

ICS 93.080.20

CCS P 66

# 团体标准

T/ITS XXXX-XXXX

## 高熵能源捕获装置服役性能测试与 评价指南

Guidelines for performance testing and evaluation of high  
entropy energy Capture devices in road domains

(征求意见稿)

本稿完成日期：2026年04月09日

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国智能交通产业联盟 发布

中国智能交通产业联盟

## 目 次

前 言 .....	II
引 言 .....	III
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语与定义 .....	2
4 关键性能指标要求 .....	2
5 关键性能测试 .....	6

中国智能交通产业联盟

## 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。

本文件由中国智能交通产业联盟（C-ITS）提出并归口。

本文件主要起草单位：四川路桥建设集团股份有限公司、蜀道清洁能源集团、北京航空航天大学、同济大学、北京纳米能源与系统研究所、上海同陆云交通科技有限公司等。

本文件起草人：刘斌、李峰、朱兴一、陈宝东、唐伟、孙周、王再闯、朱恒升、杨显军、张奥、姜之未、郭明阳、蒋春、黄博文、江欣锐、朱徐夔等。

## 引 言

智能网联道路对大体量、广分布的能源供给提出新要求，驱动高熵能源捕获方案不断演进当前国内已在振动能、固液接触能、气流能、温差能等高熵能源捕获装置实现多样化突破，工程应用潜力初现。然而道路环境多变严苛，装置需突破结构疲劳与封装失效等耐久性瓶颈，相关性能测试标准尚不统一，评价指标缺乏对比性，限制了产业化推广和规模应用。

为了规范高熵能源捕获装置的服役性能测试和评价标准，确保装置在多场景、多条件下的高效、耐久运行，为装置研发和产业化应用提供技术依据，助力实现智能网联道路的能源自洽和可持续运行，特制定本标准。

为了保持标准的适用性与可操作性，各使用者在采标过程中，及时将对本标准规范的意见及建议函告四川路桥建设集团股份有限公司，以便修订时研用。

中国智能交通产业联盟

中国智能交通产业联盟

# 高熵能源捕获装置的服役性能测试和评价标准

## 1 范围

本文件规定了路域高熵能源捕获装置的服役性能测试和评价方法，包括功率密度、能量捕获效率、耐久性、能量转换效率等关键性能指标的测试要求。明确了振动能、固液接触能、气流能和温差能捕获装置在相应服役环境条件下的适应性测试要求及评价准则。

本文件适用于高熵能源捕获装置的研发、测试、认证及产业化应用，涵盖智能网联道路交通系统中的分布式能源捕获设备，为科研、产业、检测认证等提供统一的技术规范和参考依据。

