

# Measurement Uncertainty Analysis Based on the Thermal Performance Test Facility for Solar Water Heater

Yu Deng<sup>1</sup>, Xinyu Zhang<sup>1\*</sup>, Tao He<sup>1</sup>, Wei Xu<sup>2</sup>, Min Wang<sup>2</sup>, Bojia Li<sup>2</sup>, Yan Gao<sup>3</sup>

<sup>1</sup>National Center for Quality Supervision and Testing of Solar Water Heating Systems (Beijing), Beijing

<sup>2</sup>China Academy of Building Research, Beijing

<sup>3</sup>Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing

Email: \*zxyhit@163.com

Received: Feb. 4<sup>th</sup>, 2016; accepted: Feb. 18<sup>th</sup>, 2016; published: Feb. 25<sup>th</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

The measurement uncertainty analysis of daily useful heat gain and average heat loss coefficient of the tank have been performed based on the test data from the solar water heater thermal performance test facility. The results show that the precision of pyranometer has dominated the measurement uncertainty of daily useful heat gain, and the temperature sensor measurement uncertainty has significant effect on the average heat loss coefficient of the tank. The work done in this paper gives the direction to improve the measure precision of solar water heater test facility.

## Keywords

Thermal Performance Test Facility for Solar Water Heater, Measurement Uncertainty, Daily Heat Gain, Daily Average Efficiency, Average Heat Loss Coefficient of the Tank

---

# 太阳能热水器热性能试验装置热性能测量 不确定度分析

邓 昱<sup>1</sup>, 张昕宇<sup>1\*</sup>, 何 涛<sup>1</sup>, 徐 伟<sup>2</sup>, 王 敏<sup>2</sup>, 李博佳<sup>2</sup>, 高 岩<sup>3</sup>

\*通讯作者。

文章引用: 邓昱, 张昕宇, 何涛, 徐伟, 王敏, 李博佳, 高岩. 太阳能热水器热性能试验装置热性能测量不确定度分析[J]. 可持续能源, 2016, 6(1): 12-20. <http://dx.doi.org/10.12677/se.2016.61002>

<sup>1</sup>国家太阳能热水器质量监督检验中心(北京), 北京

<sup>2</sup>中国建筑科学研究院, 北京

<sup>3</sup>北京建筑大学, 北京

Email: \*zxyhit@163.com

收稿日期: 2016年2月4日; 录用日期: 2016年2月18日; 发布日期: 2016年2月25日

## 摘要

对研制开发的家用太阳能热水器热性能测试装置的日有用得热量和平均热损因数两个参数的测量不确定度进行了分析, 分析结果表明, 利用该装置测得的日有用得热量的测量不确定度受总辐射表的测量精度影响较大, 平均热损因数的测量不确定度受温度测量传感器的不确定度影响较大, 研究结果为提高太阳能热水器热性能测试装置的测量精度指明了方向。

## 关键词

太阳能热水器热性能测量装置, 测量不确定度, 日有用得热量, 日平均效率, 平均热损因数

## 1. 引言

家用太阳能热水器由于其优异的节能效果在我国得到了广泛的应用。2011年强制性国家标准《家用太阳能热水系统能效限定值及效率等级》GB26969-2011 [1]颁布实施, 2012年家用太阳能热水器列入国家能效标识产品目录[2], 根据《家用太阳能热水系统能效限定值及效率等级》GB26969-2011 [1]的规定, 家用太阳能热水器的能效限定值与太阳能热水器的热性能参数, 即日有用得热量和贮热水箱平均热损因数有关, 因此能否准确测得太阳能热水器的热性能非常重要, 国家太阳能热水器质量监督检验中心(北京)为了更好配合《家用太阳能热水系统能效限定值及效率等级》GB26969-2011 [1]的发布实施, 研制开发了太阳能热水器热性能测试装置[3], 本文将基于这个装置的测试数据对太阳能热水器热性能测试数据的测量不确定度进行分析, 供相关人员参考。

