

# 超声波流量计在飞机燃油流量测试中的应用研究

杜乔, 姜文, 李春景

(沈阳飞机设计研究所, 沈阳 110035)

**摘要:** 燃油系统输油流量测试是飞机燃油系统地面模拟试验的一项重要内容; 由于试验油箱内部的各管路与实际飞机油箱管路的布置是一致的, 不适合在油箱内的狭小空间安装涡轮流量计, 并且会破坏管路流阻特性; 由于使用传统油箱油量标定的方法进行输油流量测量耗时耗力, 所以需要采用一种新的技术或测量方法来完成油箱输油流量的测量; 超声波流量计体积小, 不会破坏输油管路流阻特性, 防爆等级也符合试验要求; 对超声波流量计在浸油状态下测试进行可行性分析, 将超声波流量计在飞机燃油系统试验中实现创新性应用; 通过试验证明了超声波流量计在飞机燃油流量测试中发挥了重要作用, 并且首次将超声波流量计应用到飞机试验油箱内部输油管路的流量测试中, 这对飞机其他系统的流量测试和飞机机上排故试验起到了重要作用。

**关键词:** 燃油试验; 流量测试; 超声波流量计; 时差法

## Application Research of Ultrasonic Flowmeter in Aircraft Fuel Oil Flow Test

Du Qiao, Jiang Wen, Li Chunjing

(Shenyang Aircraft Design and Research Institute, Shenyang 110035, China)

**Abstract:** The system of fuel oil flow test is one of the significant ground simulation experiments. The tubes layout in the test reservoir are consistent with that in the real aircraft reservoir, so they are not suitable to be installed in the narrow space of the reservoir. And it will damage the flow resistance characteristic of the tube to install the turbine flowmeter. As the way of traditional reservoir oil calibration wastes work and time, it is necessary to apply a novel technology to fulfill the oil calibration. Because the volume of ultrasonic flowmeter is smaller so it will not ruin the flow resistance characteristic of oil transportation tube which can meet the experiment demand. This paper deals with the possibility analysis of the ultrasonic flowmeter under the circumstances of immersion oil, the creation of ultrasonic flowmeter will be fulfilled in the fuel oil system experiments. The importance of ultrasonic flowmeter in the test of airplane fuel oil will be verified by the experiments. It is significant to make a fuel oil flow test utilizing the ultrasonic flowmeter in the fuel oil system series experiments for the first time. As a result, it is proved that ultrasonic flowmeter plays an important role in the aircraft fuel oil flow test and troubleshooting.

**Keywords:** fuel oil test; flow test; ultrasonic flowmeter; time-difference method

## 0 引言

燃油系统用来贮存飞机所需要的燃油, 并保证飞机在所有的工作状态下都能连续、有效地向发动机供给燃油。此外, 燃油系统还具有为空调系统的工作介质、发电机冷却系统、液压系统和雷达冷却系统提供散热的功能。飞机燃油系统试验的主要目的是验证燃油系统各分系统及配套的成品、附件是否满足飞机性能并且验证系统设计的合理性。试验可根据燃油系统功能及合理试验方法划分为以下九大项内容, 分别为供油子系统试验、抽吸供油试验、负过载供油试验、输油子系统试验、压力加油试验、加油冲击压力测量试验、通气增压分系统试验、散热器子系统试验和油量一耗量测量子系统试验。合理的流量和压力的燃油是飞机正常飞行的保证, 无论那一项试验都会涉及到流量的测试, 所以在飞机燃油试验中测量流量的方法尤为关键<sup>[1]</sup>。

试验油箱是按照飞机油箱 1:1 模拟设计的, 油箱内部的各种管路布置与真实飞机油箱的管路布置一致, 真实飞机各个油箱内没有安装流量计, 所以如果在试验室模拟台油箱内安装

涡轮流量计, 势必会破坏管路流阻特性, 并且涡轮流量计的体积很大, 不适合安装在油箱内的狭小空间内, 只能采取其他的试验方法获取试验数据。需要采用一种新的技术或测量方法来完成油箱输油流量的测量。经过调研论证, 采用超声波流量计进行燃油流量测量。超声波流量计体积很小, 只需要安装输油管的外管壁上, 不会破坏输油管路流阻特性, 并且其防爆等级符合试验要求, 适合安装在油箱内测量管路的液体流量。在下面的文章中将要论述其在燃油试验中的具体应用。