## 2 规范性引用文件

本文件没有规范性引用文件。

中国智能交通产业联盟

### 3 术语与定义

下列术语和定义适用于本文件。

#### 3.1

##### 高熵能源 high-entropy energy

指广泛存在于自然或人造环境中，具有多源、多维、多尺度特征的低品位分布式能量，包括但不限于振动能、气流能、液滴能、温差能、光能、声能等。

该类能量单一形式功率密度较低且时空分布不均，但通过多能耦合与高效捕获转化技术，可实现持续稳定的微能量供应，适用于分布式能源利用与能量自洽系统建设。

#### 3.2

##### 振动能捕获装置 vibration energy harvester

利用道路结构振动或交通荷载产生的机械振动，通过机电转换机制获取电能的装置。

#### 3.3

##### 固液接触能捕获装置 solid-liquid contact energy harvester

基于液滴与装置表面接触、分离所引发的电荷转移现象，捕获降雨、滴水等液滴动能转化为电能的装置。

#### 3.4

##### 气流能捕获装置 airflow energy harvester

通过捕获车辆运动或环境风引起的气流动能，驱动发电结构将动能转化为电能的装置。

#### 3.5

##### 温差能捕获装置 thermal gradient energy harvester

利用道路表面与地下或昼夜之间形成的温度差，基于热电效应将热能转化为电能的装置。

### 4 关键性能指标要求

#### 4.1 振动能捕获装置

##### 4.1.1 振动能捕获装置能源捕获效率

振动形式高熵能源激励能源捕获装置输入的能量总值为高熵能源总量  $E_0$ ，高熵能源捕获装置转化为电能部分为  $E_1$ ，高熵能源捕获效率计算公式为：

$$\eta = E_1/E_0 \times 100\%$$

振动形式高熵能源的能源捕获效率不应低于 55%。

##### 4.1.2 振动能捕获装置输出电压

振动驱动纳米发电单元经电能管理电路后为外部负载供能的输出电压。

振动驱动纳米发电单元的输出电压应保持在直流 3V-4V 之间。

#### 4.1.3 振动能捕获装置输出功率密度

振动驱动的纳米发电单元输出功率密度是纳米发电单元实用化的核心指标,该指标定义为振动驱动的纳米发电单元最大输出功率与有效工作面积的比值。

振动驱动的纳米发电单元输出功率密度不应低于 18mW/cm<sup>2</sup>。

#### 4.1.4 振动能捕获装置耐久性

振动驱动的纳米发电单元耐久性是指装置在长期运行下维持稳定输出性能的能力,是评估其实际应用可行性的核心指标之一,以振动驱动纳米发电单元的输出电压作为其输出性能表征,考察振动驱动纳米发电单元连续运行后输出电压的变化情况。

振动驱动的纳米发电单元耐久性应满足连续运行 600 万次后输出电压下降不超过 5%。

#### 4.1.5 振动能捕获装置电能管理技术的能量转换效率

振动驱动纳米发电单元电能管理技术的能量转换效率是指高熵能源捕获装置输出电能经电能管理后所输出电量与输入电量的比值,电能管理电路输出端电能为  $E_{\text{output}}$  和输入端电能为  $E_{\text{input}}$ ,电能管理技术的能量转换效率的计算公式为:

$$\eta = E_{\text{output}}/E_{\text{input}}$$

其能量转换效率不应低于 70%。

### 4.2 固液接触能捕获装置

#### 4.2.1 固液接触能捕获装置输出功率密度

固液接触驱动能捕获装置输出功率密度用于衡量装置在单位有效接触面积内的最大输出能力,定义为装置最大输出功率与液滴同电介质表面接触表面积比值,其数值不应低于 8mw/cm<sup>2</sup>。

#### 4.2.2 固液接触能捕获装置能量捕获效率

固液接触驱动能捕获装置捕获效率指液滴同电介质表面接触过程中机械能总值转化为电能的效率,该指标通过机械能输入  $E_{\text{机械}}$  与转化为电能  $E_{\text{电}}$  的比值表示,计算公式为:

