

# 基于双芯智能电表的时钟电池容量 监测应用设计

张本松<sup>1</sup>, 吴昊文<sup>1</sup>, 何恒靖<sup>1</sup>, 刘 林<sup>1</sup>, 陈爱华<sup>2</sup>, 乔舒雅<sup>2</sup>

(1. 南方电网数字电网研究院有限公司, 广东 广州 510700; 2. 浙江正泰仪器仪表有限责任公司, 浙江 杭州 310052)

**摘 要:** 智能电能表时钟电池能够在掉电状态下为表内时钟芯片提供电源, 而时钟电池过早欠压是近年来电表常见故障之一。为此, 通过对电表电池的恒温退化数据进行分析, 提出一种对表内电池进行电量检验与预测的经验方法, 并以国产带操作系统的新型双芯智能电表为基础, 设计一个进行表内时钟电池在线电量监测的管理芯操作系统应用。此应用对时钟电池电量进行定期检测, 给出近似的电池寿命预计, 并上报异常情况。通过实验分析表明, 该应用可有效地对电池容量进行监控。

**关 键 词:** 双芯智能表; 智能表应用; 时钟电池; 退化数据

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.02.027 中图分类号: TM933 文章编号: 1673-9140(2023)02-0240-08

## Application design of clock battery capacity monitoring based on dual core smart meter

ZHANG Bensong<sup>1</sup>, WU Haowen<sup>1</sup>, HE Hengjing<sup>1</sup>, LIU Lin<sup>1</sup>, CHEN Aihua<sup>2</sup>, QIAO Shuya<sup>2</sup>

(1. Digital Grid Research Institute, CSG, Guangzhou 510700, China; 2. Zhejiang Chint Instrument & Meter Co., Ltd., Hangzhou 310052, China)

**Abstract:** The smart meter clock battery can provide power for the clock chip in the meter during the power down state, and premature undervoltage of the clock battery is one of the common faults of the meter in recent years. To this end, through the analysis of the constant temperature degradation data of the clock battery, an empirical method to test and predict the battery power in the meter is proposed. Then, based on the domestic new dual-core smart meter with operating system, a management core operating system application is design for on-line power monitoring of the clock battery in the meter. This application regularly detects the battery power of the clock, gives an approximate battery life estimate, and reports abnormal conditions. The experimental analysis shows that the application can effectively monitor the battery capacity.

**Key words:** double-chip electric energy meter; smart meter application; clock battery; degenerated data

随着中国电网智能化的发展, 智能电能表已经广泛应用在电网内部的用电管理系统中。在智能电能表运行过程中, 时钟电池欠压成为一个常见故障, 其影响停电时电表的状态显示和现场抄表, 可能导

致电表时钟错误, 并进一步影响分时电量和阶梯电价结算, 使得电表冻结数据及各类事件出现错误。国内研究人员对这一故障现象进行了研究, 并总结了导致电池欠压的一些原因<sup>[1-6]</sup>; 各电能表厂家也对

收稿日期: 2021-04-28; 修回日期: 2021-11-05

基金项目: 中国南方电网有限责任公司科技项目(670000KK52200011)

通信作者: 陈爱华(1979—), 男, 工程师, 主要从事电能表设计与可靠性研究; E-mail: chenah@chint.com

这一现象进行了研究,并通过软件尽量弱化电池欠压带来的影响,也可在现场更换电池,但这一故障始终存在。电能表厂家一般仅监测日常时钟电池的电压,通常仅能发现电池欠压、容量耗尽的情况,这对电池的管理带来了不便。此外,国内当前的智能电能表通用技术规范对电表寿命要求有较大提升<sup>[7]</sup>,这对电表器件的可靠性提出了更高要求,因此,对电表常见故障部件(包括时钟电池)进行自监测非常必要。

电表时钟电池通常采用一次性锂亚电池。锂亚电池在初期微小电流放电的情况下具有较稳定的放电电压,仅从电压的变化预测其容量较为困难。锂亚电池受放电电流、工作温度影响较大,检测其容量需要定时运行的检测方法,传统智能电能表没有运行操作系统,可扩展性弱,在其内部添加电池自监测功能较为困难。国内新一代电表为了满足电表IR46标准<sup>[8-11]</sup>,将法制计量部分和非法制功能分离,分别作为计量芯和管理芯,计量芯负责正常的法制计量与显示,保证高可靠性;管理芯则负责事件记录及数据存储等管理方面的业务。部分新一代电表管理芯运行嵌入式操作系统,应用可扩展升级,使得电能表的软件可扩展能力大大增强。通过管理芯内附加软件应用,可以提升电能表的自监测功能以及外部能效监测功能。

