



中华人民共和国国家计量检定规程

JJG 344—2005

镍铬 - 金铁热电偶

Ni - Cr/Au + 0.07at. % Fe Thermocouple

2005 - 04 - 28 发布

2005 - 10 - 28 实施

国家质量监督检验检疫总局 发布

镍铬 - 金铁热电偶检定规程

Verification Regulation of
Ni - Cr/Au + 0.07at. % Fe Thermocouple

JJG 344—2005
代替 JJG 344—1984

本规程经国家质量监督检验检疫总局 2005 年 4 月 28 日批准，并自 2005 年 10 月 28 日起施行。

归口单位：全国温度计量技术委员会

起草单位：辽宁省计量科学研究院

中国科学院理化技术研究所

本规程委托全国温度计量技术委员会负责解释

本规程主要起草人：

- 宋德华 （辽宁省计量科学研究院）
毛玉柱 （中国科学院理化技术研究所）
林 鹏 （中国科学院理化技术研究所）

参加起草人：

- 张 明 （辽宁省计量科学研究院）
董 亮 （辽宁省计量科学研究院）
张庆庚 （中国科学院理化技术研究所）
喻力弘 （中国科学院理化技术研究所）

目 录

1 范围	(1)
2 概述	(1)
3 计量性能要求	(1)
3.1 均匀性	(1)
3.2 热电势范围	(1)
3.3 标准热电偶的不确定度和年稳定性	(1)
3.4 工作热电偶允差	(1)
4 通用技术要求	(2)
5 计量器具控制	(2)
5.1 检定条件	(2)
5.2 检定项目	(3)
5.3 检定方法	(3)
5.4 检定结果处理	(7)
5.5 检定周期	(7)
附录 A 镍铬—金铁热电偶分度表(参考端: 0℃)	(8)
附录 B 热电偶的均匀性与检测方法	(11)
附录 C 标准镍铬—金铁热电偶检定记录	(12)
附录 D 工作镍铬—金铁热电偶检定记录	(13)
附录 E 标准镍铬—金铁热电偶检定证书与检定结果通知书(背面)格式	(14)
附录 F 工作镍铬—金铁热电偶检定结果不确定度评定实例	(16)

镍铬—金铁热电偶检定规程

1 范围

本规程适用于测量范围为 4.2K ~ 273.15K 的标准和工作用镍铬—金铁热电偶（以下简称热电偶）的首次检定、后续检定和使用中的检验。

2 概述

镍铬—金铁热电偶是一种用于深低温测量的热电偶，其镍铬合金丝按质量比表示为镍 90% + 铬 10%，金铁合金丝按原子比表示为金 + 铁原子百分比 0.07。

3 计量性能要求

3.1 均匀性

热电偶在制作前应对偶丝进行均匀性检查，不均匀热电动势值不得超过表 B-1 的规定，检测方法见附录 B。

3.2 热电势范围

经均匀性检查合格后，焊成的热电偶在 4.22K 和 77.34K 时的热电动势值不得超过表 1 的规定。

表 1 热电偶的热电势范围

热电偶类别	允许的热电动势值/ μV	
	4.22K	77.34K
标准热电偶	- (5266.6 \pm 2.0)	- (4043.0 \pm 2.0)
工作热电偶	- (5267 \pm 13)	- (4043 \pm 17)

3.3 标准热电偶的不确定度和年稳定性

按本规程检定的标准热电偶，最终给出的不确定度不得超过 0.2K，周期检定结果之差，不得超过表 2 的规定。

表 2 标准热电偶的年稳定性（周期检定结果之差）

温度范围/K	年稳定性/ μV （参考端：0 $^{\circ}\text{C}$ ）
4.22 ~ 77.34	\pm 2.0
77.34 ~ 273.15	\pm 2.5

3.4 工作热电偶允差

按本规程检定的工作热电偶，最终给出的检定结果，允许误差为 \pm 1.0K。

4 通用技术要求

a. 热电偶的偶丝直径为 $0.1\text{mm} \sim 0.3\text{mm}$ ，对于新制的标准热电偶，长度不得小于 2.5m 。

b. 新制热电偶的偶丝直径应均匀，外表应平滑。使用中的热电偶，在任何部位不得有明显尖形弯角或裂口。

c. 热电偶测量端的焊接点应匀称、圆滑、成球形，不得有砂眼，其直径约为偶丝直径的 $2 \sim 3$ 倍，且表面光泽。

d. 使用中的热电偶，其测量端如有折裂或脱落，允许按上述 c 项要求重新焊接，其长度不得小于 2.0m 。

5 计量器具控制

计量器具控制包括首次检定、后续检定和使用中检验。

5.1 检定条件

5.1.1 环境条件

检定时的环境温度、相对湿度、电磁干扰和振动等，应满足标准器与配套设备的相应要求。

5.1.2 检定设备

检定时所需的标准器与配套设备见表 3。选用的标准器，包括整套检定装置，以置信概率 $p = 0.95$ 提供估计值的扩展不确定度 U_{95} ，应不超过被检热电偶允差的 $1/5$ 。

