

中等口径天文望远镜光学系统研究综述

董云芬^{1,3}, 平一鼎^{1,2}, 栗荣翔³, 李海波³

(1. 中国科学技术大学 天文与空间科学学院, 合肥 230026; 2. 中国科学院紫金山天文台, 南京 210023; 3. 中科院南京天文仪器有限公司, 南京 210042)

摘要: 本文系统梳理了中等口径天文望远镜的光学系统, 依据其科学目标划分为多终端通用型、大视场巡天型和光谱巡天型三大类。研究超越了单一结构描述, 揭示了其技术演进的内在逻辑与系统设计哲学。分析表明, 里奇-克莱琴 (R-C) 结构凭借其优异的像差校正能力成为设计基石, 并衍生出两条清晰的技术路径: 通过多焦点布局提升观测灵活性, 或通过集成改正镜组实现数度级大视场以优化巡天效率。研究进一步阐明, 现代光学设计理念已从局部优化转向“全系统联合优化”, 并深度集成主动/自适应光学以动态维持高像质。未来发展趋势将依托优良台址发展专用系统, 探索新构型以兼顾大口径与大视场, 并通过设计、制造与计算方法的协同创新, 支撑下一代前沿科学探索。

关键词: 中等口径望远镜; 光学系统; R-C 结构; 主动光学; 多终端仪器

中图分类号: P111.2 **文献标识码:** A

1 引言

光学望远镜是天文学研究的核心观测设备, 其口径大小直接决定探测深度与分辨能力。自 20 世纪下半叶以来, 国际天文学界在 8~10 米级大型望远镜领域取得了革命性突破——美国凯克 10 米望远镜、加那利大型望远镜 (GTC)、欧洲南方天文台甚大望远镜 (VLT)、日本昴星团望远镜 (Subaru) 等相继建成, 将人类对宇宙的认知推向了前所未有的深度^[1,2]。当前, 天文观测正朝着更大口径与更广视野的方向迈进。诸如三十米望远镜 (TMT)、欧洲极大望远镜 (ELT) 等下一代巨型光学望远镜已进入建设阶段, 旨在以更高的空间分辨率探测更暗弱的天体; 而大型综合巡天望远镜 (LSST) 则凭借其大视场与高巡天效率, 将系统描绘动态宇宙的全景图像。这些大型设施依托巨大的集光面积与先进的探测技术, 能够捕捉宇宙早期的暗弱信号, 在系外行星直接成像、高红移星系、超大质量黑洞及暗能量本质等前沿领域持续发挥不可替代的作用。

然而, 在这一进程中, 2~4 米级的中等口径望远镜始终占据着不可替代的战略地位。这

收稿日期: YYYY-MM-DD; 修回日期: YYYY-MM-DD

资助项目: 国家重点研发计划-政府间国际科技创新合作项 (2022XXXXXX)

通讯作者: 平一鼎, ydping@pmo.ac.cn

类望远镜兼具适中的建设成本和灵活的科学研究适应能力,在广域巡天、时域监测、系外行星搜寻、空间碎片跟踪等领域发挥着独特作用^[3]。与8~10米级大型望远镜相比,中等口径望远镜具有以下显著优势:建设周期短、成本可控,能够实现多台设备的网络化布局;观测时间分配灵活,可承担长期监测和快速响应的科学任务;技术风险较低,适合作为新技术验证平台;便于开展大规模巡天项目,为大型望远镜提供目标源。如图1所示,世界各国在中等口径望远镜领域均有重要布局,形成了覆盖南北半球的观测网络,在当代天文学研究格局中扮演着“承上启下”的关键角色。

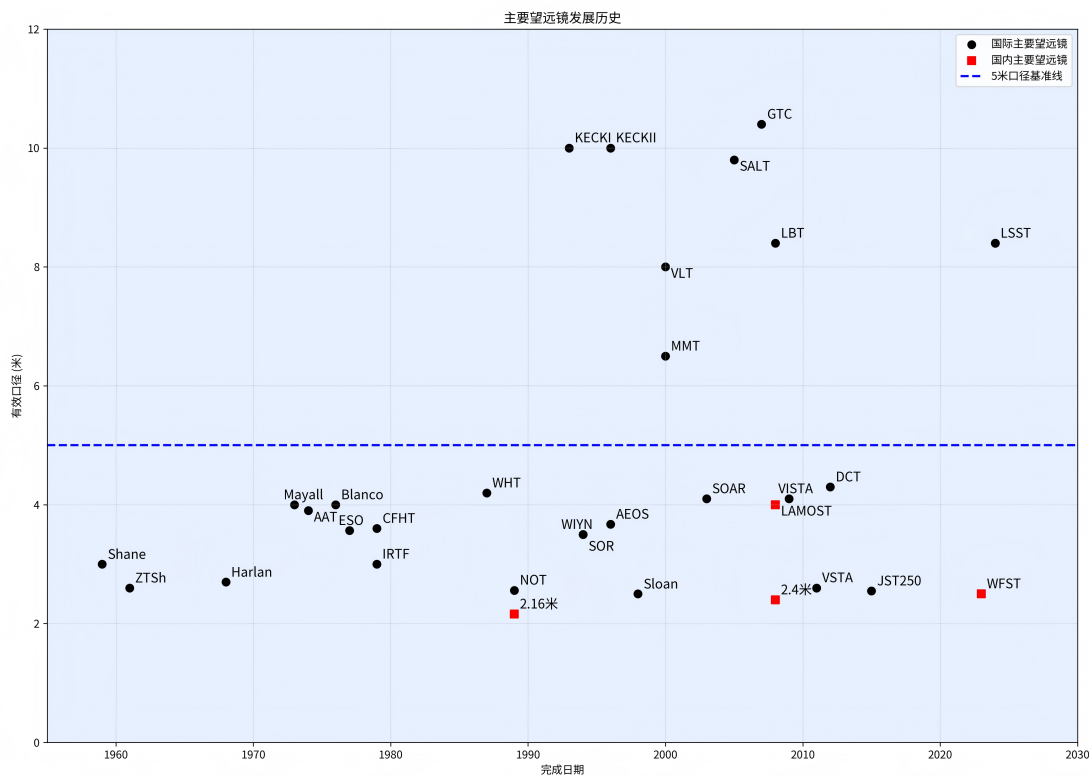


图1 国际上主要望远镜发展历史图

从我国天文学发展的角度来看,中等口径望远镜同样是构建自主观测能力、培养科研队伍、产出原创成果的重要依托^[3]。丽江2.4米望远镜作为东亚地区最大的通用光学望远镜,自2008年建成以来,已在恒星物理、系外行星探测等领域取得一系列重要成果^[4];郭守敬望远镜(LAMOST)凭借国际领先的光谱获取能力,推动我国掌握了主动光学与高精度光纤定位等核心技术^[5];而基于2.16米望远镜研发的自适应光学系统,也为中小型望远镜的技术升级积累了宝贵经验。近年来,我国陆续建成多台特色鲜明的望远镜:2.5米级墨子巡天望远镜

