



中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 1692—2018

涡流电导率仪校准规范

Calibration Specification for Eddy Current Conductivity Meters

2018-02-27 发布

2018-05-27 实施

国家质量监督检验检疫总局 发布



涡流电导率仪校准规范

Calibration Specification for Eddy

Current Conductivity Meters

JJF 1692—2018

归口单位：全国电磁计量技术委员会

主要起草单位：中国计量科学研究院

辽宁省计量科学研究院

镇江市计量检定测试中心

参加起草单位：北京东方计量测试研究所

本规范主要起草人：

郑联英（中国计量科学研究院）

梁国鼎（辽宁省计量科学研究院）

曹剑秋（镇江市计量检定测试中心）

参加起草人：

金海彬（北京东方计量测试研究所）

赵雅婷（中国计量科学研究院）

陈 薇（中国计量科学研究院）

目 录

| | |
|--------------------------------|-----|
| 引言 | (Ⅲ) |
| 1 范围 | (1) |
| 2 引用文件 | (1) |
| 3 术语和计量单位 | (1) |
| 3.1 国际退火铜标准 | (1) |
| 3.2 涡流 | (1) |
| 3.3 标准渗透深度 | (1) |
| 3.4 提高效应 | (1) |
| 3.5 边缘效应 | (1) |
| 4 概述 | (2) |
| 5 计量特性 | (2) |
| 5.1 电导率仪误差限 | (2) |
| 6 校准条件 | (2) |
| 6.1 环境条件 | (2) |
| 6.2 测量标准及其他设备 | (2) |
| 7 校准项目和校准方法 | (2) |
| 7.1 校准项目 | (2) |
| 7.2 校准方法 | (3) |
| 8 校准结果表达 | (4) |
| 8.1 校准证书 | (4) |
| 9 复校时间间隔 | (4) |
| 附录 A 涡流电导率校准结果测量不确定度评定示例 | (5) |
| 附录 B 校准原始记录格式 | (8) |
| 附录 C 校准证书内页格式 | (9) |

引 言

本规范依据国家计量技术规范 JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》编制。

本规范为首次发布。



涡流电导率仪校准规范

1 范围

本规范适用于量程为 0.58 MS/m~58 MS/m (1% IACS~100% IACS) 的测量非铁磁金属电导率的涡流电导率仪校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

GB/T 12966—2008 铝合金电导率涡流测试方法

ASTM E1004-09 涡流法测定材料电导率 [Standard Test Method for Determining Electrical Conductivity Using the Electromagnetic (Eddy-Current) Method]

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

3 术语和计量单位

3.1 国际退火铜标准 International Annealed Copper Standard (IACS)

在温度为 20 ℃时，当均匀横截面为 1 mm²，长度为 1 m 的铜线具有的电阻为 (1/58) Ω 时，规定它是 100% 的国际退火铜标准（即 100% IACS——100 Percent International Annealed Copper Standard），与国际单位制的换算公式如式 (1)：

$$100\% \text{IACS} = 58 \text{ MS/m} \quad (1)$$

3.2 涡流 eddy current

由于外磁场在时间或空间上的变化而在导体表面及近表面产生的感应电流。

3.3 标准渗透深度 standard depth of penetration

在涡流检测中，涡流密度降至样块表面层涡流密度的 1/e (e 为自然常数，数值约为 2.718 28) 时的深度 δ 称为标准渗透深度，可用式 (2) 计算

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \mu_r \pi f \sigma}} \quad (2)$$

式中：

δ —— 标准渗透深度，m；

σ —— 样块（标准块与仪器自校标准块）电导率，S/m；

f —— 测试（探头激励源）频率，Hz；

μ₀ —— 真空磁导率 (μ₀ = 4π × 10⁻⁷)，H/m；

μ_r —— 相对磁导率，对于非铁磁金属材料 μ_r 近似为 1（实际按 1 计算），无量纲。

3.4 提离效应 lift-off effect

涡流检测线圈与被检试件之间的距离改变时，其阻抗矢量产生变化的效应。

3.5 边缘效应 edge effect

在涡流检测中，由于试件几何形状的突变而产生的磁场和涡流的变化。

4 概述

涡流电导率仪是用于测量非铁磁金属电导率的仪器，采用电磁感应原理。绕制电感线圈探头，接触并施加交变磁场作用于被测金属表面，使其产生感应涡流，该涡流所产生的磁场又反作用于探头线圈，使线圈阻抗改变，通过确定阻抗变化量来测定被测金属电导率。

