

# 大型民用飞机燃油量测量系统精度标定研究

杨 洋 \* 刘亦林 徐子昂 孙承煦

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

**摘要:** 飞机燃油量测量系统是飞机燃油系统的重要组成部分, 用于测量和指示飞机各个油箱的可用燃油量以及飞机总可用燃油量。燃油量测量精度是飞机燃油量测量系统的重要性能指标, 可分为地面姿态下的燃油量测量精度和空中燃油量测量精度。地面姿态下的燃油量测量精度可通过地面标定试验的方法标定出其实际精度; 在空中时由于无法得知飞机油箱的真实燃油量, 因此无法通过试验的方法标定出其空中实际精度, 空中燃油量测量精度需结合地面标定的精度以及空中精度分析最终给予说明。本文介绍了大型民用飞机在地面姿态下的燃油量测量精度标定方法, 主要内容包括标定点的选取、标定方法、合格判据、数据处理等。

**关键词:** 民用飞机; 燃油测量系统; 精度; 标定

中图分类号: V241.7

文献标识码: A

OSID: 



## 0 引言

民用飞机燃油量测量系统是指在地面和飞行状态下, 可连续测量和指示民用飞机各油箱以及飞机总可用燃油量的系统<sup>[1]</sup>。随着航空业的发展, 现代民用飞机的载油量也越来越大, 为了满足长航程的需要, 现代民用飞机在原型飞机基本燃油箱外还会附加辅助燃油箱, 辅助燃油箱通常加装在客舱或者货舱中, 用于存储额外燃油以实现增加飞机航程的目的<sup>[2]</sup>。现代大型民用飞机的载油量约占飞机总重量的 40%~60%<sup>[3]</sup>。

飞机燃油量测量系统是飞机的重要组成部分, 其准确性和可靠性关系到飞机的整体性能<sup>[4-5]</sup>。飞机的燃油不仅用于为发动机和 APU 提供燃料, 还关系到飞机的重心, 影响飞机平衡<sup>[6]</sup>。民用飞机燃油量测量系统可及时准确地测量出油箱剩余可用燃油量并且在驾驶舱进行指示, 能够帮助飞行员及时掌握飞行情况, 制定和调整飞行计划, 提高飞行效率, 对飞机的飞行安全有着重要的意义。

民用飞机燃油量测量系统精度标定可准确标

定出飞机燃油测量系统地面姿态下的真实测量精度, 用于判断飞机燃油测量系统精度是否满足设计精度要求, 若不满足设计精度要求则可根据标定数据迭代更新软件算法, 使系统精度最终满足设计精度要求。

## 1 民用飞机燃油测量系统

### 1.1 工作原理

民用飞机燃油量测量系统主要包括硬件电路和测量软件两部分。硬件电路主要包括: 液位传感器、燃油密度计、测量线缆、通讯电路、电源模块、信号采集模块、计算机等设备。测量软件主要为燃油量测量软件, 安装于计算机内。电源模块给油箱内的液位传感器和密度计提供激励信号, 信号采集模块通过测量线缆采集液位传感器和密度计的反馈信号并转换成数字量信号, 通过通讯电路传输给计算机, 计算机将接收到的液位传感器和密度计的数字量信号计算成对应燃油量输出至航电系统。民用飞机燃油量测量系统的工作原理如图 1 所示。

\* 通信作者. E-mail: yangyang13@comac.cc

引用格式: 杨洋, 刘亦林, 徐子昂, 等. 大型民用飞机燃油量测量系统精度标定研究 [J]. 民用飞机设计与研究, 2024(4):52-

56. YANG Y, LIU Y L, XU Z A, et al. Research on calibration of large civil aircraft fuel measurement system [J]. Civil Aircraft Design and Research, 2024(4):52-56 (in Chinese).

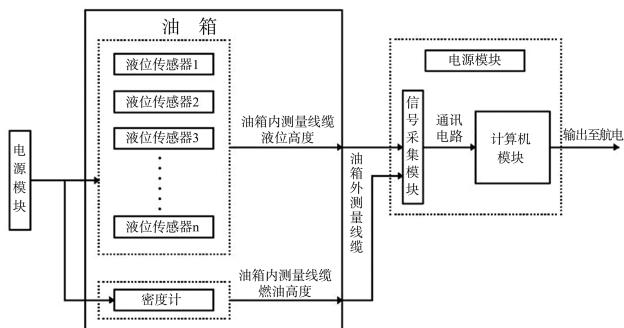


图1 民用飞机燃油量测量系统工作原理

## 1.2 精度要求

依据 ARINC611-1<sup>[7]</sup> 以及 SAE AIR5691B<sup>[8]</sup>，现代大型民用或军用飞机的燃油量测量精度如图 2 所示，可通过增加额外的油量传感器使得飞机的燃油量测量精度优于 ARINC611-1 的要求。

