



目 次

前言	i
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
3.1 测量系统	1
3.2 测量系统组件	2
3.3 刻度因数	3
3.4 额定值	3

附录 E (资料性附录) 对特定波形的参数限值规定 91

附录 F (资料性附录) 电压耐受能力 91

GB/T 16927.4—2014



本部分主要起草人：雷民、崔东、李前、任稳柱、王安、田恩文、袁渊、杨春燕、危鹏、王建生、赵伟、王亭、李鹤。

本部分参加起草人：周琼芳、杨左、吕建玉、陈奎、周远翔、殷晶辉、张勐、李新春、赵鸿飞、张建新、赵建沛、张东宁、邓永辉、肖敏英、艾晓宇、余青、江波、蒲路、卢军、李喜贵。

高电压和大电流试验技术 第4部分： 试验电流和测量系统的定义和要求

1 范围

GB/T 16927 的本部分规定了以下内容：

- 定义所使用的术语；
- 定义参数和容差；
- 给出大电流测量不确定度的估算方法；
- 规定完整测量系统应满足的要求；
- 给出测量系统的认可方法及其组件的校核方法；

仅由以上某些组件组成或基于非传统原理的测量系统,只要符合本部分规定的不确定度要求也是可以接受的。

注2: 测量系统所处的环境,如与带电体、载流导体和接地物体的净距,周围有无电场或磁场都可能明显影响测量结果及其不确定度。

3.1.2

性能记录 record of performance

使用者建立并保存的测量系统的详细记录,是描述系统和表明系统达到标准所列要求的证明文件。文件中应包含初始性能试验结果和历次性能试验结果,以及性能校核结果和相应性能试验(校核)的周期。

3.1.3

认可测量系统 approved measuring system

满足本部分给出的一组或几组要求的测量系统。

3.1.4

标准测量系统

3.3 刻度因数

3.3.1

测量系统的刻度因数 scale factor of a measuring system

与测量仪器的读数相乘便得到整个测量系统的输入量值的因数。

注1：对不同的电流测量范围、不同的频率范围或不同的波形，一个测量系统可有多多个刻度因数。

注2：直接显示输入量值的测量系统，其标称刻度因数为1。

3.3.2

转换装置的刻度因数 scale factor of a converting device

与转换装置的输出量值相乘便得到其输入量值的因数。

注：转换装置的刻度因数可以是无量纲的（例如电流互感器的变比），也可以是具有量纲的（例如分压器的阻抗）。

间间隔内所能承受的规定冲击电流或短时电流的最大次数。

注：该次数通常以每分钟施加的次数以及数分钟或数小时的时间间隔来表示。

3.5 有关动态特性的定义

3.5.1

测量系统的响应 response of a measuring system

G

系统输入端施加规定电流条件下,其输出与时间或频率的关系。

3.5.2

幅-频响应 amplitude-frequency response

$G(f)$

输入为规定条件下,测量系统的输出和输入之比与频率的关系。

注 1: 此差值应区别于测量的不确定度。

注 2: 测得的试验电流应在规定试验电流的给定容差范围内。

3.6.2

(测量) 不确定度 uncertainty (of measurement)

表征合理地赋予被测量之值的分散性, 与测量结果相联系的参数。

注 1: 不确定度是不带符号的正数。

注 2: 电流测量的不确定度不应与规定试验电流的容差相混淆。

注 3: 更多信息见附录 A 和附录 B。

3.6.3

标准不确定度 standard uncertainty

u

以标准偏差表示的测量不确定度。

注 1: 标准偏差与被测值的估计值有关, 与被测值有相同的量纲。

注 2: 某些情况下, 可以使用测量的相对标准不确定度。测定的相对标准不确定度是标准不确定度除以被测量, 以

3.6.11

国家计量研究机构 **National Metrology Institute**

由国家指定的对一个或多个量的国家计量标准进行开发和维护的科研机构。

3.7 有关测量系统试验的定义

3.7.1

校准 **calibration**

在规定条件下,为确定测量仪器或测量系统所指示的量值,或实物量具或参考物质所代表的量值,

准测量系统和合适的操作程序进行的。

注：由国家计量机构或有资质的校准实验室进行的校准及其出具的报告、证书可以认为是已溯源到国家和/或国际基(标)准。

4.2 性能试验周期

为保持测量系统的特性，应参照5.3定期进行性能试验以验证其校准溯源因素。性能试验周期应

系统对外磁场的敏感度。

注 1：载流导体在距罗哥夫斯基线圈一定距离范围内出现载流导体 90°拐角，研究表明，此距离大于罗哥夫斯基线圈半径的 2 倍时，其影响可忽略。

注 2：杂散耦合还需进一步研究。

在工作和环境条件范围内，测量系统的不确定度应当在本部分所规定的范围内。

对交、直流电流应规定测量系统的标定工作时间。

注 3：推荐最短标定工作时间为 1 h。

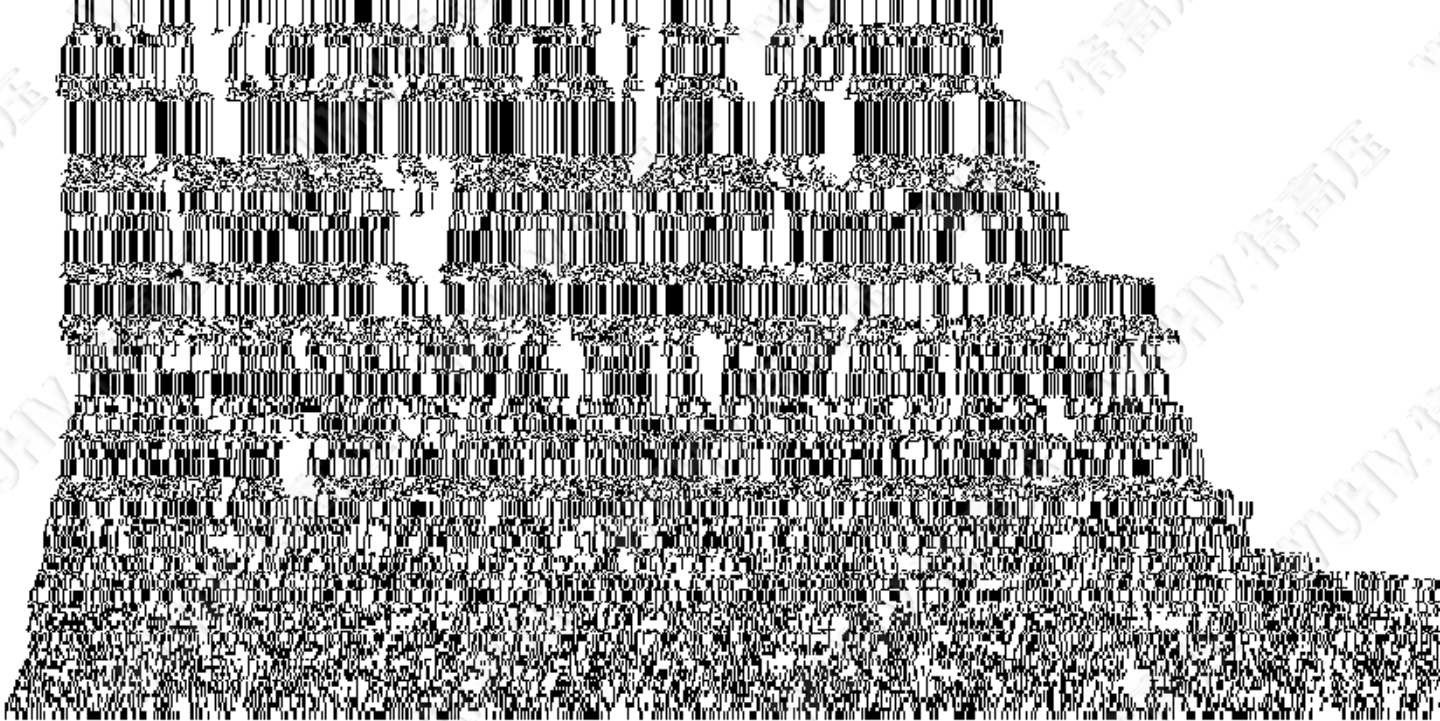
对短时电流或冲击电流应规定最大施加频次。

注 4：推荐最大施加频次的最小值为 2 次/min。

应当注明测量系统组件满足本部分要求的环境条件范围。

4.6 不确定度

按本部分进行的所有测量的不确定度应依据 [F 1059] -2012 标准进行评定



验(如果规定)应在使用者实验室进行。模拟试验布置应反映工作条件并在性能试验上记录。

如果转换装置(和/或其他测量系统的部件)对邻近效应是敏感的,则应确定有效标定刻度因数对应的净距范围,并应保存在性能记录中。每一净距范围对应的标定刻度因数均应验证。

5.2.1.2 全部测量范围内进行比对

该试验包括标定刻度因数的确定和线性度的确定,应根据 5.2.1.1,在标定测量范围的最小和最大值之间直接与标准测量系统比对来确定刻度因数,同时还应在至少 3 个近乎相等间隔的中间值下进行比对(见图 2)。不需再进行线性度试验。标定刻度因数 F 即为 h 个电流水平下记录到的所有刻度因数 F_x 的平均值,由式(1)给出,即:

$$F = \frac{1}{h} \sum_{x=1}^h F_x \quad \text{其中 } h \geq 5 \quad \dots\dots\dots(4)$$

式中:

h —— 电流水平;

F_x —— 某一电流水平 I_x 下的刻度因数的算术平均值。

标定刻度因数 F 的标准不确定度 u_F 由 u_{lin} 、 u_{nc} 两个 B 类分量组成。 u_{lin} 表征平均刻度因数 F_x 的非线性度。 u_{nc} 为 h 个电流水平试验得到的 A 类标准不确定度 u_x 的最大值。

$$u_F = \sqrt{u_{\text{lin}}^2 + u_{\text{nc}}^2} = \sqrt{\frac{1}{3} \left(\max_x \left| \frac{F_x}{F} - 1 \right| \right)^2 + \left(\max_x (u_x) \right)^2} \quad \dots\dots\dots(5)$$

注 1: 因为数据不是在相同的条件下获得的,尤其考虑到不同的电流水平,刻度因数 F_x 的 h 个测量结果不能构成一个统计系统。所以不可能通过统计方式(即 A 类)获得标定刻度因数的不确定度,而是采用基于两个分量的 B 类估计方法获得。在不同电流水平下得到的 F_x 的分布可作为一种矩形概率分布,用与平均值的最大偏差来评估。在每一个电流水平下测得的单个 F_x 结果的统计学 A 类分量,则作为正态分布,通过单个 u_x 的最大值来进行评估(见图 3)。

5.2.1.3 有限电流范围内比对

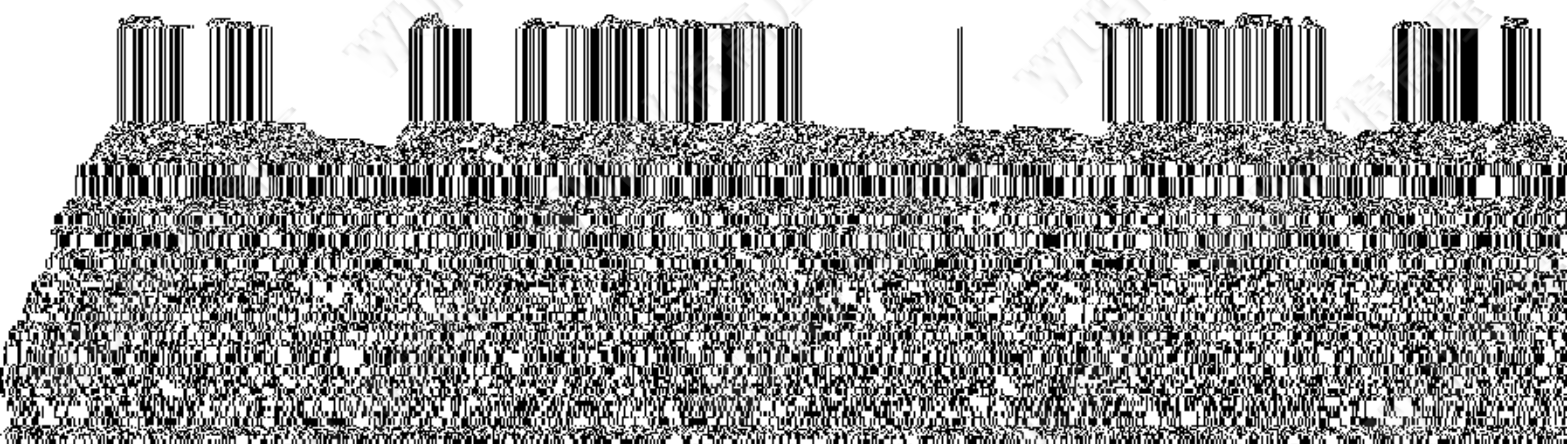
在标定测量范围超过标准测量系统测量范围情况下,应根据 5.2.1.1 比对至标准测量系统的最高电

基于阻抗测量值的计算：

刻度因数的动态特性可用卷积方法(见附录 D)从阶跃响应的稳态分量(见附录 C)得到。

注 2：应当采取措施确保测量中考虑包括了耦合的影响以及组件间的相互影响。

分流器的刻度因数可由直流测试给出，在直流测试之前应先单独测试其动态特性。



试刻度因数时可能需将转换装置从测试回路中卸下,此时应在电流或冲击施加后尽快测量,以确保刻度因数未发生明显变化,推荐最大时间为 20 min。

试验结果是在电流施加时间内刻度因数变化的一个估算值,其 B 类标准不确定度分量为:

$$u_{\text{B}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left| \frac{F_{\text{after}}}{F_{\text{before}}} - 1 \right| \quad \dots\dots\dots (10)$$

式中:

$F_{\text{before}}, F_{\text{after}}$ —— 短时稳定性试验前、后的刻度因数。

5.5.2 稳态电流

刻度因数应在施加电流之前或开始时测量,转换装置上应施加额定电流直至达到热平衡,在施加电流结束时刻(或之后),应再次测量刻度因数(见图 6)。

在某些情况下,应允许一定时间重新连接转换装置。这一时间不能超过转换装置热时间常数的 20%,且在任何情况下均不能超过 20 min。

另一种方法是在试验时测量分流器中阻性器件的温度,此时可用两种方法得到电流施加结束时刻的刻度因数,一是人工加热分流器同时进行直接测量;二是记录冷却过程中的刻度因数,将温度曲线外推至施加电流的最后瞬间。

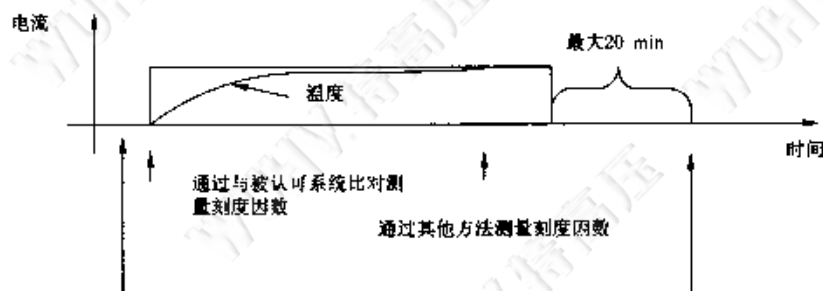


图 6 稳态电流的短时稳定性试验

5.5.3 冲击电流和短时电流

刻度因数应在施加电流的瞬间或者之前,以及施加电流的最后瞬间或之后立即进行测量。转换装置上应加额定电流(见图 7)。

另外,刻度因数应在下一次脉冲施加之前或施加瞬间进行测量,以证明两脉冲之间的时间足以让刻度因数回到初始值。

注:在短时直流或交流情况下,在施加单次电流前后对刻度因数进行测量是评估短时稳定性的合适方法。

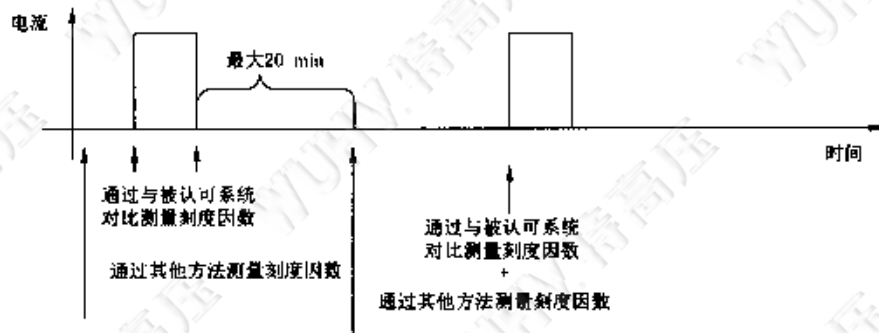


图 7 脉冲电流和短时电流的短时稳定性试验

5.5.4 周期脉冲电流和周期短时电流

刻度因数应在施加一系列电流脉冲或者短时电流之前或施加瞬间测量,以及在施加电流最后时刻或之后立即测量(见图8),转换装置上应施加额定电流。

另外,刻度因数应在下一组脉冲施加之前或施加瞬间进行测量,以证明两组脉冲之间的时间足以让

式中:

F_T ——特定温度条件下的刻度因数;

