

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2021.06.05

核电池热功率测量装置校准用标准热源设计

高祎¹, 寇琼月², 张灏¹, 唐亚曼¹

(1. 航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095; 2. 中国人民解放军 92228 部队, 北京 100072)

摘要: 核电池在空间探测、核工业等领域应用十分广泛, 由于核电池结构和材料的特殊性, 多采用基于等效热功率的方法对其进行功率测量。目前我国用于对核电池热功率测量装置进行计量的热功率标准装置存在准确度较低、稳定性较差的问题, 为解决此问题, 本文研制了一套标准热源装置, 该装置由高精度恒流源、标准电阻、发热体、八位半数字多用表等部分组成, 利用电流的焦耳效应将电能转化为热能。经试验证明, 该装置在电流小于等于 3 A 的范围内, 能够产生 0.7 ~ 147 W 的功率, 相对扩展不确定度不大于 2×10^{-3} ($k=2$), 为保障核电池热功率准确溯源起到了重要作用。

关键词: 核电池热功率; 电阻; 稳定性; 不确定度

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2021)06-0028-08

Design of Standard Heat Source for Calibration of Nuclear Battery Thermal Power Measurement Device

GAO Yi¹, KOU Qiongyue², ZHANG Hao, TANG Yaman¹

(1. Changcheng Institute of Metrology and Measurement, Beijing 100095, China;

2. PLA Unit No. 92228, Beijing 100072, China)

Abstract: Nuclear batteries are widely used in space exploration, nuclear industry and other fields. Because of the particular structure and materials of nuclear battery, methods based on equivalent thermal power are often applied when measuring their power. At present, the thermal power standard device used for measuring the nuclear battery thermal power measurement device in China has the problems of low levels of accuracy and stability. In order to solve these problems, this paper developed a set of standard heat source device. It is consisted of a high-precision constant current source, a standard resistance, a standard heat source, an eight-and-a-half-digit digital multimeter, etc. The device converts electrical energy into heat energy by the means of Joule effect. It has been verified by experiments that when the range of current is within 3A, the device can generate 0.7 ~ 147 W of power, and the relative expanded uncertainty would be equal to or less than 2×10^{-3} ($k=2$), which plays an important role in ensuring the accurate traceability of the thermal power of nuclear batteries.

Key words: nuclear battery thermal power; resistance; stability; uncertainty

0 引言

核电池因其使用寿命长、寿命周期内维护频次低、功率稳定等优点, 在空间探测、核工业、反潜监听等领域发挥着重要作用^[1-2]。由于核电池长期工作在难以进行人工维护的环境中, 因此需要对其进行功率测量, 以确保准确核算探测器寿命、极限功率载荷、核燃料纯度等关键参数。核电池功率通过量热计测量,

量热计的标定与溯源需要标准热源提供参考标准值。

美国核安全管理局(NNSA)洛斯阿拉莫斯国家实验室应用惠斯通桥原理测量核电池热功率, 其标准热源应用经认证的标准 Pu-238(准确度优于 0.02%)及电加热标准热源^[3-4]。法国塞塔拉姆公司开发的 CALVET LV 量热仪, 使用焦耳效应标定, 量热准确度为 $\pm 0.2\%$ ^[5]。柳加成等^[6]应用基于热电堆原理的量热计测量热功率, 其标准热源选择同位素热源和电加热模

收稿日期: 2021-07-15; 修回日期: 2021-10-31

基金项目: 国家“十三五”技术基础科研项目(JSJL2016205A093)

引用格式: 高祎, 寇琼月, 张灏, 等. 核电池热功率测量装置校准用标准热源设计[J]. 计测技术, 2021, 41(6): 28-35.

GAO Y, KOU Q Y, ZHANG H, et al. Design of standard heat source for calibration of nuclear battery thermal power measurement device[J]. Metrology and measurement technology, 2021, 41(6): 28-35.