## 1 超声波流量计简介

19 世纪 30 年代, 德国人发明有史以来第一台超声波流量计。迄今为止, 超声波流量计历经了九十多年的发展历程。虽然最初的超声波流量计使用并不广泛, 但在 1970 年以后, 随着集成电路和电子技术的迅速发展, 使得超声波流量计在测量精度、响应速度和稳定性方面有了大幅度改善。近十几年来, 随着我国航空事业的快速发展, 国防工业对于测试设备和测试技术能力要求的逐步提高, 超声波流量计迅速成为流量测量的领域不可或缺的组成部分<sup>[2]</sup>。

超声波流量计主要由流量计二次仪表、测量探头(换能器)及信号处理单元和安装部件组成。正确选择测量点对于实现可靠和高精度的测量是至关重要的, 测量必须在管道上进行。测量点的正确选择和正确的传感器安装位置能保证在最佳

收稿日期: 2016-12-20; 修回日期: 2017-01-05。

作者简介: 杜乔(1982-), 男, 辽宁沈阳人, 工程师, 主要从事飞机燃油系统试验测试与控制方向的研究。

条件下接受和处理超声波信号。由于测量环境不同对测试影响的因素众多，对于传感器的定位并无标准方案。传感器安装的正确性主要受介质影响，受介质中存在的气泡影响，受管路的直径、材料、内衬、壁厚和形状影响。安装应该尽量避开管路中有沉积物的位置，应确保选定的位置上的温度处于仪器换能器的工作范围内。

结合飞机燃油试验流量测量的需要，分析一下所选 FLEXIM 公司的 F601 型号超声波流量计的特点。(1) 测量精度为 0.5% 完全符合试验需要；(2) 适用温度范围 -200~450℃ 完全包含试验测试温度范围；(3) 响应时间为 70 ms；(4) 可测量最小管径为 6 mm；(5) 可测最低流速为 0.01 m/s；(6) 主机采用双处理器，一个作为信号采集，一个作为信号处理，提高运行速度；(7) 传感器内部带有温度补偿功能，确保介质温度发生变化时，保证测量精度；(8) 传感器电缆为铠装电缆，防止传感器在经常适用的情况下损坏电缆，适应试验环境；超声波流量计内部固化储存芯片，适用时流量计自动读取传感器数据，方便操作，保证试验测量精度<sup>[3]</sup>。

## 2 超声波流量计原理

超声波流量计就是通过测量流体对超声波的作用所承载的信息来测量流体流量的。若所利用的承载信息不同，其测量原理也就不同，超声波流量计的测量原理可以分为时差法、相关法、多普勒法、噪声法、旋涡法和波束偏移法等。其中时差法的技术最为成熟，应用也最为广泛，本文测量燃油流量就是采用的时差法原理。

时差法是通过测量超声波束在管道流体中传播时间差值来测量流体流速，进而计算出流量的<sup>[4]</sup>。

超声波流量计的测量原理参见图 1 和图 2。

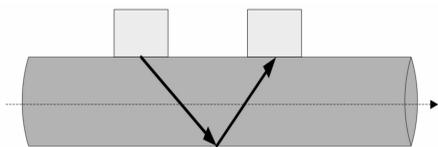


图 1 超声波流量计的安装图

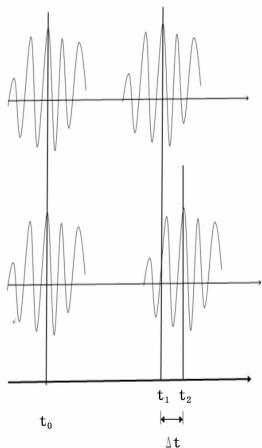


图 2 超声波流量计传播时间示意图

图 1 中管路为输油管路，两个方块为超声波流量计的换能器，超声波流量计贴在输油管外壁上，一个为超声波发射模块，一个为超声波接收模块。

如图 2 所示，图上方波形图为超声波在静止液体中传播示意曲线，下方是在有一定流速的液体传播示意曲线。由于超声波在煤油中的传播速度是一定的，由于两个模块安装位置之间的距离是固定的，那么如果管路内的油是静止的，那么一束超声波经过管路中煤油，再反射到接收模块，超声波在煤油传播的时间就是一个定值，即  $t_1$ ；当管路中的液体是流动的，超声波此时传播速度应该是液体的流动速度加上超声波在煤油中的固有的传播速度，所以与液体静止时接收到超声波的时间有滞后或超前，这个时间为  $t_2$ ，时间差  $\Delta t$  就是由于管路中液体流动产生的，并且与流动速度相关，在已知管路内径和超声波在液体中的固有传播速度的情况下，就可以通过一系列计算获得液体单位时间内流过的体积，即管路中流动液体的瞬时流量。

