



# 中华人民共和国国家计量技术规范

JJF XXXX—20XX

## 脉冲磁场模拟器校准规范

Calibration Specification of Impulse Magnetic Simulators

(征求意见稿)

20XX-XX-XX 发布

20XX-XX-XX 实施

国家市场监督管理总局

发布

脉冲磁场模拟器

校准规范

Calibration Specification of  
Impulse Magnetic Simulators

JJF XXXX—20XX

归口单位：全国无线电计量技术委员会

主要起草单位：辽宁省计量科学研究院  
中国计量科学研究院

参加起草单位：上海市计量测试技术研究院  
广东省计量科学研究院  
江苏省计量科学研究院

本规范委托全国无线电计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

XXX（辽宁省计量科学研究院）

XXX（中国计量科学研究院）

XXX（辽宁省计量科学研究院）

参加起草人：

XXX（辽宁省计量科学研究院）

XXX（上海市计量测试技术研究院）

XXX（广东省计量科学研究院）

XXX（江苏省计量科学研究院）

# 目 录

引言.....	( II )
1 范围.....	( 1 )
2 引用文件.....	( 1 )
3 术语和计量单位.....	( 1 )
3.1 感应线圈.....	( 1 )
3.2 感应线圈因数.....	( 1 )
3.3 标准感应线圈.....	( 1 )
4 概述.....	( 1 )
5 计量特性.....	( 2 )
5.1 脉冲电流发生器.....	( 2 )
5.2 脉冲磁场模拟器.....	( 3 )
6 校准条件.....	( 3 )
6.1 环境条件.....	( 3 )
6.2 测量标准及其他设备.....	( 3 )
7 校准项目和校准方法.....	( 4 )
7.1 外观及工作正常性检查.....	( 4 )
7.2 脉冲电流发生器的校准.....	( 4 )
7.3 脉冲磁场模拟器的校准.....	( 5 )
8 校准结果.....	( 6 )
9 复校时间间隔.....	( 6 )
附录A 原始记录格式.....	( 7 )
附录B 校准证书内页格式.....	( 9 )
附录C 主要项目校准不确定度评定示例.....	( 10 )

# 引 言

JJF1071-2010 《国家计量校准规范编写规则》和 JJF1059.1-2012 《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。

本规范参考 GB/T 17626.9 《电磁兼容 试验和测量技术 脉冲磁场抗扰度试验》及 IEC 61000-4-9: 2016 《电磁兼容 试验和测量技术 脉冲磁场抗扰度试验》相关条款进行编写。

本规范为首次发布。

# 脉冲磁场模拟器校准规范

## 1 范围

本规范适用于符合 GB/T 17626.9《电磁兼容 试验和测量技术 脉冲磁场抗扰度试验》及 IEC 61000-4-9: 2016《电磁兼容 试验和测量技术 脉冲磁场抗扰度试验》要求的脉冲磁场模拟器的校准,也适用于电磁兼容抗扰度综合测试系统中的脉冲磁场模拟器部分的校准。

## 2 引用文件

本规范引用了下列文件:

GB/T 17626.9 电磁兼容 试验和测量技术 脉冲磁场抗扰度试验

IEC 61000-4-9: 2016 电磁兼容 试验和测量技术 脉冲磁场抗扰度试验  
(Electromagnetic compatibility - Testing and measurement techniques - Impulse magnetic field immunity test)

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

下列术语和定义适用于本规范。

### 3.1 感应线圈 inductive coil

具有确定形状和尺寸的导体环,环中流过电流时,在其平面和所包围的空间内产生确定的磁场。

### 3.2 感应线圈因数 inductive coil factor

尺寸确定的感应线圈所产生的磁场强度与相应电流的比值,磁场强度是在没有受试设备的情况下,在线圈平面中心处所测得的。

### 3.3 标准感应线圈 standard inductive coil

匝数为1,尺寸为1 m × 1 m的正方形或1 m × 2.6 m的矩形感应线圈。

## 4 概述

脉冲磁场模拟器一般由脉冲电流发生器和感应线圈组成。脉冲电流发生器主要由高压源、充电电阻、储能电容器、阻抗匹配电阻及波形网络等组成。脉冲电流发生器特性主要为短路电流波形参数。波形示意图如图1所示。

