

文章编号: 1672-8785(2026)01-0042-14

## 南极近红外巡天望远镜关键技术研究

李晓燕<sup>1,2</sup> 张东阁<sup>3</sup> 王小坤<sup>3</sup> 刘婷婷<sup>1,2</sup> 杨光<sup>1,2</sup> 李正阳<sup>1,2</sup>  
陈俊林<sup>3</sup> 黄凌锋<sup>3</sup> 杨臣威<sup>4</sup> 温海焜<sup>1,2</sup> 魏彦峰<sup>3</sup>  
傅雨田<sup>3</sup> 官雪非<sup>1,2</sup> 袁祥岩<sup>1,2</sup>

- 中国科学院南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042;
- 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;
- 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;
- 中国极地研究中心(中国极地研究所), 上海 200136)

**摘 要:** 红外天文学对探索宇宙至关重要, 但受限于探测器的性能和优良台址的稀缺, 我国在红外波段的天文观测设备严重不足。南极昆仑站具有干燥、寒冷、长极夜等独特的自然条件, 为开展近红外天文观测提供了得天独厚的优势, 但也面临着恶劣环境、无人值守、能源有限、积雪结霜等挑战。本文总结了南极近红外天文观测的优势与挑战、当今国内外在南极红外天文领域的现状与规划, 分析了南极红外天文望远镜的关键技术以及已有的技术积累(主要包括望远镜本体及仪器自身辐射抑制方法、镜面除冰霜方法、红外探测器技术、望远镜控制系统、杜瓦/冷箱优化设计等), 为未来南极红外望远镜的研制提供了技术参考。

**关键词:** 红外天文学; 南极望远镜; 红外探测器; 镜面除霜; 红外背景抑制; 杜瓦/冷箱

中图分类号: P111 文献标志码: A DOI: 10.11972/j.issn.1672-8785.2026.01.004

## Research on Key Technologies of the Antarctic Near-Infrared Survey Telescope

LI Xiao-yan<sup>1,2</sup>, ZHANG Dong-ge<sup>3</sup>, WANG Xiao-kun<sup>3</sup>, LIU Ting-ting<sup>1,2</sup>, YANG Guang<sup>1,2</sup>, LI Zheng-yang<sup>1,2</sup>,  
CHEN Jun-lin<sup>3</sup>, HUANG Ling-feng<sup>3</sup>, YANG Chen-wei<sup>4</sup>, WEN Hai-kun<sup>1,2</sup>, WEI Yan-feng<sup>3</sup>,  
FU Yu-tian<sup>3</sup>, GONG Xue-fei<sup>1,2</sup>, YUAN Xiang-yan<sup>1,2</sup>

- Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China;
- CAS Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Nanjing 210042, China;

收稿日期: 2025-12-17

基金项目(Foundation Item): 国家自然科学基金项目(12533012)

作者简介(Biography): 李晓燕(1982-), 女, 河南信阳人, 研究员, 主要从事天文望远镜控制技术研究。

E-mail: xyli@niaot.ac.cn

3. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

4. China Polar Research Center (Polar Research Institute of China), Shanghai 200136, China)

**Abstract:** Infrared astronomy is crucial for exploring the universe, but due to limitations in detector performance and the scarcity of suitable sites, China suffers from a severe shortage of astronomical observation equipment in the infrared band. Kunlun Station in Antarctica possesses unique natural conditions such as dryness, cold, and long polar nights, providing unparalleled advantages for near-infrared astronomical observations. However, it also faces challenges such as harsh environments, unmanned operation, limited energy, and snow and frost accumulation. This paper summarizes the advantages and challenges of near-infrared astronomical observation in Antarctica, the current status and plans for Antarctic infrared astronomy both domestically and internationally, and analyzes the key technologies of Antarctic infrared telescopes and existing technological accumulations (mainly including methods for suppressing radiation from the telescope itself and instruments, methods for de-icing mirrors, infrared detector technology, telescope control systems, and optimized dewar/cryostat design), providing technical references for the future development of Antarctic infrared telescopes.

**Key words:** infrared astronomy; Antarctic telescope; infrared detector; mirror defrosting; infrared background suppression; dewar/cryostat

## 0 引言

在天文学中, 红外辐射通常是指波长范围约为  $0.75 \sim 350 \mu\text{m}$  的电磁波<sup>[1]</sup>, 一般可划分为近红外 ( $0.75 \sim 2.5 \mu\text{m}$ )、中红外 ( $2.5 \sim 25 \mu\text{m}$ ) 和远红外 ( $25 \sim 350 \mu\text{m}$ ) 三个子波段<sup>[2]</sup>。地球大气对红外光的透过窗口主要位于近红外和中红外区域。然而, 由于中红外波段受到大气自身热辐射的强烈影响, 天光背景噪声极高, 因此地面红外天文观测主要集中在近红外波段。

近年来, 红外天文观测凭借其独特优势在国际上受到日益广泛的重视。在生命起源研究方面, 许多与地外生命息息相关的分子(如甲烷、水、二氧化碳)的特征谱线都集中在红外波段。通过分析这些谱线, 能够深入探究系外行星的大气成分、行星的形成机制等关键问题。在宇宙起源研究方面, 由于宇宙学红移, 宇宙早期形成的星系发出的紫外和可见光辐射传播至地球时, 波长已移至红外波段。因此, 红外观测是发现这些遥远早期星系并刻画其特性的最有效手段<sup>[3]</sup>。

作为地球上最干燥、最寒冷的大陆, 南极独特的地理位置和极端的气候条件为近红外天文观测创造了良好机会。本文首先讨论在南极开展近红外天文观测的优势、仪器研制和运行

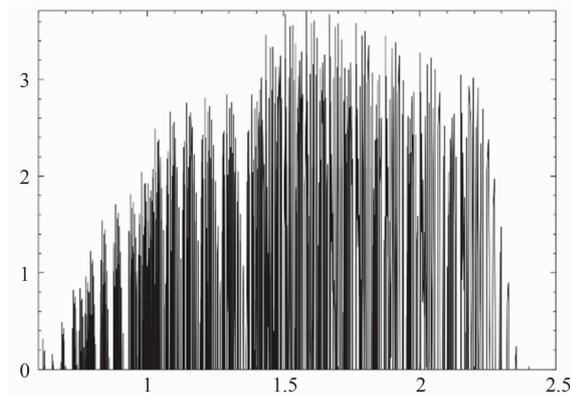
面临的挑战, 然后从多个角度分析南极近红外巡天望远镜的关键技术。

## 1 南极近红外天文的优势与挑战

南极内陆冰盖的最高点冰穹 A 位于  $80^{\circ}22'00''\text{S}$ 、 $77^{\circ}21'11''\text{E}$ , 海拔 4093 m。实测数据表明: 其夏季气温在  $-30 \sim -50^{\circ}\text{C}$  之间, 相对湿度为  $55\% \sim 70\%$ ; 冬季气温在  $-45 \sim -80^{\circ}\text{C}$  之间, 相对湿度为  $30\% \sim 55\%$ ; 冬季风速较夏季略大; 在 14 m 高度范围内, 高度越高, 平均风速越大; 4 m 高处的夏季平均风速为 4 m/s, 冬季平均风速为 4.5 m/s<sup>[4]</sup>, 大气边界层厚度约为 14 m<sup>[5]</sup>, 自由大气视宁度的中值为  $0.31''$ , 最佳值为  $0.13''$ <sup>[6]</sup>。

