第59卷 第3期 天 文 学 报 Vol.59 No.3
2018年5月 ACTA ASTRONOMICA SINICA May, 2018

doi: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2018.03.001

大视场巡天望远镜探测器响应与滤光片优化分析*

师冬冬[1,2†] 郑宪忠[1‡] 赵海斌[1] 娄 铮[1] 王海仁[1]
钱 元[1] 刘 伟[1] 姚大志[1]

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210008)
(2 中国科学技术大学天文与空间科学学院 合肥 230026)

摘要 大视场巡天望远镜(Wide Field Survey Telescope, WFST)是采用主焦式光学设计、2.5 m口径、具备强大巡天能力的望远镜, 可以开展大规模图像巡天, 用于刻画银河系和近邻宇宙的组成和结构、普查太阳系天体和外部构成、开展时域天文监测等科学研究工作. 结合大视场巡天望远镜光学系统的透过率、西藏阿里站址的大气透过率和冒纳凯阿台址的天光发射谱, 比较不同电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)量子响应曲线、读出噪声和不同曝光时间情况下, 不同类型天体在u、g、r、i、z和w波段的能谱响应, 分析各个波段测光信噪比, 优化确定CCD响应曲线和用于太阳系天体巡天的白光滤光片(w)设计. 分析结果显示: 蓝敏CCD对探测超新星等高能爆发暂现源有优势, 但在r、i、z波段效率降低, 从而降低这些波段的巡天探测灵敏度. 光学宽带CCD响应曲线兼顾蓝端和红端能谱响应, 在相同观测时间内, 可以实现比蓝敏CCD更高的巡天灵敏度. 采用宽带CCD响应曲线, 结合估算的WFST系统光学成像效率及站址的天光和消光, 计算给出了巡天观测对太阳系天体(G2V恒星光谱)、椭圆星系(E)、漩涡星系(Sbc/Scd)、不规则星系(Im)、类星体、I型和II型超新星的探测灵敏度. 通过调节w波段的带宽和中心波长, 可以实现对不同类型天体的能谱响应信噪比最大化. 综合比较, 确定w滤光片的优化设计波长范围为367–795 nm. 最后, 计算给出了各波段长期巡天图像数据叠加的探测灵敏度随曝光时间的变化曲线.

关键词 大视场巡天: 滤光片, 电荷耦合器件: 信噪比, 灵敏度
中图分类号: P111; **文献标识码**: A

1 引言

技术进步促进天文设备观测能力和手段的不断提升, 进而推动天文观测研究的发展. 在过去二十年间, 不同规模的光学巡天观测计划陆续开展, 如Sloan Digital Sky

2017-09-19收到原稿, 2017-11-22收到修改稿
*国家重点研发计划(2017YFA0402703)和国家自然科学基金项目(11773076)资助
†ddshi@pmo.ac.cn
‡xzzheng@pmo.ac.cn

Survey (SDSS)[1]、Hyper-Suprime Cam (HSC) Legacy Survey[2]、Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System (Pan-STARRS) 3π Survey[3]等, 提供了丰富的巡天数据, 大大促进了多个天文领域研究的进展. 与此同时, 科学研究的拓展和突破也提出新的观测需求, 推动研发新一代具备强大巡天能力的大视场望远镜, 用于获取大规模高质量、高灵敏度和高时频(cadence)的图像观测数据, 开展时域天文前沿在内的多领域科学研究.

建设中的Large Synoptic Survey Telescope (LSST)是一台8.4 m口径、视场直径3.5°的大型综合巡天望远镜, 计划开展南天球2×10^4 deg^{2}天区面积的u、g、r、i、z、y 6个波段的巡天观测, 每3 d巡测一遍, 以暗物质和暗能量、太阳系天体、时域天文和银河系研究为核心科学目标[4]. 预研中的大视场巡天望远镜(Wide Field Survey Telescope, WFST)是一台2.5 m口径的主焦式望远镜, 拥有3°直径大视场、9亿像素探测器, 成像质量高、通光量达39.3, 是仅次于LSST的专用光学图像巡天设备. 大视场巡天望远镜拟开展北天球2×10^4 deg^{2}的大规模光学u、g、r、i、z、w波段图像巡天, 与南天LSST巡天互补. 此外, 大视场巡天望远镜配备有大气色散补偿器, 可以实现超宽w波段的高像质成像. 在本文中, 我们结合科学目标和设备的光学系统响应及站址观测条件, 分析巡天设备在观测不同能谱类型天体的各波段探测灵敏度, 优选探测器响应曲线, 优化设计巡天滤光片的透过率曲线, 定量评估观测灵敏度与巡天进展的关系.

SDSS和LSST望远镜所使用的滤光片均为宽带滤光片. Fukugita等[5]指出, 宽带滤光片在红外或近红外波段会引起平场问题, 尤其对于旧的背照明电荷耦合器件(CCD: Charge Coupled Device)的“staring”模式更显著, 而这种影响可以通过改善CCD和滤光片的镀膜等制造工艺修正. 波段超宽的w滤光片, 又称白光(white)滤光片, 相当于SDSS的g、r、i滤光片的合成, 常用于太阳系天体、空间碎片以及超新星爆发等暂现源的搜寻[6]. 超宽滤光片允许接收更宽波段的电磁辐射, 提高目标天体的信号探测强度. Pan-STARRS[3]望远镜系统采用的w滤光片相当于g、r、i 3个滤光片的覆盖波段叠加. 大视场巡天望远镜设计的滤光片系统中包括w滤光片, 可用于太阳系天体和空间碎片的观测, 该望远镜比Pan-STARRS 1.8 m望远镜口径更大, 可以探测到更暗的天体. 当目标天体亮度比天光亮度更暗时, 天光噪声开始主导探测灵敏度, 红端波段(i、z、y)的天光亮度比蓝端(u、g、r)高, 超宽w滤光片的波段覆盖范围需要针对巡天观测目标的能谱进行优化.

本文将利用模拟的高海拔台址大气透过率曲线和夏威夷冒纳凯阿(Mauna Kea)观测台址天光背景发射谱, 结合巡天望远镜预期的光学系统透过率曲线和不同CCD量子响应曲线, 选择CWW (Coleman, Wu and Weedman)模板[1]中的椭圆星系(E)、漩涡星系(Sbc/Scd)和不规则星系(Im)、SWIRE (Spitzer Wide-Area Infrared Extragalactic survey)模板库[2]中的类星体(QSO)、Peter Nugent能谱模板[3]中的I型和II型超新星(SNI、SNII)以及太阳系天体类型的恒星(G2V)能谱共8个天体能谱模板[7−9]来研究: (1) CCD量子响应曲线对望远镜巡天效率和灵敏度的影响; (2)目标天体信噪比与w滤光片的波长变化关系; (3)估计各滤光片在不同曝光时间的5σ极限星等. 本文采用AB星等系

[1]http://www.bo.astro.it/ micol/Hyperz/old public v1/hyperz manual1/node6.html
[2]http://www.iasf-milano.inaf.it/ polletta/templates/swire templates.html
[3]http://c3.lbl.gov/nugent/nugent templates.html

统[10].

