

超大口径光学制造的静压支撑系统集成与控制

胡海飞¹ 罗 霄^{1,2} 戚二辉^{1,3} 胡海翔^{1,3} 郑立功^{1,2}

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

²中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 在超大口径光学制造中, 镜体背部空间狭小, 转台承载能力有限, 要求光学制造的支撑结构尽量简单; 镜体承受加工载荷且弥漫加工磨料, 要求支撑系统对加工载荷和环境不敏感; 此外, 为便于在线检测, 缩短检测周期, 还要求支撑系统具有较高的调整精度和稳定性。设计了一种均力型静压支撑系统, 先测试了单个支撑的均力性及刚度, 预测了压印效应的大小; 随后阐述了支撑系统的控制方法; 最后实现了系统集成及其图形用户界面(GUI)界面操作。将该系统用于2m SiC反射镜的光学加工, 可将压印效应均方根(RMS)值控制到13.1 nm $\approx\lambda/48$, 满足加工需要; 用于立式检测, 系统对镜体倾斜和俯仰角可监测到的角度范围为0.34"~0.48°, 以及沿Z方向 ± 5 mm的运动; 对应曲率中心在XY平面的调节范围dR最大值50 mm, 最小值为10 μm , 与电荷耦合器件(CCD)像元尺寸接近, 满足立式检测需要。对目前具有重大需求的2~4 m量级反射镜而言, 该系统具有较好的适用性。

关键词 光学制造; 均力静压支撑; 调整精度; 超大口径反射镜; 在线加工检测

中图分类号 O439, TH161+14

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0822001

System Integration and Control of the Hydrostatic Supports for Manufacturing Ultra-Large Optics

Hu Haifei¹ Luo Xiao^{1,2} Qi Erhui^{1,3} Hu Haixiang^{1,3} Zheng Ligong^{1,2}

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

²Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In the process of manufacturing ultra-large mirrors, there is very limited space beneath the mirror's back, the machine platform has limited carrying capacity, so the polishing support system (PSS) should be structured simply. Also as the mirror is suffering from fabricating load and polishing powder which is very "dirty" spreads everywhere, PSS should not be sensitive to polishing load and its working environment. Moreover, when one wants to speed up the polishing through online testing, PSS should be adjustable and stable enough. An equal-force hydrostatic support system is designed, afterward the equal-force performance and static stiffness of PSS's single support structure are tested, then the print-through effect is predicted, finally the corresponding control method is proposed and PSS is integrated with (GUI) operation. Applied to the polishing of a 2 m SiC mirror, PSS restricts the magnitude of print-through effect to 13.1 nm $\approx\lambda/48$, which is considered stiff enough. And PSS achieves an angle adjusting region of 0.34"~0.48° and a ± 5 mm motion along Z axis for the mirror. The angle adjustment makes the corresponding XY-plane motion of the curvature center range from 50 mm to 10 μm , which is close to the size of charge couple device (CCD)'s basic unit, showing it suitable for mirror adjustment during vertical testing. The

收稿日期: 2014-12-19; 收到修改稿日期: 2015-02-20

基金项目: 国家973计划(2011CB013205)、国家自然科学基金(61210015)

作者简介: 胡海飞(1984—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事光机结构设计、精密支撑系统研制等方面的工作。

E-mail: huhf@ciomp.ac.cn

proposed hydrostatic support system has a good adaptability to 2~4 m class mirrors, which are in great demand.

Key words optical fabrication; equal-force hydrostatic support; adjustment precision; ultra-large aperture mirror; online testing for fabrication

OCIS codes 220.4610; 120.4610; 120.4880

1 引 言

光学望远镜在遥感技术领域中发挥着巨大的作用,被广泛应用于天文观测、对地侦查、遥控交会对接、资源勘察和气候监测等科学技术领域。随着技术水平和应用需求的提高,现代光学望远镜的口径越来越大,其中许多都已经突破2~4 m量级。这些超大口径反射镜在光机结构实现时,通常采用 whiffletree 结构实现反射镜的多点支撑,从而达到良好的面形指标^[1-3]。

随着主动光学和光学制造技术的进步,20世纪90年代出现了一种基于流体支撑结构的 whiffletree 分离点浮动支撑技术^[4-6]。该技术已被广泛应用于超大口径反射镜的加工制造和结构安装,在世界上已成功应用于4 m、8 m量级反射镜的加工^[4,7-8],国内近年来也有用于加工和支撑2~4 m口径反射镜的研究工作^[2,9-10]。

