

基于模型参考的薄膜热电偶传感器 动态误差补偿算法

刘 清

(南京师范大学 数学与计算机科学学院, 江苏 南京 210097)

[摘要] 针对用于瞬态高温测量薄膜热电偶的动态特性研究问题, 提出通过建立传感器的动态逆模型补偿器, 来展宽其工作频带, 以此来减小动态误差的方法. 该方法无需事先已知薄膜热电偶的动态特性, 可根据传感器以及参考模型对输入激励响应的实测数据, 通过微粒群 (PSO) 算法的优化学习得到动态逆模型补偿器的参数. 薄膜热电偶的输出经过补偿器后, 能够克服由动态特性引起的测量误差. 最后, 通过实验验证了该方法的有效性.

[关键词] 薄膜热电偶, 动态误差, 模型参考, 逆模型, 补偿

[中图分类号] TP212 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2006)01-0005-04

A Algorithm of the Thin-film Thermocouple Dynamic Error Compensation Based on Model Reference

LU Qing

(School of Mathematics and Computer Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

Abstract: On the study of the dynamic characteristic of the thin-film thermocouple used in transient high temperature measurement, an approach that can widen the working frequency band and reduce the dynamic error is reported by using the compensator of sensor dynamic inverse model. With this approach, a compensator of sensor dynamic inverse model can be realized without knowing the dynamic characteristics of thin-film thermocouple, and the parameters of the compensator are optimized by PSO algorithm according to the measurement data of the step response of the sensor and reference model. When the output signals of the thin-film thermocouple are processed by the compensator, the dynamic measurement errors are reduced. Experimental results show that the approach is effective.

Key words: thin-film thermocouple, dynamic errors, model reference, inverse model, compensation

0 引言

薄膜热电偶是一种用于瞬态温度测量的传感器, 由于固有的热惯性, 使得它的过渡过程较长. 所以在瞬态温度测量中, 会造成较大的动态滞后误差^[1~3]. 为了保证瞬态测量的精度, 必须对薄膜热电偶的输出进行后处理, 设计动态补偿环节, 提高薄膜热电偶的热响应特性, 达到动态温度测量的要求.

目前克服薄膜热电偶输出滞后的常规方法, 一是选择时间常数小的薄膜热电偶; 二是设置补偿环节, 使补偿环节传递函数的零点与薄膜热电偶的传递函数极点相同, 通过零极抵消的方法实现动态补偿^[2,3]. 但是, 上面的方法要求在测量前确定薄膜热电偶传感器的数学模型. 由于在确定数学模型时, 为避免建模所带来的复杂性, 会作一些简化和假设, 这样, 所设计的动态补偿器的效果必然受到限制, 同样会引入动态测试误差. 为了消除或减少薄膜热电偶的动态测量误差, 必须按其实际特性建立传感器的动态补偿器, 以避免不准确的模型影响动态补偿效果. 为此, 本文提出一种基于模型参考和微粒群 (PSO) 算法优化的薄膜热电偶动态误差补偿器的设计方法. 采用该方法无需事先已知薄膜热电偶的动态特性, 可根据薄膜热电偶以及参考模型对输入激励响应的实测数据, 通过 PSO 算法的优化学习得到补偿器的参数, 该补偿方法具有算法简单和补偿精度高的特点.

收稿日期: 2005-10-27.

作者简介: 刘清 (1962-), 博士, 副教授, 主要从事智能控制与现场总线测控系统的研究与开发. E-mail: njnuhq@163.com

1 薄膜热电偶动态补偿原理

薄膜热电偶动态测量误差形成的原因,是因为传感器动态特性的频带不够宽,不足以覆盖瞬变信号中包含的所有频率分量,而使部分高频分量受到不同程度的衰减造成的.所以,补偿器的本质是使传感器动态特性的频带得以适当延伸,它可以是一个带通或高通滤波器^[4].但是,高通滤波器会引起严重的噪声干扰,因此,在这里采用了带通滤波器,它是传感器的动态逆模型.补偿器所对应的带通滤波器可用一个线性差分方程表示:

$$A(Z^{-1})y_c(k) = B(Z^{-1})y(k) + v(k) \tag{1}$$
$$v(k) = A(Z^{-1})v(k) \tag{2}$$

取白化滤波器为 $1/A(Z^{-1})$,补偿器的输出可写为:

$$y_c(k) = A(Z^{-1})/B(Z^{-1}) \cdot y(k) + v(k) \tag{3}$$

补偿器对应的传递函数 $H(Z^{-1})$ 为:

$$H(Z^{-1}) = \frac{A(Z^{-1})}{B(Z^{-1})} = \frac{b_0 + b_1 Z^{-1} + \dots + b_m Z^{-m}}{1 + a_1 Z^{-1} + \dots + a_n Z^{-n}} \tag{4}$$

