

文章编号:1004-4213(2011)10-1526-5

高精度物镜波纹管致动器的线性度分析

袁文全, 巩岩, 张巍, 王学亮, 倪明阳, 赵磊

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘 要:采用有限元方法对高精度物镜波纹管致动器的几何非线性变形进行了分析,并引入线性度对波纹管致动器的性能进行了评估.通过有限元方法分析了常见的 U 型、S 型、C 型、方型及三角形波纹管的几何非线性变形,并结合最小二乘法,得到了上述各种波纹管致动器的行程及线性度.计算结果表明:在设计大行程波纹管致动器时,S 型波纹管的线性度最好,为 0.161%;而在设计小行程波纹管致动器时,三角形波纹管的线性度最好,为 0.135%.

关键词:高精度物镜;气动;波纹管;几何非线性;有限单元法

中图分类号:TN305.7

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20114010.1526

0 引言

高精度物镜中主动光学元件的调整准确度对成像质量的优劣具有极大的影响.目前在国内外已使用致动器对大口径反射式望远镜的光学元件进行主动调整^[1],使各子光学元件实现共焦^[2]、共相^[3],并使光学元件的波像差得到校正^[4-5].而在高精度物镜主动光学元件的致动器选择上,目前广泛采用的有两种方案^[6],一种方案采用压电致动器,优点在于控制准确度高,但其行程短、响应慢,且存在发热问题,给热控带来一定的难度;另一种方案则采用气致动器,优点在于快速响应、无发热问题,缺点是系统实现较为复杂.由于气致动器使用过程中无发热问题,不会因为温度波动对光学元件变形产生影响,而最终影响成像质量.因此比较而言,气致动器更加适合应用于高精度物镜系统.而气致动器在精密机械应用中,通常采用波纹管来代替传统的活塞型气缸,同时使用伺服阀及高分辨传感器形成闭环系统来控制气压,使气致动器达到较高的定位及分辨准确度.但在过去的一些工程应用中^[7-9],通常将波纹管的刚度假设为一个常量项,而实际上波纹管的变形存在一定的几何非线性效应^[10-13],这样,由于其变形的非线性效应导致反馈系统设计的复杂性,从而影响了整个系统的响应效率.因此,在波纹管致动器的初期设计中,需要对波纹管的几何非线性效应作评估,以选取较优的结构形式.本文在考虑波纹管几何非线性

效应对波纹管致动器变形影响的基础上,采用有限单元法分别计算了常见几种形式波纹管的变形,得到了气压与位移的关系曲线;并引入气压-位移曲线的线性度来评价各种波纹管的几何非线性效应,得到了各波纹管致动器的线性度优劣对比,为波纹管致动器的设计提供了参考意见.

1 波纹管致动器简介

1.1 波纹管致动器应用于光学元件的调节

高精度物镜主动光学元件的调节原理如图 1,计算机(Personal Computer, PC)通过数模转换装置(Digital-to-analog convertor, D/A)及信号放大器(Signal Amplifier, AMP)控制伺服阀,进而控制波纹管致动器内的气压,从而使致动器产生微小变形,以调节光学元件的位置.同时采用微位移传感

