



中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 1067—2000

工频电压比例标准装置校准规范

Calibration Specification for Sets of Voltage

Ratio Standards at Power Frequency

2000—03—06 发布

2000—07—01 实施

国家质量技术监督局 发布

工频电压比例标准装置

校 准 规 范

Calibration Specification for Sets of Voltage

Ratio Standards at Power Frequency

JJF 1067—2000

本校准规范经国家质量技术监督局于 2000 年 03 月 06 日批准，并自 2000 年 07 月 01 日起施行。

归口单位：全国交流电量计量技术委员会

起草单位：国家高电压计量站

本规范委托全国交流电量计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

王乐仁 （国家高电压计量站）

张泽平 （国家高电压计量站）

参加起草人：

侯铁信 （国家高电压计量站）

鲍仕曼 （国家高电压计量站）

张玉萍 （国家高电压计量站）

目 录

1	概述·····	(1)
2	技术要求·····	(3)
3	校准条件·····	(4)
4	校准方法·····	(5)
5	校准数据的处理·····	(9)
6	校准结果的处理和校准间隔·····	(13)

工频电压比例标准装置校准规范

本规范适用于以精密感应分压器及中心电位屏蔽型精密电压互感器为主标准器的工频电压比例标准装置的校准操作。

1 概述

1.1 精密感应分压器

精密感应分压器分为单盘感应分压器与多盘感应分压器两类。用作工频电压比例标准器的感应分压器通常采用自耦式结构，它们的电气原理如图 1 和图 2 所示。图中 A—X 为激磁绕组， A_0 — X_0 为比例绕组。为了减小引线压降误差，激磁绕组与比例绕组应使用各自的连接导线与一次电压端子连接。

单盘感应分压器的误差按比例误差定义。多盘感应分压器的误差应折算到一次电压侧，用式子表示就是：

$$\epsilon = (\dot{U}_2 - \dot{U}_1/K)/\dot{U}_1 = \Delta\dot{U}_2/\dot{U}_1$$

式中：K——额定分压比。

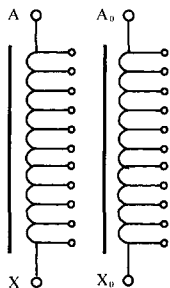


图 1 单盘感应分压器结构

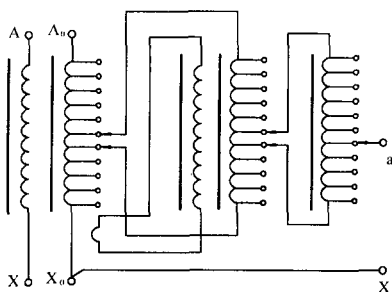


图 2 多盘感应分压器结构

1.2 中心电位屏蔽型精密电压互感器

在普通不接地精密电压互感器的一次和二次绕组外面包上铜箔，分别与指定的出线端子相连，即成为电位屏蔽型电压互感器。用于工频电压比例标准装置的中心电位屏蔽型互感器，一次绕组的屏蔽电位与绕组中心点的电位相等。它的电路结构如图 3 所示。

有了中心电位屏蔽后，一次和二次绕组的分布参数在 X 端接地与不接地时都保持不变。因此，电压互感器的误差也保持不变。使用时，P 点电位用升压器的中心抽头提供。

1.3 参考电势法

参考电势法是一种使用普遍的工频电压加法,其原理可用图4说明。设A-X间有 n 个电势串联,顺序为 $\dot{E}_1, \dot{E}_2, \dots, \dot{E}_n$ 。今以电势 \dot{E}_s 为参考量,用补偿法依次测量 $\dot{E}_i - \dot{E}_s$ 的值,结果为 ϵ_i ,于是有

