

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2016.z1.08

中国南极天文进展和科考

杜福嘉^{1,2}, 李正阳^{1,2}, 袁祥岩^{1,2}

(1. 中国科学院 国家天文台 南京天文光学技术研究所, 南京 210042; 2. 中国科学院 天文光学技术重点实验室, 南京 210042)

摘要: 南极 Dome A 地区以其独特的台址环境成为天文研究的热点, 该地区具有环境温度低、连续黑夜、干燥、低风速、自由大气视宁度好、大气边界层低等特点, 非常适合光学和红外望远镜的观测。但南极 Dome A 地区恶劣的气候环境对设备的建造和正常运行提出了挑战。对 Dome A 地区近 10 年的长期台址监测证明了其是一个优秀的天文台址。论述了 Dome A 地区在光学、红外和亚毫米波的监测结果。介绍了安装在 Dome A 地区的天文设备, 包括中国之星望远镜 CSTAR, 南极巡天望远镜 AST3 和台址监测设备的设计和制造。列举 Dome A 极端环境对设备制造、安装的考验和相应的解决方案, 最后介绍了中国天文南极科考。

关键词: 南极科考; 天文望远镜; Dome A; 台址

中图分类号: P112

文献标识码: A

1 引言

随着天文学的不断发展, 好的天文台址和空间观测带来越来越多的天文突破^[1]。好的天文台址条件在可见光和红外波段可以提高分辨率和灵敏性, 在红外和亚毫米波范围可以提高探测的灵敏性。因此天文学家不断寻求最佳的天文台址。在中国南极天文中心的领导下, 经过近 10 年的监测, Dome A 地区被认为是目前地面上最好的光学、红外和亚毫米波的天文台址^[2]。

Dome A 是南极大陆的最高点, 海拔 4 093 m, 如图 1 所示。Dome A 地区是一个广大的区域, 面积超过 100 (km)², 但是海拔高度只相差几米, 中国在离 Dome A 约 7 km 的地方建立了昆仑站 (S80°25'01", E77°06'58"), 海拔 4 087 m。昆仑站离中山站 1 250 km, 离南极点约 1 100 km。中国第 21 次南极科学考察队于 2005 年 1 月首次登上了 Dome A。并于 2009 年建立了昆仑站。

对于光学望远镜来说, 对台址第一位的要求是极佳的视宁度。地基望远镜安装在地面

资助项目: 973 项目 (2013CB834901)