## 2. 测量不确定度分析的基本理论

被测量的不确定度取决于测试过程中各输入量估计值的不确定度, 因此要想得到测量结果, 首先应确定数学模型中各输入量的最佳估计值。确定最佳估计值的方法有两类, 一种是通过实验测量得到其最佳的估计值, 另一种是通过其他信息来源得到其最佳估计值。前者通常称为A类不确定度评定, 即用对观测列进行统计分析的方法来评定标准不确定度; 后者通常称为B类不确定度评定, 标准不确定度均以标准差表征[4]。对被测量进行A类不确定度需要大量的测量数据, 在JJF 1033-2008《计量标准考核规范》[5]中规定在进行计量标准的重复性测量时, 要求测量次数大于10次, 由于太阳能热水器热性能测试中太阳辐照、环境温度及风速条件, 无法复现, 只能采用B类不确定度评定方法。B类评定标准不确定度的信息来源则很多, 信息可以来自: 校准证书、检定证书、生产厂的说明书、检测依据的标准、引用手册的参考数据、以前测量的数据、相关材料特性的知识等。信息来源于检定证书和校准证书, 通常可以根据扩展不确定度和标准不确定度之间的关系, 校准或者检定证书给出被测量的扩展不确定度及其对应的置信概率时, 可以利用公式(1)得到被测量的标准不确定度。

$$u(x) = \frac{U(x)}{k_u} \quad (1)$$

式中,  $u(x)$ ——被测量  $X$  的标准不确定度;

$U(x)$ ——扩展不确定度;

$k_u$ ——包含因子。

若证书未给出被测量的分布, 根据国家计量技术规范 JJF1059-2012 [6] 的规定, 一般按正态分布考虑。

表 1 为正态分布情况下不同置信概率  $p$  对应的包含因子  $k_p$ 。

信息来源于其他资料或手册等, 通常可以知道被测量分布的极限范围, 即知道被测量  $X$  的可能值分布区间的半宽  $a$ , 即允许误差限的绝对值, 于是被测量  $X$  的标准不确定度可以表示为:

$$u(x) = \frac{a}{k_u} \quad (2)$$

式中,  $a$ ——被测量  $X$  的允许误差限的绝对值。

公式(2)中包含因子  $k_u$  的数值与被测量  $X$  的分布有关, 常见分布的包含因子见表 2 [4]。

在不确定度评定的最后, 无论是通过 A 类评定还是 B 类评定得到各个标准不确定度分量, 需要将各分量合成进而得到被测量的合成不确定度, 合成前必须确保所有不确定度分量都要用标准不确定度表示, 如果存在其他形式的分量, 则须将其换算为标准不确定度。合成时需要考虑各个输入量之间是否存在相关性, 以及数学模型是否存在显著的非线性。如果存在相关性, 则合成时需要考虑要加入相关项。若数学模型为非线性模型, 则合成时需要考虑是否需要加入高阶项。

### 3. 太阳能热水器的热性能计算公式

根据国家标准《家用太阳热水系统热性能实验方法》GB/T 18708-2002 [7] 和国家标准《家用太阳能热水系统技术条件》GB/T 19141-2011 [8] 的规定, 与太阳能热水器热性能计算相关的公式如下:

太阳能热水器单位轮廓采光面积的日有用得热量:

$$q_{17} = \frac{17c_{p,w}m_w(t_e - t_i)}{1000A_c H} \quad (3)$$

式中,  $q_{17}$ ——太阳辐照在  $17\text{MJ}/\text{m}^2$  的条件下, 太阳能热水器日得热量,  $\text{MJ}/\text{m}^2$ ;

$c_{p,w}$ ——水的比热,  $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ ;

**Table 1.** The relationship between the confidence probability  $p$  and the coverage factor  $k_p$  in the standard normal distribution  
**表 1.** 正态分布情况下置信概率  $p$  与包含因子  $k_p$  之间的关系

$p(\%)$	50	68.27	90	95	95.45	99	99.73
$k_p$	0.67	1	1.645	1.960	2	2.576	3

**Table 2.** Common coverage factor  $k_u$   
**表 2.** 常见分布的包含因子  $k_u$  值

分布类型	$k_u$
反正弦分布	$\sqrt{2}$
两点分布	1
矩形分布	$\sqrt{3}$
三角分布	$\sqrt{6}$
正态分布	3
梯形分布 $\beta = 0.71$	2

