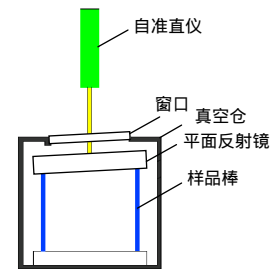




红外材料低温热膨胀系数测量方案及其精度分析

倪磊*, 黄宝锐, 李培林

西南科技大学制造过程测试技术教育部重点实验室, 四川 绵阳 621010



摘要: 为了实现低温真空环境下红外材料热膨胀系数的高精度测量,提出了一种固体材料低温热膨胀系数的测量方案。本方案基于自准直原理,设计了一种测微结构,建立起了结构变形与角度的关系,并推导出热膨胀系数测量公式。利用测量公式,从理论上分析了该方案的测量误差传递函数关系,并利用误差灵敏度函数对红外材料低温热膨胀系数测量装置的设计精度进行了分析,最后通过计算得到了该方案的测量相对误差。结果表明,测量的热膨胀系数相对误差仅为0.76%,满足纳米级测量要求。

关键词: 低温热膨胀系数测量; 微变形测量; 误差传递函数; 低温光学

中图分类号: TN213

文献标志码: A

Measurement of cryogenic thermal expansion coefficient and accuracy analysis

Lei Ni*, Baorui Huang and Peilin Li

Key Laboratory of Testing Technology for Manufacturing Process, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China

Abstract: In order to realize the high-precision measurement of the thermal expansion coefficient of the infrared material under the cryogenic vacuum environment, a measurement scheme of solid material is proposed. Based on the self-collimation principle, this scheme designs a microstructure, establishes the relationship between structural deformation and angle, and deduces the formula of thermal expansion coefficient measurement. Using the measurement formula, this article analyzes the relationship between the measurement error transfer function of the scheme, and also uses the error sensitivity function to analyze the design accuracy of cryogenic thermal expansion coefficient measuring device for infrared materials, and finally the relative error of the scheme is calculated. The thermal expansion coefficient of the scheme is measured to be only 0.76%, which satisfies the nanometer measurement requirement.

Keywords: cryogenic thermal expansion coefficient measurement; micro deformation measurement; error transfer function; cryogenic optics

DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.10.010

Citation: *Opto-Elec Eng*, 2017, 44(10): 1014–1021

1 引言

现代红外探测系统为了提高探测效率,一般都需

要将光学元件进行低温致冷,目前设计和研发低温下红外光学系统的一个重要难题就是缺少光学元件材料在低温下的物理特性,例如折射率特性、热膨胀特性等^[1]。低温下的折射率改变主要受两方面影响,一是电子极化率,二是材料的热膨胀特性(主要影响材料密

收稿日期: 2017-07-26; 收到修改稿日期: 2017-09-24

*E-mail: sunshinedavy@qq.com

度)。对低温下红外材料热膨胀系数的测定,可以为低温下红外光学系统的研究提供理论依据。国内外对红外材料特性做了大量研究^[2-9]。国外,印度矿业大学对二元半导体的热膨胀系数做了测量,但缺乏对低温环境红外材料热膨胀系数的研究^[10];日本名古屋理工大学通过固相反应合成 NZP 族陶瓷,在 $-150\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内通过 X 射线衍射测定其热膨胀特性。测得 SrZP 陶瓷的平均热膨胀系数为 $0.2\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,但还是缺乏红外材料的数据^[11]。国内,上海交通大学制冷与低温工程研究所研制了一套基于千分测微器的热膨胀系数测量装置,能够测量 80 K~353 K 温区各类固体材料的热膨胀系数,但没有涉及到红外材料^[12];华南理工大学用 TMA-30 型仪器测定了 SiC 材料在室温至 1273 K 温度范围内的线膨胀系数,但还是缺乏低温的数据^[13]。本文提出了一种高精度低温热膨胀系数测量方案,并对该方案进行理论研究和精度分析,为测量仪器的设计和搭建提供依据。

2 低温热膨胀系数测量方案及原理

2.1 低温热膨胀系数测量方案

由于物体具有随温度变化体积发生变化的特性,其变化能力以热膨胀系数来定义,即压强一定的情况下,单位温度变化所导致的长度的变化量,单位为 $1/\text{K}$ ^[14]。

