

GRLM

国家太阳能光热产业技术创新战略联盟标准

T/GRLM 09-2016

抛物面槽式太阳能集热器热性能 动态测试方法

Dynamic test method for the thermal performance of parabolic
trough solar collectors

2016-03-25 发布

2016-04-25 实施

国家太阳能光热产业技术创新战略联盟 发布

目次

前 言	1
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 符号与单位	2
5 测试系统组成	2
6 仪器与测量	4
7 测试平台	5
8 热性能动态测试方法	5
9 测试报告	8
附 录 A.....	9
附 录 B.....	12

前 言

本标准按照 GB/T 1.1-2009 给出的规则起草。

本标准由中国科学院电工研究所提出。

本标准归口单位：国家太阳能光热产业技术创新战略联盟。

本标准起草单位：中国科学院电工研究所、首航节能光热技术股份有限公司、中国电力工程顾问集团公司、北京有色金属研究总院、北京市太阳能研究所有限公司、中海阳能源集团股份有限公司、江苏太阳宝新能源有限公司、武汉圣普太阳能科技有限公司、常州龙腾太阳能热电设备有限公司、康达新能源设备股份有限公司、成都禅德太阳能电力有限公司、山西利虎玻璃（集团）有限公司、旭硝子特种玻璃（大连）有限公司、北京天瑞星光热技术有限公司、国家电投中央研究院、北京清华阳光能源开发有限责任公司、北京市太阳能热发电工程技术研究中心、中国科学院太阳能利用与光伏系统重点实验室。

本标准主要起草人：徐立、王志峰、白凤武、原郭丰、孙飞虎、张强强、赵东明、廖志荣、姚志豪、陈玉虹、蒋利军、孙守建、杨军峰、殷建平、李志清、胡桥、方全喜、周福云、彭强、刘玉彬、陈道坚、陈步亮、符佳、李旭光。

本标准为首次发布。

抛物面槽式太阳能集热器热性能动态测试方法

1 范围

本标准规定了抛物面槽式太阳能集热器热性能的动态测试方法及计算程序。

本标准适用于利用单轴跟踪的抛物面槽式聚光器，传热介质为导热油、水和熔融盐等在吸热过程中无相变液体介质的太阳能集热器，并且几何聚光比大于 7，包括由多台抛物面槽式聚光器组成的集热器阵列。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改版）适用于本文件。

GB/T 4271	太阳能集热器热性能试验方法
GB/T 12936	太阳能热利用术语
GB/T 26972	聚光型太阳能热发电术语
ISO 9488	太阳能-术语
ISO 9806	太阳能-太阳能集热器-测试方法
EN 12975-2	太阳能热水系统及部件-太阳能集热器-第二部分：测试方法
ANSI 93	确定太阳能集热器热性能的测试方法

3 术语和定义

GB/T 4271、GB/T 12936、GB/T 26972、ISO 9488、ISO 9806、EN 12975-2 和 ANSI 93 确立的以及下列术语和定义适用于本标准。

3.1

集热器非稳态效率 collector unsteady efficiency

在非稳态条件下，抛物面槽式太阳能集热器传热流体在规定时段内输出的能量与考虑到系统热惯性的相应时段内垂直入射在抛物面槽式太阳能集热器采光平面上的太阳辐照量同采光面积的乘积之比。

3.2

入射角 angle of incidence

入射太阳光线与抛物面槽式太阳能集热器采光平面法线之间的夹角。

3.3

余弦损失 cosine loss

由于太阳光入射方向与抛物面槽式太阳能集热器采光平面的法线方向不平行引起的采光平面接收能量减少。

3.4

端部损失 end loss

当太阳光非垂直入射抛物面槽式太阳能集热器采光平面时，部分抛物面槽式吸热管接收不到太阳辐射而造成的能量减少。

3.5

日得热量 all-day useful energy

在规定的一天内，单位集热器面积的得热总量。

3.6

集热器阵列 collector row

由多台集热器在同一方向串联形成的集热单元。

4 符号与单位

本标准使用的符号及单位见附录 A。

5 测试系统组成

5.1 抛物面槽式太阳能集热器结构

抛物面槽式太阳能集热器包括跟踪太阳运动的抛物面槽式聚光器和位于抛物面焦线处的抛物面槽式吸热管，其组成部件名称见图 1。抛物面槽式聚光器包括基座、支架、槽形反射器和传动装置等部分，其结构及组成部件名称见图 2。与抛物面槽式聚光器相配合的抛物面槽式吸热管，一般为双端开口的真空管，主要包括玻璃透光罩管、金属吸热管、真空夹层、吸气剂、玻璃-金属封接过渡件和热应力缓冲段等部分，其结构及组成部件名称见图 3。

