

# 团 体 标 准

T/GDCKCJH 087—2024

## 稳态传热性能测量系统校准规范

Calibration specification for steady-state heat transfer performance  
measurement system

2024-08-12 发布

2024-08-15 实施



## 目 次

前言.....	II
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 测量系统概述.....	2
5 计量特性.....	4
6 校准条件.....	4
7 校准项目与校准方法.....	5
8 校准结果表达.....	6
9 复校时间间隔.....	7
附录 A (资料性) 原始记录格式.....	8
附录 B (资料性) 校准证书内页格式.....	9
附录 C (资料性) 稳态传热性能测量系统传热系数测量不确定度评定示例.....	10

## 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》、JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》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。

本文件由广东省测量控制技术与装备应用促进会提出并归口。

本文件起草单位：广东省建筑科学研究院集团股份有限公司、广东省建设工程质量安全检测总站有限公司、广州能源检测研究院、广东省建筑材料研究院有限公司、太科技有限公司、广东省测量控制技术与装备应用促进会、广东省计量科学研究院、华南理工大学、广东省有色工业建筑质量检测站有限公司、广东正昇检测技术有限公司。

本文件主要起草人：谢福金、郑靓、谢小芳、张超前、胡岚、曾康洋、戈海彪、杜文淳、钟锦、万勇、林鹏、王恒昌、潘渊、黄启云、邓耀祥、胡健、李坚、黄有龙、张加广。

本文件为首次发布。

# 稳态传热性能测量系统校准规范

## 1 范围

本文件规定了稳态传热性能测量系统(以下简称测量系统)的术语和定义、测量系统概述、校准条件、校准项目与校准方法、校准结果表达、复校时间间隔。

本文件适用于基于防护热箱法的建筑构件(窗除外)稳态传热性能测量系统的校准。

## 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 13475-2008 绝热稳态传热性质的测定标定和防护热箱法

GB 50176-2016 民用建筑热工设计规范

JJF 1001-2011 通用计量术语及定义

JJF 1059.1 测量不确定度评定与表示

## 3 术语和定义

JJF 1001-2011、GB 50176-2016 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**热阻 thermal resistance**

表征围护结构本身或其中某层材料阻抗传热能力的物理量,单位:  $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ 。

[来源: GB 50176-2016, 2.1.7]

### 3.2

**传热阻 heat transfer resistance**

热传递过程中的阻碍因素,由物体之间的温度差、热导率、物体厚度和热阻系数等因素决定,单位:  $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ 。

[来源: GB 50176-2016, 2.1.8]

### 3.3

**导热系数 thermal conductivity**

在稳态条件和单位温差作用下,通过单位厚度、单位面积匀质材料的热流量,单位:  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

[来源: GB 50176-2016, 2.1.5]

3.4

**传热系数 heat transfer coefficient**

在稳态条件下，围护结构两侧空气为单位温差时，单位时间内通过单位面积传递的热量。传热系数与传热阻互为倒数，单位： $W/(m^2 \cdot K)$ 。

[来源：GB 50176-2016，2.1.9]

3.5

**表面换热阻 surface resistance of heat transfer**

物体表面层在对流换热和辐射换热过程中的热阻，单位： $(m^2 \cdot K)/W$ 。

[来源：GB 50176-2016，2.1.14]

4 测量系统概述

4.1 概述

稳态传热性能测量系统是依据 GB/T 13475-2008 研制、生产，采用防护热箱法原理，用于测定各种材料的传热系数，依据一维稳态传热原理，模拟围护结构构件传热，将构件置于不同温度场的两箱体间，热箱模拟室内或夏季室外情况，冷箱模拟室外或夏季室内情况；运行若干小时达稳定状态，形成稳定温场、速度场后，测量试件两侧及相关部位的温度、温差和热箱输入功率等主参数，可算出试件传热系数，测量系统典型结构见图 1。

