



河北省地方计量技术规范

JJF (冀) 148—2018

变压器用绕组温控器校准规范

Calibration Specification of Thermometers for Transformer Windings

2018-04-19 发布

2018-05-31 实施

河北省质量技术监督局 发布

变压器用绕组温控器校准规范

Calibration Specification of Therometers for
Transformer Windings

JJF (冀) 148—2018

归口单位：河北省质量技术监督局

主要起草单位：河北省计量监督检测研究院

本规范委托河北省质量技术监督局负责解释

本规范主要起草人：

耿荣勤（河北省计量监督检测研究院）

李 杰（河北省计量监督检测研究院）

邢寒雪（河北省计量监督检测研究院）

参加起草人：

索镛桢（河北省计量监督检测研究院）

侯宗贤（河北省计量监督检测研究院）

目 录

引言	(II)
1 范围	(1)
2 引用文件	(1)
3 术语	(1)
4 概述	(1)
4.1 用途	(1)
4.2 结构与原理	(1)
5 计量性能要求	(2)
5.1 示值误差	(2)
5.2 示值回差	(2)
5.3 接点动作误差	(2)
5.4 切换差	(2)
5.5 热模拟附加温升误差	(2)
5.6 热模拟时间常数	(3)
5.7 温度变送器输出误差	(3)
6 通用技术要求	(3)
6.1 外观	(3)
6.2 绝缘电阻	(3)
6.3 绝缘强度	(3)
7 校准条件	(3)
7.1 环境条件	(3)
7.2 标准器及配套设备	(3)
8 校准方法	(3)
8.1 通用技术条件的检查	(3)
8.2 计量性能的校准	(4)
9 校准结果	(7)
10 复校时间间隔	(7)
附录 A-1 变压器用绕组温控器示值误差、回差校准记录格式	(8)
附录 A-2 变压器用绕组温控器接点动作误差及切换差校准记录格式	(9)
附录 A-3 变压器用绕组温控器热模拟特性校准记录格式	(10)
附录 B 校准证书内页参考格式	(11)
附录 C 变压器用绕组温控器示值误差校准不确定度分析示例一	(12)
附录 D 变压器用绕组温控器示值误差校准不确定度分析示例二	(15)
附录 E 变压器用绕组温控器附加温升误差校准不确定度分析示例	(18)

引 言

本规范是以 JJF1071-2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF1001-2011《通用计量术语及定义》和 JJF1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》为基础性系列规范进行编写的。

本规范为首次发布。

变压器用绕组温控器校准规范

1 范围

本规范适用于变压器用绕组温控器（以下简称绕组温控器）在（-10~150）℃范围计量性能的校准。变压器用油面温控器计量性能的校准也可参照本规范。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJF1183 《温度变送器校准规范》

JB/T8450 《变压器用绕组温控器》

JB/T6302 《变压器用油面温控器》

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

3.1 变压器用油面温控器 oil-surface thermometers for transformers

变压器用油面温控器是利用感温介质热胀冷缩原理来测量变压器内顶层油温度的仪表，可带有电气接点和远传信号装置，用来输出温度开关控制信号和温度变送器信号。

3.2 变压器用绕组温控器 thermometers for transformer windings

变压器用绕组温控器是专门用于测控变压器绕组温度的仪表，由油面温控器、热模拟装置和远方温度显示器组成，可输出与绕组温度成正比的标准电流、电压信号或Pt100铂电阻信号和报警接点信号及冷却装置的控制信号。

3.3 热模拟装置 thermal simulation device

采用“热模拟”方法间接测量变压器绕组对油的温升的装置。

3.4 热模拟时间常数 thermal simulation time constant

当热模拟装置产生附加温升 ΔT 时，其温度指示值变化量达到附加温升值 ΔT 的63.2%时所需要的时间。

4 概述

4.1 用途

变压器用绕组温控器是专门用于测控油浸式变压器绕组温度的仪表。

4.2 结构与原理

绕组温控器主要由感温元件、弹性元件、指示仪表、变流器、电热元件、温度变送器、控制开关几部分组成，其中变流器一般分为A、B、C、D四个档位，每个档位对应不同的变压器电流互感器二次额定电流 I_p 。绕组温控器结构示意图如图1所示。

绕组温控器的工作原理：将感温元件的温包插在变压器油箱顶层的专用插孔内，当变压器顶层油温变化时，感温元件内的液体体积随之改变，通过毛细管的传递，使弹性元件产生相应位移，当变压器负荷为零时，绕组温控器指示的温度值是变压器的顶层油温。当变压器带负荷后，通过变压器电流互感器取出与负荷成正比的电流 I_p ， I_p 经变流器调整为 I_s 后，流经嵌装在波纹管内的电热元件，电热元件产生热量，该热

量使弹性元件的位移量增大, 增大的位移量经机械传动, 推动指示仪表指针转动, 使仪表指示值增加 ΔT , ΔT 近似等于变压器绕组对油的附加温升, 绕组温控器指示的温度值是变压器顶层油温与绕组对油的附加温升之和。