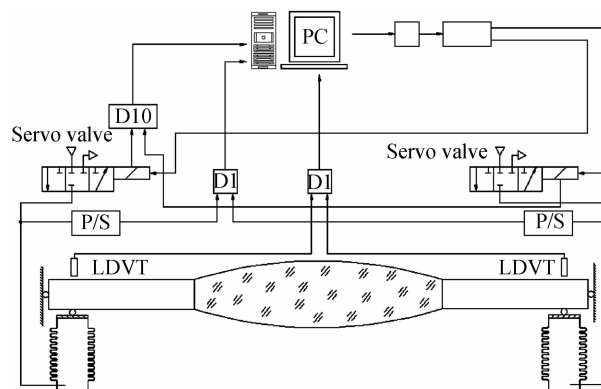


图 1 可调镜片的调节原理

Fig. 1 Schematic view of adjustable lens' adjusting

基金项目:国家 02 专项基金(No. 2009ZX02005)资助

第一作者:袁文全(1982-),男,助理研究员,硕士研究生,主要研究方向为精密光机结构设计与分析. Email: yuanwenquan@tom.com

通讯作者:巩岩(1968-),男,研究员,博士研究生,主要研究方向为短波光、光学系统光机集成设计. Email: gongy@sklao.ac.cn

收稿日期:2011-01-25;修回日期:2011-04-13

器 (Linear Differential Variable Transformer, LDVT), 气压压力传感器 (Pressure Sensor, P/S) 及伺服阀动作传感器通过数字输入/输出单元 (Digital Input/Output unit, DI, DIO) 与计算机形成闭环反馈控制系统, 以达到精确控制光学元件位置的目的。

1.2 波纹管致动器的结构

典型的波纹管致动器结构如图 2, 波纹管致动器的主体部分由波纹管、法兰盘及气管组成, 波纹管的两端与法兰盘采用焊接或胶结的连接方式, 并由气管与供气系统连接. 通过改变气压的大小, 使波纹管产生收缩或者膨胀, 从而使法兰盘产生一个微小的位移量。

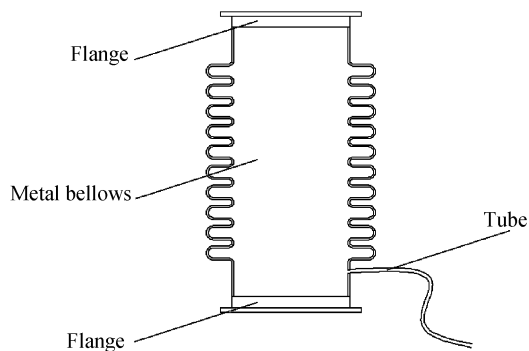


图 2 波纹管致动器的结构
Fig. 2 Structure of bellows actuator

由于波纹管致动器的行程主要由波纹管所决定, 因此, 可以依据行程的不同选择合适类型的波纹管. 常见波纹管的结构形式有 U 型、S 型、C 型、方型及三角型, 图 3 给出了这几种型式波纹管的示意图, 更多的结构型式可参阅相关标准^[14]或自行设计。

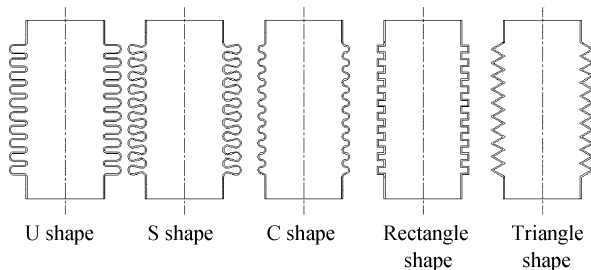


图 3 几种典型形式的波纹管
Fig. 3 Several representative shapes of bellows

2 几何非线性效应及其评价

2.1 波纹管致动器的变形

波纹管致动器的微位移主要由波纹管的变形贡献, 而该变形具有一定的几何非线性效应, 即波纹管的大变形引起其内表面压力方向的变化, 从而导致波纹管变形的几何非线性效应. 以 U 型波纹管为例, 其变形效应说明如图 4。

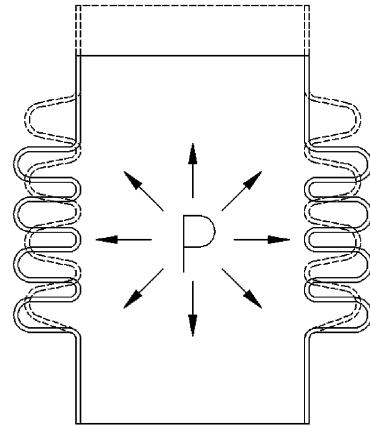


图 4 波纹管的变形
Fig. 4 Deformation of bellows

波纹管在轴向方向的变形量可以表示为压强与刚度的非线性函数, 其表达式为

$$Y = \frac{P}{K(Y)} \quad (1)$$

式中, Y 为波纹管轴向变形量, P 为波纹管内的气体压强, $K(Y)$ 为波纹管轴向刚度, 是轴向变形量 Y 的非线性函数。

由于波纹管的变形为几何非线性问题, 因此最初人们采用摄动法^[10]求近似解, 不仅求解过程极为复杂, 且该解析解与实际响应直接存在较大的误差. 目前随着计算机的发展, 一般采用有限元法^[11-12, 15-17]来计算该类几何非线性问题, 本文则采用有限元法对这种问题进行求解。

