

JJF

# 中华人民共和国国家计量技术规范

JJF XXXX-XXXX

## 经颅磁刺激治疗仪校准规范

Calibration specification of

transcranial magnetic stimulation system

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

国家市场监督管理总局发布

# 经颅磁刺激治疗仪校准规范

Calibration specification of  
transcranial magnetic stimulation system

JJF xxxx-xxxx

归口单位：全国医学计量技术委员会

主要起草单位：中国计量科学研究院

江苏省计量科学研究院

参加起草单位：中国信息通信研究院

武汉依瑞德医疗设备新技术有限公司

北京华泰长润科技发展有限公司

本规范委托全国医学计量技术委员会负责解释

**本规范主要起草人：**

李成伟（中国计量科学研究院）

张 璞（中国计量科学研究院）

顾加雨（江苏省计量科学研究院）

**参加起草人：**

巫彤宁（中国信息通信研究院）

夏勋荣（江苏省计量科学研究院）

葛 康（武汉依瑞德医疗设备新技术有限公司）

胡 垠（北京华泰长润科技发展有限公司）

# 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 刺激序列.....	1
3.2 刺激簇.....	1
3.3 刺激脉冲.....	1
3.4 最大磁感应强度.....	2
3.5 输出频率.....	2
3.6 输出强度.....	2
3.7 刺激脉冲宽度.....	2
3.8 刺激持续时间.....	2
3.9 刺激间隔.....	2
4 概述.....	3
5 计量特性.....	3
5.1 最大磁感应强度.....	3
5.2 刺激脉冲宽度.....	3
5.3 输出频率.....	3
5.4 线圈表面温度.....	3
5.5 定时（如适用）.....	4
6 校准条件.....	4
6.1 环境条件.....	4
6.2 测量标准及其他设备.....	4
7 校准项目与校准方法.....	4
7.1 外观及功能性检查.....	4
7.2 最大磁感应强度.....	5

---

7.3 刺激脉冲宽度 .....	6
7.4 输出频率 .....	7
7.5 线圈表面温度 .....	7
7.6 定时 .....	8
<b>8 校准结果表达.....</b>	<b>8</b>
8.1 校准记录 .....	8
8.2 校准结果的处理 .....	8
<b>9 复校时间间隔.....</b>	<b>9</b>
<b>附录 A 经颅磁刺激治疗仪校准原始记录（推荐）格式样式.....</b>	<b>10</b>
<b>附录 B 校准证书内页（推荐）格式样式.....</b>	<b>11</b>
<b>附录 C 最大磁感应强度校准结果不确定度评定示例 .....</b>	<b>13</b>
<b>附录 D 输出频率校准结果不确定度评定示例 .....</b>	<b>16</b>

# 引 言

JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001-2011《通用计量术语及定义》、JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》共同构成支撑本规范制定工作的基础性系列文件。

本规范的制定参考和引用了以下技术标准的部分内容：JJF 1188-2008《无线电计量名词术语及定义》、GB 9706.1-2020《医用电气设备 第1部分：基本安全和基本性能的通用要求》和 YY/T 0994-2015《磁刺激设备》。

本规范为首次发布。

# 经颅磁刺激治疗仪校准规范

## 1 范围

本规范适用于经颅磁刺激治疗仪（可具有单脉冲、双脉冲和重复脉冲等刺激模式）的校准。

## 2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJF 1188-2008 无线电计量名词术语及定义

GB 9706.1-2020 医用电气设备 第1部分：基本安全和基本性能的通用要求

YY/T 0994-2015 磁刺激设备

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

JJF 1188-2008 界定的及以下术语和定义适用于本规范。

### 3.1 刺激序列 stimulation sequence

由多个刺激簇组成，包含输出频率、输出强度、刺激持续时间和刺激间隔等信息的时序序列。经颅磁刺激治疗仪会根据刺激序列参数设置自动转化为对应的交变电流时序序列。

### 3.2 刺激簇 stimulation cluster

由多个刺激脉冲形成的一组刺激时序。

### 3.3 刺激脉冲 stimulation pulse

自第一额定状态出发，到达第二额定状态，最后又回到第一额定状态的一种波，是刺激序列中的最小激励单元，时序形状为正弦脉冲。

[来源：JJF 1188-2008，11.1，修改]