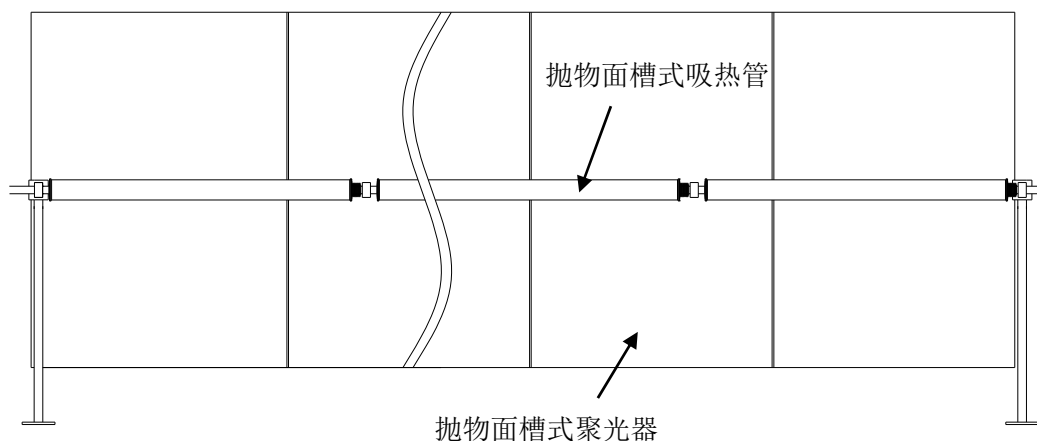


图 1 抛物面槽式太阳能集热器结构示意图

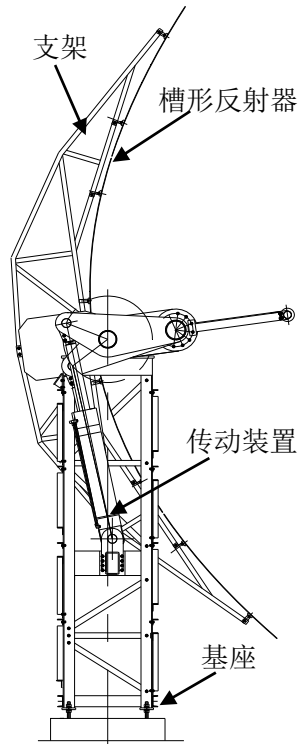


图 2 抛物面槽式聚光器结构示意图

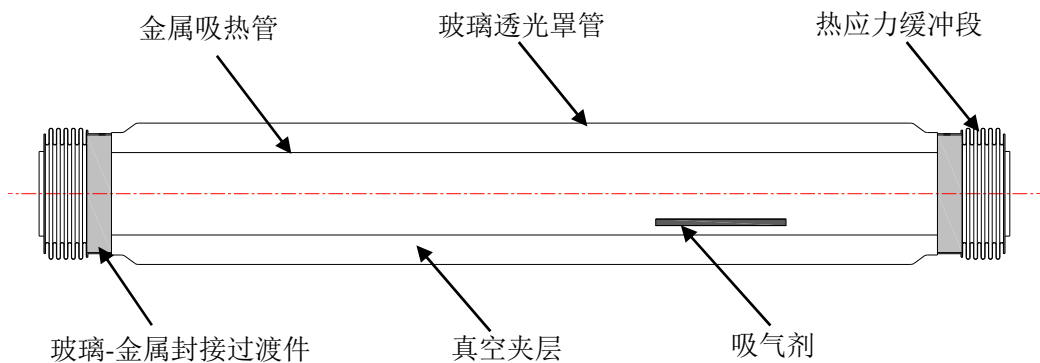
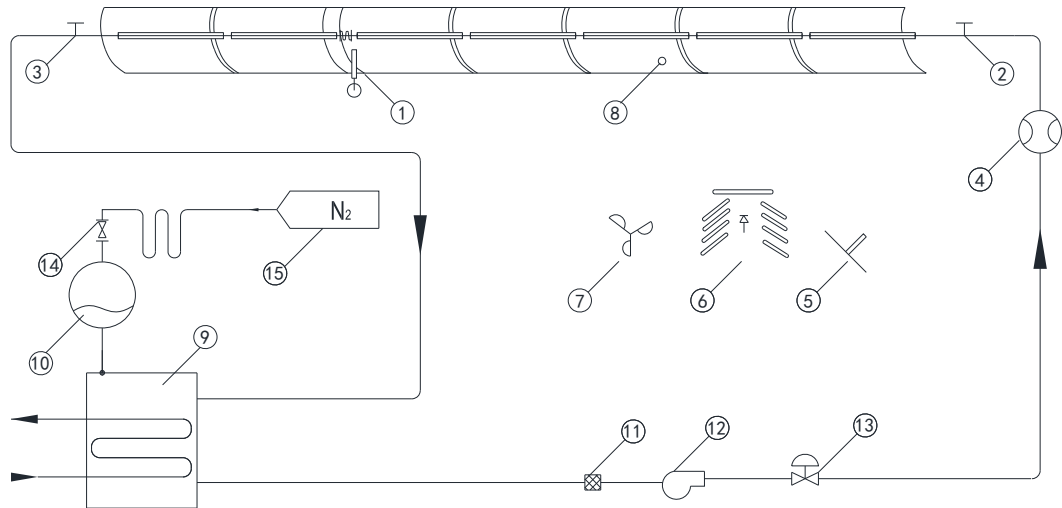


图 3 抛物面槽式吸热管结构示意图

5.2 抛物面槽式太阳能集热器热性能动态测试系统组成

抛物面槽式太阳能集热器热性能动态测试采用闭式循环系统。这套系统的测量仪器主要由传热流体进出口温度传感器、流量计、直接日射表及太阳跟踪器、环境空气温度传感器、风速仪、镜面反射率测定仪等组成；传热流体循环部分（含参考设备）主要由抛物面槽式太阳能集热器、换热器、膨胀罐、过滤器、泵、流量控制阀等组成；氮气密封部分（参考部分）主要由氮气呼吸阀和氮气瓶等组成；冷却循环部分接换热器，可采用水冷或者空冷方式，如图 4 所示。



- | | |
|-----------------|----------|
| 1—抛物面槽式太阳能集热器 | 9—换热器 |
| 2—温度传感器（传热流体进口） | 10—膨胀罐 |
| 3—温度传感器（传热流体出口） | 11—过滤器 |
| 4—流量计 | 12—泵 |
| 5—直接日射表及太阳跟踪器 | 13—流量控制阀 |
| 6—环境空气温度传感器 | 14—氮气呼吸阀 |
| 7—风速仪 | 15—氮气瓶 |
