

# 离轴抛物面镜在温度传感器校准系统中的应用

(中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室,太原 030051)

关键词: 测量与计量; 传感器动态校准系统; 动态校准; 离轴抛物面镜; 热电偶

中图分类号: TP212.1<sup>+</sup>1      文献标识码: A      doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.01.012

## Application of off-axis parabolic mirrors in temperature sensor calibration systems

(Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement of Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** In order to improve focusing effect of the crystalline lens on the laser beam in a temperature sensor dynamic calibration system, a  $90^\circ$  off-axis parabolic mirror was used instead of the crystalline lens. The influence of the misalignment angle of the  $90^\circ$  off-axis parabolic mirror on the focused laser spot was studied according to geometrical optics. Utilizing the improved system, the CHAL-010-type thermocouple's time constant at step temperature around  $242^\circ\text{C}$  was tested and the dynamic calibration experiment was carried out. The results show that the new system reconstructed with the  $90^\circ$  off-axis parabolic mirror can fulfill the dynamic calibration of temperature sensors.

**Key words:** measurement and metrology; sensor dynamic calibration system; dynamic calibration; off-axis parabolic mirror; thermocouple

## 引 言

在瞬态高温测量中,温度随时间迅速变化,测温传感器由于感温件的热惯性和有限热传导,测出的温度与实际温度存在差别,即所谓的动态响应误差。为了尽量减少这类系统误差,一般需对测温传感器进行动态校准。校准装置<sup>[1]</sup>中激光束光学变换系统为球面共轴系统<sup>[2]</sup>,存在一条对称轴线,系统不能拐弯,占用空间大、操作不方便;光学系统中硒化锌晶体透镜透射光波波长单一,不能用于其它波长的激光器激光束的聚焦,不利于激励源的升级,因此,需要对校准系统中的光学系统进行改进。用90°离轴抛物面镜代替晶体透镜,利用其能改变光学系统光轴方向和较宽的波段响应特性,对系统进行改造,使其更加紧凑。

作者简介: 江练勇(1982-),男,硕士研究生,现主要从事温度传感器动态校准技术的研究。

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

收稿日期: 2011-04-11; 收到修改稿日期: 2011-05-30

## 1 离轴抛物面镜

### 1.1 离轴抛物面镜的聚焦原理

在抛物面的对称面一侧,按一定规格截取抛物面上的一部分,然后,在其表面镀铝膜或镀金膜而形成的反射镜称为离轴抛物面镜。在理想情况下,入射光束严格平行于光轴时,反射光束聚焦于离轴抛物面镜的焦点<sup>[3]</sup>。如图1所示, $F$ 为离轴抛物面镜的焦点,选入射光一波振面 $ABC$ ,经离轴抛物面镜反射后相交于 $F$ 点。入射光束与反射光束之间的夹角称为离轴抛物面镜的反射面角度,目前,按反射面角度的不同,分为 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 几种规格。入射光束经离轴抛

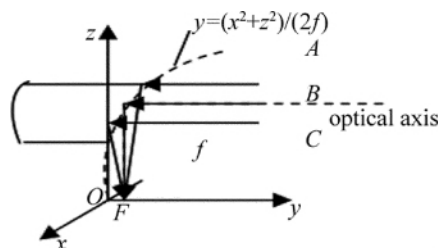


Fig. 1 Coordinate diagram of a  $90^\circ$  off-axis parabolic mirror

物面镜反射后传播方向发生改变,其所对应的光学系统为非球面共轴系统。

## 1.2 离轴抛物面镜的反射率

镀有铝膜或金膜的离轴抛物面镜,虽然镜表面吸收率比透镜略高(1%~2%),但使用这种方式对激光束聚焦不仅不会产生热透镜效应,还能消除透镜聚焦不可避免的球面像差。如图2和图3所示,从近红外到中红外线,镀铝膜或金膜的抛物面镜都有极高的反射率,从而为升级激励源创造了条件,可以使用不同波长而上升前沿更快的激光器作为激励源。从图中可以看出,在近红外波段,镀金膜抛物面镜的反射率高于铝膜抛物面镜的反射率。