### 3.4 最大磁感应强度 maximum magnetic induction intensity

使用任意刺激序列,经颅磁刺激治疗仪在空间中产生交变磁场的磁感应强度的最大瞬时模量,单位 T。最大磁感应强度一般以峰-峰值的形式表示。

[来源: JJF 1188-2008, 2.3 及 2.4, 修改]

### 3.5 输出频率 frequency

刺激簇中每 1 s 内包含的刺激脉冲个数,单位为 Hz。

### 3.6 输出强度 stimulation intensity

刺激脉冲的脉冲幅度,一般以百分比形式设置。

### 3.7 刺激脉冲宽度 pulse width of stimulation pulse

刺激脉冲上升到正半周脉冲幅度的 10%至下降至负半周脉冲幅度的 90%所经历的时间,单位  $\mu\text{s}$ 。

[来源: JJF 1188-2008, 11.14, 修改]

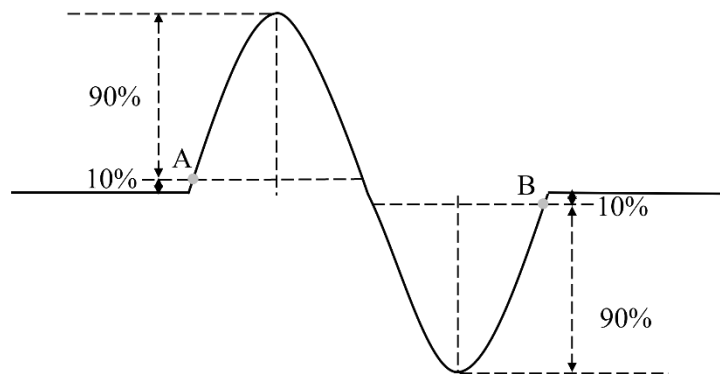


图 1 刺激脉冲宽度示意图

注:图中横坐标为时间轴,纵坐标为磁感应强度值,B点与A点间横坐标差值即为刺激脉冲宽度。

### 3.8 刺激持续时间 duration of stimulation cluster

任意刺激簇中,第一个刺激脉冲的脉冲起始时间到最后一个刺激脉冲的脉冲终止时间之间的时间间隔,单位 s。

### 3.9 刺激间隔 time interval between adjacent stimulation clusters



前一个刺激簇中最后一个刺激脉冲的脉冲终止时间到下一个刺激簇中第一个刺激脉冲的脉冲起始时间之间的时间间隔，单位为 s。

[来源：JJF 1188-2008，11.5，修改]