表 3 检定设备

序号	名称	技术要求	用途	备注
1	标准铂电阻温度计	$13.8083\text{K} \sim 273.16\text{K}$ $U_{95} = 0.03\text{K}$	检定标准热电偶	
	标准铯铁电阻温度计	$4.2\text{K} \sim 30\text{K}$ $U_{95} = 0.03\text{K}$		
	锑电阻温度计	$4.2\text{K} \sim 100\text{K}$ $U_{95} = 0.03\text{K}$		
	标准镍铬—金铁热电偶	$4.2\text{K} \sim 273.15\text{K}$ $U_{95} = 0.2\text{K}$	检定工作热电偶	
2	低电势直流电位差计 或数字电压表	0.01 级，最小步进值 $0.1\mu\text{V}$ 0.002 级，分辨力 $0.1\mu\text{V}$	检定标准热电偶	含配套 设备
		0.01 级，分辨力 $0.1\mu\text{V}$	检定工作热电偶	
3	多点转换开关	寄生热电势 $< 0.4\mu\text{V}$	检定标准热电偶	
		寄生热电势 $< 1\mu\text{V}$	检定工作热电偶	

表 3 (续)

序号	名称	技术要求	用途	备注
4	标准电阻	0.01 级, 标称阻值: 0.1 Ω , 1 Ω , 10 Ω , 100 Ω , 1000 Ω , 各带温度修正系数	检定标准热电偶	
5	微安表	0.5 级, 0 μ A ~ 100 μ A	检定标准热电偶	
6	毫安表	0.5 级, 0mA ~ 10mA	检定标准热电偶	
7	水银温度计	0 $^{\circ}$ C ~ 50 $^{\circ}$ C, 最小分度值 0.1 $^{\circ}$ C	检定标准热电偶	
8	精密稳压电源	电压稳定度 < 10 ⁻³	检定标准热电偶	
9	低温恒温器	温度波动度 ± 0.01 K/15min, 铜块工作区最大温差 0.03K	检定标准热电偶	
		温度波动度 ± 0.1 K/15min	检定工作热电偶	
10	精密电阻箱	0.1 级, 0 Ω ~ 9999.9 Ω , 最小步进值 0.1 Ω	检定标准热电偶	2 支
11	水三相瓶 (含保温装置)		检定标准热电偶	
12	冰点恒温器	0 $^{\circ}$ C \pm 0.1 $^{\circ}$ C	检定工作热电偶	
13	放大镜	5 ~ 8 倍	外观检查	
14	米尺	2m, 刻度值 1mm	外观检查	

5.2 检定项目

只有满足第 3.4 条要求的热电偶才能进行下一步的检定。检定内容就是确定温度与热电势之间的关系。

5.3 检定方法

5.3.1 标准热电偶

5.3.1.1 标准热电偶的检定原理如图 1 所示 (电测装置以电位差计为例)。

5.3.1.2 冻制水三相点瓶。稳定后, 测量低温标准铂电阻温度计在水三相点的电阻值。

5.3.1.3 标准温度计与热电偶的安装

a. 热电偶在低温恒温器中安装时, 不得多于 15 支, 其测量端和低温标准电阻温度计必须与恒温铜块有良好热接触。

b. 热电偶的偶丝和低温标准电阻温度计测量引线从低温恒温器中引出之前, 应与铜块、热屏和热轴有良好热接触。

c. 将被检热电偶参考端与同样直径漆包线扭接, 并将其插入水三相点瓶底部。

5.3.1.4 热电偶安装完之后, 将低温恒温器的真空室封好, 用真空机组抽空。当真空度达到 10⁻²Pa 时, 可用氮气清洗 1~2 次, 再充入适量的氮气。最后, 把低温恒温器放