相关文献中对流体 whiffletree 的介绍,一般侧重阐述主动校正力的计算方法及校正效果,鲜见对于支撑结构具体实施、控制方法和精度的具体描述。本文提出一种新型的均力静压支撑结构,验证了其支撑性能,进行了支撑系统集成,并通过 RS 485 总线实现了实时控制。在控制软件中,预先测定系统的响应矩阵,只需给定镜体的当前姿态和目标姿态,即可将镜体迅速调整到指定位置。

2 新型结构设计

2.1 结构与受力分析

已见报道的典型流体支撑结构如图1所示:其中图1(a)所示为用于多镜面望远镜(MMT)6.5 m口径主镜的气动支撑^[4],图1(b)所示为用于SUBARU 8.3 m主镜的静压支撑系统^[11],图1(c)所示为静压支撑结构设计方案^[12]。图1(c)中支撑的工作原理为:活塞1、膜片3、压4片、缸盖5、丝堵7和O型圈9构成密闭腔体,通过液压管向该腔体内注入液体,当密闭腔体内液体压强达到一定大小时,缸体盖向上浮动可支撑待加工光学元件。

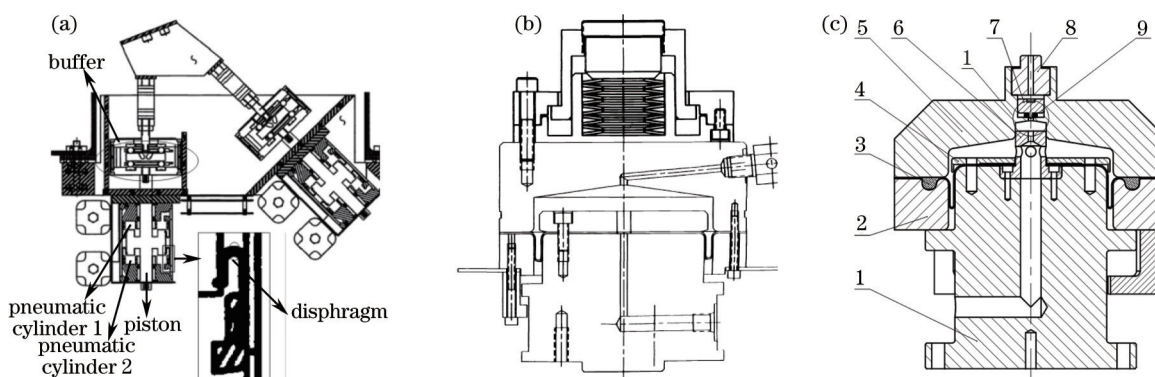


图1 流体压力支撑结构设计方案。(a) MMT气动支撑结构; (b) SUBARU静压支撑结构; (c) 新型静压支撑结构

Fig. 1 Structural design scheme of fluid supports. (a) MMT's pneumatic support; (b) SUBARU's hydro-support; (c) new hydro-support

通过比较图1的设计方案,并与现有光机结构支撑对比,可以发现,相比这些支撑结构,提出的新型静压支撑结构具有以下优点。

1) 结构中的上排气孔和整体设计遵循回转对称原则,确保输出的支撑力沿着轴线方向,避免如图1(b)所示侧排气方案引起的浮动质量分布不均匀、输出力偏离轴线的问题。

2) 采用的液体介质比图1(a)中的气体更不易压缩,能提供较大的刚度,既能降低镜体的自重变形,又对加工载荷更不敏感,从而达到对压印效应的抑制效果^[10,13],还可以充当立式检测塔的广义调整架结构。

3) 较高的定位支撑精度。图1(c)中径向限位结构6可限制浮动件2、5、11组合体的径向位置,载物限位结构8可保证缸盖5相对工件的径向位置,连同活塞底部的定位销孔,三者共同保证定位支撑精度。

4) 比传统光机结构支撑有更好的适用性。使用光机结构支撑须考虑磨料防护,且循环载荷容易导致柔性部件的疲劳损伤——而静压支撑结构易于拆装和重复利用,对加工环境也不敏感,由磨料弥漫、温度变化造成的影响可忽略不计。

5) 去掉了支撑结构顶部附带的缓冲结构和力反馈元件,使得支撑系统集成与控制更容易,制造成本更低。系统效果的提升可通过优化支撑点布局^[10]和保证输出力的一致性(均力性)来实现。

