文章编号 1004-924X(2015)10-2852-08

哈特曼探测器的高精度调节机构

李文杰[1,2],穆全全[1],王少鑫[1],王海萍[1],杨程亮[1],曹召良[1],宣 丽[1]
(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.中国科学院大学,北京 100039)

摘要:设计了基于高精度直线驱动器和曲柄滑块机构的高精度二维角度调节机构,以实现 2 m 口径望远镜中哈特曼探测器与自适应光学系统间的高精度对准与自动化调节。依据光学设计分析得出调节机构分别需满足±1°的调节范围和 6" 的调节精度。根据哈特曼探测器的外形结构和调节机构的整体布局,选择了调节机构中的主要参数,对整体调节机构进行了初始设计并分析了它的精度和动态特性。利用自准直仪设计了调节机构的检测系统,对设计的调节机构的调节范围、精度和动态性能进行了实际测量。结果表明:哈特曼探测器调节机构在俯仰和扭摆方向上的角度调节量均约为 ±1.2°,调节精度分别为 0.43″和 2.1″,均满足设计要求,为哈特曼探测器的高精度探测奠定了基础。

关 键 词:哈特曼探测器;调节机构;曲柄滑块机构;直线驱动器;自准直仪
中图分类号:TP212.14;O439 **文献标识码**:A **doi**:10.3788/OPE.20152310.2852

High precision adjustable mechanism for Shack-Hartmann sensor

LI Wen-jie[1,2], MU Quan-quan[1], WANG Shao-xin[1],
WANG Hai-ping[1], YANG Cheng-liang[1], CAO Zhao-liang[1], XUAN Li[1]

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciencess, Changchun* 130033, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Science, Beijing* 100039, *China*;)
* *Corresponding author, E-mail: li-wenjie@163.com*

Abstract: A high precision two dimension angle adjustable mechanism based on a fine actuator and a slider-crank mechanism was designed to implement the fine alignment and automatic adjustment between Hartmann sensor and adaptive optical system in a 2 m diameter telescope. On the basis of the optical analysis, it points out that the mechanism needs ±1° adjustable amount and 6" adjustable accuracy. Associating the use pattern of the actuator with the outline of the Hartmann sensor, main parameters of the adjustment mechanism were selected, the initial mechanism was designed and its accuracy and dynamic specialty were analyzed. Then, a detecting system for the mechanism was designed based on an autocollimator. The adjustable range and accuracy as well as the dynamic specialty were tested by the detecting system in the experiment. The results show that the adjustable angles on the pitch and azimuth directions are all about ±1.2° and the rotation angle accuracies in the pitch and azi-

收稿日期:2015-01-20;**修订日期**:2015-02-17.
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11174274, No. 11174279, No. 61205021, No. 11204299, No. 61377032, No. 61378075)

muth directions are 0.43″ and 2.1″, respectively, which all satisfy the design requirements. The research results provide a foundation for high precision detection of Hartmann sensors.

Key words: Shack-Hartmann sensor; adjustable mechanism; slider-crank mechanism; line actuator; autocollimator

1　引　言

自适应光学技术通过对光学畸变波前实时地探测-控制-校正，使光学系统具有自动适应外界条件变化，始终保持良好工作状态的能力[1]，已被广泛应用于天文观测和医学观测等[2-4]。自适应光学技术的关键器件为波前探测器和波前校正器。波前探测器对波前畸变进行实时的测量，并将测量信息反馈给波前校正器进行波前校正。因此，波前探测器的探测精度在很大程度上影响了波前的校正精度和最终的成像质量。

2 m 口径望远镜自适应光学系统中使用的波前探测器为哈特曼探测器，由微透镜阵列和 CCD 相机组成。哈特曼探测器通过微透镜阵列对光学波前进行分割采样并聚焦成像于 CCD 面板上。当光学波前发生畸变时，CCD 相机中的聚焦光斑将发生偏移。通过测量每个微透镜聚焦光斑的偏离量分布及大小就可得到该波前的畸变形式和幅度[5]。为了获得较好的质心偏移测量精度，通常需要利用平面光波对哈特曼探测器进行零位标定，当标定位置为微透镜所占像素的中心时，探测时的离散采样误差最小、光斑位移敏感度最高，测量的动态范围最大[6]。在与自适应光学系统对接时，则通过调节机构将入射波前与哈特曼探测器进行对准。对于哈特曼探测器，主要的调节为上下的俯仰调节和左右的扭摆调节。调节机构一般通过具有一定位置关系的调节螺钉运动或者根据运动学原理来实现机构中各部件相对位置的改变[7-13]。本文采用直线驱动器为主动件，基于曲柄滑块机构的运动学原理设计了哈特曼探测器的二维调节机构。首先，结合机构运动形式和哈特曼探测器的外形结构，选择了曲柄滑块机构中各杆件参数；然后，根据调节机构的调节量和调节精度要求选择了驱动器参数。最后，对所设计的调节机构进行了实验测试，并分析讨论了实验结果。

