

同意报批。

邵建平 2015.10.17

JJF

# 贵州省地方计量技术规范

JJF (黔) ××-××××

## 高频开关电源校准规范

Calibration Specification for High-frequency Switching Power Supply

(报批稿)

20 XX-XX-XX 发布

20 XX-XX-XX 实施

贵州省市场监督管理局 发布

# 高频开关电源校准规范

Calibration Specification for

High-frequency Switching Power Supply

JJF (黔) XX—XXXX

归口单位：贵州省市场监督管理局

主要起草单位：贵州航天计量测试技术研究所

贵州省计量测试院

本规范委托贵州航天计量测试技术研究所负责解释

# 高频开关电源校准规范

Calibration Specification for  
High-frequency Switching Power Supply

JJF (黔) XX—XXXX

归口单位：贵州省市场监督管理局

主要起草单位：贵州航天计量测试技术研究所

贵州省计量测试院

本规范委托贵州航天计量测试技术研究所负责解释

**本规范主要起草人：**

李金阳（贵州航天计量测试技术研究所）

朱永晓（贵州航天计量测试技术研究所）

李 骋（贵州省计量测试院）

**参加起草人：**

杨 建（贵州航天计量测试技术研究所）

李银川（贵州航天计量测试技术研究所）

杜鸿程（贵州省计量测试院）

龚 雪（贵州省计量测试院）

# 目 录

引言 .....	(II)
1 范围 .....	(1)
2 引用文件 .....	(1)
3 术语和计量单位 .....	(1)
4 概述 .....	(2)
5 计量特性 .....	(2)
5.1 电压示值误差 .....	(2)
5.2 电流示值误差 .....	(2)
5.3 输出电压短期稳定性 .....	(2)
5.4 输出电流短期稳定性 .....	(2)
5.5 负载调整率 .....	(3)
5.6 纹波系数 .....	(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)
7.2 校准方法 .....	(4)
8 校准结果表达 .....	(8)
8.1 校准记录 .....	(8)
8.2 校准证书 .....	(9)
9 复校时间间隔 .....	(9)
附录 A 校准原始记录格式 .....	(10)
附录 B 校准证书内页格式 .....	(12)
附录 C 校准结果不确定度评定示例 .....	(14)

# 引 言

本规范按照 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》和 JJF 1001-2011《通用计量术语及定义》等基础性系列规范进行制定。



# 高频开关电源校准规范

## 1 范围

本规范适用于交流供电的额定输出电压 50 V 及以下、额定输出电流 10 kA 及以下直流输出的高频开关电源的校准。

本规范不适用于直流供电的高频开关电源的校准。

## 2 引用文件

本规范引用了下列文件：

GB/T 17478-2004 低压直流电源设备的性能特性

GB/T 21560.6-2008 电压直流电源 第 6 部分：评定低压直流源性能的要求

JB/T 1504-1993 电镀用整流设备

YD/T 731-2008 通信用高频开关整流器

YD/T 1058-2015 通信用高频开关电源系统

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡是不注明日期的引用文件，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 短期稳定性 short-term stability

在其他条件保持不变的情况下，规定时间间隔内输出量的最大变化。

### 3.2 负载调整率 load regulation

在其他影响量保持不变时，额定功率状态下由于负载的变化，所引起输出电压变化量与额定输出电压的相对变化量。

### 3.3 纹波系数 ripple factor

直流输出电压中包含的交流分量的有效值（方均根值）与直流分量的绝对值之比（用百分数表示）。



## 4 概述

高频开关电源主要为负载设备提供电能。通常包括整流滤波电路、DC/DC 转换电路、脉宽调制 (PWM) 控制与驱动电路、滤波电路、取样反馈控制电路、采样电阻等组成。高频开关电源按显示类型,可分为数字式和模拟式;按工作模式,分为稳压和稳流。高频开关电源原理框图如图 1 所示。