通讯作者: 杜福嘉, fjdu@niaot.ac.cn

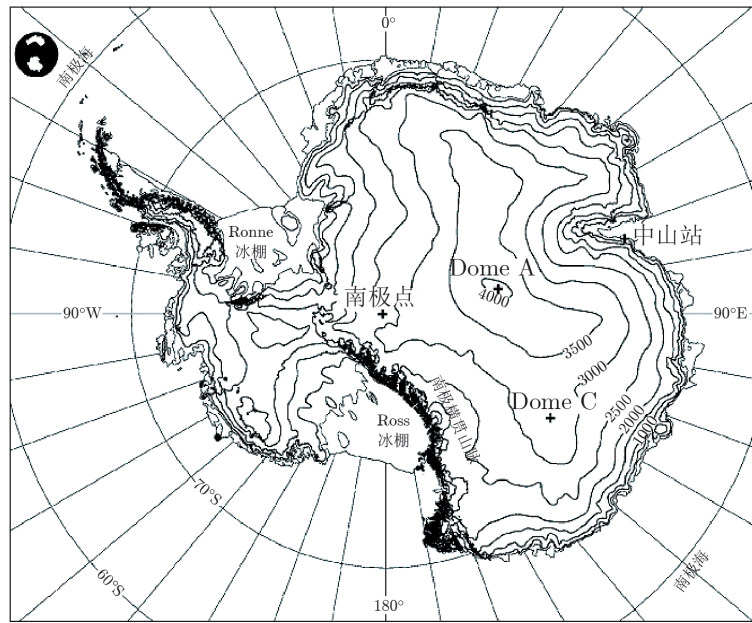


图 1 南极地形图

之上，由于大气湍流的存在，造成大气折射率随机起伏，导致平面波经过湍流大气后，振幅和相位都会产生随机涨落，引起天文图像的抖动、模糊和闪烁，望远镜的像质受到大气影响而变差，评价这种影响的指标就是视宁度。优良的视宁度条件可以显著提高望远镜的分辨率，达到理论上的衍射极限。目前在中纬度地区最佳的天文台址视宁度为 $0.5''\sim 1.0''$ ^[3]，Lawrence 等人在 Dome C ($S75^{\circ}6'$, $E123^{\circ}21'$, 3 250 m) 进行了冬季台址监测，使用 MASS (Multi-Aperture Scintillation Sensor 多孔径闪耀探测器) 对 0.5~16 km 范围内的视宁度进行了测量，结果为在 30 m 以上的中值视宁度是 $0.27''$ ，有 25% 的时间视宁度低于 $0.15''$ ^[3]。由于 Dome A 地区和 Dome C 地区具有相似的地理环境和气候特点，因此可以预测 Dome A 地区也具有极佳的视宁度条件。此外，Dome A 地区从 5 月到 8 月有近 130 d 的连续黑夜，这对时域天文学的连续观测至关重要。图 2 是南极 Dome A 地区 2014 年全年的温度曲线和太阳高度图^[4]。

在光学波段，天空永远无法达到全黑的状态，在黑夜中的天光背景是影响观测质量的主要因素之一。影响天空背景的主要因素有：太阳光和月光的散射、极光、气辉、黄道光、人工光源^[5-9]。在 Dome A 地区，人工光源是不存在的，影响天空背景的主要是太阳光和月光的大气散射。在过去几年，天文学家使用 Nigel (使用光纤输入测量天光背景的光谱仪) 和 GATTINI (天光背景监测相机) 测试了 Dome A 的天光背景，除此之外，在 Dome A 地区还使用 CSTAR (中国之星小望远镜阵列) 监测了天光背景，结果是在 i 波段无月晴朗夜的天空背景中值是 $20.5 \text{ mag/arcsec}^2$ ，对比其他天文台址，如 La Palma 是 $20.10 \text{ mag/arcsec}^2$ ，Paranal 是 $19.93 \text{ mag/arcsec}^2$ ，Cerro Tololo 是 $20.07 \text{ mag/arcsec}^2$ ，Dome A 有更暗的天空

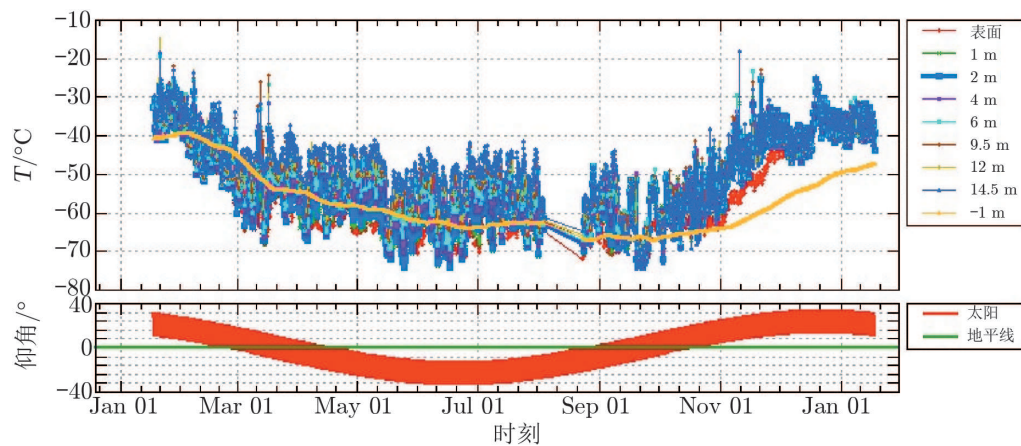


图 2 2014 年 Dome A 全年温度变化和太阳高度^[4]