为保证均力性,对结构进行受力分析,如图 2 所示。

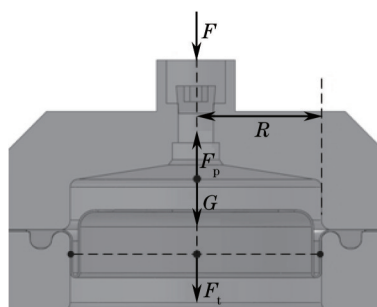


图 2 静压支撑结构受力分析

Fig.2 Force balance of a single hydrostatic support

图 2 中 F 为镜体载荷(静压支撑力的反作用力), G 为缸体浮动组件自重, F_t 为膜片张力($F_t=PC/2$, C 为缸体内活塞壁到缸体壁之间的间隙宽度,即卷积宽度), P 为液体压强, R 为缸体半径。由静力平衡条件有

$$\pi R^2 P = F + \pi R C P + m g, \quad (1)$$

其中 R 、 C 、 P 和 m 均为设计变量。某反射镜要求单点支撑力 F 为 165.6 N, 选用 $\Phi 83$ 和 $\Phi 64$ 的两种标准膜片, 卷积宽度分别为 $C_{83}=3.9$ mm 和 $C_{64}=2.4$ mm。据此设计的两型静压支撑结构, 浮动组件的质量分别为 $m_{83}=1.306$ kg 和 $m_{64}=1.054$ kg, 控制压强分别为 $P_{83}=0.03639$ MPa, $P_{64}=0.05912$ MPa, 由(1)式得到

$$dF = (2R - C)\pi P dR - \pi R P dC + (R^2 - RC)\pi dP - g dm, \quad (2)$$

据此分析影响支撑力精度的各因素公差、权重和支撑力合成误差如表 1 所示。表 1 引用的是一般严格的制造公差, 可根据各因素导致的误差幅值适当放大或缩小该项允差, 据此制定静压支撑结构件机械加工的允差分配准则。表 1 表明, 两种设计方案的支撑力的合成误差均小于 2‰, 满足静压支撑系统的均力要求。

表 1 均力静压支撑的支撑力精度(变量采用 mm-N-t 量纲体系)

Table 1 Force precision of equal-force hydrostatic supports (in mm-N-t system)

Type	Factor	Designed value	Tolerance	Weight	Force error	Total force error
Φ64	R	32	$\pm 1.00 \times 10^{-2}$	11.44	± 0.1144	± 0.1978 $\pm 1.2\%$
	C	2.4	$\pm 1.00 \times 10^{-2}$	-5.944	± 0.0594	
	P	0.05912	$\pm 5.00 \times 10^{-5}$	2976	± 0.1488	
	m	0.001054	$\pm 2.00 \times 10^{-6}$	-9805	± 0.0196	
Φ83	R	41.5	$\pm 1.00 \times 10^{-2}$	9.044	± 0.0904	± 0.2662 $\pm 1.6\%$
	C	3.9	$\pm 1.00 \times 10^{-2}$	-4.745	± 0.0475	
	P	0.03639	$\pm 5.00 \times 10^{-5}$	4902	± 0.2451	
	m	0.001306	$\pm 2.00 \times 10^{-6}$	-9805	± 0.0196	

2.2 均力性验证

为验证表 1 所示的支撑力精度, 设计了一个测试方案: 将 5 个 Φ64 型静压支撑连成一个支路, 安装 5 个精度为 0.3‰ 的力传感器分别监测各支撑的支撑力, 使用一个压强传感器读取管路压强。取 5 组数据的平均值作为真实支撑力的预测值, 各支撑力相对均值的误差随管路压强的变化如图 3 所示。

观察发现, 除第 1 号的少数测点的相对误差介于 2‰~2.5‰ 之间, 其余测点误差均在 2‰, 由此可以认为这 5 个样品的制造公差均满足设计要求, 具备组装均力静压支撑系统的支撑力精度。

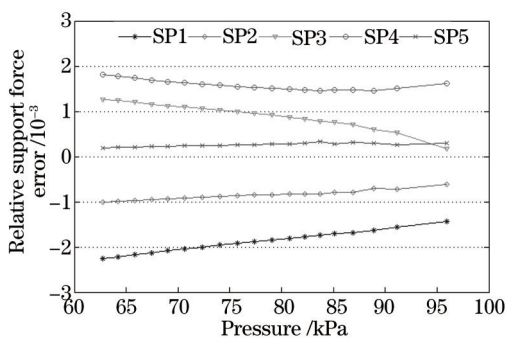


图3 均力支撑性能测试试验结果

Fig.3 Experimental results of equal force performance

3 静压支撑系统

满足要求的离散支撑通过管路相连便组成支撑系统。支撑系统服役于反射镜的研磨、抛光及立式检测的漫长过程,因此要求其稳定、高刚度并灵活可调。

3.1 硬件构造

将静压支撑结构系统分成3个支路^[7],分别控制管路内的液体体积,可使滚动膜片上下滚动,从而实现镜体姿态的灵活调整。为防止加工过程中镜体发生侧移,可在反射镜侧边额外安装三个以上的侧限位支撑。静压支撑系统的各支路采用相同的设计概念,如图4(a)所示。

