

具备可扩展功率组件的电动汽车电池检测系统

郭重阳 李佳欣 黎承俊 覃祥媚 黄俊豪

桂林电子科技大学机电工程学院，广西桂林，541004；

摘要：动力电池的出厂测试过程冗杂，消耗大量能量，为此本文设计了一套具备可扩展功率组件的检测系统。该系统采用模块化架构，负载模拟模块输出的电能通过由并网逆变器组成的馈能单元实现电能回馈，储能单元协同调节系统的能量平衡。实际测试表明，系统在范围内稳定工作，有效降低了能量损耗。

关键词：电动汽车电池；电子负载；能量回馈；可扩展功率；模块化

DOI：10.69979/3041-0673.26.02.036

引言

近年来，全球新能源汽车产业呈现快速发展态势，在此背景下，动力电池作为车辆核心组成部件，其性能水平直接决定车辆的续航里程、安全性能与使用寿命。传统电池检测设备多采用固定功率电阻作为负载，该方式存在功率参数不可调节、能量损耗显著的局限性。针对这一问题，本课题开展了功率组件可扩展式电池检测系统的研究与设计工作。该系统通过模块化设计实现功率灵活扩展，并结合智能控制算法实现能量回馈功能，可有效降低能量损耗、提升系统运行稳定性，从而能够达到精准评估电池在复杂工况下的性能表现及检查器是否有安全隐患的目的。

1 系统结构

本设计主要由负载模拟模块、馈能并网模块、储能模块、人机交互四部分构成，系统结构框图如图 1 所示。图中粗箭头为功率流的传输方向，细箭头表示信号流传输方向。

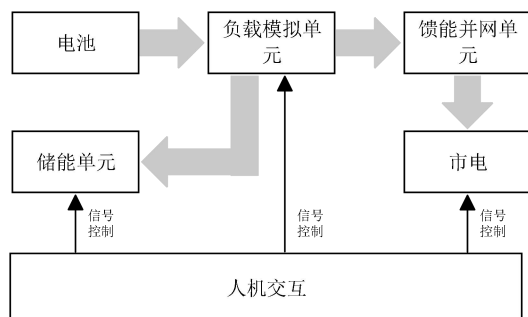


图 1 系统结构框图

电池作为能量源，向负载模拟单元输出电能，负载模拟单元模拟实际用电负载的特性。负载模拟单元的能量，一部分传递至馈能并网单元，将其回馈给电网。另

一部分，被存储在储能单元，在需要时向负载侧释放能量，调节系统能量平衡。

2 负载模拟单元

2.1 信号采集

2.1.1 输入电压信号采集

在电压信号采集中，为实现对输入电压的精准测量，需首先确保信号幅值处于单片机的有效检测范围内。因此，采用 GS8552 专用运算放大器构建高性能差分放大电路，通过科学配置电路中的反馈电阻参数，实现对输入电压信号的精确衰减，具体而言，通过合理选取反馈电阻与输入电阻的阻值比例，将原始输入电压信号的幅值按比例缩小 10 倍，从而匹配单片机的 ADC 模块输入范围，避免因信号过载导致的测量失真。

该差分电路结构并非简单的信号衰减组件，其核心优势在于卓越的共模干扰抑制能力。GS8552 芯片本身具备极高的共模抑制比，配合差分电路的对称拓扑设计，能够有效抵消两输入端的共模干扰信号，从而最大限度剔除噪声干扰。

