

中国“宋”项目：一个全球自动化 观测网络*

闫正洲^{1,2,3†} 卢晓猛¹ 田健峰¹ 张春光¹
王 坤³ 邓李才^{1,2‡}

(1 中国科学院国家天文台光学天文重点实验室 北京 100012)

(2 中国科学院大学天文与空间科学学院 北京 100049)

(3 西华师范大学物理与空间科学学院 南充 617000)

摘要 在技术发展和科学需求的驱动下,天文数据获取的方式发生了巨大的变化.全自动化的观测网络成为地基时域天文观测研究领域的一种趋势.以中国“宋”项目为例,从科学目标、设计和实现等方面,介绍自动化观测网络的构建与实施. SONG (Stellar Observations Network Group)计划是中国天文界参与的一个国际合作的天文学研究计划,以星震学、疏散星团中的变星研究等时域天体物理现象为主要科学目标.项目以全球布站的全自动观测网络为建设目标,每个站点的核心设备包括1台1 m光学望远镜、高精度和高分辨光谱仪与双通道幸运成像系统.中国自主提出在每个站点增设的1台50 cm双筒(双通道)测光望远镜,共享国际SONG计划的网络平台和基础设施.主要针对这一个由多种设备、多站点构成的地基网络,讨论其技术手段和方法的设计与实现.

关键词 望远镜, 中国“宋”项目, 方法: 观测

中图分类号: P111; 文献标识码: A

1 中国“宋”项目简介

国际SONG (Stellar Observations Network Group)计划^[1-2]是一个国际合作计划,其目的是在南北半球各建立4台配备相同终端设备的全自动高性能1 m望远镜系统,按一定经度间隔分布,组成基于高分辨光谱仪和幸运成像技术的星震学和系外行星研究专用地基网络.以较低的经费投入获得超越所有正在运行和计划中的地面和空间观测设备所能达到的星震学研究能力,实现对恒星内部结构的直接测量和对系外行星微引力事件的搜寻.以中国科学院国家天文台为首的合作单位于2009年正式加入国际SONG计划,成立了中国“宋”项目,承担国际SONG计划中国节点的建设工作.2010年3月,第3届国际SONG计划国际研讨会在北京召开,中国天文学家从科学研究的需求上,提出了大

2017-03-14收到原稿, 2017-04-01收到修改稿

*国家自然科学基金项目(11373010、11473037)、四川省教育厅自然科学基金项目(12ZB149)资助

†zzyan@bao.ac.cn

‡licai@nao.ac.cn

视场变源测光方案, 命名为50BiN (50 cm Binocular Network)^[3]. 中国“宋”项目在青藏高原进行了严格的选址, 并对最终选定的德令哈站址进行了光学天文条件勘定^[4]. 根据实测结果, 在德令哈站址主要开展国际SONG计划的星震学研究, 以及50BiN的大视场多色的时域天文学工作.

1.1 科学目标

中国“宋”项目包括两部分, 一是国际SONG计划中国节点望远镜及终端设备, 二是50BiN项目的中国节点望远镜, 分别运用高分辨光谱仪和大视场多色测光观测两种手段开展时域恒星物理研究. 因台址视宁度条件的限制^[4], 中国“宋”项目的幸运成像系统暂时没有运行计划.

(1) SONG

国际SONG计划作为一个全球布站的高精度视向速度和测光观测的地基网络, 科学委员会选择以下科学目标:

利用星震学的方法, 对选择的恒星样本进行高光谱分辨率、高视向速度测量精度和长时间基线的连续观测, 得到这些恒星内部结构的直接观测结果. 对恒星演化理论进行直接的观测检验, 并解决恒星结构演化上尚存的一些关键问题.

利用微引力透镜方法, 对选择的银河系核球区域密集星场进行高精度的幸运成像测光、搜巡和研究系外行星(系统). SONG项目的设备尤其强调地球质量的系外行星搜巡, 可望发现系外宜居行星并进行进一步研究. 此科学目标主要在网络的南方节点执行.

机会源(Target of Opportunity, ToO)观测响应. 在收到预报的情况下, 可以对伽马暴、超新星等特殊目标进行快速响应.

(2) 50BiN

50BiN目标是利用SONG计划的台址、节点基础设施和网络平台建立一个国际SONG计划的附加网络, 实现长时间基线和高时间分辨率的大视场同时多色测光观测网络, 主要科学目标如下:

疏散星团整体一致的多色测光巡天. 可以获得大样本疏散星团均匀一致的高精度测光结果, 在统一的系统中测量样本星团的基本物理参数及分布情况; 研究疏散星团均匀样本下的蓝离散星、测光双星的统计规律, 研究其演化行为; 研究年轻星团中恒星形成相关的物理过程; 并利用以上样本研究银盘形成及演化历史.

选样星团天区内所有时变源的长时间基线同时多色测光观测. 研究各类变星光度变化和统计性质, 获取各类变星的基本物理信息, 测定其物理参量.

