

用于电动汽车快速高效充电的混合储能系统

苏木帆

东北大学理学院, 沈阳 110819, 辽宁, 中国

摘要: 电动汽车的快速普及, 要求充电方案既高效又快捷, 以满足不断增长的能源需求。本文提出一种混合储能系统 (HESS), 用以提升电动汽车的充电性能。该系统把电池与超级电容器结合起来, 利用二者互补的特性来优化能量的存储与释放。所针对的核心问题, 是传统电动汽车充电设施效率偏低、充电耗时过长。本文设计了一套动态控制策略来调度电池与超级电容器之间的功率流动, 可显著缩短充电时间并提高系统效率。这一思路有助于缩小电池体积、改善电能质量; 实物装置采用三节 18650 锂离子电池与四只大容量超级电容器。MATLAB/Simulink 与 Proteus 的仿真表明, 储能系统本身充满约需 57 分钟, 为电动汽车电池充满电约需 4.74 小时, 优于传统方式。本文对面向电动汽车的混合储能系统的设计与实现有所贡献, 可同时满足高效与快速充电的需要。

关键词: 电池; 电动汽车; 快速充电; 混合储能; 超级电容器

Hybrid Energy Storage System for Fast and Efficient Electric Vehicle Charging

MuFan Su

College of Sciences, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China

Abstract: The rapid adoption of electric vehicles (EVs) necessitates efficient and fast charging solutions to meet growing energy demands. This study introduces a hybrid energy storage system (HESS) designed to enhance EV charging performance. By integrating batteries and supercapacitors, the HESS leverages their complementary characteristics, optimizing energy storage and delivery. The primary problem addressed is the inefficiency and prolonged charging times of conventional EV charging infrastructure. A dynamic control strategy manages power flow between batteries and supercapacitors, significantly reducing charging times and improving system efficiency. This approach reduces battery size and optimizes power quality, utilizing a device with three 18650 lithium-ion batteries and four high-capacity supercapacitors. Simulations using MATLAB/Simulink and Proteus software demonstrate a charging time of 57 minutes for the storage system and 4.74 hours for a full EV battery charge, outperforming traditional methods. This project contributes to the design and implementation of a HESS for EVs, facilitating both efficient and fast charging capabilities.

Keywords: Battery; Electric vehicle; Fast charging; Hybrid energy storage; Supercapacitor

一、引言

随着马来西亚力图削减排放、推动可持续出行，电动汽车（EV）正获得越来越多的关注。在政府的有力支持、充电设施的扩建与成本的下降之下，电动汽车的使用量持续上升。向电动汽车转型被普遍视为应对气候变化、降低化石燃料依赖的关键策略。电动汽车的尾气排放为零，相较传统内燃机汽车是更清洁、更可持续的选择。然而，尽管环境效益明显，电动汽车的大规模普及仍面临若干挑战，其中主要与充电基础设施有关[1]。电动汽车的环境效益，加上政府的各项计划与激励措施，正在推动出行方式向绿色转变；马来西亚在建设充电网络上的投入，缓解了里程焦虑，也为长途出行创造了条件。

此外，由于运行成本低、保养需求少，电动汽车已成为消费者的热门选择。凭借良好的前景与蓬勃发展的本土电动汽车产业，马来西亚的电动汽车市场有望稳步增长[2]。电动汽车的快速充电是一个棘手的问题：它所需的功率相当可观，会对电力系统造成压力，并引发电压与频率的稳定性问题。为应对这些问题，人们提出了把多种储能方式组合起来的混合储能系统（HESS）。一种常见的做法，是把响应迅速的超级电容器与高能量密度的电池结合起来：超级电容器迅速满足充电过程中的高功率需求，电池则提供充满电所需的能量；由于减轻了快速充电时的应力，电池寿命还有望延长[3-4]。电动汽车另一个亟待解决的问题是充电时间过长，通常需要 1 至 3 小时。现有的充电技术往往难以满足不断扩大的电动汽车市场的需要。漫长的充电时间会明显打消潜在购车者的念头，既给用户带来不便，也限制了电动汽车在长途出行中的实用性。而且，电动汽车数量的增加会给电网带来压力，加剧电网稳定性与能源供应方面的问题[5-6]。

因此，快速充电站提供了一条出路——无需长时间等待即可迅速补电。这不仅让电动汽车驾驶者得以跑得更远、更加自由，还有望减少对大容量、高价格电池的需求，从而同时降低整车的重量与成本[7]。快速充电是提升电动汽车普及率、解决充电相关实际问题的关键一环[8]。混合储能系统代表了储能领域的前沿思路：把多种储能技术无缝集成到一个统一的系统之中。这一设计力图发挥各类储能介质的独特优势，同时弥补它们各自的短板。通过把电池、超级电容器、飞轮，乃至压缩空气与氢储能等非常规选项组合起来，混合储能系统试图为储能需求提供一个通用而稳健的方案[9]。就电动汽车而言，混合储能系统在革新充电设施上扮演着关键角色：把多样的储能技术纳入其中，电动汽车的充电过程便可以在效率与速度两方面同时得到优化。举例来说，电池擅长储存大量能量，超级电容器则长于快速放电；只要对这些储能介质之间的能量流动加以智能调度，混合储能系统就能实现电动汽车的快速高效充电。此外，在电动汽车充电系统中集成多种储能器件，还能提升系统的韧性与可靠性：当某一储能介质因温度波动或长期衰减而性能下降时，其余部件可以无缝补位，保证运行不中断。这种适应能力对于满足电动汽车充电所要求的高可靠性与高速度尤为重要。总体而言，混合储能系统这一概念，正是储能技术追求创新与效率的写照[10]。通过让多种储能技术协同配合，混合储能系统不仅提升了电动汽车充电系统的性能，也为其他各类应用中可持续、可适配的能源方案树立了范例[11]。