(WFST) 拥有北半球最强的时域巡天能力, 北师大慕天望远镜 (MOST) 致力于高精度测光与光谱观测, 建设中的南京大学太阳望远镜 (WeHoST) 则专注于天地一体化的太阳物理研究, 进一步丰富了我国的天文观测体系。当前, 随着青海冷湖赛什腾山世界级光学天文台址的发现, 以及 4.2 米地基专用天体测量望远镜、4.4 米 JUST 光谱望远镜、6.5 米宽视场光谱巡天望远镜等重点项目的规划与建设, 标志着我国在中等到大口径望远镜领域正步入一个快速发展的新阶段。

在望远镜的整体设计中, 光学系统不仅是实现既定科学目标的先决条件, 更从根本上决定了其在机械结构、电控系统乃至关键零部件加工制造方面的可行性^[6]。一套优秀的光学设计方案, 必须在科学目标、技术指标、工程实现与成本预算等多个维度之间取得最佳平衡。正如北欧光学望远镜的设计理念所揭示的: “将点扩散函数减小一定因子, 与将集光表面尺寸增大相同因子, 对观测能力的提升效果是等效的”^[7,8]。这一深刻洞见指出了成像质量与集光能力在科学产出上的等价性, 在拥挤星场观测、天体精细结构分辨、系外行星直接成像等诸多前沿场景中, 成像质量的提升往往比单纯增大口径更具科学价值。得益于光学设计与加工技术的持续进步, 中等口径望远镜的光学系统经历了从经典卡塞格林到 R-C 结构、从单焦点到多终端的演进, 随后 RC 系统进一步衍生出大视场改正这一主要技术方向; 进入 21 世纪, 以 VST (2011 年)、JST250 (2015 年) 为代表的新一代巡天望远镜, 成功将大视场、高像质与大规模探测器阵列融为一体, 从而将中等口径望远镜的科学能力推向了新的高度。

基于上述背景, 本文旨在对国际代表性中等口径望远镜的光学系统进行系统梳理。文章将重点分析通用型、大视场巡天型及光谱巡天型三类望远镜的科学目标与光学设计特点, 总结里奇-克莱琴结构的主流地位、多焦点布局的设计思路以及大视场改正镜组的发展趋势。同时, 本文也将结合全系统联合优化、关键像差控制等核心技术, 深入探讨中等口径望远镜在支撑前沿科学研究中的独特价值与未来发展方向, 以期为我国后续相关望远镜的规划、设计与建设提供参考。

2 中等口径望远镜的发展概况

根据科学目标和功能定位的不同, 现代中等口径光学天文望远镜主要可分为三大类: 面向多样化天体物理问题的多终端通用望远镜、专注于大规模系统性巡天的的大视场巡天望远镜, 以及致力于高效获取海量光谱信息的光谱巡天望远镜。这三类望远镜在科学功能、光学系统和技术路线上各具特色, 共同构成了当代天体物理研究的完整观测体系。

2.1 通用望远镜

2.1.1 通用望远镜科学目标

通用望远镜旨在覆盖尽可能广泛的天体物理研究领域, 强调多功能性。这类望远镜通常需具备多模式观测能力, 能够在成像、光谱、测光、偏振测量等不同工作模式之间快速切换, 以满足多样化的科学需求。典型的通用望远镜有 Harlan J. Smith 望远镜 (2.7 米)、丽江 2.4 米望远镜、Shajn 望远镜 (ZTSh)、威廉·赫歇尔望远镜 (WHT, 4.2 米) 等多焦点类型, 以及

南方天体物理研究望远镜 (SOAR)、北欧光学望远镜 (NOT)、ESO 3.6 米等主要以卡塞格林焦点接驳不同功能终端的类型, 如表 1 所示。

表 1 国际上主要的多终端通用望远镜

名称	科学目标	光学结构	视场	终端数量	终端仪器
丽江 2.4 米望远镜	恒星物理、系外行星、成像与光谱观测等通用天体物理研究	里奇-克莱琴 (R-C)	工作视场 8 角分 (F/8)	多终端 (1+8)	卡焦光谱仪、卡焦相机、高色散光谱仪、多波段测光系统
Harlan J. Smith 望远镜	行星科学、恒星成分、星系动力学、系外行星搜寻, 曾支持月球激光测距	里奇-克莱琴 (R-C)	取决于焦点 (F/8.8, 17.7, 32.5)	3 焦点	卡焦光谱仪、库德高分辨率光谱仪
Shajn 望远镜 (ZTSh)	通用天体物理观测	多焦点系统	取决于焦点	4 焦点 (主焦、卡焦、Nasmyth、库德)	光谱仪 SPeM、ASP-14、ESPL、CCD 相机
AEOS (先进光电系统)	空间目标监视、识别与跟踪, 卫星成像, 火箭导弹追踪, 兼顾天文观测	三反射镜系统	2.0 毫弧度 (全视场)	多焦点	自适应光学系统、高分辨率成像传感器
威廉·赫歇尔望远镜 (WHT)	星系演化、恒星天体物理、宇宙学、时域天文	经典卡塞格林	主焦 40 角分 (带改正器)	多焦点	WEAVE、ISIS、ACAM、LIRIS
南方天体物理研究望远镜 (SOAR)	高分辨率成像与光谱, 星系、恒星、系外行星、活动星系核	改良型 R-C	卡焦 5-8 角分	主要卡焦	Goodman 光谱仪、SAM、SPARTAN、SIFS
北欧光学望远镜 (NOT)	高成像质量通用观测, 可见/红外波段, 恒星、星系、太阳系天体精细研究	增强型 R-C	全视场 30 角分, 未渐晕 25 角分	主要卡焦	ALFOSC、NOTCAM、FIES
ESO 3.6 米	系外行星搜寻、恒星物理、通用天体物理研究	里奇-克莱琴	约 30 角分	主要卡焦	HARPS、NIRPS、CES、EFOSC2

2.1.2 通用望远镜光学系统发展概况

通用望远镜的光学系统旨在针对单个目标或小天区实现深度与精细观测, 其视场通常为角分量级, 核心设计目标是在口径、成像质量、视场与机械复杂度之间取得最佳平衡, 以支撑其多样化的科学任务。在此理念下, 能够同时校正球差和彗差的里奇-克莱琴 (R-C) 结构,

因其提供了更大、更均匀的良好像场, 已成为绝对主流的方案。通用望远镜光学系统的发展脉络清晰, 其演进始终围绕对更高成像质量与更强终端兼容性的追求, 经历了从被动支撑到主动控制、从单焦点到多焦点高效集成的技术跃迁。