背景^[5]。

大气边界层对天文观测非常重要, 它直接影响到望远镜的成像质量, 南极高原由于空气和雪面之间进行热交换导致的逆温使 Dome A 的边界层非常低^[10]。根据 Dome C 的观测结果, 地面层的大气湍流对冬季的视宁度贡献达到 87%^[11], Dome C 地区的边界层近 30 m, 如果要避开边界层, 需要把望远镜架到高于 30 m 的空中, 这样的高度对于塔架的设计、建造、安装和可靠运行挑战巨大。在 2009 年, 使用 Snodar (Surface-layer Non-Doppler Acoustic Radar) 测试了 Dome A 地区的大气边界层, 结果显示 Dome A 地区的中值边界层是 13.9 m^[11]。这么低的大气边界层, 只要我们把望远镜架高到边界层之上, 就可以在自由大气视宁度的环境下观测, 从技术难度和可实现性方面都大大增加了可行性。

对于地面上的太赫兹望远镜, 在选择台址上有两个关键的因素: 大气透明度和稳定性, 这两个因素都受到大气水汽含量和流动性约束。因此, 亚毫米波望远镜都安装于干燥、寒冷、海拔高的地点。Dome A 地区的极端环境正好符合亚毫米波和太赫兹观测。Dome A 地区使用安装在 PLATO 上的 Pre-HEAT (高海拔南极太赫兹望远镜, 0.2 m 离轴抛物面镜面, 661 GHz) 对 Dome A 进行了亚毫米波台址测量, 结果为冬季最佳 25% 的大气透过率在 661 GHz (453 μm) 是 80%, 相应于 0.1 mm 的水汽总量^[12]。在大气透明度和稳定性方面, 也超过了中纬度优良的台址。

2 南极天文设备

2.1 PLATO

PLATO (Plateau Observatory) 是由澳大利亚新南威尔士大学 (UNSW) 开发的第三代自供电全自动的南极观测平台, 如图 3 所示。PLATO 对设备提供连续的电力、温控、高可靠性



图3 南极现场的 PLATO

的命令、控制和通讯^[13-16]。为了应对南极无人值守的漫长冬季, PLATO 由内燃机提供动力。除了提供能源、控制和通讯之外, PLATO 还安装了一些监测台址的设备, 如 GATTINI: 全天空照相机, 广角光学 CCD 照相机, 用来测量云量和天空亮度; Nigel: 光纤耦合频谱仪, 测量光学波长的天空谱线辐射; SODAR: 声雷达, 测量 30~900 m 地面层内的湍流; Pre-HEAT: 亚毫米波望远镜, 测量大气透明度和水汽含量。

2.2 CSTAR——中国之星小望远镜阵列

CSTAR 于 2008 年 1 月被安装在南极昆仑站, 连续运行了 4 年后, 于 2012 年 1 月带回国内。CSTAR 由四个固定指南天极的望远镜阵列组成, 不进行指向跟踪。每个镜筒采用不同的滤光片, 观测以南极点为中心的 20 平方度的视场, 长时间的连续光变曲线, 暂现天象如新星及超新星等的观测, 搜寻系外行星^[17]。CSTAR 的主要性能指标是: 有效孔径 100 mm, 视场 20 平方度, 探测器 1 024×1 024 的 CCD, CCD 每个像素为 13 μm。4 个镜筒的波段分别为 G (4 085~5 455 Å), R (5 655~6 915 Å), I (6 865~8 395 Å) 和全波段 (3 900~8 800 Å)。CSTAR 的安装现场图如图 4 所示。CSTAR 观测得到的天文数据在变星和系外行星搜索方面取得了一批科研成果^[18-21]; 除此之外, 在 Dome A 台址监测、极端环境下设备建造方面都取得了宝贵的数据和成果。



图4 2012年 CSTAR 现场图

2.3 AST3 望远镜

AST3 (Three Antarctic Survey Telescopes) 是第二代南极望远镜, 如图 5 所示, 由 3 台具有相同光学系统的望远镜组成, 3 台望远镜主镜是 680 mm, 入瞳直径 500 mm, 视场 4.14°, 配备 G、R 和 I 滤光片, 镜筒长度 2.4 m^[22]。AST3 望远镜使用 STA 公司的 10 000×10 000 CCD 作为探测器, 像元大小是 9 μm。AST3 的科学目标是研究超新星、宇宙暗能量、系外行星探测、搜寻变星和台址监测等^[23]。其中第一台望远镜 AST3-1 于 2012 年 1 月安装在昆仑站, 第二台望远镜 AST3-2 于 2015 年 1 月安装在昆仑站。中国南极天文的远期目标是建造大视场高分辨的第三代仪器, 提出了 2.5 m 的