这样的自然条件对于近红外天文观测具有独特的优势。首先, 水蒸气是红外辐射的主要吸收源之一。作为地球上最干燥的大陆, 南极大气中的水汽含量极低, 使得红外辐射能够更有效地穿透大气层。其次, 红外天文观测的背景噪声主要来自大气和望远镜自身的热辐射, 而南极的低温环境显著降低了天空背景辐射和仪器热辐射噪声, 提高了红外观测的灵敏度和信噪比。此外, 南极连续数月的极夜期以及  $80\%$  以上的高晴夜率<sup>[7]</sup>, 为天文学家提供了长时间连续观测的机会。

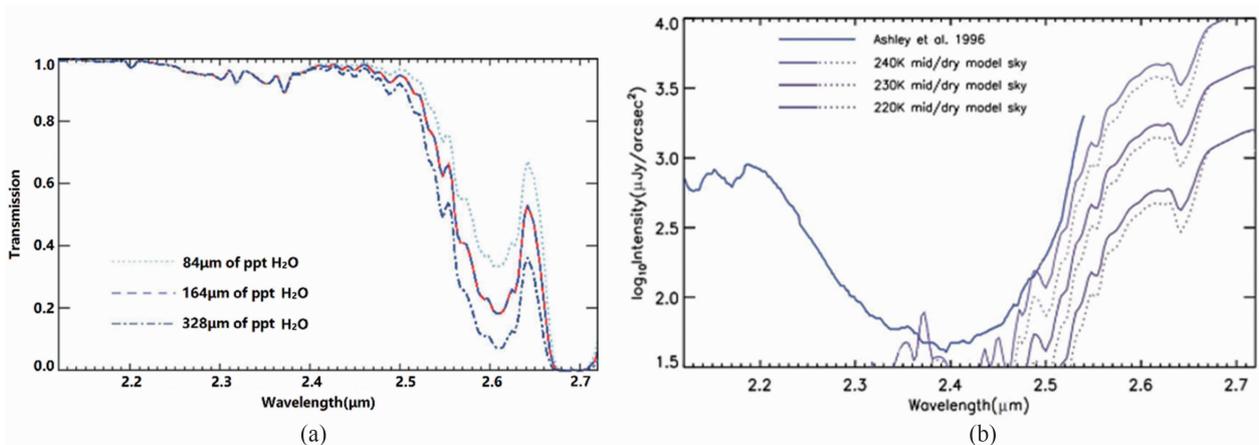
大气辉光的发射线, 尤其是羟基(OH)在

图 1 羟基谱线在不同波段的强度分布图<sup>[8]</sup>Fig. 1 Intensity distribution of hydroxyl spectral lines in different bands<sup>[8]</sup>

近红外波段的发射线，对地基望远镜的红外天文观测影响较大。如图 1 所示，在  $1\sim 2.3\ \mu\text{m}$  波段，OH 谱线分布密集，而  $2.25\sim 2.5\ \mu\text{m}$  的  $K_{\text{dark}}$  波段位于大气辉光强度较低的区域<sup>[8]</sup>，能够显著降低大气辉光的影响，有效提高信噪比，进而提升望远镜的探测性能。如图 2 所示，在  $K_{\text{dark}}$  波段，南极的大气透过率高，且红外背景辐射约为中纬度台址的  $1/40$ 。 $2.25\sim 2.5\ \mu\text{m}$  的  $K_{\text{dark}}$  波段是在南极开展红外观测的最优波段<sup>[8]</sup>。

近年来，国际上在南极已有或即将部署多台红外望远镜(见表 1)。2008 年左右，意大利主导研制的 80 cm 红外望远镜——国际机器人南极红外望远镜(International Robotic Antarctic

Infrared Telescope, IRAIT)<sup>[9]</sup>被运输到南极冰穹 C 进行安装。由于部分系统出现问题，IRAIT 仅完成工程测试，并未投入常规科学运行。2012 年，ASTEP South 望远镜在南极冰穹 C 成功部署<sup>[10]</sup>。该望远镜用于系外行星和变星的高精度测光观测，其口径为 40 cm，视场为  $1\ \text{deg}^2$ ，主要工作波段为可见光的 R 波段。澳大利亚和美国也持续在多台红外望远镜上迭代相关技术。2018 年，Palomar Gattini-IR 望远镜在美国 Palomar 天文台投入试观测。该望远镜的口径为 30 cm，视场为  $25\ \text{deg}^2$ ，工作波段为 J 波段<sup>[11]</sup>。2023 年，DREAMS 望远镜<sup>[12]</sup>在澳大利亚 Siding Spring 天文台开展试观测。该望远镜的口径为 50 cm，视场为  $3.8\ \text{deg}^2$ ，工作波段覆盖 Y、J、H 波段，配备了高灵敏度红外探测器(7.8 兆像素)。澳大利亚和美国近期计划研制一台口径为 26 cm 的全制冷望远镜——Cryoscope Pathfinder，于 2026 年安装在南极冰穹 C，其焦比为  $f/2$ ；采用创新的双弯月改正镜设计，视场为  $16\ \text{deg}^2$ ；采用像元间距为  $18\ \mu\text{m}$  的  $2048\times 2048$  碲镉汞探测器，像元分辨率为  $7.1''/\text{pixel}$ ，工作波段为  $2.25\sim 2.5\ \mu\text{m}$  的  $K_{\text{dark}}$  波段<sup>[13]</sup>。该望远镜是未来计划中的 Cryoscope 望远镜(口径为  $1\sim 1.2\ \text{m}$ 、视场将达  $50\ \text{deg}^2$ )的先行项目<sup>[14]</sup>。

图 2 南极  $K_{\text{dark}}$  波段：(a)大气透过率高；(b)红外背景辐射低<sup>[8]</sup>Fig. 2 Antarctic  $K_{\text{dark}}$  band: (a) high atmospheric transmittance; (b) low infrared background radiation<sup>[8]</sup>

中国天文学界一直积极推动南极红外天文的发展(见表 2)。2019 年, 中国科学技术大学研制的近红外天光背景测量仪(Near-Infrared Sky Brightness Monitor, NISBM)被安装在位于南极冰穹 A 地区的昆仑站, 首次获得了南极昆仑站 J、H、Ks 波段的夜空天光背景数据(采用铟镓砷探测器)<sup>[14]</sup>。2023 年, 中山大学南极红外双筒望远镜(Antarctic Infrared Binocular Telescope, AIRBT)在冰穹 A 成功安装。该望远镜同样采用铟镓砷探测器, 由两台 15 cm 口径的红外望远镜组成, 能够同时在 J、H 波段进行双波段红外观测。2024 年, 第 40 次南极科考队在冰穹 A 成功安装了南极近红外望远镜<sup>[15]</sup>。该望远镜的口径为 15 cm, 视场大小为  $0.87^\circ \times 0.69^\circ$ , 工作波段为 J 波段; 采用 SONY-IMX990 铟镓砷探测器, 像元分辨率为  $2.5''/\text{pixel}$ , 全视场平均像质为 1.4 像素。相关团队利用该望远镜完成了白天恒星观测、近红外天空亮度背景测量, 以及近地轨道卫星和空间碎片的白昼观测实验<sup>[16]</sup>。中国科学院南京天文光学技术研究所计划于 2026 年在南极昆仑站部署南极巡天望远镜 AST3-3, 其有效口径为 50 cm, 焦比为 4.48; 采用 4 片像元间距为  $15 \mu\text{m}$  的  $640 \times 512$  碲镉汞探测器, 像元

分辨率为  $1.38''/\text{pixel}$ , 视场大小为  $0.98^\circ \times 0.78^\circ$ ; 采用斯特林制冷机将芯片制冷到 77 K, 并将二次光学元件制冷到 150 K。