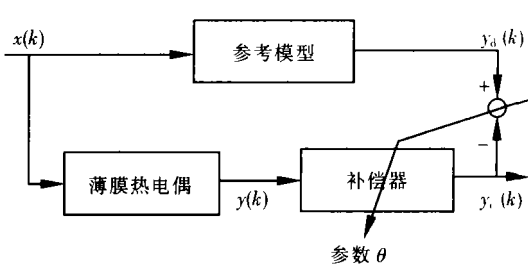


图 1 补偿器参数辨识原理

式中, $y_c(k)$ 为 k 时刻动态补偿器的输出; $y(k)$ 为 k 时刻薄膜热电偶的输出和动态补偿器的输入; $v(k)$ 为输出端综合噪声; m 为薄膜热电偶动态模型的阶次; n 为补偿后薄膜热电偶动态模型的阶次; 补偿器的参数 $\theta = (a_1, a_2, \dots, a_n, b_1, \dots, b_m)$.

为了减少补偿器设计时对薄膜热电偶动态特性的数学模型依赖,采用模型参考的系统辨识方法得到补偿器 $H(Z^{-1})$,辨识的原理如图 1 所示.补偿器的设计成变为一个对 $L(L = m + n)$ 维参数 的最优化过程,即使

$$J = \sum_{k=0}^{N-1} [y_c(k) - y_d(k)]^2 \rightarrow \min \tag{5}$$

其中, $y_c(k)$ 和 $y_d(k)$ 分别为激励信号作用下的补偿器实际输出和希望输出的实验数据.

2 基于微粒群 (PSO) 算法的补偿器参数优化

为了获得理想的薄膜热电偶动态测量效果,需要对补偿器 L 维参数 进行搜索和优化.下面介绍应用微粒群 (PSO) 算法进行补偿器参数优化的具体方法.

2.1 PSO 算法原理

PSO 算法^[5] 与其他进化算法相类似,也是将寻优的参数作为一个个体,由多个个体组成群体.它将个体看成是 D 维寻优搜索空间的一个没有体积的微粒(点),通过对环境的适应度来将群体中的个体向好的区域移动,结合微粒的历史最佳位置和群体历史最佳位置信息,以一定的速度向目标值逼近.第 i 个微粒可以表示成 D 维向量 $X_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}]$,微粒的速度表示成 $V_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD}]$,这个微粒经历的最佳位置(对应于最好的适应度)表示为 $P_i = [p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD}]$,也称为 P_{best} .群体所有微粒经历的最好位置的索引号用 g 表示,记为 P_g ,也称为 g_{best} .第 i 个微粒从 n 代进化到 $n + 1$ 代,通过下式进行更新.

$$V_{id}^{n+1} = w V_{id}^n + c_1 r_1^n (P_{id}^n - X_{id}^n) + c_2 r_2^n (P_{gd}^n - X_{id}^n) \tag{6}$$

$$X_{id}^{n+1} = X_{id}^n + V_{id}^{n+1} \tag{7}$$

式中, w 表示惯性权重 (inertia weight),它使微粒保持运动惯性,使其具有扩展搜索空间的趋势,有助于新区域的搜索. c_1, c_2 均为正实数,称为加速度常数 (acceleration constants),它们表示将每个微粒推向 P_{best} 和 g_{best} 的统计加速度的权重. r_1^n, r_2^n 为在区间 $[0, 1]$ 变化的随机数.

通过模拟鸟群的觅食过程, PSO 算法的计算流程可描述如下:

(1) 根据具体问题,设置有关参数,如种群规模 m ,惯性权重 w ,加速度常数 c_1 和 c_2 ,算法结束的条件等.初始化群体中的微粒、微粒的初始位置和速度.

(2) do {

 计算每个微粒的适应度函数值 $f_{fitness}$;
 将每个微粒的 $f_{fitness}$ 与 P_{best} 相比较,如果 $f_{fitness}$ 值更优,则用 $f_{fitness}$ 更新 P_{best} ;

将每个微粒的 f_{fitness} 与 g_{best} 相比较,如果 f_{fitness} 值更优,则将其置为新的 g_{best} ,同时记录其索引号;

根据算式 (7)、(8) 更新各微粒的位置和速度;

while (不满足性能指标要求) && (没有完成规定代数的寻优));

(3) 从种群中选择最优微粒,输出寻优结果.