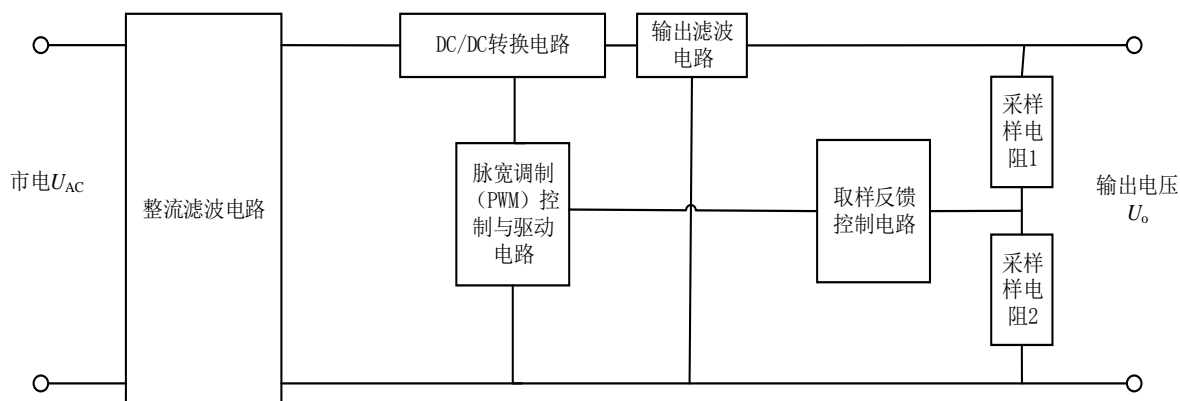


图 1 高频开关电源原理框图

## 5 计量特性

### 5.1 电压示值误差

高频开关电源电压示值的最大允许误差见表1。

表 1 高频开关电源电压示值的最大允许误差

准确度等级	0.5 级	1 级	2 级	5 级
最大允许误差	$\pm 0.5\%$	$\pm 1\%$	$\pm 2\%$	$\pm 5\%$

### 5.2 电流示值误差

高频开关电源电流示值的最大允许误差见表2。

表 2 高频开关电源电流示值的最大允许误差

准确度等级	0.5 级	1 级	2 级	5 级
最大允许误差	$\pm 0.5\%$	$\pm 1\%$	$\pm 2\%$	$\pm 5\%$

### 5.3 输出电压短期稳定性

电源工作在稳压模式时,在规定的时间内(最短 10 min),输出电压最大变化量的相对值应不大于最大允许误差相对值的 1/2。

### 5.4 输出电流短期稳定性

电源工作在稳流模式时，在规定的时间内（最短 10 min），输出电流最大变化量的相对值应不大于最大允许误差相对值的 1/2。

### 5.5 负载调整率

稳压工作模式，其额定负载输出电压与空载输出电压变化量的相对值应不大于其最大允许误差相对值的 1/2。

### 5.6 纹波系数

稳压工作模式纹波系数不超过 10%。

注：以上技术指标不用于合格性判定，仅供参考。

## 6 校准条件

### 6.1 环境条件

6.1.1 环境温度：(20±10)℃。

6.1.2 相对湿度：25%~75%。

6.1.3 供电电源：相电压(220±22)V，频率(50±1)Hz。

6.1.4 其他：周围无影响仪器正常工作的电磁干扰和机械振动，并具有良好的接地。

### 6.2 测量标准及其他设备

测量标准及其他设备技术要求见表 3。

表 3 测量标准及其他设备技术要求

测量标准及其他设备名称	技术要求
直流电压表	电压测量范围：10 mV~100 V，输入电阻大于 1 MΩ； 最大允许误差：± (0.1%~1%)。
直流电流传感器或直流分流器	电流测量范围：10 mA~10 kA； 最大允许误差：± (0.1%~1%)。
数字示波器或高频有效值电压表	带宽不低于 20 MHz； 数字示波器垂直增益最大允许误差不超过±5%； 高频有效值电压表电压有效值测量范围 10 mV~10 V，最大允许误差不超过±5%。
无极性电容器	容值：0.1 μF（陶瓷电容器）、10 μF（金属薄膜电容器），额定电压不低于 100 V。
直流电子负载或电阻负载装置	能够承受高频开关电源校准时额定功率电压电流在规定范围内的变化。

## 7 校准项目和校准方法

### 7.1 校准项目

校准项目一览表见表 4。

表 4 校准项目一览表

序号	校准项目
1	电压示值误差
2	电流示值误差
3	输出电压短期稳定性
4	输出电流短期稳定性
5	纹波系数
6	负载调整率

### 7.2 校准方法

#### 7.2.1 校准前准备

##### 7.2.1.1 校准前检查

##### a) 外观检查

被校高频开关电源的仪器名称、型号、出厂编号、制造厂名或商标、额定输入电压和频率、输出参数额定值、端钮标志等信息应齐全；端钮、开关、按键或调节旋钮应无松动、损伤、脱落；各种功能标志应齐全正确。

##### b) 工作正常性检查

通电后，开关电源各开关、按键、调节旋钮、显示屏、测量仪表和各种状态指示灯（标志）应正常工作。

#### 7.2.2 电压示值误差

a) 数字式高频开关电源的校准点应在量程 10%~100%之间均匀选取，每个量程选取 3~5 个校准点，至少包括量程的 10%、50%和接近 100%点；模拟式高频开关电源的校准点应选取某一量程标有数字刻度的点，其他量程选取满刻度点和半量程点。