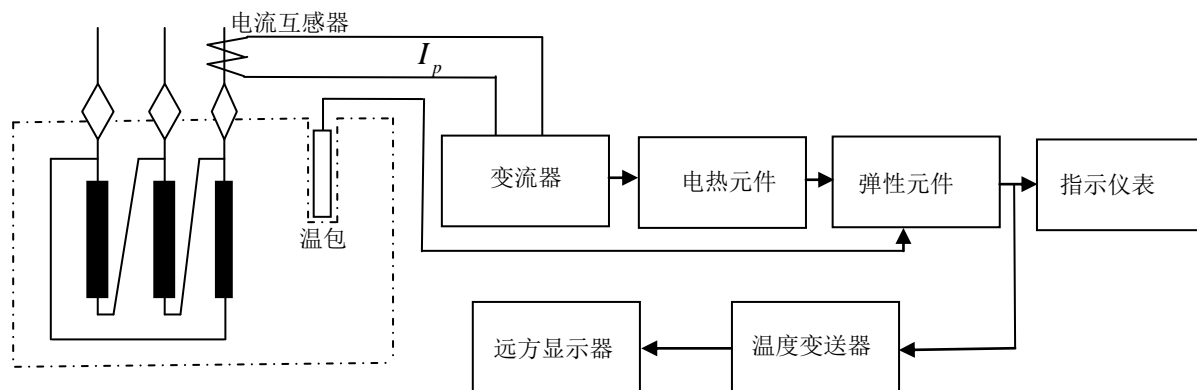


图1 绕组温控器结构示意图

附加温升 ΔT 与电流 I_s 的关系见表 1。

表 1 附加温升 ΔT 与电流 I_s 对应表

$\Delta T / ^\circ\text{C}$	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38
I_s / mA	740	800	860	920	980	1040	1090	1140	1190	1240	1280	1320	1360	1400	1440

5 计量性能要求

5.1 示值误差

绕组温控器示值最大允许误差与准确度等级及量程之间的关系, 以公式 (1) 表示:

$$\Delta = \pm a\% FS \quad (1)$$

式中:

Δ —— 绕组温控器示值最大允许误差, $^\circ\text{C}$;

a —— 绕组温控器准确度等级;

FS —— 绕组温控器量程, $^\circ\text{C}$ 。

示值误差应不超过最大允许误差。

5.2 示值回差

绕组温控器示值回差应不超过最大允许误差的绝对值, $^\circ\text{C}$ 。

5.3 接点动作误差

绕组温控器控制开关的接点动作误差应不超过 $\pm 2^\circ\text{C}$ 。

5.4 切换差

绕组温控器控制开关的接点切换差应不超过 $6^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 。

5.5 热模拟附加温升误差

热模拟附加温升误差应不超过示值最大允许误差, °C。

5.6 热模拟时间常数

热模拟时间常数应不大于 9min。

5.7 温度变送器输出误差

温度变送器输出误差换算为温度值应不超过绕组温控器示值最大允许误差的 1/2, °C。

注: 以上指标不适用于合格性判定, 仅供参考。

6 通用技术要求

6.1 外观

6.1.1 绕组温控器的外形结构应完好, 各部件的保护层应牢固、均匀和清洁, 不得有锈蚀和脱落现象; 表头用的保护玻璃或其它透明材料应光洁透明, 不得有妨碍正确读数的缺陷。

6.1.2 绕组温控器表盘上的刻度、数字、符号和其它标志应清晰、完整、正确, 指针应伸入标度尺最短标度线的 1/4~3/4 内, 其指针尖端宽度应不超过标度尺最短标度线宽度。

6.1.3 绕组温控器的设定旋钮标志, 应能设定在标度尺的任意标度线上。

6.2 绝缘电阻

在规定的条件下, 绕组温控器开关的接点与接地端子之间的电阻应不小于 20MΩ。

6.3 绝缘强度

在规定的条件下, 绕组温控器开关的接点与接地端子之间应能承受 50Hz、2kV 的正弦交流电压, 历时 1min。绕组温控器应无击穿或闪烁现象。

7 校准条件

7.1 环境条件

7.1.1 温度: (23±5) °C, 相对湿度: (30~85) %。

7.1.2 周围应无强烈振动、强电磁场和其它干扰。

7.2 标准器及配套设备

标准器及配套设备可从表 2 中参考选择。

8 校准方法

8.1 通用技术条件的检查

8.1.1 外观检查

检查绕组温控器的外观, 应符合 6.1 的规定。

8.1.2 绝缘电阻

在规定的条件下, 使用兆欧表测量绕组温控器开关的接点与接地端子之间的绝缘电阻, 应符合 6.2 的规定。

8.1.3 绝缘强度

在规定的条件下, 将绕组温控器开关的接点短接后接入高压试验台, 对地施加 2kV, 历时 1min 的正弦交流电压, 漏电电流设定为 10mA。绕组温控器应无击穿或

闪烁现象。

表 2 标准器及配套设备

序号	测量标准或设备	技术要求	用途	备注
1	二等标准铂电阻温度计及配套设备	(-200~420) °C	标准装置	
2	标准水银温度计	(-10~150) °C	标准器	
3	恒温槽	温度范围: (-10~150) °C	提供温度场	
		工作区域最大温差: ≤0.1°C		
		温度波动度: ≤0.1°C/10min		
		在 (20~120) °C, 升、降温速率可控制在 ≤1.0°C/min		
4	可调交流恒流源	输出: (0~5) A	热模拟特性试验	
5	交流电流表	A ₁ , 测量范围: (0~5) A, 准确度等级: 0.5 级, 最小分辨力: 0.001A。	热模拟特性试验输入端电流测量	
		A ₂ , 测量范围: (0~2) A, 准确度等级: 0.5 级, 最小分辨力: 0.001A。	热模拟特性试验输出端电流测量	
6	直流电流表	测量范围: (0~20)mA, 分辨力: 不大于 1μA, 相对误差: ±0.02%;	温度变送器输出测量	
	直流电压表	测量范围: (0~10) V, 分辨力: 不大于 1mV; 相对误差: ±0.02%。		
7	秒表	最小分辨力不大于 1s	热模拟时间常数测量	
8	兆欧表	额定电压 500V, 准确度等级: 10 级	绝缘电阻试验	
9	高压试验台	高压侧电源功率 ≥2500VA	绝缘强度试验	