2.2 PSO 算法优化补偿器参数

根据薄膜热电偶传感器以及参考模型对输入激励响应的实测数据,通过 PSO 算法的优化学习得到补偿器 L 维参数 的过程分为 3 步:

(1) 根据传感器的动态特性,确定期望的薄膜热电偶动态特性的参考模型,补偿器 $H(Z^{-1})$ 的阶次 n 和 m ,以及补偿器的参数 $\theta = (a_1, a_2, \dots, a_n, b_1, \dots, b_m)$.

(2) 选取一个能够充分激励传感器的动态特性的输入信号,通过实验获在该激励信号作用下的传感器实际输出 $y(k)$ 和参考模型输出 $y_d(k)$.

(3) 以 $y(k)$ 和 $y_d(k)$ 分别作为补偿器的输入和希望输出,通过 PSO 算法寻优,得到补偿器的参数 θ . 其中, f_{fitness} 为式 (5).

3 仿真结果

为了验证采用模型参考和 PSO 算法优化的薄膜热电偶动态补偿方法的有效性,作者对某一薄膜热电偶动态特性进行了仿真研究. 设传感器动态特性的数学模型为^[3]

$$G(z^{-1}) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} = \frac{0.4181 + 0.05491z^{-1} - 0.3632z^{-2}}{1 - 1.9133z^{-1} + 0.9135z^{-2}} = \frac{0.4181(z + 1.000)(z - 8.86869)}{(z - 0.99763)(z - 0.91567)} \quad (8)$$

由于在 $G(z^{-1})$ 中存在一个较接近单位圆的实极点,使得传感器的动态特性呈现为一阶特性,其动态响应需经过一个较长的过程才到达稳态,从而在对瞬态信号测量时出现动态误差. 通过设计动态补偿器,可以达到减小动态误差测量的目的.

3.1 传感器输入信号

在系统辨识的理论研究中,白噪声是用于辨识的理想输入信号. 但是,在传感器的动态补偿器建模中,无法产生按白噪声规律变化的输入信号. 所以,为了充分激励传感器的动态特性,并考虑到实现的方便性,作者采用了

$$u(k) = \begin{cases} u_1 & 0 < k < k_1 \\ u_2 & k_1 \leq k < k_2 \\ 0 & k_2 \leq k < k_3 \end{cases} \quad (9)$$

作为传感器的激励信号 ($u_1 = 1, u_2 = 2, k_1 = 3\,000, k_2 = 6\,000, k_3 = 10\,000$).

3.2 参考模型选择

增加补偿环节是为了改善传感器的响应速度,其本质是扩大传感器频率响应的带宽. 为使补偿器的输出快速达到传感器稳态值,所以,参考模型选用较大固有频率的二阶低通滤波器,

$$H(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\zeta_0\omega_0s + \omega_0^2} \quad (10)$$

这里,阻尼比 $\zeta_0 = 0.8$,固有频率 $\omega_0 = 5\text{ rad/sec}$ 远大于薄膜热电偶的固有频率,但也不能够选取得太大,盲目地拓宽传感器的通频带,会使测量中存在高频噪声信号得到放大,使补偿失去意义.

3.3 补偿器辨识

补偿器的脉冲响应传递函数 $G(z^{-1}) = \frac{b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2}}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2}}$,即:补偿器 $G(Z^{-1})$ 的参数 $\theta = (a_1, a_2, b_0,$

$b_1, b_2)$,将在 (9) 式信号激励下的传感器输出 $y(k)$ 和参考模型输出 $y_d(k)$,作为补偿器的输入和希望输出. 经过 PSO 算法离线辨识,使得公式 (5) 成立.

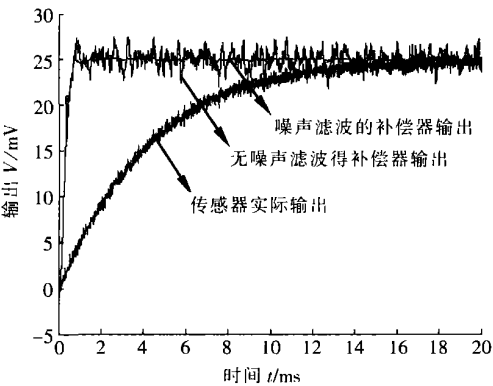


图 2 模型的阶跃响应仿真曲线

通过辨识过程得到补偿器 $G(z)$ 的参数 $= (-1.7835, 0.7994, 5.4628, -4.1838, -1.2632)$, 脉冲响应传递函数 $G(z^{-1})$ 为

$$G(z^{-1}) = \frac{5.4628 - 4.1838z^{-1} - 1.2632z^{-2}}{1 - 1.7835z^{-1} - 0.7994z^{-2}} = \frac{5.4628(z - 0.9976)(z + 0.2318)}{(z - 0.8918 - 0.0643i)(z - 0.8918 + 0.0643i)} \quad (11)$$