2.2 波纹管的线性度评价

线性度是系统输入-输出特性曲线与拟合直线之间的最大偏差与满量程输出的百分比来表示的, 简图说明如图 5, 曲线 1 为系统输入-输出特性曲线, 直线 2 为系统输入-输出特性曲线的拟合直线, ΔL_{\max} 为两者之间的最大偏差. 线性度的公式表示为

$$E_f = \frac{\Delta L_{\max}}{Y_{\max}} \times 100\% \quad (2)$$

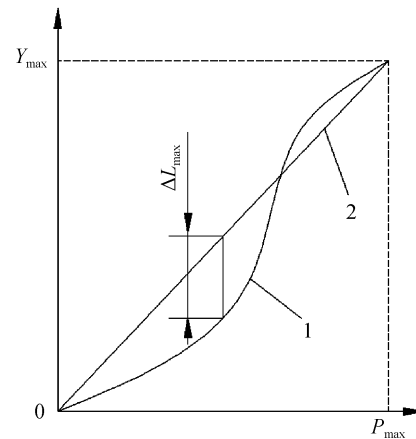


图 5 线性度示意图
Fig. 5 Illustration of linearity

对于波纹管来说,当输入气压与外界气压相等时候,变形量为零.如果以输入气压与外界气压差 P 作为自变量,波纹管顶端的位移量 Y 为因变量,则其拟合直线的形式为

$$Y = \frac{P}{K} = K'P \quad (3)$$

式中, K 为波纹管轴向拟合刚度, K' 为 K 的倒数,两者均为常量项.

由于波纹管气压-位移关系具有一定非线性,而对于控制系统来说,要求气压-位移关系最好是比例关系.因此,波纹管的气压-位移关系线性特性越好,越有利于物镜系统的高准确度装调.

3 有限元分析

3.1 模型数据

由于波纹管致动器的微位移主要由波纹管贡献,因此在分析中可假设上、下法兰盘为刚体,在建模过程中作简化处理.波纹管的材质为 1Cr18Ni9Ti,其力学性能如表 1.

表 1 1Cr18Ni9Ti 的力学性能

Table 1 Mechanical properties of 1Cr18Ni9Ti

Materials	Module of elasticity/Pa	Poisson's ratio
1Cr18Ni9Ti	1.95×10^{11}	0.3

分析的波纹管致动器中波纹管型式有 U 型、S 型、C 型、方型及三角型,具体几何结构参量依照国家标准^[14]设计如表 2.

表 2 波纹管的结构参量(单位:毫米)

Table 2 Structural parameters of bellows (units: mm)

Items	Total length	Numbers of wave	Wavelength	Wave height	Thickness
U shape	24	10	1.8	2.41	0.16
S shape	24	10	1.8	2.5	0.16
C shape	24	10	1.8	1.06	0.16
Rectangle shape	24	10	1.8	1.06	0.16
Triangle shape	24	10	1.8	1.88	0.16

3.2 网格划分

采用线性壳单元对波纹管进行网格划分,而在计算过程中以逐步加倍细化网格的办法对波纹管的静力变形进行分析,并以网格细化前后计算结果的偏差相对值小于 0.01% 作为网格是否合适的准则.计算结果显示在网格尺寸为 0.03 mm 附近有较好的数值结果,由于此时网格过于致密,图 6 绘制了网格尺寸为 0.3 mm 时的该种网格划分方法.