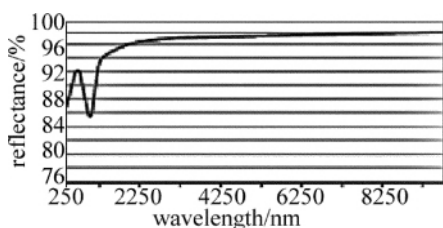


Fig. 2 Theoretical reflectance curve for protected aluminum Al

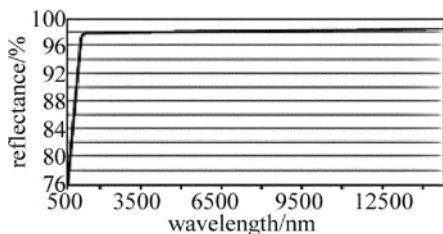


Fig. 3 Theoretical reflectance curve for protected gold

## 1.3 入射失准角对焦斑的影响

这里主要讨论 $z=0$ 平面及焦平面上的光斑分布,忽略入射光束发散角的影响,将入射光束视为平行均匀分布圆光束。两种光束失准条件下的入射偏角分别记为 $\theta$ 和 $\varphi$ ,其对应焦平面处的光斑只在坐标上有细微差别<sup>[4-6]</sup>。图4是偏角 $\theta$ 分别取1mrad、2mrad、3mrad、4mrad、6mrad时( $\varphi=0$ ),焦平面( $z=0$ )上的光斑图。从图中可以看出,焦平面处的焦斑半径随着入射偏角 $\theta$ 的增大而增大。 $\theta$ 取值很小,则 $\sin\theta \approx \tan\theta \approx \theta$ ,由几何方法可以证明,焦面半径大致与入射偏角 $\theta$ 成正比。在相同入射光功率的情况下,入射偏角 $\theta$ 的存在大大降低了焦斑的光强。因此,在为了充分利用激光束输出功率,应对离轴抛物面镜进行微调,使入射偏角趋于0。在实验过程中,为了得到合适的激光功率或光斑半

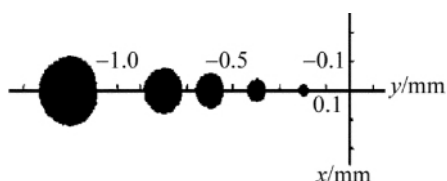


Fig. 4 Spot diagram at focal plane ( $z=0$ ),  $\theta = 1\text{mrad}, 2\text{mrad}, 3\text{mrad}, 4\text{mrad}, 6\text{mrad}$  ( $\varphi=0$ )

径,可以沿 $z$ 轴调节被加热的物件。 $z=l(l \neq 0)$ 平面上的光斑半径,可以利用参考文献[7]中给出的方法求出。

## 2 测试系统及方案

图5是校准系统原理图。激光器发出的激光束经过光学系统的变换后被校准传感器接收,再经后继系统对接收信号进行处理。在校准系统的光学系统部分中,晶体透镜的球面像差对聚焦性能有一些影响,在短焦距及要求高时尤其不可忽略。还有透镜的膜层对激光的吸收及透镜在高功率激光照射下产生的形变<sup>[8]</sup>都会导致聚焦效果不理想。与晶体透镜相比,通过对离轴抛物面镜精细调节,使入射光束与离轴抛物反射镜的光轴平行,可以消除球面像差,并且在这种情况下,其聚焦光路可以等价为高斯光束经过透镜的聚焦<sup>[9]</sup>,此时,抛物面镜的焦距等于透镜焦距,且在高功率激光器的照射下不会产生形变。温度传感器动态校准系统采用高功率脉冲可调 $\text{CO}_2$ 激光器作为整个系统的阶跃发生装置,对温度传感器进行加热,提供一个温度激励信号。 $\text{CO}_2$ 激光器的波长 $10.6\mu\text{m}$ ,镀金膜层的离轴抛物面镜在 $10.6\mu\text{m}$ 处的反射率达到96%以上,损失的功率很小。

