

望远镜主镜气压力驱动器设计

唐金龙^{1,2,3} 张俊^{1,2,3} 王少白^{1,2,3} 鲜浩^{1,2}

¹ 中国科学院光电技术研究所自适应光学研究室, 四川 成都 610209
² 中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209
³ 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 为了获取优异的光学图像质量, 大口径天文望远镜通常采用主动支撑结构以校正主镜面形误差。对望远镜主镜支撑系统所需的气压驱动器进行了研究。基于气动原理设计了一种采用滚动膜片结构的气压力驱动器, 其中滚动膜片结构用于消除摩擦力的影响, 滚珠式力解耦器用于消除侧向力、弯矩的影响。进一步设计了针对气压驱动器带死区的比例-积分-微分(PID)控制算法, 以实现气压驱动器的闭环控制。实验结果表明: 气压力驱动器可精确提供主镜控制所需的支撑力, 在望远镜高角变化速度达到 $2^\circ/\text{s}$ 时, 输出支撑力范围为 $0\sim 1000\text{ N}$, 驱动器支撑力误差仅为满量程的 $\pm 0.4\%$ 。设计的气压驱动器可实现主动支撑力的快速精确输出, 能满足天文望远镜主镜主动支撑需求。

关键词 光学器件; 天文望远镜; 主镜; 主动支撑; 气压驱动器

中图分类号 P111.21 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201232.0623005

Pneumatic Force Actuator for Telescope Primary Mirror Support

Tang Jinlong^{1,2,3} Zhang Jun^{1,2,3} Wang Shaobai^{1,2,3} Xian Hao^{1,2}

¹ *Laboratory on Adaptive Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China*
² *Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China*
³ *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract In order to obtain fine optical imaging quality, large astronomical telescopes commonly utilize active support system to correct surface deflection of the primary mirror. A device of pneumatic force actuator for telescope primary mirror support is designed and tested. Based on the principle of pneumatic systems, a type of pneumatic force actuator with a rolling diaphragm element is designed for primary mirror active support. In the actuator, a force decoupler with ball bearing is adopted to eliminate lateral force and flexural torque. In addition, a proportional-integral-differential (PID) control algorithm with dead zone is designed for the actuator. When the telescope's elevation angle changes with the speed of $2^\circ/\text{s}$, the support force output can vary from 0 to 1000 N and the error is only $\pm 0.4\%$ of the full range. The experimental results show that the pneumatic force actuator designed is with good performance in static and dynamic force output.

Key words optical devices; astronomical telescope; primary mirror; active support; pneumatic actuator

OCIS codes 230.3120; 010.1290; 110.6770

1 引言

由于望远镜聚光能力与其接收面积成正比, 在其他提高聚光能力的方法如增加积分时间、扩展望

远镜观察的频谱等措施受到限制时, 建造大口径望远镜成为唯一的选择^[1]。大口径天文望远镜在使用过程中, 望远镜需要指向不同的天顶角。此时, 重力

收稿日期: 2011-11-30; **收到修改稿日期:** 2012-02-03

作者简介: 唐金龙(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事光学结构设计方面的研究。E-mail: ioetang@163.com

导师简介: 鲜浩(1968—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事大型光学设备设计方面的研究。

E-mail: xianhao@ioe.ac.cn

等因素对主镜面形的影响也是变化的。要保证望远镜成像质量,需要主镜支撑结构提供变化的支撑力来主动校正面形^[2~4]。

望远镜主镜支撑结构一般分为轴向支撑和侧向支撑两部分,在望远镜工作过程中,轴向支撑力与侧向支撑力随天顶角的余弦或者正弦成比例变化。望远镜在快动工作状态时,高角变化率可达 $1^\circ/\text{s} \sim 3^\circ/\text{s}$ ^[1]。这就要求主镜支撑结构中的驱动器输出支撑力在30~90 s内由最小值增至最大值,且误差不能超过满量程的1%。