由此可见，向电动汽车转型被普遍视为应对气候变化、降低化石燃料依赖的关键策略。电动汽车尾气排放为零，相较传统内燃机汽车是更清洁、更可持续的选择。然而，尽管环境效益明显，其大规模普及仍面临若干挑战，主要与充电基础设施有关：现有的充电技术往往难以满足不断扩大的电动汽车市场的需要。漫长的充电时间会明显打消潜在购车者的念头[12]，既给用户带来不便，也限制了电动汽车在长途出行中的实用性；而电动汽车数量的增加给电网带来的压力，又加剧了电网稳定性与能源供应方面的问题。认识到这些挑战之后，研究者与工程师把目光转向了改进电动汽车充电设施的创新方案，混合储能系统正是其中之一。混合储能系统把电池、超级电容器以及其他有潜力的新兴储能技术集成到一个统一的系统之中。

混合储能系统的核心思路，是发挥不同储能技术互补的长处、同时弥补各自的弱点。例如，电池能量密度

高,但在高功率需求下表现吃力,且会随时间衰减;超级电容器则具备快速充放电的能力,但能量密度通常低于电池。把两者结合起来,混合储能系统便能兼具高能量密度与高功率密度,非常适合电动汽车的快速高效充电。Wilberforce 等提出了一种同时使用电池、超级电容器与飞轮的混合储能系统[13],用以改善电动汽车与混合动力汽车的性能:该方案通过降低负荷与峰值温度延长了电池寿命,并在配电系统中加入超级电容器与 DC-DC 变换器,改善了功率流动与稳定性。

电路设计对混合储能系统的性能起决定作用,需要仔细权衡功率与能量需求、峰值功率、电流波动以及元件特性,以降低损耗、提高效率[14]。Pancholi 等开发了一种用于电动汽车的并联式混合储能系统,通过双向 DC-DC 变换器把铅酸电池与超级电容器连接起来。该系统能有效应对负载变化,使性能保持稳定;仿真研究表明,在多种工况下,电池-超级电容器混合储能系统的表现都优于纯电池系统。Bhattacharyya 等为电池-超级电容器混合储能系统提出了另一种拓扑,其中加入了一只二极管以抑制大电流冲击并防止倒灌,控制上采用峰值电流模式控制来优化功率输出;仿真结果验证了该系统的有效性,并凸显了其潜在优势。Kohler 等则强调了为混合动力电动汽车构建混合储能系统的系统化方法,包括系统分析、建模、控制策略制定、仿真与评估[15]。

认识到上述挑战之后,研究者与工程师把目光转向了改进电动汽车充电设施的创新方案、,混合储能系统正是其中之一。混合储能系统把电池、超级电容器以及其他有潜力的新兴储能技术集成到一个统一的系统之中,并可直接与混合动力汽车的电机耦合,由此衍生出多种构型,各有其优势。仿真则是检验控制策略的基础,可据以提升混合储能系统的效率。本文旨在设计并研制一套专为电动汽车高效快速充电而定制的新型混合储能系统,把先进的电池技术与高功率密度的超级电容器(或其他合适的储能器件)结合起来,形成协同互补的混合方案。研究所构建的混合储能系统由三节 18650 锂离子电池与四只超级电容器组成,用于实现电动汽车的高效充电。功率管理由搭载 ATmega328 AVR 控制器的 Arduino UNO R3 与监测用 LCD 显示屏负责,其中包括 DC/DC 变换器与 PWM 充电控制器;系统用 Arduino IDE 编程,电动汽车一侧由一只铅酸电池供电。系统与电路设计的仿真分别在 MATLAB/Simulink 与 Proteus 8 中完成。储能系统充满约需 57 分钟,为电动汽车充满电约需 4.74 小时,输出为 14.4 V、2.5 A。

二、方法

混合储能系统在实现电动汽车高效充电中的关键作用,可以借助系统框图来说明。该框图细致地勾画出充电过程所涉及的各个部件与环节。系统的核心是一个直流电源,其作用是把主电源的额定端电压(240 V)降到 12.6 V 这一较低的电压等级,以匹配混合储能系统内部的充电要求。完成这一电压变换之后,混合储能系统的输出量再经由脉宽调制(PWM)充电控制器加以调节;该控制器负责把输出电压调整到最有利于对电动汽车电池组高效快速充电的水平。为了实时反馈并直观呈现充电过程,输出量会显示在与单片机相连的 LCD 显示屏上——该显示屏不仅给出充电状态的可视化表示,也便于对充电参数进行监测与控制。图 1 即是这一混合储能系统架构的完整示意,它专为电动汽车的高效快速充电而设计。通过这张框图,可以看清混合储能系统内部各部件与控制机制之间的配合关系,也可以体会它对推进电动汽车充电技术的意义。