2 系统响应函数

2.1 滤光片透过率曲线

传统测光系统的不同光学滤光片的透过率曲线波段重合较多, 且透光率曲线呈尖锐峰值分布. SDSS的滤光片透过率曲线顶部相对平缓, 边缘陡直, 接近矩形, 使得滤光片透过效率最大化; 不同滤光片的波段重合较少, 更利于天体能谱的测定. LSST的滤光片与SDSS的u、g、r、i滤光片相同, 而z波段带宽相对窄些, 并增加了y波段滤光片. SDSS的z滤光片在红端没有截止, 以充分利用CCD量子响应曲线, 提高灵敏度. 我们所用的宽带滤光片u、g、r、i与LSST的相应滤光片相同, z滤光片与SDSS相应滤光片相同, 而w滤光片类似于Pan-STARRS中的g、r、i滤光片的合成[11−12](如图1所示的黑色实线). 实际的滤光片曲线顶部透过率有起伏, 我们在这里使用简化的滤光片曲线, 对计算结果影响不大.

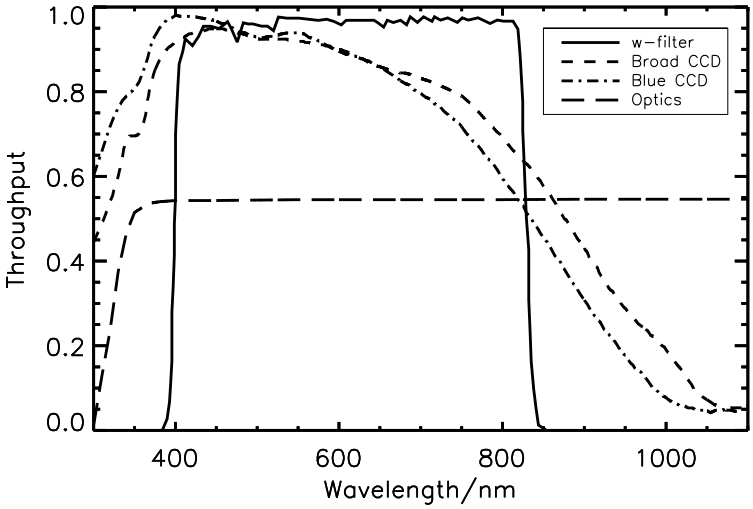

图 1 WFST系统响应函数比较图. WFST的光学系统透过率(thoughput)随波长变化曲线(黑色长虚线)、蓝敏(黑色点划线)和光学宽带(黑色短虚线)两种类型下的CCD量子响应曲线, Pan-STARRS的w滤光片(黑色实线)透过率曲线

Fig. 1 Comparison of system response functions for WFST. The black solid line is w filter transmission curve from Pan-STARRS; The black dash-dotted (blue-sensitive) and the black short dashed (optical broadband) curves are two kinds of CCD quantum response curves; and the black long dashed line is the predicted throughput of the optical system of WFST

一个滤光片的有效波长可定义为:

$$\lambda_{\rm eff} = \frac{\int \lambda T_\lambda {\rm d}\lambda}{\int T_\lambda {\rm d}\lambda}, \tag{1}$$

其中, T_λ为滤光片的透过率, λ为对应的波长. LSST中u波段的有效波长为356.3 nm, g波段的有效波长为475.9 nm, r波段的有效波长为620.4 nm, i波段的有效波长为753.9 nm,

SDSS的z波段的有效波长为872.2 nm, 如图2所示.

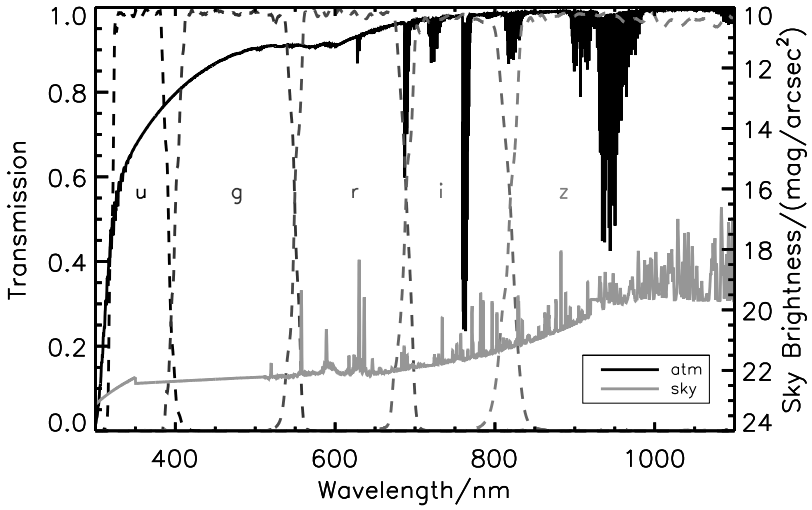

图 2 海拔5130 m观测台址的模拟大气透过率曲线和夏威夷冒纳凯阿(Mauna Kea)观测台址暗夜的天光发射谱. 模拟大气透过率曲线利用MODTRAN软件生成. 天光背景发射谱来自Gemini天文台的实测数据. 背景虚线(不同灰度)是大视场巡天望远镜所用的u、g、r、i、z滤光片对应的透过率曲线

Fig. 2 The simulated atmospheric transmission curve for the site at the altitude of 5130 m, generated using the software MODTRAN, and the sky background spectrum of dark night at the Gemini Observatory on the summit of Mauna Kea. The background dashed lines (different gray) denote the transmission curves of the u, g, r, i, and z filters

2.2 CCD探测器的量子响应曲线

我们采用E2V公司生产的290-99背照明CCD探测器, 像元数为10 k ×10 k. 我们选取两组典型的量子响应曲线开展进一步对比分析, 以便选取合适的CCD透过率曲线, 有利于大视场望远镜开展巡天观测. 选取的这两种量子响应曲线为工作温度在173 K标准硅片的宽带和蓝敏类型, 采用的涂层不同, 对不同波段光子的响应有差别, 如图1中的黑色点划线和黑色短虚线.

比较图1中的两条CCD量子响应曲线, 亦即CCD将接收到的光子转为电子的效率, 我们可以看出蓝敏CCD在u、g波段具有更高的响应, 而宽带CCD在r、i、z波段的量子响应效率更高. 在完成全部波段图像巡天达到相同灵敏度情况下, 哪种类型CCD探测器的总体效率更高、所需巡天时间更少, 就可以确定为系统采用的CCD探测器类型.

