

DOI: 10.13382/j.jemi.B2508671

生命周期供电考场机械钟表与授时装置实现

惠登峰¹ Shamala K. Subramaniam² Lili Nurliyana binti Abdullah² Abdullah bin Muhammed²
刘红妍¹ 王 森³ 王梓郡³ 惠玉淳³ 朱俊宇³

(1. 北京洪威先创科技股份有限公司 北京 100083; 2. 马来西亚博特莱大学 雪莱莪 43400;
3. 北京师范大学亚太实验学校 北京 102209)

摘 要:针对标准化考场禁止考生自带计时设备而墙挂 BPC 电波钟在复杂建筑中存在授时盲区、接收不稳和频繁换电的问题,设计了“生命周期供电机械电波钟+局域 BPC 微型授时发射器”的免维护校时方案。终端在不改变 WBC-E16A 标准化考场自动校时同步时钟外观的前提下,将原 2 节 AA 电池扩展为 2S4P 低自放电模组,通过恒阻放电与实机功耗测试建立 mWh 级能量寿命模型;设施侧研制功耗 $\leq 1.5\text{ W}$ 的 USB 5 V 发射器,经校园 WiFi 从多源 NTP 获取 UTC 时间并在教室内重播标准 BPC 时码。地下封闭空间样机验证表明,在授时盲区条件下各终端可在 2~10 min 自动完成首次校时;教学楼 30 台终端 4 周运行显示,引入微型发射器后授时成功率由约 70% 提升至 100%。恒阻放电与日耗监测结果显示,南孚物联网 AA 电池在 $\geq 2.2\text{ V}$ 有效电压区间可提供约 34.9 Wh 能量,结合 14.8~16.5 mWh $\cdot\text{d}^{-1}$ 日耗和 1%~2% 自放电,单组 2S4P 模组可支撑电波钟不低于 5 年 (Life-Time) 的免换电池与免维护运行。方案已在 22 个省约 8 000 台终端中应用,Life-Time RCC 与局域 BPC 补盲组合能够在授时盲区内实现多教室机械挂钟的长期秒级统一对时,显著减轻考场钟表维护与巡检压力,提升考场时钟的可靠性。

关键词:考试时钟;永续供电;电波钟;时间同步;无线授时;BPC 时码;物联网

中图分类号: TP274;TN929.5 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 610.255

Life-time powered maintenance-free mechanical clock for examination rooms
and its time synchronisation device implementation

Hui Dengfeng¹, Shamala K. Subramaniam², Lili Nurliyana binti Abdullah², Abdullah bin Muhammed²,
Liu Hongyan¹ Wang Miao³ Wang Zijun³ Hui Yuchun³ Zhu Junyu³

(1. Beijing Wholeway Centron Technology Co., Ltd., Beijing 100083, China; 2. Universiti Putra Malaysia, Selangor 43400, Malaysia; 3. Beijing Normal University Asia-Pacific Experimental School, Beijing 102209, China)

Abstract: In standardized examination-rooms, candidates are prohibited from using personal timekeeping devices, while wall-mounted BPC time-code radio-controlled clocks (RCCs) in complex buildings often suffer from reception blind spots, unstable synchronization, and frequent battery replacement. To address this, a unified time-keeping scheme combining a “life-time powered mechanical RCC” with a “local BPC miniature transmitter” is proposed. On the terminal side, the WBC-E16A exam clock retains its original appearance, but its two AA cells are upgraded to a 2S4P low-self-discharge AA pack, and an mWh-level energy model is derived from constant-resistance discharge tests and in-situ power measurements. On the infrastructure side, a $\leq 1.5\text{ W}$ USB 5 V transmitter is developed that acquires UTC from multiple NTP servers over campus WiFi and rebroadcasts the standard BPC code inside classrooms. Tests with ten clocks in a fully enclosed underground space show that, in BPC reception blind spots, all terminals automatically complete their first synchronization within 2~10 minutes. In a four-week field trial with thirty clocks in a teaching building, the automatic synchronization success rate increases from about 70% to 100% after enabling the local transmitter. Discharge and consumption measurements indicate that Nanfu IoT AA cells provide about 34.9 Wh of usable energy above 2.2 V; combined with a daily consumption of 14.8~16.5 mWh and a 1%~2% self-discharge rate, a single 2S4P pack can support at least five years of operation without battery replacement. The scheme has been deployed in about 7 848 terminals across 22 provincial-level regions, and the proposed Life-Time RCC plus local BPC

blind-spot compensation enables long-term, second-level synchronization of mechanical wall clocks while greatly reducing maintenance and inspection workload and significantly enhancing the robustness of examination-room timekeeping.

Keywords: examination clock; sustainable power supply; radio wave clock; time synchronization; wireless timing; BPC time code; Internet of Things

0 引言

多地标准化考场管理规定禁止考生携带与考试无关物品(含各类手表)进入考场,统一墙钟因而成为唯一且可视的时间参考^[1-2]。仅依赖普通石英钟人工调校,运行一段时间后走时误差即可累积到分钟量级,给监考组织带来考前逐钟排查和人工调校压力;而 BPC 电波授时(68.5 kHz)虽能自动统一校时,但在远离商丘低频时码发播台或处于低楼层、钢筋混凝土遮蔽的教室内,室内接收仍常出现不稳甚至盲点,“有钟不齐”问题难以根除^[3-4]。

一些考点尝试采用有线电子显示屏或网络时钟提升可控性,但需新增弱电布线和上墙施工,设备能耗与维护成本较高,联网设备还可能带来潜在信息安全隐患,整体亦不具备成本优势^[5]。而在测量与仪器领域,基于以太网的精密时间协议(precision time protocol, PTP) IEEE 1588 以及室内超宽带(ultra-wideband, UWB)无线同步等技术,已经在电力系统、通信与工业控制中实现了微秒乃至纳秒级的工程化时间同步^[6-9]。这些实践表明,在局域范围内部署少量基础设施即可实现高可靠的统一授时,为面向考场的本地化授时方案提供了工程参照。

在中学考场,大尺寸指针式挂钟仍为主流且更易被接受,指针布局便于学生直观把握“剩余时间”,无需逐字读取数码刻度。以北京洪威自 2012 年起推出的 16 in 标准化考场自动校时同步时钟,型号:WBC-E16A 为代表,大量中国低频时码授时系统(BPC)机械挂钟已在多省市考点形成可观存量。本应借助自动授时减轻人工校时,但在复杂建筑和电磁环境下,长波信号易形成盲区,加之电池更换周期难以统一,这些设备在关键考试场景中反而频繁暴露授时失效和维护负担。

现有室内授时补盲路径主要包括直接依赖长波 BPC 配合机械电波钟、以太网/以太网供电(power over ethernet, PoE)网络时钟与发光二极管(light-emitting diode, LED)大屏系统,以及基于全球定位系统(global positioning system, GPS)/北斗导航卫星系统授时信号的再辐射或有线总线方案。前两类方案通常要大规模弱电布线和专用显示设备,对既有考场扰动较大;GPS/北斗再辐射则对屋顶天线条件和无线电管理要求较高。

与长距离无线通信(long range, LoRa)、无线局域网(wireless fidelity, WiFi)、蓝牙等主流无线技术相比,围

绕既有 BPC 机芯做局域补盲在终端形态和改造成本上更具优势;LoRa 更适合作为楼宇级时间分发的“中间链路”,蓝牙和 2.4 GHz WiFi 在校园环境中又易受现有网络与移动终端干扰。若直接集成到每只挂钟则需要复杂协议栈和握手流程,终端功耗与物料成本都会显著上升。继续采用成本较低的长波接收机芯,在墙面端保留机械指针显示,仅在楼宇弱电侧布设少量低功率 BPC 发射节点,可在不改变终端形态的前提下把系统复杂度集中到少数可维护节点上,这构成了所提出方案的工程出发点。

针对上述需求与约束,提出并验证一套“生命周期供电机械电波钟+本地授时装置”的一体化方案(兼容 BPC 标准,可扩展其他时码和协议)。终端侧在机械指针钟内集成大容量低自放电电池组与超低功耗机芯,实现单次更换电池后 ≥ 5 年运行;设施侧采用功耗 ≤ 1.5 W 的 USB 5 V 微型发射器(可复用教室 DC 12 V 弱电回路降压供电),通过校园 WiFi 网络时间协议(network time protocol, NTP)从服务器获取统一时间源,并在本地重编码为 BPC 标准时码进行室内补盲广播,在不改动现有电波机芯的前提下提升覆盖与一致性。发射器可在既有弱电系统内灵活复用(如监控摄像头 DC 12 V 电源),支持分布式部署与联网协同,从而显著降低人工维护与电池更换频率,压缩运维工作量与总体成本。在地下屏蔽环境和校内教学楼隔墙条件下,对多台机械电波钟开展了授时覆盖与同步性能验证,并结合小电流放电实验和 200 d+ 实机功耗监测,从维护频率、管理压力及改造成本等维度进行了定量分析,验证了所提方案在标准化考场中的工程可行性与推广价值^[3,6]。本文方案也在实践应用中,得到了有效的验证和用户肯定。

1 文献综述

考场与教学空间内普遍使用的石英挂钟,其长期走时偏差主要受机芯品质、供电电压与环境温度影响。国际标准 ISO 19235:2015 和 GB/T 38021—2019 对指针式石英钟在不同工况下的短期/长期误差及检定条件给出限值 and 评价方法,走时准确度通常以 $s \cdot d^{-1}$ 计量^[10-11]。即便产品出厂满足上述标准,在大规模分散部署且缺乏定期校准的场景中,由器件离散性和环境应力引起的累计漂移仍不可忽视,易形成周期性集中校时负担^[10-11]。

与石英钟类似, GB/T 20408-2016、ISO 23346: 2020 GB/T 42826—2023 以及 QB/T 4351 2012 分别对指针式电波钟、信号接收测试和电波手表给出型式试验要求^[12-15], 但主要面向出厂检定, 对大规模在网运行阶段的维护问题涉及较少。

