文章编号　1004-924X(2012)05-1064-05

压电双晶片扫描器的低温迟滞蠕变特性

张　旋[1*]，潘　鸣[2]

(1. 中国科学院 上海技术物理研究所，上海 200083；
2. 中国电子科技集团公司 第五十研究所，上海 200063)

摘要：研究了用于空间红外相机低温光学系统的压电双晶片扫描器的低温迟滞蠕变问题。压电双晶片具有行程大，不发热，在低温下仍然能够工作等优点，然而由于压电陶瓷固有的迟滞蠕变特性，使得其扫描精度受到了较大的影响。本文在常温和低温下，对所研制的压电双晶片扫描器的迟滞和蠕变特性进行实验研究和特性对比。结果显示：尽管压电双晶片扫描器的迟滞量和蠕变量均有大幅度下降，但由于总行程的下降幅度更大，使得迟滞度和蠕变系数有较大上升；120 K 下的迟滞度约为 300 K 下的 2 倍，120 K 下的蠕变系数比 300 K 下的上升了一个数量级。低温下压电双晶片扫描器的迟滞和蠕变特性相比常温下更加严重，这给其在低温下的高精度应用带来了更大的影响。

关　键　词：红外相机；压电双晶片；低温光学；迟滞蠕变

中图分类号：TN384；TN216　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.3788/OPE.20122005.1064

Cryogenic hysteresis and creep characteristics of piezoelectric bimorph scanner

ZHANG Xuan[1*], PAN Ming[2]

(1. *Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai* 200083, *China*;
2. *The* 50 *th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Shanghai* 200063, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: flyfeatherx@hotmail.com*

Abstract: The cryogenic hysteresis and creep characteristics of piezoelectric bimorph scanners for cryogenic optical systems in space infrared cameras were studied. The piezoelectric bimorph has superior characteristics of large displacement, high resolution, no self-heating, *etc.*, moreover, it can work efficiently at a cryogenic temperature. However, the inherent hysteresis and creep characteristics of the piezoelectric bmorph have a large impact on the scanning accuracy when it is used for high precision scanning. In this paper, the hysteresis and creep characteristics of a fabricated piezoelectric bimorph scanner were experimentally studied at room temperature and cryogenic temperature and the results were compared. The results indicate that both hysteresis displacement and creep displacement of the piezoelectric bimorph scanner have a large decrease, but the decrease of total travel displacement is much larger, which leads the hysteresis rate and creep coefficient increase more large. The hysteresis

收稿日期：2012-02-13；**修订日期**：2012-03-15.

基金项目：上海技术物理研究所三期知识创新工程资助项目(No. C1-30)

rate at 120 K is twice that at 300 K and the creep coefficient at 120 K increases by an order of magnitude as compared with that at 300 K. Results mean that the hysteresis and creep characteristics of piezoelectric bimorph scanner at cryogenic temperature are more serious than it at room temperature, which will bring greater impact when it is used for high precision applications.

Key words: infrared camera; piezoelectric bimorph actuator; cryogenic optics; hysteresis and creep

1　引　言

科学技术的发展加快了对空间红外相机分辨率的要求。在红外天文望远镜、对地观测等应用中，为了降低光学系统自身的热辐射对探测率的影响，多需要使用低温光学系统，尤其在远红外波段，低温光学系统是必然的选择。像方扫描系统作为低温光学系统中的重要组成部分也需要工作在低温环境下。压电双晶片由于其工作行程大，不发热，并且可以工作在低温环境下，因此可以用来进行像方扫描驱动。然而压电陶瓷本身具有的迟滞和蠕变特性，较大地影响了它的应用。在进行像方扫描应用时，扫描系统处于 120 K 左右的低温环境时，扫描精度要求很高，此时压电双晶片的迟滞和蠕变对高精度的扫描运动有多大的影响，是需要认真考虑和解决的问题。特别是当单片压电双晶片的扫描运动无法达到像方扫描的行程要求时，还需要将几片双晶片叠加起来组成压电双晶叠堆，此时每片双晶片的迟滞和蠕变效应都会叠加在一起，从而在输出端形成一个较大的形变，导致扫描精度下降。