$$\eta = E_{\text{机械}}/E_{\text{电}}$$

能源捕获效率不应低于 55%。

#### 4.2.3 固液接触能捕获装置能量转换效率

固液接触驱动能装置能量转换效率指装置输出电能经电能管理后所输出电量与输入电

量的比值，计算方法为能量管理电路输出端 EOUT 和输入端 EIN 的比值 EOUT/EIN 为能量转换效率 ( $\eta$ )，其值不应低于 70%。

#### 4.2.4 固液接触能捕获装置输出电压

固液接触驱动能装置的直流输出指装置输出电能经电能管理后所输出的直流电压值为 3V-4V。

#### 4.2.5 固液接触能捕获装置耐久性

固液接触驱动能装置的耐久性指在长期液滴撞击器件的运行下维持稳定输出性能的能力。在连续工作 600 万次液滴撞击条件下，装置的输出性能衰减率应不超过 5%。

### 4.3 气流能捕获装置

#### 4.3.1 气流能捕获装置启动风速

气流能捕获装置启动风速指驱动气流能捕获装置工作的最小风速，该指标为实验室通过吹风装置驱动捕获装置工作时测得的最小风速，测量位置为捕获装置处。

#### 4.3.2 气流能捕获装置额定功率

气流能捕获装置额定功率指多台气流能捕获装置构成阵列后的整体输出功率，该指标通过气流能捕获装置连接在输出端测试并计算得到，输出功率应  $\geq 10W$ 。

#### 4.3.3 气流能捕获装置输出电压

气流能捕获装置输出电压是指将多台气流能捕获装置并联，连接管理电路后的输出电压，该指标需将多台装置并联后连接管理电路后测得，输出电压应保持在 3-4V。

#### 4.3.4 气流能捕获装置耐久性

气流能捕获装置耐久性是指在长期运行下维持稳定输出性能的能力。在连续工作 600 万次摆动条件下，装置的输出电压性能衰减率应不超过 5%。

#### 4.3.5 气流能捕获装置能量捕获效率

气流能捕获装置的能量捕获效率是指装置捕获的风能转化为装置直接输出电能的效率，该指标通过装置直接输出电能 E1 与装置捕获的风能 E0 的比值表示。

能量捕获效率计算公式如下：

$$\eta = E_1/E_0 \times 100\%$$

气流能捕获装置的能量捕获效率不应低于 55%。

#### 4.3.6 气流能捕获装置能量转换效率

气流能捕获装置能量转换效率是指装置直接输出电能总和通过管理电路转化为直流电能的转化效率，该指标通过管理电路转化后电能  $E_{out}$  与装置直接输出电能  $E_{in}$  的比值表示，具体计算公式为：

$$\eta = E_{output}/E_{input} \times 100\%$$

能量转化效率不应低于 70%。

#### 4.4 温差能捕获装置

##### 4.4.1 温差驱动纳米发电单元的输出电压

温差驱动纳米发电单元经电能管理电路后为外部负载供能的输出电压。

温差驱动纳米发电单元的输出电压应保持在直流 3V-4V 之间。

##### 4.4.2 温差驱动的纳米发电单元输出功率密度

温差能捕获装置输出功率密度用于衡量装置在单位有效接触面积内的最大输出能力，定义为装置最大输出功率与器件接触表面积比值，其数值不应低于 15mw/cm<sup>2</sup>。

##### 4.4.3 温差形式高熵能源的能源捕获效率

温差能捕获装置捕获效率指装置埋设处吸收的热能总值转化为电能的效率，该指标通过转化为电能  $E_{电}$  与热能输入  $E_{热}$  的比值表示，计算公式为：

$$\eta = E_{电}/E_{热}$$

温差能装置捕获效率不应低于 55%。

##### 4.4.4 温差驱动的纳米发电单元耐久性

温差能捕获装置耐久性指在长期运行及多种环境应力耦合作用下维持稳定输出性能的能力。在连续工作 600 万次热循环条件下，装置的输出性能衰减率应不超过 5%。

##### 4.4.5 温差驱动纳米发电单元电能管理技术的能量转换效率

温差能装置能量转换效率指装置输出电能经电能管理后所输出电量与输入电量的比值，该指标通过管理电路转化后电能  $E_{out}$  与装置直接输出电能  $E_{in}$  的比值表示，具体计算公式为：

$$\eta = E_{output}/E_{input} \times 100\%$$

能量转化效率不应低于 70%。

## 5 关键性能测试

### 5.1 振动能捕获装置

#### 5.1.1 测试环境

实验应在大气环境条件下，温度为 $(25\pm 5)$ ℃，相对湿度为 $(30\pm 10)$ %，标准大气压强。

#### 5.1.2 测试方法

##### a) 振动能捕获装置输出电压

开始测试前对仪器进行校准和试运行。对振动驱动纳米发电单元施加压力，运行过程中经电能管理电路后可产生稳定的电压输出，对电信号进行采集。计算振动驱动纳米发电单元运行过程中输出电压的平均值作为该指标的测试值。

每件样品应测试不少于 3 次，取平均值进行评估。

##### b) 振动能捕获装置输出功率密度

振动驱动的纳米发电单元最大输出功率  $P$  可通过下列公式估算：

$$P = U^2/R$$

式中：

$R$  为外接阻性负载阻值

$U$  为外接阻性负载上的分压

在稳定的激励条件下，外接一组不同阻值的电阻负载，测量装置在各阻值下的输出电压，根据上述公式计算不同阻值下的输出功率，绘制电压-电阻关系曲线，得到振动驱动的纳米发电单元最大输出功率。将最大输出功率除以装置在地面上的垂直投影面积( $\text{cm}^2$ )，得出输出功率密度( $\text{mW}/\text{cm}^2$ )。

