

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2016.03.14

表面温度动态校准中导热平板对时间常数测试影响分析

赵楠, 吕国义, 王莉, 刘丹英

(中航工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 针对阶跃变化表面温度装置中的表面温度传感器的数学模型进行了建模, 分析了导热平板对被测表面温度传感器时间常数的影响, 通过对不同时间常数的表面温度传感器进行数值仿真计算, 得出当被测表面温度传感器时间常数大于 20 倍导热平板时间常数时, 导热平板对被测表面温度传感器时间常数的影响可以忽略。

关键词: 表面温度传感器; 导热平板; 时间常数; 影响分析

中图分类号: TB942

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795 (2016) 03-0055-03

Analysis of Influence of Thermal Conductive Plate on Time Constant During Dynamic Surface Temperature Calibration

ZHAO Nan, LYU Guoyi, WANG Li, LIU Danying

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: The mathematical model of surface temperature sensor in a step change surface temperature measuring device is established. The influence of the thermal conductive plate on the time constant of measured surface temperature sensor is analysed. through the mathematical simulation and calculation of surface temperature sensor at different time constants, it is concluded that when the time constant of thermal conductive plate is 20 times greater than that of the measured surface temperature sensor, it can be ignored that the influence of the thermal conductive plate on the time constant of measured surface temperature sensor.

Key words: surface temperature sensor; thermal conductive plate; time constant; influence analysis

0 引言

在科学研究和工程实践中, 经常采用表面温度传感器对被测物体的表面温度进行动态测量, 以确定被测区域的温度时变特性。目前已经研制出阶跃表面温度装置测量表面温度计时间常数, 但其忽略了装置中导热平板对被测表面温度传感器时间常数的影响。本文通过数值仿真分析得出阶跃变化表面温度装置中导热平板对被测表面温度传感器时间常数的影响可以忽略的条件。

1 阶跃变化表面温度装置

阶跃变化表面温度装置由主测量室、测量杯、冰

水混合物储存室、传感器、工作面等组成, 结构简图如图 1 所示。

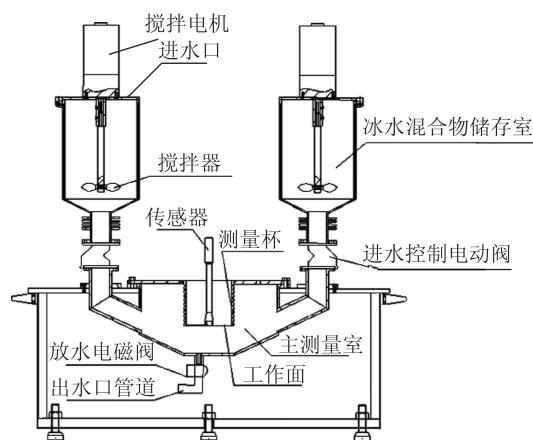


图 1 阶跃变化表面温度装置结构简图

收稿日期: 2015-12-25

作者简介: 赵楠 (1985-), 女, 山东平度人, 工程师, 硕士, 从事热电偶计量工作。

工作时, 将被测表面温度计用支架固定在阶跃变化装置的工作面上, 通过手阀控制使冰水混合物进入

储存室,从而使温度产生一个阶跃变化。数据采集系统采集被检表面温度传感器的输出信号,得到其阶跃响应数据,进行动态参数分析。

2 工作面温度传递数学模型

假设冰水混合物瞬间充满主测量室,工作面即导热平板下表面温度传到上表面的时间可以通过数值分析求得。应用非稳态导热的数值解法,由于稳定性条件要求 $1-2Fo_0 \geq 0$, 内部节点最大取 18, 通过仿真可得, 内部节点为 9~18 时, 求得导热平板上表面温度从 20℃ 变化到 0.1℃ 时间相差 0.001 s, 为了方便计算, 取内部节点为 9, 数值解法如图 2 所示。