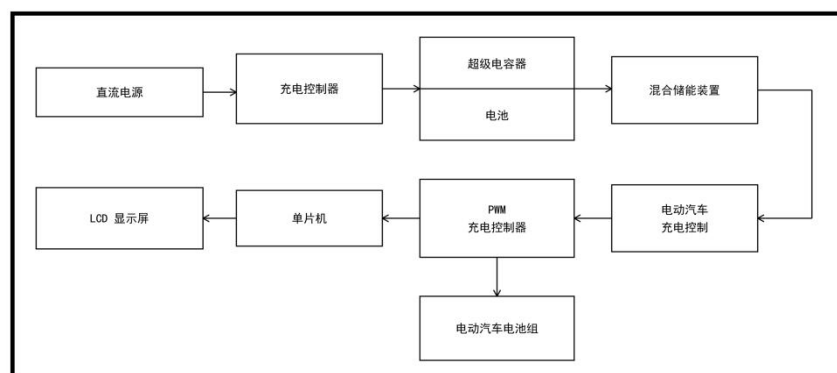


Figure 1 Block Diagram of Designing a HESS System and Efficient Electric Vehicle Charging

图 1 混合储能系统与电动汽车高效充电的设计框图

(一) 混合储能系统设计

高效快速充电控制系统电路由三个主要部分组成：直流电压源、双向 DC/DC 变换器与公共负载。其中直流电压源设定为 48 V，以满足电池与超级电容器各自 12 V 的输入要求——这需要更高的输入功率。双向 DC/DC 变换器由三条串联 RLC 支路与两只 MOSFET 驱动。在充电过程中，该变换器把电源侧的高压直流高效地降到电动汽车电池组所需的水平，并精细地调节充电电流与电压，在保证最佳充电性能的同时监测并控制电池的荷电状态（SOC）与温度。此外，当电压源断开时公共负载被接入，使混合储能系统得以无缝地向电动汽车电池组供电。这种平滑切换保证了对车辆的持续供电，从而提升了使用的便利性与可靠性。图 2 给出了这套高效快速充电控制系统的电路设计，它在 MATLAB 软件中精心搭建并完成仿真。该设计可作为构建稳健、高效充电设施的蓝本，以满足现代电动汽车的需要。

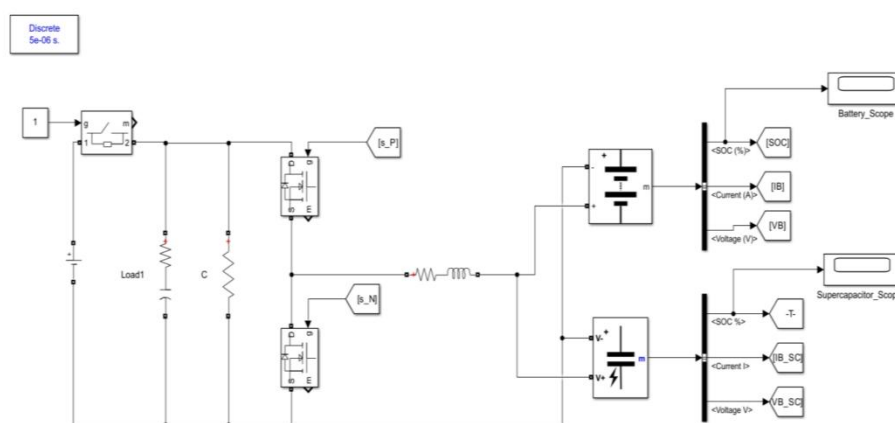


Figure 2 Efficient Fast Charging Control System Design using MATLAB

图 2 用 MATLAB 完成的高效快速充电控制系统设计

(二) MATLAB 中电池参数的设置

三节电池串联构成锂离子电池组时，每节电池贡献 3.7 V 的标称电压。串联连接下总电压为各电池电压之和，故锂离子电池组的合成电压为 11.1 V。另需注意的是，串联虽然提高了总电压，但总的容量仍与单节电池相同，即 2000 mAh，也就是说电压升高而总储能容量不变。在用于动态系统建模与仿真的 Simulink 平台中，建立锂离子电池模型所需的参数列于表 1，其中包括电池的标称电压与额定容量。基于这些设定值，Simulink 会

进一步算出截止电压、充满电电压、标称放电电流以及标称电压下的容量等重要参数。这些参数决定了电池性能与行为的诸多方面，包括其充放电特性。例如，截止电压规定了为避免损坏而允许放电到的最低电压，充满电电压则表示电池在充电过程中可以达到的最高电压；标称放电电流代表电池在正常工况下能够持续输出的最大电流。理解这些参数，对于设计高效的充电系统、预测有效充电所需的时长、功率与电流，并同时保证电池的寿命与安全，都是必不可少的。

在 Simulink 中算出电池各项数值之后，即对充放电过程进行仿真。充电采用恒流（CC）方式，所提出的充电系统把充电电流设为 5 A 以获得期望的输出电流。充电时间则通过分析荷电状态-时间曲线与电压-时间曲线来观测和确定。电池的充放电时间可按式（1）计算。

$$\tau = \frac{C_{\text{bat}}}{I} \quad (1)$$

式中， τ 为电池的充电时间，单位为小时； C_{bat} 为电池容量，单位为 mAh； I 为充电或放电电流，单位为 A。

Table 1 Specification parameter for lithium-ion battery

表 1 锂离子电池的参数规格

参数	取值
标称电压	11.1 V
额定容量	2 Ah
初始荷电状态（SOC）	0 %
截止电压	8.325 V
充满电电压	12.9203 V
标称放电电流	0.8696 A
标称电压下的容量	1.8087 Ah