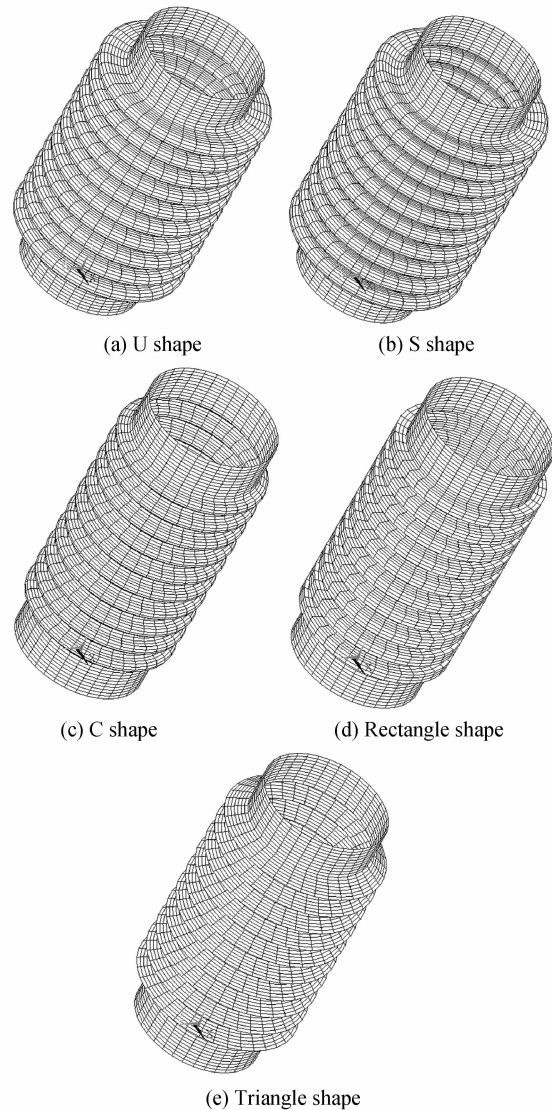


图 6 波纹管的网格划分

Fig. 6 Meshes of bellows

3.3 计算结果

分别对 U 型、S 型、C 型、方型及三角型的波纹管致动器进行分析,其中气压变化范围为 0~0.6 MPa,步长为 0.005 MPa.将计算结果绘制成气压-位移图,然后根据最小二乘法拟合出气压-位移的关系曲线.分析结果如图 7.

对上述各形式的波纹管的线性度进行计算,并列出了 0~0.6 MPa 下各型式波纹管的行程如表 3.

表 3 波纹管的特性

Table 3 Characteristics of bellows

Items	Stoke/mm	Linearity/(%)
U shape	0.714	0.371
S shape	0.855	0.161
C shape	0.06	0.173
Rectangle shape	0.106	0.89
Triangle shape	0.133	0.135