无线电控制钟(radio-controlled clock, RCC)通过接收国家/区域授时台发射的长波时码实现自动校时, 是提升多点时间一致性的常见路径。不同国家采用不同频段与

编码体制, 如日本长波授时台(JJY time signal, JJY) 40/60 kHz、美国长波授时台(WWVB time signal, WWVB) 60 kHz 幅度/相位混合以及我国 BPC 68.5 kHz 等。BPC 采用每帧 20 s 的四进制脉宽编码, 单位时间信息量较高, 工程上常用负脉冲发送并在接收端反相处理以增强抗干扰^[16]; 但受低频调幅信道和终端机芯实现差异影响, 在复杂电磁环境下仍可能出现码元判决错误和帧丢失^[16-17], 典型参数如表 1 所示。

表 1 典型长波授时系统主要参数对比

Table 1 Key parameters of representative long-wave time-signal systems				
系统	主要服务区域	载波频率/kHz	典型覆盖半径	调制与时码特点
BPC (中国)	中国及周边东亚地区	68.5	1 500~3 000 km 半径(商丘台)	传统幅度调制时码, 叠加相位扩频信号, 日工作约 20 h, 功率 90 kW 左右
DCF77 (德国)	欧洲大部分地区	77.5	官方标称约 1 500~2 000	50 kW 长波台, 1 bit/s 幅度调制时码, 叠加伪随机序列的相位扩频增强信号
JJY (日本)	日本及近邻海域	40/60	1 000~2 000 km(两座台叠加覆盖)	两频点同步发送脉宽调制时码, 格式与 WWVB 类似的 IRIG 变体
WWVB (美国)	北美大部分地区	60	覆盖美国本土, 夜间可至 3 000	70 kW 载波, 传统幅度调制时码上叠加相位调制增强信号

BPC 授时以地波为主、天波为辅。研究表明, 地形/地物遮挡、建筑材料衰减以及天/地波干涉和电离层时变等因素都会影响室内可用度^[18]。在距离商丘发播台较远、楼层较低或朝向不利、钢筋混凝土遮蔽显著的教室中, RCC 终端更易出现接收盲区与入网不稳; 即便 BPC 具有多帧冗余, 当有效帧率不足时也难以长期维持统一自动校时^[16, 18]。因此, “室内补盲/本地分发”成为面向复杂建筑环境的现实工程对策。

与普通石英钟相比, RCC 时钟终端需周期性射频接收、解码与追时驱动, 平均功耗明显上升; 在授时信号质量不佳、频繁重试的情形下, 能耗进一步增加并缩短电池寿命^[19], 这也是现网 RCC 项目中“频繁换电池—考试季停摆风险—管理压力”的重要成因之一。低功耗系统评测通常建议在小电流、长寿命场景中采用 mWh 进行能量核算, 并结合放电曲线拟合寿命及自放电影响^[20]。在碱性/物联网电池与磷酸铁锂电池(lithium iron phosphate battery, LiFePO₄)之间存在“容量—自放电—成本—安全性”的权衡: LiFePO₄ 虽具较高容量, 但在微功耗应用中其自放电与成本优势并不一定凸显; 相反, 长货架期碱性电池或物联网专用一次电池在小电流放电往往具有更高总可用能量和更低年化自损^[21-23]。

在不改动既有 RCC 终端机芯的前提下, 采用小型本地授时装置在教室内重编码并广播标准 BPC 时码, 可缩短传播路径、减弱建筑遮蔽影响并提高有效帧率, 同时保持协议级兼容、降低替换成本与改造风险。近场磁场耦合/感应回路在低频分发和无线音频系统中已有成熟工程应用, 可为固定区域提供稳定覆盖^[24]。基于此, 面向考场的低成本、易部署、低功耗(可复用弱电)的本地化

授时路径, 已成为近年来工程界应对“覆盖—能耗—维护”三重约束的重要方案^[16, 18, 20, 24-25]。

在中国标准化考场实践中, 北京洪威公司出品的标准化考场自动校时同步时钟(WBC-E16A)已在多省市部署并形成稳定运维基线。该型号采用 3 V 双电池供电并内置 CR2032 纽扣电池保持时钟存储, 可在断电情况下维持核心走时^[16]。在电源侧, 南孚聚能环 L6R 碱性电池与南孚物联网专用电池因低自放电、供应稳定和小电流工况下较高可用能量, 通常被选作 RCC 终端长周期供电方案^[21-23]; 实验中亦将两者与 LiFePO₄ 进行对比评估^[22], 以获得“≥5 年生命周期(life time)免维护”的能量配置依据。

综上, 已在技术标准侧给出了石英/电波钟的准确度要求与编码规则^[10-16], 传播机理研究揭示了长波授时在复杂建筑中的室内不稳成因^[18], 能源与维护相关工作则指出了 RCC 在大规模运维中的电池更换与管理压力^[20-23]。因此, 面向“高一致性+低运维”的考场应用, 亟需一种兼容 BPC 的室内补盲方案与覆盖整个生命周期的终端供电策略; 在不改动现有机芯的前提下提升室内可用度, 并通过能量建模与电池选型获得“≥5 年免维护”的运行窗口。方案提出的“本地化 BPC 授时器 + 生命周期供电机械电波钟”即围绕上述空缺展开系统设计与实验验证。

2 系统设计与实现

2.1 整体思路

本文方案将每台生命周期供电的 BPC 机械电波钟

视作一个独立终端,由布设在考场或楼宇弱电节点上的微型授时发射器统一提供长波时码补盲服务。对于已大规模部署 BPC 授时钟表的学校,可在不更换终端的前提下现场加装发射器实现升级补充;在外部长波授时信号难以覆盖或无法引入的建筑中,则可将本地发射器视作“微型授时基站”,为局部区域构建标准化考试时钟基础设施。

授时源方面,当前实现通过校园 WiFi 访问多台公网/园区 NTP 服务器获取协调世界时 (coordinated universal time, UTC),在本地重编码为 BPC 标准时码并广播给各终端;系统同时预留 GPS/北斗每秒脉冲信号 (one pulse per second, 1PPS) 及有线/无线扩展接口,以便未来接入其他授时基准,但重点讨论“NTP→局域 BPC 补盲→多钟表同步”这一典型实现路径。

2.2 微型授时发射器设计

为在封闭考场或教室内提供可靠的授时覆盖,研制了一款微型授时发射器原型。考虑到低成本、易部署和便于维护等要求,发射器采用 USB 2.0 标准接口供电 (5 V DC,整机功耗 ≤ 1.5 W),既可直接接入普通手机充电器或计算机 USB 口,也可复用教室现有 DC 12 V 弱电回路经降压供电。整机体积约为一个计算机鼠标大小,便于在墙角、吊顶内等位置隐蔽安装并进行多点布设。

发射器的硬件结构如图 1、2 所示,整体由主控 微控制器单元 (microcontroller unit, MCU)、WiFi 通信模块、电源与接口模块、调制与整形网络、功放及磁棒天线和状态指示电路等部分构成:1 号 ATmega 系列 MCU 负责根据 NTP 时间构造 BPC 四进制脉宽时码并完成秒级调度;2 号 ESP8266 WiFi 模块以 AP 热点模式完成配置后,再以 STA 终端模式接入校园网络,周期性获取主备 NTP 服务器的 UTC 时间并通过虚拟串口发送给 MCU;3 号模块集成 USB-TTL 调试接口与 5 V/3.3 V 电源管理;4 号驱动电路与 9 号多色 LED 提供上电、联网、授时与故障状态指示。MCU 输出的秒脉冲经 5 号调制单元和 6 号 RC 低通+谐振网络整形成 68.5 kHz 近正弦载波,7 号小功率功放驱动 8 号铁氧体磁棒天线在本地辐射。实际部署时天线沿钟面法线方向摆放并远离大面积金属或接地平面,以获得更稳定的近场耦合与覆盖效果。

在调制链路中,MCU 输出的秒脉冲门控信号经方波调制单元和电阻-电容 (resistor-capacitor, RC) 低通+谐振网络整形成 68.5 kHz 近正弦载波,再由小功率功放驱动铁氧体磁棒天线辐射长波近场信号。磁棒沿壳体边缘固定并避开大面积金属或接地平面,以保证谐振 Q 值和频率稳定。典型教室内,在按国家授时台场强限值设置发射功率的条件下,有效覆盖半径可达数十米,可满足单间标准化考场的同步需求。

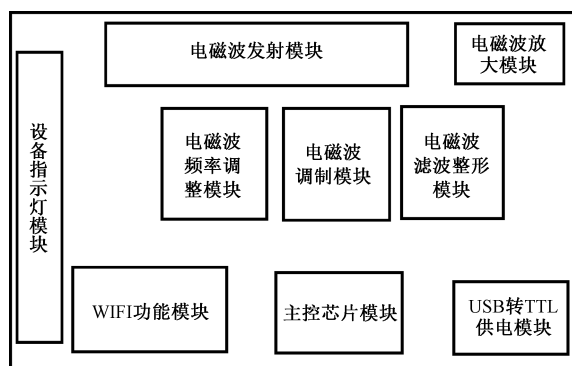


图 1 微型授时发射器的功能结构框图

Fig. 1 Function block diagram of the miniature time synchronization transmitter

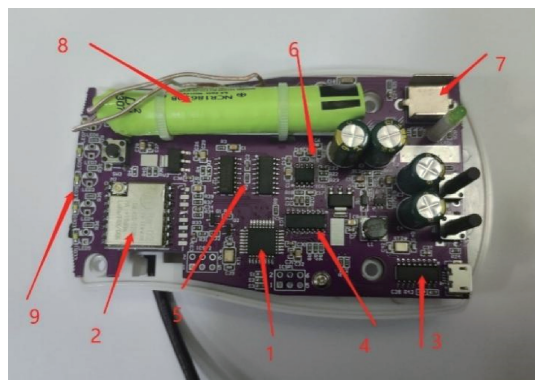


图 2 微型授时发射器原型机

Fig. 2 Prototype of the miniature transmitter

2.3 全生命周期供电机械钟设计

选取北京洪威公司研制的 WBC-E16A 型标准化考场电波钟作为代表性样机。该型号面向“标准化考场自动校时同步时钟”应用,被中国教育部考试中心(教育部教育考试院)相关视频资料收录,并已在多省市考场形成稳定运维基线。其机芯按 GB/T 20408 标准完成型式检验,指针式表盘直径约 30 cm,刻度尺寸与可视距离满足考试场景要求;为提高远距可读性与走时稳定性,秒针尾部加装金属配重以改善转动平衡,如图 3 所示。

