

民用飞机燃油温度指示系统研究

唐慧娟* 宋志强

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

摘要: 民用飞机设置燃油温度指示系统对燃油箱内的燃油温度进行持续监控, 以避免燃油结冰, 并确保燃油系统向发动机/APU 提供的燃油符合温度要求。介绍了民用飞机燃油温度指示系统的组成和设计要点, 以单通道民用客机为例对燃油温度告警设定考虑因素及告警值设定、告警等级及飞行员操作等进行分析。提出燃油温度传感器安装位置应考虑飞机燃油泵安装位置及耗油顺序、耗油规律, 燃油温度告警类型应考虑飞机系统设计架构, 针对飞行过程中燃油箱内燃油温度会增高的构型设置高温告警, 除特殊构型外应设置燃油低温告警, 燃油低温告警阈值应综合考虑燃油冰点、发动机/APU 正常工作所需的人口燃油温度, 确保燃油箱内的燃油温度符合要求。低温告警触发后, 飞行员应结合燃油种类及冰点对飞机进行操作。

关键词: 燃油系统; 温度测量; 温度告警

中图分类号: V228.1

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温度不会达到燃油冰点, 且燃油系统向发动机/辅助动力装置 (auxiliary power unit, 简称 APU) 提供的燃油满足温度要求, 避免温度过低影响发动机/APU 工作性能。同时, 中国民用航空规章第 25 部 (CCAR-25-R4) 25.981 条款对燃油箱内系统、设备和环境的最高温度提出了限制要求。因此, 民用飞机燃油系统设置燃油温度指示子系统, 实现燃油箱内燃油温度的持续监控并在驾驶舱进行温度指示。燃油温度指示子系统通常设置温度告警, 在燃油温度达到非正常状态时向机组报告。本文以单通道民用客机为例对燃油温度指示系统设计中涉及的温度告警设定、燃油温度传感器安装位置进行分析。

1 燃油温度指示系统设计要点

民用飞机燃油温度指示系统组成包括燃油温度传感器及其安装所必须的支架类零件、传输信号

的线缆。燃油温度传感器一般为电阻式传感器。温度传感器测得的信号通过线缆传递至燃油计算机进行温度解算, 燃油计算机将解算得到的温度值传输至航电系统进行驾驶舱指示。

燃油系统应确保燃油箱内的燃油温度符合条款要求, 即燃油温度不会低至燃油冰点, 也不会高至产生点火源风险, 同时保证供给发动机和 APU 的燃油符合温度要求, 不会影响发动机和 APU 工作性能。为监控燃油温度, 燃油系统一般设置低温告警, 在燃油温度低至一定值时在驾驶舱指示告警信号 (FUEL TEMP LO), 提醒机组燃油温度已达到较低状态, 应调整飞机高度或飞机速度以避免燃油温度过低对发动机、APU 性能产生不良影响。特殊架构下, 飞机还应设置燃油高温告警 (FUEL TEMP HI) 监控燃油箱内燃油高温状态, 避免由于温度过高带来点火源风险。燃油温度指示系统设计还应考虑燃油温度传感器的安装位置, 保证传感器始终被燃油浸没, 达到对燃油温度进行持续监控的目的。

燃油温度指示系统基本架构图如图 1 所示。通常在驾驶舱燃油简图页进行燃油温度指示, 在发动

* 通信作者. E-mail: tanghuijuan@comac.cc

引用格式: 唐慧娟, 宋志强. 民用飞机燃油温度指示系统研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2023(2): 89-93. TANG H J, SONG Z Q. Research on fuel temperature indicating system of civil aircraft[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2023(2): 89-93 (in Chinese).