## 3 超声波流量计组成和性能指标

一套超声波流量计由两个探头（换能器）、同轴电缆和测量仪表（二次仪表）组成，两个探头直接安装在管路上，通过同轴电缆将信号输入给二次仪表，两个探头一个为超声波信号发射探头，一个为超声波信号接受探头。

超声波流量计的测试精度为：0.5%

防爆等级：二区防爆 ExdII BT4

可测温度范围：-200℃~450℃

可测最低流速：0.01 m/s

可测最小管径：6 mm

## 4 超声波流量计安装方法和注意事项

安装方式主要有两种：同一侧安装和对侧安装，见图 3。

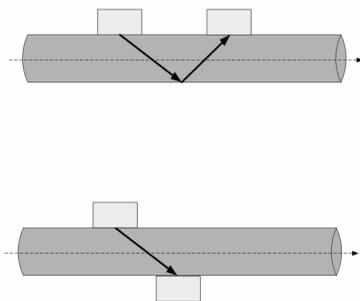


图 3 超声波流量计安装方式示意图

上图是反射式，采用 V 型或 W 型安装；下图是直射式，采用 Z 型安装。选择哪种安装方式与管路的管径相关，一般将管径参数输入与传感器配套的测试仪表内，测试仪表经过计算会提示一个比较适合的安装方式，并且给出最优的安装距离。安装人员按照此参数进行实际安装。

反射式安装需要两个模块中心线在一条直线上，并且与管路轴线平行，而直射式安装两个模块中心线在一个平面内，并且与管路轴线平行。这两个条件看似简单，却往往因为安装位置和安装空间的限制不容易实现，通常要利用直角尺和游标卡尺共同完成安装<sup>[5]</sup>。两个探头之间的距离要利用游标卡尺精确测量，此参数需要输入给测量仪表参与流量值计算。

超声波安装位置的选择，有以下几条注意事项：

① 首先保证需要测量的管路是一段直管路，并且管路外表面和内表面都比较光滑，如果表面比较粗糙，会降低超声波的反射能力，影响测量精度；

②传感器距离如果管路上有弯头、变径、阀门和泵等,要保证一定的距离,因为在弯头、变径、阀门和泵的附近容易产生涡流,影响测量数据,具体距离参数可查找安装说明的参数表,传感器一般与之都要相距10倍管径以上;

③如果选择垂直地面的管路测量,要注意液体的流向,要选择液体向上流动的管路,因为液体向下流动时,受重力的影响,容易造成液柱不连续,有气泡产生,影响测量精度。

## 5 二次仪表的使用及数据采集

超声波流量计的探头通过同轴电缆与二次仪表相连,二次仪表通过采集超声波信号,进行相关计算,得到流量值。

二次仪表需要输入输油管路的管径参数,超声波在煤油中的传播速度,煤油密度、黏度系数、测试电缆长度等参数<sup>[6]</sup>。

测量仪表计算出流量值后,可以根据设定的量程范围变送输出标准的电流电压信号,供计算机测试系统采集记录。

## 6 超声波流量计的在飞机燃油试验中具体应用

在飞机燃油试验中需要采用油箱标定的方法来测量输油流量。在以往的型号试验中油箱标定的方法是通过逐次向油箱内加入一定量的煤油,记录下油箱内液位传感器的液位高度,得到油箱的油量-高度曲线。在油箱标定试验中,油箱输油,记录下油箱内液位传感器的液位高度变化,通过油量-高度曲线计算得到油箱油量随时间变化曲线,其斜率是油箱输油瞬时流量。但是油箱标定是一项很庞大的试验,虽然试验本身并不复杂,但需要耗费大量人力物力,在某型飞机油量标定试验中,整个试验团队用两个月才完成标定试验。并且在飞机燃油试验中,试验需要测试不同油箱在不同姿态下的输油流量,而涡轮流量计的体积很大,不适合安装在油箱内的狭小空间,因此不能安装涡轮流量计,为了保住试验节点不能再使用的耗时耗力的测量方法。所以,需要采用一种新的技术或测量方法来完成油箱输油流量的测量。经过调研论证,发现了一种新型流量测量仪器—超声波流量计进行流量测量。超声波流量计的优点是体积很小、适合安装在输油管路的管壁上,不会破坏输油管路流阻特性,并且其防爆等级是二区防爆 ExdII BT4 符合飞机燃油试验要求,可以浸泡在油箱煤油中测量油箱内部管路的煤油流量。