拟热源两种,电加热模拟 12.81 W 热源时,短期稳定性相对标准偏差为 0.44%。张萍等^[7]设计了射频中功率量热计校准系统,其中标准热源负载选择标称阻值为 50 Ω 的负载电阻。

相较同位素热源,电加热模拟热源成本较低且无放射性,因此更具有普适性。应用电加热模拟热源时,基于量热法测量核电池热功率的溯源链为:核电池热功率溯源到热功率测量装置,热功率测量装置溯源到标准热源,标准热源溯源到电学基准。

目前我国用于对核电池热功率测量装置进行计量的电加热标准热源存在准确度较低、稳定性较差的问题。针对此问题,本文研制了一套热功率标准装置,该装置基于电流的焦耳效应原理将电能转化为热能,在电流小于等于 3 A 的范围内,能够产生 0.7 ~ 147 W 的功率。本文对该装置的结构组成、工作原理进行详细介绍,并开展性能试验及不确定度分析以验证其可靠性与准确性,为相关热功率标准装置的国产化设计研发提供借鉴。

1 装置原理及构成

1.1 装置原理

研制的标准热源装置由高精度恒流源、标准电阻、发热体、八位半数字多用表等部分组成,如图 1 所示。高精度恒流源为电路提供稳定的电流,发热体与标准电阻串联在电路中。高精度数字多用表用于测量发热体和标准电阻两端的电压,利用低热电势扫描开关实现测量位置的切换。

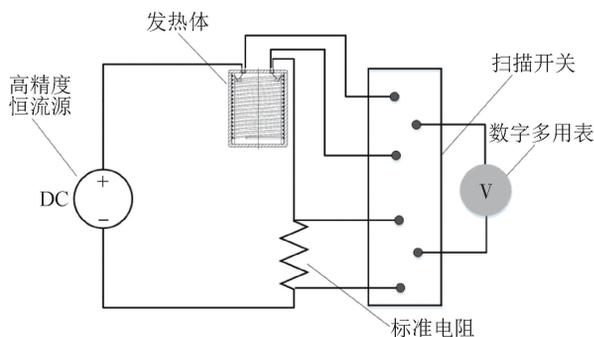


图 1 标准热源装置图

Fig. 1 Schematic diagram of standard heat source

热功率标准热源装置基于电流的焦耳效应将电能转化为热能,通过电功率计算产生的热功率。由于发热体和标准电阻为串联结构,因此通过二者的电流相同,标准电阻两端电压 U_1 与电阻 R_0 的比值即为通路中的电流。功率 P 为发热体两端电压 U_2 与电流的乘积,故

$$P = \frac{U_1 U_2}{R_0} \quad (1)$$

1.2 发热体设计

1.2.1 发热体骨架

发热体骨架的形状应与测量对象适配,本文研制的热功率标准热源主要用于对核电池热功率测量装置进行计量,目前大部分核电池热功率测量装置均为圆柱体,因此将发热体骨架计为圆筒状,这种设计方式还具有达到热平衡的时间较短的优点。

根据不同的功率,将发热体整体尺寸分为 3 种,功率与发热体尺寸的对应关系如表 1 所示。

表 1 发热体尺寸

Tab. 1 Size of heating element

热功率/W	发热体高度/mm	发热体直径/mm
1 ~ 10	30	25
10 ~ 100	120	90
100 ~ 150	150	110

1.2.2 加热丝材料选择

根据发热体的工作特性要求选择加热丝材料。标准热源装置作为标准器具对核电池热功率进行校准,其长期稳定性至关重要,加热丝材料需要具有抗氧化、抗腐蚀、不易受环境影响、温度分布均匀的特点。对比常用加热丝材料的上述特性(如表 2 所示),选择铂丝作为加热丝材料。

表 2 加热丝材料选型

Tab. 2 Material selection of heating wire

加热丝材料	优点	缺点
铬镍合金、铁铬铝合金	塑性好、抗氧化	温度分布不均匀
钨、钨、钽	电阻系数大、熔点高	抗氧化性差,必须在真空或适当气氛中使用
铂和铂铑合金	抗氧化、电热性能稳定	不能经还原气氛及硅、铁、硫、碳元素的侵蚀
碳化硅	耐温度骤变性能好、化学性能稳定	不能在真空气氛使用、使用过程中易老化、易碎
硅化钨	独特的高温抗氧化性	不能在 400 ~ 700 $^{\circ}\text{C}$ 条件下长期使用

1.2.3 加热丝缠绕方式

加热丝缠绕方式可分为内绕式和外绕式,内绕式无法提供支撑应力,耐震性差;外绕式能够提供支撑应力,耐震性相对较好。本文采用双螺旋外绕式缠绕方式缠绕加热丝,以减小电流的磁效应。具体方法为:

将加热丝对折，对折端固定在骨架底部，然后在骨架表面双线螺旋向上缠绕加热丝。发热体骨架外表面开有双螺旋状沟槽用以固定加热丝。为保证发热体表面均匀性，双螺旋沟槽中的两个螺旋线螺距一致，螺旋线方向一致。

