



中华人民共和国国家计量技术规范

JJF XXXX—202X

航空燃油油量测量仪校准规范

Calibration Specification for Aviation Fuel Quantity Testers

(草案)

202X-XX-XX 发布

202X-XX-XX 实施

国家市场监督管理总局 发布

航空燃油油量测量仪
校准规范
Calibration Specification for Aviation
Fuel Quantity Testers

JJF XXXX—XXXX

归口单位：全国航空专用计量测试技术委员会

主要起草单位：上海飞机制造有限公司
成都飞机工业（集团）有限责任公司
北京飞机维修工程有限公司

参加起草单位：中航西安飞机工业集团股份有限公司
沈阳飞机工业（集团）有限公司
上海市计量测试技术研究院有限公司
中国航发商用航空发动机有限责任公司

本规范委托全国航空专用计量测试技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

王桂君（上海飞机制造有限公司）

匡锐丹（成都飞机工业（集团）有限责任公司）

姜 威（北京飞机维修工程有限公司）

参加起草人：

段更勋（上海飞机制造有限公司）

陈艳红（沈阳飞机工业（集团）有限公司）

蓝 娟（中航西安飞机工业集团股份有限）

冯 建（上海市计量测试技术研究院有限公司）

黄 成（中国航发商用航空发动机有限责任公司）

目 录

引言	(II)
1 范围	(1)
2 概述	(1)
3 计量特性	(2)
4 校准条件	(3)
5 校准项目和校准方法	(4)
5.1 校准项目	(4)
5.2 外观及工作正常性检查	(4)
5.3 校准点的选取原则	(5)
5.4 电容测量	(5)
5.5 电容输出	(6)
5.6 直流电阻测量	(7)
5.7 绝缘电阻测量	(8)
5.8 直流电阻输出	(8)
6 校准结果表达	(9)
7 复校时间间隔	(10)
附录 A 原始记录内页格式	(11)
附录 B 校准证书内页格式	(13)
附录 C 测量结果不确定度评定示例	(15)

引 言

JJF 1071-2010 《国家计量校准规范编写规则》和 JJF 1059.1-2012 《测量不确定度评定与表示》共同构成支撑本规范编制工作的基础性系列规范。

本规范为首次发布。

航空燃油油量测量仪校准规范

1 范围

本规范适用于航空燃油油量测量仪的校准。

2 概述

飞机携带的航空燃油油量是通过在飞机油箱内布置电容式燃油油量传感器测量得到的。航空燃油油量测量仪是一种便携式测试设备,可以通过模拟飞机油箱传感器数据,在飞机不真实加油的情况下,验证飞机油箱测量系统是否正常;还可以测量油箱组和补偿器的电容,测量油箱组和航行器电缆的电阻等。航空燃油油量测量仪一般由供电单元、显示/控制单元、激励源、电容测量模块、电容模拟阵列、电阻测量模块、电阻模拟阵列和接口单元等部分组成,系统硬件框图如图 1 所示。