电池容量的监测方法主要包括基于经验和性能的方法<sup>[12]</sup>。基于经验的方法包括电压监测、电流积分法等,基于性能的方法有基于退化数据模型、电池机理预测、电池关键特征以及电池数据驱动的方法<sup>[12-16]</sup>。目前锂亚电池寿命预测研究较少,除大多数厂家的电压监测方法外,文献[13]通过模拟智能电能表电池的应用场景,采用加速测试及半经验方法建立电池的寿命预测模型,为预测智能电能表电池的使用寿命提供参考依据;文献[14]利用加速寿命试验提出一个经验模型,用于对不同温度存储后的电池进行寿命预测;文献[15]利用Adaboost算法对传统的预测模型进行改进,建立了智能电能表内置电池容量预测模型;文献[16]通过测量不同放电深度脉冲电压的变化值并进行数据模拟,建立了脉冲电压与剩余电量的数学模型,从而判断电池剩余电量。由于电能表运行时仅方便获取电池电压和电流数据,电能表内部CPU运算能力一般,故特征和模

型的方法大多不适于在线实时监测。此外,由于微小电流较难持续测量,基于电流积分法进行放电容量实时监测较为困难。因此,本文结合经验和数据驱动方法,通过对较大电流放电时电池恒温退化电压数据进行分析,提出一种基于退化电压数据进行近似电池电量监测的方法,并以电能表管理芯应用的形式运行,实现对电池容量和状态的在线监测。

本文通过锂亚电池放电实验发现,锂亚电池较大电流放电退化曲线分为2个阶段:前期电压下降缓慢,近似线性缓慢下降;后期放电退化曲线的电压变化近似以指数递增。根据锂亚电池较大电流退化曲线的特点,本文设计一种基于电池常温退化数据的电池电压检测与电量预测方法。同时,基于新一代电能表的应用可扩展性,设计运行在双芯电能表管理芯上的一个应用,通过对计量芯采集的数据进行分析,实现对表内时钟电池的电量监测,不影响电能表的正常运行。

## 1 背景技术

### 1.1 双芯智能电能表

随着能源管理与技术的发展,现有智能电能表的功能和结构已经不能满足技术发展的需求。IR46标准要求电能表计量功能和其他功能分离,非法制部分软件不影响法制部分的功能<sup>[8-10]</sup>。基于这种要求,国内部分新一代电能表开始采用基于操作系统的双芯电能表结构,包含管理芯和计量芯。电能表计量芯是具有独立功能的电能表法制单元模块,提供电能量相关参变量的测量、计量、冻结、存储以及显示等功能;管理芯是具有独立功能的电能表非法制单元模块,内含嵌入式实时操作系统,并提供硬件以及软件应用接口的专有平台,主要实现电能表通讯和管理。

电能表管理芯软件系统包括内核层、中间层与应用层。内核层为操作系统层,实现硬件资源管理、进程管理与调度、消息队列等核心功能。中间层为简化应用层的设计而添加,实现抄表通信、计量通信管理、平台管理的接口函数,同时提供各种公用程序库,如各种算法库。应用层运行针对电能表管理的应用,最简单的应用即为一个程序函数。

操作系统大大加强了系统的扩展能力和管理芯边缘计算属性。常见电能表的电能质量和负荷分类监测模块可以通过一个管理芯应用实现,本文通过设计一个应用进行表内时钟电池的监测。

## 1.2 锂亚电池及容量监测

目前,碳包式锂亚硫酰氯(Li/SOCl<sub>2</sub>)电池被广泛应用在智能电能表中,其为实际应用电池系列中能量比最高的一种电池,主要特点<sup>[1-6,11]</sup>如下。

1) 电池放电电量较小。小电流放电时电压稳定,智能表外部供电时的电池功耗一般在10 μA以下的情况下产生,寿命最长可达10余年。

2) 存在电池钝化现象。当电池存放一段时间后,由于氧化膜的形成,使得其初次放电时内阻变大、输出电压降低。但是,氧化膜的形成非常缓慢,使用电池时保持微小电流(一般几 μA)的持续放电可阻止氧化膜的形成,从而阻止钝化的形成。

3) 电池电压受温度影响比较大。相同负载电流情况下电压随温度降低而降低;不同负载情况下电池厂家提供的电池电压随温度变化的曲线如图1所示,可以看出,在相同电流负载下,负载电压随温度变化是近似分段线性变化的。