目前，对压电陶瓷迟滞和蠕变特性的研究虽然已经进行得较为广泛和深入[1-5]，但人们对压电双晶片在低温下的迟滞蠕变特性及其变化仍然一无所知。本文在研制低温压电双晶片扫描器的基础上对其低温迟滞蠕变特性进行了实验研究，寻找它们的变化规律；为减少压电陶瓷在低温下高精度定位时的迟滞和蠕变带来的误差提供依据。

2　实验设计

实验装置如图 1 所示[6-8]。压电双晶片搭载一块扫描镜构成扫描机构，安装在低温真空罐内，并用铜带将扫描机构与热沉连接起来。低温真空罐内通液氮使扫描机构冷却，扫描机构上贴有加热片以控制其温度，扫描机构的温度可以在 110～350 K 变化。小型激光器从低温真空罐的一侧窗口射入，打在扫描镜上折射到另一侧窗口射出，并由位置传感器(PSD)接收。当压电双晶片加载电压发生形变，带动扫描镜发生角度偏转时，PSD 上的激光光点位置也发生移动，PSD 输出这一位置移动，从而可以计算得到扫描镜发生的角度偏转。PSD 位置传感器的分辨率为 1.5 μm，角度测量范围为 4°，测量精度可以达到 3 μrad。压电双晶片的驱动电源为自行研制的电流控制型开环驱动电源[9]，输出电压为 −100～100 V，电压纹波在毫伏量级，可以产生任意波形对压电陶瓷进行控制。

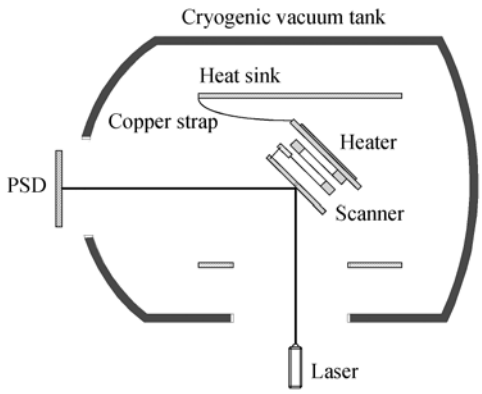

图 1　实验装置示意图

Fig. 1　Diagram of experimental platform

3　低温实验研究

3.1　低温迟滞特性研究

由于压电陶瓷的迟滞特性，压电双晶片扫描器的输出角度也会随着驱动电压的大小、频率以及加载历史的变化而变化，但在扫描周期稳定的电压波形驱动下，扫描器的扫描波形具有良好的重复性，其迟滞环是闭合的，不存在残余变形。这里使用周期稳定的三角波对扫描器进行驱动，扫

描段和回扫段的比例为 3∶1，扫描幅度为－30～30 V，扫描频率为 0.1 Hz，图 2 为扫描驱动波形。

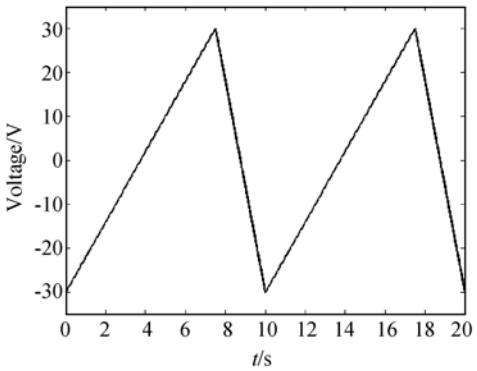

图 2　扫描驱动波形

Fig. 2　Driving waveform

在常温和低温 120 K 下对扫描器进行驱动，测量得到的迟滞环如图 3 所示。可以看到，动态扫描时，扫描曲线的迟滞环是闭合的。相比 300 K 常温，低温 120 K 下的扫描幅度有大幅度