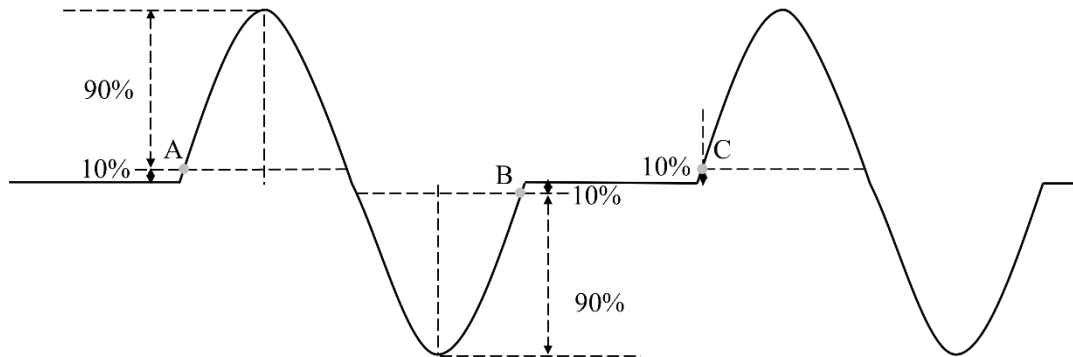


图 2 刺激间隔示意图

注：图中横坐标为时间轴，纵坐标为磁感应强度值，C 点与 B 点间横坐标差值即为刺激间隔。

## 4 概述

经颅磁刺激治疗仪是用于抑郁症、脑卒中等大脑相关疾病诊断或治疗的医疗设备。它依据法拉第电磁感应定律制成，通过刺激线圈中的交变电流产生交变磁场，磁场穿透颅骨后在大脑特定区域产生感应电场，从而激活或抑制脑区功能、达到治疗效果。经颅磁刺激治疗仪一般包括电源模块、储能模块、能量释放与回收模块、控制系统和刺激线圈。

## 5 计量特性

### 5.1 最大磁感应强度

峰-峰值测量方式下最大允许误差为 $\pm 20\%$ 。

### 5.2 刺激脉冲宽度

最大允许误差为 $\pm 10\%$ 。

### 5.3 输出频率

最大允许误差为 $\pm 10\%$ 。

### 5.4 线圈表面温度

任意刺激线圈以最大输出功率工作时，线圈表面温度不应超过 43 °C。

## 5.5 定时（如适用）

刺激序列的持续时间可调，最大允许误差为±10%。

注：

- 1 以上指标不适用于合格性判别，仅供参考；
- 2 对于仅具有单脉冲刺激模式的临床诊断用经颅磁刺激治疗仪，仅需检测最大磁感应强度和刺激脉冲宽度。

## 6 校准条件

### 6.1 环境条件

6.1.1 环境温度：10 °C~35 °C；

6.1.2 相对湿度：≤80%；

6.1.3 供电电源：（220±22）V，（50±1）Hz；

6.1.4 周围无明显影响系统正常工作的机械振动和电磁干扰。

### 6.2 测量标准及其他设备

#### 6.2.1 经颅磁刺激治疗仪校准装置

经颅磁刺激治疗仪校准装置由交变磁场测量探头、测量支架、装置主机及控制电脑组成。磁感应强度测量范围为 0.5 T~5 T，最大允许误差±10%；频率测量结果最大允许误差±3%。

#### 6.2.2 温度测量探头

测量范围为 10 °C~45 °C，最大允许误差±0.2 °C。

#### 6.2.3 秒表

测量范围为（0~3600）s，日差±0.5 s/d。

## 7 校准项目与校准方法

### 7.1 外观及功能性检查

被校经颅磁刺激治疗仪应标识清楚,具有生产厂家、型号、出厂编号等信息;结构应完整,无影响正常工作和校准的缺陷或机械损伤;各部分连接应准确可靠,控制按钮标识清晰,易于操控;开机后应能正常工作。

## 7.2 最大磁感应强度

7.2.1 将磁场测量探头固定在测量支架上,使磁场测量探头与刺激线圈表面接触但不挤压;如厂商给出最大磁感应强度测量位置,在厂商给定位置校准;如厂商未给出测量位置,圆形线圈在图 3 中标注的虚线位置进行测量,8 字形线圈在图 4 中标注的虚线位置进行测量。

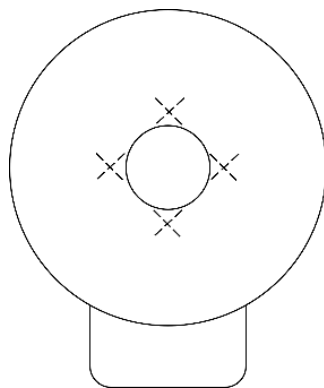


图 3 圆形线圈测量位置示意图

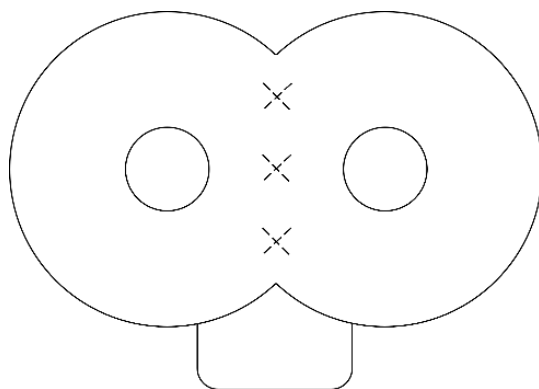


图 4 8 字形线圈测量位置示意图

7.2.2 将经颅磁刺激治疗仪刺激序列的输出强度设为 100% (或者最大值),其他参数的设置应保证经颅磁刺激治疗仪能够以最大输出强度连续输出刺激脉冲;在 7.2.1 中规定的测量位置进行最大磁感应强度测量,每个测量位置至少测量 3 次并以其峰值的平均值作为该测量位置的测量结果。