##### c) 振动能捕获装置能源捕获效率

输入系统的高熵能源总量  $E_0$  通过下列公式进行估算：

$$E_0 = \int_{x_{\text{start}}}^{x_{\text{end}}} F dx$$

式中：

$F$  为施加于振动驱动纳米发电单元的力

$x$  为施加于振动驱动纳米发电单元力的位移

振动驱动纳米发电单元转化为电能部分  $E_1$  通过下列公式进行估算：

$$E_1 = \int_{t_{\text{start}}}^{t_{\text{end}}} \frac{U^2}{R} dt$$

式中：

t 为施加于振动驱动纳米发电单元的时间

R 为振动驱动纳米发电单元的最佳匹配阻性负载

U 为最佳匹配阻性负载上的分压

多次向振动驱动纳米发电单元施加足以驱动其运行的力，驱动其正常运行。在振动驱动纳米发电单元运行到最大限位位置后取消施加力，使其自动进行复位。记录施加力过程中输入系统高熵能源总量  $E_0$ ，全过程（施加外力和复位过程）中振动驱动纳米发电单元转化为电能部分  $E_1$ ，计算振动形式高熵能源的能源捕获效率。

每件样品应测试不少于 3 次，取平均值进行评估。

#### d) 振动能捕获装置耐久性

将振动驱动纳米发电单元中发电核心组件安装在测试装置上，使测试装置以固定激励频率不断激励其运行，振动驱动纳米发电单元在外力作用下产生周期性的电信号输出。以 10 万次激励为节点，测量电压信号在 600 万次工作周期内的衰减情况。

#### e) 振动能捕获装置能量转换效率

振动驱动纳米发电单元输出电能经电能管理电路后存储于超级电容器中，其中输入端电能  $E_{input}$  等效于 a. 振动形式高熵能源的能源捕获效率中的  $E_1$ 。

输出端电能  $E_{output}$  可通过下列公式计算：

$$E_{output} = \frac{1}{2} C (V_{end}^2 - V_{start}^2)$$

式中：

C 为超级电容器等效电容

$V_{start}$  为充电前超级电容器电压

$V_{end}$  为充电后超级电容器电压

计算振动驱动纳米发电单元电能管理技术的能量转换效率  $\eta = E_{output} / E_{input}$ 。

## 5.2 固液接触能捕获装置

### 5.2.1 测试环境

固液界面的接触驱动的纳米发电单元在实验室中的工作环境包括一套注射泵、支具和高度测量设备。

测试环境应满足以下条件：

注射泵设备应包含一个推注装置和一个注射器，其可产生  $\geq 100\text{mL/h}$  的推注速度、60mL 容量的注射器，为实验模拟液滴降落特征。

支具由铁架台和斜面模具构成，前者起到固定软管和提供 20cm 以上的降落高度的作用，

后者用来固定纳米发电单元并控制其与水平面成  $60^\circ$  倾斜。

电压测量设备为数字示波器，应具有  $\geq 100\text{Mhz}$  的带宽和  $2\text{GSa/s}$  的采样率。

降落高度的测量应选用有游标卡尺  $\geq 25\text{cm}$ ，准确测量液滴的降落距离。

液滴与纳米发电单元的接触面积的照片由架于实验台外侧的高倍照相机获取。

## 5.2.2 测试方法

### a) 输出功率密度

注射泵为能量转换电路提供稳定的滴落液滴。电压测量设备为数字示波器，应具有  $\geq 100\text{Mhz}$  的带宽和  $2\text{GSa/s}$  的采样率。降落高度的测量应选用有游标卡尺  $\geq 25\text{cm}$ ，准确测量液滴的降落距离。液滴与纳米发电单元的接触面积的照片由架于实验台外侧的高倍照相机获取。

固液界面的接触驱动的纳米发电单元的输出电功率计算：

$$P = U^2/R$$

固液界面的接触驱动的纳米发电单元的输出电功率密度计算：

$$P_m = P/S$$

样品 1 至 6 平均电功率密度计算：

$$\overline{P_m} = \frac{1}{3} \times \left( \frac{P_1}{S_1} + \frac{P_2}{S_2} + \frac{P_3}{S_3} \right)$$

$\overline{P_m}$  为 3 次测量的输出电功率的平均值。

### b) 能量捕获效率

注射泵为能量转换电路提供稳定的滴落液滴。使用高速摄像机拍摄液滴的滴落状态图像，并通过游标卡尺测量液滴直径（单位 mm）和滑动长度（单位 mm），并计算输入的机械能。通过 5.2.1（1）小节的结果计算输出电能，步骤如下：