2.3 望远镜光学(optics)系统响应函数

大视场巡天望远镜的光学系统由主镜、5个透镜、一个大气色散改正镜组成, 有效口径为2.3 m[13]. 设计团队定量评估了该望远镜的光学系统透过率(throughput)曲线. 参考国际已建成的望远镜光学系统性能, 与光学透过率估算有关的参数估算如下:

(1)计算包括改正镜对光学系统的遮拦, 其面积大约是主镜的18%;

(2)采用传统铝膜的反射率曲线, 假定镀膜后的主镜平均反射率为0.90;

(3)采用镀膜后透镜表面的透过率为0.98;

(4)透镜第3镜材料为N-BK7光学玻璃, 对350 nm以上光子透过率在90%以上, 对小于350 nm的紫外光子有显著吸收; 其他透镜材料为熔石英, 对紫外光学波段吸收率可设为0.

考虑以上因素, 给出估计的大视场巡天望远镜光学系统透过率曲线如图1中黑色长虚线所示. 从图中可看出该望远镜的光学系统在350 nm以下的透过率较低, 而在其他波段保持不变, 其光学波段透过率为0.545.

除望远镜光学系统响应和探测器响应曲线外, 大气消光、天光背景亮度、所在观测台址的大气视宁度(seeing)、大气透明度和水汽含量等因素对天文观测图像的灵敏度也有重要影响[14−17], 因此在对望远镜的不同波段灵敏度定量估计时需要予以考虑.

2.4 大气透过率和天光背景辐射

大气中的气体分子、水汽分子和悬浮气溶胶等细微颗粒会对穿过大气的电磁辐射产生消光(吸收和散射)作用, 消光强度随波长变化的曲线即为大气的消光曲线, 亦即大气透过率曲线[4]. 大视场巡天望远镜计划安置在西藏阿里地区海拔5130 m的狮泉河观测台址上. 此处还没有实测标定的大气透过率曲线. 我们借助计算大气透过率的MODTRON软件, 模拟给出了海拔5130 m的观测台址上空大气的透过率曲线[5], 如图2中有吸收线的曲线所示. 考虑到大气中的水汽等分子成分, 我们设定大气质量(airmass)为1.2、水汽含量PWV=2 mm, 利用MODTRAN软件计算得到了从紫外到光学、近红外波长范围的大气透过率响应. 大气质量越大, 辐射穿过大气的光程就越大, 使得大气透过率降低, 尤其在紫外波段, 大气透过率对大气质量非常敏感. 而大气中的水汽含量是根据望远镜所在台址的可降水量来度量的, 在近红外波段吸收显著, 影响较大[18].

大气除了吸收和散射来自大气层外的辐射外, 自身也会产生电磁辐射. 图2中所示的天光背景辐射能谱来自美国光学国立天文台(NOAO: National Optical Astronomy Observatory)给出的Gemini-North望远镜所在夏威夷(Hawaii)台址处的实测数据[19], 是暗夜(dark night)的天光辐射能谱[6]. 从图中可以看出, 在350–550 nm波段的天光背景谱较平; 在300–350 nm波段, 主要是大气中氧气的瑞利散射贡献的天光连续谱; 红外波段密集的发射线谱主要是由大气中的水汽电离出的羟基(OH)贡献的. 由于夏威夷冒纳凯阿(Mauna Kea)观测台址海拔高度(4200 m)与阿里地区狮泉河站址的海拔相近, 我们采用Gemini天文台的暗夜天光发射谱来模拟WFST望远镜的观测条件.

3 分析与结果

3.1 望远镜灵敏度估算

光学系统透过率、滤光片透过率和CCD量子响应共同决定了望远镜整体的透过率曲线, 加上观测站址的观测条件(视宁度、大气消光及天光背景辐射强度), 与望远镜口

[4]http://www.cfht.hawaii.edu/Instruments/Observatory Manual/CFHT Observatory Manual(Sec2).html

[5]http://hinotori.hiroshima-u.ac.jp/Instrument/

[6]http://www.gemini.edu/sciops/telescopes-and-sites/observing-condition-constraints/optical-sky-background

径一起决定了望远镜在给定曝光时间实测能够达到的灵敏度. 我们利用上节中给出的大视场巡天望远镜响应曲线并结合其他参数来计算望远镜的灵敏度. 大视场巡天望远镜的有效口径为2.3 m, 单次曝光时间为30 s, 大气视宁度为1 arcsec, 望远镜在巡天状态下探测器处于为3 MHz快速读出模式, 读出噪声为18 $\mathrm{e}^- \cdot \mathrm{pixel}^{-1}$, 探测器像素大小为0.3 arcsec, CCD增益为1. 在计算AB星等时, 我们采用的测光零点为$F_0 = 3.631 \times 10^{-20}$ $\mathrm{erg \cdot s^{-1} \cdot cm^{-2} \cdot Hz^{-1}}$.

利用上述数据, 我们估算WFST望远镜实测曝光30 s的信噪比. 定义信噪比的表达式[20]为:

$$S/N = \frac{N_* t}{\sqrt{N_* t + n_{\mathrm{pix}}(N_{\mathrm{s}} t + N_{\mathrm{R}}^2)}}\,, \tag{2}$$

其中, N_*是单位时间内望远镜探测器接收到的目标天体的光电子数, t是曝光时间, N_{s}是单位时间内探测器接收到的天光背景的光电子数, N_{R}为读出噪声电子数, n_{pix}是目标天体信号在探测器上的像元数. 在具体计算过程中, 我们用输出的光电子数目来代替信号和噪声. 信号主要来源于探测器接收天体的光子积累的电子数目, 利用r波段23 mag的天体对能谱模板进行定标, 并在给定的曝光时间和望远镜接收面积计算出不同波长的总能量, 得到总的接收光子数随波长变化关系, 最后利用滤光片、CCD量子响应曲线、望远镜光学成分等计算出接收到天体源的总电子数, 即源的信号. 天体亮度为r=23 mag的辐射到达地球大气层外的流量密度为2.29×10^{-29} $\mathrm{erg \cdot s^{-1} \cdot cm^{-2} \cdot Hz^{-1}}$, 对应的光子数密度为$3.46 \times 10^{-3}$ $\mathrm{s^{-1} \cdot cm^{-2}}$.