为实现“一个电池周期覆盖整个使用寿命”的目标,在不改变钟体外观的前提下对供电结构进行改造:将机壳内原有的 2 节 AA 电池仓 (~3 V) 扩展为 2S4P 结构的电池组,总容量提升至原设计的约 4 倍。按终端实测日耗 15~17 mWh 的量级估算,在 ≥ 2.2 V 的有效工作电压窗口内,单组 2S4P 电池即可支撑电波钟连续运行约 4~5 年;机壳内部同时预留了第 2 组 2S4P 电池安装位置,必要时可通过并联扩容将供电寿命进一步翻倍而无需更改机芯与钟表结构。

在电池化学体系选择方面,结合相关研究^[21-23]及厂



图 3 北京洪威 WBC-E16A 型 BPC 考场电波钟外观
Fig. 3 WBC-E16A BPC exam hall clock (BWT-CO)

商数据,将磷酸铁锂电池、南孚聚能环 L6R 碱性电池和南孚物联网专用一次电池纳入候选集合。表 2 对 3 种方案的关键指标进行了对比:磷酸铁锂有较高可用容量与可充电特性,但单价与体系复杂度较高;聚能环电池工艺成熟、成本低廉,自放电率约 1%,已在现网 WBC-E16A 中大规模应用;物联网专用锂电池保持约 1% 年自放电率的同时提升了单位体积能量密度,更适合长寿命、小电流场景。

表 2 不同电池性能比较

Table 2 Performance comparison of battery options

电池类型	年自放电率/%	供应及可靠性	优势特点	不足
磷酸铁锂	3~5 (严格品控)	工业应用较多,单节成本高	容量较大,支持充电循环	价格昂贵,自放电偏高,长期安全冗余不足
南孚聚能环碱性电池 (L6R)	~1 (10 年质保)	市场成熟,易获取,大量用于 WBC-E16A	成本低廉,产品稳定,容量满足需求	不可充电,单节电压随放电逐渐衰减
南孚物联网专用锂电池 (10 年质保)	~1%	新兴产品,供应正常,需保证一致性	能量密度高,容量与碱性电池相当	单价略高,应用尚不如碱性电池广泛

2.4 BPC 时码编码实现原理与流程控制

授时控制流程由主控 MCU 的 1 Hz 定时中断驱动完成。授时器周期性从网络 NTP 时间源获取当前 UTC 时间,将年、月、日、周、时、分等字段填入 BPC 帧缓冲区并生成当分钟的 3 帧时码序列。随后 MCU 按帧格式进行逐秒调度:在每分钟 0、20、40 s 关闭载波 1 s 作为帧起始空码,其余秒按编码序列输出门控脉冲,形成 1 min 循环广播的当前时间码。

BPC 码每帧 20 s(图 4、5),由 1 s 起始空码和 19 个

码元组成,对应年、月、日、周、时、分及 P1~P4 辅助位。码元采用四进制脉宽编码,载波导通时间 $t_{on} \in \{0.1\text{ s}, 0.2\text{ s}, 0.3\text{ s}, 0.4\text{ s}\}$ 分别表示 0/1/2/3,整分钟帧起始位出现在 0/20/40 s 的整秒空播。P3 兼具奇偶校验和午前/午后指示,P4 进行二次奇偶校验并携带年份高位。在每个 1 s 时隙内,MCU 先按 t_{on} 发射载波,随后关断至该秒结束;在帧起始秒关闭整秒载波以形成帧边界。3 帧连续输出构成完整的 1 min BPC 时码数据流,其秒脉宽编码波形与调制后包络分别如图 5 和 6 所示。

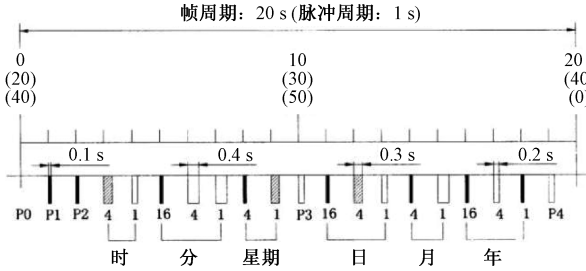


图 4 BPC 时码标准数据帧结构

Fig. 4 Data frame structure of the BPC time code

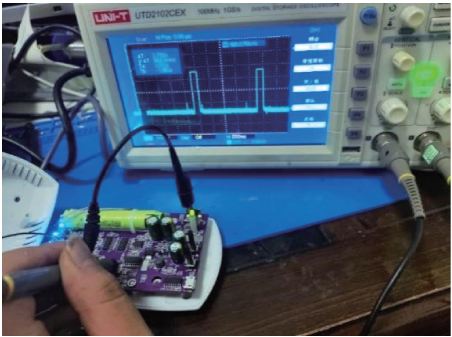


图 5 秒脉宽编码波形

Fig. 5 Waveform of second-pulse width coding

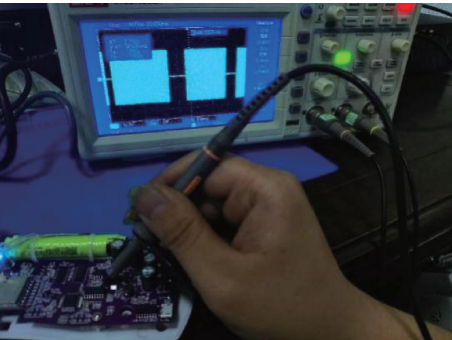


图 6 调制后脉冲包络

Fig. 6 Modulated pulse envelope

2.5 基准频率合成(535.5→68.5 kHz 倍频)

为兼顾成本、相位噪声和频率稳定度,本系统采用

“MCU 低频基准+外置倍频/分频器”的载波合成方案。主控定时器在 D9 管脚产生 535.5 Hz 方波基准信号(图 7),经可编程计数器先 $\times 256$ 倍频、再 $\div 2$ 分频得到约 68.5 kHz 时钟,随后由 6 号整形网络滤除高次谐波形成近似正弦载波(图 8),并通过 7 号功放驱动 8 号磁棒天线。相较于直接由 MCU 输出 68.5 kHz 高频方波,该方案显著降低了抖动与温漂,改善了电磁兼容性能,同时保持器件成本可控,能够满足考场近场授时对载波频率精度和长期稳定度的要求。

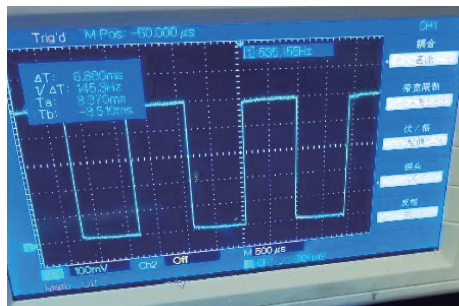


图 7 D9 Pin 基准波形

Fig. 7 Reference waveform on D9 Pin

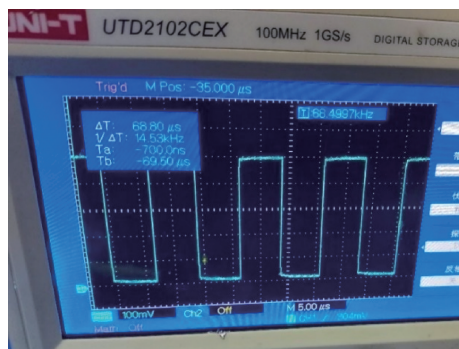


图 8 68.5KHz 载波信号

Fig. 8 68.5 kHz carrier signal

为实现 535.5 Hz 的参考方波输出,图 9 所示为 ATmega 系列 MCU 的定时器配置方法。通过将定时器 1 设置为 CTC (Clear-Timer-on-Compare) 模式,并选择无分频 (prescaler=1) 的计数方式,从而精确产生给定频率的方波。该频率作为倍频链路的基准输入,可显著降低时钟抖动与温漂,提高载波频率的长期稳定性,同时减轻 MCU 算力与电磁兼容压力。

2.6 关键通信与编码流程(伪代码/最小实现呈现)

授时系统的通信与编码逻辑概括为 4 个环节,分别为网络授时、数据交互、时码构造和秒级调度。WiFi 模块通过 SmartConfig 以 AP 模式迅速配网后转入 STA 模式连入校园 WiFi,从主、备 NTP 服务器轮询获取 UTC 时间,内置超时与回退策略,并只将校验通过的时间戳发送

```
TCCR1A = _BV(COM1A0); // toggle OC1A on compare match
TCCR1B = _BV(WGM12) | _BV(CS10); // CTC mode, prescaler=1
OCR1A = 14948; // Fout = Fcpu/(2*(OCR1A+1)) ≈ 535.5 Hz
pinMode(9, OUTPUT); // OC1A on D9
```

图 9 MCU 定时器配置,生成 535.5 Hz 基准

Fig. 9 MCU timer configuration for generating 535.5Hz

给主控 MCU。

MCU 通过虚拟串口接收时间戳,按 BPC 协议生成 3 f/min 的时码序列,包含帧标识、奇偶校验位及时间字段;随后以二进制脉宽方式对 68.5 kHz 载波进行秒级门控调制,经整形与功放驱动磁棒天线在本地辐射。上述“最小实现”流程的伪代码与关键数据通路如图 10~12 所示。

```
start:
set Wi-Fi to STA; begin SmartConfig
while (!connected):
blink(NetLED); if (timeout) allow 'reset SSID' command
fetch UTC from NTP_pool; if (invalid || < factory_epoch):
try backup_NTP_1 -> backup_NTP_2 (max_retry = 100)
if (still invalid) soft_restart()
share epoch to MCU via UART (5-byte payload + checksum)
set auto-reconnect; persist credentials
```