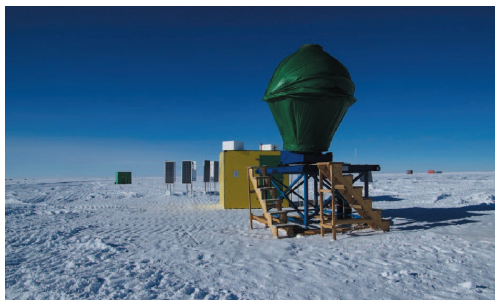


图5 南极现场 AST3-1 望远镜

KDUST (Kunlun Dark Universe Survey Telescope) 光学红外望远镜和 5 m 太赫兹望远镜 DATE5, 项目正在规划之中。

3 南极台址条件对望远镜的挑战

虽然南极 Dome A 地区有着优异的台址条件, 但是 Dome A 地区的极端环境也对天文设备的正常运行提出了挑战。相对于其他陆地望远镜, 南极望远镜所面临的问题主要如下。

3.1 低温环境

昆仑站的气温在夏天时是 $-25^{\circ}\text{C}\sim-40^{\circ}\text{C}$, 在冬天时达到 $-55^{\circ}\text{C}\sim-80^{\circ}\text{C}$ 。这样的低温条件已超过了几乎所有的电气设备的正常工作温度, 给电气设备的选型和正常运行带来了挑战。电子系统必须做保温处理或深度隔离。最为重要的是, 低温环境下润滑脂性能的变化和材料的热胀冷缩导致系统负载扭矩增加, 给控制系统带来非线性的控制问题, 直接影响到跟踪系统的稳定性和精度。图 6 是实测的望远镜轴系负载扭矩随温度的变化情况^[24], 从中可以看出, 随着温度的降低, 轴系负载扭矩不断增大, 并且具有非线性。

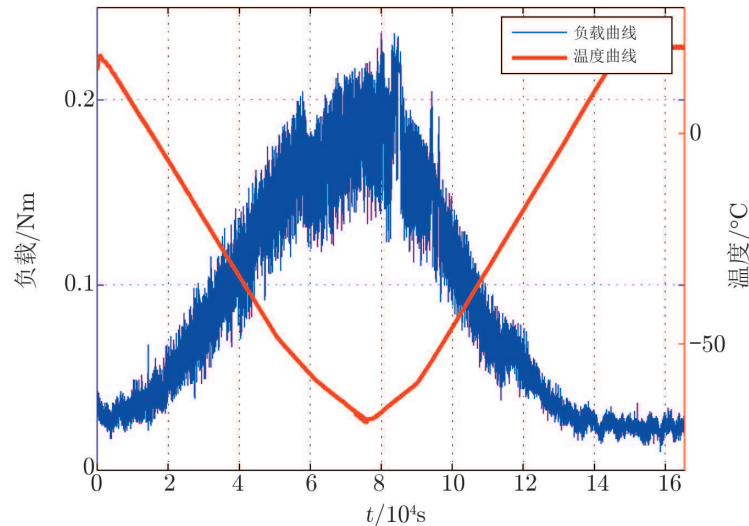


图 6 轴系负载扭矩随温度变化曲线

3.2 低气压

昆仑站的海拔是 4 083 m, 但是大气压只有约 570 mbar, 这相当于海拔 4 600 m 的气压^[14]。这么低的气压不但影响到发电机和电脑机械硬盘的性能和可靠性, 影响到设备的散热和密封, 同时也给现场操作人员带来恶劣的工作环境, 操作人员在这样的环境下工作会导致血压上升和身体缺氧。

3.3 结霜

昆仑站地区具有低温、低气压环境。虽然大气中水汽含量相对很少, 但是相对于霜点,

水汽已经过饱和, 如果暴露物体表面的温度比环境温度低, 则在物体表面会凝结成微米尺寸大小的冰晶, 冰晶不断积累就在物体表面形成霜。在望远镜的传动系统结霜会导致负载扭矩增大, 严重时卡死传动系统, 在镜面上结霜会严重影响到望远镜的成像。为了克服结霜对望远镜的不利影响, 安装在南极的光学望远镜在进光镜面上都镀上 ITO (铟锡氧化物) 膜, 通过对 ITO 膜加电使镜面发热, 最终使镜面温度高于环境温度 $2^{\circ}\text{C}\sim 3^{\circ}\text{C}$, 可以起到融霜和防霜的功能, 实践表明, 这种方法是有效的。

