

·测试、试验与仿真·

热电偶动态校准及动态补偿技术研究

杨宇^{1,2}, 郝晓剑^{1,2}, 周汉昌^{1,2}

(1. 中北大学电子测试技术国家重点实验室, 山西 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, 山西 太原 030051)

摘要:介绍了利用大功率半导体激光器发出的脉冲激光作为激励源,使被校准热电偶表面产生温升,用响应速度快的红外探测器和对被校准热电偶同时对此温度变化信号进行探测,由于红外探测器的频率响应优于被校准热电偶频率响应,因此,以前者测得的值作为真值来校准后者的动态校准系统。利用该系统对普通K型铠装热电偶进行了动态校准,得到红外探测器和被校准热电偶温度-时间的曲线。热电偶补偿环节采用动态补偿滤波器进行建模,由测得的数据曲线来确定滤波器的阶次和参数,从而确立模型结构,并利用交叉检验法检验模型的正确性。试验表明:通过动态补偿模型减小了热电偶的动态误差,使之更接近于实际值,并给出了普通K型铠装热电偶补偿曲线。

关键词:热电偶;动态校准;动态补偿;建模;动态误差

中图分类号:TN215

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2013)-06-0077-04

Research on Technology of Dynamic Calibration and Compensation of Thermocouple

YANG Yu^{1,2}, HAO Xiao-jian^{1,2}, ZHOU Han-chang^{1,2}

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

Abstract: Pulse laser emitted by a high power semiconductor laser is used as an exciting source to make the temperature rise on the surface of the calibrated thermocouple. The temperature change signals are detected by a fast-response infrared detector and the calibrated thermocouple simultaneously. The frequency response of the infrared detector is better than that of the calibrated thermocouple, the previous measured value is used as a true value to calibrate the latter dynamic calibration system. An ordinary K-type sheathed thermocouple is calibrated dynamically by the system, a temperature-time curve of the infrared detector and calibrated thermocouple is obtained. The thermocouple's dynamic compensation is modeled with a dynamic compensation filter, the order and parameters of the filter are determined based on the measured digital curves and the model structure is defined. The correctness of the model is examined by cross-validation method. Experimental results show that the dynamic error of the thermocouple is reduced by means of the dynamic compensation model, which brings it closer to the actual value, and the ordinary K-type sheathed thermocouple compensation curve is given.

Key words: thermocouple; dynamic calibration; dynamic compensation; modeling; dynamic error

收稿日期:2013-10-05

基金项目:山西省回国留学人员科研资助项目(2012-068);太原市科技局明星专项资助项目(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,山西省晋城市人,硕士研究生,主要研究方向为测试计量技术及仪器;郝晓剑(1969-),女,副教授,博士,硕士研究生导师,中北大学信息与通信工程学院电子工程系主任,中北大学电子测试技术国家科技重点实验室、仪器科学与动态测试教育部重点实验室光电仪器与传感技术方向青年骨干,主要从事光电检测与动态测试工作。

在现代测温系统中,热电偶是最常用的温度传感器。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,由于热电偶的热惯性和有限热传导的因素,使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。因此,为了减小热电偶的动态误差,提高测温精度,需要研究热电偶的动态响应特性,传感器的动态特性是指传感器对于随时间变化的输入量的响应特性,因此,需要对热电偶进行动态校准获得动态误差修正值并进行动态补偿建立补偿模型^[1-3]。通过对热电偶进行动态校准,明确了热电偶动态响应特性,确定其性能指标。当在温度测试系统中选用的热电偶动态响应性能指标不符合设计和使用要求时,需要进行动态补偿或重新设计合适的热电偶^[4]。对于热电偶动态特性的研究,动态实验是基础,动态建模是关键,动态补偿、动态误差修正是目的^[5]。

文中介绍了基于大功率半导体激光器的热电偶动态校准系统,并利用该系统对普通K型铠装热电偶进行了动态校准,得到红外探测器和被校准热电偶温度-时间的曲线,由测得的曲线数据确定热电偶补偿环节模型结构,得到此热电偶补偿曲线。通过动态补偿减小了热电偶动态误差,补偿后的结果更接近于实际值。因此,对热电偶进行动态校准确定其动态响应特性对于保证温度的快速、准确测量具有非常重要的意义。