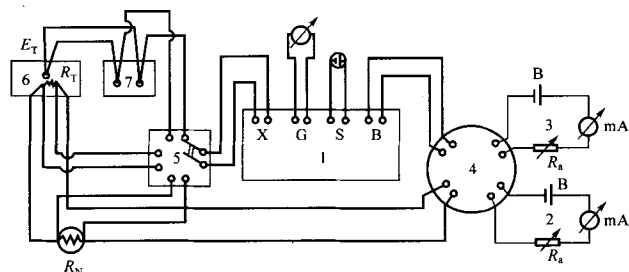


图1 标准热电偶检定原理示意图

1—电位差计；2—电位差计工作回路电源；3—测量回路电源；4—电流换向开关；

5—多点转换开关；6—热电偶测量端；7—热电偶参考端；

B—电源；S—标准电池；G—检流计；X—测量端；mA—毫安表； R_s —可调电阻箱；

R_T —低温标准电阻温度计； R_N —标准电阻； E_T —被检热电偶

入杜瓦瓶中，视需要输入液氮或液氮。

5.3.1.5 热电偶的分度和检定，先从最低温度开始，逐渐升温进行。在 4.2K ~ 77K 和 4.2K ~ 273.15K 两个范围的检定点数见表 4。

表 4 标准热电偶的检定点

温度范围/K	检定点数
4.2 ~ 15	5
15 ~ 20	4
20 ~ 35	3
35 ~ 40	4
40 ~ 77	4
77 ~ 273.15	10

5.3.1.6 各温区所用低温标准温度计的工作电流和匹配使用的标准电阻，应根据不同温度范围按表 5 规定使用。

表 5 标准温度计与标准电阻的工作状况

标准温度计	标称阻值/ Ω	适用温区/K	工作电流/mA	标准电阻/ Ω
铂电阻	$R_0 \approx 25$	13.8 ~ 273.16	5 ~ 1	0.1, 1, 10
铱-铁电阻	$R_0 \approx 50$	4.2 ~ 30	0.5 ~ 1.0	1, 10
锗电阻	$R_{4.2} \approx 1000$	4.2 ~ 100	0.01 ~ 1.0	10, 100, 1000

5.3.1.7 用真空机组将低温恒温器真空室抽至 10^{-3} Pa, 首先检定 4.2K, 然后再逐点进行升温检定。

5.3.1.8 各检定点的温度由低温标准电阻温度计监测, 当铜块温度达到平衡之后, 先由水银温度计读取标准电阻的温度, 再按下列顺序测出标准与被检热电偶的电压降和热电动势值, 每次不得少于两个循环。

标准电阻 → 标准温度计 → 被检₁ → 被检₂ → …… → 被检_n

↓ 换向

标准电阻 ← 标准温度计 ← 被检₁ ← 被检₂ ← …… ← 被检_n

测量始末铜块的温度变化不得超过 0.01K。测量结束后, 再读水银温度计示值。将所有测得值记在检定记录上 (见附录 C)。

5.3.2 工作热电偶

5.3.2.1 工作热电偶的检定原理如图 2 所示。

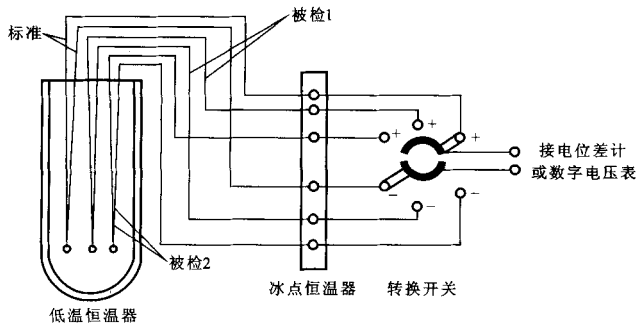


图 2 工作热电偶检定原理示意图

5.3.2.2 热电偶的安装

a. 被检热电偶一般不超过 20 支, 其测量端应围绕 2 支标准热电偶。用直径 0.1mm 漆包线捆扎, 涂上真空油脂, 再用锡 (或铝) 箔裹紧, 插入预先涂有真空油脂的低温恒温器铜块小孔中。将偶丝在铜块上绕一周, 再经与冷却液温度相同的外壳接触 (至少 10cm) 后引至室温。

b. 将热电偶的参考端与同样直径的漆包线连接, 套上塑料管, 插入盛有纯水或变压器油的试管底部, 再将试管插入冰点恒温器中。

5.3.2.3 工作热电偶的检定点为 4.2K、20K 或 27K、77K 或 90K、195K。

5.3.2.4 检定时测量顺序如下。

标准₁ → 被检₁ → 被检₂ → …… → 被检_n → 标准₂

↓

标准₁ ← 被检₁ ← 被检₂ ← …… ← 被检_n ← 标准₂

每次测量不得少于两个循环。测量始末铜块温度变化不得超过 0.1K。将所有测得值记在检定记录上（见附录 D）。

5.3.2.5 对检定中记录全部测得的热电动势值 E_T ，在必要时，应根据电位差计各盘修正值进行修正。若使用同等准确度的数字电压表，可直接读取测得值，必要时也应进行修正。