4) 高温时电池自放电率明显增加,导致电表工作电流范围内对应的容量明显降低。低温对电池在较大放电电流的情况下影响较大,对电能表正常工作时的微小电流放电影响较小。

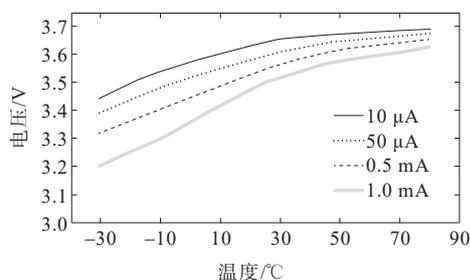


图1 锂亚电池电压和温度的关系

Figure 1 Relationship between voltage and temperature of lithium/thionyl chloride batteries

目前,国内规范对电能表的寿命要求达到15 a以上,较之前的10 a有明显提升,因此,电能表对自身常见故障进行自监测非常必要<sup>[7]</sup>。在智能电能表运行中,时钟电池过早欠压是常见的故障之一,对电能表时钟电池进行监测对于找到电池欠压原因、改善欠压故障有重要意义。

## 2 电池监测试验与分析

### 2.1 恒温放电试验

锂亚电池的特点是放电初期内阻、小电流放电电压变化很小。此外,锂亚电池电压输出和放电容量对温度较为敏感。因此,在常温20 °C情况下,本试验方案中使用电子负载仪器的恒流模式对电池进行放电,放电电流为10 mA,测试时电池的放置方位与实际电能表电池一致,每隔1 h记录一次电池的输出电压。

3个不同品牌的14250型号新电池样品容量随放电时间的变化曲线如图2所示;试验电能表采用某品牌的3只电池放置几个月后的放电曲线,如图3所示,这和厂家提供的曲线是近似的。

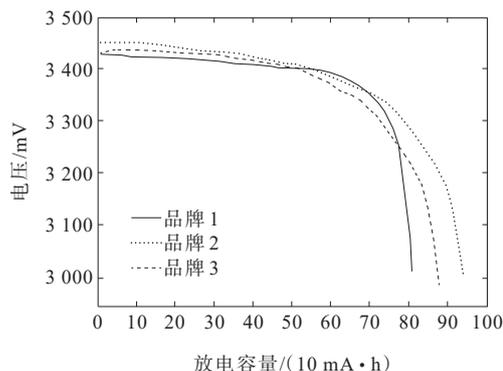


图2 不同品牌时钟电池输出电压随容量的变化

Figure 2 Variation of output voltage with capacity of clock batteries of different brands

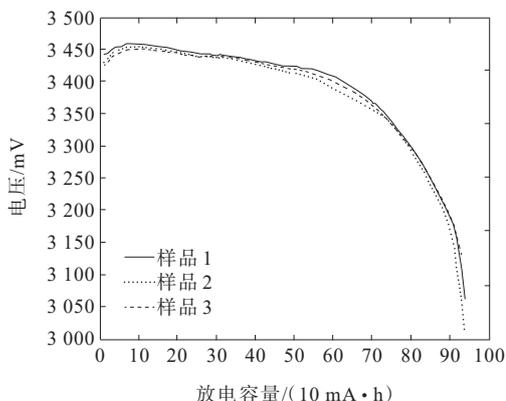


图3 同品牌时钟电池不同放电容量下的输出电压

Figure 3 Output voltage of the same brand clock battery with different discharge capacity

从图 3 可以看出:

1) 新电池钝化现象不明显,不同品牌的样品在恒温放电曲线上有差异,但是都可近似分为 3 个阶段,即第 1 阶段电压比较稳定,变化范围在几 mV 范围内,一般持续 100 mA·h 左右;第 2 阶段电压出现小幅下降,但变化小,总体变化在几十 mV 范围内;第 3 阶段电压迅速下降,下降幅度递增;

2) 存放一段时间的电池存在钝化现象,电池等效内阻在初始阶段较大,导致输出电压先升后降;

3) 通过计算,平均放电超过 300 mA·h 的电池电压出现累计变化,较之初始最大值出现累计 15 mV 以上的变化;

4) 电池电压在放电容量 600 mA·h 左右,电池电压开始加速下降,不同样品差异较大;