1 热电偶动态校准系统组成与原理

热电偶动态校准系统组成结构如图1所示。此系统采用大功率半导体激光器作为动态激励源发生装置,其产生的脉冲激光光束经聚焦透镜汇聚后通过屏蔽箱内不小于3 sr的输入窗口,加热处于球面反射镜一个共轭焦点上的被校准热电偶,被校准热电偶产生动态响应并由数据采集卡输出曲线,同时热电偶表面产生红外热辐射,热辐射信号经过球面反射镜聚焦到位于反射镜另一个共轭焦点的红外探测器上,随之红外探测器经数据采集卡输出曲线。系统中红外探测器采用光电导型碲镉汞器件,其响应波长为1~5 μm,灵敏波长为3~5 μm,响应时间小于10 μs。该波段覆盖了对于大多数情况下表面温度范围的辐射波长,因此,满足动态校准的需求。由于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^[6],因此,以前者的值作为真值来校准后者并

获取动态误差再进行补偿。

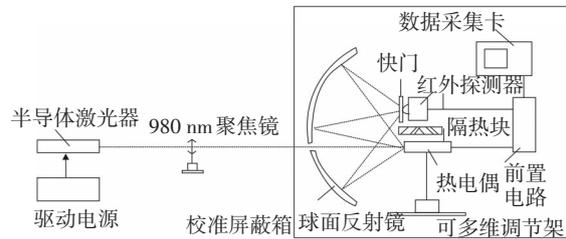


图1 动态校准系统组成

2 动态补偿建模

利用动态校准系统对热电偶进行动态校准的目的是为了改善热电偶的动态特性。由于热电偶的热惯性和有限热传导,导致热电偶存在动态误差。因此,必须考虑热电偶的动态补偿问题。整个热电偶动态校准过程由红外探测器与被校温度传感器的静态校准、红外探测器与被校温度传感器动态校准和瞬态表面温度的动态校准三个部分组成^[7]。通过热电偶动态校准过程最终得到被校准热电偶与红外探测器的温度时间($T-t$)曲线。由于红外探测器的频率响应特性优于热电偶,可以将红外探测器的值作为真值,以红外探测器的输出作为热电偶的输入,以热电偶的输出为输出,建立被校准热电偶的系统模型,从而得到系统的传递函数,最终达到了减小被校准热电偶动态误差进行动态补偿的目的。文中热电偶动态补偿环节模型采用设计动态补偿滤波器^[8]来实现,利用系统的激励和响应数据确定模型的结构。

激励信号不同,所采用的阶次辨识方法也不同。当激励信号为脉冲信号的时候,可以采用Hankel矩阵判秩定阶法,利用系统的脉冲响应判定系统阶次。与Hankel矩阵判秩定阶法思想类似的是行列式比判阶法,但是该方法利用的是输入数据。此外,在实际中还经常用残差的方差判定系统阶次的方法,模型阶次的确定方法有Hankel矩阵判秩定阶法、行列式比判阶法和残差的方差判阶法。文中采用残差的方差^[9]判定系统阶次,由残差的方差性质, \hat{n} 从1开始逐一增加,若 L 充分大,则 $V_1(\hat{n})$ 将随 \hat{n} 递减,减到某一固定值时,对应的 \hat{n} 可认为是过程模型的阶次。

确定动态补偿滤波器的阶次之后,还要求出对应的滤波器的参数,比较常用的参数确定方法是最小二乘法。该方法可以根据输入输出数据一次性求

取滤波器的参数,但是该方法可辨识的条件是 $H_n^T H_n$ 的逆存在,使所得参数估计 \hat{n} 取值很不稳定,并且有时候在最小二乘意义下得到的解也不一定就是最优解。为了克服传统最小二乘法的不足,文中采用粒子群智能优化算法^[10]求解动态补偿滤波器的参数。