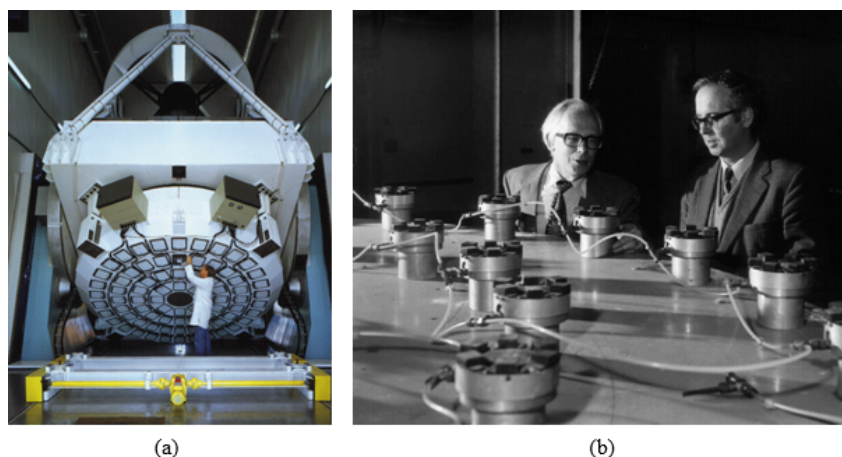
1. 早期阶段: 被动支撑与多焦点探索

早期的通用望远镜在确立 R-C 结构地位的同时, 开始借助机械手段实现多功能观测。Harlan J. Smith 望远镜 (2.7 米, 1968 年) 采用 R-C 设计, 通过可互换副镜在三个焦点间灵活切换。其主镜采用创新的钟摆式机械被动支撑系统抵抗重力形变, 并配备了从高分辨率光谱仪到近红外成像的多样化终端, 体现了早期的多功能探索能力^[9-13]。

2. 发展与成熟阶段: 从“像质优先”到主动光学与高效观测

随着设计与工艺进步, 设计理念转向像质与效率的系统性优化。北欧光学望远镜 (NOT, 2.56 米, 1989 年) 采用增强型 R-C 结构, 通过高次非球面主镜、彻底轻量化与精密被动支撑, 在无主动光学情况下实现了 80% 能量集中度 ≤ 0.3 角秒的卓越像质, 实践了“减小弥散斑等效于增大口径”的设计哲学^[14-17]。

与此同时, 主动光学技术的引入标志着通用望远镜发展步入成熟阶段。欧洲南方天文台新技术望远镜 (NTT, 3.58 米, 1989 年) 是里程碑式的代表。它首次成功将主动光学技术应用于中等口径望远镜, 通过主镜背面的促动器阵列实时校正形变 (如图 2(a) 所示), 配合系统性热控设计, 使望远镜在全天指向范围内保持优于 0.2 角秒的像质, 为后续更大口径望远镜的发展奠定了技术基础^[18]。



注: (a) NTT 主镜背部支撑结构, (b) WHT 主镜背部支撑图。NTT 主镜背部的轴向支撑负责支撑镜子的重量, 并改变其面形, 径向支撑布置有 24 个侧向促动器, 确保镜面位置并约束温度变化引起的热胀冷缩变形。WHT 主镜背部的核心是气动浮动系统, 还包括弹簧式支撑垫、三区联动伺服控制等结构。

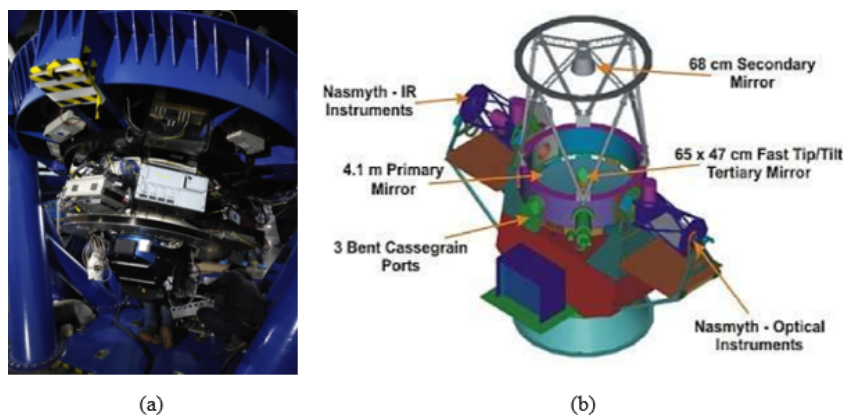
图 2 望远镜及主镜主动支撑机构

威廉·赫歇尔望远镜 (WHT, 4.2 米, 1987 年) 的设计则完美体现了以支持多样化终端需求为核心牵引的成熟思想。它采用精密的 60 点气动支撑系统保障主镜面形精度 (如图 2(b))

所示), 并通过多焦点(主焦点、卡塞格林焦点、奈斯密斯焦点)布局实现终端设备的灵活部署与快速切换。当前, 其新一代多目标光纤光谱仪 WEAVE 已常态化运行, 支撑望远镜在宇宙学、暂现源等前沿领域持续产出, 彰显了高适应性光学平台支撑终端其持续、可迭代的强大能力^[19, 20]。

3. 现代阶段: 高兼容性、高精度与系统集成

现代通用望远镜的光学系统更强调多焦点快速切换、高精度像质保障与终端的高度系统集成。丽江 2.4 米望远镜(2008 年)采用 R-C 结构, 其设计亮点在于通过可快速平移旋转的平面镜在奈斯密斯焦点与卡塞格林焦点间切换, 并设计了支持多达 9 台终端仪器快速插拔的接口系统(如图 3(a)所示), 切换时间仅需半分钟, 极大提升了观测效率。该望远镜配备了 YFOSC、LiJET 等覆盖成像、光谱与系外行星探测的终端设备体系, 充分利用了其高兼容性平台的优势^[21-24]。



注: (a) 丽江 2.4 米望远镜终端设备, (b) SOAR 望远镜多终端示意图。其中 SOAR 望远镜主要包括主镜(4.1m)、次镜(68cm)、三镜(65×47cm)、光学设备终端口、红外设备终端口等。

图 3 望远镜多终端示意图

南方天体物理研究望远镜(SOAR, 4.1 米, 2004 年)则代表了主动光学技术的成熟应用。其主、次镜均采用主动控制, 提供两个奈斯密斯焦点和两个折叠卡焦, 可在数分钟内完成切换。依托这一平台, SOAR 集成了 Goodman 光谱仪、STELES 高分辨率光谱仪、SAM 自适应光学系统等多台终端(总体结构如图 3(b)所示), 覆盖了从光学到近红外的完整波段^[25-29]。先进光电系统望远镜(AEOS, 3.6 米)进一步将像质追求推向极致, 其配备的自适应光学系统能够校正大气湍流, 实现对空间目标的近衍射极限成像(0.05 角秒), 拓展了通用望远镜的应用边界^[30]。

综上所述, 通用望远镜的光学系统发展, 是一部围绕“均衡”与“适应”核心, 不断追求更高像质、更灵活功能、更高效观测的技术演进史。从被动的机械补偿到主动的实时控制, 从单一焦点到快速切换的多焦点集成, 其设计始终以服务多样化的前沿科学需求为根本动力。

2.2 大视场巡天望远镜

2.2.1 大视场巡天望远镜科学目标

大视场巡天望远镜旨在以单次观测覆盖尽可能广阔的天区(通常为平方度量级),服务于大规模系统性巡天任务。其核心科学目标涵盖暗能量与暗物质研究(如宇宙大尺度结构、弱引力透镜、重子声波振荡)、银河系结构与演化、暂现源探测(如超新星、伽马射线暴、引力波电磁对应体)、近地小天体监测以及小行星与彗星普查等。这类望远镜通常具备高巡天效率、大焦面多色成像能力,并可扩展至无缝光谱或低分辨率光谱模式,以获取天体的测光与光谱信息^[31]。典型的大视场巡天望远镜有墨子巡天望远镜(WFST, 2.5 米)、Sloan 数字巡天望远镜(2.5 米)、VLT 巡天望远镜(VST, 2.6 米)、JST250 巡天望远镜(2.6 米)、布兰柯望远镜(Blanco)等如下表 2 所示,这类望远镜通常具备大视场、高巡天效率、大焦面多色成像能力,并可扩展至无缝光谱或低分辨率光谱模式,以获取天体的测光与光谱信息。