5) 电池电压在放电容量超过 800 mA·h 后下降非常快,电池等效内阻急剧增加,电池难以继续支撑 10 mA 的电流放电。

### 2.2 数据分析

根据可靠性理论,电子组件(包括电池)的退化轨迹一般可以利用 3 种线性模型的组合进行有效拟合<sup>[17-18]</sup>,即

$$v_n = a_n + b_n t \tag{1}$$

$$\ln v_n = a_n + b_n t \tag{2}$$

$$\ln v_n = a_n + b_n \ln t \tag{3}$$

式(1)~(3)中  $v_n$  为电池的性能参数指标, $n$  为测试样本数; $t$  为试验时间; $a_n$ 、 $b_n$  为待拟合的未知参数。

从图 3 可以看出,时钟电池放电电压较为复杂,放电初期和中后期的电压变化行为不一致,电池放电初期电压的下降近似和时间成正比,中后期下降幅度迅速加大。因此,电池放电曲线至少为 2 个线性模型以上的组合。

为了消除温度波动和采样误差的影响,本文首先对数据进行滑动平均滤波,然后进行曲线拟合。从电压开始下降至迅速下降位置的电池电压数据经过滤波和指数拟合后的曲线如图 4 所示,放电退化曲线某种程度上相似于加速度变化的平抛运动位移曲线。

该测试样品电恒温放电退化曲线拟合方程为

$$v(t) = ae^{bt} + ce^{dt} \tag{4}$$

其中, $a = -2.125$ , $b = 0.05972$ , $c = 3450$ , $d = -6.72 \times 10^{-5}$ 。由于  $d$  为负的小数,在放电时间内,第 1 项以指数随时间变化,第 2 项是一条随时间变化的直线,如图 5 所示。因此,放电曲线可以表示为式(1)、(2)的拟合。

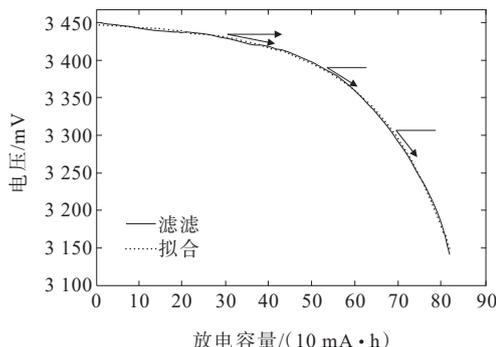


图 4 电池样品 1 放电数据滤波与拟合曲线对比

Figure 4 Comparison of filtering and fitting curves for discharge data of battery sample 1

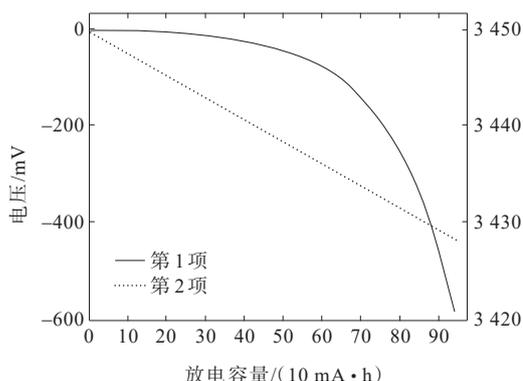


图 5 电池样品 1 拟合项曲线

Figure 5 The curve of battery sample 1 fitting term

从图 4、5 可以看出,电池放电初期电压近似随放电时间呈线性变化,此时,电压变化受方程(4) 2 项的影响,均不能忽略,因此电压的变化较为复杂。电池较大电流放电时中后期电压的变化主要取决于第 1 项的变化。由于第 1 项导致的电压变化随时间占据主导地位,随着放电时间的推移,使得放电曲线某点的切线与水平方向的夹角逐渐增大(图 4)。退化曲线  $v(t)$  在点  $(t, v)$  的切向角为该点导数  $v'(t)$  的反正切值,因此,曲线导数的变化表示电池电压随时间变化的快慢,同时也反映了电池等效内阻随放电时间的变化。

3 个测试样品实际退化电压的差分曲线如图 6

所示,可以看出,电池放电初期电压变化小,实际每 $10\text{ mA}\cdot\text{h}$ 下降一般小于 $1\text{ mV}$ ,温度、采样误差以及钝化效应加剧了电压的非线性变化,当电池放电超过 $600\text{ mA}\cdot\text{h}$ 后,电池电压下降较快。