3 普通K型铠装热电偶实验结果及分析

通过以上静态校准过程的描述,设置激光器脉冲时间为 8 s,调节激光器的功率控制旋钮使其逐渐增大,最终记录下多组红外探测器电压-温度数据,经过神经网络非线性拟合得到红外探测器电压-温度曲线如图2所示。由于红外辐射温度计(红外探测器)的放大器采用的是交流放大器,存在电容漏电的现象,所以在温度下降的过程中,会出现电压为负值的情况,转化成温度后会小于 0 °C 如图3中所示,这是不符合常理的,所以实验中截取了部分数据用来对动态补偿滤波器进行辨识。另外,由于该热电偶是铠装热电偶,在标定的过程中,其输出会有一些的延时,根据多次试验观察,该延时大约为 30 ms,为了保证动态补偿滤波器的因果性,实验中将红外辐射温度计的输出延后 30 ms 后再进行补偿环节的辨识求解。

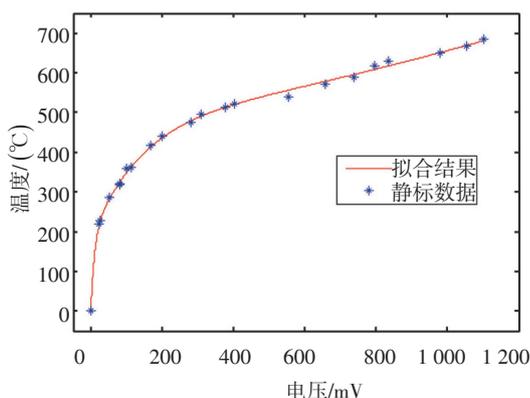


图2 双隐层神经网络拟合效果

文中取每个系数的范围为[-2, 2],可以肯定在该范围内必然能够找到系数的最优解。根据设置激光脉冲时间为 100 ms,驱动电路电流为 50 A 时得到的曲线如图3,可得动态补偿滤波器模型的阶次为5阶,采用粒子群智能优化算法对动态补偿滤波器进行辨识,最后得到其补偿曲线如图3所示。为了验证模型

的准确性,用辨识得到的模型对激光脉冲时间为 100 ms,驱动电路电流为 40 A 时得到的动态标定的数据进行动态补偿效果的验证,效果如图4所示。从图中可以看出,文中所辨识得到的动态补偿滤波器可以很好地消除热电偶在温度测量中产生的动态误差。

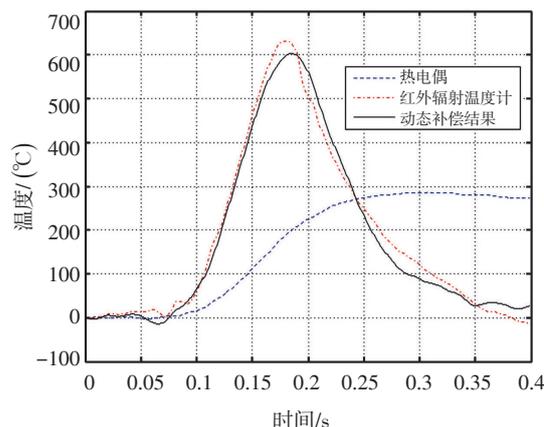


图3 热电偶动态补偿样本数据

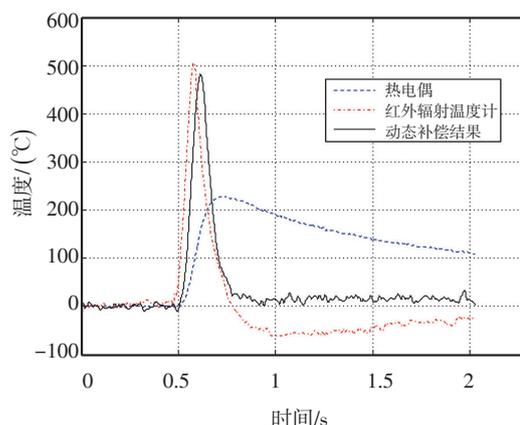


图4 热电偶动态补偿验证结果

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热电偶动态校准系统,系统中采用了上升时间更快的半导体激光器,可以实现对微秒级传感器的动态校准。通过动态校准系统得到的数据建立热电偶输入输出关系,建立动态补偿滤波器模型,此模型达到了减小热电偶测量动态误差以及提高测温精度的目的。由于目前对热电偶的动态校准尚没有统一的方法,因此,此系统对于热电偶的研究与应用具有重要的参考价值。

参考文献

- [1] 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]. 仪器仪表学报,1999,20(3): 183-186.
- [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.
- [3] 孟宪文. 瞬态表面温度传感器动态测量误差补偿技术研究[D]. 太原:中北大学,2007.
- [4] 郝晓剑,李科杰,周汉昌,等. 热电偶动态测量误差补偿技术研究[J]. 中北大学学报(自然科学版),2008,29(4): 370-375.
- [5] 郝晓剑. 瞬态表面高温测量与动态校准技术研究[D]. 太

原:中北大学,2005.