脉冲磁场模拟器主要用于模拟雷击建筑物和其他金属构架(包括天线杆、接地体和

接地网) 以及由在低压、中压和高压电力系统中初始的故障瞬态产生的干扰, 考察被测试电子仪器设备的抗脉冲磁场的能力。

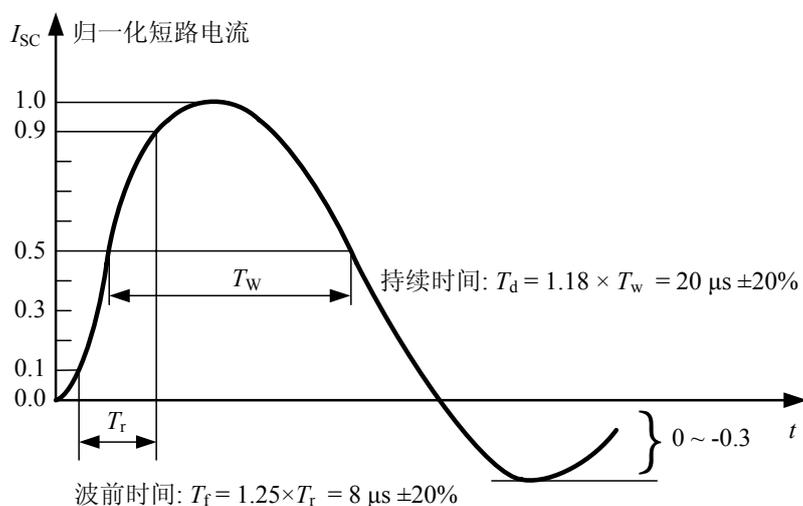


图 1 脉冲电流发生器短路电流波形示意图

## 5 计量特性

### 5.1 脉冲电流发生器

#### 5.1.1 短路电流峰值

电流范围: (0.1~2) kA,

最大允许误差:  $\pm 10\%$ ,

#### 5.1.2 短路电流波前时间

标称值: 8  $\mu\text{s}$ ,

最大允许误差:  $\pm 20\%$ 。

#### 5.1.3 短路电流持续时间

标称值: 20  $\mu\text{s}$ ,

最大允许误差:  $\pm 20\%$ 。

### 5.2 脉冲磁场模拟器

#### 5.2.1 电流峰值

电流范围: (0.1~2) kA,

最大允许误差:  $\pm 10\%$ ,

标准感应线圈电流与磁场的关系如表1所示。

#### 5.2.2 电流波前时间

电流波前时间如表 2 所示。

表 1 标准感应线圈电流与磁场关系

磁场设定值 (A/m)	1 m × 1 m 标准感应线圈 电流标称值 (A)	1 m × 2.6 m 标准感应线圈 电流标称值 (A)
100	111	152
300	333	453
1000	1111	1515

表 2 脉冲磁场模拟器电流波前时间

标准线圈	标称值	允许误差范围
1 m × 1 m	8 μs	-0.8 μs~2.4 μs
1 m × 2.6 m	8 μs	-0.8 μs~3.2 μs

### 5.2.3 电流持续时间

电流持续时间如表 3 所示。

表 3 脉冲磁场模拟器电流持续时间

标准线圈	标称值	允许误差范围
1 m × 1 m	20 μs	-2 μs~6 μs
1 m × 2.6 m	20 μs	-2 μs~8 μs

### 5.2.4 脉冲磁场强度

脉冲磁场范围：(100~1000) A/m，

最大允许误差：±30%，

注：以上技术指标不用于合格性判别，仅供参考。校准时，以技术说明书中所列的技术参数为准。

## 6 校准条件

### 6.1 环境条件

6.1.1 环境温度：(23±5) °C

6.1.2 相对湿度：20%~80%

6.1.3 电源要求：(220±11) V, (50±1) Hz

6.1.4 周围无影响正常校准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 数字存储示波器

带宽不小于100 MHz，  
幅度测量最大允许误差：±2%，  
时基最大允许误差：±1×10<sup>-4</sup>。

#### 6.2.2 电流变换器

转换系数最大允许误差：±2%，  
频带宽度：100Hz~1 MHz，  
脉冲电流峰值：不小于2 kA。

#### 6.2.3 电容

标称值：18 μF，  
可承受脉冲电压峰值：不小于4 kV。

#### 6.2.4 钢卷尺

范围：(0~5) m，  
准确度等级：II级。

### 7 校准项目和校准方法

校准项目如表4所示。

表4 校准项目表

序号	校准项目	
1	外观及工作正常性检查	
2	脉冲电流发生器	短路电流峰值
		短路电流波前时间
		短路电流持续时间
3	脉冲磁场模拟器	电流峰值
		电流波前时间
		电流持续时间
		脉冲磁场强度