注：为满足客户预期用途，可根据用户实际需求选择校准点；固定输出的高频开关电源校准点为其标称值。

b) 高频开关电源空载状态下，电压示值误差的校准仪器接线图如图 2 所示。

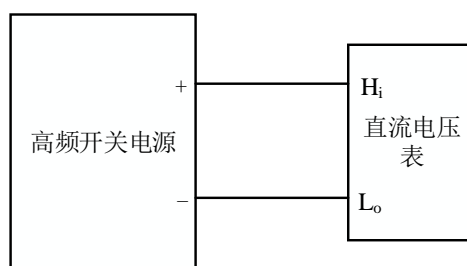


图2 电压示值误差校准接线图

c) 根据校准点，选择直流电压表相应的测量量程。

d) 高频开关电源设置为稳压模式，按校准点设置调节输出电压，读取并记录高频开关电源电压示值和直流电压表的测量值。

e) 电压示值误差按公式 (1) 计算。

$$\Delta U = U_x - U_N \quad (1)$$

式中：

$\Delta U$ ——电压示值误差，V；

$U_x$ ——高频开关电源电压示值，V；

$U_N$ ——直流电压表的测量值，V。

### 7.2.3 电流示值误差

a) 数字式高频开关电源的校准点应在量程 10%~100%之间均匀选取，每个量程选取 3~5 个校准点，至少包括量程的 10%、50%和接近 100%点；模拟式高频开关电源的校准点应选取某一量程标有数字刻度的点，其他量程选取满刻度点和半量程点。

注：为满足客户预期用途，可根据用户实际需求选择校准点；固定输出的高频开关电源校准点为其标称值。

b) 电流示值误差的校准仪器接线图如图 3 所示。

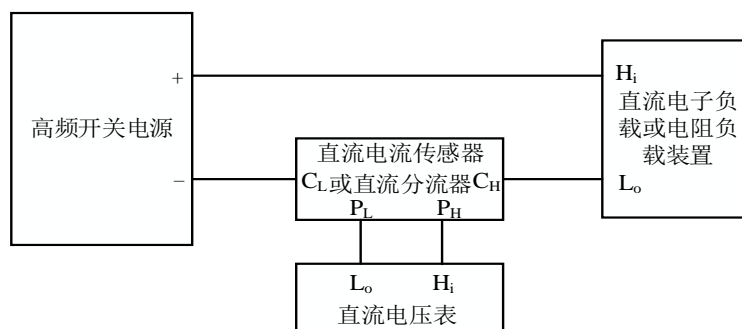


图3 电流示值误差校准接线图

c) 根据校准点所选择直流电流传感器或直流分流器的电压转换输出范围, 设置直流电压表相应的测量量程。

d) 高频开关电源设置为稳流模式, 按校准点设置调节输出电流, 读取并记录高频开关电源电流示值和直流电压表的测量值。

e) 电流示值误差按公式 (2) 计算。

$$\Delta I = I_x - G U_0 \quad (2)$$

式中:

$\Delta I$ ——电流示值误差, A;

$I_x$ ——高频开关电源电流示值, A;

$G$ ——直流电流传感器或直流分流器的电流电压转换比例系数, A/V;

$U_0$ ——直流电压表测量值, V。

#### 7.2.4 输出电压短期稳定性

a) 输出电压短期稳定性的校准仪器接线图如图 4 所示。

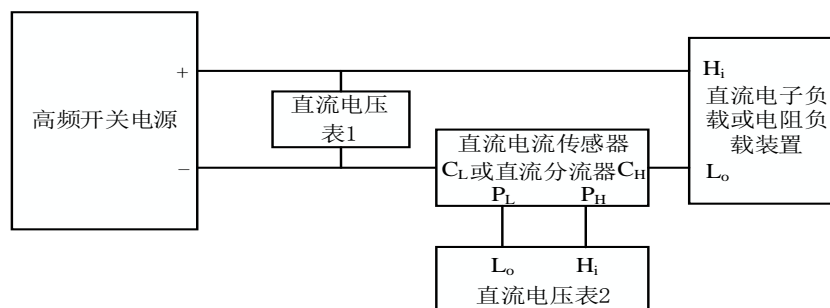


图 4 输出电压短期稳定性校准接线图

b) 高频开关电源设置为稳压模式, 设置调节输出电压或回路负载, 使其达到额定输出功率状态, 输出稳定后, 记录此时的直流电压表 1 的初始测量值。随即在规定时间内 (不少于 10 min) 间隔内记录直流电压表 1 的测量值, 并从所有的测量值中选取最大值和最小值。

c) 输出电压短期稳定性按公式 (3) 计算。

$$S_{ev} = \left| \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_s} \right| \times 100\% \quad (3)$$