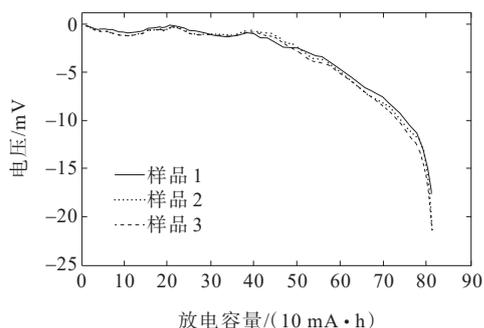


图6 电池样品退化电压的差分曲线

Figure 6 Difference curve of battery samples' degradation voltage data

测试电池放电电压的差分对数值随时间变化的曲线如图7所示,可以看出,电池等效内阻导致的电压变化在放电后期随时间近似为指数变化。实际电池在放电前半段的电压变化较小,变化值存在波动,但是电压近似是线性缓慢下降的。因此,对于电池电量开始阶段的估计,本文以累积下降幅值为基础,而电池放电中后期以近似指数变化为基础进行分析。

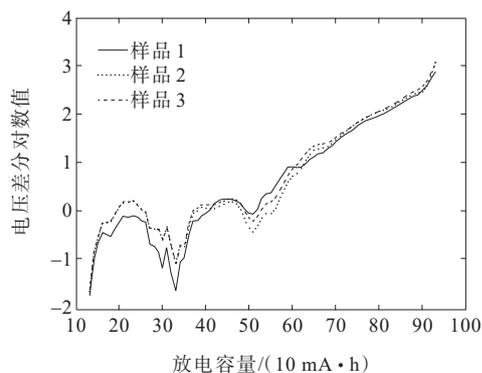


图7 电池退化电压数据差分的对数曲线

Figure 7 Logarithmic curve of the battery degradation voltage data difference

### 3 电池监测方法与应用设计

#### 3.1 监测方法

为了消除电池钝化对测试的影响,需要对电池

进行低功耗持续放电,放电电流既可抵消钝化作用又不至于对电池容量造成明显影响。选取持续放电电流为 $5\text{ }\mu\text{A}$ 左右,年低功耗放电损耗约为 $35\text{ mAh}$ 。此外,根据测试经验,未钝化的电池每次较大电流放电需要几分钟才会稳定。为了测试时电池电压快速稳定,每次测试时先采用 $20\text{ mA}$ 放电 $30\text{ s}$ ,然后切换到 $10\text{ mA}$ 放电 $5\text{ min}$ ,并在 $10\text{ mA}$ 放电末期进行电压采样,这会造成年测试耗电约为 $0.2\text{ mA}\cdot\text{h}$ 。根据本文测试的电池电压—温度曲线,设计电表时钟电池容量监测方法。

1) 在电池未出现异常放电的情况下,根据电能表所在地区气候环境,在春秋季节间隔6个月的2个月内(比如4月初与10月初或3月底与9月底),设定常温 $15\sim 25\text{ }^\circ\text{C}$ 内经常出现的某一温度进行 $10\text{ mA}$ 放电测试。其他月份仅监测小电流电压和异常放电,记录大电流持续时间及异常损耗容量。

2) 考虑年测试耗电( $0.2\text{ mA}\cdot\text{h}$ )、年低功耗放电损耗( $35\text{ mA}\cdot\text{h}$ )、电池年自放电损耗( $1\%$ )等造成的功耗,测试用时钟电池年耗电量小于 $50\text{ mA}\cdot\text{h}$ 。由于停电极少,理论上满足 $15\text{ a}$ 电量要求。因此,测试对比的时间窗口定为半年是合理的。初始阶段,通过出厂测试进行时钟电池年耗电量估计。当后续电压相对初始阶段电压平均值 $v_0$ 出现大于阈值 $v_{th}$ (为大量样本测试均值,本文多样本测试值为 $15\text{ mV}$ )的下降幅度时,即认为电池电压放电约为 $P_{e1}$ (本文采用多样本测试均值 $350\text{ mA}\cdot\text{h}$ ),记录该点为 $v_{e1}$ ,并计算从 $v_0$ 开始每半年的平均电压下降幅度,假定为 $v_{ref}$ 。然后计算年度近似耗电量,并进行电池的近似寿命预测。 $10\text{ mA}$ 放电测试直至时钟电池电压阈值 $v_{th10}$ 为止,后续监测小电流放电电压至阈值 $v_{th1}$ 为止。

