

航空燃油密度测量技术研究

The Research of Aviation Fuel Density Measurement Technology

鲜燕¹ 王丽梅¹ 陈健¹ 陈贵勇² / Xian Yan¹ Wang Limei¹ Chen Jian¹ Chen Guiyong²

(1. 中国民航飞行学院新津分院, 成都 611400; 2. 中航工业成飞集团复合材料加工厂, 成都 61000)

(1. Civil Aviation Flight University of China Xinjin Flight College, Chengdu 611400, China;

2. AVIC Chengdu Aircraft Composites Factory, Chengdu 610000, China)

摘要:

燃油量是飞机燃油系统的重要组成部分,同时燃油密度的测量又是燃油测量中的一个关键环节,为了进一步研究提高航空燃油密度测量精度的方法,预测燃油测量未来的发展,介绍了燃油测量系统和密度测量的重要性,结合文献分析法和定性分析法进行了总结归纳,论述了各种燃油密度测量方法的基本原理,包括间接法、比重计法、基于谐振技术测量、放射性同位素测量以及超声波测量,并对比分析了各种方法的优缺点,在国内外研究现状的基础上指出了数字化综合化是航空燃油测量技术发展的必然趋势。

关键词:航空燃油;密度测量;方法;原理;燃油量

中图分类号:V233.2

文献标识码:A

[**Abstract**] The amount of fuel is an important component of the aviation fuel system, while measuring the fuel density is a key link in fuel quantity measurement. To further investigate the accuracy of aviation fuel density measurements to predict the future development of fuel measurements. This paper summarizes the main methods for measuring the fuel density, including the indirect method, hydrometer measurement, based on resonance technology measurement, a radioactive isotope measurement and ultrasonic measurement, analyzes basic principle of the methods, and compares their advantages and disadvantages, with current research points out the development trend of fuel measurement technology.

[**Key words**] aviation fuel; density measurement; method; principle; the amount of fuel

0 引言

燃油是飞机的能源,燃油系统是飞机能源的供应系统。飞机燃油系统主要功能是储存燃油,并根据飞行状态和飞行高度,按需要的压力和流量,安全可靠地将燃油供给发动机。因而在飞机的飞行过程中,燃油量对飞行安全起着重要的作用^[1-3],不仅要求燃油量能实时地显示出,并且要求其测量值尽可能精确。这是由于飞机工作的特殊环境所导致的,燃油测量系统的测量精度对飞机的整体性能有重要的影响,例如民用飞机的燃油测量精度只要每提高 0.5%,相应就可以至少增加 2~3 名乘

客^[4],大大提高经济效益。因此,提高飞机燃油系统的测量精度显得尤为重要。

近年来,如何实现高精度飞行燃油密度的实时测量是国内外一直在探索和研究的重点,然而国内航空燃油密度测量技术的研究尚处于起步阶段,因此,对各种新的燃油密度测量方法及燃油量测量技术的研究将推动着燃油测量技术不断地发展与完善。

1 燃油测量系统

飞机燃油测量系统包括液位测量传感器、密度测量传感器、燃油测量与处理任务计算机以及油量显示等部分,图 1 是它的工作原理:液位测量传感器

首先测量出油箱中燃油的高度 h , 结合飞行姿态和飞行高度以及数学模型信息, 计算机可得到相应的燃油体积 v , 同时密度传感器可以测出燃油的密度 ρ , 计算机通过结合温度补偿等可得出油箱燃油的质量 m , 最终输出并显示。

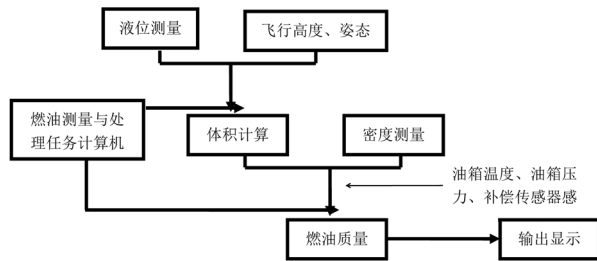


图1 燃油测量系统原理图

其中, 燃油的液位测量经历了从油尺测量、电容式(特性传感器到线性传感器)测量、超声波测量、放射性测量、光纤测量以及磁致伸缩技术测量等各种先进的测量方式并存的时代, 使实时的体积计算成为现实^[5]。由于燃油的消耗是动态过程, 燃油密度并不是固定值, 它会随着飞机飞行的高度、大气压力、油箱温度的变化而改变, 因此要实时地测量出燃油密度, 并且提高密度的测量精度, 从而提高整个燃油测量系统的精度, 是燃油测量中至关重要的一个环节。