F_{T_1} ——校准温度条件下的刻度因数。

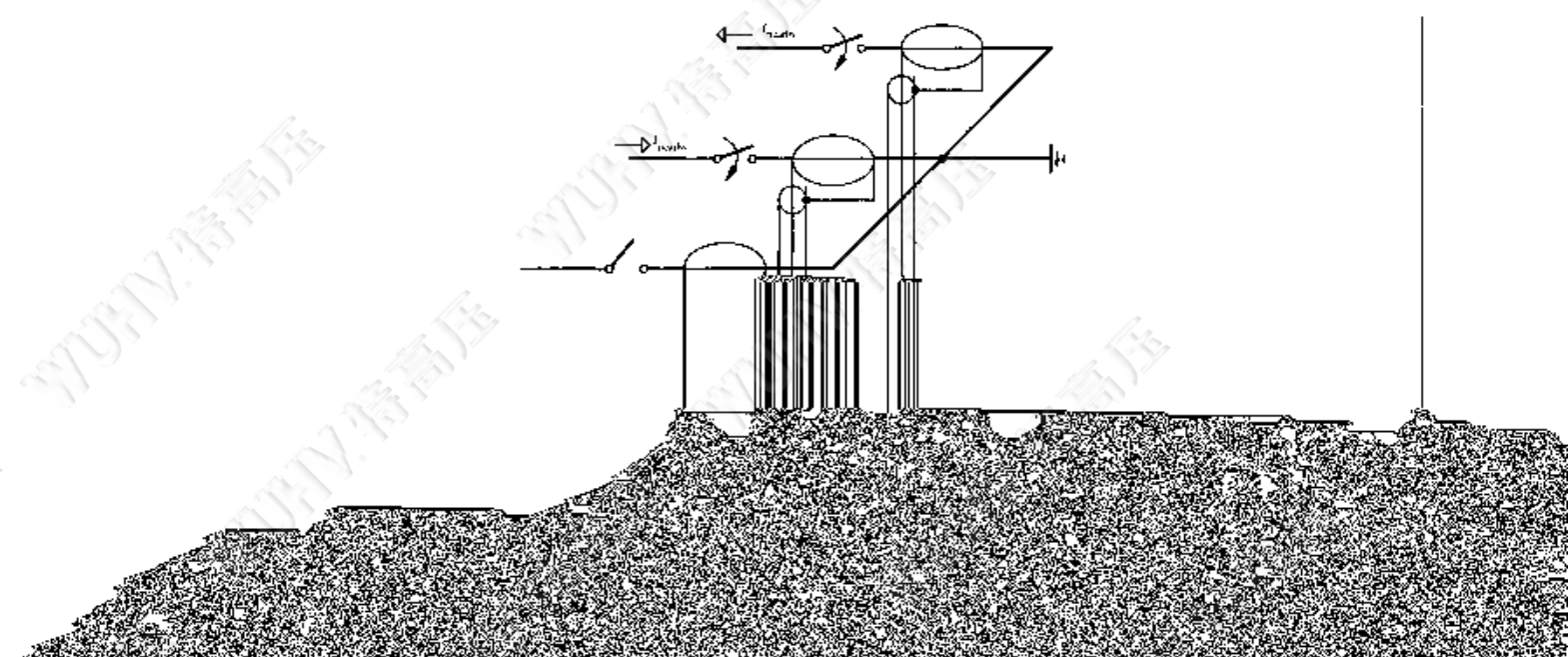
注:自热效应包含在短时稳定性试验中。

当环境温度在一个很宽的范围内变化时,可对刻度因数使用温度修正系数。任何温度修正应在性能记录中列出。一旦使用了温度修正系数,可将温度修正系数的不确定度 u_{temp} 作为不确定度分量。

5.8 邻近回路电流影响

邻近大电流回路的互感效应(例如:在三相测试电路中)引起的干扰对电流测量结果的影响,可在电流转换装置与可能引起干扰的电路的间距为典型值的条件下,通过测量确定。试验时,接地应该与常规试验条件时相同。

试验时,在邻近电路中流过某一合适的电流,电流转换装置中不通过电流,同时读取被测测量系统



$$U_{\text{en}} = k \cdot u_{\text{enl}} = 2 \sqrt{u_{\text{rel}}^2 + u_F^2 + \sum_{j=1}^N u_{ij}^2} \quad \text{----- (15)}$$

式中：

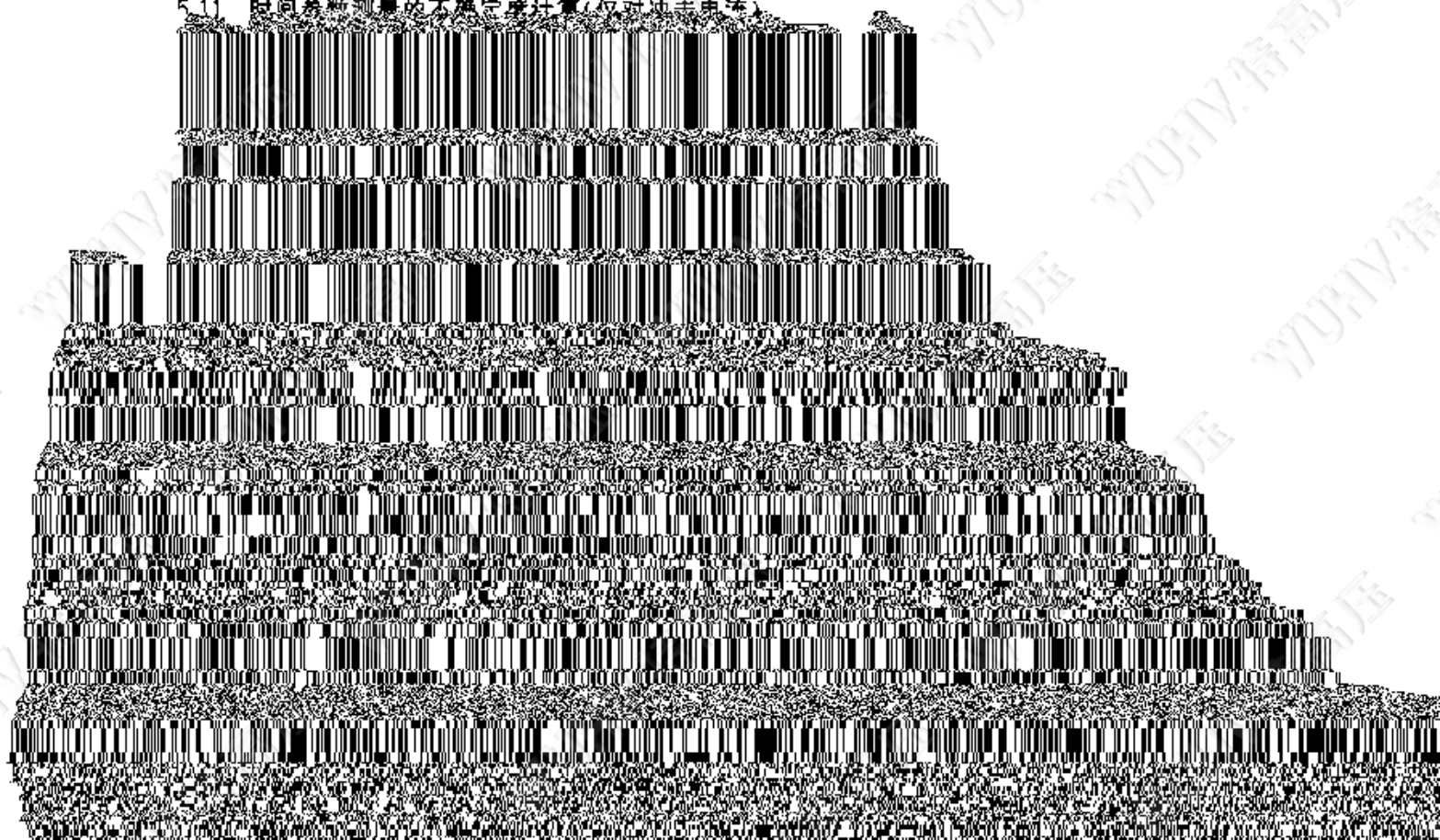
k ——包含因子，对应于约 95% 的覆盖概率，且为正态分布。 $k=2$ ；

u_{enl} ——认可测量系统在其校准时的刻度因数的合成不确定度；

u_{en} ——标准测量系统在其校准时的刻度因数的合成不确定度；

u_F ——按照 5.2.1 或者 5.2.2，刻度因数中确定的标准不确定度；

5.11 时间参数测量的不确定度计算(仅对冲击电流)



在特殊情况下,扩展不确定度的其他分量可能很重要,应加以考虑。

5.11.3 使用认可测量系统的时间参数测量的不确定度

使用者应进行时间参数测量的扩展不确定度的估算,然而可以结合校正证书,在测量条件的限定范围内给出其估算。

注1:如果时间参数校准的扩展不确定度 U_{cal} 比本部分规定的时间参数测量的扩展不确定度低70%,则通常可假定所用认可测量系统时间参数测量的不确定度 U_{meas} 等于 U_{cal} 。

时间参数测量的扩展不确定度 U_{meas} 应按式(23)进行计算:

$$U_{meas} = k \cdot u_{comp} = 2 \sqrt{u_{cal}^2 + \sum_{i=1}^n u_{bi}^2} \dots\dots\dots (23)$$

式中:

u_{cal} ——已校准的测量系统的平均波前时间误差的合成标准不确定度;

k ——包含因子,对应于约95%的覆盖概率,且为正态分布。 $k=2$;

u_{bi} ——由第 i 个影响量产生的认可测量系统冲击时间参数的合成标准不确定度的分量,以B类分量评定。这些分量和认可测量系统的正常使用有关,由例如长期不稳定性,短时稳定性,软件影响等因素产生,也可由不理想的冲击波形产生。依据5.3~5.9,既可由附加测量确定,也可由其他数据源估算确定,在某些情况下,还应考虑其他影响,如认可测量系统的显示分辨率。

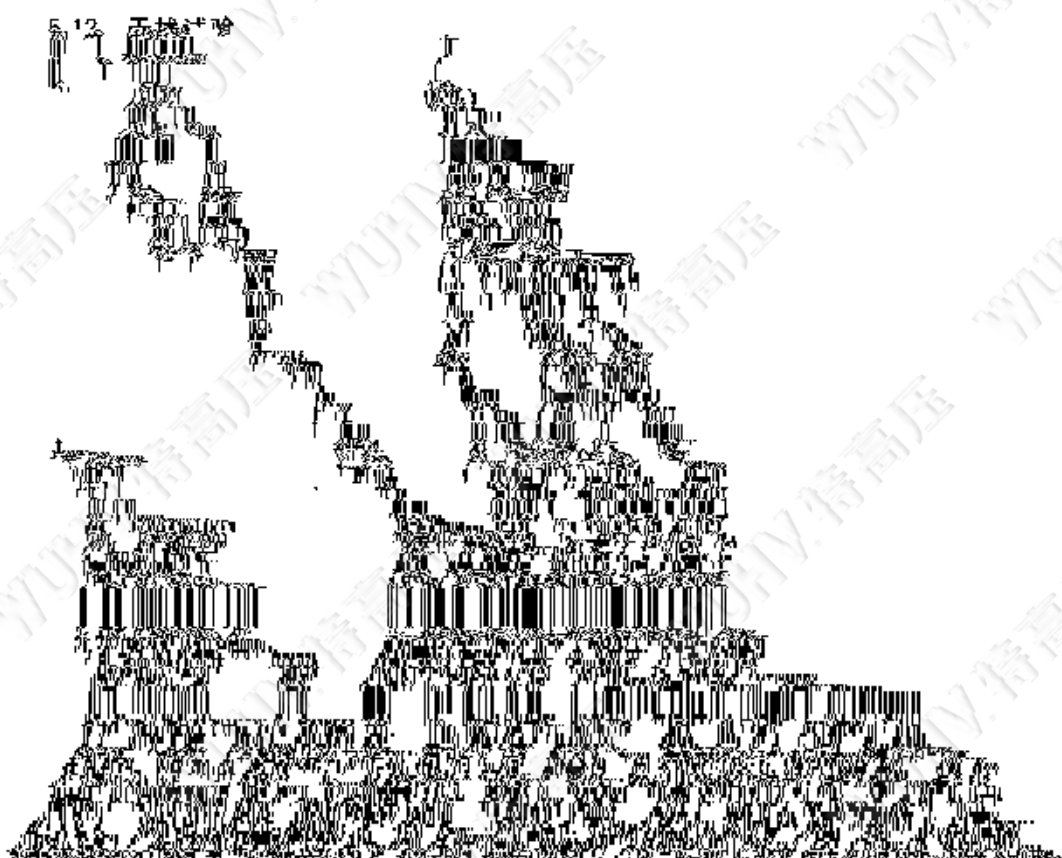
u_{comp} ——用认可测量系统测得的冲击电流时间参数的合成标准不确定度,在一个预定的使用期间内有效。

在特定条件下,计算 U_{meas} 时,应考虑到扩展不确定度的其他分量可能很重要,如在冲击电流波前叠加振荡的情况。

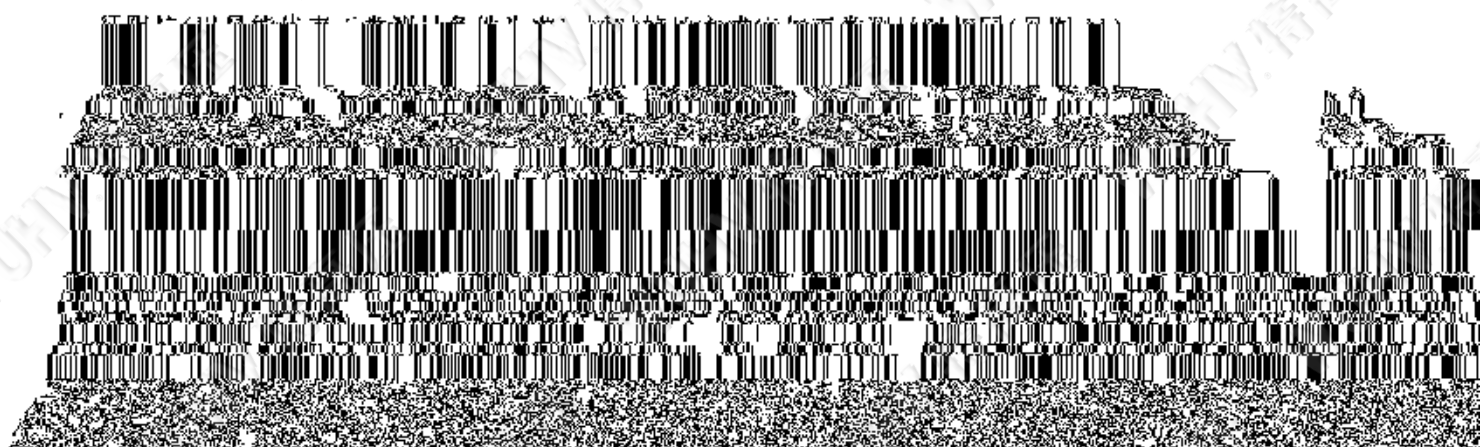
注2:只要观测到的相对平均误差 $\overline{\Delta T_{meas}}/T_1$ 和其相对扩展不确定度 U_{meas}/T_1 的和小于相关时间参数测量结果要求的相对不确定度的70%,时间参数测量结果是不要求修正的。

注3:时间参数的变化对试验结果的影响应该是很小的。

注4:修正的时间参数 T_{meas} 的扩展不确定度应该按照本条款确定。



转换装置中应承载电流。对于分流器,一端应与转换装置连接,另外一端与转换装置断开,测量电缆在分流器端短路;对带铁心的电流互感器,二次绕组短路连接(同轴电缆情况下);或者在输入端连接其特