噪声主要来自天体源自身的光子噪声、仪器噪声(主要是由读出噪声主导, 暗流引起的噪声可忽略)以及天光背景噪声. 光子噪声为信号电子数的平方根; 读出噪声是由CCD探测器给定的; 天光背景噪声的计算与求解信号的方法类似, 这里忽略来自遥远的河外背景辐射. 根据暗夜(dark night)下的天光背景发射谱, 利用B波段面亮度为22.3 $\mathrm{mag \cdot arcsec^{-2}}$对其进行定标, 得到天光背景噪声, 最后将这3种噪声叠加即为天体的总噪声. 图3展示了8个不同谱型的天体在暗夜下的天光辐射能谱随波长的变化关系. 这种关系是由天体能谱与大气消光、望远镜光学系统以及宽带类型的CCD量子响应曲线卷积得到的, 此时未与滤光片卷积.

由图3中的关系, 我们可得到不同类型天体源在不同波段下的信噪比, 从而估算出WFST望远镜在不同波段的灵敏度. 在计算信噪比时, 我们采用2 arcsec直径的圆孔径对大气视宁度(seeing)为1 arcsec条件下轮廓为高斯函数的点扩散函数(PSF)点源测光, 孔径内像元数为34.9个, 目标点源圆孔径外光子数比例为6.3%. 将图3的能谱与滤光片卷积后, 再利用(2)式得到天体源在各波段的信噪比, 结果如图4所示. 需要指出的是, 对于河外星系这样的展源来说, 以PSF来计算会高估其信噪比, 高估程度与星系的半光半径和轮廓分布有关. 本文讨论的灵敏度估算是基于点源的轮廓分布.

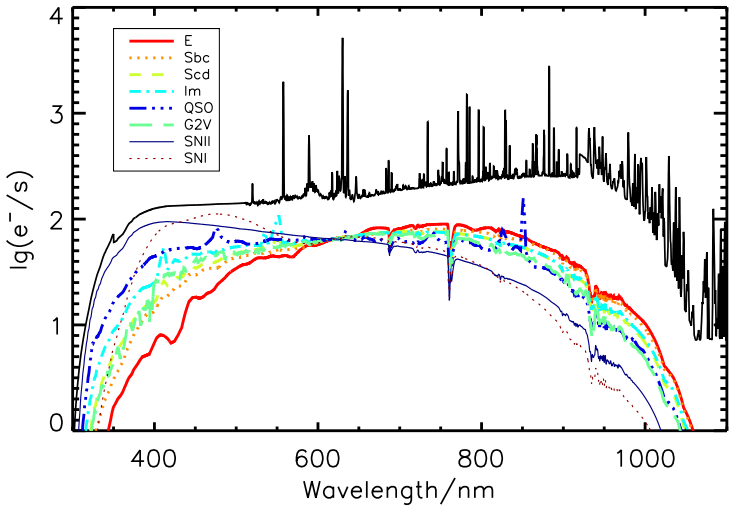

图 3 WFST在30 s曝光时间下接收到来自天光和r=23 mag的8类不同能谱天体光子转换的电子数随波长变化关系

Fig. 3 Number of electrons integrated by WFST within 30 s exposure as a function of wavelength from the sky (black) and eight types of r=23 mag celestial sources (color-coded), respectively

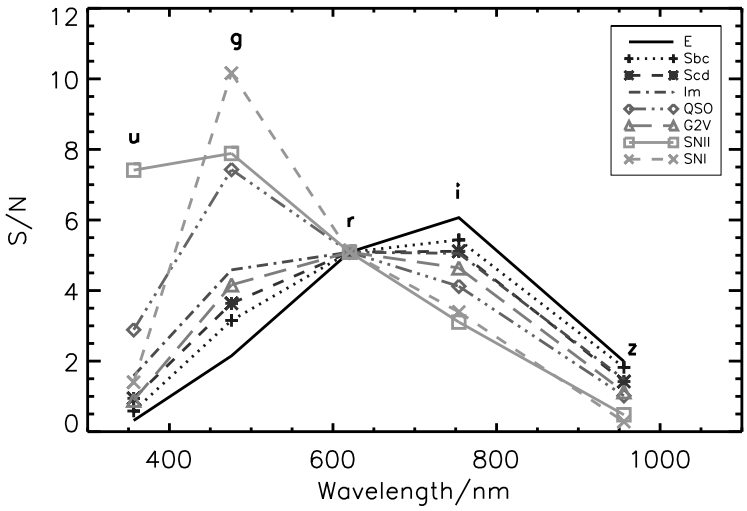

图 4 8种不同类型的天体源在宽带类型的CCD量子响应下u、g、r、i、z波段的信噪比

Fig. 4 Signal-to-noise ratios at u, g, r, i, and z for eight types of celestial sources. The broadband CCD quantum response is adopted here

3.2 CCD量子响应曲线对比

我们在上一节中给出蓝敏和宽带两种类型的CCD量子响应曲线(如图1所示). 利用WFST在相应观测条件和望远镜参数下, 30 s曝光得到了8类不同能谱天体在u、g、r、

i、z 5个波段的信噪比, 如图4所示. 考虑在高海拔台址开展u波段巡天有其独特优势, 我们结合WFST的科学目标, 分析如何选取合适类型的CCD量子响应曲线.

我们通过比较蓝敏和宽带两种CCD量子响应下不同能谱的天体在u、g、r、i、z波段的信噪比来选取CCD类型. 蓝敏CCD量子响应在u波段比宽带CCD量子响应高, 在g、r波段与宽带CCD量子响应相当, 但考虑到整个波段的巡天效率, 我们最终选取了宽带CCD作为WFST望远镜的量子响应曲线. 我们主要通过修正各波段的曝光时间使得天体在蓝敏和宽带CCD下的灵敏度相同来选取合适的CCD量子响应. 结果表明: u波段达到蓝敏CCD的30 s曝光灵敏度时, 宽带CCD需要在30 s的基础上增加5.28 s, 在g波段需要增加0.22 s才能达到蓝敏CCD的30 s曝光灵敏度; 而蓝敏CCD在r、i、z波段需要增加23.9 s的曝光时间才能达到宽带CCD的30 s曝光达到的灵敏度. 若将蓝敏CCD在r、i、z波段增加的23.9 s曝光时间添加到u波段后, 此时宽带CCD在u波段天体源的信噪比比蓝敏CCD在u波段高, 如表1所示. 当5个波段达到指定灵敏度时, 蓝敏CCD开展巡天的总曝光时间比宽带CCD多曝光12.3%, 这表明宽带CCD在总体巡天的效率比蓝敏CCD更高, 所需巡天时间更少. 因此, 我们选择宽带CCD作为WFST的探测器.