目前常见的大型望远镜支撑驱动器主要有机械平衡锤式、机电式、液压式、气压式或者以上支撑方式的组合^[5~7]。机械平衡锤式驱动器可以根据望远镜指向天顶角自动调整支撑力分量,并且对制造、安装误差不敏感^[8],但如果需要主动调整支撑力以校正主镜面形就需要与其他支撑方式结合。机电式具有结构简单、便于主动控制等特点,但存在空回、摩擦等不利因素影响。液压或者气压驱动器具有质量轻、体积小、结构较简单、技术成熟、可靠性高、使用寿命长和便于主动控制等特点,但是液压式驱动器存在泄漏污染等问题。因此,气压驱动器在2000年后广泛应用于大口径望远镜主镜支撑设计中,如VISTA、Magellan、MMT和LBT等大口径望远镜^[9~11]。

由于气体的可压缩性、空气在阀口流量的非线性及摩擦等因素影响,气压驱动器开环响应特性并不是很好,要建立气压驱动器的数学模型并设计合适的控制策略也是困难的。常见的主镜气压式驱动器多采用闭环系统,根据反馈支撑力修正驱动器输出,从而消除非线性影响;对驱动器系统摩擦力在线估计并对其补偿以实现支撑力准确响应^[12,13]。本文设计的气压驱动器采用膜片式结构,可以有效消除摩擦力的影响,避免由摩擦力引起的爬行和跳变等现象,比例压力阀根据闭环反馈支撑力控制驱动器腔体内气压,从而控制驱动器的输出力,实现对所需支撑力的快速、准确响应。

2 气压力驱动器结构设计

2.1 望远镜主镜驱动器性能需求

望远镜在使用过程中,主镜指向不同的天顶角时轴向支撑结构和侧向支撑结构所提供的支撑力是随天顶角变化的。气压力驱动器所提供的驱动力在望远镜运行过程中,需要提供连续变化的支撑力。根据望远镜主镜重量和支撑结构的个数,并考虑气

压力驱动器系统的安全裕度,本文设计的气压力驱动器系统设计输出支撑力为0~1000 N。

望远镜在工作时,其基本运动方式有快动、定位、导星和跟踪等。其中望远镜在快动工作状态时,高角变化率可达 $1^\circ/\text{s} \sim 3^\circ/\text{s}$,即气压力驱动器输出支撑力需在30~90 s内由最小值增至最大值。

2.2 主镜气压驱动器工作原理

根据以上要求设计的驱动器为一个闭环的力反馈式气压驱动器(如图1所示)。驱动器主要由4部分组成,依次为力传感器、力解耦结构、气缸模块和比例压力阀。支撑力解耦结构连接主镜和支撑结构,采用双层滚珠和柔性铰链消除侧向力及力矩的影响。力传感器测量驱动器输出支撑力,测量结果反馈至驱动器气压控制系统以控制比例压力阀输出的气体压力。气缸模块内含一个滚动式膜片代替活塞以消除活塞与气缸壁之间的摩擦,通过滚珠式直线轴承约束活塞杆径向自由度。比例压力阀根据理想输出力和力传感器反馈的支撑力控制输出气体压力。

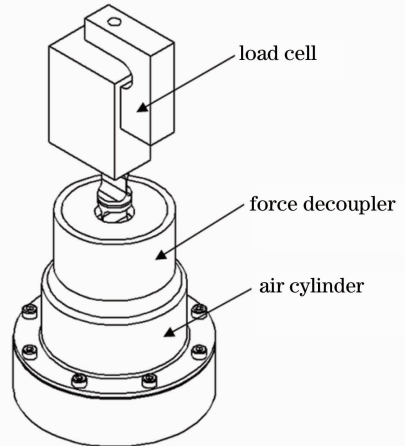


图1 气压力驱动器结构

Fig. 1 Pneumatic force actuator structure

压式驱动器在不工作时,膜片位置是自由的。当输出力指令到达比例压力阀时,压力与输出力指令成比例的气体被输送至气缸模块,气体推动膜片产生输出力。力传感器测量驱动器实际的输出力,控制系统读取力传感器测量数值并与理想输出力指令进行对比,并根据一定的控制策略来减小或者增大比例压力阀输出压力的大小,消除实际值与理想值之间的误差。