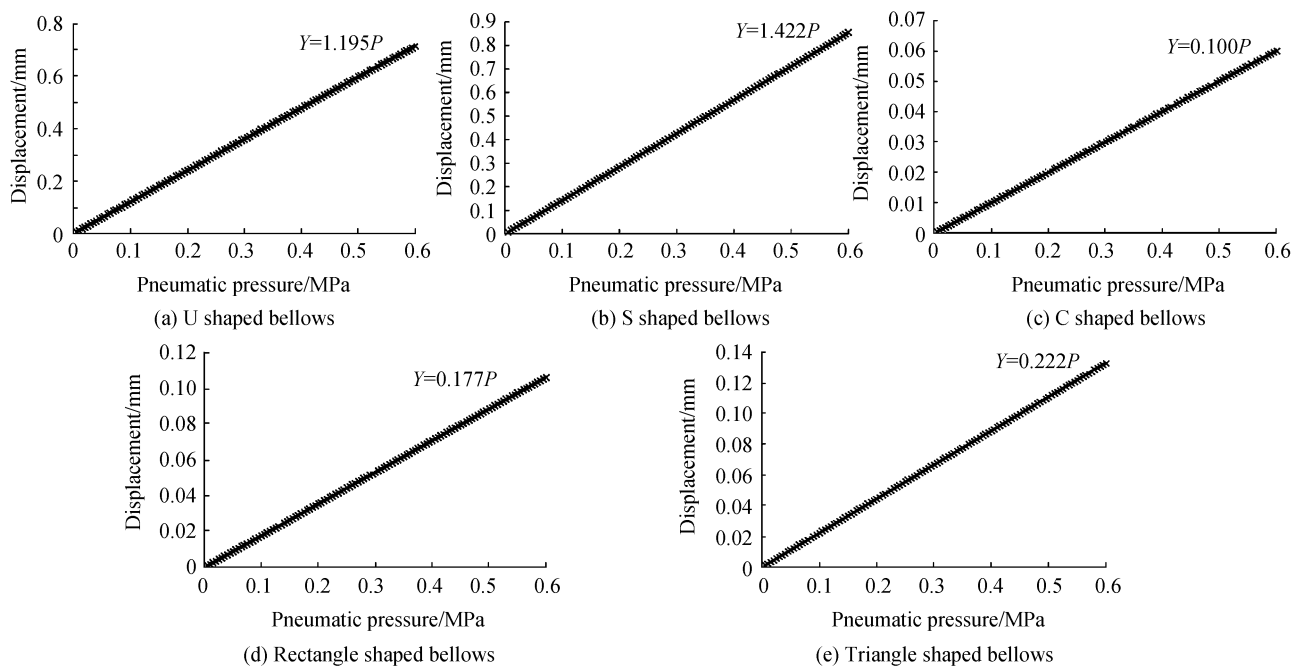


图 7 气压—位移关系曲线

Fig. 7 Pneumatic pressure versus displacement

从上面的计算结果来看, 由于结构形式的不同, 各波纹管致动器的行程不同. 当设计大行程波纹管致动器时, S 型波纹管在行程及线性度方面均优于 U 型波纹管; 而在设计小行程波纹管致动器时, 三角型波纹管在行程及线性度方面均优于方型、C 型波纹管.

4 结论

在考虑波纹管几何非线性效应对波纹管致动器变形影响的基础上, 采用有限单元法分别计算了常见 U 型、S 型、C 型、方型及三角型波纹管的变形, 并引入线性度对上述各种波纹管进行评价. 计算结果表明: 在大行程波纹管致动器设计方面, S 型波纹管在行程及线性度方面最优, 其线性度为 0.161%; 而在设计小行程波纹管致动器时, 三角型波纹管在行程及线性度方面最优, 其线性度为 0.135%.

参考文献

- [1] DAVIES R. Adaptive optics: Observations and prospects for studies of active Galactic Nuclei[J]. *New Astronomy Reviews*, 2008, **52**(6): 307-322.
- [2] LIN Xu-dong, CHEN Tao, WANG Jian-li, *et al.* Co-focus experiment of segmented-mirror active optics[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(3): 563-569.
林旭东, 陈涛, 王建立, 等. 拼接镜主动光学共焦实验[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(3): 563-569.
- [3] LIN Xu-dong, WANG Jian-li, LIU Xin-yue, *et al.* Co-phase experiment of active optics for segmented-mirrors[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(7): 1520-1528.
林旭东, 王建立, 刘欣悦, 等. 拼接镜主动光学共相实验[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(7): 1520-1528.
- [4] WANG Fu-guo, LI Hong-zhuang, YANG Fei. Ability of the thin mirror active optics to correct optical astigmatism[J].

Acta Photonica Sinica, 2010, **39**(5): 871-875.

王富国, 李宏壮, 杨飞. 薄镜面主动光学对光学像差的校正能力分析[J]. *光子学报*, 2010, **39**(5): 871-875.