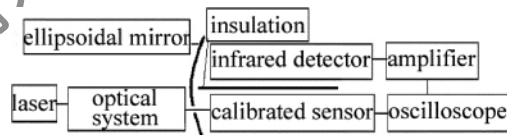


Fig. 5 Schematic diagram of a calibration system

图5中整个系统的工作过程如下:辐射温度计(红外探测器)和被校传感器分别置于椭球面反射镜的一对共轭焦点上,为了避免二者的直接辐射热传递,加入一个隔热块。椭球面反射镜的一侧留有激光加热脉冲入射窗口,其孔径要保证一个不小于 $3\text{sr}$ 的有效光收集固定角度。图中的辐射温度计为光导型碲镉汞红外探测器,灵敏波长为 $3\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$ ,该波长是对应大多数情况下的表面温度范围的最大辐射波长。为了充分利用 $\text{CO}_2$ 激光器的能量,安装全反射镜和 $90^\circ$ 离轴抛物反射镜对激光器的能量进行汇聚,最终输入到被校准的传感器。系统中采用了相干公司的K500型大功率高频可调制 $\text{CO}_2$ 激光器(输出功率 $25\text{W} \sim 500\text{W}$ 、峰值功率 $250\text{W} \sim 1500\text{W}$ 、重复频率 $0\text{kHz} \sim 100\text{kHz}$ )作为加热热源来实现温度传感器的现场动态校准。

## 3 HAL-010型热电偶的动态校准

### 3.1 CHAL-010型热电偶的时间常数

对于热电偶时间常数的测试,温度阶跃的上升时间应远小于被测热电偶的时间常数,才能使测得结果具有较好的准确性。一般方法是按输入为阶跃信号对其进行动态校准实验,从输出响应曲线上直接获取时

间常数。传感器的输出与初始温度差达到整个温度阶跃的 63.2% 时,所经历的时间称为时间常数。系统采用相干公司的 K500 型  $\text{CO}_2$  激光器,经测试其脉冲上升时间为  $72\mu\text{s}$ ,脉宽可调( $2\mu\text{s} \sim 1000\mu\text{s}$ ),并且可连续加热,其温度范围可覆盖常温到  $2000^\circ\text{C}$ ,是测量亚毫秒至秒量级的热电偶时间常数的理想激励源<sup>[10]</sup>。

利用改进后的系统测试 CHAL-010 型热电偶的时间常数,在阶跃温度为  $242^\circ\text{C}$  时测得该热电偶的时间常数为  $1.88\text{s}$ ,图 6 为测试得到的波形图。

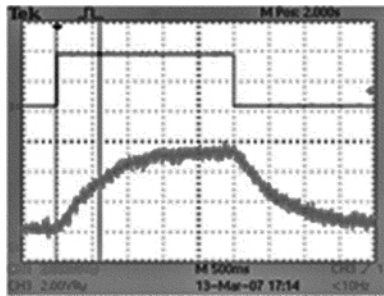


Fig. 6 Typical response curves of time constant for CHAL-010-type thermocouple

### 3.2 CHAL-010 型热电偶的动态校准

从某时刻开始用重复频率足够高的激光脉冲序列加热被校传感器,产生一个准阶跃温度变化。脉冲激光产生的热量被被校传感器表面吸收,且向内传热。被校传感器温度脉冲激光产生的热量被被校传感器表面吸收,且向内传热。被校传感器温度升高产生红外热辐射,经球面反射镜聚焦成像,此时,在球面反射镜另一个共轭焦点的辐射温度计也会产生一个相应的温度变化。用示波器记录被校传感器和辐射温度计的电压输出,即可得出在某一温度时,辐射温度计和被校传感器的电压-时间( $U-t$ )曲线。对 CHAL-010 型热电偶动态校准的波形如图 7 所示,曲线 1 激光器输出激光束的时间,曲线 2 和曲线 3 分别是红外探测器和 CHAL-010 型热电偶的响应曲线。