机会源响应. 在收到预报的情况下, 对伽马暴、超新星、耀发现象、近地小天体等各类机会源进行快速响应, 提供多色测光观测服务.

1.2 技术实现

20世纪80年代开始, 全球天文学家开展的太阳5 min震动研究在太阳内部结构的直接探测上取得了巨大成功. 其后, 恒星物理学家开始采用同样的方法探测恒星的物理过程(特别是恒星内部结构). 通过对震动引起的各种物理性质的变化研究, 以光谱分析的各种方法去反演恒星内部的精细结构特征. 最近十多年来, 由于观测设备精度大幅度提高和观测手段的优化, 星震学的发展取得了长足的进步, 通过对恒星丰富的脉动行为的

研究, 基本实现了对有类太阳震动恒星内部结构的直接探测.

1.2.1 星震学观测的手段

恒星的震动信号非常微弱, 星震学观测需要以极高的精度检测星光中微弱的光度或表面运动产生的视向速度变化, 并连续不间断地进行很长时间观测, 获得足够高的频率分辨率, 用来区分不同的脉动模式. 目前星震学研究主要有测光和光谱两种观测手段. 基于空间和地基两种平台, 有着不同的优缺点.

(1) 空间观测

空间望远镜可以摆脱地球大气对观测的影响, 以及昼夜交替带来的数据间断, 其观测时序和精度都远高于地面观测. 在之前的地面观测中, 只在少数恒星中探测到了类太阳震动, Kepler空间望远镜利用高精度白光测量手段, 在数千颗主序星、亚巨星和红巨星中探测到了类太阳震动. Kepler、CoRoT (Convection Rotation and planetary Transits)等空间项目的成功给星震学研究带来了革命性的发展^[5-8]. 但是Kepler仅采用白光强度的测光, 主要对由恒星震动引起的温度变化敏感. 在这种方式下, 对于恒星的类太阳震动, 米粒组织会造成较高的背景噪声, 影响观测精度. 在目前的技术条件下, 用于高精度视向速度观测的光谱仪体积和自重较大, 对温度变化、机械震动非常敏感, 难以作为空间观测设备.

(2) 地基观测

地基测光观测受大气和昼夜交替的影响, 其观测精度和数据连续性均远低于空间观测. 但光谱观测对视向速度的变化最为敏感, 其信噪比要比测光观测高得多, 能够以更高的精度、在更低的频率探测恒星震动. 同时, 利用视向速度更易于探测空间测光难以探测到的 $l = 3$ (l 为球谐度)的恒星震动模式, 而更多的震动模式显然会带给我们更多的关于恒星内部结构的信息, 这是光谱观测的另一个巨大优势^[9].

地基高精度视向速度测量技术已经相当成熟, 欧洲南方天文台部署的极紫外及可见光栅光谱仪(Ultraviolet and Visual Echelle Spectrograph, UVES)^[10]和高精度系外行星搜索项目(High Accuracy Radial velocity Planet Searcher, HARPS)^[11]的视向速度观测精度可以达到m/s量级. 同时, 相对空间设备而言, 地基观测设备建设成本低、周期短、运行维护方便且可行性较高.

全球太阳震动观测网络(Global Oscillation Network Group, GONG)^[12]是一个国际合作项目, 采用日震学方法研究太阳的内部结构和动力学, 6个台站组成的观测网络对太阳的 p 模震动取得了高精度的观测数据. 利用这些数据, 对太阳对流区深度和氦丰度、太阳内部重元素的沉降和较差自转等问题的研究取得了丰硕的成果. GONG在成功的同时, 不断地对观测方式和设备进行升级, 已成为地面观测网络成功的典范.

由于目前用于星震学研究的高分辨率光谱观测只能靠地基望远镜获得, 且探测恒星的类太阳震动需要长时序的高精度视向速度观测. 要从已有的符合观测精度要求的少数望远镜中获得足够的连续观测时间是一件非常困难的事情. 基于GONG项目的成功经验, 专用地面望远镜观测网络是在星震学领域中取得成功的最佳方案.

1.2.2 自动化观测的发展历程

天文望远镜作为高度集成的精密仪器, 在发展的过程中不断应用新技术提高观测数据的质量和效率. 随着计算机技术、网络技术和传感器技术的发展, 计算机作为重要的

控制设备逐步替代人工操作. 天文观测大致经历了3个阶段: 程控观测、远程观测和自主观测.

(1)程控观测

由运行在计算机上的程序依照预设流程控制望远镜完成观测任务. 1968年, 威斯康辛大学的Code等人成功使用微机控制一台0.2 m的望远镜和光度计进行观测, 同年基特峰天文台1.27 m望远镜实现计算机控制, 这被视为望远镜程控观测的开始. 1976—1977年, 前苏联建于高加索的6 m地平式望远镜和美国建于怀俄明州的2.3 m望远镜成为首批计算机控制的大型望远镜^[13]. 此后, 计算机程序控制成为天文望远镜控制的通用方式, 其功能覆盖望远镜的运动控制、终端控制和数据获取等各个方面.