在南极建造望远镜充满挑战。南极昆仑站自然条件恶劣: 极夜期间温度极低( $-50 \sim -80^\circ\text{C}$ ), 全年多次出现风速超过 10 m/s 的大风, 气压仅为 580 hPa 左右<sup>[17]</sup>。这些极端环境对设备运行构成严峻考验: 低温会导致设备或线缆表面结冰, 增加设备负荷; 低温与强紫外线共同作用会使材料变性, 例如线缆外护套变硬变脆甚至开裂; 润滑剂在低温下黏度增大甚至凝固, 导致润滑失效; 大风引发的地吹雪会使积雪堆积在设备缝隙中, 或者侵入设备内部, 导致运动部件卡死或电子设备失效; 此外, 降雪、地吹雪和温度变化还会导致光学镜面结冰或结霜, 严重影响观测质量, 甚至使观测无法进行。

南极昆仑站的设备运行条件也极为苛刻: 在持续数月的极夜期间, 电力供应主要依赖柴油发电机, 目前总供电功率仅为 1 kW, 对设备的能耗管理提出了极高要求; 每年科考队员仅有约 20 天可到站维护, 其余时间则完全处于无人值守状态, 对设备的可靠性也提出了极高要求<sup>[18]</sup>。自 2025 年起, 中山站开始部署我

表 1 国外南极红外望远镜的性能参数

Table 1 Performance parameters of foreign Antarctic infrared telescopes

望远镜名称	口径	视场	工作波段	(计划)安装时间/安装地点
IRIAT	80 cm	$10'$	中红外	2008 年(未投入运行)/南极冰穹 C
ASTEP	40 cm	$1 \text{ deg}^2$	可见光 R	2012 年/南极冰穹 C
Gattini-IR	30 cm	$25 \text{ deg}^2$	J	2018 年/美国 Palomar 天文台
DREAMS	50 cm	$3.8 \text{ deg}^2$	Y、J、H	2023 年/澳大利亚 Siding Spring 天文台
Cryoscope Pathfinder	26 cm	$16 \text{ deg}^2$	$K_{\text{dark}}$	2026 年/南极冰穹 C
Cryoscope	1 m 级	$50 \text{ deg}^2$	$K_{\text{dark}}$	2030 年后/南极冰穹 C

表 2 我国南极冰穹 A 红外望远镜的性能参数

Table 2 Performance parameters of the Chinese infrared telescopes in Antarctic Dome A

望远镜名称	口径	视场	工作波段	安装时间
AIRBT	15 cm	$1.2^\circ \times 1^\circ$	J、H	2023 年
南极近红外望远镜	15 cm	$0.87^\circ \times 0.69^\circ$	J	2024 年
AST3-3	50 cm	$0.98^\circ \times 0.78^\circ$	$K_{\text{dark}}$	预计 2026 年

国自主卫星的高速网络通信, 南极昆仑站也即将开启高速网络时代; 但在此之前, 国内与南极昆仑站之间的通信仍以低带宽、高费用的卫星通信为主, 如铱星通信和海事卫星通信系统。这些卫星网络存在不稳定性高、延迟大的问题, 限制了实时交互和数据获取的效率。

以上这些不利条件对南极昆仑站的天文观测设备提出了极高的技术要求, 同时也为相关技术的创新与发展提供了重要机遇。

## 2 南极近红外巡天望远镜关键技术

### 2.1 望远镜本体与仪器自身红外辐射抑制方法

根据普朗克黑体辐射定律, 任何温度高于绝对零度( $-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ )的物体都会持续向外辐射电磁波, 且其辐射的强度和波长分布取决于物体自身的温度。因此, 除大气红外背景辐射外, 南极望远镜及仪器的自身热辐射也会被红外探测器接收, 从而降低图像质量。因此, 望远镜光学系统需要严格控制成像前端器件自身热辐射对观测的影响。

南极红外望远镜本体与仪器自身红外辐射主要包括望远镜镜面和结构的辐射、冷箱内的封窗和表面的辐射、以及仪器内的杂散光。南极红外望远镜在系统工作时, 其温度通常与周围环境温度相近( $-40\sim-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ )。这个温度

范围对应的望远镜和仪器内部部件的自体辐射可以通过三个物理量来计算: 由普朗克函数  $B_{\lambda}(T)$  决定黑体辐射光谱的绝对温度  $T$ 、决定黑体辐射贡献比例的各部件的辐射系数  $\epsilon(\lambda)$ 、指向探测器平面的立体角。图 3(a)所示为不同温度以及不同波段下望远镜的自体辐射强度对比情况。其中, K 波段望远镜的自身热辐射强度是 J 波段的  $10^4$  至  $10^6$  倍<sup>[19]</sup>。如图 3(b)所示, 在  $K_{\text{dark}}$  波段, 南极望远镜仪器自身热辐射已高于天空背景辐射<sup>[8]</sup>。因此, K 波段望远镜受自体辐射的影响更为严重, 必须特别关注红外背景的抑制问题。

望远镜光学系统的红外背景抑制主要采用以下两种方法: (1) 基于二次成像系统设计, 将出瞳位置控制在探测器前方附近, 并在瞳面处放置冷光阑, 确保冷光阑后的光机部分处于低温环境; (2) 采用镜筒整体制冷式光学系统, 即成像光学系统的所有光学元件均处于低温环境中。

二次成像光学系统通常采用冷光阑和遮光罩的设计, 抑制望远镜自身热辐射直接入射或者经多次反射后入射至探测器, 从而减小背景噪声。根据望远镜自身热辐射和鬼像分析结果, 综合考量热辐射抑制效果、成本以及杂散光抑制方法的复杂性, 进行特殊的设计优化。

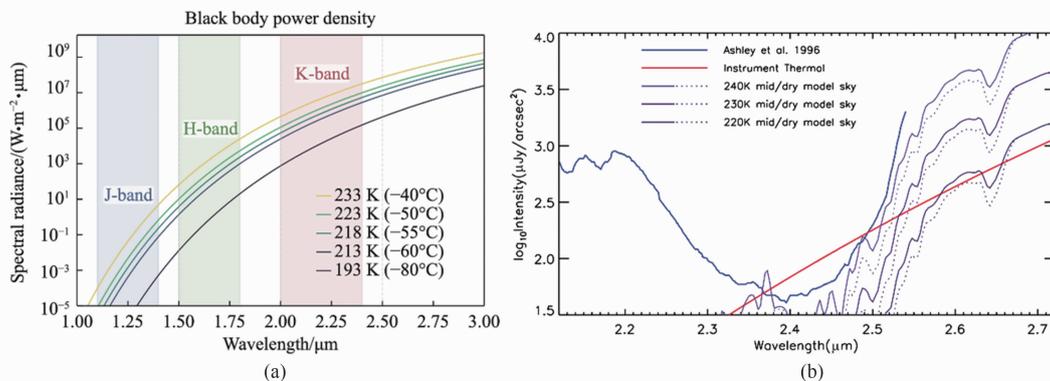


图 3 (a)不同温度以及不同波段下望远镜的自身辐射强度<sup>[19]</sup>; (b)南极望远镜仪器自身热辐射与天空背景辐射的比较<sup>[8]</sup>

Fig. 3 (a) The intrinsic radiation intensity of the telescope at different temperatures and in different bands<sup>[19]</sup>; (b) Comparison of the intrinsic thermal radiation of the Antarctic telescope instruments with the background radiation of the sky<sup>[8]</sup>