7.2.3 磁感应强度输出波形如图 5，正峰值定义为  $B_1$ ，负峰值定义为  $B_2$ （带负号），按照公式（1）计算最大磁感应强度峰-峰值  $B_{pp}$ 。比较所有测量位置的测量结果，以其中的最大值作为最大磁感应强度峰-峰值的校准结果。

$$B_{pp} = B_1 - B_2 \quad (1)$$

式中：

$B_{pp}$  — 最大磁感应强度峰-峰值的测量结果，T；

$B_1$  — 磁感应强度正峰值，T；

$B_2$  — 磁感应强度负峰值，T。

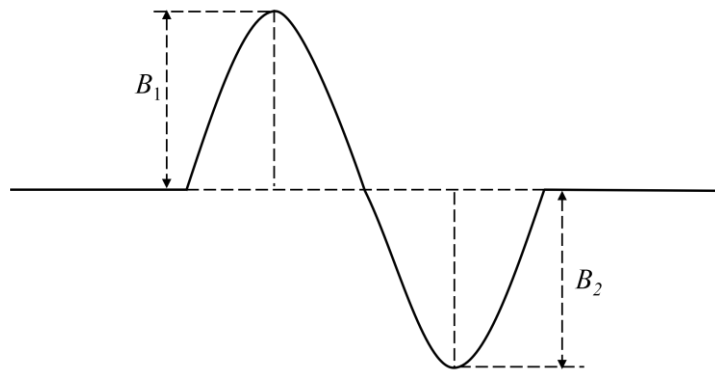


图 5 最大磁感应强度测量方法示意图

### 7.3 刺激脉冲宽度

7.3.1 根据 7.2 中最大磁感应强度校准结果，在测得最大磁感应强度峰-峰值的位置进行刺激脉冲宽度的校准；将磁场测量探头固定在测量支架上，使磁场测量探头置于选定的测量位置上并与刺激线圈表面接触但不挤压。

7.3.2 将经颅磁刺激治疗仪刺激序列的输出强度设为 100%（或者最大值），输出频率设置为 1 Hz，其他参数的设置保证经颅磁刺激治疗仪能够持续输出刺激脉冲。

7.3.3 如图 6，选取任意刺激脉冲，将其正半周波形上升沿 10%位置（图 6 中 A 点）到负半周波形下降沿 90%（图 6 中 B 点）位置之间的时间间隔记为  $t_1$ ，即为该刺激脉冲对应的刺激脉冲宽度测量值；连续测量 3 次并以其均值作为刺激脉冲宽度校准结果  $t_p$ 。

