

文章编号 1004-924X(2026)17-2656-14

大口径光学望远镜镜盖类型综述

韩 硕^{1,2,3}, 姜 翔^{1,2*}, 喻进知^{1,2}, 顾伯忠^{1,2}, 徐 进^{1,2}

- (1. 中国科学院 南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042;
2. 中国科学院天文光学技术重点实验室(南京天文光学技术研究所), 江苏 南京 210042;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 镜盖是大型天文望远镜主镜防护的关键装置, 其设计直接影响主镜膜层寿命、望远镜可用性和维护成本。本文系统综述了国内外大型望远镜镜盖的主要结构类型, 将其归纳为幕帘式、百叶式、盖板式(含转开双门式和花瓣式)以及特殊构型四大类, 阐述了各类型的结构原理、应用案例和优缺点。在此基础上, 从结构材料、驱动控制、风载力学和密封防护四个方面提炼了镜盖设计的共性关键技术, 并对不同类型镜盖的综合性能进行了对比分析。最后, 总结了当前镜盖设计面临的主要挑战, 展望了轻量化复合材料、智能化控制及空间可展机构等方向的未来发展趋势。本文可为大口径望远镜镜盖的方案选型和工程设计提供参考。

关键词: 望远镜镜盖; 主镜防护; 幕帘式镜盖; 百叶式镜盖; 盖板式镜盖; 空间望远镜

中图分类号: TH751 **文献标识码:** A

doi: 10. 3724/OPE. 20263417. 2656 **CSTR:** 32169. 14. OPE. 20263417. 2656

Review of mirror cover types for large-aperture optical telescopes

HAN Shuo^{1,2,3}, JIANG Xiang^{1,2*}, YU Jinzhi^{1,2}, GU Bozhong^{1,2}, XU Jin^{1,2}

- (1. *Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China;*
2. *CAS Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Nanjing 210042, China;*
3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*
** Corresponding author, E-mail: jiang.x@niaot.ac.cn*

Abstract: Mirror covers are essential protective devices for the primary mirrors of large astronomical telescopes. Their design directly affects the service life of primary-mirror coatings, telescope availability, and maintenance costs. In this study, the principal structural configurations of mirror covers used in large telescopes worldwide are systematically reviewed and classified into four categories: curtain-type, louver-type, panel-type-including swing-open double-door and petal configurations-and special configurations. The structural principles, representative applications, advantages, and limitations of each category are examined. Based on this classification, the key technologies common to mirror-cover design are summarized from four perspectives: structural materials, drive and control systems, wind-load mechanics, and sealing

收稿日期: 2026-05-26; 修订日期: 2026-07-01.

基金项目: 国家自然科学基金重大科研仪器研制项目(No. 12127901); 国家自然科学基金专项项目(No. 12541301)

protection. A comparative assessment of the overall performance of different mirror-cover configurations is also presented. Current challenges in mirror-cover design are identified, and future development trends are discussed, with particular emphasis on lightweight composite materials, intelligent control systems, and deployable space mechanisms. This review provides a systematic reference for configuration selection and engineering design of mirror covers for large-aperture telescopes.

Key words: telescope mirror cover; primary mirror protection; curtain-type mirror cover; louver-type mirror cover; panel-type mirror cover; space telescope

1 引 言

随着天文学的不断发展,对大口径望远镜的需求日益迫切。大口径望远镜具有更高的观测分辨率和灵敏度,能够捕捉到更为微弱的天体信号。然而,望远镜口径的增大也意味着主镜的制造和维护成本急剧上升——大型望远镜主镜的制造成本通常占据整个望远镜系统的四分之一甚至更高^[1]。望远镜主镜由高精度的光学材料制成,表面镀有高反射率的光学膜层,该膜层极为脆弱,极易受到灰尘、落物撞击以及环境腐蚀的影响。一旦膜层受损,需要将主镜从望远镜上卸下进行重新镀膜,这一过程不仅耗费大量时间和资金,还会导致望远镜长时间停用(通常每18个月至2年需重新镀膜一次),显著增加了望远镜的运维成本和观测损失。

设计良好的镜盖可以在望远镜非工作状态下有效阻挡灰尘、雨水和其他污染物的侵入,减少对主镜膜层的损伤;同时在闭合状态下,也能防止维护过程中工具坠落等意外情况对镜面造成的损害。因此,镜盖系统是保障大口径望远镜长期稳定运行、降低运维成本的关键设备之一。

大口径望远镜通常选址于大气条件优良的高原或山地区域,这些地点普遍具有高海拔、强风、大温差等严苛的自然环境特征。望远镜长期暴露在外部环境中,镜盖需经受紫外线、湿度、温度变化等复杂因素的综合考验,这就要求镜盖具备高度的防护性能和恶劣环境适应性。Thomas A. Sebring 等^[1]在关于 Southern Astrophysical Research (SOAR) 望远镜的研究中指出,望远镜的各子系统(包括镜盖)需要严格的测试和调试,以确保在实际运行中的稳定性和可靠性。

望远镜镜盖的设计具有悠久的历史,其结构形式呈现出多样化的特点。然而,镜盖设计

面临多重矛盾:既要保证闭合状态下的密封防护性,又要确保展开状态下不遮挡光路、不引入额外的风载和振动;既要具有足够的结构刚度以抵御强风和落物冲击,又要尽可能轻量化以减轻对望远镜伺服系统的负担。陈宝刚等^[2]针对某米级光学望远镜设计了四门对开花瓣式主镜保护盖,并对国内外大口径望远镜主镜保护盖的结构形式进行了初步归纳。Tarun Bangia 和 Wahab Uddin 在研究印度 Devasthal 3.6 m 光学望远镜时指出,该望远镜的主镜盖在实际应用中面临多种技术问题,简单的设计在应对复杂环境时存在局限性^[3]。杨德华和周超等分别对大型光学望远镜和 1.2 m 望远镜的风载作用进行了分析,揭示了风载对望远镜结构尤其是镜盖系统的显著影响^[4-5]。

目前,国内外虽有若干综述性文章对镜盖设计有所涉及^[2,6],但对镜盖类型的系统分类不够完善,缺乏跨类型的综合对比分析,且对空间望远镜镜盖的关注甚少。本文旨在系统梳理地基和空间领域大口径望远镜镜盖的结构类型和设计方案,提炼共性关键技术,为镜盖设计的进一步发展提供理论基础与技术参考。本文的综述范围涵盖地基光学望远镜和空间望远镜的镜盖系统,检索文献的时间跨度为1990年至2024年,主要来源包括 SPIE 会议论文集、中国光学期刊网、CNKI 数据库以及各天文台站的技术报告。

2 镜盖结构类型分类

目前,国内外大型望远镜镜盖的结构形式主要可分为幕帘式、花瓣式和盖板式三大类,此外还有一些适用于特殊构型望远镜(如拼接镜面、空间望远镜)的设计方案。这几种形式各具特色,其优缺点和适用场景也不尽相同。

2.1 幕帘式镜盖

幕帘式镜盖是一种结构较为简单的防护装置,主要通过柔性材料制成的幕帘覆盖镜面,从而有效阻止灰尘和污染物进入。幕帘式镜盖通常由幕布、卷收机构和驱动电机组成,其核心原理类似于家用卷帘窗——在望远镜非工作状态下展开幕布遮蔽镜面,在工作时将其卷收于镜筒边缘或专用收纳仓内。