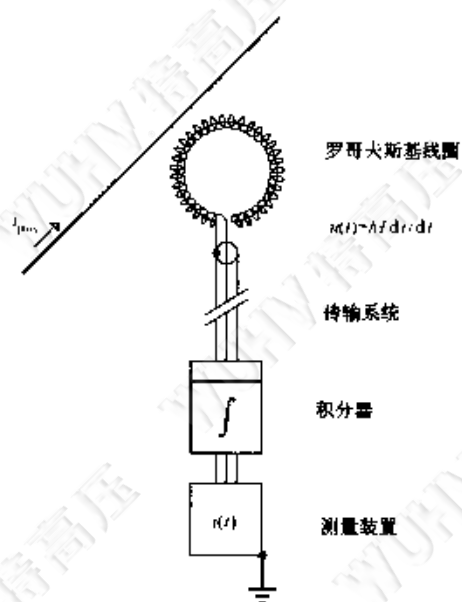


图 13 无铁心感应系统干扰试验电路

5.13 耐受试验

5.13.1 电压耐受试验

6.2 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

6.2.1

直流试验电流值 value of the d.c. test current

试验电流的算术平均值。

6.2.2

纹波 ripple

周期性地偏离电流的算术平均值的量。纹波的幅值定义为被测电流瞬时值最大值和最小值之差的一半。

6.2.3

纹波因数 ripple factor

电流的纹波幅值和算术平均值的比值。

6.3 试验电流

6.3.1 要求

除非相关技术委员会另有规定,试验电流为纹波因数不大于7%的直流电流。更多的试验要求可

每一台设备都要进行例行试验。详细情况见 4.6, 例外情况见 4.4.2。

表 1 稳态直流电流测量系统要求的试验

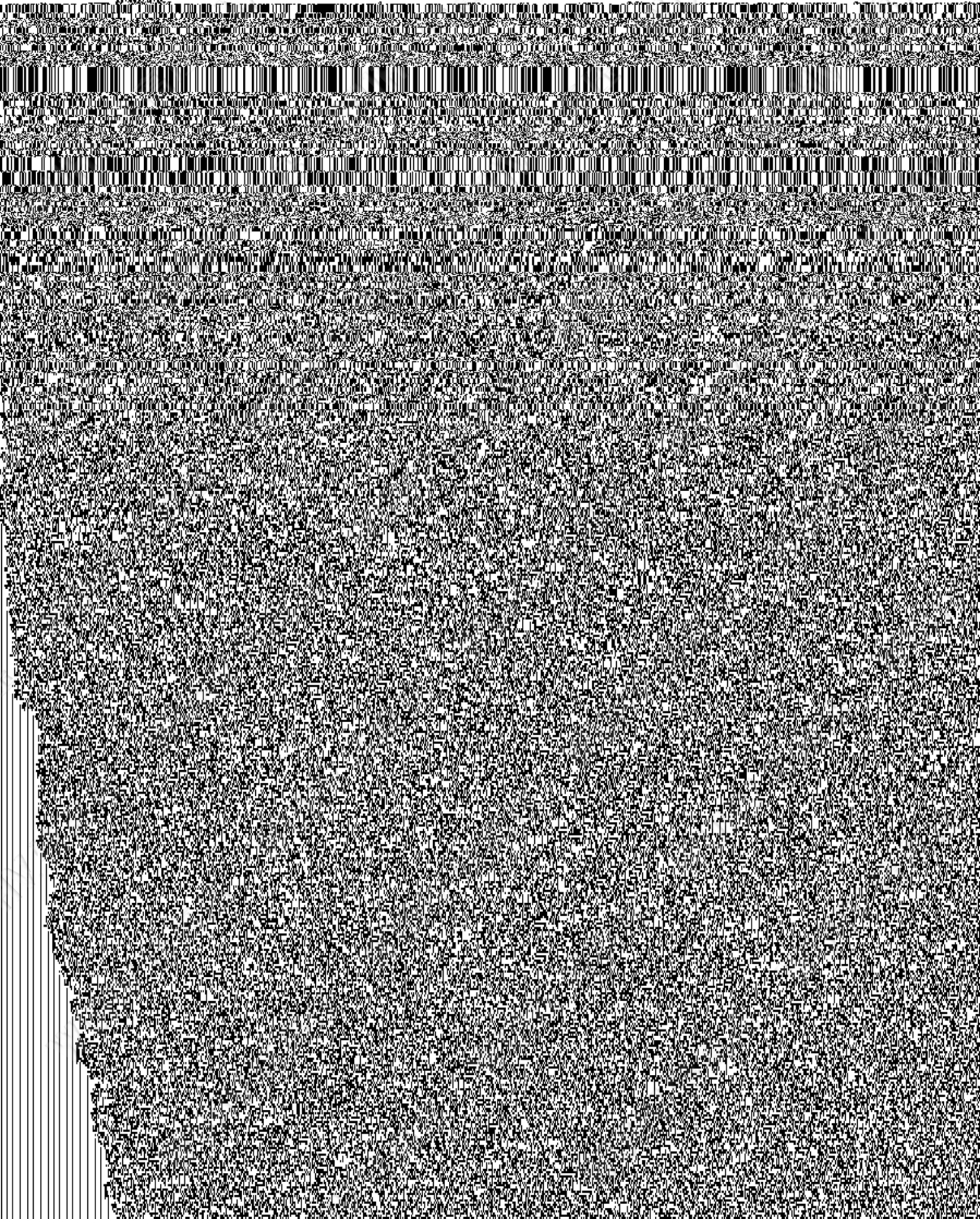
试验类别	型式试验	例行试验	型式试验	型式试验
1	1	1	1	1
2	1	1	1	1
3	1	1	1	1
4	1	1	1	1
5	1	1	1	1
6	1	1	1	1
7	1	1	1	1
8	1	1	1	1
9	1	1	1	1
10	1	1	1	1
11	1	1	1	1
12	1	1	1	1
13	1	1	1	1
14	1	1	1	1
15	1	1	1	1
16	1	1	1	1
17	1	1	1	1
18	1	1	1	1
19	1	1	1	1
20	1	1	1	1
21	1	1	1	1
22	1	1	1	1
23	1	1	1	1
24	1	1	1	1
25	1	1	1	1
26	1	1	1	1
27	1	1	1	1
28	1	1	1	1
29	1	1	1	1
30	1	1	1	1
31	1	1	1	1
32	1	1	1	1
33	1	1	1	1
34	1	1	1	1
35	1	1	1	1
36	1	1	1	1
37	1	1	1	1
38	1	1	1	1
39	1	1	1	1
40	1	1	1	1
41	1	1	1	1
42	1	1	1	1
43	1	1	1	1
44	1	1	1	1
45	1	1	1	1
46	1	1	1	1
47	1	1	1	1
48	1	1	1	1
49	1	1	1	1
50	1	1	1	1
51	1	1	1	1
52	1	1	1	1
53	1	1	1	1
54	1	1	1	1
55	1	1	1	1
56	1	1	1	1
57	1	1	1	1
58	1	1	1	1
59	1	1	1	1
60	1	1	1	1
61	1	1	1	1
62	1	1	1	1
63	1	1	1	1
64	1	1	1	1
65	1	1	1	1
66	1	1	1	1
67	1	1	1	1
68	1	1	1	1
69	1	1	1	1
70	1	1	1	1
71	1	1	1	1
72	1	1	1	1
73	1	1	1	1
74	1	1	1	1
75	1	1	1	1
76	1	1	1	1
77	1	1	1	1
78	1	1	1	1
79	1	1	1	1
80	1	1	1	1
81	1	1	1	1
82	1	1	1	1
83	1	1	1	1
84	1	1	1	1
85	1	1	1	1
86	1	1	1	1
87	1	1	1	1
88	1	1	1	1
89	1	1	1	1
90	1	1	1	1
91	1	1	1	1
92	1	1	1	1
93	1	1	1	1
94	1	1	1	1
95	1	1	1	1
96	1	1	1	1
97	1	1	1	1
98	1	1	1	1
99	1	1	1	1
100	1	1	1	1

WUHV.特高压

6.5 纹波幅值的测量

6.5.1 认可测量系统的要求

测量纹波幅值的扩展不确定度(包含概率为95%)应不大于纹波幅值的10%或者直流试验电流值



注 1: 如果已经获取了足够的采样值(见附录 G.4), 一般可以从任意周期波形的数字记录中计算得到真有效值。

注 2: 在频率变化的情况下, 没有计算真有效值的严格公式。

7.2.3

峰值 peak value

I_m

电流的最大瞬时幅值。

7.3 试验电流

7.3.1 要求

试验电流为交流电流, 一般其额定频率在 45 Hz~65 Hz 范围内, 称之为工频试验电流。特殊试验可能要求频率大大低于或高于该范围, 由相关技术委员会规定。

电流波形应近似于一个正弦波, 正峰值和负峰值的差异小于 2%。

如果总的相对谐波畸变率(THD)不超过基波分量有效值的 5%, 则可认为大电流试验的结果不受波形畸变的影响。

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \dots\dots\dots (25)$$

式中:

I_1 —— 电流基波分量的有效值;

I_n —— 从 $n=2$ 开始的第 n 次谐波分量的有效值。

对于某些常用试验回路允许较大的波形畸变。例如: 被试品可能会造成相当大的波形畸变, 特别是具有非线性阻抗特性的被试品。

7.3.2 容差

实线和虚线标示的上限和下限之间。该限值来源于对不确定度的要求。图表中的数对给出了限值线拐角处的归一化频率(以对数尺度表示)及该频率下响应与理想幅频响应的允许偏差值。图 6 为 20 kV

表 3 稳态交流电流要求的试验

试验类型	型式试验	例行试验	性能试验	性能校核
校准测量系统的刻度因数			5.2	
刻度因数校核				7.1.5
线性度		5.3(如果适用)	5.3(如果适用)	
测量系统的动态特性		7.1.3 和 5.4		
转换装置的短时稳定性		5.5		
长期稳定性			5.3(如果适用)	

7.4.5.3 测量系统刻度因数的校核

可按照 5.2.1 的程序与另一认可测量系统进行比对。如果两个系统测量值之间的差值(绝对值)在 2%以内,则其校准刻度因数仍然有效。如果该差值超出 2%,则应进行性能试验来验证校准刻度因数。



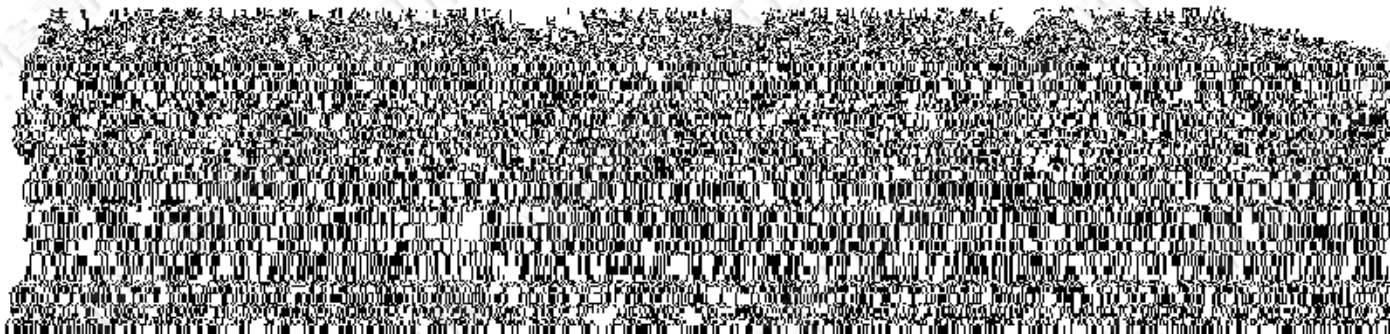
8.2.3

回路的时间常数 time constant of the circuit

τ

回路中的电感值与电阻值之比。

注：回路的时间常数是电感值与电阻值的比值。它决定了电路的响应时间。



8.4.3 动态特性

8.4.3.1 要求

测量系统的设计应包含从直流到上限频率 f_1 的频率范围。测量系统的幅频响应的-3dB上限频率 f_2 应大于1 kHz。由频率响应引起的不确定度分量认为是0。

8.4.3.2 动态特性试验

幅频响应既可以直接确定,也可以通过评估脉冲响应的频谱密度来确定。

为了直接确定幅频响应,给测量系统输入一个已知幅值的正弦信号(通常幅值较小)并测量测量系统的输出。在足够宽的频率范围内重复测量以验证从直流到上限频率 f_1 频率范围的响应情况。

为了采用频谱密度函数确定幅频响应,给测量系统输入一个冲击电流信号,并测量它的输入信号和输出信号。用标准测量系统测量输入信号,标准测量系统在关心的频率范围内具有平坦的响应曲线。电流脉冲的上升时间应该比被测系统被认可使用范围内的最短上升时间短。为了验证从直流到上限频率 f_1 频率范围的响应特性,冲击脉冲应该有足够长的持续时间。通过对标准测量系统测得的试验电

表 5 (续)

试验类型	型式试验	例行试验	性能试验	性能校核
测量仪器的刻度因数		5.2		
责任	组件由制造商负责		系统由使用方负责	

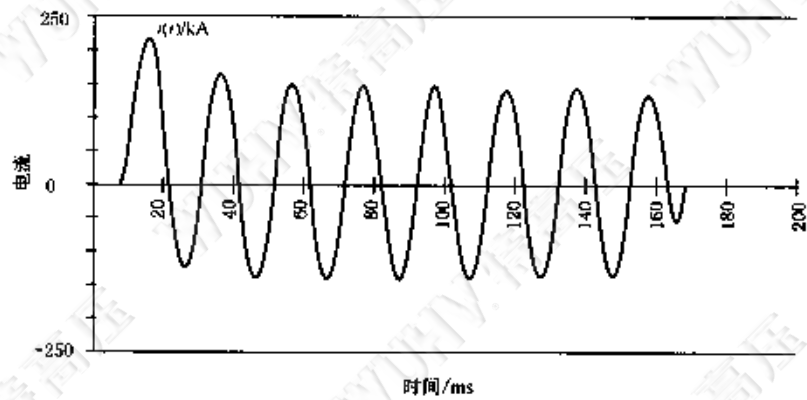


图 17 短时交流电流示例

下面给出的试验电流测量程序适用于校准和测量。

9.2 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

9.2.1

对称电流 symmetrical current
不含直流分量或直流分量可以忽略的电流。

9.2.2

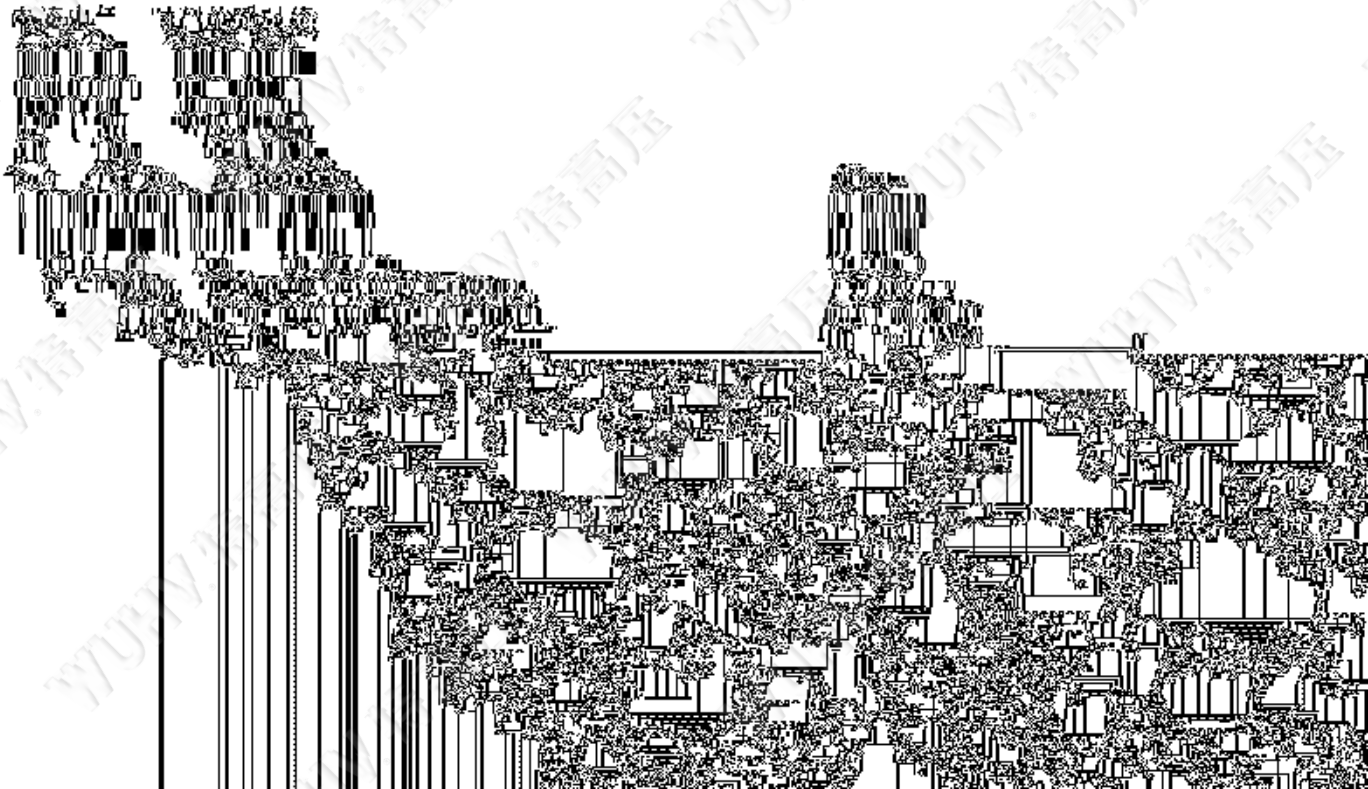
非对称电流 asymmetrical current
直流分量不可忽略的电流。

9.2.3

峰值 peak value
；
电流的最大瞬时幅值。

9.2.4

瞬时电流值 instantaneous value of current



式中:

t_0 —— 电流第一次偏离零点的时刻;

T —— 电流最后一次偏离零点经历的时间;

$i(t)$ —— 电流的瞬时值。

注1: 若采样点数足够, 真有效值一般可从有限时间内的数字化记录进行计算得到。

注2: 真有效值也要考虑直流分量。

9.2.8

对称交流分量 symmetrical a.c. component

任何直流分量衰减后的电流的真有效值。

9.2.9

峰值因数 peak factor

交变量绝对值的最大值与其均方根值之比。

9.2.10

阻抗相角 impedance angle

φ

$$\varphi = \arctan \frac{X}{R} = \arctan \frac{\omega L}{R} \dots\dots\dots (27)$$

式中:

ω —— 电源的角频率;

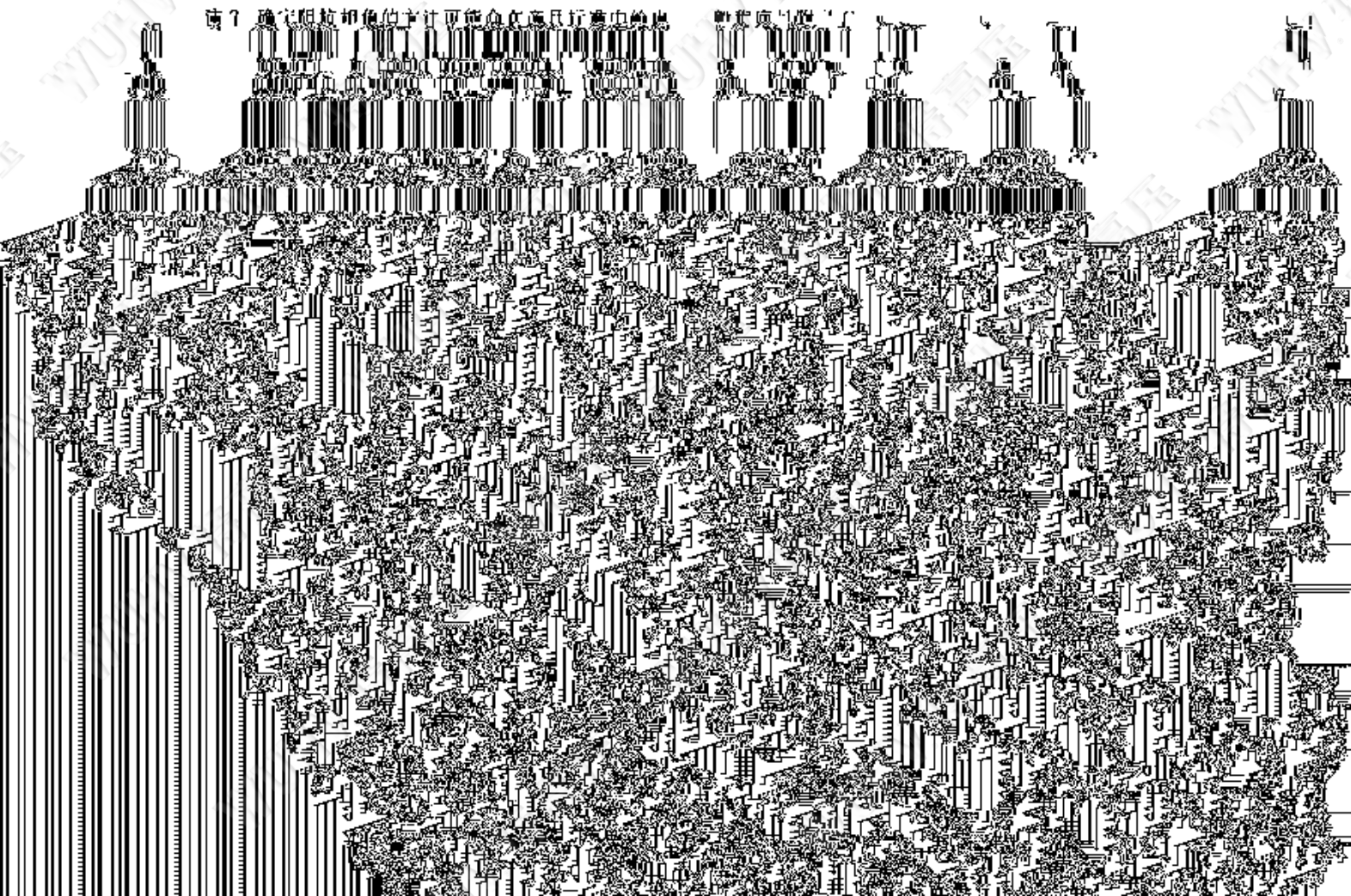
L —— 电感, 单位为亨(H);