2.1.1 基本术语

1) 线性热膨胀系数

在压强一定的情况下,试样长度变化量与试样初始长度的比值,也就是长度的相对变化量:

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_0}, \quad (1)$$

其中: ΔL 是试样从初始温度到温度变化稳定后的长度的变化量, L_0 是初始温度下试样的长度。线性热膨胀系数常以百万分之几表示。

2) 平均线性热膨胀系数

在初始温度 t_1 与温度变化稳定后的温度 t_2 之间,温度每变化 1 K 试样长度的相对变化量,用 α_m 表示:

$$\alpha_m = \frac{L_2 - L_1}{L_0(t_2 - t_1)} = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot \frac{1}{\Delta t} \quad (t_1 < t_2), \quad (2)$$

从式(2)可知,平均线性热膨胀系数就是线性热膨胀系数与温度变化量的比值,单位为每摄氏度。

3) 瞬间线膨胀系数

在温度 T 下,温度变化 1 K 对应的线性热膨胀值

用 α_t 表示,公式定义为

$$\alpha_t = \frac{1}{L_i} \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \frac{L_2 - L_1}{t_2 - t_1} = \frac{dL}{dt} \cdot \frac{1}{L_i}. \quad (3)$$

2.1.2 测量方案

基于自准直测角原理,提出了一种固体材料热膨胀系数测量方案,具体实现方式如图 1 所示,采用一个样品柱和两个支撑柱支撑一个平面反射镜的结构,三个圆柱棒以正三角形方式放置。当温度发生变化时,样品柱的长度会发生变化,导致顶部的平面反射镜的倾斜角度发生变化。通过装置顶部的自准直仪来测量平面反射镜的倾斜角度变化量,来推算固体材料的热膨胀系数。

需要注意的是,为了使样品柱达到较低的温度,需要对样品柱测量环境抽真空,所以温控部分必须整体放入真空仓中,同时,为了防止真空窗口对自准直仪测量造成影响,需要将窗口倾斜一定的角度,如图 1 所示。

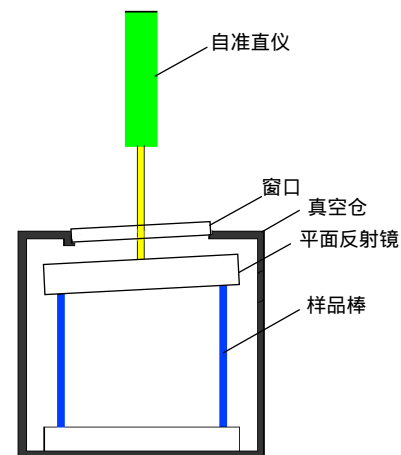


图 1 热膨胀系数测量方案示意图。

Fig. 1 Framework of thermal coefficient measuring system.

2.2 低温热膨胀系数测量原理

本方案的测量原理如图 2 所示,在测量时,控制样品棒的温度,两个支撑柱的温度保持不变,在测量过程中,由于样品柱热胀冷缩的特性, L_1 样品柱长度发生变化,从而引起 θ 角变化。

固体材料温度变化时,材料的长度变化量计算公式为

$$\Delta L = L_0 \alpha (t_2 - t_1) = L_0 \alpha \Delta t, \quad (4)$$

式中: ΔL 为样品长度变化量; L_0 为样品初始长度; α 为样品材料的热膨胀系数; Δt 为温度变化量。

从图 2 热膨胀系数测量原理图可得,在温度变化

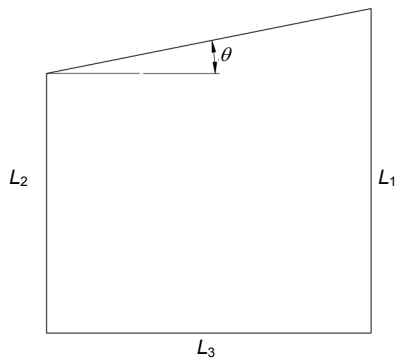


图2 热膨胀系数测量原理图.

Fig. 2 Measurement of thermal expansion coefficient.