$$\sum (\dot{E}_i - \dot{E}_s) = \sum \epsilon_i \quad (1)$$

因为 $\sum \dot{E}_i = \dot{E}_{AX}$, 所以

$$n\dot{E}_s = \dot{E}_{AX} - \sum \epsilon_i \quad (2)$$

$$\dot{E}_i = \dot{E}_{AX}/n + \epsilon_i - \sum \epsilon_i/n \quad (3)$$

也就是说,经过 n 次测量,可以确定 \dot{E}_i 的误差,从而能计算出由它们组合而产生的所有电压比的误差。

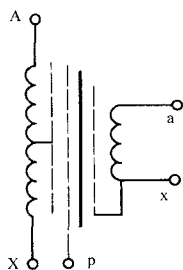


图3 中心电位屏蔽型互感器结构

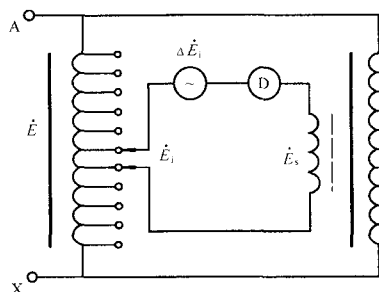


图4 参考电势法原理线路

1.4 互感器串联电压加法

互感器串联电压加法属于一种双边工频电压加法,其原理可用图5说明。图中 T_1, T_2, T_3 的额定电压比相同,其中接地型电压互感器 T_1 和 T_2 在一次侧和二次侧都串联连接,中心电位屏蔽型电压互感器 T_3 的一次绕组和串联后的 T_1 和 T_2 的一次绕组并接;在二次侧,以串联后的 T_1 和 T_2 的二次电压为参考测量 T_3 的电压比误差。设 T_1, T_2, T_3 的电压比误差分别为 α, β 和 γ ,在A-X间加有电压 $2U$ 时,测得误差为 ϵ_c ,即

$$\epsilon_c = \alpha(2U) - \beta(U)/2 - \gamma(U)/2 \quad (4)$$

然后用图6的电路分别以 T_1 和 T_2 为参考测量 T_3 的电压比误差 ϵ_a 和 ϵ_b ,即

$$\epsilon_a = \alpha(U) - \beta(U) \quad (5)$$

$$\epsilon_b = \alpha(U) - \gamma(U) \quad (6)$$

由以上 3 式可得到

$$\alpha(2U) - \alpha(U) = \epsilon_c - (\epsilon_a + \epsilon_b)/2 \quad (7)$$

因此, 用互感器串联加法可得到电压互感器的电压系数曲线。

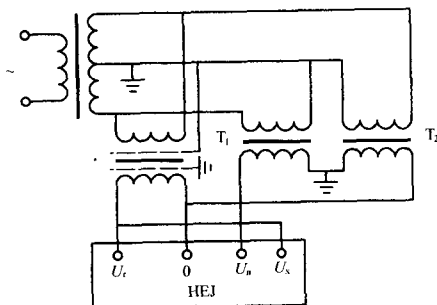


图 5 互感器串联电压加法线路

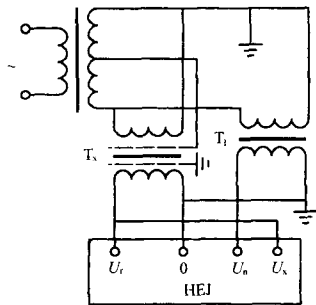


图 6 电压互感器互校线路

2 技术要求

2.1 工频电压比例标准装置计量准确度根据主标准器的比率修正值准确度分为 1×10^{-6} , 2×10^{-6} , 5×10^{-6} , 1×10^{-5} , 2×10^{-5} , 5×10^{-5} , 1×10^{-4} 共 7 个等级。各个等级的允许误差见表 1。

表 1 工频电压比例标准器的允许误差

准确度等级	1×10^{-6}	2×10^{-6}	5×10^{-6}	1×10^{-5}	2×10^{-5}	5×10^{-5}	1×10^{-4}
比值差 (10^{-6})	± 1	± 2	± 5	± 10	± 20	± 50	± 100
相位差 (μ rad)	± 1	± 2	± 5	± 10	± 20	± 50	± 100