R —— 短时交流等效回路的电阻, 单位为欧姆(Ω);

阻抗相角常用 $\cos\varphi$ 的值表示, 称为“功率因数”。

注1: 阻抗相角是试验回路本身的特征参数。

注2: 确定阻抗相角的方法可能会在高压试验中给出。



注 1：必须强调，容差是试验规定值与实际测量值的允许差值。该差值应与测量的不确定度区分开来。
注 2：相关技术委员会可规定其他容差限值。

表 6 短时交流电流试验参数的容差要求

量	容差/%
峰值	±5
电流交流分量	±5
电流直流分量	±10
对称交流分量	±5
$\cos\varphi$	±0.05
频率	±5
持续时间	由相关技术委员会规定

9.4 试验电流的测量

9.4.1 对认可测量系统的要求

除非相关仪器标准另有规定，一般要求在性能记录中给出的指定测量范围内测量峰值和电流交流分量的扩展测量不确定度 U_{meas} (95% 的覆盖概率) 不应超过 5%。

注 1：测量阻抗相角 (用 $\cos\varphi$ 表示) 的扩展测量不确定度应不超过 0.05。但是，测量不确定度可能会受到用于此次测量的其他测量系统的影响。
注 2：对于使用带铁心的电流互感器作为转换装置的测量系统，应该特别注意由连续不对称试验电流引起的铁心饱和可能带来的影响。

9.4.2 不确定度分量

对短时交流电流测量系统，扩展不确定度 U_{meas} 应依据 5.10.3 进行评定，如果需要，还可依据附录 A 或附录 B 进行评定。为评定不确定度分量所需进行的试验在表 7 中给出。某些情况下，其他分量可能很重要，则另外加以考虑。这里给出的信息仅供参考。

表 7 短时交流电流要求的试验

试验类型	型式试验	例行试验	性能试验	性能校核
校准测量系统的刻度因数			5.2	

表 7 (续)

试验类型	型式试验	例行试验	性能试验	性能校核
------	------	------	------	------

表 9 刻度因数在频率范围低端和高端的允许偏差要求

在基波频率下	在频率范围的低端/%	在频率范围的高端/%
见 5.2	± 15	± 15

9.4.3.2 幅频响应的直接测量

按照 5.3 中的程序进行试验。

需要确定的是第一个峰的峰值。要求对直流分量的两个极性进行线性度试验。

注 1 在施加的脉冲电压中,如“正”的直流分量,则由于正电荷的积累,在脉冲的上升沿时,能观察到在直流分量的影响下,

WUHV.特高压

WUHV.特高压

WUHV.特高压

WUHV.特高压

WUHV.特高压

WUHV.特高压

WUHV.特高压

WUHV.特高压

WUHV.特高压

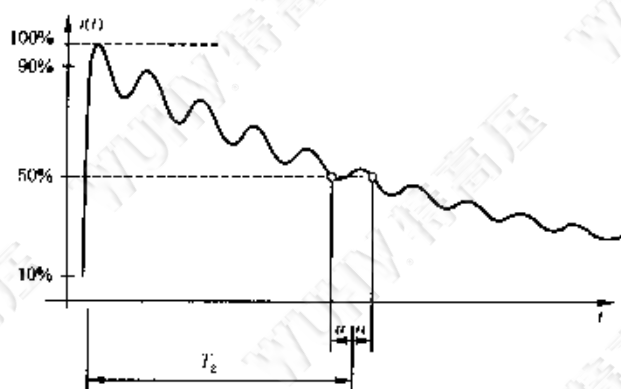


图 19 指数型冲击电流-波尾振荡

10.2.2

矩形冲击电流(冲击电流波形-矩形波) rectangular impulse current

10.2.3

冲击电流值 value of the impulse current

试验电流峰值。

注：通用标准中规定的冲击电流值，是指冲击电流峰值。

瞬时电流绝对值对时间的积分。

$$Q = \int_a^b |i(t)| dt \quad \text{.....(29)}$$

注 1：基于实际考虑，积分上限值的选取应使得剩余部分的影响小于相关技术委员会给出的规定值。

注 2：电流的绝对值适用于弧根电压降基本恒定的情况。

10.2.11

冲击电流焦耳积分 joule integral of an impulse current

I^2t

瞬时电流平方对时间的积分。

$$I^2t = \int_a^b i^2(t) dt \quad \text{.....(30)}$$

注：基于实际考虑，积分上限值的选取应使得剩余部分的影响小于相关技术委员会给出的规定值。

10.3 电流试验

10.3.1 概述

试验中使用各种不同的标准冲击电流波形。表 10 中列举了指数型冲击电流波形，更多波形在附录 H 中给出。其他波形可由相关技术委员会规定。

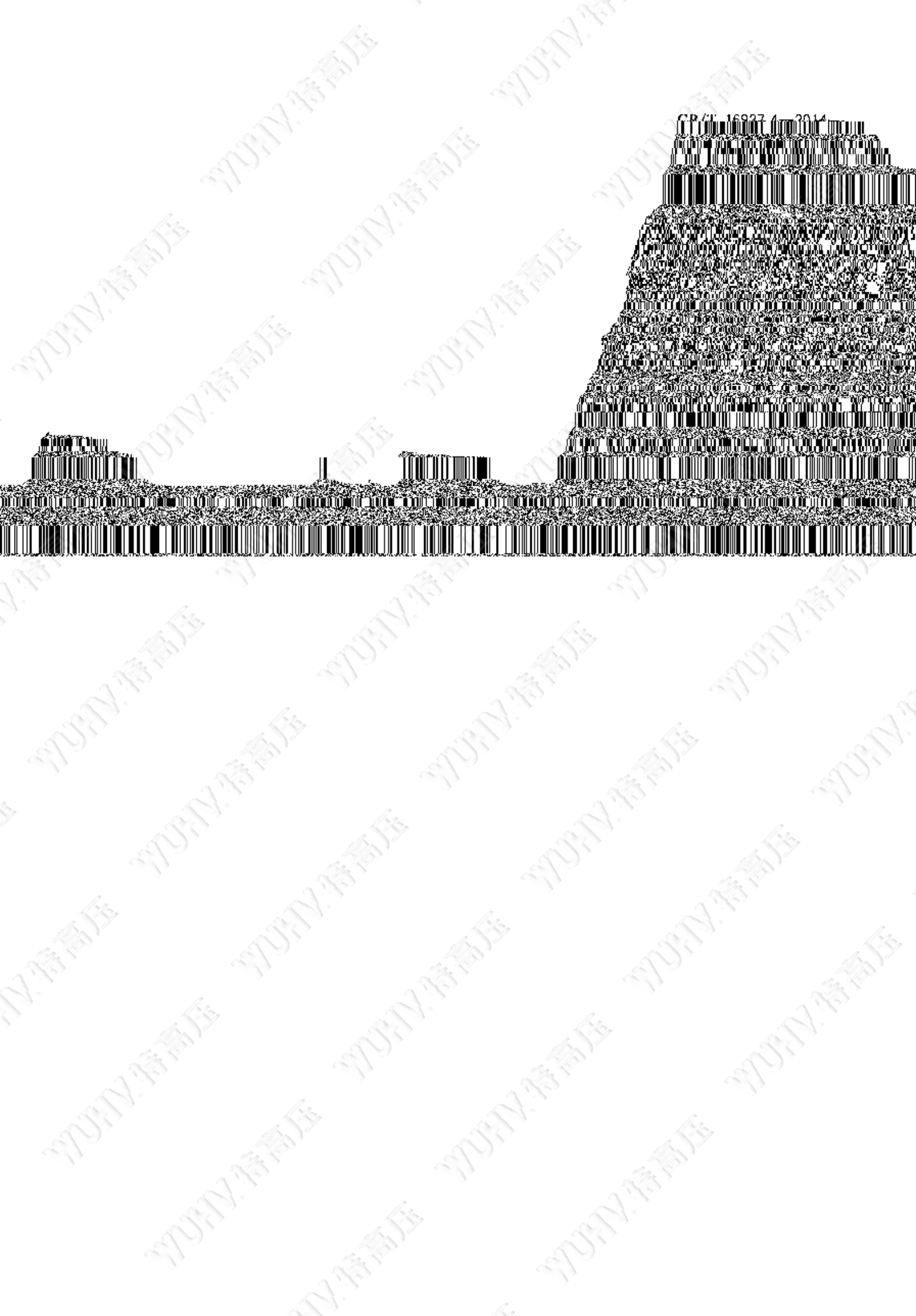


表 11 (续)

试验类型	型式试验	例行试验	性能试验	性能校核
除电缆外的传输系统刻度因数		5.1		
测量仪器的刻度因数		5.2		
责任	组件由制造商负责		系统由使用者负责	
非重复率	仅 1 次(型式试验和例行试验)		视其稳定性, 但至少每 5 年 1 次	视其稳定性, 但至少每年 1 次

10.4.3 动态特性

录,同时参考附录 C 和附录 D。

10.4.3.5 参考记录(可选)

若需要用测量系统的阶跃响应进行性能校核,应按照 10.1.3.6 的方法记录测量系统的阶跃响应。阶跃响应应包括在性能记录的记录中作为参考记录(“指纹”),用于检测后续性能校核中动态特性是否发生变化(10.1.5)的判断。

10.4.3.6 阶跃响应记录

对测量系统施加冲击电流,测量其输入输出。用标准测量系统测量输入信号,标准测量系统在关心的频率范围内具有平坦的响应曲线。电流脉冲的波前时间应该比被测系统被认可使用范围内的最短上升时间 t_{rise} (见 10.2.9)短。脉冲总时间应与被试系统所要求的冲击类型相符。

10.4.4 对认可测量系统进行的校准和试验

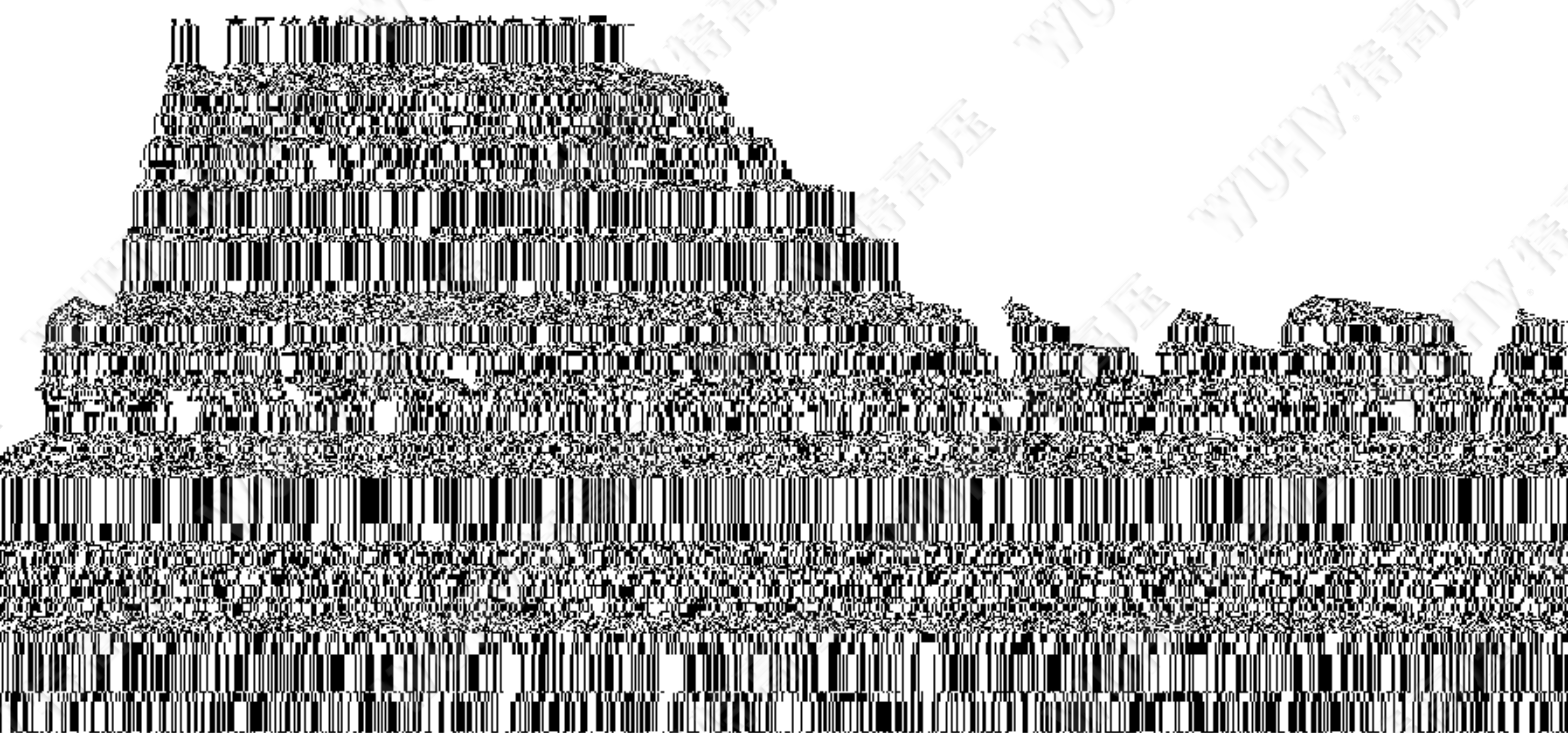
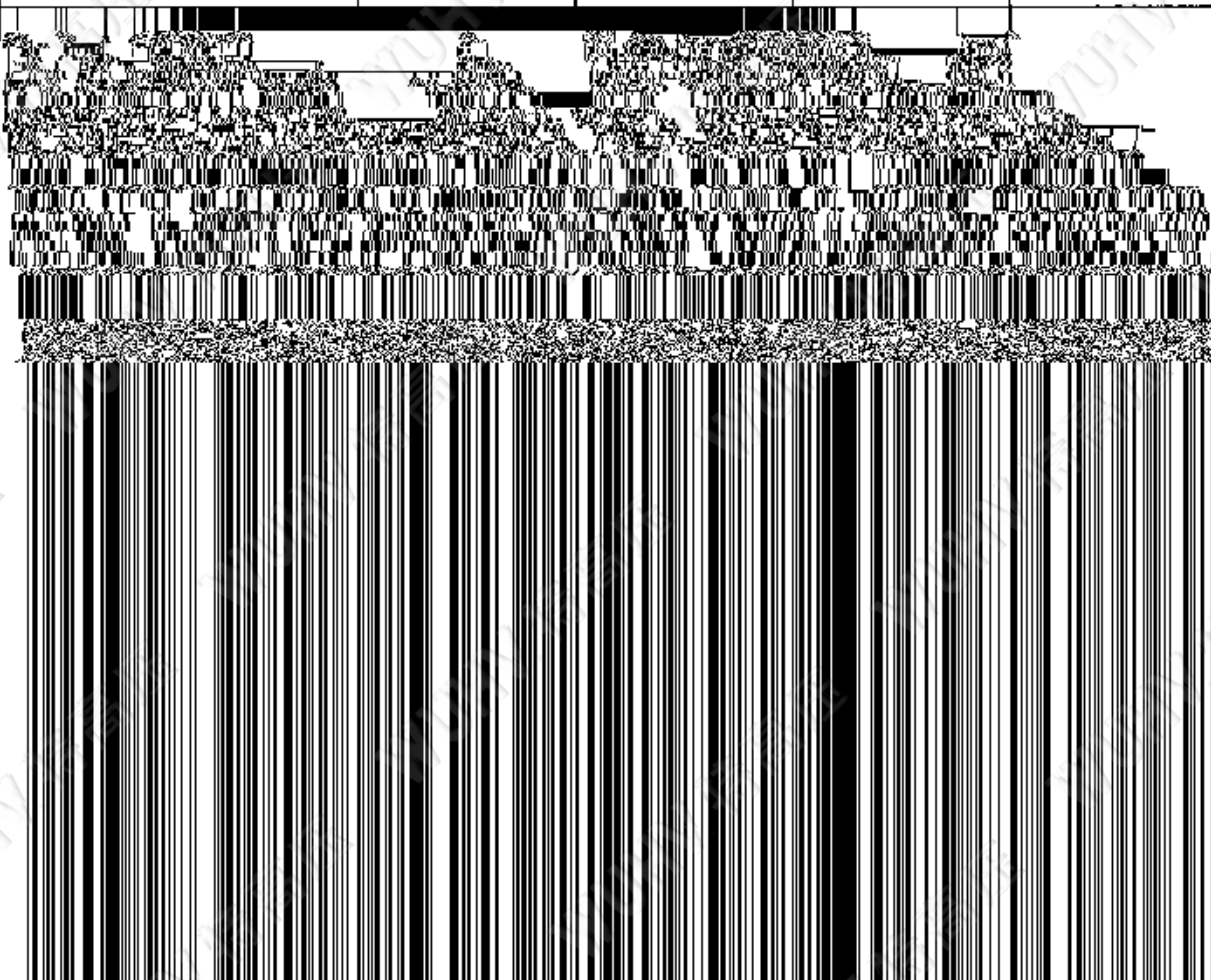