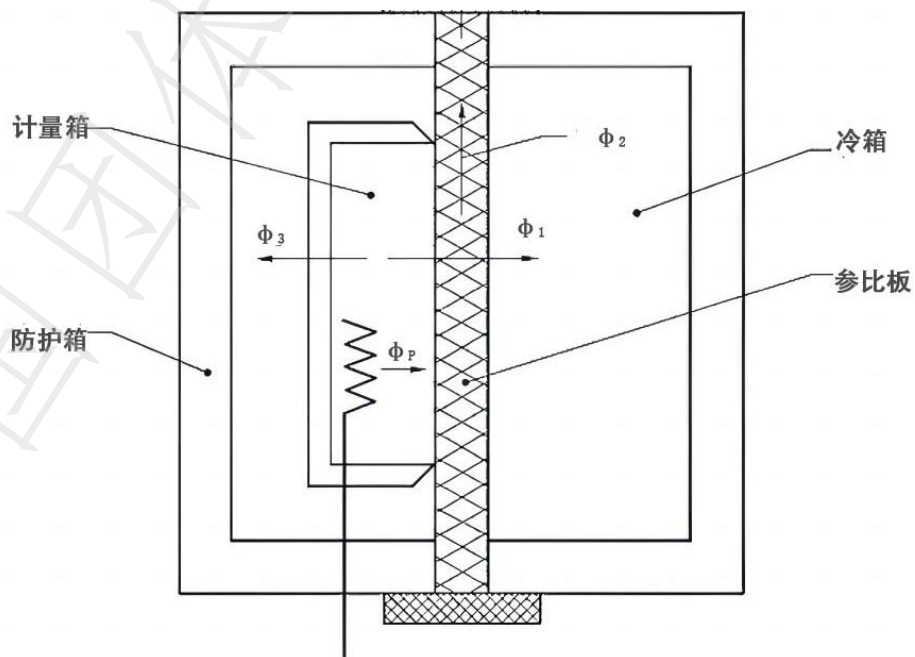


图 1 稳态传热性能测量系统典型结构图

测量系统的校准方法为：借助导热系数参比板来校准稳态传热性能测量系统的传热系数，具体换算参考 GB 50176-2016 的 3.4 进行。

#### 4.2 传热阻 $R_0$ 计算

传热阻  $R_0$  按式 (1) 计算：

$$R_0 = R_i + R + R_e \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中：

$R_0$  ——传热阻， $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ ；

$R_i$  ——内表面换热阻， $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ ；

$R$  ——平壁热阻， $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ ；

$R_e$  ——外表面换热阻， $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ 。

内表面换热阻 $R_i$ 参考表 1 取值。

表 1 内表面换热阻 $R_i$ 参考值

适用季节	表面特征	内表面换热阻 $R_i / (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$
冬季和夏季	墙面、地面，表面平整或有肋状突出物的顶棚，当 $h/L \leq 0.3$ 时	0.11
	有肋状突出物的顶棚，当 $h/L > 0.3$ 时	0.13
注：表中 $h$ 为肋高，取两位小数，单位：m； $L$ 为肋间净距，取两位小数，单位：m。		

外表面换热阻 $R_e$ 参考表 2 取值。

表 2 外表面换热阻 $R_e$ 参考值

适用季节	表面特征	内表面换热阻 $R_i / (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$
冬季和夏季	外墙、屋面与室外空气直接接触的地面	0.04
	与室外空气相通的不采暖地下室上面的楼板	0.06
	闷顶、外墙上无窗的不采暖地下室上面的楼板	0.08
	外墙上无窗的不采暖地下室上面的楼板	0.17
夏季	外墙和屋面	0.05

#### 4.3 平壁热阻的计算

平壁热阻按式 (2) 计算：

$$R = \frac{\delta}{\lambda} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中：

- $R$  ——平壁热阻,  $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ ;
- $\delta$  ——材料层的厚度,  $\text{m}$ ;
- $\lambda$  ——材料的导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

#### 4.4 传热系数 $K$ 计算

传热系数  $K$ 按式(3)计算:

$$K = \frac{1}{R_0} \dots\dots\dots(3)$$

式中:

- $K$  ——传热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;
- $R_0$  ——传热阻,  $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ 。

根据式(1)、式(2)、式(3), 得到式(4)计算传热系数  $K$  :

$$K = \frac{1}{R_0} = \frac{1}{R_i + \delta/\lambda + R_e} \dots\dots\dots(4)$$

### 5 计量特性

- 5.1 温度探头示值误差: 不超过 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。
- 5.2 传热系数示值误差: 不超过 $\pm 5\%$ 。
- 5.3 传热系数示值重复性: 不超过 $2\%$ 。

### 6 校准条件

#### 6.1 校准环境条件

环境温度:  $15^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$ ; 相对湿度: 不大于 $80\%$ 。

#### 6.2 测量标准及其他设备

##### 6.2.1 温度示值误差校准用标准器

温度示值误差校准用标准器如下:

- a) 标准铂电阻: 二等标准铂电阻温度计;
- b) 电测设备: 最大允许相对误差为 $\pm 3 \times 10^{-5}$ ;
- c) 恒温槽: 温度范围 $(-20 \sim 50)^\circ\text{C}$ , 温度波动性不大于 $0.2^\circ\text{C}/10 \text{ min}$ , 工作区域最大温差不超过 $0.2^\circ\text{C}$ 。

##### 6.2.2 传热系数示值误差校准用标准器:

传热系数示值误差校准用标准器如下:

- a) 附带标准样品证书的导热系数参比板，同时提供标准值，相对不确定度不大于 1%；
- b) 游标卡尺：测量范围(0~200)mm，最大允许误差为±0.04 mm；
- c) 导热系数测定仪：最大允许相对误差为±5%。

## 7 校准项目与校准方法

### 7.1 校准项目

稳态传热性能测量系统校准项目见表 3。

表 3 稳态传热性能测量系统项目一览表

序号	项目名称
1	外观及工作正常性检查
2	温度示值误差
3	传热系数示值误差

### 7.2 外观及工作正常性检查

检查被校测量系统的结构是否完整，应无影响正常工作的机械损伤等影响测量准确的因素，箱体无漏风。

### 7.3 温度示值误差

将温度探头及标准温度计插入恒温槽中，并确保它们都处于同一水平面上。在示值稳定 10 min 后，先读取标准温度计示值，再读取各被检温度探头的读数。读数顺序为其顺序为“标准→被检→被检→标准”，读取两个循环的数据，取 4 次读数平均值计算温度计示值误差。

按照式(5)计算温度示值误差：

$$\Delta T = \bar{T} - \bar{T}_s \quad \dots\dots\dots(5)$$

式中：

$\Delta T$  ——被校温度探头温度示值误差，℃；

$\bar{T}$  ——被校温度探头温度示值 4 次读数平均值，℃；

$\bar{T}_s$  ——标准温度计示值 4 次读数平均值，℃。

### 7.4 传热系数示值误差

传热系数示值误差测量可按下面的方法进行：

- a) 方法一：在稳态传热测量前，需将参比板在 105℃烘干 8 h，密封冷却。使用游标卡尺测量参比板厚度 $\delta$ 。根据系统构造和操作指南，将参比板安装于测试腔体，设定冷热箱温差在 20

$K \sim 50 \text{ K}$ 。并通过测量系统读取平均传热系数 $K$ ，重复测量 6 次，按式(6)计算传热系数 $\bar{K}$ 试件平均传热系数示值：

$$\bar{K} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_i \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中：

$\bar{K}$  ——稳态传热性能测量系统测得的试件平均传热系数示值， $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ；

$n$  ——测量次数，取  $n=6$ 。

按式(7)计算传热系数示值误差：

$$\Delta k = \frac{\bar{K} - K_s}{K_s} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中：

$\Delta k$  ——传热系数的相对示值误差，%；

$K_s$  ——参比板的传热系数证书值，按式(7)计算， $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

