

# 中华人民共和国国家标准

GB/T 41308—2022

---

## 太阳能热发电站储热系统性能评价导则

Guide for evaluating thermal energy storage system performance of solar  
power plant

2022-03-09 发布

2022-10-01 实施

---

国家市场监督管理总局  
国家标准化管理委员会 发布

## 目 次

前言 .....	III
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 总则 .....	2
5 储热容量 .....	4
6 充放热性能 .....	6
7 保温性能 .....	7
8 耗电性能 .....	8
9 介质损耗 .....	9
附录 A (资料性) 储热系统效率指标及评价方法 .....	11
附录 B (资料性) 太阳能热发电站储热系统性能评价报告 .....	13
附录 C (资料性) 储热系统性能指标评价表 .....	14
附录 D (资料性) 单项指标多次测试记录表 .....	15
附录 E (规范性) 评价采用的测点及数据处理要求 .....	16

## 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。

本文件由中国电力企业联合会提出。

本文件由全国太阳能光热发电标准化技术委员会(SAC/TC 565)归口。

本文件起草单位：中国大唐集团新能源科学技术研究院有限公司、中国大唐集团新能源股份有限公司、中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司、思安新能源股份有限公司、内蒙古电力勘测设计院有限责任公司、云南电网有限责任公司电力科学研究院、北京思安综合能源发展有限公司、中广核太阳能开发有限公司、中广核太阳能德令哈有限公司、西安热工研究院有限公司。

本文件主要起草人：唐宏芬、赵晓辉、邢至珏、寇建玉、王丽、王小春、赵雄、杨佳霖、乔木森、刘颖黎、陆海、杜小龙、张建元、段明浩、杨小强、于海洋、孟令宾、居文平、孙利群、王博、韩广明、石如心、刘万军、刘荣。

# 太阳能热发电站储热系统性能评价导则

## 1 范围

本文件规定了太阳能热发电站储热系统储热容量、充放热、保温、耗电、介质损耗等性能指标评价的技术要求。

本文件适用于显热储热系统性能评价,潜热储热系统性能评价参照执行。

## 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。

GB/T 40104 太阳能光热发电站 术语

DL/T 5072 发电厂保温油漆设计规程

## 3 术语和定义

GB/T 40104 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

#### **间接储热系统 indirect thermal energy storage system**

储热介质和吸热介质为不同介质的太阳能热发电储热系统。包括集热场传热流体进入充放热换热设备的管道接口范围内的传热流体管道,以及储热介质相关的所有工艺系统及设备。

### 3.2

#### **直接储热系统 direct thermal energy storage system**

传热流体和储热介质为同一介质的太阳能热发电储热系统。包括集热系统传热流体出口至储热系统所有涉及的工艺系统和设备,至传热流体放热后返回至集热系统的分界。

### 3.3

#### **有效储热介质用量 amount of effective thermal energy storage medium**

能够参与充热和放热过程的储热介质的总质量。

注:单位为千克(kg)。

### 3.4

#### **充热功率 heat charge power**

单位时间内向储热系统流入的净热量。

### 3.5

#### **放热功率 heat discharge power**

单位时间内从储热系统流出的净热量。

### 3.6

#### **储热深度 storage level**

储热系统完全放热所能提供的可用热量与设计储热容量的比值。

注：额定温度和额定压力下，当储热系统可用热能为 0 时，储热深度为 0%；当储热系统可用热能达到设计储热量时，储热深度为 100%。

### 3.7

#### 完全充热状态 fully charged condition

储热系统的充热量、温度达到设计值，不再继续充热时的状态。

注：完全充热状态下，储热深度表示为 100%。

### 3.8

#### 完全放热状态 fully discharged condition

储热系统的放热量、温度达到设计值，无法继续放热时的状态。

注：完全放热状态下，储热深度表示为 0%~2%。

### 3.9

#### 最大可用储热容量 maximum effective heat storage capacity

从完全充热状态开始放热直至完全放热状态，储热系统的可用热量。

### 3.10

#### 储热系统平均温降 thermal energy storage average temperature drop

充热至设计温度后，经过预定的时间段后开始放热并使充、放热过程中介质的累积质量基本相等，充热过程中介质的质量加权平均温度与放热过程中介质的质量加权平均温度的差值。

### 3.11

#### 介质年耗损率 medium annual consumption rate

储热系统内的介质因泄漏或分解等，在一年时间内造成的损耗量与储热系统投运时介质总质量的比值。

注 1：对于直接储热系统，本文件所述介质特指储热介质，如熔融盐。

注 2：对于间接储热系统，储热介质为固体材料时，本文件所述介质特指传热介质，如导热油；储热介质为熔融盐时，本文件所述介质可指储热介质或传热介质，具体在性能评价前由各单位协商确定。