| 8—镜面反射率测定仪 | |

图 4 抛物面槽式太阳能集热器热性能动态测试系统示意图

6 仪器与测量

6.1 法向直射辐照度测量

使用符合或优于 GB/T 12936 规定的一级直接日射表进行测量。直接日射表在进行数据采集前应放置于测试位置至少 30min。直接日射表在每次测量前后都应对干燥剂观察，确认其有效。视场内障碍物应在太阳追踪平面以下 5°。直接日射表应避免放置于如塔、杆、墙或者具有明亮颜色的物体下。

6.2 环境空气速度测量

风速仪的准确度应等于或优于 $\pm 0.5\text{m/s}$ 或测量值的 $\pm 1.0\%$ 。安装高度应接近抛物面槽式吸热管的高度。应在风不被阻挡且靠近集热器的位置进行环境空气速度测量。

6.3 传热流体流量测量

可以通过所测量的体积流量和对应温度下的密度计算得出质量流量，也可以直接测量质量流量。传热流体流量测量的准确度应等于或优于测量值的 $\pm 1.0\%$ 。

6.4 镜面反射率测量

镜面反射率测量的准确度应等于或优于 ± 0.002 。

6.5 传热流体进出口温度测量

传热流体进出口温度传感器的安装位置距抛物面槽式吸热管进出口的距离应不大于 1m。传热流体

进出口温度传感器的允差等级应等于或优于 1/3B。

6.6 环境空气温度测量

环境空气温度传感器应安置在距被测集热器 15m 以内的白色百叶箱或防辐射罩中，安装高度距地面高度应不小于 1m。环境空气温度测量的准确度应等于或优于 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。

