

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2020.06.017

LHAASO-WFCTA 读出电子学系统架构设计

张进文¹, 周 荣¹, 张寿山², 李 尧¹, 熊 浩¹, 胡刚菱¹, 杨朝文¹

(1. 四川大学物理学院, 成都 610065; 2. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

摘要: 广角切伦科夫望远镜阵列(Wide Field of View Cherenkov Telescope Array, WFCTA)是大型高海拔空气簇射观测站(Large High Altitude Air Shower Observatory, LHAASO)的主要探测器阵列之一,其物理目标是完成30 TeV到几EeV的宇宙线能谱测量. 望远镜读出电子学系统包括1 024个通道,需要处理的信号既有脉宽为几十ns的切伦科夫信号,又有脉宽为 μs 的荧光信号. 本文详细介绍了望远镜读出电子学系统的架构设计,为了减少数据量,设计了在线触发的事例筛选架构:在子模块电子学上先进行第一级硬件触发,再在触发电路上实现事例触发. 同时该电子学系统采用了4点压缩的方式获取波形数据,覆盖波形宽度为2.24 μs . 实验室测试结果表明:读出电子学系统可以正确获取信号波形,电荷测量的动态范围可以覆盖10 P. E. (Photon Electron)到32 143 P. E.,高增益通道和低增益通道的重叠区从857 P. E.到1 714 P. E.,高低增益比值与设计相符,电荷分辨率在10 P. E.时优于20%,在32 000 P. E.时优于5%,相对偏差在10 P. E.时优于5%,在32 000 P. E.时优于2%,该读出电子学系统满足设计要求.

关键词: 切伦科夫望远镜;读出电子学;架构

中图分类号: TH751 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2020)06-1125-06

The design of framework for readout electronics of LHAASO-WFCTA

ZHANG Jin-Wen¹, ZHOU Rong¹, ZHANG Shou-Shan², LI Yao¹,
XIONG Hao¹, HU Gang-Ling¹, YANG Chao-Wen¹

(1. College of Physics, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Institute of High Energy Physics Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Wide Field of View Cherenkov Telescope Array (WFCTA) is one of the main detector arrays in the Large High Altitude Air Shower Observatory (LHAASO). Its physical goal is to measure the cosmic ray energy spectrum from 30 TeV to several EeV. The telescope readout electronics system consists of 1024 channels and the signals to be processed include both Cherenkov signals with pulse widths of tens of ns and fluorescence signals with pulse widths of μs . This paper describes the framework design of the telescope readout electronics system in detail. In order to reduce the amount of data, an on-line trigger is designed, that is to say, the first-level hardware trigger is performed on the subcluster electronics, and then the event trigger is implemented on the trigger circuit. At the same time, the electronic system uses a 4-point compression method to obtain waveform data, covering a waveform width of 2.24 μs . The laboratory test results show that the readout electronics system can correctly obtain the

收稿日期: 2020-08-04

基金项目: 国家自然科学基金(11475121)

作者简介: 张进文(1991-), 男, 博士生, 研究方向为核信息获取与处理. E-mail: 382639676@qq.com

通信作者: 周荣. E-mail: r.zhou@foxmail.com

signal waveform, and the dynamic range of the charge measurement can cover 10 P. E. (Photon Electron) to 32 143 P. E. The overlap area of the high gain channel and the low gain channel is from 857 P. E. to 1 714 P. E., and the high-low gain ratio is consistent with the design. The charge resolution is better than 20% at 10 P. E., better than 5% at 32 000 P. E., and the relative deviation is better than 5% at 10 P. E., and better than 2% at 32 000 P. E, and thus readout electronics system meets design requirements.