(2)远程观测

观测者通过网络在异地远程控制望远镜进行程控观测. 自1975年1台0.75 m的望远镜采用计算机程控观测并允许通过微波通信远程操作开始, 望远镜进入远程控制阶段^[14]. 随着网络技术的发展, 远程观测被很多设备采用. 观测者不必再抵达观测台站, 而是通过远程登录等方式操作望远镜进行观测, 可以节约时间和成本.

(3)自主观测

观测者基于网络提交观测计划, 控制系统负责观测站气象和大气条件判断、观测调度、实施以及观测数据的存储与处理, 整个观测过程不需要人工干预. 随着自动化控制技术、望远镜及终端仪器的发展以及数据获取方式的进步, 自主观测模式日益完善成熟. 自主观测在早期首先实现对晨昏蒙影和天气等条件判断, 逐渐加入观测任务调度和设备故障判断等功能, 并引入人工智能机器学习功能.

自主观测相对于之前的观测方式有更多优点: 首先是观测调度灵活, 可最大化发挥观测设备效率. 传统观测方式下, 将固定的时间分配给观测者, 无法根据当前观测条件对观测任务进行灵活的调整. 而自主观测根据观测时仪器的配置、天气和视宁度条件及优先级(权重)等因素, 选择观测队列中最合适的观测任务逐个执行. 其次是数据获取质量高. 在观测过程中基于实时数据处理结果, 执行自动调焦和指向修正等工作改善成像质量, 以获得高质量数据. 最后, 自主观测还可以降低观测过程中人工判断不准确和疲劳等因素的影响, 降低不必要的到站观测成本和精力开支. 从上世纪90年代以来, 越来越多的望远镜开始进行自动化观测研究. Fraser在2 m级的利物浦望远镜(Liverpool Telescope)实现了自主观测^[15], 正在建设4 m级的Liverpool Telescope 2.0. Las Cumbres Observatory Global Telescope Network (LCOGT)已经初步实现全球布站的自主观测网络^[16], 目前正在进行下一阶段的建设.

1.2.3 地面望远镜网络发展历程

除了高纬度地区以外, 单一地基台站设备对选定目标(天区)的最长连续观测时标是观测夜. 当科学目标需求对观测对象进行长时序、连续观测时, 可选方案为: (1)将望远镜建设在南极地区, 利用极夜进行连续2–3个月的观测, 此方案成本高, 难以实现; (2)将分布于不同台站的望远镜组成观测网络进行观测. 在组网观测的实现上, 存在两个不同的技术方向:

一是基于已有的望远镜组网观测. 最早的组网观测是根据科学目标, 选择分布于不同经度(或纬度)的望远镜进行一定时间的联合测试. 随着网络技术的发展和高速互

联网的普及, 天文学家开始基于已有的天文望远镜, 通过软件改造升级, 构建观测网络实现联网观测. 在具体实施时又分为两种方法: (1)对望远镜等设备控制软件定制开发, 使其具备联网观测能力; (2)基于ASCOM和INDI等通用协议改造控制软件, 或者使用RTS2一类的工具实现联网观测. 此研究的目的是在节约改造成本和建设周期的同时, 通过实现联网观测挖掘已有观测设备的潜力. 但由于历史原因, 大部分已有设备缺少必要的、可数字化监测的安全保护措施, 仅通过软件升级难以保证无人值守的可靠性(如HTN^[17]和NORT^[18]), 组网设备的个体差异也大大地限制了此类网络科学工作的范围和深度(如Whole Earth Telescope (WET)^[19]).

二是针对特定的科学目标, 新建观测网络, 尤其是自动化观测网络. 各节点使用相同或者高度一致的硬件, 通过网络通信和软件来调度管理整个系统. 观测网络在设计阶段就充分考虑长时序观测和自动观测需求: 硬件上选择技术成熟、可靠、具有状态反馈的产品, 并做模块化设计; 控制逻辑简单可行, 具有健壮性, 构建从观测输入到数据输出的闭环过程; 软件上利用ASCOM、RTS2和INDI等协议或工具的支持, 减少开发工作量; 采用硬件和软件双重保护, 确保系统安全. 自动观测网络有利于解决时域天文学长时序观测和成本问题. 已在运行的Hungarian-made Automated Telescope Network-South (HATSouth)^[20]、Burst Observer and Optical Transient Exploring System (BOOTES)^[21]、LCOGT^[22]和Solaris^[23]等项目以及在研的Korea Microlensing Telescope Network (KMTNet)^[24]都是其典型代表.