#### 7.1 外观及工作正常性检查

脉冲磁场模拟器的开关、旋钮、按键应能够正常工作，感应线圈应连接完好，不应有影响电气性能的机械损伤；脉冲磁场模拟器应设有接地端子，并标明接地符号，接地线应完好无损。按说明书要求进行预热。

标准感应线圈应由铜、铝或其他非磁性导体制成，用标准钢卷尺测量感应线圈边长，最大允差±1cm。将检查结果记录在附录A表A.1中。

## 7.2 脉冲电流发生器的校准

### 7.2.1 短路电流峰值

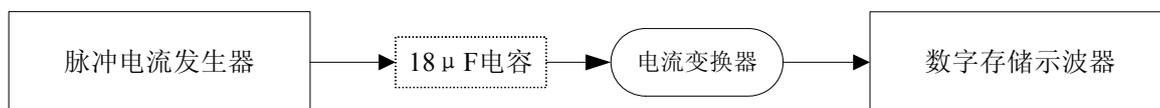


图 2 脉冲电流发生器短路电流校准接线示意图

设备连接如图 2 所示。将  $18\ \mu\text{F}$  电容输出端与脉冲电流发生器输出端短接，短路线（尽可能短，电阻应小于  $0.1\ \Omega$ ）穿过电流变换器的感应端。若脉冲电流发生器高压输出端已内置  $18\ \mu\text{F}$  电容，则图 2 中无需连接电容。设置脉冲电流发生器为高压端口输出模式，调节数字存储示波器使一个完整的脉冲波形显示于屏幕中央。测量不同脉冲磁场设定值对应的短路电流峰值，记录在附录 A 表 A.2 中。

### 7.2.2 短路电流波前时间

设备连接如图 2 所示。调节数字存储示波器使一个完整的脉冲上升沿波形显示于屏幕中央。测量峰值 10% 到 90% 的时间间隔  $T_r$ ，按公式 (1) 计算短路电流波前时间。测量不同设定脉冲磁场下的短路电流波前时间，记录在附录 A 表 A.3 中。

$$T_{\text{rf}} = 1.25 \times T_r \quad (1)$$

式中： $T_{\text{rf}}$  -----短路电流波前时间， $\mu\text{s}$ ；

$T_r$  ----短路电流峰值 10% 到 90% 的时间间隔， $\mu\text{s}$ 。

### 7.2.3 短路电流持续时间

设备连接如图 2 所示。调节数字存储示波器使一个完整的脉冲波形显示于屏幕中央。测量电流上升到 50% 峰值和下降到 50% 峰值两点之间所对应的时间间隔  $T_w$ ，按公式 (2) 计算短路电流持续时间。测量不同设定脉冲磁场下的短路电流持续时间，记录在附录 A 表 A.4 中。

$$T_d = 1.18 \times T_w \quad (2)$$

式中： $T_d$  -----短路电流持续时间， $\mu\text{s}$ ；

$T_w$  ----短路电流上升到 50% 峰值和下降到 50% 峰值两点之间所对应的时间间隔， $\mu\text{s}$ 。

## 7.3 脉冲磁场模拟器的校准

### 7.3.1 电流峰值

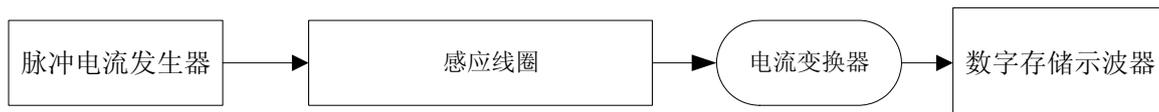


图3 脉冲磁场模拟器电流波形参数校准接线示意图

设备连接如图3所示。脉冲电流发生器与感应线圈相连，将其连接线穿过电流变换器的感应端，且感应线圈应距离任何导体表面至少0.5m。调节数字存储示波器使一个完整的脉冲波形显示于屏幕中央。测量不同脉冲磁场设定值对应的电流峰值，记录在附录A表A.5中。

### 7.3.2 电流波前时间

设备连接如图3所示。调节数字存储示波器使一个完整的脉冲上升沿波形显示于屏幕中央。在不同设定脉冲磁场下，测量峰值10%到90%的时间间隔 $T_r$ ，按公式(1)计算电流波前时间。记录在附录A表A.6中。

### 7.3.3 电流持续时间

设备连接如图3所示。调节数字存储示波器使一个完整的脉冲波形显示于屏幕中央。在不同设定脉冲磁场下，测量电流上升到50%峰值和下降到50%峰值两点之间所对应的的时间间隔 $T_w$ ，按公式(2)计算电流持续时间。记录在附录A表A.7中。