表 2 国际上主要大视场巡天望远镜

名称	科学目标	光学结构	主焦比	视场	焦点类型	终端仪器
墨子巡天望远镜(WFST)	时域天文、太阳系普查、研究银河系结构、暗物质本质,绘制北天球深度多色星表、为其他观测设备提供候选目标	主焦式光学系统	F/1.92	直径 3 度	主焦	大靶面 CCD 拼接相机(7.65 亿像素)
VLT 巡天望远镜(VST)	可见光波段巡天,为 VLT 提供目标源,暗能量、暗物质研究	改进型 R-C+ 改正器	F/5.5(系统)	1.47 度(校正后)	卡焦	OmegaCAM(2.68 亿像素)
JST250 巡天望远镜	大规模成像巡天,宇宙学、星系形成、瞬变源发现	快焦比 R-C+ 三透镜改正器	F/1.5	3 度	卡焦	JPCam 相机
可见光和红外巡天望远镜(VISTA)	近红外波段巡天,星系演化、暗能量、银河系结构	R-C 结构	F/1.0	1.65 度直径	卡焦	VIRCAM(16 个红外探测器)
布兰柯望远镜(Blanco)	暗能量巡天、大规模成像巡天	R-C+ 五透镜改正器	原始 F/2.5	3 度(DES 改正器)	卡焦	DECam、其它仪器
梅奥尔望远镜(Mayall)	暗能量光谱巡天(DES)、大规模光谱巡天	最初通用,后改造	原始 F/2.5	3.2 度(DES)	改造后主焦	DESI 光纤定位器(5000 根光纤)

2.2.2 大视场巡天光学系统发展概况

大视场巡天望远镜的观测功能强调系统效率与数据通量的最大化。一方面,采用大口径(通常 2.5 米以上)与大视场(数平方度至数十平方度)协同设计,配合数十亿像素级的大焦面相机,使单次曝光即可覆盖广袤天区并获取数万至数十万天体的测光信息。另一方面,依托大焦面多通道成像与无缝光谱技术,望远镜通常配备多波段同时成像的滤光片系统,在一次曝光中获取多个波段数据。其主流技术路线为“R-C(或类似)反射系统+折射改正镜”或“主焦+改正镜”的混合光路,发展历程可分为以下三个阶段:

1. 开创与专用化阶段

斯隆数字巡天(SDSS)的 2.5 米望远镜是首个为大规模数字巡天专用设计的望远镜,具有开创意义。它采用“R-C 系统+双校正器”的光学设计,有效校正了像散、色差和畸变。其低畸变特性完美匹配了漂移扫描所需的“时间延迟积分”(TDI)成像模式,大幅提升了巡天效率。SDSS 的成功验证了“R-C+改正镜”技术路线的可行性,为后续所有巡天望远镜树立了设计标杆,开创了现代大型数字巡天的新范式^[32,33]。

2. 技术成熟与性能提升阶段

随着光学设计与加工技术的进步,新一代巡天望远镜在视场、像质和效率上均实现了显著提升,并成功拓展至近红外波段。如 VLT 巡天望远镜(VST, 2.6 米)是欧洲南方天文台专门为巡天任务建造的专用可见光巡天设备。采用改进型 R-C 系统,焦比 F/5.5,视场直径 1.47 度。配备 2.68 亿像素 OmegaCAM 相机,成像质量优于 0.7 角秒,畸变小于 0.01%。主镜和次镜采用 Sital 结晶陶瓷,通过主动光学系统实时控制,证明了 R-C 加多透镜改正器方案在大口径望远镜中的成熟性^[34-40]。

JST250 巡天望远镜(2.6 米)代表了当前大视场望远镜光学设计的更高水平。该望远镜针对 3 度超大规模视场进行深度优化,体现了快焦比设计的典范。光学系统由 F/1.5 的凹八次非球面主镜、F/2.2 的凸六次非球面次镜和三片式石英视场改正镜组成,结构极为紧凑,在 330—1100nm 波段范围内实现了 50% 能量直径 ≤ 0.27 角秒、80% 能量直径 ≤ 0.41 角秒的卓越成像质量,体现了超大视场与超高像质统一的设计巅峰^[41-44]。布兰柯望远镜(Blanco, 4 米)的案例则展示了另一条技术路径——将现有中型望远镜改造为顶级巡天设施的可能性。该望远镜主系统为卡塞格林式光学结构。为进行暗能量巡天(DES),在主焦点位置安装了五片改正镜组(含杜瓦窗),将有效视场扩大至 3 度,为暗能量相机(DECam)提供了优异的光学性能^[45-47]。可见光和红外巡天望远镜(VISTA, 4.1 米)是专为近红外巡天设计的大型设施,代表了该波段大视场巡天技术的重大突破。该望远镜光学系统的特点是主次镜系统 F/3.25 不单独成像,而是通过三片式石英校正透镜组(五面球面、一面非球面)同时校正离轴像差、场曲和色差,在 1.65 度直径(约 1.65 平方度)的大视场内实现 50% 环能直径 ≤ 0.36 角秒、80% 环能直径 ≤ 0.68 角秒的成像质量^[48-51]。

3. 中国特色与创新发展阶段

进入 21 世纪第二个十年,中国在大视场巡天领域实现了从跟跑到部分领跑的跨越,并注入了新的设计理念和技术特色。墨子巡天望远镜(WFST, 2.5 米)是中国标志性设施,坐落

于青海冷湖世界一流光学台址。采用国际先进主焦光学系统, 结合主动光学技术, 在 3 度视场内实现均匀高像质和极低畸变, 配备 7.65 亿像素相机, 成为北半球最具威力的光学时域巡天设备^[52]。

总之, 大视场巡天望远镜的光学系统正朝着更大视场、更快焦比、更优像质、更高集成度的方向发展。正在规划建设的下一代设施如薇拉·鲁宾天文台 (8.4 米), 采用更为独特的三反射镜结构, 在 3.5 度视场范围内实现接近衍射极限的像质, 其焦面配备 32 亿像素的 CCD 阵列, 代表了现代大视场巡天望远镜的巅峰。从 SDSS 的开创性探索, 到 VST、JST250 的性能优化, 再到 WFST 的台址与系统集成创新, 其演进路径始终以最大化巡天效率、深度和科学产出为根本导向。未来, 随着更大口径、更复杂光学系统的发展, 大视场巡天望远镜将继续在暗能量、时域天文、系外行星探测等前沿领域发挥不可替代的作用。