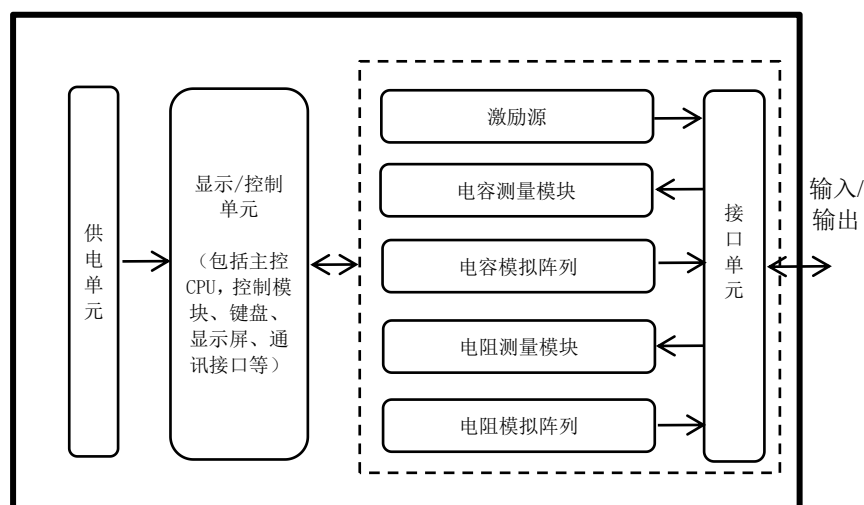


图 1 航空燃油油量测量仪系统硬件框图

供电单元:多数航空燃油油量测量仪内置电池组,部分型号支持外接交流电源供电,用于给测量仪供电。

显示/控制单元:提供显示界面、功能切换、量程切换和数据通讯等。

激励源:提供用于电容测量和电阻测量的激励信号。

电容测量模块:用于电容测量的电路。

电容模拟阵列:一般为十进制电容阵列或固定值的实物电容。

电阻测量模块:用于电阻测量的电路。

电阻模拟阵列：一般为固定值的实物电阻。

接口单元：通过测试电缆与飞机的油箱测量系统接口连接，形成测试回路。

3 计量特性

3.1 示值误差

电容测量、电容输出、电阻测量、绝缘电阻测量和电阻输出的示值误差均用公式(1)表示：

$$\Delta = Y_x - Y_s \quad (1)$$

式中：

Δ ——示值误差；

Y_x ——被校航空燃油油量测试仪输出示值/读数值；

Y_s ——对应输出量/测量量的参考值（标准值）。

3.2 最大允许误差

对于多量程的电容测量、电容输出、直流电阻测量、绝缘电阻测量和直流电阻输出功能，各功能和各量程允许有不同的最大允许误差指标。

电容测量、电容输出、直流电阻测量、绝缘电阻测量和直流电阻输出的最大允许误差一般可以用公式(2)表示。

$$\Delta_{\text{MPE}} = \pm (a\%Y_x + b) \quad (2)$$

式中：

Δ_{MPE} ——最大允许误差；

Y_x ——航空燃油油量测试仪的输出示值或测量示值；

a ——与航空燃油油量测试仪的输出示值或测量示值有关的误差系数；

b ——与量程值有关的误差值。

3.3 电容测量

a) 范围： 1 pF~40 nF；

b) 最大允许误差： $\pm (0.1\% \text{测量示值} + 1 \text{ pF})$ 。

3.4 电容输出

a) 范围： 0.1 pF~12 nF；

b) 最大允许误差： $\pm (0.1\% \text{输出示值} + 0.3 \text{ pF})$ 。

3.5 直流电阻测量

a) 范围： $10 \text{ m}\Omega \sim 1 \text{ M}\Omega$ ；

b) 最大允许误差： $\pm (2\% \text{测量示值} + 0.1 \Omega)$ 。

3.6 绝缘电阻测量

a) 范围： $1 \text{ M}\Omega \sim 100 \text{ G}\Omega$ ；

b) 最大允许误差： $\pm 5\% \text{测量示值}$ 。

3.7 直流电阻输出

a) 范围： $10 \Omega \sim 200 \Omega$ ；

b) 最大允许误差： $\pm 0.1\% \text{测量示值}$ 。

注：以上技术指标不用于合格判定，仅供参考。

4 校准条件

4.1 环境条件

被校航空燃油油量测量仪的校准环境条件应符合表1的规定。

表 1 航空燃油油量测量仪的校准环境条件

电容输出最大允许误差	环境温度	相对湿度
$\pm (0.1\% \sim 0.2\%)$	$(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$	30%~70%
$\pm 0.2\%$ 及以下	$(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$	20%~80%

注：航空燃油油量测试仪如需在现场校准，而现场的环境条件和供电条件不符合上述要求时，则必须经不确定度评定。只有在新的条件下，校准时标准器及配套设备引入的扩展不确定度 U 应不大于被测航空燃油油量测试仪允许误差绝对值的1/3，方可进行现场校准。

4.2 测量标准及其他设备

4.2.1 电容测试仪

电容测试仪一般包括电容电桥或 LCR 测量仪，其测量范围应覆盖被测电容输出值的范围，其对应功能的最大允许误差绝对值（或扩展不确定度（ $k=2$ ））一般不大于被校航空燃油油量测量仪电容输出最大允许误差绝对值的1/3。

4.2.2 标准电容箱

标准电容箱的电容值及频率范围应能覆盖被校航空燃油油量测量仪电容测量值及

频率范围，其对应功能的最大允许误差绝对值（或扩展不确定度（ $k=2$ ））一般不大于被校航空燃油油量测量仪电容测量最大允许误差绝对值的1/3。

4.2.3 标准电阻箱

标准电阻箱的直流电阻值应能覆盖被校航空燃油油量测量仪电阻测量值，其对应功能的最大允许误差绝对值（或扩展不确定度（ $k=2$ ））一般不大于被校航空燃油油量测量仪直流电阻测量最大允许误差绝对值的1/3。

4.2.4 高阻箱

高阻箱的直流电阻值应能覆盖被校航空燃油油量测量仪电阻测量值，其对应功能的最大允许误差绝对值（或扩展不确定度（ $k=2$ ））一般不大于被校航空燃油油量测量仪绝缘电阻测量最大允许误差绝对值的1/3。

4.2.5 数字多用表

数字多用表的直流电阻测量范围应能覆盖被校航空燃油油量测量仪电阻输出值的范围，其对应功能的最大允许误差绝对值（或扩展不确定度（ $k=2$ ））一般不大于被校航空燃油油量测量仪直流电阻输出最大允许误差绝对值的1/3。