图 10 算法 1 WiFi 配网与 NTP 回退

Fig. 10 Algorithm 1 WiFi provisioning with NTP fallback

```
every minute at sec = {0,20,40}:
frame_id -> P1; P2 = 0
encode hour(12h), minute, weekday(1..7), day, month, year(00..99) in quaternary
compute P3 (odd parity + AM/PM), P4 (odd parity + year_msb)
BPC[0..18] = {P1,P2,H1,H0,M2,M1,M0,H1,M0,P3,D2,D1,D0,M01,M00,Y2,Y1,Y0,P4}
// second-level pulse-width modulation
send 1 s blank (frame preamble)
for i in 0..18:
enable_carrier for t_on = (BPC[i]+1)*0.1 s
disable_carrier for (1.0 - t_on) s
```

图 11 BPC 帧构造与秒级调度

Fig. 11 BPC frame build & second-level scheduler

```
uint8_t buf[5]; // 4B epoch (Unix) + 1B checksum
uint32_t t = get_epoch(); // validated UTC (>= factory_epoch)
buf[0..3] = to_bytes(t);
buf[4] = (buf[0]+buf[1]+buf[2]+buf[3]) & 0xFF;
uart_write(buf, 5);
```

图 12 MCU-ESP 时间戳交换与校验

Fig. 12 Epoch exchange & checksum

2.7 发射波形整形、功率放大与天线谐振

为同时满足带外抑制和近场耦合效率要求,授时发射器在 68.5 kHz 载频下采用“门控调制 + 正弦整形 + 谐振匹配”的一体化结构。载波经门控后首先通过 RC 低通和有源正弦整形级,将方波逐级滤为近似正弦波形(图 13),整形网络与磁棒线圈及并联电容共同构成串/并联谐振回路,并通过 L/π 型匹配实现与小功率功放的阻抗匹配,在保证频谱纯度的同时提升近场辐射效率、降

低对周边设备的电磁干扰。

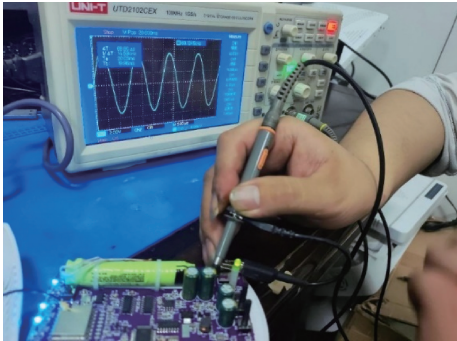


图 13 68.5 kHz 正弦整形与天线谐振实现(台架测量)
Fig. 13 Implementation of 68.5 kHz sine-wave shaping and antenna resonance (bench measurement)

发射天线采用铁氧体磁芯线圈加并联可调电容,精确调谐在 68.5 kHz,谐振条件下对工作频点呈高阻抗,便于功率从功放有效耦合至天线。部署时应使磁棒远离大面积金属或接地铜皮,以避免 Q 值下降和频偏;利用其“主辐射方向垂直于磁芯轴线”的方向性特征优化摆放,可覆盖单间教室及相邻教室。经上述整形-匹配-谐振设计,系统在室内可实现稳定的长波近场辐射,典型覆盖半径达十数米,满足考场场景的补盲授时需求。

所述局域授时发射器工作在 BPC 载频 68.5 kHz,仅在楼宇内部以长波近场方式重播经 NTP 校准的标准时间,发射功率受限于 USB 5V 低压供电。根据《微功率短距离无线电发射设备目录和技术要求》,A 类通用微功率设备在 9 ~ 190 kHz 频段 10 m 处磁场强度限值为 72 dB μ A/m,并随频率每倍频程降低 3 dB。按磁偶极子近场模型估算,本原型在 10 m 处的磁场仅为 μ A/m 量级,远低于约 4 mA/m 的限值;结合实测覆盖范围约为一个教室至一层楼,可将其归入室内 A 类微功率短距离无线电设备^[26],而非大功率长波授时发射台。

3 实验与结果

从地下屏蔽空间、校内教学楼以及终端功耗 3 方面对所提局域授时与生命周期供电方案的工程性能进行验证,重点考察在多台机械电波钟同时工作的实际条件下,授时成功率、覆盖能力与电池寿命是否满足“ ≥ 5 年免维护”的设计目标。

3.1 地下屏蔽空间验证授时性能

在实验室模拟环境中,在一处地下全封闭仓储空间对微型授时发射器的覆盖能力进行验证。该空间经测试确认无法接收到商丘 BPC 授时台信号,可视为理想授时盲区。发射器经 USB 口供电,输出功率约 0.5~1 W(电

流约 300 mA),单点布设于房间中央。

需要指出,试验属面向考场应用的现场覆盖与授时可靠性验证,测试条件与 GB/T 42826-2023/ISO 23346:2020 所规定的电波钟信号接收型式试验方法并不等同;实验关注在复杂建筑内多台终端是否能够完成自动校时,后者则面向单机芯在标准化环境下的接收灵敏度评估,而机芯出厂合格后即已视为通过该项测试,故本实验与之两者互为补充。

实验中,两批共 10 台 WBC-E16A 电波钟样机被均匀放置在不同高度和方位,同时上电开始授时接收。终端在上电后持续尝试解调长波时码,若数据帧校验失败则丢弃该轮结果并等待下一帧;当成功解码后立即执行指针追时,将时、分、秒同步拨至当前时间,因此从上电到首次完成校时的总耗时通常为 2~10 min。各样机的授时结果及摆放情况如表 3 所示。

表 3 地下封闭空间授时实验结果

Table 3 Results of time-sync test in enclosed space		
样机编号 (Device #)	授时结果 (Sync Result)	摆放及环境情况 (Placement/Environment)
1	成功	无特殊情况
2	成功	无特殊情况
3	成功	侧向摆放,表盘平面垂直于发射天线
4	成功	侧向摆放,表盘平面垂直于发射天线
5	成功	平放摆放,表盘水平朝上,耗时较长
6	成功	平放摆放,表盘水平朝上,耗时较长
7	失败, F	置于金属表面(铁箱顶),影响信号
8	失败, F	局部干扰,墙体内部电线电磁干扰
9	成功	无特殊情况
10	成功	无特殊情况

观察到典型现象包括置于铁箱顶等大面积金属表面时,电波钟基本无法接收授时信号而导致校时失败;平放(表盘向上)情况下虽可完成授时,但整体耗时明显增加;侧面对向发射天线(表盘平面与发射线圈平面垂直)时仍能正常完成校时;当发射器与钟表之间被同一水平面的金属板完全遮挡时,信号显著衰减,难以对时。

穿透测试表明,微型发射器在隔一堵石膏板墙或普通水泥墙(直线距离约 7 m)条件下,仍可在约 2 min 内完成授时;但隔着厚约 20 cm 的钢筋混凝土楼板上层传输时终端未能捕获有效信号。综合来看,该系统在单间教室等封闭空间内可实现可靠覆盖,并具备一定的墙体穿透能力,但跨层授时效果有限。地下屏蔽环境实验表明,在“无外部 BPC 信号 + 多台终端”的最不利工况下,微型发射器仍能为电波钟提供稳定的本地授时服务,为后续教学楼场景的测试提供了边界条件与工程依据。

3.2 校内教学楼实测

为评估真实教学楼环境下的授时效果,在北京某学

校一栋教学楼内随机部署 30 台 WBC-E16A 型考场电波钟(覆盖不同楼层及部分弱信号位置),连续 4 周每周记录其自动校时状态。

需要指出,实验属于工程应用场景下的长期运行验证,而非 GB/T 42826-2023 所规定的电波钟信号接收型式试验。

实测首周仅依赖商丘授时台 BPC 信号,30 台钟表中有 9 台(2、7、12、15、19、22、25、28、30 号,约占 30%)在统计窗口内未能成功对时。第 2 周在楼内增设微型授时发射器后,除 7 号(USB 供电故障)和 12 号(初始配网失败)外,其余终端均可正常完成自动校时。更换 7 号电源适配器并重新为 12 号配网后,第 3~4 周 30 台终端连续保持 100%成功率,如表 4 所示。

表 4 校内场景实测结果
Table 4 On-campus field test results

样机	第 1 周	第 2 周	第 3 周	第 4 周	备注
1	成功	成功	成功	成功	—
2	失败. F	成功	成功	成功	增配发射器
3	成功	成功	成功	成功	—
4	成功	成功	成功	成功	—
5	成功	成功	成功	成功	—
6	成功	成功	成功	成功	—
7	失败. F	失败. F	成功	成功	增配发射器 USB 供电故障
8	成功	成功	成功	成功	—
9	成功	成功	成功	成功	—
10	成功	成功	成功	成功	—
11	成功	成功	成功	成功	—
12	失败. F	失败. F	失败. F	成功	初始配网失败 第 3 周重配置
13	成功	成功	成功	成功	—
14	成功	成功	成功	成功	—
15	失败. F	成功	成功	成功	增配发射器
16	成功	成功	成功	成功	—
17	成功	成功	成功	成功	—
18	成功	成功	成功	成功	—
19	失败. F	成功	成功	成功	增配发射器
20	成功	成功	成功	成功	—
21	成功	成功	成功	成功	—
22	失败. F	成功	成功	成功	增配发射器
23	成功	成功	成功	成功	—
24	成功	成功	成功	成功	—
25	失败. F	成功	成功	成功	增配发射器
26	成功	成功	成功	成功	—
27	成功	成功	成功	成功	—
28	失败. F	成功	成功	成功	增配发射器
29	成功	成功	成功	成功	—
30	失败. F	成功	成功	成功	增配发射器