2 燃油密度的测量

燃油的密度测量从早期的间接测量、比重计测量逐渐到了振动筒式测量、放射性同位素测量、超声波测量等传感器测量, 使得燃油测量精度、安全性、操作性及自动化水平大大提高, 下面就几种主要密度测量方法的工作原理进行说明。

2.1 主要测量方法及其原理

(1) 间接方法进行测量

早期的燃油测量系统不能对燃油密度进行直接测量, 而采用的是间接测量方式。密度的间接测量又有结合介电常数和燃油温度补偿的方法(式1)以及利用燃油密度与温度、压力等之间的关系(式2)来进行间接测量两种^[3,6]。

$$\rho = F_1(T \cdot C) \quad (1)$$

$$\rho = F_2(P \cdot T) \quad (2)$$

其中, ρ 为燃油密度, T 为温度, C 为介电常数, P 为压力, F_1 为密度与介电常数之间的关系函数; F_2 为燃油密度与温度、压力之间的关系函数。

对于第一种方法, 由于燃油品格的不同, 介电常数与密度之间的关系不总是恒定的, 且测量得出的燃油密度精度不高; 对于第二种方法, 由于温度压力以及其他参数与密度之间的关系复杂, 往往测量过程中简化模型, 使得精度降低。因此, 相继出现了直接测量的密度计以及传感器。

(2) 比重计进行测量

比重计是测定液体密度的一种仪器, 原理是阿基米德定律和物体浮在液面上的平衡, 由干管和躯体组成。当比重计在不同的燃油中浸入的深度不同, 受到的压力不同, 根据干管上的读数可以确定出燃油的密度。由于比重计测量密度精度不高, 加上自动化程度低, 一般在飞机燃油上很少使用。

(3) 基于谐振技术测量

基于谐振技术的燃油密度测量采用的是谐振筒式传感器, 它是一种适用于多种参数测量的传感器, 通过测量谐振筒在不同状态下的固有振动频率, 从而测量出测量燃油的密度, 输出量为频率^[7-8]。谐振筒的结构简图如图2所示, 可以将其视为一个单自由度受迫振动的二阶系统, 等效于如图3所示模型, 其运动方程可以表述为式(3)。当外力(激振力) $F(t)$ 能够克服阻尼力时, 系统就将处于谐振状态, 根据振动理论, 其谐振频率为式(4), 也即是固有频率。

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = F(T) \quad (3)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad f_0 = h \sqrt{\frac{EI}{m}} \quad (4)$$

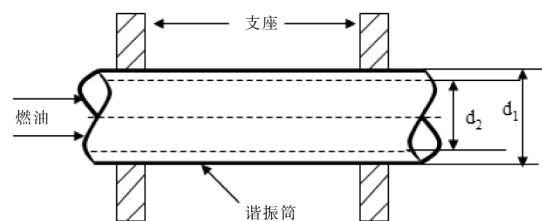


图2 谐振筒的结构简图

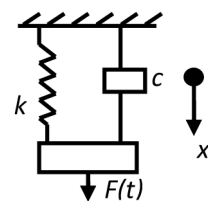


图3 振动系统等效模型

其中, $F(T)$ 为激振力, m 为等效质量, c 为阻尼

系数, k 为弹簧刚度, E 为材料弹性模量, I 为刚度。

当燃油从谐振筒中流过时, 总质量由 m 变成 $m + \Delta m$, Δm 是燃油振动部分的质量, 此时的振动频率为式(5)。

$$f_x \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{(m+\Delta M)}} = f_0 \sqrt{\frac{1}{1+\Delta m/m}} \quad (5)$$