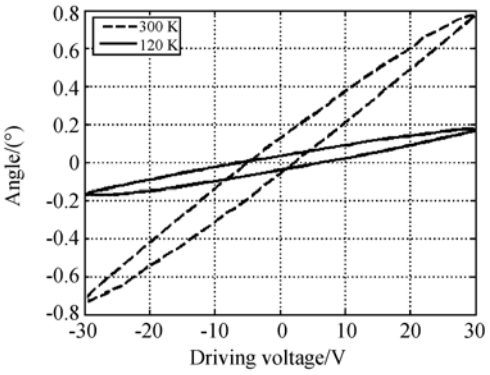

图 3　300 K 和 120 K 下迟滞环

Fig. 3　Hysteresis loops at 300 K and 120 K

的下降。为了清楚地分析低温下压电双晶片的迟滞特性变化，定义在不同驱动电压下的迟滞度为：

$$\xi=\frac{\Delta A}{A_{total}}=\left|\frac{A_{scan}-A_{feedback}}{A_{total}}\right|, \qquad (1)$$

其中：A_{total} 为整个扫描波形的扫描幅度；A_{scan} 为某一驱动电压下扫描段的输出；$A_{feedback}$ 为同一电压下回扫段的输出角度。

可以画出常温和低温下整个迟滞环的迟滞度曲线，如图 4 所示。对比图 4 中 2 条迟滞度曲线，迟滞度最大的位置均在迟滞环的中间，也就是驱动电压为 0 V 的附近。120 K 低温下迟滞环的迟滞度整体比 300 K 常温下大，300 K 常温下的最大迟滞度为 0.126，120 K 低温下最大迟滞度为 0.229，120 K 下迟滞度约为 300 K 下的 2 倍。由此可见，温度降低以后，压电双晶片的迟滞特性有所加剧，在进行高精度应用时更容易对精度造成影响。

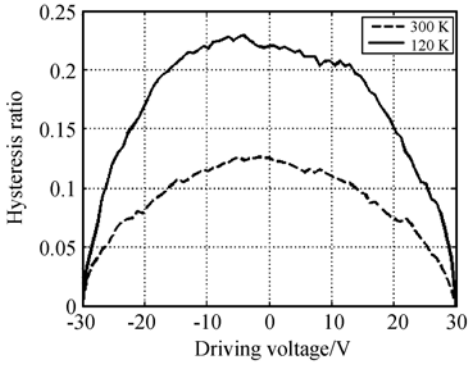

图 4　300 K 和 120 K 下迟滞度

Fig. 4　Hysteresis rates at 300 K and 120 K

3.2　低温蠕变特性研究

压电双晶片对阶跃驱动电压的响应可以分成 2 个过程，首先是在极短的时间内发生一个较大的形变，该形变的大小取决于阶跃驱动电压的大小，压电双晶片绝大部分的形变量来自于这一阶段。随后压电双晶片发生缓慢的蠕变响应，该过程往往持续很长时间，使得扫描镜的位置久久不能稳定下来，严重影响扫描定位的精度。

在常温 300 K 下分别用增量为 20、30、40、50、60 V 的阶跃电压驱动压电双晶片扫描器，可以得到如图 5 的蠕变曲线。可以看到，常温下扫描器的蠕变量是较大的，在电压增量为 60 V 的情况下蠕变角度达到 400 μrad 以上，同时，扫描器的蠕变量随着电压增量的增加而增大。

