

文章编号: 1001-3806(2014)02-0145-04

## 基于热电偶动态校准的非线性拟合方法研究

杨宇<sup>1,2</sup>, 郝晓剑<sup>1,2\*</sup>, 武耀艳<sup>1,2</sup>, 周汉昌<sup>1,2</sup>

(1. 中北大学 电子测试技术国家重点实验室, 太原 030051; 2. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051)

**摘要:** 为了提高热电偶动态校准的准确性, 采用半导体激光器、红外探测器和被校准热电偶组成新的热电偶动态校准系统, 分析了动态校准中红外探测器静态校准目的。根据反向传播神经网络原理, 确定了反向传播神经网络的结构和参量, 同时针对普通 K 型铠装热电偶进行了动态校准实验, 得到红外探测器静态校准数据, 由此数据采用最小二乘法和反向传播神经网络分别进行数据的非线性拟合, 对两种方法的拟合结果进行了分析, 并给出了拟合曲线。结果表明, 在样本数据少、分布不均匀的情况下, 反向传播神经网络拟合效果优于传统的最小二乘法, 减小了由于数据拟合所带来的误差, 能够更加准确地获得热电偶动态特性, 实现热电偶动态补偿。这一研究结果对于热电偶动态特性研究具有重要的参考价值。

**关键词:** 测量与计量; 动态校准系统; 静态校准; 反向传播神经网络; 非线性拟合

**中图分类号:** TN249 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.02.001

## Nonlinear fitting method based on dynamic calibration of thermocouples

YANG Yu<sup>1,2</sup>, HAO Xiaojian<sup>1,2</sup>, WU Yaoyan<sup>1,2</sup>, ZHOU Hanchang<sup>1,2</sup>

(1. National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** In order to improve the accuracy of thermocouple dynamic calibration, based on a new thermocouple dynamic calibration system composed of a semiconductor laser, infrared detector and calibration thermocouples, the static calibration of the infrared detector was analyzed in the dynamic calibration system. According to the principle of back propagation (BP) neural network, the structure and the parameters of neural network were determined. The dynamic calibration experiment with ordinary K type armor-loaded thermocouple was performed and the static calibration data of infrared detector was acquired. Nonlinear curve fitting was performed using the least square method and BP neural network. The fitting results of the both the methods were analyzed and the fitting curves were obtained. The results show that, the fitting effect of BP neural network is better than the traditional least square method when there is less and uneven distributed data. The error caused by data fitting is reduced, dynamic characteristics of the thermocouple are acquired more accurately and thermocouple dynamic compensation is realized. The study has an important reference to the research of thermocouple dynamic characteristics.

**Key words:** measurement and metrology; dynamic calibration system; static calibration; BP neural network; nonlinear fitting

## 引言

随着现代科学技术的快速发展, 如何提高热电偶的测量精度愈加重要。在瞬态温度测量过程中, 由于热电偶热惯性和有限热传导的因素, 使得测得的温度与实际温度存在差别, 这种差别即热电偶的动态误差, 为了减小热电偶的这种动态误差、提高测温精度, 需要对热电偶进行动态校准<sup>[1]</sup>。在动态校准过程中, 红外探测器静态校准非线性拟合的结果

基金项目: 山西省回国留学人员科研基金资助项目 (2012-068); 太原市科技局明星专项基金资助项目 (120247-20); 山西省人力资源和社会保障厅留学回国人员科技活动资助项目

作者简介: 杨宇 (1989-), 男, 硕士研究生, 主要从事测试计量技术及仪器等方面的研究工作。

\* 通讯联系人。E-mail: haoxiaojian@nuc.edu.cn

收稿日期: 2013-07-01; 收到修改稿日期: 2013-08-22

很大程度影响着热电偶动态校准的结果,因此,研究动态校准数据处理中非线性拟合的方法对于保证动态校准结果具有重要意义。非线性拟合的优势在于能够进行比较精确的曲线拟合,目前曲线拟合方法总体上可分为两类:一类是由于数据的背景资料规律相适应的解析表达式约束的曲线拟合;另一类是由几何方法或神经网络的拓扑结构确定数据<sup>[2]</sup>。因此,本文中利用新的热电偶动态校准系统对普通K型铠装热电偶进行动态校准实验,得到了红外探测器静态校准数据,采用最小二乘法与神经网络两种方法对这些数据进行了拟合,并对两种方法的拟合结果进行了分析,给出了拟合曲线。

