

# 团 体 标 准

T/CSMT-NY002—2024

## 温差发电器件性能测试方法

Testing method for performance of thermoelectric generator device

2024-12-10 发布

2025-01-10 实施

中国计量测试学会 发布  
中国标准出版社 出版

## 目 次

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 前言                       | III |
| 引言                       | IV  |
| 1 范围                     | 1   |
| 2 规范性引用文件                | 1   |
| 3 术语和定义                  | 1   |
| 4 测试原理                   | 3   |
| 5 测试设备和仪器                | 4   |
| 5.1 测试设备                 | 4   |
| 5.2 测试仪器                 | 4   |
| 6 测试条件                   | 5   |
| 7 测试试样                   | 5   |
| 7.1 试样规格                 | 5   |
| 7.2 试样冷、热侧               | 5   |
| 8 测试程序                   | 5   |
| 8.1 测试前准备                | 5   |
| 8.2 测试步骤                 | 5   |
| 9 测试数据处理                 | 6   |
| 9.1 输出功率                 | 6   |
| 9.2 热侧吸热量                | 6   |
| 9.3 发电效率                 | 7   |
| 9.4 线性回归曲线               | 7   |
| 9.5 最大输出功率               | 7   |
| 10 测试报告                  | 7   |
| 附录 A(资料性) 温差发电器件发电性能测试报告 | 8   |

## 前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国计量测试学会提出并归口。

本文件起草单位：中国科学院上海硅酸盐研究所、中国电子科技集团公司第十八研究所、上海第二工业大学、杭州大和热磁电子有限公司。

本文件主要起草人：廖锦城、柏胜强、陈立东、侯旭峰、任保国、吴子华、谢华清、阮炜、吴永庆。

## 引 言

基于泽贝克(Seebeck)效应的温差发电(Thermoelectric Generator)是一种将热能直接转换成电能的环境友好型能量转换技术,具有全固态、工作无噪声、无排放等特点,主要应用于航天特种电源、工业节能减排、太阳能综合利用、分布式自供给电源等领域。近年来,我国温差发电材料和器件技术发展迅速,整体技术达到国际先进,部分领域国际领先,温差发电器件先后在我国同位素温差电池、汽车尾气废热回收、钢铁等工业低品位余热发电、太阳能光电-热电复合发电等领域获得示范和应用。随着我国航天、国防、工业等领域的深入发展和对新型电源技术的迫切需求,温差发电器件正处于加速发展期。但是,对温差发电器件的测量尚未形成标准,很难对现有的材料和器件作出统一的评价,不同国家、不同机构(包括学术界和工业界)报道的材料和器件的性能已经出现了严重分歧。由于缺乏相关测量标准和权威的第三方检测机构,这些分歧无法进行检验或验证,这严重阻碍了温差发电技术的发展和应用。无论在科研领域,还是在应用领域,温差发电器件的测量标准化都是一项非常有意义并亟需完善的工作。中国计量测试学会组织本文件的起草,为温差发电器件性能评价提供依据。

# 温差发电器件性能测试方法

## 1 范围

本文件界定了温差发电器件性能测试的术语和定义,规定了测试原理、测试设备和仪器、测试条件、测试试样、测试程序、数据处理和测试报告等。

本文件适用于温差发电器件热侧温度为 20℃~1 000℃、冷侧温度为 0℃~300℃工况下的性能测试,其他工况测试可参照执行。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

SJ 2855 温差电制冷名词术语

## 3 术语和定义

SJ 2855 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**温差发电器件 thermoelectric generator device**