2　调节机构的设计与分析

2 m 口径望远镜自适应光学系统中所用的哈特曼探测器的外形结构如图 1 所示，由长宽高约为 240 mm×77 mm×175 mm 的 CCD 相机和微透镜阵列与转接透镜组成，重量约为 4.5 kg。探测之前通过调节哈特曼探测器的位置，使平行光垂直入射到微透镜阵列，汇聚到 CCD 面板上，标定光斑的零位。CCD 面板上像素尺寸为 48 μm，微透镜成像焦距为 16.5 mm，每个微透镜对应 CCD 面板中的 6 pixel×6 pixel 以实现对聚焦光斑的质心测量。设计完成的哈特曼探测器质心测量精度可以达到 1/10 像素，为此调节机构的调节精度 $\Delta\varphi$ 设计为不低于 $\Delta\varphi=0.01\times P/f=6''$。最大调节范围则根据每个哈特曼探测器的测量动态范围给定，为不超过 ±1°。

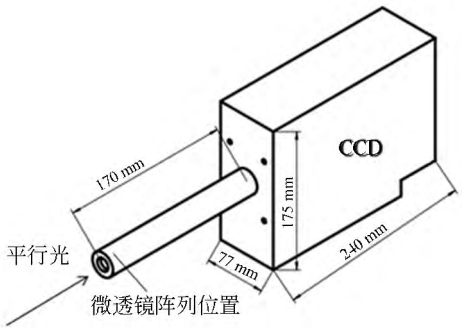


图 1　哈特曼探测器外形示意图

Fig. 1　Outline sketch of Hartmann sensor

为了满足上述的调节精度要求，采用精密直线驱动器与基于曲柄滑块运动原理的组合控制机构来实现对哈特曼探测器的二维角度调节。所用的曲柄滑块机构原理如图 2 所示，滑块 C 与直线驱动器连接，可以在驱动器的带动下来回往复直线运动，进而带动连架杆 1 完成绕轴 A 点的角度转动。由于 A、B、C 三点间为三角形布局形式，

整体结构稳定性高，且连杆间通过刚性铰链副连接，机构刚性好，可以确保调节过程的精确和稳定。

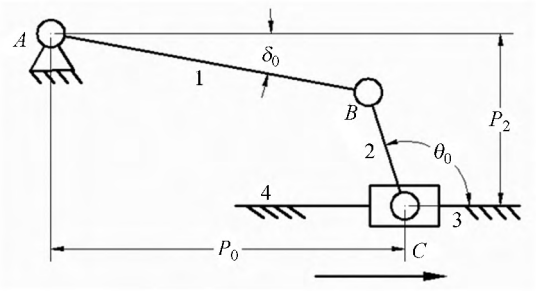


图 2　曲柄滑块原理示意图

Fig. 2　Principle diagram of slider-crank mechanism

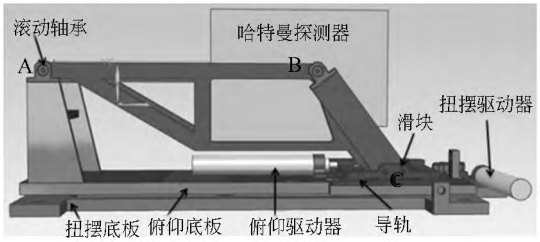


图 3　调整机构布局示意图

Fig. 3　Configuration diagram of mechanism

根据哈特曼探测器的外形结构以及调节机构的整体布局设计了如图 3 所示的俯仰和扭摆二维角度调节系统。俯仰驱动器克服哈特曼探测器以及其支架的重力分力，驱动哈特曼探测器作俯仰运动。扭摆驱动器克服位于扭摆底板以上的部件产生的滚动摩擦力，驱动哈特曼探测器作扭摆运动。为使机构在运动过程中更加顺滑，铰链副采取滚动轴承连接，轴承的径向游隙为 2～13 μm，滑块固定在滚珠直线导轨上。由于在进行自适应光学系统与哈特曼探测器的精确角度对准调节时，需要始终保持哈特曼探测器中的微透镜阵列与系统出瞳间的横向位置关系。因此在角度调节时要避免哈特曼探测器发生垂轴偏移，如在俯仰调节时，造成哈特曼探测器在高度方向也发生了变化[14]。为此，将俯仰调节的转动中心轴（图 3 中 A 处）设计在微透镜阵列的水平对称轴上，扭摆调节中心轴设计在微透镜阵列竖直对称轴上。最终设计完成的 2 个维度方向上的曲柄滑块机构各主要参数如表 1 所示，表中 l_{AB}、l_{BC} 分别为杆 1 和 2 的长度。

表 1　俯仰和扭摆调节的参数

Tab. 1　Parameters on pitch and azimuth directions

	l_{AB}/mm	l_{BC}/mm	P_0/mm	P_2/mm	杆件材料
俯仰调节	350±1	160±0.5	446±1	128±1	铝合金
扭摆调节	548±1	40±0.5	88±0.5	575±1	铝合金

图 2 所示的曲柄结构满足如下的几何关系：

$$l_{AB}\cos\delta_0-l_{BC}\cos\theta_0=P_0, \tag{1}$$

$$l_{AB}\sin\delta_0+l_{BC}\sin\theta_0=P_2, \tag{2}$$

$$l_{AB}\cos\delta-l_{BC}\cos\theta=P_0+x, \tag{3}$$

$$l_{AB}\sin\delta+l_{BC}\sin\theta=P_2, \tag{4}$$

$$\varphi=\delta-\delta_0, \tag{5}$$

其中：φ 为调节机构转角，X 为驱动器的运动量，初始位置时 X 为 0；P_0、P_2 分别为机构在初始位置时点 A、C 的水平距离和垂直距离（以驱动器运动方向为水平方向）；δ_0、θ_0 分别为机构在初始位置时连架杆 1 和连杆 2 与水平正方向的夹角；δ、θ 分别为滑块运动量为 X 时连架杆 1 和连杆 2 与水平正方向的夹角。

由式(1)～(5)整理得，哈特曼探测器的角度调节量和驱动器运动量的关系为：

$$\sin\left(\frac{\varphi}{2}\right)=-\frac{X\cos\theta_0}{2l_{AB}\sin(\theta_0+\delta_0)}. \tag{6}$$

结构参数确定后，δ_0、θ_0 以及杆 AB 长 l_{AB} 均为常数。当驱动器移动量 X 很小时，调节机构转角近似为：

$$\varphi=-\frac{X\cos\theta_0}{l_{AB}\sin(\theta_0+\delta_0)}=CX,$$

其中：

$$C=-\frac{\cos\theta_0}{l_{AB}\sin(\theta_0+\delta_0)}. \tag{7}$$

可见，角度调节量和驱动器的运动量基本成线性关系，且曲线的斜率为 C。代入表 1 中的杆件参数得在初始位置附近，调节机构在俯仰和扭摆方向上角度调节量的响应曲线斜率分别为(431±15)″/mm 和(436±18)″/mm。将调节机构在俯仰和扭摆方向的参数以及哈特曼探测器±1°的角度调节量以及 6″的调节精度要求分别代入式(1)～(5)，计算得出驱动器在俯仰和扭摆调节方向上所需的行程和运动精度，如表 2 所示。

为使驱动器能正常工作，还需保证驱动器的受力在许用范围内。图 4(a)所示为驱动器在俯仰调节方向上的受力示意图，驱动器需要克服哈特曼探测器以及俯仰调整架的重力的水平分力作

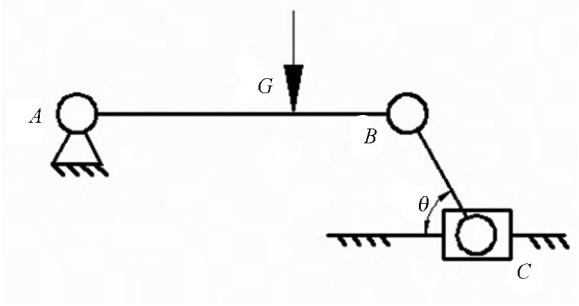
表 2　驱动器所需的行程和精度

Tab. 2　Required stroke and precision of actuator

	驱动器最小行程/mm	驱动器最低运动精度/μm
俯仰调节	−8.7～7.7	13.3
扭摆调节	−8.46～8.18	13.6

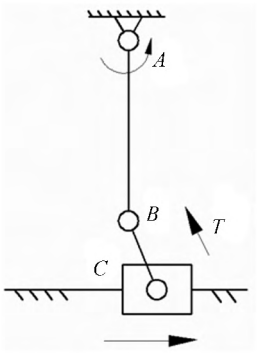
用。哈特曼及其调整架总重约为 100 N。当驱动器处于右极限位置时，驱动器受力最大，此时角度 θ 为 48.5°。连杆 BC 承受的挤压力 R_b 约为 70 N，故在水平方向上驱动器承受的拉力为 $R_{b1}=R_b\times\cot\theta=62$ N。图 4(b)所示为驱动器在扭摆调节方向的受力示意图，驱动器克服滚动摩擦力作用，摩擦力的正压力为俯仰调整架和哈特曼探测器的重力，约为 150 N，滚动摩擦系数约为 0.05，驱动器只需克服 150×0.05＝7.5 N 的摩擦力即可驱动结构进行扭摆运动。根据驱动器所需的运动行程、运动精度以及受力大小要求，选择了运动范围±10 mm，单向运动精度为 0.1 μm，双向运动精度为 1 μm，许用受力为 120 N 的驱动器。

机构的整个调节过程是通过驱动器的往复运动完成的。当驱动器进行反向运动时，由于杆件



(a) 俯仰方向受力分析

(a) Force analysis on pitch direction



(b) 扭摆方向受力分析

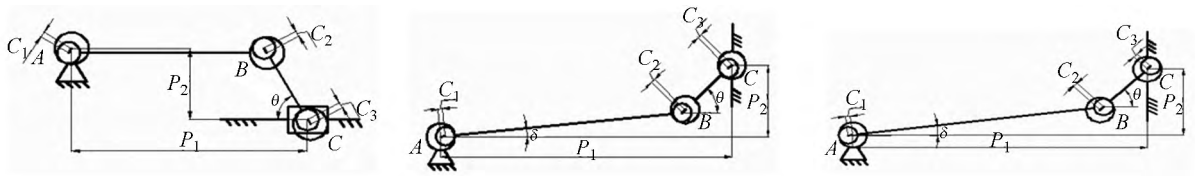
(b) Force analysis on azimuth direction

图 4　驱动器受力分析

Fig. 4　Force analysis of actuators

连接处轴承径向游隙以及驱动器反向运动精度的影响，响应曲线会出现一段非线性响应的过渡区。对于俯仰调节，哈特曼探测器自身重力使得杆件轴始终靠在轴承孔的一侧，如图 5(a)所示，其中大圆代表轴承孔，小圆代表杆件轴。C_1、C_2、C_3 为轴承的径向游隙。当驱动器反向运动时杆件的有效长度几乎没有变化，因此，俯仰调节的回程差很小，响应曲线的过度区可近似认为是驱动器的双向运动精度，即 1 μm。

对于扭摆调节，轴承的径向游隙影响了杆件的有效长度，如图 5(b)、(c)所示，当驱动器向上运动时，杆 AB 的有效长度为 $l_{AB}+C_1$，杆 BC 的有效长度为 $l_{BC}+C_2+C_3$。当驱动器向下运动时，杆 AB 的有效长度为 $l_{AB}-C_1$，杆 BC 的有效长度为 $l_{BC}-C_2-C_3$。利用极限法将杆件的有效长度代入式(1)～(5)计算得扭摆运动的回程差不大于 44″。



(a)俯仰调节　(b)扭摆调节向上运动　(c)扭摆调节向下运动

(a)Pitch adjustment　(b) Up motion on azimuth direction　(c)Down motion on azimuth direction

图 5　机构反向运动分析

Fig. 5　Back motion analysis of mechanism

3　实验对比分析与讨论

为了验证上述理论分析的正确性，对加工完成的哈特曼探测器调节机构进行受力测试和调节精度测试。由上述分析可知，驱动器在俯仰调节方向的受力远大于扭摆方向上的受力，实验中使用测力计测量了俯仰调节方向上驱动器的受力情况，如图 6 所示，通过测力计代替驱动器推动机构俯仰调节方向的运动。经测量得，驱动器最大受力约为 65 N，与理论计算(62 N)基本相符，并且在驱动器许用力范围(120 N)内。

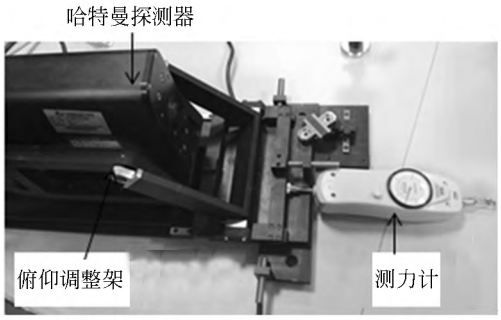
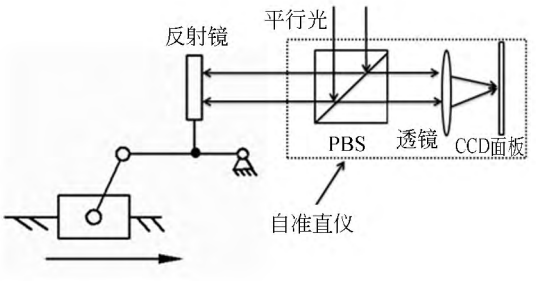


图 6　驱动器受力测量

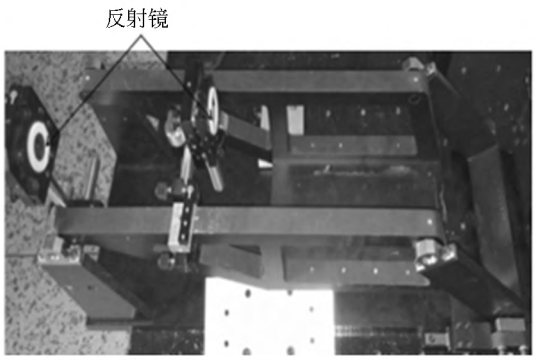
Fig. 6　Force measure ment of actuator

由式(7)可知，当驱动器的移动量 X 很小时，可认为哈特曼探测器的转角 φ 是线性响应的。通过驱动器的微小步距移动，测量哈特曼探测器调节机构转角曲线的线性度，将曲线线性度好时的步距转角定义为机构的调节精度。一般可通过判定系数 R^2 来判定一个线性回归直线拟合的好坏[15]。判定系数体现的是自变量引起因变量的百分比，如当 $R^2=0.8$ 时，表示因变量 y 的变异中有 80%是由自变量 x 引起的。通常，当拟合直线的判定系数 R_2 达到 0.99 时可认为自变量与因变量完全线性相关。实验中使用高精度数字自准直仪测量机构的小角度偏转，其测量原理图如图 7(a)所示，光源发出的平行光经过自准直仪中的偏振分光棱镜(PBS)，将光打到与被测结构固接的反射镜上。经反射镜反射的光经过 PBS 透射、透镜汇聚在 CCD 面板上，记录调节机构转动前后光点在 CCD 面板中的相对位置即可得出结构的转角，其测量精度为 0.01″。为了减小环境的时序变化对测量结果的影响，在运动构件和静止构件上各固定了 1 块反射镜，以静止构件为相对参考点测量运动构件的转角精度，其测量实物图如图 7(b)所示。但实验发现，同一时刻的环境扰动对处于不同位置的 2 块反射镜影响不同，导致了测量结果在一定的范围内波动。实验中采取了多次测量求平均值的方法来进一步降低环境扰动对测量结果的影响。



(a) **自准直仪测量原理**

(a) Measuring principle of autocollimator



(b) **参考目标的使用**

(b) Applying of reference object

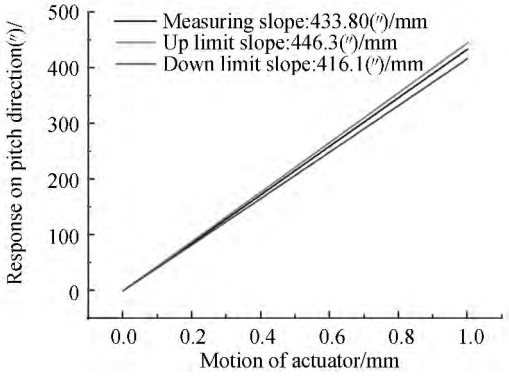
图 7　自准直仪测量机构转角

Fig. 7　Angle measurement of mechanism using autocollimator

通过对实验数据的处理和分析，得出哈特曼探测器在俯仰和扭摆调节方向上角度调节量的响应曲线，如图 8(a)～(f)所示。图 8(a)、(b)中的黑线分别为驱动器每步行走 0.1 mm 时调节机构在俯仰和扭摆方向上的转角响应曲线。由于杆件误差的存在，转角响应曲线的拟合斜率可在一定范围内波动，图中红、蓝线围成的区域即为转角响应曲线斜率允许的波动范围。哈特曼探测器在俯仰和扭摆调节方向上转角响应曲线的斜率分别为 433.8(″)/mm 和 431.6(″)/mm，曲线斜率均落在了波动范围内，故杆件长度误差在允许范围内。由于整个运动过程基本为线性响应的，结合驱动

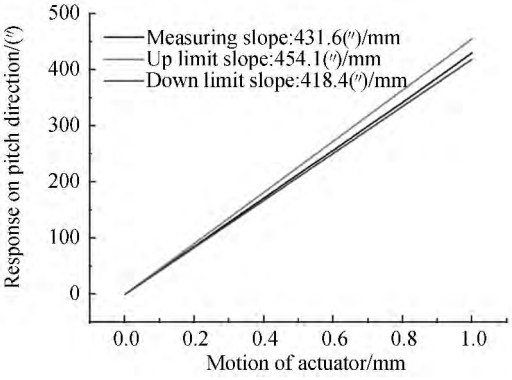
器的运动量得调节机构在俯仰和扭摆方向上的角度调节范围均约为±1.2°，均满足角度调节±1°的设计要求。

图 8(c)所示为在俯仰调节方向上驱动器每步行走 1 μm 时调节机构的转角响应曲线，曲线拟合的判定系数R^2达到了0.999 56，曲线的线



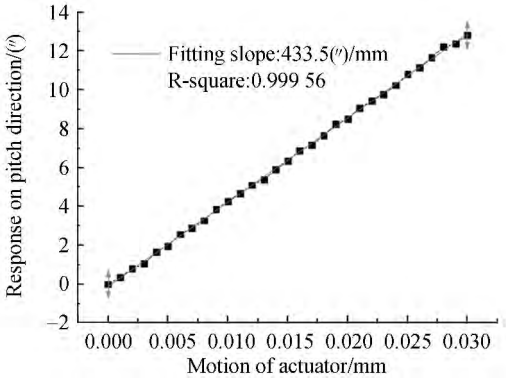
(a)俯仰调节角度调节量测试

(a) Slope measure ment of pitch adjustment



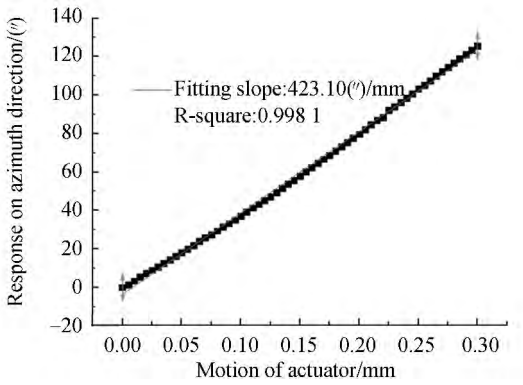
(b) 扭摆调节角度调节量测试

(b) Slope measure ment of azimuth adjustment



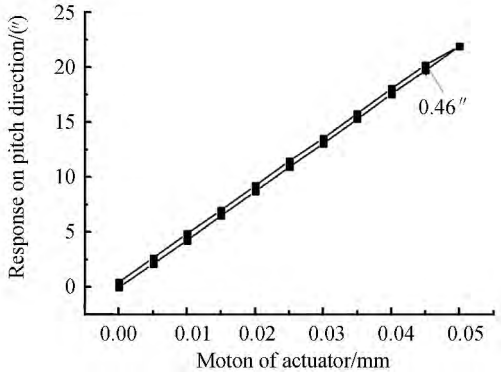
(c) 俯仰调节单向运动精度测试

(c) Moving accuracy measure ment of pitch adjustment



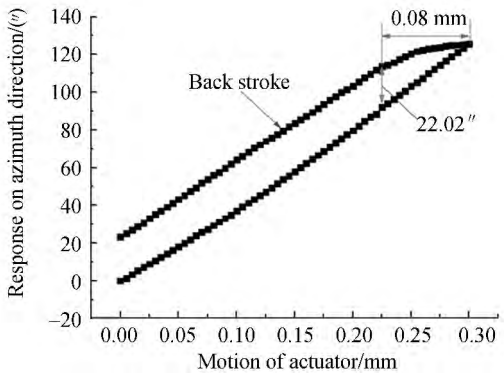
(d) 扭摆调节单向运动精度测试

(d) Moving accuracy measurement of azimuth adjustment



(e) 俯仰调节回程运动分析

(e) Back stroke analysis of pitch adjustment



(f) 扭摆调节回程运动分析

(f) Back stroke analysis of azimuth adjustment

图 8　哈特曼探测器调节机构转角响应曲线分析

Fig. 8　Curve analysis of adjustable mechanism for Hartmann sensor

性度较好，且拟合斜率与上述分析的大步距行走时的斜率相当，说明曲线响应到位。此时驱动器每步行走量对应的调节机构转角为 0.43″，即调节机构在俯仰方向上的调节精度为 0.43″。图 8

(d)所示为在扭摆调节方向上驱动器每步行走 5 μm 时调节机构的转角响应曲线，曲线拟合的判定系数 R^2 达到了 0.998 1，曲线的线性度较好。同理可得出调节机构在扭摆方向上的单向调节精度为 2.1″。图 8(e)为调节机构在俯仰调节方向上的回程测试曲线，回程差很小，仅为 0.46″，与理论分析的基本一致。图 8(f)为调节机构在扭摆调节方向上的回程测试曲线，回程差为22.02″，小于理论分析的极限回程差 44″，说明各铰链处的轴承运行良好，且轴承的径向游隙在公差范围内。从图 8(f)中可以看出，驱动器在反向运动时存在约 0.08 mm 的过渡区，该段响应曲线较为复杂。为更好的根据角度调节量预判驱动器的运动量，扭摆调节方向上的驱动器在进行反向运动时，应同向运动约 0.1 mm，再进行反向运动。

4　结论与讨论

本文针对 2 m 自适应光学系统中哈特曼探测器高精度、强稳定性的要求，运用曲柄滑块机构运动学原理设计了哈特曼探测器调节机构，以高精度驱动器为主动件完成整个机构的运行。根据哈特曼探测器的外形结构和调节机构的整体布局，选择了调节机构中的主要参数，并分析了调节机构的动态特性。经分析计算得驱动器所需的运动为－8.7～7.7 mm，运动精度为 13 μm。受力大小约为 62 N，由此选择了一款运动范围为±10 mm，单向运动精度为 0.1 μm，双向运动精度为 1 μm，许用力为 120 N 的驱动器。实验中使用了测力计测量出驱动器在整个运行过程中最大受力，约为 65 N，结果与理论计算基本一致。利用自准直仪设计了调节机构的检测系统。通过实际测量得调节机构在俯仰和扭摆调节方向上的角度调节量均约为±1.2°，调节精度分别为 0.43″和 2.1″，均满足设计要求。俯仰调节在驱动器反向运动时回程差大小为 0.46″，主要是由于驱动器反向运动精度造成的；扭摆调节在驱动器反向运动时回程差为 22.01″，小于理论分析的极限回程差 44″，说明轴承的径向游隙在公差范围内。扭摆调节在驱动器反向运动时存在着约 0.08 mm 的非线性响应过渡区，为了能根据角度调节量更好地预判驱动器的运动量，在驱动器需反向运动时，应先同向运动 0.1 mm，再进行反向运动。这样，角度调节量基本和驱动器的运动量成正比。本文设计的哈特曼探测器在俯仰和扭摆方向的二维角度调节机构，为哈特曼探测器的高精度探测奠定了基础。

参考文献：

[1] 姜文汉. 自适应光学技术 [J]. 自然杂志，2006，28(1)：7-13.
JIANG W H. Adaptive optics technology [J]. *Chinese Journal of Nature*，2006，28(1)：7-13. (in Chinese)

[2] 陈浩，宣丽，胡立发，等. 1 200 mm 望远镜开环液晶自适应光学系统设计 [J]. 光学 精密工程，2010，18(1)：30-36.
CHEN H，XUAN L，HU L F，*et al*.. Design of open-loop liquid crystal adaptive optical system for 1200 mm telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*，2010，18(1)：30-36. (in chinese)

[3] 夏明亮，李抄，刘肇男，等. Shack-Hartmann 波前传感器自适应阈值的选取 [J]. 光学 精密工程，2010，18(2)：334-340.
XIA M L，LI CH，LIU ZH N，*et al*.. Adaptive threshold selection method for Shac-Hartmann wavefront sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*，2010，18(2)：334-340. (in Chinese)

[4] 凌宁，张雨冬，饶学军. 用于活体人眼视网膜观察的自适应光学成像系统 [J]. 光学学报，2004，24(9)：1153-1158.
LIN N，ZHANG Y D，RAO X J. A small adaptive optical imaging system for cells of Living Human Retina [J]. *Acta Optics Sinica*，2004，24(9)：1153-1158. (in chinese)

[5] 穆全全. 液晶自适应光学技术的工程化研究 [D]. 北京：中科院博士论文，2011.
MU Q Q. *Engineering research of the Liquid Crystal Adaptive Optics Technology* [D]. Beijing：University of the Chinese Academy of Sciences，2011. (in chinese)

[6] 马晓燠，郑翰清，饶长辉. 自适应系统中哈特曼波前传感器光斑质心的最佳标定位置 [J]. 光电工程，2009，26(4)：22-26.
MA X Y，ZHENG H Q，RAO CH H. Optimal spot centroid position during Shack-Hartmann wavefront sensor calibration in adaptive optics system [J]. *Opto-Electronic Engineering*，2009，26(4)：22-26. (in chinese)

[7] 吴军勇，孙蕊. 大口径多维调整反射镜架的设计及精度分析 [J]. 激光与红外，2011，41(9)：1010-1013.
WU J Y，SUN R. Design and accuracy analysis for a large diameter multidimensional reflected mirror rim [J]. *Laser & Infrared*，2011，41(9)：1010-1013. (in Chinese)

[8] 郭建增，刘铁根，池伟，等. 大口径精密光学调整架的优化设计 [J]. 强激光与粒子束，2013，25(2)：301-304.
GUO J Z，LIU T G，SHI W，*et al*.. Optimal design of great diameter fine Optical adjustable mount [J]. *High Power Laser and Paticle Beam*，2013，25(2)：301-304. (in Chinese)

[9] 于建，陈利，赵玉强. 精密光学调整架的自动控制 [J]. 光电子激光，2000，11(4)：437-438.
YU J，CHEN L，ZHAO Y Q. Auticontrols of precision optical adjustable mounts [J]. *Journal of Optoelectronics & Laser*，2000，11(4)：437-438. (in Chinese)

[10] 郭抗，巩岩. 6_PSS 型光学元件精密轴向调节机构 [J]. 光学 精密工程，2013，21(10)：2649-2655.
GUO K，GONG Y. Precise axial adjustment mechanism with 6-PSS type of optical elements [J]. *Opt. Precision Eng.*，2013，21(10)：2649-2655. (in Chinese)

[11] 蒋庄德，苑国英. 精密机械设计 [M]. 西安：西安交通大学出版社，2000.
JIANG ZH D，YUAN G Y. *Mechanical Precision Design* [M]. Xi'an：Xi'an Traffic University，2000. (in chinese)

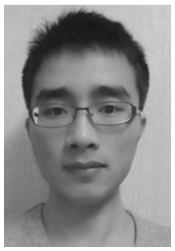
[12] 申永胜. 机械原理教程(第 2 版) [M]. 北京：清华大学出版社，2005.
SHEN Y SH. *Theory of Mechines and Mechanisms*(*Second Edition*) [M]. Beijing：Tsinghua University Press，2005. (in chinese)

[13] 陈勇. 大口径精密光学调整架的机械设计与计算 [J]. 机械设计与研究，2005，34(2)：23-25.
CHEN Y. Machine dedign and calculation of optical precision mount with large-aperture [J]. *Machine Building & Auto mation*，2005，34(2)：23-25. (in chinese)

[14] 罗勇. 多维精密光学调整架坐标解耦合分析 [J]. 光电工程，2011，38(4)：37-40.
LUO Y. Coordinates-decoupling of multidimensional precision optical adjusting frame [J]. *Opto-Electronic Engineering*，2011，38(4)：37-40. (in Chinese)

[15] http://www.docin.com/p-688479295.html

作者简介：



李文杰(1988－)，男，广西桂林人，博士研究生，主要从事液晶自适应光学系统中光机结构的设计。E-mail：li-wenjie@163.com

导师简介：



宣　丽(1957－)，女，江苏常州人，博士，研究员，博士生导师，1983 年于吉林大学获学士学位，1986 年于中国科学院长春物理研究所获硕士学位，1998 年于日本东北大学获工学博士学位，1999 年入选中国科学院/百人计划，主要从事液晶自适应光学、液晶光学器件及液晶高分子化学等方面的研究。E-mail：xuanli@ciomp.ac.cn

(版权所有　未经许可　不得转载)