工频电压比例标准装置按工作电压范围设置多个主标准器时, 准确度可以根据工作电压范围分段表示。

2.2 装置中的电压互感器和感应分压器, 其比率误差应符合以下关系:

$$\epsilon \leq 4\zeta$$

式中, ζ 为比率修正值允许误差, ϵ 为比率误差的绝对值。

2.3 装置中的电压互感器和感应分压器,工作电压上升与下降时的变差,应不大于其比率修正值允许误差的 $1/5$;校准间隔内电压比的变化,应不大于其比率修正值允许误差的 $1/3$ 。

2.4 装置中的参考电势装置应有完善的电位屏蔽,校准时屏蔽电位变化对参考电势的影响,应不大于比率修正值允许误差的 $1/5$ 。参考电势的屏蔽误差可以用以下方法测量:把一次绕组短接且屏蔽接地,在短接的一次绕组和屏蔽之间施加实际工作电压,在参考电势绕组上产生的电压与该绕组额定电压之比就是屏蔽误差。如果参考电势屏蔽达不到以上要求,但可以通过某种测量方法抵偿,也允许使用。

装置中的中心电位屏蔽型电压互感器,校准时屏蔽电位的变化对二次电压的影响,应不大于比率修正值允许误差的 $1/5$ 。参考电势的屏蔽误差,可以用电压加法得到的电压系数与比较法测量得到的电压系数之差来计算。

2.5 装置中的电压比例标准器,应能耐受 1.5 倍额定电压 1 min 试验而不损坏,当恢复到正常工作电压范围时,误差应无显著改变。它们的一次和二次绕组之间,以及一次和二次绕组对地之间的绝缘电阻,应大于 $200\text{ M}\Omega$ 。

2.6 装置中的电压比例标准器和升压器,在工作电压范围内产生的二次电压非线性失真,应不大于 1% ,提供中心电位的升压器,中心电位对称性应优于 0.1% 。

3 校准条件

3.1 实验室环境温度 $10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度 $30\%\sim 80\%$ 。

3.2 实验室应有专用的接地装置,接地电阻不大于 $5\text{ }\Omega$ 。

3.3 工作电源频率为 $(50\pm 0.5)\text{ Hz}$,波形失真不大于 5% 。电源中性点与接地装置之间电压不大于 5 V 。电源有足够的稳定度,能满足检验要求。

3.4 环境电磁干扰对测量结果的影响,应不大于比率修正值允许误差的 $1/10$ 。干扰程度可以用改变试验电源极性的方法估计,两次测量结果之差,应不大于比率修正值允许误差的 $1/5$ 。

3.5 误差测量装置对测量结果的影响,应不大于被校设备比率修正值允许误差的 $1/10$ 。其中仪器灵敏度的影响不大于 $1/20$,最小分度值的影响不大于 $1/15$,差压测量回路负荷的影响不大于 $1/20$ 。

误差测量装置应具有不接地的差值电压回路,对共模干扰的抑制能力不小于 120 dB ,三次以上谐波抑制能力不小于 40 dB 。

误差测量装置用于指示工作电压的电压表,测量误差应不超出下式给定范围:

$$\Delta U = \pm (1.5\% U + 0.2\% FS) \quad (8)$$

式中: U ——测量值;

FS ——量程的满度值。

4 校准方法

4.1 外观检查

被校设备外观应完好, 铭牌标志齐全清晰, 接线端子完整, 标志正确。油浸式互感器的油箱与高压套管中的油位符合要求。

4.2 绝缘电阻试验

试验使用 2000 V 或 2500 V 兆欧表, 依次测量各台设备一次对二次, 一次和二次对地之间的绝缘电阻, 结果应不小于 200 MΩ。

4.3 绝缘电压试验

接地电压互感器和感应分压器, 工频电压加在一次绕组上, 也可以用二次电压感应出符合要求的一次电压。试验时一次绕组的 X 端接地。不接地电压互感器采用二次电压感应方法, 一次绕组不接地。