3) 当连续2次下降幅度均超过 $2v_{ref}$ ,并且出现明显电压递增(本文选取电压大于 $3\text{ mV}$ )时,则认为电池等效电阻进入快速下降阶段,记录此时的电压为 $v_{e2}$ ,也就是说电池放电在 $P_{e2}$ (文中采用多样本测试均值 $600\text{ mA}\cdot\text{h}$ )以上。根据文2.2中的分析,放电后期电池电压的变化随放电时间近似成指数变化,假定此时连续2个时间窗口的电压变化均值为 $D_n$ 、 $D_{n+1}$ ,则

$$\ln D_{n+2} = 2 \ln D_{n+1} - \ln D_n \quad (5)$$

利用式(5)可以对电池电压  $v_{k2}$  放电至阈值  $v_{th10}$  的时间进行估计,并逐次依据实际数据进行修正。

4) 当 10 mA 截止电压  $v_{th10}$  到达时,电池放电约超过 800 mA·h,大多在 900 mA·h 左右,相对于平常 1 mA 的应用,仍然有 200 mA·h 以上的电量。此时根据年平均耗电量进行剩余寿命预测,并给出更换电池预警。此外,继续进行小电流电池电压监测,当低于 1 mA 电压告警阈值  $v_{th1}$  时,给出时钟电压欠压提示。

### 3.2 计量芯电压监测硬件设计

根据上文监测方法,进行电池电压监测时涉及 2 点:① 电能表计量芯要进行异常放电监测,以防软硬件设计等方面导致的漏电现象发生,并记录大电流漏电电量;② 定期测试时电池电压以恒温恒流方式放电。时钟电池平常消耗电流很小<sup>[4]</sup>,本文的监测方案由电池电压采集电路、压控恒流放电电路、异常放电监测电路组成,如图 8 所示。

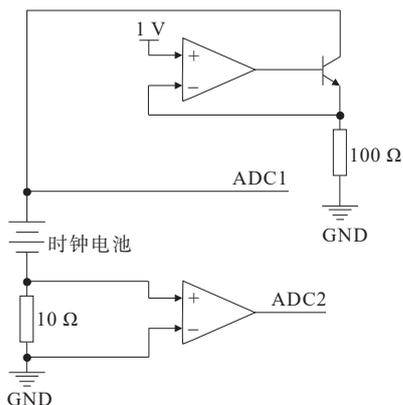


图 8 计量芯电池监测电路

Figure 8 Schematic diagram of clock battery monitoring circuit

表内温度基于电能表计量芯自带温度传感器进行采集。压控恒流放电电路控制恒流放电,结合电池电压采集电路进行恒温恒流电池电压数据的采集。异常放电监测电路进行异常放电的监测,当非停电状态电流过大,超过设定电压阈值,进行异常报警,并记录损耗电量。

### 3.3 管理芯部分应用设计

本文的应用在管理芯上作为内部操作系统的扩展 APP 运行,通过管理芯操作系统的计量管

理服务与计量芯通信。应用随管理芯操作系统上电启动,运行流程设计如图 9 所示。

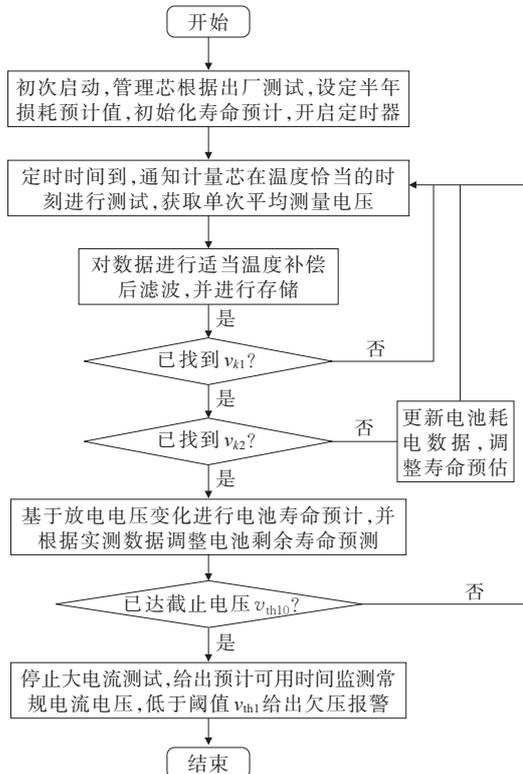


图 9 管理芯时钟电池监测应用流程

Figure 9 Clock battery monitoring application flow chart

初次启动,应用根据出厂数据进行初始化,以出厂测试功耗数据进行寿命预估;然后,根据选定的测试周期,根据温度情况择时通知计量芯进行电池放电测试。测试数据经过整理,存储在非易失存储器中。接着,应用根据电池电压的变化寻找 2 个关键点  $v_{k1}$ 、 $v_{k2}$ ,并按照所述方法在不同阶段采用不同方式进行电量估算。当 10 mA 放电测试电压小于  $v_{th10}$  时,不再进行 10 mA 测试,并利用计算得到的年平均功耗计算电池剩余寿命。同时,监测小电流放电电压。当电池电压放电电压小于  $v_{th1}$  后,电量耗尽,给出电池电压欠压警告信息。