2.3 光谱巡天望远镜

2.3.1 光谱巡天望远镜科学目标

光谱巡天望远镜的科学目标以“物理参数测量”与“统计完备性”为核心特征, 广泛覆盖宇宙大尺度结构、银河系考古、星系演化及暗能量性质等前沿领域。其核心价值在于大规模、高效率地获取天体的光谱, 从而测量其径向速度、化学成分、距离、物理状态等关键参数。与成像巡天提供“形态”信息不同, 光谱巡天提供的是“物理”信息, 对于理解宇宙的组成、结构和演化具有不可替代的作用。典型的光谱巡天望远镜有郭守敬望远镜 (LAMOST, 4 米)、梅奥尔望远镜 (Mayall)、英澳望远镜 (AAT)、斯隆数字巡天望远镜 (SDSS) 等, 如下表 3 所示, 这类望远镜通常具备数平方度的大视场、数千根光纤的并行定位能力, 并可配备多台光谱仪阵列, 以单次观测获取数百至数千条天体光谱, 从而实现红移测量、化学元素丰度分析和三维宇宙图谱构建等科学目标。

2.3.2 光谱巡天光学系统发展概况

光谱巡天望远镜的光学设计为“光纤喂食”这一独特需求进行了深度优化, 其核心要求是远心性、低几何畸变、平坦的焦面和大视场, 以确保光能高效耦合进光纤并能精确定位大量目标。与通用望远镜或成像巡天望远镜不同, 光谱巡天望远镜的光学系统具有鲜明的技术特点: 远心光路设计确保主光线垂直入射焦平面, 以减小光纤焦比退化效应; 低几何畸变 (如 SDSS 要求全视场畸变 <12 微米) 保障光纤精确定位; 集成大气色散补偿器以动态补偿不同天顶距下的色散效应; 焦平面为光纤阵列提供平整空间, 焦比通常设计为 $F/5$ 左右以匹配光纤接收效率。在这些设计原则的指导下, 光谱巡天望远镜的光学系统经历了一条从专用化设计到系统革新、再到革命性突破的清晰路径。

1. 专用化设计的开端

在 2.2 节大视场巡天望远镜的讨论中, 斯隆数字巡天望远镜 (SDSS, 2.5 米) 依托 R-C 结构配合改正镜组实现的极低畸变、平坦焦面与优异像质, 在焦面部署双光纤光谱仪系统, 可同时获取 640 个天体光谱, 光谱覆盖 380-920nm。单夜观测可更换 6-9 块预钻孔铝板, 获取多达 5000 个天体光谱数据, 开创了光谱巡天专用化设计的先河^[33]。

2. 系统革新与能力突破

表 3 国际上主要的光谱巡天望远镜

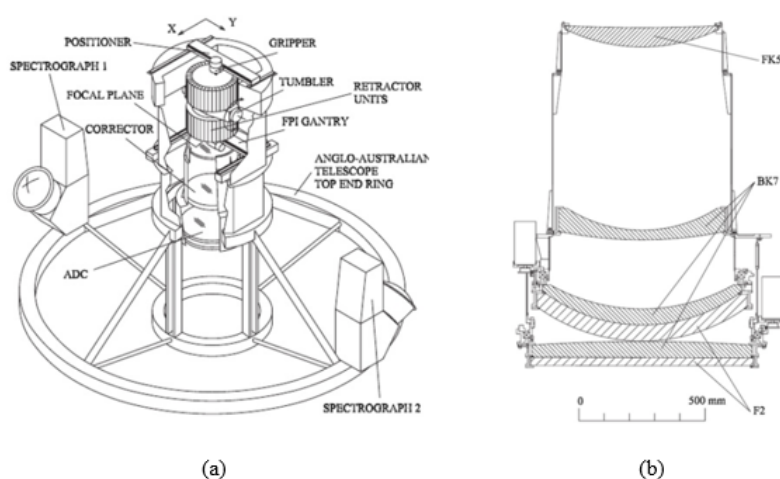
名称	科学目标	光学结构	主焦比	视场	终端仪器	完成日期
郭守敬望远镜 (LAMOST)	银河系恒星考古、宇宙大尺度结构、特殊天体普查	主动光学反射施密特系统	F/5	直径 5°	16 台光纤馈入式光谱仪 (4000 根光纤)	2009 年
Sloan 数字巡天望远镜 (SDSS)	数字化巡天, 宇宙大尺度结构、星系演化、类星体研究	双校正器 R-C 系统	F/2.25	直径 3°	成像相机 (30 片 2048×2048 CCD)、双光纤光谱仪 (640 根光纤)	1998 年
英澳望远镜 (AAT)	星系红移巡天、多目标光谱观测	主焦点 + 校正镜	F/3.3	2° (2dF 系统)	2dF (400 根光纤)、光谱仪、成像仪	1974 年
梅奥尔望远镜 (Mayall)	DESI 多目标光谱巡天	R-C 系统	F/2.7	3° (DESI)	DESI 光谱仪 (5000 根光纤)	1973 年

随着科学目标对光谱数量需求的剧增, 光学系统出现了两种革新路径:

一是传统路径的升级: 在已有优良光学系统的望远镜上, 升级焦面仪器, 这一路径充分体现了光谱巡天光学系统对焦面设计与光纤定位能力的持续强化。英澳望远镜 (AAT, 3.9 米) 是这一路径的典型代表, 外观如图 4 所示, 其通过在主焦点加装“2 度视场” (2dF) 系统, 将传统通用望远镜成功改造为高效的光谱巡天平台。2dF 采用机器人定位系统, 可在 2° 视场内独立定位多达 400 根光纤, 定位精度达 0.3 角秒^[53, 54]。梅奥尔望远镜 (Mayall, 4 米) 则通过更为彻底的改造, 在其主焦点加装承载 5000 根光纤的 DESI 改正器与定位系统, 配合大气色散补偿器和 10 台三通道光谱仪并行工作, 实现了单次观测同时获取数万天体红移信息的突破性能力, 转型为当今最强大的光谱巡天设施之一^[55]。

二是革命性路径的创造: 中国科学家提出主动光学反射施密特系统创新构想, 采用中星仪式卧式结构: 24 块可变形子镜组成的主动反射施密特改正镜和 37 块球面子镜组成的固定球面主镜, 首次实现 4 米有效口径与 5 度大视场兼得, 焦面容纳 4000 根光纤, 突破传统施密特望远镜口径与视场相互制约的瓶颈, 使中国在大规模光谱巡天领域跃居国际领先地位^[5]。

总之, 光谱巡天光学系统的发展始终围绕“多目标、高效率、大样本”核心, 从 SDSS 开创专用化设计, 到 AAT、Mayall 通过升级改造实现能力跃升, 再到 LAMOST 以革命性构型突破传统限制。当前 DESI 等项目正将光谱获取规模推向千万量级, 光谱巡天将在精密宇宙学时代发挥更为关键的作用。



注: (a) 2dF 顶部示意图, (b) AAT 改正镜结构图。AAT 改正镜采用四片式结构, 前两片是直径接近 1 米的可旋转胶合棱镜双合透镜, 将大气色散补偿器集成到了改正镜内部, 可以有效抵消因地球大气对不同波长光折射率不同而造成的色散, 显著提升宽波段观测的像质。