8.2 计量性能的校准

8.2.1 示值误差校准

8.2.1.1 校准点的选择

一般应在整个测量范围均匀选择不少于四个点 (包括上、下限)。也可根据用户要求选择校准点。

8.2.1.2 示值误差校准方法

校准应在上、下两个行程上分别向上限或下限方向逐点进行, 用比较法校准。将标准温度计和绕组温控器温包插入恒温槽, 温包应全部浸没在恒温槽工作区域, 绕组温控器表头应垂直放置, 表头与温包之间的高度差应不大于 1m; 示值校准点不得与开关设定点重叠, 二者间距不小于 5°C。

上行程示值误差校准: 将恒温槽设定到校准温度, 开始升温, 待恒温槽示值稳定后 10min 开始读数, 读数时恒温槽温度偏离校准点温度不超过 0.5°C (以标准温度计

为准), 记录恒温槽的实际温度值 t_s 和被校准绕组温控器上行程的示值 t_{R1} , 按公式 (2) 计算上行程示值误差 Δt_1 :

$$\Delta t_1 = t_{R1} - t_s \quad (2)$$

下行程示值误差校准: 将恒温槽设定到校准温度, 开始降温, 待恒温槽示值稳定后 10min 开始读数, 读数时恒温槽温度偏离校准点温度不超过 0.5°C (以标准温度计为准), 记录恒温槽的实际温度值 t_s 和被校准绕组温控器下行程的示值 t_{R2} , 按公式 (3) 计算下行程示值误差 Δt_2 :

$$\Delta t_2 = t_{R2} - t_s \quad (3)$$

示值误差取 Δt_1 、 Δt_2 中绝对值较大者。

注: 读取绕组温控器标度尺示值时, 视线应垂直标度尺, 读数应估读到最小分度值的 $1/10$, 读数过程恒温槽温度变化不大于 0.1°C 。

8.2.2 示值回差校准

与示值误差校准同时进行, 在同一温度点 (上、下限点除外) 上、下行程示值误差之差的绝对值即为回差 Δ_h , 按公式 (4) 计算:

$$\Delta_h = |\Delta t_1 - \Delta t_2| \quad (4)$$

8.2.3 接点动作误差校准

8.2.3.1 校准点的选择

接点动作误差校准点应至少包括 55°C 和 75°C 。也可以与用户协商确定。

8.2.3.2 接点动作误差校准方法

将标准温度计和绕组温控器温包插入恒温槽, 绕组温控器的接点指针调整到校准温度点 S_v , 接点端子接到信号电路中, 一般在恒温槽温度距校准点温度 6°C 时, 以不大于 $1.0^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率缓慢均匀改变恒温槽温度, 使接点产生闭合或断开的切换动作, 动作瞬间读取标准温度计示值, 即为接点上行程切换值 t_{s1} 或下行程切换值 t_{s2} , 按公式 (5) 计算接点动作误差 Δt_d :

$$\Delta t_d = t_{s1} - S_v \quad (5)$$

8.2.4 切换差校准

与接点动作误差校准同时进行, 同一温度点上行程切换值 t_{s1} 与下行程切换值 t_{s2} 的差值即为切换差 Δt_q , 按公式 (6) 计算:

$$\Delta t_q = t_{s1} - t_{s2} \quad (6)$$

8.2.5 热模拟附加温升误差校准

将绕组温控器热模拟装置的变流器、电热元件与可调交流恒流源、交流电流表 A_1 (通过电流用 I_p 表示)、交流电流表 A_2 (通过电流用 I_s 表示) 按图 2 连接好。

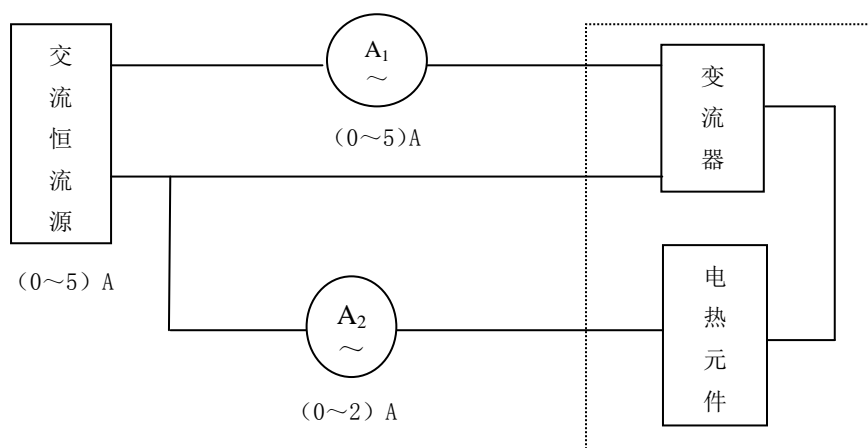


图2 热模拟特性校准接线图

8.2.5.1 校准点的选择

附加温升 ΔT 校准至少应包括 10°C 、 24°C 、 38°C 三个点。也可与用户协商确定。

8.2.5.2 附加温升误差校准方法

变流器档位选择：根据变压器电流互感器二次额定电流 I_p （由用户提供），选择相应的档位，将档位键按下。

将绕组温控器温包和标准温度计插入恒温槽，使恒温槽温度恒定在 $20^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$ 范围内某个温度点，一般选 20°C 和 80°C 。