3.4 无人值守的运行环境

南极昆仑站目前只是一个度夏站, 每年只能安排一次科考, 当望远镜被安装到南极内陆后, 考察队员就返回中国, 望远镜只能在远程控制、无人值守的状态下工作。这就要求望远镜具备良好的监控系统, 并且具有自诊断和自我修复的能力。

4 中国南极科考

中国目前在南极有 4 个科学考察站, 按建站的时间顺序依次是长城站 ($S62^{\circ}12'59''$, $W58^{\circ}57'52''$, 1984 年), 中山站 ($S69^{\circ}22'24''$, $E76^{\circ}22'40''$, 1989 年), 昆仑站 (2009 年) 和泰山站 ($S73^{\circ}51'$, $E76^{\circ}58'$, 2014 年)。中国于 1984 年首次进行南极科考, 到 2016 年共进行了 32 次南极科考。2005 年 1 月 18 日, 中国第 21 次南极考察队从陆路实现了人类首次登顶 Dome A, 并于 2009 年 1 月 27 日建成昆仑站。从 2008 年中国第 24 次南极科考开始, 天文项目开始加入到南极科考之中。在那一年, 中国天文界的两位科学家周旭和朱镇熹研究员到南极昆仑站安装了 PLATO 和 CSTAR 等天文设备。紧随其后, 项目参加了历次南极昆仑站科考, 陆续安装了 SNODA, PLATO-A, AST3-1 和 AST3-2 等设备, 表 1 是历次中国南极科考安装设备情况, 图 7 是目前昆仑站的天文场地。

考察队次	安装的设备
24	PLATO, CSTAR
25	SNODAR, GATTINI
26	FTS (Fourier Transform Spectrometer)
27	国产平台
28	PLATO-A, AST3-1
31	AST3-2, 自动气象站

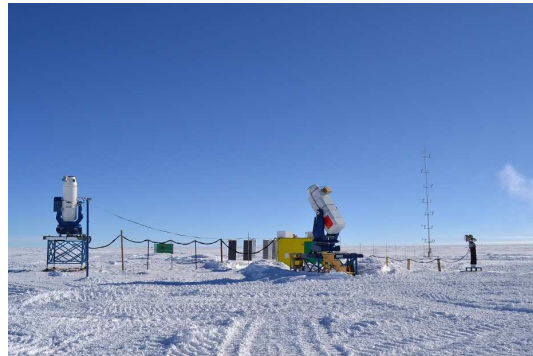


图 7 Dome A 天文场地

目前南极科考主要还是采用海运和陆运的方式。首先人员和货物从上海港乘坐“雪龙船”通过海路抵达中山站, 在中山站进行货物和科考队员的转运, 通过雪地车的陆运方式将科考队员和货物运输到昆仑站, 由于海运和陆运速度比较慢, 所以整个科学考察的周期很长,

整个行程大约需要 160 天左右, 而在昆仑站从事科考活动只有 20 多天。

致谢

中国南极天文是在中国南极天文中心 (CCAA: Chinese Center for Antarctic Astronomy) 的组织领导下开展的, 感谢南京天光所、国家天文台、紫金山天文台等项目组全体成员; 感谢项目的国际合作方澳大利亚新南威尔士大学在能源和通讯平台的支持; 南极天文科考得到了“南北极环境综合考察与评估”专项的支持, 特此致谢。

参考文献:

- [1] Storey J W V, Burton M G, Ashley M C B. SPIE, 2002, 4835: 110
- [2] Sims G, Ashley M C B, Cui X, et al. PASP, 2012, 124: 637
- [3] Lawrence J S, Ashley M C B, Tokovinin A, et al. Nature, 2004, 431: 278
- [4] Hu Y, Shang Z, Ashley M C B, et al. PASP, 2014, 126: 868
- [5] Zou H, Zhou X, Jiang Z, et al. AJ, 2010, 140: 602
- [6] Kenyon S L, Ashley M C B, Everett J R, et al. SPIE, 2006, 6267: 62671M-1
- [7] Moore A, Aristidi E, Ashley M, et al. SPIE, 2006, 6267: 62671N-1
- [8] Lawrence J S, Ashley M C B, Burton M G, et al. SPIE, 2002, 4836: 176
- [9] Sims G, Ashley M C B, Cui X, et al. SPIE, 2010, 7733: 77334M-1
- [10] Travouillon T, Jolissaint L, Ashley M C B, et al. PASP, 2009, 121: 668
- [11] Bonner C S, Ashley M C B, Lawrence J S, et al. SPIE, 2008, 7014: 70146I-1
- [12] Yang H, Kulesa C A, Walker C K, et al. PASP, 2010, 122: 490
- [13] Lawrence J S, Ashley M C B, Hengst S, et al. Review of Scientific Instruments, American Institute of Physics, 2009, 80: 064501-1
- [14] Yang H, Allen G, Ashley M C B, et al. PASP, 2009, 121: 174
- [15] Lawrence J S, Allen G R, Ashley M C B, et al. SPIE, 2008, 7012: 701227-1
- [16] Lawrence J S, Ashley M C B, Storey J W V. Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering, 2005, 2: 1
- [17] 刘根荣, 袁祥岩. 天文学报, 2009, 50: 224
- [18] Wang L Z, Macri L M, Wang L F, et al. AJ, 2013, 146: 6
- [19] Wang S H, Zhang H, Zhou X, et al. ApJS, 2015, 218: 2
- [20] Yang M, Zhang H, Wan S H, et al. ApJS, 2015, 217: 2
- [21] Wang S H, Zhang H, Zhou J L, et al. ApJS, 2014, 211: 2
- [22] Yuan X Y, Su D Q. MNRAS, 2012, 424: 23
- [23] Cui X C, Yuan X Y, Gong X F. SPIE, 2008, 7012: 70122D-1
- [24] Du F J, Zhang J, Wen H K. SPIE, 2014, 9151: 91513B-1
- [25] Bonner C S, Ashley M C B, Cui X, et al. PASP, 2010, 122: 1122
- [26] Lawrence J S, Ashley M C, Kenyon S, et al. SPIE, 2004, 5489: 174
- [27] Sims G, Ashley M C B, Cui X, et al. PASP, 2012, 124: 74
- [28] Kulesa C A, Walker C K, Schein M, et al. SPIE, 2008, 7012: 701249-1
- [29] 宗伟凯, 付建宁, 牛家树, 等. 天文学研究与技术, 2014, 11: 89
- [30] Lawrence J S, Ashley M C B, Burton M G, et al. 天文学报, 2007, 48: 48
- [31] 裴冲, 袁祥岩, 陈华林, 等. 天文学报, 2011, 52: 1
- [32] Yuan X Y, Cui X Q, Liu G R, et al. SPIE, 2008, 7012: 70124G-1
- [33] Li Z Y, Yuan X Y. SPIE, 2014, 9150: 91501Y-1

[34] Yuan X Y, Cui X Q, Gu B Z. SPIE, 2014, 9145: 91450F-1

Chinese Antarctic Astronomical Progression and Expeditions

DU Fu-jia^{1,2}, LI Zheng-yang^{1,2}, YUAN Xiang-yan^{1,2}

(1. National Astronomical Observatories / Nanjing Institute of Astronomical Optics and Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042; 2. Key Laboratory of Astronomical Optics and Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics and Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042)

Abstract: Antarctic Dome A currently is a hot place for astronomical research due to its unique environment. Dome A is very suitable for astronomical observatory because it has low environment temperature, continuous dark night, dry, low wind velocity, excellent free atmospheric seeing and low boundary layers. But the harsh environment also challenges the equipment construction and operation. This paper introduces the site-testing results in optic, infrared and sub-millimeter. The astronomical instruments that installed in Dome A are introduced, such as CSTAR, AST3 telescopes and site-testing instruments. In addition, we present the Antarctic expeditions.

Key words: antarctic astronomical; telescope; Dome A; site-testing