表 1 天体源在蓝敏、宽带两种类型的CCD量子响应下u波段的信噪比

Table 1 The u-band signal-to-noise ratios of celestial sources under blue-sensitive and broadband CCD quantum responses, respectively

Source types	E	Sbc	Scd	Im	QSO	G2V	SNII	SNI
S/N with blue CCD (30 s)	0.36	0.67	1.08	1.81	3.30	1.02	8.45	1.60
S/N with broad CCD (30 s)	0.33	0.61	0.99	1.65	3.01	0.93	7.73	1.46
S/N with broad CCD (30+23.9 s)	0.45	0.84	1.35	2.27	4.14	1.28	10.62	2.01

Pan-STARRS不具备u波段良好的探测能力, 而u波段的天光背景较低, 更适合探测在紫外变化较大的活动星系核(AGN)和高能爆发事件, 可用来示踪年轻恒星, 测量恒星的金属丰度和研究近邻宇宙的恒星形成, 也可用来开展超新星、伽马暴等暂现源和变星等的时域天文研究; 对于遥远星系, u波段的观测可以更好地测量它们的测光红移等. 此外, u波段也是未来大视场巡天望远镜(WFST)开展时域巡天的一种重要的观测波段.

3.3 w滤光片

w滤光片主要用于太阳系天体搜寻和时域天文观测, 其波段范围设置需根据科学目标和巡天策略予以优化. 因此, 我们根据大视场巡天望远镜的科学目标需求, 定量优化分析w滤光片. w滤光片的优化分析主要借助于望远镜的CCD量子响应、光学透过率、大气消光及天光背景辐射强度等, 给定曝光时间和天体能谱类型, 得到w滤光片的信噪比随波长变化的函数关系, 从而估计出w滤光片下信噪比的优化值.

当前设计生产的滤光片透过率曲线接近矩形, 顶部平直透过率接近1, 在两端迅速下降至0. 在具体优化计算中, 我们参考Pan-STARSS望远镜的w滤光片的透过率曲线. 假设WFST的w滤光片透过率曲线顶部为常数0.97, 曲线的蓝端和红端分别与g和i滤光片的

蓝端和红端的斜率相同, 而截止波长可变. 这里的截止波长指透过率降为峰值的一半时对应的波长. 实际制成的滤光片的透过率曲线顶部数值有波动, 但不影响我们的优化结果. 需要注意的是, 我们所选用的天体源类型有CWW模板中的4类星系、SWIRE模板中的类星体(QSO)能谱、Peter Nugent模板中的两类超新星能谱以及类太阳恒星能谱8类天体. 我们设定4类星系和2类超新星的红移为$z = 0.1$, 类星体QSO的红移$z = 0.7$[21]. 定义信噪比随波长的变化关系, 其表达式为:

$$S/N = \frac{\int_{\lambda_b}^{\lambda_r} S(\lambda)\,\mathrm{d}\lambda}{\int_{\lambda_b}^{\lambda_r} N(\lambda)\,\mathrm{d}\lambda}\,, \tag{3}$$

其中, $S(\lambda)$为天体源总的信号随波长变化关系, $N(\lambda)$为天体源总的噪声随波长变化关系, λ_r为红端截止波长, λ_b为蓝端截止波长.

对w滤光片波长的优化分析, 我们采用两种模式来计算. 第一种模式是固定w滤光片蓝端截止波长为$\lambda_b = 300$ nm, 变化红端截止波长λ_b, 步长为0.1 nm. 选择宽带类型的CCD量子响应, 利用光学透过率、大气消光、天光背景辐射强度及天体能谱, 结合WFST望远镜给定的相关参数, 根据(3)式得到不同谱型的天体在w滤光片的信噪比与波长的函数关系, 如图5所示. 结果显示不同谱型的天体信噪比均对应一个最大值, 相应地对应一个最优截止波长值.

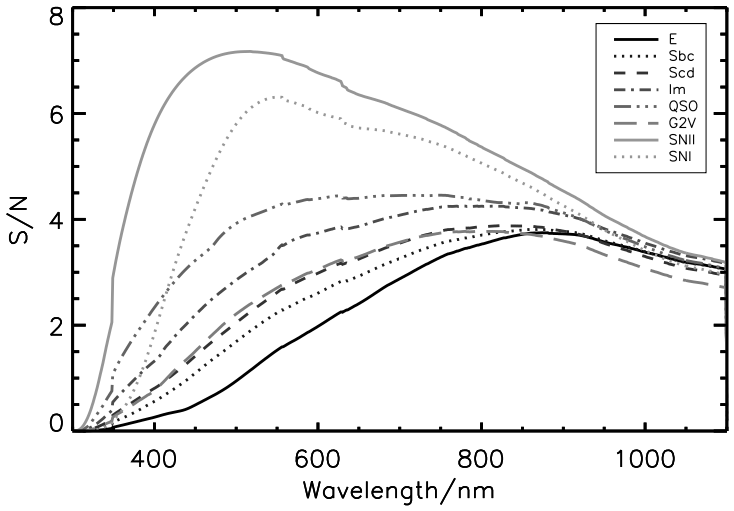

图 5　天体在w波段30 s曝光成图的测光信噪比随w滤光片红端截止波长变化的关系. w滤光片透过率曲线蓝端固定在300 nm, 改变红端截止波长变化

Fig. 5　The signal-to-noise ratios (30 s exposure) for eight types of celestial sources as a function of the red cut-off wavelength of the w filter. The blue cut-off wavelength of w filter is fixed at 300 nm, and the red cut-off wavelength is tuned

表2给出了固定w滤光片蓝端截止波长$\lambda_b = 300$ nm, 变化红端截止波长λ_r的结果. 8种不同谱型的天体在w波段对应的最优截止波长大小分别为875 nm、861 nm、827

nm、780 nm、750 nm、795 nm、517 nm、552 nm. 由图5中的曲线可知, 不同谱型的天体源所对应的w波段的最优截止波长值也不同. 结果还显示出, 对于蓝光主导的超新星, 其对应的w波段最优红端截止波长在g波段, 而椭圆星系所对应的w波段的最优红端截止波长更接近z波段.

表 2 固定w波段蓝端截止波长$\lambda_{\rm b}=300$ nm, 8类天体信噪比最大时的红端波长最优值

Table 2 The optical red cut-off wavelength of the w filter with the blue cut-off wavelength fixed at $\lambda_{\rm b}=300$ nm with the maximized signal-to-noise ratios for eight types of celestial sources

Source type	E	Sbc	Scd	Im	QSO	G2V	SNII	SNI
$(S/N)_{\rm max}$	3.75	3.81	3.88	4.25	4.46	3.77	7.17	6.31
$\lambda_{\rm max}$/nm	875	861	827	780	750	795	517	552

用于w滤光片优化分析的第二种模式是同时改变w波段两端截止波长$\lambda_{\rm r}$、$\lambda_{\rm b}$的取值, 它们的取值范围为300–1100 nm, 步长为0.5 nm. 计算得到信噪比极大值对应w滤光片蓝端和红端最优波长. 最大信噪比与波长的关系如图6所示. 结果也显示了不同谱型的天体源所对应的w波段的最优截止波长范围是不同的.