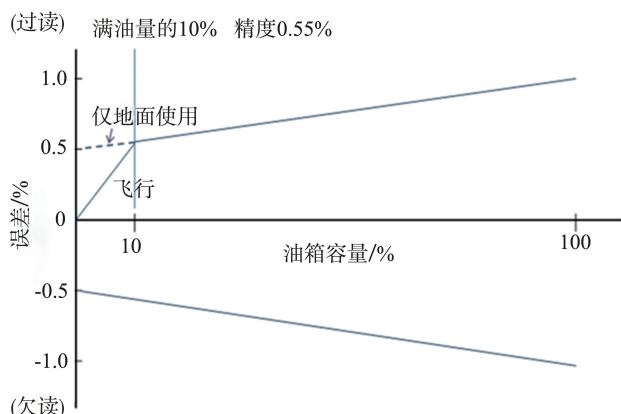


图2 飞机燃油量测量精度

一般来讲，小型飞机燃油测量系统精度的设计无需依据 ARINC611-1 要求的精度水平。对于干线以及大型干线飞机来说，在飞机飞行的性能包线内，地面和巡航姿态下的测量精度要求通常为满量程的 2%~3%（空载时可能为 1.75%）；一些公务机和活塞发动机飞机（23 部飞机）的测量精度要求通常为满量程的 1%~5% 不等。

以某大型双通道干线飞机为例，其燃油量测量精度指标如表 1 所示。

根据其精度指标要求，在地面停机姿态下（俯仰/滚转角均在  $\pm 2^\circ$  以内），其燃油量测量误差需在“满刻度的  $\pm 0.5\%$  + 指示值的  $\pm 0.5\%$ ”范围以内，即当指示值达到满刻度值时，燃油量测量精度最高可达  $\pm 1\%$ 。

表1 某大型双通道干线飞机燃油量测量精度指标

飞机状态	姿态描述		燃油测量精度指标
	俯仰角 /( $^\circ$ )	横滚角 /( $^\circ$ )	
地 面	$\pm 2$	$\pm 2$	满刻度的 $\pm 0.5\%$ + 指示值的 $\pm 0.5\%$ （指示值达到满刻度时，精度最高可达 $\pm 1\%$ ）
飞行(有效)	0~5	$\pm 1$	满油量的 $\pm 1.0\%$

可通过地面油量测量精度标定试验来验证民用飞机在地面状态下燃油量测量系统的精度是否满足“精度指标”要求。由于飞机在空中的真实油量无法得知，因此无法通过试验的方法标定出其空中实际精度，空中燃油量测量精度需结合地面标定的精度以及空中精度分析后最终给予说明。本文主要对民用飞机燃油量测量系统地面油量测量精度标定的方法进行研究。

## 2 民用飞机燃油量测量精度标定

### 2.1 标定概述

民用飞机燃油量测量系统一般通过地面油量测量精度标定试验的方法来标定出其在地面真实的燃油量测量精度，并且根据试验结果判断其地面测量精度是否满足“精度指标”要求。

以某大型双通道干线飞机为例，在地面停机姿态下，所有油箱“标定点”的误差（也可叫偏差量，即飞机指示油量 - 飞机实际可用油量）均应在图 3 所示的上、下限范围内，表明该民用飞机地面燃油量

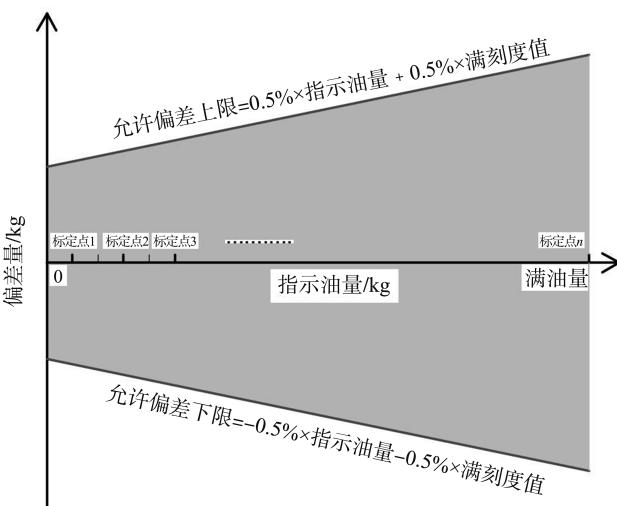


图3 飞机燃油量测量精度

测量精度满足设计“精度指标”的要求。

## 2.2 标定点选取

民用飞机燃油箱一般为双油箱、三油箱或五油箱的布置,燃油箱沿飞机中轴线对称。民用飞机典型三油箱布置如图 4 所示。民用飞机在驾驶舱区域需显示每个油箱的可用燃油量以及飞机的总可用燃油量,一般来讲每个油箱的燃油量测量是互相独立的,因此需标定飞机在地面姿态下每个油箱的燃油量测量精度。