1.2.4 加热丝直径和长度选择

加热丝的直径 D 、长度 L 和功率 P 的关系需要通过公式(2)和(3)计算获得

$$P = I^2 R \tag{2}$$

式中： R 为电阻值， Ω ； I 为通路中电流，A。

$$R = \frac{4\rho L}{\pi D^2} \tag{3}$$

式中： ρ 为加热丝的电阻率， $\Omega \cdot m$ ； L 为加热丝的有效长度，m； D 为加热丝的直径，m。

由于高功率情况下电阻阻值较大，若采用直径过大

的加热丝，会导致所需长度过长，缠绕时每匝间距过近，实际使用过程中容易出现短路。若采用直径过小的加热丝，会导致加热丝强度较低，缠绕过程中易折断。因此，加热丝直径的选择应综合考虑每匝缠绕间隔和加热丝强度。开展了不同功率下加热丝直径和长度选择试验(数据如表 3 所示)，根据试验情况，最终设计：功率为 1~10 W 时，选择直径为 0.2 mm 的加热丝，长度约为 314 mm；功率为 10~100 W 和 100~150 W 的情况下，选择直径为 0.5 mm 的加热丝，长度分别约为 10239 mm 和 19130 mm。

发热体装置结构如图 2 所示。发热体的外壳、骨架、顶盖、固定柱均选择石英玻璃材料制造，具有绝缘性好、耐热性强、热膨胀系数小、化学热稳定性好等优点。发热体外壳和顶盖的厚度均为 2 mm，主要起绝缘作用。固定柱伸出骨架内壁 10 mm，便于固定加热丝。

表 3 加热丝直径和长度

Tab. 3 Diameter and length of heating wire

热功率/W	电流/A	骨架高度/mm	骨架直径/mm	电阻/ Ω	加热丝直径/mm	加热丝长度/mm	每匝间隔/mm
1~10	2.1	26	21	2.3	0.8	5024	0.3
					0.5	1963	0.9
					0.2	314	4.6
10~100	3	116	86	12	0.8	26212	1.2
					0.5	10239	2.9
					0.2	1638	18.0
100~150	3	146	106	23	0.8	47826	1.1
					0.5	19130	2.7
					0.2	2869	17.0

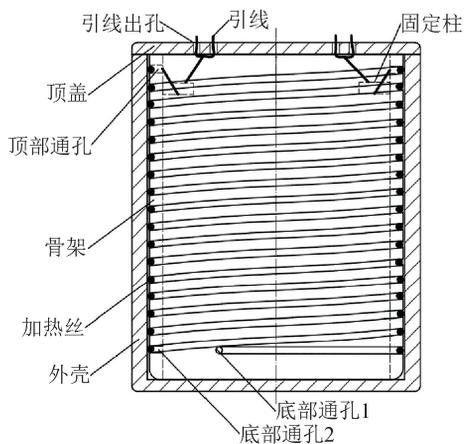


图 2 发热体装置图

Fig. 2 Schematic diagram of heating element

2 标准热源性能试验

开展发热体电阻值及温度随时间变化试验、发热体产生功率随电流变化试验、发热体产生功率的短期稳定性试验，以验证本文研制的标准热源装置的实际性能。

2.1 试验系统搭建及通用步骤

标准热源装置如图 3 所示，高精度恒流源提供恒定电流，八位半数字多用表与寄生电势小于 0.2 μV 的扫描切换开关相连。其中，标准电阻连接扫描开关的标准通道，发热体连接扫描开关的 01 通道，通过转换扫描开关的通道来测量发热体和标准电阻两端的电压值。



图3 标准热源装置图

Fig. 3 Image diagram of standard heat source

以下步骤为试验验证的通用步骤：

步骤一，在发热体表面贴一支铂电阻温度计，在标准电阻四周贴4支铂电阻温度计，用以监测发热体表面温度和标准电阻温度；

步骤二，打开高精度恒流源、扫描开关及数字多用表的电源；

步骤三，设置数字多用表DCV(直流电压档)，扫描开关设置为标准通道，设置高精度恒流源的电流，设置完成后，发热体电阻值和温度随时间变化试验间隔为2 min，功率随电流的变化以及发热体产生功率的稳定性试验间隔为1 h，读取数字多用表的示数并记录；读数完成后，开关通道设置为01通道，读取数字电压表的示数并记录；