利用泽贝克(Seebeck)效应工作的温差电器件(thermoelectric device)。

### 3.2

**热侧温度 hot side temperature**

$T_h$

温差发电器件热侧表面的平均温度。

注:单位为开尔文(K)。

### 3.3

**冷侧温度 cold side temperature**

$T_c$

温差发电器件冷侧表面的平均温度。

注:单位为开尔文(K)。

### 3.4

**开路电压 open circuit voltage**

$V_{oc}$

温差发电器件没有负载,无电流输出时输出端的电位差。

注:单位为伏特(V)。

### 3.5

**输出电压 output voltage**

$V_{out}$

温差发电器件连接负载时输出端的电位差。

注:单位为伏特(V)。

3.6

**输出电流 output current**

$I_{out}$

温差发电器件连接负载时回路中产生的电流。

注：单位为安培(A)。

3.7

**短路电流 short circuit current**

$I_{sc}$

温差发电器件的输出端短接时产生的最大的电流。

注：单位为安培(A)。

3.8

**负载 load**

$R_L$

连接在温差发电器件电输出端的外部载荷。

注：单位为欧姆( $\Omega$ )。

3.9

**输出功率 output power**

$P_{out}$

温差发电器件工作时产生的电功率。

注：单位为瓦特(W)。

3.10

**温差发电器件内阻 internal resistance**

$R_{in}$

温差发电器件输出端之间的内部电阻。

注：单位为欧姆( $\Omega$ )。

3.11

**最大输出功率 maximum output power**

$P_{max}$

温差发电器件工作时可产生的最大电功率。

注：单位为瓦特(W)。

3.12

**热侧吸热量 hot side thermal input**

$Q_h$

温差发电器件工作时热侧吸入的热流量。

注：单位为瓦特(W)。

3.13

**冷侧排热量 cold side thermal output**

$Q_c$

温差发电器件工作时冷侧排出的热流量。

注：单位为瓦特(W)。

3.14

**发电效率 generator efficiency**

$\eta$

温差发电器件工作时,其输出功率与热侧吸热量的比值。

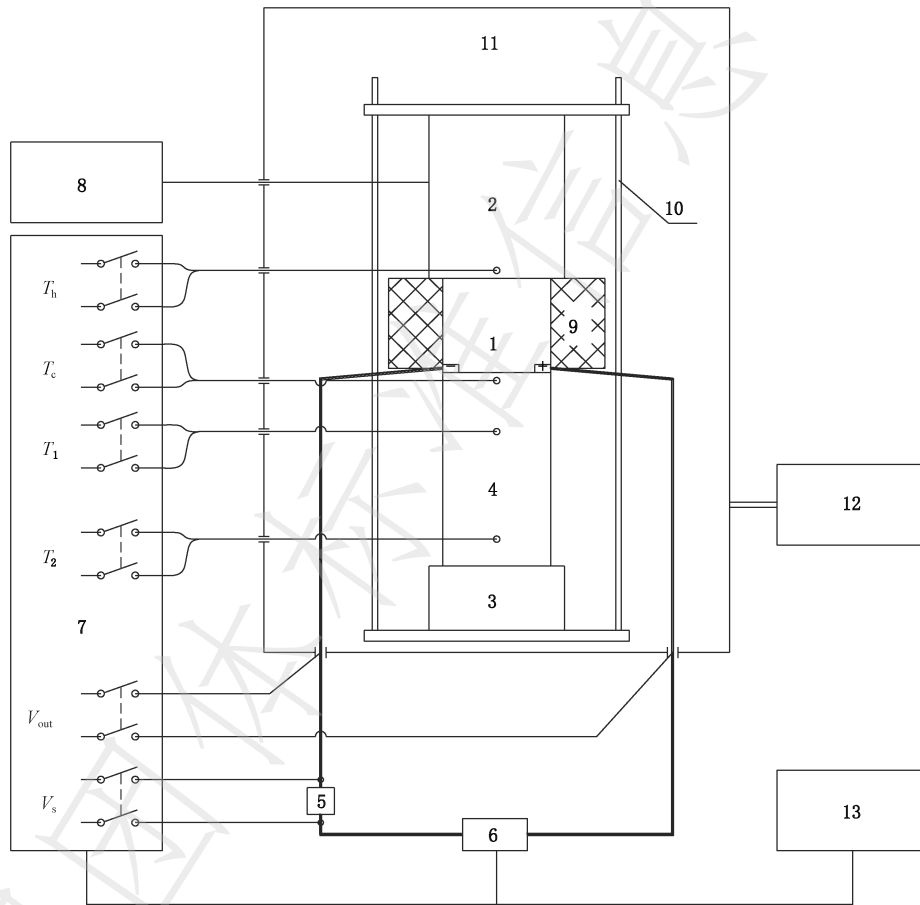
## 3.15

**最大发电效率 maximum generator efficiency** $\eta_{\max}$ 

温差发电器件工作时,发电效率可能达到的最大值。

## 4 测试原理

温差发电器件性能测试装置的示意图见图 1。基于泽贝克(Seebeck)效应,在给定的温差下,温差发电器件的输出功率等于输出电压与输出电流的乘积,发电效率等于输出功率与热侧吸热量的比值。



标引序号说明:

- 1 —— 温差发电器件试样;
- 2 —— 热源;
- 3 —— 热沉;
- 4 —— 热流计;
- 5 —— 电流采样电阻;
- 6 —— 直流电子负载;
- 7 —— 数据采集器;