7 测试平台

7.1 总体结构

第 5 章图 4 给出了抛物面槽式太阳能集热器热性能动态测试平台的结构示意图。

7.2 传热流体

在测试期间，传热流体工作温度范围内，传热流体为液体，没有相变发生，可以是导热油、熔融盐或水。传热流体的相关物性参数应为第三方检测数据或行业认可的实验数据。

7.3 管道布置与组装

在集热器回路中使用的管道应耐腐蚀，能在传热流体最高工作温度和压力下工作，并且应确认管道的材料是否与传热流体兼容。温度测量点和抛物面槽式吸热管进出口之间的管道应采用隔热和防晒反射材料进行保护。

8 热性能动态测试方法

8.1 测试装置

测试系统的安装应符合第 6 章和第 7 章的规定和要求。

8.2 测试前处理

测试前应对抛物面槽式太阳能集热器的外观进行检查，并且做好记录。测试前应清洗抛物面槽式聚光器的槽形反射器表面和真空管型吸热管的玻璃透光罩管表面。测试前应确认测试系统的工作温度范围能够满足被测试的传热流体工作温度范围，并且完成调试运行。

8.3 测试条件

动态测试期间，需要满足的测量条件要求见表 1。

表 1 动态测试期间测量条件要求

测量条件	要求
太阳法向直射辐照度	不小于 700 W/m^2
环境空气速度	平均值不大于 8 m/s
传热流体的体积流量	使经过集热器传热流体的流动处于湍流状态， 大于被测集热器的安全运行流量设定值， 变化不大于测量值的 $\pm 2.0\%$
传热流体进口温度	升温测试期间上升速率不大于 2.5°C/min
传热流体进出口温差	升温测试期间大于 6.5 节规定的温度传感器准确度的 5 倍
聚光器镜面反射比	整个测试期间变化小于 2%

8.4 测量

应对以下参数进行测量：

- a) 集热器采光口面积 A_a
- b) 传热流体进口温度 t_i
- c) 传热流体出口温度 t_e
- d) 传热流体的体积流量 \dot{V}
- e) 太阳法向直射辐照度 (DNI) G_{DN}
- f) 环境空气温度 t_a
- g) 环境空气速度 u
- h) 槽形聚光器反射镜的反射比 ρ_r

8.5 测试程序

首先测定槽形反射器的反射率，沿着传热流体流动方向每 10m 长度的集热器至少有一个反射率测量点，反射率由这些测量点的平均测量值计算得出。

集热器测试应在室外条件下集热器工作温度的范围内进行。测试过程包括两个阶段，即升温测试和降温测试。升温测试为集热器跟踪聚光工况下的传热流体出口温度上升过程的连续测试；降温测试为调整集热器采光口背向太阳工况下的传热流体出口温度下降过程的连续测试。

集热器升温测试应在一天内接近最大太阳入射角出现的时间附近进行。例如，对于水平南北轴布置的抛物面槽式太阳能集热器，应在每日太阳时正午前后 3h 内进行集热器升温测试。

集热器升温测试中，在集热器工作温度范围内传热流体进口温度上升应不小于 100℃。升温测试的初始传热流体出口温度和降温测试的结束传热流体出口温度之差应不大于 10℃；升温测试的结束传热流体出口温度和降温测试的初始传热流体出口温度之差应不大于 10℃。

所有连续测量数据的时间间隔应不大于 5s，有效测试的总时间应不小于 4h，升温测试和降温测试完成次数均应不小于 3 次。

8.6 测试和结果的表示

8.6.1 集热器效率的计算

考虑到测试过程中太阳光线的非法线入射造成的集热器余弦损失，集热器采光平面上的直接太阳辐照度定义为

$$G_{bp} = G_{DN} \cos(\theta) \dots\dots\dots (1)$$

式中：

G_{DN} ——太阳法向直射辐照度， W/m^2 ；

θ ——入射角，即直射太阳光线与集热器采光平面法线之间形成的夹角，°。

根据被测抛物面槽式太阳能集热器的布置和跟踪方式，入射角的计算可参见文献（DUFFIE J A, BECKMAN W A. Solar Engineering of Thermal Processes [M]. 4th ed. JOHN WILEY & SONS, INC., 2013）。