步骤四，更改恒流源电流，重复步骤三。

三个试验的区别在于发热体电阻值和温度随时间变化的试验中记录数据的时间间隔与其他试验不同。发热体电阻值和温度随时间变化试验不需要步骤四。

2.2 发热体电阻值及温度随时间变化试验

发热体由铂丝缠绕而成，随着通电时间的增加，铂丝温度不断升高，铂丝的电阻值随温度升高而增大。开展发热体电阻值及温度随时间变化试验以得出标准热源装置达到动态平衡(即发热体的电阻值、温度和功率几乎不随时间变化)的时间，以便确定后续试验中的时间间隔。试验结果如图4所示，可以看出随着时间的增长，热源温度和铂丝电阻值的变化率均越来越小，

40 min后，温度变化范围在0.5℃以内，铂丝电阻值的变化范围在0.005Ω范围内，相对于10.651Ω的变化率为0.05%。

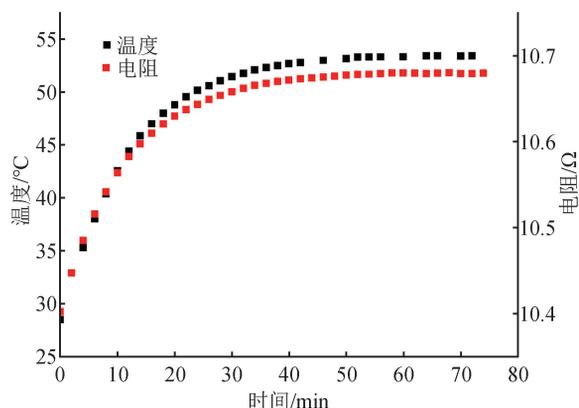


图4 发热体电阻值及温度随时间变化规律

Fig. 4 The resistance value and temperature change of heating element with time

后续发热体功率随电流变化试验中，设置恒流源的电流和电压后，需等待相同时间，以保证试验结果的重复性，即每个电流值条件下需要保持至少40 min再记录数字多用表的电压值。

2.3 发热体产生功率随电流变化试验

本试验目的是验证功率随电流的变化规律及各型号发热体达到的功率上限。当本发热体作为标准器时，根据功率与电流的拟合曲线，找到指定功率下对应的电流值，试验结果如图5~图7所示。本试验中，每个电流值条件下保持1 h再记录数据；数据记录后设置下一电流值。