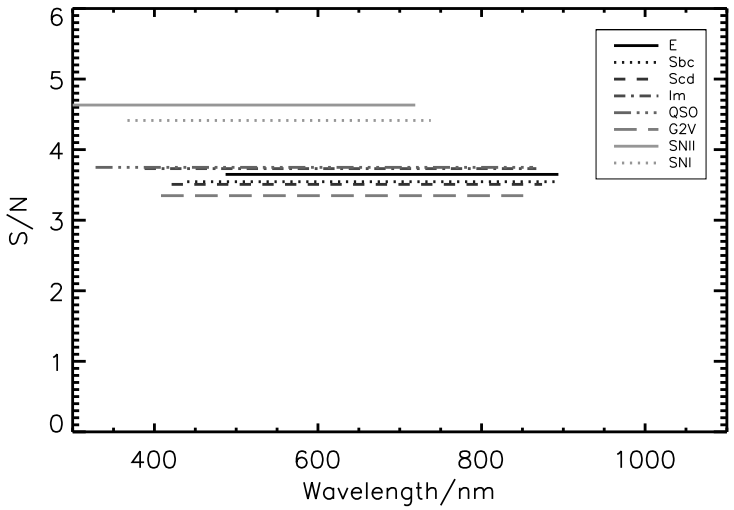

图 6 观测不同能谱类型天体时实现最优信噪比对应的w滤光片蓝端和红端截止波长范围

Fig. 6 Maximal signal-to-noise ratio achieved with w filter for eight types of celestial sources. These lines denote the optimal band width

表3是同时改变w滤光片两端波长大小得到的最优截止波长范围. 此时8种不同谱型的天体在w波段对应的最优截止波长范围分别为487–894 nm、440–891 nm、421–874 nm、388–867 nm、328–863 nm、408–851 nm、300–719 nm、367–738 nm. 图6显示了对于年轻恒星更适合在紫外波段观测, 可以用来研究近邻宇宙的恒星形成, 这也与第一

种模式下得到的结果一致.

表 3 同时调节w滤光片两端截止波长λ_r和λ_b下8种天体源的信噪比

Table 3 The signal-to-noise ratios of eight celestial sources when adjusting the blue cut-off wavelength λ_b and red cut-off wavelength λ_r of w filter

Source type	E	Sbc	Scd	Im	QSO	G2V	SNII	SNI
$(S/N)_{max}$	3.65	3.55	3.51	3.73	3.75	3.35	4.63	4.41
λ_{max}/nm	487–894	440–891	421–874	388–867	328–863	408–851	300–719	367–738

两种模式对w滤光片波长进行优化分析的结果是一致的. 不同谱型的天体对应的w滤光片波长最优范围不同. 为了更多地包含天体信息, 综合考虑不同谱型天体源的性质, 结合8种天体源信噪比的优化分析, 我们截取大视场巡天望远镜w滤光片最优波长范围为367–795 nm. 这比Pan-STARRS中的w滤光片(433–815 nm)带宽更宽, 其可覆盖紫外到近红外波段. 通过我们的w滤光片可探测更多有用信号, 从而可提高望远镜的探测灵敏度, 这也使得大视场巡天望远镜具有独特的竞争优势.

3.4 WFST灵敏度分析

大视场巡天望远镜光学系统响应、CCD探测器量子响应, 模拟海拔高度为5130 m观测台址的大气透过率曲线u、g、r、i、z、w 6个滤光片总的透过率曲线如图7所示. 图7包含WFST各种透过率成分, 其中优化分析得到的w滤光片波长范围为367–795 nm, 有效波长为580.2 nm. 大视场巡天望远镜配备有大气色散补偿器, 可以实现w波段的高像质成像, 大大提高望远镜的探测能力, 这也是该望远镜最有竞争力的优势, 相应的w波段巡天也将会成为时域巡天的主要模式.

我们将优化得到的w滤光片与由g、r、i波段合成的w′滤光片进行比较. 根据望远镜CCD探测器量子响应、望远镜光学成分、大气消光以及天光背景辐射强度等, 在相同的曝光时间和望远镜参数等比较信噪比为5的天体的亮度. 结果发现针对WFST望远镜优化的w滤光片对能谱颜色偏蓝天体的观测结果比w′波段深0.01–0.16 mag, 而相对能谱颜色偏红天体的观测结果比w′波段深$\sim$ 0.005 mag, 两者相差不大. 优化的w滤光片包含了紫外波段(部分u波段), 有效波长为580.2 nm, 比由g、r、i波段合成w′滤光片(有效波长: $\sim$ 609.8 nm)更靠近蓝端, 具有紫外波段的优势, 因此也适合探测对紫外敏感的天体.

前面给出了大视场巡天望远镜的各种透过率成分, 并得到了w滤光片优化波长范围. 为了解大视场巡天望远镜探测能力, 我们分析望远镜u、g、r、i、z、w 6个滤光片的探测灵敏度. 我们采用两种观测模式来估算望远镜滤光片的灵敏度: 第一种为巡天模式, 即单次曝光时间为30 s, 读出噪声为18 $e^-\cdot pixel^{-1}$的快速读出模式; 第二种为指向模式, 即单次曝光时间为900 s, 读出噪声为5 $e^-\cdot pixel^{-1}$的慢速读出模式. 在两种观测模式下, 计算给出望远镜各个波段探测灵敏度随曝光时间的变化关系. 我们测量天光背景辐射的噪声主导光子噪声, 在直径为2 arcsec的孔径读出噪声与天光背景噪声叠加的均方根值(rms: root mean square) 1σ对应的流量强度. 最终得到u、g、r、i、z、w波段在两种

观测模式下的5σ探测极限(如图8–9所示).