涡流电导率仪测试频率一般在 50 kHz~500 kHz，常用频率为 60 kHz。

5 计量特性

5.1 电导率仪误差限

电导率仪误差限见表 1。

表 1 电导率仪误差限

| 测量范围 | 误差限 |
|---------------------|------------------------|
| 20.3 MS/m~58 MS/m | ± (0.4 MS/m~1.0 MS/m) |
| 0.58 MS/m~20.3 MS/m | ± (0.02 MS/m~0.4 MS/m) |

以上指标不是用于合格性判别，仅供参考。

6 校准条件

6.1 环境条件

- a) 环境温度：20℃±2℃；
- b) 相对湿度：≤80%；
- c) 周围无影响仪器正常工作的电磁干扰和机械振动。

6.2 测量标准及其他设备

6.2.1 标准块（组）

标准块（组）由两块及以上非铁磁金属样块组成，其电导率范围应均匀覆盖被校电导率仪的测量范围，测量不确定度应小于被校电导率仪最大允许误差绝对值的 1/3。

标准块表面应保持清洁，不得有油脂、灰尘等附着物。标准块有效面积的几何尺寸应大于等于 2.5 倍探头直径，厚度大于等于 2.6 倍渗透深度，标准块表面应无镀层、无划痕、无凹槽。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

校准项目见表 2。

表 2 涡流电导率仪校准项目表

| 序号 | 项目 |
|----|---------|
| 1 | 外观及通电 |
| 2 | 电导率示值误差 |

7.2 校准方法

7.2.1 外观及通电检查

7.2.1.1 外观检查

仪器外观完好，无机械损伤，调节旋钮或按键无松动现象；面板标识清晰，应标记制造厂、仪器编号、出厂年月等；配套附件（如外附标准块、测量探头及电源等）齐全；仪器应附有使用说明书——标明仪器准确度、测量范围、自校方法及使用条件等。

7.2.1.2 通电检查

仪器通电后开关、按键、调节旋钮、显示屏、测量仪表和各种状态指示灯（标志）应工作正常。

7.2.2 电导率示值误差

7.2.2.1 校准前准备

标准块、被校电导率仪探头应置于同一恒温环境中至少 30 min。

7.2.2.2 自校准

参照涡流电导率仪说明书中自校要求设定仪器自校程序，探头垂直按压于自校标准块表面中心位置，使得标准块按压范围内受力均匀且不变形，保证探头与标准块表面贴合，执行校准程序。如仪器自带多个自校标准块，按以上步骤重复自校程序，完成仪器的自校准，并保存自校结果。

7.2.2.3 电导率示值误差

被校电导率仪完成自校准后，应迅速开始电导率仪示值误差校准。一般选择测量频率为 60 kHz，校准点不少于 3 个且覆盖电导率仪的测量范围。校准时将探头垂直适度按压于标准块表面中心位置，使探头与标准块表面均匀贴合，待被校涡流电导率仪示值稳定，读取仪器显示值并进行记录，以此方法不间断进行其他校准点测量得到一组校准值。