5 校准项目和校准方法

5.1 校准项目

航空燃油油量测量仪校准项目见表2。

表 2 校准项目表

序号	校准项目	条款
1	电容测量	5.4
2	电容输出	5.5
3	直流电阻测量	5.6
4	绝缘电阻测量	5.7
5	直流电阻输出	5.8

5.2 外观及工作正常性检查

5.2.1 校准前准备

按照被校航空燃油油量测试仪使用说明书的要求和规定进行预热和预调。

5.2.2 外观检查

5.2.2.1 被校航空燃油油量测量仪外观应完好无损，无影响正常工作的机械损伤，其开关、按键和旋钮应牢固且调节正常，显示屏能正常显示。

5.2.2.2 被校航空燃油油量测量仪通电后，应能自检通过，正常工作。

5.2.2.3 将检查结果记录于附录 A 的表 A.1 中。

5.3 校准点的选取原则

校准点应覆盖所有量程并兼顾各量程之间的覆盖性及量程内的均匀性，同时应参考被校航空燃油油量测量仪按说明书中对校准点的建议，并可根据实际情况或送校单位的要求选取校准点。

5.3.1 电容测量，根据说明书范围，每个量程选取不少于 3 个校准点，应包含量程（接近量程）上下限点、中间点或选取 10 的整数次幂点。

5.3.2 电容输出，每个度盘选取不少于 3 个校准点，应包含量程（接近量程）上下限点、中间点或选取固定值点。

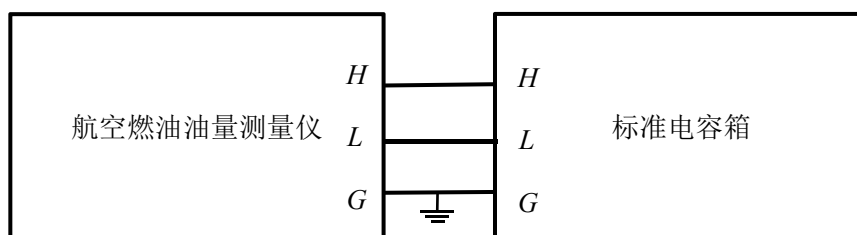
5.3.3 直流电阻测量，根据说明书范围，每个量程选取不少于 3 个校准点，应包含量程（接近量程）上下限点、中间点或选取 10 的整数次幂点。

5.3.4 绝缘电阻测量，根据说明书范围，每个量程选取不少于 3 个校准点，应包含量程（接近量程）上下限点、中间点或选取 10 的整数次幂点。

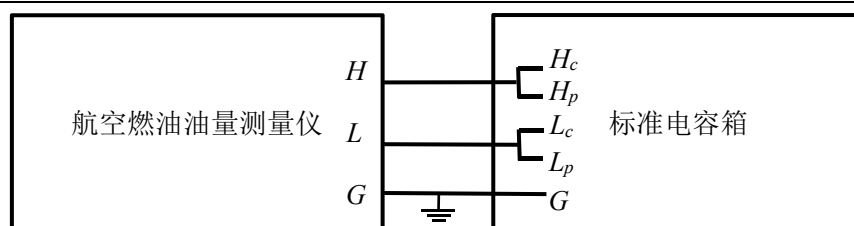
5.3.5 直流电阻输出，每个度盘选取不少于 3 个校准点，应包含量程（接近量程）上下限点、中间点或选取固定值点。

5.4 电容测量

5.4.1 仪器连接如图 2 所示，标准电容箱的屏蔽端要与航空燃油油量测量仪接地端相连。若标准电容箱为两端口输出方式时，用两根同轴电缆分别将标准电容箱与航空燃油油量测量仪高端、低端相连，如图 2(a) 所示。若标准电容箱为四端口输出方式时，先将标准电容箱高端和低端分别接三通，转换为一个高端和一个低端，用两根同轴电缆分别将标准电容箱与航空燃油油量测量仪高端、低端相连，如图 2(b) 所示。



(a) 标准电容箱为两端口输出方式接线



(b) 标准电容箱为四端口输出方式接线

图 2 电容测量校准连接图

5.4.2 被校航空燃油油量测量仪选择电容测量模式, 推荐校准频率为 1kHz。

5.4.3 按校准点调节标准电容箱的电容值 C_0 , 再读取被校航空燃油油量测量仪上的显示值 C , 按公式 (3) 计算电容测量示值误差 ΔC , 并将测量结果记录于附录 A 的表 A.2 中。

$$\Delta C = C - C_0 \quad (3)$$

式中:

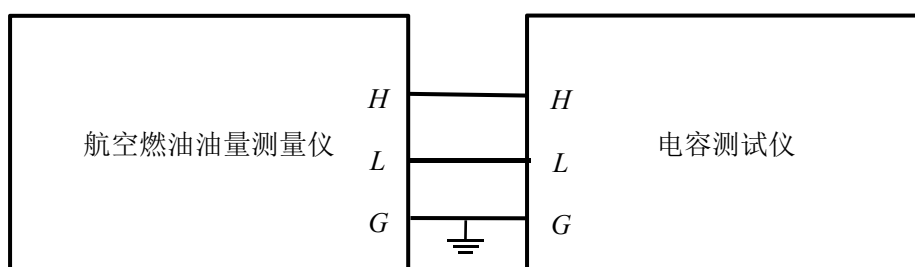
ΔC —电容测量示值误差, F;