周国华等^[7]以LAMOST反射施密特改正镜的新型镜罩设计为案例,介绍了幕帘式镜盖系统。如图1所示,LAMOST的镜罩系统通过桁架末端的4台交流伺服电机实现幕帘的自动卷收与展开。展开时,上下两组幕布将镜面覆盖在一起,幕布的内表面不与镜面接触,能够有效防止灰尘降落到镜面上。幕帘式镜盖结构简单、安全可靠,在实际操作中表现出较高的便利性和稳定性。

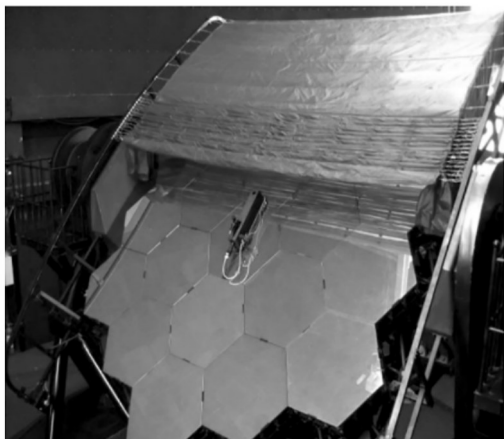


图1 LAMOST幕帘式镜罩工作状态^[7]

Fig. 1 Working state of LAMOST curtain-type mirror cover^[7]

如图2所示,丽江2.4 m望远镜同样采用了幕帘式镜盖设计。与LAMOST方案类似,该镜盖通过卷筒收放幕布,幕布展开时能够很好地覆盖镜面,卷收时幕布可收纳于镜筒边缘的紧凑空间内,既节省空间,也为镜面的维护提供了较好的操作空间。

Tarun Bangia 和 Wahab Uddin 在研究中提到,印度Devasthal 3.6 m光学望远镜也采用了幕布式防护方案^[3]。如图3所示,该望远镜所处台址在季风季节面临强降雨,24小时内降水量可达200 mm。在此期间,需要用幕布覆盖镜面以防



图2 丽江2.4 m望远镜镜盖结构示意图^[7]

Fig. 2 Structural schematic of Lijiang 2.4 m telescope mirror cover^[7]

止任何可能的雨水侵入望远镜内部。该幕布通过固定于镜筒的结构件和压紧装置实现可靠的防水密封。



图3 印度3.6 m望远镜幕帘式镜盖设计^[3]

Fig. 3 Design of the curtain-type mirror cover for Indian 3.6 m telescope^[3]

然而,幕帘式镜盖的局限性也十分明显。首先,幕布材料的防护能力有限——在进行高精度的装调或维护作业时,柔软的幕布无法抵御工具的意外坠落撞击,甚至维修人员的误触也可能对镜面造成损伤。其次,在强风或极端恶劣天气下,幕布的防风效果难以满足要求。此外,幕布长期暴露在强紫外线和温湿度变化的环境中,材料老化和性能退化问题不可忽视。因此,幕帘式镜盖虽然在结构简单、操作便捷等方面具有显著优势,但在防护等级和环境适应性方面存在较大局限,主要适用于对防护要求相对较低的中小型望远镜作为辅助防护手段。

2.2 百叶式镜盖

百叶式镜盖与幕帘式或盖板式镜盖的最大区别在于:在望远镜工作时,该装置通过折叠或旋转的方式将防护叶片收拢于镜面边缘,而非整体移开。百叶式镜盖通常采用具有一定硬度和抗冲击能力的刚性材料(如金属或复合材料)制成叶片,这些叶片的刚性能为镜面提供更为有效的冲击防护。此外,百叶式镜盖在闭合时能够有效防止灰尘落到镜面上,打开时迎风面积较小,

从而降低了对望远镜的风载影响。

在多台 8 m 级及以上的望远镜中, Gemini 望远镜采用了典型的百叶式镜盖设计^[8]。如图 4 和图 5 所示,该望远镜的镜盖为对开式多叶结构,在闭合状态下能够将叶片嵌入镜室边缘的密封槽中,从而实现对镜面的完全密封覆盖。该设计不仅提供了良好的密封性和防护性,而且有效减少了环境因素对望远镜内部的影响。

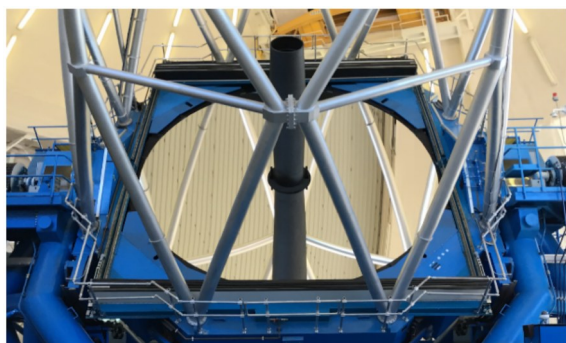


图 4 Gemini 镜盖完全打开时^[8]

Fig. 4 Fully opened state of Gemini mirror cover^[8]

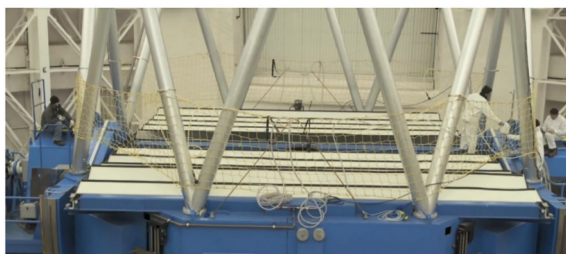


图 5 Gemini 镜盖半开时(镜面未安装)^[8]

Fig. 5 Half-open state of Gemini mirror cover (Primary mirror not installed)^[8]

与幕帘式镜盖相比,百叶式镜盖在打开时同样能够较好地收拢,收起后迎风面积较小,从而显著降低望远镜所受的附加风载。此外,这种镜盖形式能高效利用望远镜内部空间,提高整体的空间利用率。但值得注意的是,百叶式镜盖对镜室的结构形式有特定要求——通常适用于方形镜室框架,对于其他构型的望远镜适配性较差。同时,其传动机构较为复杂,维护操作也更需精细化。

ESO 3.6 m 望远镜采用了另一种百叶式变体——旋转叶片式镜盖。如图 6 所示,该镜盖由一系列弧形金属叶片组成,每片叶片围绕自身转

轴同步旋转。当镜盖闭合时,叶片同时旋转展开,形成快门状闭合圆盘;打开时叶片旋转收拢至镜筒边缘。这种设计具有外观紧凑、附加风载较低的优点,但要求叶片之间高度同步,对控制系统的精度要求较高。



图 6 ESO 3.6 m 望远镜镜盖完全展开时

Fig. 6 Fully deployed state of ESO 3.6 m telescope mirror cover

2.3 盖板式镜盖

盖板式镜盖是一种通过刚性盖板运动实现镜面开闭的防护装置,其结构刚性好、抗落物冲击能力强,是目前大型望远镜镜盖中使用最为广泛的形式。根据盖板的运动方式,盖板式镜盖可进一步分为转开双门式和花瓣式两种。