$m_w$ ——贮热水箱容水量, kg;  
 $t_e$ ——贮热水箱初始温度, °C;  
 $t_i$ ——贮热水箱结束温度;  
 $A_c$ ——轮廓采光面积, m<sup>2</sup>。  
 贮热水箱平均热损因数:

$$U_{SL} = \frac{U_S}{V_s} = \frac{\rho_w c_{p,w}}{\Delta\tau} \ln \left[ \frac{t_{is} - t_{as(av)}}{t_{fs} - t_{as(av)}} \right] \quad (4)$$

式中,  $U_{SL}$ ——贮热水箱平均热损因数, W/(m<sup>3</sup>·°C);

$U_S$ ——贮热水箱热损系数, W/°C;

$\rho_w$ ——水的密度, kg/m<sup>3</sup>;

$c_{p,w}$ ——水的比热, kJ/(kg·°C);

$V_s$ ——贮热水箱容水量, m<sup>3</sup>;

$t_{is}$ ——热损实验时水箱初始温度, °C;

$t_{fs}$ ——热损实验时水箱结束温度, °C;

$t_{as(av)}$ ——热损实验期间平均环境温度, °C;

$\Delta\tau$ ——热损实验持续时间, s。

太阳能热水器热性能也可用热效率表示, 由公式(3)可以得到太阳能热水器热效率的表达式为:

$$\eta = \frac{c_{p,w} m_w (t_e - t_i)}{1000 A_c H} = \frac{c_{p,w} (t_e - t_i)}{1000 H} \cdot \frac{m_w}{A_c} = \frac{c_{p,w} (t_e - t_i)}{1000 H} \cdot \frac{m_w}{L[(n-1)s + d]} \quad (5)$$

式中,  $\eta$ ——太阳能热水器热效率;

$s$ ——真空管之间的中心距, m;

$d$ ——真空管直径, m;

$n$ ——真空管支数;

$L$ ——真空管可以接受太阳辐照的长度, m。

## 4. 太阳能热水器热性能测量不确定度评定

### 4.1. 太阳能热水器日有用得热量测量不确定度评定

根据公式(3), 可以得到公式(6),

$$q_{17} = \frac{17 c_{p,w} m_w (t_e - t_i)}{1000 A_c H} = \frac{17 q_s}{1000 A_c H} \quad (6)$$

式中,  $q_s = c_{p,w} m_w (t_e - t_i)$ , 得热量, MJ。

则太阳能热水器热效率的测量不确定度与  $q_s$ 、 $A_c$  和  $H$  的测量不确定度有关。得热量  $q_s$  的测量仪器设备、集热器轮廓采光面积  $A_c$  的测量仪器设备和太阳辐照  $H$  测量仪器设备各不相同, 从测量的角度, 这三个变量的测量是相互独立的, 即得热量  $q_s$ 、 $A_c$  和  $H$  之间相互独立, 则太阳能热水器效率的相对标准不确定度为:

$$u_{rel}^2(q_{17}) = u_{rel}^2(q_s) + u_{rel}^2(A_c) + u_{rel}^2(H) \quad (7)$$

式中,  $u_{rel}(q_{17})$ ——太阳能热水器日用得热量测量的相对标准不确定度;

$u_{rel}(A_c)$ ——轮廓采光面积测量的相对标准不确定度；

$u_{rel}(H)$ ——太阳辐照测量的相对标准不确定度。

#### 4.1.1.1. 得热量 $q_s$ 的测量不确定度评定

根据得热量的计算公式可知，为非线性模型，由于  $c_{p,w}$  为常数，不是变量， $m_w$  的测量与  $t_e$ ， $t_i$  无关，而  $t_e$  和  $t_i$  的测量存在相关性，为了避免处理相关性，将  $(t_e - t_i)$  视为一个变量进行处理，得热量的方差表示为：

$$u^2(q_s) = c_{p,w}^2 (t_e - t_i)^2 u^2(m_w) + c_{p,w}^2 m_w^2 u^2(t_e - t_i) + c_{p,w}^2 u^2(m_w) u^2(t_e - t_i) \quad (8)$$