2 中国“宋”项目计划

国际SONG计划拟在全球建设8台设计指标一致的1 m望远镜及终端设备(包括高分辨光谱仪和幸运成像系统), 在南北半球各均匀布局4个节点, 建设逼近不间断的长时序自动观测网络. 同时, 利用相同的台址、基础设施和网络平台, 建设一个我国自主运行的全球布站、长时间基线、高时间分辨率的同时性多色测光观测网络(50BiN).

考虑到参与国家的发展现状和投入的可能性, 北半球网络优先建设. 基于科学目标、成本等综合考虑, 望远镜选址于已有的优良台站. 1 m望远镜、高色散光谱仪及高帧频CCD用于光谱观测及幸运成像, 由于性能指标高, 望远镜及光谱仪均独立研制. 50 cm双筒望远镜用于大视场多色测光, 采用成熟产品, 包括望远镜和探测器.

中国“宋”项目的硬件包括: 1 m望远镜及终端设备(光谱仪, Electron-Multiplying Charge-coupled Device (EMCCD))、50 cm双筒望远镜及CCD、圆顶等. 软件包括望远镜控制系统、观测控制系统和数据管理系统.

中国“宋”项目1 m望远镜采用卡塞格林系统和地平式驱动, 具有两个耐施密斯焦点, 其中一个焦点可通过转轮将光路切换至幸运相机、库德光路或夏克-哈德曼系统, 分时实现幸运成像和高精度光谱观测, 其技术指标见表1. 同时, 1 m望远镜配备主镜面主动光学(AO)、六连杆副镜精细调焦和大气色散改正系统(ADC)用于改善成像质量. 高精度、高分辨率的光谱仪则采用经典的交叉色散、白瞳、中阶光栅光谱仪^[25], 性能指标如表2所示.

表 1 1 m 望远镜技术指标
Table 1 Specifications of 1 m telescope

Item	Performance	
Optics system	main mirror M1	paraboloid, radius of curvature 0.46 m, conic -1 , aperture 1 m, sitall, active optics
	second mirror M2	hyperboloid, conic -1.26 , M-810 miniature hexapod support
	focal length	(36667 ± 50) mm
	focal ratio	36.7
	image quality	at lucky image focal plane, $46'' \times 46''$ field of view (FOV), 80 percent energy at $0.3''$ (test band in 450–650 nm and 650–1000 nm)
	ADC	2 double glue lens
	Nasmyth focus to spectrograph	coude
Control system	direct drive	
	Max. acceleration	$2(^{\circ})/s^2$
	Max. speed	$10(^{\circ})/s$
	zenith blind zone	$\leq 2^{\circ}$
	pointing accuracy	$\leq 5''$ (rms) ($70^{\circ} \geq$ zenith angle $\geq 1^{\circ}$)
	tracking accuracy	$\leq 0.3''$ (rms) (90 s, $70^{\circ} \geq$ zenith angle $\geq 1^{\circ}$) $\leq 1.0''$ (rms) (1800 s, $70^{\circ} \geq$ zenith angle $\geq 1^{\circ}$)

50 cm 望远镜采用奥地利Astrosysteme Austria (ASA)公司生产的DDM160德国式赤道仪,并在赤道仪两端各配置1台50 cm口径R-C光学系统的镜筒.在卡塞格林焦点配置相同型号的滤光片系统及Andor CCD相机,主要技术指标如表3所示.

1 m 望远镜使用传统随动式圆顶,50 cm 望远镜采用4片天窗的全开式圆顶.两个圆顶均提供网络控制能力,可对其远程管理.

根据科学目标的需求,SONG观测网络要实现以下的功能:全球分布的多台望远镜向用户提供统一的访问接口,从外部看起来是一个整体的观测网络;观测者在Web页面提交观测请求,中央控制节点完成观测调度、任务分配、台站管理和控制等流程;每个台站在收到观测任务后,实施执行观测、数据传输和信息反馈等工作.SONG观测网络是一个基于数据驱动的自动化系统,其运行过程依赖于控制和反馈信息等在线数据和风速、降雨、沙尘等不可准确预测的环境变化.结合观测数据、日志等离线数据,大气质量以及月相等参数的综合分析结果,优化中央控制节点的观测调度和任务分配策略.

表 2 光谱仪技术指标
Table 2 Spectrograph specifications

Item	Performance
Structure	slit, off-axis parabolic collimator, echelle grating, white pupil, cross lens, camera
Pre-table	calibration halogen, ThAr, focus monitor, guiding monitor, 2 Tip-Tilt
	others temperature, humidity
Optics system	resolution 60000 (2.06", 4.05 pixel)
	wave length 120000 (1.03", 2.02 pixel)
	efficiency 480–680 nm (from slit to CCD) peak $\geq 50\%$, median $\geq 40\%$
	CCD Andor i-Kon L 936, 2048 \times 2048, 13.5 μm /pixel,
	readout speed 50 kB/s, 1 MB/s, 3 MB/s, 5 MB/s
System performance	temperature stability heat preservation, thermostat, $\pm 0.025^\circ\text{C}$
	radial velocity accuracy ± 3 m/s

中国“宋”项目软件系统的功能包括: 硬件通讯与驱动, 实现底层控制; 设备控制逻辑, 实现硬件功能控制; 中间层脚本, 可根据观测者需求编制不同观测策略脚本; 应用接口, 处理观测请求和系统任务; 响应系统状态变化的守护程序. 在实现功能的基础上, 软件系统必须满足可行性、健壮性和高效性等条件. 其设计遵循以下原则:

(1)采用层次结构. 整个系统有清晰的层次结构, 每层负责实现不同的功能, 各层之间相互透明, 使用接口通信.