### 1 热电偶动态校准原理与组成

热电偶动态校准系统组成结构如图1所示,此系统采用上升时间更快的大功率半导体激光器发出可控制单脉冲激光作为动态激励信号,由于半导体激光器具有一定的发散角而不能充分利用激光器的能量,因此,在激光器前放上激光聚焦透镜,可以使处于球面反射镜一个共轭焦点上的被校准热电偶表面瞬间产生温升,随之热电偶进行热传导和热辐射,热辐射经过球面反射镜聚焦到处于另一个焦点的红外探测器上,红外探测器与热电偶对热源同时进行测量,由于所选的光子器件为光电导型碲镉汞红外探测器,其时间常数小于 $10\mu s$ ,因此,红外探测器的频率响应优于被校准温度传感器的频率响应<sup>[3]</sup>,从而以前者的值作为真值来校准后者,并获取动态误差再进行动态补偿。

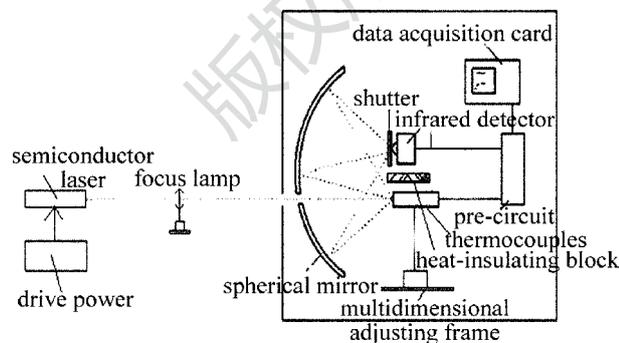


Fig. 1 Diagram of the dynamic calibration system

整个动态校准过程由红外探测器静态校准、红外探测器和被校温度传感器动态校准、瞬态表面温度的动态校准3个步骤组成<sup>[4]</sup>。动态校准过程原理如图2所示,其中静态校准的目的是为动态校准提供基准,红外探测器静态校准的主要目的是建立其

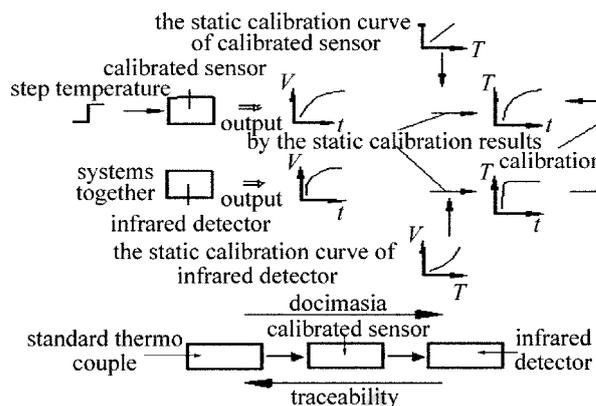


Fig. 2 Process of the dynamic calibration

测量电信号与温度传感器表面温度对应关系。红外探测器静态校准是通过量值传递的过程由标准热电偶传递给红外探测器。一方面保证了静态校准和动态校准在同一系统中进行,因此不存在传感器安装环境差异、热物性的变化产生的误差,提高了动态校准的精度;另一方面达到了可溯源的目的,由红外探测器的值可以追溯到国家计量标准<sup>[5]</sup>。

### 2 反向传播神经网络原理

反向传播(back propagation, BP)神经网络模型是神经网络模型中使用最广泛的一类,它是一种单向传播的多层前向网络,可分为输入层、隐层以及输出层,相连层采用全互联方式连接,同一层之间没有任何连接,输入层和输出层之间也没有任何连接<sup>[6]</sup>。图3为一个3层BP网络模型,其中输入层节点数为 $M$ ,输入变量为 $x_j(j=1,2,\dots,M)$ ;隐层节点数为 $q$ ,输入层节点与隐层节点间的连接权值为 $w_{i,j}(i=1,2,\dots,q;j=1,2,\dots,M)$ ,隐层节点的阈值为 $\theta_i(i=1,2,\dots,q)$ ,隐层节点输出为 $\phi_i(i=1,2,\dots,q)$ ;输出层节点数为 $L$ ,隐层节点与输出层节点间的连接权值为 $w_{k,i}(k=1,2,\dots,L;i=1,2,\dots,q)$ ,输出层节点的阈值为 $\alpha_k(k=1,2,\dots,L)$ ,输出层节点输出为 $o_k(k=1,2,\dots,L)$ 。