Keywords: Cherenkov telescope; Readout electronics; Framework

1 引言

大型高海拔宇宙线观测站(Large High Altitude Air Shower Observatory, LHAASO)是我国“十二五”规划中的重大科学项目,该观测站站址修建在四川省甘孜州稻城县的海子山上,平均海拔 4 400 m^[1-2]. LHAASO 使用了复合探测的设计方案,由多种探测器阵列共同构成,包括电磁粒子探测器阵列,水切伦科夫探测器阵列,广角切伦科夫望远镜阵列^[3-4]. 广角切伦科夫望远镜阵列(wide field of view Cherenkov telescope array, WFCTA)用来探测大气簇射时产生的切伦科夫光和荧光,使用了可移动的设计,方便根据探测需求进行不同的布局,每台望远镜有 1 024 个硅光电倍增管(silicon photomultiplier, SiPM),视角为 0.5°. 为了读出 1 024 个通道的数据,我们需要设计一套读出电子学系统,目前已有的读出电子学方案,如 LHAASO 的电磁粒子探测器阵列(ED)或者水切伦科夫探测器阵列(WCDA),采用无触发的方式^[5-6],直接对每个通道的时间信息和电荷信息进行测量,然后把各通道的数据包上传到服务器,离线进行事例分析. 而望远镜不仅仅需要获得事例的时间和电荷信息,各个通道的波形信息包含了宇宙线物理的相关信息,也需要被记录下来. 按单通道数据量 1 024 bit,且单道触发率为 10 kHz 计算,1 024 通道就需要 10 Gbit/s 的带宽才可以将数据全部传出. 因此,ED 或 WCDA 的读出电子学设计对 WFCTA 望远镜来说并不适用,需要开发一套新的架构,实现事例数据的在线挑选. 设计思路为:采用前端电子学联合后端触发电路的方式,在前端电子学上实现第一级触发:判别着火通道,然后在触发电路上实现第二级触发:根据着火通道的位置判别是否事例触发. 与无触发的方式相比,可以通过对事例的在线判别,过滤掉噪声数据,减少数据量,并且前端电子学只需要将着火通道的位置信息发送到触发电路上,而不用将通道的全部数据

都发送到触发电路上进行事例判别,这样又减少了前端电子学和触发电路之间的数据量,使得系统的带宽得到充分利用. 为了兼容记录切伦科夫信号和荧光信号的波形,考虑到荧光信号是 μs 量级,在波形获取时使用 4 点压缩方式,将模数转换器(analog to digital convertor, ADC)采样点的相邻 4 点累加起来作为波形点,这样每个事例波形包含 28 个波形点,覆盖 2.24 μs 的宽度. 根据 WFCTA 项目需求,读出电子学的主要指标如表 1 所示.

表 1 读出电子学主要指标

Tab. 1 Main indicators of readout electronics

项目	指标
动态范围	10~32 000 P. E.
分辨率	<20% @ 10 P. E. <5% @ 32 000 P. E.
相对偏差	<5% @ 10 P. E. <2% @ 32 000 P. E.
通道数	1 024

2 WFCTA 读出电子学系统

读出电子学的硬件设计分为两部分:子模块和触发电路^[7]. 如图 1 所示,读出电子学由 64 个子模块和一块触发电路组成. 每个子模块由 4×4 的 SiPM 阵列、前置放大电路^[8]、温度偏压补偿电路^[9]、模拟电路^[10]和数字电路^[11]组成.

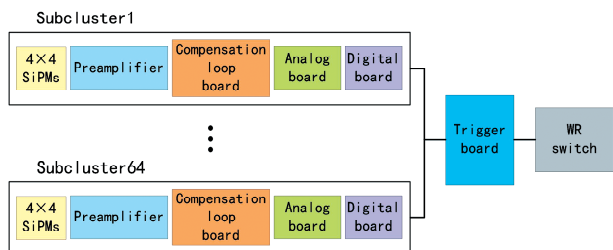


图 1 WFCTA 读出电子学框架

Fig. 1 Framework of the WFCTA readout electronics system

SiPM 阵列将收集入射的切伦科夫光或荧光,前置放大电路把来自 SiPM 的电流信号转化成为

电压信号,以供后续电路处理. 模拟电路用来处理前置放大电路的输出信号,对信号进行放大,分为高低两种增益,覆盖 3 200 倍的动态范围. 温度偏压补偿电路的作用是读取 SiPM 的温度信息,并向 SiPM 提供所需高压. 数字电路的作用是对模拟板的信号进行数字化处理和触发判选. 触发电路负责对事例数据进行筛选和汇总.

2.1 在线触发架构

子模块读出电子学的结构如图 2 所示, 4×4 的 SiPM 阵列与前放板的输出信号半高宽为 42 ns,由模拟板进行处理,子模块包含两块模拟板,分别处理 8 路信号,为了满足测量 10~32 000 P. E. 的动态范围,模拟板采用高低增益设计. 数字电路上使用了两片采样率为 50 MHz, 12 bit 的 AD9249 对模拟信号进行数字化处理,并且使用 Spartan-6 系列的现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)对串行数据进行解串,解串后的原始采样点(20 ns/bin)会流入 FPGA 开辟的两条线性缓存中,一条线性缓存用来计算单道触发,使用宽度 80 ns 的积分窗口逐点滑动,每滑过 1.6 μ s 就找出积分窗口的最大值,然后将该值扣除基线,再分别与单道阈值和记录阈值进