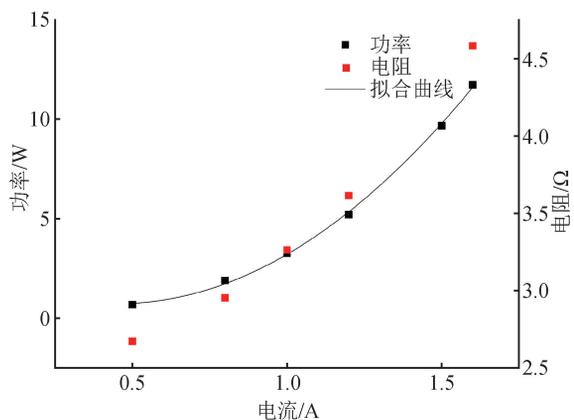


图5 0.7~10 W 功率随电流变化

Fig. 5 0.7~10 W power varies with current

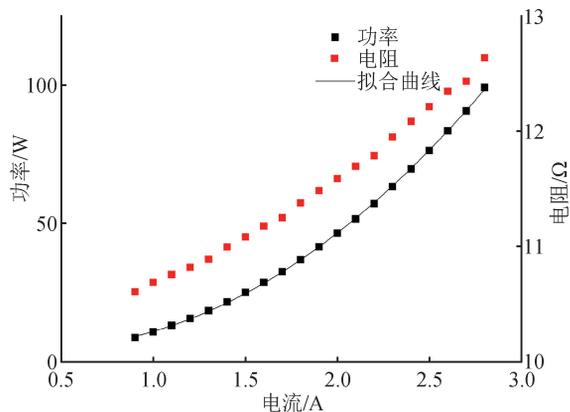


图 6 10 ~ 100 W 功率随电流变化

Fig. 6 10 ~ 100 W power varies with current

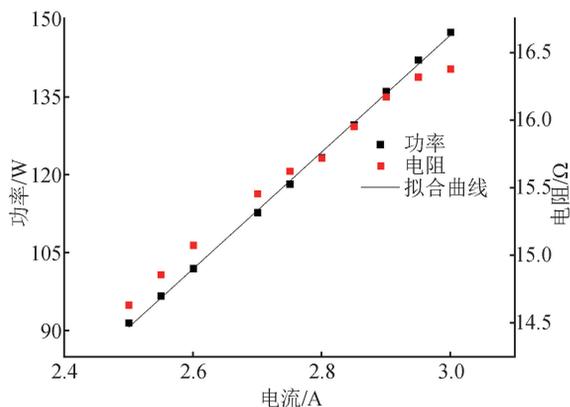


图 7 100 ~ 147 W 功率随电流变化

Fig. 7 100 ~ 147 W power varies with current

由图 5 和图 6 可知, 在空气中自然对流的情况下, 拟合曲线显示功率与电流呈幂函数关系。由图 7 可知, 功率与电流呈线性关系。

发热体由铂丝缠绕而成, 铂丝的阻值随温度的升高呈现幂函数关系^[8], 即

$$R_t = R_n(1 + AT + BT^2) \quad (4)$$

式中: R_t 为实际电阻值, Ω ; R_n 为标称电阻, Ω ; T 为温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

联立式(2)和式(4), 可以得到

$$P = I^2 R_n(1 + AT + BT^2) \quad (5)$$

发热体产生的热量一部分随自然对流换热而散失, 另一部分使内能增加, 则有

$$P = P_{\text{内}} + P_{\text{散}} \quad (6)$$

式中: $P_{\text{内}}$ 为使内能增加的功率, W ; $P_{\text{散}}$ 为由于自然对流等散失的功率, W 。

$P_{\text{内}}$ 与温度之间的关系^[9]可表示为

$$P_{\text{内}} t = cm\Delta T \quad (7)$$

式中: t 为时间, s ; c 为比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; m 为质量, kg ; ΔT 为温度变化量, K 。

$P_{\text{散}}$ 与温度之间的关系^[10]可表示为

$$P_{\text{散}} = hA(t_w - t_f) \quad (8)$$

式中: h 为对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; t_w 为壁面温度, K ; t_f 为来流温度(室温温度), K ; A 为换热面积, m^2 。

h 可根据努塞尔数 Nu 计算得出, Nu 的表达式为

$$Nu = \frac{hl}{\lambda} \quad (9)$$

式中: λ 为导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; l 为特征长度, m 。

努塞尔数 Nu 与普朗特数 Pr 和格拉校夫数 Gr 的乘积相关。 Pr 的计算公式为

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (10)$$

式中: ν 为运动粘度系数, m^2/s ; α 为热扩散系数, m^2/s 。

Gr 的计算公式为

$$Gr = \frac{g\alpha_v\Delta T l^3}{\nu^2} \quad (11)$$

式中: α_v 为体膨胀系数, K^{-1} ; ΔT 为壁面温度与无穷远处流体温度的温差(无穷远处流体温度为室温温度, 是恒定的), K 。

努塞尔数 Nu 与普朗特数 Pr 和格拉校夫数 Gr 的关系为

$$Nu_m = C(GrPr)_m^n \quad (12)$$

式中: m 为定性温度, $^{\circ}\text{C}$; C 为常数; n 为系数。 C 和 n 的值受流态和 Gr 影响。根据实际情况判断, 自然对流流态为层流, Gr 的范围为 $1.43 \times 10^4 \sim 3 \times 10^9$, 因此可得 $C = 0.59$, $n = 1/4$ ^[10]。

t_m 为定性温度采用边界层的算数平均温度, 即

$$t_m = \frac{t_f + t_w}{2} \quad (13)$$

联立式(8) ~ 式(13)可得

$$P_{\text{散}} = \frac{0.59 \times (g\alpha_v Pr)^{1/4} \lambda A \Delta T^{5/4}}{l^{1/4} \nu^{1/2}} \quad (14)$$

根据式(6)、式(7)和式(14), 可以得到

$$P = \frac{cm\Delta T}{t} + \frac{0.59 \times (g\alpha_v Pr)^{1/4} \lambda A \Delta T^{5/4}}{l^{1/4} \nu^{1/2}} \quad (15)$$

联立式(5)和式(15), 得到 P 与 I 的隐函数关系。根据试验数据拟合曲线, 发现 $0.7 \sim 10 \text{ W}$ 和 $10 \sim 100 \text{ W}$