2.3.1 转动双开门式镜盖

转开双门式镜盖的设计原理源于传统的双开大门结构——由两扇对称布置的刚性盖板组成,通过旋转铰链实现盖板的同步打开和关闭。这种形式的优点在于结构简单、运行直观,在闭合状态下能够提供良好的密封性和防护性,有效隔离外部环境的影响。

Victor M. Blanco 4 m 望远镜(位于智利 Cerro Tololo)采用了典型的转开双门式镜盖设计。如图 7 所示,其镜盖由两扇半圆形盖板与中心圆盘组成,闭合时中间的圆形密封件能够严密嵌入,形成一个封闭空间,对镜面具有良好的保护作用。

如图 8 所示,英国 WIYN 3.5 m 望远镜同样采用了双门式镜盖,每扇盖板由折叠臂驱动开合。然而,由于该望远镜所处环境多风,其设计存在一定弊端——盖板展开时其表面上的灰尘容易落到镜面上,对镜面造成污染。这一案例也反映出镜盖设计对复杂环境适应性的考虑不足。



图 7 Victor M. Blanco 望远镜镜盖打开时

Fig. 7 Open state of Victor M. Blanco telescope mirror cover



图 8 WIYN 镜盖闭合时(左)与打开时(右)

Fig. 8 Closed (left) and open (right) states of WIYN mirror cover

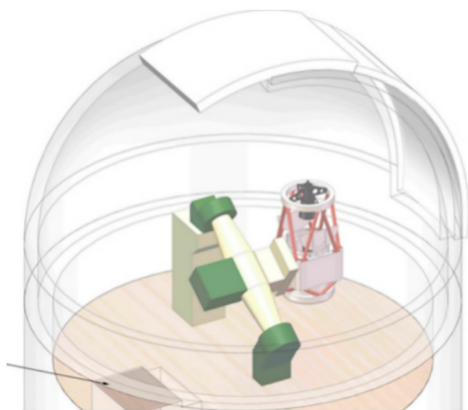
如图 9 所示,国内某 2 m 级望远镜借鉴并发展了此类设计,采用了类似于 WIYN 望远镜的折叠双门式结构——两半盖板在打开后能够再次折叠收拢成一半的尺寸。这种折叠机制能够显著减小盖板完全展开时的迎风面积与空间占用,有效降低附加风载,但在实际工程中也对铰链机构和驱动部件的长期可靠性提出了更高的要求。

如图 10 所示,中国科学院国家天文台兴隆观测站的 2.16 m 望远镜也采用了转开双门式镜盖设计^[9],与 Victor M. Blanco Telescope 类似,由



图 9 国内某 2 m 级望远镜镜盖结构

Fig. 9 Mirror cover structure of a 2 m-class telescope in China

图 10 兴隆 2.16 m 望远镜结构^[9]Fig. 10 Structure of Xinglong 2.16 m telescope^[9]

两扇半圆形盖板组成,确保了良好的密封性和防护效果。

转开双门式镜盖也存在一定的局限性。首先,对盖板闭合位置的精度要求较高,需要确保闭合时实现无缝对接,这对结构设计和控制系统提出了较高要求。其次,盖板展开时的迎风面积较大,对望远镜造成的附加风载较高,可能影响望远镜的稳定性和观测效果。因此,该型式更适用于风载条件相对温和或镜室空间较为充裕的场合。

2.3.2 花瓣式镜盖

花瓣式镜盖是一种通过多个独立盖板组合形成的主镜保护装置,其设计类似于花瓣的展开和闭合,通过多个盖板的协同运动实现对主镜的全覆盖。根据盖板数量的不同,花瓣式镜盖主要分为四叶、六叶以及多叶等形式。这种多叶设计形式的优点在于开启状态下能够较大幅度地减少盖板式镜盖所带来的风载影响,且外观较为美观,符合现代望远镜的设计美学,但多叶的设计所带来的是更复杂的控制问题。

在滑移式镜盖的构型设计中,盖板闭合后形成的几何形状主要有两种:一是圆锥台式——盖板闭合后整体呈截头圆锥体,此结构既能保证镜面覆盖,又能通过锥面将落物导向镜筒外侧。如图 11 所示,SOAR 4.1 m 望远镜的镜盖即采用了此结构^[1],由四块对称的扇形盖板组成,通过滑轮系统和直线驱动器实现平稳开合,整个开合过程约 60 s。

美国 Lowell 天文台的 Discovery Channel

Telescope (DCT) 4.3 m 望远镜也采用了类似的四瓣滑移式结构^[10],如图 12 所示,盖板闭合后形成圆锥台外形。



图 11 SOAR 望远镜镜盖完全展开状态^[1]

Fig. 11 Fully deployed state of SOAR telescope mirror cover^[1]

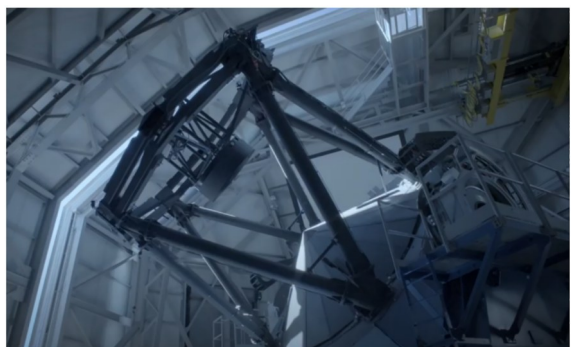


图 12 Discovery Channel 望远镜镜盖闭合状态^[10]

Fig. 12 Closed state of Discovery Channel telescope mirror cover^[10]

美国 Kitt Peak 国家天文台的 Nicholas U. Mayall 4 m 望远镜同样采用了四瓣式设计,如图 13 所示,其开合过程平稳可靠,进一步验证了该型式在不同望远镜中的适用性和有效性。

此外,如图 14 所示,土耳其新建的东安纳托



图 13 Nicholas U. Mayall 4 m 望远镜镜盖打开状态(左)与闭合状态(右)

Fig. 13 Open (left) and closed (right) states of Nicholas U. Mayall 4 m telescope mirror cover



图 14 DAG 望远镜镜盖打开状态^[11]

Fig. 14 Open states of DAG telescope mirror cover^[11]

利亚天文台(Eastern Anatolia Observatory)DAG 4 m 望远镜也选用了花瓣式镜盖系统^[11]。这些案例进一步验证了该结构型式在国际 4 m 级望远镜防护设计中的广泛适用性与有效性。

二是环形闭合式——盖板闭合后各瓣与镜室边缘的密封环嵌合。如图 15 和图 16 所示,英国 William Herschel Telescope (WHT) 4.2 m 望远镜、澳大利亚 Anglo-Australian Telescope (AAT) 3.89 m 望远镜以及美国 Canada-France-Hawaii Telescope (CFHT) 3.58 m 望远镜均采用了环形滑移式镜盖。以 CFHT 为例,其镜盖由多块扇形盖板组成,盖板沿环形轨道滑移打开时收拢于镜筒一侧,闭合时各瓣在中心汇合形成完整覆盖。这种环形闭合方式能更好地适应圆形镜室结构,且闭合后的密封效果出色。