试验电压为额定工作电压的 1.5 倍, 偏差不大于 3%。电压应缓慢上升, 到最大试验电压的 80% 处稍作停顿, 然后以匀速在 1~2 min 内升到指定试验电压, 停留 1 min 后迅速下降到零。试验过程中被试设备应无过热、放电及绝缘损坏现象。

4.4 电压比较准

电压比较准的目的, 是通过校准得到各台标准器的电压比误差及不确定度。为了减小随机误差, 本规范规定用统计方法试验, 试验次数不少于 6 次, 试验中的粗差除了要剔除外, 还应补做试验数据。

本规范对试验电压百分数范围不作规定, 实验室可根据装置技术条件及量值传递需要拟定, 一般应控制在设备额定工作电压的 10%~150% 范围。

4.4.1 单盘感应分压器自校

单盘感应分压器的校准可按图 7 线路进行。图中 T_1 为接地与供电分压器, T_2 为参考变压器, T_0 为被校分压器。如果参考变压器 T_2 的屏蔽效果达不到第 2.4 的要求, 则应采用倒换极性法, 用两次测量的平均值消除屏蔽误差。倒换时, T_2 的一次及二次高低端要同时换接。其它结构的参考变压器, 可以采取相应的能消除屏蔽误差的换接方法。

试验时, 按图 7 线路逐段测量 T_0 各段电势 E_i 相对于参考电势 E_s 的误差 ϵ_i , 并把数据填入表 2, 然后计算出两次测量的平均值和各段误差平均值 $\bar{\epsilon}$ 。填入表 2 的数据可用 $(\pm a \pm bj)$ 的复数形式, 也可以分成关于 f 值和 δ 值两个表格的形式。其它表格情况相同, 不再加以说明。

$$\bar{\epsilon} = \sum_{i=1}^n \epsilon_i / n \quad (9)$$

分压比误差按下式计算:

$$\epsilon_k = \sum_{i=1}^k \epsilon_i / k - \bar{\epsilon} \quad (10)$$

单盘分压器除按通常的 10 段校准外, 还应进行 9 段和 7 段校准。

表 2 单盘分压器试验记录

 $U_p/U_n =$ % $\varepsilon \times 10^{-6}$

	1	2	3	n	$\bar{\varepsilon}$
1						
2						
平均						
ε_k						

4.4.2 多盘感应分压器校准

多盘感应分压器应采用整体方法校准, 条件不具备时, 允许用半整体方法校准。如果半整体方法所得结果与整体方法不一致, 以整体校准结果为准。

4.4.2.1 整体校准多盘感应分压器可采用图 8 所示线路, T_1 为接地及供电分压器, T_2

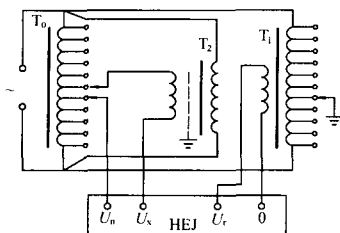


图 7 单盘分压器校准线路

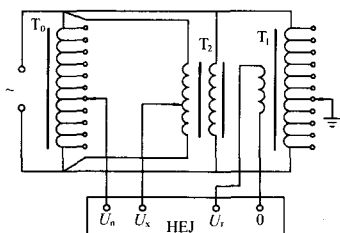


图 8 多盘分压器校准线路

为被校分压器, T_0 为单盘分压器 (也可以是多盘分压器), 准确度至少比被校分压器高一级, 并有已知比率误差校准值和不确定度。HEJ 为误差测量装置。当环境干扰不能满足测量误差要求时, 还需要用倒换电源极性方法, 取两次测量平均值。被检分压器金属外壳上的接地端子应与标准分压器的 X 端连接, 并对地绝缘。测量时, 用单盘分压器 (或标准多盘分压器) 给出 $10/N$, ($N=1\sim 10$), $9/N$, ($N=1\sim 9$), $7/N$, ($N=1\sim 6$) 等共 25 个标准比率。并把误差测量结果填入表 3, 然后计算出两种电源极性下测量平均值。