(2)采用中心控制型拓扑结构, 同时各台站具有自主观测的能力. 中心节点统一调度观测任务, 避免局部故障造成整个观测网络不可用. 各节点的软件系统需要评估环境变化和和设备状态, 制定相应的运行和报警依据, 保证在非关键条件不满足或非关键设备故障的情况下, 能够正常观测.

(3)准确、可靠、快速的信息反馈. 信息反馈是提高观测效率的基础, 系统决策尤其是短期决策, 高度依赖于观测环境和设备状态. 同时, 关键设备的故障存在产生损坏设备的风险, 控制系统在收到设备工作状态信息及时响应, 可以最大化保证设备安全.

3 实施方案

从功能上, 国际SONG计划的观测网络要实现以下目标: 对选定恒星或星团进行连续不断的光谱或测光观测; 整个观测网络从外部看起来是一致的观测系统, 观测者仅通过Web页面提交观测计划; 由中心控制节点对整个网络进行调度, 各节点具有自主观测能力.

表 3 50BiN技术指标
Table 3 50BiN specifications

Item	Performance	
Optical system	optics structure	Ritchey-Chrétien
	main mirror	sitall
	aperture	50 cm, Al+SiO ₂ coating
	main ratio	3
	system ratio	9.5 (focal length: (4753 ±25) mm)
	FOV	20' × 20' (27.6 mm×27.6 mm)
	image quality	80% energy at 0.8''
Control system	direct drive	
	Max. speed	10(°)/s
	pointing accuracy	≤ 6''(rms) (zenith angle≤ 70°)
	tracking accuracy	0.2'' 10 s rms, 0.6'' 300 s rms
Filters and wheel	filter wheel	FLI CFW-4-5
	filters	Astrodon UVBRcIc filter, square 50 mm
CCD		Andor DZ936N-# BV, 2048×2048, 13.5 μm/pixel
	readout speed	50 kB/s, 1 MB/s, 3 MB/s, 5 MB/s

中国“宋”项目作为标准节点, 需要实现以下目标: 作为独立的台站进行自动观测; 接收来自中心控制节点的观测任务进行观测; 向中心控制节点反馈观测结果, 同步观测数据.

中国“宋”项目将整个系统分为观测辅助(Observation Auxiliary System, OAS), 观测控制(Observation Control System, OCS), 望远镜控制系统(Telescope Control System, TCS) 3大部分. 如图1, 系统按以下逻辑工作: 观测者通过Web页面将观测请求(Observing Requests, OR)插入中心服务器数据库; 网络调度器(Dispatcher)自动复制观测请求(OR)到各台站服务器调度数据库. 台站控制系统中, 调度器(Scheduler)守护进程将满足观测条件的请求解析为观测计划(Plan)并发送给OCS; OCS将计划分解成观测任务(Task)并调用脚本执行, 观测完成后将数据推送到观测数据库; 守护进程寻找下一观测请求.

在技术实现上, 从稳定性和可靠性等各方面考虑, 项目软件系统使用客户端/服务器(C/S)模式, 采用Debian Linux作为平台, 开发工具为Python. 数据管理选择PostgreSQL作为数据库管理系统, 使用PostgreSQL具有的触发器(Triiger)作为数据驱动机制, 使用Slony-I和GlusterFS作为数据同步工具.

3.1 观测辅助系统

观测辅助系统实现对观测有影响条件的实时监测, 采集包括光学观测条件、气象和设备状态等方面的信息, 将结果存储到数据库. 此系统既要为观测执行提供判定依据, 保

障自动观测正常和高效的运行, 也要方便天文学家管理和查询.

观测辅助系统的设计与实现是自动观测的前置条件, 根据中国“宋”项目的需求, 参考国内外相关经验, 观测辅助系统已于台址勘定时先期建成^[26], 包括以下方面:

(1)授时服务: 通过GPS及NTP服务, 为整个系统提供毫秒级的授时, 确保各设备获取准确的时间.

(2)气象系统: 两套不同的自动气象站每分钟采集一次风速、风向、温度、湿度、气压和粉尘等气象条件, 经单片机处理后, 存入气象数据库.

(3)光学观测条件: Sky Quality Meter (SQM)每分钟采集一次天顶夜天光, Differential Image Motion Monitor (DIMM)监测视宁度, 全天相机^[27]监测全天云量, 存入相应数据库.