由表 4 可知,在排除个别供电与配置异常后,微型发射器提供的室内补盲可将原先仅依赖商丘塔台 BPC 信

号时约 70%的有效授时成功率提升至 100%,这说明在复杂教学楼环境中,局域授时装置能够有效消除长波信号盲区,使终端长期保持稳定、免人工干预的统一对时,具有良好的工程可复制性和在类似标准化考场中的推广价值。

3.3 电池放电与能量评估(小电流放电)

量化生命周期供电能力时,搭建 2×AA 电池(~3 V)+150 Ω 恒阻放电平台,以恒定负载模拟电波钟工作电流上限。恒阻放电实验在我国东北地区实验室冬季条件下进行,室内由集中供暖维持常规室温,试验期间温度约 18 ℃~24 ℃,随昼夜存在明显缓慢周期性波动。

电池样品组经 150 Ω 精密金属膜电阻恒阻放电。端电压由 ATmega328P 微控制器内部 1.1 V 精密参考源驱动的 10 位 ADC 采集,经精密分压电阻映射后标定,电压分辨率约 0.01 V,短期重复性优于 0.5%,可满足能量积分与平台特性分析的精度需求。实验按 $\Delta t=60\text{ s}$ 的时间步长采集端电压 V_i ,并基于电功公式积分计算总放出能量 E :

$$E=(\Delta t/R)\sum_{i=1}^nV_i^2,\Delta t=60\text{ s},R=150\text{ }\Omega$$

(1)

式中: E 是放电阶段释放的总能量; V_i 是第 i 次采样电池端电压; R 为恒阻负载阻值; Δt 是采样时间步长; n 为总采样点数, $n=T/\Delta t$ 。

为便于工程比较,通常将 E 由(J)转换为 mWh,处理如下:

$$E_{\text{mWh}}=\frac{1\text{ }000E}{3\text{ }600}$$

(2)

图 14~19 所示为磷酸铁锂电池、南孚聚能环电池与南孚物联网电池在 150 Ω 负载、每分钟采样一次条件下的放电数据与曲线,反映了不同化学体系在小电流长时放电下的电压平台与衰减特性。为评估其对电波钟生命周期供电的实际贡献,按电压区间对累计能量进行分段统计。

1) ≥2.4 V 核心工作阶段。保证接收解码、指针追时、备用电池充电等全部功能满负荷运行,对考试期间的可靠性最为关键;

2) ≥2.2 V 性能下降阶段。部分非关键功能(如机芯 CR2032 保电、LED 亮光等)可能衰减,主要保障日常授时和走时精度;

3) ≥1.8 V 剩余极限阶段。在有授时信号覆盖的情况下,机芯可继续走时并同步,但失去独立长期计能力,内部实时时钟模块(real-time clock,RTC)失效,仅能视为对维护窗口提供时间冗余。

上述分段方法可直接量化不同电池在关键工作区间的能量输出,并为寿命预测和安全裕量设计提供依据。各阶段持续时间和可用能量如表 5 所示。

磷酸铝铁电池测量记录 1 sample per 60 seconds
<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<TotalData>
 <Single Time="1" Data="3.16" />
 <Single Time="2" Data="3.34" />
 <Single Time="3" Data="3.31" />
 <Single Time="4" Data="3.29" />
 <Single Time="5" Data="3.28" />
 <Single Time="6" Data="3.27" />
 <Single Time="7" Data="3.26" />
 <Single Time="8" Data="3.25" />
 <Single Time="9" Data="3.25" />
 <Single Time="10" Data="3.24" />
 <Single Time="11" Data="3.23" />
 <Single Time="12" Data="3.22" />

图 14 磷酸铁锂电池 150 Ω 小电流放电数据
Fig. 14 LiFePO₄ low-current discharge data at 150 Ω

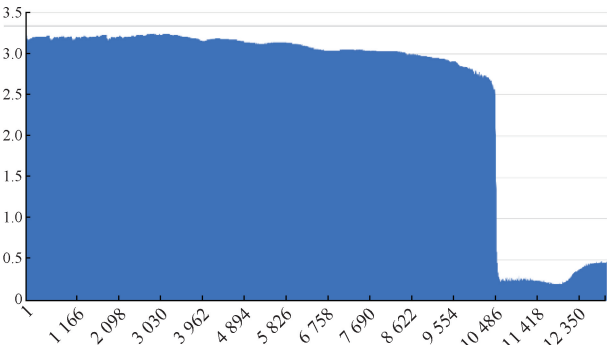


图 15 磷酸铁锂电池 150 Ω 放电曲线
Fig. 15 LiFePO₄ battery discharge curve at 150 Ω

表 5 3 种电池 150 Ω 负载下不同电压阶段的可用能量

Table 5 Available energy of three battery types at different voltage stages under a 150 Ω load

电池类型	≥2.4 V		≥2.2 V		≥1.8 V	
	时间/ min	能量/ mWh	时间/ min	能量/ mWh	时间/ min	能量/ mWh
磷酸铁锂	11 501	11 202	10 505	11 002	10 517	11 210
南孚聚能环	8 900	7 071	10 600	8 423	13 160	9 335
南孚物联网	9 200	7 271	11 000	8 735	14 250	9 978

图 15、17 和 19 的长时放电曲线中可见数十毫伏至约 0.1 V 的缓慢起伏,周期与昼夜节律相近。其主要原因因为环境温度日周期波动叠加在恒阻小电流放电过程:一方面,碱性电池与磷酸铁锂电池的开路电压具有 $\text{mV} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 量级的温度系数;另一方面内阻随温度变化而改变,使恒定负载下的端电压产生轻微升降。已有文献与厂商数据表明,在 20 ℃ 附近数摄氏度室温变化内,电压变化通常处于几十毫伏量级,与本文实验观察到的抖动一致^[27-28]。

为定量评估这种温度起伏对能量估算的影响,在原始电压序列上采用 60 min 滑动中值进行平滑处理,分别

南孚聚能环碱性电池小电流放电曲线

<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<TotalData>
 <Single Time="1" Data="3.16" />
 <Single Time="2" Data="3.16" />
 <Single Time="3" Data="3.16" />
 <Single Time="4" Data="3.16" />
 <Single Time="5" Data="3.16" />
 <Single Time="6" Data="3.16" />
 <Single Time="7" Data="3.16" />
 <Single Time="8" Data="3.15" />
 <Single Time="9" Data="3.16" />
 <Single Time="10" Data="3.15" />
 <Single Time="11" Data="3.15" />
 <Single Time="12" Data="3.15" />
 <Single Time="13" Data="3.15" />

图 16 南孚聚能环电池 150 Ω 小电流放电数据
Fig. 16 Nanfu alkaline low-current discharge data at 150 Ω

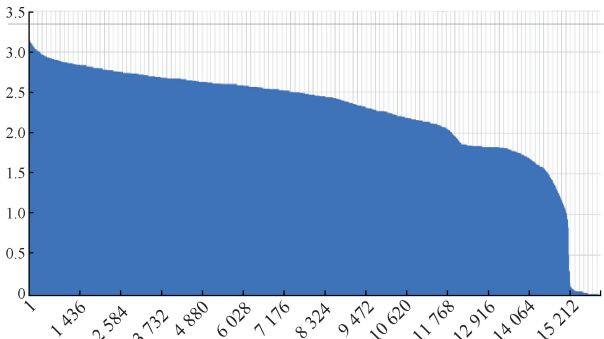


图 17 南孚聚能环电池 150 Ω 放电曲线
Fig. 17 Nanfu alkaline battery discharge curve at 150 Ω

南孚物联网电池小电流放电曲线

<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<TotalData>
 <Single Time="1" Data="3.18" />
 <Single Time="2" Data="3.18" />
 <Single Time="3" Data="3.18" />
 <Single Time="4" Data="3.18" />
 <Single Time="5" Data="3.17" />
 <Single Time="6" Data="3.18" />
 <Single Time="7" Data="3.17" />
 <Single Time="8" Data="3.18" />
 <Single Time="9" Data="3.17" />
 <Single Time="10" Data="3.17" />
 <Single Time="11" Data="3.17" />
 <Single Time="12" Data="3.17" />
 <Single Time="13" Data="3.17" />

图 18 南孚物联网电池 150 Ω 小电流放电数据
Fig. 18 Nanfu IoT low-current discharge data at 150 Ω

以原始数据和平滑数据按式(1)、(2) 计算累计能量。结果表明 3 种电池在整个放电周期内,基于两种曲线得到的总能量相对差异均小于 0.02%,远低于所提出方案

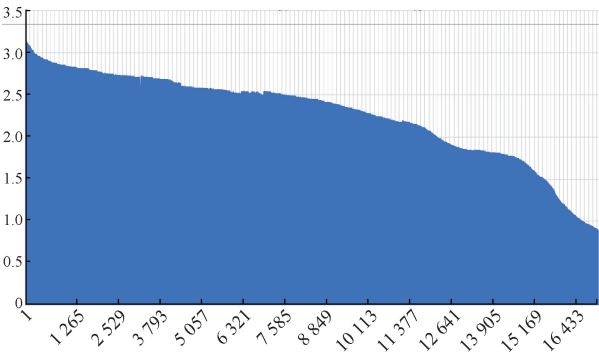


图 19 南孚物联网电池 150 Ω 放电曲线
Fig. 19 Nanfu IoT battery discharge curve at 150 Ω

在生命周期功耗模型中预留的 15%~30% 的工程安全裕量。

从理论上,端电压可视为缓慢变化平均值与零均值小扰动之和,扰动可在长时间积分中基本互相抵消;ATmega328P 带隙参考源的温漂与初始误差主要影响绝对标定,而相对变化远小于端电压长期衰减的量级。因此,在 BPC 供电生命周期的寿命建模中直接采用原始电压数据进行能量积分不会对“生命周期供电”结论造成实质性偏差。

若以 II 阶段($\geq 2.2\text{ V}$)作为考场“生命周期供电、免维护”的主判据,优选南孚物联网电池;聚能环为性价比替代;LiFePO₄ 虽高压平台强,但成本偏高,性价比低,而且末段塌陷快。

