词: 燃油系统; 油量测量; 低油量告警

中图分类号: V233.2

文献标识码: A

OSID:



0 引言

民用飞机燃油系统应确保飞行过程中燃油箱内的燃油量可支持飞机抵达目的地, 在存在油箱可用燃油不足以飞抵目的地的风险时, 根据中国民用航空规章第 25 部 (CCAR-25 部) 和美国联邦航空局颁发的 FAR 25 部中 25.1309(c) 条款要求, 飞行员应对危险情况知悉并执行相应操作^[1-2]。欧洲航空安全局 (European Aviation Safety Agency, 简称 EASA) 颁发的 CS-25 部中对低油量告警阈值的计算有进一步的规定^[3]。中国民用航空局颁发的大型飞机公共航空运输承运人运行合格审定规则 (CCAR-121 部) 也有对航空公司/飞行员最低油量宣布的要求^[4]。

本文分析了 CCAR-25 部、FAR 25 部、CS-25 部中关于低油量告警的要求, 及 CCAR-121 部中关于最低油量宣布的要求。结合飞机运行场景对低油量告警的发生场景进行分析, 并计算不同场景下的低油量告警阈值, 为民用飞机低油量告警需求来源分析及低油量告警阈值确定提供参考。

1 适航规章要求分析

1.1 CCAR-25 部 & FAR 25 部

CCAR 25.1309(c) 条款要求: 必须提供警告信息, 向机组指出系统的不安全工作情况并能使机组采取适当的纠正动作。系统、控制器件和有关的监控和警告装置的设计必须尽量减少可能增加危险的机组失误^[1]。

FAR 25.1309(c) 要求: Warning information must be provided to alert the crew to unsafe system operating conditions, and to enable them to take appropriate corrective action. Systems, controls, and associated monitoring and warning means must be designed to minimize crew errors which could create additional hazards^[2]。即 CCAR 25.1309(c) 和 FAR 25.1309(c) 本质上要求是一致的。

CCAR-25 部和 FAR 25 部中并没有直接要求飞机设置低油量告警, 也没有规定低油量告警的具体阈值如何计算。结合飞机安全性分析及运行场景分析可知, 飞机发生低油量时可能导致油箱内的可

* 通信作者. E-mail: tanghuijuan@comac.cc

引用格式: 唐慧娟. 基于运行场景的民用飞机低油量告警分析[J]. 民用飞机设计与研究, 2024(3):1-5. TANG H J. Operating scenario-based fuel level low alarm analysis of civil aircraft[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2024(3):1-5 (in Chinese).

用燃油量不足以支持飞机抵达目的地,是显而易见的不安全工作情况,因此应该设置低油量告警以满足该条款要求。

1.2 CS-25

EASA 颁发的 CS-25 中对低油量告警有进一步的规定,CS 25.1305 要求:Provide(s) a low fuel level cockpit alert for any tank and/or collector cell that should not become depleted of fuel. Each alert is such that: (A) It is provided to the flight crew when the usable quantity of fuel in the tank concerned reaches the quantity required to operate the engine(s) for 30 minutes at cruise conditions; (B) The alert and the fuel quantity indication for that tank are not adversely affected by the same single failure^[3]。

即 CS 25.1305 要求飞机为飞行员提供油箱或集油箱的低油量告警,且对低油量告警架构设计提出要求:

1) 当油箱的可用油量达到发动机巡航 30 min 所需油量时应触发低油量告警;

2) 单点失效不应同时对油量指示和低油量告警产生不利影响。

CS 25.1305 要求飞机设置低油量告警,且告警时油箱剩余燃油量应可满足飞机 30 min 巡航要求。此外,CS 25.1305 还要求飞机燃油系统燃油量指示的低油量告警的独立性。

1.3 CCAR-121 部

中国民用航空局颁发的大型飞机公共航空运输承运人运行合格审定规则(CCAR-121 部)有对最低油量宣布的要求,CCAR 121.555“飞行中燃油管理”条款规定:

d) 当决定在某一特定机场着陆时,如经计算表明对飞往该机场现行许可的任何改变会导致着陆时的机载剩余可用燃油量低于计划最后储备燃油量时,机长必须通过宣布“最低油量”或“MINIMUM FUEL”向空中交通管制部门通知最低油量状态,并通知飞行签派员。

e) 宣布“最低油量”是通知空中交通管制部门对现行许可的任何改变会导致使用低于签派的最后储备燃油着陆。这并非指紧急状况,仅表示如果再出现不适当耽搁很可能发生紧急状况。