的发热体产生的功率随电流呈现二次幂函数关系, 100 ~ 147 W 的发热体产生的功率随电流呈现线性关系。这一结果的产生与发热体的外形尺寸相关, 产生 0.7 ~ 10 W 和 10 ~ 100 W 的发热体直径和高度相对较小, 自然对流换热量相对较小; 而产生 100 ~ 147 W 的发热体直径和高度相对较大, 自然对流换热量相对较大。

综上可知, 本文研制的发热体在电流小于等于 3 A 时, 可产生 0.7 ~ 147 W 的功率。

2.4 发热体产生功率的短期稳定性试验

本试验目的是验证功率的短期稳定性, 共进行 3 次试验, 测试结果如图 8 所示, 功率稳定后的数据如表 4 所示, 可知稳定后功率变化最大值为 0.008 W, 相对变化为 0.08%。

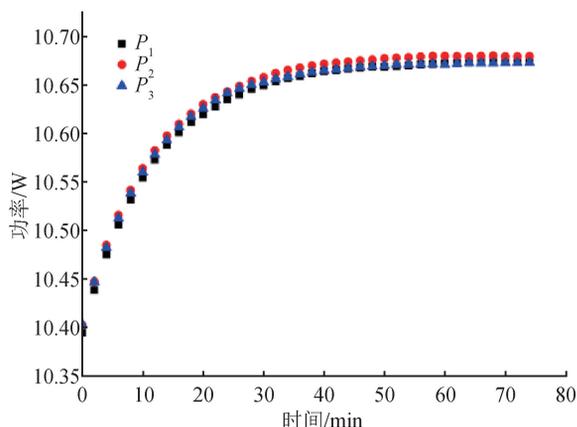


图 8 功率随时间变化重复试验

Fig. 8 Repeat test of power changes with time

表 4 功率稳定后试验结果

Tab. 4 Test results after power stabilization

时间/min	P_1/W	P_2/W	P_3/W
62	10.673	10.68	10.672
64	10.673	10.679	10.673
68	10.674	10.68	10.673
70	10.674	10.68	10.673
72	10.675	10.679	10.673
74	10.675	10.679	10.673

表 5 为电流间隔 1 h 更改一次的功率值, 共进行 3 组试验, 每组间隔 24 h, 结果分别为 P_{11} , P_{12} , P_{13} 。由表 5 可知, 相同电流下, 最大功率差值为 0.051 W, 相对变化约为 0.21%。

表 5 功率与电流关系短期稳定性试验结果

Tab. 5 Short-term stability test results of the relationship between power and current

电流/A	P_{11}/W	P_{12}/W	P_{13}/W	极差/W
0.9	8.390	8.392	8.380	0.012
1.0	10.753	10.754	10.744	0.010
1.1	12.947	12.957	12.946	0.011
1.2	15.372	15.377	15.366	0.011
1.3	18.495	18.515	18.476	0.039
1.4	21.442	21.443	21.425	0.018
1.5	24.625	24.628	24.577	0.051
1.6	28.669	28.670	28.620	0.050
1.7	32.401	32.393	32.403	0.010

3 测量不确定度分析

本装置的量程范围为 0.7 ~ 147 W, 其测量不确定度^[11]来源主要包括: 测量重复性引入的不确定度分量、标准电阻两端电压测量误差引入的不确定度分量、发热体两端电压测量误差引入的不确定度分量、扫描开关寄生电势引入的不确定度分量、标准电阻阻值引入的不确定度分量、标准电阻在空气中的阻值变化引入的不确定度分量、引线漏热引入的不确定度分量。

以 2.98 W 功率为例, 计算各不确定度分量:

1) 测量重复性引入的不确定度分量 u_1

进行 4 次重复试验, 通过极差法评定不确定度, 即

$$s(x_k) = \frac{R}{C} \quad (16)$$

式中: R 为极差, $R = x_{\max} - x_{\min}$, W; C 为极差系数, 查表得到, 当 $n=4$ 时, $C=2.06$ 。

由表 6 可知, 功率 P 为 2.98 W 时, 计算重复性引入的不确定度 $u_1 = s(x_k) = 0.0025$ W。

表 6 重复性

Tab. 6 Repeatability

重复次数	功率/W
1	2.982
2	2.9818
3	2.9869
4	2.9868
$s(x_k)$	0.0025

2)标准电阻两端电压测量误差引入的不确定度分量 u_2

当功率为 2.98 W 时,标准电阻两端电压为 100.47 mV。选择档位为 1 V 档位,根据校准证书可知,100 mV 测量不确定度为 5×10^{-6} V ($k=2$),其引入的不确定度分量为