之前:

$$\tan \theta_1 = \frac{L_1 - L_2}{L_3} \quad (5)$$

温度变化之后,平面反射镜的倾斜角度会发生变化:

$$\tan \theta_2 = \frac{L_1 - (L_2 - \Delta L_2)}{L_3} \quad (6)$$

其中 $\Delta L_2 = \alpha L_2 \Delta t$ 。代入式(6),得到:

$$\tan \theta_2 = \frac{L_1 - L_2 + L_2 \alpha \Delta t}{L_3} \quad (7)$$

整理式(5)、式(6)、式(7)可以得到材料的热膨胀系数测量公式。设温度变化后,平板角度变化为 $\Delta \theta$, 则 $\theta_2 = \theta_1 + \Delta \theta$, 可得公式:

$$\alpha = \frac{L_3 [\tan(\theta_1 + \Delta \theta) - \tan \theta_1]}{L_2 \Delta t} \quad (8)$$

从式(8)可以看出,材料在低温下的热膨胀系数测量的本质是平板角度的测量。

3 方案系统误差与误差传递规律

本方案通过测量角度变化来得到热膨胀系数,是一种间接测量方案。通过测量冷却前后反射镜偏转角度差、样品柱与支撑柱之间距离、样品柱长度及温度差来间接得到热膨胀系数。由于测量精度比较高,因此要考虑可能的误差源,例如装置的安装以及零件的加工也会存在误差,这些误差还会相互影响,所以对装置进行误差及精度分析,对每一个可能的误差源进行控制,以保证仪器总体精度满足要求。

3.1 误差源分析

根据测量方案图3所示, θ_1 表示样品柱冷却前反射镜偏转角度; θ_2 表示样品柱冷却后反射镜偏转角度; L_3 表示样品柱与支撑柱之间距离; L_2 表示冷却前样品

柱的长度。误差源来自于以下方面,样品柱与台面的垂直度误差 δ_1 ; 测量冷却前样品柱长度时有测量误差 δ_2 ; 样品柱与支撑柱之间距离有加工误差 δ_3 ; 自准直仪测量 $\Delta \theta$ 的误差 δ_4 ; 温度值的测量误差 δ_5 。

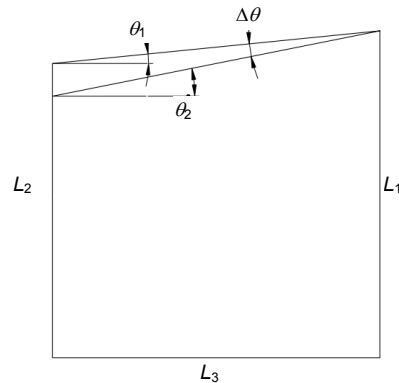


图3 样品柱冷却前后反射镜偏转示意图.

Fig. 3 The mirror deflection of the sample column before and after cooling.

误差来源较多,但总体可以分为两类,即冷却前反射镜偏转角度 θ_1 的误差 e_1 和反射镜偏转的角度差 $\Delta \theta$ 的误差 e_2 。根据误差的传递关系可以得到如图4所示误差源分类。

3.2 误差灵敏度分析

要计算各个因素引起的热膨胀系数误差大小就要求出各个因素的误差灵敏度。

3.2.1 一级误差灵敏度

用 S_1 表示 e_1 的误差灵敏度; S_2 表示 e_2 的误差灵敏度。在式(8)中: $L_2 = L_3 = 100 \text{ mm}$, $\Delta T = 10 \text{ K}$ 。 θ_1 表示因样品柱不垂直于台面造成的反射镜偏转角度,为保证误差按照最大计算原则, θ_1 取最大值。当公差等级为6时, $\theta_1 = 26''$, $\Delta \theta = 391.79''$ 。

$$S_1 = \frac{\partial \alpha}{\partial \theta_1} = \frac{L_3}{L_2 \Delta T} \left[\frac{1}{\cos^2(\Delta \theta + \theta_1)} - \frac{1}{\cos^2 \theta_1} \right],$$

$$S_2 = \frac{\partial \alpha}{\partial \Delta \theta} = \frac{L_3}{L_2 \Delta T} \times \frac{1}{\cos^2(\Delta \theta + \theta_1)}。$$