f) 当预计在距离最近的能安全着陆的合适机场着陆时的机载剩余可用燃油量低于计划最后储

备燃油量时,机长必须通过广播“MAYDAY MAYDAY MAYDAY FUEL”宣布燃油紧急状况^[4]。

CCAR-121 部附件 A 中对最后储备燃油进行定义。对于某次飞行,在指定目的地备降机场时,最后储备燃油是指使用到达目的地备降机场的预计着陆重量计算得出的燃油量;在未指定目的地备降机场时,最后储备燃油是指按照到达目的地机场的预计着陆重量计算得出的燃油量^[4]。对涡轮发动机飞机,最后储备燃油为以等待速度在机场上空 450 m(1 500 ft)高度上在标准条件下飞行 30 min 所需的油量。

根据 CCAR-121 部中规定,最低油量是指飞行过程中应当报告空中交通管制员采取应急措施的一个特定燃油油量最低值,该油量是在考虑到规定的燃油油量指示系统误差后,最多可以供飞机在飞抵着陆机场后,能以等待空速在高于机场标高 450 m(1 500 ft)的高度上飞行 30 min 的燃油量。

综上所述,各国颁布的民航相关适航规章中,CS-25 部对低油量告警有具体要求,包括告警阈值计算和告警架构设计。CCAR-25 部和 FAR 25 部中没有对低油量告警的直接要求,需根据系统安全性分析得到设置告警的必要性。CCAR-121 部是对航空公司的要求,无论飞机是否设置低油量告警,飞行员均应在机上燃油量低于计划最后储备燃油量时向空管部门宣布飞机达到最低油量。

2 运行场景分析

2.1 总述

参考 CS 25.1305 和 CCAR 121.555 中关于低油量告警的要求及最低油量宣布的原则,本文以“等待空速在高于机场标高 450 m(1 500 ft)的高度上飞行 30 min”条件确定飞机低油量告警阈值。

民用飞机的运行场景,一般从“航前准备”起至“停放 & 航行结束”,可以定义为 16 个典型阶段:航前准备、牵引、滑出、起飞、初始爬升、航路爬升、巡航、下降、等待、起始进近、最后进近、拉平、滑跑、滑入、过站、停放 & 航行结束。“以等待空速在高于机场标高 450 m(1 500 ft)的高度上飞行 30 min”对应的运行场景为“等待”,即在巡航高度以下固定高度在指定空域做预先确定的机动飞行以等待进一步指令。

进一步分析,飞机可能在“等待”阶段运行并触

发低油量告警的场景有:

a) 经过一个航段的飞行,由于改航、气象等因素^[5],飞机油量即将/已经达到低油量状态,在目的地机场上空指定空域等待;

b) 由于燃油测量系统油量显示错误,或航空公司计算油量不足^[5],飞机起飞后即发出低油量告警,飞机爬升至 1 500 ft 安全高度后,在起飞机场上空指定空域等待。

以某干线民用飞机为例,针对两种运行场景开展低油量告警阈值分析。确定低油量告警对应的油箱油量值,需要的设计输入有:

a) 等待空速及对应的发动机油耗,需考虑襟缝翼卡位状态;

b) 高于机场标高 450 m (1 500 ft),选择什么场高的机场作为评估标准;

c) 飞机重量状态;

d) 环境温度;

e) 燃油测量精度。

2.2 目的地机场上空等待

经过一个航段的飞行,由于改航、气象等因素,飞机油量即将/已经达到低油量状态,在目的地机场上空指定空域等待。该场景的详细运行活动如表 1 所示。

表 1 场景 1 详细运行活动

利益相关方	操作行为
飞行机组	a) 向空中交通管制员宣布“低油量状态” b) 向空中交通管制员报告剩余的可用燃油还能飞多少分钟 c) 继续按照空中交通管制员同意的航路飞行 d) 通知飞行签派员,已宣布了最低油量 e) 如果按照目视飞行规则或者在无雷达地区实施运行,报告现在位置和预计到达目的地的时间
签派员	a) 密切监控飞机的飞行状态 b) 与相应的空管部门联系,积极协调,确保飞行机组、运行控制部门和空管部门保持联系和协作,直至飞机安全降落
空管部门	a) 向机组提供相关航行情报、气象情报和空中交通信息,以及可能使航班飞行时间进一步延长的非正常情况,例如:预计的等待、由于天气原因可能出现的额外延误、流量控制及速度限制 b) 尽量避免由于燃油引发的紧急情况,如果机组宣布“燃油紧急情况”后,立即启动紧急燃油情况程序