5.3.2.6 标准热电偶的计算步骤（以电测装置选电位差计为例）

a. 取测量前后标准电阻温度（由水银温度计读出）的平均值，然后按下式求得该温度下标准电阻的实际值。

$$R_N = R_{20} [1 + \alpha (t - 20) + \beta (t - 20)^2] \quad (1)$$

式中 R_N ——温度为 t 时标准电阻的电阻值；

R_{20} ——标准电阻检定证书给出的 20℃ 时的检定值；

α , β ——所用标准电阻的温度系数；

t ——检定时标准电阻的温度。

b. 热电偶测量端的温度（ T ）计算。

热电偶测量端的温度（ T ），根据记录通过相应的标准温度计证书求得，如果是标准铂电阻温度计，则按 1990 年国际温标由电阻比计算；如果是标准铑铁或钨电阻温度计，则由电阻值直接计算。

c. 将每支热电偶测得的 T 、 E_T 列成表格。

d. 将上述列出的 T 、 E_T 值，用电子计算机按下式求出系数 B_n ，并按 T 的每一度间隔打印出 E_T 、 T 、 S 、 $\left(\frac{dE}{dT}\right)$ 表。

$$E_T = \sum_{n=0}^L B_n T^n \quad (2)$$

式中 L ——最佳拟合阶数。

5.3.2.7 工作热电偶检定结果的计算

a. 由标准热电偶测得值，根据检定证书给出的 E_T-T-S 表，算出测量端温度 T 。

b. 根据 T 由分度表（见附录 A）求得 E_i ，再由下式算出工作热电偶的误差 ΔT_i ，以此作为判断该热电偶合格与否的依据。

$$\Delta T_i = \frac{E_i - E_T}{\frac{dE}{dT}} \quad (3)$$

式中 E_i ——被检工作热电偶当测量端温度为 T 时测得的热电动势值；

E_T ——由标准热电偶确定的，热电偶测量端温度为 T 时，对应分度表的热电动势值；

$\frac{dE}{dT}$ ——温度为 T 时的微分热电动势。

5.3.2.8 从低温恒温器中取出热电偶时，注意勿使热电偶成直角弯折，并将热电偶捋成一束，轻松地绕在一轴心直径大于 50mm 的线轴上。

5.4 检定结果处理

5.4.1 将热电偶检定结果按要求逐一填写在检定证书（见附录 E）上，对于标准热电偶应给出五位有效数字，对于工作热电偶应给出四位有效数字。

5.4.2 按本规程要求检定合格的热电偶给出检定证书，不合格的给出检定结果通知书并指出不合格项目。

5.5 检定周期

标准热电偶和工作热电偶的检定周期一般为 1 年。

镍铬—金铁热电偶分度表(参考端:0℃)

℃	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10	℃
-270	-5.279	-5.290	-5.300	-5.308	-5.317	-5.326	-5.334	-5.341	-5.348	-5.354	-5.359	-270
-260	-5.130	-5.147	-5.163	-5.179	-5.195	-5.211	-5.226	-5.241	-5.254	-5.267	-5.279	-260
-250	-4.961	-4.978	-4.995	-5.011	-5.028	-5.045	-5.062	-5.079	-5.096	-5.113	-5.130	-250
-240	-4.794	-4.811	-4.827	-4.844	-4.860	-4.877	-4.894	-4.910	-4.927	-4.944	-4.961	-240
-230	-4.630	-4.646	-4.663	-4.679	-4.696	-4.712	-4.728	-4.745	-4.761	-4.778	-4.794	-230
-220	-4.463	-4.480	-4.497	-4.513	-4.530	-4.547	-4.563	-4.580	-4.596	-4.613	-4.630	-220
-210	-4.292	-4.310	-4.327	-4.344	-4.361	-4.378	-4.395	-4.412	-4.429	-4.446	-4.463	-210
-200	-4.117	-4.135	-4.153	-4.170	-4.188	-4.205	-4.223	-4.240	-4.258	-4.275	-4.292	-200
-190	-3.938	-3.956	-3.974	-3.992	-4.010	-4.028	-4.046	-4.064	-4.082	-4.100	-4.117	-190
-180	-3.755	-3.773	-3.792	-3.810	-3.829	-3.847	-3.865	-3.884	-3.902	-3.920	-3.938	-180
-170	-3.568	-3.586	-3.605	-3.624	-3.643	-3.662	-3.680	-3.699	-3.718	-3.736	-3.755	-170
-160	-3.377	-3.396	-3.415	-3.434	-3.453	-3.472	-3.492	-3.511	-3.530	-3.549	-3.568	-160
-150	-3.182	-3.202	-3.221	-3.241	-3.260	-3.280	-3.299	-3.318	-3.338	-3.357	-3.377	-150
-140	-2.984	-3.004	-3.024	-3.044	-3.064	-3.084	-3.103	-3.123	-3.143	-3.162	-3.182	-140
-130	-2.784	-2.804	-2.824	-2.844	-2.864	-2.885	-2.905	-2.925	-2.945	-2.964	-2.984	-130
-120	-2.581	-2.601	-2.622	-2.642	-2.662	-2.683	-2.703	-2.723	-2.744	-2.764	-2.784	-120
-110	-2.375	-2.396	-2.417	-2.437	-2.458	-2.478	-2.499	-2.520	-2.540	-2.560	-2.581	-110
-100	-2.168	-2.189	-2.209	-2.230	-2.251	-2.272	-2.293	-2.313	-2.334	-2.355	-2.375	-100