按式(8)计算传热系数 $\bar{K}$ 示值测量重复性：

$$s = \frac{1}{\bar{K}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_i - \bar{K})^2}{n-1}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中：

$s$  ——传热系数示值测量重复性，%；

$K_i$  ——传热系数第  $i$  个测量值， $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

- b) 方法二：用经过溯源的导热系数测定仪测定单一匀质材料的导热系数，用该单一匀质材料替代方法一中的参比板，测量厚度，干燥和冷却并安装妥善后按照试验方法设置冷热箱温度。用测量系统开始测试，按式(4)计算出单一匀质材料的传热系数，按式(7)计算稳态传热性能测量系统的相对示值误差，按式(8)计算传热系数示值的重复性。

## 8 校准结果表达

8.1 校准原始记录格式见附录 A，校准证书内页格式见附录 B。

8.2 校准后，出具校准证书。校准证书应至少包含以下信息：

- a) 标题：“校准证书”；
- b) 实验室名称和地址；
- c) 进行校准的地点(如果与实验室的地址不同)；
- d) 证书或报告的唯一性标识(如编号)，每页及总页数的标识；
- e) 客户的名称和地址；
- f) 被校准对象的描述和明确标识；
- g) 进行校准的日期，如果与校准结果的有效性和应用有关时，应说明被校对象的接收日期；

- h) 如果与校准结果的有效性应用有关时，应对被校样品的抽样程序进行说明；
- i) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- j) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
- k) 校准环境的描述；
- l) 校准结果及其测量不确定度的说明，其中测量系统传热系数测量不确定度依据 JJF 1059.1 进行评定，按附录 C 示例；
- m) 对校准规范的偏离的说明；
- n) 校准证书或校准报告签发人的签名、职务或等效标识；
- o) 校准结果仅对被校对象有效的声明；
- p) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书的声明。

## 9 复校时间间隔

建议复校时间间隔不超过 1 年。由于复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者、本身质量等诸多因素决定的，因此，用户可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔。

附录 A  
(资料性)  
原始记录格式

A.1 外观及工作正常性检查: \_\_\_\_\_

A.2 温度示值误差

校准点\_\_\_\_\_℃

探头编号					
标准温度计			被校温度探头示值		示值误差
电测值	温度值	平均值	温度值	平均值	/
(Ω)	(℃)	(℃)	(℃)	(℃)	(℃)

A.3 传热系数相对示值误差和重复性

导热系数参比板厚度\_\_\_\_\_m

标准值	示值				相对示值误差
/	序号	/	平均值	重复性	/
[W/(m <sup>2</sup> ·K)]	/	[W/(m <sup>2</sup> ·K)]	[W/(m <sup>2</sup> ·K)]	(%)	(%)
	示值 1				
	示值 2				
	示值 3				
	示值 4				
	示值 5				
	示值 6				

附 录 B  
(资料性)  
校准证书内页格式

B.1 外观及工作正常性检查: \_\_\_\_\_

B.2 温度示值误差

编 号	校准点(°C)	示值(°C)	标准值(°C)	示值误差(°C)	扩展不确定度°C ( $k=2$ )

B.3 传热系数相对示值误差和重复性

标准值 $W/(m^2 \cdot K)$	示值 $W/(m^2 \cdot K)$	相对示值误差 (%)	示值重复性 (%)	相对扩展不确定度( $k=2$ ) (%)

## 附录 C

(资料性)

## 稳态传热性能测量系统传热系数测量不确定度评定示例

## C.1 传热系数测定仪示值误差测量不确定度评定

## C.1.1 测量模型

传热系数测定仪相对示值误差按式(C.1)、式(C.2)计算:

$$\Delta K = \bar{K} - K_s \quad \dots\dots\dots (C.1)$$

$$\Delta k = \frac{\bar{K} - K_s}{K_s} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (C.2)$$

式中:

$\Delta K$ ——传热系数测定仪传热系数的示值误差, %;

$\bar{K}$ ——稳态传热性能测量系统测得的试件平均传热系数示值,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;