## 4 总则

4.1 太阳能热发电站储热系统应在电站竣工验收合格，正式移交生产管理，并且生产运维正常进行后定期开展。

4.2 太阳能热发电站储热系统性能评价宜以年为周期。

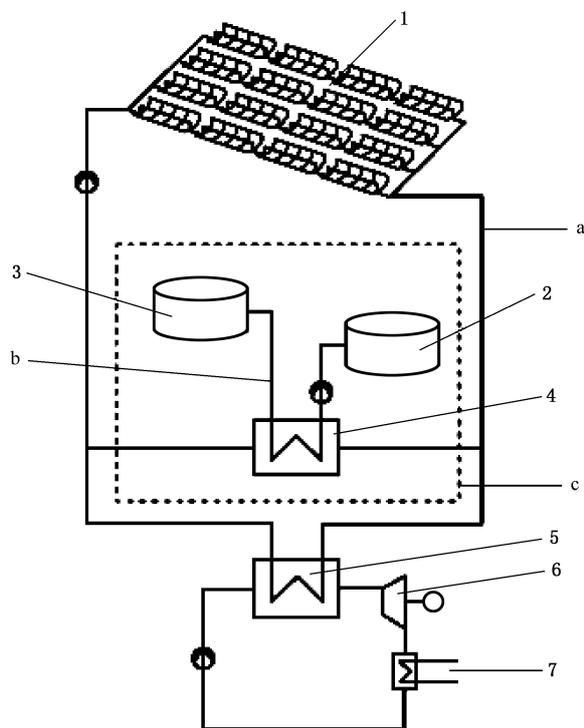
4.3 太阳能热发电站储热系统性能评价前收集资料的时间段应与评价周期一致，应收集以下基础资料：

- a) 系统基本信息，包括电站名称、装机容量、集热类型、储热类型、储热时间、储热系统配置，主要设备的型号规格和生产厂家，电站建设时间、投入商业运营时间等；
- b) 储热系统资料，包括系统设计、施工、验收相关技术文件等；
- c) 实测气象数据，包括电站直接辐射数据、风速风向、气压、湿度、风霜雨雪沙尘天数等；
- d) 运行数据，包括集热系统、储热系统、发电系统运行数据、运行值班记录等运行文件；
- e) 性能指标评价所使用的计量表计应定期校验，并在有效范围内。

4.4 间接储热系统和直接储热系统的评价范围分别为：

- a) 间接储热系统的评价范围包括集热场传热流体进入充放热换热设备的管道接口范围内的传热流体管道，储热介质相关的所有工艺系统及设备，以及传热流体放热至发电单元工质的换热系统部分，评价范围见图 1；
- b) 直接储热系统的评价范围包括集热系统传热流体出口至储热系统所有涉及的工艺系统和设

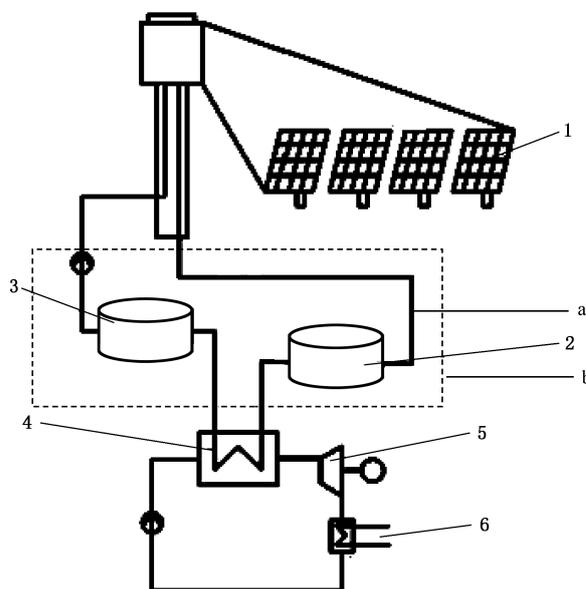
备,至传热流体放热后返回至集热系统的分界,评价范围见图 2。



标引序号说明:

- 1——集热场;
- 2——热盐罐;
- 3——冷盐罐;
- 4——热交换器;
- 5——蒸汽发生器;
- 6——汽轮机;
- 7——凝汽器;
- a——导热油回路;
- b——熔盐回路;
- c——储热系统评价范围。

图 1 间接储热系统评价范围示意图



标引序号说明:

- 1——镜场;
- 2——热盐罐;
- 3——冷盐罐;
- 4——蒸汽发生器;
- 5——汽轮机;
- 6——凝汽器;
- a——熔盐回路;
- b——储热系统评价范围。

图 2 直接储热系统评价范围示意图

4.5 太阳能热发电站储热系统性能评价指标应包括以下内容:

- a) 储热容量指标:包括储热系统温差、有效储热介质用量、最大有效储热容量、等效储热时长;
- b) 充放热性能指标:包括充热功率和充热量、放热功率和放热量;
- c) 保温性能指标:包括储热系统平均温降等;
- d) 耗电指标:包括储热系统厂用电率、储热系统厂用电占比和储热系统装置耗电率;
- e) 介质损耗指标:包括介质年损耗量和年损耗率。

4.6 根据电站运行条件和储热系统特点,可进行储热系统效率等性能评价,储热系统效率评价指标及评价方法见附录 A。

4.7 太阳能热发电站储热系统性能评价宜采用目标评价法、历史数据评价法、先进对标评价法:

- a) 目标评价法,以太阳能热发电站储热系统设计值、理论测算法或其他更加先进指标为基准值,

通过衡量实际运行数据与基准值的比值进行评价；

- b) 历史数据评价法,以太阳能热发电站储热系统同期历史数据或统计周期内历史数据指标为基准值,通过衡量实际运行数据与基准值的比值进行评价；
- c) 先进对标评价法,以行业先进水平为标杆,确定基准值,通过衡量实际运行数据与基准值的比值进行评价。