力解耦结构如图2所示,包含双层滚珠结构和柔性铰链。双层滚珠可以消除对准误差引入的侧向力或者力矩,这种对准误差通常可能是由于加工、安装误差或者主镜与支撑结构材料的不同温度膨胀系数导致的。柔性铰链可以消除偏转对准误差引入的

力矩,这种偏转对准误差通常是由于主镜支撑单元变形而引入的。

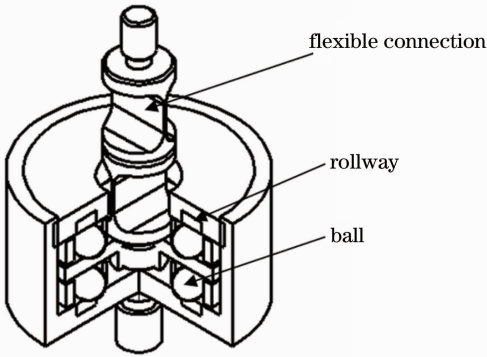


图2 气压力驱动器力解耦结构

Fig. 2 Force decoupler of the pneumatic force actuator

3 气压力驱动器实验

3.1 望远镜高角速度分析

望远镜在运行过程中,需要对不同的天顶角、不同速度的目标进行观察。对地平式望远镜而言,由于其方位轴和高度轴不再与地球自转轴平行,所以天体目标的视运动不能再由一根轴的简单旋转而补偿,而必须由方位轴和高度轴共同补偿。方位角速度和高角速度不再是恒定值。地心坐标系中天球的赤道与地平坐标系的关系可以由球面三角导出^[1]。

图3中地平坐标系应用方位、俯仰和距离来表示空间一点 P 。地平坐标原点为地球表面上一点 O , O 点与地心连线向上为 Z 轴,过 O 垂直于 Z 轴向东方为 X 轴, Y 轴过 O 点与 X 、 Z 轴符合右手坐标系。空间一点 P 在 XOY 平面投影为 P_0 , OP_0 与 Y 轴的夹角称为方位角 A , OP 与 XOY 平面的夹角称为高角 E , R 为 OP 的长度。

由球面三角可以得出地平坐标方位角 A 和高

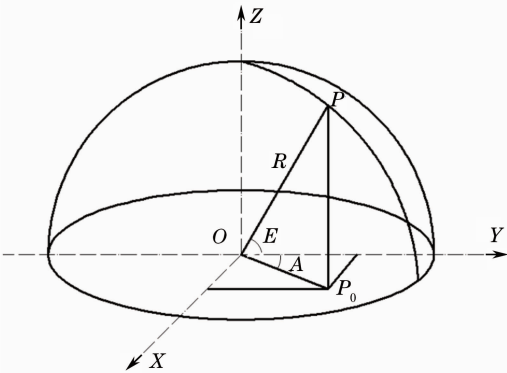


图3 地平坐标示意图

Fig. 3 General view of the horizontal coordinate system

角 E 与地理纬度 ϕ 及赤纬 δ 、时角 t 的关系为

$$A = \arctan\left(\frac{\sin t}{-\sin \phi \cos t + \cos \phi \tan \delta}\right), \quad (1)$$

$$E = \arcsin(\sin \phi \cos \delta + \cos \phi \cos \delta \cos t). \quad (2)$$

地平式望远镜在观测天体周日运动时,由于方位角和高角的这种复杂关系,方位轴和高度轴均应做变速运动。方位角和高角速度可以表示为

$$\frac{dA}{dt} = \frac{\sin \phi \cos E + \sin E \cos A \cos \varphi}{\cos E}, \quad (3)$$