ICAO 燃油计划与燃油管理手册《Flight planning and fuel management (FPFM) manual》^[6]中针对主流机型给出了“最低油量”的数据参考,该手册指出,计算“最低油量”时使用的是飞机最大着陆重量,本文以飞机最大着陆重量作为计算耗油量输入。

飞机在等待阶段应减少不必要的燃油浪费,为进近、着陆预留尽量多的燃油储备,机组也应该尽量避免“燃油紧急情况”的出现,因此低油量告警燃油量的计算条件不应该考虑襟缝翼放下的状态。

航空公司计算最低油量时,一般考虑温度为标准大气温度或 ISA+15 °C,机场场高通常选择海平面高度为基准。

基于安全性考虑,燃油测量精度应考虑正误差。即相比于告警值,存在燃油测量误差时应提前触发低油量告警提示飞行员进行相应操作。某型民用飞机巡航姿态的最大燃油测量精度为满油的±1.5%,爬升/下降姿态的最大燃油测量精度为满油的±2%,空中发生测量系统单点失效时误差不超过 2 倍。计算低油量告警阈值考虑测量误差时应取最严酷场景,即下降姿态叠加单点失效时燃油测量误差 4%。该飞机机翼油箱燃油量为 3 275 kg,则最严酷场景——飞机下降姿态时最大燃油量计算误差为 131 kg。

综上所述,目的地机场上空等待的低油量告警油量计算条件:最大着陆重量、海平面高度机场上空 450 m (1 500 ft)、温度为 ISA+15 °C、0 卡位等待速度飞行 30 min、燃油测量误差为满油的 4%。

根据该飞机性能数据计算,基于 3 号喷气燃料^[7]、最大着陆重量、海平面高度机场上空 450 m (1 500 ft)、温度为 ISA+15 °C、0 卡位待机 30 min,待机速度(最小阻力)229 kt,双发油耗为 1 053 kg,单发油耗为 527 kg。叠加燃油测量误差,则该场景下单发油耗为 658 kg,向上取整为 660 kg。

因此,“目的地机场上空等待”场景下的低油量告警油量值为 660 kg。

2.3 起飞机场上空等待

由于未知的燃油测量系统故障,即错误油量指示或航空公司计算加油量错误,飞机起飞后即发出低油量告警,飞机爬升至 1 500 ft 安全高度后,在起飞机场上空指定空域等待。该场景详细运行活动见表 2。

表 2 场景 2 详细运行活动

利益相关方	操作行为
飞行机组	a) 向空中交通管制员宣布“最低油量”和飞机油量异常情况,请求返场着陆 b) 向空中交通管制员报告剩余的可用燃油还能飞多少分钟 c) 通知飞行签派员,已宣布了最低油量
签派员	a) 密切监控飞机的飞行状态 b) 与相应的空管部门联系,积极协调,确保飞行机组、运行控制部门和空管部门保持联系和协作,直至飞机安全降落
空管部门	a) 优先安排本次航班尽快返场着陆 b) 向机组提供相关航行情报、气象情报和空中交通信息,以及可能使航班飞行时间进一步延长的非正常情况,例如:预计的等待、由于天气原因可能出现的额外延误、流量控制及速度限制。

对于飞机起飞后即发出低油量告警的运行场景,此时飞机明显存在影响飞行安全的失效状态,机组应选择就近机场着陆。支持飞机安全着陆所需的油量可按以下条件分别计算:

a) 等待空速盘旋 10 min、进近-着陆;

b) 等待空速盘旋 10 min、进近-着陆、复飞爬升到 450 m(1 500 ft)、再进近-着陆。

根据某型民用飞机性能数据,最大着陆重量、海平面高度机场上空 450 m(1 500 ft)、温度为 ISA+15 °C、0 卡位待机 10 min,待机速度(最小阻力)229 kt,双发油耗为 351 kg,单发油耗为 176 kg。进近-着陆单发油耗为 60 kg,复飞单发油耗为 50 kg。计算可得上述场景 2 中 b) 条的单发油耗为 346 kg,叠加燃油测量误差,则该场景下单发油耗为 477 kg,向上取整为 480 kg。

场景 2 计算得到的低油量告警值低于场景 1 估算的 660 kg,因此确定该飞机低油量告警阈值为 660 kg。

2.4 低油量告警飞行员操作分析

当低油量情况出现时,飞行员需立即知晓状况,并采取措施避免油量过低导致飞机无法正常着陆,因此低油量告警(L/R FUEL LEVEL LO)一般是 Caution 级别的告警。