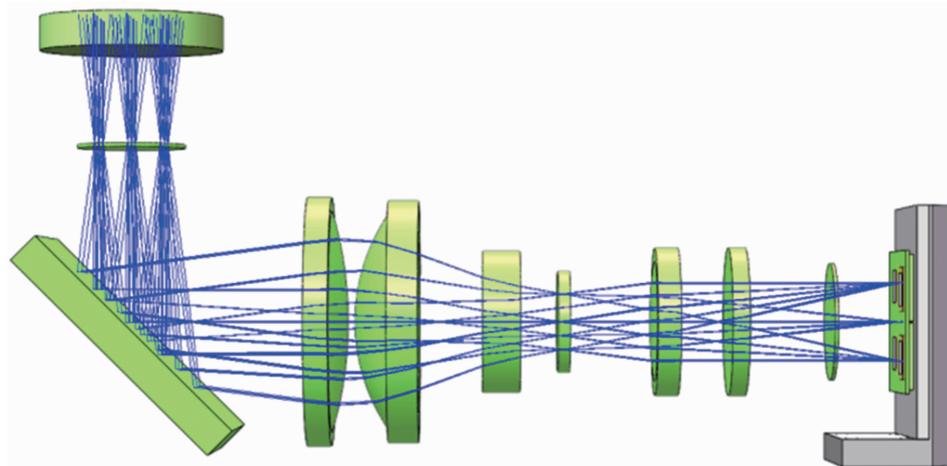


图 4 AST3-3 望远镜的二次成像光学系统

Fig. 4 Secondary Imaging Optical System of AST3-3 Telescope

南极近红外巡天望远镜采用改进的施密特型光学系统。如图 4 所示, 在二次成像光路内形成望远镜出瞳, 并在出瞳位置上放置冷光阑, 以阻止所有来自温暖表面的场外散射光和热辐射到达探测器平面, 从而降低系统的热辐射影响。该设计的缺点是, 由于光阑位置控制对光路设计的限制, 系统的视场会受到约束。为了进一步减少热辐射杂散光对系统探测能力的影响, 南极近红外巡天望远镜 AST3-3 通过增加视场光阑来抑制系统杂散光。由于改正的施密特型光学系统的焦面不在主镜后方, 主副镜遮光罩不再是此类系统最有效的杂散光抑制手段。而增加视场光阑则是一种更直接有效的方法, 可显著降低系统杂散光水平。通过将视场光阑设置在一次成像面位置, 可以有效阻止视场外的光线未经光学元件或支撑元件的散射而直接到达像面, 降低杂散光的影响。综上所述, 南极近红外巡天望远镜并未采用传统遮光罩设计, 而是通过冷光阑与视场光阑的结合使用, 在抑制红外背景辐射和杂散光方面取得了显著效果, 提升了系统的探测性能。

整体制冷式光学系统以 Cryoscope Pathfinder 望远镜<sup>[13]</sup>为例。如图 5 所示, 望远镜主体采用密封式设计, 通过整体制冷降低主镜及镜筒自身的热辐射。同时, 位于望远镜主体之外的改正镜由于未制冷, 其热辐射通过复杂的椭球体遮光罩设计将改正镜组的自身辐射大部

分反射出望远镜系统, 减少进入探测器的热辐射。遮光罩表面还使用了二向色涂层, 吸收带内光并反射长波辐射, 进一步降低了杂散光的干扰。为实现光学系统的快速降温, 主镜采用金刚石单点车削的轻量化铝制主镜, 遮光罩则采用花瓣式多层结构。这种综合设计使得 Cryoscope Pathfinder 望远镜在抑制热辐射和杂散光方面表现出色, 显著提升了系统的探测性能。

## 2.2 镜面除冰霜

南极光学/红外望远镜通常至少有一块或一块以上的光学镜面暴露在极端环境中。当南极相对湿度饱和的空气经过温度低于其冻结温度的光学镜面时, 水气会凝华附着形成霜层, 如图 6 所示<sup>[20]</sup>。霜层会显著降低镜面的透光率, 大幅减小望远镜效率; 霜层的不均匀分布还会引入随机变化的相位、光散射和畸变, 大幅降低光学系统的分辨率和成像质量; 霜层会导致观测数据质量受损, 影响高精度测光和光谱分析, 尤其是对暗物质、系外行星等前沿研究的数据质量产生负面影响。

目前在南极昆仑站运行的可见光波段的望远镜(如 CSTAR、AST3、KL-DIMM 等)均采用了封闭式镜筒, 将冰雪对镜筒内的光学元件的影响降至最低。对于入瞳的镜面, 则镀上一层可导电的透明氧化铟锡(Indium Tin Oxide,

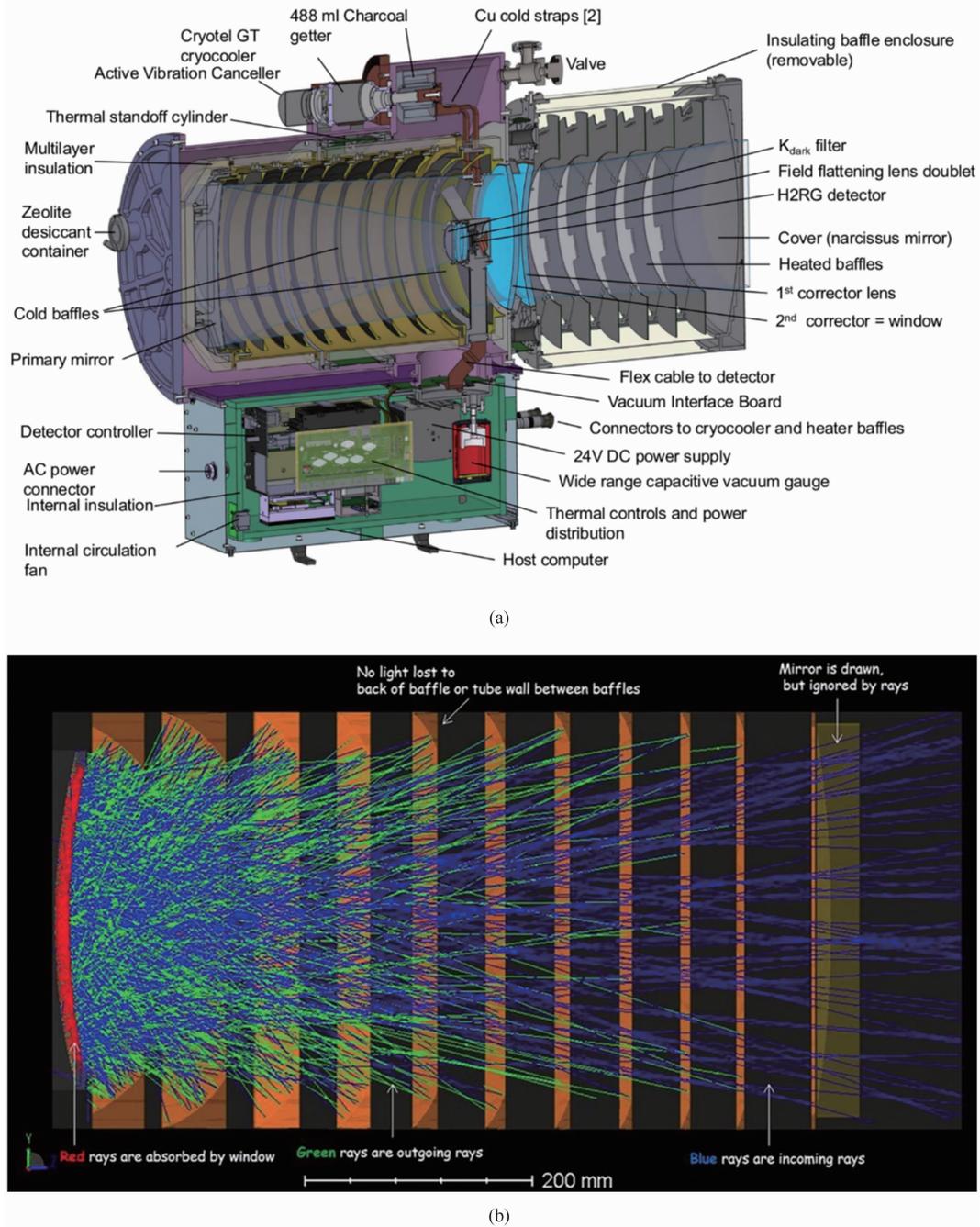


图 5 (a) Cryoscope Pathfinder 望远镜的机械布局；(b)花瓣式遮光罩的杂散光抑制分析<sup>[13]</sup>

Fig. 5 (a) Mechanical layout of the Cryoscope Pathfinder telescope; (b) Stray light suppression analysis of the petal-shaped hood<sup>[13]</sup>