续表

℃	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10	℃
						热电动势值/ μV						
-90	-1.958	-1.979	-2.000	-2.021	-2.042	-2.063	-2.084	-2.105	-2.126	-2.147	-2.168	-90
-80	-1.746	-1.767	-1.789	-1.810	-1.831	-1.852	-1.873	-1.895	-1.916	-1.937	-1.958	-80
-70	-1.533	-1.554	-1.575	-1.597	-1.618	-1.640	-1.661	-1.682	-1.704	-1.725	-1.746	-70
-60	-1.317	-1.339	-1.361	-1.382	-1.404	-1.425	-1.447	-1.468	-1.490	-1.511	-1.533	-60
-50	-1.101	-1.122	-1.144	-1.166	-1.188	-1.209	-1.231	-1.253	-1.274	-1.296	-1.317	-50
-40	-0.883	-0.904	-0.926	-0.948	-0.970	-0.992	-1.014	-1.035	-1.057	-1.079	-1.101	-40
-30	-0.663	-0.685	-0.707	-0.729	-0.751	-0.773	-0.795	-0.817	-0.839	-0.861	-0.883	-30
-20	-0.443	-0.465	-0.487	-0.510	-0.532	-0.554	-0.576	-0.598	-0.620	-0.642	-0.663	-20
-10	-0.222	-0.244	-0.267	-0.289	-0.311	-0.333	-0.355	-0.377	-0.399	-0.421	-0.443	-10
0	0.000	-0.022	-0.045	-0.067	-0.089	-0.111	-0.133	-0.156	-0.178	-0.200	-0.222	0
℃	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10	℃
℃	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	℃
0	0.000	0.022	0.045	0.067	0.089	0.111	0.134	0.156				
℃	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	℃

本分度表的温度范围与拟合方程的系数是

-273℃~7℃

 $C_0 = 0.000\ 000\ 000\ 0$ $C_1 = 2.227\ 236\ 746\ 6 \times 10^{-02}$ $C_2 = 3.640\ 617\ 966\ 4 \times 10^{-06}$ $C_3 = -1.596\ 792\ 820\ 2 \times 10^{-07}$ $C_4 = -4.526\ 016\ 988\ 8 \times 10^{-09}$ $C_5 = 4.043\ 255\ 576\ 9 \times 10^{-11}$ $C_6 = 4.906\ 303\ 576\ 5 \times 10^{-12}$

$C_1 = 1.227\ 234\ 848\ 4 \times 10^{-13}$
$C_4 = 1.682\ 977\ 369\ 7 \times 10^{-15}$
$C_9 = 1.463\ 645\ 014\ 9 \times 10^{-17}$
$C_{10} = 8.428\ 790\ 974\ 7 \times 10^{-20}$
$C_{11} = 3.214\ 663\ 938\ 7 \times 10^{-22}$
$C_{12} = 7.822\ 543\ 048\ 3 \times 10^{-25}$
$C_{13} = 1.101\ 093\ 059\ 6 \times 10^{-27}$
$C_{14} = 6.826\ 366\ 158\ 0 \times 10^{-31}$