- [5] ZHOU Chao, YANG Hong-bo, WANG Fu-guo, *et al.* Finite element analysis on the capability of fitting aberration of deformable mirrors[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(8): 1461-1465.
周超, 杨洪波, 王富国. 变形镜像差拟合能力的有限元仿真[J]. *光子学报*, 2010, **39**(8): 1461-1465.
- [6] MICHAEL F M, DAVID G T, DANIEL N G. Apparatus, system, and method for precision positioning and alignment of a lens in an optical system; US, 6760167[P]. 2004-07-06.
- [7] FERNAND B, MAURICE B, DANIEL T. Control of a planar fine positioned actuated by metal bellows[J]. *Automatica*, 1994, **30**(11): 1677-1691.
- [8] PRELLE C, JUTARD A, BETEMPS M. Compliance adjustment of a metal bellows actuator by control law parameters[J]. *Mechatronics*, 2001, **11**(6): 631-647.
- [9] KENJI K, TAKESHI A, KOTARO T, *et al.* Development of coarse/fine dual stage using pneumatically driven bellows actuator and cylinder with air bearings [J]. *Precision Engineering*, 2010, **34**(3): 526-533.
- [10] HU Liang. Method and application of U-shaped bellows stiffness calculation [J]. *Journal of Shanghai University (natural science)*, 1995, **1**(1): 26-35.
胡良. U 型波纹管刚度计算及应用[J]. *上海大学学报(自然科学版)*, 1995, **1**(1): 26-35.
- [11] HU Chang-ying, WANG Zhi-wei. Integral equations, iterative algorithm of U-shaped bellows at a large deflection [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2001, **18**(1): 19-26.
胡长鹰, 王志伟. U 型波纹管大挠度变形的积分方程描述及其迭代算法[J]. *应用力学学报*, 2001, **18**(1): 19-26.
- [12] WANG Yong-gang, DAI Shi-liang, LU Ying-min. Nonlinear analysis on bellows of oil tank [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2002, **19**(3): 35-39.
王永岗, 戴诗亮, 吕英民. 储罐用波纹管的几何非线性分析[J]. *应用力学学报*, 2002, **19**(3): 35-39.

- [13] KANG H W, LEE I H, CHO D W. Developmet of a micro-bellows actuator using micro-stereolithography technology [J]. *Microelectronic Engineering*, 2006, **83**: 1201-1204.
- [14] 于振毅, 尤玉良, 徐秋玲, 等. JB/T 6169-2006, 金属波纹管 [S]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [15] YANG Yi-jun, WANG Xin-feng. Nonlinear finite element analysis of the multiply bellows [J]. *Journal of Pressure Equipment and Systems*, 2003, **20**(9): 13-16.
杨义俊, 王心丰. 多层波纹管非线性有限元应力分析[J]. 压力容器, 2003, **20**(9): 13-16.
- [16] CHEN Ye, LI Yong-sheng, GU Bo-qin, *et al.* The finite element analysis to the U-shape bellows by the ANSYS program[J]. *Journal of Pressure Equipment and Systems*, 2000, **17**(3): 34-36 .
陈晔, 李永生, 顾伯勤, 等. 用 ANSYS 软件对 U 形波纹管的有限元分析[J]. 压力容器, 2000, **17**(3): 34-36.
- [17] ZHANG Bing, WANG Xing-feng. Stability of bellows analysis with nonlinear finite element method[J]. *Journal of Pressure Equipment and Systems*, 2001, **18**(1): 40-44.
张兵, 王心丰. 用非线性有限元分析波纹管的稳定性[J]. 压力容器, 2001, **18**(1): 40-44.

Linearity Analysis on Bellows Actuator of a Fine Objective Lens

YUAN Wen-quan, GONG Yan, ZHANG Wei, WANG Xue-liang, NI Ming-yang, ZHAO Lei
(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Geometrical nonlinearity of a fine objective lens' bellows actuator was analyzed with finite element method, and characteristics of bellows actuator were evaluated by linearity. Geometric nonlinear deformations of some common bellows(U shape, S shape, C shape, rectangle shape and triangle shape) were analyzed via the finite element method, the stoke and linearity of these actuators were obtain with the least square method. The results show that: the S shaped bellows, of which linearity is up to 0.161%, is the best one for large stoke bellows actuator, and the triangle shaped bellows, of which linearity is up to 0.135%, is the best one for small stoke bellows actuator.

Key words: Fine objective lens; Pneumatic; Bellows; Geometrical nonlinearity; Finite element method