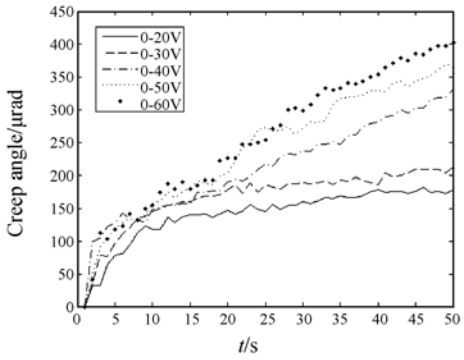

图 5　常温蠕变曲线

Fig. 5　Creep curves at room temperatures

通常压电陶瓷的蠕变曲线为对数形式[10]：

$$L(t)=L_0\left(1+\gamma\log\frac{t}{t_0}\right), \qquad (2)$$

其中 γ 为压电陶瓷的蠕变系数。

计算常温下压电双晶片扫描器的蠕变系数，可以得到如表 1 的结果，可见蠕变系数在 0.01 到 0.02 之间。

表 1　300 K 下压电扫描器的蠕变系数

Tab. 1　Creep coefficients at 300 K

驱动电压 /V	位移量 /mrad	蠕变量 /μrad	蠕变系数
0～20	10.89	175.5	0.016 1
0～30	15.43	211.2	0.013 7
0～40	19.92	328.8	0.016 5
0～50	25.75	370.9	0.014 4
0～60	29.50	406.3	0.013 8

在低温 120 K 下分别用增量为 20、30、40、50、60 V 的阶跃电压驱动压电双晶片扫描器，可以得到如图 6 的低温蠕变曲线。相比常温 300 K，低温120K下压电双晶片扫描器的蠕变量下降了许多，在电压增量为 60 V 的情况下蠕变角度小于 50 μrad，蠕变量也是随着电压增量的增加而增大的。计算此时的蠕变系数，发现尽管蠕变量下降了，但由于位移量也大幅下降，蠕变系数反而大幅度上升，达到了 0.2 左右，相比 300 K 温度下上升了一个数量级，如表 2 所示。

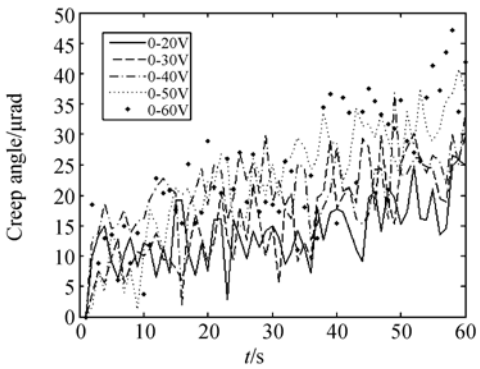

图 6　低温蠕变曲线

Fig. 6　Creep curves at cryogenic temperatures

表 2　120 K 下压电扫描器蠕变系数

Tab. 2　Creep coefficient at 120 K

驱动电压 /V	位移量 /μrad	蠕变量 /μrad	蠕变系数
0～20	108.0	24	0.222
0～30	142.5	27	0.189
0～40	150.0	31.5	0.21
0～50	166.5	34.5	0.207
0～60	193.5	37.5	0.194

为了更加清楚地了解压电双晶片扫描器蠕变系数随温度变化的规律，在低温到常温的各个温度点对其蠕变常数进行测量，阶跃驱动电压均为 0～50 V，得到蠕变系数随温度变化的曲线如图 7 所示。很明显，随着温度的降低，压电双晶片扫描器的蠕变系数大幅度上升，说明低温下其蠕变特性有所加剧，在进行高精度应用时更容易对精度造成影响。