(4)设备状态监测: 定义和采集设备工作状态, 将其存入设备状态数据库; 采用网络摄像头对设备姿态进行图像和视频采集.

(5)数据存储与发布: 整个系统采集的各项数据作为原始资料, 对台址条件、工作状态记录及后期工作的回溯有极其重要的意义, 丢失或破坏均无法恢复. 因此, 数据的存储与安全非常重要. 同时, 以可视化的方式发布于网站, 支持实时刷新与互动, 也有利于天文学家和管理人员实时掌握台站信息.

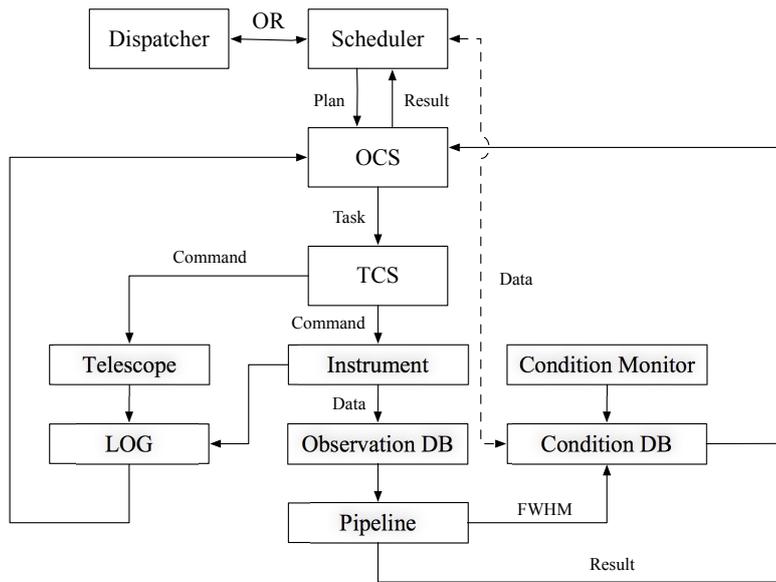


图 1 自动观测流程

Fig. 1 Automated observation process

3.2 自动观测实施方案

在实际观测中, 整个网络按以下流程工作: 首先, 各台站的一系列基于PostgreSQL建立的数据库均实时共享; 中央服务器保证插入的新观测请求和各站点的数据与状态保持更新. 考虑到网络同步时间和可能的通讯故障, OR必须提前一周提交至中央服

务器. 当新的观测请求通过Web页面提交成功时, 中央服务器中的OR等信息的数据表通过Slony-I复制到各台站的数据库. 各台站自动进行观测并处理观测数据, 将结果通过GlusterFS同步至中央服务器, FITs图像存储和备份于台站, 待网络空闲时传输至中央服务器.

每个台站的工作流程如下(图2): 控制系统的调度器(scheduler)执行收到的最新OR并选择适合的OR执行. 首先对时间进行判断, 若气象条件满足, 则提前一定时间打开圆顶, 使圆顶内外达到热平衡; 当时间到达天文昏影终后, 如果气象条件(云量、湿度、风速、降水和粉尘等)、光学观测条件(目标高度角、月相、视宁度和大气质量等)、设备状态(圆顶、望远镜和CCD等)均满足观测条件, 则根据观测模式调用相应的观测脚本, 设置好各设备明确的参数, 将望远镜指向观测目标, 开始获取观测数据. 当观测任务完成或时间到天文晨光始, 则观测结束进入定标(或平场、本底)拍摄过程. 完成后, 备份和同步数据, 推入pipeline处理. 若在观测过程中, 各项关键条件不满足(天气变坏和设备故障等), 则关闭圆顶、望远镜及终端设备, 并报错等待处理.