$$\frac{dE}{dt} = \cos \phi \sin A. \quad (4)$$

望远镜主要用于收集天体的暗弱辐射,主要有以下几种基本运动方式:快动、定位、导星和跟踪等。望远镜快动的目的主要为将望远镜迅速指向目标观测区域。极限情况为望远镜从指向水平方向迅速转为指向天顶。例如在观测中子星时,需要在30 s内指向目标区域,极限情况下需要望远镜最大高角速度超过 $3^\circ/\text{s}$ 。对本文设计的气压力驱动器,实验分析均以高角速度 $2^\circ/\text{s}$ 和 $5^\circ/\text{s}$ 进行实验,以验证驱动器的性能。

3.2 气压驱动器实验

为测试气压力驱动器输出支撑力的速度及精度,分别测试了驱动器在望远镜不同高角速度下所需支撑力的输出精度。气压驱动器应用比例压力阀控制输出至气缸模块的输出气体压力,气体推动气缸前后两腔内膜片,产生输出力。输出支撑力由力传感器测量并反馈回控制器以实时校正输出力误差。实验原理如图4所示,其中 M 为负载质量, B 为负载阻尼系数, K 为负载弹簧刚度。

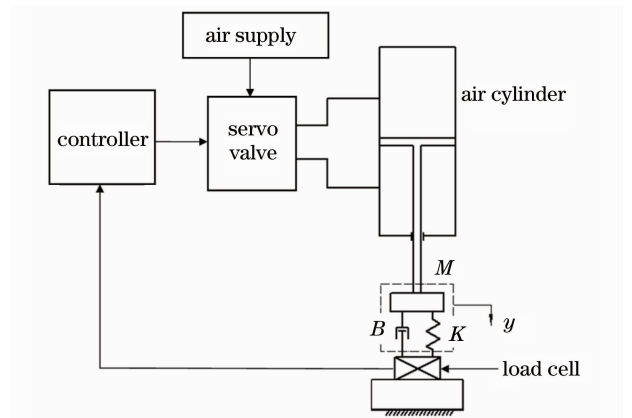


图4 气压驱动器试验简图

Fig. 4 Pneumatic actuator force servo system

由于气体的可压缩性、比例阀本身的非线性等因素,气压力驱动器开环控制效果并不理想。开环控制效果如图5所示,系统在开环输出时,响应速度较慢,理想值与输出值之间存在很大滞后,对系统

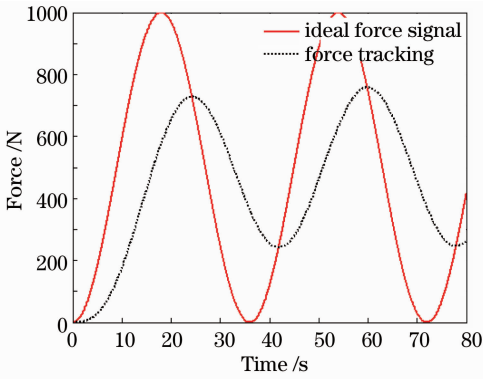


图 5 气压驱动器系统开环响应

Fig. 5 Output of pneumatic actuator force servo system without PID control

输出力的误差需要进行校正消除。

比例-积分-微分(PID)控制器在工业控制应用中占据着主导地位,其特点是依靠控制目标与实际输出之间的误差来确定消除此误差的控制策略,具有实现比较简便、对模型的精确度要求不高等优点^[14]。PID控制器是一种线性控制器,其控制算法为根据给定值 $y_d(k)$ 和实际输出值 $y(k)$ 构成控制偏差,可表示为

$$r_{error}(k) = y_d(k) - y(k), \quad (5)$$

PID控制规律可表示为

$$u(k) = k_p r_{error}(k) + k_i \sum_{j=0}^k r_{error}(j) T + k_d \frac{r_{error}(k) - r_{error}(k-1)}{T}. \quad (6)$$