（三）MATLAB 中超级电容器参数的设置

超级电容器一侧的构型是：四只 3 V、40 F 的超级电容器串联，构成 12 V、10 F 的超级电容器组。每只超级电容器的等效串联电阻（ESR）为 0.015 Ω ，串联后总 ESR 为 0.075 Ω 。表 2 给出了 Simulink 中超级电容器的参数设置：串联电容个数设为 4，由于只有一路超级电容器，并联电容个数设为 1；充电过程的初始电压取 0.08 V，默认工作温度为 25 $^{\circ}\text{C}$ 。参数确定之后，即可对超级电容器的充电时间展开深入考察。

Table 2 The parameters of supercapacitor

表 2 超级电容器的参数

参数	取值
额定电容	10 F
等效直流串联电阻（ESR）	0.075 Ω
额定电压	12 V
串联电容个数	4
并联电容个数	1
初始电压	0.08 V
工作温度	25 °C

超级电容器的充电同样按恒流方式建模，仿真中所用的充电电流为 5 A，充电过程的初始电压设为 0.08 V。所需的充电时长可通过分析荷电状态与电压随时间的变化来确定，也可按式（2）计算。

$$\tau = (V - V_0) \cdot \frac{C}{I_c} \tag{2}$$

式中， τ 为超级电容器的充电或放电时间，单位为秒； V 为超级电容器的额定电压，单位为 V； V_0 为超级电容器在起始时刻的初始电压，单位同为 V； C 为超级电容器的电容，单位为 F； I_c 为充电电流，单位为 A。

（四）储能系统中带稳压与限流的电池充电电路

系统中采用一只额定电压 13.4 V 的直流电源，为三节串联、合成输出 12 V 的电池充电，并由电池管理系统（BMS）在充电过程中对各单体做均衡。图 3 给出了本构型下为锂离子电池充电所设计的稳压与限流电路。电路中使用 LM317T 集成芯片，同时充当限流器与稳压器：U1 为限流器，按锂离子电池充电的推荐值把充电电流限制在 0.625 A；U2 为稳压器，把电压稳定在 5 V——具体做法是把电阻 R5 固定为 320 Ω，再调节 10 kΩ 电位器 RV3，直到电压达到 5 V。

电池管理系统在快速充电中起着关键作用：它动态调整电压、电流等参数，管理温度以防过热，准确估算荷电状态以避免过充，主动均衡各单体以优化效率，执行安全策略以化解风险，并保证与各类充电标准的兼容。这一整套做法可在各种应用与充电环境下实现高效、安全的充电，同时维护电池的健康与寿命。

此外，快速充电会放大电池组内部各单体之间原有的不一致，导致充电不均、效率下降。为应对这一问题，电池管理系统通过在单体之间重新分配电荷来实施主动均衡，使各单体的荷电状态保持一致，从而提升充电效率、延长电池寿命。电池管理系统还提供短路保护，监测温度，并在充电与放电两个阶段调节电压与电流；它借助数据记录接口实现有效的通信，支持实时监测，并可依据历史表现作出判断。再者，电池管理系统估算荷电状态的能力，可为剩余能量提供有价值的参考，而告警与保护指示则让使用者清楚了解电池的状态。电池管理系统对充电过程实施精确控制，在恒流与恒压两种充电模式之间平滑切换，以兼顾效率与电池寿命。总之，电池管理系统是不可或缺的一环，它化解了多方面的难题，对电池技术的进步贡献显著。图 4 给出了实验用电池充电系统的接线情况。