4.8 评价完成后,应形成太阳能热发电站储热系统性能评价报告,报告主要内容见附录 B。报告宜参照附录 C 储热系统性能指标评价表,分析指标差距,提出改进措施。

## 5 储热容量

### 5.1 评价指标

#### 5.1.1 储热系统温差

储热系统温差为储热系统放热温度与蓄热温度的差值,采用评价周期内高温储罐内温度接近设计高温或储热深度最大时的运行数据进行评价。双罐、单罐储热系统温差的计算方法如下：

- a) 双罐储热系统中,储热系统温差为高温储罐内熔盐温度与低温储罐内熔盐温度的差值,取实际高温储罐内温度测点的质量加权平均值与低温储罐内温度测点的质量加权平均值之差；
- b) 单罐储热系统中,储热系统温差为储热罐内高温区域与低温区域熔盐温度的差值,取高温区测点质量加权平均值与低温区测点质量加权平均值之差。

#### 5.1.2 有效储热介质用量

有效储热介质用量采用进入系统的储热介质总量,减去如下各项得出：

- a) 低温储罐和高温储罐内,满足泵吸入最小液位以下的储热介质质量；
- b) 充热过程储热介质流经的工艺管道和设备内填充满所需要的储热介质质量；
- c) 放热过程储热介质流经的工艺管道和设备内填充满所需要的储热介质质量。

注 1: 上列各扣除项采用储热介质输送泵的设计资料以及换热系统设计文件计算得出。对于配置熔盐储热的导热油槽式光热电站,当充热过程和放热过程不可能同时进行,只扣除上述 c)。

注 2: 储热介质总量由储热介质总体积,根据对应的温度,结合储热介质密度计算得出。其中储热介质总体积通过储罐液位计测得的储热介质液位,结合储罐对应温度状态下的几何尺寸计算得出。

#### 5.1.3 最大有效储热容量

5.1.3.1 最大有效储热容量可采用有效储热介质用量和在设计高温和低温状态下的温度对应的储热介质比焓或比热,按公式(1)计算。

$$Q = \frac{m_{\text{TES}} \times (h_h - h_c)}{3.6 \times 10^6} \dots\dots\dots(1)$$

式中：

- Q ——储热容量,单位为兆瓦时(MWh)；
- $m_{\text{TES}}$  ——有效储热介质用量,单位为千克(kg)；
- $h_h$  ——储热介质在设计高温温度对应的比焓,单位为千焦每千克(kJ/kg)；
- $h_c$  ——储热介质在设计低温温度对应的比焓,单位为千焦每千克(kJ/kg)。

5.1.3.2 对于显热储热,也可按公式(2)计算。

$$Q = \frac{m_{\text{TES}} \times \int_{t=t_c}^{t_h} c_p(t) \cdot dt}{3.6 \times 10^6} \dots\dots\dots(2)$$

式中：

- $Q$  ——储热容量,单位为兆瓦时(MWh);
- $m_{\text{TES}}$  ——有效储热介质用量,单位为千克(kg);
- $c_p(t)$  ——储热介质在温度为  $t$  时的定压比热容,单位为千焦每千克摄氏度[kJ/(kg°C)];
- $t_c$  ——储热介质设计最低工作温度,单位为摄氏度(°C);
- $t_h$  ——储热介质设计最高工作温度,单位为摄氏度(°C)。

5.1.3.3 当储热介质的定压比热容随温度线性变换,公式(2)中积分项可用平均定压比热容与工作温度区间的乘积替代。通过有效储热介质用量,结合储热介质物性参数表以及相应的设计温度,按公式(3)计算得出最大有效储热容量。

$$Q = \frac{m_{\text{TES}} \times \overline{c_p} \times (t_h - t_c)}{3.6 \times 10^6} \dots\dots\dots(3)$$

式中：

- $Q$  ——储热容量,单位为兆瓦时(MWh);
- $m_{\text{TES}}$  ——有效储热介质用量,单位为千克(kg);
- $\overline{c_p}$  ——对应于  $t_h$  和  $t_c$  温度区间的储热介质平均定压比热容,单位为千焦每千克摄氏度[kJ/(kg°C)];
- $t_c$  ——储热介质设计最低工作温度,单位为摄氏度(°C);
- $t_h$  ——储热介质设计最高工作温度,单位为摄氏度(°C)。

#### 5.1.4 等效储热时长

等效储热时长根据最大有效储热容量和汽轮发电机组额定工况下所需热功率确定,按公式(4)计算。

$$d = \frac{Q_m}{\Phi_{\text{turbine}}} \times \frac{1}{3.6 \times 10^3} \dots\dots\dots(4)$$

式中：

- $d$  ——等效储热时长,单位为时(h);
- $Q_m$  ——最大有效储热容量,单位为兆焦(MJ);
- $\Phi_{\text{turbine}}$  ——使汽轮发电机组能够以额定发电功率运行时所需提供的最小热功率,单位为兆瓦(MW)。

## 5.2 评价方法

5.2.1 采集评价周期内介质进、出储热系统边界时的温度、流量等参数、数据,储热介质主要热力学参数,分别计算评价周期内的储热系统温差、有效储热介质用量、最大有效储热容量、等效储热时长等指标的实际值,记录各指标的设计值、实际值、历史评估值,记录表格见附录 C。