重复 7.2.2.2 自校仪器后，再次进行上述校准点校准，共重复 10 次，得到每个校准点的平均值，计算仪器示值误差。

示值误差按式 (3) 计算：

$$\Delta\sigma = \overline{\sigma_x} - \sigma_0 \quad (3)$$

式中：

$\Delta\sigma$ ——被校涡流电导率仪示值误差，MS/m；

$\overline{\sigma_x}$ ——被校涡流电导率仪校准平均值，MS/m；

σ_0 ——电导率标准块的校准值，MS/m。

8 校准结果表达

8.1 校准证书

校准结果应在校准证书（报告）上反映，校准证书（报告）应至少包括以下信息：

- a) 标题，如“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) 对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) 校准证书和校准报告签发人的签名、职务或等效标识；
 - o) 校准结果仅对被校对象有效的声明；
 - p) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书或报告的声明。
- 校准原始记录格式见附录 B，校准证书（报告）内页格式见附录 C、附录 D。

9 复校时间间隔

建议复校的时间间隔为 1 年。由于复校时间间隔的长短由仪器使用情况、使用者、仪器本身质量等诸因素所决定的，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

涡流电导率校准结果测量不确定度评定示例

A.1 概述

涡流电导率仪通过比较方法校准。电导率仪预热后开启仪器自校程序，自校完成后将探头与标准块表面均匀贴合，记录此时电导率仪上显示的数值，得到标准块的电导率值，重复多次测量步骤取其平均值并以此与标准块的标准值进行比较。

A.2 测量依据

测量依据本规范 7.2.2.3。

A.3 计量标准器

电导率标准块，范围为 0.58 MS/m~58 MS/m，最大允许误差为±0.05%。

A.4 测量模型

涡流电导率仪的示值误差校准方法见 7.2，其示值误差校准的测量模型可用式 (A.1) 表示：

$$\Delta\sigma = \overline{\sigma_x} - \sigma_0 \quad (\text{A.1})$$

式中：

$\Delta\sigma$ ——被校涡流电导率仪示值误差，MS/m；

$\overline{\sigma_x}$ ——被校涡流电导率仪校准平均值，MS/m；

σ_0 ——电导率标准样块的校准值，MS/m。

各不确定度分量不相关，不确定度传播可用式 (A.2) 表示：

$$u_c(\Delta\sigma) = \sqrt{c_1^2 u^2(\sigma_x) + c_2^2 u^2(\sigma_0)} = \sqrt{u^2(\sigma_x) + u^2(\sigma_0)} \quad (\text{A.2})$$

式中， $c_1=1$ ， $c_2=-1$ 。

A.5 不确定度来源

A.5.1 $u(\sigma_0)$ 的来源

电导率标准样块引入的标准不确定度 $u_1(\sigma_0)$ 。

A.5.2 $u(\sigma_x)$ 的来源A.5.2.1 被校电导率仪测量重复性引入的标准不确定度 $u_1(\sigma_x)$ ；A.5.2.2 被校电导率仪分辨力引入的标准不确定度 $u_2(\sigma_x)$ 。

注：当 $u_1(\sigma_x) > u_2(\sigma_x)$ 时， $u_2(\sigma_x)$ 可以不重复计入。

A.6 标准不确定度分量评定

A.6.1 电导率标准样块引入的标准不确定度 $u_1(\sigma_0)$

标准块电导率的最大允许误差为±0.05%，估计服从均匀分布，则引入的标准不确定度为

$$u_1(\sigma_0) = \frac{0.05\%}{\sqrt{3}} = 0.029\%$$

则标准块引入的标准不确定度为

$$u(\sigma_0) = 0.029\% \times 57.42 \text{ MS/m} = 0.017 \text{ MS/m}$$

A.6.2 被校电导率仪引入的标准不确定度 $u(\sigma_x)$ A.6.2.1 被校电导率仪测量重复性引入的标准不确定度 $u_1(\sigma_x)$

测量结果的重复性引入的标准不确定度通过多次重复测量进行 A 类评定。以涡流电导率仪 SMP10 型号为例,其量程为 0.58 MS/m~58 MS/m (1% IACS~100% IACS),最大允许误差为 $\pm 0.5\%$ 。在相同条件下,涡流电导率仪对同一块标准块重复测量 10 次,测量频率为 60 kHz,测量结果见表 A.1,测量实验标准偏差按式 (A.3) 计算。