表 12 (续)

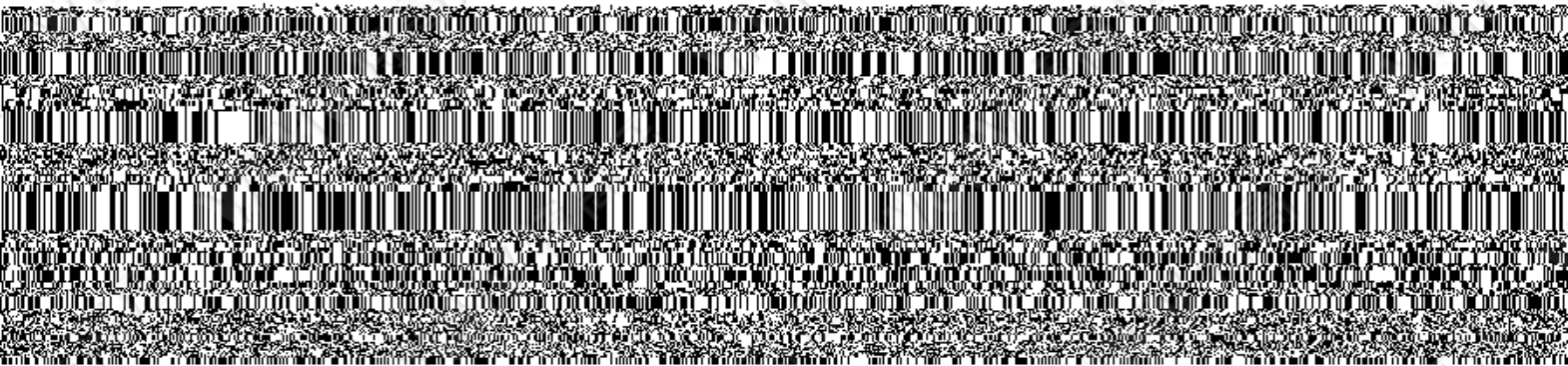
试验类型	型式试验	例行试验	性能试验	性能校核
				

12.2 标准测量系统的校准周期

校准周期应视测量系统的用途而定。如果测量系统用于校准其他测量系统，则校准周期应不超过一年。

附录 A
(资料性附录)
测量不确定度

A.1 概述



A.2.6

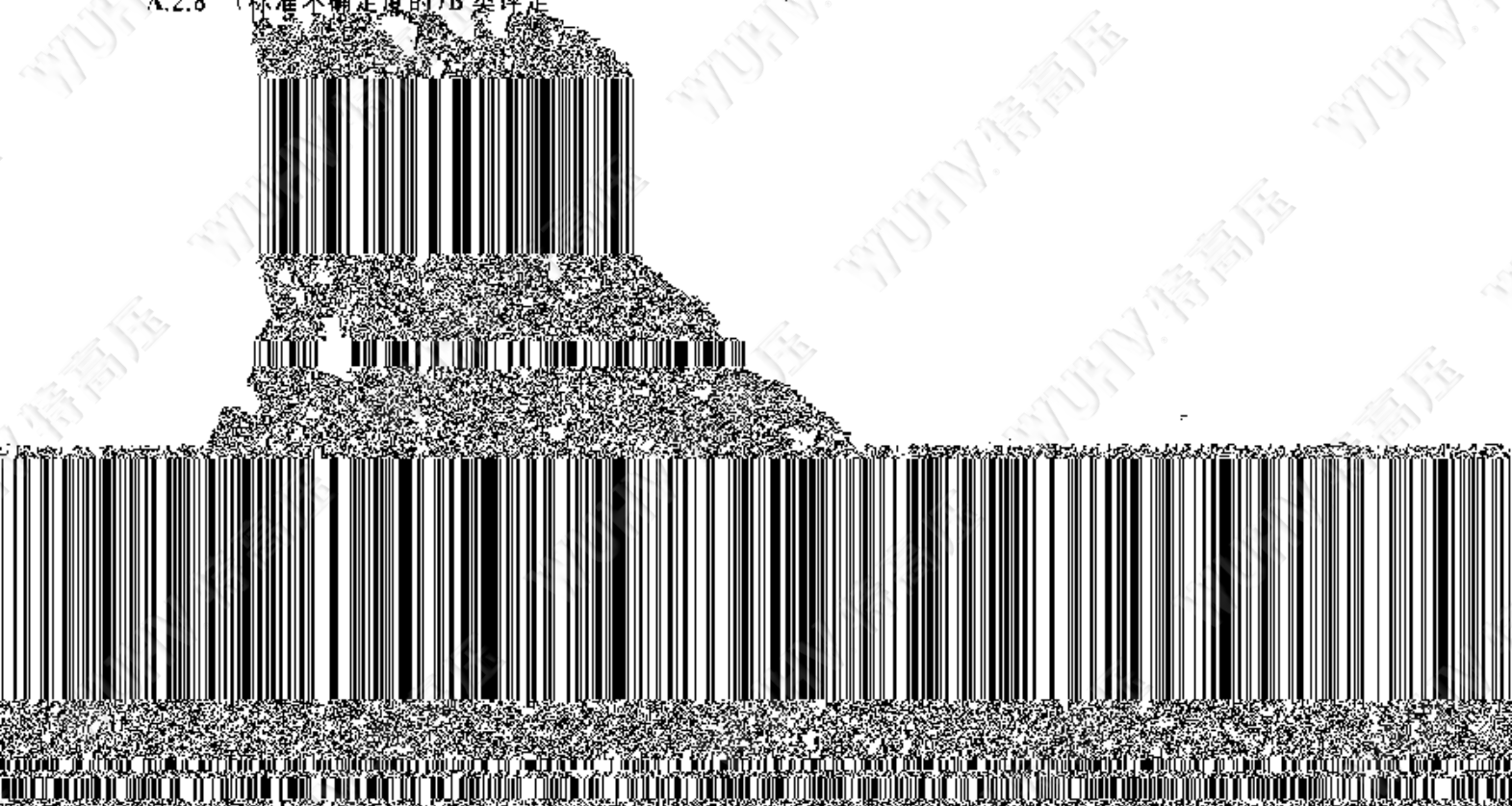
覆盖概率 coverage probability

数值分布的百分率,通常是太百分率,作为理应属于被测量的测量结果。

A.2.7 (标准不确定度的)A类评定

对一系列观测进行统计分析来评定标准不确定度的方法。

A.2.8 (标准不确定度的)B类评定



A.5 标准不确定度的 B 类评定

B 类评估方法适用于除一系列观察的统计分析以外的所有事项。B 类不确定度由科学判断进行评

IEC 1059:1—2012 规范指出,如果特殊影响已在 A 类不确定度中考虑了,则 B 类不确定度不应再次计算。而且,不确定度的评定应该是实际的并依据标准不确定度来进行,以避免因个人因素或其安全保险原因求得比按 IEC 1059:1—2012 规范方法求得的还要大的不确定度。通常输入量 X_i 应予以调整或修正以减小幅值的系统影响,如电阻温度值与电流的关系。但是,修正系数与修正相关联的不确定度

$$U = k u(y) \quad \text{----- (A.12)}$$

式中:

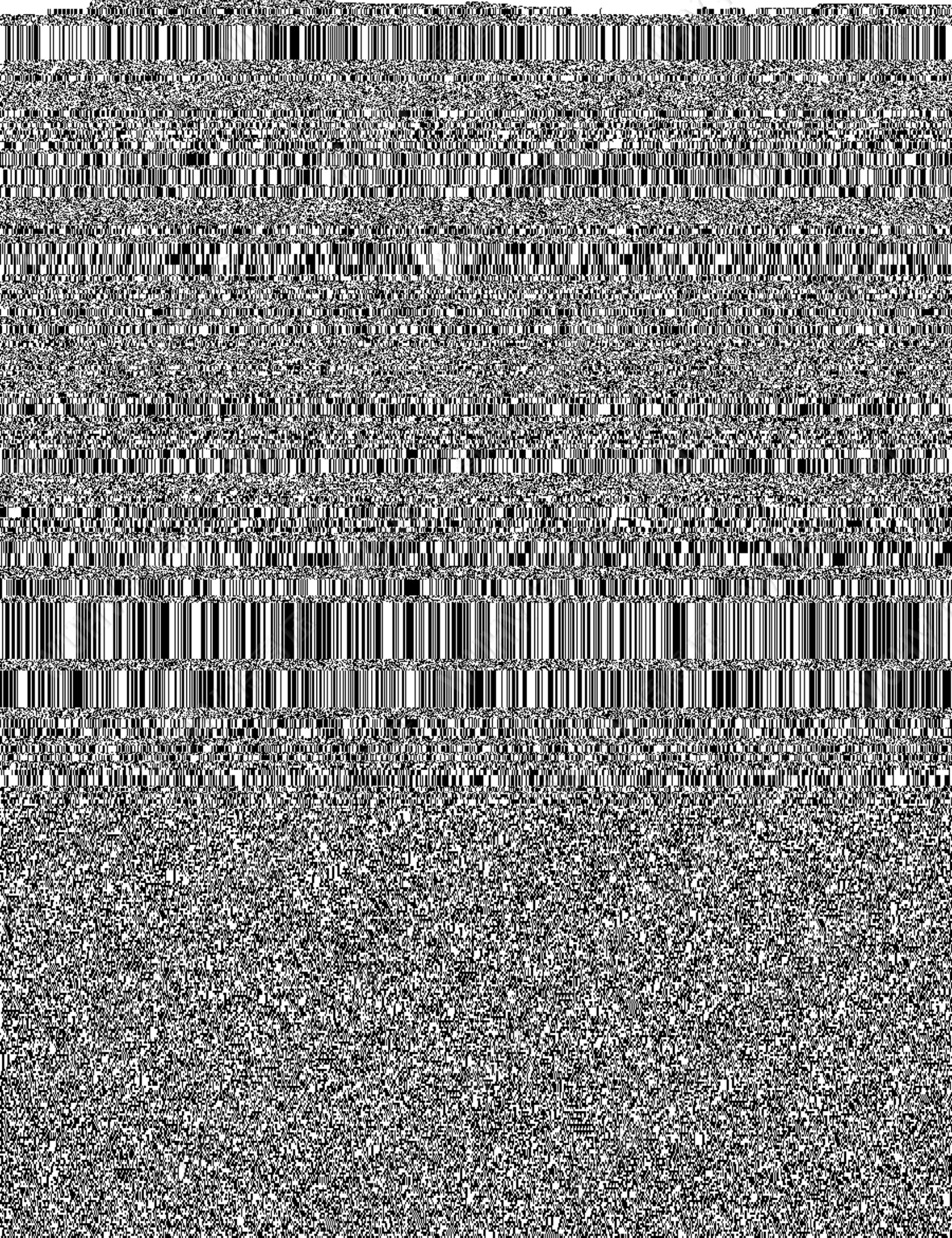
U 扩展不确定度;

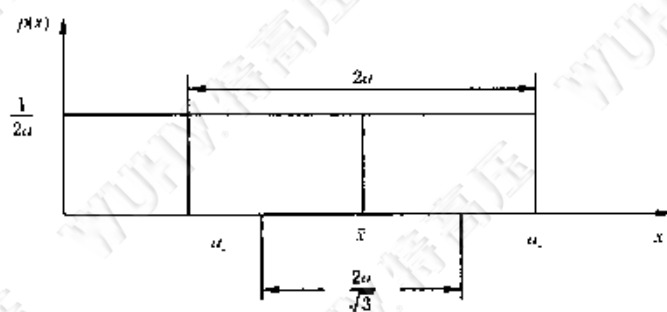
k 包含因子, $k=2$ 。用在 y 属于正态分布和 $u(y)$ 有足够的可靠度, 即 $u(y)$ 的有效自由度足够大(见 A.8)的场合, 否则应取 $k=2$ 以使 $p=95\%$ 。

注 1: 在某些老标准中采用术语“总不确定度”, 大多数情况下, 该术语解释为包含因子 $k=2$ 的扩展不确定度。

注 2: 由于不确定度定义为正值, U 的符号总是正的。当然, 在用 U 表示不确定度区间时, 将 k 表述为“ $\pm U$ ”。

A.8 有效自由度





注：阴影区域表示标准不确定度。

图 A.2 矩形概率分布 $p(x)$

附录 B

(资料性附录)

大电流测量不确定度计算示例

B.1 概述

校准不确定度和使用已校准的测量系统进行测量的不确定度之间存在明显的区别。

校准不确定度仅在校准时适用,它主要由对被校准测量系统的不确定度分析构成,同时也可能包含与

量 u_1 。

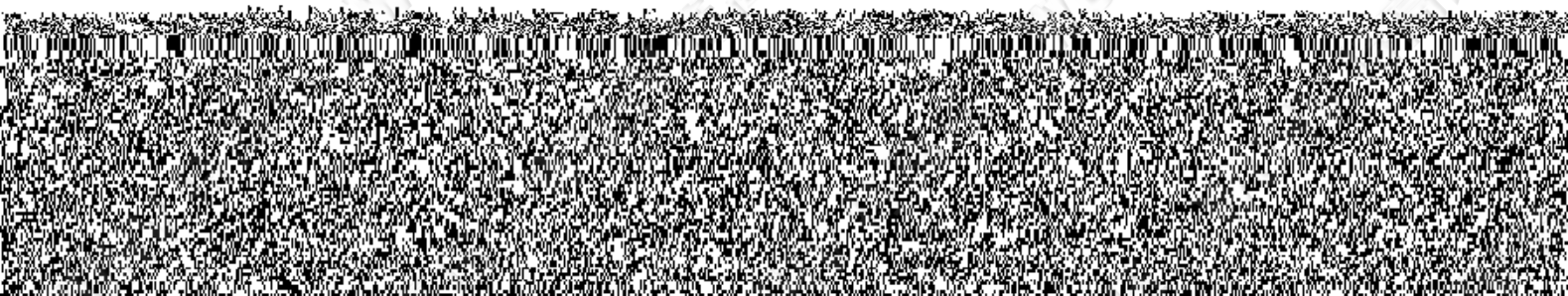


表 B.2 $h=3$ 个电流等级下结果汇总

电流等级数 k	电流水平 $I_{N,m,k}$ 的百分数	V_k/V_N	$s(V_k/V_N)$	$u_{s,k}$
1	10	1.001 2	0.002 44	0.000 77
2	25	1.001 7	0.002 03	0.000 61
3	50	1.003 7	0.002 88	0.000 91 ($=u_{s,k}$)
平均值		1.001 2		

据此,通过与标准系统进行比较得到的刻度因数可评估为:

$$F_N = 10.024 \times 1.001\,2 = 10.066,1 \quad \text{.....(B.6)}$$

V_k/V_N 的不确定度评定为:

$$u_F = \sqrt{\frac{1}{3} \left(\max_{k=1}^3 \left| \frac{F_k}{F} - 1 \right| \right)^2 + \left[\max_{k=1}^3 (u_{s,k}) \right]^2} = \sqrt{\frac{1}{3} (0.000\,5)^2 + (0.000\,91)^2} = 0.001\,0 \quad \text{.....(B.7)}$$

不确定度评定结果表 B.3 列出了模型等式(B.4)右侧输入量的数值及其标准不确定度,自由度依据式(A.13)确定。评定结果包含刻度因数及其标准不确定度,表中最后一行给出了其有效自由度, $\nu_{eff} =$

素 $\pm 0.2\%$ 。根据制造商的数据,在下次校准前, F_X 的长时间稳定性的影响在 $\pm 0.3\%$ 范围。由于测量系统 X 安装在用户试验厅的固定位置,邻近回路电流的影响已在校准中体现,不需要单独考虑。

校准刻度因数 $F_{X,cal}$ 的模型等式及其扩展标准不确定度为:

$$F_{X,cal} = F_{X,ref} + \Delta F_{X,lin} + \Delta F_{X,sh} + \Delta F_{X,lt} + \Delta F_{X,dyn} + \Delta F_{X,temp} \quad \dots\dots\dots (B.3)$$

式中:

$F_{X,ref}$ —— 比对法测得的刻度因数结果(见式 B.2);

$\Delta F_{X,lin}$ —— 线性度试验分量;

$\Delta F_{X,sh}$ —— 系统短时稳定性分量;

$\Delta F_{X,lt}$ —— 系统长期稳定性分量;

$\Delta F_{X,dyn}$ —— 系统动态特性分量;

$\Delta F_{X,temp}$ —— 使用系统的温度间隔引入的分量。

系统的刻度因数及其不确定度受漂移、温度等因素的影响。

系统的刻度因数均会受到多个参量的影响,如漂移、温度等,它们会影响刻度因数及其不确定度。

上面列出了本例中的影响分量。一般说来,影响刻度因数 F_X 和 F_U 的每一个分量包括漂移和标准不确定度。

理读数的软件组成。标定测量范围有效值为 3 kA~120 kA, 峰值 7.5 kA~300 kA。

短时交流电流标准测量系统(记为 N)由标准分流器和波形记录仪以及进行数据处理读数的软件组成。标定测量范围有效值为 1 kA~110 kA, 最大峰值 350 kA。