5.2.2 采用目标评价法和历史数据评价法进行评价,用运行数据计算得出的指标实际值与设计值或历史评估值的比值,按公式(5),公式(6)分别计算储热容量指标达标率。

$$\text{目标评价法指标达标率} = \frac{\text{实际值}}{\text{设计值}} \times 100\% \dots\dots\dots(5)$$

$$\text{历史数据法指标达标率} = \frac{\text{实际值}}{\text{历史评估值}} \times 100\% \dots\dots\dots(6)$$

## 6 充放热性能

### 6.1 评价指标

#### 6.1.1 充热功率

储热系统充热功率通过储热系统充热过程中进入储热系统的介质流量、比焓,按公式(7)计算。

$$\Phi_{\text{ch}} = (\rho_{\text{in}} \cdot q_{\text{in}} \cdot h_{\text{in}} - \rho_{\text{out}} \cdot q_{\text{out}} \cdot h_{\text{out}}) \times \frac{1}{3.6 \times 10^6} \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中:

- $\Phi_{\text{ch}}$  ——储热系统充热功率,单位为兆瓦(MW);
- $\rho_{\text{in}}、\rho_{\text{out}}$  ——介质进、出储热系统边界时的密度,单位为千克每立方米( $\text{kg}/\text{m}^3$ );
- $q_{\text{in}}、q_{\text{out}}$  ——介质进、出储热系统边界时的体积流量,单位为立方米每时( $\text{m}^3/\text{h}$ );
- $h_{\text{in}}、h_{\text{out}}$  ——介质进、出储热系统边界时的比焓,单位为千焦每千克( $\text{kJ}/\text{kg}$ )。

#### 6.1.2 充热量

储热系统充热量由有效充热时段内的充热功率对时间求积分,按公式(8)计算。

$$Q_{\text{ch}} = \int \Phi_{\text{ch}} d\tau \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中:

- $Q_{\text{ch}}$  ——充热量,单位为兆焦(MJ);
- $\Phi_{\text{ch}}$  ——储热系统充热功率,单位为兆瓦(MW);
- $\tau$  ——时间,积分区间为充热过程对应的的时间区间,单位为秒(s)。

#### 6.1.3 放热功率

储热系统放热功率根据放热过程中介质进、出储热系统边界时的流量和比焓,按公式(9)计算。

$$\Phi_{\text{disch}} = (\rho_{\text{out}} \cdot q_{\text{out}} \cdot h_{\text{out}} - \rho_{\text{in}} \cdot q_{\text{in}} \cdot h_{\text{in}}) \times \frac{1}{3.6 \times 10^6} \quad \dots\dots\dots (9)$$

式中:

- $\Phi_{\text{disch}}$  ——储热系统放热功率,单位为兆瓦(MW);
- $\rho_{\text{in}}、\rho_{\text{out}}$  ——介质进、出储热系统边界时的密度,单位为千克每立方米( $\text{kg}/\text{m}^3$ );
- $q_{\text{in}}、q_{\text{out}}$  ——介质进、出储热系统边界时的体积流量,单位为立方米每时( $\text{m}^3/\text{h}$ );
- $h_{\text{in}}、h_{\text{out}}$  ——介质进、出储热系统边界时的比焓,单位为千焦每千克( $\text{kJ}/\text{kg}$ )。

#### 6.1.4 放热量

储热系统放热量由放热时段内的放热功率对时间求积分得出,按公式(10)计算。

$$Q_{\text{disch}} = \int \Phi_{\text{disch}} d\tau \quad \dots\dots\dots (10)$$

式中:

- $Q_{\text{disch}}$  ——放热量,单位为兆焦(MJ);
- $\Phi_{\text{disch}}$  ——储热系统放热功率,单位为兆瓦(MW);
- $\tau$  ——时间,积分区间为放热过程对应的的时间区间,单位为秒(s)。

注:对于直接储热系统,测试充热量对进入储热系统和进入换热系统介质流量分别计量;对间接储热系统,直接计量储热系统的介质流量。

## 6.2 评价方法

6.2.1 采集评价周期内介质进、出储热系统边界时的温度、流量、比焓、有效充热时间、有效放热时间等参数、数据,分别计算得出评价周期内的最大、最小充热功率,典型充热过程的充热量,以及最大、最小放热功率,典型放热过程的放热量等指标的实际值,记录环境温度、风速。

6.2.2 测试期间数据选取应确保在系统正常运行允许偏差范围内,数据修正应符合设备出力进出口参数要求,单项指标多次测试记录表见附录 D,采用的测点及数据处理应符合附录 E 的要求。

6.2.3 将各指标实际值折算成设计环境条件下的数值,记录各指标的设计值、实际值、历史值,记录表格见附录 C。

6.2.4 采用目标评价法和历史数据评价法分别对充放热性能指标进行评价,按公式(5)、公式(6)计算分别储热系统充放热性能指标达标率。

## 7 保温性能

### 7.1 评价指标

#### 7.1.1 储热系统平均温降

7.1.1.1 储热系统平均温降可用测温法由运行数据计算得出,也可采用放热法进行充、放热试验测量后计算得出。

##### a) 测温法

选取充热达到设计温度或最高运行温度,且不进行放热期间的运行数据,采用储罐上各温度测点数值,每间隔 12 h 分别计算出冷罐、热罐的质量加权平均温度,记录储罐液位及外壁与环境温度的差值,通过折算得出储热系统平均温降。