ITO)导电膜<sup>[21]</sup>：通电后产生热量，消除镜面的冰雪、防止镜面结霜。然而，这一技术无法应用于红外天文的入瞳镜面上。首先，ITO 薄膜在可见光波段有较好的透过率，但在  $1.2\ \mu\text{m}$  以上的近红外波段，透过率却大幅下降<sup>[22]</sup>，

如图 7 所示。其次，ITO 薄膜加热时产生的热量，会成为观测的重要噪声来源。针对 AST3-3 望远镜的分析表明，ITO 加热膜是最大的自身热辐射源，占比达 31%<sup>[8]</sup>。因此，优化加热方法或者探索其他途径来清除镜面冰雪、防

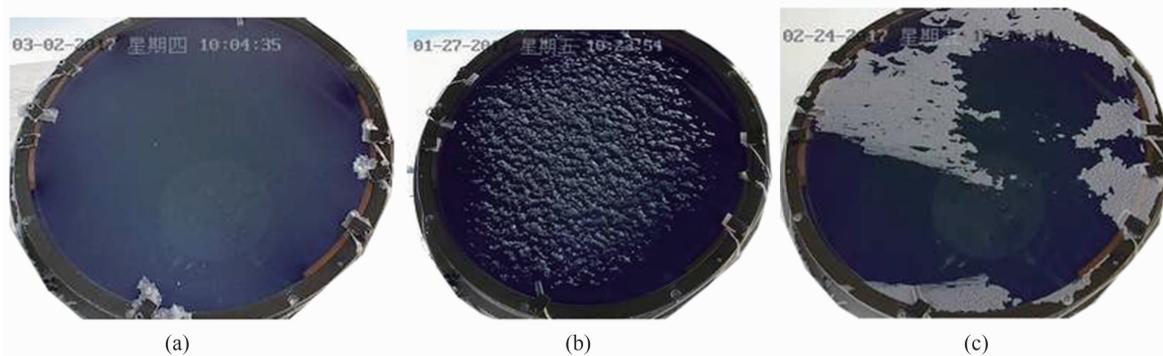


图 6 南极望远镜镜面附着冰霜的几种形态: (a)霜; (b)冰雪; (c)吹雪

Fig. 6 Several forms of frost adhering to the mirror surface of an Antarctic telescope: (a) frost; (b) ice and snow; (c) snowstorm

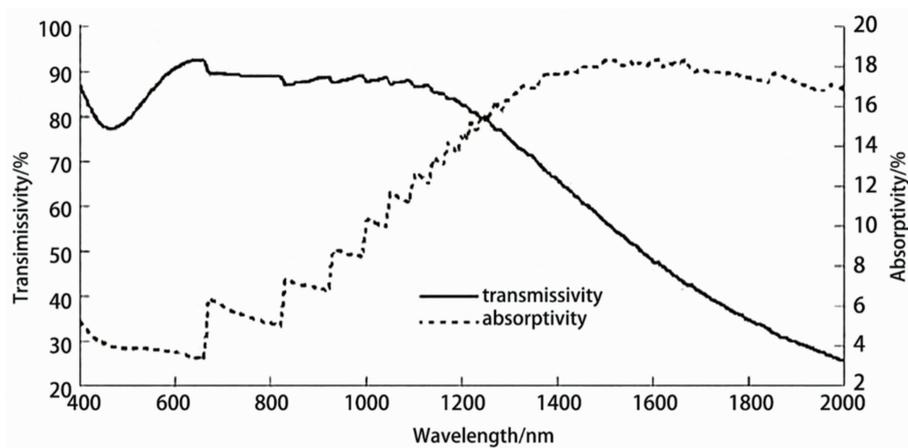


图 7 ITO 薄膜在可见光与红外波段的透射率和吸收率曲线<sup>[30]</sup>

Fig. 7 Transmittance and absorptivity curves of ITO thin film in the visible and infrared bands<sup>[30]</sup>



图 8 (a) AST3-2 镜面吹风方案; (b)近红外望远镜的机械式除雪方案

Fig. 8 (a) AST3-2 mirror blowing system; (b) Mechanical snow removal system for the near-infrared telescope

止镜面结霜, 对于减少望远镜自身的热辐射、提升观测质量具有至关重要的意义。

在可见光波段观测的 AST3-2 望远镜以及南极首台近红外望远镜上, 尝试了镜面吹风、镜面扫雪等物理方法<sup>[19]</sup>。澳大利亚的

Cryoscope 望远镜亦计划采用吹干燥空气的方法来防止入瞳镜面的结霜<sup>[13]</sup>。图 8(a)所示为 AST3-2 望远镜采用的镜面吹风方案, 图 8 (b)所示为近红外望远镜的机械式除雪装置。结果表明, 镜面吹风可有效改善镜面视宁度;

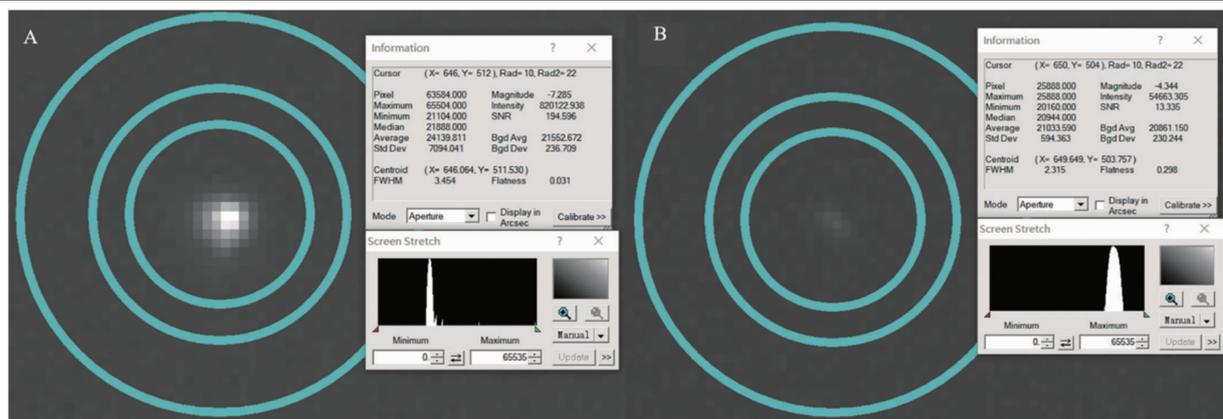
图 9 机械式除雪前后的星像信息对比<sup>[19]</sup>Fig. 9 Comparison of star chart information before and after mechanical snow removal <sup>[19]</sup>

