Application of Battery Charge Management and Power Detection of Wearable Devices Based on TP4056 and DS2782*

JIANG Wei[1], LI Chuantao[2], YANG Jishun[3*]
(1.School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2.Aviation Physiological and Psychological Training Team, Naval Medical Center, Shanghai 200433, China;
3.Medical Support Center, Naval Medical Center, Shanghai 200053, China)

Abstract: Lithium battery as a common power supply for wearable devices is widely used. While the safety of battery charging and the difficulty of power prediction affect the safety and performance of devices. Therefore, it is necessary to carry out lithium battery charge management and power detection, so as to improve the safety and performance of battery charging. The lithium battery charge management module based on TP4056 and the battery level detection module based on DS2782 chip are designed, and the hardware design and working principle of the two modules are introduced. Through the hardware circuit design and program design, the TP4056 battery charge management module and DS2782 battery detection module meet the design requirements of wearable devices, which have the advantages of simple circuit and high reliability.

Key words: TP4056; DS2782; charge management; electronic quantities detection; lithium battery
EEACC: 8360 **doi**: 10.3969/j.issn.1005-9490.2026.04.012

基于 TP4056 和 DS2782 的可穿戴设备电池充电管理和电量检测应用研究*

江 炜[1], 李川涛[2], 杨积顺[3*]
(1.上海理工大学健康科学与工程学院, 上海 200093; 2.海军特色医学中心航空生理心理训练队, 上海 200433;
3.海军特色医学中心医疗保障中心, 上海 200053)

摘 要: 锂电池作为常见可穿戴设备电源应用广泛, 然而电池存在的充电安全、电量预估困难等问题影响设备的安全和性能, 因此需要对锂电池进行充电管理和电量检测。设计了基于 TP4056 的锂电池充电管理模块和基于 DS2782 芯片的电池电量检测模块, 介绍了两种模块的硬件设计和工作原理。通过硬件电路设计和程序设计, TP4056 充电管理模块和 DS2782 电池检测模块满足可穿戴设备的设计需求, 具有电路简单、可靠性高等优点。

关键词: TP4056; DS2782; 充电管理; 电量检测; 锂电池
中图分类号: TM932 **文献标识码**: A **文章编号**: 1005-9490(2026)04-0794-05

可穿戴设备在医疗保健、健康监测、行为分析等应用场景中具有重要作用[1-2]。便携式可穿戴设备结构设计紧凑, 给电池预留的空间有限, 为了实现尽可能长时间工作, 需要有效的电源管理[3]。依据锂电池充电时电压电流特性选择合适的充电管理芯片和电路设计, 可以提升设备在充放电时的安全性和延缓电池使用损耗[4]。

此外, 可穿戴设备需要电量检测功能以实现功耗管理和电气安全。电池管理系统(Battery Management System, BMS)通过传感器对电池组的电压、电流、温度进行实时检测, 同时利用算法计算剩余容量、放电功率, 对电池进行均衡管理、热管理, 从而延长电池组使用寿命[5-6]。电量估算算法是 BMS 系统重要组成部分, 西安科技大学团队[7]采用基于麻雀搜索算法优化极限学习机的电池剩余电量(State of Charge, SOC)估计方法, 对 Tent 混沌映射和模拟退火算法中的 Metropolis 准则进行改进, 最后在 0 ℃和 25 ℃的环境下进行验证, 结果表明不同温度下使用改进算法的 SOC 估计误差较传统方法有所降低。但是算法运行需要专用处理芯片, 小型嵌入式设备