代入 L_2 、 L_3 整理得表1。

3.2.2 二级误差灵敏度

由图4可知,二级误差分为 θ_1 的误差 e_1 和 $\Delta \theta$ 的误差 e_2 , 先分析 e_1 。样品柱与台面垂直度误差 δ_1 传递给 e_1 的误差将在下面章节介绍。 δ_2 与 δ_3 的传递需要计算误差灵敏度,用 s_1 表示 L_2 传递给 e_1 的误差灵敏度; 用 s_2 表示 L_3 传递给 e_1 的误差灵敏度。先计算 δ_2 的误差灵敏度,如图5所示。

$$\theta_1 = \arctan \frac{L_2 - 100}{L_3},$$

则

$$s_1 = \frac{\partial \theta_1}{\partial L_2} = \frac{1}{1 + \left(\frac{L_2 - 100}{L_3}\right)^2} \cdot \frac{1}{L_3}.$$

再计算 δ_3 的误差灵敏度，如图 6 所示。

$$\theta_1 = \frac{\pi}{4} - \arccos\left(\frac{50\sqrt{2}}{L_3}\right),$$

则

$$s_2 = \frac{\partial \theta_1}{\partial L_3} = \frac{50\sqrt{2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{50\sqrt{2}}{L_3}\right)^2} \times L_3^2}.$$

代入 L_2 、 L_3 整理得表 2。

再分析 e_2 ，样品柱与台面垂直度误差 δ_1 传递给 e_2 的误差将在下面介绍。自准直仪的测量误差不需要传递，国产光电自准直仪的精度一般是亚秒级，这里取 0.3"，所以 $\delta_4=0.3''$ ； δ_5 、 δ_2 与 δ_3 的传递则需要计算误差灵敏度，用 s_3 表示温度测量误差 δ_5 传递给 e_2 的灵敏度； s_4 表示 L_2 的测量误差传递给 e_2 的误差灵敏度；用

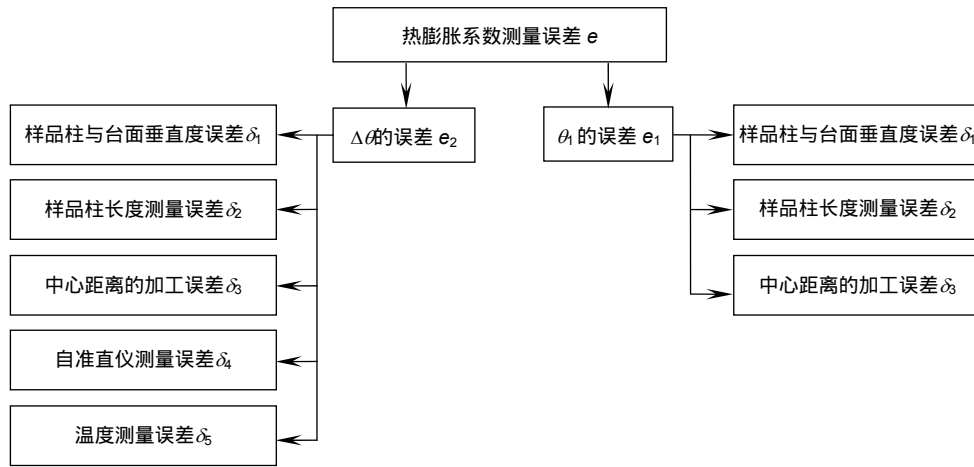


图 4 热膨胀系数误差源分类。

Fig. 4 Classification of error sources of thermal expansion coefficient.

表 1 一级误差灵敏度。

灵敏度类别	S_1	S_2
灵敏度大小	1.97e-11	4.85e-7

表 2 二级误差 e_1 灵敏度。

灵敏度类别	s_1	s_2
灵敏度大小	2062.65	2062.85

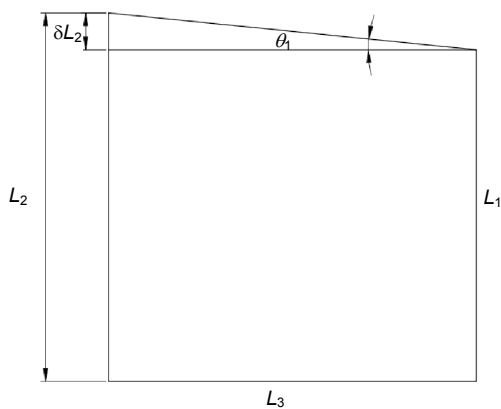


图 5 L_2 对 θ_1 的误差计算示意图。

Fig. 5 The effect of L_2 on θ_1 .