记录恒温槽实际温度 t_s 及绕组温控器指示值 t_R ，然后调节交流恒流源电流使 A_2 恒定在附加温升 ΔT 对应的电流 I_s （见表1），待绕组温控器指示稳定后，记录其指示值 t_{Ri} 。 $(t_{Ri} - t_R)$ 即为实测附加温升 X ，按公式（7）计算附加温升误差 Y ：

$$Y = X - \Delta T \quad (7)$$

8.2.6 热模拟时间常数校准

8.2.6.1 校准点的选择

校准点应至少包括附加温升为 10°C 、 24°C 、 38°C 三个点。也可与用户协商确定。

8.2.6.2 校准方法

与热模拟附加温升误差校准同时进行，调节交流恒流源电流使 A_2 恒定在附加温升 ΔT 对应的电流 I_s ，同时开启秒表，当绕组温控器指示值变化量达到附加温升值 ΔT 的 63.2% 时，记录秒表的指示值，即为该点的热模拟时间常数。

8.2.7 温度变送器输出误差校准

8.2.7.1 热模拟装置不带电流时温度变送器输出误差校准

变送器输出误差校准与绕组温控器示值误差校准同时进行，将直流数字电流表（电压表）连接到温度变送器的输出端，记录恒温槽实际温度和绕组温控器示值的同时，记录温度变送器的输出值，按公式（8）计算温度变送器输出误差：

$$\Delta A_t = A_d - \left[\frac{A_m}{t_m} (t_s - t_0) + A_0 \right] \quad (8)$$

式（8）中：

- ΔA_i —— 变送器的输出误差, mA 或 V;
 A_d —— 变送器的输出值, mA 或 V;
 A_m —— 变送器的输出量程, mA 或 V;
 t_m —— 变送器的输入量程, °C;
 A_0 —— 变送器输出的理论下限值, mA 或 V;
 t_s —— 标准温度计测量的恒温槽实际值, °C;
 t_0 —— 变送器输入范围的下限值, °C。

8.2.7.2 热模拟装置带电流时温度变送器输出误差校准

与热模拟附加温升误差校准同时进行, 按公式 (9) 计算温度变送器输出误差:

$$\Delta A_i = A_{di} - \left[\frac{A_m}{t_m} (t_s + \Delta T - t_0) + A_0 \right] \quad (9)$$

式 (9) 中:

- ΔA_i —— 热模拟装置带电流时变送器的输出误差, mA 或 V;
 A_{di} —— 热模拟装置带电流时变送器的输出值, mA 或 V。

9 校准结果

经校准的绕组温控器发给校准证书, 证书应给出绝缘电阻、绝缘强度、示值误差、示值回差、接点动作误差、切换差、热模拟附加温升误差、热模拟时间常数、温度变送器输出误差及校准结果不确定度等。

10 复校时间间隔

绕组温控器的复校时间间隔可根据具体情况由用户确定, 建议复校时间间隔最长不超过一年。

附录 A-1

变压器用绕组温控器示值误差、回差校准记录格式

校准地点: _____ 共 页 第 页
 校准依据: _____ 环境温度: _____ °C 环境湿度: _____ %RH
 标准器名称: _____ 测量范围: _____ 准确度等级: _____
 证书编号: _____ 有效期至: _____ 年 月 日

		标准器		送检单位				
		型号规格						
		出厂号						
		生产厂家						
		证书编号						
		测量范围/°C						
		准确度等级/最小分度值						
标准器 编号	校准 点/°C	指示仪表读数 $t_{R1}/^{\circ}\text{C}$	正行程	/				
		变送器读数 $A_d/\text{mA}, \text{V}$						
		正行程示值误差 $\Delta t_1/^{\circ}\text{C}$						
		变送器输出误差 $\Delta A_t/\text{mA}, \text{V}$						
		变送器输出误差不确定度 $U/\text{mA}, \text{V} (k=2)$						
		指示仪表读数 $t_{R2}/^{\circ}\text{C}$	反行程					
		反行程示值误差 $\Delta t_2/^{\circ}\text{C}$						
示值误差校准不确定度 $U/^{\circ}\text{C} (k=2)$								
/			回差 $\Delta_h/^{\circ}\text{C}$					
标准器 编号	校准 点/°C	指示仪表读数 $t_{R1}/^{\circ}\text{C}$	正行程	/				
		变送器读数 $A_d/\text{mA}, \text{V}$						
		正行程示值误差 $\Delta t_1/^{\circ}\text{C}$						
		变送器输出误差 $\Delta A_t/\text{mA}, \text{V}$						
		变送器输出误差不确定度 $U/\text{mA}, \text{V} (k=2)$						
		指示仪表读数 $t_{R2}/^{\circ}\text{C}$	反行程					
		反行程示值误差 $\Delta t_2/^{\circ}\text{C}$						
示值误差校准不确定度 $U/^{\circ}\text{C} (k=2)$								
/			回差 $\Delta_h/^{\circ}\text{C}$					
校准:	核验:	校准日期:	年 月 日					