项目来源: 国家自然科学基金项目(82101970)
收稿日期: 2023-12-29 **修改日期**: 2024-04-27

算力有限无法满足运行算法所需的硬件资源。

小型嵌入式设备因为体积小,元器件集成度高且算力有限等限制条件,无法运行庞大算法程序,因此有部分研究采用主控芯片的数模转换器(Analog-to-Digital Converter,ADC)进行电压测量进而估算电量。李文清等[8]采用库仑计法,利用锂电池串联精密电阻将电流转换成电压,使用 MSP430 主控芯片对电压进行采集与分析,估算锂电池剩余电量,测量结果显示电池剩余电量与电压的关系曲线与文献中数据相似。曹志鹏等[9]采用开路电压法,利用电池组端电压与电池剩余电量的关系进行电量估算,利用数字信号处理器(Digital Signal Processor,DSP)进行电压检测,使用分段线性拟合算法提高检测精度,测试结果最大误差为 1.23%。利用主控芯片的 ADC 采集电压的估算方法,虽然无需额外检测电路设计,但是没有考虑环境温度、电池放电规律的影响,电池电量在多次估算后会产生误差积累[10]造成测量不准确。因此,为提高电池电量测量准确性,需要将电池特征参数纳入到估算算法中,这会增加处理算法程序复杂性,占用正常功能的运行资源,影响设备运行。独立式电量计是嵌入式设备专用的电量计芯片,芯片中存储了估算算法,并能自动解算出估算结果,利用通信总线传输给主控。本文采用 DS2782 电量监测芯片,该芯片在库仑计数法的基础上引入电池温度、放电电压等电池特征参数进行建模,从而减少库仑计的测量误差,提高了电池电量估算的准确性。

1　系统介绍

本研究以可穿戴脑电采集设备的电池充电管理和电量检测模块作为研究对象,根据可穿戴脑电采集设备研制需求,在脑电采集实验期间对设备电池电量进行估算。如图 1 所示,设备采用 STM32H743 芯片作为主控,电池充电模块采用 TP4056 充电管理芯片[11]为电池充电,电池电量检测模块采用 DS2782 电量检测芯片[12]进行电量估算。硬件电路实物如图 2 所示。设计实现方案主要由充电管理、电量检测、串口通信三部分构成,主控芯片利用 I2C 总线写入电池特征参数以及读取电池电量信息,并通过串口通信传输至上位机显示。

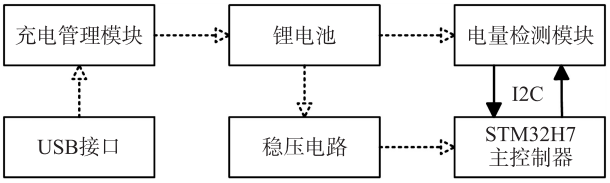


图 1　系统框图

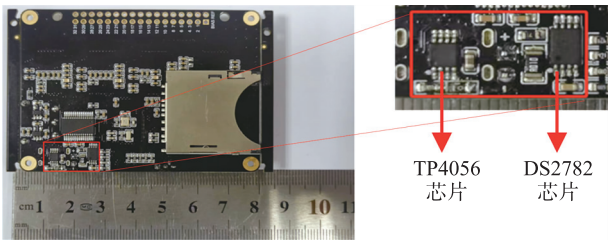


图 2　硬件电路设计图

2　充电管理模块设计

在充电管理模块电路中采用 TP4056 芯片。该芯片外围器件少,具有体积小、充电速率快的特点。芯片采用了内部 PMOSFET 架构,加上防倒充电路,无需增加外部隔离二极管。热反馈可对充电电流进行自动调节,以便在大功率操作或高环境温度条件下对芯片温度加以限制[14-15]。充电电流可设置,设置电流最大为 1 000 mA。TP4056 充电管理芯片外围电路原理如图 3 所示。