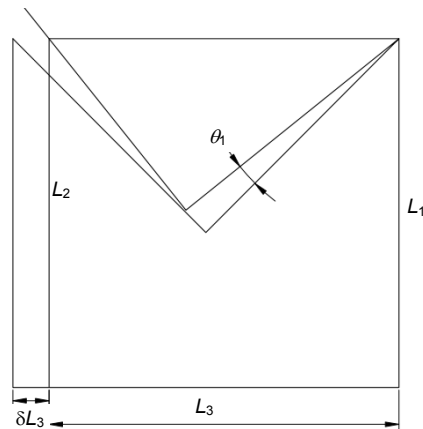


图 6 L_3 对 θ_1 的误差计算示意图。

Fig. 6 The effect of L_3 on θ_1 .

s_3 表示 L_3 的测量误差传递给 e_2 的误差灵敏度。先计算 δ_5 的误差灵敏度 s_3 , 如图 7 所示。

$$\Delta\theta = \arctan \frac{\Delta L}{L_3} = \arctan \frac{\alpha L_2 \Delta T}{L_3},$$

则

$$s_3 = \frac{\partial \Delta\theta}{\partial \Delta T} = \frac{\alpha L_2}{L_3} \frac{1}{1 + \left(\frac{\alpha L_2 \Delta T}{L_3}\right)^2}.$$

再计算 δ_2 的误差灵敏度 s_4 , 如图 8 所示。

$$\Delta\theta = \arctan \frac{L_3}{100 - L_2 + \Delta L} - \arctan \frac{L_3}{100 - L_2},$$

则

$$s_4 = \frac{\partial \Delta\theta}{\partial L_2} = \frac{1}{1 + \left(\frac{L_3}{100 - L_2 + \Delta L}\right)^2} \frac{L_3}{(100 - L_2 + \Delta L)^2} - \frac{1}{1 + \left(\frac{L_3}{100 - L_2}\right)^2} \frac{L_3}{(100 - L_2)^2}.$$

再计算 δ_5 的误差灵敏度 s_5 , 如图 9 所示。

$$\Delta\theta = \arctan \frac{\Delta L}{L_3},$$

则

$$s_5 = -\frac{\Delta L}{L_3} \frac{1}{1 + \left(\frac{\Delta L}{L_3}\right)^2}.$$

代入 L_2 、 L_3 、 ΔL 、 α 、 ΔT , 整理得表 3。

表 3 二级误差 e_2 灵敏度。

Table 3 Sensitivity of the secondary error e_2 .

灵敏度类别	s_3	s_4	s_5
灵敏度大小	1.56	-0.008	-3.92

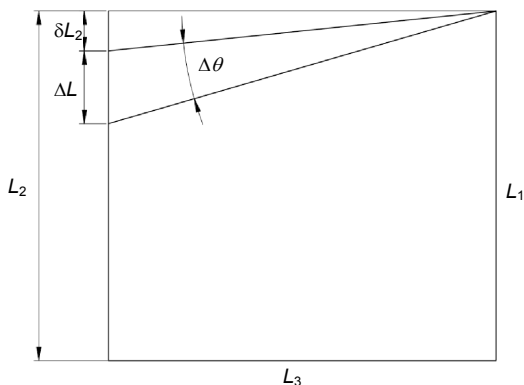


图 7 ΔT 对 $\Delta\theta$ 的误差计算示意图。

Fig. 7 The effect of ΔT on $\Delta\theta$.

3.3 精度分析

要计算各误差引起的热膨胀系数误差就需要知道各误差 δ 的大小。

δ_2 是测量冷却前样品柱长度的测量误差, 取 $\delta_2=0.01$ mm; δ_3 是样品柱与支撑柱之间距离的加工误差, 取 $\delta_3=0.01$ mm; δ_4 是自准直仪测量 $\Delta\theta$ 的误差, 由自准直仪精度决定, 国产型自准直仪的精度是 $0.3''$, 所以 $\delta_4=0.3''$; δ_5 是温度值的测量误差, 取 $\delta_5=0.01$ K; δ_1 是样品柱与台面的垂直度误差, 下面将具体分析其分别传递给 e_1 和 e_2 的误差值。