C —航空燃油油量测量仪的电容显示值, F;

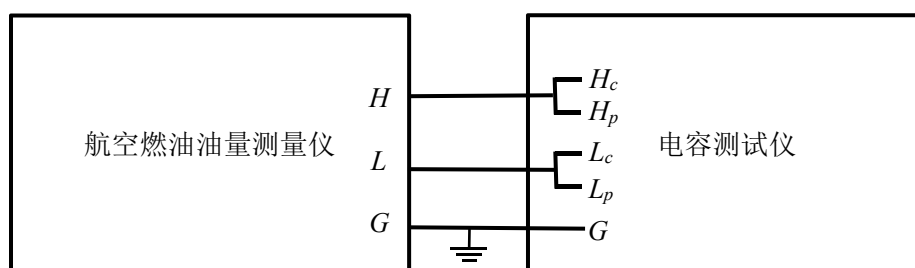
C_0 —标准电容箱的电容标准值, F。

5.5 电容输出

5.5.1 仪器连接如图 3 所示, 电容测试仪的屏蔽端要与航空燃油油量测量仪接地端相连。若电容测试仪为两端口测量方式时, 用两根同轴电缆分别将电容测试仪与航空燃油油量测量仪高端、低端相连, 如图 3(a) 所示。若电容测试仪为四端口测量方式时, 先将电容测试仪高端和低端分别接三通, 转换为一个高端和一个低端, 用两根同轴电缆分别将电容测试仪与航空燃油油量测量仪高端、低端相连, 如图 3(b) 所示。



(a) 电容测试仪为两端口测量方式接线



(b) 电容测试仪为四端口测量方式接线

图 3 电容输出校准连接图

5.5.2 被校航空燃油油量测量仪选择电容模拟模式, 推荐校准频率为 1 kHz。

5.5.3 按校准点调节被校航空燃油油量测量仪的模拟电容输出值 C , 再读取电容测试仪上的实测值 C_0 , 按公式(4)计算电容输出示值误差 ΔC , 并将测量结果记录于附录 A 的表 A.3 中。

$$\Delta C = C - C_0 \quad (4)$$

式中:

ΔC —电容输出示值误差, F;

C —航空燃油油量测量仪电容输出值, F;

C_0 —电容测试仪实测值, F。

5.6 直流电阻测量

5.6.1 仪器连接如图 4 所示, 用导线分别将被校航空燃油油量测量仪的测量端与标准电阻箱的高端和低端相连。

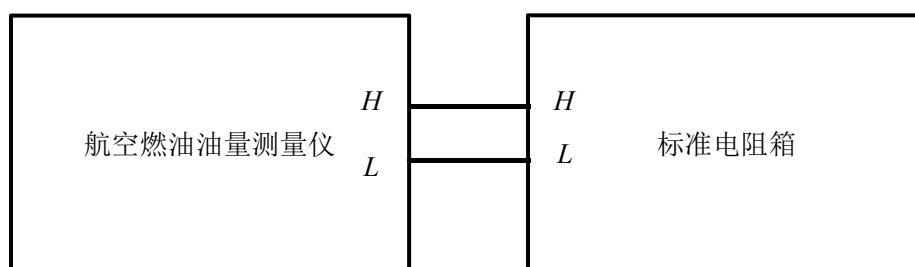


图 4 电阻测量校准连接图

5.6.2 被校航空燃油油量测量仪选择电阻测量模式。

5.6.3 按校准点调节标准电阻箱的电阻值 R_0 , 再读取被校航空燃油油量测量仪上的显示值 R , 按公式(5)计算直流电阻测量示值误差 ΔR , 并将测量结果记录于附录 A 的表 A.4 中。

$$\Delta R = R - R_0 \quad (5)$$

式中：

ΔR —直流电阻测量示值误差， Ω ；

R —航空燃油油量测量仪的电阻显示值， Ω ；

R_0 —标准电阻箱的电阻标准值， Ω 。

5.7 绝缘电阻测量

5.7.1 仪器连接如图 5 所示，用导线分别将被校航空燃油油量测量仪的测量端与高阻箱的高端和低端相连。

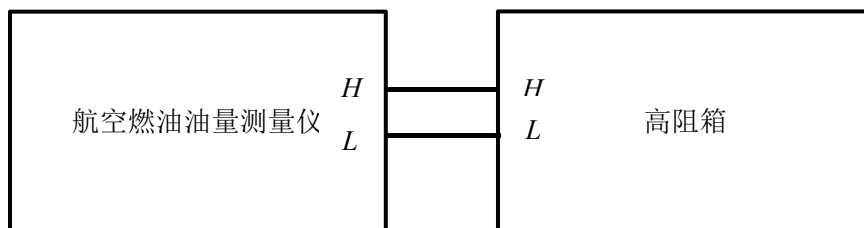


图 5 绝缘电阻测量校准连接图

5.7.2 被校航空燃油油量测量仪选择电阻测量模式。

5.7.3 按校准点调节高阻箱的电阻值 R_0 ，再读取被校航空燃油油量测量仪上的显示值 R ，按公式（6）计算绝缘电阻测量误差 ΔR ，并将测量结果记录于附录 A 的表 A.5 中。