- 1) 打开注射器，调节注射速率为  $5\text{mm/min}$ ，确保能够提供稳定的信号输入。
- 2) 打开高速摄像机，拍摄液滴从开始滴落到与发电单元碰撞后沿发电单元滑落的完整过程。
- 3) 重复 3 次以上测试过程并使用计算机记录保存拍摄图像。
- 4) 使用示波器测量并记录与发电单元并联的最优电阻两端的电压信号，计算信号产生到结束时间  $s$ ，以及相机帧数  $T$ 。
- 5) 使用游标卡尺分别测量分别拍摄相隔  $T$  帧的扩散液滴的图像测量两个图像中扩散液滴的直径  $d_1$  与  $d_2$  并计算两个液滴的面积差  $\Delta S$ ，并计算液滴的表面能  $\Delta E_{\text{表面}}$ 。
- 6) 使用游标卡尺分别测量分别拍摄相隔 4 帧的扩散液滴的图像测量两个图像中扩散液滴的距离发电单元顶端距离  $h_1$  与  $h_2$ ，计算 4 帧内液滴下降的高度  $\Delta h$ ，并计算重力势能变化  $W$ ，捕获的机械能应为  $W + \Delta E_{\text{表面}}$ 。

- 7) 根据输出功率密度测试小节中，测得的输出电压信号通过公式计算纳米发电单元的输出功率并积分计算电能。
- 8) 根据公式计算纳米发电单元的能量捕获效率平均值。

计算方法：

相机帧数  $T$

$$T = s \times 6400$$

能量捕获效率：

$$\Delta S = \frac{1}{4}\pi d_1^2 - \frac{1}{4}\pi d_1^2$$

$$\Delta E_{\text{表面}} = \gamma \times (\Delta S)$$

计算液滴滴落势能为：

$$W = mg\Delta h$$

根据测得的器件电压计算输出电能为：

$$E_{\text{electric}} = \int_{t_0}^{t_{\text{discharging}}} \frac{U^2}{R}$$

液滴滴落 FEP 表面能：

$$\Delta E_{\text{表面_固液}} = \gamma \times (\Delta S) \times \cos\theta$$

机械能变化为：

$$\Delta E_{\text{机械}} = \Delta E_{\text{表面}} - \Delta E_{\text{表面_固液}} + W$$

$$\varphi = \frac{E_{\text{electric}}}{\Delta E_{\text{机械}}} \times 100\%$$

### c) 能量转换效率

注射泵为能量转换电路提供稳定的输入交流电压。将能量转换电路的输出端（即负载电阻）连接示波器，并记录输出电压信号。分别通过积分方法计算输入和输出电能及能量转化效率。

- 1) 打开注射器，调节注射速率为 5mm/min，确保能够提供稳定的信号输入。
- 2) 连接示波器探头的正负极于负载电阻，并记录输出电压信号（U）。
- 3) 根据测得的输出电压信号计算输出电压有效值（ $U_{\text{eff}}$ ），并通过公式 1-1 计算输出功率。
- 4) 利用测得的功率及能量转换电路的输出功率，通过积分法计算输入分别计算输入

( $E_{IN}$ ) 和电输出能量 ( $E_{OUT}$ )。

- 5) 计算能量转换效率。
- 6) 重复以上实验 3 次，并计算转换效率的平均值。

计算方法：

输入电能能量

$$E_{IN} = \int_{t_{on}}^{t_{off}} \frac{U^2}{R_{opt}}$$

输出电能能量

$$E_{OUT} = \int_{t_{on}}^{t_{off}} \frac{U_{eff}^2}{R_{load}}$$

能量转换效率

$$\eta = \frac{E_{OUT}}{E_{IN}} \times 100\%$$

#### d) 直流输出

使用数字万用表测试整流-Buck 降压拓扑电路的输出正负极的直流输出电压（单位 V）。

- 1) 使用注射器连续滴落液滴。
- 2) 打开数字示波器。
- 3) 等待液滴滴落 1.5 分钟，数字万用表测试并记录电压值。
- 4) 重复以上实验步骤 6 次。