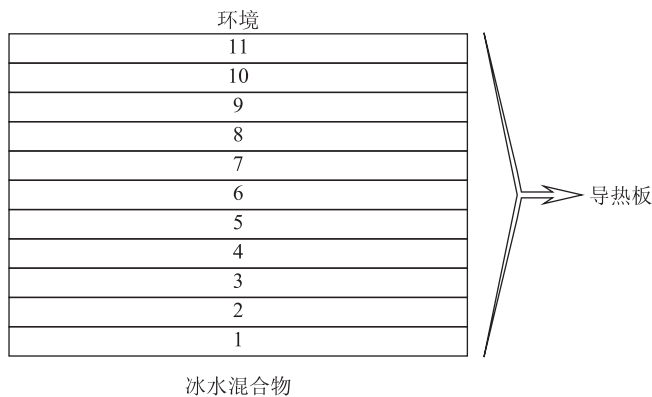


图2 导热平板非稳态导热数值解法节点示意图

内部节点为 9, 则 $n=10$ 。节点的显式差分方程为

$$\begin{cases} T_1^{k+1} = [1 - 2Fo(1 + Bi)] \times T_1^k + 2Fo(T_2^k + BiT_\infty) \\ T_i^{k+1} = Fo(T_{i-1}^k + T_{i+1}^k) + (1 - 2Fo)T_i^k \\ T_{11}^{k+1} = T_{11}^k = 273 \text{ K} \end{cases} \quad (1)$$

式中: T_i^k 为第 i 个节点第 k 个时间步长时的温度, K; $i=2, 3, \dots, 10$; T_∞ 为流体温度, 即环境温度, K; Fo 为傅里叶数; Bi 为毕渥数。

$$\text{其中, } Fo = \frac{\lambda \Delta \tau}{\rho c (\Delta x)^2} = 0.132 \quad (2)$$

$$Bi = \frac{h \Delta x}{\lambda} = 1.2285 \times 10^{-6} \quad (3)$$

由于导热板采用的是紫铜, 导热板相关性能参数见表 1。

表1 导热板相关性能参数

导热系数 λ	398 W/(m·K)
导热板密度 ρ	7830 kg/m ³
导热板比热容 c	386 J/(kg·K)
导热板周围空气对流系数 h	5 W/(m·K)

导热板厚度 $\delta = 1\text{mm}$, 边界条件为初始温度 20℃, 终止温度为 0℃。

取 $\Delta x = \frac{\delta}{10} = 10^{-4} \text{ m}$, 时间步长 $\Delta \tau = 10^{-5} \text{ s}$, 利用 Matlab 计算求得导热平板上表面温度从 20℃ 变化到 0.1℃, 时间约为 0.02 s。

导热平板的数学模型可认为是一阶惯性模型, 由于其输入与输出均为温度, 且稳态终值等于输入值, 则其在时域的数学表达式实质上为单位阶跃响应公式:

$$y(t) = 1 - e^{-\frac{t}{T_0}} \quad (4)$$

式中: T_0 为时间常数, s。

根据公式 (4), 将归一化幅值 $y(t) = 0.995$ 和时间 $t = 0.02 \text{ s}$ 代入可得, 导热平板的时间常数约 $T_0 = 0.00381 \text{ s}$, 其阶跃响应曲线如图 3 中所示。

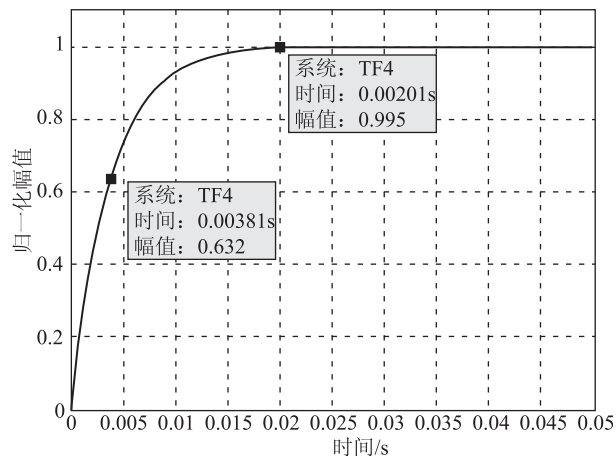


图3 导热平板单位阶跃响应曲线示意图

3 被检表面温度计的时间常数确定

被检表面温度传感器其数学模型可认为是一阶惯性模型, 其归一化的典型数学模型如公式 (5) 所示。

$$y(t) = 1 - e^{-\frac{t}{T_m}} \quad (5)$$

式中: T_m 为表面温度计时间常数, s。

时间常数 T_m 的计算较为复杂, 工程上常用其阶跃响应幅值的 63.2% 近似。测试时, 将热电偶测量端固定在装置导热平板的有限工作区内, 测量端初始温度为实验室温度 20℃, 测量端输入阶跃激励为冰水混合物 (0℃), 本文采用 NI-PCI-4474 数据采集器 (AD 数位为 24 位, 采集频率 10 MHz)。将数据采集器采集到的传感器数据实时准确反映到计算机软件中, 记录阶跃过程开始前直至阶跃过程完成后的全部测试数据, 得出被检表面温度传感器时间常数 T , 三次测量结果分别为 0.28, 0.22, 0.17 s, 其平均值为 0.22 s。