### 7.3.4 脉冲磁场强度

按公式(3)计算脉冲磁场强度，记录在附录A表A.8中。

$$H = K_{CF} \times I \quad (3)$$

式中： $H$ -----脉冲磁场强度，A/m；

$K_{CF}$ -----感应线圈因数（取理论值），1/m；

$I$ -----电流峰值校准结果，A。

## 8 校准结果

脉冲磁场模拟器校准后，出具校准证书。校准证书至少应包含以下信息：

- 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。

## 9 复校时间间隔

复校时间间隔由用户根据使用情况自行确定，推荐为1年。

## 附录 A

## 原始记录格式

## A.1 外观及工作正常性检查 \_\_\_\_\_

## A.2 脉冲电流发生器短路电流峰值

开路电压 设定值/V	短路电流峰值 标称值/A	数字示波器 电压测量值/V	电流变换器 转换系数	短路电流峰值 实测值/A	不确定度 ( $k=2$ )

## A.3 脉冲电流发生器短路电流波前时间

开路电压 设定值/V	波前时间 标称值/ $\mu\text{s}$	第一峰值10%到90%的 时间间隔的测量值/ $\mu\text{s}$	系数	短路电流波前时 间实测值/ $\mu\text{s}$	不确定度 ( $k=2$ )
	8		1.25		

## A.4 脉冲电流发生器短路电流持续时间

开路电压 设定值/V	持续时间 标称值/ $\mu\text{s}$	50%峰值到50%峰值间 时间间隔测量值/ $\mu\text{s}$	系数	短路电流持续时 间实测值/ $\mu\text{s}$	不确定度 ( $k=2$ )
	20		1.18		

## A.5 脉冲磁场模拟器电流峰值

脉冲磁场 设定值/A/m	电流峰值 标称值/A	数字示波器 电压测量值/V	电流变换器 转换系数	电流峰值 实测值/A	不确定度 ( $k=2$ )
100					
300					
1000					

## A.6 脉冲磁场模拟器电流波前时间

脉冲磁场 设定值 /A/m	波前时间 标称值/ $\mu\text{s}$	第一峰值10%到90%的 时间间隔的测量值/ $\mu\text{s}$	系数	电流波前时间 实测值/ $\mu\text{s}$	不确定度 ( $k=2$ )
100	8		1.25		
300					
1000					

## A.7 脉冲磁场模拟器电流持续时间

脉冲磁场 设定值 /A/m	持续时间 标称值/ $\mu\text{s}$	50%峰值到50%峰值间 时间间隔测量值/ $\mu\text{s}$	系数	电流持续时间 实测值/ $\mu\text{s}$	不确定度 ( $k=2$ )
100	20		1.18		
300					
1000					

## A.8 脉冲磁场强度

脉冲磁场 设定值/A/m	电流峰值 实测值/A	感应线圈因数/ 1/m	脉冲磁场 实测值/ A/m	不确定度 ( $k=2$ )
100				
300				
1000				

## 附录 B

## 校准证书内页格式

## B.1 外观及工作正常性检查 \_\_\_\_\_

## B.2 脉冲电流发生器短路电流峰值

开路电压设定值/V	短路电流峰值标称值/A	短路电流峰值实测值/A	不确定度 ( $k=2$ )

## B.3 脉冲电流发生器短路电流波前时间

开路电压设定值/V	标称值/ $\mu\text{s}$	实测值/ $\mu\text{s}$	不确定度 ( $k=2$ )
	8		

## B.4 脉冲电流发生器短路电流持续时间

开路电压设定值/V	标称值/ $\mu\text{s}$	实测值/ $\mu\text{s}$	不确定度 ( $k=2$ )
	20		

## B.5 脉冲磁场模拟器电流峰值

脉冲磁场设定值/A/m	电流峰值标称值/A	电流峰值实测值/A	不确定度 ( $k=2$ )
100			
300			
1000			

## B.6 脉冲磁场模拟器电流波前时间

脉冲磁场设定值/A/m	标称值/ $\mu\text{s}$	实测值/ $\mu\text{s}$	不确定度 ( $k=2$ )
100	8		
300			
1000			

## B.7 脉冲磁场模拟器电流持续时间

脉冲磁场设定值/A/m	标称值/ $\mu\text{s}$	实测值/ $\mu\text{s}$	不确定度 ( $k=2$ )
100	20		
300			
1000			

