

一种锡膜热电偶的动态响应模型

Dynamic Response Model of Tin Oxide Film Thermocouple

孟欣

(陕西理工学院机械工程学院, 陕西 汉中 723000)

摘要: 为了提高铜-康铜锡膜热电偶温度传感器的测量精度以及灵敏性, 选取铜-康铜锡膜热电偶进行一维非稳态传热分析。基于牛顿冷却定理以及傅里叶导热定律, 建立了铜-康铜锡膜热电偶的动态热响应模型, 对其边界条件进行综合比较, 对模型进行求解并基于 Simulink/Matlab 进行动态仿真。通过试验验证了动态热响应模型精度。仿真预测模型简单, 能够较为精确地模拟铜-康铜锡膜热电偶的热响应特性。

关键词: 热电偶 传感器 动态热响应 高精度 Simulink/Matlab

中图分类号: TP212 **文献标志码:** A

Abstract: In order to enhance the measurement accuracy and sensitivity of the copper constantan tin oxide film thermocouple temperature sensor, the one dimension unsteady heat transfer analysis is conducted for copper constantan tin oxide film thermocouple. Based on Newton cooling theorem and Fourier law of heat conduction, the dynamic thermal response model of the copper constantan tin oxide film thermocouple is established. The boundary conditions are compared comprehensively, and the model is solved, and dynamic simulation is conducted based on Simulink/Matlab. Through experiments, the accuracy of the dynamic thermal response model is verified. The simulation model is simple and simulating the thermal response characteristics of the copper constantan tin oxide film thermocouple accurately.

Keywords: Thermocouple Sensor Dynamic thermal response High accuracy Simulink/Matlab

0 引言

热电偶是根据温度的变化而产生响应的电势, 进而在计算机上显示出温度值, 因此热电偶在测温中不会因自发热而影响测量精度, 在实际应用中表现出优良的性能。但是热电偶的热惰性会使得其测温的实时性受到影响^[1], 目前基于热电偶内部的导热特性对响应时间影响的报道并不多见。闫洁^[2]建立了热电偶时间常数的测试系统, 给出了不同范围温度、时间常数各异的热电偶测试曲线, 并且通过试验验证了此系统的测试精度, 可以测试到亚毫秒至秒量级的时间常数。胡国林等人^[3]通过对热电偶导热特性的分析, 建立了热电偶在管式炉内测温时的温度响应模型, 得到了热电偶的温度响应时间, 并且试验验证了其理论。张朝晖等人^[4-6]基于热电偶的传递函数求得的补偿算法可以在单片机内实现对实际温度的实时采集。曾其勇等人^[7]从传感器的结构出发, 论述了传感器的结构、动态和静态标定, 在实际应用中取得了良好的效果。

近年来, 对薄膜热电偶的研究越来越多^[8], 主要是对热电偶形状改进的研究。对热电偶的形状进行改进, 能提高其动态响应时间。但是对于热电偶动态响应时间的理论模型的研究鲜见报道。

1 建立模型

1.1 建模理论

采用锡膜焊接^[9]的方法制作的铜-康铜热电偶, 在锡膜焊接过程中对锡膜直径控制的精度不高。文献^[9]提出的热电偶锡膜直径可控制在 0.03 ~ 0.5 mm, 因此在这个直径范围内对其进行导热分析。铜-康铜热电偶内部结构如图 1 所示。

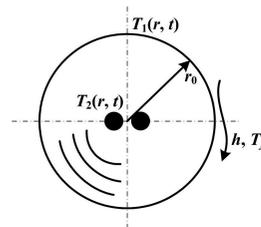


图 1 热电偶内部传热示意图

Fig. 1 Schematic diagram of heat transfer in thermocouple

图 1 中, r_0 为热电偶锡膜半径, h 为热电偶锡膜外表面与热流空气的换热系数。

国家创新基金资助项目(编号:12C26216106801)。

修改稿收到日期:2013-02-17。

作者孟欣(1981-), 男, 2009年毕业于西安理工大学能源与动力工程专业, 获硕士学位, 讲师; 主要从事制冷与低温工程及太阳能转化利用方面的研究。

铜-康铜热电偶在固体表面进行测温时要保证其密封性,因此可认为测温过程是热电偶对其周围的热流空气进行测温。热流空气的温度通过锡膜传到热电偶内部的感应端,锡膜外壁到感应端的温度从 $T_1(r,t)$ 降低到 $T_2(r,t)$ 。建模思想基于如下假设。