表 3 南极望远镜镜面除冰雪方法比较

Table 3 Comparison of de-icing methods for Antarctic telescope mirrors

方法	应用的望远镜	优点	缺点
镜面加热	CSTAR、AST3、KL-DIMM	除冰雪效果好	产生红外背景辐射、消耗功率略大
固定位镜面吹风	AST3-2	除浮雪效果较好	难以去除已形成的粘性冰雪、消耗功率略大
机械式除雪	南极近红外望远镜	除浮雪效果较好、消耗功率小	极夜环境下的可靠性、安全性和除雪效果尚未验证
吹干燥空气	Cryoscope Pathfinder	效果尚未验证	需提前设计鼓风机和吹风装置，消耗功率较大

机械式除雪装置可以有效缓解浮雪对消光的影响<sup>[19]</sup>。图 9 所示为机械式除雪前后的星像信息对比情况。南极近红外巡天望远镜设计采用机械式除雪方案(见表 3)，配合动态像质检测，以系统透过率闭环控制除雪的频次；同时辅助吹风方案，在不加热镜面的基础上达到防雪除霜的目的。

### 2.3 红外探测器

红外探测器是可将接收的红外辐射能量转换为便于计量的物理量的器件<sup>[2]</sup>。与其他领域相比，天文观测的特点在于其对极弱信号探测能力的极端要求；对探测器的量子效率、暗电流、读出噪声等参数的要求远高于常规应用。这是由于宇宙天体的红外辐射极其微弱，需要探测器具有极高的灵敏度，且需在长时间的积分观测中保持低噪声，以获得清晰准确的信号。天体观测要求红外器件的读出噪声为几个

到几十个电子数，暗电流一般在每秒几个电子数甚至更小的水平。

用于天文观测的红外探测器根据其工作波长和探测要求，可选用不同的材料体系。在 1~5  $\mu\text{m}$  波段，碲镉汞、碲化铟、铟镓砷探测器都是比较常用的。在更长的波段，则更多地采用硅或锗等的掺杂材料，例如 Si:As、Ge:Ga 等。

如前所述，南极天文观测主要采用碲镉汞和碲化铟探测器，且需要制冷，以减少内部组件和传感器自身热量产生的噪声。铟镓砷也是常见的非制冷型探测器材料，但其工作波段通常为 0.9~1.7  $\mu\text{m}$  的短波红外波段，因此集中在 2.25~2.5  $\mu\text{m}$  波段观测的南极近红外巡天望远镜将采用制冷的碲镉汞探测器。

碲镉汞是碲化汞和碲化镉按一定比例组成的赝二元固溶体半导体材料，晶体结构为

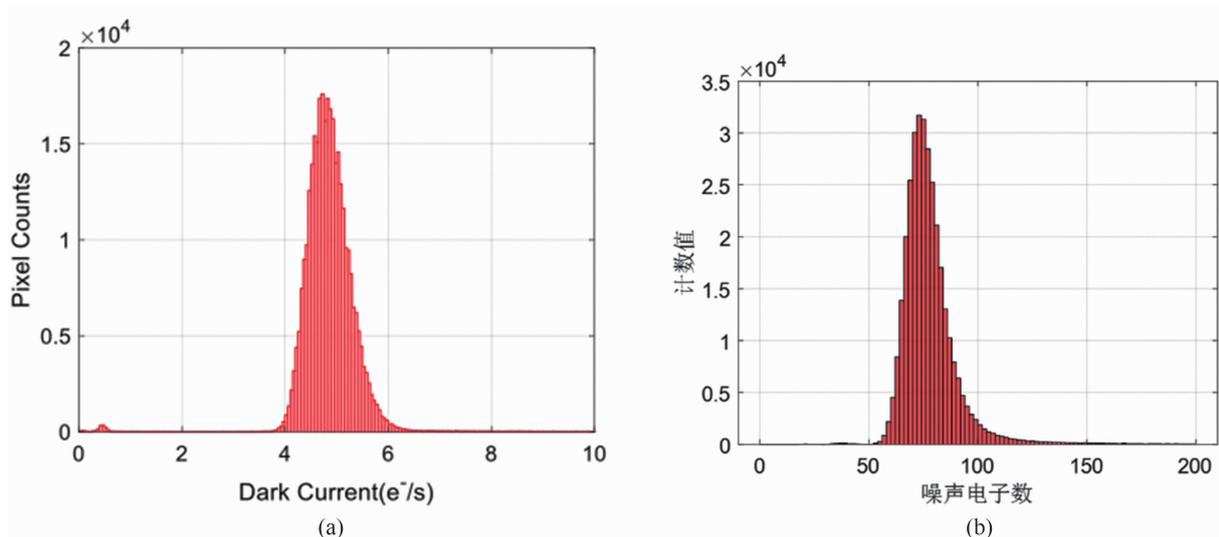


图 10 国内碲镉汞芯片实测数据: (a)暗电流; (b)读出噪声

Fig. 10 Measured data for domestic mercury cadmium telluride chips: (a) dark current; (b) readout noise

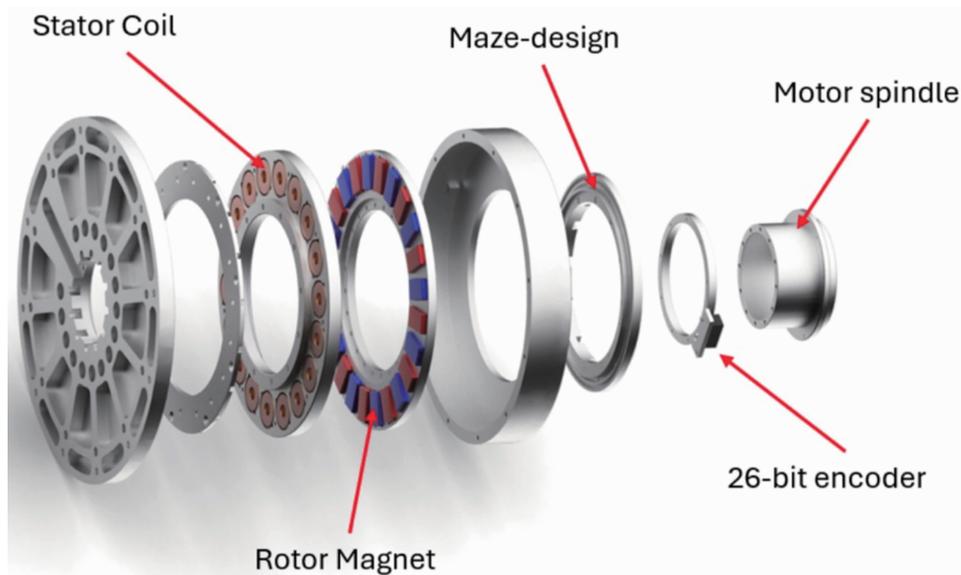


图 11 结合迷宫式密封结构的轴向盘式永磁同步电机<sup>[27]</sup>

Fig. 11 Axial disc permanent magnet synchronous motor with labyrinth seal structure<sup>[27]</sup>

闪锌矿结构。其响应光谱可通过改变镉的含量连续可调,可覆盖相当宽的红外波段,是制备红外探测器的优良材料。碲镉汞可在异质衬底(如硅、锗、砷化镓、氧化铝)上生长大面积材料,以满足超大规模碲镉汞红外焦平面探测器的需求<sup>[2]</sup>。目前建造大规模碲镉汞探测器阵列的难度较高,国际上主流的单芯片尺寸为 $2048 \times 2048$ ,在许多望远镜上采用拼接方法获得更大的面阵。国内目前最大的用于天文观测的碲镉汞芯片尺寸为 $640 \times 512$ ,其暗电流能够

