



烃化油品电导率测试设备的研制

刘昊¹, 王军², 郑衍², 卢鉴², 吴越¹, 魏召唤¹, 吴喆^{1*}

(1. 电子科技大学物理学院, 成都 611731; 2. 成都航利装备科技有限公司, 成都 611937)

摘要: 航空煤油在运输过程中可能会带上静电电荷, 由此会引发火灾, 因此需要快速测量出航空煤油电导率来避免意外事故的发生。该文采用恒流源法, 以“分体设计、兼容对接”方式设计了一款可以快速测量油类电导率的便携设备。电导池的探头和机体分离设计可以较高精度的可靠地测量出被测油品的电导率。该文针对 3 号航空煤油进行了一次设备的功能验证实验, 实际测试结果显示, 设备可有效测量出航空煤油的电导率。

关键词: 航空煤油; 烃化油品; 电导率; 恒流源法

中图分类号: TP75

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20230236

Research and Fabrication of a Device for the Conductivity Measurement of Hydro-carbone Oil Products

LIU Hao¹, WANG Jun², ZHENG Kan², LU Jian², WU Yue¹, WEI Zhaohuan¹, WU Zhe^{1*}

(1. School of Physics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;

2. Chengdu Holy Equipment Technology Co., Ltd., Chengdu 611937, China)

Abstract: Aviation fuel may carry electrostatic charges during transportation, which may cause fires. Therefore, it is necessary to quickly measure the conductivity of aviation kerosene to avoid accidents. In this paper, a portable device that can quickly measure the conductivity of oil is produced by using the constant current source method, which adopts the design method of split design and compatible docking. The design of seperading the probe and body can measure the conductivity of tested oil with great accuracy. A set of testing experiments is conducted, and the results show that the device could effectively measure the conductivity of aviation fuel.

Key words: aviation fuel; hydro-carbone oils; conductivity; constant flow source method

在现代航空运输中, 喷气式飞机使用的多是含有多种烃类物质混合的航空煤油。煤油本身具有易燃性, 作为高碳分子物质, 在发生火灾意外后, 火势蔓延快, 火力破坏性大, 伴随着油料物质泄漏, 火情将进一步迅速扩大, 对周围环境带来毁灭性的破坏^[1]。由于航空用煤油在运输过程要经历喷射、流动、晃动、过滤、灌注等过程, 这些过程均可能产生大量静电, 静电带来的瞬间火花放电可达到油料的燃点, 瞬间点燃整个油罐^[2]。因此, 在航空煤油的运输和储存过程中, 往往添加多类除静电物质, 但是从源头遏制危险的发生仍是必要的。航空煤油对运输中使用的储存和运

输用具及方式所产生的物质污染, 以及航空煤油含水量、电导率等安全性指标有着较高要求^[3]。文献 [4] 提到了因为储油罐施工引起的结构异常突起引发静电积累, 从而引起火灾的案例。

航空煤油对静电积累很敏感^[5-6], 这个变化可以通过监测油品的电导率来发现。油品不带电荷情况下, 测得的电导率为静止电导率, 单位为皮西门子每米 (pS/m), 根据国家标准 (GB6950—2001 轻质油品安全静止电导率)^[7], 航空燃料的安全静止电导率为 50~600 pS/m, 汽油、煤油和柴油的静止电导率应低于 50 pS/m。

目前, 在国内外的航空煤油各类安全监测

收稿日期: 2023-04-28; 修回日期: 2023-11-06

基金项目: 四川省科技厅项目 (2020YJ0266); 成都航利装备科技有限公司技术开发项目 (210279); 电子科技大学大学生创新创业项目 (202110614550)。

作者简介: 刘昊 (2000-), 男, 硕士生, 主要从事无线电物理方面的研究。

* 通信作者: 吴喆 (1981-), 女, 博士, 教授, 主要从事无线电物理方面的研究。E-mail: zhewu@uestc.edu.cn

中, 均有一些对应的监测设备^[8]。但经市场调研发现, 国内没有专用于航空行业的相关对应设备。本文从这一应用的需求出发, 拟设计并制作一种用于航空煤油或者各类有相关需求的烃类物质的电导率监测设备。