其中, $m_x = \frac{\pi}{4} (d_1^2 - d_2^2) \rho \cdot l$, $\Delta m = \frac{\pi}{4} d_2^2 \rho_x \cdot l$, 代入可得式(6)。

$$\rho_x = \rho \left[\left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 - 1 \right] \cdot \left[\left(\frac{f}{f_x} \right)^2 - 1 \right] \quad (6)$$

$$\text{令 } \frac{1}{k_0} = \rho \left[\left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 - 1 \right], k_2 = \frac{f^2}{k_0}, \text{ 则}$$

$$\rho_x = -k_0 + \frac{k_2}{f_x^2} \quad (7)$$

其中, d_1 、 d_2 分别为谐振筒的内外径, f 为谐振筒的振动频率, f_x 为加入燃油后谐振筒的振动频率。

当燃油进入谐振状态的谐振筒中, 将随之一起振动并成为其振动质量的有效部分, 根据式(7)测量出此时的振动频率即可以确定出燃油的密度, 图4是系统原理框图。

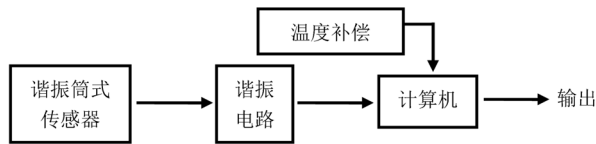


图4 谐振式航空燃油测量系统示意图

(4) 放射性同位素测量

放射性同位素燃油密度测量是基于燃油对辐射射线的吸收, 当 γ 射线穿过燃油时, 其衰减程度与穿透过的燃油厚度、密度以及成分有关, 其放射性强度的衰减规律如式(8)所示^[9-12]。

$$I = I_0 \exp(-\mu \rho_x d) \quad (8)$$

$$\rho_x \frac{1}{\mu d} \ln \left(\frac{I_0}{I} \right) \quad (9)$$

其中, ρ_x 是燃油的密度, $\mu = \sum_{i=1}^n c_i \mu_i$, μ 是燃油对射线的质量吸收系数, 当燃油固定后, 它不随温度、压力等环境因素变化, 可将其视作常数, I_0 是穿透燃油前射线的强度, I 是穿透燃油后射线的强度, d 是射线穿过燃油的距离。

通过转换, 可以得到式(9), 由于 μ 、 d 、 I_0 都是不变的, 只需根据衰减后射线的强度 I 就可以得到所需的燃油密度, 图5是此测量方式的示意图。



图5 放射性燃油密度测量示意图

(5) 超声波测量

超声波测量燃油密度利用的是超声波在燃油中的传播过程是以纵波的形式进行的, 其传播速度与燃油密度、声阻抗等密切相关^[13-14], 测量出燃油中的声速即可得到燃油的密度, 其表达式为式(10)。超声波测量密度示意图如图6所示。

$$c = \sqrt{E/\rho} \quad (10)$$

式中: c 为超声波的传播速度, E 为燃油的体积弹性模量, ρ 为燃油的密度。

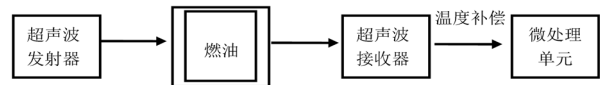


图6 超声波测量密度示意图

2.2 各种测量方法对比

表1是各种燃油密度测量方法的优缺点详细情况, 从成本、测量精度、稳定性、自动化程度、是否与燃油接触、系统可操作性以及维护性等方面进行了对比说明。其中比重计测量与间接测量属于静态测量, 其余测量方法属于动态测量; 谐振技术测量和超声波测量为非接触式测量, 在密度测量过程中不易造成传感器的污染, 使得传感器稳定性较好。

表1 燃油密度测量方法对比表

测量方法		是否接触式	优点	缺点
静态测量	比重计测量	是	成本低	测量精度不高, 自动化程度低, 燃油密度测量很少采用。
	间接测量	否	简化燃油测量系统, 降低成本。	参数之间关系复杂, 实际中需简化模型, 测量精度不高。
动态测量	谐振筒测量	是	测量精度高、稳定性和可靠性好, 自动化水平高。	传感器表面极易受到油液的污染, 影响精度; 受飞行姿态和燃油液面高度的影响不适合实时检测。
	放射性同位素测量	否	不宜造成污染, 不受飞行姿态和燃油液面高度的影响, 稳定性好, 测量精度高。	审批程序繁琐、管理与检查严格。需要放射性射线源; 需较长的时间达到稳定;
	超声波测量	否	非接触测量, 无放射性, 对人体无害, 测量稳定性好。	燃油中的杂质会引起超声波信号的严重衰减, 测量结果不稳定, 精度有待提高。

(下转第30页)

荷计算方法研究[J]. 民用飞机设计与研究,2011,3:14-16.
[4]范洁川. 风洞试验手册[M]. 第二版. 北京:航空工业出版社,2012.

[5]. GB/T 16638.1. 中华人民共和国国家标准[S]. 北京:中华人民共和国国家标准化委员会,1994.

