CN 53-1189/P ISSN 1672-7673

# 基于 WCDA 水质监测分析\*

## 纪 方<sup>1,2,3</sup>,张健欣<sup>1,3</sup>,陈明君<sup>2</sup>,李会财<sup>2</sup>

(1. 内蒙古工业大学电力学院,内蒙古 呼和浩特 010080; 2. 中国科学院高能物理研究所,北京 100049;3. 内蒙古自治区机电控制重点实验室,内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要:水切伦科夫探测器阵列(Water Cherenkov Detector Array, WCDA)是高海拔宇宙线 观测站(Large High Altitude Air Shower Observatory, LHAASO)的主体探测器之一,水作为探测 器的唯一探测介质,水的洁净度直接影响探测器对切伦科夫光的探测效率。为保证水切伦科夫 探测器阵列物理目标的实现,水衰减长度的实时测量和监测至关重要,是探测器正常运行和标 定的关键工作之一。分别介绍了水衰减长度测量装置和紫外可见分光光度计的工作原理,并通 过不同波长的发光二极管(Light Emitting Diode, LED)对各种样品水进行测量,将两种方法的 数据结果进行对比分析,得出两种装置的测量误差分别为0.22 m 和 0.18 m,以及工业指标 吸光度与科研指标水衰减长度之间的对应关系,并为几何和跟踪(GEometry AND Tracking, GEANT4)模拟确定了一种 Querry 水质模型,进一步推进了模拟的真实化。通过对水切伦科 夫探测器阵列1号水池水衰减测量装置的验证及从注水到稳定运行期间的水质监测的数据研 究,总结了一套稳定可靠的水质监测方案,为2、3号水池的监测工作奠定了良好的基础。 关键词:高海拔宇宙线观测站;水质监测;水衰减长度;吸光度 中图分类号:TN152; X832 文献标识码:A 文章编号: 1672-7673(2020)02-0252-06

LHAASO-WCDA 实验的主要物理目标是实现甚高能伽马射线的全天候观测,其中包括甚高能伽马源的探测与监测、能谱测量以及扩展形态的研究<sup>[1]</sup>。水切伦科夫探测器阵列的总面积为 78 000 m<sup>2</sup>,有效水深 4 m,由 3 个水池构成,共需要 3.5×10<sup>8</sup> kg 净化水。每个水池被黑色隔光帘分隔成多个探测器单元,共3 120 个,每个单元大小为 5 m×5 m。在 1 号水池的每个单元底部中心位置安装一支光阴极朝上的 8 英寸光电倍增管(Photo Multiplier Tube, PMT),用于接收广延大气簇射的次级粒子在水中产生的切伦科夫光。根据每个光电倍增管上接收的光子数目和光子到达时间,重建原初粒子的簇射芯位、能量和方向<sup>[2]</sup>。在每个 8 英寸光电倍增管旁边放置了一个 1.5 英寸的光电倍增管,用于扩大簇射芯区可测量的动态范围,从而实现高能宇宙线的高精度测量<sup>[3]</sup>。

水作为水切伦科夫探测器阵列的关键探测介质,对长期运行的探测器阵列实验至关重要,水的衰减长度直接影响探测器的探测效率,水衰减长度越大,表示水质越好,光探测效率越高。不同实验对水质的要求也不相同。切伦科夫探测器(CHerenkov Detectors In PitS, CHIPS)实验中测量切伦科夫光的衰减长度随滤光时间的变化,研究了405 nm 激光的透射特性,衰减长度高达100 m<sup>[4]</sup>。中国大亚湾中微子实验中水的衰减长度要求30 m 以上<sup>[5]</sup>。液氩时间投影室(Liquid Argon Time Projection Chamber, LArTPC)探测器实验中测量出液氩中掺杂的氮气分子与闪烁光之间的反应截面为(7.14±0.74)×10<sup>-21</sup> cm<sup>2</sup> · molecule<sup>-1</sup>。百亿分之二(ppm 水平)的掺杂浓度对应的衰减长度为(30±3) m<sup>[6]</sup>。平方千米阵列(Kilometer-square Array, KM2A)缪子探测器<sup>[7]</sup>组自行研制了一种测量装置,在8 m 长的水箱中安装多光源,达到快速测量水衰减长度的目的。通过对山上超纯水水样以及不同水质水样进行测量,验证该