图 4 民用飞机三油箱布置

大型民用飞机的可装载燃油量少则二十多吨,多则可达几百吨,具体需视飞机的大小及航程而定。需结合飞机燃油量测量系统的特点以及运营场景合理地选取每个油箱的标定数据点,目前主流的民用飞机燃油量测量系统均为电容式油量传感器测量,测量线性度高,标定点的选取既可按照一定的步长均匀分布整个测量量程,也可结合飞机的运营场景,对部分测量段进行标定点的加密,最终标定出各油箱燃油量测量系统的真实精度。民用飞机燃油量测量精度标定点选取的一般事项如下:

- 1) 标定的起始点一般为油箱的 0 油量点,应当根据测量系统设置的 0 油量点合理选取第一个标定点,在 0 油量点附近也可根据实际情况设置不同步长加密测量 0 油量点附近的测量精度,需要注意的是在开展标定试验之前需将油箱放油至不可放油状态;

- 2) 在 0 油量点之后,可设置较大的标定步长来标定油箱燃油量测量系统指示全量程内的测量精度,步长可根据油箱标定点的数量和油箱满量程合理设置,一般单个油箱设置 10~25 个标定点即可,具体需根据局方或系统的要求而定;

- 3) 最后一个标定点一般应选取油箱最大可加载燃油量的点,对应到实际一般为民用飞机手动加油的切断点。

## 2.3 标定方法

民用飞机地面姿态下的燃油量测量精度一般可通过两种方法进行标定,即两地面称重法和高精

度流量计测量法。

地面称重法是在地面将已经称重计量好的燃油,按照所设置的标定点通过特种设备加注到飞机油箱。地面称重计量的值为油箱内的真实油量值,通过和飞机油箱的指示油量值进行对比即可得到该标定点的测量精度/误差。这种标定方法可精确控制每个标定点的加注燃油量并且通用性较高,但是需要特种设备辅助加注并且标定效率较低。

高精度流量计测量法是通过给加油车加装高精度流量计,通过加油车本身的加注装置将燃油注入油箱,高精度流量计的指示值即可视为加入到油箱内的真实油量值。在实施过程中需通过切断加油车的供油阀门来控制每个标定点的加注燃油量,对标定点的控制精度相对较低,但针对小步长加密测量段的精度标定不友好,适用于大型飞机大步长的标定试验。这种标定方法无需特种设备辅助并且标定效率高。

不管是地面称重法还是高精度流量计测量法,在开展标定试验之前均需要对标定设备的精度进行计量。根据 GJB 5109-2004<sup>[9]</sup>,标定设备的精度与被校准设备的精度比一般不得低于 4:1。以某大型双通道干线飞机为例,其在地面姿态下,当指示值接近满刻度值时,燃油量测量精度最高可达  $\pm 1\%$ ,因此标定设备的精度应不得低于  $\pm 0.25\%$ 。

## 3 标定点数据处理

### 3.1 合格判据

以某大型双通道干线飞机为例,在地面停机姿态下(俯仰/滚转角在  $\pm 2^\circ$  以内),飞机所有油箱所有标定点的指示油量值与实际可用油量值的误差应当在“满刻度的  $\pm 0.5\%$  + 指示值的  $\pm 0.5\%$ ”以内,即图 3 的允许范围以内。

### 3.2 数据处理

飞机的指示油量为可用燃油量,即燃油泵吸油口以上的燃油。民用飞机燃油测量精度标定试验是从不可放油状态开始向飞机进行分步加油标定,计算出每个标定点的飞机燃油量指示精度。由于飞机的指示油量为“可用油量”,在测量系统软件中已经将“不可用油”(燃油泵吸油口以下的燃油)减去再将其指示在驾驶舱和加放油控制面板,因此也需对飞机每个标定点的“实际总油量”进行处理,按照测量系统软件中“不可用油”的处理方式,将每个

标定点的“实际总油量”减去“不可用油”，即可得到每个标定点的实际“可用油量”。应当将飞机指示的“可用油量”和每个标定点的实际“可用油量”进行对比，判断是否满足“合格判据”。其中需要注意的是，“实际总油量”的计算应当为每个标定点的“实际加油量”加上该油箱的“不可放油量”，“不可放油量”的计算为：不可放油量=放油前飞机实际载油重量-放油重量<sup>[10]</sup>。