式中， $u(q_s)$ ——得热量的标准不确定度，MJ；

$u(m_w)$ ——质量测量的标准不确定度，kg；

$u(t_e - t_i)$ ——温差的量的标准不确定度， $^{\circ}\text{C}$ 。

以上的处理过程仅从数学角度进行了求方差的处理，由于温度和质量物理单位不同，为了便于理解，可以以相对标准不确定度的方式表示：

$$\begin{aligned} u_{rel}^2(q_s) &= \frac{u^2(q_s)}{q_s^2} = \frac{c_{p,w}^2 (t_e - t_i)^2 u^2(m_w) + c_{p,w}^2 m_w^2 u^2(t_e - t_i) + c_{p,w}^2 u^2(m_w) u^2(t_e - t_i)}{c_{p,w}^2 m_w^2 (t_e - t_i)^2} \\ &= \frac{(t_e - t_i)^2 u^2(m_w) + m_w^2 u^2(t_e - t_i) + u^2(m_w) u^2(t_e - t_i)}{m_w^2 (t_e - t_i)^2} \\ &= \left[ \frac{u(m_w)}{m_w} \right]^2 + \left[ \frac{u(t_e - t_i)}{(t_e - t_i)} \right]^2 + \left[ \frac{u(m_w)}{m_w} \right]^2 \left[ \frac{u(t_e - t_i)}{(t_e - t_i)} \right]^2 \\ &= u_{rel}^2(m_w) + u_{rel}^2(m_w) \left[ \frac{u(t_e - t_i)}{(t_e - t_i)} \right]^2 + \left[ \frac{u(t_e - t_i)}{(t_e - t_i)} \right]^2 \end{aligned} \quad (9)$$

式中， $u_{rel}(q_s)$ ——得热量的相对标准不确定度；

$u_{rel}(m_w)$ ——质量测量的相对标准不确定度。

根据对质量测量的不确定度的分析，在电子秤的量程范围内，最大允许偏差均为  $\pm 0.03$  kg，最小称量数值为 20 kg，此时标准不确定度最大，参照公式(2)计算可得此时相对标准不确定度为：

$$u_{rel}(20) = \frac{0.015 \text{ kg}}{20 \text{ kg}} = 0.075\% \quad (10)$$

即，

$$u_{rel}(m) = 0.075\% \quad (11)$$

根据测试方法要求  $(t_e - t_i)$  测量准确度为  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ，温度测量通常可按矩形分布考虑，查表 2 可得包含因子为  $\sqrt{3}$ ，则：

$$u(t_e - t_i) = \frac{0.10^{\circ}\text{C}}{\sqrt{3}} \quad (11)$$

将公式(10)和(11)带入公式(9)得：

$$u_{rel}^2(q_s) = 0.5625 \times 10^{-6} + \frac{0.333583 \times 10^{-2}}{(t_e - t_i)^2} \quad (12)$$

将公式(12)开方得

$$u_{rel}(q_s) = \sqrt{0.5625 \times 10^{-6} + \frac{0.333583 \times 10^{-2}}{(t_e - t_i)^2}} \quad (13)$$

从公式(13)可以看出,得热量相对标准不确定度为贮热水箱温升的函数。根据公式(13)可以得到图 1。从图 1 可以看出随着温升的增加,不确定度减小,根据 GB/T 19141 [8]的规定,温升至少为 25℃,此时得热量的相对标准不确定度最大,将 $(t_e - t_i) = 25^\circ\text{C}$ 带入公式(13)得:

$$u_{rel}(q_s) = 0.24\% \quad (14)$$

通过以上的分析可知,得热量的最大相对标准不确定度为 0.24,取包含因子为 $k_u=2$ ,于是得热量的扩展不确定度为:

$$U(q_s) = 0.48\% \quad (k_u = 2) \quad (15)$$

#### 4.1.2. 轮廓采光面积 $A_c$ 的测量不确定度评定

根据《家用太阳能热水系统技术条件》GB/T 19141-2011 [8],轮廓采光面积  $A_c$  可由公式(16)计算。

$$A_c = L \times W \quad (16)$$

式中,  $W$ ——集热器宽度, m。

由于集热器长度  $L$  和宽度  $W$  均由同一把钢卷尺测量,因此  $L$  和  $W$  存在相关性,则轮廓采光面积的相对标准不确定度为:

$$u_{rel}(A_c) = \sqrt{u_{rel}^2(L) + 2r(L,W)u_{rel}(L)u_{rel}(W) + u_{rel}^2(W)} \quad (17)$$

相关系数  $r(L,W)$  按 1 考虑,则公式(17)变为:

$$u_{rel}(A_c) = u_{rel}(L) + u_{rel}(W) \quad (18)$$

长度的测量值一般为 1.7 m,宽度的测量值最大为 2 m,根据钢卷尺的标定证书,测量长度所用的钢卷尺,测量范围为 4 m,其校准证书给出的不确定度为:

$$U_l = 30 + 5L \quad (k_u = 2) \quad (19)$$

式中,  $U_l$ ——钢卷尺的不确定度,  $\mu\text{m}$ ;

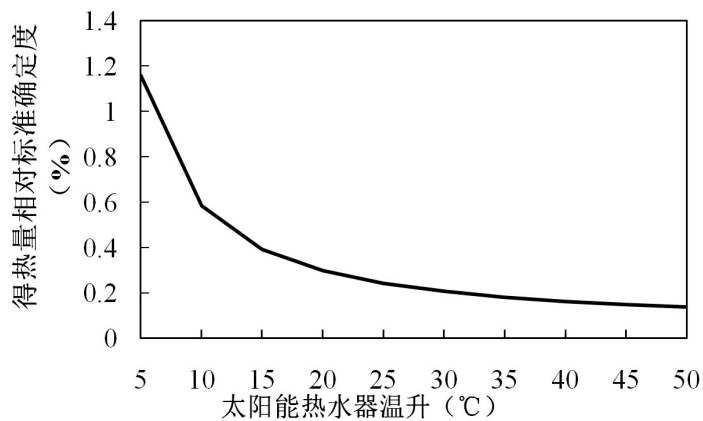


Figure 1. The relative standard uncertainty of daily heat gain with the temperature increase in storage tank

图 1. 得热量的相对标准不确定度与水箱温升的关系图

可得公式(2)和(19)可得长度的相对测量不确定度为:

$$u_{rel}(L) = u_{rel}(1.7) = \frac{30 + 5 \times 1.7}{2 \times 1700000} = 1.13 \times 10^{-3}\% \quad (20)$$

宽度的相对测量不确定度为:

$$u_{rel}(W) = u_{rel}(2) = \frac{30 + 5 \times 10^{-6} \times 2000000}{2 \times 2000000} = 1 \times 10^{-3}\% \quad (21)$$

将公式(20)和公式(21)带入公式(18)得:

$$u_{rel}(A_c) = u_{rel}(L) + u_{rel}(W) = 1.13 \times 10^{-3}\% + 1 \times 10^{-3}\% = 2.13 \times 10^{-3}\% \quad (22)$$

#### 4.1.3. 辐照 $H$ 的测量不确定度评定

总辐射表检定证书给出灵敏度的不确定度为 $\pm 2.6\%$ , 包含因子为 $k_u = 2$ , 根据公式(1), 可得辐射测量的相对标准不确定度 $u(H)$ 为:

$$u(H) = \frac{\pm 2.6\%}{2} = \pm 1.3\% \quad (23)$$

式中,  $u(H)$ ——总辐射表的标准不确定度。

#### 4.1.4. 日有用得热量测量不确定度评定

将公式(15)、公式(22)和公式(23)带入公式(7)得:

$$u_{rel}^2(q_{17}) = u_{rel}^2(q_s) + u_{rel}^2(A_c)^2 + u_{rel}^2(H)^2 = (0.24\%)^2 + (2.13 \times 10^{-3}\%)^2 + (1.3\%)^2 \quad (24)$$