达到小于 5 个电子的水平,读出噪声小于 80 个电子(见图 10)。

#### 2.4 望远镜控制系统

为了适应南极昆仑站极端低温、冰雪侵袭、无人值守的运行环境,望远镜控制系统需进行特殊设计。南京天文光学技术研究所针对控制系统故障诊断和可靠性分析开展了一系列研究<sup>[23-26]</sup>。

一种轴向盘式永磁同步电机结合迷宫式密封结构的设计<sup>[27]</sup>被应用于南极望远镜。轴向

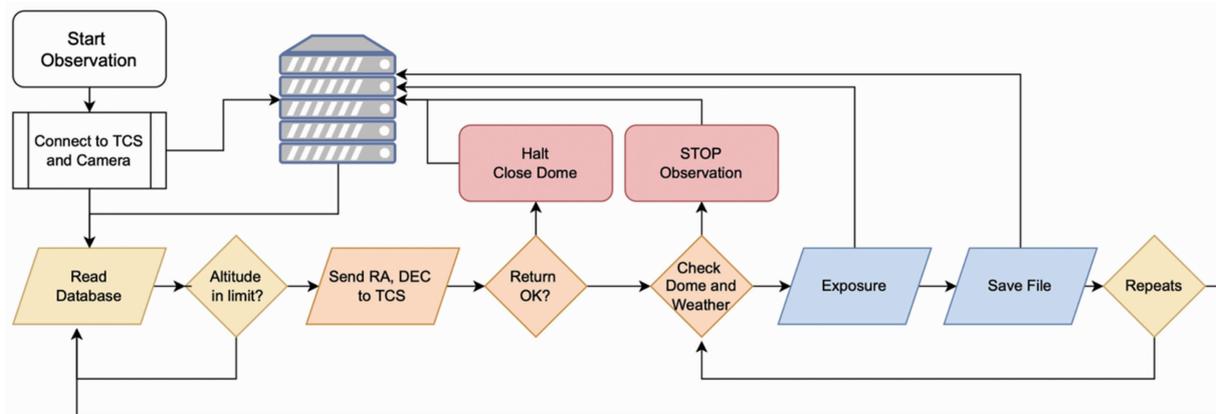
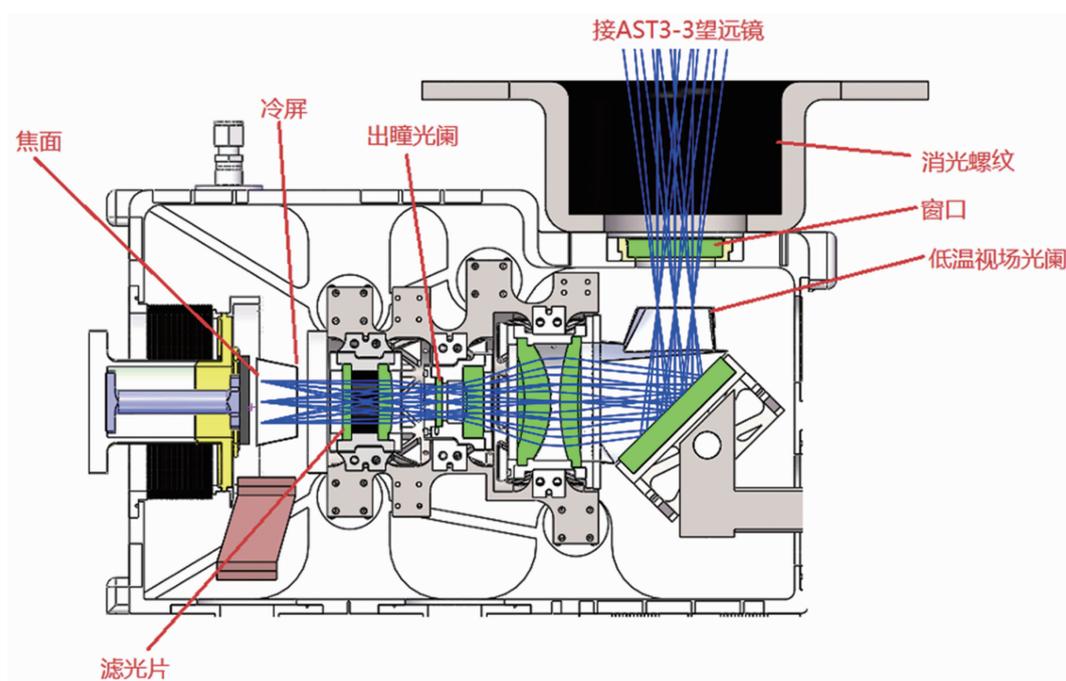
图 12 全自动观测流程图<sup>[28]</sup>Fig. 12 Flowchart of Fully Automated Observation<sup>[28]</sup>

图 13 AST3-3 望远镜的杜瓦结构剖面图

Fig. 13 Cross-sectional view of the dewar structure of the AST3-3 telescope

盘式永磁同步电机外形呈扁平状盘式结构：外壳一般用钢板压制；永磁体可用铁氧体或钕铁硼制成，按 N、S 极交替排列，固定在一侧端盖或两侧端盖上（见图 11）。绕组一般绕制完成后用环氧树脂压制成圆盘式结构，固定在电枢中。轴向盘式永磁同步电机兼有盘式电机和永磁电机的优越性，具有高效、高功率密度特点，且结构紧凑，占用空间更小，更适于复杂环境下的使用。

为了应对南极无人值守的运行模式，望远

镜软件系统套件实现了望远镜的全自动观测、远程控制运行及维护、本地数据处理等功能（见图 12）。观测控制软件系统 OCS，建立了一套全自动的工作流程<sup>[28]</sup>和 pipeline 数据处理套件<sup>[29]</sup>，可在本地完成全自动观测和南极天文数据处理。望远镜控制软件系统 TCS 实现了望远镜远程控制、远程校准、实时状态监测和故障诊断等功能<sup>[18]</sup>。

## 2.5 杜瓦/冷箱的优化设计

杜瓦/冷箱是为探测器和光学元件提供真

空与低温环境的组件,旨在降低探测器元件的噪声、抑制光学元件及其支撑结构的热辐射和杂散光对探测性能的影响。杜瓦/冷箱通常是真空绝热容器,通过真空结构和高反射率涂层(如镀金)实现隔热,防止外部热量传入。

杜瓦/冷箱主要包含真空腔体、通光窗口、光阑、低温光学镜筒、反射镜、滤光片和探测器芯片,同时还有制冷机和导热装置等。杜瓦/冷光学冷箱组件汇集了光学接口、热力学接口和电子学接口,是多学科集成设计的典型。图 13 是 AST3-3 望远镜的杜瓦结构剖面图。其关键技术包括:针对南极最低  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、温度起伏大、冰雪覆盖的特点,筛选光窗、机械制冷机、冷箱/杜瓦外壳镀层、外部电学部件等的工艺方法,以维持其真空度;机械制冷机的散热以及  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$  低温冷启动技术;南极低功耗要求下的整体功率分配与控制等。

### 3 展望

发展南极近红外巡天望远镜技术、在南极开展 K 波段巡天观测对于当今天文学领域具有极其重要的意义。本文分析和总结了一部分关键技术以及目前已有的技术积累,为未来南极红外望远镜的研制提供参考。但技术上可能的创新和突破远不止本文所述内容。例如,可借鉴甚长基线干涉技术,探索跨站阵列联动,构建中山站—泰山站—昆仑站的分布式观测链路;在探测极限与巡天效率提升方面,大面阵红外探测器的研制还需突破材料与工艺、读出与噪声、低温与热控、拼接与封装以及成本控制等方面的瓶颈;在极端环境的适配方面,需研发新型低温抗霜材料,解决  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$  极寒环境下的镜面结霜问题;在观测与数据应用优化方面,还需完善数据传输与处理体系,建立近站预处理与国内远程深度分析的协同平台,推动观测数据的快速共享和成果转化;构建多波段协同观测体系,推动近红外望远镜、可见光巡天望远镜、太赫兹望远镜的联动观测,实现