$$\Delta R = R - R_0 \quad (6)$$

式中：

ΔR —绝缘电阻测量示值误差， Ω ；

R —航空燃油油量测量仪的绝缘电阻显示值， Ω ；

R_0 —高阻箱的电阻标准值， Ω 。

5.8 直流电阻输出

5.8.1 仪器连接如图 6 所示，用两根导线分别将被校航空燃油油量测量仪的电阻输出端与数字多用表的高端和低端相连。

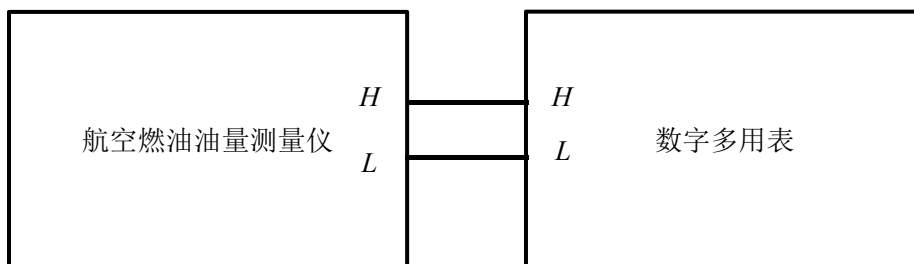


图 6 直流电阻输出校准连接图

5.8.2 被校航空燃油油量测量仪选择电阻输出模式。

5.8.3 按校准点调节被校航空燃油油量测量仪的电阻输出值 R ，读取数字多用表上的实测值 R_0 ，按公式（7）计算直流电阻输出示值误差 ΔR ，并将测量结果记录于附录 A 的表 A.6 中。

$$\Delta R = R - R_0 \quad (7)$$

式中：

ΔR —直流电阻输出示值误差， Ω ；

R —航空燃油油量测量仪电阻输出值， Ω ；

R_0 —数字多用表的电阻实测值， Ω 。

6 校准结果表达

校准结果应在校准证书上反映，校准证书应至少包含以下信息：

- a) 标题：“校准证书”；
- b) 实验室名称和地址；
- c) 进行校准的地点（如果与实验室的地址不同）；
- d) 证书或报告的唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；
- e) 客户的名称和地址；
- f) 被校对象的描述和明确标识；
- g) 进行校准的日期，如果与校准结果的有效性和应用有关时，应说明被校对象的接收日期；
- h) 如果与校准结果的有效性和应用有关时，应对被校样品的抽样程序进行说明；
- i) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- j) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
- k) 校准环境的描述；
- l) 校准结果及其测量不确定度的说明；
- m) 对校准规范的偏离的说明；
- n) 校准证书签发人的签名、职务或等效标识；
- o) 校准结果仅对被校对象有效的说明；

p) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书的声明。

7 复校时间间隔

建议复校时间间隔为 1 年。校准时间间隔的长短是由使用情况、使用者、仪器本身质量等诸多因素决定的，因此，送校单位可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔。

附录 A

原始记录内页格式

A.1 外观及工作正常性检查

表 A.1 外观及工作正常性检查

外观及工作正常性检查	
检查结果	

A.2 电容测量（频率 1 kHz）

表 A.2 电容测量

量程	标准值	被测设备显示值	示值误差	扩展不确定度 U ($k=2$)
...	...			
	...			
	...			
...	...			
	...			
	...			

A.3 电容输出（频率 1 kHz）

表 A.3 电容输出

度盘	被测设备输出值	实测值	示值误差	扩展不确定度 U ($k=2$)
...	...			
	...			
	...			
...	...			
	...			
	...			

A.4 直流电阻测量

表 A.4 直流电阻测量

量程	标准值	被测设备显示值	示值误差	扩展不确定度 U ($k=2$)
...	...			
	...			
	...			

...	...			
	...			
	...			

A.5 绝缘电阻测量

表 A.5 绝缘电阻测量

量程	标准值	被测设备显示值	示值误差	扩展不确定度 U ($k=2$)
...	...			
	...			
	...			
...	...			
	...			
	...			

A.6 直流电阻输出

表 A.6 直流电阻输出

度盘	被测设备输出值	实测值	示值误差	扩展不确定度 U ($k=2$)
...	...			
	...			
	...			
...	...			
	...			
	...			