附录 A-2

变压器用绕组温控器接点动作误差及切换差校准记录格式

校准地点： 共 页 第 页
 校准依据： 环境条件： 温度： ℃ 湿度： %RH
 标准器名称： 测量范围： 准确度等级：
 证书编号： 有效期： 年 月 日

送检单位			
型号规格			
出厂号			
生产厂家			
证书编号			
测量范围/℃			
准确度等级/最小分度值			
标准器 编号	校准 点 /℃	上切换值 $t_{s1}/℃$	
		下切换值 $t_{s2}/℃$	
		接点动作误差 $\Delta t_d/℃$	
		不确定度 $U/℃$ ($k=2$)	
		切换差 $\Delta t_q/℃$	
标准器 编号	校准 点 /℃	上切换值 $t_{s1}/℃$	
		下切换值 $t_{s2}/℃$	
		接点动作误差 $\Delta t_d/℃$	
		不确定度 $U/℃$ ($k=2$)	
		切换差 $\Delta t_q/℃$	
绝缘电阻/MΩ			
绝缘强度检查			
校准：	核验：	校准日期：	年 月 日

附录 A-3

变压器用绕组温控器热模拟特性校准记录格式

校准地点: _____ 共 页 第 页
 校准依据: _____ 环境条件: 温度: _____ °C 湿度: _____ %RH
 标准器名称: _____ 测量范围: _____ 准确度等级: _____
 证书编号: _____ 有效期: _____ 年 月 日

一、热模拟附加温升误差校准

送检单位											
型号规格											
出厂编号											
生产厂家											
证书编号											
测量范围/°C											
准确度等级											
标准器测量的恒温槽温度值 t_s /°C											
绕组温控器初始值 t_R /°C											
通过 A_2 电流 I_s /mA											
对应的温升 ΔT /°C											
绕组温控器示值 t_{Ri} /°C											
附加温升误差 Y /°C											
不确定度 U /°C ($k=2$)											

二、热模拟时间常数校准

送检单位											
出厂编号											
绕组温控器初始值 t_R /°C											
通过 A_2 电流 I_s /mA											
对应的温升 ΔT /°C											
时间常数/s											

校准: _____ 核验: _____ 校准日期: _____ 年 月 日

附录 B

校准证书内页参考格式

一、绕组温控器示值误差、回差校准

校准点/°C				
示值误差/°C				
不确定度 U /°C ($k=2$)				
回差/°C				

二、绕组温控器接点动作误差、切换差校准

校准点/°C				
接点动作误差/°C				
不确定度 U /°C ($k=2$)				
切换差/°C				

三、绕组温控器热模拟特性校准

恒温槽温度/°C					
附加温升 ΔT /°C					
附加温升误差/°C					
不确定度 U /°C ($k=2$)					
热模拟时间常数/s					

四、温度变送器输出误差校准

1. 热模拟装置不带电流时:

校准点/°C				
输出误差/mA, V				
不确定度 U /mA, V ($k=2$)				

2. 热模拟装置带电流时:

恒温槽温度/°C					
附加温升 ΔT /°C					
输出误差/mA, V					
不确定度 U /mA, V ($k=2$)					

附录 C

变压器用绕组温控器示值误差校准不确定度分析示例一

C.1 被校对象

变压器绕组温控器，测量范围：(0~150)℃，最小分度值：2℃，准确度等级：2.0。

C.2 校准用标准器及配套设备

C.2.1 二等标准铂电阻温度计，测量范围：(0~420)℃

C.2.2 精密铂电阻数字测温仪，测量范围：(0~420)℃，分辨力：不大于 0.001℃，允差：±0.020℃。

C.2.3 双制冷恒温槽，测量范围：(-10~150)℃，工作区域最大温差：0.1℃，温度波动度：0.1℃/10min。

C.3 校准方法

按照本规范规定，用比较法进行校准，将标准器和被校绕组温控器的感温包按规定插入恒温槽，恒温槽温度稳定后 10 分钟开始读取标准器和被检的数据。

C.4 测量模型

$$\Delta t = t_R - t_s \quad (\text{C.1})$$

式中： Δt —— 绕组温控器示值误差，℃；

t_R —— 绕组温控器指示值，℃；

t_s —— 标准温度计指示值，℃。

C.5 方差和灵敏度系数

对式 (C.1) 各分量求偏导，各分量灵敏系数如下：

$$c_1 = \frac{\partial \Delta t}{\partial t_R} = 1 \quad ; \quad c_2 = \frac{\partial \Delta t}{\partial t_s} = -1$$

设 t_R 、 t_s 引入的标准不确定度分量分别为 u_1 、 u_2 ，由于各分量彼此独立，因此合成方差 u_c^2 表示为：

$$u_c^2 = u_1^2 + u_2^2 \quad (\text{C.2})$$

C.6 标准不确定度分量

C.6.1 输入量 t_R 引入的标准不确定度 u_1

u_1 是由被校对象示值误差测量重复性和分辨力及恒温槽的均匀度、波动度引入的。

C.6.1.1 由被校对象示值误差测量重复性和分辨力引入的不确定度分量 u_{11} a) 重复性引入的不确定度分量 u_{111}

u_{111} 采用 A 类评定，在相同条件下对被校表在 50℃ 点进行 6 次重复测量，根据极差法计算单次测量的实验标准偏差 $s_i = 0.08$ ℃， $u_{111} = s_i = 0.08$ ℃。