3.4 电波钟实机功耗与寿命估计(实测)

3 种电池分别装入同型号电波钟 WBC-E16A(保持每日自动授时),连续 200 d+ 监测端电压。受夏季升温与电压回弹影响, LiFePO₄ 样机在 236 d 时仍高于容量实验的阶段阈值 3.492 V,难以与恒阻数据对齐,故仅作为参考,不参与日耗估算。其余两组在起始电压段与容量实验对齐后,可得南孚聚能环的实测平均日耗为 16.50 mWh/d,南孚物联网电池为 14.83 mWh/d。

由此可见,WBC-E16A 在典型考场条件下日均能耗约为 14.8~16.5 mWh,功耗相较于市面普通 12 in 民用款式偏高,是因为 WBC-E16A 钟面为考场特制 16 in,使用大盘专用机芯,指针长度和配重均高于《GB/T 20408-2016 指针式电波钟》的标准盘面数据,故驱动扭矩和平均电流相应增加。机芯还集成了每分钟点亮约 1 s、十余毫安电流的 LED 授时状态指示灯,以及在弱信号环境下频繁接收重试的约 200 mA 量级的快速追时动作,这些高功耗工况在 200 d 监测窗口内偶有出现^[12,29]。为在寿命模型估算中吸收上述工况波动、批次离散和测量误差,方案在实测区间基础上将日耗模型值保守向上取为 20 mWh/d,相当于预留约 20%~30% 工程安全裕度,用

于后续 Life-Time 寿命预测。
表 6 中, $\geq 2.2\text{ V}$ 阶段可用能量,可得到各电池方案的预期寿命。

表 6 电波钟实机日耗与寿命预测(以 $\geq 2.2\text{ V}$ 为判据)

Table 6 Predicted daily consumption and service life ($\geq 2.2\text{ V}$ stage)					
电池类型	实测平均 日耗/ (mWh·d ⁻¹)	模型日耗/ (mWh·d ⁻¹)	$\geq 2.2\text{ V}$ 可用能量/ mWh	预测寿命 /d	约/月
南孚聚能环	16.50	20	8 423	421	14.0
南孚物联网	14.83	20	8 735	437	14.6
磷酸铁锂	—	20	11 025	551	18.4

注:LiFePO₄ 未对齐到统一阈值,实测日耗不报告,仅作参考

按保守模型(20 mWh/d),模型寿命约 14~15 个月;结合 200 d 实测日耗修正后,完整 2S4P 模组在 $\geq 2.2\text{ V}$ 阈值下的预测寿命可达 5 年甚至更长,更符合生命周期供电、免维护的目标。

3.5 全生命周期模型验证与工程结论

寿命评估基于式(1)对 150 Ω 放电曲线进行分钟级积分,分别统计在 $\geq 2.4\text{ V}$ (核心区)、 $\geq 2.2\text{ V}$ (下降区)、 $\geq 1.8\text{ V}$ (极限区)的可用能量 E_{usable} 。以模型日耗 $E_{\text{day}} = 20\text{ mWh}$ 计算寿命 $T = E_{\text{usable}}/E_{\text{day}}$ (表 7),并结合 200 d 实测测得日耗对 $\geq 2.2\text{ V}$ 判据下的寿命(表 8)进行交叉验证。其中日均能耗 E_{day} 统一按 20 mWh/d 取值,以覆盖指针扭矩、LED 指示、弱信号重试与追时动作等带来的附加能耗,使寿命估算结果偏保守而非乐观。

1) 容量分布

磷酸铁锂样品总能量最高,但有效工作电压窗内($\geq 2.2\text{ V}$)结合其成本优势有限;南孚物联网与聚能环总能量接近,其中物联网在 $\geq 2.2\text{ V}$ 及 $\geq 1.8\text{ V}$ 段的可用能量更高。

2) 模型寿命

在统一 20 mWh·d⁻¹ 预算下,物联网模组在 $\geq 2.2\text{ V}$ 判据对电波钟可提供 4.79 年(1 747 d)的寿命;聚能环为 4.42 年(1 612 d)。

3) 实机交叉验证

200 d 实机测得平均日耗 14.83 mWh·d⁻¹(物联网)、16.50 mWh·d⁻¹(聚能环)。据此推算, $\geq 2.2\text{ V}$ 判据下寿命分别为 6.45 和 5.34 年,与模型估计吻合良好,也印证了采用 20 mWh·d⁻¹ 建模属于保守取值。

综合能量分布、模型寿命和实机日耗三方面结果,在标准化考场“ ≥ 5 年免维护”目标下,2S4P 南孚物联网电池 Life-Time 模组为优选方案,南孚聚能环可作为成本略低的备选;磷酸铁锂虽然总能量高,但结合成本、自放电和系统复杂度,不宜作为本场景的量产配置。工程实施

中建议以端电压 2.2 V 作为维护阈值,配合 2.2~2.3 V 低压告警和年度抽检,抑制过放与碱性电池漏液损毁机芯风险。

表 7 2S4P Life-Time 模组在不同电压阶段的可用能量与模型寿命(未计自放电,假设日耗 20 mWh)

Table 7 Available energy and model of 2S4P life-time packs (no self-discharge, 20 mWh/day)

电池类型	≥ 2.4 V 能量/Wh	预测寿命/d	年	≥ 2.2 V 能量/Wh	预测寿命/d	年	≥ 1.8 V 能量/Wh	预测寿命/d	年
磷酸铁锂	44.808	2 240.4	~6.14	44.100	2205.0	~6.04	44.840	2 242.0	~6.14
南孚聚能环	28.284	1 414.2	~3.87	32.244	1612.2	~4.42	37.340	1 867.0	~5.12
南孚物联网	29.084	1 454.2	~3.98	34.940	1747.0	~4.79	39.912	1 995.6	~5.47

表 8 ≥ 2.2 V 判据下的实机日耗交叉验证与 2S4P Life-Time 模组寿命推算(200 d 平均)

Table 8 Cross-check of measured daily consumption and life-time estimation of 2S4P life-time pack at the ≥ 2.2 V criterion (200 d average)

电池类型	实测平均日耗/(mWh·d ⁻¹)	≥ 2.2 V 可用能量/Wh	推算寿命/d	年
南孚聚能环	16.50	32.244	1951	~5.34
南孚物联网	14.83	34.940	2356	~6.45
磷酸铁锂	—	44.100	—	—

3.6 工程可行性与边界条件

基于恒阻放电实验和约 200 d 电波钟日耗测量结果,采用 2S4P 电池模组并以 ≥ 2.2 V 为有效判据、日耗按 20 mWh 建模时,系统在教室尺度内可实现长期稳定供电与可靠授时覆盖。寿命估计采用:

$$L = \frac{E_{\text{usable}}}{E_{\text{day}}(1 + \rho) + E_{\text{overhead}}} \tag{3}$$

式中: L 为预测的可运行寿命; E_{usable} 为在有效工作电压区间 ≥ 2.2 V 内的可用能量; E_{day} 为日均能耗,本研究中按 20 mWh·d⁻¹ 建模; E_{overhead} 为建模中考虑的附加能耗项若未单独计量可近似取 0。 ρ 为年化自放电(取 1%~2% 区间做稳健估计)。敏感性分析表明,在 5 年尺度上,自放电造成的可用能量折减约 5%~10%,被模型中预留的 20%~30% 冗余吸收,因此不会改变“生命周期供电”结论。

在电池体系选择上, LiFePO₄ 虽然总能量较高,但有效平台主要集中在 2.8 V 附近,落入电波钟工作区间(≥ 2.2 V)后的有效能量优势有限,同时成本和管理复杂度较高;低自放电碱性/物联网级 AA 电池在该电压区间放电曲线更平缓、单价低且供应稳定,更适合面向考场的大规模部署。

在授时链路鲁棒性方面,本文系统采用“多源 NTP + 本地回退 + 商丘塔台 BPC 常规授时”的结构。微型发射器通过校园 WiFi 轮询多台公网/园区 NTP 服务器获取 UTC 时间戳,当服务器不可达时自动切换;当外部 NTP 出现数小时至 1~2 d 的短时中断时,发射端停止工作,终端钟表退回至基于 MCU 石英晶振的 RTC 计时模式,沿用最近一次成功获取的时钟走时。

指针式电波钟国家标准 GB/T 20408-2016 对同步后

结合前述微型授时发射器的长期低功耗特性,上述电池模块配置可以满足考场机械电波钟“生命周期供电、免人工维护”的时间同步需求。

指针偏差的允许范围在秒级以内,本方案终端电波钟也遵循此国标要求并通过检测。机芯晶振在常温下日漂移约 ±0.5 s,每天凌晨自动接收授时信号校正走时,使秒针校准偏差始终维持在允许的公差范围内。因此,即使在外部网络授时短时中断的情况下(数小时到数天),终端退回石英 RTC 计时模式后累计漂移也仅为数秒量级,一旦信号恢复即可纠偏。

此外,在电磁环境和天气较好时, WBC-E16A 电波钟终端本身仍可能直接接收到国家授时台 BPC 信号,结合终端电波钟每天定时尝试收时,各钟之间的相对误差仍可控制在考试场景可接受范围内。可视为上游链路的一种自然冗余。

从系统方案取舍看,与在室内布置 GPS/北斗再辐射器或整体替换为网络时钟 + LED/LCD 大屏相比,本地 BPC 局域补盲的优势在于:一是充分复用已大规模部署的机械电波钟终端,仅在弱电回路增设低功率发射器即可完成升级,施工扰动小、功耗和带宽需求低;二是不依赖屋顶天线和大规模土建,便于在存量校园中渐进式铺开。其局限在于单节点覆盖半径约为一间教室或单层空间,需要通过多节点协同覆盖整栋教学楼,因此更适合作为现有 BPC 体系的“保障性补盲或升级”,而不是跨楼宇统一授时的唯一手段。