$K_s$ ——参比板的传热系数证书值,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;

$\Delta k$ ——传热系数的相对示值误差, %。

## C.1.2 不确定度方差及灵敏系数

由于  $K$  和  $K_s$  互不相关, 按式(C.3)计算传热系数测定仪示值误差的不确定度:

$$u(\Delta K) = \sqrt{C_1^2 u^2(K) + C_2^2 u^2(K_s)} \quad \dots\dots\dots (C.3)$$

式中:

$u(\Delta K)$ ——传热系数测定仪示值误差的不确定度,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;

$u(K)$ ——传热系数测定仪示值测量引入的不确定度,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;

$u(K_s)$ ——参比板引入的不确定度,  $W/(m \cdot K)$ 。

由于灵敏系数:

$$C_1 = 1,$$

$$C_2 = -1$$

所以:

$$u(\Delta K) = \sqrt{u^2(K) + u^2(K_s)} \quad \dots\dots\dots (C.4)$$

其中, 传热系数  $K$  按式(C.5)计算:

$$K = \frac{1}{R_0} = \frac{1}{R_i + R + R_e} = \frac{1}{R_i + \delta/\lambda + R_e} \quad \dots\dots\dots (C.5)$$

式中:

$R_0$ ——传热阻,  $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ ;

$R_i$ ——内表面换热阻,  $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ , 取 0.11;

$R$ ——平壁热阻,  $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ ;

$R_e$ ——外表面换热阻,  $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ , 取 0.05;

$\delta$ ——材料层的厚度, m;

$\lambda$ ——材料的导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

故有:

$$K = \frac{1}{(\delta/\lambda + 0.16)}$$

令  $R_0 = \delta\lambda^{-1} + 0.16$ , 则  $K = R_0^{-1}$ , 有灵敏系数:

$$c_1 = \frac{\partial K}{\partial \delta} = -\frac{1}{R_0^2} \times \frac{\partial R_0}{\partial \delta} = -\frac{1}{\lambda} \times \frac{1}{(\delta/\lambda + 0.16)^2}$$

$$c_2 = \frac{\partial K}{\partial \lambda} = -\frac{1}{R_0^2} \times \frac{\partial R_0}{\partial \lambda} = -\frac{1}{(\delta/\lambda + 0.16)^2} \times -\frac{\delta}{\lambda^2} = \frac{\delta}{\lambda^2(\delta/\lambda + 0.16)^2}$$

故:

$$u(K_s) = \sqrt{c_1^2 u^2(\delta) + c_2^2 u^2(\lambda)} \quad \dots\dots\dots (C. 6)$$

### C. 1. 3 不确定度来源分析

传热系数测定仪示值误差的不确定度来源主要由测量重复性引入的不确定度分量, 和参比板引入的不确定度分量; 测量参比板厚度带来的不确定度分量; 参比板由上一级定值引入的不确定度分量。

### C. 1. 4 示值误差测量结果不确定度评定

#### C. 1. 4. 1 测量重复性引入的不确定度分量 $u(K)$

选用一台稳态传热性能测试系统, 在相同情况下用参比板测量 10 次, 其中参比板的的传热系数为  $1.01712 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , 测得结果分别如下表 C. 1。

表 C. 1 稳态传热性能测量系统重复测量数据

测量次数	1	2	3	4	5
$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	0.97971	0.97403	1.0086	0.9687	0.98155
测量次数	6	7	8	9	10
$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	0.97821	0.98681	0.97821	0.96983	0.96887

平均值为  $0.97945 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , 按式 (C. 7) 计算示值的重复性的标准差  $s$ :

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_i - \bar{K})^2}{n-1}} = 0.02 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad \dots\dots\dots (\text{C. 7})$$

式中:

$s$  ——重复性测量的标准差,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

$K_i$  ——第  $i$  次稳态传热性能测量系统测得的试件平均传热系数示值,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;

$\bar{K}$  ——稳态传热性能测量系统测得的试件平均传热系数示值,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;