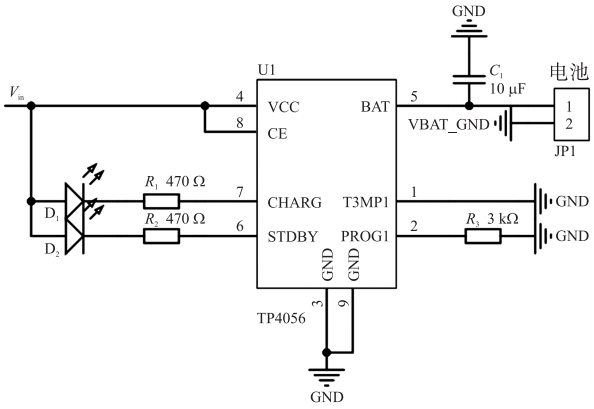


图 3　锂电池充电管理电路原理图

图 3 中,V_{in}作为锂电池充电的 5 V 供电电源端口接入芯片 VCC 端和 CE 使能端,芯片 BAT 作为芯片输出端。红灯 D_1 及其限流电阻 R_1 接入芯片 CHARG 作为电池充电指示灯;蓝灯 D_2 及其限流电阻 R_2 接入芯片 STDBY 作为电池充电完成指示灯。芯片 TEMP 温度检测输入端在本研究中没有得到使用,故接入电源地 GND。芯片 PROG 管脚为可编程充电电流设置端口,电阻 R_{PROG}与充电电流 I_{BAT}关系如式(1)所示,计算得出充电电流 I_{BAT}所需要的外接电阻阻值 R_{PROG},采用 3 kΩ 外接电阻 R_3,设置的恒流充电电流为 400 mA。

$$R_{PROG}=\frac{1\ 200}{I_{BAT}} \tag{1}$$

充电过程中,充电指示灯常亮,在恒流充电阶段,锂电池充电电流保持在 400 mA 左右,充电电压持续

升高,当电压接近 4.2 V 时芯片进入恒压充电阶段,充电电流逐渐减小。充电电流达到最终浮充电压之后降至原来设定值的 1/10 时,TP4056 芯片将自动停止充电,充电指示灯熄灭,充电完成指示灯亮起。

3 电池电量检测模块设计

3.1 电量检测模块

本文采用亚德诺公司的独立式电量计 DS2782 作为锂电池电量检测芯片。该芯片具有检测精度高、使用方便等特点,能够采集电池工作电流、电压以及温度等电量特征参数综合估计电池电量。电池电量检测模块原理如图 4 所示,电池正极接入芯片 VIN,用于检测电池相对于器件地 VSS 引脚的电压。芯片 VDD 通过去耦电容连接电池正极作为芯片电源输入。芯片 SNS 连接电池负极 VBAT_GND,并且作为 10 mΩ 检测电阻 R_1 连接端与芯片 VSS 形成环路用于检测电池电流。芯片 SCL 和 SDA 引脚分别连接主控芯片 VBAT_SCL 和 VBAT_SDA 端口,用于与主控进行通信,读写芯片寄存器数据。

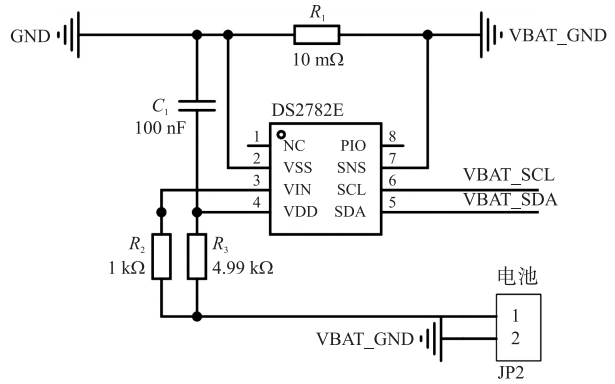


图 4 锂电池电量检测模块原理图

3.2 锂电池应用参数配置

在估算剩余电量时,为了得到合理精度,需要考虑在不同温度下充电过程和放电过程的电池特征参数,比如充电电压、负载电流等应用参数[13,16]。通过主控设置应用参数并加载到芯片存储器 EEPROM 中。本文选择的锂电池特征参数设置表 1 所示。