控制器读取力传感器输出的电压,根据实际输出力与理想值的差异,采取PID控制策略,改变比例压力阀的控制电压,进而消除实际值与理想值的差异。结果显示,采取PID闭环控制时,驱动器的阶跃输出支撑力存在一定的震荡,但在2.5s后达到稳态(如图6所示)。驱动器在望远镜不同高角速度下所需支撑力的输出实验效果如图7、8所示。

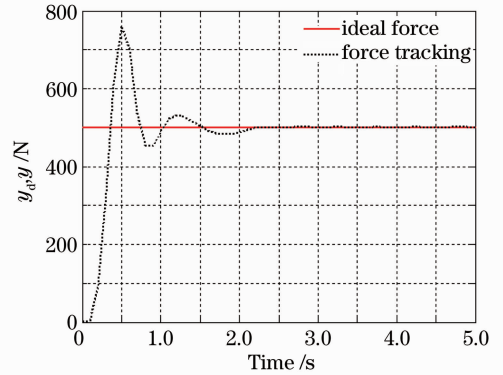


图 6 PID控制下气压驱动器阶跃响应

Fig. 6 Output of pneumatic actuator force servo system with PID control

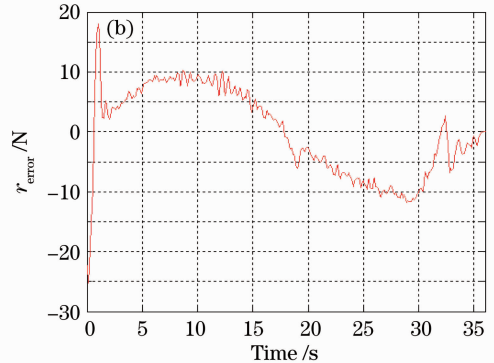
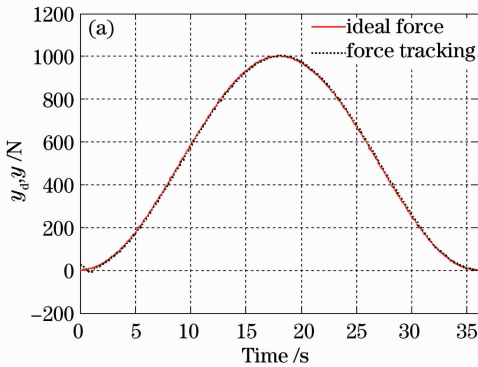


图 7 望远镜高角速度为 $5^\circ/\text{s}$ 时 PID 控制气压驱动器输出。(a) 支撑力轨迹; (b) 支撑力误差

Fig. 7 Output of pneumatic actuator force servo system with PID control as the telescope's elevation angle changes by up to $5^\circ/\text{s}$. (a) Force sinusoidal trace; (b) force error trace

图7和图8分别表示气压驱动器在望远镜高角速度为 $5^\circ/\text{s}$ 和 $2^\circ/\text{s}$ 时系统的输出力。图7(a)和图8(a)分别为气压驱动器输出跟随理想值变化曲线,理想输出力和实际支撑力几乎重合,可以很好地跟随输入变化;图7(b)和图8(b)为实际支撑力输出误差,在望远镜高角速度为 $5^\circ/\text{s}$ 时,在输出的开始阶段存在震荡,这是由于PID控制虽然在实际中大量使用,但其控制参数不容易整定,不易满足高性能

的要求。如果要精确整定PID控制参数,很多时候需要系统的精确模型,而PID控制的优点恰恰是不需要精确的数学模型^[15]。因此,需要改进PID控制算法来实现对气压驱动器系统的控制。

在气压驱动器控制系统中,为了避免控制作用过于频繁,消除由于频繁动作所引起的震荡,可以采用带死区的PID控制算法。其控制算式与普通PID控制规律相同,如(6)式所示,仅其控制偏差与普通