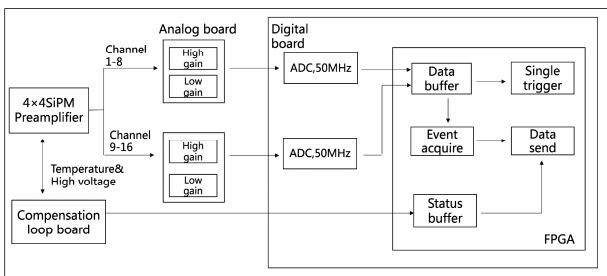


图 2 WFCTA 子模块读出电子学框架

Fig. 2 Framework of the WFCTA subcluster readout electronics

行比较^[12]. 如果过单道阈值则单道触发,相应单道触发标志位为 1,如果过记录阈值则记录标志位为 1. 单道标志用来对单通道的触发进行判断,而记录标志则用于判断单通道数据是否应该被保留记录. 另一条线性缓存用来进行波形压缩,原始采样点会进行 4 点求和,和值被存在线性缓存中,事例获取模块将直接从该缓存中获取波形数据. 一个子模块的单道触发信号由 16 bit 单道触发标志组成,每个 bit 分别代表相应的 SiPM 通道是否过单道阈值.

每个子模块的单道触发模块将会把 16 bit 的单道触发信息串行发送给触发电路,如图 3. 触发电路上使用 8 个 FPGA(FPGA1-8)对单道触发信号进行汇总,每个 FPGA 分别汇总 8 个子模块传来的单道触发信息. 由于进行事例触发判选的 FPGA9plus 与 FPGA1-8 之间的管脚有限,所以在 FPGA1-8 上对单道信息进行汇总,把两个子模块的单道信息合并为 32 bit,再串行发送到 FPGA9plus 上,这样 FPGA1-8 与 FPGA9plus 将分别有 4 对差分线用来传输单道信息. 单道信息的传输是流水线式的,子模块每 1.6 μ s 会向触发电路的 FPGA1-8 发送一次单道触发信息,代表当前 1.6 μ s 的窗口内单道是否触发,FPGA1-8 每 1.6 μ s 向 FPGA9plus 发送一次汇总后的单道触发信息,FPGA9plus 每 1.6 μ s 会判断收到的 1 024 bit 单道信息是否满足事例触发条件并产生事例触发信号返回给 64 个子模块,当子模块收到事例触发信号后会耗时 1.6 μ s 对触发标志进行解析. 因此,子模块从发出单道触发信号再到接收事例触发信号耗时 4 个 1.6 μ s,合计 6.4 μ s. 由于触发信号传递产生的延迟,子模块上的先进先出队列(First in First Out, FIFO)至少需要可以容纳 4 个事例,而子模块上 FPGA 的资源足够容纳 16 个事例,可以满足需求. 如图 2 所示,如果事例触发,则子模块中的事例获取模块将从数据缓存中取出事例数据存入 FIFO 中,在子模块上同一个事例的各通道数据都是固定长度的,读取固定长度数据即可将同一个事例打包在一起,然后通过数据发送模块发送给触发电路. 子模块的温度偏压补偿电路用来获取 SiPM 的温度数据并为其设置高压,SiPM 的温度和高压等状态数据将被发送到数字电路上,数字电路上使用 FIFO 对状态数据进行缓存,然后经过数据发送模块传输给触发电路.