表 1 锂电池应用参数设置

特征参数设置	数值
检测电阻阻值(RSNSP)/mΩ	10
充电电压(VCHG)/mV	4 200
最小充电电流(IMIN)/mA	80
有效空电压(VAE)/mV	3 200
有效空电流(IAE)/mA	200
老化容量(AC)/mAh	1 000

3.3 电池组特征建模

芯片利用写入储存器中电池应用参数估算电池剩余电量(顶层算法框图见图 5)。DS2782 采用 Fuel-Pack™估算法,通过查找函数检索设置的满电量点(VCHG、IMIN)和空电量点(VAE、IAE)构建分段电量线性模型,分别是满电量模型曲线、工作电量模型曲线和待机电量模型曲线。每条模型曲线根据 0 ℃到 40 ℃间的 5 个温度点(0 ℃、10 ℃、20 ℃、30 ℃、40 ℃)分为 4 条斜率不同的折线。低于 0 ℃时选择 0 ℃到 10 ℃的斜率优化模型精度;当温度超过 40 ℃时斜率设置为 0,对电量进行保守估计。电池从空电量点持续充电到满电量点可实现一个学习周期,调整电池容量 AS 系数,确保库仑计计数在模型曲线边界内。

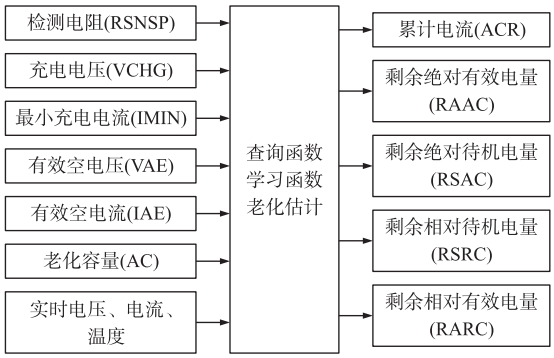


图 5 顶层算法框图

3.4 电池电量检测程序设计

程序设计主要由电量检测模块、USART 串口通信模块构成,主控芯片利用 I2C 总线写入电池特征参数以及读取电池电量等信息,并通过串口传输至上位机显示。设备上电后进入 main( )函数运行,执行系统初始化函数、I2C 与 USART 初始化函数、DS2782 初始化函数。DS2782 初始化函数运行时,通过 I2C 协议将电池特征参数写入芯片 EEPROM 存储器中;DS2782 芯片每隔 440 ms 解算测量结果并产生 5 个结果寄存器值。程序中设计每隔 5 s 读取一次结果寄存器数值,打印并通过 USART 串口发送给上位机。程序运行流程如图 6 所示。

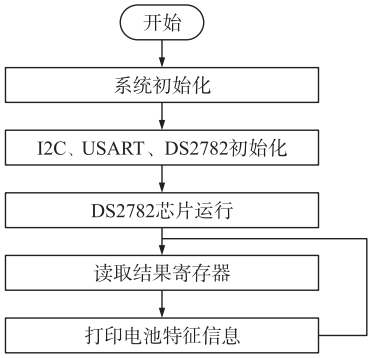


图 6 程序运行流程

4　系统测试

4.1　充电管理模块测试

测试采用一块标称容量 1 000 mAh、标压 3.7 V 的锂电池进行充电测试。在进行充电测试时,采用可调稳压电源进行充电,使用吉时利 DMM6500 六位半数字表外接电池正极和负极(如图 7 所示),测量充电电压。