注：

本规程规定热电偶参考温度为0℃，参考端不在0℃的热电势值与参考端在0℃的热电势值的换算关系为

$$E(t, t_0) = E(t, t_1) + E(t_1, t_0)$$

式中 $E(t, t_0)$ ——参考端为0℃(t_0)，测量端为 t 时的热电势值；

$E(t, t_1)$ ——参考端为 t_1 ，测量端为 t 时的热电势值；

$E(t_1, t_0)$ ——参考端为 t_0 ，测量端为 t_1 时的热电势值， t_1 可以是0℃以下任一参考温度，如77K、4.2K等。

附录 B

热电偶的均匀性与检测方法

B1 热电偶不均匀性热电动势不得超过表 B-1 的规定。

表 B-1 热电偶不均匀性热电动势

偶丝材料	不均匀热电动势/ μV	
	标准热电偶	工作热电偶
镍铬	1.5	2.5
金铁	1.5	3.0

B2 热电偶不均匀性检测方法

B2.1 外观检查

热电偶外观检查按本规程第 4 条的要求，用放大镜和米尺进行观测。

B2.2 均匀性检测

将 5m ~ 30m 长单丝双绕在一根直径 50mm、长 1000mm、厚 2mm ~ 3mm 的玻璃筒或塑料管上，制成探测筒。偶丝不要拉得太紧，以不脱落为宜。偶丝两端与两根同样直径的漆包线扭接，并将其插在冰点恒温器中，然后将两根漆包线接到电测装置上。

将探测筒每隔 5cm，逐段浸入液氮中，浸入后经 5min 读取不均匀性热电动势。

附录 C

标准镍铬—金铁热电偶检定记录

第 页

电测装置	标准电阻温度/℃				测量时间	参考端温度	检定点温度/K	
	开始		结束					
标准温度计与 热电偶编号								
制 造 厂								
测 得 值 / μV	1							
	2							
	3							
	4							
	5							
	6							
平均值								
修正值								
实际值								
电阻值								
W_r 值								
温度值								
备 注								

检定：

记录：

计算：

复核：

年 月 日

年 月 日

年 月 日

附录 D

工作镍铬—金铁热电偶检定记录

第 页

电测装置		时间	开始		参考端温度	检定点温度/K		
			结束					
热电偶编号								
制造厂								
测得值/ μV	1							
	2							
	3							
	4							
	5							
	6							
平均值								
修正值								
实际值								
温度值								
误差 ΔT_i								
备注								

检定:

记录:

计算:

复核:

年 月 日

年 月 日

年 月 日

附录 E

标准镍铬—金铁热电偶检定证书与检定结果通知书（背面）格式

E1 标准镍铬—金铁热电偶检定证书（背面）格式

检 定 结 果

1. 检定温度范围：
2. 热电势—温度计算方程：

$$E_T = \sum_{n=0}^L B_n T^n$$

式中： $B_0 =$

$B_1 =$

⋮

$B_L =$

3. 参考端温度：

附： $T-E_T-S$ 表

注：下次送检时必须带此证书。

E2 标准镍铬—金铁热电偶检定结果通知书（背面）格式

检定结果通知书

检定温度点 (°C) 热电动势 (mV) 超差值 (mV)

参考端温度 (°C):

注：下次送检时必须带此证书。

附录 F

工作镍铬—金铁热电偶检定结果不确定度评定实例

F1 数学模型

根据本规程, 被检工作镍铬—金铁热电偶(以下简称被检偶)在检定点(T)判断合格与否的公式为

$$\Delta T = \frac{E_{\text{被}}(T) - E_{\text{分}}(T)}{\frac{dE}{dT}} \quad (\text{F-1})$$

式中 $E_{\text{被}}(T)$ ——被检偶在温度 T 时的热电势, μV ;

$E_{\text{分}}(T)$ ——在检定点 T 时, 分度表的热电势, μV ;

$\frac{dE}{dT}$ ——在检定点 T 时的微分电势值, $\mu\text{V}/\text{K}$ 。

实际上, 被检偶的测量结果, 用热电势表示时应为

$$E_{\text{被}}(T) = E_{\text{标}}(T) + \Delta E(T) \quad (\text{F-2})$$

式中 $E_{\text{被}}(T)$ ——被检偶在检定点 T 时的热电势, μV ;

$E_{\text{标}}(T)$ ——标准热电偶在检定点 T 时的热电势, μV ;

$\Delta E(T)$ ——在温度 T 时被检偶与标准偶测得的热电势平均值之差, 即 $[\bar{e}_{\text{被}}(T) - \bar{e}_{\text{标}}(T)]$, μV 。

式(F-2)也可写为

$$E_{\text{被}}(T) = E_{\text{标}}(T) + \bar{e}_{\text{被}}(T) - \bar{e}_{\text{标}}(T) \quad (\text{F-3})$$

式(F-3)即为本评定中的数学模型。

F2 方差与灵敏系数

对式(F-3)全微分, 得

$$dE_{\text{被}}(T) = dE_{\text{标}}(T) + d\bar{e}_{\text{被}}(T) - d\bar{e}_{\text{标}}(T)$$

当上式微分量的误差源以不确定度合成时, 可有

$$u_c^2 = u^2(E_{\text{标}}) + u^2(\bar{e}_{\text{被}}) + u^2(\bar{e}_{\text{标}}) \quad (\text{F-4})$$