通过这一电路方案，系统能够在复杂工况下稳定维持高测量精度，该差分电路的具体拓扑结构可参考图 2。

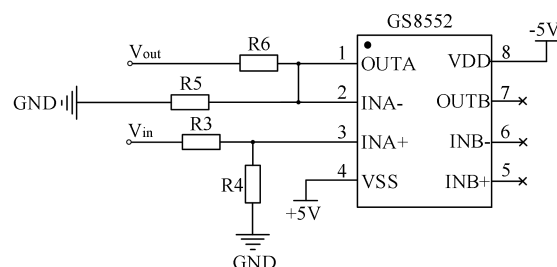


图 2 差分结构电路图

增益公式如下：

$$V_{out} = \frac{R_6 + R_5}{R_5} \times \frac{R_4}{R_3 + R_4} \quad (1)$$

2.1.2 输入电流信号采集

输入电流与电压采样原理相似，电流采样采用运放同相放大电路，通过配置反馈电阻将检流电阻的微弱电压放大 50 倍，满足单片机 ADC 直接采集需求。电路结构如图 3 所示。

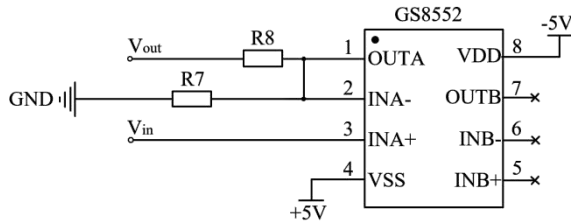


图 3 运放同相放大电路

增益计算公式如下：

$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_8}{R_7}\right) \cdot V_{in} \quad (2)$$

2.2 负载工作模式

电子负载恒流模式是最基本、最基础的一种工作方式。当电子负载工作在恒流模式下，被测电源电压不变，而电流可改变。利用 MOS 管的可变电阻区，该区域内其栅极电压变化时，漏源电阻 R_{ds} 相应变化，且输入电流不随输入电压改变。如图 2-4 所示，电路中 R_{10} 为 MOS 管 (75N75) 栅极电阻， R_9 为检流电阻，Q1 为 P 沟道功率 MOS 管；其工作原理为：运放正输入端接入参考电压 V_{ref} 时，负输入端初始无反馈电压，正输入端电压高于负输入端，运放输出电压经使 Q1 进入 R_{10} 线性工作区，此时 Q1 等效为特定阻值电阻，输入电压回路形成电流， R_9 产生的电压反馈至运放负输入端，导致正、负输入端电压差值减小，运放输出电压降低并使 Q1 等效电阻增大，直至 V_{ref} 与 R_9 反馈电压相等，运放输出电压稳定、Q1 等效电阻恒定，输入电压回路进入恒流状态。此时输入电压电路中的电流 I 为

$$I = \frac{V_{ref}}{R_9} \quad (3)$$

由公式(1)可知， R_9 阻值固定时，调节 V_{ref} 即可改变 I ，且 I 与输入电压无关，从而实现输入电压回路的电流恒定，此即恒流模式，其电路如图 4 所示。

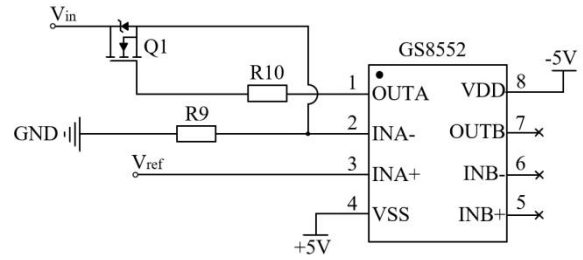


图 4 恒流模式电路图

当电子负载工作在恒阻模式下，电子负载输入电流与输入电压成线性关系，不管输入电压如何变化，负载的等效电阻不变，主要用于模拟电阻值固定的负载。实现恒阻方式有硬件控制和软件控制两种实现方式。本课程采用软件控制，单片机通过测量输入电压，根据设定电阻值，根据公式(4)计算调节输入电流，使输入电流和输入电压成特定的线性关系，即可模拟特定阻值的电阻。

$$R = \frac{V}{I} \quad (4)$$

当电子负载工作在恒功率模式下时，测试电源的输入功率不变，当输入电压变化时，使输入电流随之变化，维持输入功率不变，该模式控制方式通过测量输入电压，由设定功率值，根据公式(5)，计算得到输入电流值，从而保持电源输入功率恒定，该模式可模拟功率恒定的负载。