##### b) 放热法

根据充、放热过程中介质的质量加权平均温度,按公式(11)~公式(13)计算储热系统平均温降。

$$\Delta t = t_{\text{ch}} - t_{\text{disch}} \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$t_{\text{ch}} = \frac{\sum_A m_i \cdot t_i}{\sum_A m_i} = \frac{\sum_A \rho_i \cdot q_i \cdot \Delta\tau_i \cdot t_i}{\sum_A \rho_i \cdot q_i \cdot \Delta\tau_i} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$t_{\text{disch}} = \frac{\sum_B m_j \cdot t_j}{\sum_B m_j} = \frac{\sum_B \rho_j \cdot q_j \cdot \Delta\tau_j \cdot t_j}{\sum_B \rho_j \cdot q_j \cdot \Delta\tau_j} \quad \dots\dots\dots (13)$$

式中:

$\Delta t$  ——储热系统平均温降,单位为摄氏度( $^{\circ}\text{C}$ );

$t_{\text{ch}}、t_{\text{disch}}$  ——充、放热过程中介质的质量加权平均温度,单位为摄氏度( $^{\circ}\text{C}$ );

$\rho_i、\rho_j$  ——充、放热过程中,数据记录间隔内介质的平均密度,单位为千克每立方米( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$q_i、q_j$  ——充、放热过程中,数据记录间隔内介质的平均体积流量,单位为立方米每小时( $\text{m}^3/\text{h}$ );

$\Delta\tau_i、\Delta\tau_j$  ——数据记录间隔,单位为秒(s);

$A、B$  ——充、放热过程对应的时间区间。

7.1.1.2 放热过程开始时,储热系统可以是完全储热状态或不完全储热状态。此外,充、放热过程应满足公式(14)的条件。

$$\sum_A \rho_i \cdot q_i \cdot \Delta\tau_i \approx \sum_B \rho_j \cdot q_j \cdot \Delta\tau_j \quad \dots\dots\dots (14)$$

式中：

- $\rho_i, \rho_j$  ——充、放热过程中，数据记录间隔内介质的平均密度，单位为千克每立方米(kg/m<sup>3</sup>)；
- $q_i, q_j$  ——充、放热过程中，数据记录间隔内介质的平均体积流量，单位为立方米每时(m<sup>3</sup>/h)；
- $\Delta\tau_i, \Delta\tau_j$  ——数据记录间隔，单位为秒(s)；
- A、B ——充、放热过程对应的时间区间。

注：被测系统温度测点不少于6个。

## 7.2 评价方法

7.2.1 采集评价周期内储热系统热罐、冷罐外壁各温度测点数值，对应的环境温度、风速、液位等参数，选取充热达到设计温度或最高运行温度，且不进行放热期间的运行数据，采用储罐上各温度测点数值，每间隔12h分别计算出冷罐、热罐的质量加权平均温度，并记录储罐液位、外壁温度及环境温度。

7.2.2 采用放热法测量计算储热系统平均温降，需测量一次完整的充放周期(充热到设计温度，放热到储热深度为0%~2%)。实测数据环境温度及风速应尽量与保温设计环境一致，记录充、放热过程中介质的体积流量、温度、时间，以及相应的环境温度、风速、液位等参数。单项指标多次测试记录表见附录D。

7.2.3 按测温法或放热法计算每间隔12h的储热系统平均温降实际测量值。

7.2.4 储热系统保温性能评价应考虑环境温度、风速、液位的影响。当实测数据环境温度及风速与保温设计环境不一致时，应按照DL/T 5072，重新计算理论设计温降。

7.2.5 采用目标评价法进行评价，按公式(15)计算保温性能达标率。

$$\text{目标法评价达标率} = \frac{\text{实际测量值}}{\text{理论设计值}} \times 100\% \dots\dots\dots (15)$$

## 8 耗电性能

### 8.1 评价指标

#### 8.1.1 储热系统厂用电率

储热系统厂用电率为储热系统中各设备在评价周期内(月或年)的耗电量与全厂发电量的比值，按公式(16)计算。

$$W_{cr} = \sum_{i=1}^n W_i / W_f \dots\dots\dots (16)$$

式中：

- $W_{cr}$  ——储热系统耗电量，单位为千瓦时(kWh)；
- $W_i$  ——储热系统中各设备在评价周期内的耗电量，设备至少应包括泵、电加热器、电伴热装置、电气系统等，单位为千瓦时(kWh)；
- $W_f$  ——评价周期内全厂发电量。