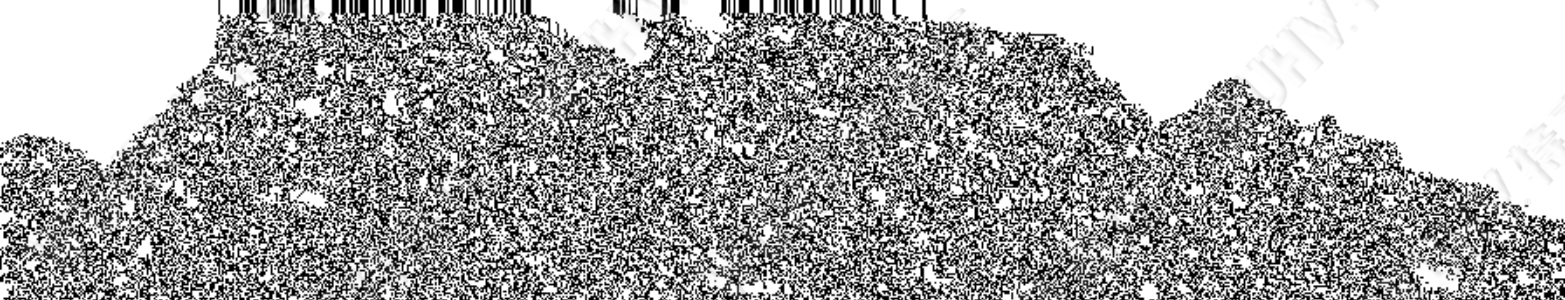


表 B.6 (续)

测量次数	标准系统 I_s /kA	被试系统 V_s /V	F_s
10	3.133	0.062 5	50.128 0
	F_s 的测量值		50.026 6

$$u_F = \sqrt{\frac{1}{3} \left(\max_{k=1}^2 \left| \frac{\bar{F}_k}{F} - 1 \right| \right)^2 + \left[\max_{j=1}^2 (u_{F_j}) \right]^2} = \sqrt{\frac{1}{3} (0.000\ 625)^2 + (0.000\ 716)^2} = 0.000\ 80$$

.....(B.17)

表B.9列出标定制所用数字的不确定度预算及相对标准不确定度计算结果。表中最后一行给出了

与误差相反的符号。不确定度分量评定方法如 A.5 中所述,即若假定在 $\pm a_i$ 区间内是矩形概率分布,则其扩展不确定度 $u_i = \frac{a_i}{\sqrt{3}}$;或者,用被校组件的扩展不确定度 U 除以包含因子 k 来求得。分量 F_{N} 并不总是有误差(或假定误差很小可以忽略),此时仅需考虑不确定度分量 u_i 。

1) 系统 X 线性度引入的不确定度分量

表 B.10、表 B.11、表 B.12 仅列出了部分等级电流的比对测量结果数据,线性度试验结果见表 B.13。

表 B.10 10%电流水平下比对测量结果

测量次数	标准系统 I_{N} / kA	被试系统 V_{N} / V	F_{N}
1	12.171	0.212 0	50.210 7
2	12.336	0.217 1	19.923 1
3	11.197	0.229 5	50.095 9
F_{N} 的平均值			50.076 6

表 B.11 20%电流水平下比对测量结果

测量次数	标准系统 I_{N} / kA	被试系统 V_{N} / V	F_{N}
1	24.324 5	0.186 3	50.019 5
2	23.476 5	0.169 7	19.981 9
3	24.092 6	0.180 1	50.182 5
F_{N} 的平均值			50.061 3

表 B.12 80%电流水平下比对测量结果

测量次数	标准系统 I_{N} / kA	被试系统 V_{N} / V	F_{N}
1	93.191	1.863 1	50.020 9
2	96.212	1.932 2	19.809 5
3	95.866	1.918 6	19.966 6
F_{N} 的平均值			19.932 4

表 B.13 线性度试验结果



表 B.13 (續)

A large, dense, black and white image showing a massive crowd of people, likely a large gathering or protest, filling the frame. The image is heavily distorted with horizontal and vertical lines, suggesting a corrupted or glitched scan. The top portion of the image shows a dark, silhouetted area, possibly a stage or a structure, against a lighter background. The rest of the image is a chaotic, high-contrast pattern of black and white pixels, with some vertical streaks and horizontal bands of varying density, making it difficult to discern specific details.

测试结果见表 B.15。

表 B.15 动态特性测试结果

测量频率/Hz	F_{v}	$\left \frac{F_{\text{v}}}{F} - 1 \right $
20	50.042 6	0.000 158
50	50.050 5	0.000 000
1 000	49.937 5	0.002 258
5 000	49.897 4	0.003 059
10 000	49.857 4	0.003 858

表 B.17 (续)

测量次数	标准系统 I 、kA	被试系统 V 、V	F 、
7	7.537	0.150.5	50.079.7
8	7.672	0.153.6	49.947.9
9	7.505	0.150.3	49.933.5
10	7.631	0.154.9	50.236.7
F 的平均值			50.041.7
相对实验标准偏差 $s(F)$			0.002.158

$$u_2 = u(F) = \frac{s_p}{\sqrt{n}} = \frac{0.002.158}{\sqrt{10}} = 0.000.777 \quad \dots\dots\dots (B.30)$$

表 B.18 -7.5 kA 电流下比对测量结果

测量次数	标准系统 I 、kA	被试系统 V 、V	F 、
1	-7.788	0.156.2	49.859.2
2	-7.512	0.150.0	50.080.0
3	-7.485	-0.149.0	50.234.0

表 B.21 $g=2$ 个电流水平(正负) $k=4$ 结果汇总

电流水平数 k	电流水平 $I_{N,\max}$ 的百分数 $\varepsilon/\%$	F_N	$s_z(F_N)$	α_{Nk}
1	+2.5	50.041 7	0.002 5	0.000 777
	-2.5	50.045 5	0.002 9	0.000 928
	+10	50.050 6	0.002 1	0.000 671

邻近回路电流试验进行了研究测试,并对 F_N 的影响进行了相应计算。校准刻度因数 $F_{N,cal}$ 的模型等式

表 B.25 +20%电流水平下比对测量结果

测量次数	标准系统 I 、kA	被试系统 U 、V	F 、
1	50.060 7	1.185 0	70.093 4
2	50.060 7	1.185 0	70.093 4
3	50.060 7	1.185 0	70.093 4
4	50.060 7	1.185 0	70.093 4
5	50.060 7	1.185 0	70.093 4
6	50.060 7	1.185 0	70.093 4
7	50.060 7	1.185 0	70.093 4
8	50.060 7	1.185 0	70.093 4
9	50.060 7	1.185 0	70.093 4
10	50.060 7	1.185 0	70.093 4
11	50.060 7	1.185 0	70.093 4
12	50.060 7	1.185 0	70.093 4
13	50.060 7	1.185 0	70.093 4
14	50.060 7	1.185 0	70.093 4
15	50.060 7	1.185 0	70.093 4
16	50.060 7	1.185 0	70.093 4
17	50.060 7	1.185 0	70.093 4
18	50.060 7	1.185 0	70.093 4
19	50.060 7	1.185 0	70.093 4
20	50.060 7	1.185 0	70.093 4
21	50.060 7	1.185 0	70.093 4
22	50.060 7	1.185 0	70.093 4
23	50.060 7	1.185 0	70.093 4
24	50.060 7	1.185 0	70.093 4
25	50.060 7	1.185 0	70.093 4
26	50.060 7	1.185 0	70.093 4
27	50.060 7	1.185 0	70.093 4
28	50.060 7	1.185 0	70.093 4
29	50.060 7	1.185 0	70.093 4
30	50.060 7	1.185 0	70.093 4
31	50.060 7	1.185 0	70.093 4
32	50.060 7	1.185 0	70.093 4
33	50.060 7	1.185 0	70.093 4
34	50.060 7	1.185 0	70.093 4
35	50.060 7	1.185 0	70.093 4
36	50.060 7	1.185 0	70.093 4
37	50.060 7	1.185 0	70.093 4
38	50.060 7	1.185 0	70.093 4
39	50.060 7	1.185 0	70.093 4
40	50.060 7	1.185 0	70.093 4
41	50.060 7	1.185 0	70.093 4
42	50.060 7	1.185 0	70.093 4
43	50.060 7	1.185 0	70.093 4
44	50.060 7	1.185 0	70.093 4
45	50.060 7	1.185 0	70.093 4
46	50.060 7	1.185 0	70.093 4
47	50.060 7	1.185 0	70.093 4
48	50.060 7	1.185 0	70.093 4
49	50.060 7	1.185 0	70.093 4
50	50.060 7	1.185 0	70.093 4
51	50.060 7	1.185 0	70.093 4
52	50.060 7	1.185 0	70.093 4
53	50.060 7	1.185 0	70.093 4
54	50.060 7	1.185 0	70.093 4
55	50.060 7	1.185 0	70.093 4
56	50.060 7	1.185 0	70.093 4
57	50.060 7	1.185 0	70.093 4
58	50.060 7	1.185 0	70.093 4
59	50.060 7	1.185 0	70.093 4
60	50.060 7	1.185 0	70.093 4
61	50.060 7	1.185 0	70.093 4
62	50.060 7	1.185 0	70.093 4
63	50.060 7	1.185 0	70.093 4
64	50.060 7	1.185 0	70.093 4
65	50.060 7	1.185 0	70.093 4
66	50.060 7	1.185 0	70.093 4
67	50.060 7	1.185 0	70.093 4
68	50.060 7	1.185 0	70.093 4
69	50.060 7	1.185 0	70.093 4
70	50.060 7	1.185 0	70.093 4
71	50.060 7	1.185 0	70.093 4
72	50.060 7	1.185 0	70.093 4
73	50.060 7	1.185 0	70.093 4
74	50.060 7	1.185 0	70.093 4
75	50.060 7	1.185 0	70.093 4
76	50.060 7	1.185 0	70.093 4
77	50.060 7	1.185 0	70.093 4
78	50.060 7	1.185 0	70.093 4
79	50.060 7	1.185 0	70.093 4
80	50.060 7	1.185 0	70.093 4
81	50.060 7	1.185 0	70.093 4
82	50.060 7	1.185 0	70.093 4
83	50.060 7	1.185 0	70.093 4
84	50.060 7	1.185 0	70.093 4
85	50.060 7	1.185 0	70.093 4
86	50.060 7	1.185 0	70.093 4
87	50.060 7	1.185 0	70.093 4
88	50.060 7	1.185 0	70.093 4
89	50.060 7	1.185 0	70.093 4
90	50.060 7	1.185 0	70.093 4
91	50.060 7	1.185 0	70.093 4
92	50.060 7	1.185 0	70.093 4
93	50.060 7	1.185 0	70.093 4
94	50.060 7	1.185 0	70.093 4
95	50.060 7	1.185 0	70.093 4
96	50.060 7	1.185 0	70.093 4
97	50.060 7	1.185 0	70.093 4
98	50.060 7	1.185 0	70.093 4
99	50.060 7	1.185 0	70.093 4
100	50.060 7	1.185 0	70.093 4

表 B.29 (续)

电流水平数 k	电流水平 $I_{k,0.5}$ 的百分数	$F_{k,0.5}$	$\left \frac{F_{k,0.5}}{F_{k,0.5}} - 1 \right $
1	+20	50.161 8	0.001 385
	-20	50.018 6	0.000 078
5	+10	50.091 2	0.001 373
	-10	50.072 3	0.000 905

取其中最大值, $u_{\text{imp}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times 0.005\ 143 = 0.002\ 969$ (B.11)

4) 测量系统的动态特性引入的不确定度分量

根据 5.4, 对系统 X 进行了 20 Hz、50 Hz、1 kHz、5 kHz、10 kHz 的动态特性试验, 试验波形为振荡

试验波形试验, 每个频率下正弦波幅值 10 kV, 最大峰峰值电流为 20 kA, 试验结果进行如下分析

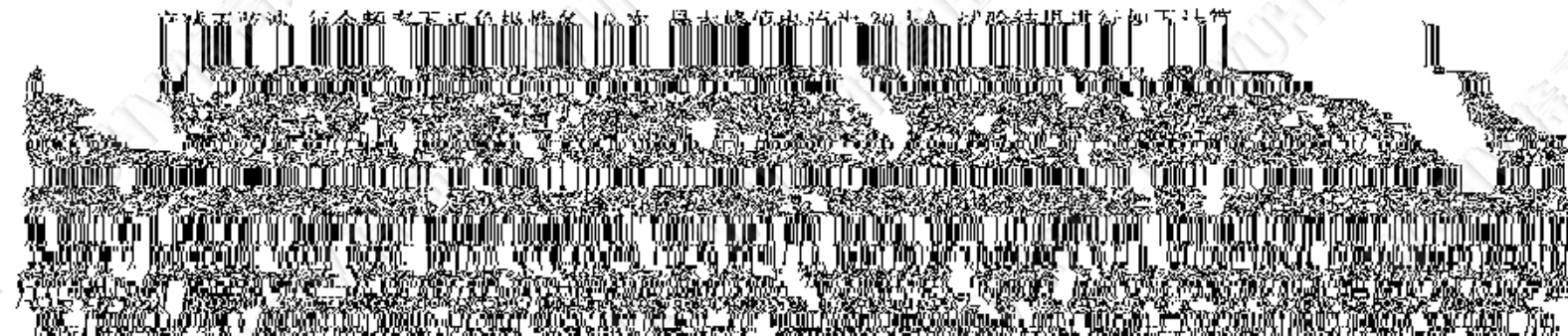


表 B.32 (续)

量	值	自由度	合成相对标准不确定度分量
$u_{X_{col}}^b$	0.001 9		0.001 9
$u_{X_{dis}}^b$	0.002 227		0.002 227
$u_{X_{comp}}^b$	0.002 989		0.002 989
$u_{X_{ins}}^b$	0.000 072		0.000 072
$u_{X_{ch}}^a$	0.000 64	50	0.000 64
P_{sum}	50.050 5	281	0.006 7
^a 正态分布; ^b 矩形分布。			

表 B.32 合成标准不确定度 u_m 计算为:

$$u_m = \sqrt{u_{X_{col}}^2 + u_{X_{dis}}^2 + u_{X_{ins}}^2 + u_{X_{ch}}^2 + u_{X_{comp}}^2 + u_{X_{pre}}^2 + u_{X_{cor}}^2}$$

$$= \sqrt{0.0019^2 + 0.002227^2 + 0.000072^2 + 0.00064^2 + 0.002989^2 + 0.000000^2 + 0.000000^2}$$

表 D-22 20% 油丰度海水盐度对

—40%电流水平： $u_x = u(F_x) = \frac{s_x}{\sqrt{n}} = 0.001 \quad (9)$

+40%电流水平： $u_x = u(F_x) = \frac{s_x}{\sqrt{n}} = 0.001 \quad (10)$

表 B.35 60%冲击电流水平比对

次数	约—60%电流值		约—60%电流值	
	标准系统	标准系统	标准系统	标准系统

表 B.36 (续)

次数	约 -80% 电流值			约 +80% 电流值		
	标准系统 I_s , kA	被校系统 V_s , V	F_s	标准系统 I_s , kA	被校系统 V_s , V	F_s
9	+158.725	+156.203	0.997	+160.873	+161.031	0.999
10	+159.221	+159.961	0.996	+160.172	+161.111	0.991

表 B.38 $g=5$ 个正负电流水平下及线性度结果汇总

电流水平数 g	电流水平 $I_{x,max}$ 的百分数, %	F_N	$s_N(F_N)$	u_{N_0}	$\left \frac{F_N}{F} - 1 \right $
1	-20	1.001	0.003 8	0.001 21	0.001 2
2	+20	1.001	0.004 3	0.001 36	0.001 2
3	-40	1.001	0.004 7	0.001 49	0.001 2
4	+40	0.998	0.001 1	0.001 40	0.001 8
5	-60	1.000	0.004 4	0.001 30	0.000 2
6	+60	1.001	0.002 6	0.000 823	0.001 2
7	-80	0.998	0.001 8	0.001 52	0.001 8
8	+80	0.998	0.003 9	0.001 21	0.001 8

确定度为 $U_{95} = \pm 0.51\%$ ($k = 2$)。其从 10 kA ~ 200 kA 的线性度通过与标准测量系统(记为 N)进行比对、对测量系统的环境温度影响、短时稳定性、长期稳定性、邻近回路电流、测量系统软件影响以及其他因素影响试验进行了研究测试,并对 F_{95} 的影响进行了相应计算。

刻度因数 F_{95} 的模型等式及其扩展标准不确定度见式(13.19):

$$u_0 = \frac{1}{\sqrt{3}} \times 0.002 = 0.00115$$

4) 测量系统的邻近回路试验引入的不确定度分量

在间隔 0.5 m 的邻近回路中施加 200 kA 的冲击电流,被测量系统电流转换装置开路,读取到被测测量系统中的电流读数为 50 A,则该项带来的不确定度分量为:

$$u_{\text{max}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \left| \frac{i_{\text{max}}}{i_{\text{meas}}} \right| = 0.00015$$

5) 测量系统软件引入的不确定度分量

与一标准测量系统 N 在约 100 kA 的冲击电流下进行比对校准波前时间(见图 B.1)。系统 N 在标称时段测量 $8\sim 20\ \mu\text{s}$ 冲击电流波形波前时间的系统平均误差为 $\Delta T_{1N} = 0.08\ \mu\text{s}$, 扩展不确定度为 $U_N = 0.16\ \mu\text{s}$ ($k=2$)。

通过比对, 两套系统同时记录了 10 对具有规定波前时间的冲击电流。由系统 N 记录的第 i 次冲击电流的实际波前时间由下式确定:

$$T_{1N,i} = \frac{(t_{90} - t_{10})}{0.8}$$

式中, t_{10} 和 t_{90} 分别为系统 N 确定的峰值幅值的 10% 和 90% 对应的时刻; 由系统 X 记录的同一冲击电流的波前时间 $T_{1X,i}$ 也是按相同方法计算的。

根据系统 X 和系统 N 测得的 $n=10$ 个对应波前时间的差, 由下式确定波前时间偏差的平均值:

$$\Delta T_1 = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^n (T_{1X,i} - T_{1N,i})$$

比对在标称时段的最小、最大和中间值三种不同的波前时间下进行, 即 $T_1 \approx 6\ \mu\text{s}$ 、 $T_1 \approx 8\ \mu\text{s}$ 和 $T_1 \approx 10\ \mu\text{s}$, 不同的波前时间可由序列号 j 来区分。对每个 T_1 值均计算平均误差 $\Delta T_{1,j}$, 3 个 $\Delta T_{1,j}$ 值的总