(上接第18页)

2.3 国内外燃油密度测量研究

我国的燃油测量技术研究起步较晚,从20世纪70年代才开始跟踪与研究航空液位传感器、燃油密度传感器及其相关技术^[15],目前我国民用飞机的燃油密度测量主要采用间接方式,即介电常数与温度补偿的方法进行测量,只有个别机型选用了数字化燃油测量系统,这样导致燃油测量数字化程度偏低,容易造成测量系统的可靠性较低,测量精度偏低,平均无故障工作时间较短,占用维修时间较多。

在传感器方面,霍尼韦尔和史密斯公司等国外大型公司大力开展数字式燃油测量系统技术研究,先后在波音757、波音767、C-130和F-22等飞机上成功运用放射性燃油密度传感器和谐振式密度传感器,结合补偿修正技术、BIT技术等使密度测量传感器在测量精度、可靠性和使用寿命方面有很大的提高。其中以美国F-22为代表的第四代战斗机不仅更换了密度测量方法,还彻底放弃了电容式液位测量,使燃油测量系统发生了质的飞越。2014年由美国UTC公司设计和生产的联合技术航空系统被Airbus S. A. S. 选中为空客A321、A319、A320和A320neo等机型提供通用燃油测量系统,该燃油测量系统提供了改良的性能和更好的可靠性,提供通用的燃油密度测量和液位探测仪、指示器和油量感应控制装置等。

3 燃油测量技术的发展

无论是振动筒式测量、放射性同位素测量还是超声波测量方法,每一种新型的燃油密度测量技术及其应用都将直接或间接地提高航空燃油的测量精度和自动化水平,微电子和计算机技术在燃油测量技术发展的过程中起了决定性作用,这就决定了数字化、综合化是航空燃油测量技术发展的必然趋势。

大力开展各种新型的燃油液位和燃油密度测量技术研究,研制适合我国燃油系统发展需求的燃油测量系统,是实现飞机燃油管理的重要基础。未来航空燃油测量系统的发展将集中体现在五个方

面:一是高精度传感器的研制,着力提高燃油测量精度,提高燃油的利用效率;二是传感器内部结构与分布技术的优化,力图实现传感器的一体化、小型化;三是测量误差的补偿与修正技术的完善,减小系统误差;四是系统可靠性和维护性等的改进,提高系统整体功能性;五是向智能控制发展,实现燃油系统的数字化、综合化管理。

参考文献:

- [1]王向杨,等. 飞机燃油测量方法研究[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2004.
- [2]李楠,吕俊芳. 飞机燃油密度实时测量及其实现方法[J]. 航空计测技术,2002,22(1):24-26.
- [3]肖凝. 飞机燃油测量技术研究与发展[J]. 航空科学技术,2003,3:31-34.
- [4]赵灿. 基于磁致伸缩技术的飞机燃油测量系统研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2007.
- [5]刘涛. 基于磁致伸缩的燃油测量系统的研究[D]. 天津:天津大学,2006.
- [6]张欲晓,曾显群,王新杰. 中国民用飞机燃油测量系统现状与发展趋势[J]. 航空制造技术,2010,13:38-40.
- [7]谢捷如,袁慎芳. 基于谐振技术的航空燃油密度测量的研究[J]. 中国制造业信息化,2006,35(21):34-36.
- [8]崔玉亮,邓铁六,于凤. 谐振式传感器理论及测试技术[M]. 北京:煤炭工业出版社,1997.
- [9]李楠,吕俊芳. 提高同位素测量航空燃油密度精度的方法研究[J]. 北京航空航天大学学报,2003,29(7):620-623.
- [10]蒋正雄,肖凝. 放射性燃油密度测量技术的应用[J]. 航空计测技术,2003,23(1):12-14.
- [11]李楠,吕俊芳. 利用放射性同位素 γ 射线测量飞机燃油密度的方法研究[J]. 航空学报,2002,23(6):587-590.
- [12]李楠,吕俊芳. 基于物质对辐射射线吸收原理的航空燃油密度的测量[J]. 飞机设计,2002,9(3):31-34.
- [13]姚明林,陈先中,张争. 超声波液体密度传感器[J]. 传感器与微系统,2005,24(5):57-60.
- [14]渠晓峰. 超声波液体密度测量仪的研究与开发[D]. 保定:华北电力大学,2008.
- [15]单宝峰,张广涛,李景春,王斌. 航空油量测量技术研究及其发展现状[J]. 自动化仪表,2013,34(4):31-33.