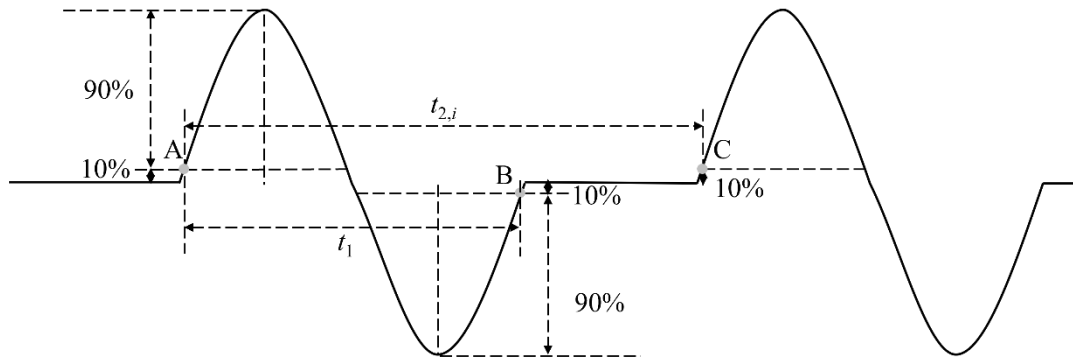


图 6 输出频率测量方法示意图

#### 7.4 输出频率

7.4.1 根据 7.2 中最大磁感应强度校准结果，在测得最大磁感应强度峰-峰值的位置进行输出频率的校准；将磁场测量探头固定在测量支架上，使磁场测量探头置于选定的测量位置上并与刺激线圈表面接触但不挤压。

7.4.2 将经频磁刺激治疗仪刺激序列的输出强度设为中等强度（例如 60%，或根据厂商建议设置），输出频率依次设置为 1 Hz、5 Hz 及 10 Hz，其他参数的设置保证经频磁刺激治疗仪能够以中等强度连续输出刺激脉冲；每个输出频率设置值下至少连续测得 4 个形状完整的刺激脉冲。

7.4.3 如图 6，选取任意两个相邻刺激脉冲，将前一个刺激脉冲正半周波形上升沿 10%位置（图 6 中 A 点）到下一个刺激脉冲正半周波形上升沿 10%位置（图 6 中 C 点）之间的时间间隔记为  $t_{2,i}$  ( $i=1, 2, 3$ )；重复测量 3 次并计算获得  $t_{2,i}$  的均值  $\overline{t_{2,i}}$ ，按照公式 (2) 计算获得输出频率校准结果  $F$ 。

$$F = \frac{1}{\overline{t_{2,i}}} \quad (2)$$

式中：

$\overline{t_{2,i}}$  — 3 次  $t_{2,i}$  ( $i=1, 2, 3$ ) 测量结果的均值， $\mu\text{s}$ ；

$F$  — 输出频率校准结果，Hz。

#### 7.5 线圈表面温度

7.5.1 根据 7.2 中最大磁感应强度校准结果，在测得最大磁感应强度峰-峰值的

位置进行线圈表面温度的校准；将温度测量探头固定在刺激线圈选定的测量位置。

7.5.2 将经颅磁刺激治疗仪刺激序列的输出强度设为 100%（或者最大值），其他参数的设置保证经颅磁刺激治疗仪能够以最大输出强度连续输出刺激脉冲。

7.5.3 经颅磁刺激治疗仪持续以最大输出强度连续输出刺激脉冲，持续测量刺激线圈上测量位置处的温度变化，直至经颅磁刺激测量仪触发温度保护机制或连续刺激时间达到 20 min；记录此时温度测量探头的测量结果作为线圈表面温度校准结果  $T$ 。

## 7.6 定时

7.6.1 根据 7.2 中最大磁感应强度校准结果，在测得最大磁感应强度峰-峰值的位置进行定时的校准。

7.6.2 将经颅磁刺激治疗仪刺激序列的输出强度设为中等强度（例如 60%），输出频率设置为 10 Hz，其他参数的设置保证经颅磁刺激治疗仪能够以中等强度连续输出刺激脉冲；记录经颅磁刺激治疗仪上显示的刺激序列持续时间  $t_3$ 。

7.6.3 点击开始扫描按键，同时秒表开始计时；刺激序列结束时秒表同时结束计时，记下读数；重复测量 3 次，取 3 次计数的均值作为定时校准结果  $t_s$ 。

## 8 校准结果表达

### 8.1 校准记录

校准记录格式参见附录 A。

### 8.2 校准结果的处理

校准证书内页格式参见附录 B，校准证书应至少包括以下内容：

- 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（如果不在实验室内校准）；
- d) 证书或报告的唯一性标识（如证书编号），每页及总页数的标识；