**B.8 脉冲磁场强度**

脉冲磁场设定值/A/m	脉冲磁场实测值/A/m	不确定度 ( $k=2$ )
100		
300		
1000		

## 附录 C

## 主要项目校准不确定度评定示例

## C.1 短路电流峰值校准不确定度评定

## C.1.1 测量模型及不确定度传播律

## C.1.1.1 考虑了测量系统有限带宽影响后的短路电流峰值的测量模型

$$I_p = \frac{V_{PR}}{R_T} \cdot \frac{1 + \delta R + \delta V}{1 - \left(\frac{\beta}{B}\right)^2}$$

式中,  $I_p$ ——短路电流峰值测量值, A;

$V_{PR}$ ——脉冲电压峰值读数, V;

$R_T$ ——电流探头转移电阻,  $\Omega$ ;

$\delta R$ ——对非重复性的修正, 百分比表示的相对量, 无量纲;

$\delta V$ ——示波器的直流垂直精度, 百分比表示的相对量, 无量纲;

$B$ ——测量系统的-3dB 带宽, kHz;

$\beta$ ——系数, kHz。

## C.1.1.2 不确定度传播律

$$u(I_p) = \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\partial I_p}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i) = \sum_{i=1}^6 [c_i u(x_i)]^2$$

式中,

$$c_1 = \frac{\partial I_p}{\partial V_{PR}} = \frac{1}{R_T} \times \frac{1 + \delta R + \delta V}{1 - \left(\frac{\beta}{B}\right)^2} = 1000(1/\Omega)$$

$$c_2 = \frac{\partial I_p}{\partial R_T} = -\left(\frac{V_{PR}}{R_T^2}\right) \times \frac{1 + \delta R + \delta V}{1 - \left(\frac{\beta}{B}\right)^2} = -933617(A/\Omega)$$

$$c_3 = \frac{\partial I_p}{\partial \delta R} = \left(\frac{V_{PR}}{R_T}\right) \times \frac{1}{1 - \left(\frac{\beta}{B}\right)^2} = 933.6(A)$$

$$c_4 = \frac{\partial I_p}{\partial \delta V} = \left(\frac{V_{PR}}{R_T}\right) \times \frac{1}{1 - \left(\frac{\beta}{B}\right)^2} = 933.6(A)$$

$$c_5 = \frac{\partial I_p}{\partial \beta} = \left( \frac{V_{PR}}{R_T} \right) \times \frac{1 + \delta R + \delta V}{1 - \left( \frac{\beta}{B} \right)^2} \times \frac{2\beta}{B^2} = 0.0023(A/kHz)$$

$$c_6 = \frac{\partial I_p}{\partial B} = \left( \frac{V_{PR}}{R_T} \right) \times \frac{1 + \delta R + \delta V}{\left( 1 - \left( \frac{\beta}{B} \right)^2 \right)^2} \times \frac{2\beta^2}{B^3} = -0.00001(A/kHz)$$

### C.1.2 标准不确定度的评定

#### C.1.2.1 脉冲电压峰值读数引入的标准不确定度 $u_{VPR}(I_p)$

脉冲电压峰值读数  $V_{PR}$  为 0.9336V，假定使用具有内插能力和 8 比特垂直分辨率的示波器条件下得到的，服从三角分布，则

$$u_{VPR}(I_p) = c_1 \times \frac{\left( \frac{V_{PR}}{2 \times 2^8} \right)}{\sqrt{6}} = \frac{1000}{\sqrt{6}} \times \frac{0.9336}{2 \times 2^8} = 0.744(A)$$

#### C.1.2.2 电流探头转移电阻引入的标准不确定度 $u_{RT}(I_p)$

电流探头转移阻抗的估值为 0.001  $\Omega$ ，最大允许误差为  $\pm 5\%$ ，服从矩形分布，则

$$u_{RT}(I_p) = c_2 \times \frac{R_T \times 0.05}{\sqrt{3}} = -933617 \times \frac{0.001 \times 0.05}{\sqrt{3}} = -26.951(A)$$

#### C.1.2.3 测量重复性引入的不确定度分量 $u_{\delta R}(I_p)$

$\delta R$ ：对由于测量仪器、测量装置的布局和试验发生器本身的原因导致对电流峰值  $I_p$  测量的非重复性的量化。用实验方法确定非重复性。这是通过重复测量的样本实验标准差量化的 A 类评估。

重复测量脉冲电压峰值的 10 次数据见表 C.1：

表 C.1 脉冲电压峰值读数 10 次测量数据

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
示值/V	0.936	0.936	0.932	0.928	0.936	0.936	0.936	0.936	0.932	0.928

$$\overline{\delta R} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} \delta R_i = 0.9336(V)$$

单次测量的实验标准差

$$s(\delta R_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (\delta R_i - \overline{\delta R})^2}{10-1}} = 0.003373(V)$$

$$u_{\delta R}(I_p) = c_3 \times \frac{s(I_p)}{I_p} = 933.6 \times \frac{0.003373}{0.9336} = 3.373(A)$$

#### C.1.2.4 示波器直流幅度测量引入的不确定度分量 $u_{\delta V}(I_p)$

示波器直流幅度测量最大允许误差为  $\pm 2\%$ ，服从矩形分布，则

$$u_{\delta V}(I_p) = c_4 u(\delta V) = 933.6 \times \frac{0.02}{\sqrt{3}} = 10.780(A)$$

#### C.1.2.5 系数 $\beta$ 引入的不确定度分量 $u_{\beta}(I_p)$

$\beta$  既取决于测量系统的冲激脉冲响应的形状也取决于峰值附近的标准冲激脉冲波

形，其区间  $(14.8 \pm 1.6)$  kHz 是单向脉冲这类系统的代表，服从矩形分布，则

$$u_{\beta}(I_p) = c_5 u(\beta) = c_5 \times \frac{1.6}{\sqrt{3}} = 0.0023 \times \frac{1.6}{\sqrt{3}} = 0.002(A)$$

#### C.1.2.6 测量系统的-3dB 带宽引入的不确定度分量 $u_B(I_p)$

测量系统由数字存储示波器（带宽  $B_1=500\text{MHz}$ ）和电流探头（带宽  $B_2=3.5\text{MHz}$ ）组成，测量系统带宽  $B$  为

$$B = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{B_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{B_2}\right)^2}} = 3500(\text{kHz})$$

$B$  的最大允差为  $\pm 10\%$ ，服从矩形分布，则

$$u_B(I_p) = c_6 u(B) = c_6 \times \frac{B \times 0.1}{\sqrt{3}} = -0.000010 \times \frac{3500 \times 0.1}{\sqrt{3}} = -0.002(A)$$

#### C.1.3 合成标准不确定度的计算

冲激脉冲短路电流峰值标准不确定度分量汇总表如表C.1所示。

表C.2 冲激脉冲短路电流峰值标准不确定度分量汇总表

符号	估值	单位	误差界	单位	分布	除数	$u(x_i)$	$c_i$	单位	$u_i(I_p)$	单位
$V_{PR}$	0.9336	V	0.0018	V	三角	2.45	0.000744	1000	A/V	0.744	A
$R_T$	0.001	$\Omega$	0.00005	$\Omega$	矩形	1.73	0.00003	-933617	A/ $\Omega$	-26.951	A
$\delta R$	0	1	0.036	1	正态 ( $k=1$ )	1.00	0.0036	933.6	A	3.373	A
$\delta V$	0	1	0.02	1	矩形	1.73	0.01155	933.6	A	10.780	A
$\beta$	14.8	kHz	1.6	kHz	矩形	1.73	0.92376	0.0023	A/kHz	0.002	A
$B$	3500	kHz	350	kHz	矩形	1.73	202.07	-0.000010	A/kHz	-0.002	A
$u_c(I_p) = \sqrt{\sum_{i=1}^{10} u_i(I_p)^2}$										0.0292	kA
$I_p = \frac{V_{PR}}{R_T} \times \frac{1 + \delta R + \delta V}{1 - (\beta/B)^2}$										0.9336	kA
$u_{c,rel}(I_p) = u_c(I_p) / I_p$										3.11%	

#### C.1.4 扩展不确定的确定

$$U_{rel}(I_p) = k \cdot u_{c,rel}(I_p) = 2 \times 3.11\% = 6.3\%, (k=2)$$

### C.2 脉冲磁场的不确定度

#### C.2.1 测量方法

脉冲磁场校准是按照下式进行计算得到。

$$H_p = K_{CF} \times I_p$$

式中,  $I_p$ ——电流峰值测量值, A;  
 $H_p$ ——脉冲磁场峰值, A/m;  
 $K_{CF}$ ——线圈因数, 1/m。

### C.2.2 不确定度来源

经分析, 不确定度来源有以下 2 项:

- (1) 电流峰值引入的不确定度分量  $u_1$ ;
- (2) 线圈因数引入的不确定度分量  $u_2$ ;

### C.2.3 标准不确定度评定

#### C.2.3.1 电流峰值引入的不确定度分量

按照 C.1 的方法评定电流峰值扩展不确定度为 6.3%,  $u_1 = 6.3\%/2 = 3.15\%$

#### C.2.3.2 线圈因数引入的不确定度分量

当线圈为边长 1m 的正方形线圈时,  $K_c = 0.9(1/m)$ , 相对扩展不确定度为 5%,  
 $u_2 = 5\%/2 = 2.5\%$

### C.2.4 合成标准不确定度

以上不确定度分量彼此不相关, 则

$$u_{c,rel}(H_p) = \sqrt{0.0315^2 + 0.025^2} = 4\%$$

### C.2.5 扩展不确定度

脉冲磁场峰值的相对扩展不确定度为:

$$U_{rel}(H_p) = k u_{c,rel} = 2 \times 4\% = 8\%, (k = 2)$$

## C.3 短路电流波前时间校准不确定度评定

### C.3.1 测量模型及不确定度传播律

#### C.3.1.1 考虑了测量系统有限带宽影响后的浪涌脉冲短路电流波前时间的测量模型

$$T_f = 1.25 \sqrt{(T_{90\%} - T_{10\%} + \delta R)^2 - \left(\frac{\alpha}{B}\right)^2}$$

式中,  $T_f$ ——短路电流波前时间测量值,  $\mu\text{s}$ ;  
 $T_{10\%}$ ——10%幅度峰值处时间,  $\mu\text{s}$ ;  
 $T_{90\%}$ ——90%幅度峰值处时间,  $\mu\text{s}$ ;  
 $\delta R$ ——对非重复性的修正,  $\mu\text{s}$ ;  
 $B$ ——测量系统的-3dB 带宽, kHz;  
 $\alpha$ ——系数,  $\mu\text{s} \cdot \text{kHz}$ 。

#### C.3.1.2 不确定度传播律

$$u_c^2(T_f) = \sum_{i=1}^5 \left( \frac{\partial T_f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) = \sum_{i=1}^5 [c_i u(x_i)]^2$$

式中,

$$c_1 = \frac{\partial T_f}{\partial T_{10\%}} = -1.25 \times \left[ (T_{90\%} - T_{10\%} + \delta R)^2 - \left( \frac{\alpha}{\beta} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \times (T_{90\%} - T_{10\%} + \delta R) = -1.2501$$

$$c_2 = \frac{\partial T_f}{\partial T_{90\%}} = 1.25 \times \left[ (T_{90\%} - T_{10\%} + \delta R)^2 - \left( \frac{\alpha}{\beta} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \times (T_{90\%} - T_{10\%} + \delta R) = 1.2501$$

$$c_3 = \frac{\partial T_f}{\partial \delta R} = 1.25 \times \frac{1}{2} \times \left[ (T_{90\%} - T_{10\%} + \delta R)^2 - \left( \frac{\alpha}{\beta} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \times 2(T_{90\%} - T_{10\%} + \delta R) = 1.2501$$

$$c_4 = \frac{\partial T_f}{\partial \alpha} = 1.25 \times \frac{1}{2} \times \left[ (T_{90\%} - T_{10\%} + \delta R)^2 - \left( \frac{\alpha}{\beta} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \times \left( -\frac{1}{B^2} \right) \times 2\alpha = -0.0000005 (1 / \text{kHz})$$

$$c_5 = \frac{\partial T_f}{\partial B} = 1.25 \times \frac{1}{2} \times \left[ (T_{90\%} - T_{10\%} + \delta R)^2 - \left( \frac{\alpha}{\beta} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \times 2\alpha^2 \times \left( \frac{1}{B^3} \right) = 0.0000005 (\mu\text{s} / \text{kHz})$$

### C.3.2 标准不确定度分量的评定

#### C.3.2.1 10%峰值幅度处的时间读数引入的不确定度分量 $u_{T_{10\%}}(T_f)$

10%峰值幅度处的时间读数  $T_{10\%}$  的估值为  $0.41\mu\text{s}$ ，误差界是假定由一台具有  $5\text{GS/s}$  的采样频率和轨迹内插能力的示波器得到的，服从三角分布，则

$$u_{T_{10\%}}(T_f) = c_1 \times \frac{\left( \frac{10^6}{5 \times 10^9 \times 2} \right)}{\sqrt{6}} = \frac{-1.2501}{\sqrt{6}} \times \frac{10^6}{5 \times 10^9 \times 2} = -0.00005 (\mu\text{s})$$