每个支路中含 n 个静压支撑、 $n+1$ 个球阀,压强传感器和调压泵各1个。图4(b)所示为支撑系统的实施方案,管路系统和侧支撑未画出。

图4(c)所示为图4(b)所示支撑系统的支路管路连接方式,3个支路可用于调整镜体的刚体位移(dZ)和姿态角(反射镜与 X 轴的夹角 α 、与 Y 轴的夹角 β),其中每组相互连通的白线表示一个支路系统。为了监测支撑力,可在各支路中增加力传感器,其输出速度比压强传感器更快,能较好地监测支路压强状态。

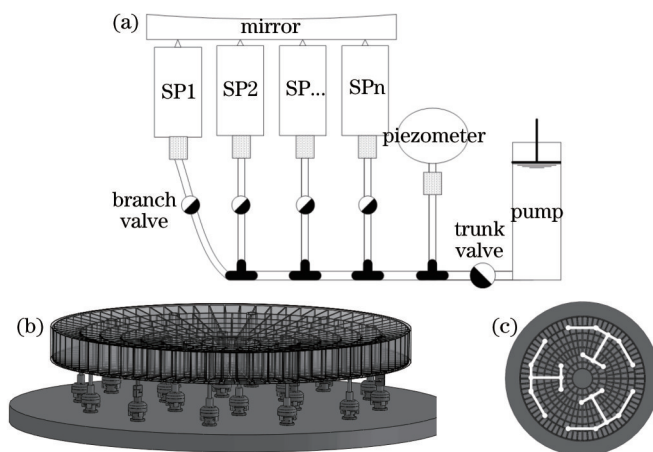


图4 均力静压支撑系统。(a) 均力支撑系统支路连接方案; (b) 用于超大口径光学制造; (c) 三个支路及连接方式

Fig.4 Equal-force hydrostatic support system. (a) One piping trunk of equal-force support system;

(b) applied to fabricate ultra-large optics; (c) three trunks and pipe links

3.2 压印效应评估

为评估反射镜在静压系统支撑状态下的压印效应,先测定静压支撑的准静态刚度,然后通过有限元分析,评估由反射镜和支撑结构组成的弹簧系统在加工压强下的面形变化情况。

刚度测试试验如图5(a)所示,试验中使用工装结构使力传感器承载孔和位移传感器同心,靠机床主轴提供 $2\ \mu\text{m/s}$ 的加载速率。多次测量取平均值,得到静压支撑刚度均值为 $2500\ \text{N/mm}$ 。据此,在有限元模型中,镜体被18个 z 向刚度为 $2500\ \text{N/mm}$ 的弹簧所支撑,镜面施加 $1\ \text{kPa}$ 的加工载荷,得到的面形如图5(b)所示。

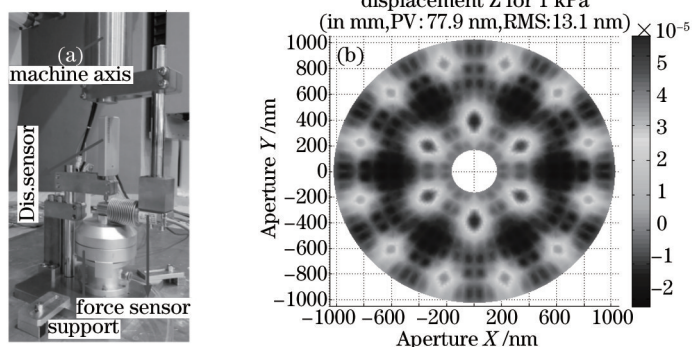


图 5 使用弹簧支撑系统模拟加工过程中的压印效应。(a) 刚度试验; (b) 压印效应分析
 Fig. 5 Simulating the print-through effect during polishing by spring support system. (a) Stiffness test;
 (b) analysis of the print-through effect