- e) 客户的名称和地址;
- f) 被校准经颅磁刺激治疗仪的描述和明确标识 (如型号、产品编号等);
- g) 进行校准的日期或校准证书的生效日期;
- h) 校准所依据的技术规范的标识, 包括名称和代号;
- i) 校准所用测量标准的溯源性及有效性说明;
- j) 校准环境的描述;
- k) 校准结果及测量不确定度的说明;
- l) 校准员及核验员的签名;
- m) 校准证书批准人的签名;
- n) 校准结果仅对被校对象有效的声明;
- o) 未经试验室书面批准, 不得部分复制证书或报告的声明。

## 9 复校时间间隔

建议复校时间间隔不超过 12 个月。

由于复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者、仪器本身质量等诸多因素所决定的, 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

## 经颅磁刺激治疗仪校准原始记录（推荐）格式样式

证书编号：

校准地点：

送校单位：					
生产厂家：		型号：	序列号：		校准依据：
校准设备名称及编号：		校准设备证书编号及有效期：		温 度：            °C	相对湿度：            %
<b>最大磁感应强度（单位：T）</b>					
测量次数 测量位置	1	2	3	均值	
1					
2					
3					
4					
最大磁感应强度校准结果：					
<b>刺激脉冲宽度（单位：μs）</b>					
测量次数	1	2	3	均值 $t_p$	
$t_1$					
<b>输出频率</b>					
设置值 （单位：Hz）	测量次数 $i$ 测量项目	1	2	3	均值 $F$ （单位：Hz）
1	$t_{2,i}$ （单位：μs）				
	均值 $\overline{t_{2,i}}$ （单位：μs）				
5	$t_{2,i}$ （单位：μs）				
	均值 $\overline{t_{2,i}}$ （单位：μs）				
10	$t_{2,i}$ （单位：μs）				
	均值 $\overline{t_{2,i}}$ （单位：μs）				
<b>线圈表面温度（单位：°C）</b>					
线圈表面温度校准结果： $T =$					
<b>定时（单位：s）</b>					
测量次数	1	2	3	均值 $t_s$	设置值 $t_3$
读数					

校准员：

核验员：

日期：      年    月    日



## 附录 B

## 校准证书内页（推荐）格式样式

校准证书第 1 页

证书编号：XXXX-XXXX				
校准机构授权说明				
校准所依据/参照的技术文件（代号、名称）				
校准环境条件及其地点：				
温度：        ℃            相对湿度：        %				
地点：				
其它：				
测量标准及其他设备				
名称	测量范围	不确定度/准确度等级/最大允许误差	证书编号	有效期至

校准证书第 2 页

证书编号：XXXX-XXXX

校准结果

1. 最大磁感应强度校准结果： $B_{pp} =$  \_\_\_\_\_， 不确定度  $U =$  \_\_\_\_\_；
2. 输出脉冲宽度校准结果： $t_p =$  \_\_\_\_\_， 不确定度  $U =$  \_\_\_\_\_；
3. 输出频率校准结果： $F =$  \_\_\_\_\_， 不确定度  $U =$  \_\_\_\_\_；
4. 线圈表面温度校准结果： $T =$  \_\_\_\_\_， 不确定度  $U =$  \_\_\_\_\_；
5. 定时校准结果： $t_s =$  \_\_\_\_\_， 不确定度  $U =$  \_\_\_\_\_。

第 2 页 共 2 页

## 附录 C

## 最大磁感应强度校准结果不确定度评定示例

依据 JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》的要求，给出最大磁感应强度校准结果测量不确定度评定过程。其中包括各分量标准不确定度评定、合成标准不确定度以及扩展不确定度计算等。

## C.1 建立测量模型

$$B_{pp} = B_1 - B_2$$

式中：

$B_{pp}$  — 最大磁感应强度峰-峰值的测量结果，T；

$B_1$  — 磁感应强度正峰值，T；

$B_2$  — 磁感应强度负峰值，T。

由测量模型可得灵敏系数为：

$$c(B_1) = 1$$

$$c(B_2) = -1$$

## C.2 标准不确定度分量评定

C.2.1 正峰值 $B_1$ 测量结果引入的标准不确定度C.2.1.1 测量重复性引入的标准不确定度 $u_1(B_1)$ 

$u_1(B_1)$ 是正峰值测量重复性引入的标准不确定度，用交变磁场测量探头对厂商规定的最大磁感应强度测量位置进行测量，以3次独立重复测量结果的均值作为正峰值 $B_1$ 。3次测量值及其标准偏差 $s(B_1)$ 见下表 C.1，其中标准偏差采用极差法计算。