再考虑到集热器端部损失，则有：

$$G_{bpe} = G_{bp} \left(1 - \frac{f}{L} \tan(\theta) \right) \dots\dots\dots (2)$$

式中：

f ——集热器抛物面的焦距，m；

L ——集热器的长度，m。

每个测试数据点的集热器输出的有用功率为:

$$q = c_f \rho \dot{V} (t_e - t_i) \dots \dots \dots (3)$$

式中:

c_f ——流经集热器的传热流体比热, J/(kg·°C);

ρ ——传热流体密度, kg/m³;

\dot{V} ——传热流体体积流量, m³/s;

t_e ——传热流体出口温度, °C;

t_i ——传热流体进口温度, °C。

同时测量得到的传热流体的集热器进口温度 t_i 和出口温度 t_e 与公式 (3) 中的这两个参量在时间上是不对应的, 因此修正这两个参量的对应函数关系为:

$$t_e(\tau_i + \tau_p) = F[t_i(\tau_i)] \dots \dots \dots (4)$$

式中:

τ_i ——传热流体进口温度测量记录时间, s;

τ_p ——传热流体从集热器进口到出口的流动时间, s。

τ_p 取决于集热器的长度 L 和测试期间传热流体的平均流速 v , 表示为:

$$\tau_p = L / v \dots \dots \dots (5)$$

为了模型表达的简洁, 本标准的模型中不再特别标出 $t_e(\tau_i + \tau_p)$ 和 $t_i(\tau_i)$ 。

综上所述, 抛物面槽式太阳能集热器效率为:

$$\eta = \frac{\int q d\tau}{A_a \int G_{bp} d\tau} \dots \dots \dots (6)$$

式中:

A_a ——集热器采光面积, m²;

τ ——时间, s。

考虑到端部损失的抛物面槽式太阳能集热器效率为:

$$\eta_{end} = \frac{\int q d\tau}{A_a \int G_{bpe} d\tau} \dots \dots \dots (7)$$

通常选取 5min 作为一个时段在附录 B 中表达集热器效率。

8.6.2 集热器测试模型

抛物面槽式太阳能集热器热性能动态测试模型的表达形式为:

$$\frac{t_e - t_i}{G_{eni}} = e_0 + e_1 \frac{\theta}{\cos(\theta)} + e_2 \frac{\theta^2}{\cos(\theta)} + a \frac{1}{G_{eni}} \frac{dt_e}{d\tau} + b \frac{1}{G_{eni}} \frac{dt_i}{d\tau} + c \frac{t_i - t_a}{G_{eni}} + d \frac{(t_i - t_a)^2}{G_{eni}} \dots \dots \dots (8)$$

式中：

$$G_{\text{eni}}(\tau_i + \tau_p) = [G_{\text{DN}}(\tau_i + \tau_s) + \dots + G_{\text{DN}}(\tau_i + p\tau_s)] \cos(\theta) \left[1 - \frac{f}{L} \tan(\theta) \right] / p \dots\dots\dots (9)$$

G_{eni} 是考虑余弦损失、端部损失和传热流体经集热器时太阳辐照度变化影响的一个有效均化的太阳直射辐照度。

p 为抛物面槽式金属吸热管沿传热流体流动方向划分的 p 个等长区域，取决于传热流体从集热器进口到出口的流动时间 τ_p 和测试数据采集时间间隔 τ_s ，即：

$$p = \tau_p / \tau_s \dots\dots\dots (10)$$

方程 (8) 中的 e_0 、 e_1 、 e_2 、 a 、 b 、 c 和 d 是七个待定参数，它们需要使用集热器热性能测试得到的数据进行辨识；

dt_e / dt 和 dt_i / dt 两个一阶导数通过 Taylor 展开法得到导数的差分表达为：

$$\frac{dt_e}{dt}(n) = \frac{t_e(n+1) - t_e(n-1)}{2\tau_s} \dots\dots\dots (11)$$

$$\frac{dt_i}{dt}(n) = \frac{t_i(n+1) - t_i(n-1)}{2\tau_s} \dots\dots\dots (12)$$