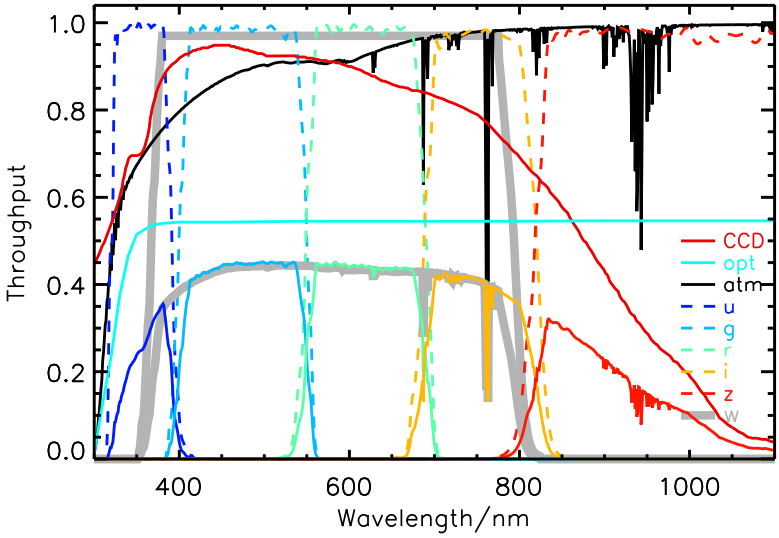

图 7 大视场巡天望远镜(WFST)光学系统响应曲线(浅蓝实线)、宽带CCD量子响应曲线(红实线)、大气透过率曲线(黑实线)、u、g、r、i、z、w波段的透过率曲线及各波段的总透过率曲线. 虚线(不同颜色)为u、g、r、i、z滤光片透过率曲线, 灰色实线为优化的w滤光片透过率曲线.

Fig. 7 The optical system response (light blue solid line), broad CCD quantum response (red solid line), atmospheric transmission (black solid line), u, g, r, i, z, and w filters' transmission curves and their total transmission curve. The dashed lines (different colors) show the transmission curve of u, g, r, i, and z filters, and the gray solid line denotes the transmission curve of optimal w filter.

图8–9为两种不同观测模式下u、g、r、i、z、w 6个波段的5σ探测极限星等, 其结果为: 对于巡天模式, u、g、r、i、z、w 6个波段30 s曝光成像的5σ探测极限分别为22.31 mag、22.93 mag、22.77 mag、22.05 mag、21.02 mag、22.96 mag; 而对于指向模式, u、g、r、i、z、w 6个波段900 s曝光成像的5σ灵敏度分别为24.30 mag、24.83 mag、24.64 mag、23.95 mag、22.89 mag、24.84 mag. 图8–9给出增加曝光时间时WFST望远镜探测极限的变化, 表明WFST通过10 h有效时间的观测可以探测到r波段星等为26.6 mag的天体. 在这6个滤光片中, 优化分析得到的w波段探测极限最大, 这也表明w滤光片具有探测暗源的优势, 大大提高了望远镜的探测能力.

表4–5为两种不同读出模式在给定曝光时间下各波段的5σ探测极限. 比较这两种情形下各波段的5σ灵敏度发现它们之间存在差异, 这种差异主要是由读出噪声决定的, 且读出噪声越大, 读出时间越快, 5σ灵敏度越低, 此外还与单次曝光时间不同有关. 需要指出的是, 这些灵敏度计算没有考虑目标天体的光子噪声, 以及实测观测中估计天光背景等环节引入的误差. 实测的灵敏度深度通常会降低~0.1–0.2 mag. 另外, 这些计算是基于暗夜的天光背景, 在灰夜和亮夜条件下, 探测灵敏度会降低, 尤其在u波段最为敏感.

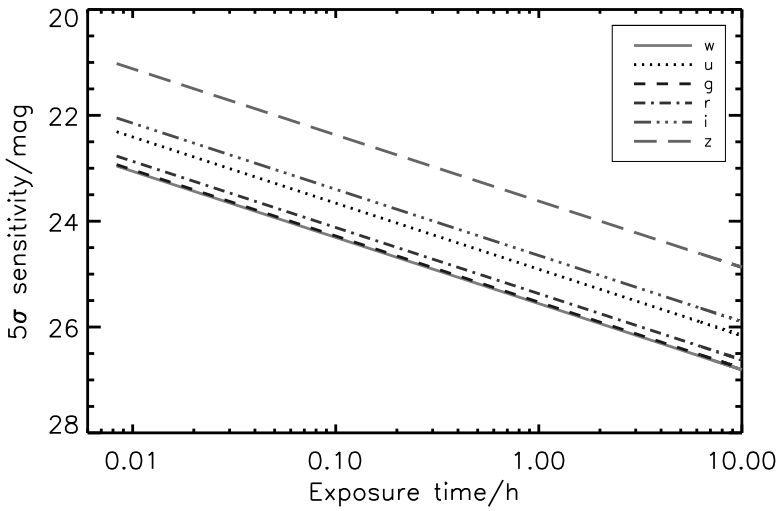

图 8 巡天模式下(30 s曝光、快速读出) WFST在u、g、r、i、z、w波段灵敏度与积分时间的关系

Fig. 8 WFST sensitivities in the u, g, r, i, z, and w bands as a function of integration time under the survey mode (30 s exposure+fast readout)

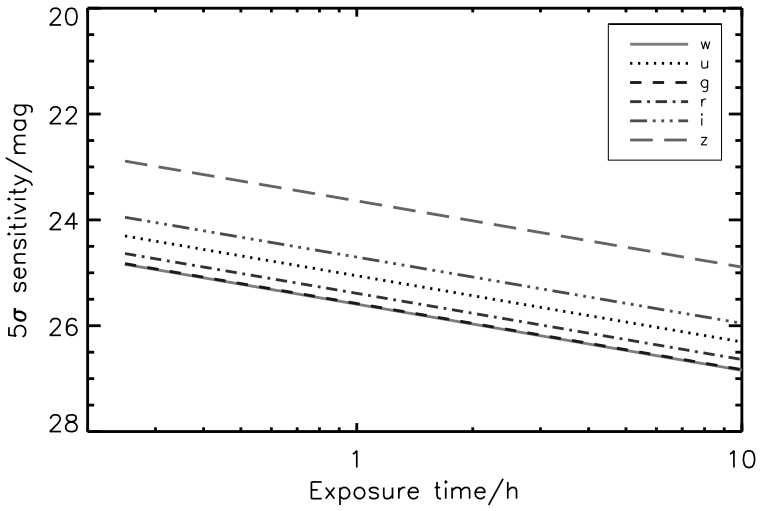

图 9 指向观测模式下(900 s曝光、慢读出) WFST在u、g、r、i、z、w波段灵敏度与曝光时间关系

Fig. 9 WFST sensitivities in the u, g, r, i, z, w bands as a function of integration time under the pointing mode (900 s exposure+slow readout)

表 4 巡天模式下WFST在u、g、r、i、z、w波段不同曝光时间达到的灵敏度(以星等m表示)
Table 4 The sensitivities (presented as magnitude m) of WFST in the u, g, r, i, z, and w bands under the survey mode

