

# 经验介绍



## 飞机燃油测量系统误差与精度分析

王卉 王澍 周伟

(上海飞机设计研究院动力燃油设计研究部,上海 200436)

Aircraft Fuel Gauging System Error and Accuracy Analysis

Wang Hui Wang Shu Zhou Wei

(Powerplant and Fuel System of SADRI, Shanghai 200436, China)

**摘要:**燃油测量系统是燃油系统的重要子系统之一,其精度、可靠性和维护性对飞机整体性能都有很大的影响。实时、精确地测量油箱内的剩余油量对于保证飞机安全飞行,实现重心控制、燃油管理、耗油顺序优化等功能有重要意义。同时,对于民用飞机而言,燃油测量系统精度的提高将直接影响飞机的经济性。从常见的燃油测量系统误差入手,分析了各个因素对测量精度的影响,其中重点针对密度测量对精度的影响做出了分析,并得出在满足某精度要求的前提下,油箱内传感器的最优组合方案。

**关键词:**燃油测量系统;测量精度;误差

**[Abstract]** Fuel gauging system is an important subsystem of fuel system, whose accuracy, reliability and maintainability usually have great effect on the performance and capability of the entire aircraft. How to measure the fuel quantity on board in real time and accurately is very important to ensure safety flight and CG management, fuel management, optimizing fuel consuming sequence. Besides, for civil aircraft, improving the accuracy of fuel gauging system will affect the economic of aircraft directly. It is reported that improving the gauging accuracy by 0.5% will result in accommodating several passengers for more. This article analyzed the each kind of error's effects on accuracy based on the common error of fuel gauging system, and it placed emphasis on the fuel density measurement's influence. It formed the optimal probe combination solution according to the accuracy requirements.

**[Key words]** Fuel gauging system; gauging accuracy; error

## 0 引言

燃油测量系统的首要功能是负责对各油箱燃油量和飞机总油量的测量和指示,它一般由油量传感器、补偿传感器、密度计和燃油计算机等部件组成。因此,如何精确地测量并指示油箱内的剩余油量,是燃油测量系统的本质,也是关键。但从民机经济性的角度考虑,为了提高测量精度而一味地增加油箱内传感器数量,经济性、可靠性差。如何采用最少的传感器,达到最高的测量精度,是民机燃油测量系统追求的最佳方案。

## 1 测量系统精度要求

美军标 MIL-26988C 中对燃油测量系统的精度做了如下定义:

- (1) I 级精度:指示值的 $\pm 4\%$ ,满刻度的 $\pm 2\%$ ;
- (2) II 级精度:指示值的 $\pm 2\%$ ,满刻度的 $\pm 0.75\%$ ;
- (3) III 级精度:指示值的 $\pm 1\%$ ,满刻度的 $\pm 0.5\%$ 。

通常情况下,不带补偿的测量系统精度约为 I 级,满油时精度为满刻度值的 $\pm 5\%$ ;带补偿的测量系统(目标为 II 级精度),空油时精度为满刻度值的

$\pm 0.75\% \sim \pm 1\%$ ,满油时精度为满刻度值的 $\pm 2.75\% \sim \pm 3.25\%$ ;数字式的测量系统(目标为 III 级精度),空油时精度为满刻度值的 $\pm 0.5\% \sim \pm 0.75\%$ ,满油时精度为满刻度值的 $\pm 1\% \sim \pm 1.5\%$ 。

上述精度通常也作为民用飞机燃油测量系统制定设计要求的依据之一。

## 2 基础误差来源及分布

根据 ARINC611 燃油测量系统设计及安装指南中的描述,燃油测量误差来源主要有:

- (1) 油量传感器的制造误差,为随机误差,每个为 $0.2\% \sim 0.4\%$ 不等;
- (2) 油量传感器的安装误差,为随机误差,每个约为 $0.15\%$ ;
- (3) 密度计的制造误差,为随机误差,每个约为 $0.2\%$ (已考虑温度造成的影响);
- (4) 补偿传感器的制造误差,为随机误差,每个约为 $0.2\%$ (已考虑温度造成的影响);
- (5) 温度对传感器造成的影响,为随机误差,每个为 $0.17\% \sim 0.14\%$ 不等;
- (6) 燃油特性参数波动造成的误差,即当由某一参数推算出另一参数时产生的误差,为偏移误差,每个参数约为 $1\%$ ;

(7)不同燃油混合时产生的误差,为偏移误差,约为0.5%;

(8)传输电缆的误差,随机误差,对每个传感器的影响为0.17%~0.33%不等;