式中：

n 是测试数据的序号 ($n > 1$)。

8.6.3 测试模型参数确定的数学工具

测试模型参数确定的数学工具采用多元线性回归 (MLR) 进行计算辨识。线性意味着模型记为前面带有参数 P_n 作为乘子的多项式集合。

$$\text{例如: } Y = P_0 + P_1 \cdot F(x_1, x_2) + P_2 \cdot H(x_1, x_3, x_4) + P_3 \cdot I(x_2, x_5) \dots\dots\dots (13)$$

各项中的函数 $F(x. .)$ 、 $H(x. .)$ 和 $I(x. .)$ 可以是高阶非线性的。

由此，抛物面槽式太阳能集热器热性能动态测试模型采用基于最小二乘法方法的多元线性回归 (MLR) 作为其七个待定系数的辨识方法，判定系数应不小于 0.85。

9 测试报告

抛物面槽式太阳能集热器热性能动态测试报告见附录 B。

附录 A

(规范性附录)
符号和单位

符号和单位见表 A.1。

表 A.1 符号和单位

符号 Symbol	意义 Meaning	单位 Units
a	动态模型常量 <i>Algebraic constant used in the dynamic model</i>	s
A_a	集热器采光口面积 <i>Aperture area of the collector</i>	m^2
b	动态模型常量 <i>Algebraic constant used in the dynamic model</i>	s
c	动态模型常量 <i>Algebraic constant used in the dynamic model</i>	---
c_f	传热流体比热 <i>Specific heat capacity of heat transfer fluid</i>	$J/(kg \cdot ^\circ C)$
d	动态模型常量 <i>Algebraic constant used in the dynamic model</i>	$1/^\circ C$
e_0	动态模型常量 <i>Algebraic constant used in the dynamic model</i>	$^\circ C \cdot m^2/W$
e_1	动态模型常量 <i>Algebraic constant used in the dynamic model</i>	$^\circ C \cdot m^2/(W \cdot ^\circ)$
e_2	动态模型常量 <i>Algebraic constant used in the dynamic model</i>	$^\circ C \cdot m^2/(W \cdot ^\circ^2)$
f	集热器抛物面的焦距 <i>Focus length of the parabolic surface</i>	m

符号 Symbol	意义 Meaning	单位 Units
G_{bp}	垂直集热器采光口上的直接太阳辐照度 <i>Direct solar irradiance component in the aperture plane</i>	W/m^2
G_{bpe}	考虑端部损失的垂直集热器采光口上的直接太阳辐照度 <i>Direct solar irradiance component with the end loss consideration in the aperture plane</i>	W/m^2
G_{DN}	太阳法向直射辐照度 <i>Direct normal irradiance</i>	W/m^2
G_{eni}	有效均化太阳直射辐照度 <i>Effective, averaged beam solar irradiance</i>	W/m^2
L	抛物面槽式太阳能集热器长度 <i>Length of the parabolic trough collector</i>	m
n	测试数据的序号 <i>Number of test data in sequence</i>	---
p	沿传热流体流动方向划分的等长区域数量 <i>Number of zones divided in the direction of heat transfer fluid with the same length</i>	---
q	集热器输出的有用功率 <i>Useful power extracted from the collector</i>	W
t_a	环境空气温度 <i>Ambient air temperature</i>	$^{\circ}C$
t_e	传热流体的集热器出口温度 <i>Temperature of heat transfer fluid at the collector outlet</i>	$^{\circ}C$
t_i	传热流体的集热器进口温度 <i>Temperature of heat transfer fluid at the collector inlet</i>	$^{\circ}C$
t_m	传热流体平均温度, 即 $(t_i + t_e) / 2$ <i>Mean temperature of heat transfer fluid</i>	$^{\circ}C$