$$u_2 = 2.5 \times 10^{-6} \text{ V} \quad (17)$$

3)发热体两端电压测量误差引入的不确定度分量 u_3

当功率为 2.98 W 时,发热体两端的电压为 2.973 V,使用数字电压表 3458A 测量时,应选择 10 V 档位,根据校准证书可知,3 V 电压测量不确定度为 9×10^{-6} V ($k=2$),其引入的不确定度分量为

$$u_3 = 4.5 \times 10^{-6} \text{ V} \quad (18)$$

4)扫描开关寄生电势引入的不确定度分量 u_4

扫描开关的寄生电势小于 0.2 μV ,按均匀分布计算,取半宽,扫描开关引入的不确定度为

$$u_4 = \frac{0.1 \times 10^{-6}}{\sqrt{3}} \text{ V} = 5.8 \times 10^{-8} \text{ V} \quad (19)$$

5)标准电阻阻值引入的不确定度分量 u_5

试验过程选择 SRL-0.1 Ω 标准电阻,最大电流为 3 A,标准电阻最大功率为 0.3 W。以二等标准器使用,标准电阻误差为 $\pm 1 \times 10^{-5}$ Ω ,按照均匀分布计算,取半宽,标准电阻引入的不确定度分量为

$$u_5 = \frac{1 \times 10^{-5}}{\sqrt{3}} \Omega = 5.8 \times 10^{-6} \Omega \quad (20)$$

6)标准电阻在空气中的阻值变化引入的不确定度分量 u_6

试验过程选择 SRL-0.1 Ω 标准电阻,根据其说明书,当环境温度在 18.0~28.0 $^{\circ}\text{C}$ 范围变化时,其阻值变化为 0.10000044~0.09999945 Ω ,分散区间为 0.1 $\Omega \pm 0.00000045$ Ω 。在整个试验过程中标准电阻周围温度均在 25.3 $^{\circ}\text{C}$ 左右,未超过 28 $^{\circ}\text{C}$ 。因此标准电阻在空气中的阻值变化引入的不确定度分量为

$$u_6 = \frac{4.5 \times 10^{-7}}{\sqrt{3}} \Omega = 2.6 \times 10^{-7} \Omega \quad (21)$$

7)引线漏热引入的不确定度分量 u_7

电流回路的引线和电压测量的引线均由发热体两端引出,因此加热丝产生的热功率会通过引线散失一部分。引线导热系数 λ 随温度的变化关系可以近似为 $\lambda = -0.0521t + 399.53$,根据傅里叶导热定律

$$\Phi = - \int_{t_1}^{t_2} (-0.0521t + 399.53) A \frac{1}{L} dt \quad (22)$$

式中: Φ 为热流量, W; A 为引线的截面积, m^2 ; L 为

引线长度, m; t 为温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

功率为 2.98 W 时,引线漏热引入的功率为 1.26×10^{-3} W,按照均匀分布,引线漏热引入的不确定度分量为

$$u_7 = \frac{1.26 \times 10^{-3}}{\sqrt{3}} \text{ W} = 7.3 \times 10^{-4} \text{ W} \quad (23)$$

合成标准不确定度 u 计算公式为

$$u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2 + u_7^2} \quad (24)$$

相对扩展不确定度 U 为

$$U = \frac{u}{P} \times k \quad (25)$$

功率为 2.98 W 时,对应的不确定度分量如表 7 所示。计算可得合成标准不确定度为 2.7×10^{-3} W,相对扩展不确定度为 1.9×10^{-3} ($k=2$)。

表 7 2.98 W 对应不确定度分量

Tab. 7 Uncertainty components of 2.98 W

不确定度分量	标准不确定度	灵敏系数	功率标准不确定度/W
u_1	0.0025 W	1	0.0025
u_2	2.5×10^{-6} V	29.7	7.5×10^{-5}
u_3	4.5×10^{-6} V	1.1	5.0×10^{-6}
u_4	5.8×10^{-8} V	29.7	1.8×10^{-6}
u_5	5.8×10^{-6} Ω	29.8	1.8×10^{-4}
u_6	2.6×10^{-7} Ω	29.8	7.8×10^{-6}
u_7	7.3×10^{-4} W	1	7.3×10^{-4}