为在更大尺度上评估本方案的工程适用性,对截至投稿时已按“Life-Time+局域 BPC”方案完成升级并稳定运行的 WBC-E16A 考场钟及其配套发射装置进行了全国范围的交付情况统计(表 9)。统计表明,方案已在 22 个省级行政区的 136 所学校/考点项目中落地应用,累计交付终端约 7 848 台,对应合同数 214 份。其中陕西、四川、山西、青海、河北和重庆等地部署规模较大,例如陕西

14 个项目共安装约 2 455 台终端,四川 19 个项目约 1 002 台终端,其余地区合计约 50 个项目、2 108 台终端。可认为,该方案已从局部试点场景演进为覆盖多地区、多校型标准化考场的持续性工程应用基础。

表 9 WBC-E16A Life-Time 部分地区部署情况统计

Table 9 Deployment of WBC-E16A life-time exam clocks in selected regions				
省份/地区	项目数	钟表数量	首批投运年份	最近升级年份
陕西	14	2 455	2020	2025
四川	19	1 002	2020	2025
山西	21	659	2020	2025
青海	11	638	2020	2025
河北	8	514	2020	2024
重庆	13	472	2020	2025
其他地区	50	2 108	2020	2025
合计	136	7 848	2020	2025

注:1)“项目数”相当于学校/考点数量;2)“其他地区”合并了北京、湖北、山东、湖南、辽宁、黑龙江、广东、广西、内蒙古、宁夏、河南、安徽、吉林、江西、浙江、云南等 16 个省区;3)WBC-E16A 是 2012 年起定型的产品,时间列反映的是“Life-Time+局域 BPC”技术初次投入项目的投运年份及最近一次升级年份,早期规模较小且记录不完整原型验证项目未纳入统计

从项目维度看,在上述 136 个项目中,有 39 个项目在统计期内签订了两份及以上合同,占项目总数的约 28.7%;这些“多次采购项目”累计安装终端约 4 991 台,占总体装机量的约 63.6%(表 10)。

表 10 局域授时方案的项目分布情况(统计截至 2025 年)

Table 10 Project distribution of the life-time BPC local time-synchronization scheme (up to 2025)				
类别	项目数	占全部项目比/%	终端数	占全部数量比/%
多次采购项目 (≥2 份合同)	39	28.7	4 991	63.6
单次采购项目	97	71.3	2 857	36.4
合计	136	100	7 848	100

以重复采购作为工程侧“满意度”的间接指标,可认为不少早期用户在经历一个或多个考试季的运行验证后,仍选择继续扩容并沿用本文方案,说明其在解决授时盲区 and 电池维护负担方面的效果已得到实际使用部门的认可。

在上述边界条件以及实测功耗和全国部署统计的支撑下,可以认为采用 2S4P 低自放电碱性/物联网级 AA 电池模组的 WBC-E16A 电波钟与微型本地授时发射器组合,在典型标准化考场环境中能够在工程上实现“≥5 年免更换电池”生命周期供电目标;结合后端的人工巡检或 AI 视觉读钟远程巡检机制,可将日常人工维护频度压缩到较低水平。

4 结 论

面向标准化考场钟表同步需求,提出并实现一种“局

域 BPC 补盲+生命周期供电”的机械电波钟方案。得到如下结论。

1)在终端侧,将 WBC-E16A 标准化考场自动校时同步时钟改造为 2S4P 低自放电 AA 电池模组供电,并结合小电流恒阻放电与 200 d 实机日耗测试,建立了功耗与寿命模型。在以 $\geq 2.2\text{ V}$ 为有效工作区间、日耗按 $20\text{ mWh}\cdot\text{d}^{-1}$ 保守建模时,南孚物联网电池可为单只钟表提供约 5 年的免维护运行窗口,满足考场“生命周期供电、免维护”的目标。

2)在授时侧,设计了 USB 5 V 供电、整机功耗 $\leq 1.5\text{ W}$ 的微型本地授时发射器,利用磁棒谐振天线在 68.5 kHz 近场重播 BPC 时码。地下屏蔽空间与隔墙实验表明,装置可在无实台信号覆盖环境中,为多只机械电波钟提供稳定授时;在真实教学楼的测试中,未经补盲首周仅约 70%终端能自动校时,引入本装置并排除个别供电与配网故障后,后续各周终端自动校时成功率稳定在 100%,显著提升复杂建筑授时可靠性。

3)在工程实现上,本文方案保持终端 BPC 机芯与机械指针形态不变,仅在弱电系统侧增设少量低功耗发射节点,即可完成对既有考场钟表系统的升级;在有国家长波授时台地区,可作为室内补盲与弱覆盖区域的保障性方案;在缺乏长波基础设施的地区,可与 GNSS/NTP/PTP 等上游时间源结合,构建局域长波授时网络,为校园和考场提供成本可控、部署友好的统一授时路径。

4)终端状态感知与 AI 视觉巡检。主要聚焦于供电与授时链路本身的鲁棒性,对个别终端出现电池故障或机芯机械卡滞等极端情况,目前仍需要依赖例行巡检来发现。为提高单向授时体系下对终端失步的可感知能力,在实际工程中已开发并试运行一套基于 AI 视觉读钟的远程巡检模块:利用教室(标准化考场巡考系统)既有监控摄像头周期性采集挂钟图像,通过 YOLO 系列目标检测算法模型进行钟面检测和指针读数,将识别出的时间与后台标准时间比对,对异常终端生成告警并上报监控平台,实现走时的异常自动发现。该模块已在部分试点学校与 Life-Time+局域 BPC 方案联合部署,下一步将结合寿命模型和运维策略,在更大规模考场系统中系统评估其长期稳定性和告警有效性。

当前工作仍存在如下局限:1)实验场景主要集中在北京地区的地下空间和典型教学楼,尚需在不同气候带、更复杂建筑形态及极端电磁环境下开展更长期的运行观测;2)终端仍基于传统调幅 BPC 机芯,在强干扰环境中的抗扰性和灵敏度仍受成本与实现复杂度限制;3)系统主要依赖 NTP+BPC 授时链路,多源时间基准(北斗/GPS/PTP 等)协同机制尚未系统评估。后续研究将围绕“多地区长周期实测”“引入多源时间基准实现链路冗余”和“基于 LoRa/FSK 等扩频中间链路与新型抗干扰机

芯的终端架构”展开,以进一步提升系统在更广泛场景中的鲁棒性和推广价值。

综上,方案在不更换既有 BPC 机械挂钟的前提下,通过局域授时发射器、多源授时链路和生命周期供电,为目前大量依赖电波钟的标准化考场提供了一条成本可控、部署温和且鲁棒性较高的升级路径。该研究方案在标准化考场、教学楼及其他对时间同步要求严苛的室内环境中具有明确的可推广价值和工程可行性。

参考文献

- [1] 教育部教育考试院. 考生当日注意事项[EB/OL]. 中国教育网, 2023-06-01[引用日期 2025-08-14]. 可获得: <https://cael.neea.cn/xhtml11/folder/20123/7769-1.htm>.
Ministry of Education, National Education Examinations Authority. Notes for candidates on the exam day[EB/OL]. China Education Examinations Authority, 2023-06-01[cited 2025-08-14]. Available: <https://cael.neea.cn/xhtml11/folder/20123/7769-1.htm>.
- [2] 中国人民大学. 2025 年全国硕士研究生招生考试“1102-中国人民大学”报考点考生须知[EB/OL]. 2024-12-19[引用日期 2025-08-14]. 可获得: <https://pgs.ruc.edu.cn/info/1062/3372.htm>.
Renmin University of China. Instructions for candidates at the “1102-Renmin University of China” test site for the 2025 national postgraduate entrance examination[EB/OL]. 2024-12-19[cited 2025-08-14]. Available: <https://pgs.ruc.edu.cn/info/1062/3372.htm>.
- [3] 中国科学院国家授时中心. 商丘低频时码发播台[EB/OL]. [引用日期 2025-08-14]. 可获得: <https://ntsc.cas.cn/jgsz/tz/sqdpst/>.
National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences. Shangqiu low-frequency time-code transmitting station[EB/OL]. [cited 2025-08-14]. Available: <https://ntsc.cas.cn/jgsz/tz/sqdpst/>.
- [4] 中国科学院. 北京时间从这里发出——国家授时中心蒲城授时部[EB/OL]. 2010-07-16[引用日期 2025-08-14]. 可获得: https://www.cas.cn/kxcb/kpwz/201007/t20100716_2904154.shtml.
Chinese Academy of Sciences. Beijing time is broadcast from here—Pucheng time service division of the National Time Service Center[EB/OL]. 2010-07-16[cited 2025-08-14]. Available: https://www.cas.cn/kxcb/kpwz/201007/t20100716_2904154.shtml.
- [5] 王东宇, 张慧君, 李孝辉, 等. 遮挡环境下的基于 AKF 组合导航定位方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(5): 171-179.
WANG D Y, ZHANG H J, LI X H, et al. Navigation and positioning method based on AKF integrated navigation in occluded environments[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(5): 171-179.
- [6] 瞿智, 张慧清, 陈建元. 基于 UWB 的无线网络精密时钟同步设计[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(6): 86-92.
QU ZH, ZHANG H Q, CHEN J Y. Design of precise clock synchronization for wireless networks based on UWB[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(6): 86-92.
- [7] 徐兴晨, 朱维斌, 黄垚, 等. 一种转台测角系统动态比对信号同步方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(12): 112-119.
XU X CH, ZHU W B, HUANG Y, et al. Signal synchronization method for dynamic comparison of a turntable angle-measurement system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(12): 112-119.
- [8] IEEE Standards Association. IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems (IEEE Std 1588-2019)[S]. New York: IEEE, 2019.
- [9] 张仕奇, 田恒. 基于分数型锁相环的宽带电力线载波通信时钟同步方法[J]. 电子测量技术, 2022, 45(1): 49-55.
ZHANG SH Q, TIAN H. Clock synchronization method for broadband power-line carrier communication based on a fractional-N PLL[J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(1): 49-55.
- [10] International Organization for Standardization. ISO 19235: 2015 Analogue quartz clocks—Timekeeping accuracy[S]. Geneva: ISO, 2015.
- [11] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 38021-2019 指针式石英钟 走时精度[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
Standardization Administration of China. GB/T 38021-2019 analogue quartz clocks with hands—Timekeeping accuracy[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.
- [12] 国家钟表质量监督检验中心. 指针式电波钟机芯检验报告: CH-899 型号[R]. 2011.
National Watch Quality Supervision and Testing Center. Inspection report of radio-controlled clock movement with hands: model CH-899[R]. 2011.
- [13] International Organization for Standardization. ISO 23346: 2020 Radio-controlled clocks—Signal receiving measurement method[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2020.
- [14] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 42826-2023 电波钟 信号接收测试方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
State Administration for Market Regulation,