式(F-4)为不确定度评定的方差公式, 其灵敏系数分别为 $c_1 = 1$, $c_2 = 1$, $c_3 = -1$, 各个不确定度分量均以微伏计。

F3 计算各标准不确定度分量

以 4.2K 点为例, 热电势值约为 $-5267\mu\text{V}$, 变化率约为 $12\mu\text{V}/\text{K}$ 。

F3.1 $E_{\text{标}}(T)$ 的不确定度

根据本规程标准偶检定结果给出的扩展不确定度为 0.2K, $p = 0.99$, 属正态分布, 包含因子 $k = 2.58$, 故

$$u_1 = \frac{12 \times 0.2}{2.58} = 1.0\mu\text{V}$$

自由度 $\nu_1 \rightarrow \infty$, 该分量属 B 类不确定度

F3.2 $\bar{e}_{\text{热}}(T)$ 的不确定度

F3.2.1 使用数字电压表测量被检偶热电势时引入的不确定度

检定时使用 $6\frac{1}{2}$ 位数字电压表, 分辨力为 $0.1\mu\text{V}$, 在 4.2K 时, 热电势值约为 -5.267mV 。本测量中采用 7071 (solartron) 公司数字电压表的 $6\frac{1}{2}$ 字长挡, 满度指示为 1.4V (或 $1.4 \times 10^6 \mu\text{V}$), 测量误差为 $\pm(20 \times 10^{-6} \times \text{读数} + 10^{-6} \times \text{满度指示})$, 但该仪表使用时间较长, 应计及仪表的终生最大误差 (每平方根年误差), 即测量误差为

$$\Delta = \pm (60 \times 10^{-6} \times \text{读数} + 1 \times 10^{-6} \times \text{满度指示}) \quad (\text{F}-5)$$

该仪表的测量误差为均匀分布, 当以微伏 (μV) 为单位时, 则有

$$u_{2.1} = \frac{6 \times 10^{-5} \times 0.5267 \times 10^4 + 10^{-6} \times 0.14 \times 10^6}{\sqrt{3}} = 0.3\mu\text{V}$$

对此分析的相对不确定度为 10%, 故自由度 $\nu_{2.1} = 50$, 属 B 类不确定度分量。

F3.2.2 低温恒温槽温度波动的影响

根据本规程要求, 测量始末的温度变化最大不超过 0.1K , 实际上在自动控制中, 温度波动度呈正弦变化, 故半区间为 0.05K , 此项不确定度为反正弦分布, 故有

$$u_{2.2} = \frac{0.05 \times 12}{\sqrt{2}} = 0.4\mu\text{V}$$

该项估计的相对不确定度为 50%, 故自由度 $\nu_{2.2} = 2$, 属 B 类不确定度分量。

F3.2.3 铜块工作区内温度不均匀带来的影响

低温恒温槽中铜块工作区域各点最大温差 (温场均性) 为 0.03K , 属均匀分布, 半区间为 0.015K , 故有

$$u_{2.3} = \frac{0.015 \times 12}{\sqrt{3}} = 0.1\mu\text{V}$$

完全可靠, 则自由度 $\nu_{2.3} \rightarrow \infty$, 属 B 类不确定度分量。

F3.2.4 参考端温度变化带来的影响

测量中采用 0°C 作为参考端, 经多次实验, 测量过程中冰点槽的温度变化为 $0^\circ\text{C} \pm 0.1^\circ\text{C}$, 热电势随温度变化为 $22\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, 属均匀分布, 故为

$$u_{2.4} = \frac{0.1 \times 22}{\sqrt{3}} = 1.3\mu\text{V}$$

此分析的相对不确定度为 50%, 自由度 $\nu_{2.4} = 2$, 属 B 类不确定度分量。

F3.2.5 多点转换开关寄生热电势带来的影响

本规程要求多点转换开关每个接触点的寄生热电势均小于 $0.4\mu\text{V}$, 则半区间为 $0.2\mu\text{V}$, 属均匀分布, 故有

$$u_{2.5} = \frac{0.2}{\sqrt{3}} = 0.1\mu\text{V}$$

估计相对不确定度为 30%, 自由度 $\nu_{2.5} = 5$, 属 B 类不确定度分量。

F3.3 $\bar{e}_{\text{热}}(T)$ 的不确定度

F3.3.1 电测仪表测量时带来的影响

在 4.2K 时, 标准偶的热电势与被检偶接近, 约为 $-5267\mu\text{V}$, 故与被检偶的不确定度分量一样, 即 $u_{3,1} = 0.3\mu\text{V}$, $\nu_{3,1} = \nu_{2,1} = 50$, 属 B 类不确定度分量。