将公式(2-52)开方得到太阳能热水器日有用得热量的相对标准不确定度:

$$u_{rel}(\eta) = \sqrt{(0.24\%)^2 + (2.13 \times 10^{-3}\%)^2 + (1.3\%)^2} = 1.32\% \quad (25)$$

则太阳能热水器日有用得热量的扩展不确定度为:

$$U(\eta) = 2.64\% \quad (k_u = 2) \quad (26)$$

比较公式(23)和(25)发现, 太阳能热水器日有用得热量的不确定度与太阳辐照的测量不确定度接近, 因此在实验过程中应选择准确度较高的太阳辐射表, 减少测量过程中的测量误差。

## 4.2. 太阳能热水器贮热水箱热损系数/平均热损因数测量不确定度评定

由公式(4)可知, 太阳能热水器贮热水箱热损系数与贮热水箱体积、降温时间、热损实验开始时水箱温度、热损实验结束时水箱温度和环境温度有关, 平均热损因数与降温时间、热损实验开始时水箱温度、热损实验结束时水箱温度和环境温度有关, 可以放在一起进行测量不确定度评定。

贮热水箱热损系数和平均热损因数的数学模型为非线性模型, 展开项还有高阶项, 根据文献[4]-[6]的相关规定, 为了避免处理高阶项, 从不确定度最本质的角度评定贮热水箱热损系数和平均热损因数。

从测试过程中看, 热损实验开始时水箱温度、热损实验结束时水箱温度和环境温度测量过程相关。它们之间的相关系数按最大考虑, 即热损实验开始时水箱温度、热损实验结束时水箱温度和环境温度互相之间的相关系数均为 1。根据国家太阳能热水器质量监督检验中心(北京)的测试经验, 热损实验开始时水箱温度一般在 $50^\circ\text{C}$ , 整个热损实验期间环境温度在 $8^\circ\text{C}$ 时(通常情况下测试期间环境温度在 $20^\circ\text{C}$ 左右), 贮热水箱温降在 $5^\circ\text{C}$ 左右, 即热损实验结束时水箱温度为 $45^\circ\text{C}$ 。以上条件下贮热水箱热损系数和平均热损因数的不确定度最大。

根据前面的分析, 温度测量的准确度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ , 按矩形分布考虑, 热损实验开始时水箱温度相对标准不确定度为:

$$u_{rel}(50^\circ\text{C}) = \frac{0.1}{50\sqrt{3}} = 0.07\% \quad (27)$$

热损实验结束时水箱温度相对标准不确定度为:

$$u_{rel}(50^\circ\text{C}) = \frac{0.1}{45\sqrt{3}} = 0.07\% \quad (28)$$

环境温度相对标准不确定度为:

$$u_{rel}(8^\circ\text{C}) = \frac{0.1}{8\sqrt{3}} = 0.42\% \quad (29)$$

则贮热水箱热损系数和平均热损因数标准不确定度评定过程中温度测量相对不确定度为:

$$u_{rel}(t) = u_{rel}(50) + u_{rel}(45) + u_{rel}(8) = 0.07\% + 0.07 + 0.42\% = 0.56\% \quad (30)$$

贮热水箱容水量  $V_s$  可以通过测量容水质量  $m_w$  来获得, 因此贮热水箱容水量的标准不确定度等于容水质量的测量不确定度, 即:

$$u_{rel}(V_s) = u_{rel}(m_w) = 0.075\% \quad (31)$$

根据公式(2), 计时的测量的准确度应为 $\pm 0.2\%$ , 按正态分布考虑, 则包含因子  $k_u = 2$ , 则计时的相对标准不确定度为:

$$u_{rel}(\Delta\tau) = \frac{0.2\%}{2} = 0.1\% \quad (32)$$

贮热水箱热损系数的相对标准不确定度为:

$$u_{rel}(U_s) = \sqrt{u_{rel}^2(V_s) + u_{rel}^2(\Delta\tau) + u_{rel}^2(t)} \quad (33)$$