#### e) 耐久性

使用数字示波器测量纳米发电单元输出电压（单位 V）

- 1) 打开示波器，并将示波器的正负极分别与纳米发电单元连接。
- 2) 选择示波器中的采集方式为滚动模式；选择探头衰减为×10 倍；选择 50V 电压档位和 1s 时间标度。
- 3) 打开水龙头，固定液滴流动速率，并在输出电压稳定后测试确定输出电压  $V_0$ 。
- 4) 记录纳米发电单元被撞击每 10 万次的的输出电压。

数据处理：冲击 600 万次时刻输出电压下降比率计算：

$$\varphi = \frac{V_0 - V_{T60}}{V_0}$$

### 5.3 气流能捕获装置

#### 5.3.1 测试环境

气流能捕获装置的测试应考虑道路气流分布特性，测试环境需包括吹风装置、气流能捕获装置、电路以及测量设备，如图 1 所示。具体测试环境应满足以下条件：

吹风装置应包含一个调速装置，其可产生 0.5-15m/s 的风速，为实验提供稳定风速的气流，模拟不同流速的气流；

外接负载测试其功率，负载范围为  $1\Omega$ - $10G\Omega$ ，可通过变阻器实现；

电流测量设备为 6514 静电计，应具 1000/s 的采样率；应具备  $1\mu\text{A}$  的灵敏度范围，保证实验测试的准确性；

风速的测量应选用风速计，其测量范围应 0.1-20 m/s，准确测量气流的速度。

#### 5.3.2 测试方法

##### a) 启动风速测试方法

在测试环境下，将风速测定仪固定于气流能转换装置处，通过调节吹风装置风速使捕获装置开始旋转，并实时测量捕获装置处的启动风速。

启动风速测量应不少于 3 次，取平均值。

##### b) 额定功率测试方法

在额定风速驱动下，将气流能捕获装置阵列连接，并在输出端外接负载，测试其额定功率。

额定功率测量应不少于 3 次，取平均值。

##### c) 输出电压测试方法

在恒定风速驱动下，将气流能捕获装置阵列连接管理电路，并在管理电路的输出端，通过 6514 静电计测量输出电压。

输出电压测量应不少于 3 次，取平均值。

##### d) 耐久性测试方法

在恒定风速下，驱动单组气流能捕获装置连续旋转 600 万个周期，并在管理电路的输出端，通过 6514 静电计实时记录其输出性能变化，每 10 万秒设置 1 个评估节点，评估该 60 次测试结果下降幅度。

##### e) 能量捕获效率测试方法

在恒定风速驱动下，固定捕获装置不动，在一定距离处测试被捕获装置截留后的风能 $v_1$ ；

在相同风速驱动下，捕获装置被驱动，在相同位置处测试流经捕获装置后的驱动风能和漏掉的风能 $v_2$ 。最终对两次的风能作差得到用于驱动捕获装置的风能 $E_{\text{风}}$ 。采用 6514 静电计测量电磁发电单元与摩擦发电单元的输出电能 $E_{\text{电}}$ 。通过效率公式，进一步计算捕获效率。

能量捕获效率计算公式如下：

$$\eta = \frac{E_{\text{电}}}{E_{\text{风}}} \times 100\%$$

$$E_{\text{风}} = E_{v_2} - E_{v_1}$$

$$E_{\text{电}} = E_{EMG} + E_{TENG}$$

在恒定风速驱动下，装置捕获的风能 $E_{\text{风}}$ 通过分别测定的 $v_1$ 与 $v_2$ 来计算得到。

所有测量应不少于 3 次，取平均值进行计算。

#### f) 能量转换效率测试方法

采用恒定风速的吹风装置驱动气流能捕获装置，并采用图 1 中的环境进行测试，使用 6514 静电计测试并计算相同时间的电磁发电单元输出电能 $E_{EMG}$ 、摩擦发电单元输出电能 $E_{TENG}$ ，并对他们进行求和得到 $E_{in}$ ，以及测试经过管理电路的输出端的电能 $E_{out}$ ，依据测量结果进一步计算能量转换效率，具体计算公式为：