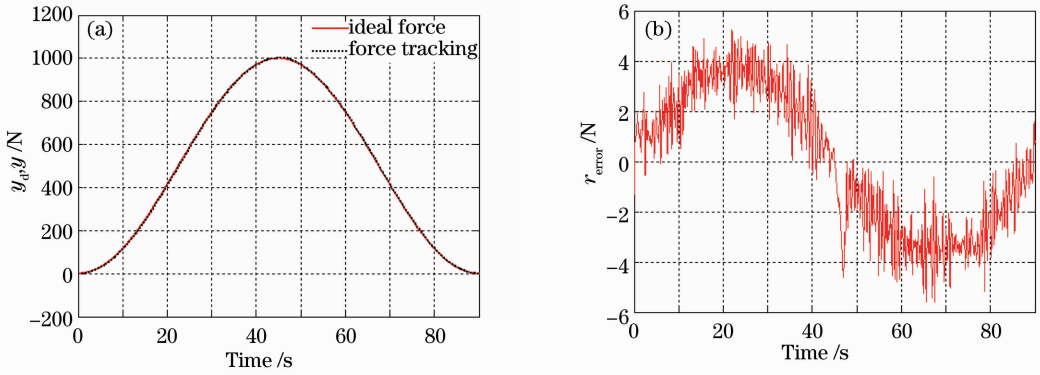


图 8 望远镜高角速度为 $2^\circ/\text{s}$ 时 PID 控制气压驱动器输出。(a) 支撑力轨迹；(b) 支撑力误差

Fig. 8 Output of pneumatic actuator force servo system with PID control as the telescope's elevation angle changes by up to $2^\circ/\text{s}$. (a) Force sinusoidal trace; (b) force error trace

PID 控制算法不同。控制偏差可表示为

$$r_{\text{error}}(k) = \begin{cases} 0, & |r_{\text{error}}(k)| \leq |e_0| \\ y_d(k) - y(k), & |r_{\text{error}}(k)| > |e_0| \end{cases} \quad (7)$$

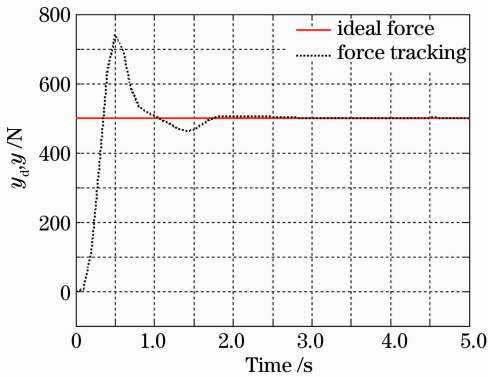


图 9 带死区的 PID 控制下气压驱动器阶跃响应

Fig. 9 Output of pneumatic actuator force servo system with dead zone PID control

望远镜气压驱动器在带死区 PID 控制下的阶跃响应如图 9 所示,驱动器输出在 2 s 即达到稳定状态,与单纯的 PID 控制相比,震荡时间缩短,且震荡穿越次数也减少。在实际的望远镜系统中驱动器输出支撑力不会为阶跃输出,这主要是为了保护主镜不受到冲击。实际设计中应尽可能地减少震荡现象的发生。由图 10(a)和图 11(a)可知在带死区的 PID 闭环控制作用下,在望远镜高角速度为 $5^\circ/\text{s}$ 和 $2^\circ/\text{s}$ 时驱动器实际输出力均可以很好地跟随理想值输出。从图 10(b)和图 11(b)输出支撑力误差曲线来看,驱动器在平缓输出支撑力时,震荡现象消失。这是由于在带死区的 PID 控制算法下,当控制误差小于一个给定值时,控制器输出不变,避免了控制动作过于频繁,减少了震荡的发生。在望远镜高角变化速度达到 $2^\circ/\text{s}$ 时,驱动器支撑力误差仅为 $\pm 4 \text{ N}$,较好地达到了望远镜在主镜支撑方面的需求。