表 C.1 正峰值 $B_1$ 的测量重复性

单位：T

测量值			平均值	标准偏差 $s(B_1)$
1	2	3		
1.48	1.48	1.44	1.47	0.0237

则由重复性引入的标准不确定度分量 $u_1(B_1)$ 为:

$$u_1(B_1) = s(B_1)/\sqrt{3} = 0.0137 \text{ T}$$

#### C. 2. 1. 2 环境温度、湿度变化引入的标准不确定度 $u_2(B_1)$

在仪器的正常使用环境条件下, 由于磁感应强度值不受温度、湿度影响变化影响, 刺激线圈产生磁感应强度的变化可以忽略不计; 而交变磁场测量探头采用霍尔元件制成, 其测量结果的温度漂移量将在中 C. 2. 1. 3 考虑。

#### C. 2. 1. 3 交变磁场测量探头测量不准确引入的标准不确定度 $u_3(B_1)$

由于交变磁场测量探头测量结果的相对扩展不确定度为  $U_{\text{rel}}=0.6\%$  ( $k=2$ ), 则由其引入的标准不确定度分量为:

$$u_3(B_1) = 1.47 \times (0.6\% \div 2) = 0.0044 \text{ T}$$

### C. 2. 2 负峰值 $B_2$ 测量结果引入的标准不确定度

#### C. 2. 2. 1 测量重复性引入的标准不确定度 $u_4(B_2)$

$u_4(B_2)$ 是负峰值测量重复性引入的标准不确定度, 用交变磁场测量探头对厂商规定的最大磁感应强度测量位置进行测量, 以 3 次独立重复测量结果的均值作为负峰值 $B_2$ 。3 次测量值及其标准偏差 $s(B_2)$ 见下表 C.2, 其中标准偏差采用极差法计算。

表 C.2 负峰值 $B_2$ 的测量重复性

单位: T

测量值			平均值	标准偏差 $s(B_2)$
1	2	3		
-1.16	-1.12	-1.12	-1.13	0.0237

则由重复性引入的标准不确定度分量 $u_4(B_2)$ 为:

$$u_4(B_2) = s(B_2)/\sqrt{3} = 0.0137 \text{ T}$$

#### C. 2. 2. 2 环境温度、湿度变化引入的标准不确定度 $u_5(B_2)$

在仪器的正常使用环境条件下, 由于磁感应强度值不受温度、湿度影响变化影响, 刺激线圈产生磁感应强度的变化可以忽略不计; 而交变磁场测量探头采用

霍尔元件制成，其测量结果的温度漂移量将在中 C. 2. 2. 3 考虑。

### C. 2. 2. 3 交变磁场测量探头测量不准确引入的标准不确定度 $u_6(B_2)$

由于交变磁场测量探头测量结果的相对扩展不确定度为  $U_{\text{rel}}=0.6\%$  ( $k=2$ )，则由其引入的标准不确定度分量为：

$$u_6(B_2) = 1.13 \times (0.6\% \div 2) = 0.0034 \text{ T}$$

## C. 3 合成标准不确定度

各不确定度分量见表 C.3。

表 C.3 最大磁感应强度校准结果不确定度分量

序号	不确定度来源	不确定度分量
1	正峰值测量重复性引入的标准不确定度 $u_1(B_1)$	0.0137 T
2	正峰值测量时，交变磁场测量探头测量不准确引入的标准不确定度 $u_3(B_1)$	0.0044 T
3	负峰值测量重复性引入的标准不确定度 $u_4(B_2)$	0.0137 T
4	负峰值测量时，交变磁场测量探头测量不准确引入的标准不确定度 $u_6(B_2)$	0.0034 T