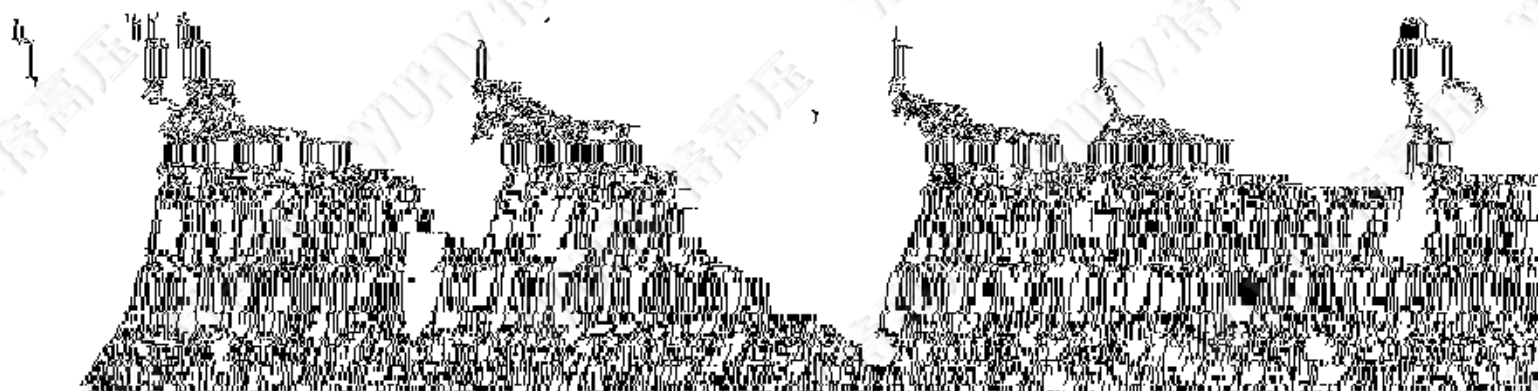


表 B.43 波前时间 T_1 和偏差的校准结果

		值		
$s_j(\Delta T_{1,i})$	μs	0.057	0.050	0.063
$\Delta T_{1,i}$	μs	0.12	0.20	0.19
ΔT_{1m}	μs	0.17		

表 B.43 给出了波前时间 T_1 和偏差的校准结果。

由 3 个 $T_{1X,j}$ 值的最大标准偏差计算 A 类标准不确定度：

$$u_A(T_{1X}) = \frac{1}{\sqrt{10}} \max_{j=1}^3 s_j = 0.019\ 9\ \mu\text{s}$$

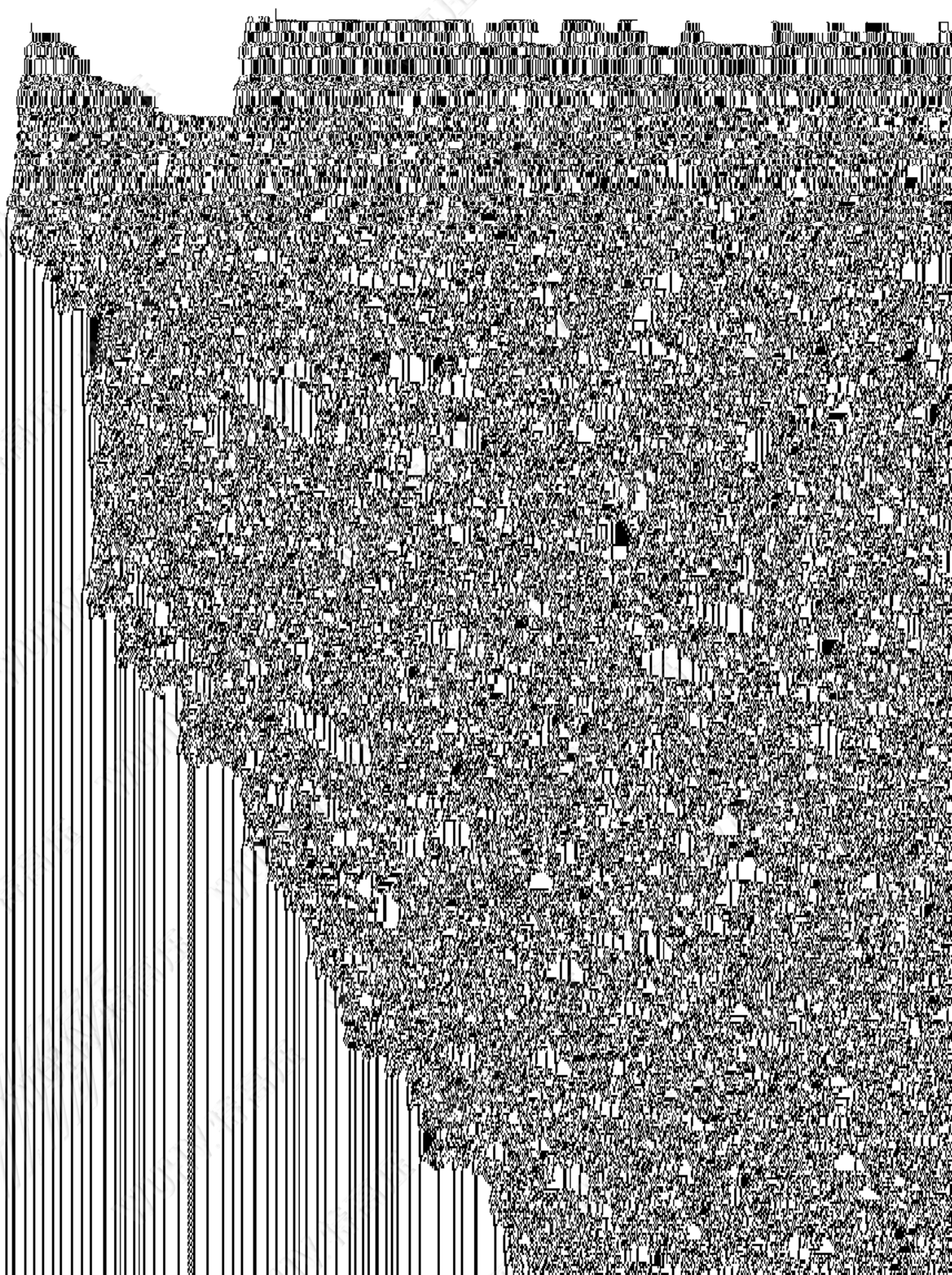
由平均值 ΔT_{1m} 中的三个单独 $T_{1X,j}$ 值的最大偏差给出 B 类标准不确定度：

$$u_B(T_{1m}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \max_{j=1}^3 |\Delta T_{1,i} - \Delta T_{1m}| = \frac{0.05\ \mu\text{s}}{\sqrt{3}} = 0.029\ \mu\text{s}$$

把所有输入量的数值及其标准不确定度代入模型公式，用附录 A 中给出的公式对模型等式进行计算。计算结果见表 B.44，表中最后一行给出了平均误差 $\Delta T_{1\text{tot}}$ 、合成标准不确定度及其有效自由度， $\nu_{\text{eff}} = 71$ 表示 $\Delta T_{1\text{tot}}$ 的可能值属正态分布，因此 $k = 2$ 是有效的（见表 A.1）。

表 B.44 波前时间偏差 $\Delta T_{1\text{tot}}$ 的不确定度预算

量	值 / μs	标准不确定 度分量 μs	自由度	敏感系数	合成标准不确 定度分量 μs
ΔT_{1X}	0.08	0.08 ^a	50	1	0.08
$u_A(T_{1X})$	0.00	0.020 ^a	9	1	0.020
ΔT_{1m}	0.17	0.029 ^b	∞	1	0.029
$\Delta T_{1\text{tot}}$	0.09		71		0.088
^a 正态分布。 ^b 矩形分布。					



附录 C
(资料性附录)
阶跃响应测量

C.1 电流阶跃波概述

C.2.1

基准水平 (仅对冲击测量) reference level

I_R

在区间 $0.5 \times t_{\min} \sim 2 \times t_{\max}$ 内阶跃响应的平均值 I_R (见图 C.3)

注: 一个测量系统可以具有一个以上的基准水平。例如, 由于响应水平 (见图 C.3) 的变化, 对不同的波形可具有不同的刻度因数。

C.2.2

阶跃响应原点 origin of a step response

O_1

响应曲线在 (单位) 阶跃响应 (见图 C.3) 的零电平处的噪声幅度之上的首次开始单调上升的瞬间。

注: 所有时间值均从原点 O_1 开始测量。

C.2.3

单位阶跃响应 unit step response

$g(t)$

以基准水平为单位值和零电平为零 (图 C.3), 经归一化后的阶跃响应。

注: 针对一个基准水平, 测试系统就有一个单位阶跃响应, 阶跃响应的原点 O_1 是单位阶跃响应的原点。

注：通常， $T_a = T(t_1)$ ，这里 t_1 是 $g(t)$ 首次到达单位幅值的时间（图 C.3）。

C.2.7

拟合响应时间 T_a

附录 D

(资料性附录)

卷积法确定阶跃响应测量的动态性能

D.1 概述

卷积法通常用于由冲击电流转换装置、数字记录仪或一个完整的冲击电流测量系统的阶跃响应来确定它们的动态性能の場合。

卷积法是利用测量系统的阶跃响应从其输入冲击波形来计算其输出冲击波形,输出波形和输入波形冲击参数之间的误差可用于评定对所测量的特定波形的测量系统的性能。

卷积法假定测量系统的阶跃响应的测量是正确的,且用于计算的输入波形为被测实际冲击波形的典型波形。

D.2 卷积的方法

如果一个冲击测量系统的输入冲击波形和单位归一化的阶跃响应(附录 C)分别为 $V_m(t)$ 和 $g(t)$, 则输出电压 $V_{out}(t)$ 可用如下的卷积积分表示:

$$V_{out}(t) = \int_0^t V'_m(\tau) g(t - \tau) d\tau \quad \dots\dots\dots (D.1)$$

式中:

t 时间;

$V'_m(t)$ 输入冲击波形 $V_m(t)$ 的一阶导数。

如果 $g(t)$ 和 $V_m(t)$ 以相同的采样间隔被采样, 并且 $g(t)$ 和 $V_m(t)$ 的采样点数也相同, 由此连续卷积积分(D.1)可转换为离散卷积总和的形式。

$$V_{out}(i) = \sum_{k=0}^{i-1} V'_m(k) \cdot g(i-k) \cdot \Delta t \quad (i = 0, \dots, n-1) \quad \dots\dots\dots (D.2)$$

式中:

$V_{out}(i)$ 离散输出电压数列;

$V'_m(i)$ 输入数列的一阶导数;

$g(i)$ 单位阶跃响应数列;

n 输入数列采样点数;

Δt 数列和阶跃响应数列的采样间隔。



样点数(见步骤3),输入波形应为平滑波形,其噪声最高频率已减小至远低于奈奎斯特频率(冲击数列的采样频率的一半)。平滑的输入波形数列和它的冲击参数可用下列方法之一获得:

- 1) 由冲击的解析表达式(如一双指数函数)产生。该波形的冲击参数既可以由解析表达式获得,也可以由被测冲击测量系统的冲击计算软件求得。
 - 2) 已由一精密低通数字滤波器或用一段三次样条拟合算法进行平滑后得到的实际记录波形。波形的冲击参数可由被测冲击测量系统的冲击计算软件求得。
- c) 通过数值计算的方法获得输入冲击波形 $V_m(i)$ 的一阶导数 $V'_m(i)$, $i = 0, \dots, n-1$ 。
- d) 获得单位阶跃响应数组 $g(i)$, $i = 0, \dots, m-1$, $m = n-j$, j 是所记录的阶跃响应原点 O_1 之前的数据点数。
- 1) 把所测阶跃响应进行归一化后求得单位阶跃响应(附录C)。为了进行卷积,可把数个阶跃响应记录取平均以获得低噪声的单位阶跃响应,如果式(1.2)用于卷积计算且冲击数列 $V_m(i)$ 已经平滑,则单位阶跃响应数列 $g(i)$ 的平滑便不太关键了。
- 注1:对于大电流测量系统,具有足够短的上升时间和足够长的波尾时间的阶跃响应是不可能得到。在这种情况下,通过组合波前较短的记录和波尾较长的记录可能得到近似的阶跃响应。这些记录可以通过不同的方法获得。
- 2) 把阶跃的开始前记录的阶跃响应数列 $s(i)$ 的采样值取平均来获得阶跃响应的零电平 l 。

D.5 冲击参数计算误差的讨论

D.5.1 峰值误差

单位阶跃响应的单位电平不总是恒定的。因此,尽管它与峰值要求的测量不确定度相比可能较小的,但是峰值的计算误差与卷积数值误差相比往往是较大的。

峰值计算的相对误差应等于在输入冲击 $V_{in}(t)$ 的波前时间 T_1 大约 2 倍的时刻 ($2T_1$) 处 $g(t)$ 值与

附录 E

(资料性附录)

对特定波形的参数限值规定

一些最初用来试验非线性的元器件的特定电流波形,在应用到线性元器件时在产生标准波形方面出现了一些问题。例如在避雷器试验中规定了 8/20 的波形,其中避雷器是高度非线性的元件。当负载为非线性时,该波形很容易得到,其参数如下:

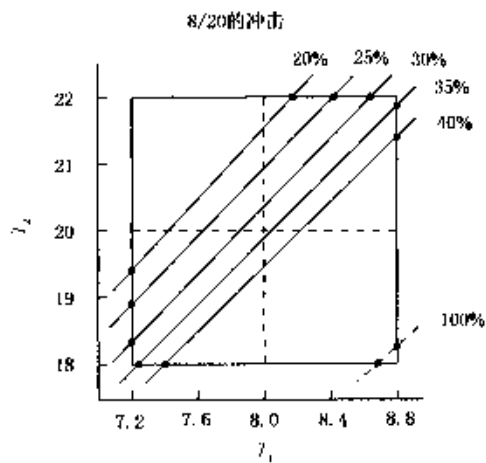
- 峰值: $\pm 10\%$;
- $T_1 = 8\ \mu\text{s} \pm 10\%$;
- $T_2 = 20\ \mu\text{s} \pm 10\%$;
- 反峰值: $< 20\%$ 峰值。

但是当负载为线性时,这些参数通常很难得到,因为波形产生回路仅用到了 R 、 L 、 C 元件,只可能得到 T_1 和 T_2 参数组合中的小部分参数。

波形计算的前提条件为反向过冲小于 20%,可以得到 T_2/T_1 的比值在 2.7 和 3.8 之间(见 Sato, T. Harada 和 M. Hanai 的相关著作)。

图 E.1 中显示了 T_2 和 T_1 在允许变化量为 10% 和 20% 时的允许存在范围。





说明:结果对 1/2.5 和 1/10 冲击波形同样适用。

图 E.2 8/20 冲击电流所允许的时间参数与反向过冲值的函数轨迹

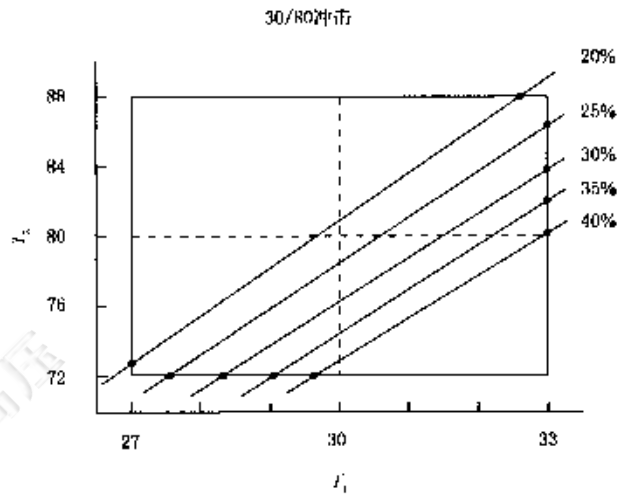


图 E.3 30/80 μs 冲击电流所允许的时间参数与反向过冲值的函数轨迹

附录 F
(资料性附录)
电阻元件的温升

在冲击电流和/或短时电流的一般工作条件下,分流器在非常短的时间内要消耗大量热量,以至于该电阻材料的加热过程几乎是绝热过程。在这些情况下,温升 ΔT 和电阻变化量 ΔR 可以计算如下:

附录 G

(资料性附录)

短时交流电流有效值的确定

G.1 短时变化电流的一般特性

短路电流试验的等效电路图如图 G.1 所示。图中给出了在变压器输出端短路情况下的等效电路。

G.3 对称的交流分量(真有效值)