图 4 AAT 主焦点 F/3.3 改正镜光路图

3 中等口径天文望远镜的光学设计与技术演进

中等口径天文望远镜的光学系统设计并非静态组件的简单堆砌, 而是一个受核心科学目标 (如超大视场、高分辨像质与高度终端兼容性) 驱动, 并在物理极限与工程约束下进行多维技术折中与演进的复杂系统工程。历经数十年的发展, 里奇-克莱琴 (R-C) 构型凭借其卓越的全局像差校正能力, 已确立为该领域的基石。为响应大规模巡天与多目标光谱等前沿观测需求, 现代 R-C 系统衍生出多焦点布局与大视场改正两大核心技术路径。本章旨在超越对单一光学组件的静态描述, 以技术演进为主线, 系统剖析核心光学架构背后的设计哲学、工程执行中的多目标折中 (Trade-offs) 考量, 以及面向极致观测性能的全局优化规律。

3.1 R-C 系统的确立与多焦点构型的演进

在本文梳理的代表性中等口径望远镜中, R-C 系统或其改进型构成了主流的光学设计。经典卡塞格林系统主镜为抛物面, 仅能校正球差, 存在严重的轴外彗差, 导致有效视场较小。为克服这一局限, R-C 系统被广泛采用。其核心在于主次镜均采用双曲面设计 (如 SOAR 望远镜主镜圆锥常数 -1.002667、次镜 -5.2951), 该结构能够同时校正球差和彗差, 从而在较大视场内获得均匀良好的像质。即, R-C 系统可以在有限口径下实现较大视场内的优质成像, 因此成为现代通用与大视场巡天望远镜的基础构型^[52]。

R-C 系统像质优良, 为提升望远镜的观测灵活性与多终端兼容性, 可以通过引入额外的反射镜以形成多焦点系统, 这也是通用望远镜的长期重要发展方向。例如, 威廉·赫歇尔望远镜 (WHT) 通过可互换副镜实现主焦 (F/2.8)、卡焦 (F/11) 和奈焦 (F/11) 的切换; 丽江

2.4 米望远镜利用可旋转平面镜实现奈焦和卡焦的快速切换；SOAR 望远镜则通过旋转 45° 的第三反射镜实现两个奈氏焦点和两个折叠卡焦的切换。

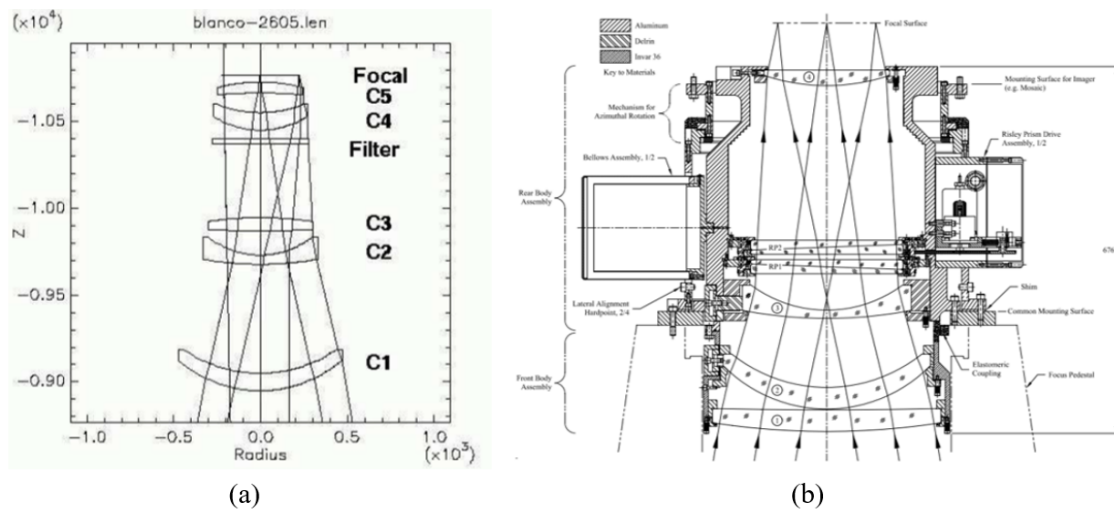
多焦点布局在提升仪器兼容性的同时，也引入了系统级的工程折中。增加的反射面不可避免地导致光能损失；同时，光路转换机构增加了光学对准的难度及机械重力形变风险。在系统设计中，统一各焦点的焦比（如紫金山天文台 2.5 米望远镜各焦点均采用 F/8.2）以实现后段终端仪器的模块化与互换，是提升系统通用性的关键设计考量。

3.2 大视场改正镜的技术演进与设计权衡

为纯反射式 R-C 系统虽然有效校正了球差与彗差，但仍存在固有的像散和匹兹伐场曲，导致其优良像质视场通常局限于 0.5° 以内。为满足现代大规模巡天对数度级大视场的需求，在焦面前方引入由多片透镜构成的折射式宽视场改正镜组，成为扩展视场的主要技术路径。在大视场改正镜的设计中，主要存在主焦和卡焦两条技术路线，二者在光效、视场与工程实现上各有侧重。

1. 主焦改正路线（如 Blanco、Mayall/DESI、WHT）：

改正镜组置于主镜焦点附近，如图 5 所示。该布局光线仅经一次反射，光通量高，且易于实现 3° 以上的超大视场。然而，该路线对工程结构提出了挑战：大口径改正镜与焦面探测器位于望远镜顶端，引入了显著的重量负载，容易导致镜筒弯沉与重心前移，进而要求系统具备极高的机械结构刚度或复杂的实时主动姿态补偿系统。



注：(a) Blanco(DES) 五片式改正镜组，(b) Mayall 主焦点 F/3.1 改正镜。Blanco(DES) 五片式改正镜组中 C1 至 C5 采用熔融石英材质，C1、C3、C5 为双球面设计，而 C2 和 C4 各含一个高精度非球面面型。Mayall 主焦点 F/3.1 改正镜核心功能是校正像差并扩大望远镜的可用视场，同时对大气色散进行补偿。

图 5 主焦改正镜图

2. 卡焦改正路线（如 Sloan/SDSS、JST250、VST）：

改正镜组置于次镜之后。此构型的优势在于光线经主次镜两次反射后系统焦比变慢, 避免了主焦系统中因大光焦度透镜引入的严重色差; 此外, 卡焦位置仪器安装空间充裕、重心较低, 适合承载重型终端设备。例如 SDSS 望远镜在 3 度视场上实现了优于 $12\ \mu\text{m}$ 的低畸变控制。但为实现与主焦同等的视场, 卡焦路线需显著增加次镜尺寸, 导致中心遮挡率上升, 对系统集光力和衍射像质产生一定影响。为校正大视场引入的色差, 改正镜设计通常需采用具有互补色散特性的光学材料(如特种高折射率低色散玻璃)以实现复消色差。但在工程实践中, 大尺寸、高均匀性特种光学毛坯的熔炼难度大且成本高昂。