① 在热电偶外表面流动空气的热流密度恒定,可忽略接触热阻。

② 锡膜较薄,可假设温度为一维球体导热。

③ 由于锡膜直径较小,可认定感应端的两个球体与锡膜同心,即热电偶锡膜外表面到感应端的传热距离为 r_0 。

1.2 动态建模

根据图 1 所示热电偶内部结构,将热电偶放置在初始温度为 T_f 的实际工况中,得到一维导热模型:

$$\frac{\partial^2 T_1(r,t)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \times \frac{\partial T_1(r,t)}{\partial r} = \frac{1}{h} \times \frac{\partial T_1(r,t)}{\partial t} \quad (1)$$

$$T = T_i, r = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial T_1(r,t)}{\partial r} + hT_1(r,t) = T_f, r = r_0 \quad (3)$$

$$T_1(r,t) = f(r) \quad (4)$$

式中: h 为热电偶锡膜外表面换热系数; r 为瞬时传热距离; r_0 为锡膜半径; T_f 为被测热流空气温度; T_i 为热电偶处于室温下的初始温度。

引用新的因变量 $U(r,t) = rT_1(r,t)$, 式(1)~式(4)可变换为:

$$\frac{\partial^2 U(r,t)}{\partial r^2} = \frac{1}{a} \times \frac{\partial U(r,t)}{\partial t} \quad (5)$$

$$U = T_i, r = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial U(r,t)}{\partial r} + h^* U(r,t) = T_f, r = r_0 \quad (7)$$

$$U(r,t) = rf(r) \quad (8)$$

式中: $h^* = a^* / \lambda = a / \lambda - 1 / r_0$; λ 为锡膜导热系数。

可求得瞬态温度场为:

$$T_2(r,t) = \frac{1}{r} U(r,t) = \frac{1}{r} \sum_{m=1}^{\infty} C_m R_m(r) \exp[-\xi_m^2 F] \quad (9)$$

式中: $R_m(r) = \sin(\xi_m r / r_0)$ 为特征函数; ξ_m 为特征值,可由 $\xi_m \tan(\xi_m) = -Bi^*$ 求出^[11], $Bi^* = h^* r_0 = Bi - 1$; $F = a\tau / r_0^2$ 为傅里叶数;

$$C_m = \frac{\int_0^{r_0} r \sin(\xi_m r / r_0) dr}{N_m^2} = \frac{2r_0 Bi (\sin \xi_m) [\xi_m^2 + (Bi^*)^2]}{\xi_m^2 (\xi_m^2 + Bi^* - Bi)}$$

为待定常数; $N_m^2 = \frac{2}{r_0} \frac{\xi_m^2 + (Bi^*)^2}{\xi_m^2 + (Bi^*)^2 + Bi^*}$ 为特征函数的范数。

对温度进行无量纲变换,可得:

$$\theta(r,t) = \frac{T_2(r,t) - T_f}{T_i - T_f} \quad (10)$$

$$U(r,t) = r^* \theta(r,t) \quad (11)$$

利用特征值 $\xi_m \tan(\xi_m) = -Bi^*$ 求得:

$$\sin(\xi_m) = (-1)^{m+1} \frac{\xi_m}{\sqrt{\xi_m^2 + Bi^* - 2}} \quad (12)$$

代入式(9)整理得:

$$\theta(r,t) = \sum_{m=1}^{\infty} A_m R_m(r) \times \frac{r_0}{r \xi_m} \exp(-\xi_m^2 F) \quad (13)$$

式中: $A_m = (-1)^{m+1} \frac{2Bi \sqrt{\xi_m^2 + (Bi-1)^2}}{\xi_m^2 + Bi^2 - Bi}$ 为待定常数。

综上可得到锡膜经过 t 时间的积累瞬时传热量 Q_{0-r} , 将其无量纲化得到:

$$\frac{Q_{0-r}}{Q_{0-\infty}} = 1 - \sum_{m=1}^{\infty} B_m \exp(-\xi_m^2 F) \quad (14)$$