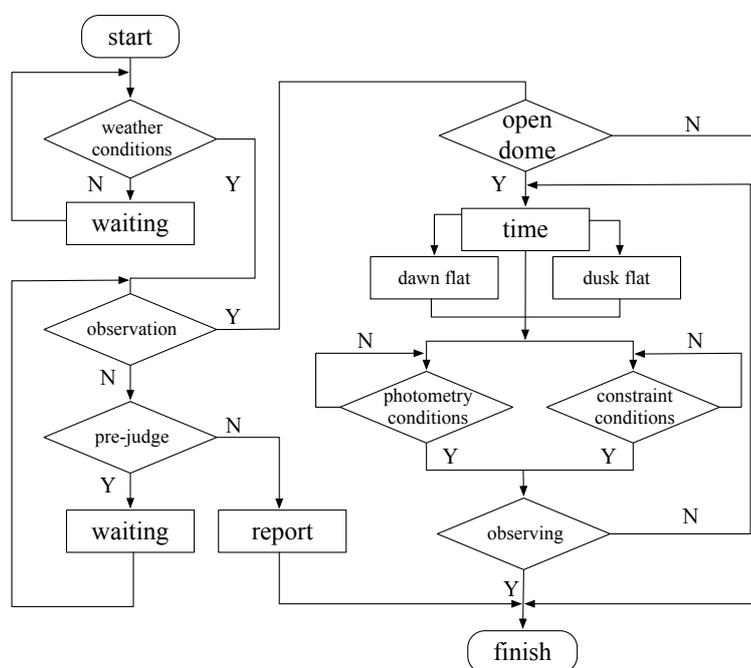


图 2 自动观测操作流程

Fig. 2 Automated observation flow

如图3所示, 观测日的时间在正常观测可分为5个阶段: 开机, 昏影终前一定时间打开天窗, 使圆顶内外达成热平衡; 晚平场, 获取天光平场(50BiN)或获取定标谱(SONG); 夜间观测, 夜天光达到要求后观测天文目标; 早平场, 获取天光平场(50BiN); 关机, 晨光始(SONG)或早平场时间后(50BiN), 关闭天窗.

在观测过程中, 服务器程序会依据设定的状态字(F1、F2和F3, 见表4)、观测时间、观测计划和设备状态, 决定当前应执行的操作, 推动观测流程的执行.

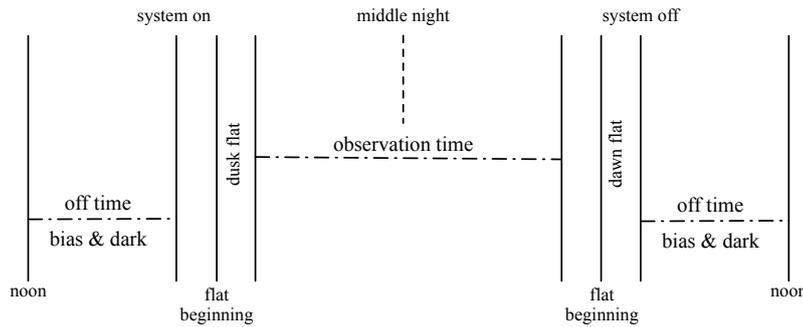


图 3 观测时间定义

Fig. 3 Time definition

表 4 状态字定义

Table 4 Status word definition

Number: implication	Description
	0: initializing, unknown status
	1: observation conditions have satisfied,
F1: weather conditions	observation could begin, need: open dome slit
	2: observation conditions have unsatisfied,
	if observing, need: close dome slit, stop observation
	0: initializing, unknown status
	1: dome slit is opened
	2: dome slit is closed
F2: dome slit status	3: dome slit is opening
	4: dome slit is closing
	5: dome open failure
	6: dome close failure
	0: waiting conditions satisfied to start observation
	1: observation is closing
F3: observation status	2: observation is finished
	3: observation is suspended
	4: device unavailable or no observation plan

4 进展与展望

经过4年多的建设, 中国“宋”项目完成了从概念设计、设备研制和采购、基础设施和观测辅助系统的建设到全部设备的安装与调试的工作, 进入了科学运行阶段. 在经过长时间的有人值守测试后, 逐步进入了全自动观测状态.

1 m望远镜及终端系统: 通过项目验收, 已实现单站人工观测, 正在开发自动观测控制系统. 目前正在进行有人值守的双站联合观测, 检验望远镜、仪器性能和稳定性, 收集软件和硬件缺陷.

50 cm双筒望远镜及终端系统: 经历3 yr的科学运行, 开展的工作包括设备性能验证工作、星团及变星的研究、场星特殊目标的时域观测和机会源等, 并取得了科学成果^[28-34]. 在3 yr的运行实践中, 我们进行了自动化观测软件设计、开发. 目前已实现自动观测全部流程, 仅需要人工推送观测命令即可完成从打开圆顶、平场拍摄、自动观测到关机的全部过程, 通过自动观测系统在有人值守的试观测后, 进入自动观测工作模式.

通过试观测和科学运行检验, 中国“宋”项目达到设计目标和功能需求, 目前正在进一步完善系统, 实现全系统自动化观测. 进一步的工作是与丹麦方联网观测, 验证国际SONG计划的科学目标, 同时检测本地基网络的实际运行情况和效率, 确保获得满足科学要求的数据产品.

致谢 感谢紫金山天文台德令哈观测站在“宋”项目建设期间给予的持续支持. 感谢南京天文光学技术研究所望远镜和设备研制团队对本工作提供的帮助. 感谢紫金山天文台青海观测站SONG项目组和西华师范大学天文系全体同仁.