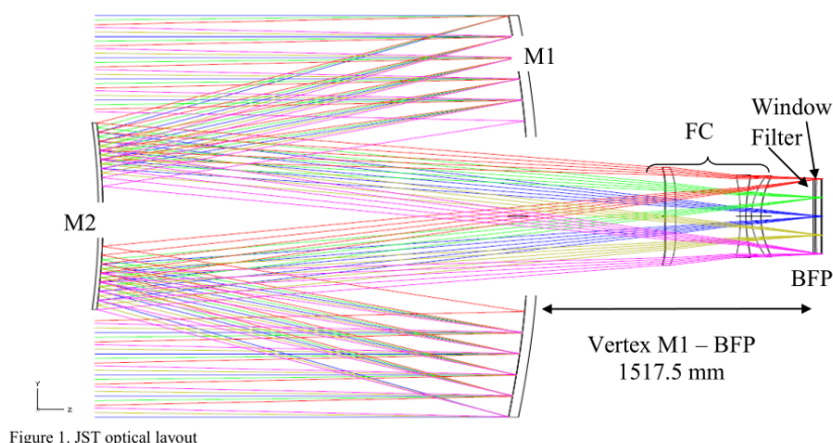


Figure 1. JST optical layout

图 6 JST250 望远镜光学系统

面对材料获取的约束, 光学设计常需进行策略性权衡。如图 6, 以 JST250 巡天望远镜为例, 为规避大尺寸特种玻璃毛坯的制备限制, 其三片式改正镜均采用常用的石英材料。在缺乏材料色散互补的条件下, 为有效控制畸变和色差, 该设计采用了四个高次非球面, 最大非球面偏离量达 8 毫米。这一设计策略本质上是材料约束转化为对高次非球面加工与高精度面形检测技术的挑战, 体现了工程约束边界下的系统设计权衡。基础 R-C 系统提供了优秀的像质核心, 但为满足特定的科学功能(如多仪器兼容、超大视场巡天), 必须对其进行光学拓展。主要拓展方向分为多焦点设计与大视场改正镜组设计两类。

3.3 光学系统的全局联合优化策略

在确定基础光学构型后, 为最大化系统性能, 现代光学设计方法逐渐由传统的局部组件独立优化向全局系统联合优化的范式转变, 这一过程深刻体现了多阶像差校正之间的相互制约关系。传统的光学设计多采用分步策略, 即优先实现主次镜系统的像差极小化, 随后匹配后段改正系统。而现代联合优化理念则将望远镜的光学全链路(涵盖主次镜、改正镜组、大气色散补偿器乃至探测器封装窗口)视为耦合的整体, 进行端到端的一体化设计与优化。

可见光和红外巡天望远镜(VISTA)是该联合优化策略的典型代表光路如图 7 所示。作为专用的单焦点巡天设备, VISTA 并未寻求将其 F/1.0 快焦比主镜和次镜独立优化至衍射极限。相反, 设计中适度放宽了主次镜的像差约束, 允许其残留特定像差, 并利用相机内的三

统正逐步向增加反射面数量的复杂折反射构型演进。例如, 薇拉·鲁宾天文台 (Vera C. Rubin Observatory) 突破了传统两镜设计的局限, 采用了独特的三反射镜结合透射改正镜组的设计。通过将主要的像差校正任务前置于三面反射镜, 该构型极大减轻了后端折射镜组的体量与设计压力, 在极宽波段内提供了更为平坦的广域像场, 代表了提升系统综合探测能力的关键演进方向。

突破传统硬件极限逐渐依赖于跨学科技术的深度融合。一方面, 随着曲面焦平面阵列探测器技术的演进, 光学设计可免受绝对平坦焦面的强约束, 从而显著简化改正镜组结构, 乃至在特定应用中省却场曲校正元件。另一方面, 计算光学 (Computational Optics) 理念的引入, 允许前端光学系统适度保留确定性的残余像差, 通过后端的计算图像重构算法予以数字补偿。“光-机-电-算”一体化的系统级协同设计, 将有效缓解前端大口径光学元件在设计、加工及装调阶段的工程压力, 构筑下一代高性能望远镜技术发展的新范式。

4 总 结

中等口径光学望远镜的发展, 清晰地呈现出一条以科学目标为根本驱动、以光学设计为核心实现路径的技术演进脉络。本文通过对国际代表性设施的梳理, 得出以下核心结论与展望。

结论表明, 光学系统的演进始终服务于特定的科学雄心。R-C 结构之所以成为绝对主流, 源于其能同时校正球差和彗差, 为实现“多功能高像质”提供了最佳基础。为满足更高阶的科学需求, 光学系统沿两个方向深度拓展: 一是通过多焦点布局提升观测灵活性, 以适应通用望远镜的“仪器集群”; 二是通过大视场改正镜设计极致优化巡天效率, 乃至发展出 LAMOST 式的革命性构型以破解“口径-视场”矛盾。现代设计理念已从追求局部组件完美, 转向全系统联合优化, 将主次镜、改正镜组与终端探测器视为一体进行设计, 旨在实现科学目标下的全局性能最优。

展望未来, 中国的中等口径望远镜光学设计正迎来战略机遇期。一方面, 可依托青海冷湖等世界级台址, 发展面向衍射极限观测的专用系统, 并利用一体化协同设计方法优化性能。另一方面, 需持续挑战更大口径与大视场兼得的光学构型, 为下一代宇宙学巡天奠定基础。同时, 光学系统需更好地响应时域天文与多信使天文对快速观测与模式切换的迫切需求。最终, 推动光学设计工具与超高精度制造工艺的自主突破, 是锻造下一代“观天巨眼”、支撑前沿科学发现的根本保障。

参考文献:

- [1] Jannuzi B T. *Astronomical Optics: Design, Manufacture, and Test of Space and Ground Systems V*: Vol. 13624. SPIE, 2025: 1362402
- [2] Cai Z, Huang S, Liu Y, et al. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2025, 68: 280403
- [3] 张景旭. *中国光学*, 2012, 5: 327
- [4] *云南科技管理*, 2016, 29: 88
- [5] Cui X Q, Zhao Y H, Chu Y Q, et al. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2012, 12: 1197