Integration time/s	$m_{\rm u}$/mag	$m_{\rm g}$/mag	$m_{\rm r}$/mag	$m_{\rm i}$/mag	$m_{\rm z}$/mag	$m_{\rm w}$/mag
30	22.31	22.93	22.77	22.05	21.02	22.96
60	22.69	23.31	23.15	22.43	21.40	23.33
90	22.91	23.53	23.34	22.66	21.62	23.55
900	24.16	24.78	24.62	23.89	22.87	24.80
1800	24.53	25.15	24.99	24.27	23.24	25.18
3000	24.81	25.43	25.27	24.55	23.52	25.46
3600	24.91	25.53	25.37	24.65	23.62	25.56
7200	25.29	25.91	25.75	25.02	24.00	25.93
18000	25.78	26.40	26.24	25.52	24.49	26.43
36000	26.16	26.78	26.62	25.90	24.87	26.81

表 5 指向模式下WFST在u、g、r、i、z、w波段不同曝光时间达到的灵敏度
Table 5 The sensitivities of WFST in the u, g, r, i, z, and w bands under the pointing mode

Exposure time/s	$m_{\rm u}$/mag	$m_{\rm g}$/mag	$m_{\rm r}$/mag	$m_{\rm i}$/mag	$m_{\rm z}$/mag	$m_{\rm w}$/mag
900	24.30	24.83	24.64	23.95	22.89	24.84
1800	24.68	25.20	25.01	24.33	23.27	25.22
2700	24.90	25.42	25.23	24.55	23.49	25.44
3600	25.06	25.58	25.39	24.70	23.64	25.59
9000	25.55	26.08	25.89	25.20	24.14	26.09
18000	25.93	26.45	26.26	25.58	24.52	26.47
27000	26.15	26.67	26.48	25.80	24.74	26.68
36000	26.31	26.83	26.64	25.95	24.89	26.84

4 总结

本文主要利用大视场巡天望远镜光学系统响应、高海拔天光背景和大气消光、比较不同CCD量子响应曲线、读出噪声和曝光时间并结合8种不同谱型的天体在u、g、r、i、z、w 6个滤光片的信噪比来开展望远镜的优化工作, 其主要内容总结如下:

(1)分析并得到了大视场巡天望远镜的系统响应函数, 包括滤光片透过率曲线、两种不同类型的CCD量子响应曲线、望远镜的光学系统响应函数以及利用MODTRAN软件模拟的西藏阿里海拔5130 m观测站址的大气透过率曲线等;

(2)结合大视场巡天望远镜系统各个参数以及天光背景辐射等, 通过分析各个波段

测光信噪比, 优化确定CCD量子响应曲线和用于太阳系天体巡天的w滤光片设计. 光学宽带CCD量子响应曲线兼顾蓝端和红端能谱响应, 在相同曝光时间下, 可以实现比蓝敏CCD更高的巡天灵敏度, 为此我们选择宽带CCD量子响应曲线作为望远镜的探测器. 通过调节w滤光片的带宽和中心波长, 实现w滤光片波长的优化分析, 最终确定的w滤光片的优化波长约为367–795 nm;

(3)利用优化的大视场巡天望远镜系统, 计算出了u、g、r、i、z、w 6个波段在长期巡天图像数据叠加的探测灵敏度随着曝光时间的变化关系.

致谢 本论文的研究得益于和中国科学院紫金山天文台的杨戟、梁明、程景全等老师的讨论, 他们为研究工作的完善提供了宝贵建议, 在此向他们表示感谢!

参 考 文 献

[1] York D G, Adelman J, Anderson J E, et al. AJ, 2000, 120: 1579
[2] Miyazaki S, Komiyama Y, Sekiguchi M, et al. PASJ, 2002, 54: 833
[3] Contreras C, Hamuy M, Phillips M M, et al. AJ, 2010, 139: 519
[4] Ivezic Z, Axelrod T, Brandt W N, et al. SerAJ, 2008, 176: 1
[5] Fukugita M, Ichikawa T, Gunn J E, et al. AJ, 1996, 111: 1748
[6] Jeffrey S M, Nicholas K, Vincent M, et al. SPIE, 2012, 8444: 84440H
[7] Coleman G D, Wu C C, Weedman D W. ApJS, 1980, 43: 393
[8] Hatziminaoglou E, Perez-Fournon I, Rowan-Robinson M, et al. BAAS, 2005, 37: 1246
[9] DiCarlo E, Massi F, Valentini G, et al. ApJ, 2002, 573: 144
[10] Oke J B, Gunn J E. ApJ, 1983, 266: 713
[11] Tonry J L, Stubbs C W, Lykke K R, et al. ApJ, 2012, 750: 99
[12] Stubbs C W, Doherty P, Cramer C, et al. ApJS, 2010, 191: 376
[13] Lou Z, Liang M, Yao D Z, et al. SPIE, 2016, 10154: 101542A
[14] Bely P Y. PASP, 1987, 99: 560
[15] Racine R, Salmon D, Cowley D, et al. PASP, 1991, 103: 1020
[16] Warner J W. PASP, 1977, 89: 724
[17] Erasmus D A. PASP, 1986, 98: 254
[18] Cartier J T, Warner J W. PASP, 1978, 90: 607
[19] Krisciunas K, Schaefer B E. PASP, 1991, 103: 1033
[20] Nugent P, Kim A, Perlmutter S. PASP, 2002, 114: 803
[21] Howell S B. PASP, 1989, 101: 616

A Study of Detector Response and Filter Optimization for the Wide Field Survey Telescope

SHI Dong-dong[1,2] ZHENG Xian-zhong[1] ZHAO Hai-bin[1] LOU Zheng[1]
WANG Hai-ren[1] QIAN Yuan[1] LIU Wei[1] YAO Da-zhi[1]

(1 Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)
(2 School of Astronomy and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Abstract The Wide Field Survey Telescope (WFST) is designed to be a powerful survey machine with prime-focus optics, 2.5 m diameter primary mirror, and 3 degree field of view. It is dedicated to a northern sky imaging survey over 20000 square degrees area. The main science goals include: (1) characterizing the compositions and structures of the Milky Way and local universe; (2) mapping the solar system objects; and (3) exploring variable universe. We combine the optical throughput, charge coupled device (CCD) quantum response, and filter transmission with atmospheric transmission of a 5130 m-altitude site and sky emission from the site of Mauna Kea to analyze the sensitivities of the telescope with different types of CCD response curves. Our results denote that a typical blue-sensitive CCD provides a higher sensitivity in observing blue-color objects like supernova and quasar than a typical broadband CCD, but a lower sensitivity in the r, i, and z bands, leading to a lower survey efficiency to the same u, g, r, i, and z depths. We show that the wavelength range of the w filter ($\simeq g + r + i$) can be optimized in terms of the energy distribution of survey targets, and give the optimal wavelength range of 367–795 nm for the w filter. Finally, we present the u, g, r, i, z, and w sensitivities as a function of integration time to demonstrate the capability of WFST.

Key words wide field survey: filter, CCD: signal-to-noise ratio, sensitivity