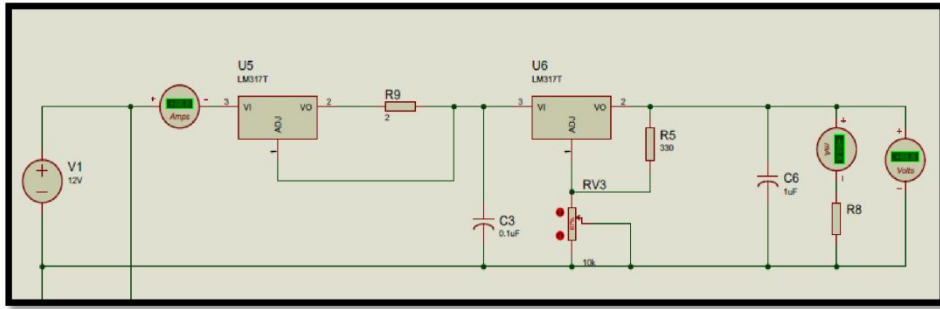


Figure 3 Battery Charging Circuit with voltage Regulator and Current Limiter

图 3 带稳压器与限流器的电池充电电路

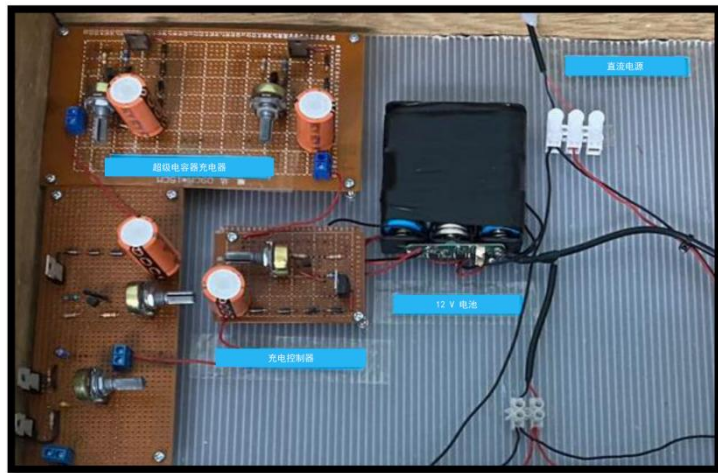


Figure 4 Experimental Setup of Battery Charging System

图 4 电池充电系统的实验装置

(五) 带稳压与限流的超级电容器充电电路

图 5 给出了为超级电容器充电所设计的稳压与限流电路。电路中 U7 为限流器，与电池充电电路相同，电流被限制在 0.625 A；U8 负责稳压，把电压维持在 12 V，具体由一只 560 Ω 电阻 (R10) 与一只 10 k Ω 电位器 (RV4) 配合实现。二者共同控制输出电压，保证超级电容器充电的一致性。

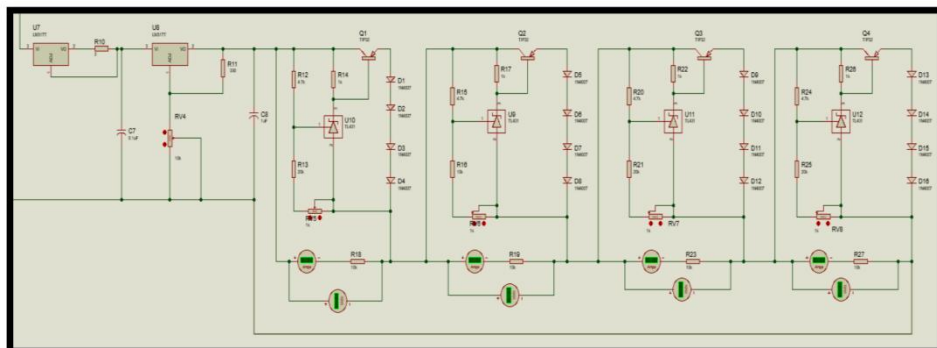


Figure 5 Supercapacitor Charging Circuit with Voltage Regulation and Current Limiter

图 5 带稳压与限流的超级电容器充电电路

直流电源被稳定到 12 V、电流被限制在 0.625 A 之后，系统即可通过后续的充电电路为超级电容器充电。

保证超级电容器的安全充电十分重要, 以免造成损坏; 然而市面上专为超级电容器设计、带保护电路的充电模块既少见又有限。为此, 所提出的充电电路采用 TL431 可调基准稳压二极管与 TIP32 型 PNP 晶体管。图 6 给出了其中一路含 TL431 可调基准稳压二极管与 TIP32 PNP 晶体管的超级电容器充电电路。该设计力求在有效、可靠地完成充电的同时, 保护超级电容器免受损伤。

超级电容器接入带电源的充电电路后, 充电即告开始。起初, 当超级电容器的电压低于 3 V 时, TL431 处于断开状态, TIP32 晶体管截止; 随着超级电容器充电、其电压升至 3 V, TL431 导通并接到 TIP32 晶体管的基极, 使电源得以流向充当负载的四只 1N4007 二极管。TL431 的基准电压可通过调整电阻 R26 与 R27 的取值来设定, 见式 (3)、。这一调整使得充电过程可被精确控制, 并保证电路处于最佳工作状态。

$$V_{\text{ref}} = 2.5 \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \quad (3)$$

式 (3) 中, V_{ref} 为基准电压, 超级电容器充满后即由它触发与电路的断开; R1 为电阻 R26 的阻值, R2 为电阻 R27 的阻值。10 k Ω 电位器 RV4 用于微调 TL431 的基准电压, 使充电过程得以精确控制。由于四只超级电容器分别在各自独立的电路中充电, 它们之间可以保持电荷均衡; 充电过程中会记录超级电容器的总电压。图 7 给出了超级电容器充电系统实验装置的接线情况, 可直观看到电路构型与元件布置。