图 5(b)示, 1 kPa 抛光压力造成的压印效应峰谷(PV)值为 77.9 nm, 均方根(RMS)值为 13.1 nm, 为 $\lambda/48$ 。一般在光学加工过程中, 反射镜面形 RMS 值达到约 $\lambda/20$ 后会改用离子束修形(IBF)并安装结构支撑, 因此认为该静压支撑系统可提供足够的支撑刚度。

3.3 镜体姿态控制

XYZ 直角坐标系定义为: +Z 为加工机床主轴抬高方向; +X 为加工平台导轨方向, 从加工位指向立式检测位; +Y 轴机床主轴横梁方向, 依据右手螺旋法则确定。在 XYZ 坐标系下, 与镜体接触的 1~3 号位移传感器位置 $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 、 $P_2(x_2, y_2, z_2)$ 和 $P_3(x_3, y_3, z_3)$ 决定的平面可以表示为

$$\begin{cases} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{cases} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{bmatrix} \begin{cases} a \\ b \\ c \end{cases}, \quad (3)$$

其中 z_i 来自位移传感器的读数, x_i 和 y_i 为位移传感器的安装坐标, 将上式记为

$$Z = AX. \quad (4)$$

由于 P_1, P_2, P_3 三点不共线, (4)式具有唯一解

$$X = A^{-1}Z. \quad (5)$$

而该平面与 X 轴的夹角 α 与 Y 轴的夹角 β 满足

$$\tan \alpha = \frac{\partial z}{\partial y} = b, \tan \beta = \frac{\partial z}{\partial x} = a, \quad (6)$$

依据位移响应向量 Z 、蠕动泵转动向量 W , 定义支撑系统响应矩阵为 R 为

$$Z = RW. \quad (7)$$

结合(4)式和(7)式有

$$AX = RW, \quad (8)$$

(8)式的增量形式为

$$AdX = RdW, \quad (9)$$

求解(9)式, 有

$$\begin{cases} dW_1 \\ dW_2 \\ dW_3 \end{cases} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_1 \sec^2 \alpha & y_1 \sec^2 \beta & 1 \\ x_2 \sec^2 \alpha & y_2 \sec^2 \beta & 1 \\ x_3 \sec^2 \alpha & x_3 \sec^2 \beta & 1 \end{bmatrix} \begin{cases} d\alpha \\ d\beta \\ d\bar{z} \end{cases}, \quad (10)$$

其中 $d\bar{z}$ 为空间平面与 z 轴交点的 z 坐标值。将(10)式记为

$$dW = R^{-1}A'U, \quad (11)$$

其中 R 通过标定得到, A' 为与历史相关的状态变量, 需要实时更新。在 α 和 β 较小时, $A' \approx A$ 。

4 集成控制与测试

4.1 系统组成

将前述控制方法软件化,并辅之以执行元件,可实现系统的实时控制。控制方案如图 6(a)所示,基于 485 协议实现主机图形用户界面(GUI)界面与 1~3 号位移传感器(Sensor 1~3)、控制蠕动泵的 1~3 号步进电机控制器(1~3# M4505A)的数据传输。