团队首次将超声波流量计应用到飞机燃油试验中,而其中最大亮点就是首次使用超声波流量计测量浸在飞机油箱中的输油管路的输油流量。

下面结合测量机翼油箱的输油流量测量介绍超声波流量计的在飞机燃油试验中具体应用。

首先打开油箱口盖,确认需要测量的管路,选择测量位置时要参照上文所述的安装位置选择注意事项。

通过查阅管路设计图纸,获得待测输油管路的材料型号、管径、壁厚等参数指标,经确认,机翼油箱的输油管路材料为

(上接第31页)

长寿命”GNC系统的关键技术之一。能够满足空天飞行器在轨、再入复杂环境下的任务要求,该设计理念可为后续同类航天器的设计提供参考。

### 参考文献:

[1] 林来兴,最近十年航天器制导、导航与控制(GNC)系统故障分

析研究[J].控制工程,2004,(1):1-2.

铝、外径(XX)mm、壁厚(XX)mm,将这些参数输入测量仪表,测量仪表经过内部计算,给出最优的安装方式和探头之间的最佳间距。

在确定好安装位置后,按照测量仪表提示的安装方式和间距进行安装,安装时一定要注意探头的中心线与管路轴线平行,参照前文论述,另外注意探头的方向与管路中煤油流向一致。

探头固定好后,用千分卡尺测量两个探头之间的实际距离,虽然安装时是尽量按照仪表给出的尺寸安装,但由于安装空间限制,实际距离与要求距离不能完全相同,但只要将实际距离输入测量仪表,测量仪表根据实际距离进行修正。

探头固定安装后,将探头的测试电缆与测量仪表连接,这时,如果管路中充满煤油,仪表的测试界面将显示超声波信号强弱,如果信号很强,则表明探头安装正确,如果信号弱,则需检查探头安装情况,调整安装,直至显示信号正常,可以进行试验测试。

测试仪表将测得的流量值输入给计算机测试系统,计算机系统同步记录流量值和试验中其他参数,从而完成输油流量测量试验。

## 7 结论

本文介绍了超声波流量计在飞机燃油试验中的实际应用,并且在近期几个型号的燃油地面模拟试验中,都应用了超声波流量计测量输油流量,由于其安装测试简单方便,节省大量的人力物力,解决了费时费力的测试难题,很好地完成试验任务,确保了试验节点。综上,在飞机燃油流量测试中应用超声波流量计是可行的,并且本方法已经在飞机燃油模拟试验的流量测试中得到成功运用。建议该测试方法在飞机其他系统流量测试中使用,比如液压系统、环控系统都非常适合使用该方法。同时,该测试方法在飞机机上排故方面会起重大作用。随着超声波流量计发展,测试设备越来越小,并且可以应用在机上燃油流量测试。

### 参考文献:

[1] 罗伊·兰顿.飞机燃油系统[M].上海:上海交通大学出版社,2010.

[2] 黄肇雄.超声波流量计的发展与应用[J].自动化与仪表,1998(3):1-4.

[3] 陈聪.超声波流量计的特点和应用[J].医药工程技术,2010(1):48-50.

[4] 刘杰.基于时差法的超声波流量计设计[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2010.

[5] 王立琦,王珍.高精度超声波流量计的研制[J].哈尔滨商业大学学报,2001.

[6] 兰纯纯.时差式超声波流量计二次仪表的研究[D].杭州:浙江大学机械能源学院,2004.

[2] K PKihlstrom, L E Moser, P M Melliar-Smith. Solving Consensus in a Byzantine Environment Using an Unreliable Fault Detector [A]. Proceedings of the International Conference on Principles of Distributed Systems (OPODIS) [C]. 1997.

[3] Leslie Lamport, Robert Shostak, Marshall Pease. The byzantine generals problem [J]. ACM Transactions on Programming Language and Systems, 1982, 4 (3): 382-401.