4.4.2.2 用半整体方法校准多盘分压器时, 应以每个十进盘为单位, 用参考电势法测量各段误差后计算出各盘 $10/N$ 系列各分压比的误差, 并把结果填入表 4。测量方法和步骤可参照 4.4.1 内容。

表 3 整体校准多盘分压器记录 $U_p/U_n = \% \quad \epsilon \times 10^{-6}$

	10/1	9/1	7/1	7/6
1							
2							
平均							

表 4 半整体校准多盘分压器记录 $U_p/U_n = \% \quad \epsilon \times 10^{-6}$

	1	2	3	10/10
第一盘					
第二盘					
:					
:					
:					

按半整体方法校准多盘感应分压器时, 还应把分压器金属外壳接地端子与 X 连接, 用另一台分压器作参考标准, 在前一盘置 $(N-1)$, 后一盘置 10 时测量一次, 然后在前一盘置 N , 后一盘置 0 时测量一次, 把二次测量值之差作为第 N 段的负荷效应。把各盘测得的段最大负荷效应 (去掉符号) 折算到一次电压, 再按方和根法综合, 作为比率误差不确定度的一个分量。

4.4.3 中心电位屏蔽型电压互感器校准

4.4.3.1 电压比误差值的电压系数测量

试验线路如图 5 和图 6 所示。先以被校互感器额定电压的 10% 为间隔, 在 20% 到 120% 额定电压范围测量被校互感器与两台串联的接地互感器的相对误差 ϵ_c , 然后以被校互感器额定电压的 5% 为间隔, 在 10% 到 60% 额定电压范围测量被校互感器与单台接地互感器的相对误差 ϵ_a 和 ϵ_b , 把测量结果填入表 5, 并在表中计算出 $\alpha - \alpha^* = \epsilon_c - (\epsilon_a + \epsilon_b) / 2$ 的值。

测量时可用被校互感器作为供电互感器,使它在校准时始终以误差测量装置的工作电压回路为负荷,保持两台接地互感器为 0 VA 负荷。

测量时,除上限点外,其它点应取电压上升与下降时的测量平均值。

表 5 电压串联加法数据记录

 $\epsilon \times 10^{-6}$

U_p/U_n (%)	20	30	40	120
ϵ_c					
U_p/U_n (%)	10	15	20		60
ϵ_d					
ϵ_b					
$\alpha - \alpha^*$					

4.4.3.2 参考点误差测量

被校电压互感器 T_x 的电压比通常大于标准器 T_0 的电压比,需要在单盘感应分压器或标准器 T_0 的二次输出端级联多盘感应分压器 T_2 ,组成如图 9 或图 10 所示的测量线路。

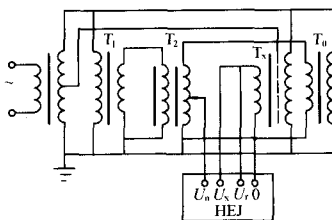


图 9 用电压互感器与多盘分压器
级联测量高压互感器参考点

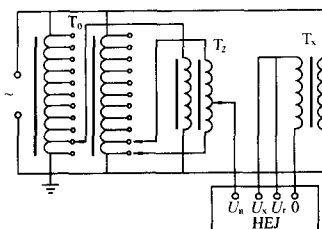


图 10 用感应分压器级联测量
高压互感器参考点

图 9 中 T_1 的电压比与 T_0 相同,用来给 T_2 的激励绕组供电。误差测量装置 HEJ 依然由 T_x 供电。测量点可根据表 4 选取,通常为 10%、15%、20% 额定电压点。为了减小电磁干扰误差,可以倒换电源极性,取两次测量的平均值。测量结果填入表 7。如果 T_0 是单盘感应分压器,则可按图 10 的级联方法与 T_2 级联。