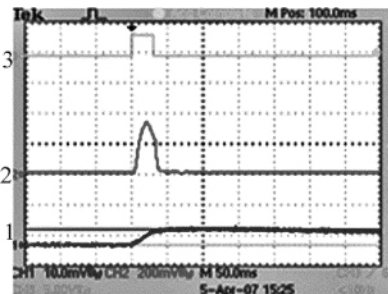


Fig. 7 Dynamic calibration curves of CHAL-010-type thermocouple

## 4 结果及分析

将离轴抛物面镜应用于传感器动态校准系统中,并利用改进后的系统对 CHAL-010 型热电偶进行时间常数和动态校准测试,实验得到的波形图(见图 6、图 7)和参考文献<sup>[11]</sup>中的基本一致,初步证明了离轴抛

物反射镜在传感器动态校准系统中的应用。与原系统图<sup>[12]</sup>相比,改进后的系统存在以下优点:(1)系统所占实验空间更小,便于操作。原系统中所有的实验仪器都是排列在一条直线上,所以系统不能拐弯,整个系统所占的空间很大,实验过程需要两个人同时进行操作,容易引进操作上的误差;改进后的系统占用空间大大减少,整个校准系统都能集合在一个光学平台上,由一个人进行操作,避免了操作过程中引入不必要的误差;(2)拓宽了激励源。晶体透镜只能透过某一特定波长的激光束,升级激励源的同时对校准系统中晶体透镜进行更换,从而造成不必要的浪费。从图 3、图 4 中可以看出,离轴抛物面镜对近红外、中红外线都有极高的反射率,这样,激励源可以用光纤激光器或半导体激光器代替,获得更快的脉冲上升前沿,使校准环境更接近实际使用中的环境。

### 参考文献

- [1] CHEN W L, ZHOU H Ch, HAO X J, *et al.* Test analysis of the laser's response time in the transient dynamic calibration system of high-temperature transducer [J]. *Metrology & Measurement Technique*, 2005, 32(7): 16-17.
- [2] AN L Sh. *Journal of applied optics* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2007: 14-73 (in Chinese).
- [3] TANG X H. High power transverse flow  $\text{CO}_2$  laser and its applications [M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2008: 172-174 (in Chinese).
- [4] SHI H B, CHENG Zh G, XU G L, *et al.* Study on focusing spot characteristic by off-axis parabolic mirror [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2000, 27(10): 880-884 (in Chinese).
- [5] TAO X Y, ZHOU H R, LÜ B D. Study on beam propagation characteristics by means of the Fourier series expansion [J]. *Laser Technology*, 2003, 27(2): 150-152 (in Chinese).
- [6] HAN R D, SHEN X J, WANG L. Transmission characteristics of flattened Gaussian beams passing through a misaligned optical system [J]. *Laser Technology*, 2010, 34(5): 704-706 (in Chinese).
- [7] XIAO R S, MEI H H, ZUO T C. The role of laser beam performance in laser materials processing [J]. *Journal of Beijing Polytechnic University*, 1996, 22(3): 43-45 (in Chinese).
- [8] LI B, LI Y D, CHEN J Q, *et al.* The influence of thermal-lens effect on laser beam focusing [J]. *Optical Instruments*, 2007, 29(6): 44-48 (in Chinese).
- [9] LUO X, CHEN P F, WANG Y. Analysis of  $90^\circ$  off-axis parabolic mirror focal spot characteristic [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(3): 683-686 (in Chinese).
- [10] REN L, HUANG F L. Analysis and prospect on studying dynamic characteristics of temperature sensors [J]. *Chinese Journal of Science Instrument*, 2009, 38(2): 50-51 (in Chinese).
- [11] HAN D S, HAO X J, WANG G. The application of SR830 lock-in amplifier the transient temperature sensor dynamic test [J]. *China Instrumentation*, 2007, 27(12): 32-34 (in Chinese).
- [12] CHEN W L, HAO X J. The optic design of the surface temperature sensor's traceable dynamic calibration system [J]. *Sensor World*, 2006, 12(2): 12-15 (in Chinese).