 <sup>\*</sup> 基金项目:国家自然科学基金(U1831208,U1731136)资助.
收稿日期:2019-11-04;修订日期:2019-11-29
作者简介:纪 方,男,硕士.研究方向:检测技术与自动化装置.Email:936138108@qq.com
通讯作者:张健欣,男,副教授.研究方向:复杂过程建模与优化控制,混杂生产过程调度与优化.Email:zhangjianxin@imut.edu.cn

装置在 100 m 衰减长度的测量精度可以达到 20%<sup>[8]</sup>。

水衰减长度测量方法中,采用一种简便易行的直筒式测量方法,通过改变测量装置中水位的高低 来改变光在不同光程下的衰减,即可得到水样的衰减长度<sup>[9]</sup>。前期水切伦科夫探测器阵列工程样机 实验中,通过数据研究分析发现了一套利用单路计数能谱的第2个峰的峰位变化监测水质的方法<sup>[10]</sup>。 此方法需要结合直接测量装置的测量结果进行对比分析。GEANT4 模拟时需要给定不同波长下的水衰 减长度参数,即需要给出一个和实验接近的水质模型,但通过调研得出 Smith 和 Querry 两种水质模 型<sup>[11]</sup>,需要通过测量确定一个合理的水质模型,为模拟提供可靠的参量。

实验采用直筒式测量方法得出一定波长下的水衰减长度,并同紫外可见分光光度计的测量结果进行对比,标定探测介质的衰减长度,并进一步通过不同波长发光二极管的测量结果分析,为 GEANT4 模拟提供一组可靠的水质模型参数。

1 水衰减长度测量装置

1.1 测量装置的工作原理

水衰减长度测量装置由发光二极管、光筒、主水管、光电倍增管组成,在某一波长下测量不同水 位 h 的光电倍增管接收的信号幅度 A, A<sub>0</sub> 为发光二极管的发光强度,根据水衰减长度定义 λ:

$$A = A_0 \mathrm{e}^{-h/\lambda} \,, \tag{1}$$

两边取自然对数:

$$\ln A = \ln A_0 + (-h/\lambda), \qquad (2)$$

得到光电倍增管接收到的信号幅值 lnA 与水位高 度 h 的线性关系,进而得到水样的λ值,即斜 率绝对值的倒数。

 1.2 水切伦科夫探测器阵列水衰减长度测量装置 图1为水切伦科夫探测器阵列利用该测量原 理设计的水衰减长度测量装置。测量步骤:(1) 用待测水样自动清洗测量装置,以降低实验误 差;(2)开启对应的电水阀和水泵开始注水,当 水位达到1.1m时,关闭电水阀和水泵,打开发 光二极管和光电倍增管电源,光电倍增管采集发 光二极管的发光信号;(3)控制排水阀,改变测 量装置中水的高度h,测量光电倍增管接收到的 信号幅值为A,记录保存实验数据;(4)根据水 衰减长度计算公式拟合得到水样的水衰减长度。

水衰减长度测量可以分为自动和手动测量两种方式。在慢控制的系统下,实现自动测量,单次水样测量每2小时完成一次,达到监测水质的目的。

 1.3 水切伦科夫探测器阵列水衰减长度测量装置 稳定性分析和测量结果

在正式测量之前,对该装置的稳定性进行了 验证分析。利用该装置对水池内的水质进行了27 日的监测,通过分析每日的数据误差,验证系统 测量的稳定性。图2为27日的测量误差,可以看



图 3 利用此装置测得在 400 nm 波长发光二极管下水池水样的结果,图 3(a)为单次测量拟合得到的水衰减长度,测量误差小于 3%;图 3(b)为长期测量结果,目前水池内的水质基本维持在(7.53±0.21) m,总体测量误差小于 5%。



图 3 测量装置的测量结果。(a) 单次测量结果;(b) 总体测量结果

Fig. 3 Measuring device measuring results. (a) Single measurement result; (b) Overall measurement result