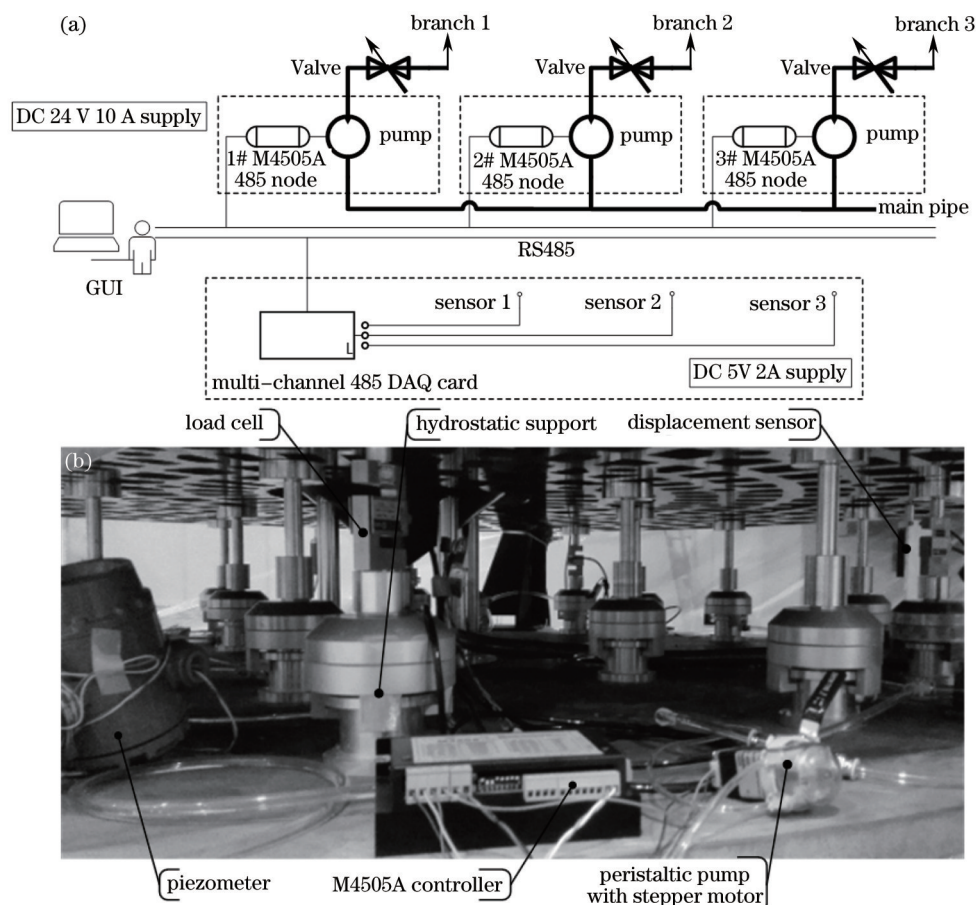


图 6 静压支撑系统集成方案及应用实施。(a) 静压支撑系统控制方案; (b) 加工某 2m 反射镜所使用的静压支撑系统
Fig.6 Integration of the hydrostatic support system and its application. (a) Control scheme of the hydrostatic support system; (b) hydrostatic support system applied to manufacture a 2 m mirror

图 6(a)中的位移传感器的接触式测头竖直顶在反射镜背部基准面,蠕动泵连接静压支撑的支路,支路中的各个静压支撑承担反射镜轴向支撑功能,如图 6(b)所示。图 6(b)所示的实施案例中,还采用了 3 个压强传感器和 3 个力传感器,以获取更多有利于判断管路和镜体状态的信息。

4.2 软件流程图

图 6(a)中 GUI 界面的软件流程图如图 7 所示。图 7 流程中的 485 多通道数据采集卡可以随时获取位移传感器的信息,在需要的时候可以对支撑系统的响应矩阵 R 进行更新。用户指定调整量后,控制算法使用最新的 R 和 A' ,依据(13)式,计算各控制电机所需的脉冲数,实现各蠕动泵的联动,实现支路调整。

4.3 性能测试与分析

图 7 流程中需要使用到 R 和 A' , A' 为历史状态变量,与结构特性无关,因此可以通过 R 判断静压支撑系统的调整精度。通过图 6(a)中的 GUI 界面分别单独向各支路蠕动泵发送 50000 个脉冲,得到各位移传感器的响应值,如表 2 左半边所示。