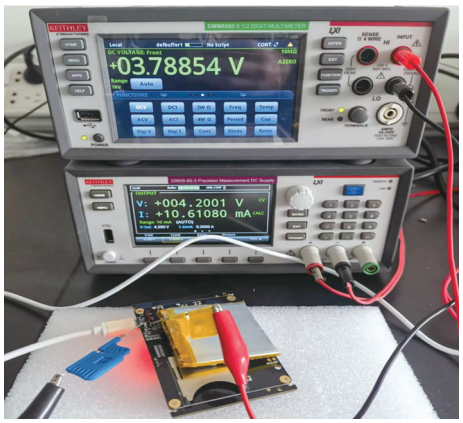


图 7　充电测试

充电测试结果如图 8 所示,电池充电曲线符合 TP4056 芯片恒流-恒压充电特点。在恒流充电过程中,电流从 400 mA 缓慢下降到 300 mA,这是由于芯片内部功率管电路的工作温度过高,芯片自动降低充电电流;电池的端电压阶梯式上升,当上升至 4.16 V 时,芯片开始从恒流充电模式转换成恒压充电模式,充电电压保持不变,充电电流快速降低。当接近 0 mA 时,充电完成指示灯亮起,此时记录的充电电流为 5 mA,低于设定值 400 mA 的 1/10。恒压充电的电压设定值为 4.2 V,与实际电压阈值 4.16 V 存在 40 mV 的误差,这是由于电压测量误差和温度变化造成的。

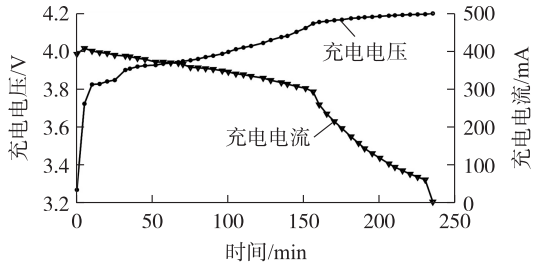


图 8　充电电压和充电电流曲线

4.2　电量检测模块测试

脑电采集设备在空载状态下进行测试,设备的空载恒定电流为 118 mA,平均温度为 32 ℃。设备电池充电完成后连接上位机并开始运行,通过串口传输在上位机显示当前打印的电量信息,直到电量耗尽无法通过串口传输数据为止,记录电压和对应电量数据并绘图。图 9 所示是芯片检测电压与电量的关系曲线。从图中可以看出,关系曲线可以分成 3 段,即 97%~92%,92~6%,6%~0%。在 100%~92%区间内电压下降明显;而 92%~6%区间电压进入缓慢下降阶段,从 6%~0%区间电压急剧下降直到电量为 0,该曲线符合锂电池放电特征。在 97%~92%区间内,电池电压从 4 040 mV 降低到 3 940 mV,电量下降了 4%,在 92%~60%区间,电压从 3 904 mV 下降到 3 780 mV,电量下降了 29%,电池电压与电量并非线性关系。

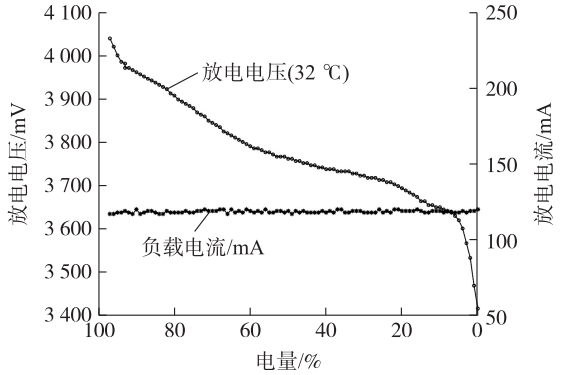


图 9　芯片检测电压与电量的关系曲线

5　结论

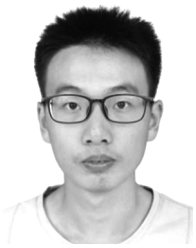
本研究设计的基于 TP4056 的电池充电管理模块设计电路简单,可设置恒流充电的电流大小,满足充电电压处在预设电压±1%的精度要求。恒流-恒压充电在电池充电安全的情况下,实现充电速率最大化。通过实验验证,该电池充电管理模块可实现对电池的安全高效充电。基于 DS2782 的电量检测模块设计,本文给出了典型应用电路的设计方案。实验表明,模块通过库仑计计算电量并根据电池特征参数进行电量校准,减少估算误差,实现了对电量的准确估值。在使用开路电压法和库仑计法进行电量估算时,为估算准确,估算算法往往复杂度高,算法程序冗长,处理过程会占用大量主控资源,影响设备性能。