为了和直接测量装置对比研究,实验中还利用紫外可见分光光度计对同一水样进行测量,得出吸 光度和测量装置给出的水衰减长度的对应关系。

#### 2 紫外可见分光光度计工作原理

2.1 紫外可见分光光度计工作原理

朗伯-比尔定律又称为光吸收基本定律。它表明物质吸收入射光时,吸收强度与光程及吸收物质 浓度之间的关系,是紫外吸收光谱和红外光谱定量分析的理论依据。

$$A = \lg(I_0/I) = \lg(1/T) = -\lg T = KCL , \qquad (3)$$

其中, *A* 为吸光度; *T* 为透过率; *K* 为吸光系数; *C* 为样品浓度; *L* 为光程; *I*<sub>0</sub>/*I* 为入射光强度/透过 光强度。

紫外可见分光光度计由光源、单色器、样品室、检测器、放大控制系统和结果显示系统构成。实验 采用双光束,有两条光路和一个检测器,两条光路中分别放置参比和样品,光从单色器发出后经斩波 器,依次测定参比和样品。检测器选用光电倍增管,当它受到辐射时,吸收光子能量,并转变为可测 量的物理量,将样品的测试结果显示保存在计算机上。该方法测量水样的吸光度是相对吸光度。 2.2 水切伦科夫探测器阵列紫外可见分光光度计

本次水切伦科夫探测器阵列水质测量使用安捷伦科技有限公司生产的 Cary300 型紫外可见分光光度计。首先打开电脑 Scan 软件和 Cary300 设备,预热 1 小时,再设置测量波长 300~700 nm,采样时间为 0.2 s,采样间隔为 1 nm,样品室放入纯水样品进行基线校正,再对水样进行测量。各个水样经紫外可见分光光度计测量的结果是吸光度(A),即:

$$A = \lg(I_0/I) \ . \tag{4}$$

依据光的衰减遵从比尔(Beer)定律, 假定水的衰减长度为 $\lambda$ , 那么强度为 $I_0$ 的入射光通过长度为L的水样后的强度为

(5)

$$I = I_0 e^{-2\lambda}$$
,  
分光计测量时 L 取 0.1 m. 可计算出各个水样在每个波长下的衰减长度为

$$\lambda = 1/(10A\ln 10) . \tag{6}$$

2.3 水切伦科夫探测器阵列紫外可见分光光度计

在正式测量之前,利用该装置对水池内的水质进行了27日的监测,分析每日的数据误差,图4为27日的吸光度转化为水衰减长度的测量误差,对该装置的稳定性进行了验证分析。可以看出,误差 波动在0.18m 范围内,说明本装置测量同样稳定。

紫外可见分光光度计在波长 400 nm 时测量各个水样吸光度如图 5, 纯水的吸光度基本为 0, 吸光 度越小,表明水样的透明度越高,水衰减长度数值越大。开始注水时,吸光度快速下降,是不断增加 的水量对水池内污染物的稀释作用。循环站处理后的水的吸光度小于水池内水的吸光度,表明循环站 处理有一定的净化水质的能力,但尚未达到设计要求。



### 3 结果分析

由上述两种测量装置的测试误差分析可以看出,两种测量装置均存在一定误差,分析是由于目前水切伦科夫探测器阵列水净化循环设备不稳定,影响测量。此外,紫外可见分光光度计测量时, 由于设备本身误差和每次取样时比色皿上会有不同程度不可避免的污染导致测量结果略微不同。但两 种装置测量的数据误差都很小,均在可接受范围内。随后利用两种装置对相同水样进行了测量及对比 分析。

图 6 是用水衰减长度测量装置在 18 日内对水切伦科夫探测器阵列水池内水的监测结果,水衰减 长度是(7.41 ± 0.21) m。同时利用紫外可见分光光度计监测同一水样的结果经转化后,水衰减长度 (6.79 ± 0.37) m。两种测量方法得到的水衰减长度结果在误差范围内是符合的。

对两种装置测量的数据进行了水质模型计算。表 1 为通过水衰减长度测量装置和紫外可见分光光度计测量得到的水池内的水样在发光二极管波长 365 nm、385 nm 和 400 nm 下的水衰减长度,通过 3 个点得出水衰减长度与波长关系的斜率,分别为 0.08 ± 0.04 和 0.10 ± 0.02。图 7 是水的吸收长度随 波长的变化关系图,根据不同的实验结果,给出了两种水吸收长度模型。Smith 和 Querry 水质模型在 相同条件下的斜率分别为 0.79 ± 0.05 和 0.16 ± 0.01。两种装置测量的数据计算出的斜率,均明确得 出水池内水样更接近 Querry 水质模型,因此,GEANT4 模拟确定使用 Querry 水质模型。