参 考 文 献

- [1] Grundahl F, Arentoft T, Christensen-Dalsgaard J, et al. *Journal of Physics: Conference Series*, 2008, 118: 012041
- [2] Grundahl F, Christensen-Dalsgaard J, Kjeldsen H, et al. *Solar-Stellar Dynamos as Revealed by Helio- and Asteroseismology: GONG 2008/SOHO 21 ASP Conference Series*, 2009, 416: 579
- [3] Deng L, Xin Y, Zhang X, et al. *IAU Symposium Proceedings of the International Astronomical Union*, 2013, 288: 318
- [4] Tian J, Deng L, Zhang X, et al. *PASP*, 2016, 128: 105003
- [5] Gilliland R L, Brown T M, Christensen-Dalsgaard J, et al. *PASP*, 2010, 122: 131
- [6] Chaplin W, Basu S, Huber D, et al. *ApJS*, 2013, 210: 1
- [7] Baglin A, Auvergne M, Barge P, et al. *Proceedings of the First Eddington Workshop on Stellar Structure and Habitable Planet Finding*, 2002, 485: 17
- [8] Huber D, Ireland M, Bedding T R, et al. *ApJ*, 2012, 760: 32
- [9] Arentoft T, Tingley B, Christensen-Dalsgaard J, et al. *MNRAS*, 2014, 437: 1318
- [10] Dekker H, D'odorico S, Kaufer A, et al. *Proceedings of SPIE*, 2000, 4008: 534
- [11] Pepe F, Mayor M, Delabre B, et al. *Proceedings of SPIE*, 2000, 4008: 582
- [12] Harvey J, Hill F, Hubbard R, et al. *Science*, 1996, 272: 1284
- [13] Gehrz R, Hackwell J. *S&T*, 1978, 55: 466
- [14] Colgate S A, Moore E P, Carlson R. *PASP*, 1975, 87: 565
- [15] Fraser S N. *Adaptive Optimal Telescope Scheduling*. Liverpool: Liverpool John Moores University, 2012
- [16] Saunders E S, Lampoudi S. *Hot-Wiring Transient Universe Workshop, Santa Fe*, 2013: 117
- [17] Allan A, Hessman F, Bischoff K, et al. *AN*, 2006, 327: 744
- [18] Hajjar R, Querci F, Querci M, et al. *UNPSA*, 2001, 12: 43
- [19] Nather R, Winget D, Clemens J C, et al. *ApJ*, 1990, 361: 309
- [20] Bakos G, Csabry Z, Penev K, et al. *PASP*, 2013, 125: 154
- [21] Castro-Tirado A J, Jelínek M, Gorosabel J, et al. *Astronomical Society of India Conference Series, Astronomical Society of India*, 2012, 7: 313

- [22] Brown T, Baliber N, Bianco F, et al. PASP, 2013, 125: 1031
- [23] Stepp L M, Gilmozzi R, Hall H J, et al. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers Proceedings, International Society for Optics and Photonics, 2014, 9145: 16
- [24] Kim S L, Lee C U, Park B G, et al. JKAS, 2016, 49: 37
- [25] Tull R G, MacQueen P J, Sneden C, et al. PASP, 1995, 107: 251
- [26] 田健峰. SONG自动观测辅助系统的研发. 北京: 中国科学院大学, 2016
- [27] 田健峰, 邓李才, 闫正洲, 等. 天文学报, 2016, 57: 366
- [28] Zhang X, Deng L, Wang K, et al. AJ, 2014, 148: 40
- [29] Zhang X, Deng L, Tian J, et al. AJ, 2014, 148: 106
- [30] Wang K, Deng L, Zhang X, et al. AJ, 2015, 150: 161
- [31] Pan Y, Luo Z Q, Zhang X B, et al. RAA, 2016, 16: 009
- [32] Peng Y J, Luo Z Q, Zhang X B, et al. RAA, 2016, 16: 157
- [33] Deng L, Xin Y, Zhang X, et al. IAUGA, 2015, 22: 46848
- [34] Chen X, Deng L, De Grijs R, et al. AJ, 2016, 152: 129

SONG-China Project: A Global Automated Observation Network

YAN Zheng-zhou^{1,2,3} LU Xiao-meng¹ TIAN Jian-feng¹
ZHANG Chun-guang¹ WANG Kun³ DENG Li-cai^{1,2}

(1 Key Laboratory of Optical Astronomy, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012)

(2 School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

(3 Physics and Space Science College, China West Normal University, Nanchong 617000)

ABSTRACT Driven by advancements in technology and scientific objectives, data acquisition in observational astronomy has been changed greatly in recent years. Fully automated or even autonomous ground-based network of telescopes has now become a tendency for time-domain observational projects. The Stellar Observations Network Group (SONG) is an international collaboration with the participation and contribution of the Chinese astronomy community. The scientific goal of SONG is time-domain astrophysics such as asteroseismology and open cluster research. The SONG project aims to build a global network of 1 m telescopes equipped with high-precision and high-resolution spectrographs, and two-channel lucky-imaging cameras. It is the Chinese initiative to install a 50 cm binocular photometry telescope at each SONG node sharing the network platform and infrastructure. This work is focused on design and implementation in technology and methodology of SONG/50BiN, a typical ground-based network composed of multiple sites and a variety of instruments.

Key words telescopes, SONG-China Project, methods: observational