在国内,如图 17 所示,陈宝刚等针对某米级光学望远镜设计了四门对开花瓣式主镜保护盖,通过偏置曲柄滑块机构实现了高效的运动控制^[2]。工程设计结果表明,该镜盖单次开/关时间约 62.5 s,免维护开关次数超过 500 次,经过一年以上的无故障使用验证。该研究同时指出,这本



图 15 英国 WHT 镜盖闭合过程(左)与澳洲 AAT 镜盖闭合状态(右)

Fig. 15 Closing sequence of WHT mirror cover in the UK (left) and the closed state of AAT mirror cover in Australia (right)

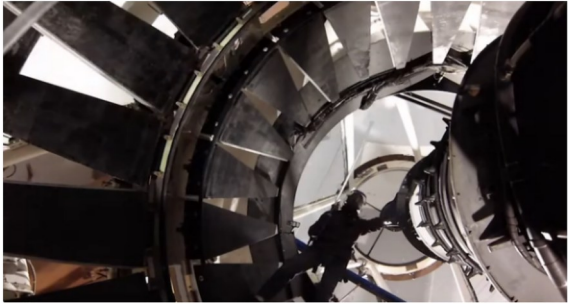


图 16 CFHT 镜盖打开示意图

Fig. 16 Diagram of the opened CFHT mirror cover



图 18 慕天望远镜镜盖结构

Fig. 18 Structure of MOST mirror cover

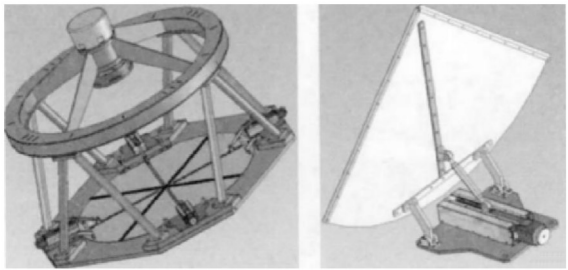


图 17 镜盖三维示意图(陈宝刚等设计)^[2]

Fig. 17 3D schematic diagram of the mirror cover (Designed by Chen Baogang *et al.*)^[2]

质上也属于滑移-旋转复合运动型式的盖板式镜盖。

近年来,随着国内大口径巡天设备的快速落成,四叶花瓣式结构在实际工程中得到了更为广泛的应用。例如,目前正在新疆慕士塔格峰(海拔 4 526 m)进行安装的北京师范大学 1.93 m 慕天望远镜(MOST),以及计划安装于四川稻城亚丁的南京大学 2.5 m 望远镜,均明确采用了四叶花瓣式主镜保护盖。如图 18 和 19 所示,这两台望远镜均肩负着高频次的时域巡天任务,且其所处的高海拔西部台址具有强风沙、大温差等极为严苛的自然特征。采用四叶花瓣式设计,既能在非观测状态下为极高精度的光学表面提供高强度的密封防护,又能在展开后有效控制整机的附加风载,完美契合了国内新一代 2 m 级以上巡天望远镜对极端环境适应性与快速开合的工程需求。

如图 20 所示,文丰艾等提出了分块式同步折展主镜保护机构方案^[6]。该方案采用八块保护盖板布置于镜筒前端口,通过对称布置的推杆和定位轮设计,实现了双瓣同步驱动、八块保护盖板同步折展以及始末位置锁定等多项功



图 19 南京大学 2.5 m 望远镜镜盖打开示意图

Fig. 19 Opened WeHoST 2.5 m mirror cover

能。盖板选用了复合材料夹层结构,经过铺层优化设计,单块盖板质量小于 2.5 kg,一阶模态高于 20 Hz,可承受八级风载和 1 kg 落物冲击(Tsai-Wu 失效判据 <1),单向折展时间约 52 s。该方案结合了滑移式多瓣覆盖和复合材料轻量化的优势,代表了国内在该领域的最新进展。

花瓣式镜盖的不足之处在于结构相对复杂,对导轨精度和控制系统提出了更高的要求,这也意味着更高的制造成本和更复杂的维护流程。

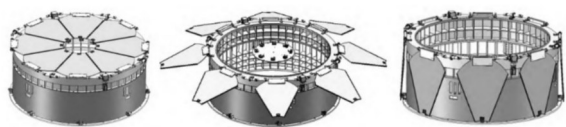
图 20 镜盖的打开过程示意图(文丰艾等设计)^[6]

Fig. 20 Schematic diagram of the mirror cover opening process (Designed by Wen Feng'ai et al.)^[6]

2.4 特殊构型与空间望远镜镜盖

除上述三大类镜盖外,一些望远镜因其独特的光学构型或应用环境,采用了特殊的镜盖方案。同时,空间望远镜因其运行环境(真空、零重力、极端温差)的独特性,其镜盖设计与地基望远镜有本质区别。

如图 21 所示, Giant Magellan Telescope (GMT)^[12-13] 的特点在于其主镜并非一块完整的镜面或拼凑成结构紧密的一块类圆形镜面,而是由 7 面 8.4 m 圆形镜面拼接而成,其镜盖在设计时,每块镜面都有单独的镜盖,外圈六个子镜的镜盖采用了盖板式镜盖。由于其位置特性,每块镜盖在展开后各自进行四折叠,缩小体积以减小造成的额外风载。中间镜面的镜盖则设计成了六叶花瓣型,每块盖板在展开后会再次折叠成类四面体结构,避免对镜面造成遮挡,以确保观测。GMT 镜盖系统还配备了充气式清洗密封(Inflatable Wash Seal),在镜盖闭合时环绕镜面周边充气膨胀,有效隔离灰尘和污染物。Francesco Dinardo 等报道了 GMT 镜盖系统的全尺寸原型测试工作,包括钢制替代镜面上的开合功能测试和抗震性能验证^[14]。

如图 22 所示,日本 Subaru 8.2 m 望远镜采用了独特的顶部盖板式设计——在主镜室顶部布置了两块大型矩形盖板(由一组半圆形和一组矩

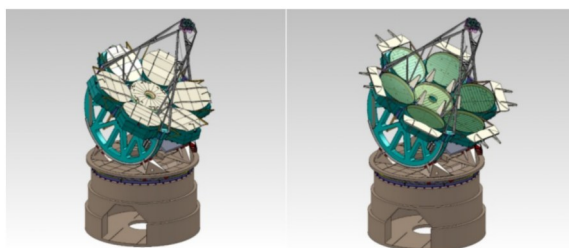
图 21 GMT 镜盖闭合时(左)与展开时(右)^[12]

Fig. 21 Closed (left) and deployed (right) states of GMT mirror cover^[12]



图 22 Subaru 望远镜顶部盖板展开时

Fig. 22 Deployed state of Subaru telescope top cover

形面板组成),这些盖板虽然未完全覆盖镜面,但为镜面提供了一定程度的防护,减少了部分环境因素对镜面的影响。这种“非全覆盖”方案是 Subaru 为适应其独特的桁架式镜筒结构而做出的权衡。