b) 分辨力引入的不确定度分量 u_{112}

被校对象的最小分度值为 2℃，不确定度区间半宽为 0.2℃，按均匀分布，因此：

$$u_{112} = 0.2 / \sqrt{3} = 0.12 \text{℃}$$

c) 合成不确定度分量 u_{11}

u_{111} 和 u_{112} 属相关项, 取二者中较大者, $u_{11} = 0.12^\circ\text{C}$ 。

C. 6. 1. 2 由恒温槽均匀度引入的不确定度分量 u_{12}

恒温槽工作区域最大温差 0.1°C , 不确定度区间半宽 0.05°C , 则恒温槽均匀度引入的不确定度分量:

$$u_{12} = 0.05 / \sqrt{3} = 0.03^\circ\text{C}$$

C. 6. 1. 3 恒温槽波动度引入的不确定度分量 u_{13}

恒温槽的波动度: $0.1^\circ\text{C}/10\text{min}$, 由于标准器和被检时间常数不同, 波动度引入的不确定度区间半宽估计为 0.05°C , 按均匀分布, 则双制冷恒温槽波动度引入的不确定度分量:

$$u_{13} = 0.05 / \sqrt{3} = 0.03^\circ\text{C}$$

C. 6. 1. 4 t_R 引入的标准不确定度 u_1 的计算

由于 u_{11} 、 u_{12} 、 u_{13} 互不相关, 则:

$$u_1 = \sqrt{u_{11}^2 + u_{12}^2 + u_{13}^2} = 0.13^\circ\text{C}$$

C. 6. 2 输入量 t_s 引入的标准不确定度 u_2

C. 6. 2. 1 标准器及精密铂电阻数字测温仪允差引入的不确定度分量 u_{21}

标准器及精密铂电阻数字测温仪的允差: $\pm 0.020^\circ\text{C}$, 于是:

$$u_{21} = 0.020 / \sqrt{3} = 0.012^\circ\text{C}$$

C. 6. 2. 2 标准器及精密铂电阻数字测温仪的稳定性引入的标准不确定度分量 u_{22}

标准器及精密铂电阻数字测温仪的稳定性不超过 0.010°C , 不确定度区间半宽 0.005°C , 按均匀分布, 于是:

$$u_{22} = 0.005 / \sqrt{3} = 0.003^\circ\text{C}$$

C. 6. 2. 3 t_s 引入的标准不确定度 u_2 的计算

由于 u_{21} 和 u_{22} 互不相关, 则:

$$u_2 = \sqrt{u_{21}^2 + u_{22}^2} = 0.012^\circ\text{C}$$

C. 7 标准不确定度分量一览表

标准不确定度分量一览表见表 C. 1。

表 C. 1 标准不确定度分量一览表

标准不确定度	不确定度来源	标准不确定度 u_i 值	灵敏系数 c_i	$ c_i u_i$
u_1				0.13 $^\circ\text{C}$
u_{11}	示值误差重复性及被检示值分辨力	0.12 $^\circ\text{C}$	1	
u_{12}	双制冷恒温槽的均匀度	0.03 $^\circ\text{C}$		
u_{13}	双制冷恒温槽的波动度	0.03 $^\circ\text{C}$		
u_2			-1	0.012 $^\circ\text{C}$
u_{21}	标准器及精密铂电阻数字测温仪允差	0.012 $^\circ\text{C}$		
u_{22}	标准器及精密铂电阻数字测温仪的稳定性	0.003 $^\circ\text{C}$		

C.8 合成标准不确定度 u_c

根据公式 $u_c^2 = u_1^2 + u_2^2$, 计算 $u_c = 0.13^\circ\text{C}$ 。

C.9 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$, 根据公式 $U = ku$ 计算: $U = 0.3^\circ\text{C}$ 。

附录 D

变压器用绕组温控器示值误差校准不确定度分析示例二

D.1 被校对象

变压器绕组温控器，测量范围：(0~150)℃，最小分度值：2℃，准确度等级：2.0。

D.2 校准用标准器及配套设备

D.2.1 标准水银温度计，测量范围：(0~150)℃，分度值 0.1℃；不确定度 $U = 0.04$ ℃
 $k = 2$ 。

D.2.2 双制冷恒温槽，测量范围：(-10~150)℃，工作区域最大温差：0.1℃，温度波动度：0.1℃/10min。

D.3 校准方法

按照本规范规定，用比较法进行校准，将标准器和被校绕组温控器的感温包按规定插入恒温槽，恒温槽温度稳定后 10 分钟开始读取标准器和被检的数据。

D.4 测量模型

$$\Delta t = t_R - (t_s + d) \quad (\text{D.1})$$

式中：

- Δt —— 绕组温控器示值误差，℃；
- t_R —— 绕组温控器指示值，℃；
- t_s —— 标准水银温度计示值，℃；
- d —— 标准水银温度计在该点的修正值，℃。

D.5 方差和灵敏度系数

对式 (D.1) 各分量求偏导，各分量灵敏系数如下：

$$c_1 = \frac{\partial \Delta t}{\partial t_R} = 1 \quad ; \quad c_2 = \frac{\partial \Delta t}{\partial t_s} = -1 \quad ; \quad c_3 = \frac{\partial \Delta t}{\partial d} = -1$$

设 t_R 、 t_s 、 d 各分量引入的标准不确定度分量分别为 u_1 、 u_2 、 u_3 ，由于各分量彼此独立，因此合成方差 u_c^2 表示为：

$$u_c^2 = u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 \quad (\text{D.2})$$