3.3.1 垂直度引起的误差

样品柱向不同方向偏转会引起反射镜不同的偏转情况, 如图 1 所示, 样品柱向左和向右偏转都会引起相对较大的系统误差, 所以下面分别对两个方向进行分析。

1) 样品柱向左倾斜引起的误差

当样品柱向左倾斜一定角度由 BC 倾斜至 FC 时, 反射镜因此偏转的角度 β , 示意图如图 10 所示。

由图 10 可知: $FH = \delta$ 。

$\angle DAB = 45^\circ$, 根据几何关系可得:

$$\beta = \frac{\pi}{4} - \angle EAB, \quad (9)$$

$$\angle EAB = \arccos \frac{L_2 \times \frac{\sqrt{2}}{2}}{\sqrt{(L_3 - \delta)^2 + \left(L_1 - L_1 \cos\left(\arcsin \frac{\delta}{L_1}\right)\right)^2}} + \arccos \frac{L_3 - \delta}{\sqrt{(L_3 - \delta)^2 + \left(L_1 - L_1 \cos\left(\arcsin \frac{\delta}{L_1}\right)\right)^2}}, \quad (10)$$

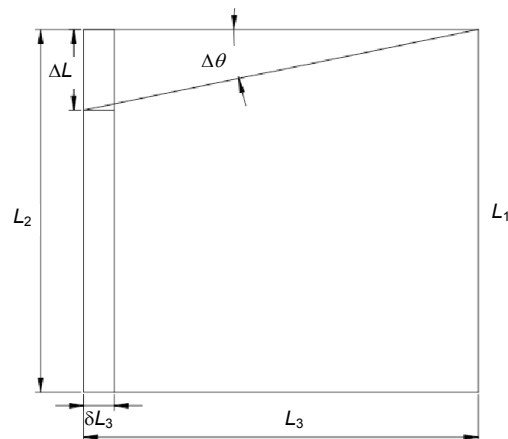


图 8 L_2 对 $\Delta\theta$ 的误差计算示意图。

Fig. 8 The effect of L_2 on $\Delta\theta$.

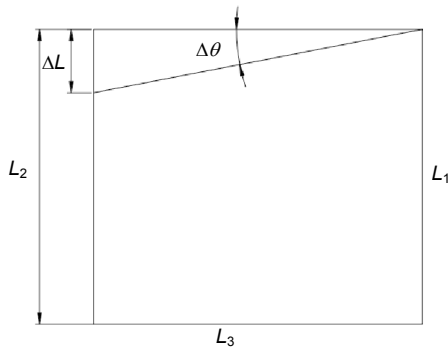


图9 L_3 对 $\Delta\theta$ 的误差计算示意图.
Fig. 9 The effect of L_3 on $\Delta\theta$.

由式(9)和式(10)可以计算出冷却前样品柱不垂直于台面而引起的反射镜向上偏转角度 θ_1 的值： $\theta_1 = \beta$ 。如表4所示。

当样品柱冷却收缩时，反射镜会因此偏转一定角度到 θ_2 。此时需要将公式中 δ 、 FC 改变，即：

$$\begin{aligned} \lambda &= 1 - (\Delta L / L_1), \\ \delta' &= \lambda \delta, \\ FC &= \lambda L_1. \end{aligned}$$

可得：

$$\beta' = \frac{\pi}{4} - \arccos \frac{L_2 \times \sqrt{2} / 2}{\sqrt{(L_3 - \lambda \delta)^2 + \left(L_1 - \lambda L_1 \cos \left(\arcsin \frac{\delta}{L_1} \right) \right)^2}} - \arccos \frac{L_3 - \delta}{\sqrt{(L_3 - \lambda \delta)^2 + \left(L_1 - \lambda L_1 \cos \left(\arcsin \frac{\delta}{L_1} \right) \right)^2}}, \quad (11)$$

由式(11)可以计算出冷却后样品柱不垂直于台面而引起的反射镜向下偏转角度 θ_2 的值： $\theta_2 = -\beta'$ 。如表5所示。

在不同垂直度公差等级下，若样品柱向左偏转，反射镜发生最大的角度偏转，偏转的角度 $\Delta\theta = \theta_1 + \theta_2$ 及绝对误差如表6所示。

表4 不同公差等级下反射镜位置偏差.