在空间望远镜领域,镜盖的功能不仅限于防尘和防撞击,还往往需要兼顾热控、杂光抑制乃至气密保护等功能。哈勃空间望远镜(Hubble Space Telescope, HST)在发射阶段和早期的维护任务中使用了专用的保护盖系统。如图 23 所示, Bush 等对 HST 保护盖系统进行了详细描述^[15]——该保护盖系统在发射阶段覆盖精密光学元件,入轨后通过电机驱动打开,确保光学系统在进入工作状态前免受污染和损伤。

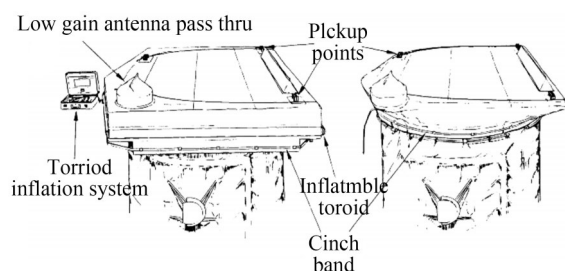
图 23 HST 保护盖系统示意图^[15]

Fig. 23 Schematic of HST protective cover system^[15]

詹姆斯·韦伯空间望远镜 (James Webb Space Telescope, JWST) 代表了空间望远镜镜盖/遮罩技术的极致水平。如图 24 所示, JWST 配备了一套五层 Kapton 薄膜遮阳罩, 展开尺寸约 21.2 m × 14.2 m, 折叠后收纳入 Ariane 5 火箭 5 m 直径的整流罩中。遮阳罩的五层 Kapton 膜(最外层厚 0.05 mm, 内层 0.025 mm)均蒸镀铝反射层, 面向太阳的两层还附加了掺杂硅涂层以

增强紫外防护。展开序列涉及 139 个释放机构、70 个铰链组件、8 个电机和约 400 个滑轮,是航天史上最复杂的空间可展机构之一^[16]。JWST 的 18 块拼接主镜在发射阶段由镜面保护盖覆盖,入轨展开序列中先行释放。

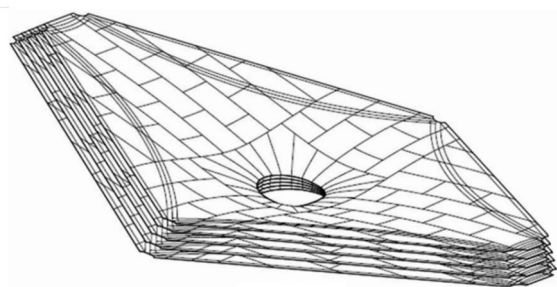


图 24 JWST 遮阳罩展开状态示意图^[16]

Fig. 24 Schematic diagram of JWST sunshield in a deployed state^[16]

此外,折纸原理(Origami)为空间望远镜镜盖设计提供了新的灵感。如图 25 所示,Miura-ori 折叠模式可实现薄膜或薄板材料的紧凑折叠与可靠自展开。研究表明,采用 Miura-ori 折纸构型的空间相机防护罩在 120° 展开角时可实现约 85% 的通光面积,并能改善热控效果——相比无防护罩状态,最高温度降低 22 °C,最低温度提升 51.5 °C,XY 方向重复定位精度优于 0.006 mm (10 次循环后)^[17]。

针对太阳望远镜,镜盖还具有一项特殊的安全功能——防止意外指向导致的高聚光能量损伤。Daniel K. Inouye 太阳望远镜(DKIST)的 M1 镜盖被设计为安全完整性等级 SIL2 的关键安全装置,须在 15 s 内完成闭合以阻断约 16.9 kW 的聚焦太阳光,与孔径盖构成冗余防护体系^[18]。GREGOR 太阳望远镜在设计中也着重考虑了动态风载对镜盖和镜筒结构的影响^[19]。

在拼接镜面望远镜方面,GMT 的 7 面子镜各有独立花瓣式镜盖(见 2.4 节)是目前最系统的拼接镜面镜盖方案。Castro 等在 GMT 围栏详细工程设计中进一步考虑了镜盖系统与望远镜主体结构协同^[13,20]。30 m 望远镜(Thirty Meter Telescope, TMT)则采取了不同的防护策略——未设置专用的主镜镜盖,而是依靠其 66 m 直径的球形卡洛特式圆顶提供整体环境防护,并



图 25 Miura 折纸折叠实拍^[17]

Fig. 25 Actual photograph of Miura folding process^[17]

结合 CO₂ 雪清洗系统定期对 492 块拼接子镜进行表面清洁,同时为每对边缘传感器配备防尘罩(Dust Boot)以确保拼接波前测量的精度^[21]。这一策略反映了超大规模拼接镜面望远镜在镜盖设计上面临的独特挑战——镜面尺寸和分块数量使得传统机械式镜盖方案变得极度复杂和笨重。

CCAT-prime 6 m 亚毫米波望远镜(位于智利 Cerro Chajnantor,海拔 5 600 m)则采用了一体化仰角快门式结构,将防护机构集成于仰角壳体中,可抵御极端天气条件^[22]。该结构使用了 Invar 和 CFRP 材料以保证极端温度环境下的尺寸稳定性^[23]。

VLT(Very Large Telescope)4 台 8.2 m 单元望远镜的镜面防护策略也值得注意。VLT 在常规观测中依靠其旋转圆顶和风屏系统提供环境防护,但当主镜需要卸下进行重新镀膜(约每 18 个月一次)时,必须使用专用运输保护盖覆盖镜面,以防止阳光直射镜面导致热变形。Huedepohl 等详细描述了 VLT 主镜的装卸和保护子系统^[24]。

3 镜盖设计关键共性技术

不同的镜盖结构类型虽然在机械实现上千差万别,但在设计过程中均需面对若干共性的关

键技术问题。本章从结构材料、驱动控制、风载力学和密封防护四个方面对其进行讨论。

3.1 结构设计与材料选择

镜盖的工作环境决定了其材料选择需要在刚度、重量和工艺性之间寻求最优平衡。传统镜盖多采用铝材或不锈钢制成,具有加工便利、成本可控的优势,但随着望远镜口径的增大,金属材料的自重问题日益突显。

复合材料的引入为镜盖轻量化开辟了新途径。文丰艾等在 2.5 m 望远镜镜盖设计中采用了碳纤维增强树脂(CFRP)面板与蜂窝夹芯的复合夹层板结构,通过铺层优化设计使单块盖板质量控制在 2.5 kg 以内,一阶固有频率高于 20 Hz,在满足刚度和强度要求的前提下实现了显著的减重^[6]。美国 ULTRA 1 m 望远镜则将镜盖设计为电机驱动的 CFRP 可变光阑(Iris)式结构,整个望远镜的重量不足传统同口径望远镜的四分之一。

未来趋势表明,CFRP 夹层结构、陶瓷基复合材料(如 Cescic)和形状记忆合金等新型材料有望在下一代镜盖设计中获得更广泛的应用。特别是对于空间望远镜,近零膨胀系数($CTE \approx 0$)的复合材料是确保极端温差条件下镜盖尺寸稳定性的关键。

3.2 驱动与控制系统

驱动系统是镜盖实现可靠开合的核心。目前常见的驱动方式包括电机驱动直线推杆、齿轮/链传动系统以及液压/气动驱动。精密机械设计的共性要求——高精度装配、低齿隙传动和长期运行可靠性——在镜盖驱动系统中同样适用。