(9)处理电路误差,随机误差,每条信号处理通道约为0.2%;

(10)油箱建模误差,随机误差,约为0.16%;

(11)油箱制造误差,为随机误差,约为0.1%。

### 3 合成误差分析与计算

#### 3.1 合成误差分类

根据油量计算公式可知,油量为燃油密度(D)与燃油体积(V)的乘积。因此,要实现油量的精确测量就需要获得高精度的燃油密度和体积。燃油体积通常采用间接测量的方法,即通过油量传感器测得油面高度(H),再结合实际的油箱结构计算出燃油体积。燃油密度可采用直接或间接测量的方式,直接测量即在油箱内放置密度计测量燃油密度;间接测量即通过补偿传感器测量燃油介电常数(K),然后利用公式推算出燃油密度。

由此可以看出,燃油测量误差可最终归结于以下三类:

- (1)燃油介电常数K测量误差;
- (2)燃油密度测量D误差;
- (3)燃油油面高度H测量误差。

#### 3.2 误差计算方法

根据ARINC 611的规定,系统误差为总的随机误差与偏移误差之和;其中总随机误差为各项随机误差平方和再开方,即RSS,总偏移误差为各项偏移误差的代数和。以该方法作为计算上述三类合成误差的依据,可得出介电常数K,燃油密度D和油面高度H的测量误差。

影响K测量精度的基础误差有补偿传感器的制造误差、处理电路误差和传输电缆影响造成的误差,由此计算出K的测量误差,如表1所示。

表1 介电常数K的测量误差分析与计算

误差来源	空油箱	满油箱
补偿传感器制造误差	0.00%	0.20%
处理电路误差	0.00%	0.20%
电缆的影响	0.00%	0.05%
RSS	0.00%	0.29%

同理,可以计算出D和H的测量误差,具体数据见表2,表3。

表2 燃油密度D的测量误差分析与计算

误差来源	空油箱	满油箱
密度计制造误差	0.00%	0.20%
处理电路误差	0.00%	0.20%
RSS	0.00%	0.28%

表3 油面高度H的测量误差分析与计算

误差来源	左油箱		中央油箱		右油箱	
	空油箱	满油箱	空油箱	满油箱	空油箱	满油箱
传感器安装误差	0.05%	0.05%	0.05%	0.05%	0.05%	0.05%
传感器制造误差	0.07%	0.13%	0.06%	0.12%	0.07%	0.13%
处理电路误差	0.20%	0.20%	0.20%	0.20%	0.20%	0.20%
介电常数测量误差	0.00%	0.29%	0.00%	0.29%	0.00%	0.29%
温度对传感器的影响	0.07%	0.14%	0.07%	0.14%	0.07%	0.14%
电缆影响	0.11%	0.06%	0.10%	0.05%	0.11%	0.06%
RSS	0.25%	0.41%	0.25%	0.40%	0.25%	0.41%

### 4 方案分析

#### 4.1 前提说明

下面将列举4种测量方案,这4种方案分别采用了不同的燃油密度测量方式的组合。为了充分说明燃油密度对系统精度的影响,并使各个方案具有可比性,首先初步确定各个油箱内油量传感器的数

量与位置,在此基础上,调整密度计、温度传感器和补偿传感器的数量,即形成4种不同的传感器组合方式,计算各自的精度。

首先假设各方案满足以下前提:

- (1)燃油系统采用三油箱构型,需要满足III级精度要求。
- (2)使用相同的油箱模型进行分析计算。

(3)使用相同的真实油箱。

(4)使用的燃油种类相同,并且均为 ARINC611 中列举的燃油类型。

(5)均采用传统的交流式电容传感器测量油面高度,左右机翼油箱内各放置 14 个,中央翼油箱内放置 8 个。

(6)油量传感器的安装位置相同。

(7)单个重量。油量传感器:0.5lb;补偿传感器:0.5lb;温度传感器:0.3lb;燃油特性传感器:2.8lb。

(8)飞机在各个状态下的姿态误差一定。

(9)传感器信号传输电缆及电缆长度均相同。

基于上述假设,针对第 2 章节提到的各种基础误差,可以分析出对这 4 种方案而言的下列各项误差均相同:

(1)油箱制造误差;

(2)建模误差;

(3)油面高度测量误差;

(4)飞机姿态误差;

(5)由于燃油混合产生的误差。

由于这些误差与密度测量无关,为了更清晰地说明燃油密度测量对系统的影响,先计算出与密度测量无关的各项误差,再单独分析燃油密度测量的误差,最后计算出总误差。与密度测量无关部分的