Table 4 Position deviation of reflector at different tolerance levels.

公差等级	0	2	4	6	8	10	12
$\theta_1 / (")$	0	3	10	26	62	155	413

表5 不同公差等级下样品柱冷却后反射镜向下偏转角度.

Table 5 At different tolerance levels, the reflector deflects downward when the sample column is cooled.

公差等级	0	2	4	6	8	10	12
$\theta_1 / (")$	393	390	382	367	331	238	-19

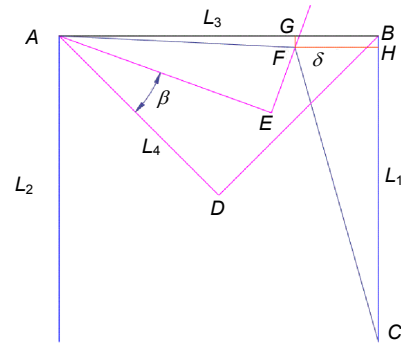


图10 样品柱向左倾斜反射镜角度变化示意图.
Fig. 10 The change of the mirror angle when the sample column is tilted to the left.

由于自准直仪的分辨率为 $0.1''$ ，所以取公差等级为6级。则 δ_1 传递给 e_1 的误差为 $26''$ ，传递给 e_2 的误差为 $0.11''$ 。

2) 样品柱向右倾斜引起的误差

同理当样品柱向右倾斜一定角度由 BC 倾斜至 FC 时，反射镜因此偏转的角度 β 。示意图如图11所示。

$$\begin{aligned} \angle EAF &= \arccos \frac{AE}{AF}, \\ \angle FAB &= \arccos \frac{AG}{AF} = \arccos \frac{AB + GB}{AF} = \arccos \frac{L_3 + \delta}{AF}, \\ AF &= \sqrt{(L_3 + \delta)^2 + \left(L_1 - L_1 \cos \left(\arcsin \frac{\delta}{L_1} \right) \right)^2}. \\ \beta &= \angle EAF - \frac{\pi}{4} - \angle FAB = \\ &= \arccos \frac{L_2 \times \sqrt{2} / 2}{\sqrt{(L_3 + \delta)^2 + \left(L_1 - L_1 \cos \left(\arcsin \frac{\delta}{L_1} \right) \right)^2}} - \frac{\pi}{4} - \arccos \frac{L_3 + \delta}{\sqrt{(L_3 + \delta)^2 + \left(L_1 - L_1 \cos \left(\arcsin \frac{\delta}{L_1} \right) \right)^2}}, \quad (12) \end{aligned}$$

由式(12)可以计算出冷却前 θ_1 的值： $\theta_1 = \beta$ ，当样

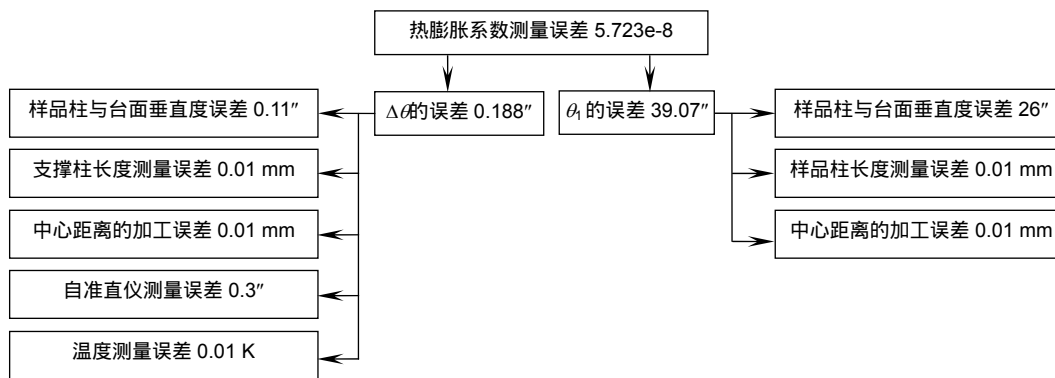


图 12 误差合成示意图。

Fig. 12 Synthesis of errors.