当低油量告警触发后,一般应首先判断是否发生燃油泄漏,可将“机上燃油量+已用燃油量”与“离场时机上燃油量”做比较,当相差很大或“机上燃油量+已用油量”越来越少时,则怀疑是燃油泄漏,执

行燃油泄漏程序。当不存在燃油泄漏时,如果仅一侧油箱出现低油量,应打开交输供油阀使用燃油较多一侧油箱燃油进行交输供油,尽量延长飞机可飞行时间。

一般情况下,飞行员宣布飞机发生“最低油量”时,如果飞机即将抵达目的地,飞机可按原航路飞行,只是不能接受更多延误,避免出现“紧急油量”情况^[8]。如飞机刚起飞或距离目的地较远,则应报告空管部门,选择附近机场着陆。如发生“紧急油量”情况可向空管部门申请优先权^[9-10]。

3 结论

本文通过分析 CCAR-25 部、FAR 25 部、CS-25 中关于低油量告警的设置要求,和 CCAR-121 部中对航空公司/飞行员宣布“最低油量”的要求,引入民用飞机设置低油量告警的必要性和低油量告警阈值计算原则。基于民用飞机运行场景,以某干线民机为例,计算两种场景下的低油量告警阈值,并经过分析得到最终的低油量告警阈值,可为民用飞机燃油系统开展低油量告警的需求分析提供参考。

参考文献:

- [1] 中国民用航空局. 中国民用航空规章 第 25 部: 运输类飞机适航标准: CCAR-25-R4[S]. 北京: 中国民用航空局, 2011.
- [2] Federal Aviation Administration. Airworthiness standards: transport category airplanes: 14 CFR Part 25[S]. U. S.: Federal Aviation Administration, 2024.
- [3] European Aviation Safety Agency. Certification specifications and acceptable means of compliance for large aeroplanes: CS-25, Amendment 14[S]. Europe: European Aviation Safety Agency, 2013.
- [4] 中国民用航空局. 中国民用航空规章第 121 部: 大型飞机公共航空运输承运人运行合格审定规则[S]. 北京: 中国民用航空局, 2021, R7.
- [5] 姜野航. 航空器低油量情况下的管制处置程序研究[J]. 科技风, 2012(2): 126.
- [6] International Civil Aviation Organization. Flight planning and fuel management (PFPM) manual; Doc 9976[S]. International Civil Aviation Organization, 2015.
- [7] 国家能源局. 3 号喷气燃料: GB 6537-2018[S]. [出版地不详: 出版者不详], 2018.
- [8] 王昊. 航空器低油量及其管制处置[J]. 民航学报, 2021, 5(5): 41-43.

- [9] 中国民用航空局. 民用航空器征候等级划分办法: 民航规[2021]25号[S]. 北京: 中国民用航空局, 2021.
- [10] 中国民用航空局. 航班备降工作规则: 民航规[2020]7号[S]. 北京: 中国民用航空局, 2020.

作者简介

唐慧娟 女, 硕士, 工程师。主要研究方向: 民用飞机燃油测量管理技术。E-mail: tanghuijuan@comac.cc

Operating scenario-based fuel level low alarm analysis of civil aircraft

TANG Huijuan *

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

Abstract: The display of available fuel quantity in the cockpit is one of the important functions of the civil aircraft fuel system. Pilots should be aware of the available fuel quantity throughout the entire flight process. Under normal circumstances, the available fuel in the fuel tank should be sufficient to support the aircraft's arrival at the destination. If the available fuel may not be sufficient to support the aircraft's arrival at the destination, it will be considered unsafe. This article analyzes the requirements for setting fuel level low alarms in CCAR25, FAR25, and CS25, as well as the requirement for airlines/pilots to declare "minimum fuel" in CCAR121. It introduces the necessity of setting fuel level low alarms in civil aircraft and the principle of calculating alarm thresholds. Based on the operational scenarios of civil aircraft, carry out two calculation methods and factor analysis for fuel level low warning thresholds in "waiting" scenarios. Taking a three tank civilian aircraft as an example, calculate the low fuel alarm threshold for two scenarios, and after analysis, obtain the final low fuel alarm threshold. Propose pilot operation suggestions after the aircraft triggers the fuel level low alarm, which can provide reference for the requirement analysis of fuel level low alarm in civil aircraft fuel systems.

Keywords: fuel system; fuel measurement; fuel level low alarm

* Corresponding author. E-mail: tanghuijuan@comac.cc