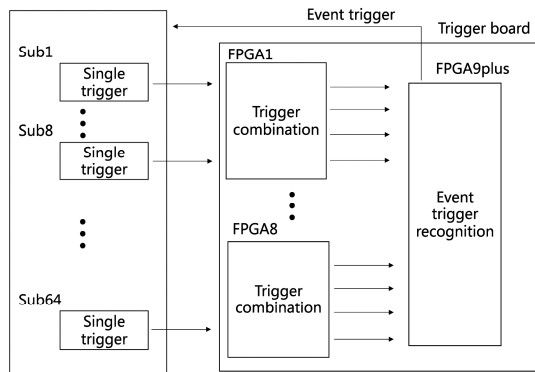


图 3 WFCTA 读出电子学在线触发逻辑框架

Fig. 3 Framework of the WFCTA readout electronics online trigger logic

2.2 事例获取架构

子模块上的数据发送模块将使用 1 对差分线将事例数据和状态数据串行发送到触发电路 FPGA1-8 上,如图 4 所示. 每个 FPGA 分别接收 8 个子模块的数据,并同时依据记录标志位去挑选需要保留的通道数据. 然后将它们汇总后再经过 1 对差分线串行发送给 FPGA9. 小白兔(white rabbit, WR)是基于以太网技术而改进的全数字频率分布和时间同步技术^[13],可以提供任意数量节点间频率锁相及亚纳秒级时间同步. WR 交换机通过单模光纤与触发电路上的 WR 节点相连,为望远镜提供统一的参考频率和时间, FPGA10 上的 WR 节点将解析出 WR 交换机传来的国际原子时(temps atomique international, TAI)并提供相应的秒脉冲(pulse per second, PPS). 事例时间由粗时间和细时间组成,粗时间为 TAI,计数周期是秒,细时间统计由 FPGA9 上的时间获取模块完成, FPGA9 使用 50 MHz 时钟对细时间进行计数,时间精度为 20 ns. FPGA9 上事例数据汇总模块使用 8 个 FIFO 分别对 FPGA1-8 传来的数据进行缓存,并与事例时间一起打包后发送给 DDR3 SDRAM 进行存储. DDR3 SDRAM 选用了 Micron 公司的 MT41J64M16-15E,缓存容量为 1 Gbits. FPGA9 上的事例数据发送模块将从 DDR3 中读取数据并发送给 FPGA10. FPGA10 使用 FIFO 对数据进行缓存然后使用 TCP/IP 协议经 WR 交换机上传到服务器.

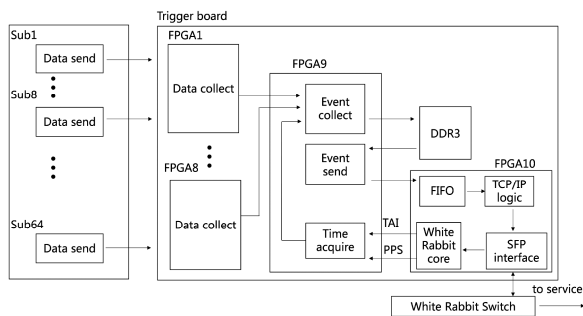


图 4 WFCTA 读出电子学事例获取逻辑框架

Fig. 4 Framework of the WFCTA readout electronics event acquisition logic

3 实验室测试

3.1 波形获取

RIGOL(DG4102)信号发生器产生半高宽为 42 ns 的波形代替前置放大电路的输出信号,该信号经过模拟电路放大后进入数字电路,进行波形获取. 我们可以从获得的波形中计算出信号的电荷

量,信号的电荷量与 SiPM 产生的光电子数目成正比. 实验室中自行研制的扇出电路用来将该信号扇出到每一个子模块,子模块的数据将会被触发电路接收并由 WR 交换机发送到上位机,使用 Matlab 对数据进行处理. 子模块一个通道的高低增益波形如图 5 和图 6 所示. 为了在线压缩数据量,波形的每一个点都代表了 4 个 ADC 采样点的和,每个 ADC 采样点是 12 bit,不做压缩时,4 个采样点总共 48 bit,进行压缩后仅占 14 bit,并且波形的电荷量和压缩前是一样的. 图中波形由 28 个波形点组成,总共代表 112 个 ADC 采样点,合计 2.24 μ s.