#### 8.1.2 储热系统耗电占比

储热系统耗电占比为评价周期内储热系统耗电量与太阳能热发电站厂用电量的比值，按公式(17)计算。

$$L_{cd} = \frac{W_{cr}}{W_d} \times 100\% \dots\dots\dots (17)$$

式中，

$L_{cd}$ ——评价周期  $t$  内储热系统耗电占比；

$W_{cr}$ ——评价周期  $t$  内储热系统耗电量，单位为千瓦时(kWh)；

$W_d$ ——评价周期  $t$  内太阳能热发电站厂用电量，单位为千瓦时(kWh)。

### 8.1.3 储热系统装置耗电率

8.1.3.1 储热系统装置耗电率为储热系统主要用电设备在充热、放热工况下，用电设备安装电动机总功率与发电机额定功率的比值。

8.1.3.2 用电设备功率应按不同工况分别评价：

- 充热工况：充热工况下的循环泵、辅助电加热器、电伴热装置、电气系统等用电设备功率；
- 放热工况：放热工况下的循环泵、辅助电加热器、电伴热装置、电气系统等用电设备功率；
- 保温工况：保温工况下电伴热装置、辅助电加热器、电气系统等用电设备功率与发电机额定功率的比值。

注：上述工况中如有其他辅助热源，按照热源热量等量折算为电功率。

8.1.3.3 储热系统装置耗电率按公式(18)计算。

$$L_{cr} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{P} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(18)$$

式中：

$L_{cr}$ ——储热系统中泵、电加热器、电伴热装置、电气系统等用电设备功率；

$\sum_{i=1}^n P_i$ ——分别对应上述 a)~c) 工况下的用电设备功率总合，单位为千瓦(kW)；

$P$ ——发电机额定功率，单位为千瓦(kW)。

## 8.2 评价方法

8.2.1 采集评价周期内储热系统冷、热熔盐泵、电加热设备、伴热设备、氮气密封系统等耗电设备的功率、耗电量数据，以及全站厂用电量、发电量数据，计算储热系统厂用电率、储热系统耗电占比和储热系统装置耗电率指标数值。

8.2.2 储热系统厂用电率、储热系统耗电占比指标，宜采用历史数据评价法进行评价，计算与历史评估值的差值；储热系统装置耗电率指标宜采用目标评价法进行评价，计算不同工况下实际值与设计值的偏差。

## 9 介质损耗

### 9.1 评价指标

采用介质年损耗率评估储热系统泄漏以及储热介质、传热介质的损耗情况，按公式(19)计算。

$$\zeta = \frac{\Delta m}{m_0} = \frac{\Delta l \cdot \pi r^2 \cdot \rho}{m_0} \quad \dots\dots\dots(19)$$

式中：

$\zeta$ ——介质年损耗率，%；

$\Delta m$ ——试验起止点储热系统内介质的损耗差，单位为千克(kg)；

$m_0$ ——电站正式投运前加入储热系统的介质总质量，单位为千克(kg)；

$\Delta l$  ——评价周期起止点储罐内介质的液位差,试验起止点介质的温度应保持一致,单位为米(m);

$r$  ——储罐内径,单位为米(m);

$\rho$  ——介质对应的密度,单位为千克每立方米( $\text{kg}/\text{m}^3$ )。

注:试验起止时间内补充的介质质量计为损耗量;试验起止时间间隔不等于一年时,折算成年损耗率。

## 9.2 评价方法

9.2.1 采集电站正式投运前加入储热系统的介质总质量,评价周期起止点储罐内介质的液位、温度、介质密度、储罐几何尺寸等参数、数值,按照附录 E 要求对测点数据进行处理。

9.2.2 结合储热介质温度-密度特性表,计算评价周期起止点介质损耗量实际值,折算成年介质损耗率。

9.2.3 储热系统介质损耗率采用目标评价法进行评价,计算年介质损耗率实际值与理论设计预估值值的偏差。

## 附录 A

(资料性)

## 储热系统效率指标及评价方法

## A.1 评价指标

## A.1.1 充热效率

对于实现充热量  $Q_{ch}$  过程中的充热效率,按公式(A.1)计算。

$$\eta_{ch} = 1 - \frac{q_1}{Q_{ch}} \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:

$\eta_{ch}$  ——充热效率, %;

$q_1$  ——充热过程中,自集热系统出口至储热系统储热介质进入储罐的工艺接口之间所有管道,换热器,泵类的散热量。对于传热介质为导热油的间接储热系统,应包括传热流体在充热过程中流经工艺管道、设备等的散热量。单位为千焦(kJ)。

$Q_{ch}$  ——充热过程中总的充热量,可计算充热前后储热量的差值,也可由流量、温度对时间积分计算得出,单位为千焦(kJ)。

## A.1.2 储热效率

A.1.2.1 对应充热量  $Q_{ch}$ ,储热效率按公式(A.2)计算。

$$\eta_{TES} = 1 - \frac{q_2}{Q_{ch}} \quad \dots\dots\dots (A.2)$$

式中:

$\eta_{TES}$  ——储热效率, %;

$q_2$  ——所有储罐设备外表面及基础的散热量之和,对于设计有和大气直接或间接相通的系统,尚应包括此部分散热量,单位为千焦(kJ);

$Q_{ch}$  ——充热过程中总的充热量,可计算充热前后储热量的差值,也可由流量、温度对时间积分计算得出,单位为千焦(kJ)。

A.1.2.2 当评价储罐额定充热状态下的储热效率时,按公式(A.3)计算。

$$\eta_{TES} = 1 - \frac{q_2'}{Q_m} \quad \dots\dots\dots (A.3)$$

式中:

$\eta_{TES}$  ——储热效率, %;