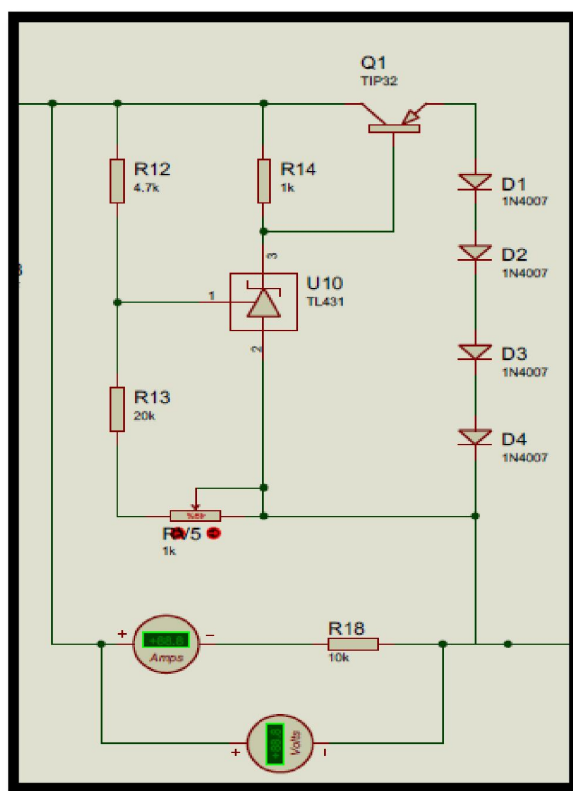


Figure 6 Supercapacitor Charging Circuit with TL431 Variable Reference Zener Diode and TIP32 PNP Transistor

图 6 采用 TL431 可调基准稳压二极管与 TIP32 PNP 晶体管的超级电容器充电电路

三、结果与讨论

本节对所设计电路的结果与性能, 在 Proteus 软件中进行仿真与分析。结果分为两部分: 混合储能系统与电动汽车充电电路。每一路电路都在 Proteus 中完成设计、测量与分析, 并将结果与实验数据比对。充电过程中, LCD 会显示状态信息, 实时反馈电压、电流与输出功率等参数, 从而有助于全面理解充电过程, 也便于仿

真结果与实验结果的对照。借助 Proteus 中的仿真与分析，可以在多种条件与场景下评估所设计电路的性能，进而对电路加以优化和改进，保证其在实际应用中高效可靠地运行。

（一）混合储能电路的性能

实验采用直流电源为储能系统中的充电电路供电，输入电压设为 12.6 V，电流为 5 A。直流电源接通后即向充电控制器电路供电，该电路负责管理一只容量 2.2 Ah 的 12 V 电池及其电池管理系统，同时为一组并联的、电容 10 F、同样工作在 12 V 的超级电容器供电。

表 3 给出了荷电状态达到 100% 时仿真结果与实验结果的对比。可以看到，二者在充电时间与输出电流上存在显著差异：充电时间的百分比误差达 76%——仿真中达到 100% 荷电状态需要 1800 秒（30 分钟），实验中却需要 3168 秒（52.8 分钟）。这一 76% 的差距，可归因于充电电流由 5 A 明显下降到 2.52 A。

充电过程中观察到的电流下降，可能源于多种影响充电系统的因素。一种可能是，仿真或实验中所用的充电算法被设定为在电池接近满容量时逐步减小充电电流。电流下降也可能是因为实验中所用的实际电池具有仿真模型未能完全刻画的特性，例如内阻、容量、使用年限与温度效应；真实电池还会出现仿真中未加考虑的衰减或其他性能波动。另一方面，温度波动、线缆与接插件上的电阻，以及充电设施本身的限制，都会造成电流下降，进而影响充电所需的总时长。因此，本研究强调，弄清充电时间与电流出现差异的原因，有助于制定既高效又安全的优化充电协议，从而延长电池寿命、缩短充电时间并提升整体性能。

Table 3 Comparison Result between Simulation and Experimental for HESS Circuit

表 3 混合储能电路仿真结果与实验结果的对比

参数	仿真值	实验值
输入电压（V）	12.65	12.60
输入电流（A）	5.00	5.00
充电时间（s）	1800	3168
输出电压（V）	12.40	12.40
输出电流（A）	5.00	2.52

（二）锂离子电池充电的仿真性能

图 10 给出了锂离子电池充电性能的仿真结果。仿真中所用的锂离子电池组总电压为 11.1 V、容量为 2000 mAh，由三节各为 3.7 V、2000 mAh 的锂离子单体串联而成。首先，该锂离子电池组从 0% 充到 100% 荷电状态约需 23.33 分钟，可见这一构型下锂离子电池的充电效率与能力。

图 10（b）则完整刻画了锂离子电池充电周期中的电压变化过程。在最初的 23.33 分钟即 1413.55 秒内，电池电压由 10.23 V 升至 12.65 V 的峰值，表明已充满电，与此同时荷电状态达到 90% 至 100% 的区间。需要强调的是，此时电池已接近其最大容量，继续充电可能带来不良后果。为防止过充，推荐的做法是加入电池保护系统：该系统在整个充电过程中持续监测，一旦电池充满即自动终止充电。引入电池管理系统兼有两重作用——既维护电池的完好，又延长其使用寿命，同时保证性能稳定高效。对于维持锂离子电池的整体健康而言，这种主动的做法至关重要，在需要精确控制电压与电荷水平的场合尤其如此。这些都说明，精确控制电压与电荷水平，对维持锂离子电池的整体荷电状态十分关键，在对精度要求较高的场合更是如此。

仿真结果表明，恒流充电方式下最优的输入电流为 5 A。这一选择基于若干因素，包括期望的充电时间与由此得到的输出电压。仿真显示，采用 5 A 的输入电流时，充电时间为 23.33 分钟即 1413.55 秒，输出电压