误差计算结果见表 4。

接下来分析各个方案中燃油密度测量采用的方式、误差和对系统的影响。

## 4.2 方案 1

### 4.2.1 方案描述

特点:没有密度计。

方案 1 首先间接测量出 3 个油箱内燃油的密度,然后根据油量传感器测得的油面高度数据计算出燃油体积,最后将密度与体积相乘得出油量。

间接测量燃油密度的方式是:在左、右机翼和中央翼油箱内各布置 1 个补偿传感器,利用补偿传感器测得的燃油介电常数  $K$ ,根据公式推算出当前的燃油密度。

方案 1 的传感器布局如图 1 所示。

### 4.2.2 精度分析

(a)地面状态

地面状态的精度分析结果如表 5 所示。

(b)飞行状态

飞行状态的精度分析结果如表 6 所示。

根据表 5 和表 6 的数据可以看出,方案 1 不满足精度要求。

### 4.2.3 设备清单

方案 1 的设备清单见表 7。

表 4 不受密度测量精度影响的误差

误差来源		左翼油箱		中央翼油箱		右翼油箱	
		空油箱	满油箱	空油箱	满油箱	空油箱	满油箱
油箱制造误差		0.10%	0.10%	0.10%	0.10%	0.10%	0.10%
油面高度测量		0.25%	0.41%	0.25%	0.40%	0.25%	0.41%
建模误差		0.16%	0.16%	0.16%	0.16%	0.16%	0.16%
燃油混合	地面	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	飞行	0.50%	0.50%	0.50%	0.50%	0.50%	0.50%
姿态误差	地面	0.09%	0.12%	0.10%	0.10%	0.09%	0.12%
	巡航	0.15%	0.20%	0.10%	0.10%	0.15%	0.20%
	非巡航	0.20%	0.25%	0.17%	0.23%	0.20%	0.25%

表 5 方案 1 地面状态精度分析

误差来源		左翼油箱		中央翼油箱		右翼油箱	
		空油箱	满油箱	空油箱	满油箱	空油箱	满油箱
燃油特性参数误差		0.00%	1.00%	0.00%	1.00%	0.00%	1.00%
总误差		0.41%	1.22%	0.41%	1.19%	0.41%	1.22%

表6 方案1飞行状态精度分析

误差来源	左翼油箱		中央翼油箱		右翼油箱	
	空油箱	满油箱	空油箱	满油箱	空油箱	满油箱
燃油特性参数误差	0.00%	1.00%	0.00%	1.00%	0.00%	1.00%
总误差(巡航)	0.47%	1.40%	0.41%	1.30%	0.47%	1.40%
总误差(非巡航)	0.52%	1.45%	0.48%	1.43%	0.52%	1.45%

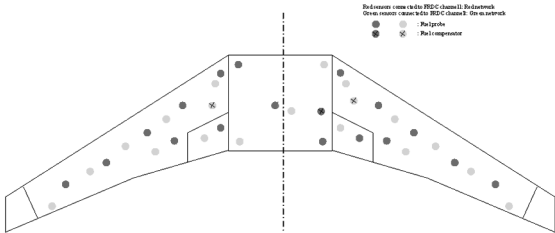


图1 方案1的传感器布局示意图

表7 方案1的设备清单

传感器类型	数量	单个重量(lb)	总重量(lb)
油量传感器	34	0.5	17
补偿传感器	3	0.5	1.5
总重量			18.5

### 4.3 方案2

#### 4.3.1 方案描述

特点:2个密度计。

假设:2个机翼油箱内燃油温度相同,燃油混合情况也相同。

方案2直接测量左机翼和中央翼油箱的燃油密

度,右机翼油箱的密度根据左机翼的数据进行推算;然后根据油量传感器测得的油面高度数据计算出燃油体积,最后将密度与体积相乘得出油量。

在左机翼和中央翼油箱内各放置1个燃油特性传感器,直接测量燃油密度。右翼油箱内的燃油密度测量不到,只能推算。方案2的传感器布局如图2所示。

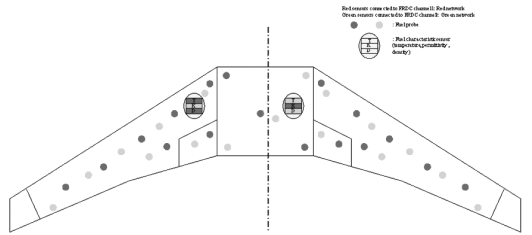


图2 方案2传感器布局示意图

#### 4.3.2 精度分析

(a)地面状态

地面状态的精度分析结果如表8所示。

(b)飞行状态

飞行状态的精度分析结果如表9所示。

表8 方案2地面状态精度分析

误差来源	左翼油箱		中央翼油箱		右翼油箱	
	空油箱	满油箱	空油箱	满油箱	空油箱	满油箱
燃油密度测量	0.00%	0.28%	0.00%	0.28%	0.00%	0.34%
总误差	0.41%	0.65%	0.41%	0.63%	0.41%	0.72%