附录 B

校准证书内页格式

B.1 外观及工作正常性检查

表 B.1 外观及工作正常性检查

外观及工作正常性检查	
检查结果	

B.2 电容测量（频率 1 kHz）

表 B.2 电容测量

量程	标准值	被测设备显示值	示值误差	扩展不确定度 U ($k=2$)
...	...			
	...			
	...			
...	...			
	...			
	...			

B.3 电容输出（频率 1 kHz）

表 B.3 电容输出

度盘	被测设备输出值	实测值	示值误差	扩展不确定度 U ($k=2$)
...	...			
	...			
	...			
...	...			
	...			
	...			

B.4 直流电阻测量

表 B.4 直流电阻测量

量程	标准值	被测设备显示值	示值误差	扩展不确定度 U ($k=2$)
...	...			
	...			
	...			

...	...			
	...			
	...			

B.5 绝缘电阻测量

表 B.5 绝缘电阻测量

量程	标准值	被测设备显示值	示值误差	扩展不确定度 U ($k=2$)
...	...			
	...			
	...			
...	...			
	...			
	...			

B.6 直流电阻输出

表 B.6 直流电阻输出

度盘	被测设备输出值	实测值	示值误差	扩展不确定度 U ($k=2$)
...	...			
	...			
	...			
...	...			
	...			
	...			

附录 C

测量结果不确定度评定示例

C.1 电容测量校准测量不确定度评定

C.1.1 测量方法

使用航空燃油油量测量仪 PSD60-2R 测量标准电容箱输出的 1000 pF 标准电容值为例进行不确定度评定。

C.1.2 测量模型及不确定度传播公式

C.1.2.1 测量模型

以绝对误差形式表示的电容测量示值误差 ΔC 见公式 (C.1)

$$\Delta C = C - C_0 \quad (\text{C.1})$$

式中：

ΔC —电容测量示值误差；

C —航空燃油油量测量仪电容显示值；

C_0 —电容标准值。

C.1.2.2 不确定度传播公式

由于 C 、 C_0 间的不确定度之间不相关, 依照公式 (C.2)

$$u_c^2(y) = \sum \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right] u^2(x_i) \quad (\text{C.2})$$

得到

$$u_c^2(\Delta C) = c_1^2 u^2(C) + c_2^2 u^2(C_0) \quad (\text{C.3})$$

C.1.2.3 灵敏系数

$$c_1 = \frac{\partial \Delta C}{\partial C}, \quad c_2 = \frac{\partial \Delta C}{\partial C_0} \quad (\text{C.4})$$

C.1.3 不确定度来源

测量不确定度主要来源包括：

- (1) 重复性引入的不确定度分量 u_1 ；
- (2) 由标准电容值最大允许误差引入的不确定度分量 u_2 ；
- (3) 由标准电容温度漂移引入的不确定度分量 u_3 ；
- (4) 由航空燃油油量测量仪读数分辨力引入的不确定度分量 u_4 。

C.1.4 标准不确定度评定

C.1.4.1 重复性引入的不确定度分量 u_1

测量 1000 pF 标准电容值，重复测量 10 次，则测量值分散性引入的不确定度按照 A 类不确定度计算，得到的测量结果如表 C.1 所示。

表 C.1 电容测量重复性测量结果

次数 n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值 x_i/pF	1000.1	1000.1	1000.2	1000.1	1000.1	1000.1	1000.2	1000.1	1000.1	1000.1

重复性引入的相对不确定度为

$$s_n(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (x_i - \bar{x})^2} = 0.04 \text{ pF}$$

$$u_1 = s_n(x) = 0.04 \text{ pF}$$

C.1.4.2 标准电容值最大允许误差引入的不确定度分量 u_2

对于 1000 pF 的标准电容，其最大允许误差为 $\pm 0.05\%$ ，即 0.50 pF，视其为均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则标准电容值最大允许误差引入的相对不确定度分量 u_2 ：

$$u_2 = \frac{0.50 \text{ pF}}{\sqrt{3}} = 0.29 \text{ pF}$$

C.1.4.3 标准电容温度漂移引入的不确定度分量 u_3

对于 1000 pF 的标准电容，其校准温度 20℃，温度系数 $2 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ ，视其为均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，以校准环境条件 15℃为例，则由标准电容温度漂移引入的不确定度分量 u_3 ：

$$u_3 = \frac{1000 \text{ pF} \times 2 \times 10^{-5}/^\circ\text{C} \times (20 - 15)^\circ\text{C}}{\sqrt{3}} = 0.06 \text{ pF}$$