本文第一部分介绍器件的设计思路, 器件采用分模块兼容设计, 将电导率的测量和控制功能分开设计实现, 在器件模块上, 将作为电导池的探头和作为印刷电路板(pinted circuit board, PCB)容纳的机体分离设计。第二部分介绍样机的设计和开发, 分别从电导池、电路的设计出发讲解了探头的设计形状和原由, 以及电路的模块功能和效能。电导池利用等效电阻模型计算出液体电导率, 外形类似同轴柱体; 采用恒流源法设计计算电路, 可以实时自我电调零, 显示被测油品的电导率。最后给出了样机的外观。第三部分给出了原型机的测试实验, 委托航利公司进行了一组 3 号喷气燃料的电导率测试实验, 由于油品本身的不稳定性, 不存在单一数值的标准电导率值, 因此采取同一油品多次取样, 通过电导率值是否处在规定安全区间内并计算多次取样值的精度是否满足要求来评估仪器性能。最后发现器件可以达到分辨率 1 pS/m, 测试精度均小于等于 3%。

1 设计思路

在电路设计方面, 采用“分体设计、兼容对接”的模块化思路, 如图 1 所示。分体设计意味着器件的电导测量模块和主控模块采取分离式设计, 其中, 电导测量模块由“基准电压电路”“电导池”“弱电流放大器”3 个部分组成。基准电压电路控制器件放出电流信号, 经过电导池和油品发生作用, 弱电流放大器放大通过油品后的电流信号; 主控模块由“模数转换”和“显示驱动”两部分构成, “模数转换”计算出油品的等效电导率, “显示驱动”将计算后得到的油品电导率数值显示到数字液晶显示屏上。兼容对接意味着各个模块间可以合适匹配, 并给各个模块留有一定的后续优化空间。该设计各器件由统一电源供电。电导池作为测量探头容纳一定的待测油品, 它类似于具有同心同轴电极的电容器, 浸入样本流体中, 施加直流电压导致相对较小的直流电流流过电极之间的流体。该过程是快速简单的, 原理基于欧姆定律。由于测试的油品具有可

燃性, 不可能使用过大的电流通过油品, 因此使用微小电流。为保证测量仪器的精度, 采用了精密的弱电流放大电路, 将电流的幅度放大捕捉微小的电流扰动, 期望得到更高的测量精度。

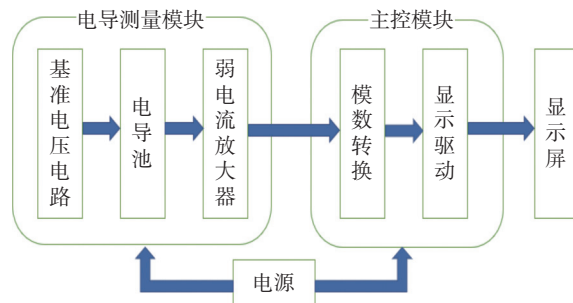


图 1 设计思路图

2 样机的设计开发

2.1 电导池结构

在实验室测试使用设备时, 会将圆筒状的电导池浸入被测油类样品。电导池作为和被测油类样品直接接触的部分, 它的结构形似壁上开孔的同心柱体。如图 2(a)所示, 部分 1 作为和仪器机体连接部分, 可以考虑使用现有的航空探头或其他符合电路接口要求的工业连接端头; 部分 2 为一个电导池, 它的外壁和内导体之间可以施加直流电压, 被测油品作为导电介质参与组成通路, 如此基准电压电路和电导池间就可以产生瞬时微小电流, 将电流经放大器电路放大后就可计算出油品的电导率。注意在探头外壁部分 2 靠近部分 1 的地方存在数个圆形开孔, 孔位可以辅助判断探头没入液体的深度 L , 控制探头没入深度使每次容纳的液体样本的体积一致。实际上, 配合电路设计出合适的孔位高度对于得到准确的测试结果是十分重要的。经过最优化设计, 电导池的内柱体半径 R_1 为 4.0 mm, 外壁内半径 R_2 为 5.5 mm。探头的加工图如图 2(b)所示, 柱体 H_1 为 51.0 mm, 柱体 H_2 为 52.2 mm, 外壁第一孔位到底端 $L_1=30.5$ mm, 第二孔位到底端 $L_2=58.2$ mm。连接件采用通用航空探头, 可以自由组配。其中 L_2 略大于 H_1 , 这是因为我们使用的连接件其内外柱体的底端不在一个平面。二者依然保证了被测液体在一段内外半径不变的电导池内被测量。在等效的电阻计算中, 这个结构使电导率和等效电阻近似相等。第一和第二连接件组合连接了探头和机器主体。探头 H_2 部分的尖端结构为类似双台面底座

的锥子, 其中头部锥尖处和机体的一个端口连接, 传输电流电压信息到数据主板。由于原油是酸性的, 所以绝大多数从原油生产出来的产品都有一定的酸性。制作电导池柱体的材料不能与被测液体发生化学反应, 需具有一定的抗氧化、耐腐蚀、抗击打形变的能力。我们采用不锈钢 304 作为制作材料, 如果可能, 推荐在面向油品的内测壁镀一层金, 可以有效提高抗腐蚀性并提高测试电导率时的准确度。