$q_2'$  ——在设计储热时长内,储热系统储罐满充时储罐不同部位散热量之和,单位为千焦(kJ)。

$Q_m$  ——储罐的额定充热量,单位为千焦(kJ)。

## A.1.3 放热效率

实现放热量  $Q_{dis}$  的放热过程中,放热效率按公式(A.4) 计算。

$$\eta_{dis} = 1 - \frac{q_3}{Q_{ch}} \quad \dots\dots\dots (A.4)$$

式中:

$\eta_{dis}$  ——放热效率, %;

$q_3$  ——放热过程中,自集热系统出口至储热系统储热介质进入储罐的工艺接口之间所有管道,换热器,泵类的散热量。对于传热介质为导热油的间接储热系统,应包括传热流体在充热过程中流经工艺管道、设备等的散热量。单位为千焦(kJ);

$Q_{ch}$  ——充热过程中总的充热量,可计算充热前后储热量的差值,也可由流量、温度对时间积分计算得出,单位为千焦(kJ)。

## A.2 评价方法

A.2.1 进行效率评价应进行充、放热试验。

A.2.2 采集试验过程中介质进、出储热系统边界时的温度、流量等参数、数据,储热介质主要热力学参数,以及理论设计值等作为储热容量指标评价的依据。

A.2.3 分别计算得出试验过程中充热效率,储热效率和放热效率,记录各指标的设计值、实测值、历史评估值,以及实测值与理论设计值或历史评估值的偏差,记录表格见附录 C。

A.2.4 对于充热效率和放热效率,将充热过程、放热过程管道、换热器的热损失视为常数定值,可取这两个过程效率为 99%;可采用在某一给定环境温度、平均环境风速、给定储热状态等条件下,储罐或固体混凝土模块 24 h 温度降低值来评价储热效率。

## 附录 B

(资料性)

### 太阳能热发电站储热系统性能评价报告

#### B.1 项目概况

项目规模、电站概况,储热系统构成及主要工艺、设备参数,储热介质的具体成分及典型热物性曲线。

#### B.2 评价及分析测试方法

储热系统性能评价的基本规定,设计及运行数据收集情况、数据筛选条件;性能试验依据的标准、试验设备、测点、仪表等。现场测试试验设备及测试方法、试验条件。

#### B.3 评价指标取值、计算说明及分析

##### B.3.1 储热容量指标及评价

根据评价方法,评价太阳能热发电站储热系统温差、有效储热介质用量、最大有效储热容量、等效储热时长指标。

##### B.3.2 充放热性能指标及评价

根据评价方法,评价太阳能热发电站充热功率和充热量、放热功率和放热量指标。

##### B.3.3 保温性能指标及评价

根据评价方法,评价太阳能热发电站储热系统平均温降指标。

##### B.3.4 耗电指标及评价

根据评价方法,评价太阳能热发电站储热系统厂用电率、储热系统耗电占比和储热系统装置耗电率指标。

#### B.4 结论及建议

储热系统性能指标评价表,分析指出指标差距,并针对差距给出指导性意见及建议。

#### B.5 附件

设备及系统说明书及检测报告与设计参数核对表,评价指标及性能试验记录数据、协议、补充说明等。

附录 C

(资料性)

储热系统性能指标评价表

储热系统性能指标评价表见表 C.1。

表 C.1

序号	项目	单位	实际值	目标评价法		历史数据法	
				设计值	偏差	历史值	偏差
1	储热容量						
1.1	储热系统温差	℃					
1.2	有效储热介质用量	kg					
1.3	最大有效储热容量	MWh					
1.4	等效储热时长	h					
2	充放热性能						
2.1	最大充热功率	MW					
2.2	最小充热功率	MW					
2.3	充热量	MJ					
2.4	最大放热功率	MW					
2.5	最小放热功率	MW					
2.6	放热量	MJ					
3	保温性能						
3.1	储热系统平均温降	℃					
3.2	充热时介质平均温度	℃					
3.3	放热时介质平均温度	℃					
4	耗电指标						
4.1	储热系统厂用电率	%					
4.2	储热系统耗电占比	%					
4.3	储热系统装置耗电率	%					
5	介质损耗						
5.1	介质年损耗量	kg					
5.2	介质年损耗率	%					
6	.....						
评价意见：							
(评价单位)							
(日期)							

附录 D  
(资料性)  
单项指标多次测试记录表

单项指标多次测试记录表见表 D.1。

表 D.1

日期： 年 月 日		记录人：			
测试指标 时间	测试指标 1 (单位)	测试指标 2 (单位)	测试指标 3 (单位)	测试指标... (单位)	测试指标 n (单位)
设计值					
时 分					
时 分					
时 分					
时 分					
时 分					
时 分					
时 分					
时 分					
时 分					
时 分					
时 分					
运行记录说明					
运行工况记录:(充热 <input type="checkbox"/> 放热 <input type="checkbox"/> 保温 <input type="checkbox"/> )					
天气情况记录:(阴、晴、雨、雪、气温情况)					

附 录 E

(规范性)

评价采用的测点及数据处理要求

E.1 采集数据要求

计算太阳能热电站储热系统各项性能指标前,应对采集数据进行筛选及校核,并按评价指标计算要求分类。有效的评价样本数据应足够多,用于指标计算的数据记录间隔不应超过 10 s,持续时间不小于 2 个充/放热循环,或一周内累计 64 h。