式中: $Q_{0-\infty} = \frac{4}{3} \pi r_0^2 \rho c (T_i - T_f)$ 为总传热量。

由于 $Bi \ll 1$, 所以式(14)中系数 B_m 为:

$$B_m = \frac{6Bi^2}{\xi_m^2 (\xi_m^2 + Bi^2 - Bi)} \approx 1 \quad (15)$$

热流空气与热电偶锡膜外表面的换热量表面的对流换热量可由傅里叶定律得到:

$$Q(x,y,t) = \alpha_1 [T_f, v_f \Delta T] \quad (16)$$

式中: $\Delta T = T_f - T_i$, 为传热温差; $\alpha_1(T_f) = \frac{\lambda_f(T_f)}{r} \times$

$\frac{(f/8) [Re(v_f) - 1000] Pr(T_f)}{1 + 12.7 \sqrt{f/8} [Pr^{2/3}(T_f) - 1]} \left[1 + \left(\frac{r}{r_0} \right)^{2/3} \right] c_t$, 为传热系数, 其中, $\lambda_f(T_f)$ 为热电偶外表面与热流空气的导热系数, $Re(v_f)$ 为热流空气的雷诺数, $Pr(T_f)$ 为与温度有关的动态普朗特数, $c_t = \left\{ \frac{Pr_f(T_f)}{Pr_{r,w} [T_2(r,t)]} \right\}^{0.01}$ 为放热系数;

$f = (1.821 \lg Re - 1.64)^{-2}$ 为 Darcy 阻力系数; $A = \frac{4}{3} \pi r_0^2$ 为热电偶锡膜外表面与热流空气接触的表面积。基于能量守恒定理, 式(14)、式(16)联立可得:

$$Q(x,y,t) = Q_{0-r} = \alpha_1(T_f, v_f \Delta T) \quad (17)$$

基于式(17)可求得无量纲化的时间常数:

$$t = \frac{\ln \left[\frac{T_1 - \frac{hr_0^2}{\lambda} (T_f - T_1) \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_0} \right)}{C_m R_m(r)} \right] \times r_0^2}{\alpha} \quad (18)$$

式(18)表明, 锡膜热电偶动态响应时间与锡膜直径 r_0 、导热系数 λ 、锡膜外表面换热系数 h 以及空气的热扩散率 α 有关。如当锡膜直径 r_0 增大时, 动态响应时间也随之增大等。

综上所述, 式(13)和式(18)为非线性方程, 不容易获得精确解, 可基于拥有强大计算功能的 Simulink/

Matlab,对所述非线性方程组求得热电偶对热流空气进行测温时的瞬态温度场,并最终求得热电偶锡膜直径对动态响应时间常数的影响。

2 数值仿真

在 Simulink 下对表 1 中的初始工况进行仿真,得到 3 种直径下的热电偶的动态响应情况如图 2 所示。

表 1 试验与仿真初始工况

Tab.1 The initial conditions of the experiment and simulation

直径 d/mm	初始测量温度 $T/^\circ\text{C}$	阶跃温度 $T/^\circ\text{C}$
0.3	50	90
0.5	50	90
1.0	50	90

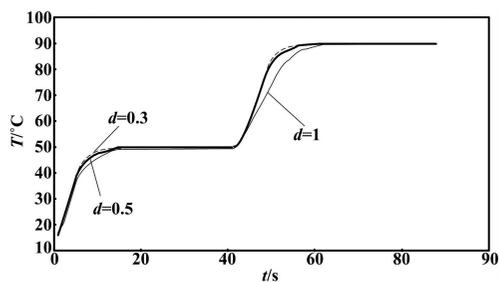


图 2 热电偶动态响应时间

Fig.2 The dynamic response time of thermocouples

图 2 表明,热电偶随着其锡膜直径的增大,其动态响应时间增加,尤其是当锡膜直径为 1 mm 时,热电偶的滞后性明显,可见热电偶的动态响应时间取决于锡膜直径,直径越小,动态响应时间越短。