短路变化电流的对称交流分量(如由不受任何附加试品阻抗和试品自身承受的短路电流影响的特定试验回路产生的短路电流)的真有效值定义如图 G.2 所示。

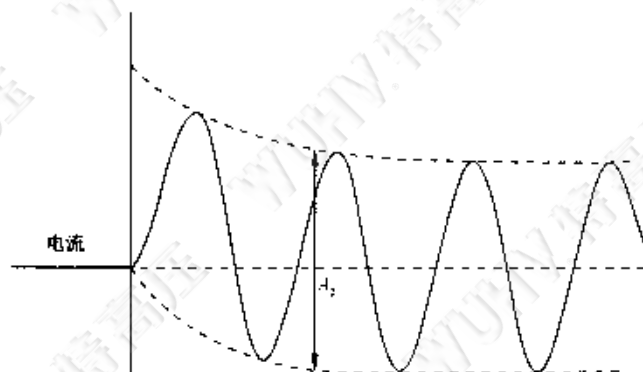
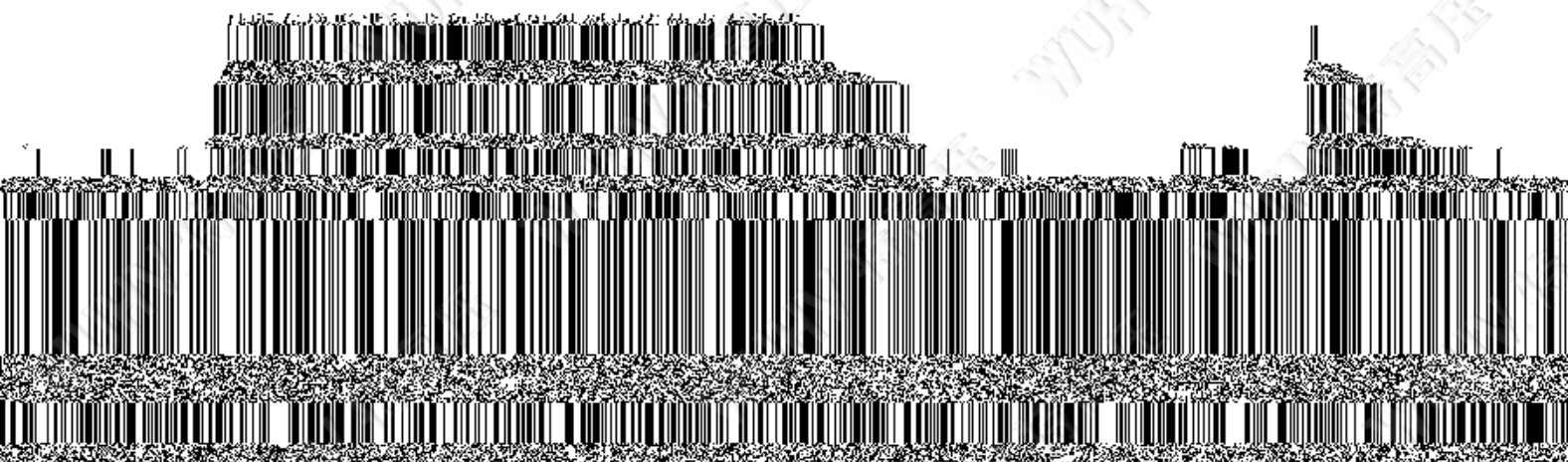
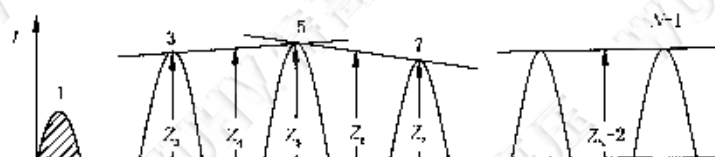


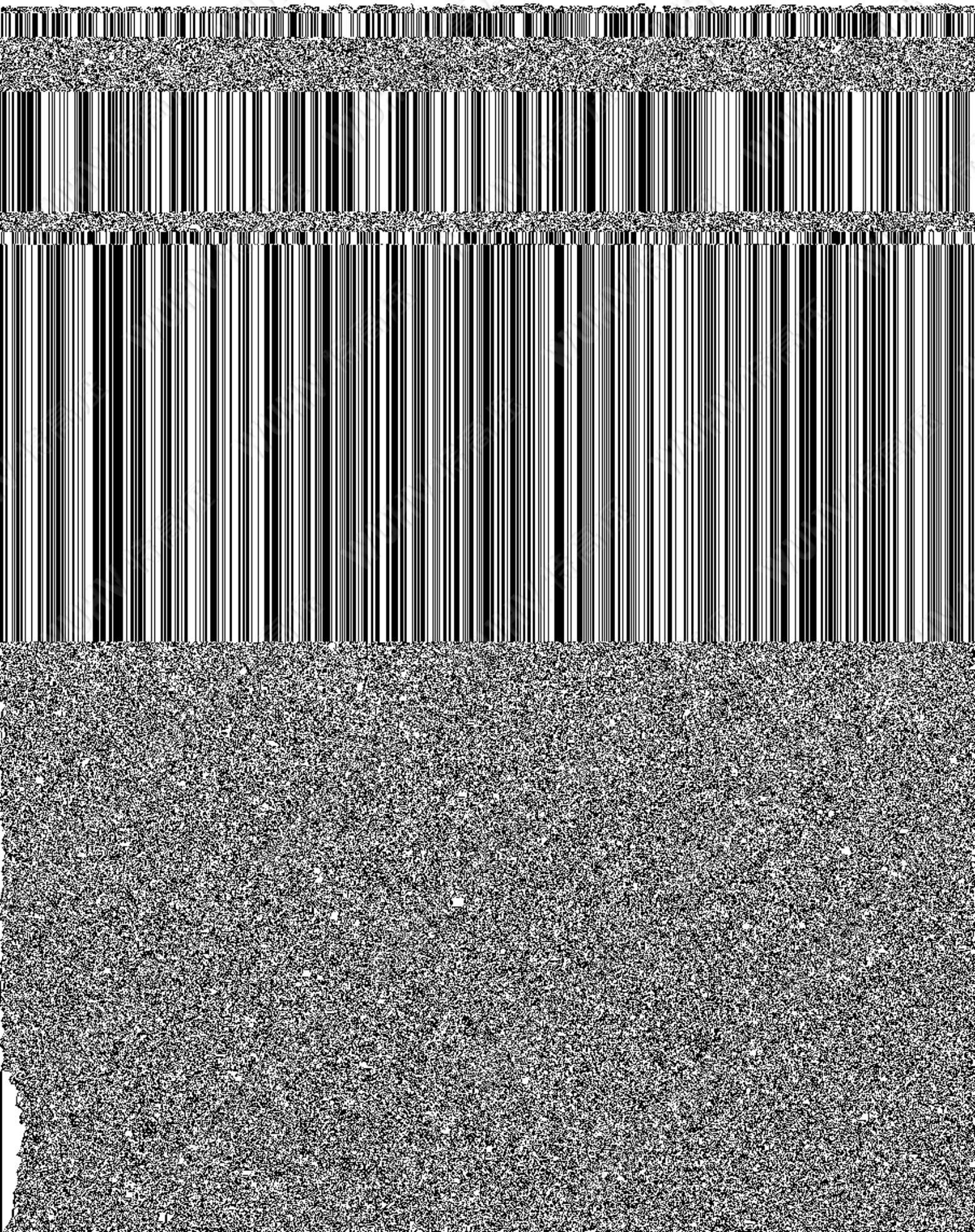
图 G.2 短路变化电流的对称交流分量

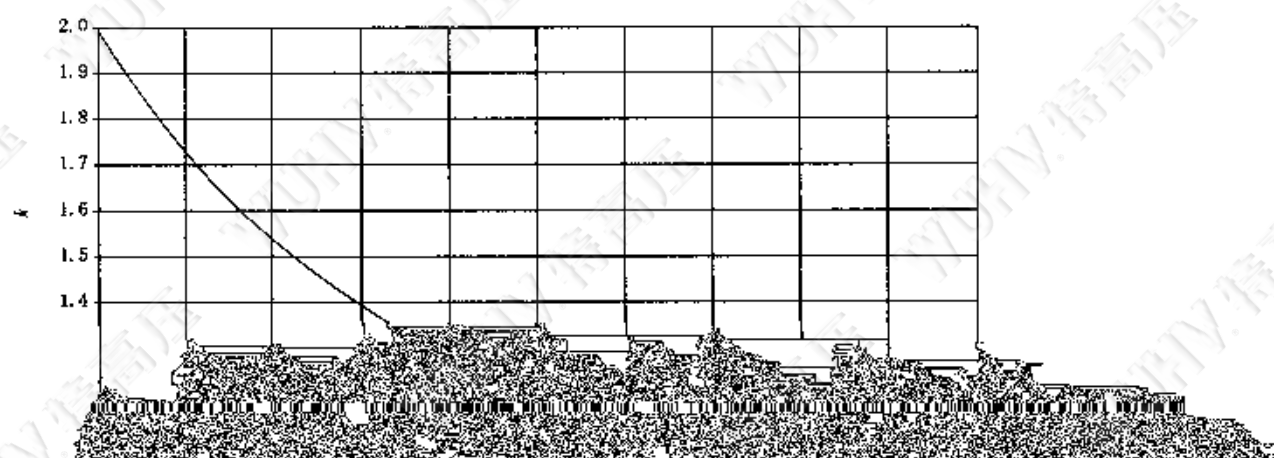


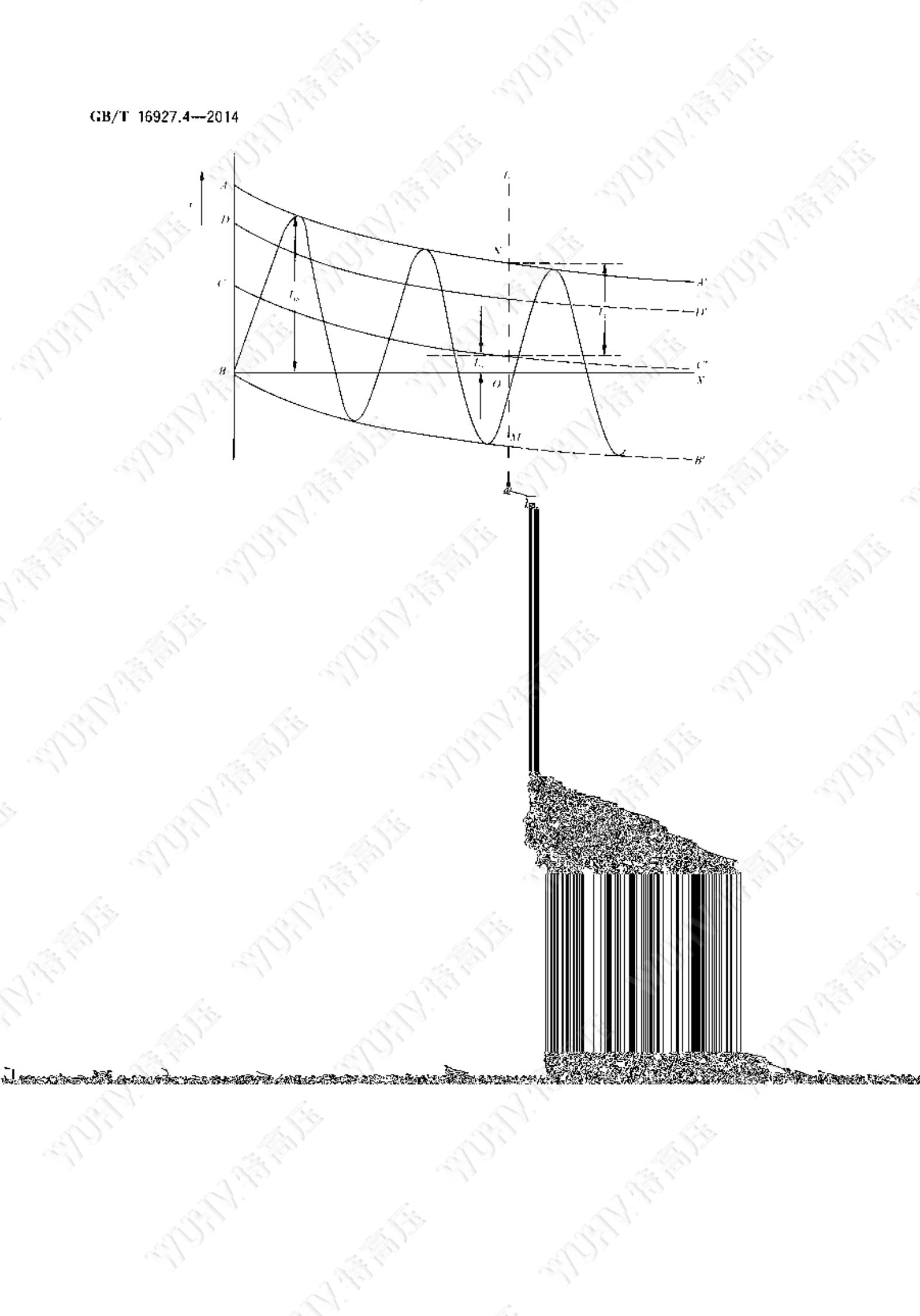


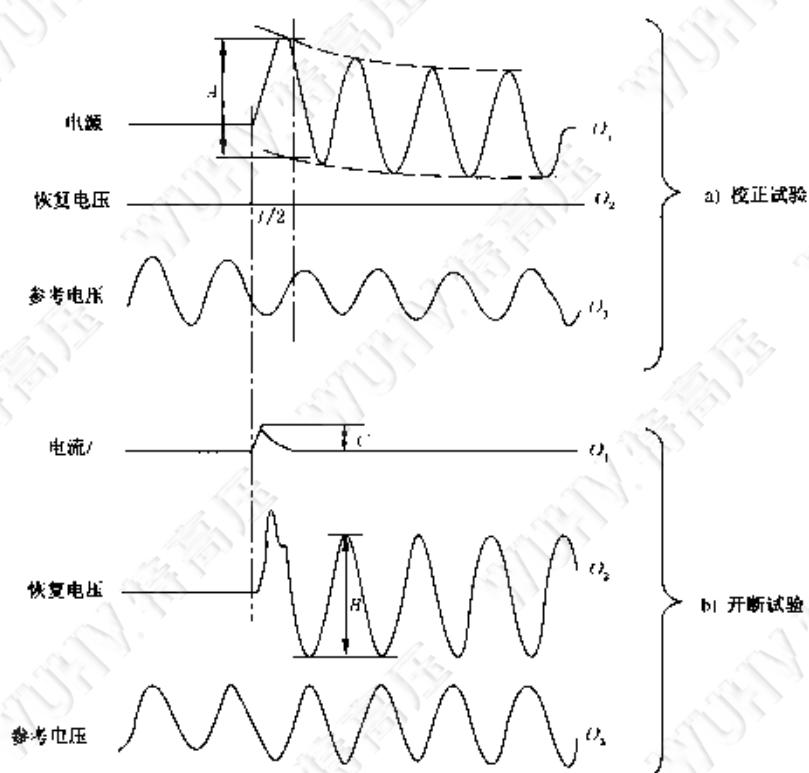
的情况下,将第一个半波和最后一个周波去掉(图 G.5)。











说明:

预期开断电流交流分量有效值 $I = \frac{A}{2\sqrt{2}}$;

恢复电压 $V = \frac{B}{2\sqrt{2}}$;

截止电流 $I = C$, 断路器在开断时出现的最大电流瞬时值

附录 H

(资料性附录)

国标和 IEC 大电流试验示例

表 H.1 短时交流电流的典型试验列表

试验类型	IEC 相关标准(示例)
峰值耐受电流和短时耐受电流试验	GB 1094.5, IEC 60076-5 GB/T 7251.2, IEC 60139-2 GB 14048.1, GB 14048.2, IEC 60947-1, IEC 60947-2 GB 14048.3, IEC 6017-3 DL/T 879, IEC 61230 IEC 61439-1 GB/T 11022, IEC 62271-1
关合和开断试验	GB 3801, IEC 60265-1 GB 11048.1, GB 11048.2, IEC 60947-1, IEC 60947-2 GB 14048.3, IEC 6017-3 GB 1984, GB 1985, IEC 62271-100, IEC 62271-102 GB/T 14810, GB 16926, IEC 62271-101, IEC 62271-105
并联电抗器开合试验	IEC 62271-110
容性电流开合试验	GB 1984, IEC 62271-100
合成试验	GB/T 4473, IEC 62271-101
限流熔断器试验	GB/T 15166.2, IEC 60282-1

表 H.2 指数型冲击电流的典型试验列表

试品类型	参考标准	冲击类型	时间参数
无间隙避雷器试验	GB 11032, IEC 60099-4	1, ≤ 20	$T_1 \geq 10 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \mu\text{s}$
无间隙避雷器试验	GB 11032, IEC 60099-4	1, 10	$3.5 \mu\text{s} < T_1 < 1.5 \mu\text{s}$ $T_2 \pm 10\%$
无间隙避雷器试验	GB 11032, IEC 60099-4	8/20	$7 \mu\text{s} < T_1 < 9 \mu\text{s}$ $18 \mu\text{s} < T_2 < 22 \mu\text{s}$
避雷器试验	IEC 61643-11		$T_1 \pm 10\%$ $T_2 \pm 10\%$
电子设备	GB/T 17626.5, IEC 61000-4-5		$T_1 \pm 20\%$ $T_2 \pm 20\%$
通讯网络中的电涌保护器 低压配电系统中的电涌保护器 (SPD)	GB 18802.21, IEC 61643-21		$T_1 \pm 20\%$ $T_2 \pm 20\%$

表 H.2 (续)

试品类型	参考标准	冲击类型	时间参数
无间隙避雷器测试	GB 11032, IEC 60099-1	30/80	$25 \mu\text{s} < T_d < 35 \mu\text{s}$ $70 \mu\text{s} < T_r < 90 \mu\text{s}$
无间隙避雷器测试	GB 11032, IEC 60099-1	30/100/(60-200)	
无间隙避雷器测试	GB 11032, IEC 60099-1 中表 5 和表 6	$T_d = 500 \mu\text{s}, 1\,000 \mu\text{s}, 2\,000 \mu\text{s}$ 或 $2\,000 \mu\text{s} < T_d < 3\,200 \mu\text{s}$	$T_r \pm 20\%$ $T_r \pm 20\%$
通讯网络中的电涌保护器	GB 18802.21, IEC 61643-21	5/300	$T_r \pm 30\%$ $T_r \pm 20\%$
无间隙避雷器测试	GB/T 21714.1, IEC 62305-4	10/350	未给出
通讯网络中的电涌保护器	GB 18802.21, IEC 61643-21	10/350 10/250	$T_r \pm 30\%$ $T_r \pm 20\%$

表 H.3 使用矩形波冲击电流的典型试验

试品类型	参考标准	冲击类型
无间隙避雷器测试	GB 11032, IEC 60099-1 中表 5 和表 6	$T_d = 500 \mu\text{s}, 1\,000 \mu\text{s}, 2\,000 \mu\text{s}$ 或 $2\,000 \mu\text{s} < T_d < 3\,200 \mu\text{s}$

参 考 文 献

- [1] IEC 60050-151; 2001 International Electrotechnical Vocabulary Part 151; Electrical and magnetic devices
- [2] IEC 60050-300; 2001 International Electrotechnical Vocabulary Electrical and electronic measurements and measuring instruments Part 311; General terms relating to measurements Part 312; General terms relating to electrical measurements Part 313; Types of electrical measuring in-

voltages above 1 kV up to and including 52 kV

- [24] IEC 62271-104 High voltage switchgear and controlgear Part 104: Alternating current switchgear for rated voltages of 52 kV and above