机指示和机组告警系统(engine indication and crew alerting system,简称 EICAS)显示页面进行温度告警指示。

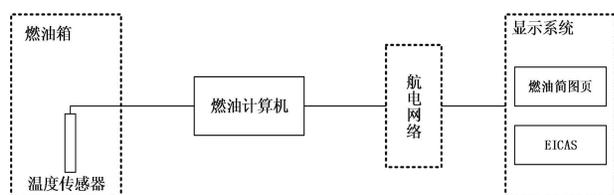


图 1 燃油温度指示系统基本架构图

2 燃油温度告警设置

2.1 燃油温度变化规律

根据热力学分析理论及飞机飞行数据分析,地面状态下飞机燃油箱内燃油初始温度受大气温度影响;飞行过程中燃油温度受大气总温影响,飞行高度影响大气静温从而影响大气总温^[1]。地面飞机停机状态下,飞机燃油箱内燃油温度接近大气温度。飞机起飞滑行过程中,集油箱内燃油温度因燃油泵工作对燃油的搅动会造成小幅度升高,机翼油箱内燃油温度相对稳定^[2]。飞机飞行过程中,燃油箱内的燃油与大气持续进行能量交换,随着飞行高度增加,大气温度降低,燃油温度相应降低。当飞机处于巡航阶段时,飞行高度相同,飞机燃油箱内燃油仍与大气进行持续能量交换,因巡航阶段大气温度始终低于燃油温度,燃油箱内燃油温度随飞行时间增加而降低。巡航结束后飞机飞行高度下降初期,燃油箱内燃油温度仍低于大气温度,直至燃油温度与大气温度相同后随飞行高度降低而增高^[3-4]。

2.2 燃油温度告警类型分析

民用飞机设置燃油温度传感器和燃油温度告警用于监控燃油箱内的燃油温度。燃油温度告警分为低温告警和高温告警,应根据飞机系统架构确定适合的告警类别及告警阈值。

针对飞行过程中燃油箱内燃油温度会增高的飞机架构需设置燃油高温告警,比如 A320 飞机设置有整体驱动发电机(integrated drive generator,简称 IDG)冷却系统,燃油箱中的部分燃油会用来冷却 IDG 冷却系统中的发动机滑油,升温后的燃油会通过再循环系统再次回到油箱中^[5]。根据中国民用航空规章第 25 部 25.981 条款规定,燃油箱或燃油

箱系统的最高温度低于预期燃油箱内燃油的最低自燃温度,并留有安全裕度^[6],因此需设置高温告警对燃油温度进行监控以防止燃油箱内温度过高产生点火源风险^[7]。

常见的飞机发动机滑油冷却系统中,燃油用作冷却液后不会再进入油箱中,而是进入发动机燃烧室进行燃烧,无需对燃油箱中的燃油进行高温监控。飞机通常会设置燃油低温告警监控燃油低温状态,在燃油温度即将达到冰点时提示飞行员当前燃油温度已经达到较低值,应提高飞行速度或降低飞行高度避免燃油温度过低造成部件结冰,或影响发动机/APU 性能。

2.3 燃油温度传感器安装位置分析

单通道民用客机一般有两油箱构型和三油箱构型两种,典型两油箱构型如图 2 所示,油箱分为左、右机翼油箱,两油箱正常工况下不连通,左、右机翼油箱分别设置左、右集油箱,燃油泵安装在集油箱中。

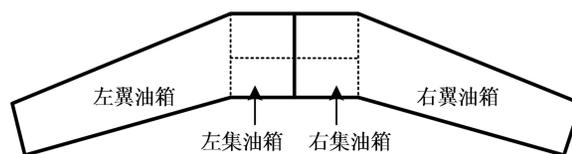


图 2 典型两油箱布局示意图

本文以三油箱单通道民用客机为例进行燃油温度指示系统研究,该飞机油箱构型如图 3 所示,油箱布局包括中央翼油箱、左机翼油箱、右机翼油箱,中央翼油箱大部分在机身内,设置前、中、后三个隔舱,部分油箱在机身外紧邻集油箱;左、右机翼油箱分别设置左、右集油箱,并在翼梢处设置左、右通气油箱。中央翼油箱机身内后隔舱设置有燃油泵,集油箱亦设置有燃油泵。该飞机用于发动机滑油系统冷却液的燃油直接进入发动机燃烧室进行燃油,不考虑设置高油温告警。