D.6 标准不确定度分量

D.6.1 输入量 t_R 引入的标准不确定度 u_1

u_1 是由被校对象示值误差测量重复性和分辨力及恒温槽的均匀度、波动度引入的。

D.6.1.1 由被校对象示值误差测量重复性和分辨力引入的不确定度分量 u_{11} a) 重复性引入的不确定度分量 u_{111}

u_{111} 采用 A 类评定，在相同条件下对被校表在 50℃ 点进行 6 次重复测量，根据极差法计算单次测量的实验标准偏差 $s_i = 0.08$ ℃， $u_{111} = s_i = 0.08$ ℃。

b) 分辨力引入的不确定度分量 u_{112}

被校对象的最小分度值为 2℃，不确定度区间半宽为 0.2℃，按均匀分布，因此

$$u_{112} = 0.2 / \sqrt{3} = 0.12 \text{℃}$$

c) 合成不确定度分量 u_{11}

u_{111} 和 u_{112} 属相关项, 取二者中较大者, $u_{11} = 0.12^\circ\text{C}$ 。

D. 6. 1. 2 由恒温槽均匀度引入的不确定度分量 u_{12}

恒温槽工作区域最大温差 0.1°C , 不确定度区间半宽 0.05°C , 则恒温槽均匀度引入的不确定度分量:

$$u_{12} = 0.05 / \sqrt{3} = 0.03^\circ\text{C}$$

D. 6. 1. 3 恒温槽波动度引入的不确定度分量 u_{13}

恒温槽的波动度: $0.1^\circ\text{C}/10\text{min}$, 由于标准器和被检时间常数不同, 波动度引入的不确定度区间半宽估计为 0.05°C , 按均匀分布, 则恒温槽波动度引入的不确定度分量:

$$u_{13} = 0.05 / \sqrt{3} = 0.03^\circ\text{C}$$

D. 6. 1. 4 t_R 引入的标准不确定度 u_1 的计算

由于 u_{11} 、 u_{12} 、 u_{13} 互不相关, 则:

$$u_1 = \sqrt{u_{11}^2 + u_{12}^2 + u_{13}^2} = 0.13^\circ\text{C}$$

D. 6. 2 输入量 t_s 引入的标准不确定度 u_2

D. 6. 2. 1 标准水银温度计读数引入的不确定度分量 u_{21}

标准水银温度计的分度值 0.1°C , 估读到 0.01°C , 不确定度区间半宽 0.01°C , 按均匀分布, 则: $u_{21} = 0.01 / \sqrt{3} = 0.006^\circ\text{C}$ 。

D. 6. 2. 2 标准水银温度计插入不垂直引入的不确定度分量 u_{22}

标准水银温度计插入不垂直引入的不确定度最大为 0.02°C , 不确定度区间半宽 0.01°C , 按均匀分布, 则 $u_{22} = 0.01 / \sqrt{3} = 0.006^\circ\text{C}$,

D. 6. 2. 3 t_s 引入的标准不确定度 u_2 的计算

由于 u_{21} 和 u_{22} 互不相关, 则:

$$u_2 = \sqrt{u_{21}^2 + u_{22}^2} = 0.008^\circ\text{C}$$

D. 6. 3 d 引入的标准不确定度分量 u_3

D. 6. 3. 1 标准水银温度计修正值的不确定度 u_{31}

标准水银温度计的修正值不确定度 $U = 0.04^\circ\text{C}$ $k = 2$, 则: $u_{31} = 0.04 / 2 = 0.02^\circ\text{C}$ 。

D. 6. 3. 2 标准水银温度计的稳定性引入的标准不确定度分量 u_{32}

标准水银温度计的稳定性在 50°C 点不超过 0.05°C , 不确定度区间半宽 0.025°C , 按均匀分布, 于是:

$$u_{32} = 0.025 / \sqrt{3} = 0.014^\circ\text{C}$$

D. 6. 3. 3 d 引入的标准不确定度 u_3 的计算

由于 u_{31} 和 u_{32} 互不相关, 则:

$$u_3 = \sqrt{u_{31}^2 + u_{32}^2} = 0.024^\circ\text{C}$$

D. 7 标准不确定度分量一览表

标准不确定度分量一览表见表 D. 1。

D. 8 合成标准不确定度 u_c

根据公式 $u_c^2 = u_1^2 + u_2^2 + u_3^2$, 计算 $u_c = 0.13^\circ\text{C}$

D. 9 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，根据公式 $U = ku$ 计算： $U = 0.3^\circ\text{C}$ 。

表 D.1 标准不确定度分量一览表

标准不确定度	不确定度来源	标准不确定度 u_i 值	灵敏系数 c_i	$ c_i u_i$
u_1			1	0.13 $^\circ\text{C}$
u_{11}	示值误差重复性及被 检示值分辨力	0.12 $^\circ\text{C}$		
u_{12}	恒温槽的均匀度	0.03 $^\circ\text{C}$		
u_{13}	恒温槽波动度	0.03 $^\circ\text{C}$		
u_2			-1	0.008
u_{21}	标准器读数	0.006		
u_{22}	标准器插入不垂直	0.006		
u_3			-1	0.024 $^\circ\text{C}$
u_{31}	标准器的修正值	0.02 $^\circ\text{C}$		
u_{32}	标准器的稳定性	0.014 $^\circ\text{C}$		