4 导热平板影响分析

据公式（4）和图 3 可知，由于导热平板的输出等于阶跃变化表面温度装置中被测表面温度传感器的输入，即被检表面温度传感器的实际输入为非理想阶跃输入，则上述被检表面温度传感器模型存在由于导热平板环节所引入的误差。为了评价导热平板对被检表面温度传感器时间常数的影响程度，对各类表面温度传感器的误差特性进行了分析。

根据几类不同型号的表面温度传感器的时间常数，分别将导热平板的一阶惯性模型代入，按工程上常用的阶跃响应幅值的 63.2% 近似得到各型号表面温度传感器的时间常数 T_m 及相对误差 $\Delta T/T_m$ ，具体如表 2 所示。

表 2 表面温度传感器的时间常数 T_m 及相对误差 $\Delta T/T_m$

T_m/s	$\Delta T/s$	$\Delta T/T_m$
0.05	0.0039	0.078
0.08	0.0038	0.048
0.1	0.004	0.040
0.22	0.004	0.018
0.3	0.004	0.013

根据表 2 可知，对于阶跃变化表面温度装置，导热平板的时间常数 T_0 为已知量。当测得的被检表面温度传感器的时间常数 T_m 越接近 T_0 时，其 T_m 的测试相对误差越大；当测得的 T_m 大于 20 倍 T_0 时， T_m 的测试

相对误差小于 5%，在工程应用中可以接受。

另一方面， T_m 越小，则表明此传感器的动态特性越好。但是，在测试这类表面温度传感器时，特别要注意导热平板对测试带来的误差。在 T_m 小于 20 倍 T_0 的情况下，一般需更换阶跃变化表面温度装置中导热平板的规格，使得 T_m 大于 20 倍 T_0 ，以保证 T_m 的测试误差在 5% 以内，满足各类工程应用要求。

5 结论

- 根据上述分析，可得出如下结论：
- 1) 通过数值仿真的方法求得导热平板的时间常数 T_0 ；
 - 2) 应用表面温度测试装置可以方便地测得表面温度传感器时间常数 T_m ，并掌握每个被检表面温度传感器的动态特性；
 - 3) 当测得 T_m 后，需与 T_0 进行比较，以判断测试相对误差是否满足工程应用需求，否则需改变导热平板规格重新测试。

参 考 文 献

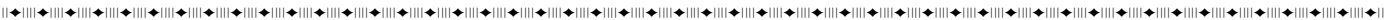
[1] 廖理. 热学计量 [M]. 北京：原子能出版社，2002.

[2] 国家技术监督局. JJF1049-1995 温度传感器动态响应校准规范 [S]. 北京：中国计量出版社，1995.

[3] 国家质量监督检验检疫总局. JJF1409-2013 表面温度计校准规范 [S]. 北京：中国质检出版社，2013.

[4] 国家质量监督检验检疫总局. JJG684-2003 表面铂热电阻检定规范 [S]. 北京：中国计量出版社，2003.

[5] 戴锅生. 传热学 [M]. 北京：高等教育出版社，1999.



约克仪器南京办事处成立

约克仪器南京办事处于 2016 年 5 月正式成立。该办事处是约克仪器在华东地区设立的第二家机构，主要围绕着工业计量校准、气体分析、环保检测、安全防护、流量物位、传感器等相关领域开展业务。针对江苏、安徽等地区市场，形成特色服务和技术产品优势，以满足江苏、安徽地区终端用户的业务发展需求。

南京办事处的成立，是约克仪器进一步发展的战略需求，更是服务当地企业和机构日益高涨的工业检测需求。南京处于我国华东地区，经济发展比较平稳。随着全国经济结构调整和产业转型步伐的不断加快，对工业检测产品需求日益增强，发展潜力巨大。约克仪器是国

内技术较为领先的工业检测设备企业，公司毗邻北京中关村园区，是一家快速发展的创新型企业，自 1995 年成立之日起，就专注于国内的工业计量校准、气体分析、环保检测、安全防护、流量物位、传感器等相关领域。

按照约克仪器的总体要求及部署，南京办事处将依托于北京总部的优势资源，服务南京及周边地区，为石油化工、航空航天、电力、冶金、环保、科研机构、煤矿等行业提供专业化、市场化、国际化的技术和设备支持。

(焦丹 供稿)