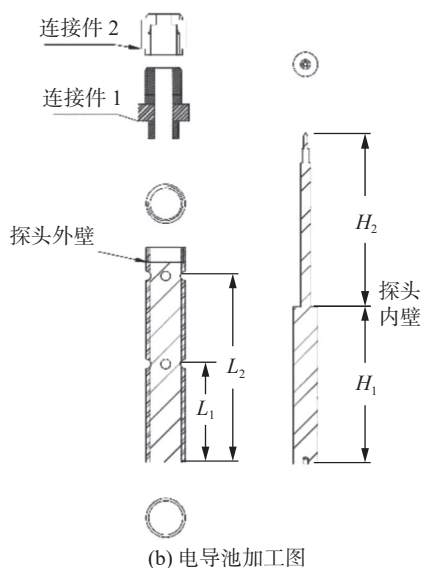
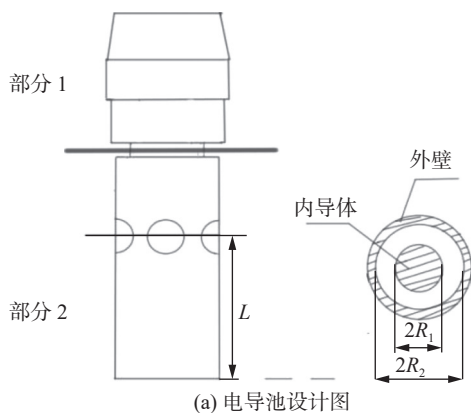


图 2 电导池结构图

2.2 电导率计算原理

在测量油品电导率方面, 通常有以下 3 种方法。

1) 恒流源法

恒流源法的系统简单, 器件成本低, 但是此时电导池的电极通过直流电, 可能引入极化效应。

2) 基于锁相放大原理的液体电阻率测量方法

基于锁相放大法其原理是将信号进行幅度调制得到和激励信号同频率的正弦波和复合噪声信

号的复合信号, 该信号放大后和另一个具有激励信号同频率的参考信号进行相关运算后可以极大抑制噪声成分, 加入锁相放大提高整体电路对噪声的抵抗性, 但是它的设计复杂, 成本高, 不方便和传感器系统集成。

3) 基于双极性脉冲电流技术的液体电阻率测量方法^[9]

双极性脉冲电流技术的输出信号类似方波波形, 它在信号的前半周期和后半周期幅度相同, 极性相反, 因此避免了电流对样品的极化效应。但是这种电路设计不可避免地会引入交流成分信号, 因此为不影响信号精度需在设计时加上良好性能的滤波器模块, 增加了设计难度, 提高了器件成本。

本文采用的是恒流源法, 使用恒定电压对样品通电, 测量电压和电流后, 通过欧姆定律得到样品的等效电阻 R , 由于样品可以视作均匀的同轴圆柱体导体, 可得到样品电阻率 ρ 和等效电阻 R 的关系为^[10]:

$$R = \rho \frac{\ln \frac{R_2}{R_1}}{2\pi L} \quad (1)$$

式中: ρ 取倒数得到电导率 σ 。电路原理图如图 3 所示, 分为模数转换与显示、电路稳压和运算放大 3 个部分。

1) 数模转换与显示

该功能由 ICL7106 芯片完成, 它是一种数模转换芯片, 具有高性能、低功耗的优点, 用来驱动 3.5 字显示屏。显示部分还包括七段解码器、显示驱动器、参考和时钟部分。时钟信号源使用 100 pF 的电容器和 100 k Ω 的电阻组成的 RC 电路, 用以驱动 3.5 字液晶显示屏。显示屏的显示计数为 1000 \times (输入电压/参考电压)。使用最大阻值为 10 k Ω 的电位器和 15 k Ω 的电阻来组成调节数模转换的参考电压的调节分压电路。

2) 电路稳压

该功能由 LT1460 芯片提供, 它是一款微功率电压基准源芯片。该系列芯片用曲率补偿获得低温度系数, 该芯片将提供高达 20 mA 的电流, 具有出色的线路调节特性, 使其成为精密稳压器应用的理想选择, 为电路提供稳定的 10 V 电压。