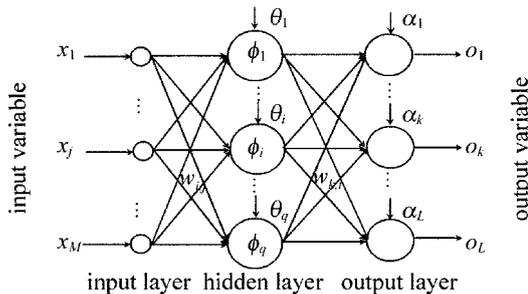


Fig. 3 Model of BP network

在 BP 神经网络模型中,隐层的层数确定和隐层节点数的确定是模型建立的关键<sup>[7]</sup>,对于隐层的层数,由著名的 Kolmogorov 定理证明,只要有足够多的隐层,神经网络模型就可以任意精度逼近一个非线性函数<sup>[8]</sup>。对于隐含层的节点数,一般由经验和实验摸索来确定。输入节点与输出节点个数一般由本身决定。除了以上确定网络结构的因素,关系到网络最终效果的还有学习率和迭代次数。学习率通常取 0.01 到 0.8。学习率太小会造成算法收敛比较慢,过大则可能会造成在最优值附近震荡而不收敛。对于迭代次数而言,如果次数太少,容易得不到最优值,太大则会造成计算的浪费。因此,具体值通过实践的效果来确定。BP 神经网络的算法除了输入样本和学习率决定外,各层的误差也决定了算法,如果输出响应与期望输出模式有误差,不满足要求,那么就转入误差后向传播,将误差值沿连接通路逐层传送并修正各层连接权值<sup>[9]</sup>。对于给定的一组训练模式,不断用训练模式训练网络,重复前向传播和误差后向传播过程,当各个训练模式都满足要求时,就可以说 BP 网络已学习好了。

### 3 红外探测器静标数据拟合实验结果及分析

通过动态校准系统对普通 K 型铠装热电偶进行动态校准实验,将被校准传感器和红外探测器放置于光学系统中的两个共轭焦点处,大功率半导体激光器发出一定长时间的激光使热电偶表面产生温升且向内传热,此时热电偶输出电压值,根据分度表可知此电压值下的温度值,同时,红外探测器接收到由球面反射镜聚焦的热电偶红外辐射信号,当热电偶达到热平衡时,迅速打开和关闭快门,使红外探测器接收辐射聚焦的信号并输出电压信号,记录下热电偶此温度下红外探测器对应的电压值,重复实验得到多组不同温度下不同电压数据,通过对这些数据非线性拟合,最终得到红外探测器电压-温度( $V-T$ )曲线<sup>[10]</sup>。由以上过程得到多组红外探测器的静标数据。采用传统的最小二乘法对实验数据进行非线性曲线拟合,拟合阶次分别为 5 阶和 11 阶,拟合结果如图 4、图 5 所示。从图中可以看出,分别采用低价次和高阶次进行拟合,尽管拟合后的结果基本上符合这些数据大体趋势,但是由于数据分布的不均匀性和非线性的复杂性,某些部分的拟合效果在量程内存在不佳的情况。虽然采用了高阶次拟合,在拟合程度上提高已知点上的精度,但是从图中

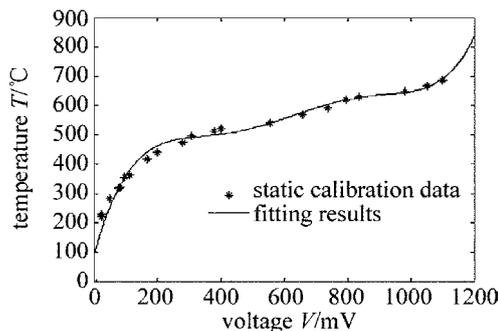


Fig. 4 The least-squares fitting results of 5-order polynomial

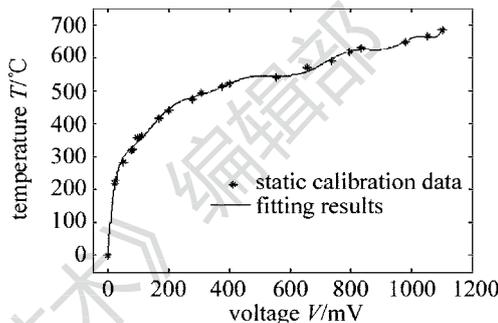


Fig. 5 The least-squares fitting results of 11-order polynomial

明显可以看出电压高时温度值反而降低的这种不符合事实的情况,采用这样的拟合结果处理红外探测器的输出电压是不准确的,显然会影响动态校准的结果。因此,在这种情况下,最小二乘意义下的最优解并不是最好的。