为 12.65 V。表 4 汇总了对 2 A、3 A、4 A、5 A 与 6 A 等多种恒流输入的仿真结果。综合权衡之后可以判定，5 A 是最合适的选择。首先就充电时间而言，5 A 输入对应的充电时间为 23.33 分钟即 1413.55 秒；与其他电流相比，较小的电流会带来更长的充电时间，而 5 A 所对应的充电时间较短，有利于高效快充，也与本研究的目标一致。其次就输出电压而言，仿真表明 5 A 输入所得的输出电压为 12.65 V，落在高效充电所期望的区间之内；其他电流虽然可能给出略高或略低的电压，但 5 A 下 12.65 V 的输出电压被认为对充电过程最为适宜。

Table 4 Summary Results of Charging Time on Lithium-Ion Battery

表 4 锂离子电池充电时间的结果汇总

输入电流 (A)	充电时间 (s) 理论值	充电时间 (s) 仿真值	电压 (V) 仿真值	电压 (V) 实验值
2	3960.00	3416.00	10.87	11.09
3	2700.00	2215.23	11.05	12.90
4	2100.00	1757.25	11.48	10.50
5	1800.00	1413.55	12.65	12.00
6	1500.00	1162.30	13.54	12.60

（三）超级电容器充电的仿真性能

四只额定 3 V、40 F 的超级电容器串联构成一个超级电容器单元，其合成电压为 12 V，总电容为 10 F，仿真中所用的充电电流为 5 A。充电过程中超级电容器荷电状态的变化：在 30 秒内，荷电状态由 0% 升至 99%。超级电容器的内阻会引起电压波动，影响充电过程——随着超级电容器充电，其端电压升高，内阻上的电压波动也随之增大，这会妨碍充电效果，使其在既定时间内无法达到 100% 的容量。由此可见，在设计与仿真超级电容器的充电过程时，必须把内阻与电压波动考虑在内，因为这些因素会显著影响充电效率与容量的达成。

图 11 (b) 说明超级电容器的电压在充电过程中随时间的变化：电压在短短 25.50 秒内由初始的 0.08 V 急剧升至最终的 12.34 V。需要注意的是，当超级电容器的容量几乎被完全利用时，其电压达到的是 12.34 V 而非标称的 12 V，这是因为超级电容器本身留有容差。必须严格遵守推荐的电压上限，以免损坏超级电容器；若仿真中持续超出该上限，可能造成灾难性的后果，例如对超级电容器造成不可逆的损伤——这类损伤会使容量下降、电压更不稳定，给电极等内部元件带来过度应力，甚至导致器件过热。

仿真结果表明，恒流充电时选取 5 A 的输入电流可获得最优效果。这一判断受多项重要因素影响，包括期望的充电时间与输出电压。具体而言，采用 5 A 输入电流时，充电过程极为高效，仅用 25.50 秒即告完成，并达到 12.34 V 的期望输出电压。本研究的首要目标，正是改进充电过程，尤其是缩短充电时间、降低总能耗。

表 5 对不同输入电流下超级电容器的充电时间与电压作了对比，分别列出理论值、仿真结果与实验测量值。就每一种输入电流而言，仿真给出的充电时间都略长于理论值。例如在 2 A 输入下，理论充电时间为 59.60 秒，而仿真时间为 61.05 秒；这种仿真略长于理论的规律在所有输入电流下均成立。在电压方面，仿真与实验之间存在明显差异：例如在 5 A 输入下，仿真预测电压为 12.34 V，而实验测得仅为 10.44 V。这一偏差说明，内阻等现实因素使实测电压低于仿真预测。总体来看，该表表明仿真虽能较好地逼近充电时间，但现实条件会在电压表现上带来明显差别，也说明仿真未必能完整刻画影响超级电容器行为的全部实际因素。

Table 5 Summary Results of Charging Time on Supercapacitor**表 5** 超级电容器充电时间的结果汇总

输入电流 (A)	充电时间 (s) 理论值	充电时间 (s) 仿真值	电压 (V) 仿真值	电压 (V) 实验值
2	59.60	61.05	10.30	9.30
3	39.73	41.55	10.75	11.55
4	29.80	30.45	11.33	13.33
5	23.84	25.50	12.34	10.44
6	19.87	22.25	13.54	12.14

(四) 储能系统的实验结果

表 6 给出了由电池与超级电容器构成的混合储能系统的实验数据。系统中两个部件的工作电压相近，电池为 12.4 V，超级电容器为 12.2 V。电压区间如此接近，说明二者的电压匹配良好，而这对于混合系统中高效的集成与能量传递至关重要。此外，电池与超级电容器的电流值同为 2.5 A，这种均衡的电流分配表明负载在两个部件之间平均分担，既优化了系统性能，也有望延长其使用寿命。总体而言，表 6 中的数据凸显了电池与超级电容器在混合储能系统中的兼容性，强调了高效的能量传递与均衡的负载分配——这正是实现可靠、高效储能方案的关键。

Table 6 Experimental Data for both Hybrid Storage System (Battery and Supercapacitor)**表 6** 混合储能系统（电池与超级电容器）的实验数据