式中:

$S_{ev}$ ——输出电压短期稳定性, %;

$U_s$ ——额定功率输出直流电压表 1 初始测量值, V;

$U_{\max}$ ——规定时间间隔直流电压表 1 测量的最大值, V;

$U_{\min}$ ——规定时间间隔直流电压表 1 测量的最小值, V。

### 7.2.5 输出电流短期稳定性

a) 输出电流短期稳定性的校准仪器接线如按图 4 所示;

b) 高频开关电源设置为稳流模式, 设置调节输出电流或回路负载, 使其达到额定输出功率状态, 输出稳定后, 记录此时的电流传感器或直流分流器测量直流电压表 2 的初始测量值。随即在规定时间 (不少于 10 min) 间隔内记录电流传感器或直流分流器输出直流电压表 2 的测量值, 并从所有的测量值中选取最大值和最小值。

c) 输出电流短期稳定性按公式 (4) 计算。

$$S_{eI} = \left| \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_s} \right| \times 100\% \quad (4)$$

式中:

$S_{eI}$ ——输出电的短期稳定性, %;

$U_s$ ——额定功率输出电流传感器或直流分流器的直流电压表 2 初始测量值, V;

$U_{\max}$ ——规定时间间隔电流传感器或直流分流器的直流电压表 2 最大电压值, V;

$U_{\min}$ ——规定时间间隔电流传感器或标准分流器的直流电压表 2 最小电压值, V。

### 7.2.6 纹波系数

a) 为消除非常高频率噪声及尖峰和较低频率噪声对测试结果影响, 在靠近输出端同时并联 0.1  $\mu$ F 和 10  $\mu$ F 无极性电容器, 纹波系数校准接线图如图 5 所示。

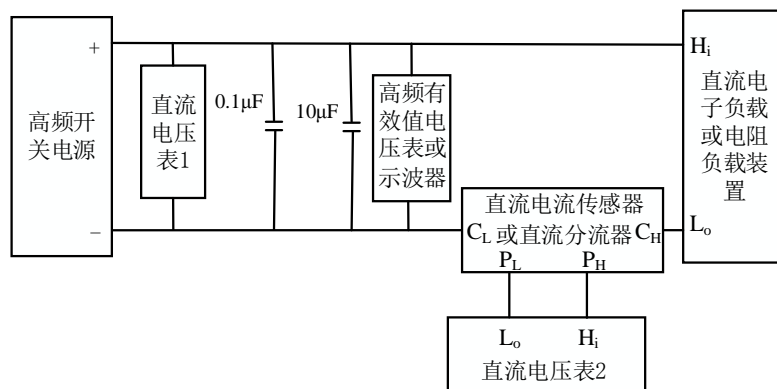


图 5 纹波系数校准接线图

b) 高频开关电源设置为稳压模式，设置调节输出电压或负载，使其达到额定输出功率状态，输出稳定后，记录此时的直流电压表 1 电压值和高频有效值电压表或示波器有效值电压。

c) 纹波系数按公式 (5) 计算。

$$\gamma = \frac{U_{\text{rms}}}{U_s} \times 100\% \quad (5)$$

式中：

$\gamma$ ——纹波系数，%；

$U_s$ ——额定功率输出直流电压表 1 初始测量值，V；

$U_{\text{rms}}$ ——高频有效值电压表或示波器测量纹波电压有效值，V。

### 7.2.7 负载调整率

a) 负载调整率的校准接线如图 4 所示。

b) 高频开关电源设置为稳压模式，设置调节输出电压或负载，使其达到额定输出功率状态，输出稳定后，记录此时直流电压表 1 的测量值。

c) 断开负载（空载），输出稳定后再次记录直流电压表 1 的测量值。

d) 负载调整率按公式 (6) 计算。

$$S_L = \left| \frac{U_s - U_N}{U_N} \right| \times 100\% \quad (6)$$

式中：

$S_L$ ——负载调整率，%；

$U_s$ ——额定功率输出直流电压表 1 测量值，V；

$U_N$ ——空载额定电压输出直流电压表 1 测量值，V。

## 8 校准结果表达

### 8.1 校准结果处理

校准结果应在校准证书上反映，校准证书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或应用有关时，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) 校准证书或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，不得部分复制证书的声明。