由于最小二乘法拟合效果不理想,因此,本文中采用 BP 神经网络拟合,设置迭代次数为 1000 次,学习率设置为 0.08,误差设置为 0.0000004,输入输出节点为红外探测器的电压值和温度值。如果选择单隐含层的网络结构,不管网络节点取多少拟合效果总是不够好。因此,选择双隐含层的网络结构,选取不同的节点数进行拟合,找到合理的拟合结果,分别选取节点数为 2 和 5,拟合结果见图 6 和图 7。通过拟合曲线进行对比发现,采用节点数多的情况下尽管提高了拟合精度,但是拟合效果并不理想,曲线

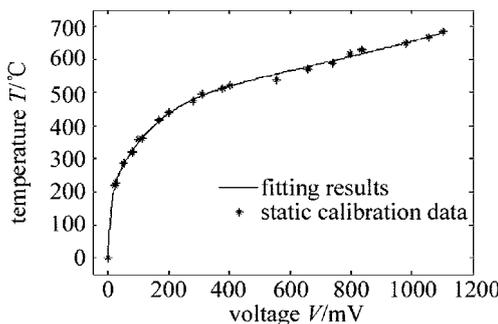


Fig. 6 The fitting result of two-hidden layer with 2 nodes

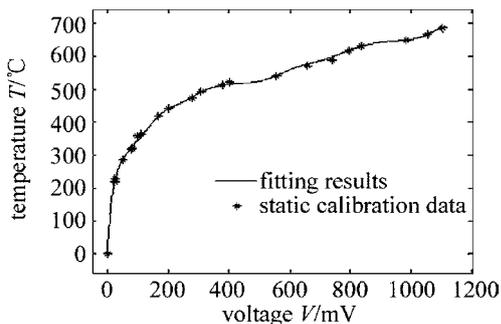


Fig. 7 The fitting result of five-hidden layer with 5 nodes

弯曲较多。采用节点数少的情况下,拟合精度虽然会降低一点,但是得到的拟合曲线更加光滑。因此,选取节点数为 2 的曲线拟合效果更加合理,而节点数多适合拟合更加复杂的非线性情况。

#### 4 结 论

介绍了一种利用半导体激光器作为温度发生装置的新的动态校准系统,系统优点在于应用了上升时间为纳秒量级的激光器,可以实现对时间常数为微秒量级的热电偶动态校准,对于热电偶动态特性研究具有重要的参考价值。在热电偶动态校准过程中,运用神经网络非线性拟合改善了最小二乘法拟合中的不足,减小了由于数据拟合所带来的误差,最终能够更加准确地获得热电偶动态误差,实现热电偶动态补偿。

#### 参 考 文 献

[1] LIANG L G, ZHOU H Ch, PAN D H. A study on the method of

calibration for transient surface temperature detectors[J]. *Acta Armamentaria*, 2001, 22(2): 263-265 (in Chinese).

[2] QIAO L Sh, WANG Y L, ZENG J G. Discussion on methods of curve fitting in experimental data processing [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2004, 31(1): 91-95 (in Chinese).

[3] HAO X J, LI K J, LIU J, *et al.* Traceability dynamic calibration of temperature sensor based on CO<sub>2</sub> laser [J]. *Acta Armamentaria*, 2009, 30(2): 156-159 (in Chinese).

[4] HUANG L. Research on dynamic calibration technology of transient surface temperature sensor [D]. Taiyuan: North University of China, 2007: 18-20 (in Chinese).

[5] HAO X J. Transient high surface temperature measurement and dynamic calibration [D]. Taiyuan: North University of China, 2005: 18-20 (in Chinese).

[6] HE Q B. Back propagation neural network and applications [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2004: 13-16 (in Chinese).

[7] TANG W M. The study of the optimal structure of BP neural network [J]. *Systems Engineering-theory & Practice*, 2005, 25(10): 96-100 (in Chinese).

[8] WU K, HARMS J. Performance study of a multipath routing method for wireless mobile ad hoc networks [C] // 9th International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems. Cincinnati, Ohio, United States: IEEE, 2001: 99-107.

[9] WU M X, ZHANG X L, WEN Sh H, *et al.* Summarization of BP neural networks improvement [J]. *Journal of Taiyuan University of Science and Technology*, 2005, 26(2): 120-125 (in Chinese).

[10] HAO X J, LI K J, ZHOU H Ch, *et al.* Research on dynamic measurement errors compensation technology of thermocouple [J]. *Journal of North University of China (Natural Science Edition)*, 2008, 29(4): 371-375 (in Chinese).