符号 Symbol	意义 Meaning	单位 Units
u	环境空气速度 <i>Surrounding air speed</i>	m/s
v	传热流体的平均流速 <i>Mean velocity of heat transfer fluid</i>	m/s
\dot{V}	传热流体体积流量 <i>Volumetric flow rate of heat transfer fluid</i>	m ³ /s
θ	入射角 <i>Angle of incidence</i>	°
η	抛物面槽式太阳能集热器效率 <i>Collector efficiency of parabolic trough solar collectors</i>	---
η_{end}	考虑到端部损失的抛物面槽式太阳能集热器效率 <i>Collector efficiency of parabolic trough solar collectors with the end loss consideration</i>	---
τ	时间 <i>Time</i>	s
τ_i	传热流体的集热器进口温度测量记录时间 <i>Record time when the temperature of heat transfer fluid at the collector inlet is tested</i>	s
τ_p	传热流体从集热器进口到出口的流动时间 <i>Flow time when heat transfer fluid passes from the collector inlet to outlet</i>	s
τ_s	测试数据的采集时间间隔 <i>Sampling time interval for test data</i>	s
ρ	传热流体的密度 <i>Density of heat transfer fluid</i>	kg/m ³
ρ_r	槽形反射器的反射率 <i>Reflectance of the parabolic trough reflector</i>	---

附 录 B
(规范性附录)
抛物面槽式太阳能集热器热性能动态测试报告

1 太阳能集热器描述 / Solar Collector Description

1.1 基本数据 / Basic Data

- 送检单位 / Applicant:
- 集热器编号 / Collector code:
- 送检日期 / Application date:

1.2 抛物面槽式聚光器 / Parabolic Trough Concentrator

- 抛物面槽式聚光器生产商 / Manufacturer of the parabolic trough concentrator:
- 焦距 / Focal length:
- 采光口宽度 / Aperture width:
- 采光面积 / Aperture area:
- 反射率 / Reflectivity:

1.3 抛物面槽式吸热管 / Parabolic Trough Receiver Tube

- 抛物面槽式吸热管生产商 / Manufacturer of parabolic trough receiver tubes:
- 真空管金属吸热管外径 / Absorber tube outer diameter:
- 真空管玻璃透光罩管外径 / Cover tube outer diameter:
- 真空管金属吸热管壁厚 / Absorber tube thickness:
- 真空管玻璃透光罩管壁厚 / Cover tube thickness:
- 单根抛物面槽式吸热管长度 / Length of a parabolic trough receiver tube:
- 抛物面槽式吸热管总长度 / Total length of parabolic trough receiver tubes:

1.4 传热流体 / Heat Transfer Fluid (HTF)

- 传热流体名称 / HTF name:
- 传热流体生产商 / HTF manufacturer:
- 传热流体型号 / HTF type:
- 传热流体说明 (添加剂等) / HTF specifications (additives etc.):

1.5 运行条件 / Operation conditions

- 最高运行温度 / Maximum operating temperature:
- 最大运行压力 / Maximum operating pressure:

1.6 集热器示意图 / Schematic Diagram of Collectors

1.7 集热器照片 / Photo of Collectors

1.8 测试回路示意图 / Schematic Diagram of Test Loop

2 测试结果，测量和计算的数据 / Test Results, Measurements and Derived Data

纬度 / Latitude:

经度 / Longitude:

集热器轴布置方式 / Collector axis arrangement:

表 1 / Table 1

测试结果 - 测量数据 / Test Results - Measured Data

日期/Date	时段/Time span	G_{DN}	t_a	t_i	t_e	\dot{V}	u
D - M - Y	HH:MM- HH:MM	W/m ²	°C	°C	°C	m ³ /s	m/s

表 2 / Table 2

测试结果 - 计算的数据 / Test Results - Derived Data

日期/Date	时段/Time span	G_{bp}	t_m	c_f	q	η	η_{end}
D-M-Y	HH:MM- HH:MM	W/m ²	°C	J/(kg·K)	W	-	-

多元线性拟合数据 / Multilinear fit to data:

$$\frac{t_e - t_i}{G_{eni}} = e_0 + e_1 \frac{\theta}{\cos(\theta)} + e_2 \frac{\theta^2}{\cos(\theta)} + a \frac{1}{G_{eni}} \frac{dt_e}{dt} + b \frac{1}{G_{eni}} \frac{dt_i}{dt} + c \frac{t_i - t_a}{G_{eni}} + d \frac{(t_i - t_a)^2}{G_{eni}}$$

表 3 / Table 3

热性能模型系数 / Thermal Performance Formula Coefficients

	值 / Value	标准偏差 / Standard Deviation
e_0		
e_1		
e_2		
a		
b		
c		
d		

判定系数 / Coefficient of Determination: