

# T/CSMT

团 体 标 准

T/CSMT-00\* —20××

## 热膜剪应力测量系统校准规范

Calibration Specification of Shear Stress Measurement Systems of Thermal  
Film

(征求意见稿)

XXXX—XX—XX 发布

XXXX—XX—XX 实施

中国计量测试学会 发布

目 录

前言.....II

1 范围..... 1

2 规范性引用文件..... 1

3 术语和定义..... 1

3.1 热膜..... 1

3.2 剪应力..... 1

3.3 热膜剪应力测量系统..... 1

4 概述..... 1

4.1 热膜剪应力测量系统原理..... 1

4.2 热膜剪应力测量系统校准原理..... 2

5 计量特性..... 2

5.1 示值相对误差..... 2

5.2 回程误差..... 2

5.3 稳定性..... 3

6 校准条件..... 3

6.1 环境条件..... 3

6.2 校准设备要求..... 3

7 校准项目..... 4

8 校准方法..... 4

8.1 校准前的准备..... 4

8.1.1 外观检查..... 4

8.1.2 校准前准备..... 4

8.2 示值相对误差..... 4

8.3 回程误差..... 5

8.4 稳定性..... 5

9 校准结果的处理..... 6

10 校准周期..... 6

附录 A （资料性附录）校准记录模板 ..... 7

## 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。

本文件由北京振兴计量测试研究所提出。

本文件由中国计量测试学会归口。

本文件起草单位：北京振兴计量测试研究所、厦门大学、中国计量测试学会。

本文件主要起草人：付政伟、王凌云、张琦、李炜鹏、江宇璇、张佳楠、赵玲玲。

本文件的附录A为资料性附录。

# 热膜剪应力测量系统校准规范

## 1 范围

本文件规定了热膜剪应力测量系统的计量特性、校准条件、校准项目、校准方法、校准结果的处理和校准周期。

本文件适用于1Pa~100Pa范围内热膜剪应力测量系统的校准，其他范围内的热膜剪应力测量系统的校准亦可参考使用。

## 2 规范性引用文件

本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。

JJG 860-2015 压力传感器（静态）检定规程

JJG 875-2019 数字压力计 检定规程

JJF 1059.1-2012 测量不确定度评定与表示规范

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1 热膜

能按照一定规律将流体的剪应力作用转换为电信号输出的膜片式传感器件。

### 3.2 剪应力

流体流经固体表面时在固体表面产生的、平行于流体流动方向的切向应力。

注：本标准所提剪应力为流体壁面剪应力，不同于材料力学中由于材料弯曲产生的剪应力。

### 3.3 热膜剪应力测量系统

热膜剪应力测量系统由热膜剪应力传感器和数据采集/分析设备构成，通过传感器的输出量的变化实现剪应力测量的系统。

## 4 概述

### 4.1 热膜剪应力测量系统原理

热膜剪应力测量系统的原理是：如图1所示，当流体流经热膜剪应力传感器表面时，通过测量传感器的输出量的变化即可得出流体流动产生的剪应力的大小。

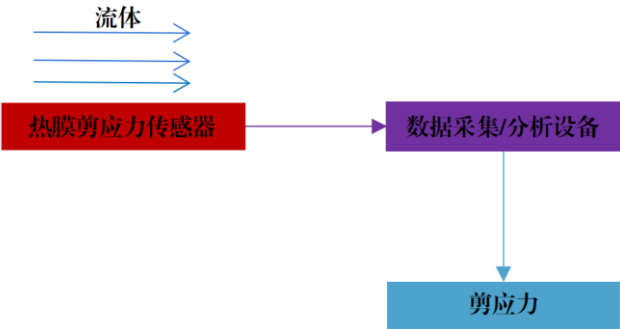


图 1 热膜剪应力测量系统示意图

4.2 热膜剪应力测量系统校准原理

如图2所示，热膜剪应力测量系统校准系统包含气源、减压器、流量计、长圆管道测试平台、差压计和数据采集/分析设备。当流体流经热膜剪应力传感器表面时，由于流体在长圆管道内是充分发展的湍流流动，传感器附近的局部剪应力不发生变化，此时传感器两端的压力损失（压力差）与剪应力平衡，通过测量传感器正上方测压孔两端的压力差即可由公式(1)得出对应的剪应力的大小。

$$\tau_w = \frac{D}{4L} \cdot \Delta P \tag{1}$$

式中：

$\tau_w$ ——流经热膜剪应力传感器上方的流体流动产生的剪应力的大小，Pa；

$D$ ——长圆管道圆截面内径，mm；

$L$ ——长圆管道的长度，mm；

$\Delta P$ ——流体流经热膜剪应力传感器表面时传感器正上方测压孔两端的压力差，Pa。

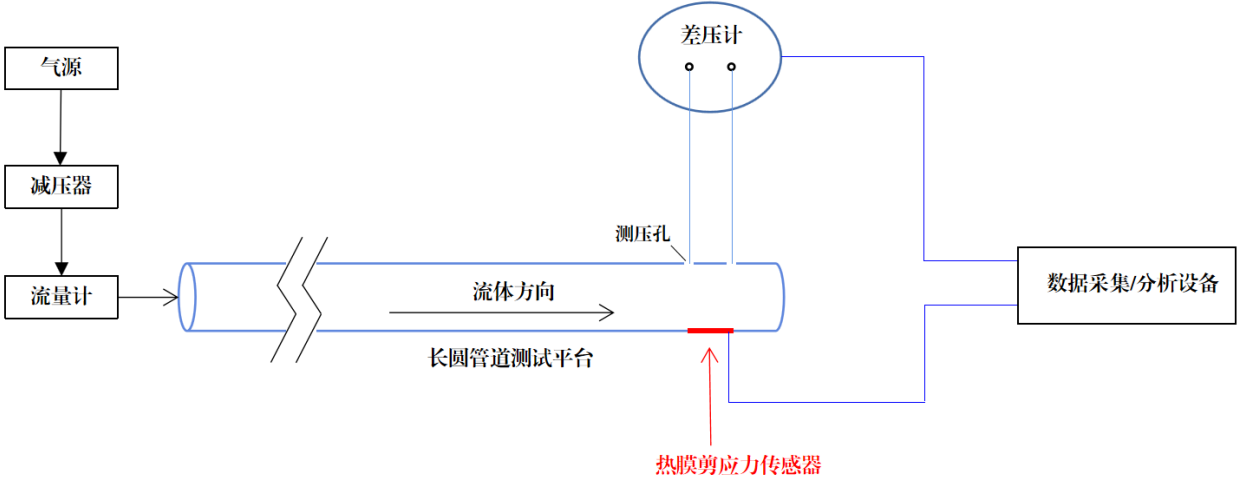


图 2 热膜剪应力测量系统校准原理示意图

5 计量特性

5.1 示值相对误差

热膜剪应力测量系统的示值相对误差不大于 5%FS。

5.2 回程误差

热膜剪应力测量系统的回程误差不大于 5%FS。

### 5.3 稳定性

60s 内热膜剪应力测量系统的稳定性不大于 5%FS。

注：指标仅用于参考，不作为合格判据。

## 6 校准条件

### 6.1 环境条件

环境条件应符合以下要求：

- a) 环境温度：(20±5)℃；
- b) 环境相对湿度：不大于60%；
- c) 供电电源：(220±22) V，(50±1) Hz；
- d) 其他：环境中不应有影响校准的冲击、振动、电磁干扰等。

### 6.2 校准设备要求

校准所需的标准设备见表1，配套设备见表2。剪应力测量系统标定测试设备用途及要求如表1所示，所有测试设备均应经过计量技术机构计量确认合格，并在有效期内。

表1 标准器技术要求

序号	仪器设备名称	用途及说明
1	差压计	1) 用于测量剪应力传感器正上方测压孔两端的压力差； 2) 压力测量最大允许误差应不大于±0.5Pa。
2	流量计	1) 用于控制气体来流速度； 2) 最大允许误差应不大于±0.1 L/min。
3	长圆管道	1) 作为校准区，热膜剪应力传感器样件安装位置的中心与长圆管道末端出口处的距离在 50mm~100mm 为宜； 2) 测压孔间距在 20mm~25mm 为宜； 3) 内壁面粗糙度应不大于 0.01mm。

表2 配套设备技术要求

序号	仪器设备名称	用途及说明
1	气瓶	1) 气瓶内校准气体为空气，用于产生流体； 2) 气压不小于(15±0.5) MPa。
2	减压器	1) 用于保证气瓶输出的气体工作压力维持在一个恒定值； 2) 最大允许误差应不大于±0.05 MPa。
3	三坐标测量机	1) 用于测量长圆管道的长度、圆截面直和热膜剪应力传感器样件的长度和宽度； 2) 最大允许误差应不大于±(2.3+L/300) μm。
4	表面粗糙度测量仪	1) 用于测量长圆管道内壁面粗糙度； 2) 示值相对误差应不大于±10%。
5	秒表	1) 用于确定稳定性测试时间； 2) 分度值不大于 0.2s。

7 校准项目

校准项目见表3。

表3 校准项目表

序号	校准项目名称	校准方法对应的章节号
1	示值相对误差	8.2
2	回程误差	8.3
3	稳定性	8.4

8 校准方法

8.1 校准前的准备

8.1.1 外观检查

手动、目视检查被校热膜剪应力测量系统外观，应标注名称、型号、出厂编号等信息，其连接线等不应有影响校准的缺陷。

检查客户送校的热膜剪应力测量系统中的热膜剪应力传感器，要求未经历过高温，无破损、刮痕等，表面状态完好。

8.1.2 校准前准备

热膜剪应力测量系统校准前准备包括：

- a) 根据热膜剪应力测量系统使用要求，清洁热膜剪应力传感器样件上的污渍，并将传感器样件安装在标定测试系统测试平台区域；
- b) 确认热膜剪应力传感器样件敏感端的长度不大于测压孔间距的三分之一为宜，敏感端的宽度不大于长圆管道直径的三分之一为宜；
- c) 将校准系统按照如图2所示方式连接，给流量计、差压计和热膜剪应力测量系统的电源系统通电进行预热，时间不低于5min；
- d) 待热膜剪应力测量系统输出稳定后，记录其零点输出值；
- e) 选择剪应力测试点，剪应力校准点数量一般不少于6个，通常包含剪应力测量范围上限、下限及中间点，也可根据实际使用要求选择其他剪应力测试点。

8.2 示值相对误差

热膜剪应力测量系统的示值相对误差校准过程如下：

- a) 在剪应力校准点下限点，按照剪应力校准点从低到高的顺序依次设置流量计的输出值，直到剪应力校准点上限点，在每个剪应力校准点下，等待流量计达到设定值并稳定后记录热膜剪应力测量系统和校准系统输出的剪应力数值，校准数据记录到附件 A.1 中；
  - b) 在剪应力校准点上限点，按照剪应力校准点从高到低的顺序依次设置流量计的输出值，直到剪应力校准点下限点，在每个剪应力校准点下，等待流量计达到设定值并稳定后记录热膜剪应力测量系统和校准系统输出的剪应力数值，校准数据记录到附件 A.1 中；
  - c) 重复步骤 a) ~b) 3 次；
  - d) 将校准系统恢复至常压，并去除热膜剪应力传感器样件，校准区域恢复至初始状态。
- 按照公式(2)计算得到热膜剪应力测量系统的示值相对误差：

$$\delta = \frac{|\tau_i - \tau_j|}{\tau_j} \times 100\% \quad (2)$$

式中：

$\delta$ ——某校准点热膜剪应力测量系统的示值相对误差，Pa；

$\tau_i$ ——某校准点热膜剪应力测量系统剪应力测量结果，Pa；

$\tau_j$ ——某校准点校准系统剪应力输出结果，Pa。

取全部剪应力校准点下示值相对误差的最大值作为热膜剪应力测量系统的示值相对误差。

### 8.3 回程误差

热膜剪应力测量系统的回程误差校准过程同 8.2 节。

按照公式(3)计算得到热膜剪应力测量系统的回程误差：

$$\xi_H = \frac{|\Delta y_H|_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (3)$$

式中：

$|\Delta y_H|_{\max}$ ——剪应力测量系统在同一校准点下正行程输出值的算术平均值与反行程输出值的算术平均值之差的绝对值的最大值，Pa；

$y_{FS}$ ——剪应力测量系统的满量程输出值，Pa。

按照公式(4)计算得到剪应力测量系统在同一校准点正行程输出值的算术平均值与反行程输出值的算术平均值之差：

$$\Delta y_{Hi} = \overline{y_{Hi}} - \overline{y_{Di}} \quad (4)$$

式中：

$\Delta y_{Hi}$ ——某校准点正行程、反行程输出值的算术平均值之差，Pa；

$\overline{y_{Hi}}$ ——某校准点正行程输出值的算术平均值，Pa；

$\overline{y_{Di}}$ ——某校准点反行程输出值的算术平均值，Pa。

取全部剪应力校准点下回程误差的最大值作为热膜剪应力测量系统的回程误差。

### 8.4 稳定性

热膜剪应力测量系统的稳定性校准过程如下：

a) 按照剪应力校准点上限点设置对应的流量计输出值，等待流量计达到设定值并稳定后实时采集记录热膜剪应力测量系统输出的剪应力数值，并从采集到的输出值中进行选择，每隔 1s 记录一次（确定第一个测试点为第 1s 对应的数据，则后续数据分别对应第 3s、第 5s、第 7s .....），校准数据记录到附件 A.1 中，记录点个数应不少于 60 个；

b) 将校准系统恢复至常压，并去除热膜剪应力传感器样件，校准区域恢复至初始状态。

按照公式(5)计算得到剪应力校准点上限点处热膜剪应力测量系统的稳定性：

$$\tau_s = \frac{|\max(\tau_1, \tau_3, \dots, \tau_{119}) - \tau_U|}{\tau_U} \times 100\% \quad (5)$$

式中：

$\tau_s$ ——热膜剪应力测量系统的稳定性，Pa；



$\max(\tau_1, \tau_3, \dots, \tau_{119})$ ——剪应力校准点上限点处热膜剪应力测量系统的最大测量值, Pa;

$\tau_U$ ——剪应力校准点上限点处校准系统输出的剪应力, Pa。

## 9 校准结果的处理

校准结束后应出具校准证书, 校准证书应准确、客观地报告校准结果。

## 10 校准周期

建议复校时间间隔为1年, 送校单位可根据实际情况自主决定。

附 录 A  
(资料性附录)  
校准记录模板

A.1 示值相对误差和回程误差记录格式

被校准热膜剪应力测量系统信息：		型号：			编号：				
校准日期：				校准地点：					
环境温度：				环境相对湿度：					
外观检查									
校准数据									
流量计输出值 (L/min)	标准剪应力 (Pa)	剪应力测量系统示值							
		正行程(Pa)			反行程(Pa)			示值相对误差 (%FS)	回程误差 (%FS)
		第一次	第二次	第三次	第一次	第二次	第三次		
示值相对误差结果：					回程误差结果：				
标定方程： $\tau_{LS} = k\tau_i + b$		斜率 $k =$							
		截距 $b =$							

A.2 稳定性记录格式

稳定性										
										单位： Pa
标准剪 应力	热膜剪应力测量系统示值									
	第 1s	第 3s	第 5s	第 7s	第 9s	第 11s	第 13s	第 15s	第 17s	第 19s
	第 21s	第 23s	第 25s	第 27s	第 29s	第 31s	第 33s	第 35s	第 37s	第 39s
	第 41s	第 43s	第 45s	第 47s	第 49s	第 51s	第 53s	第 55s	第 57s	第 59s
	第 61s	第 63s	第 65s	第 67s	第 69s	第 71s	第 73s	第 75s	第 77s	第 79s
	第 81s	第 83s	第 85s	第 87s	第 89s	第 91s	第 93s	第 95s	第 97s	第 99s
	第 101s	第 103s	第 105s	第 107s	第 109s	第 111s	第 113s	第 115s	第 117s	第 119s
最大示值：			最小示值：				稳定性结果：			

T/CSMT - XXXX - XXXX