表 6 电压互感器参考点误差测量

 $\epsilon \times 10^{-6}$

U_p/U_n (%)	10	15	20
1				
2				
平均				

5 校准数据的处理

5.1 读取的测量有效数字最后一位应不大于被校标准装置比率修正值允许误差的1/20。最后结果修约时，原则上保留二位有效数字，如果一位有效数字已能满足修约间隔不大于比率修正值允许误差的1/20，也可以用一位有效数字给出结果。

5.2 单盘感应分压器误差计算

5.2.1 比率误差校准值

表7是单盘感应分压器的比率误差值统计表。把表2中计算得到的比率误差 ϵ_k 按测量顺序填入表7，再用统计方法计算出平均值和标准差 s 。

表 7 单盘分压器测量数据统计表 $U_p/U_n = \%$ $\epsilon \times 10^{-6}$

	10/1	9/1	7/1	7/6
1							
2							
:							
:							
:							
n							
平均							
s							

对应于某电压比的误差平均值就是该比率的误差校准值。

5.2.2 误差校准值的合成标准不确定度 误差校准值的合成标准不确定度 u_{c1} 由 A 类分量和 B 类分量组成。A 类分量为表 8 中 s 的最大值, 记作 s_1 。B 类分量包括误差测量装置的标准不确定度 u_1 , 参考电势屏蔽不良对应的标准不确定度 u_2 。以上 3 项按方和根法综合, 即

$$u_{c1} = \sqrt{s_1^2/n + u_1^2 + u_2^2}$$

式中 n 为试验次数, $u_1 = 0.1\epsilon_{\max}/1.7$, ϵ_{\max} 为校验仪测量读数最大绝对值, 自由度 8。不修正屏蔽误差 ϵ_p 时, $u_2 = \epsilon_p/1.7$, 自由度 8; 用平均法消除屏蔽误差时, 取 $u_2 = 0.2\epsilon_p/1.7$, 自由度 8。

5.3 多盘感应分压器的误差计算

5.3.1 表 7 也用于感应分压器整体校准数据统计, 把表 3 中计算出的比率误差值按测量顺序填入表中, 然后用统计方法计算出平均值和标准差 s 。

对应于某电压比的误差平均值, 加上标准器的误差校准值, 就是该比率的误差校准值。

5.3.2 用半整体方法校准多盘感应分压器时, 可采用表 8 格式逐盘计算平均值和标准差 s 。

表 8 多盘分压器半整体校准数据统计表 $U_p/U_n = \% \quad \epsilon \times 10^{-6}$

	10/1	100/1	1000/1
1						
2						
:						
:						
:						
n						
平均						
s						

某比率的误差用组成该比率的各盘所置比率值的误差, 折算到一次电压后按系统误差综合, 作为该比率的误差校准值。

5.3.3 多盘感应分压器误差校准值的合成标准不确定度

整体校准时, A 类分量取表 7 中最大的 s 值 (记作 s_2), B 类分量包括标准器误差

值的标准不确定度 u_3 和误差测量装置对应的标准不确定度 u_4 ，合成标准不确定度按下式综合：

$$u_{c2} = \sqrt{s_2^2/n + u_3^2 + u_4^2}$$

式中 u_3 根据标准器校准证书给出的标准不确定度及自由度取值。 $u_4 = 0.1\epsilon_{\max}/1.7$ ， ϵ_{\max} 为校验仪测量读数最大绝对值，自由度 8。