3) 运算放大

该功能由 AD549 放大器提供, 它是一款具有

极低输入偏置电流的单片静电计运算放大器。输入失调电压和输入失调电压漂移经过激光调整以实现精确性能，用以将电导池两端微小的电流信

号转换成电压信号，它的优良性保证了系统可以得到高精度的被测样品电导率。然后通过 ICL-7106 模块进行模数转换和显示输出。

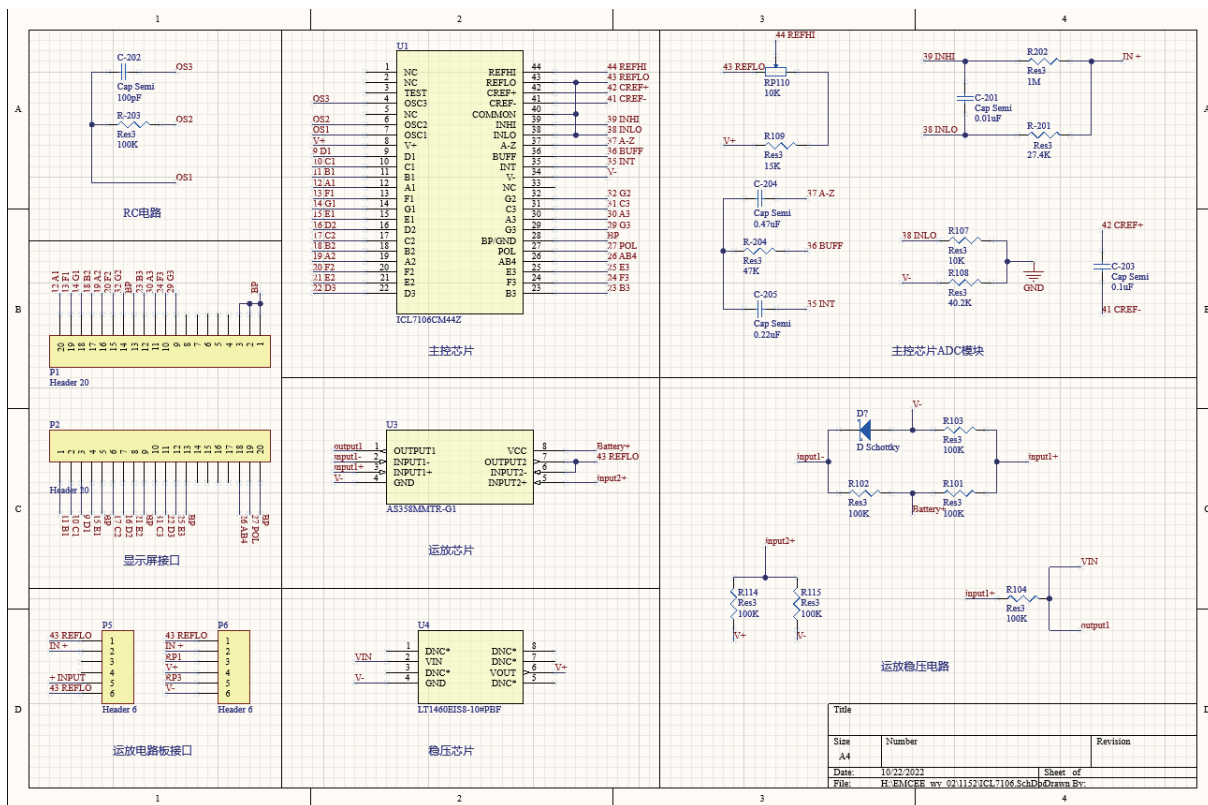


图 3 电路原理图

2.3 样机

样机具有校准和测试两个功能按键，目前我们已通过样机进行了测试。测试前，先完成系统的自动校准。样机开机后，按下按键“M”归零，如图 4(a)所示，显示“000”；按下按键“C”校准，如图 4(b)显示为“400”。

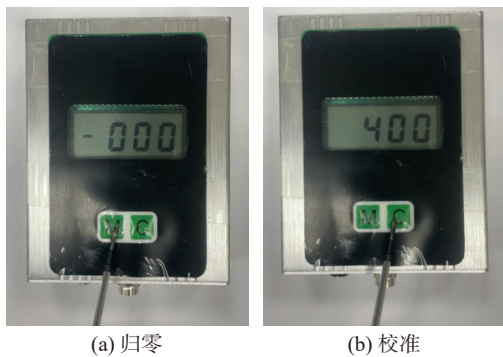


图 4 校准过程

3 原型机的测试

对各种物体的电导率测试方法已经相对成

熟，但是面对液体待测物，还需要考虑液体本身具有的流动性，成分的混杂型导致的多重噪声问题和没有稳定电导率数值的问题。因此，针对航空油品，我们主要考察原型机的可靠性，即短时间内测试同一样品得到的数值是否稳定。如果满足一定的精度，就认为器件设计和探头设计可靠。