## 8.2 校准记录与证书内页、不确定度评定

校准原始记录格式见附录 A，校准证书内页格式见附录 B，校准结果测量不确定度评定示例见附录 C。

## 9 复校时间间隔

由于复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者、仪器本身质量等诸因素所决定的，因此，送校单位也可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔。建议复校时间间隔不超过 12 个月。



## 附录 A

## 校准原始记录格式

第 页 共 页

委托单位:			记录编号:			
通讯地址:			仪器设备名称:			
型号/规格:	出厂编号:		制造单位:			
仪器外观及通电检查:						
不确定度或准确度或最大允许误差						
仪器设备接收日期:						
环境温度:      °C		相对湿度:      %		其他:		
校准地点:						
校准所依据文件:						
校准所使用的计量标准装置/主要仪器						
名称	型号/规格	出厂编号	测量范围	不确定度或准确度 或最大允许误差	证书编号	有效期

## 校准原始记录格式 (续)

第 页 共 页

一、电压示值误差:				
显示值	实测值	示值误差	测量不确定度 ( $k=2$ )	
二、电流示值误差:				
显示值	实测值	示值误差	测量不确定度 ( $k=2$ )	
三、输出电压的短期稳定性:				
加载额定电压	记录时间间隔	记录电压值	短期稳定性	测量不确定度 ( $k=2$ )
四、输出电流的短期稳定性:				
加载额定电流	记录时间间隔	记录电流值	短期稳定性	测量不确定度 ( $k=2$ )
五、纹波系数:				
加载额定电压	纹波电压有效值	纹波系数	测量不确定度 ( $k=2$ )	
六、负载调整率:				
加载电压	空载电压	负载调整率	测量不确定度 ( $k=2$ )	

校准员: \_\_\_\_\_ 年 月 日      核验员: \_\_\_\_\_ 年 月 日

## 附录B

## 校准证书内页格式

证书编号：

校准机构授权说明：					
校准所使用的计量标准装置/主要仪器					
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	证书有效期至 (YYYY-MM-DD)	
校准所依据/参照的技术文件（代号、名称）：					
样品接收日期：					
温度	℃	相对湿度	%	其他	
地点					

注：

- 1 未经本机构书面授权，不得部分复制证书；
- 2 本证书的校准结果仅对本次所校准的对象有效；
- 3 被校计量器具修理后，应立即重新校准；
- 4 在使用过程中，如对被校准计量器具的技术指标产生怀疑，请重新校准；
- 5 本证书仅对加盖“XXXXXX 校准专用章”的完整证书负责。

## 校准结果

第 页 共 页

证书编号:

一、电压示值误差:			
显示值	实测值	示值误差	测量不确定度 ( $k=2$ )
二、电流示值误差:			
显示值	实测值	示值误差	测量不确定度 ( $k=2$ )
三、输出电压的短期稳定性:			
四、输出电流的短期稳定性:			
五、纹波系数:			
六、负载调整率:			

## 附录 C

### 校准结果测量不确定度评定示例

#### C.1 概述

本附录给出高频开关电源校准项目中电压示值误差、电流示值误差和纹波系数三项典型参数校准结果测量不确定度评定示例。

##### C.1.1 环境条件

环境温度：25.2℃；

相对湿度：65%；

供电电源：相电压 225V，频率 50.5Hz。

##### C.1.2 测量标准和被校对象

###### C.1.2.1 测量标准

直流电压表 1：电压测量范围 10 mV~100 V，输入电阻 10 MΩ，最大允许误差 $\pm 10^{-4}$ ；

直流电流传感器：电流测量范围 100 A~8 kA，最大允许误差 $\pm 0.5\%$ ；

直流电压表 2：电压测量范围 10 mV~100 V，输入电阻 10 MΩ，最大允许误差 $\pm 10^{-4}$ ；

高频有效值电压表：有效值电压测量范围 1 mV~10 V，带宽 200 MHz，最大允许误差 $\pm 4\%$ 。

###### C.1.2.2 被校对象

高频开关电源（数字式，RDX-PWH）：额定输出电压 12 V，电流 8 kA，最大允许误差 $\pm 5\%$ 。

#### C.2 电压示值误差校准结果的测量不确定度评定

##### C.2.1 测量方法

采用直接测量法，按照 7.2.2 中对应的测量方法，将被校高频开关电源与测量标准进行连接，设置调节高频开关电源输出校准点。同时读取被校高频开关电源的电压显示值和直流电压表的测量值，此时高频开关电源的电压显示值与直流电压表的测量值之差即为被校高频开关电源电压示值误差。