- [6] 范君柳, 吴泉英, 王福亮, 等. 光学精密工程, 2011, 19: 2877
- [7] Djupvik A A, Andersen J. Highlights of Spanish astrophysics V. Springer, 2010: 211
- [8] Telting J, Avila G, Buchhave L, et al. Astronomische Nachrichten, 2014, 335: 41
- [9] Tull R. American Astronomical Society Meeting Abstracts# 196: Vol. 196. 2000: 35
- [10] Smith H J, Barnes T G. Publications in Astronomy, Report of the Optical Conference on the 7.6-Meter Telescope, Austin, Texas, March 1982, Austin: University of Texas, 1984, edited by Smith, Harlan J.; Barnes, Thomas G. 1984
- [11] Kelton P W. Telescope Structures, Enclosures, Controls, Assembly/Integration/Validation, and Commissioning: Vol. 4004. SPIE, 2000: 438
- [12] Tull R G, MacQueen P J, Sneden C, et al. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1995, 107: 251
- [13] Smith H. International Astronomical Union Circular, 1970, 2209: 1
- [14] Andersen T, Larsen O, Owner-Petersen M, et al. Progress in Telescope and Instrumentation Technologies, ESO Conference and Workshop Proceedings, ESO Conference on Progress in Telescope and Instrumentation Technologies, ESO, Garching, 27-30 April 1992, Garching: European Southern Observatory (ESO), 1992, edited by Marie-Helene Ulrich, p. 311: Vol. 42. 1992: 311
- [15] Abbott T M, Aspin C, Sorensen A N, et al. Optical and IR Telescope Instrumentation and Detectors: Vol. 4008. SPIE, 2000: 714
- [16] Baldwin J, Tubbs R, Cox G, et al. Astronomy & Astrophysics, 2001, 368: L1
- [17] Von Essen C, Stefansson G, Mallonn M, et al. Astronomy & Astrophysics, 2019, 628: A115
- [18] 黄晨, 王建军, 薛莉, 等. 红外与激光工程, 2016, 45: 170
- [19] Ridings A W, Tulloch S M, Basson R A. Ground-based Telescopes: Vol. 5489. SPIE, 2004: 552
- [20] Agócs T, Abrams D C, Lhomé E, et al. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy V: Vol. 9147. SPIE, 2014: 2238
- [21] 何鑫, 姜翔, 顾伯忠, 等. 红外与激光工程, 2022, 51: 374
- [22] 王传军. 博士论文, 中国科学院大学 (中国科学院云南天文台), 2019
- [23] 刘辰旭, 郝蕾. 科学, 2016, 68: 4
- [24] Qingyu P. 2013 中国天文学会学术年会文集, 2013
- [25] Sebring T A, Cecil G N, Moretto G. Advanced Technology Optical/IR Telescopes VI: Vol. 3352. SPIE, 1998: 62
- [26] Tokovinin A, Cantarutti R, Tighe R, et al. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2010, 122: 1483
- [27] Tokovinin A, Mason B D, Mendez R A, et al. The Astronomical Journal, 2024, 168: 28
- [28] Krabbendam V L, Heathcote S, Schumacher G, et al. Ground-based Telescopes: Vol. 5489. SPIE, 2004: 615
- [29] Ashe M C, Schumacher G. Advanced Telescope and Instrumentation Control Software: Vol. 4009. SPIE, 2000: 48
- [30] Kenemuth J R, McNally J J, Passaro J R, et al. Adaptive Optics. Optica Publishing Group, 1996: AMB
- [31] Xiao X, Zheng L, Yi-ding P, et al. Acta Astronomica Sinica, 2025, 66
- [32] York D G, Adelman J, Anderson J E, et al. The Astronomical Journal, 2000, 120: 1579
- [33] Gunn J E, Siegmund W A, Mannery E J, et al. The Astronomical Journal, 2006, 131: 2332
- [34] Capaccioli M, Arnaboldi M, Mancini D, et al. IMTC/99. Proceedings of the 16th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (Cat. No. 99CH36309): Vol. 2. IEEE, 1999: 776
- [35] de Jong J T, Verdoes Kleijn G A, Kuijken K H, et al. Experimental Astronomy, 2013, 35: 25
- [36] Schipani P, Covino S, Snik F, et al. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy X: Vol. 13096. SPIE, 2024: 2676
- [37] Abdulkadyrov M A. Optifab 2003: Technical Digest: Vol. 10314. SPIE, 2003: 62
- [38] Marra G, Mancini D, Cortecchia F, et al. Optical Design and Engineering II: Vol. 5962. SPIE, 2005: 608
- [39] Mancini D, Sedmak G, Brescia M, et al. Telescope Structures, Enclosures, Controls, Assembly/Integration/Validation, and Commissioning, 2000, 4004: 79
- [40] Grado A, Capaccioli M, Limatola L, et al. arXiv preprint arXiv:11021588, 2011
- [41] Cenarro J, Marin-Franch A, Moles M, et al. IAU General Assembly, 2015, 29: 2257744
- [42] Cenarro A, Ederoclite A, Íñiguez C, et al. Ground-based and Airborne Telescopes VII: Vol. 10700. SPIE, 2018: 93
- [43] Marín-Franch A, Rueda-Teruel S, López-Alegre G, et al. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IX: Vol. 12184. SPIE, 2022: 190
- [44] Brauneck U, Sprengard R, Bourquin S, et al. Astronomical Optics: Design, Manufacture, and Test of Space and Ground Systems: Vol. 10401. SPIE, 2017: 313
- [45] Kent S, Bernstein R, Abbott T, et al. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy: Vol. 6269. SPIE, 2006: 1012
- [46] Quinn P J, Bridger A. Optimizing Scientific Return for Astronomy through Information Technologies, 2004, 5493

-
- [47] Marshall J, Kent S M, Diehl H T, et al. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV: Vol. 8446. SPIE, 2012: 1781
 - [48] Sutherland W, Emerson J, Dalton G, et al. Astronomy & Astrophysics, 2015, 575: A25
 - [49] 彭尧, 张景旭, 杨飞, 等. 激光与红外, 2016, 46: 139
 - [50] Jeffers P, Henry D. Ground-based and Airborne Telescopes III: Vol. 7733. SPIE, 2010: 935
 - [51] Dalton G, Caldwell M, Ward A, et al. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy: Vol. 6269. SPIE, 2006: 314
 - [52] 徐霄, 娄铮, 平一鼎, 等. 天文学报, 2025, 66
 - [53] Taylor K, Gray P M. Instrumentation in Astronomy VIII: Vol. 2198. SPIE, 1994: 136
 - [54] TAYLOR K. Wide Field Spectroscopy and the Distant Universe, 1995: 15
 - [55] Sprayberry D, Goble W, Allen L, et al. Ground-Based and Airborne Telescopes V: Vol. 9145. SPIE, 2014: 1421

A Review of Optical Systems for Medium-Sized Astronomical Telescopes

DONG Yunfen^{1,2,3}, PING Yiding^{1,2}, LI Rongxiang³, LI Haibo³

(1. School of Astronomy and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 2. Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023, China; 3. CAS Nanjing Astronomical Instruments Co., Ltd, Nanjing 210042, China)

Abstract:

Medium-sized optical telescopes (2–4 m) play a strategic role in ground-based astronomy, balancing construction cost, flexibility, and scientific capability. This paper systematically reviews their optical systems, categorizing them into three types based on scientific objectives and functional design: multi-instrument general-purpose telescopes, wide-field survey telescopes, and spectroscopic survey telescopes.

The Ritchey-Chrétien (R-C) configuration has become the dominant design in this aperture class due to its simultaneous correction of spherical aberration and coma. Two main technological derivatives have emerged: one employs switchable secondary mirrors or fold mirrors to achieve multi-focal capabilities, enhancing instrument flexibility; the other integrates wide-field refractive correctors to expand the field of view from arcminutes to several degrees, maximizing survey efficiency. Through case studies of over twenty representative facilities—including the Lijiang 2.4 m, Nordic Optical Telescope, William Herschel Telescope, VLT Survey Telescope, Sloan Digital Sky Survey Telescope, JST250, and LAMOST—this paper identifies two core design philosophies: “full-system co-optimization,” which treats the telescope and corrector as an integrated optical system; and “deep integration of active/adaptive optics,” which enables real-time wavefront control for sustained high image quality. Finally, the paper discusses future trends in optical system development, highlighting recent advances in China such as LAMOST’s reflective Schmidt system and the Wide Field Survey Telescope’s prime focus design.

Key words: medium-aperture telescopes; optical system; Ritchey-Chrétien (R-C) configuration; active optics; multi-instrument