- 8 —— 温控器;
- 9 —— 隔热材料;
- 10 —— 样品架;
- 11 —— 样品室;
- 12 —— 气氛控制系统;
- 13 —— 计算机。

图 1 测试装置示意图

## 5 测试设备和仪器

### 5.1 测试设备

#### 5.1.1 样品室

样品室应具有气氛可控功能,极限真空度小于 10 Pa。

#### 5.1.2 样品架

样品架应具有夹紧功能,夹紧力范围宜为 0.1 kN~20 kN,室温条件下安装时,最大允许误差宜为 5 N。

#### 5.1.3 热源

安装面应包络温差发电器件试样,控温精度不低于 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ,额定使用温度高于最高测试温度 $100^{\circ}\text{C}$ 。

#### 5.1.4 热流计

截面尺寸应与温差发电器件试样一致,室温热导率不低于 $350\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,第一温度、第二温度测温点之间的温度差宜大于 $2^{\circ}\text{C}$ 。

#### 5.1.5 热沉

安装面应包络热流计,控制温度宜为 $0^{\circ}\text{C}\sim 300^{\circ}\text{C}$ 。

#### 5.1.6 隔热材料

包裹在试样周围,热导率不高于 $0.5\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

#### 5.1.7 计算机

计算机应具有温度控制模块,电压、温度同步采集模块、数据分析处理模块及数据保存模块。

#### 5.1.8 测温传感器

$T_b$ 、 $T_c$ 测温传感器应紧贴试样居中布置, $T_1$ 、 $T_2$ 测温传感器应居中布置。

### 5.2 测试仪器

#### 5.2.1 温控器

控制温度宜为 $0^{\circ}\text{C}\sim 1000^{\circ}\text{C}$ ,精度不低于 0.2%。

#### 5.2.2 电流采样电阻

额定电流不低于 20 A,精度不低于 0.25%。

#### 5.2.3 直流电子负载

恒定电流模式下,电流量程不低于 20 A,电压量程不低于 10 V。

## 5.2.4 数据采集器

电压量程不低于 10 V,精度不低于 0.01%。

## 6 测试条件

测试环境应整洁,无腐蚀性介质,无强磁场和电磁波干扰,环境温度不高于 35℃,湿度不高于 75%。

## 7 测试试样

### 7.1 试样规格

外形宜为长方体,长度宜为 10 mm~50 mm,宽度宜为 10 mm~50 mm,高度宜为 2 mm~30 mm,长度和宽度比例不应大于 1.5。

### 7.2 试样冷、热侧

试样冷、热侧应平整,试样尺寸范围内平面度不大于 0.05 mm,表面粗糙度  $Ra$  不大于 1.6  $\mu\text{m}$ ,两侧的平行度不大于 0.1 mm。

## 8 测试程序

### 8.1 测试前准备

测试前准备应按下列规定执行:

- 开启电源,检查设备及仪器连接是否正常;
- 检查热源、热沉安装面是否清洁、无污染,必要时使用无水乙醇进行擦拭;
- 测量温差发电器件试样的外形尺寸。

### 8.2 测试步骤

测试步骤应按下列规定执行:

- 将温差发电器件试样安装到样品架上,并施加不低于 0.3 MPa 的压力,关闭样品室;
- 抽真空到真空度小于 10 Pa,充入惰性气体至真空度为  $10^2$  Pa~ $10^3$  Pa,并重复不少于两次;
- 启动温差发电器件性能测试软件,按照表 1 进行参数设置;

表 1 参数设置

| 参数   | 数值             |
|--|----------------|
| 数据采集间隔/s   | $\leq 10$      |
| 热侧温度波动值/[ $^{\circ}\text{C}/(3\text{ min})$ ]        | $\leq 1.0$     |
| 测试电流步长/A   | $\leq 1.0$     |
| 电流-电压扫描时热侧温度波动值/[ $^{\circ}\text{C}/(10\text{ s})$ ] | $\leq 0.5$     |
| 电流-电压扫描结束条件  | 输出功率低于最大值的 30% |

- d) 设置试样热侧温度；
- e) 开始测试,温控器工作,开始升温,数据采集器采集信号；
- f) 电流-电压扫描测试:控制电子负载改变试样输出电流,同步采集输出电流、输出电压、热流计第一温度和第二温度,计算试样输出功率、发电效率；
- g) 采用最小二乘法对电流-电压曲线进行线性拟合、分析,得到试样的开路电压、短路电流、内阻、最大输出功率及最大输出功率对应的输出电流、输出电压；
- h) 取发电效率的最大值作为试样的最大发电效率；
- i) 结束测试,记录测试结果,如附录 A 所示。

## 9 测试数据处理

### 9.1 输出功率

试样的输出功率根据公式(1)计算:

$$P_{out,i} = V_{out,i} \times \frac{V_{s,i}}{R_s} \quad \dots\dots\dots(1)$$

式中:

- $i$  ——测试序号,数值为 1,2,3,⋯,  $n$ ;
- $P_{out,i}$  ——试样输出功率,单位为瓦特(W);
- $V_{out,i}$  ——试样输出电压,单位为伏特(V);
- $V_{s,i}$  ——电流采样电阻两端电压,单位为伏特(V);
- $R_s$  ——电流采样电阻的阻值,单位为欧姆( $\Omega$ )。

### 9.2 热侧吸热量

试样热侧吸热量等于输出功率和冷侧排热量之和,根据公式(2)计算:

$$Q_{h,i} = P_{out,i} + Q_{c,i} \quad \dots\dots\dots(2)$$

式中:

- $i$  ——测试序号,数值为 1,2,3,⋯,  $n$ ;
- $Q_{h,i}$  ——试样热侧吸热量,单位为瓦特(W);
- $P_{out,i}$  ——试样输出功率,单位为瓦特(W);
- $Q_{c,i}$  ——试样冷侧排热量,单位为瓦特(W)。

公式(2)中,试样冷侧排热量根据公式(3)计算:

$$Q_{c,i} = \lambda \times \frac{(T_{1,i} - T_{2,i}) \times A}{L} \quad \dots\dots\dots(3)$$

式中:

- $i$  ——测试序号,数值为 1,2,3,⋯,  $n$ ;
- $Q_{c,i}$  ——试样冷侧排热量,单位为瓦特(W);
- $T_{1,i}$  ——热流计第一温度,单位为开尔文(K);
- $T_{2,i}$  ——热流计第二温度,单位为开尔文(K);
- $\lambda$  ——热流计的热导率,单位为瓦特每米开尔文[W/(m·K)];
- $A$  ——热流计的截面积,单位为平方米( $m^2$ );
- $L$  ——热流计第一温度点与第二温度点之间的距离,单位为米(m)。

### 9.3 发电效率

将公式(1)和公式(2)代入公式(4)计算得到试样的发电效率:

$$\eta_i = \frac{P_{\text{out},i}}{Q_{\text{h},i}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(4)$$

式中:

- $i$  —— 测试序号,数值为 1,2,3,⋯,n;
- $\eta_i$  —— 试样发电效率;
- $P_{\text{out},i}$  —— 试样输出功率,单位为瓦特(W);
- $Q_{\text{h},i}$  —— 试样热侧吸热量,单位为瓦特(W)。

### 9.4 线性回归曲线

采用最小二乘法对试样输出电流-电压曲线进行线性拟合得到的线性回归曲线,如公式(5)所示:

$$V_{\text{out}} = V_{\text{oc}} - R_{\text{in}} \times I_{\text{out}} \quad \dots\dots\dots(5)$$

式中:

- $V_{\text{out}}$  —— 温差电器件的输出电压,单位为伏特(V);
- $V_{\text{oc}}$  —— 温差电器件的开路电压,单位为伏特(V);
- $R_{\text{in}}$  —— 温差电器件的内阻,单位为欧姆( $\Omega$ );
- $I_{\text{out}}$  —— 温差电器件的输出电流,单位为安培(A)。

### 9.5 最大输出功率

公式(5)表示的曲线的斜率即为试样的内阻,当输出电流  $I_{\text{out}} = \frac{V_{\text{oc}}}{2 \times R_{\text{in}}}$  时,根据公式(6)计算得到温差电器件的最大输出功率:

$$P_{\text{max}} = \frac{V_{\text{oc}}^2}{4 \times R_{\text{in}}} \quad \dots\dots\dots(6)$$

式中:

- $P_{\text{max}}$  —— 温差发电器件的最大输出功率,单位为瓦特(W);
- $V_{\text{oc}}$  —— 温差发电器件的开路电压,单位为伏特(V);
- $R_{\text{in}}$  —— 温差发电器件的内阻,单位为欧姆( $\Omega$ )。

## 10 测试报告

测试报告应包括下列内容(可参考附录 A):

- a) 试样信息:送样单位、试样名称、试样形状、试样尺寸、试样编号等;
- b) 测试数据:升温过程中试样热侧温度和冷侧温度、热流计第一温度、热流计第二温度、试样开路电压,以及各温度状态下电流-电压扫描对应的试样输出电流、试样输出电压、试样热侧温度、试样冷侧温度、热流计第一温度、热流计第二温度;
- c) 测试结果及分析:各温度状态下试样输出电流与输出电压、输出电流与输出功率关系曲线图,负载与试样输出功率、负载与发电效率关系曲线图,以及各温度状态下试样的开路电压、短路电流、内阻、最大输出功率及最大发电效率。