附录 E

变压器用绕组温控器附加温升误差校准不确定度分析示例

E.1 被校对象

变压器绕组温控器，测量范围：(0~150)℃，最小分度值：2℃，准确度等级：2.0。

E.2 校准用标准器及配套设备

E.2.1 二等标准铂电阻温度计，测量范围：(0~420)℃

E.2.2 精密铂电阻数字测温仪，测量范围：(0~420)℃，分辨力：不大于 0.001℃，允差：±0.020℃。

E.2.3 恒温槽，工作区域最大温差：0.1℃，温度波动度：0.1℃/10min。

E.2.4 交流电流表 A₂，测量范围 0~2A，准确度等级：0.5 级。

E.3 校准方法

将绕组温控器温包和标准温度计插入恒温槽，将恒温槽温度恒定在 (20~80)℃ 范围内某个温度点，一般选 20℃ 和 80℃ 点，记录恒温槽实际温度 t_s 及绕组温控器指示值 t_R ，然后调节交流恒流源电流使 A₂ 恒定在附加温升 ΔT 对应的电流 I_s (见表 1)，待绕组温控器指示稳定后，记录其指示值 t_{Ri} 。 $(t_{Ri} - t_R)$ 即为实测附加温升 X ，实测附加温升 X 与 ΔT 的差值即为附加温升误差 Y 。

E.4 测量模型

$$Y = X - \Delta T \quad (\text{E.1})$$

E.5 方差和灵敏度系数

对式 (E.1) 各分量求偏导，各分量灵敏系数如下：

$$c_1 = \frac{\partial Y}{\partial X} = 1 \quad ; \quad c_2 = \frac{\partial Y}{\partial \Delta T} = -1$$

设 X 和 ΔT 引入的标准不确定度分量分别为 u_1 、 u_2 ，由于各分量彼此独立，因此附加温升误差的合成方差 u_c^2 表示为：

$$u_c^2 = u_1^2 + u_2^2 \quad (\text{E.2})$$

E.6 标准不确定度分量

E.6.1 输入量 X 引入的标准不确定度 u_1

u_1 是由被校对象实测附加温升测量重复性和绕组温控器指示分辨力及恒温槽的均匀度、波动度引入的。

E.6.1.1 由被校对象实测附加温升测量重复性和绕组温控器指示分辨力引入的不确定度分量 u_{11} a) 重复性引入的不确定度分量 u_{111}

u_{111} 采用 A 类评定，在相同条件下对被检表在油温 80℃ 时，对 A₂ 施加 1.14A 交流电流 (对应的附加温升 24℃)，稳定后读取被检表的示值，重复测量 6 次，根据极差法计算单次测量的实验标准偏差： $s_i = 0.16^\circ\text{C}$ ，则 $u_{111} = s_i = 0.16^\circ\text{C}$ 。

b) 分辨力引入的不确定度分量 u_{112}

被校对象的最小分度值为 2℃，不确定度区间半宽为 0.2℃，按均匀分布，因此

$$u_{112} = 0.2 / \sqrt{3} = 0.12 \text{ } ^\circ\text{C}$$

c) 合成不确定度分量 u_{11}

u_{111} 和 u_{112} 属相关项, 取二者中较大者, $u_{11} = 0.16 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

E. 6. 1. 2 恒温槽波动度引入的不确定度分量 u_{12}

恒温槽的波动度: $0.1 \text{ } ^\circ\text{C}/10\text{min}$, 由于标准器和被检时间常数不同, 波动度引入的不确定度区间半宽估计为 $0.05 \text{ } ^\circ\text{C}$, 按均匀分布, 则双制冷恒温槽波动度引入的不确定度分量:

$$u_{12} = 0.05 / \sqrt{3} = 0.03 \text{ } ^\circ\text{C}$$

E. 6. 1. 3 X 引入的标准不确定度 u_1 的计算

由于 u_{11} 、 u_{12} 互不相关, 则:

$$u_1 = \sqrt{u_{11}^2 + u_{12}^2} = 0.16 \text{ } ^\circ\text{C}$$

E. 6. 2 ΔT 引入的不确定度分量 u_2

A_2 的准确度等级 0.5 级, 测量范围 2A, 则电流表 A_2 的最大允差为: $\pm 10\text{mA}$, 根据本规范表 1, 在附加温升 $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ 时, $\pm 10\text{mA}$ 换算为温度约为 $\pm 0.4 \text{ } ^\circ\text{C}$, 不确定度区间半宽 $0.4 \text{ } ^\circ\text{C}$, 按均匀分布, 则

$$u_2 = 0.4 / \sqrt{3} = 0.23 \text{ } ^\circ\text{C}$$

E. 7 标准不确定度分量一览表

标准不确定度分量一览表见表 E. 1。

表 E. 1 标准不确定度分量一览表

标准不确定度	不确定度来源	标准不确定度 u_i 值	灵敏系数 c_i	$ c_i u_i$
u_1				$0.16 \text{ } ^\circ\text{C}$
u_{11}	实测附加温升重复性及示值分辨力	$0.16 \text{ } ^\circ\text{C}$	1	
u_{12}	恒温槽波动度	$0.03 \text{ } ^\circ\text{C}$		
u_2	电流表 A_2 引入的	$0.23 \text{ } ^\circ\text{C}$	-1	$0.23 \text{ } ^\circ\text{C}$

E. 8 合成标准不确定度

根据公式 $u_c^2 = u_1^2 + u_2^2$, 计算 $u_c = 0.28 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

E. 9 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$, 根据公式 $U = ku$ 计算出 $U = 0.6 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。