突发天文事件的多波段数据互补,提升观测成果的科学价值。

### 参考文献

- [1] 红外望远镜 [M]// 王绥琯, 陆焱, 崔向群, 等. 中国大百科全书·天文学. 北京: 中国大百科全书出版社, 2024: 188–190.  
Infrared Telescopes [M]// Wang S G, Lu T, Cui X Q, et al. Encyclopedia of China: Astronomy. Beijing: Encyclopedia of China Publishing House, 2024: 188–190.
- [2] 红外天文学 [M]// 王绥琯, 陆焱, 崔向群, 等. 中国大百科全书·天文学. 北京: 中国大百科全书出版社, 2024: 184–187.  
Infrared Astronomy [M]// Wang S G, Lu T, Cui X Q, et al. Encyclopedia of China: Astronomy. Beijing: Encyclopedia of China Publishing House, 2024: 184–187.
- [3] 蔡云芳, 李银柱, 许方宇, 等. 天文应用之红外器件性能与测试评估方法分析 [J]. 红外技术, 2014, **36**(11): 868–872.  
Cai Y F, Li Y Z, Xu F Y, et al. The Performance and Test Evaluation Method Analysis of Astronomy Application of Infrared Devices [J]. *Infrared Technology*, 2014, **36**(11): 868–872.
- [4] Hu Y, Hu K L, Shang Z H, et al. Meteorological data from KLAWS-2G for an astronomical site survey of Dome A, Antarctica [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2019, **131**: 015001.
- [5] Bonner C, Ashley M, Cui X, et al. Thickness of the atmospheric boundary layer above Dome A, Antarctica, during 2009 [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2010, **122**: 1122–1131.
- [6] Ma B, Shang Z, Hu Y, et al. Night-time measurements of astronomical seeing at Dome A in Antarctica [J]. *Nature*, 2020, **583**: 771–774.
- [7] Yang X, Shang Z, Hu K, et al. Cloud cover and aurora contamination at dome A in 2017 from KLCAM [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2021, **501**(3): 3614–3620.

- [8] Li Y, Zheng J, Tuthill P, et al. Optimising the K Dark Filter for the Kunlun Infrared Sky Survey [J]. *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 2016, **33**: e008.
- [9] Busso M, Tosti G, Persi P, et al. The IRAIT Project [J]. *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 2002, **19**: 306–312.
- [10] Crouzet N, Agabi K, Blazit A, et al. ASTEP South: An Antarctic Search for Transiting Exoplanets around the Celestial South Pole [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2010, **511**: A36.
- [11] Moore A M, Kasliwal M K, Gelino C R, et al. Unveiling the Dynamic Infrared Sky with Gattini-IR [C]. *SPIE*, 2016, **9906**: 99062C.
- [12] Soon J, Moore A M, Kasliwal M M, et al. Opening the Dynamic Infrared Sky [C]. *SPIE*, 2018, **10700**: 107004D.
- [13] Kasliwal M, Earley N, Smith R, et al. Cryoscope: A Cryogenic Infrared Survey Telescope in Antarctica [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2025, **137**: 065001.
- [14] Zhang J, Zhang Y H, Tang Q J, et al. Sky-brightness measurements in J, H, and Ks bands at DOME A with NISBM and early results [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2023, **521**(4): 5624–5635.
- [15] Li Z Y, Cong J N, Wu Z X, et al. System Design for a Wide Field-of-view Near-infrared Telescope for Dome A in Antarctica [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2024, **136**: 115002.
- [16] Yang C, Ji T, Li Z, et al. First Daytime Near-infrared Photometric Observations at Antarctic Dome A [J]. *The Astronomical Journal*, 2025, **169**(4): 228.
- [17] Hu Y, Shang Z H, Ashley M C B, et al. Meteorological data for the astronomical site at Dome A, Antarctica [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2014, **126**: 868–881.
- [18] 李晓燕, 李运, 孙天瑞, 等. 南极光学天文望远镜控制软件关键技术 [J]. *极地研究*, 2024, **36**(1): 99–111.
- Li X Y, Li Y, Sun T R, et al. Key Technologies of Control Software for Antarctic Optical Telescopes [J]. *Polar Research*, 2024, **36**(1): 99–111.
- [19] Chen J, Li Z, Wu Z, et al. Performance analysis and strategy optimization of mechanical defrosting for an Antarctic near-infrared telescope using aperture photometry [J]. *Astronomical Techniques and Instruments*, 2025, **2**(6): 358–365.
- [20] 冯晴晨, 李晓燕. 南极天文光学望远镜智能化除霜方法 [J]. *科学技术与工程*, 2019, **19**(24): 132–138.
- Feng Q C, Li X Y. Intelligent Defrosting Method for Antarctic Astronomical Optical Telescope [J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, **19**(24): 132–138.
- [21] Yuan X, Su D, Cui X, et al. Optical system of the Three Antarctic Survey Telescopes [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2012, **424**(1): 23–30.
- [22] Zheng J R, Lawrence J, Content R, et al. Antarctic Surveying Telescope (AST3-3) NIR camera for the Kunlun Infrared Sky Survey (KISS): Thermal optimization and system performance [C]. *SPIE*, 2016, **9911**: 99111H.
- [23] 许丹丹. 南极望远镜故障诊断研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- Xu D D. Research on Fault Diagnosis of Antarctic Telescopes [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [24] 杨世海, 李运, 许丹丹, 等. 检测南极大口径望远镜机械消隙失效故障的设备及其方法: CN201710426597.X [P]. 2017–06–08.
- Yang S H, Li Y, Xu D D, et al. Equipment and methods for detecting mechanical backlash failure in the Antarctic telescope: CN201710426597.X [P]. 2017–06–08.
- [25] 杨世海, 许丹丹, 李运. 应用于南极大口径望远镜控制系统的故障诊断方法: CN 201710190599.3 [P]. 2017–03–28.
- Yang S H, Xu D D, Li Y. Fault diagnosis method applied to the control system of the Antarctic telescope: CN 201710190599.3 [P]. 2017–03–28.
- [26] 李运, 杨世海. 基于故障树的南极赤道式天文

- 望远镜主轴控制系统可靠性分析 [J]. *天文学报*, 2017, **58**(3): 70–80.
- Li Y, Yang S H. Reliability Analysis of Main-axis Control System of the Equatorial Antarctica Astronomical Telescope Based on Fault Tree [J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2017, **58**(3): 70–80.
- [27] Zhang Y, Li Q, Li Z, et al. Design and analysis of a direct-drive motor for astronomical telescopes in extreme Antarctic environments [J]. *Astronomical Techniques and Instruments*, 2025, **2**(6): 339–347.
- [28] Sun T, Li X, Hu L, et al. Antarctic Survey Telescope 3-3: Overview, System Performance and Preliminary Observations at Yaoan, Yunnan [J]. *Universe*, 2022, **8**: 303.
- [29] Sun T, Hu L, Zhang S, et al. Pipeline for the Antarctic Survey Telescope 3-3 in Yaoan, Yunnan [J]. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 2022, **9**: 897100.
- [30] 王晋峰, 王焯儒, 田杰. 南极大型天文望远镜主镜膜层防霜方法 [J]. *光学学报*, 2017, **37**(4): 377–383.
- Wang J F, Wang Y R, Tian J. Anti-Frosting Method for Primary Mirror Film Coating of Large Astronomical Telescope in Antarctica [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, **37**(4): 377–383.