燃油温度传感器安装位置应考虑设置在燃油

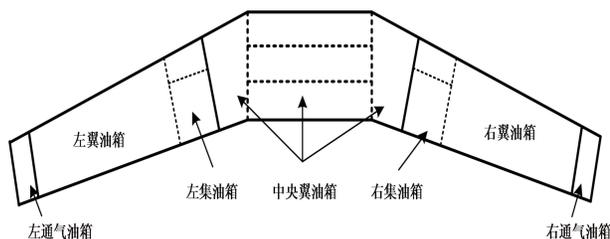


图 3 某民用飞机三油箱布局示意图

泵安装的盒段内,以监控向发动机/APU提供的燃油温度,满足发动机/APU性能对入口燃油温度的要求。该民用飞机在集油箱及机身段中央翼油箱后隔舱内设置有燃油泵,因此应考虑在集油箱及机身段中央翼油箱后隔舱设置燃油温度传感器。温度传感器安装还应考虑飞行过程中传感器始终被燃油浸没,达到对燃油温度持续监控的目的。该飞机燃油系统设置燃油转输子系统,将机翼油箱燃油持续转输至集油箱中保证集油箱始终处于满油状态;飞机加油时优先加满机翼油箱,短航程时中央翼油箱无燃油,执行长航程飞行时中央翼油箱加有燃油,但飞机除起飞阶段外优先消耗中央翼油箱燃油,通常巡航结束前可将中央翼油箱消耗完毕。因此考虑燃油温度测量的连续性,该飞机中央翼油箱不应设置温度传感器,应在左、右集油箱分别设置1个温度传感器。

该飞机燃油转输系统可保证集油箱始终处于满油状态,因此正常飞行情况下温度传感器安装在集油箱中任意高度均可满足传感器始终被浸没的要求。极端场景下,飞机飞行过程中可能会出现可用燃油不足的紧急情况,触发低油量告警(FUEL LEVEL LO)后需在附近机场尽快着陆。因此考虑极端情况,建议燃油温度传感器安装高度应低于低油量告警时集油箱燃油液面高度,即可保证温度传感器始终被燃油浸没,达到对温度进行持续监控的目的。

2.4 低油温告警阈值分析

选取该飞机不同地面温度、不同飞行时长的飞行工况进行低油温告警数值分析,表1为不同工况下该飞机各油箱盒段内燃油最低温度。表1所示数据为该飞机使用3号喷气燃料(GB6537-2018)飞行时测得的数据。

表1 某民用飞机机翼油箱燃油温度

地面温度/($^{\circ}\text{C}$)	飞行时间/h	机身内中央翼油箱最低燃油温度/($^{\circ}\text{C}$)	机身外中央翼油箱最低燃油温度/($^{\circ}\text{C}$)	集油箱最低燃油温度/($^{\circ}\text{C}$)	外翼油箱最低燃油温度/($^{\circ}\text{C}$)
-5	2.48	-0.4	-24.7	-16.75	-20
0	5.5	-1.1	-30.1	-30.5	-36.7
16	6.9	-10	-32	-36	-38
20.4	3.5	17	1	6	-2.25
28	4.8	27	8.9	18.5	14.6

除3号喷气燃料外,该飞机许用燃油还有JetA (ASTM-D-1655), JetA-1 (ASTM-D-1655) 和 TS-1 (GOST10227-2013)。许用燃油冰点数据如表2所示。

表2 许用燃油冰点

序号	燃油种类	冰点/($^{\circ}\text{C}$)
1	No. 3	$\leq -47^{[8]}$
2	Jet A	$\leq -40^{[9]}$
3	Jet A-1	$\leq -47^{[9]}$
4	TS-1	$\leq -60^{[10]}$

由表1和表2可知,该飞机在5种典型飞行任务下中央翼油箱、机翼油箱及集油箱的最低燃油温度均未达到燃油冰点。该飞机发动机及APU正常工作所需的入口燃油温度为 -40°C 。低油温告警值设置应考虑飞机许用燃油冰点、正常飞行工况下不易触发且不影响发动机/APU工作性能的数值。因此结合表1所示典型飞行工况下的燃油温度及表2所示许用燃油冰点及发动机/APU正常工作入口燃油温度要求,该民用飞机可设置燃油低温告警值为 -37°C 。

2.5 低油温告警飞行员操作分析

民用飞机机组告警可分为下列4个级别:

- 1) 警告(Warning): 紧急操作或飞机系统状态要求机组人员立即知晓并立即采取纠正或补偿动作;
- 2) 警戒(Caution): 非正常操作或飞机系统状态要求机组人员立即知晓,随后需要采取纠正或补偿动作;
- 3) 提示(Advisory): 操作或者飞机系统状态要求机组人员知晓,随后可能需要采取动作;
- 4) 状态(Status): 操作或者飞机系统状态要求机组人员知晓,但不需采取纠正动作。

当低油温告警(FUEL TEMP LO)触发时,表明此时燃油箱内燃油温度已达到较低程度,飞行员需降低飞行高度或加大飞行速度以升高燃油温度,防止达到燃油冰点出现结冰,无法为发动机提供燃油。因此建议低油温告警的告警等级为警戒(Caution),告警触发后飞行员在燃油温度达到冰点前择机进行飞行速度或飞行高度调整。