4 结论

本文提出了一种适合于纳米级小变形测量的方案，并推导出了其变形量测量公式；从理论上分析了一种自准直原理的高精度低温热膨胀系数测量方案的误差传递关系，并利用该误差传递关系对红外材料低温热膨胀系数测量装置的设计精度进行了分析，最后通过计算得到了该方案的测量相对误差，结论如下：

1) 样品柱与平台的垂直度达到公差等级 6 级时可以忽略其影响。

2) 在条件满足的情况下，该方案测量的热膨胀系数相对误差仅为 0.76%。

3) 该方案不仅可以实现热膨胀系数低温真空环境测量，还可用于固体材料高温热膨胀系数测量，以及其他高精度直线变形量的纳米级测量。

基金项目

四川省教育厅项目(17ZB0451)；西南科技大学博士基金项目(13zx7152)。

参考文献

- Ni Lei, Ren Qifeng, Liao Sheng. Measurement of cryogenic refractive index of ir materials: uncertainty analysis[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, **37**(10): 77–82.
倪磊, 任柄锋, 廖胜. 红外材料低温折射率测量技术研究: 不确定度分析[J]. *光电工程*, 2010, **37**(10): 77–82.
- Svensson S P, Sarney W L, Donetsky D, et al. Materials design parameters for infrared device applications based on III-V semiconductors[J]. *Applied Optics*, 2017, **56**(3): B58–B63.
- Ordu M, Guo J, Pack G N, et al. Nonlinear optics in germanium mid-infrared fiber material: Detuning oscillations in femtosecond mid-infrared[J]. *AIP Advances*, 2017, **7**(9): 095125.
- Lin H, Chen H, Zheng Y J, et al. Two excellent phase-matchable infrared nonlinear optical materials based on 3D diamond-like frameworks: RbGaSn₂Se₆ and RbInSn₂Se₆[J]. *Dalton*

Transactions, 2017, **46**(24): 7714–7721.

- Tang J Y, Xiao Z Y, Xu K K. Broadband ultrathin absorber and sensing application based on hybrid materials in infrared region[J]. *Plasmonics*, 2017, **12**(4): 1091–1098.
- Guo S P, Chi Y, Guo G C. Recent achievements on middle and far-infrared second-order nonlinear optical materials[J]. *Coordination Chemistry Reviews*, 2017, **355**: 44–57.
- Bureau B, Boussard-Plédel C, Troles J, et al. Development of optical fibers for mid-infrared sensing: state of the art and recent achievements[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, **9507**: 950702.
- Wang Y, Overvig A C, Shrestha S, et al. Tunability of indium tin oxide materials for mid-infrared plasmonics applications[J]. *Optical Materials Express*, 2017, **7**(8): 2727–2739.
- Pizetta D C, Mastelaro V R. Building a dilatometer and determining the coefficient of linear thermal expansion[J]. *Revista Brasileira De Ensino De Fisica*, 2014, **36**: 1313.
- Kumar V, Sastry B S R. Thermal expansion coefficient of binary semiconductors[J]. *Crystal Research and Technology*, 2015, **36**(6): 565–569.
- Miyazaki H, Ushiroda I, Itomura D, et al. Thermal expansion of NaZr₂(PO₄)₃ family ceramics in a low-temperature range[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2008, **47**(9): 7262–7265.
- Huang Yonghua, Wu Zhe, Li Xiaoci, et al. Development of simple thermal expansion coefficient measurement apparatus and its application to several materials[J]. *CIESC Journal*, 2016, **67**(S2): 38–45.
黄永华, 吴哲, 李晓慈, 等. 热膨胀系数简易测量装置研制及若干材料测量[J]. *化工学报*, 2016, **67**(S2): 38–45.
- Wu Qingren, Wen Bixuan. Studies on temperature dependence of thermal conductivity and linear expansion for SiC material[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science)*, 1996, **24**(3): 11–15.
吴清仁, 文璧璇. SiC 材料导热系数和热膨胀系数与温度关系[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 1996, **24**(3): 11–15.
- People's Republic of China General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, China National Standardization Administration Committee. Test methods for thermal expansion characteristic parameters of metallic materials: GB/T 4339-2008[S]. Beijing: China Standard Press, 2009.
中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 金属材料热膨胀特征参数的测定: GB/T 4339-2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.