3.4 结果分析

由于补偿器的一个零点与影响传感器动态特性的极点接近,所以,传感器的输出信号经过补偿器后,克服了响应滞后误差.对薄膜热电偶动态补偿前后的阶跃响应仿真曲线,如图 2 所示.作者以 $e_i = |V_i - V_{di}|$,进行了误差分析:其中, V_{di} 输出稳定值, V_i 实际输出,传感器输出的电压稳定值 25 mV,每间隔 0.1 ms 采样一次,所得到的结果如表 1 所示.传感器的阶跃响应

表 1 结果分析

次序	测量值 /mV	误差 /mV	次序	测量值 /mV	误差 /mV
1	-0.5171	25.5171	8	25.1245	0.1245
2	0.1879	24.8121	9	24.8827	0.1173
3	6.2276	18.7724	10	25.0876	0.0876
4	13.6369	11.3631	11	24.9964	0.003
5	21.1147	3.8853	12	24.8332	0.1668
6	23.0402	1.9598	13	24.7877	0.2123
7	24.8082	0.1918	14	24.8183	0.0608

达到稳态值的时间由 20 ms 缩短为 0.7 ms,可以满足瞬态温度测量的要求.在增加了动态补偿环节后,测量系统的带宽增大,可以有效地消除传感器输出滞后的测量误差.但是,噪声也被严重放大,影响测量系统的精度.为了克服噪声的影响,这里采用多项式预测滤波和中值滤波相结合的方法^[6]消除噪声的影响.

4 结语

通过在薄膜热电偶传感器的输出端增加一个动态补偿环节,可以在一定程度上减小因传感器输出滞后所引起的动态测量误差.但是,一般设计动态补偿环节的方法需要知道传感器动态特性的数学模型,而建模的过程十分复杂,所以,在一定程度上限制了动态补偿环节的使用.为此,本文提出了一种基于微粒群(PSO)算法优化的薄膜热电偶动态误差补偿器的设计方法,该方法无需事先已知传感器的动态特性,可根据薄膜热电偶传感器以及参考模型对输入激励响应的实测数据,通过 PSO 算法的优化学习得到补偿器的参数.与一般方法相比具有不依赖传感器数学模型的特点,克服了建模带来的复杂性和建模简化所引起的误差.另外,补偿方法具有精度高、算法简单等特点,可以在单片机、智能仪器和仪表上实现.

[参考文献] (References)

[1] 李付国, 黄吕权. 薄膜热电偶的动态特性研究[J]. 仪器仪表学报, 1996, 17(3): 316~ 318
LI Fuguo, HUANG L ũquan Research of thin-film thermocouple dynamic characteristics[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1996, 17(3): 316~ 318

[2] 马勤弟, 雷敏. 薄膜热电偶的动态校准及辨识建模[J]. 仪器仪表学报, 1999, 20(3): 300~ 302
MA Qindi, LEIM in The Dynamic calibration and identification modeling of thin-film thermocouple[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1999, 20(3): 300~ 302 (in Chinese)

[3] 雷敏, 王志中, 马勤弟, 等. 薄膜热电偶的动态特性及动态补偿研究[J]. 计量学报, 1999, 20(3): 182~ 183
LEIM in, WANG Zhizhong, MA Qindi, et al Investigation of the dynamic characteristic of the thin-film thermocouple and dynamic compensation[J]. Acta Metrologica Sinica, 1999, 20(7): 182~ 186 (in Chinese)

[4] 刘清, 沈祖诒, 王柏林, 等. 热敏电阻测量误差的非线性逆滤波器补偿研究[J]. 上海交通大学学报: 自然科学学报, 2004, 38(9): 1601~ 1604
L ũ Qing, SHEN Zuyi, WANG Bailin, et al Researching measurement error of thermistor compensated by nonlinear inverse filtering[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University: Natural Science, 2004, 38(9): 1601~ 1604 (in Chinese)

[5] PARSOPOULOS K E, VRAHATISM N. Recent approach to global optimization problems through particle swarm optimization[J]. Neural Computing, 2002, 1(2): 235~ 306 (in Chinese)

[6] 刘清. 减小噪声干扰的热敏电阻传感器动态测量误差补偿[J]. 计量学报, 2005, 26(2): 111~ 114
L ũ Qing Dynamic measurement error compensating of thermistor with reducing noise disturbance[J]. Acta Metrologica Sinica, 2005, 26(2): 111~ 114 (in Chinese)

[责任编辑:刘 健]