$n$  ——测量次数,  $n=6$ 。

因实际校准过程中取 6 次测量的平均值, 按式(C. 8) 计算测量重复性引入的不确定度:

$$u(K) = \frac{s}{\sqrt{n}} = 0.0082 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad \dots\dots\dots (\text{C. 8})$$

C. 1. 4. 2 测量参比板厚度引入的不确定度分量  $u(\delta)$

测量参比板厚度所使用到的仪器为游标卡尺, 测得厚度为 27.02 mm, 即为 0.027 m 游标卡尺最大允许误差为  $\pm 0.04 \text{ mm}$ , 取半宽区间, 按均匀分布, 按式(C. 9) 计算标准不确定度:

$$u(\delta) = \frac{0.04}{\sqrt{3}} = 2.3 \times 10^{-5} \text{ m} \quad \dots\dots\dots (\text{C. 9})$$

C. 1. 4. 3 导热系数参比板由上一级定值引入的不确定度分量  $u(\lambda)$

导热系数参比板证书得  $U = 0.0002 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,  $k = 2$ 。

按式(C. 10) 计算导热系数参比板由上一级定值引入的不确定度分量:

$$u(\lambda) = 0.0001 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}) \quad \dots\dots\dots (\text{C. 10})$$

C. 1. 5 合成标准不确定度

合成标准不确定度来源见表 C. 2。

表 C. 2 标准不确定度来源

标准不确定度来源	不确定度分量 (符号)	灵敏度系数 $c$	$u$	$ cu $
测量重复性引入的不确定度分量	$u(K)$	1	0.0082	0.0082
测量参比板厚度带来的不确定度分量	$u(\delta)$	$-\frac{1}{\lambda} \times \frac{1}{(\delta/\lambda+0.16)^2}$	$2.3 \times 10^{-5}$	0.00068
参比板定值引入的不确定度分量	$u(\lambda)$	$\frac{\delta}{\lambda^2(\delta/\lambda+0.16)^2}$	0.0001	0.0026

其中  $c_1 = -\frac{1}{\lambda} \times \frac{1}{(\delta/\lambda+0.16)^2} = -29.67$ ,  $c_2 = \frac{\delta}{\lambda^2(\delta/\lambda+0.16)^2} = 25.33$ 。

由于各输入量之间互为独立, 按式(C. 11) 计算合成不确定度  $u_c$ :

$$u_c = \sqrt{c_1^2 u^2(\delta) + c_2^2 u^2(\lambda)} = 0.00695 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \dots\dots\dots (\text{C. 11})$$

### C.1.6 扩展不确定度

扩展因子取  $k=2$ ，按式(C.12)计算扩展不确定度：

$$U_{rel}(\Delta k) = \frac{k \cdot u_c}{K} = \frac{2 \times 0.00695}{0.97945} \times 100\% = 1.4\% \dots\dots\dots (\text{C. 12})$$

## C.2 温度示值误差测量不确定度评定

### C.2.1 测量模型

按式(C.13)计算传热系数测定仪示值误差：

$$\Delta T = T - T_s \dots\dots\dots (\text{C. 13})$$

式中：

$\Delta T$ ——被校温度探头温度示值误差， $^{\circ}\text{C}$ ；

$T$ ——被校温度探头温度示值， $^{\circ}\text{C}$ ；

$T_s$ ——标准温度计温度示值， $^{\circ}\text{C}$ 。

### C.2.2 不确定度及灵敏系数

按式(C.14)计算温度示值误差测量不确定度：

$$u(\Delta T) = \sqrt{c_1^2 u^2(T) + c_2^2 u^2(T_s)} \dots\dots\dots (\text{C. 14})$$

式中：

$u(\Delta T)$ ——被校温度探头温度示值误差测量不确定度， $^{\circ}\text{C}$ ；

$u(T)$ ——被校温度探头温度示值测量引入的不确定度， $^{\circ}\text{C}$ ；

$u(T_s)$ ——标准温度计温度示值测量引入的不确定度， $^{\circ}\text{C}$ 。

由于 $T$ 和 $T_s$ 互不相关，其灵敏系数分别为：

$$C_1 = 1,$$

$$C_2 = -1$$

故温度示值误差测量不确定度按式(C.15)计算：

$$u(\Delta T) = \sqrt{u^2(T) + u^2(T_s)} \dots\dots\dots (\text{C. 15})$$

### C.2.3 不确定度来源分析

温度示值误差的不确定度来源主要有：

- a) 被校温度探头测量重复性；
- b) 标准温度计允许误差；
- c) 温场的均匀度；
- d) 温场的波动度。

## C.2.4 示值误差测量结果不确定度评定

C.2.4.1 测量重复性引入的不确定度分量  $u(T)$ 

将温度探头和标准温度计插入恒温槽，在 30℃ 稳定后测量 10 次，测得结果分别如表 C.3。

表 C.3 温度重复性测量

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
温度/℃	30.0	30.0	30.0	30.1	30.0	30.0	30.0	30.1	30.0	30.0

平均值为 30.02℃，按式 (C.16) 计算单次测量实验标准偏差：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2}{n-1}} = 0.042^\circ\text{C} \quad \dots\dots\dots (C.16)$$

实际以两次算术平均值作为测量结果，按式 (C.17) 计算测量重复性引入的不确定度分量：

$$u(T) = \frac{s}{\sqrt{n}} = 0.03^\circ\text{C} \quad \dots\dots\dots (C.17)$$

C.2.4.2 标准温度计允许误差引入的不确定度分量  $u_1(T_s)$ 

标准温度计的允许误差为  $\pm 0.10^\circ\text{C}$ ，按均匀分布处理，按式 (C.18) 计算标准温度计允许误差引入的不确定度分量：

$$u_1(T_s) = \frac{0.10^\circ\text{C}}{\sqrt{3}} = 0.06^\circ\text{C} \quad \dots\dots\dots (C.18)$$

C.2.4.3 温场的均匀度引入的不确定度分量  $u_2(T_s)$ 

温场的均匀度不大于  $0.2^\circ\text{C}$ ，其区间半宽为  $0.1^\circ\text{C}$ ，按均匀分布处理，按照式 (C.19) 计算温场的均匀度引入的不确定度分量。

$$u_2(T_s) = \frac{0.1^\circ\text{C}}{\sqrt{3}} = 0.06^\circ\text{C} \quad \dots\dots\dots (C.19)$$

C.2.4.4 温场的波动度引入的不确定度分量  $u_3(T_s)$ 

温场的波动度不大于  $0.2^\circ\text{C}$ ，其区间半宽为  $0.1^\circ\text{C}$ ，按均匀分布处理，按式 (C.20) 计算温场的波动度引入的不确定度分量：

$$u_3(T_s) = \frac{0.1^\circ\text{C}}{\sqrt{3}} = 0.06^\circ\text{C} \quad \dots\dots\dots (C.20)$$

## C.2.5 合成标准不确定度

合成标准不确定度来源见表 C.4。

表 C.4 标准不确定度来源

输入量	标准不确定度来源	标准不确定度(°C)	灵敏系数	不确定度分量(°C)
$T$	测量重复性	0.03	1	0.03
$T_s$	标准温度计允许误差	0.06	-1	0.104
	温场的均匀度	0.06		
	温场的波动度	0.06		

由于各输入量之间互为独立，按式(C.21)计算温场的波动引入的合成不确定度：

$$u(\Delta T) = \sqrt{c_1^2 u^2(T) + c_2^2 u^2(T_s)} = 0.11 \text{ °C} \quad \dots\dots\dots (C.21)$$

#### C.2.6 扩展不确定度

扩展因子取  $k=2$ ，按式(C.22)计算扩展不确定度：

$$U(\Delta T) = k \cdot u(\Delta T) = 0.2 \text{ °C} \quad \dots\dots\dots (C.22)$$