将公式(30)、(31)和(32)带入公式(33)得到

$$u_{rel}(U_s) = \sqrt{u_{rel}^2(V_s) + u_{rel}^2(\Delta\tau) + u_{rel}^2(t)} = \sqrt{(0.075\%)^2 + (0.1\%)^2 + (0.56\%)^2} = 0.57\% \quad (34)$$

则贮热水箱热损系数的扩展不确定度为:

$$U(U_s) = 1.14\% \quad (k_u = 2) \quad (35)$$

贮热水箱平均热损因数的相对标准不确定度为:

$$u_{rel}(U_{sL}) = \sqrt{u_{rel}^2(\Delta\tau) + u_{rel}^2(t)} \quad (36)$$

将公式(30)和(32)带入公式(36)得到:

$$u_{rel}(U_{sL}) = \sqrt{u_{rel}^2(\Delta\tau) + u_{rel}^2(t)} = \sqrt{(0.1\%)^2 + (0.56\%)^2} = 0.57\% \quad (37)$$

则贮热水箱平均热损因数的扩展不确定度为:

$$U(U_{sL}) = 1.14\% \quad (k_u = 2) \quad (38)$$

对比公式(30), (36)和(38), 可以看出, 贮热水箱热损系数和平均热损因数的不确定度与温度测量的不确定度较为接近。



## 5. 结论

综上所述,使用太阳能热水器热性能检测装置的测量结果不确定度评定结果如下:

- (1) 得热量的扩展不确定度为:  $U(q_s) = 0.48\%$  ( $k_u = 2$ );
- (2) 太阳能热水器热效率的扩展不确定度为:  $U(\eta) = 2.64\%$  ( $k_u = 2$ );
- (3) 太阳辐照为  $17 \text{ MJ/m}^2$  时单位面积日有用得热量  $q_{17}$  的扩展不确定度为:  $U(q_{17}) = 2.64\%$  ( $k_u = 2$ );
- (4) 贮热水箱热损系数的扩展不确定度为:  $U(U_s) = 1.14\%$  ( $k_u = 2$ );
- (5) 贮热水箱平均热损因数的扩展不确定度为:  $U(U_{sL}) = 1.14\%$  ( $k_u = 2$ )。

通过对太阳能热水器热性能的测量不确定度分析还可以得到:总辐射表的测量不确定度对于日有用得热量的测量不确定度影响较大,而在贮热水箱热损因数测量不确定度分析过程中发现,温度传感器的测量不确定度对贮热水箱热损因数测量不确定度影响较大。

## 6. 致谢

本文的研究内容受到了国家“十二五”科技支撑计划课题太阳能吸收膜及平板集热器检测技术研究(2015BAA02B04)和北京建筑大学节能减排协调创新中心的资助,同时对国家太阳能热水器质量监督检验中心(北京)黄祝连,张磊,王聪辉等人的辛勤工作表示感谢。

## 参考文献 (References)

- [1] 国家质量监督检验总局. GB26969-2011 家用太阳能热水系统能效限定值及效率等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [2] 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 中华人民共和国国家质量监督检验总局, 中国认证认可监督管理委员会. 2012年第19号公告.
- [3] He, T., Zhang, L., Deng, Y., Huang, Z.L., Wang, X., Wang, M., Zhang, X.Y. and Zheng, R.C. (2012) Test Method and Compact Facility for Thermal Performance and Energy Efficiency Grades of Compact Solar Water Heaters. *Energy Procedia*, **30**, 1365-1371. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2012.11.150>
- [4] 倪育才. 实用测量不确定度评定[M]. 北京: 中国计量出版社, 2004.
- [5] 国家质量监督检验总局. JJF 1033-2008 计量标准考核规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [6] 国家质量监督检验总局. JJF 1059-2012 测量不确定度评定与表示[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [7] 国家质量监督检验总局. GB/T 18708-2002 家用太阳热水系统热性能实验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [8] 国家质量监督检验总局. GB/T 19141-2011 家用太阳能热水系统技术条件[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.