##### C.2.2 测量模型

用直流电压表直接对高频开关电源的 10 V 电压示值误差进行校准，其电压示值误差的测量模型可用公式 (C.1) 表示。

$$\Delta U = U_X - U_N \quad (\text{C.1})$$

式中：

$\Delta U$ ——电压示值误差，V；

$U_X$ ——被校高频开关电源电压示值，V；

$U_N$ ——直流电压表测量值，V。

当各输入量的不确定度不相关时，则其测量不确定度传播可用公式 (C.2) 表示。

$$(u_c(\Delta U))^2 = (c(U_X))^2 \times (u(U_X))^2 + (c(U_N))^2 \times (u(U_N))^2 \quad (\text{C.2})$$

式中，式中灵敏系数为

$$c(U_X)=1, \quad c(U_N)=-1$$

### C.2.3 标准不确定度来源

#### C.2.3.1 $u(U_X)$ 的来源如下：

- 被校高频开关电源电压示值重复性引入的标准不确定度  $u_1(U_X)$ ；
- 被校高频开关电源电压示值分辨力引入的标准不确定度  $u_2(U_X)$

#### C.2.3.2 $u(U_N)$ 的来源如下：

直流电压表的最大允许误差引入的标准不确定度  $u(U_N)$ 。

### C.2.4 标准不确定度的评定

#### C.2.4.1 被校高频开关电源电压示值重复性引入的标准不确定度 $u(U_X)$

- 测量重复性引入的标准不确定度  $u(U_X)$

被校高频开关电源调节输出 10V 电压，通过直流电压表读取实测数据，在重复条件下，重复测量 10 次的读数如表 C.1 所示。

表 C.1 电压重复性测量数据

次数	$x_i/\text{V}$	次数	$x_i/\text{V}$
1	10.005	6	10.003
2	10.008	7	10.006
3	10.006	8	10.005
4	10.004	9	10.006
5	10.006	10	10.004

测量结果的平均值:  $\bar{x} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} x_i = 10.0053 \text{ V}$

单次测量值的实验标准偏差:  $s_n(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 0.0014 \text{ V}$

$$u(U_X) = 0.0014 \text{ V}$$

b) 被校高频开关电源电压示值分辨力引入的标准不确定度  $u_2(U_X)$

根据被校高频开关电源说明书和显示可知, 其在 10 V 点测量分辨力为 0.01 V, 其区间半宽度为 0.005 V, 服从均匀分布, 包含因子  $k = \sqrt{3}$ , 则被校高频开关电源电压示值分辨力引入的标准不确定度  $u_2(U_X)$  为:

$$u_2(U_X) = 0.005 \text{ V} / \sqrt{3} = 0.0029 \text{ V}$$

#### C.2.4.2 直流电压表最大允许误差引入的标准不确定度 $u(U_N)$

直流电压表经校准, 符合技术指标要求, 根据直流电压表 10 V 技术指标, 其最大允许误差为  $\pm 0.0004 \text{ V}$ , 则区间的半宽度  $a = 0.0004 \text{ V}$ , 视为均匀分布, 包含因子  $k = \sqrt{3}$ , 则直流电压表最大允许误差引入的标准不确定度为:

$$u(U_N) = a/k = 0.0004 \text{ V} / \sqrt{3} = 0.00023 \text{ V}$$

#### C.2.5 合成标准不确定度 $u_c$

不确定度分量汇总见表 C.2。灵敏系数由公式 (C.2) 得到。

表 C.2 不确定度分量汇总表

输入量 $X_i$	不确定度来源	标准表不确定度 $u(x_i)$	概率分布	灵敏系数	不确定度分量 $u_i$
$Z_X$	高频开关电源的重复性	0.0014 V	正态	1	0.0014 V
$Z_s$	直流电压表最大允许误差	0.00023 V	均匀	-1	-0.00023 V
$\delta Z_X$	高频开关电源的分辨力	0.0029 V	均匀	1	0.0029 V

考虑到被校高频开关电源读数的重复性和分辨力存在重复, 在合成标准不确定度时将二者中较小值舍去, 则:

$$u_c(\Delta U) = \sqrt{(u(U_X))^2 + (u(U_N))^2} = \sqrt{(0.0029)^2 + (0.00023)^2} \text{ V} = 0.0029 \text{ V}$$