依照相关国家标准^[11-13]，委托航利公司进行了一组对 3 号喷气燃料的电导率测试实验。经 n 次测试得到的数值的平均值为：

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \tag{2}$$

精度为：

$$\text{精度} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^2}}{\mu} \tag{3}$$

式中： $X_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$ 为第 i 次测量得到的电导

率值。

依照标准^[14], 3号喷气燃料的电导率范围应在50~600 pS/m。由于每批煤油产品的成分有差别, 电导率在一个区间变化, 因此通过对同批次3号喷气燃料3次取样, 来验证仪器对同批次取样油品测试结果的重复性。测试时, 如图5所示, 将样机探头插入盛有油料样品的金属容器内, 令油料液面浸没探头的第二个孔, 按测试键, 待示数稳定后, 记录3 s内的最大示数。一共进行了3组样品实验, 每次测试6次。样机得到的测试结果如表1所示。第一组油料样品的平均值为467.17 pS/m, 测量精度达到了1.59%; 第二组样品的多次测量的平均值为408.68 pS/m, 测量精度达到了1.82%; 第三组平均值为538.17 pS/m, 测量精度达到了1.06%。综合来看仪器的分辨率达到1 pS/m, 测试精度均小于等于3%。



图5 测试过程

表1 样机测试结果

油样	电导率/(pS·m ⁻¹)						电导率平均值/ (pS·m ⁻¹)	精度/%	结论
	测试1	测试2	测试3	测试4	测试5	测试6			
1	468	469	470	466	461	469	467.17	1.59	≤3%
2	405	406	414	410	407	410	408.68	1.82	
3	535	536	538	538	542	540	538.17	1.06	

4 结束语

电导率测试本身并不复杂, 各种测量手段和方法也比较完善。但是相较于实验室环境, 工业应用场景、民用航空场合更需求快捷简单的测量方法或性价比高的测量仪器。尽管航空交通运输的事故率较低, 但一旦发生问题就可能对人民的财产和生命安全产生巨大威胁。本文试制设备的改进在于可以快速测出航空煤油的电导率, 及时排除隐患。本次设备试制仅加入了基础的油品测试功能, 期待后续该设备可以有更多的功能加载升级。该设备可以在一切需得到油品液体电导率的情景下使用, 它具有广泛的应用前景。

参考文献

[1] 李玉玺, 蒋新生, 肖俊, 等. 航空煤油火灾蔓延特性及抑制机制研究[J]. 当代化工, 2022, 51(4): 959-962.
 [2] 姚国平, 耿晓茹. 航空煤油罐区煤油泄漏事故后果模拟分析[J]. 能源化工, 2021, 42(3): 72-77.
 [3] 王力. 机场航空煤油运输和储存方式探讨[J]. 石化技术, 2018, 25(10): 261.
 [4] 王一斌, 冷明, 陈磊. 航空煤油储罐特点及施工难点[J].

油气储运, 2014, 33(12): 1353-1358.

[5] 王要森, 曲芳, 徐彬, 等. 航空燃油循环加油系统静电特性的试验研究[J]. 山东工业技术, 2019(3): 12.
 [6] 张克渠, 杨晓峰. 3号喷气燃料电导率探讨[J/OL]. 中国储运, 2019(8): 130-132[2023-04-01]. <http://www.chinachuyun.com>.
 [7] 宋广成, 沈建荣, 周富国, 等. GB 6950—2001 轻质油品安全静止电导率[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
 [8] 宋广成. GB/T 6539—1997 航空燃料与馏分燃料电导率标准试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
 [9] 田建来. 液体电阻率测试仪的研发[D]. 天津: 河北工业大学, 2007.
 [10] 胡青霄, 付淑英, 黄新华, 等. 大学物理[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2022: 11.352.
 [11] 王先锋. GB/T 5654—2007 液体绝缘材料相对电容率、介质损耗因数和直流电阻率的测量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
 [12] 王先锋, 曹晓珑. GB/T 21216—2007 测量电导和电容确定介质损耗因数的试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
 [13] 刘全楨, 孙立富, 刘宝全, 等. GB 13348—2009 液体石油产品静电安全规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
 [14] 陶志平, 龚冬梅, 张翠君, 等. 3号喷气燃料(GB 6537—2018)[S]. 北京: 国家市场监督管理总局、中国国家标准化管理委员会, 2018.

编辑 张俊