$$P = V \times I \quad (5)$$

2.3 升压电路

升压电路旨在将被测电池输出的低压直流电能转换为高压直流电能，以满足后续电路的电压需求。逆变器需满足并网运行的特定电压要求，其配套的推挽电路拓扑结构如图 5 所示。在该推挽电路中，隔离变压器的变比设定为 3 : 90，其核心功能为将电子负载输出的 12 V 直流电压升至 360 V，为后续高压侧电路提供符合要求的输入电能。

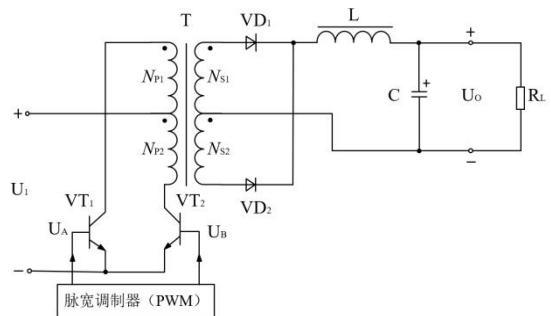


图 5 升压电路结构拓扑

3 馈能并网控制策略

系统初始化后, 进入周期性主控制循环, 先通过 ADC 采集电网电压、网侧电流。由锁相环 (PLL) 跟踪电网电压的相位与角频率, 接着构造 α - β 静止坐标系下的虚拟正交电流分量, α 轴取网侧电流, β 轴由网侧电流幅值和 PLL 相位构造。通过坐标变换将 α - β 电流转换为 dq 旋转坐标系下的有功电流分量 i_d 、无功电流分量 i_q , 为实现单位功率因数并网, 设置 $i_d=1A$, i_q 的参考值为 0。对 i_d 和 i_q 分别进行 PI 闭环控制以生成 dq 轴电压的参考值。再经逆坐标变换得到 α - β 静止坐标系下的电压参考值, 最后基于该参考值采用 SPWM 生成逆变器功率管的驱动信号, 实现逆变器稳定并网。

4 储能单元工作原理

在储能单元中, 利用同步 BUCK 电路进行储能, 同步降压电路采用典型的非隔离式 DC-DC 拓扑, 主要由控制器芯片、高侧功率 MOS 管、低侧功率 MOS 管、续流电感、输出滤波电容及电流采样电阻组成, 电路拓扑如图 6 所示。同步降压电路通过控制器芯片输出的 PWM 信号, 控制高侧与低侧的 MOS 管的交替导通与关断, 利用电感的储能特性实现电压降压与稳定输出。

其核心功能是承接电子负载输出的多余电能, 进而避免多余电能浪费、平抑负载模拟单元的输出功率波动, 为整个系统的能量供需平衡与稳定运行提供关键支撑。

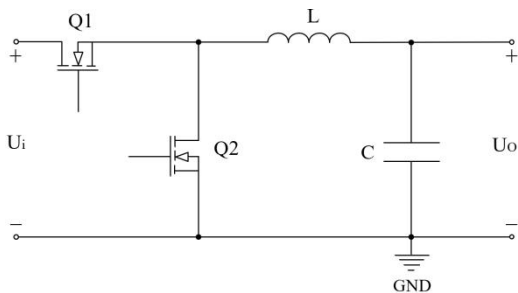


图 6 同步降压电路拓扑结构

5 软件设计

系统软件主要完成模拟电子负载测试电池部分, 主程序承担系统初始化与全局功能调度职责, 如各种设定值、人机交互界面以及输出电压电流模拟量的测量, 以及对各个模块进行初始化。程序流程图如图 7 所示。