根据表2可知,Jet A 燃油较其他种类燃油冰点较低,出于成本考虑,飞机低油温告警判断阈值通

常为固定值写入软件中,不根据飞机当前使用燃油种类进行调整。因此空中触发低油温告警时,飞行员应根据当前使用的燃油种类进行飞机飞行速度或飞行高度调整,即当使用 Jet A 燃油时,调整至燃油温度高于 $-37\text{ }^{\circ}\text{C}$;当使用 No. 3 和 Jet A-1 燃油时,调整至燃油温度高于 $-44\text{ }^{\circ}\text{C}$;当使用 TS-1 燃油时,调整至燃油温度高于 $-57\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3 结论

本文介绍了民用客机燃油温度指示系统的组成和设计要点,以单通道民用客机为例对燃油温度传感器安装位置、温度告警种类及等级设定、飞行员操作进行初步分析。燃油温度传感器安装油箱盒段应考虑飞机油箱构型及耗油顺序、耗油规律,安装高度应考虑极端情况下的集油箱燃油液面高度,保证温度传感器在飞行阶段始终被燃油浸没。燃油温度告警种类应综合考虑飞机系统架构,针对燃油箱内燃油温度会增高的构型应设置高温告警,低温告警值应设置为燃油不结冰、正常飞行工况下不易触发且对发动机/APU 性能无不良影响的数值。低油温告警触发后,飞行员应根据当前飞机使用的燃油种类及对应冰点确定操作。

参考文献:

- [1] 郝毓雅,鲁勇帅. 飞机燃油温度的影响因素分析[J]. 工程与试验, 2019, 59(3): 18-20.
- [2] 张斌. 民用飞机燃油箱系统热模型分析研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2013(1): 23-26;36.

- [3] 郝毓雅,夏树丹. 机翼油箱内燃油温度场的数值模拟[J]. 现代机械, 2020(2): 81-84.
- [4] 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.
- [5] Airbus. Single aisle technical training manual maintenance course-T1 & T2 (CFM56-5B/ME) A319/320/A321;ATA28[Z]. France: Airbus, 2006.
- [6] 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.
- [7] 田玉雯,张斌,郭军亮. 民用飞机燃油箱系统点火源防护分析方法研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2021(3): 60-64.
- [8] 国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会. No. 3 jet fuel; GB 6537-2018[S]. [S. l.]: 国家市场监督管理总局中国国家标准化管理委员会, 2018.
- [9] American Society of Testing Materials. Standard specification for aviation turbine fuels; ASTM-D-1655[S]. U. S. : American Society of Testing Materials, 2020.
- [10] Interstate Council for Standardization, Metrology, and Certification. Jet fuels (TS-1); GOST 10227-2013[S]. Russia: Interstate Council for Standardization, Metrology, and Certification, 1987.

作者简介

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

宋志强 男,硕士,研究员。主要研究方向:民用飞机燃油测量与控制。E-mail: songzhiqiang@comac. cc

Research on fuel temperature indicating system of civil aircraft

TANG Huijuan * SONG Zhiqiang

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

Abstract: Civil aircraft is equipped with fuel temperature indicating system to continuously monitor the fuel temperature in the fuel tank to avoid fuel freezing and ensure that the fuel supplied to the engine/APU meets the temperature requirements. This paper introduces the composition and design points of the fuel temperature indication system for civil aircraft, and takes a single-aisle civil airliner as an example to analyze the fuel temperature alarm setting considerations, alarm value setting, alarm level and the pilot's operation. It is proposed that the fuel temperature sensor installation location should consider the aircraft fuel pump installation location, fuel consumption sequence and fuel consumption law, the fuel temperature alarm should consider the aircraft system design configuration, and set the high temperature alarm for the configuration that the fuel temperature in the fuel tank will increase during flight, and the fuel low temperature alarm should be set in addition to the special configuration. The low fuel temperature alarm threshold should take into account the fuel freezing point and the inlet fuel temperature required for the normal operation of the engine/APU to ensure that the fuel temperature in the fuel tank meets the requirements. After the low fuel temperature alarm is triggered, the pilot should operate the aircraft according to the fuel type and freezing point.

Keywords: fuel system; temperature measurement; temperature alarm

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