在大型飞机的燃油测量系统中，一般燃油体积和密度的测量是分开的，将测得的体积和密度相乘即可得到燃油质量。因此飞机的指示油量通常指示的是燃油质量，数据处理应当将飞机指示油量和实际可用油量的质量进行对比，判断是否满足“合格判据”要求。也可将体积进行对比，这种情况需要注意的是，质量实际包含了密度测量的误差，若是将指示油量和实际可用油量的体积进行对比，“合格判据”应当将密度测量的误差减去。

## 4 结论

本文对大型民用飞机燃油量测量系统、工作原理、精度要求等内容进行了介绍，对大型民用飞机燃油量测量系统的精度标定方法、标定点的选取、合格判据以及数据处理进行了详细研究。本文的研究成果可为其他机型在地面姿态下的燃油量测量系统精度标定提供参考。

### 参考文献：

- [ 1 ] 《飞机设计手册》总编委会. 飞机设计手册:第13册:动力装置系统设计 [ M ]. 北京:航空工业出版社, 2006:908.
- [ 2 ] 刘德刚,周宇穗,游胜龙. 民用飞机辅助燃油系统研究 [ J ]. 装备制造技术,2014(9):156-158.
- [ 3 ] 张晓麒. 飞机油箱油量实时测量关键技术研究 [ D ]. 济南:山东大学,2020.
- [ 4 ] 朱明清,徐化春,李继龙. 直升飞机燃油系统测试技术与设备的研究 [ J ]. 自动化技术与应用,2015,34(11):84-86,96.
- [ 5 ] 王新民,顾晓婕,李俨. 飞机燃油测量系统的现状分析与发展方向 [ C ]//中国航空学会控制与应用第十三届学术年会论文集. [ 出版地不详:出版者不详 ],2008:1-5.
- [ 6 ] JIMENEZ J F, GIRON-SIERRA J M, INSAURRALDE C, et al. A simulation of aircraft fuel management system [ J ]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2007, 15(5): 544-564.
- [ 7 ] Aeronautical Radio Inc. Guidance for the design and installation of fuel quantity systems: ARRINC611-1 [ S ]. Maryland, USA :Airlines Electronic Engineering Committee, 1999.
- [ 8 ] SAE International. Guidance for the design and installation of fuel quantity indicating systems (FQIS) : SAE AIR5691B [ S ]. U. S. :SAE International, 2022.
- [ 9 ] 中国人民解放军总装备部. 装备计量保障通用要求检测和校准:GJB 5109-2004 [ S ]. 北京:中国人民解放军总装备部,2004.
- [ 10 ] 姜亮. 大型民用飞机燃油箱油量标定试验方法研究 [ J ]. 科技视界,2017(2):24,32.

### 作者简介

- 杨 洋 男,硕士,工程师。主要研究方向:民用飞机燃油测量与管理系统设计。E-mail: yangyang13@ comac. cc  
 刘亦林 男,硕士,工程师。主要研究方向:民用飞机燃油测量与管理系统设计。E-mail: liuyilin1@ comac. cc  
 徐子昂 男,硕士,工程师。主要研究方向:民用飞机燃油测量与管理系统设计。E-mail: xuziang@ comac. cc  
 孙承煦 男,硕士,工程师。主要研究方向:民用飞机燃油测量与管理系统设计。E-mail: sunchengxu@ comac. cc

## Research on calibration of large civil aircraft fuel measurement system

YANG Yang<sup>\*</sup> LIU Yilin XU Zi'ang SUN Chengxu

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

**Abstract:** Aircraft fuel measurement system is an important part of aircraft fuel system, which is used to measure and indicate the available fuel amount of each tank and the total available fuel amount of aircraft. Fuel measurement accuracy is an important performance index of aircraft fuel measurement system, which can be divided into ground attitude and in the air. The accuracy of ground aircraft fuel measurement system can be calibrated by the method of ground calibration test. Since the actual fuel quantity of aircraft cannot be known in the air, it is impossible to calibrate the accuracy of aircraft fuel measurement system in the air through test method, the accuracy of aircraft fuel measurement in the air should be explained by combining the accuracy of ground calibration and air analysis. This paper introduces the calibration method of fuel measurement system of large civil aircraft in ground attitude, including the selection of standard point, calibration method, qualification criterion, data processing and so on.

**Keywords:** civil aircraft; fuel measurement system; accuracy; calibration

---

\* Corresponding author. E-mail: yangyang13@ comac. cc