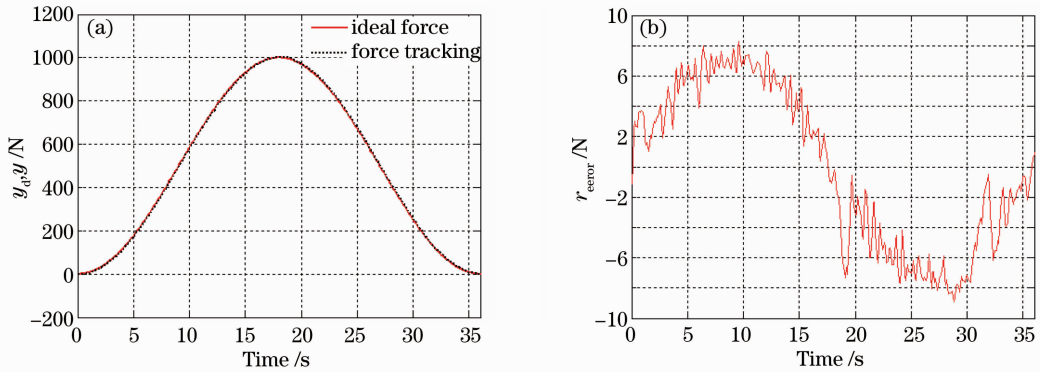


图 10 望远镜高角速度为 $5^\circ/\text{s}$ 时带死区 PID 控制气压驱动器输出。(a) 支撑力轨迹；(b) 支撑力误差

Fig. 10 Output of pneumatic actuator force servo system with dead zone PID control as the telescope's elevation angle changes by up to $5^\circ/\text{s}$. (a) Force sinusoidal trace; (b) force error trace

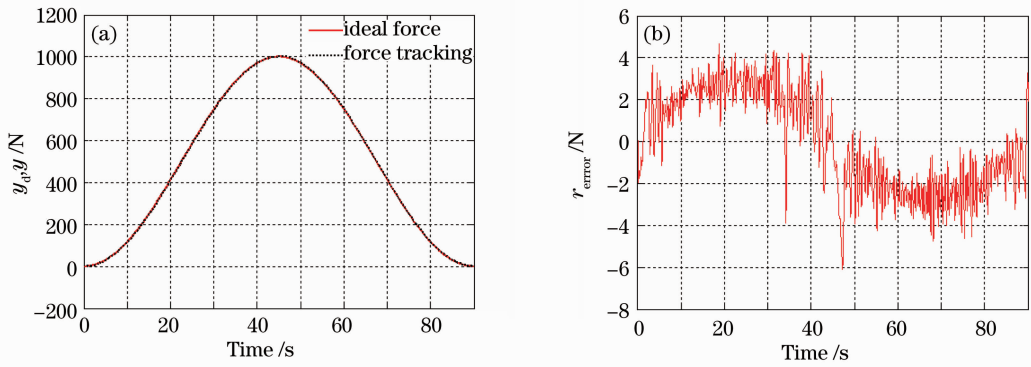


图 11 望远镜高角速度为 $2^\circ/\text{s}$ 时在带死区 PID 控制气压驱动器输出。(a)支撑力轨迹；(b)支撑力误差
 Fig. 11 Output of pneumatic actuator force servo system with dead zone PID control as the telescope's elevation angle changes by up to $2^\circ/\text{s}$. (a) Force sinusoidal trace; (b) force error trace