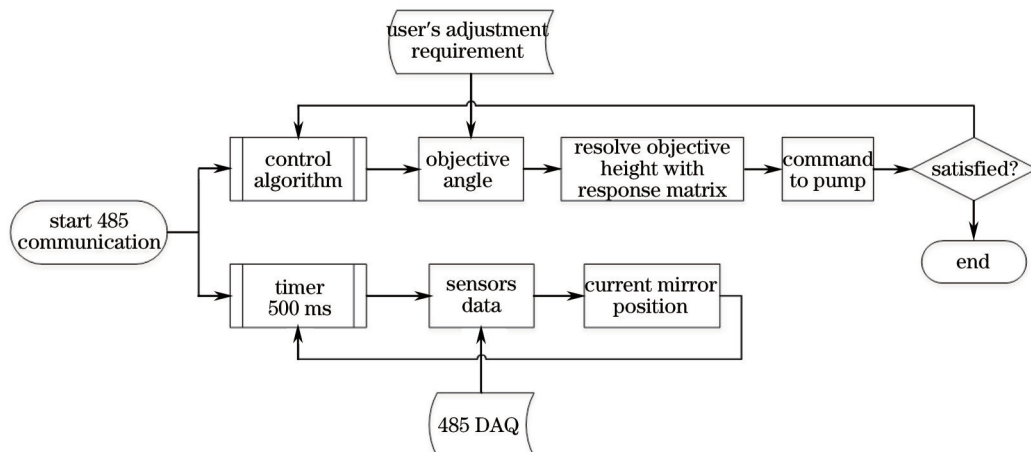


图7 静压支撑调整装置控制系统软件流程图

Fig.7 Work flow of the software for controlling the support system

表2 静压支撑系统的性能测试结果

Table 2 Performance test result of the hydrostatic support system

Pump #	Response to 50000 pulses/mm			Predicted for single step/mm		
	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3
1	-4.66×10^{-2}	5.20×10^{-3}	3.80×10^{-3}	-5.96×10^{-5}	6.66×10^{-6}	4.86×10^{-6}
2	4.40×10^{-3}	-4.26×10^{-2}	4.60×10^{-3}	5.63×10^{-6}	-5.45×10^{-5}	5.89×10^{-6}
3	2.80×10^{-3}	3.20×10^{-3}	-3.68×10^{-3}	3.58×10^{-6}	4.10×10^{-6}	-4.71×10^{-5}

使用的电机步距角为 1.8° , 步进电机控制器每驱动步细分 64 步, 因此 50000 个脉冲约合电机带动蠕动泵转动 1406° , 约合 3.9 转。根据试验结果, 可以预测: 电机单步执行时, 能产生的位移变化量为试验结果的 $64/50000$, 即 1.3% , 相应的预测值列于表 2 右半边。

从表 2 可见, 响应矩阵为主对角占优阵, 耦合项较小, 认为静压支撑的最小调整量可达 50 nm 量级, 远小于位移传感器的分辨率 $2 \mu\text{m}$ 。从几何上来说, 由位移传感器决定的监测精度正比于其分辨率和量程, 反比于其安装半径。图 6(a) 中的位移传感器安装于镜体半径为 803 mm 的位置, 分辨率为 $2 \mu\text{m}$, 可监测到的最小角度为 $0.34''$; 其量程为 10 mm, 对应最大角度为 0.48° 。

此外, 静压支撑通过滚动膜片可以实现 10 mm 行程的滚动, 通常使静压支撑系统工作在其行程中心, 因此可实现镜体整体在 z 方向大约 $\pm 5 \text{ mm}$ 的运动。更大的焦距调节功能可以通过检测塔中干涉仪的升降台和 Stewart 平台实现。

4.4 立式干涉检测试验

立式干涉检测的实施方案如图 8(a) 所示, 检测面形图如图 8(b) 所示。

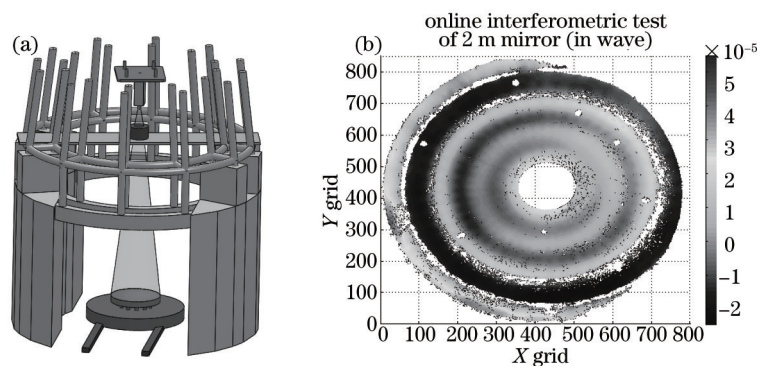


图8 静压系统支撑状态下 2 m 反射镜的立式干涉检测。(a) 立式检测概念图; (b) 立式检测面形图

Fig.8 Vertical interferometer test of a 2 m mirror sitting on the hydrostatic support system.

(a) Concept of vertical test; (b) surface figure by vertical test

处于加工状态下的反射镜,由于镜面加工载荷的非对称性,各支路的密封特性及支撑刚度有所差别,滚动膜片所使用的橡胶材料还有一定的蠕变性,经过长期积累容易造成镜体的倾斜和下降,而干涉仪支架一般倒挂于工作台,不宜频繁调整,因此更希望在检测过程中通过静压支撑系统调整镜体的姿态。实际运行情况表明,静压支撑系统的精度和稳定性满足立式检测要求。

由于静压支撑系统为浮动支撑系统,其边界条件为均力支撑,因此镜体为自由浮动调整,不存在过约束现象。待反射镜加工到要求精度后,将反射镜取下支撑系统,换上结构支撑系统,恢复等力边界条件即可恢复面形,可有效提高检测效率,可极大地减少结构装调与光学加工的反复。

5 结 论

静压支撑具有较好的定位支撑精度,各点支撑力误差在2‰以内,1 kPa抛光压力造成的镜面压印效应PV值为77.9 nm,RMS值为13.1 nm,静压支撑系统可提供足够的支撑刚度以抑制压印效应。