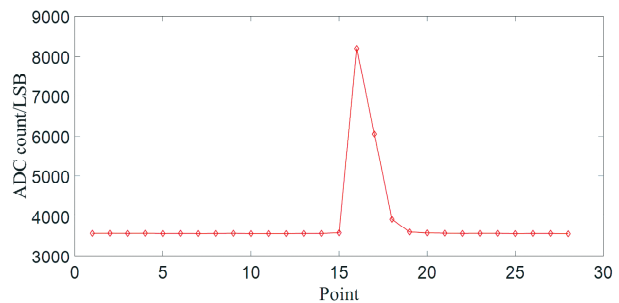


图 5 高增益通道波形

Fig. 5 Waveform of high gain channel

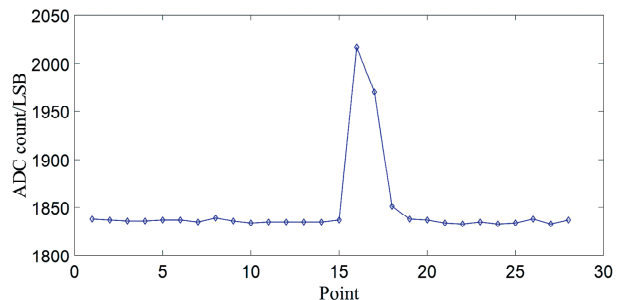


图 6 低增益通道波形

Fig. 6 Waveform of low gain channel

3.2 动态范围和高低增益比

用信号发生器产生不同幅度的波形来测试读出电子学系统的动态范围,图 7 显示了电荷测量结果,动态范围可以覆盖 10~32 143 P. E. 并且高增益通道和低增益通道的重叠区从 857~1 714 P. E. . 在理论设计中,高增益通道的增益是 15,低增益通道增益是 0.7,因此高低增益通道间的增益比是 21.4. 我们使用信号幅度为 857 P. E. 的信号对高低增益比进行测试,图 8 为 1 024 个通道的高低增益比.

3.3 电荷测量分辨率

由于电子学系统的噪声和统计涨落,输出信号的波形面积会呈高斯分布,分辨率用来量化高斯分

布的展宽,反映了噪声水平大小. 在实验室中使用信号发生器产生不同幅度的信号,幅度范围从 10 P. E. 一直测到 32 143 P. E.,在每个幅度下分别采集 1 000 个波形,然后使用 Matlab 对电子学系统获取的波形面积进行统计,计算出波形面积均值和标准差,使用标准差除以均值即可得到相应幅度下的分辨率. 图 9 为电荷分辨率的测试结果,电荷分辨率在 10 P. E. 时优于 20%,在 32 000 P. E. 时优于 5%.

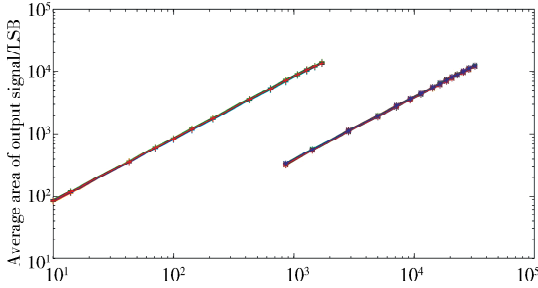


图 7 电荷测量结果,1 024 个高增益通道标记为“+”,1 024 个低增益通道标记为“*”

Fig. 7 Charge measurement results, 1 024 high gain channels marked as “+” and 1024 low gain channels marked as “*”

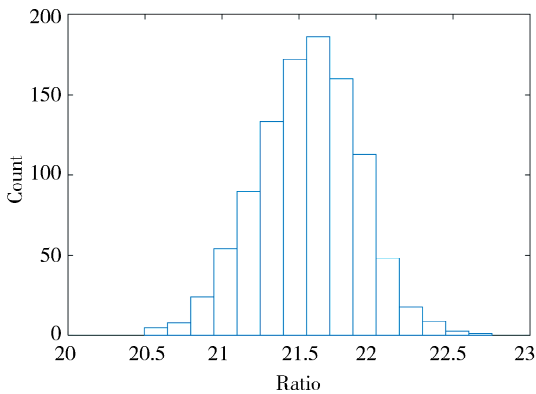


图 8 1 024 个通道的高低增益比

Fig. 8 Gain ratio between 1 024 high gain channels and low gain channels

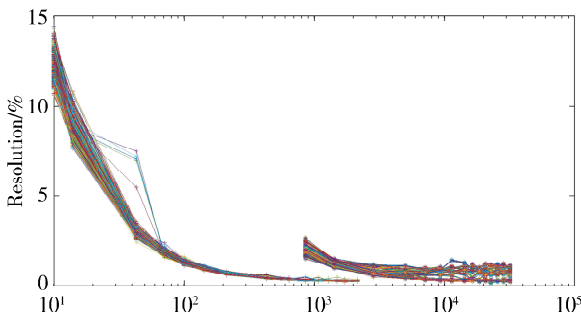


图 9 分辨率测量结果,1 024 个高增益通道标记为“+”,1 024 个低增益通道标记为“*”

Fig. 9 Resolution measurement results, 1 024 high gain channels marked as “+” and 1 024 low gain channels marked as “*”

3.4 相对偏差

电子学系统是一个线性系统,为了衡量系统的线性程度,使用相对偏差来进行量化. 相对偏差的定义为:(测量值-拟合值)/测量值×100%,对 1 024 个通道的相对偏差进行测量,如图 10 所示,相对偏差在 10 P. E. 时优于 5%,在 32 000 P. E. 时优于 2%.