系统开始时, 对系统各个模块或寄存器进行初始化操作, 为各模块协同工作奠定基础。系统主控采

用 STC32G12K128 单片机, 采用模块化分层设计思路, 以主程序为核心调度中枢, 集成 ADC 采样、PWM 输出、按键交互、OLED 显示及定时器等功能模块, 实现对电子负载的智能化控制、参数采集与状态监测, 软件架构具备高可维护性与可扩展性。

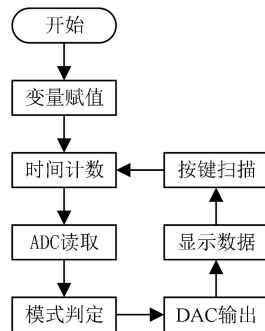


图 7 程序流程图

6 实验验证

模拟电池进行恒流放电测试, 在 30V 输入电压的情况下, 通过按键改变测试电源的电流值, 记录电流的实际值, 实验结果如表 1 所示。由此可知, 该系统的恒电流负载模拟精度较高, 设定电流值与实际电流值误差在 4% 以内。

表 1 恒流模式测试数据表

电流设定值/A	电流实际值/A
0.1	0.097
0.5	0.501
1.0	1.003
1.5	1.504
2.0	2.002

测试电子负载恒阻模式, 在 30V 输入电压的情况下, 测试电子负载对测试电源是否为一个阻值可变的等效电阻, 观察输入电源电压与电流的比值与电子负载上设定值是否一致。结果如表 2 所示。由此可知, 电阻设定值与电阻实际值之间存在一定的误差。经过观察与计算, 当设定电阻不变时, 改变测试电源输入电压, 输入电流也会改变, 但两者比值基本不变, 符合等效电阻要求。

表 2 恒阻模式测试数据表

电阻设定值/ Ω	电阻实际值/ Ω
15.0	16.5
30.0	32.9
50.0	54.8
80.0	87.7
150.0	164.8

在设定测试电源 30V 输入电压的情况下,恒功率模式具体测试情况如表 3 所示。经实验测试可知,其功率设定值与实际输出值存在一定偏差,但二者误差幅度控制在 10% 以内。当输入电压发生变化时,输入电流会随之产生相应调整,且二者的乘积与预设功率值保持一致。

表 3 恒功率模式测试数据表

功率设定值/W	功率实际值/W
10.0	9.5
20.0	18.8
30.0	28.1
40.0	37.4
50.0	46.7

7 结论

本文针对电池出厂测试场景,设计了一套基于可扩展功率模块的电池检测系统,重点开展系统硬件电路拓扑设计与控制策略优化研究。经多组对照实验验证,该系统运行稳定性与可靠性均表现优异:在电池出厂测试过程中,其负载模拟精度与动态响应性能符合测试技术要求。同时,系统可将测试过程中产生的直流电能逆变为符合电网接入标准的交流电能,在满足电网并网技术规范的前提下实现电能回馈,有效达成能量循环利用的

技术目标。此外,该系统进一步集成了储能单元,能够实现测试过程中能量的暂存与动态调度,对提升能源利用效率、推动制造业资源节约具有实际应用价值。

参考文献

- [1] 易磊,向辛东,诸逸静.电压纹波补偿式能馈型直流电子负载设计[J].电力电子技术,2025,59(05):44-48+77.
- [2] 熊佳民,江学焕.多模块并联型高压直流电子负载功率控制电路设计[J].湖北汽车工业学院学报,2023,37(04):37-41.
- [3] 吴宏,高性能大功率可编程直流电子负载.湖南省,湖南恩智测控技术有限公司,2023-05-23.
- [4] 李圣清,赵梦娣,周志飞,等.基于单相 LCL 型并网逆变器的输出阻抗相位分频段补偿方法[J].智慧电力,2025,53(09):19-27.
- [5] 王文国,张奔.基于滑动平均滤波器半正切锁相环的电网频率估计方法[J].电测与仪表,2025,62(09):210-217.

项目基金:项目编号:S202510595268,具备可扩展功率组件的电动汽车电池检测系统,自治区级。