### 3.4 实验室模拟测试验证

测试样品为 3 个电表常用品牌 14250 型号电池各 1 只,测试电表的时钟电池低功耗电流为 4.8  $\mu$ A,估计年耗电量约为 55 mA·h。每放电约 30 mA·h 时进行一次 10 mA 放电电压测试,放电电流为 1~10 mA,放电数值随机。3 只样品电池在几个关键电压节点的预测与测试值对比如表 1 所示。

表1 不同电压值对应的预测与实际放电次数

Table 1 Prediction and actual discharge times corresponding to different voltage values

样品	预测值/实际值		
	$v_{k1}$	$v_{k2}$	$v_{th10}$
1	12/11	12/13	12/12
2	21/20	23/22	22/21
3	28/27	30/31	29/30

样品1 电池 10 mA 放电初始平均电压为 3.430 V, 放电至  $v_{k1}$  以 350 mA·h 计算, 则预估值为 12 次, 实际放电 11 次下降至  $v_{k1}$  为 3.414 V, 实际放电 330 mA·h。从 90 mA·h 开始缓慢下降, 根据第 2 阶段近似线性变化, 估算约 21 次放电至非线性下降区域, 实际上在第 20 次出现明显加速下降。第 19、20 次电压下降幅度分别为 8、11.5 mV,  $v_{k2}$  对应电压为 3.38 V。根据式(5)推算, 约放电 8 次小于阈值  $v_{k10}$  (3 V), 实际放电 7 次。

样品2 电池 10 mA 初始放电电压为 3.453 V, 预估值为 12 次放电至  $v_{k1}$ , 实际放电 13 次下降至  $v_{k1}$  为 3.435 V, 放电电量为 390 mA·h。样品放电从 90 mA 开始缓慢下降, 估算约 23 次放电至非线性下降区域, 实际上在第 22 次出现明显加速下降。第 21、22 次放电下降幅度分别为 9、13 mV, 第 22 次测试电压  $v_{k2}$  为 3.4 V。根据式(5)推算, 约放电 8 次小于阈值  $v_{th10}$  (3 V), 实际放电 9 次。

样品3 与样品2 前期类似, 初始时的电压为 3.440 V, 放电 21 次出现明显的加速, 第 20、21 次电压下降幅度分别为 9.5、13 mV, 预计放电 8 次放电至 3 V, 实际放电 9 次。根据实际电压变化, 结合式(5)可对后期电池剩余工作时间进行修正。

从测试结果看, 文中方法能够近似测量电池的电量, 在一定程度上给出锂亚电池电量的预测, 有助于对电表时钟电池的状态进行较为准确的监测, 在一定程度上弥补现有欠压监测方法的不足。

## 4 结语

国内部分新型电能表采用双芯结构设计、管理芯运行操作系统, 为附加应用设计提供了便利。本

文以电能表常见时钟电池欠压故障为出发点, 首先, 通过对锂亚电池的 10 mA 恒温放电数据进行分析, 基于电池恒温退化曲线, 提出了一种对电池进行在线监测与寿命预估的经验方法; 然后, 以此方法为基础, 对计量芯时钟电池监测电路和管理芯电池监测应用进行设计, 实现了双芯电表内时钟电池的寿命自监测。该应用以试验数据分析为基础, 初步运行效果良好, 将有助于现场排查电池耗电快的主要因素, 有助于后续长寿命电表的可靠性评估。但现场应用时运行情况更为复杂, 其可靠性仍需要检验。