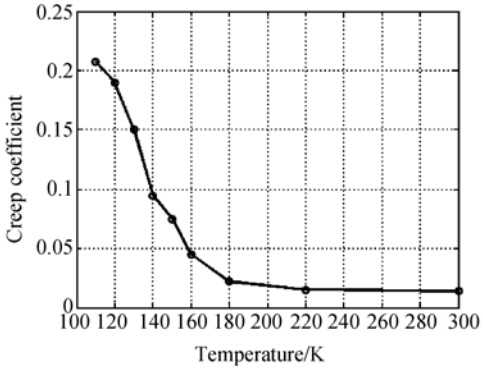

图 7　蠕变系数随温度变化的曲线

Fig. 7　Creep coefficient curve at different temperatures

4　结　论

研制了低温压电双晶片扫描器并对其低温迟滞蠕变特性进行了研究。大量的常温和低温实验证明，低温下压电双晶片扫描器的迟滞量和蠕变量虽然相比常温下在绝对值上有了大幅度的下降，但由于与此同时其总行程的下降幅度更大，从而导致其迟滞度和蠕变系数反而大幅度上升。120 K 温度下的迟滞度约为 300 K 的 2 倍，120 K 下蠕变系数比 300 K 上升了一个数量级。当在低温下对压电双晶片进行高精度应用时，特别要注意大的迟滞度和蠕变系数对精度带来的影响。本文通过实验研究压电双晶片扫描器的迟滞蠕变特性在低温下的变化规律，为其在进行低温高精度应用时减少迟滞蠕变带来的误差提供了依据。

参考文献：

[1] 王岳宇，赵学增. 补偿压电陶瓷迟滞和蠕变的逆控制算法[J]. 光学 精密工程，2006，14(6)：1032-1040.
WANG Y Y，ZHAO X Z. Inverse control algorithm to compensate the hysteresis and creep effect of piezoceramic[J]. *Opt. Precision Eng.*，2006，14(6)：1032-1040.（in Chinese）

[2] 范伟，余晓芬. 压电陶瓷驱动器蠕变特性的研究[J]. 仪器仪表学报，2006，27(11)：1383-1386.
FAN W，YU X F. Study on PZT actuator creep characteristics[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*，2006，27(11)：1383-1386.（in Chinese）

[3] 张涛，孙立宁，蔡鹤皋. 压电陶瓷基本特性研究[J]. 光学 精密工程，1998，6(5)：26-32.
ZHANG T，SUN L N，CAI H G. Study on the fundamental characteristics of piezoelectric element[J]. *Opt. Precision Eng.*，1998，6(5)：26-32.（in Chinese）

[4] JUNG H，GWEON D G. Creep characteristics of piezoelectric actuators[J]. *Review of Scientific Instrument*，2000，71(4)：1896-1900.

[5] RU C H，SUN L N. Hysteresis and creep compensation for piezoelectric actuator in open-loop operation[J]. *Sensors and Actuators A*，2005，122(1)：124-130.

[6] 高亮，阚珊珊，李敏，等. 压电陶瓷精密转动平台的转角精度测量[J]. 光学 精密工程，2007，15(2)：206-211.
GAO L，KAN SH SH，LI M，*et al.*. Rotation-angle-accuracy measurement of piezo tilt platform[J]. *Opt. Precision Eng.*，2007，15(2)：206-211.（in Chinese）

[7] ZHANG X，ZHAO G F，PAN M. The research of piezoelectric actuator for cryogenic scanning application[C]. *Proceedings of SPIE*，2011，8193：819332-1-819332-7.

[8] 南卫东，刘承，朱成武，等. 位置传感器PSD及其在光扫描动态测试中的应用[J]. 仪器仪表学报，1995，16(4)：393-397.
NAN W D，LIU CH，ZHU CH W，*et al.*. Position-Sensitive Detector (PSD) and its application in the optical scanning dynamics testing[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*，1995，16(4)：393-397.（in Chinese）

[9] 李福良. 基于PA85的新型压电陶瓷驱动电源[J]. 压电与声光，2005，27(4)：392-395.
LI F L. A new power supply for piezoelectric ceramic based on PA85[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*，2005，27(4)：392-395.（in Chinese）

[10] SMITH R C，HOM C L. Domain wall theory for ferroelectric hysteresis[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*，1999，10(3)：195-213.

作者简介：

张 旋(1985－)，男，福建上杭人，博士研究生，2007年于中国科学技术大学获得学士学位，主要从事光电技术方面的研究。E-mail：flyfeatherx@hotmail.com

潘 鸣(1958－)，男，河南新乡人，博士，研究员，博士生导师，主要从事光电遥感系统的研究与开发。E-mail：pmcn58@hotmail.com