半整体校准时，A 类分量取表 8 中第一盘最大的 s 值（记作 s_3 ），B 类分量包括测量装置对应的标准不确定度 u_5 ，参考电势对应的标准不确定度 u_6 ，负荷对应的标准不确定度 u_7 ，再按下式综合得到合成的标准不确定度：

$$u_{c3} = \sqrt{s_3^2/n + u_5^2 + u_6^2 + u_7^2}$$

式中 $u_5 = 0.1\epsilon_{\max}/1.7$ ， ϵ_{\max} 为校验仪测量读数最大绝对值，自由度 8。不修正屏蔽误差 ϵ_p 时， $u_6 = \epsilon_p/1.7$ ，自由度 8；用平均法消除屏蔽误差时，取 $u_6 = 0.2\epsilon_p/1.7$ ，自由度 8。 $u_7 = \epsilon_q/1.7$ ， ϵ_q 为负荷误差绝对值，自由度 8。

5.4 中心电位屏蔽型电压互感器误差计算

5.4.1 误差值的电压系数统计计算

把表 4 中计算出的 $\alpha - \alpha^*$ 值按测量顺序填入表 9，然后计算出表中数据的平均值和标准差 s 。

表 9 互感器加法电压系数统计表

$\epsilon \times 10^{-6}$

U_p/U_n (%)	20	30	40	……	120
1					
2					
:					
:					
:					
n					
平均					
s					

5.4.2 参考点误差值统计计算

把表 6 中计算出的平均值按测量顺序填入表 10，然后计算出表中数据的平均值和标准差 s 。

表 10 电压互感器参考点误差统计表

 $\epsilon \times 10^{-6}$

U_p/U_n (%)	10	15	20
1				
2				
:				
:				
:				
n				
平均				
s				

5.4.3 误差校准值计算

以被检互感器额定电压的 10%、20%、40%、80% 以及 15%、30%、60%、120% 为基本误差校准点。把表 10 中的统计平均值加上标准器的系统误差修正值后，作为被校互感器的部分测量点误差，再把它们标到误差曲线图上。

其它测量点误差则根据表 9 外推，方法如下：

30% 点的误差值等于 15% 点误差值加上表 9 中 30% 栏中 $\alpha - \alpha^*$ 的值，60% 点的误差值等于 30% 点误差值加上表 9 中 60% 栏的 $\alpha - \alpha^*$ 的值，120% 点误差值等于 60% 点误差值加上表 9 中 120% 栏中 $\alpha - \alpha^*$ 的值。20%、40%、80% 点的误差值也可以按以上方法确定。

另外一些电压点可用插值法补足。例如用 20% 点和 30% 点的平均值作为 25% 点的误差值，再通过表 9 计算出 50% 和 100% 点的误差值。插值引起的不确定度，不应大于标准器修正值允许误差的 1/5。

5.4.4 误差校准值的合成标准不确定度

把表 9 中 30%、60%、120% 3 栏的 s 值用方和根法综合后，记作 s_4 ，作为误差中的 A 类分量。A 类分量还包括表 10 中 s 的最大值，记作 s_5 。B 类分量包括标准器的电压比标准不确定度 u_8 ，测量装置对应的合成标准不确定度 u_9 ，被校互感器屏蔽对应的合成标准不确定度 u_{10} 。合成标准不确定度按下式计算：

$$u_{c4} = \sqrt{s_4^2/n + s_5^2/n + u_8^2 + u_9^2 + u_{10}^2}$$

式中， u_8 根据标准器校准证书给出的标准不确定度及自由度取值。 $u_9 = 0.1 \epsilon_{\max}/1.7$ ， ϵ_{\max} 为校验仪测量读数最大绝对值，自由度 8。屏蔽误差取 $u_{10} = \epsilon_p/1.7$ ，自由度 8。

6 校准结果的处理和校准间隔

6.1 被校准的感应分压器和电压互感器外观检查，绝缘电阻和绝缘电压试验合格，可发给校准证书。证书中应对各台标准器按测量点给出校准值，并给出校准扩展不确定度 U_{99} 。经校准的量值允许使用。

6.2 工频电压比例标准装置校准间隔为 2~4 年。