上述 4 个不确定度分量互不相关，故合成标准不确定度为：

$$\begin{aligned} u_c(B_{\text{pp}}) &= \sqrt{[c(B_1)]^2 \cdot [u_1(B_1)]^2 + [u_3(B_1)]^2 + [c(B_2)]^2 \cdot [u_4(B_2)]^2 + [u_6(B_2)]^2} \\ &= 0.0202 \text{ T} \end{aligned}$$

## C. 4 扩展不确定度

取包含因子  $k=2$ ，则扩展不确定度 $U(B_{\text{pp}})$ 为：

$$U(B_{\text{pp}}) = ku_c(B_{\text{pp}}) = 2 \times 0.0202 \approx 0.04 \text{ T}, \quad (k=2)$$

## 附录 D

## 输出频率校准结果不确定度评定示例

依据 JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》的要求，给出输出频率校准结果测量不确定度评定过程。其中包括各分量标准不确定度评定、合成标准不确定度以及扩展不确定度计算等。

## D.1 建立测量模型

$$F = \frac{1}{\overline{t_{2,i}}}$$

式中：

$\overline{t_{2,i}}$  — 3 次  $t_{2,i}$  ( $i=1, 2, 3$ ) 测量结果的均值， $\mu\text{s}$ ；

$F$  — 输出频率校准结果，Hz。

由测量模型可得灵敏系数为：

$$c(t_{2,i}) = -\frac{1}{\overline{t_{2,i}}^2}$$

## D.2 标准不确定度分量评定

D.2.1  $t_{2,i}$  测量重复性引入的标准不确定度  $u_1(t_{2,i})$ 

$u_1(t_{2,i})$  是  $t_{2,i}$  测量重复性引入的标准不确定度，用交变磁场测量探头对厂商规定的最大磁感应强度测量位置进行测量，重复测量 3 次。3 次测量值及其标准偏差  $s(t_{2,i})$  见下表 D.1，其中标准偏差采用极差法计算。

表 D.1  $t_{2,i}$  的测量重复性

单位： $\mu\text{s}$

测量值			平均值	标准偏差 $s(t_{2,i})$
1	2	3		
101	100	100	100.333	0.592

则由重复性引入的标准不确定度分量  $u_1(t_{2,i})$  为：

$$u_1(t_{2,i}) = s(t_{2,i})/\sqrt{3} = 0.3416 \mu\text{s}$$

### D.2.2 环境温度、湿度变化引入的标准不确定度 $u_2(t_{2,i})$

在仪器的正常使用环境条件下,由于时间测量不受温度、湿度影响变化影响, $t_{2,i}$ 的变化可以忽略不计。

### D.2.3 数字示波器测量不准确引入的标准不确定度 $u_3(t_{2,i})$

由于数字示波器时基测量结果的相对扩展不确定度为  $U_{\text{rel}}=1.2\text{E-}5$  ( $k=2$ ), 则由其引入的标准不确定度分量为:

$$u_3(t_{2,i}) = 100.333 \times (1.2\text{E-}5 \div 2) = 0.0006 \mu\text{s}$$

## D.3 合成标准不确定度

各不确定度分量见表 D.2。

表 D.2 输出频率校准结果不确定度分量

序号	不确定度来源	不确定度分量
1	$t_{2,i}$ 测量重复性引入的标准不确定度 $u_1(t_{2,i})$	0.3416 $\mu\text{s}$
2	数字示波器测量不准确引入的标准不确定度 $u_3(t_{2,i})$	0.0006 $\mu\text{s}$

上述 2 个不确定度分量互不相关, 故合成标准不确定度为:

$$u_c(t_{2,i}) = \sqrt{[c(t_{2,i})]^2 \cdot [u_1(t_{2,i})]^2 + [u_3(t_{2,i})]^2} = 1.16 \times 10^{-5} \text{ Hz}$$

## D.4 扩展不确定度

取包含因子  $k=2$ , 则扩展不确定度 $U(F)$ 为:

$$U(F) = k u_c(t_{2,i}) = 2 \times 1.16 \times 10^{-5} \approx 2.3 \times 10^{-5} \text{ Hz}, \quad (k=2)$$