标准热源装置 0.7~147 W 功率不确定度如表 8 所示,0.7~147 W 对应的相对扩展不确定度不大于 2×10^{-3} ($k=2$)。

表 8 不同功率对应不确定度

Tab. 8 Uncertainty under the condition of different power

功率/W	标准不确定度/W	相对扩展不确定度($k=2$)
0.669	6.4×10^{-4}	2.0×10^{-3}
2.982	2.7×10^{-3}	1.9×10^{-3}
10.676	9.0×10^{-3}	1.7×10^{-3}
101.939	6.2×10^{-2}	1.3×10^{-3}
147.448	7.8×10^{-2}	1.1×10^{-3}

4 结论

目前我国缺乏准确度高、稳定性好的核电池热功

率溯源用标准热源装置,为解决此问题,本文研制了一套标准热源装置。采用铂丝作为加热丝以提高热源稳定性,通过加热丝双螺旋外缠绕方式提高热功率准确度,利用石英玻璃材料制造发热体外壳、骨架、顶盖以保证热源的高可靠性。该装置能够在电流小于等于 3 A 的范围内产生 0.7 ~ 147 W 的功率,相对扩展不确定度不大于 2×10^{-3} ($k=2$),为保障核电池热功率测量数据的准确溯源提供了重要支撑,具有技术借鉴价值。

参 考 文 献

- [1] 王锋. 空间核电源[J]. 大学科普, 2021, 1: 43 - 45.
WANG F. Space nuclear power[J]. University science, 2021, 1: 43 - 45. (in Chinese)
- [2] 郝少昌, 卢振明, 符晓铭, 等. 核电池材料及核电池的应用[J]. 原子核物理评论, 2006, 23(3): 353 - 358.
HAO S C, LU Z M, FU X M, et al. Nuclear battery materials and application of nuclear batteries[J]. Nuclear physics review, 2006, 23(3): 353 - 358. (in Chinese)
- [3] BVRR T, TRELLE H, TOBIN S, et al. Integrated nondestructive assay systems to estimate plutonium in spent fuel assemblies[J]. Nuclear science and engineering, 2015, 179(3): 321 - 332. (in Chinese)
- [4] TRELLE H, FUGATE M, TOBIN S. Data mining techniques to estimate plutonium, initial enrichment, burnup, and cooling time in spent fuel assemblies[R/OL]. [2015 - 03 - 20]. <https://doi.org/10.2172/1209224>.
- [5] Setaram KEP Technologies. CALVET 产品线[EB/OL]. [2021 - 02 - 01]. https://setaramsolutions.cn/app/uploads/sites/2/2021/02/CALVET_卡尔维量热仪产品线.pdf.
- [6] 柳加成, 梁珺成, 陈靖, 等. 大功率 α 、 β 量热计的研制[J]. 核电子学与探测技术, 2011, 31(1): 5 - 8.
LIU J C, LIANG J C, CHEN J, et al. Development of α 、 β Calorimeter of large-power[J]. Nuclear electronics & detection technology, 2011, 31(1): 5 - 8. (in Chinese)
- [7] 张萍, 吴恺, 申家超, 等. 高精度射频中功率量热计的测量及校准分析[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(10): 40 - 45.
ZHANG P, WU K, SHEN J C, et al. Measurement and calibration analysis of high-precision RF mid-power calorimeter[J]. Foreign electronic measurement technology, 2020, 39(10): 40 - 45. (in Chinese)
- [8] 国家质量监督检验检疫总局. JJG 229 - 2010 工业铂、铜热电阻检定规程[S]. 2010.
General Administration of Quality Supervision. JJG 229 - 2010 Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Industry platinum and copper resistance thermometers [S]. 2010. (in Chinese)
- [9] 沈维道, 童钧耕. 工程热力学(第4版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 41.
SHEN W D, TONG J G. Engineering thermodynamics [M]. Beijing: Higher education press, 2007: 41. (in Chinese)
- [10] 杨世铭, 陶文铨. 传热学(第四版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 269.
YANG S M, TAO W Q. Heat transfer [M]. Beijing: Higher education press, 2006: 269. (in Chinese)
- [11] 国家质量监督检验检疫总局. JJF 1059.1 测量不确定度评定与表示[S]. 2012.
General Administration of Quality Supervision. JJF 1059.1 Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Evaluation and expression of uncertainty in measurement [S]. 2012. (in Chinese)