- [6] 郝晓剑,李科杰,刘健,等. 基于CO₂激光器的温度传感器可溯源动态校准[J]. 兵工学报,2009,30(2):156-159.
- [7] 黄亮. 瞬态表面温度传感器动态校准技术研究[D]. 太原:中北大学,2007.
- [8] 赵阳. 传感器的非线性校正及动态补偿研究[D]. 上海:上海交通大学,2007.
- [9] 易伟建,刘翔. 动力系统模型阶次的确定[J]. 振动与冲击,2008,27(11):13-16.
- [10] 刘清,曹国华. 基于微粒子群算法优化的微硅加速度传感器动态补偿研究[J]. 仪器仪表学报,2006,27(12): 1707-1710.

(上接第76页)

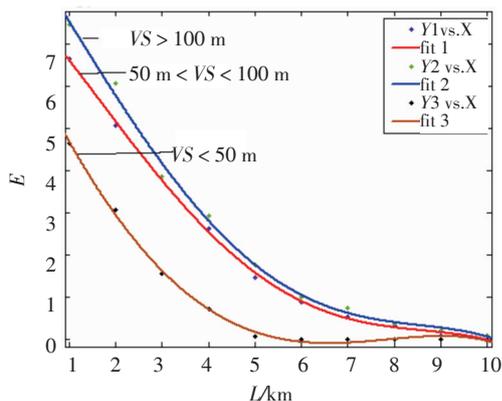


图2 雾中辐射传输衰减与距离的关系

3 结束语

除云层以外,红外辐射在传输过程中还会受到雾和雨的影响,结合前人的经验公式,分别分析了雨滴和雾滴的粒子尺度分布,并使用雨和雾对辐射传输的衰减公式进行了计算。计算结果显示,雨的衰减作用随辐射传输距离增大而增大,不同降水量时其衰减速率不同;雾的衰减作用随着传输距离的增大越来越明显,不同的能见度下,衰减的速度也不一样,能见度较大的雾比能见度较小的雾的衰减作用要弱一些。

参考文献

- [1] 韩艳丽,王铎,郭少军,等. 近红外白天恒星探测对比度分析[J]. 应用光学,2012,33(5):969-973.
- [2] Gunn R, Kinzer G D. Terminal velocity of water droplets in stagnant air[J]. J Meteor, 1949,6(4):243-248.
- [3] 陈宝君,李子华,刘吉成. 气象学报,1998(56):506.
- [4] Oguclu T. Proceeding of the IEEE 1983,71:1029.
- [5] Laws J O, Parsons D A. Trans. Am. Geophys. Unio, 1943,24: 452.
- [6] Joss J, Thames J C, Waldvogel A. Proc. Internat. Conf. on Cloud Physics, 1968:369.
- [7] Keuchi D M. Preprints of Conf. Cloud Physics and Atmospheric Electricity Amer[J]. Meteor. Soc, 1978:154.
- [8] Ulbrich C W. Preprints of 20th Conf[J]. Radar Meteorology Amer. Meteor. Soc 1981: 276.
- [9] Wolf D A. Radio Science,2001,36:639.
- [10] Brussaard G, Watson P A. Atmospheric Modeling and Millimeter Wave Propagation [M]. London: Chapman & Hall, 1995:285-296.
- [11] 贾建周,宋德安,贾仁耀,等. 激光大气传输衰减的估算方法[J]. 电子信息对抗技术,2010,25(4):73-76.
- [12] 李娣,陈辉. 激光大气传输的雨雾衰减特性研究[J]. 电子设计工程,2011,19(9):1-5.
- [13] Van de Hulst H C. Light Scattering by Small Particles[M]. New York: John Wiley & Sons, 1957:179.