$$\eta = \frac{E_{out}}{E_{in}} \times 100\%$$

$$E_{in} = E_{EMG} + E_{TENG}$$

$E_{EMG}$ 、 $E_{TENG}$ 与 $E_{out}$ 的测量应不少于 3 次，取平均值进行计算。

### 5.4 温差能捕获装置

#### 5.4.1 测试环境

温差能捕获装置的测试应考虑道路服役条件下日夜温差变化以及地下与地表热流梯度的典型分布特征。

##### a) 测试环境应满足以下条件：

热端温度设定范围为 35 °C–60 °C，冷端温度设定范围为 5 °C–25 °C；

应通过控温装置形成稳定的温差梯度，梯度不低于 20 °C；

保证热端与冷端分别处于热稳定状态，满足装置稳态工作的基础条件。

##### b) 环境搭建流程：

温差建立与稳定：开启装置冷热端加热装置与冷却装置；

热电偶或数显温度计实时监测装置上下表面温度；

待温差大于 25 °C 且保持稳定 1 分钟以上，进入电性能测试阶段。

#### 5.4.2 测试方法

##### a) 输出电压

开始测试前对仪器进行校准和试运行。测试环境搭建完毕，运行过程中经电能管理电路后可产生稳定的电压输出，对电信号进行采集，输出电压的平均值作为该指标的测试值。

每件样品应测试不少于 3 次，取平均值进行评估。

##### b) 输出功率密度

在稳定温差条件下，外接不同阻值的电阻负载，测量装置在各阻值下的输出电压；

计算输出功率  $P$ ：

$$P = U^2/R$$

式中：

$R$  为外接阻性负载阻值

$U$  为外接阻性负载上的分压

根据上述公式计算不同阻值下的输出功率，绘制电压-电阻关系曲线，得到最大输出功率。将最大输出功率  $P_{max}$  除以装置的有效热能利用区域在水平方向的投影面积  $A(\text{cm}^2)$ ，得出输出功率密度( $\text{mW}/\text{cm}^2$ )。

同样的温差梯度至少重复测试 3 次。

##### c) 捕获效率

通过沥青层的热流密度 ( $q$ )，根据傅里叶定律：

$$q = (k \times \Delta T) / d$$

式中：

$K$  为沥青路面材料的热导率

$\Delta T$  为路面至装置的温度差

$d$  为装置埋设的垂直深度

装置吸收的热功率 ( $Q$ )：

$$Q = q \times A$$

式中：

$A$  为装置的有效面积

在热端与冷端达到设定温差后，记录相同时间  $t$  输入与输出能量  $E_{热}$ 、 $E_{电}$ ，计算捕获

效率

$$E_{热} = Q \times t$$

$$E_{电} = P_{max} \times t$$

$$\eta = E_{热} / E_{电}$$

每件样品应测试不少于 3 次，取平均值进行评估。

#### d) 耐久性测试

将“温差变化”视为连续扰动过程，按秒级时间分辨率记录装置在长期热循环下的输出变化；以 1 秒为最小周期，测试总时长不低于 600 万秒；每 10 万秒设置 1 个评估节点，每个评估节点测试电性能输出时需保证冷热端温差一致，记录装置每次输出功率；装置需达到该 60 次测试结果功率输出下降不超过 5%。

#### e) 能量转换效率

温差驱动纳米发电单元输出电能经电能管理电路后存储于超级电容器中，其中输入端电能  $E_{input}$  等效于 a. 振动形式高熵能源的能量捕获效率中的  $E1$ 。

输出端电能  $E_{output}$  可通过下列公式计算：

$$E_{output} = \frac{1}{2} C (V_{end}^2 - V_{start}^2)$$

式中：

$C$  为超级电容器等效电容

$V_{start}$  为充电前超级电容器电压

$V_{end}$  为充电后超级电容器电压

计算温差驱动纳米发电单元电能管理技术的能量转换效率  $\eta = E_{output} / E_{input}$ 。

### 5.5 通过性要求

重复测试误差应控制在  $\pm 5\%$  范围内；

捕获效率、转换效率、功率密度指标，单次测试值不低于指标下限的 95%；

所有测试均需保留原始数据及测试环境记录，用于回溯性分析。

T/ITS XXXX-XXXX

中国智能交通产业联盟

中国智能交通产业联盟  
标准

**高熵能源捕获装置服役性能测试与评价指南**

T/ITS XXXX-XXXX

北京市海淀区西土城路 8 号（100088）

中国智能交通产业联盟印刷

网址：<http://www.c-its.org.cn>

XXXX 年 XX 月第一版 XXXX 年 XX 月第一次印刷