在本次测试中,根据估算结果绘制了空载情况下的电量电压曲线,可作为开路电压法的电量电压参考曲线。对于电池反复充放电后电池老化情况下电池容量与电压关系没有进行研究。在接下来的实验中,需要对经过多次充放电下独立电量计芯片的估算情况进行探讨。

参考文献:

[1]　王佳昊,闫航,胡鑫,等. 基于可穿戴设备的开放集动

作识别技术研究[J]. 计算机科学,2024,51(4):291-298:1-12.
[2] 陆琨,张松文,储建军,等. 可穿戴心电监测设备的临床应用及评价[J]. 实用心电学杂志,2023,32(6):430-434,438.
[3] 吕冬翔,张晓辉,李钏,等. 适用于可穿戴设备的柔性能源系统研究与设计[J]. 电源技术,2023,47(7):828-833.
[4] 潘发辉. 应用于便携设备中高精度线性锂电池充电管理芯片的研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2022.
[5] 王晓露,谭泽富,代妮娜,等. 电池管理系统均衡技术发展综述[J]. 现代信息科技,2022,6(8):56-59.
[6] 刘军伟,吴刚,石春. 基于可用容量估算和电量增量曲线的安时积分荷电状态估算方法[J]. 仪表技术,2021(3):33-37,43.
[7] 寇发荣,杨天祥,罗希,等. 基于 ISSA-ELM 算法的锂电池 SOC 估计[J]. 电源学报,2025,23(8):246-253,316.
[8] 李文清. 一种基于 MSP430 的锂电池电量检测系统[J]. 中国科技信息,2022(4):92-93.
[9] 曹志鹏,王健. 便携式仪表锂电池充电管理和电量检测的实现[J]. 电子器件,2010,33(1):97-100.
[10] 闫啸宇,周思达,卢宇,等. 锂离子电池容量衰退机理与影响因素[J]. 北京航空航天大学学报,2023,49(6):1402-1413.
[11] 任治,魏丹,曹景胜,等. 基于 GSM 的电动汽车充电控制系统设计与实现[J]. 汽车工程师,2015(8):21-23.
[12] 方莹,陈军峰,吴智正. 基于 DS2782 独立式电量计的动力电池模块化设计[J]. 信息系统工程,2015(10):105-107,109.
[13] 宋彦,马静,秦恩博,等. 聚合物固态电解质的研究进展[J]. 盐湖研究,2024,32(6):94-104.
[14] 宋爽,李福,唐西胜. 锂离子电池安全状态评估研究进展[J]. 储能科学与技术,2023,12(11):3545-3555.
[15] 都文和,徐正,康嘉浩,等. 一种电源管理芯片的高精度过温保护电路设计[J]. 电子科技,2024,37(9):79-86.
[16] 刘海成,徐利民. 可充电电池剩余电量检测可行性方案研究[C]//第六届全国信息获取与处理学术会议,焦作,2008:205-209.



江 炜(1999—),男,硕士研究生,主要研究方向为嵌入式系统开发,数字信号处理与分析;

杨积顺(1982-),男,教授,博士,硕士研究生导师,主要从事海洋生物仿新药新材料设计开发,海军特勤军事作业医疗保障研究以及便携式医疗救护装备研究。

李川涛(1985-),男,生物医学工程博士,助理研究员。主要从事面向医疗应用的深度学习算法,具体涉及计算病例学、人工智能辅助的人体疲劳检测以及生物医学信号处理;