#### C.3.2.2 90%峰值幅度处的时间读数引入的不确定度分量 $u_{T_{90\%}}(T_f)$

90%峰值幅度处的时间读数  $T_{90\%}$  的估值为  $8.11\mu\text{s}$ ，误差界是假定由一台具有  $5\text{GS/s}$  的采样频率和轨迹内插能力的示波器得到的，服从三角分布，则

$$u_{T_{90\%}}(T_f) = c_2 \times \frac{\left( \frac{10^6}{5 \times 10^9 \times 2} \right)}{\sqrt{6}} = \frac{1.2501}{\sqrt{6}} \times \frac{10^6}{5 \times 10^9 \times 2} = 0.00005 (\mu\text{s})$$

#### C.3.2.3 测量重复性引入的不确定度分量 $u_{\delta R}(T_f)$

重复测量 10%~90%波前时间的 10 次数据见表 C.3:

表 C.3 短路电流波前时间 10 次测量数据

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
示值/ $\mu\text{s}$	7.67	7.65	7.59	7.70	7.71	7.74	7.75	7.73	7.69	7.72

$$\bar{T}_f = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} T_{f_i} = 7.70(\mu\text{s})$$

$$\text{单次测量的实验标准差 } u(\delta R) = s(T_{f_i}) \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (T_{f_i} - \bar{T}_f)^2}{10-1}} = 0.0485(\mu\text{s})$$

$$\text{不确定度分量 } u_{\delta R}(T_f) = c_3 u(\delta R) = 1.2501 \times 0.0485 = 0.0606(\mu\text{s})$$

C.3.2.4 系数  $\alpha$  引入的不确定度分量  $u_\alpha(T_f)$

$\alpha$  取决于测量系统的冲激脉冲响应的形状，区间  $(360 \pm 40) \mu\text{s} \cdot \text{kHz}$  是单向冲激脉冲这类系统的代表，

$$u_\alpha(T_f) = c_4 \times \frac{40}{\sqrt{3}} = -5 \times 10^{-6} \times \frac{40}{\sqrt{3}} = -0.0001(\mu\text{s})$$

C.3.2.5 测量系统的-3dB 带宽引入的不确定度分量  $u_B(T_f)$

该不确定度分量评定方法与 1.2.6 节相同。

$$u_B(T_f) = c_5 \times \frac{B \times 0.1}{\sqrt{3}} = 0.5 \times 10^{-6} \times \frac{3500 \times 0.1}{\sqrt{3}} = 0.0001(\mu\text{s})$$

C.3.3 合成标准不确定度的计算

冲激脉冲短路电流波前时间标准不确定度分量汇总表如表C.4所示。

表C.4 冲激脉冲短路电流波前时间标准不确定度分量汇总表

符号	估值	单位	误差界	单位	分布	除数	$u(x_i)$	$c_i$	单位	$u_i(T_f)$	单位
$T_{10\%}$	0.41	$\mu\text{s}$	0.0001	$\mu\text{s}$	三角	2.45	0.00004	-1.2501	1	-0.00005	$\mu\text{s}$
$T_{90\%}$	8.11	$\mu\text{s}$	0.0001	$\mu\text{s}$	三角	2.45	0.00004	1.2501	1	0.00005	$\mu\text{s}$
$\delta R$	0	$\mu\text{s}$	0.0485	$\mu\text{s}$	正态 ( $k=1$ )	1.00	0.0485	1.2501	1	0.0606	$\mu\text{s}$
$\alpha$	360	$\mu\text{s} \cdot \text{kHz}$	40	$\mu\text{s} \cdot \text{kHz}$	矩形	1.73	23.0940	$-5 \times 10^{-6}$	1/kHz	-0.0001	$\mu\text{s}$
$B$	3500	kHz	350	kHz	矩形	1.73	202.0726	$-5 \times 10^{-7}$	$\mu\text{s}/\text{kHz}$	0.0001	$\mu\text{s}$
$u_c(T_f) = \sqrt{\sum_{i=1}^{10} u_i(T_f)^2}$										0.0606	$\mu\text{s}$
$T_f = 1.25 \sqrt{(T_{90\%} - T_{10\%} + \delta R)^2 - T_{MS}^2}$										9.62	$\mu\text{s}$
$u_{c\text{rel}}(T_f) = u_c(T_f) / T_f$										0.63%	$\mu\text{s}$

C.3.4 扩展不确定的确定

$$U_{\text{rel}}(T_f) = k \cdot u_{c\text{rel}}(T_f) = 2 \times 0.63\% = 1.3\%, (k=2)$$