文章编号:1001-5078(2016)02-0139-06 ·综述与评论·

基于主动光学的大口径反射镜硬点定位技术

彭 尧[1,2],张景旭[1],杨 飞[1],赵宏超[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 100049)

摘 要:大口径望远镜主镜、副镜等反射镜相对于其镜室的位置和方向靠硬点来保证,它是主动光学系统的关键组成部分,对提高望远镜的成像质量和安全防护性能具有重要的作用。本文全面地概述了大口径反射镜不同类型硬点定位的结构及工作原理,并详细介绍了E-ELT、VLT、VISTA、LSST望远镜中的硬点定位技术,它们是不同类型硬点定位的典型代表。最后,总结了大口径反射镜硬点定位的发展趋势,指出六杆硬点定位最有应用前景,并深入地论述了其结构特点及关键技术,提出了一系列提高其定位精度、轴向刚度及安全可靠性的方法。

关键词:大口径望远镜;反射镜定位;硬点;六杆平台;促动器;主动光学
中图分类号:TH751 **文献标识码**:A **DOI**:10.3969/j.issn.1001-5078.2016.02.003

Hardpoint location technique of large mirror based on active optics

PENG Yao[1,2],ZHANG Jing-xu[1],YANG Fei[1],ZHAO Hong-chao[1]
(1. Changchun Institute of Optics,Fine Mechanics and Physics,Chinese Academy of Sciences,Changchun 130033,China;
2. University of Chinese Academy of Sciences,Beijing 100049,China)

Abstract:Hardpoints determine the position and orientation of the mirrors relative to their mirror cells,and it is key elements of the active optics system and plays a significant role in improving the imaging quality and safety performance of the telescopes. The principles and structures of various kinds of hardpoints are comprehensively summarized, and hardpoint location techniques are introduced in E-ELT,VLT,VISTA and LSST,and they represent a variety of hardpoint location. Finally,the development tendency of the hardpoint location is summarized,and the key structures and technologies of hardpoint location are discussed in detail. Comparing with other types of hardpoint locations,hardpoint location with a hexapod configuration has a wide application prospect. At the same time,a series of solutions to improve the positioning accuracy,axial stiffness and safe reliability are given.

Key words:large telescope;mirror positioning;hardpoint;hexapod;actuator;active optics

1 引 言

望远镜是天文观测的重要工具,其光学系统包括镜面形状和准直状态,因此,必须合理地设计一套支撑和定位系统来保持反射镜的面形及位姿(位置和方位),并将镜室的变形同镜面隔离开来[1-3],由于其中的定位机构具有较高的刚度,国外就形象地称之为“硬点”[4-6]。

望远镜工作过程中,由于重力、风载、温度等因素会导致反射镜的位姿及面形发生改变,从而引入低阶彗差、离焦、场曲和像散,因此现代望远镜采用了主动光学技术来校正光学面形和准直。其中,硬点不仅起到确定反射镜位姿的作用,还将反射镜的力或力矩载荷反馈给主动光学系统,进而指导支撑和定位系统的调整,以取得更优的成像质量。随着

基金项目:国家自然科学基金项目(No.11403022)资助。
作者简介:彭 尧(1990-),男,硕士研究生,研究方向为大型望远镜主镜支撑和定位技术。E-mail:450625145@qq.com
收稿日期:2015-06-02;**修订日期**:2015-06-28

望远镜朝着大口径、轻量化、高分辨率的方向发展，反射镜的定位精度、负载监测及安全防护等要求对硬点定位机构提出了巨大的挑战[7]。

为此，本文全面深入地分析总结了望远镜硬点定位的研究和应用成果，期望为大型望远镜的研制提供参考。

2 硬点定位原理及分类

反射镜有 6 个自由度（沿 3 个正交坐标轴的平动 TX、TY、TZ 和绕着这 3 个坐标轴的转动 RX、RY、RZ），其约束定位遵循运动学原理，可分为轴向和侧向硬点定位及六杆硬点定位[8-9]。

2.1 轴向和侧向硬点定位

2.1.1 轴向硬点定位

轴向一般使用 120°均布的 3 个硬点确定反射镜的 3 个自由度 TZ、RX、RY，但不同的支撑系统对应的硬点形式不同。如图 1 所示，杠杆平衡重在平衡反射镜重力的同时，有效地把镜室的变形隔离开来，但不能确定反射镜的位姿，需另外设置 3 个硬点定位反射镜。这同样适用于 WHT、VST、VISTA、SAOR 等采用的独立力促动器支撑[10-11]。

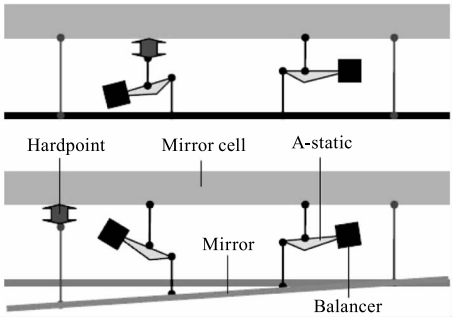


图 1 杠杆平衡重支撑中的硬点定位原理

Fig. 1 Interpretation of hardpoints for a-static lever systems

对于 SOFIA、E-ELT 等采用的由三点定位支撑原理发展而来机械 whiffletree 支撑（图 2），反射镜由轴向均布的三点，通过杠杆、两脚架或三角摇板成比例地扩展支撑点完成定位支撑。

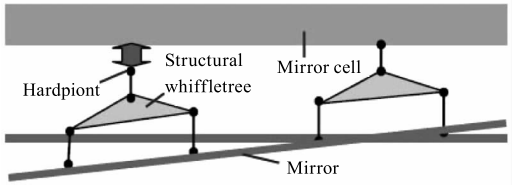


图 2 机械 whiffletree 支撑中的硬点定位原理

Fig. 2 Interpretation of hardpoints for structural whiffletree supports

对于 NTT、TNG、AEOS、VLT、WIYNT、Gemini 等采用的液压 whiffletree 支撑，其原理与机械 whiffletree 类似，支撑点分为 120°对称的 3 个扇形区，区域内液体相互连通，支撑点的位置和支撑力的大小可以确定 1 个虚拟硬点。当每个支撑点的支撑力都相同时，虚拟硬点就位于扇形区液体的形心[12-13]。气压 whiffletree 原理与液压 whiffletree 相同，但必须考虑气体具有可压缩性的问题。

2.1.2 侧向硬点定位

侧向硬点确定反射镜其余的 3 个自由度，定位点一般选在反射镜的外侧或内孔附近[14-16]。独立力促动器、杠杆平衡重、气压 whiffletree 及切向侧支撑中，为了释放反射镜的热应力，使用 3 组柔性杆切向 120°等间隔安装在反射镜外侧进行定位（以 SOAR、VST、VISTA 等为代表）。whiffletree 侧支撑中的硬点与其轴向类似，这里不再赘述。A-Frame 侧支撑与机械 whiffletree 类似，由 3 个硬点扩展成 6 个支撑点完成定位支撑[17]。对于不涉及硬点的侧向定位，本文不做论述，具体可参考相关文献。

2.2 六杆硬点定位

六杆硬点定位由六杆平台发展而来，目前使用六杆硬点定位的望远镜有 MMT、LBT、LSST 和 GMT[18-20]。

3 硬点定位在大型望远镜中的应用及其发展趋势

3.1 E-ELT 副镜硬点定位技术

E-ELT 是欧洲南方天文台正在研制的 39 m 望远镜，其副镜为薄弯月形凸面镜，直径为 4.25 m，厚度为 100 mm，轴向采用 18 点机械 whiffletree 定位支撑，使用 warping harness 校正镜面低阶变形，侧向使用 16 点气压 whiffletree 被动支撑[21-22]。

如图 3 所示，轴向 3 个硬点，通过两脚架及三角摇板扩展成 18 点 whiffletree，再通过力扩展器连接到副镜背面完成定位支撑。

侧向由 3 组柔性杆定位，其结构与 VISTA 主镜侧向硬点相同。

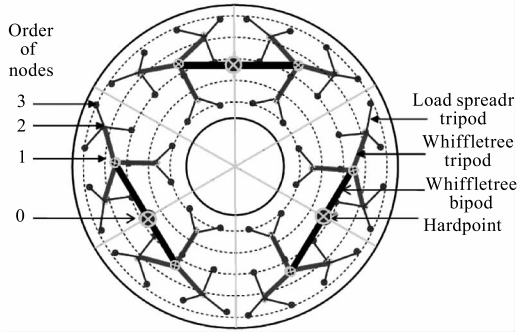


图 3 E-ELT 副镜轴向定位支撑原理

Fig. 3 Interpretation of the E-ELT M2 axial supporting and positioning system

3.2 VLT 主镜硬点定位技术

VLT 由 4 台望远镜组成,每个主镜均为 8.2 m 口径的薄弯月形镜,厚度为 175 mm,其轴向 150 个支撑点分成 3 个扇形区,形成 3 个虚拟硬点;侧向 64 个支撑点分成左右对称的 2 个区域,形成 2 个虚拟硬点[23],如图 4 所示。

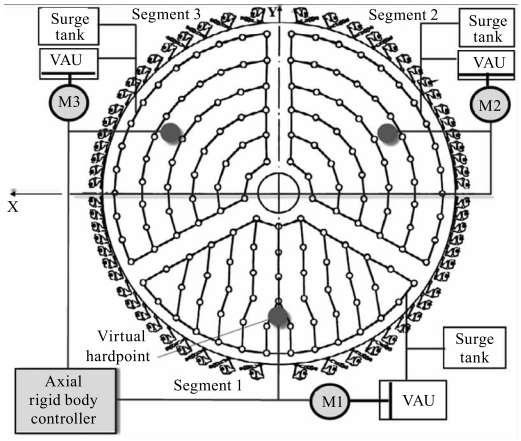


图 4 VLT 主镜支撑和定位系统

Fig. 4 VLT M1 supporting and positioning system

主镜定位系统包括 3 个子系统:促动器系统、位姿编码系统和软件系统。促动器系统包括 5 个体积调节单元(VAU),控制主镜的 TZ、RX、RY、TY(RZ 可以控制,但对成像无影响,未能控制的 TX 由侧向 16 个支撑点连接到 1 个液压回路约束)。位姿编码系统包括 6 组位移传感器(LVDT),其一端安装在镜室,一端安装在主镜背面。软件系统根据 6 组 LVDT 的延伸率进行位移解算,计算出主镜的位姿,并推算出 5 个虚拟硬点的调节量,然后控制体积单元调节进行调节,直到位姿误差小于设定的误差值。

3.3 VISTA 主镜硬点定位技术

VISTA 是 VLT 的可见光与红外线勘测望远镜,其主镜为薄弯月形镜,直径为 4.1 m,厚度为 170 mm,轴向由布置在 4 个同心圆上 81 个独立的气压力促动器和 3 个硬点(位移促动器)支撑和定位,侧向由 4 组共 24 个气压力促动器支撑,3 个硬点(柔性杆)定位[24],如图 5 所示。

轴向硬点包括 4 个主要部分,如图 6 所示:柔性铰链,侧向解耦;力过载保护装置;测力传感器;高度调节装置,调节硬点的长度,从而调整主镜的位姿。支撑系统根据 3 个硬点的支撑力调节 81 个力促动器,使 84 个点的支撑力相同。

侧向硬点结构与轴向硬点相似,如图 7 所示。支撑系统根据 3 个硬点的支撑力,调节侧向力促动器的气压,使 3 个硬点的合力接近于零。

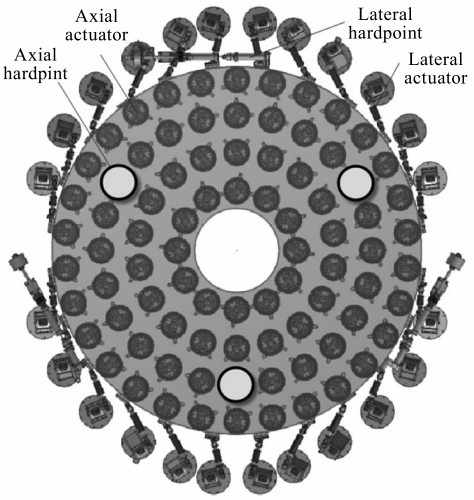


图 5 VISTA 主镜轴向和侧向支撑和定位系统

Fig. 5 Schematic of the VISTA M1 axial and lateral supporting and positioning systems

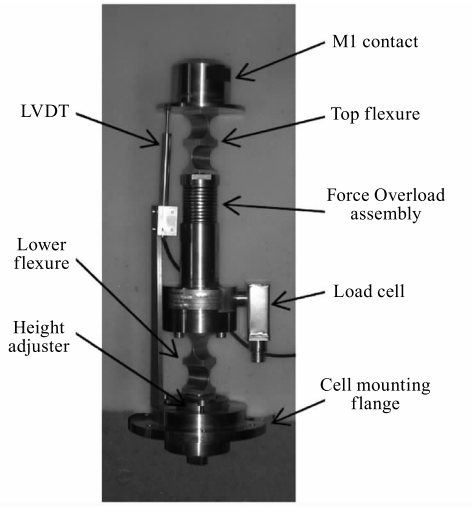


图 6 VISTA 主镜轴向硬点结构

Fig. 6 VISTA M1 Axial hardpoint

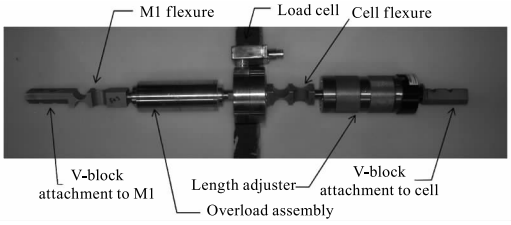


图 7 VISTA 主镜侧向硬点结构

Fig. 7 VISTA M1 Lateral hardpoint

3.4 LSST 主镜/三镜硬点定位技术

LSST 是美国国家光学天文台倡导研制的大型综合巡天望远镜,其主镜和三镜共用一个 8.4 m 口

径的蜂窝镜坯,采用六杆硬点约束定位其 6 个自由度,并使用激光跟踪仪装调和检测,如图 8 所示。镜坯和镜室与硬点的连接点在设计望远镜时就被优化好了,与镜坯连接点的半径约为其半径的 0.7,具体位置由蜂窝结构的几何形状和其他因素决定。

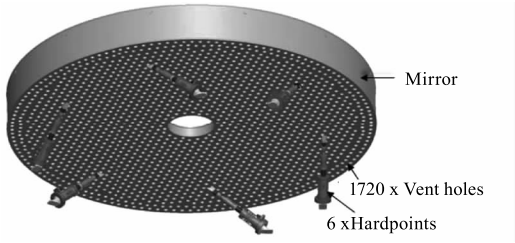


图 8 LSST 主镜/三镜六杆硬点定位

Fig. 8 The LSST M1/M3 is located by hardpoints configured into a hexapod

此外,六杆硬点还用于反馈主镜/三镜的力或力矩载荷,通过调整支撑系统,使每个硬点的支撑力接近于零,从而使施加到镜面 6 个自由度的力或力矩最小,也就释放了风载、系统的惯性力、力促动器输出误差等施加到主镜/三镜的应力,大大提高了系统的成像质量[25-27]。

3.5 硬点定位发展趋势

传统望远镜准直状态改变时,一般通过副镜调整机构进行准直,但是这带来了很多限制,尤其是主焦点设备和多面镜望远镜系统,要求能对反射镜除绕着光轴的转动 RZ 外的 5 个自由度进行调整。另一方面,由于蜂窝镜面、多镜面望远镜和独立力促动器支撑(需设置硬点定位反射镜)的巨大优势,以及六杆硬点能取得更高的刚度和定位精度、能更有效地抵抗和反馈扰动,六杆硬点机构必将在新一代大望远镜中取得广泛的应用。

4 六杆硬点的结构特点及关键技术

4.1 结构特点

六杆硬点由 6 个硬点连接反射镜和镜室,组成一个六杆平台,每个硬点包括 5 大主要组件,如图 9 所示:①基座,用于连接硬点与镜室,其刚度对系统刚度有很大的影响;②位移促动器,输出直线位移,控制硬点的长度,要求具有较高的刚度和定位精度及较大的承载能力,通常由步进电机、行星滚柱丝杆、角接触推力轴承、位移传感器、直线导轨、旋转编码器等组成;③轴向分离装置/上柔性铰链/测力传感器/转矩限制器组件,测力传感器用于反馈硬点的支撑力,分离装置用于过载保护;④加长臂/平衡重安装法兰/下柔性铰链组件,用于连接位移促动器和轴向分离装置。其中,下柔性铰链、上柔性铰链和转矩限制器用来限制硬点除轴向外 5 个自由度的力或力矩、提高测力传感器的测量精度及硬点定位精度。加长臂用于增加上、下柔性铰链间的距离,以使柔性铰链可设计较高的轴向刚度,故应具有极高的刚度和强度及较低的质量。⑤平衡重,用来平衡硬点下柔性铰链以上部分的质量,以免其悬吊在反射镜背面,产生极大的应力[28]。

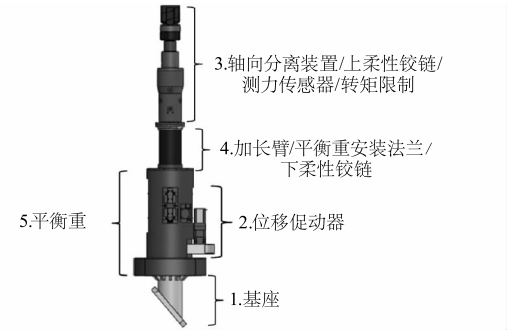


图 9 硬点五大主要组件

Fig. 9 Five main subassemblies of the hardpoint

4.2 关键技术

由上文论述可知,六杆硬点的定位精度、轴向刚度和安全可靠性(包括运动平滑、重复性能高和响应快,等)是决定反射镜的面形精度和安全防护性能及系统成像质量最为关键的 3 个技术指标,下面分别对其进行讨论[29-30]。

4.2.1 安全可靠性

提高安全可靠性的方法有:多应用数字元件以降低温度的影响;细分电机驱动器以减小振动和提高定位精度以实现运动平滑;硬点的布置应允许六杆并联实现反射镜轨迹规划以减小惯性力;扭矩限制器设计为柔性结构以消除摩擦力矩;柔性铰链及平衡重的设计应避免带来低频振动,干涉主动支撑系统;引入柔性铰链失效安全防护;根据环境温度选择性能稳定的润滑剂;为实现瞬间分离,提高分离力重复性,应使用气压式分离装置,并使用位移传感器监测分离装置是否分离及验证其刚度。

4.2.2 定位精度

定位误差主要来源于六杆硬点的定位误差和单个硬点的误差(间隙、漂移、迟滞等),减小误差的方法有:满足其他要求的同时,优化六杆硬点的布局,合理进行误差分配,以减小单个硬点误差的影响;通过预紧等方法消除促动器的间隙;采用双反馈方式,

电机后面安装旋转编码器,提供位移值的执行情况,并使用位移传感器直接反馈促动器的位移值以减小测量误差;对位移促动器进行径向支撑,避免硬点上半部分悬挂在促动器上,并使用双位移传感器取平均值,以消除倾斜及摇动带来的误差;通过负载循环和磨合等方法消除残余应力,以减小迟滞;选择高刚度和高精度的测力传感器,合理设计电子线路及软件补偿以提高重复定位精度。

4.2.3 轴向刚度

硬点的轴向刚度由各个组件的刚度决定,满足下式:

$$1/K_{Hardpoint} = 1/K_1 + 1/K_2 + 1/K_3 + 1/K_4 + 1/K_5$$

其中,分离装置的设计对硬点轴向刚度的影响最大,提高轴向刚度的方法有:增加气压缸的气压;提高分离装置活塞接触垫的加工精度,以避免污染影响刚度;轴向分离装置和测力传感器应布置在靠近镜面的一端,以减小重力的影响,减少不需要的分离而降低硬点的刚度。

5 总 结

随着大口径反射镜的定位精度及安全防护等要求越来越高,硬点定位已成为大型望远镜研究的热点和难点之一。本文全面地概述了不同类型硬点定位的结构和工作原理,详细地介绍了一些大型望远镜中极具代表性的硬点定位技术,并深入地论述了最有应用前景的六杆硬点定位的结构特点和关键技术,提出了一系列提高其定位精度、轴向刚度及安全可靠性的方法,对于开展大口径反射镜硬点设计工作具有重要的参考价值和借鉴意义。

参考文献:

[1] ZHANG Jingxu. Overview of structure technologies of large aperture ground-based telescopes[J]. Chinese Optics,2012,5(4):327 - 336. (in Chinese)
张景旭. 地基大口径望远镜系统结构技术综述[J]. 中国光学,2012,5(4):327 - 336.

[2] Hans J Kärcher,et al. Mechanical principles of large mirror supports[J]. SPIE,2010,7733:773320.

[3] SU Dingqiang,CUI Xiangqun. Active optics-key technology of the new generation telescopes[J]. Progress in astronomy,1999,17(1):1 - 14. (in Chinese)
苏定强,崔向群. 主动光学—新一代大望远镜的关键技术[J]. 天文学进展,1999,17(1):1 - 14.

[4] Douglas Neill,et al. Overview of the LSST active optics system[J]. SPIE,2014,9150:91500G.

[5] Joe DeVries,et al. LSST telescope primary/tertiary mirror hardpoints[J]. SPIE,2010,7739:77391J.

[6] FAN Lei,et al. Hardpoints defining structure for large aperture primary mirror[J]. Infrared and laser Engineering,2012,41(12):3367 - 3371. (in Chinese)
范磊,等. 大口径反射镜轴向硬点定位[J]. 红外与激光工程,2012,41(12):3367 - 3371.

[7] Attila jasko,et al. Fly's Eye camera system:optical imaging using a hexapod platform [J]. SPIE, 2014, 9145:91453S.

[8] Paul R Yoder Jr. Opto-mechanical system design,3rd edition[M]. Florida:CRC Press LLC,2006.

[9] CHENG Jingquan. Astronomical telescope principle and design[M]. Beijing:China Science and Technology Publishing,2003. (in Chinese)
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.

[10] Pietro Schipani,et al. The active optics system of the VST: concepts and results [J]. SPIE, 2012, 8444:84444Z.

[11] Pietro Schipani,et al. The VST active primary mirror support system[J]. SPIE,2010,7739:773931.

[12] FAN Lei,et al. Axial support for large aperture primary mirror based on hydraulic Whiffle - tree[J]. Infrared and laser Engineering,2013,08:2126 - 2131. (in Chinese)
范磊,等. 采用液压 Whiffle-tree 的大口径主镜轴向支撑[J]. 红外与激光工程,2013,08:2126 - 2131.

[13] WU Xiaoxia,et al. Active support system for 4m SiC lightweight primary mirror[J]. Optics and Precision Engineering,2014,09:2451 - 2457. (in Chinese)
吴小霞,等. 4m SiC 轻量化主镜的主动支撑系统[J]. 光学 精密工程,2014,09:2451 - 2457.

[14] WU xiaoxia. Design research on tangent lateral support of thin meniscus mirror[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2011,01:53 - 56. (in Chinese)
吴小霞. 弯月薄镜的切向侧支撑设计研究[J]. 长春理工大学学报:自然科学版,2011,01:53 - 56.

[15] Douglas R Neill, et al. Active tangent link system for transverse support of large thin meniscus mirrors [J]. SPIE,2007,6665:66650F.

[16] HAN Linchu,et al. Summarization of lateral flexure support in large telescope[J]. Laser & Infrared,2014,44

(12):1306 – 1311. (in Chinese)
韩琳楚,等. 柔性侧支撑在大型望远镜中的应用综述[J]. 激光与红外,2014,44(12):1306 – 1311.

[17] WANG Fuguo, et al. Review of foreign ground-based telescope primary mirror support[J]. Laser & Infrared, 2012, 42(3):237 – 243. (in Chinese)
王富国,等. 国外大型地基望远镜主镜支撑综述[J]. 激光与红外,2012,42(3):237 – 243.

[18] David S Ashby, et al. The large binocular telescope primary mirror support control system description and current performance results[J]. SPIE, 2008, 7018:70184C.

[19] Charlie Hull, et al. Giant magellan telescope primary mirror cells[J]. SPIE, 2010, 7733:773327.

[20] Luciano Miglietta, Shawn P. Callahan. Position actuators of the 6.5 – m borosilicate honeycomb primary mirrors[J]. SPIE, 1996, 2865:28 – 39.

[21] Michael Mueller, et al. The secondary mirror concept for the european extremely Large Telescope[J]. SPIE, 2014, 9145:91451I.

[22] M Cayrel. E-ELT optomechanics: overview[J]. SPIE, 2012, 8444:84441X.

[23] Thierry Hovsepian, et al. Design and tests of the VLT M1 mirror passive and active supporting system[J]. SPIE, 1998, 3352:424 – 435.

[24] Brian Stobie, et al. VISTA M1 support system[J]. SPIE, 2010, 7733:77332P.

[25] Victor L Krabbendam. The large synoptic survey telescope concept design overview[J]. SPIE, 2008, 7012:701205.

[26] Douglas Neill, Edward Hileman. LSST telescope primary/tertiary mirror cell assembly [J]. SPIE, 2010, 7733:77332Q.

[27] Edward Hileman, et al. Fast force actuators for LSST primary/tertiary mirror[J]. SPIE, 2010, 7739:773936.

[28] Robert L Meeks, et al. Super hardpoints for the large binocular telescope[J]. SPIE, 2010, 7733:77335H.

[29] Joseph H Beno, et al. An alternative architecture and control strategy for hexapod positioning systems to simplify structural design and improve accuracy[J]. SPIE, 2010, 7733:77332S.

[30] Ryan C Sneed, Paul J Keas. Error reduction and modeling for hexapod positioners of secondary mirrors for large ground-based telescopes[J]. SPIE, 2014, 9150:915020.