表9 方案2飞行状态精度分析

误差来源	左翼油箱		中央翼油箱		右翼油箱	
	空油箱	满油箱	空油箱	满油箱	空油箱	满油箱
燃油密度测量	0.00%	0.28%	0.00%	0.28%	0.00%	0.34%
总误差(巡航)	0.47%	0.93%	0.41%	0.83%	0.47%	0.98%
总误差(非巡航)	0.52%	0.98%	0.48%	0.96%	0.52%	1.03%

从表8和表9的数据可知,方案2也不满足精度要求。

#### 4.3.3 设备清单

方案2的设备清单见表10。

### 4.4 方案3

#### 4.4.1 方案描述

特点:2个密度计+1个温度传感器。

假设:2个机翼油箱内燃油混合情况相同。

方案3的传感器布局如图3所示。

方案3直接测量左机翼和中央翼油箱的燃油密度,右机翼油箱的密度根据左机翼的数据进行推算,再用实测的温度值修正,得出最终的密度值;然后根据油量传感器测得的油面高度数据计算出燃油体积,最后将密度与体积相乘得出油量。

表 10 方案2的设备清单

传感器类型	数量	单个重量(lb)	总重量(lb)
油量传感器	34	0.5	17
燃油特性传感器	2	2.8	5.6
总重量			22.6

在右机翼油箱和中央翼油箱内各放置1个燃油特性传感器,测量这两个油箱内的燃油密度,在左机

翼油箱内放置1个温度传感器,测量燃油温度。

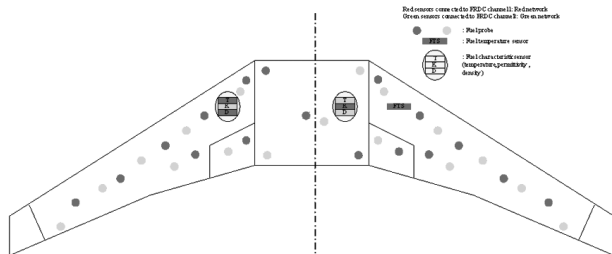


图3 方案3传感器布局示意图

#### 4.4.2 精度分析

(a)地面状态:

地面状态的精度分析结果如表11所示。

(b)飞行状态

飞行状态的精度分析结果如表12所示。

表 11 方案3地面状态精度分析

误差来源	左翼油箱		中央翼油箱		右翼油箱	
	空油箱	满油箱	空油箱	满油箱	空油箱	满油箱
燃油密度测量	0.00%	0.28%	0.00%	0.28%	0.00%	0.28%
总误差	0.41%	0.65%	0.41%	0.63%	0.41%	0.65%

表 12 方案3飞行状态精度分析

误差来源	左翼油箱		中央翼油箱		右翼油箱	
	空油箱	满油箱	空油箱	满油箱	空油箱	满油箱
燃油密度测量	0.00%	0.28%	0.00%	0.28%	0.00%	0.28%
总误差(巡航)	0.47%	0.93%	0.41%	0.83%	0.47%	0.93%
总误差(非巡航)	0.52%	0.98%	0.48%	0.96%	0.52%	0.98%

根据表11和表12的数据可以看出,方案3满足精度要求。

#### 4.4.3 设备清单

方案3设备清单如表13所示。

表 13 方案3的设备清单

传感器类型	数量	单个重量(lb)	总重量(lb)
油量传感器	34	0.5	17
燃油特性传感器	2	2.8	5.4
温度传感器	1	0.3	0.3
总重量			22.9

### 4.5 方案4

#### 4.5.1 方案描述

特点:3个密度计

方案4直接测量左、右机翼及中央翼油箱的燃油密度,然后根据油量传感器测得的油面高度数据计算出燃油体积,最后将密度与体积相乘得出油量。

直接测量燃油密度的方式是:在中央翼及左、右机翼油箱内各放置1个FCS(燃油特性传感器),燃油特性传感器内集成了1个密度计、补偿传感器和温度传感器,可直接燃油测量密度、介电常数和温度。