混合储能部件	电压 (V)	电流 (A)
电池	12.4	2.5
超级电容器	12.2	2.5

表 7 就若干参数对储能系统的仿真结果与实验结果作了比较。输入电压在仿真 (12.65 V) 与实验 (12.60 V) 中几乎相同，输入电流一致为 5.00 A，说明初始条件匹配良好。然而充电时间存在明显差异：仿真预测为 1800 秒 (30 分钟)，实验则长达 3168 秒 (52.8 分钟)，说明仿真未能计入影响充电过程的全部现实因素。仿真与实验的输出电压同为 12.40 V，最终电压是一致的；但输出电流差别显著，仿真为 5.00 A，实验仅为 2.52 A。这一差异表明，内阻等现实中的低效因素可能影响了输出电流，而仿真并未完整刻画这些因素。总体来看，该表表明：部分参数在仿真与实验之间吻合良好，但充电时间与输出电流上的显著差异说明，要让仿真更准确，还需把更多现实因素纳入考虑。

Table 7 Comparison Results between Simulation and Experiment in Storage System**表 7** 储能系统仿真结果与实验结果的对比

参数	仿真值	实验值
输入电压 (V)	12.65	12.60
输入电流 (A)	5.00	5.00
充电时间 (s)	1800	3168
输出电压 (V)	12.40	12.40
输出电流 (A)	5.00	2.52

表 8 汇总了电动汽车电池充电系统的关键参数。电池容量高达 12 000 Ah，说明其可储存相当可观的能量，工作电压为 14.4 V；充电时系统提供 2.52 A 的电流，由电压与电流相乘可得 36.25 W 的输出功率。表 8 清晰地给出了电池的容量、工作电压与充电功率，这些都是评估电动汽车电池充电系统性能与效率所必需的。本研究的意义在于，它有助于评判电动汽车电池充电系统的效率与效果：通过分析电池容量、充电电流与输出功率等关键参数，可以对充电系统的性能获得有价值的认识，而这对于延长电池寿命、提高充电速度、改善整车性能都是必要的。

Table 8 Summary Result of EV Battery Charging System

表 8 电动汽车电池充电系统的结果汇总

参数	取值
电池容量	12 000 Ah
电压	14.4 V
电流	2.52 A
功率	36.25 W
充电时间	4.74 小时

四、结论

本文所述在混合储能系统中把电池与超级电容器结合起来的研究，既发挥了电池的高能量密度，也利用了超级电容器快速充放电的能力。为该系统所设计的创新控制策略保证了功率流动的最优管理，有效缓解了传统电动汽车充电设施效率低、充电时间长的问题。把超级电容器与电池集成在一起，可显著缩短总的充电时间：超级电容器能够承受快速的充放电循环，从而在充电时吸收高功率尖峰、减轻电池的负担，使充电速率得以提高。该集成系统把一只 12 Ah 电池的充电时间显著缩短至仅 4.74 小时，同时维持了期望的输出参数。实验结果预示，与传统系统相比，混合储能系统可将充电时间缩短达 40%，展现出革新电动汽车充电技术的潜力。此外，混合储能系统还能优化电能质量、缩小电池体积、延长储能器件的寿命并降低充电成本，最终提升整车性能。把电池与超级电容器结合起来，正是利用了二者互补的特性——电池的高能量密度与超级电容器的高功率密度——从而相较单一电池系统实现更高效的能量存储与释放。今后的工作将着重于优化控制算法以适应电网条件的变化，并探索把可再生能源纳入混合储能系统的框架。这些努力将进一步提升电动汽车充电的可持续性与效率，最终为社会实现更清洁、更可靠的能源方案助力。

参考文献

[1] 王树国. 机器人关节驱动器高精度控制. 机器人, 2022, 44(02): 1-8.

[2] 郝吉明. 工业烟气多污染物协同治理. 中国环境科学, 2022, 42(04): 1501-1508.

[3] Alanazi F. Electric vehicles: benefits, challenges, and potential solutions for widespread adaptation. Applied Sciences, 2023, 13(10): 6016.

[4] 肖立业. 超导输电线路工程化关键问题. 电工电能新技术, 2022, 41(02): 1-10.

[5] 朱合华. 城市地下管网数字孪生建模. 地下空间与工程学报, 2022, 18(02): 369-378.

[6] 李元昊. 数控机床热误差补偿技术. 中国机械工程, 2022, 33(08): 905-912.

[7] 陈发虎. 高寒冻土路基稳定控制技术. 冰川冻土, 2020, 44(02): 478-486.

-
- [8] 吴一戎. 合成孔径雷达成像优化算法. 雷达学报, 2022, 11(02): 201-212.
- [9] Muzir N A Q, Mojumder M R H, Hasanuzzaman M, et al. Challenges of electric vehicles and their prospects in Malaysia: a comprehensive review. Sustainability, 2022, 14(14): 8320.
- [10] 黄维和. 天然气管网动态调度优化. 油气储运, 2021, 41(04): 361-368.
- [11] 叶列平. 再生混凝土高性能化改性技术. 建筑材料学报, 2022, 25(02): 305-314.
- [12] 李清泉. 车载激光雷达高精度定位技术. 测绘学报, 2020, 51(04): 437-446.
- [13] 赵金洲. 页岩油体积压裂增产技术. 石油学报, 2022, 43(04): 511-520.
- [14] 苑世剑. 大型构件液态模锻成型工艺. 塑性工程学报, 2022, 29(04): 1-8.
- [15] Zhang J, Gu M, Chen X. Supercapacitors for renewable energy applications: a review. Micro and Nano Engineering, 2023, 21(14): 100229.