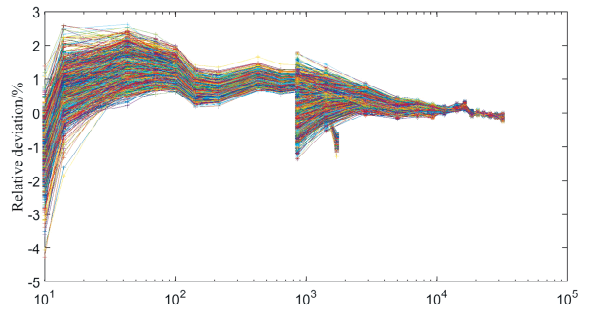


图 10 相对偏差测量结果,1 024 个高增益通道标记为“+”,1 024 个低增益通道标记为“*”

Fig. 10 Relative deviation measurement results, 1 024 high gain channels marked as “+” and 1 024 low gain channels marked as “*”

4 结论

LHAASO-WFCTA 望远镜读出电子学系统使用了在线触发架构:采用 64 个子模块先将 SiPM 着火信息传到触发电路,由触发电路进行在线触发判选,然后将事例触发信息回传给 64 个子模块的方式进行数据获取. 实验室测试表明:电子学系统可以正确获取信号波形,电荷测量的动态范围可以覆盖 10~32 143 P. E. 并且高增益通道和低增益通道的重叠区为 857~1 714 P. E.,高低增益比值与设计相符,电荷分辨率在 10 P. E. 时优于 20%,在 32 000 P. E. 时优于 5%,相对偏差在 10 P. E. 时优于 5%,在 32 000 P. E. 时优于 2%,指标满足 WFCTA 项目所需.

参考文献:

- [1] Cao Z. A future project at tibet; the large high altitude air shower observatory (LHAASO) [J]. Chin Phys C, 2010, 34: 249.
- [2] Cao Z. Status of LHAASO updates from ARGO-YBJ [J]. Nucl Instrum Meth A, 2014, 742: 95.
- [3] He H H. Design of the LHAASO detectors [J]. Radiat Detect Techn Method, 2018, 2: 1.
- [4] Cao Z, Chen M J, Chen S Z, et al. Introduction to large high altitude air shower observatory (LHAASO) [J]. Chin Astron Astrophys, 2019,

- 43: 457.
- [5] Liu X, Chang J F, Wang Z, *et al.* Prototype of readout electronics for the LHAASO KM2A electromagnetic particle detectors [J]. *Chin Phys C*, 2016, 40: 076101.
- [6] Zhao L, Liu S B, An Q. Proposal of the readout electronics for the WCDA in the LHAASO experiment [J]. *Chin Phys C*, 2014, 38: 56.
- [7] 黄九余, 申丰兆, 周荣, 等. LHAASO-WFCTA 多通道数据高速传输方案设计 [J]. *核电子学与探测技术*, 2016, 36: 1259.
- [8] Bi B Y, Zhang S S, Cao Z, *et al.* Performance of SiPMs and pre-amplifier for the wide field of view Cherenkov telescope array of LHAASO [J]. *Nucl Instrum Meth A*, 2018, 899: 94.
- [9] 张进文, 周荣, 张京隆, 等. LHAASO-WFCTA 数字电路电源模块设计 [J]. *核电子学与探测技术*, 2015(9): 909.
- [10] Xiong H, Zhou R, Chen J, *et al.* Design and performance of analog circuit for the wide field of view Cherenkov telescope array of LHAASO [J]. *Nucl Instrum Meth A*, 2019, 925: 156.
- [11] Zhang J L, Zhang S S, Zhang Y, *et al.* Readout electronics for the Wide Field of view Cherenkov/Fluorescence Telescope Array [J]. *J Instrum*, 2015, 10: 08003.
- [12] Zhang J W, Zhou R, Zhang S S, *et al.* Data acquisition and trigger system for imaging atmospheric Cherenkov telescopes of the LHAASO [J]. *J Instrum*, 2020, 15: 02004.
- [13] Jansweijer P P M, Peek H Z, Wolf E de. White rabbit: sub-nanosecond timing over Ethernet [J]. *Nucl Instrum Meth A*, 2013, 725: 187.

引用本文格式:

中文: 张进文, 周荣, 张寿山, 等. LHAASO-WFCTA 读出电子学系统架构设计[J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2020, 57: 1125.

英文: Zhang J W, Zhou R, Zhang S S, *et al.* The design of framework for readout electronics of LHAASO-WFCTA [J]. *J Sichuan Univ; Nat Sci Ed*, 2020, 57: 1125.