支撑系统的控制执行精度远高于位移传感器精度,后者取决于传感器分辨率和量程。将静压支撑系统用于某顶点曲率半径为6040 mm的2 m反射镜的立式光学检测,对镜体姿态可调整的最小角度为0.34",最大角度为0.48°,还可实现沿Z方向±5 mm的运动;对曲率中心在XOY平面内的最大调节范围 $dR_{max} \approx 50$ mm,最小调节范围 $dR_{min} \approx 10$ μm,与CCD像元尺寸相当,可满足工程使用要求。

当反射镜尺寸过渡到4 m甚至更大,静压支撑结构特性也无需改变,增加支撑个数即可,还可组合使用大量程低精度、小量程高精度的位移传感器,提高其监测精度。对目前具有重大需求的2~4 m量级反射镜而言,本文静压支撑系统及其控制方法具有较好的适用性。

参 考 文 献

- 1 Liu Yongming, Xie Jun, Li Xiangqin, *et al.*. Optimization and figure analysis of elastic thin-film liquid lens[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1216001.
刘永明, 谢 军, 李湘勤, 等. 弹性薄膜液体透镜的优化设计及面形分析[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1216001.
- 2 Jia Yong, Gao Yun-guo, Shao Shuai. Opto-mechanical optimization for laser expander system under thermal loads[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0116003.
贾 勇, 高云国, 邵 帅. 热载荷下激光扩束系统的光机优化设计[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0116003.
- 3 Wu Xiaoxia, Li Jianfeng, Song Shumei, *et al.*. Active support system for 4 m SiC lightweight primary mirror[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(9): 2451-2457.
吴小霞, 李剑锋, 宋淑梅, 等. 4m SiC轻量化主镜的主动支撑系统[J]. 光学精密工程, 2014, 22(9): 2451-2457.
- 4 Martin H M, Callahan S P, Cuerden B, *et al.*. Active supports and force optimization for the MMT primary mirror[C]. SPIE, 1998, 3352: 412-423.
- 5 Li Hongzhuang, Zhang Zhenduo, Wang Jianli, *et al.*. Active surface-profile correction of 620 mm thin-mirror based on flotation support [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0511001.
李宏壮, 张振铎, 王建立, 等. 基于浮动支撑的620 mm薄反射镜面形主动校正[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0511001.
- 6 Tang Jinlong, Zhang Jun, Wang Shaobai, *et al.*. Pneumatic force actuator for telescope primary mirror support[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(6): 0623005.
唐金龙, 张 俊, 王少白, 等. 望远镜主镜气压力驱动器设计[J]. 光学学报, 2012, 32(6): 0623005.
- 7 Schipani P, Capaccioli M, D'Orsi S, *et al.*. The VST active primary mirror support system[C]. SPIE, 2010, 7739:773931.
- 8 Martin H M, Allena R G, Cuerdena B, *et al.*. Manufacture of the second 8.4 m primary mirror for the large binocular telescope[C]. SPIE, 2006, 6273: 62730C.
- 9 Huang Qitai, Guo Peiji, Yu Jingchi. Controlling distortion in the process of ultra-thin mirror manufacture[J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(8):128-133.
黄启泰, 郭培基, 余景池. 超轻超薄反射镜制造过程中的变形控制研究[J]. 光电工程, 2008, 35(8): 128-133.
- 10 Hu Haifei, Luo Xiao, Xin Hongwei, *et al.*. Layout optimization of equal-force supports for ultra-large optical fabrication[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0422003.
胡海飞, 罗 霄, 辛宏伟, 等. 超大口径光学制造均力支撑布局优化[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0422003.

- 11 Smith W S. Manufacture of an 8-meter class primary mirror[C]. SPIE, 1994, 1994: 208-217.
- 12 Hu Haifei, Luo Xiao, Zheng Ligong, *et al.*. Hydrostatic Support Equipment Applied to Manufacture Ultra-Large Optics. China Patent: 201310339253.7[P]. 2013-11-20.
胡海飞, 罗 霄, 郑立功, 等. 用于超大口径光学加工的静压支撑装置. 中国专利: 201310339253.7[P]. 2013-11-20.
- 13 Zhong Xianyun, Xu Qinglan, Fan Bin. Study on elimination of “imprinting effect” of lightweight reflector[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(7): 0722002.
钟显云, 徐清兰, 范 斌. 消除轻质反射镜“压印效应”的技术研究[J]. 光学学报, 2011, 31(7): 0722002.

栏目编辑: 韩 峰