基于 Simulink 动态仿真模型得到热电偶锡膜直径对时间常数的影响如图 3 所示。

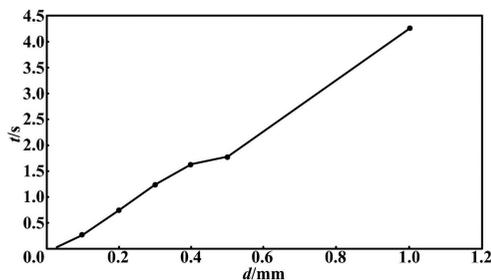


图 3 直径对响应时间的影响

Fig.3 The influence of film diameter on dynamic response time

图 3 表明,热电偶的动态响应时间常数 t 随着锡膜直径的增大呈线性增大的趋势。当锡膜直径为 1 mm 时,动态响应时间突然增大,不能满足实际测温要求。因此,要求对热电偶锡膜的直径进行严格的控制。由仿真结果可知,当锡膜直径在 0.03 ~ 0.3 mm 范围内时,热

电偶的动态响应时间常数较小,因此应尽量控制在此范围内,以便精确测温。

3 试验验证

为了进一步对热电偶的动态响应时间进行描述,取锡膜直径为 0.3 mm 的热电偶进行标定^[10]以及试验验证,采用安捷伦万用表自动采集温度,采用测温精度更高、响应时间更短的 A 级 Pt100 温度传感器对热电偶进行验证。试验中,将 A 级 Pt100 温度传感器的温度作为实际温度,并将热电偶测量到的试验值与仿真值进行对比分析。试验示意简图如图 4 所示。

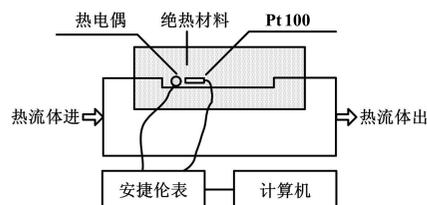


图 4 热电偶测温试验示意图

Fig.4 Schematic diagram of the temperature measuring experiment of thermocouple

将 A 级 Pt100 温度传感器、热电偶分别放置在温度为 50 °C 的被测热流空气中,要求 Pt100 温度传感器放置在热电偶附近。当热电偶测量值趋于稳定时,逐渐提高被测热流空气温度直到 90 °C 并在 90 °C 保持恒温。试验值与仿真值对比如图 5 所示。

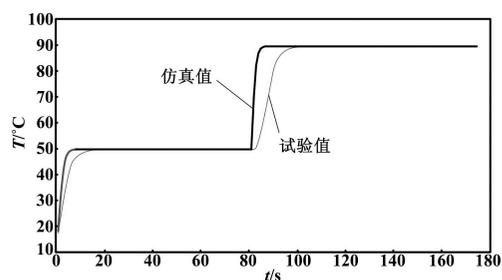


图 5 热电偶试验值与仿真值

Fig.5 The experiment and simulation values of thermocouple

由图 5 可以看出:①在 20 ~ 50 °C 阶段,热电偶的试验值略低于仿真值;②在 50 °C 的准稳态阶段,试验值略大于仿真值,表明本文模型在准稳态阶段对于热电偶实际工况能够进行较为精确的仿真模拟;③在 50 °C 上升到 90 °C 的阶段,试验值表现出明显的滞后,说明本文模型的边界条件不能非常精确地描述热电偶的实际测温特性,同时试验值与仿真值之间的误差也是由于对热流空气的温度加热并不能实时与理想仿真中的温度上升值相匹配;④在 90 °C 的准稳态阶段,试

验值与仿真值符合得较好。

为了更加直观地说明模型的仿真值与试验值之间的关系,对试验值与仿真值求绝对误差,如图6所示。

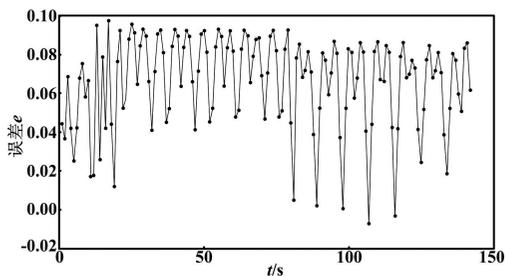


图6 试验值与仿真值误差曲线

Fig. 6 The error curves of experiment and simulation values

图6所示曲线表明,在采用热电偶进行测温时,记录数据要有一定的延迟,并且热电偶在准稳态阶段测温时的误差精度基本为 10^{-2} 。综上所述,要求热电偶尽量在准稳态阶段进行数据的采集。锡膜热电偶不适合在温度阶跃变化频率较大的工况下使用。如果温度在产生阶跃以后维持10s左右,则对锡膜热电偶采集到的温度值求平均温度后,其测量精度还是较为精确的。