C.1.4.4 航空燃油油量测量仪读数分辨力引入的不确定度分量 u_4

对于航空燃油油量测量仪 PSD60-2R，其测量分辨力为 0.1 pF，视其为均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则航空燃油油量测量仪读数分辨力引入的相对不确定度分量 u_4 ：

$$u_4 = \frac{0.1 \text{ pF}}{2 \times \sqrt{3}} = 0.03 \text{ pF}$$

C.1.4.5 标准不确定度分量表

标准不确定度分量表如表 C.2 所示。

表 C.2 电容测量不确定度分量表

不确定度来源	不确定度分量	评定方法	分布	k 值	标准不确定度
测量重复性	u_1	A 类	正态	/	0.04 pF
标准电容值最大允许误差	u_2	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	0.29 pF
标准电容温度漂移	u_3	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	0.06 pF
航空燃油油量测量仪读数分辨力	u_4	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	0.03 pF

C.1.5 合成标准不确定度

考虑到被测航空燃油油量测量仪电容测量的重复性和分辨力存在重复, 在计算合成标准不确定度时将二者中较小值舍去, 其他各不确定度分量互不相关, 则:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 0.30 \text{ pF}$$

C.1.6 扩展不确定度

取包含因子 $k = 2$, 扩展不确定度为:

$$U = ku_c = 0.6 \text{ pF}$$

C.2 电容输出校准测量不确定度评定

C.2.1 测量方法

使用航空燃油油量测量仪 PSD60-2R 输出 100 pF 电容值, 使用电容电桥测量为例进行不确定度评定。

C.2.2 测量模型及不确定度传播公式

C.2.2.1 测量模型

以绝对误差形式表示的电容输出示值误差 ΔC 见公式 (C.5)

$$\Delta C = C - C_0 \quad (\text{C.5})$$

式中:

ΔC —电容输出误差;

C —航空燃油油量测量仪电容显示值;

C_0 —电容测试仪测量值。

C.2.2.2 不确定度传播公式

由于 C 、 C_0 间的不确定度之间不相关, 依照公式 (C.6)

$$u_c^2(y) = \sum \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right] u^2(x_i) \quad (\text{C.6})$$

得到

$$u_c^2(\Delta C) = c_1^2 u^2(C) + c_2^2 u^2(C_0) \quad (\text{C.7})$$

C.2.2.3 灵敏系数

$$c_1 = \frac{\partial \Delta C}{\partial C}, \quad c_2 = \frac{\partial \Delta C}{\partial C_0} \quad (\text{C.8})$$

C.2.3 不确定度来源

测量不确定度主要来源包括：

- (1) 重复性引入的不确定度分量 u_1 ；
- (2) 由电容电桥最大允许误差引入的不确定度分量 u_2 ；
- (3) 由电容电桥温度漂移引入的不确定度分量 u_3 ；
- (4) 由航空燃油油量测量仪读数分辨力引入的不确定度分量 u_4 。

C.2.4 标准不确定度评定

C.2.4.1 重复性引入的不确定度分量 u_1

测量航空燃油油量测量仪输出的 100 pF 电容值，重复测量 10 次，则测量值分散性引入的不确定度按照 A 类不确定度计算，得到的测量结果如表 C.3 所示。

表 C.3 电容模拟重复性测量结果

次数 n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值 x_i/pF	100.115	100.115	100.114	100.114	100.115	100.114	100.114	100.115	100.115	100.115

重复性引入的相对不确定度为

$$s_n(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (x_i - \bar{x})^2} = 0.0005 \text{ pF}$$

$$u_1 = s_n(x) = 0.0005 \text{ pF}$$

C.2.4.2 电容电桥最大允许误差引入的不确定度分量 u_2

对于电容电桥，其测量 100 pF 电容值最大允许误差为 $\pm 0.01\%$ ，即 0.01 pF，视其为均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则电容电桥最大允许误差引入的相对不确定度分量 u_2 ：

$$u_2 = \frac{0.01 \text{ pF}}{\sqrt{3}} = 0.0058 \text{ pF}$$

C.2.4.3 电容电桥温度漂移引入的不确定度分量 u_3

对于电容电桥，其校准温度 $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$ ，其测量 100 pF 电容值时温度系数 $(2 \times 10^{-6} \sim 4 \times 10^{-6})/^\circ\text{C}$ ，视其为均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，以校准环境条件 15°C 为例，则由标准电容温度漂移引入的不确定度分量 u_3 ：

$$u_3 = \frac{100 \text{ pF} \times 4 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \times (22 - 15)^\circ\text{C}}{\sqrt{3}} = 0.0016 \text{ pF}$$

C.2.4.4 航空燃油油量测量仪读数分辨力引入的不确定度分量 u_4

对于航空燃油油量测量仪 PSD60-2R，在模拟 100 pF 电容时读数的分辨力为 0.01 pF，视其为均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则航空燃油油量测量仪读数分辨力引入的相对不确定度分量 u_4 ：

$$u_4 = \frac{0.01 \text{ pF}}{2 \times \sqrt{3}} = 0.0029 \text{ pF}$$

C.2.4.5 标准不确定度分量表

标准不确定度分量表如表 C.4 所示。

表 C.4 电容模拟不确定度分量表

不确定度来源	不确定度分量	评定方法	分布	k 值	标准不确定度
测量重复性	u_1	A 类	正态	/	0.0006 pF
电容电桥最大允许误差	u_2	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	0.0058 pF
电容电桥温度漂移	u_3	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	0.0016 pF
航空燃油油量测量仪读数分辨力	u_4	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	0.0029 pF