## 4 结 论

本文对水衰减长度测量装置和紫外可见分光光度计两种装置的稳定性进行了验证分析,得出了两种装置的测量误差分别为 0.22 m 和 0.18 m。利用两种装置对相同水样进行了对比测量分析,证明两种装置在误差范围内,得到的监测结果相符。

利用水衰减长度测量装置和紫外可见分光光度计两种装置的测量结果,分析不同发光二极管波长 下监测得到的水池水样的水衰减长度,通过计算及对比分析,确定了 GEANT4 模拟中应采用 Querry 水质模型。

#### 参考文献:

- [1] 中国科学院高能物理研究所,中国科学院基础研究局. 西藏羊八井宇宙线国家野外观测研究站的建设、运行与发展 [J]. 中国科学院院刊, 2010(4): 461-464.
- [2] 曹臻, 刘加丽, 白云翔. 物理学中的世纪难题: 高能宇宙线的起源之"谜" [J]. 自然杂志, 2009, 31(6): 342-347, 363.
- [3] 曹臻,陈明君,陈松战,等.高海拔宇宙线观测站LHAASO概况 [J]. 天文学报,2019,60 (3):1-16.
- [4] AMAT F, BIZOUARD P, BRYANT J, et al. Measuring the attenuation length of water in the CHIPS-M water Cherenkov detector [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators Septerometers Detectors and Associated Equipment, 2017, 844: 108-115.
- [5] 路浩奇. 大亚湾反符合水切伦科夫探测器及其模型研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2009.

- [6] JONES B J P, CHIU C S, CONRAD J M, et al. A measurement of the absorption of liquid argon scintillation light by dissolved nitrogen at the part-per-million level [J]. Journal of Instrumentation, 2013, 8(7): 1-19.
- [7] ZUO X, XIAO G, FENG S H, et al. Design and performances of prototype muon detectors of LHAASO-KM2A [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2015, 789: 143-149.
- [8] LI C, XIAO G, FENG S H, et al. An apparatus to measure water optical attenuation length for LHAASO-MD [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2018, 892: 122-126.
- [9] LI H C, YAO Z G, YU C X, et al. A method to monitor and measure the water transparency in LHAASO-WCDA using cosmic muon signals [J]. Chinese Physics C, 2017, 41(2): 145-152.
- [10] LI H C, YAO Z G, CHEN M J, et al. Study on single-channel signals of water Cherenkov detector array for the LHAASO project [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2017, 854: 107-112.
- [11] STEVE J, SCOTT P. Optical absorption of water compendium [DB/OL]. [2019-11-04]. http://omlc.org/spectra/water/abs/index.html.

#### Water Quality Monitoring Analysis Based on WCDA

Ji Fang<sup>1,2,3</sup>, Zhang Jianxin<sup>1,3</sup>, Chen Mingjun<sup>2</sup>, Li Huicai<sup>2</sup>

(1. College of Electric Power, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010080, China, Email: zhangjianxin@imut.edu.cn;

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

3. Inner Mongolia Key Laboratory of Electromechanical Control, Hohhot 010051, China)

Abstract: The Water Cherenkov Detector Array (WCDA) is one of the main detectors of the High Altitude Cosmic Ray Observatory (LHAASO), with water as the only detection medium, the water transparency will directly affect the detection efficiency of Cherenkov Light. In order to ensure the realization of WCDA physical goals, the real-time measurement and monitoring of water attenuation length is very vital, which is one of the key tasks for the normal operation and calibration of the detector. In this experiment, the working principle of water attenuation length measuring device and ultraviolet-visible spectrophotometer is introduced, and various samples of water are measured by different wavelength LED, and the data results of the two methods are compared and analyzed. The measurement errors of the two devices are found to be 0. 22m and 0. 18m, the corresponding relationship between industrial index absorbance and water attenuation length of scientific research index is found, and a Querry water quality model for the GEANT4 simulation is established by simulation, which further promotes the realisation of simulation. Through the verification of WCDA No. 1 water attenuation measuring device and the data study of water quality monitoring from water injection to stable operation, a set of stable and reliable water quality monitoring scheme is summarized, which provides a lot of help for the monitoring work of No. 2 and No. 3 water pools.

Key words: LHAASO; Water quality; Water attenuation; Absorbance