### C.2.6 扩展不确定度

取包含因子  $k=2$ ，则电压示值误差的扩展不确定度为：

$$U(\Delta U)=2\times 0.0029\text{ V}=0.0058\text{ V}\approx 0.006\text{ V}$$

## C.3 电流示值误差校准结果的不确定度评定

### C.3.1 测量方法

采用直接测量法，按照 7.2.3 中对应的测量方法，将被校高频开关电源与测量标准进行连接，设置调节高频开关电源输出校准点，同时读取被校高频开关电源的电流显示值和直流电流传感器的电流测量值，此时高频开关电源的电压显示值与直流电流传感器的测量值之差即为被校高频开关电源电流示值误差。

### C.3.2 测量模型

用直流电流传感器直接对高频开关电源的 2000 A 电流示值误差进行校准，其电流示值误差的测量模型可用公式 (C.3) 表示。

$$\Delta I = I_X - I_N \quad (\text{C.3})$$

式中：

$\Delta I$ ——电流示值误差，A；

$I_X$ ——被校高频开关电源电流示值，A；

$I_N$ ——直流电流传感器测量标准测量值，A。

当各输入量的不确定度不相关时，则其测量不确定度传播可用公式 (C.4) 表示。

$$(u_c(\Delta I))^2 = (c(I_X))^2 \times (u(I_X))^2 + (c(I_N))^2 \times (u(I_N))^2 \quad (\text{C.4})$$

式中，式中灵敏系数为

$$c(I_X)=1, \quad c(I_N)=-1$$

### C.3.3 标准不确定度来源

#### C.3.3.1 $u(I_X)$ 的来源如下：

- 被校高频开关电源电流示值重复性引入的标准不确定度  $u_1(I_X)$ ；
- 被校高频开关电源电流示值分辨力引入的标准不确定度  $u_2(I_X)$

#### C.3.3.2 $u(I_N)$ 的来源如下：

直流电流传感器的最大允许误差引入的标准不确定度  $u(I_N)$ 。

### C.3.4 标准不确定度的评定



C.3.4.1 被校高频开关电源电流示值重复性引入的标准不确定度  $u(I_X)$ a) 测量重复性引入的标准不确定度  $u(I_X)$ 

被校高频开关电源调节恒流输出 2000 A 的电流值，通过直流电流传感器测量读取实测数据，在重复条件下，重复测量 10 次的读数如表 C.3 所示。

表 C.3 电流重复性测量数据

次数	$x_i/\text{A}$	次数	$x_i/\text{A}$
1	1990	6	1995
2	1992	7	1994
3	1996	8	1992
4	1995	9	1994
5	1996	10	1993

测量结果的平均值： $\bar{x} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} x_i = 1993.7 \text{ A}$

单次测量值的实验标准偏差： $s_n(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 1.9 \text{ A}$

$$u(I_X) = 1.9 \text{ A}$$

b) 被校高频开关电源电流示值分辨力引入的标准不确定度  $u_2(I_X)$ 

根据被校高频开关电源说明书和显示可知，其在 2000 A 点测量分辨力为 1 A，其区间半宽度为 0.5 A，服从均匀分布，包含因子  $k = \sqrt{3}$ ，则被校高频开关电源电流示值分辨力引入的标准不确定度  $u_2(I_X)$  为：

$$u_2(I_X) = 0.5 \text{ A} / \sqrt{3} = 0.29 \text{ A}$$

C.3.4.2 直流电流传感器最大允许误差引入的标准不确定度  $u(I_N)$ 

直流电流传感器经校准，符合技术指标要求，根据标准 2000 A 技术指标，其最大允许误差为  $\pm 10 \text{ A}$ ，则区间的半宽度  $a = 10 \text{ A}$ ，视为均匀分布，包含因子  $k = \sqrt{3}$ ，则最大允许误差引入的标准不确定度为：

$$u(U_N) = a/k = 10 \text{ A} / \sqrt{3} = 5.8 \text{ A}$$

C.3.5 合成标准不确定度  $u_c$

不确定度分量汇总见表 C.4。灵敏系数由公式 (C.4) 得到。

表 C.4 不确定度分量汇总表

输入量 $X_i$	不确定度来源	标准表不确定度 $u(X_i)$	概率分布	灵敏系数	不确定度分量 $u_i$
$Z_x$	被校高频开关电源的重复性	1.9 A	正态	1	1.9 A
$Z_s$	直流电流传感器最大允许误差	5.8 A	均匀	-1	-5.8 A
$\delta Z_x$	被校高频开关电源的分辨力	0.29 A	均匀	1	0.29 A

考虑到被校高频开关电源读数的重复性和分辨力存在重复, 在合成标准不确定度时将二者中较小值舍去, 则:

$$u_c(\Delta I) = \sqrt{(u(I_x))^2 + (u(I_N))^2} = \sqrt{(1.9)^2 + (5.8)^2} \text{ A} = 6.1 \text{ A}$$