E.2 直接储热系统

E.2.1 对于熔盐塔式、熔盐槽式、熔盐菲涅尔式光热电站的直接储热系统,性能评价测点及要求如下:

- a) 储热介质进、出储热系统边界的流量,相邻时间点的流量波动范围 1%~5%以内;
- b) 储热介质进、出储热系统边界的温度,相邻时间点的温度波动范围应在  $T_{-10}^{+5} \text{ } ^\circ\text{C}$  以内。

E.2.2 评价采用的数据包括:

- a) 介质进、出储热系统边界时的密度,单位为千克每立方米( $\text{kg}/\text{m}^3$ );
- b) 介质进、出储热系统边界时的比焓,单位为千焦每千克( $\text{kJ}/\text{kg}$ )。

E.2.3 选取符合要求的运行数据或试验数据后,应按如下方法对每一组数据进行处理。

- a) 储热系统入口温度数据,应通过计算储热系统入口温度测量结果的算术平均值获取。
- b) 储热系统出口温度数据,应通过计算储热系统出口温度测量结果的算术平均值获取。
- c) 储热系统传热流体比热容,可由公式(E.1)计算确定,或者由具有材料热物性测试资质的机构通过实验化验测试确定。

$$c = a_0 + a_1 \cdot T^1 + a_2 \cdot T^2 + \dots + a_n \cdot T^n \dots\dots\dots(\text{E.1})$$

式中:

$a_0 \sim a_n$  ——与材料有关的常数;  
 $T^n$  ——温度的  $n$  次方,  $n$  为整数,推荐取到 3。

- d) 传热流体焓升  $\Delta h$ ,通过传热流体进出口比热和进出口温差计算可参考公式(E.2)计算:

$$\Delta h = h_{\text{出口}} - h_{\text{进口}} = \bar{c}(T_{\text{出口}} - T_{\text{进口}}) \dots\dots\dots(\text{E.2})$$

式中:

$\Delta h$  ——传热流体焓升,单位为千焦每千克( $\text{kJ}/\text{kg}$ );  
 $h_{\text{出口}}, h_{\text{进口}}$  ——传热流体进、出储热系统边界时的比焓,单位为千焦每千克( $\text{kJ}/\text{kg}$ );  
 $T_{\text{出口}}, T_{\text{进口}}$  ——传热流体进、出储热系统边界时的温度,单位为摄氏度( $^\circ\text{C}$ );  
 $\bar{c}$  ——传热流体该温度区间的平均比热容,单位为千焦每千克摄氏度 [ $\text{kJ}/(\text{kg}^\circ\text{C})$ ]。

- e) 传热流体体积流量数据,应通过计算体积流量测量的算术平均值获取。
- f) 传热流体密度,应根据温度对应的导热介质物性参数确定。

E.3 间接储热系统

E.3.1 对于槽式导热油熔盐储热系统和槽式导热油固体储热系统等间接储热系统,应同时采集储热介质侧、传热介质侧数据,评价测点及要求如下:

- a) 储热介质进、出储热系统边界的流量,相邻时间点的流量波动范围 1%~5%以内;

b) 储热介质进、出储热系统边界的温度,相邻时间点的温度波动范围应在  $T_{-10}^{+5} \text{ } ^\circ\text{C}$  以内。

### E.3.2 评价采用的数据包括如下内容。

- a) 传热介质进、出储热系统边界时的密度,单位为千克每立方米( $\text{kg}/\text{m}^3$ );根据出厂技术文件中温度对照传热介质温度-密度特性表查取,或由有检测资质的机构测定。
- b) 传热介质进、出储热系统边界时的比焓,单位为千焦每千克( $\text{kJ}/\text{kg}$ );根据出厂技术文件中温度对照传热介质温度-比热特性表查取,或由有检测资质的机构测定。
- c) 储热介质进、出储热系统边界时的密度,单位为千克每立方米( $\text{kg}/\text{m}^3$ );根据出厂技术文件中温度对照传热介质温度-密度特性表查取,或由有检测资质的机构测定。
- d) 储热介质进、出储热系统边界时的比焓,单位为千焦每千克( $\text{kJ}/\text{kg}$ );根据出厂技术文件中温度对照传热介质温度-比热特性表查取,或由有检测资质的机构测定。

### E.3.3 选取符合要求的试验数据后,应按如下方法对每一组数据进行处理。

- a) 储热系统入口温度数据,应通过计算储热系统入口温度测量结果的算术平均值获取。
  - b) 储热系统出口温度数据,应通过计算集热系统出口温度测量结果的算术平均值获取。
  - c) 储热系统储热介质、传热流体比热,应通过实验化验测试获得,并由具有材料热物性测试资质的机构测定。
  - d) 储热介质、传热流体焓升  $\Delta h$ ,应通过传热流体进出口比热和进出口温度获得,或直接由具有材料热物性测试资质的机构出具检测报告;若无法提供,可按公式(E.1)计算。
  - e) 储热介质(熔盐、储热固体)、传热流体(导热油)体积流量数据,应通过计算体积流量测量的算术平均值获取。
  - f) 储热介质(熔盐、储热固体)、传热流体(导热油)密度,应根据温度对应的导热介质物性参数确定。
-