表 A.1 涡流电导率仪重复测量数据

| 测量序号 i | 电导率仪显示值 σ_i MS/m | 平均值 $\bar{\sigma}$ MS/m | 实验标准偏差 $s(\sigma_i)$ MS/m |
|----------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|
| 1 | 57.38 | 57.42 | 0.03 |
| 2 | 57.39 | | |
| 3 | 57.36 | | |
| 4 | 57.41 | | |
| 5 | 57.47 | | |
| 6 | 57.46 | | |
| 7 | 57.43 | | |
| 8 | 57.44 | | |
| 9 | 57.42 | | |
| 10 | 57.42 | | |

$$s(\sigma_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (\sigma_i - \bar{\sigma})^2} \quad (\text{A.3})$$

式中:

σ_i ——第 i 次电导率测量值, MS/m;

$\bar{\sigma}$ —— n 次测量的平均值, MS/m;

n ——重复测量的次数。

根据表 A.1 的数据,得到涡流电导率仪重复性测量实验标准偏差为 0.03 MS/m,故测量重复性引入的标准不确定度为

$$u_1(\sigma_x) = s(\sigma_i) = 0.03 \text{ MS/m}$$

A.6.2.2 电导率仪分辨力引入的不确定度分量 $u_2(\sigma_x)$

涡流电导率仪的分辨力 δ_x 为 0.006 MS/m,则由此带来的标准不确定度为

$$u_2(\sigma_x) = 0.29\delta_x = 0.29 \times 0.006 \text{ MS/m} = 0.002 \text{ MS/m}$$

A.6.2.2.1 被校电导率仪引入的标准不确定度 $u(\sigma_x)$

为了避免重复计算,电导率仪测量结果的重复性和电导率仪测量分辨力取其中最大

值作为被校电导率仪引入的标准不确定度。 $u_1(\sigma_x) > u_2(\sigma_x)$ ，故舍去电导率仪分辨力引入的标准不确定度分量 $u_2(\sigma_x)$ 。被校电导率仪引入的标准不确定度为

$$u(\sigma_x) = u_1(\sigma_x) = 0.03 \text{ MS/m}$$

A.7 合成标准不确定度 $u_c(\Delta\sigma)$

合成标准不确定度按式 (A.2) 计算。

$$u_c(\Delta\sigma) = \sqrt{u^2(\sigma_x) + u^2(\sigma_0)} = 0.034 \text{ MS/m}$$

A.8 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，其扩展不确定度为

$$U(\Delta\sigma) = k u_c(\Delta\sigma) = 2 \times 0.034 \text{ MS/m} = 0.07 \text{ MS/m}$$

附录 C

校准证书内页格式

证书编号 ××××××—××××

| 校准机构授权说明 | | | | |
|---|------|----------------|---------------|--------|
| 校准环境条件及地点： | | | | |
| 温 度 | ℃ | 地 点 | | |
| 相对湿度 | % | 其 他 | | |
| 校准所依据的技术文件（代号、名称）： JJF 1692—2018《涡流电导率仪校准规范》 | | | | |
| 校准所使用的主要测量标准： | | | | |
| 名 称 | 测量范围 | 不确定度/ 准确度等级 | 检定/校准 证书编号 | 证书有效期至 |
| | | | | |

注：

1. ×××××仅对加盖“×××××校准专用章”的完整证书负责。
2. 本证书的校准结果仅对所校准的对象有效。
3. 未经实验室书面批准，不得部分复印证书。

证书编号 ××××××—××××

校准结果

表 1

| 标准电导率值 MS/m | 示值 MS/m | 示值误差 MS/m | 不确定度 ($k=2$) |
|----------------|------------|--------------|-------------------|
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

以下空白

校准结果不确定度的评估和表述均符合 JJF 1059.1 的要求。

敬告：

1. 被校准仪器修理后，应立即进行校准。
2. 在使用过程中，如对被校准仪器的技术指标产生怀疑，请重新校准。
3. 根据客户要求和校准文件的规定，通常情况下_____个月校准一次。

校准员：

核验员：

第×页 共×页