- Standardization Administration of China. GB/T 42826-2023 radio-controlled clocks—Methods for testing signal reception[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.
- [15] 中华人民共和国工业和信息化部. QB/T 4351-2012 指针式电波手表[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012. Ministry of Industry and Information Technology of The People's Republic of China. QB/T 4351-2012 analogue radio-controlled wristwatches [S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [16] 韩丽英, 张庆东. 基于中国制式(BPC)低频电波授时技术的研究[J]. 科技致富向导, 2012(8): 1-2. HAN L Y, ZHANG Q D. Study on low-frequency time-code service based on Chinese BPC standard [J]. Science & Technology Rich Guide, 2012(8): 1-2.
- [17] LOMBARDI M A, NELSON G K. Enhanced WWVB broadcast format and improved performance [J]. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2014, 17(1): 16-22.
- [18] 戴顺, 罗近涛, 刘海文, 等. 2020年6月21日日环食低频时码信号监测[J]. 时间频率学报, 2021, 44(3): 215-221. DAI SH, LUO J T, LIU H W, et al. Monitoring of low-frequency time-code signals during the annular solar eclipse on 21 June 2020 [J]. Journal of Time and Frequency, 2021, 44(3): 215-221.
- [19] 吴承超. 导航卫星授时信息转低频时码授时信号转发器: CN201320117976.0 [P]. CN203250148U, 2013-10-23. WU CH CH. Repeater converting navigation satellite time-service information into low-frequency time-code time-service signals: CN201320117976.0 [P]. CN203250148U, 2013-10-23.
- [20] 楼亮亮, 金彦亮, 周苗, 等. 物联网节点功耗测量及电池寿命分析[J]. 自动化仪表, 2015, 36(12): 52-55. LOU L L, JIN Y L, ZHOU M, et al. Power consumption measurement and battery life analysis for IoT nodes [J]. Automation Instrumentation, 2015, 36(12): 52-55.
- [21] 王明静. 南孚电池专利战略研究[D]. 北京: 对外经济贸易大学, 2021. WANG M J. Research on patent strategy of Nanfu battery [D]. Beijing: University of International Business and Economics, 2021.
- [22] 陈京才. 磷酸铁锂电池自放电和过放电研究[D]. 广州: 中山大学, 2010. CHEN J C. Study on self-discharge and over-discharge of lithium iron phosphate batteries [D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2010.
- [23] 谢林伟. 关于物联网技术在电池全生命周期管理中的应用研究[J]. 质量与市场, 2012(12): 36-37. XIE L W. Application of IoT technology in full life-cycle management of batteries [J]. Quality and Market, 2012(12): 36-37.
- [24] 龚心沅. 无线音频系统的线路布设及其实用性[J]. 中国电化教育, 1996(7): 30-33. GONG X Y. Wiring layout and practicality of wireless audio systems [J]. China Educational Technology, 1996(7): 30-33.
- [25] FERRARI F, ZIMMERLING M, THIELE L, et al. Efficient network flooding and time synchronization based on Glossy [C]. Proceedings of the 10th International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN), 2011: 73-84.
- [26] 工业和信息化部. 微功率短距离无线电发射设备目录和技术要求[EB/OL]. 2019-11-28. Ministry of Industry and Information Technology. Catalogue and technical requirements for micro-power short-range radio transmitting equipment [EB/OL]. 2019-11-28.
- [27] Energizer Brands LLC. Alkaline manganese dioxide handbook and application manual [EB/OL]. 2018. Available: http://data.energizer.com/PDFs/alkaline_appman.pdf.
- [28] LV S, WANG X, LU W, et al. Influence of temperature on the capacity of lithium-ion batteries with different anodes[J]. Energies, 2022, 15(1): 60.
- [29] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 20408-2016 指针式电波钟[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. GB/T 20408-2016 analogue radio-controlled clocks with hands [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.

作者简介



惠登峰(通信作者), 2005年于北方工业大学获得自动化工学学士学位, 2013年于中央财经大学获得国际工商管理硕士学位, 现为马来西亚博特莱大学(UPM)教育技术博士研究生。担任北京洪威先创科技股份有限公司董事长、总工程师, 北京洪威

考场会场安全技术防范研究实验室(BWSL)首席研究员, 研究方向为教育技术、考试安全、探测/检测装置、无线电数字语音通信与信号阻断、时码通信与授时工程、物联网低功耗系统工程、教育公平、人工智能与跨国组织管理。

E-mail: jh@bwt-co.com

Hui Dengfeng (Corresponding author) received his B. Sc. degree in Automation from North China University of Technology in 2005 and his M. Sc. degree in International Business Administration from the Central University of Finance and

Economics in 2013. He is currently an Ed. T Ph. D. at the Faculty of Computer Science and Information Technology, Universiti Putra Malaysia (UPM). He serves as the chairman and chief engineer of Beijing Wholeway Centron Technology Co., Ltd., and the chief researcher at the Beijing Wholeway Examination and Venue Security Technology Laboratory (BWSL). His main research interests include educational technology, examination security, detection devices, digital voice radio communication and signal jamming, time-code communication and timing engineering, low-power IoT systems, educational equity, artificial intelligence, and transnational organizational management.



拿督 Dato' Prof. Dr. Shamala K. Subramaniam, 马来西亚博特莱大学 (Universiti Putra Malaysia, UPM) 计算机科学与信息技术学院教授、院长。先后在马来西亚博特拉大学获得学士、硕士和博士学位。长期从事教学与科研工作, 主要研究方向为计算机网络、并行与分布式计算、无线通信与网络工程等。

E-mail: shamala_ks@upm.edu.my

Dato' Prof. Dr. Shamala K. Subramaniam is a professor and the dean of the Faculty of Computer Science and Information Technology at Universiti Putra Malaysia (UPM). She received her B. Sc., M. Sc., and Ph. D. degrees from Universiti Putra Malaysia. She has been engaged in long-term teaching and research at the faculty, and her main research interests include computer networks, parallel and distributed computing, and wireless communications and network engineering.



Assoc. Professor Ts. Dr. Lili Nurliyana binti Abdullah, 马来西亚博特莱大学 (UPM) 计算机科学与信息技术学院多媒体系副教授。先后在马来西亚博特莱大学获得计算机科学文凭和计算机科学学士学位, 在英国谢菲尔德大学获得遥传工程硕士学位, 在马来西亚国民大学获得信息科学博士学位, 为马来西亚专业技术人员理事会 (MBOT) 注册 Graduate Technologist (GS)。主要研究方向为多媒体计算、图像与视频处理、计算机视觉、人机交互、计算机游戏与虚拟现实、计算机与多媒体安全等。

E-mail: liyana@upm.edu.my

Assoc. Professor Ts. Dr. Lili Nurliyana binti Abdullah is an associate professor in the Department of Multimedia at the Faculty of Computer Science and Information Technology, Universiti Putra Malaysia (UPM). She holds a Diploma in Computer Science and a Bachelor of Computer Science from UPM, an M. Eng. in Telematics from the University of Sheffield, UK, and a Ph. D. in Information Science from Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM). She is currently a registered Graduate Technologist (GS) with the Malaysia Board of Technologists (MBOT). Her main research interests include

multimedia computing, image and video processing, computer vision, human-computer interaction, computer games and virtual reality, as well as security in computing.



Associate Professor Dr. Abdullah bin Muhammed, 马来西亚博特莱大学 (UPM) 计算机科学与信息技术学院副教授, 研究生副院长。长期从事计算机与信息技术领域科研工作, 主要研究方向包括计算任务调度、启发式优化算法、云计算、智能系统、并行与分布式计算、无线通信与网络工程等。

E-mail: abdullah@upm.edu.my

Associate Professor Dr. Abdullah bin Muhammed received his B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees in computer science related fields. He is currently an associate professor and the Deputy Dean (Graduate Studies) at the Faculty of Computer Science and Information Technology, Universiti Putra Malaysia (UPM). His main research interests include computing task scheduling, heuristic optimization, cloud computing, intelligent systems, parallel and distributed computing, wireless communications, and network engineering.



刘红妍, 2005 年于辽宁科技大学自动化专业取得工学学士学位, 现担任北京洪威先创科技股份有限公司总经理、工程师, 研究方向为电子信息类、通信与信息系统、信号与信息处理等。

E-mail: ly@bwt-co.com

Liu Hongyan received her B. Sc. degree of Engineering in Automation from the University of Science and Technology Liaoning in 2005. She is currently the general manager of Beijing Wholeway Centron Technology Co., Ltd., and is an engineer with a background in electronic and information engineering. Her main research interests include electronic information systems, communication and information systems, and signal and information processing.



王森, 2003 年于北京师范大学获学士学位, 现任北京师范大学亚太实验学校信息与科技中心主任。主要研究方向为信息技术教育与科技创新实践、教育技术与计算机应用、系统工程集成、人工智能网络、低频授时与近场耦合等。

E-mail: wm20100@bnuaps.net

Wang Miao received the B. Sc. degree from Beijing Normal University in 2003. He is currently the director of the Information and Technology Center at Beijing Normal University Asia-Pacific Experimental School. His main research interests include information technology education and technological innovation practice, educational technology and computer applications, system engineering integration, artificial intelligence networks, low-frequency time synchronization and near-field coupling.