## 参考文献:

- [1] 马永超, 赵伟, 黄松岭. 提高智能电能表可靠性技术研究综述[J]. 电测与仪表, 2022, 59(4): 1-9.  
MA Yongchao, ZHAO Wei, HUANG Songling. Review on techniques for improving the reliability of smart meters[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(4): 1-9.
- [2] 赖国书. 高湿热环境下智能电能表计量误差特性分析[J]. 电测与仪表, 2022, 59(12): 169-177.  
LAI Guoshu. Analysis on metering error characteristics of smart electricity meter under high humidity and heat environment[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(12): 169-177.
- [3] 温文满. 智能电能表电池容量衰减的欠电压故障分析[J]. 技术与市场, 2020, 27(4): 59-64.  
WEN Wenman. Under voltage fault analysis of battery capacity attenuation of smart watt hour meter[J]. Technology and Market, 2020, 27(4): 59-64.
- [4] 曹宏宇, 刘惠颖, 殷鑫, 等. 典型环境下智能电能表可靠性指标体系及指标量化[J]. 电测与仪表, 2021, 58(3): 190-194.  
CAO Hongyu, LIU Huiying, YIN Xin, et al. Reliability index system and quantification of smart meter in typical environment[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(3): 190-194.
- [5] 李涵, 陶鹏, 李翀, 等. 智能电能表时钟电池欠压分析及关键计量指标影响[J]. 河北电力技术, 2018, 37(2): 22-25.  
LI Han, TAO Peng, LI Chong, et al. Low voltage analysis of smart meter clock battery and its influence on key measurement indexes[J]. Hebei Electric Power, 2018, 37(2): 22-25.
- [6] 王保帅, 尹家悦, 胡珊珊, 等. 基于层次分析法和群体决

- 策的智能电能表可靠性分配技术研究[J].电测与仪表,2021,58(12):169-174.
- WANG Baoshuai, YIN Jiayue, HU Shanshan, et al. Research on reliability allocation technology of smart meter based on analytic hierarchy process and group decision-making[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*,2021,58(12):169-174.
- [7] Q/GDW 10827—2020.三相智能电能表技术规范[S]. Q/GDW 10827—2020. Technical specification for poly-phase smart electricity meters[S].
- [8] 王立州,付飞亚,刘亚辉.基于IR46标准的新型智能双芯电表设计[J].自动化仪表,2018,39(5):20-24. WANG Lizhou, FU Feiya, LIU Yahui. Design of the new type of smart dual core electric energy meter based on the IR46 standard[J]. *Process Automation Instrument*,2018,39(5):20-24.
- [9] 王珍,谢永明,曾仕途,等.基于IR46智能电能表软件分离测试方法研究[J].中国新技术新产品,2016(10):6-7. WANG Zhen, XIE Yongmign, ZENG Shitu, et al. Research on software separation test method of intelligent watt hour meter based on IR46[J]. *New Technologies and Products*, 2016(10):6-7.
- [10] 申永鹏,孙嵩楠,赫婷,等.基于数字人民币的智能电表及实时电力交易新模式[J].电力系统保护与控制,2023,51(7):178-187. SHEN Yongpeng, SUN Songnan, HE Ting, et al. Real-time power trading mode based on an e-CNY smart electricity meter[J]. *Power System Protection and Control*,2023,51(7):178-187.
- [11] IEC 60086-4—2007. Primary batteries-Part 4: safety of lithium batteries[S].
- [12] 罗伟林,张立强,吕超,等.锂离子电池寿命预测国外研究现状综述[J].电源学报,2013,45(1):140-144. LUO WeiLin, ZHANG Liqiang, LÜ Chao, et al. Review of life prediction of lithium ion battery abroad[J]. *Journal of Power supply*,20-13,45(1):140-144.
- [13] 李会娜,祝媛,赵瑞,等.智能电表中锂亚硫酰氯电池寿命预测[J].广东化工,2020,41(4):47-48. LI Huina, ZHU Yuan, ZHAO Rui, et al. Life prediction of lithium thionyl chloride battery in smart meter[J]. *Guangdong Chemical Industry*,2020,41(4):47-48.
- [14] CHENG S J, YUAN Z Z, ZHANG F Y, et al. Development of a lifetime prediction model for lithium thionyl chloride batteries based on an accelerated degradation test[J]. *Microelectronics Reliability*,2016,10:274-279.
- [15] 武超飞,吴跃斌,孙冲,等.运行温度对智能电能表内置电池使用寿命影响[J].电源技术,2019,43(9):1505-1508. WU Chaofei, WU Yuebin, SUN Chong, et al. Influence of operating temperature on service life of built-in battery of smart electric energy meter[J]. *Chinese Journal of Power Sources*,2019,43(9):1505-1508.
- [16] 薛阳,浦玉猛,丁黎,等.ER14250电池在智能电能表中电量保持研究[J].电源技术,2018,42(9):1298-1299+1306. XUE Yang, PU Yumeng, DING Li, et al. Study on capacity retention of ER14250 batteries in smart electricity meters [J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2018, 42(9):1298-1299+1306.
- [17] PATRICK P O, ANDRE K. Practical Reliability engineering[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2012: 41-43.
- [18] BIROLINI, ALESSANDRO. Reliability engineering: theory and practice[M]. New York: Springer Publishing Company, Inc., 2017:39-41.