4 结 论

针对望远镜主镜支撑结构的要求,应用气压原理,设计了一种应用于主镜支撑的气压力驱动器。驱动器采用膜片式气缸模块以消除静摩擦力的影响,实现支撑力的精确输出。同时驱动器采用带有双层滚珠结构的力解耦器以消除因温差、加工和安装误差等因素带来的侧向力和弯矩的影响。驱动器采用闭环 PID 控制,驱动器实时校正频率为 100 Hz,实现了对驱动器输出支撑力的实时校正。实验结果表明,在带死区的 PID 控制方法下,气压驱动器具有良好的动静特性,输出支撑力很好地跟随理想值的变化。输出支撑力范围为 $0\sim 1000\text{ N}$,驱动器支撑力误差仅为满量程的 $\pm 0.4\%$,能很好地满足望远镜主镜驱动器性能需求。

参 考 文 献

- 1 Cheng Jingquan. Principles of Astronomical Telescope Design [M]. Beijing: China Science & Technology Press, 2003
程景全. 天文望远镜原理和设计[M]. 北京:中国科学技术出版社,2003
- 2 Ma Pinzhong. A new design of optical synthetic aperture telescope [J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(4): 403~407
马品仲. 大型光学综合口径望远镜的新方案[J]. 光学学报, 1994, **14**(4): 403~407
- 3 Lucy E. Cohan, David W. Miller. Integrated modeling for design of lightweight, active mirrors [J]. *Opt. Engng.*, 2011, **50**(6): 063003
- 4 Jiang Wenhan, Zhang Yudong, Rao Changhui *et al.*. Progress on adaptive optics of institute of optics and electronics, Chinese academy of sciences [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900106
姜文汉, 张雨东, 饶长辉等. 中国科学院光电技术研究所的自适应光学研究进展 [J]. 光学学报, 2011, **31**(9): 0900106
- 5 SMC (China) Co., Ltd.. Modern Practical Pneumatic

- Technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2008
SMC(中国)有限公司. 现代实用气动技术[M]. 北京:机械工业出版社,2008
- 6 Mark A. Ealey. Fully active telescope [C]. *SPIE*, 2004, **5166**: 19~26
- 7 Wang Shanshan, Zhu Quidong, Cao Genrui. Cophasing methods of segmented space telescope [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2435~2440
王姗姗, 朱秋东, 曹根瑞. 空间拼接主镜望远镜共相位检测方法 [J]. 光学学报, 2009, **29**(9): 2435~2440
- 8 Myung K. Cho. Optimization strategy of axial and lateral supports for large primary mirrors [C]. *SPIE*, 1994, **299**: 841~851
- 9 Richard Bennett, Fred Baine. Active mirror support using pneumatic actuators [C]. *SPIE*, 2004, **5497**: 91~102
- 10 L. Salas, L. Gutierrez, M. H. Pedrayes. Active primary mirror support for the 2.1-m telescope at the san pedro martir observatory [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(16): 3708~3716
- 11 Fan Xinlong, Guan Chunlin, Rao Changhui. Wave-front fitting capability analysis of 1.8 m telescope's adaptive secondary mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0822002
樊新龙, 官春林, 饶长辉. 1.8 m 望远镜变形次镜波前拟合能力分析 [J]. 光学学报, 2011, **31**(8): 0822002
- 12 Sheng Chaoqiang, Zhao Ting. Control strategy of fast pneumatic force servo system [J]. *Control Theory & Applications*, 2010, **27**(11): 1551~1556
盛朝强, 赵婷. 快速气动伺服系统的控制 [J]. 控制理论与应用, 2010, **27**(11): 1551~1556
- 13 James E. Kimbrell, David Greenwald. AEOS 3.67 m telescope primary mirror active control system [C]. *SPIE*, 1998, **3352**: 400~411
- 14 Li Hongwen. Servo system of large telescope based on internal model PID control method [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2009, **17**(2): 327~332
李洪文. 基于内模 PID 控制的大型望远镜伺服系统 [J]. 光学精密工程, 2009, **17**(2): 327~332
- 15 Han Jingqing. From PID technique to active disturbances rejection control technique [J]. *Control Engineering of China*, 2002, **9**(5): 13~18
韩京清. 从 PID 技术到“自抗扰控制”技术 [J]. 控制工程, 2002, **9**(5): 13~18