### C.3.6 扩展不确定度

取包含因子  $k=2$ , 则电流示值误差的扩展不确定度为:

$$U(\Delta I) = 2 \times 6.1 \text{ A} = 12.2 \text{ A} \approx 12 \text{ A}$$

## C.4 纹波系数校准结果的不确定度评定

### C.4.1 测量方法

采用直接测量法, 按照 7.2.6 中对应的测量方法, 将被校高频开关电源与测量标准进行连接, 设置调节高频开关电源使其达到稳定功率输出状态, 同时高频有效值电压表的测量值, 此时高频有效值电压表的测量值即为被校高频开关电源的纹波电压。

### C.4.2 测量模型

用高频有效值电压表对被校高频开关电源额定 12 V 输出电压的纹波电压进行测量, 纹波电压的测量模型可用公式 (C.5) 表示。

$$U_{\text{rms}} = U_{\text{rms}} \quad (\text{C.5})$$

式中:

$U_{\text{rms}}$ ——被校高频开关电源的纹波电压, V;

$U_{\text{rms}}$ ——高频有效值电压表的纹波电压标准值, V。

### C.4.3 标准不确定度来源

- 高频有效值电压表最大允许误差引入的标准不确定度  $u_1$ ;
- 高频有效值电压表分辨力引入的标准不确定度  $u_2$ ;

c) 测量重复性引入的标准不确定度  $u_3$ 。

#### C.4.4 标准不确定度的评定

a) 高频有效值电压表最大允许误差引入的标准不确定度  $u_1$

高频有效值电压表经校准, 符合技术指标要求, 根据标准 380 mV 量程技术指标, 其最大允许误差为  $\pm (4\% \text{ 读数} + 0.5\% \text{ 量程})$ , 即 300 mV 点最大允许误差为  $\pm 14 \text{ mV}$ , 则区间的半宽度  $a=14 \text{ mV}$ , 视为均匀分布, 包含因子  $k=\sqrt{3}$ , 则最大允许误差引入的标准不确定度为:

$$u_1 = a/k = 14 \text{ mV} / \sqrt{3} = 8.1 \text{ mV}$$

b) 高频有效值电压表分辨力引入的标准不确定度  $u_2$

根据高频有效值电压表的说明书和显示可知, 380 mV 测量量程分辨力为 1 mV, 其区间半宽度为 0.5 mV, 服从均匀分布, 包含因子  $k=\sqrt{3}$ , 则高频有效值电压表测量分辨力引入的标准不确定度  $u_2$  为:

$$u_2 = 0.5 \text{ mV} / \sqrt{3} = 0.29 \text{ mV}$$

c) 测量重复性引入的标准不确定度  $u_3$

对被校高频开关电源额定 12 V 输出的电压的纹波电压进行重复测量, 在重复条件下, 重复测量 10 次的读数如表 C.5 所示。

表 C.5 纹波电压重复性测量数据

次数	$x_i/\text{mV}$	次数	$x_i/\text{mV}$
1	305	6	302
2	301	7	306
3	310	8	302
4	306	9	303
5	302	10	309

测量结果的平均值:  $\bar{x} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} x_i = 304.6 \text{ mV}$

单次测量值的实验标准偏差:  $s_n(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 3.1 \text{ mV}$

$$u_3=3.1 \text{ mV}$$

#### C.4.5 合成标准不确定度 $u_c$

不确定度分量汇总见表 C.6。

表 C.6 不确定度分量汇总表

输入量 $X_i$	不确定度来源	标准表不确定度 $u(X_i)$	概率分布	不确定度分量 $u_i$
$Z_x$	测量重复性	3.1 mV	正态	3.1 mV
$Z_s$	高频有效值电压表最大允许误差	8.1 mV	均匀	8.1 mV
$\delta Z_s$	高频有效值电压表的分辨力	0.29 mV	均匀	0.29 mV

考虑到测量重复性和分辨力存在重复，在合成标准不确定度时将二者中较小值舍去，则：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_3^2} = \sqrt{(8.1)^2 + (3.1)^2} \text{ mV} = 8.7 \text{ mV}$$

#### C.4.6 扩展不确定度

取包含因子  $k=2$ ，则纹波电压的扩展不确定度为：

$$U = 2 \times 8.7 \text{ mV} = 17.4 \text{ mV} \approx 17 \text{ mV}$$

纹波电压扩展不确定度的相对值，即纹波系数  $\gamma$  的扩展不确定度为：

$$U_{\text{rel}} = \frac{0.017\text{V}}{12\text{V}} \times 100\% = 0.14\% \quad (k=2)$$