4 结束语

本文对热电偶在测量热流空气时进行动态建模,模拟出热电偶测温的动态特性,并且得到热电偶锡膜直径对其动态响应的影响,对热电偶制作以及测温具有指导意义。试验验证了本文动态响应模型具有较高

的精度,锡膜热电偶在测温过程中具有滞后性,热电偶适用于准稳态工况以及温度阶跃频率较低的测温工况,不适合温度变化较大且阶跃频率较高的工况。仿真模型简单,能较为精确地描述锡膜热电偶的动态测温特性,可适用于其他温度传感器的动态响应仿真模拟。

参考文献

- [1] 王志双. 浅谈热电偶的热响应时间[C]//中国计量协会冶金分会冶炼传感器专委会2011年年会及技术交流会,2011:38.
- [2] 闫洁. 调制激光器激励法的热电偶时间常数测试[J]. 仪表技术,2011(11):8-13.
- [3] 胡国林,熊桂龙,朱庆霞,等. 热电偶温度响应的实验研究及计算机仿真[J]. 陶瓷学报,2006,27(4):348-351.
- [4] 张朝晖,袁建美,郝天昭. 提高热电偶响应速度的补偿算法[J]. 仪器仪表学报,2003,24(4):143-144.
- [5] 朱小良,张夕林. 热电偶测量锅炉烟气温度的动态补偿方法[J]. 传感技术学报,2003,16(3):359-362.
- [6] 温淑慧,刘秀红. 提高热电偶动态测温精度方法的研究[J]. 传感技术学报,2004,17(1):175-178.
- [7] 曾其勇,孙宝元,卢俊. 一种新型快速响应半人工热电偶[J]. 仪器仪表学报,2003,24(4):126-131.
- [8] 赵源深,杨丽红. 薄膜热电偶温度传感器研究进展[J]. 传感器与微系统,2012,31(2):1-7.
- [9] 石文星,颜岩,彭晓峰. 铜-康铜热电偶的锡膜焊接及热电特性[J]. 仪表技术与传感器,2002(3):43-46.
- [10] 陈良,侯予,习兰. 铜-康铜热电偶的标定与误差分析[J]. 低温工程,2008,6(166):18-23.
- [11] 季孝达,薛兴恒,陆英,等. 数学物理方程[M]. 2版. 北京:科学出版社,2009:55-69.

(上接第82页)

质量流量和密度,具有测量精度高、测量范围大、重复性好的特性,特别适合于温度高、黏度大的流体介质场合。科氏流量计用于精确的流量计量有其独特的优势,但因其技术含量高、价格昂贵,故在选择和使用时应特别慎重。如果选用不恰当,那么可能会得不到所要求的精度,甚至无法测量。总之,Coriolis质量流量计应用是一项油品计量先进技术,要正确合理地选用科氏流量计,使其最大限度地发挥它的优势作用。

参考文献

- [1] 梁国伟,蔡武昌. 流量测量技术及仪表[M]. 北京:机械工业出版社,2006:335-340.

- [2] 周庆,王磊,Haag R. 实用流量仪表的原理及其应用[M]. 北京:国防工业出版社,2003:133-140.
- [3] 徐士信. 科里奥利质量流量计的选用[J]. 石油化工自动化,2002(6):8-13.
- [4] 王兰栋,张世军,童冬生. 科里奥利质量流量计在油田含水原油计量中的应用[J]. 自动化仪表,2000,21(7):22-26.
- [5] 陆德民. 石油化工自动控制设计手册[M]. 北京:化学工业出版社,2000:101-108.
- [6] 郭子学,王澍虹,王崴. Coriolis质量流量计的原理及其在海上平台原油计量中的应用[J]. 中国造船,2007(48):52-58.
- [7] American Petroleum Institute. API 5.6 Measurement of liquid hydrocarbons by Coriolis meters[S]. Washington: Global Engineering Documents,2002:19.

《自动化仪表》 邮发代号: 4-304, 2014年定价: 15.00元,全年价: 180.00元; 国外代号: M 721

欢迎赐稿, 欢迎订阅, 欢迎宝贵建议, 欢迎惠刊各类广告