电机驱动直线推杆因其结构紧凑、控制精度高的优势,在中小型望远镜镜盖中应用最为广泛。LAMOST 幕帘式镜盖^[7]和陈宝刚等的四门对开式镜盖^[2]均采用了电机驱动方式,后者通过偏置曲柄滑块机构将电机的旋转运动转化为盖板的精确开合运动,实现约 62.5 s 的单次循环时间。GMT 的镜盖系统采用电机驱动镜盖的开合,辅以限位开关和编码器实现闭环控制^[14]。

在控制系统方面,现代镜盖越来越多地要求具备远程自动控制功能,包括与天文观测排程系统的集成、自动气象判据触发的保护闭合、以及

断电等异常情况下的安全回退机制。DKIST 的 M1 镜盖要求达到 SIL2 安全完整性等级,其控制系统具备独立的后备电源(UPS),确保在主电源失效时仍能完成闭合^[18]。

控制系统的同步精度是多瓣式镜盖的关键性能指标。各瓣之间的运动失步不仅影响镜盖的闭合密封效果,还可能导致机构卡死或碰撞损坏。文丰艾等通过对称布置的推杆和定位轮实现了八块盖板的精密同步^[6]。

3.3 风载与力学分析

风载是地基望远镜镜盖设计不可避免的重要载荷。镜盖在闭合状态承受静风压,在开合过程中承受动态风载,在打开状态(镜盖收拢)则会影响整机的风载特性。杨德华和周超等的研究表明,风载引起的主镜和镜筒结构变形是影响望远镜指向精度和成像质量的重要因素^[4-5]。

镜盖闭合状态下的风载分析主要关注盖板在极限风速(通常取 10 min 平均风速的 3 s 阵风值)下的应力水平和变形量。对于大型镜盖,还需考虑风致振动(涡激振动、抖振和驰振)的潜在风险。文丰艾等的设计工况要求镜盖能承受八级风载(17.2~20.7 m/s),在 Tsai-Wu 失效判据小于 1 的约束下进行了铺层优化^[6]。

镜盖开合过程中的动态风载更为复杂——盖板的姿态不断变化,迎风面积和气动力系数也随之改变。开合速度的选择需要在防护响应速度和结构安全之间权衡。GMT 镜盖的花瓣设计需要考虑望远镜处于不同俯仰角度时重力矢量对花瓣运动的影响,这是其全尺寸原型测试的重要验证内容之一^[14]。

此外,镜盖在打开状态的收拢位置也影响望远镜整机的风载特性。选择低矮的收拢构型、减小迎风投影面积是降低附加风载的有效措施。花瓣式镜盖在这方面优于转开双门式。

3.4 密封与防护性能

镜盖的密封性能直接决定了其对镜面的实际保护效果。密封设计需同时应对灰尘(微米级颗粒)、液态水(雨水、冷凝水)和水蒸气等多种入侵介质。

机械密封是最常见的方案——通过盖板与镜室边缘之间的精密配合、密封槽和橡胶密封条实现闭合状态下的防护。VLT、Gemini 和 SOAR

等大型望远镜的镜盖均采用了机械密封方案^[1,8]。机械密封的优点是结构简单、维护方便,但对加工精度和闭合重复精度要求较高。

充气式密封是一种面向更高防护等级的技术。GMT 镜盖系统采用了充气式清洗密封(inflatable wash seal)——镜盖闭合后,沿镜面周边的密封圈充气膨胀,填充盖板与镜室之间的微小间隙,实现气密级别的防护^[14]。这种方案能更好地适应盖板热胀冷缩和长期使用磨损带来的间隙变化。

对于幕帘式镜盖,密封主要通过幕布与镜筒之间的压紧条和魔术贴等柔性连接实现^[7],密封等级通常低于刚性盖板方案。

防护性能的另一个重要维度是热防护。盖板闭合后可在一定程度上起到保温作用,减少夜

间镜面温度下降速率,降低镜面结露风险(seeing 的重要影响因素之一)。对于太阳望远镜(如 DKIST、GREGOR),镜盖还需承担阻断高聚光能量的安全功能^[18-19]。对于空间望远镜(如 JWST),遮阳罩/镜盖的热控功能甚至比防尘功能更为关键——JWST 五层遮阳罩可将 300 ℃以上的太阳面与-223 ℃的冷面隔离开来^[16]。

4 对比与分析

4.1 各类镜盖方案综合对比

为了系统地比较各类镜盖方案的综合性能,表 1 从结构重量、抗冲击能力、闭合密封性、展开风载、驱动复杂度、典型适用口径和维护便利性等维度进行了归纳。

表 1 各类望远镜镜盖方案综合对比

Tab. 1 Comprehensive comparison of various telescope cover designs

类型	结构重量	抗冲击	密封性	展开风载	驱动复杂度	典型适用口径	代表望远镜
幕帘式	轻	差	中等	极小	低	1~4 m	LAMOST、丽江 2.4 m
百叶式	中等	较强	良好	较小	中—高	4~10 m	Gemini, ESO 3.6 m
转动双开门式	重	强	良好	大	低—中	2~4 m	V. M. Blanco、兴隆 2.16 m
花瓣式	中—重	强	良好	中	高	4~8 m	SOAR, CFHT, Mayall 4 m
空间可展式	极轻	取决于设计	极高	不适用	极高	1~10 m(折叠态)	JWST, HST

从表 1 可以看出,不同镜盖类型之间存在明显的性能权衡关系:幕帘式最轻但防护能力最弱;盖板式防护能力强但重量大、风载高;花瓣式在多项性能上取得折中,但对驱动精度要求较高;空间望远镜镜盖则可借助零重力环境采用柔性可展方案,实现地基难以达到的超轻量化设计。

在选型实践中,镜盖方案的确定通常需要对以下因素进行综合权衡:(1)望远镜口径与镜室构型;(2)台址气象条件(风速极值、降水频率、沙尘浓度);(3)镀膜周期和维护策略;(4)制造成本与全寿命周期维护成本;(5)对望远镜整机伺服性能的影响(附加惯量和风载)。对于 4 m 级以下、台址条件较好的望远镜,幕帘式或简单盖板式通常已能满足需求。对于 8 m 级以上、台址环境较恶劣(如 GMT 所在的智利 Atacama 沙漠)的望远镜,花瓣式配充气密封代表了当前最高级别的防护方案。

4.2 不同口径与区域环境的定量评估与选型建议

望远镜的主镜口径及其所处台址的自然环境是决定镜盖选型的两大核心边界条件。为了更直观的揭示这一对应关系,本章整理了全球主要大中型光学望远镜的地理分布,如图 26 所示。

从流体力学和结构力学的定量角度分析,镜盖的迎风面积 S 与望远镜口径 D 的平方成正比($S \propto D^2$)。在同等风速下,镜盖全开时承受的风载力矩 M 近似与 D^3 成正比。这种几何级数的增长意味着,随着口径和台址风速的增加,防护设计必须在结构形态上发生改变。结合国内外典型工程案例,本文针对不同口径与区域环境提出以下镜盖选型建议:

(1) 1~2 m 级望远镜:经济性与实用性的平衡在此口径区间,风载力矩的绝对值相对较小。对于环境相对温和的中低纬度或内陆台址(如兴

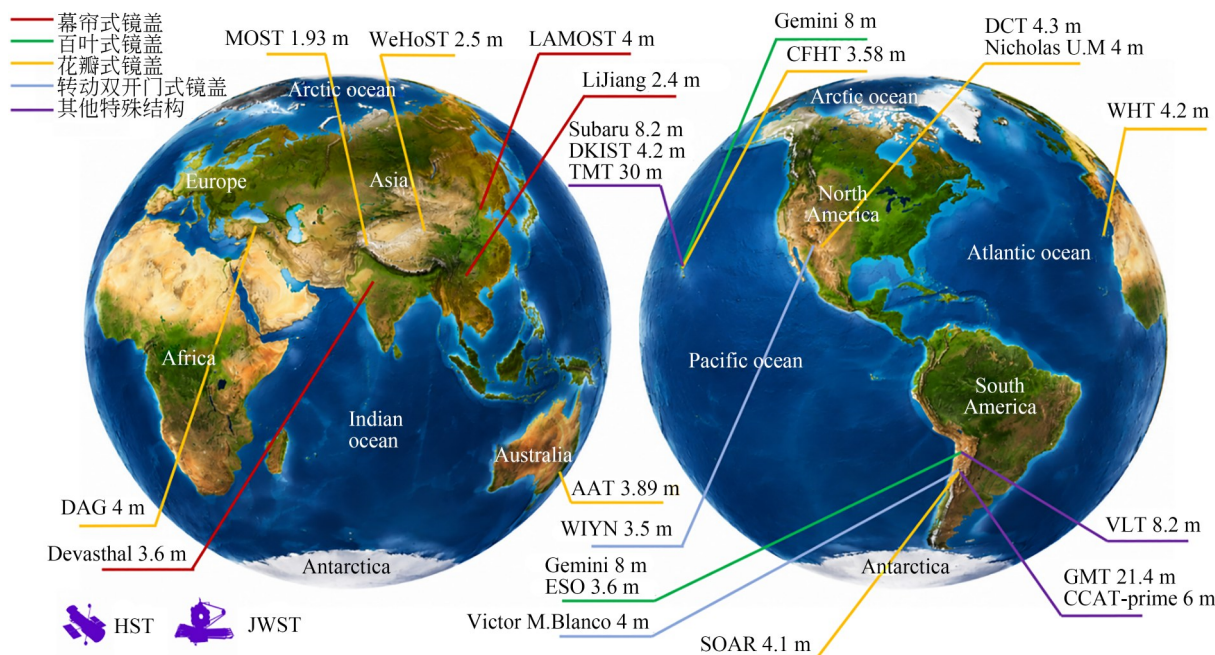


图 26 全球不同口径大中型光学望远镜分布及台址特征示意图

Fig. 26 Schematic diagram of distribution and site characteristics of large and medium aperture optical telescopes worldwide

隆观测站),结构简单的幕帘式即可满足防护需求,且工程造价最优。然而,若台址位于强风区,幕帘式易发生风振污染镜面。此时,采用如国内某 2 m 级望远镜的折叠双开门式设计,可使盖板展开后的迎风面积缩小近一半,大幅降低了伺服系统的抗风载压力。

(2) 2~4 m 级望远镜:强风沙高海拔台址的严苛考验 2~4 m 级是结构质量和风载急剧增加的“分水岭”。目前新建的该口径级别望远镜(如 MOST 1.93 m、WeHoST 2.5 m 等)大多选址于西部高海拔区域(如慕士塔格 4 526 m、冷湖 4 000 m 等)。这些区域具有常年阵风强(往往> 20 m/s)、沙尘多、昼夜温差极大的定量特征。选型建议采用四叶或多叶花瓣式镜盖。

对比表明,将 2.5 m 级圆形盖板一分为四,可使单片盖板的重心外移距离和伸出长度显著减半,从而将单瓣盖板的根部受力矩降低至整体式设计的约 1/4,极大抑制了强风下的结构震动。闭合后形成的圆锥台外形具有优异的排沙、排雪气动特性。材料方面,推荐使用碳纤维(CFRP)夹层轻量化结构替代铝合金,并要求驱动机构具备快速闭合能力,以应对高原突发恶劣气象。

(3) 4~8 m 级大型望远镜:口径突破 4 m 后

(如 DAG 4 m, Mayall 4 m, SOAR 4.1 m),即便是花瓣式,向外展开的空间也极为可观。此类台址(如智利 Atacama 沙漠、夏威夷 Mauna Kea 等)往往极其干燥但微尘丰富。选型推荐采用环形滑移多瓣式或百叶窗式。这些机构在开启时能完全贴合镜筒边缘收拢,不增加望远镜桁架附近的迎风面积,对风载的附加影响降至最低。在密封设计上,建议引入充气式弹性密封(Inflatable Seal)系统,以填补大型盖板在巨大温差热胀冷缩下产生的毫米级间隙。

(4) 极端多雨/季风环境台址的特殊考量针对受季风影响严重、年降水量大(日降水可达百毫米级)的台址(如印度 Devasthal),防雨水倒灌成为第一要务。选型建议:除了主刚性盖板(建议设计 $\geq 15^\circ$ 的导水斜度)外,增设如 Devasthal 3.6 m 望远镜所采用的辅助防水幕帘或迷宫式防水搭接槽,确保液态水无法通过毛细作用或风压渗入主镜室。

本章总结了不同口径等级光学望远镜在各类台址环境下的镜盖选型逻辑、结构方案与设计要点,可以为未来的大口径光学望远镜提供经验借鉴,对结构设计有一定的参考价值与指导意义。

5 结论与展望

本文系统梳理了大型望远镜镜盖的主要结构类型及设计关键技术。大型望远镜镜盖可分为幕帘式、百叶式、盖板式(转开双开门式/花瓣式)和特殊构型四大类,各类方案在不同口径、不同台址条件下各有适用场景。其中,幕帘式镜盖以结构简单、操作便捷见长,适用于中小口径和对防护等级要求不极端的场合。百叶式镜盖在防护性能和风载影响之间取得较好平衡,但对望远镜镜室的形状、空间提出了较高的要求。花瓣式盖板是目前4~8 m级望远镜应用最为广泛的形式,其设计已较为成熟,但在轻量化和控制方面仍有优化空间。空间望远镜镜盖在柔性可展机构、折叠原理创新(如折纸构型)和热控-防护多功能一体化方面与地基镜盖存在本质差异,为地基镜盖设计提供了新思路。

参考文献:

- [1] SEBRING T A, KRABBENDAM V L, HEATH-COTE S R. Southern astrophysical research (SOAR) telescope: steps on the route to success [J]. *Large Ground-based Telescopes*, 2003: 71.
- [2] 陈宝刚,王帅,杨飞,等. 大口径望远镜主镜保护盖设计[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(4): 988-992.
CHEN B G, WANG S H, YANG F, *et al.* Design of primary mirror cover for large aperture telescope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(4): 988-992. (in Chinese)
- [3] BANGIA T, UDDIN W. Sustaining mechanical systems of 3.6 m optical telescope at Devasthal, India [C]. *Ground-based and Airborne Telescopes VIII. December 14-18, 2020. Online Only, USA*. SPIE, 2020: 32.
- [4] 杨德华,徐灵哲,徐欣圻. 大型光学天文望远镜风载作用分析[J]. *光学技术*, 2009(3): 342-346.
YANG D H, XU L Z H, XU X Q. Wind disturbance study on large astronomical telescopes [J]. *Optical Technique*, 2009(3): 342-346. (in Chinese)
- [5] 周超,杨洪波,吴小霞,等. 1.2 m望远镜风载作用分析[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(5): 889-893.
ZHOU C H, YANG H B, WU X X, *et al.* Influence of wind loading on the 1.2 m telescope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(5): 889-893. (in Chinese)
- [6] 文丰艾,唐金龙,芮道满,等. 分块式同步折展主镜保护机构设计及验证[J]. *光学技术*, 2024, 50(5): 526-532.
WEN F A, TANG J L, RUI D M, *et al.* Design and verification of multi-block synchronous folding primary mirror protection mechanism [J]. *Optical Technique*, 2024, 50(5): 526-532. (in Chinese)
- [7] 周国华,王海,杨德华. LAMOST反射施密特改正镜新型镜罩设计[J]. *天文研究与技术—国家天文台台刊*, 2010, 7(3): 277-282.
ZHOU G H, WANG H, YANG D H. Design of a novel cover of the reflecting Schmidt plate of the LAMOST [J]. *Astronomical Research & Technology—Publications of National Astronomical Observatories of China*, 2010, 7(3): 277-282. (in Chinese)
- [8] SIMONS D A, JENSEN J B, GRAY P, *et al.* Current and future facility instruments at the Gemini Observatory [J]. *Ground-Based Instrumentation for Astronomy*, 2004, 5492: 35.
- [9] 李陶然,王建峰. 兴隆2.16米望远镜圆顶吊装通道通风研究[J]. *天文研究与技术*, 2020(2): 224-232.
LI T R, WANG J F. A study of hoist-ductventing for Xinglong 2.16 m telescope [J]. *Astronomical Research & Technology*, 2020(2): 224-232. (in Chinese)

展望未来,望远镜镜盖技术可能在以下方向取得重要进展:一是轻量化复合材料的深度应用,通过CFRP夹层结构、点阵芯材等先进轻质材料的引入,大幅降低镜盖的结构重量;二是驱动系统的智能化升级,集成气象传感、状态监测和故障诊断功能,实现全自动、高可靠性的无人值守运行;三是折纸及其他新型可展机构原理的引入,有望将空间望远镜的高效折叠方案迁移至地基应用场景。

作者贡献声明:

韩 硕:调查研究,论文构思与撰写;
姜 翔:研究提出和论文指导;
喻进知:文献调研;
顾伯忠:论文审核;
徐 进:论文审核及获取资助。

- Chinese)
- [10] TERAN U J, SEBRING T A, NEFF D H, *et al.* Design of the discovery channel telescope enclosure [J]. *Ground-based Telescopes*, 2004, 5489: 1004.
 - [11] PIRNAY O, LOUSBERG G, GABRIEL E, *et al.* DAG 4m telescope: assembly, integration and testing [C]. *Ground-based and Airborne Telescopes VII. June 10-15, 2018. Austin, USA.* SPIE, 2018: 65.
 - [12] SHEEHAN M, GUNNELS S, HULL C, *et al.* Progress on the structural and mechanical design of the Giant Magellan Telescope [J]. *Ground-Based and Airborne Telescopes IV*, 2012, 8444: 84440N.
 - [13] FANSON J L, BERNSTEIN R A, ANGELI G Z, *et al.* Overview and status of the giant Magellan telescope project [C]. *Ground-based and Airborne Telescopes VIII. December 14-18, 2020. Online Only, USA.* SPIE, 2020: 255.
 - [14] DINARDO F, TOMASI M, BURSI A, *et al.* Overview of the Analysis and Testing of a Covering System for a Telescope [M]. Latest Advancements in Mechanical Engineering. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024: 216-224.
 - [15] BUSH J, LLOYD S, MARTIN S, *et al.* Hubble space telescope protective cover system [J]. *Optical Systems Contamination: Effects, Measurement, Control*, 1987, 777: 278.
 - [16] ARENBERG J, FLYNN J, COHEN A, *et al.* Status of the JWST sunshield and spacecraft [J]. *Space Telescopes and Instrumentation 2016: Optical, Infrared, and Millimeter Wave*, 2016, 9904: 990405.
 - [17] 肖洪, 王洪洋, 郭宏伟, 等. 空间相机重复展收机构薄膜防护罩设计及分析 [J]. *光学精密工程*, 2021, 29(12): 2877-2890.
XIAO H, WANG H Y, GUO H W, *et al.* Design and analysis of the repeatable development and collapse mechanism film protective cover of space camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(12): 2877-2890. (in Chinese)
 - [18] HUBBARD R P, BULAU S E, SHIMKO S, *et al.* Daniel K. inouye solar telescope system safety [J]. *Modeling, Systems Engineering, and Project Management for Astronomy VI*, 2014, 9150: 915007.
 - [19] EMDE P, SUSS M, EISENTR GER P, *et al.* Design of the solar telescope GREGOR under dynamic wind loads [J]. *Optical Materials and Structures Technologies*, 2003, 5179: 282.
 - [20] CASTRO N, BILBAO ARECHABALA A, FERNÁNDEZ GARCÍA A, *et al.* GMT enclosure detail engineering design: facing the construction phase [C]. *Ground-based and Airborne Telescopes X. June 16-22, 2024. Yokohama, Japan.* SPIE, 2024: 4.
 - [21] GEDIG M H, BRZEZIK W, CROFOOT L, *et al.* Thirty Meter Telescope enclosure production readiness overview [C]. *Ground-based and Airborne Telescopes VIII. December 14-18, 2020. Online Only, USA.* SPIE, 2020: 6.
 - [22] ROMEO R C, MARTIN R N, TWAROG B, *et al.* Final assembly of the ULTRA 1 m carbon fiber optical telescope [J]. *New Developments in Optomechanics*, 2007, 6665: 66650C.
 - [23] PARSHLEY S C, KRONSHAGE J, BAZARKO A, *et al.* CCAT-prime: a novel telescope for sub-millimeter astronomy [C]. *Ground-based and Airborne Telescopes VII. June 10-15, 2018. Austin, USA.* SPIE, 2018: 220.
 - [24] HUEDEPOHL G, TAMAI R, EHRENFELD G, *et al.* Integration and handling of the VLT primary and secondary mirror systems [J]. 2000, 4004: 457-470.

作者简介:



韩 硕(2000—),男,山东菏泽人,博士研究生,2021年于山东科技大学获得学士学位,主要从事大口径望远镜结构方面的研究。E-mail: shan2023@niaot.ac.cn

通讯作者:



姜 翔(1979—),男,云南昭通人,正高级工程师,2002年于中国科学技术大学获得学士学位,主要研究方向为精密转台、多维调整机构、镜面支撑机构及望远镜总装集成方法等。E-mail: jiang.x@niaot.ac.cn