方案4的传感器布局如图4所示。

#### 4.5.2 精度分析

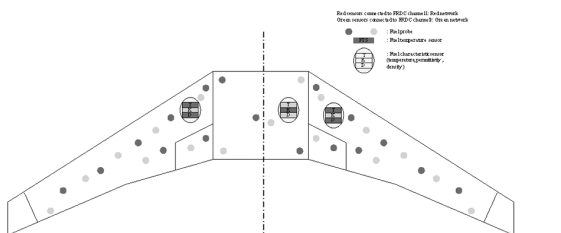


图4 方案4的传感器布局示意图

(a)地面状态:

地面状态的精度分析结果如表14所示。

(b)飞行状态

飞行状态的精度分析结果如表15所示。

表 14 方案 4 地面状态精度分析

误差来源	左翼油箱		中央翼油箱		右翼油箱	
	空油箱	满油箱	空油箱	满油箱	空油箱	满油箱
燃油密度测量	0.00%	0.28%	0.00%	0.28%	0.00%	0.28%
总误差	0.41%	0.65%	0.41%	0.63%	0.41%	0.65%

表 15 方案 4 飞行状态精度分析

误差来源	左翼油箱		中央翼油箱		右翼油箱	
	空油箱	满油箱	空油箱	满油箱	空油箱	满油箱
燃油密度测量	0.00%	0.28%	0.00%	0.28%	0.00%	0.28%
总误差(巡航)	0.47%	0.93%	0.41%	0.83%	0.47%	0.93%
总误差(非巡航)	0.52%	0.98%	0.48%	0.96%	0.52%	0.98%

由上述两个表格的数据可以得出,方案 4 满足测量精度要求。

4.5.3 设备清单

传感器布局方案 4 的设备清单见表 16。

表 16 方案 4 的设备清单

传感器类型	数量	单个重量(lb)	总重量(lb)
油量传感器	34	0.5	17
燃油特性传感器	3	2.8	8.4
总重量			25.4

5 结论

下面对各方案的主要特点、精度和重量进行对比,对比结果如表 17 所示。

根据表 17 中的信息可以得知,方案 1 和方案 2 不能满足测量精度的要求,所以应该排除;对比后两个方案,其达到的精度相同,即系统采用“3 个密度计”与“2 个密度计加 1 个温度传感器”可实现的精度相同,而方案 4 的系统重量比方案 3 大,所以方案 3 优于方案 4。因此,在这种情况下,方案 3 的传感器组合方式是最佳的。

表 17 方案对比分析

方案	主要特点	重量(lb)	精度排序	是否满足精度要求
方案 1	油箱内没有布置密度计,采用间接的方法测量燃油密度	18.5	4	否
方案 2	中央翼和左翼油箱内各布置一个密度计,根据左翼油箱的燃油密度推算出右翼油箱的燃油密度	22.6	3	否
方案 3	中央翼和左翼油箱内各布置一个密度计,右翼油箱布置一根温度传感器。根据左翼油箱的燃油密度推算出右翼油箱的燃油密度,再利用温度传感器的数据加以修正	22.9	1	是
方案 4	在三个油箱内各布置一个密度计,直接测量各油箱内的燃油密度	25.4	1	是

由此可见,在满足 III 级精度要求的前提下,燃油测量系统应至少使用 2 个密度计,分别放置在中央翼油箱和任一机翼油箱内,在没有放置密度计的机翼油箱内,可根据需要布置温度传感器,这种方案可满足系统精度要求,而且重量适中。

参考文献:

[1] Air Force - 11. MIL - G - 26988C Military Specification Gage, liquid quantity, capacitor type transistorized, general specification for[S]. 1995.  
 [2] Airlines electronic engineering committee. Guidance for the design and installation of fuel quantity systems[R].

ARINC 611-1 Aeronautical radio, INC., 1999.  
 [3] 蒋军昌. 飞机数字式燃油管理系统研究[D]. 西北工业大学, 2002.  
 [4] 李楠, 吕俊芳. 飞机燃油密度实时测量及其实现防范[J]. 测量与检修, 2002, 22(1): 24-26.  
 [5] 肖凝. 飞机燃油测量技术研究与发展[J]. 航空科学技术, 2003: 31-34.  
 [6] 聂海涛, 刘云昌. 电容式传感器在飞机燃油测量系统中的应用. 沈阳航空工业学院学报, 2007, 24(5).  
 [7] 张欲晓, 樊尚春. 中国民用飞机燃油测量系统发展趋势. 理论与实践, 2008, 28(4).  
 [8] 何发远. 浅析影响电容式油量测量系统精度的几个因素. 制造技术与实践, 2005, 6.