C.2.5 合成标准不确定度

考虑到被测航空燃油油量测量仪电容输出的重复性和分辨力存在重复，在计算合成标准不确定度时将二者中较小值舍去，其他各不确定度分量互不相关，则：

$$u_c = \sqrt{u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} = 0.0067 \text{ pF}$$

C.2.6 扩展不确定度

取包含因子 $k = 2$ ，扩展不确定度为：

$$U = ku_c = 0.014 \text{ pF}$$

C.3 直流电阻测量校准测量不确定度评定

C.3.1 测量方法

使用航空燃油油量测量仪 PSD60-2R 测量标准电阻箱输出的 100 k Ω 标准电阻值为例进行不确定度评定。

C.3.2 测量模型及不确定度传播公式

C.3.2.1 测量模型

以绝对误差形式表示的直流电阻测量示值误差 ΔR 见公式 (C.9)

$$\Delta R = R - R_0 \quad (\text{C.9})$$

式中：

ΔR —直流电阻测量示值误差；

R —航空燃油油量测量仪电阻测量值；

R_0 —电阻标准值。

C.3.2.2 不确定度传播公式

由于 R 、 R_0 间的不确定度之间不相关,依照公式 (C.10)

$$u_c^2(y) = \sum \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) \quad (\text{C.10})$$

得到

$$u_c^2(\Delta R) = c_1^2 u^2(R) + c_2^2 u^2(R_0) \quad (\text{C.11})$$

C.3.2.3 灵敏系数

$$c_1 = \frac{\partial \Delta R}{\partial R}, \quad c_2 = \frac{\partial \Delta R}{\partial R_0} \quad (\text{C.12})$$

C.3.3 不确定度来源

测量不确定度主要来源包括：

- (1) 重复性引入的不确定度分量 u_1 ；
- (2) 由标准电阻值最大允许误差引入的不确定度分量 u_2 ；
- (3) 由航空燃油油量测量仪读数分辨力引入的不确定度分量 u_3 。

C.3.4 标准不确定度评定

C.3.4.1 重复性引入的不确定度分量 u_1

测量 100 k Ω 标准电阻值,重复测量 10 次,则测量值分散性引入的不确定度按照 A 类不确定度计算,得到的测量结果如表 C.5 所示。

表 C.5 直流电阻测量重复性测量结果

次数 n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值 $x_i/k\Omega$	99.90	99.90	99.90	99.80	99.90	99.90	99.80	99.90	99.90	99.90

重复性引入的相对不确定度为

$$s_n(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (x_i - \bar{x})^2} = 0.04 \text{ k}\Omega$$

$$u_1 = s_n(x) = 0.04 \text{ k}\Omega$$

C.3.4.2 标准电阻值最大允许误差引入的不确定度分量 u_2

对于 $100 \text{ k}\Omega$ 的标准电阻，其最大允许误差为 $\pm 0.2\%$ ，即 $0.20 \text{ k}\Omega$ ，视其为均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则标准电阻值最大允许误差引入的相对不确定度分量 u_2 ：

$$u_2 = \frac{0.20 \text{ k}\Omega}{\sqrt{3}} = 0.12 \text{ k}\Omega$$

C.3.4.3 航空燃油油量测量仪读数分辨力引入的不确定度分量 u_3

对于航空燃油油量测量仪 PSD60-2R，其测量分辨力为 $0.01 \text{ k}\Omega$ ，视其为均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则航空燃油油量测量仪读数分辨力引入的相对不确定度分量 u_3 ：

$$u_3 = \frac{0.01 \text{ k}\Omega}{2 \times \sqrt{3}} = 0.0029 \text{ k}\Omega$$

C.3.4.4 标准不确定度分量表

标准不确定度分量表如表 C.6 所示。

表 C.6 直流电阻测量不确定度分量表

不确定度来源	不确定度分量	评定方法	分布	k 值	标准不确定度
测量重复性	u_1	A 类	正态	/	$0.04 \text{ k}\Omega$
标准电阻	u_2	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	$0.12 \text{ k}\Omega$
航空燃油油量测量仪读数分辨力	u_3	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	$0.0029 \text{ k}\Omega$

C.3.5 合成标准不确定度

考虑到被测航空燃油油量测量仪电阻测量的重复性和分辨力存在重复，在计算合成标准不确定度时将二者中较小值舍去，其他各不确定度分量互不相关，则：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 0.13 \text{ k}\Omega$$

C.3.6 扩展不确定度

取包含因子 $k = 2$ ，扩展不确定度为：

$$U = ku_c = 0.26 \text{ k}\Omega$$