F3.3.2 温度波动度的影响

在测量标准偶时, 恒温槽中温度波动度的影响, 与被检偶一样, 故 $u_{3,2} = 0.4\mu\text{V}$, 自由度 $\nu_{3,2} = 2$, 属 B 类不确定度分量。

F3.3.3 铜块工作区内温度不均匀带来的影响

该项影响与被检偶相同, 即 $u_{3,3} = u_{2,3} = 0.1\mu\text{V}$, $\nu_{3,3} \rightarrow \infty$, 属 B 类不确定度分量。

F3.3.4 参考端温度变化带来的影响

此项与被检偶情况一样, 即 $u_{3,4} = u_{2,4} = 1.3\mu\text{V}$, $\nu_{3,4} = 2$, 属 B 类不确定度分量。

F3.3.5 转换开关寄生热电势带来的影响

与被检偶情况一样, 故 $u_{3,5} = u_{2,5} = 0.1\mu\text{V}$, $\nu_{3,5} = 5$, 属 B 类不确定度分量。

F3.4 测量的重复性

对一支被检热电偶在 4.2K 时, 经 10 次独立系列测量, 故平均值的标准差为

$$u_4 = \sqrt{\frac{\sum u_i^2}{n(n-1)}} = 1\mu\text{V}$$

自由度 $\nu_4 = 9$, 属 A 类不确定度分量。

F4 标准不确定度分量列表

将上述评定的标准不确定度分量列表, 见表 F-1。

表 F-1

项目	误差来源	不确定度 分量	标准不确定度 / μV	分布	自由度
u_1	标准器不确定度	B	1.0	正态	∞
$u_{2,1}$	电测仪表对被检偶	B	0.3	均匀	50
$u_{2,2}$	温度波动度	B	0.4	反正弦	2
$u_{2,3}$	温场均匀性	B	0.1	均匀	∞
$u_{2,4}$	参考端温度变化	B	1.3	均匀	2
$u_{2,5}$	开关寄生电势	B	0.1	均匀	5
$u_{3,1}$	电测仪表对标准偶	B	0.3	均匀	50
$u_{3,2}$	温度波动度	B	0.4	反正弦	2
$u_{3,3}$	温场均匀性	B	0.1	均匀	∞
$u_{3,4}$	参考端温度变化	B	1.3	均匀	2
$u_{3,5}$	开关寄生电势	B	0.1	均匀	5
u_4	测量重复性	A	1.0	t	9

F5 合成标准不确定度

$$\begin{aligned}
 u_c^2 &= \sum_{i=1}^{12} u_i^2 \\
 &= 1.0^2 + 0.3^2 + 0.4^2 + 0.1^2 + 1.3^2 + 0.1^2 + 0.3^2 + 0.4^2 + 0.1^2 + 1.3^2 + 0.1^2 + 1.0^2 \\
 &= 5.92
 \end{aligned}$$

$$\text{即 } u_c = 2.4\mu\text{V}$$

F6 有效自由度

根据韦尔奇 - 萨特斯韦特公式, 有效自由度为

$$\begin{aligned}
 \nu_{\text{eff}} &= \frac{u_c^4}{\sum_{j=1}^{12} \frac{u_j^4}{\nu_j}} \\
 &= \frac{2.4^4}{\frac{0.3^4}{50} + \frac{0.4^4}{2} + \frac{0.1^4}{5} + \frac{1.3^4}{2} + \frac{0.3^4}{50} + \frac{0.4^4}{2} + \frac{1.3^4}{2} + \frac{0.1^4}{5} + \frac{1.0^4}{9}} \\
 &= \frac{35.05}{3.0} \\
 &\approx 12
 \end{aligned}$$

F7 测量结果的扩展不确定度

对于工作用计量器具, 包含因子一般取 2 (置信概率 $p = 0.95$), 实际上, 根据本计算, 有效自由度 $\nu_{\text{eff}} \approx 12$, 查 t 分布在不同置信概率 p 与自由度 ν 的 $t_p(\nu)$ 值, 包含因子 $k \approx 2.2$, 故有 $U = 2u_c = 5.3\mu\text{V}$, 相应于温度差为

$$\Delta T = \frac{U}{\frac{dE}{dT}} = 0.24\text{K}$$

即根据本规程所列的标准装置与检定方法, 被检工作用镍铬 - 金铁热偶在 4.2K 时, 检定结果扩展不确定度为 0.24K。

在不考虑被检热电偶的测量重复性时, 由装置和测量方法引入的不确定度为 0.18K ($k = 2$), 满足检定要求。