



基于 MATLAB/Simulink 的电池充放电及 均衡虚拟实验系统

赵慧勇

(湖北汽车工业学院 汽车工程学院, 十堰 442002)

摘要: 为了降低实验成本, 该文采用 MATLAB/Simulink 软件设计了电池组充放电及均衡的虚拟实验系统。该系统由 GUI 界面、Simulink/Simscape 元件组成的仿真模型组成, 具有充电、放电、均衡等多种仿真模式, 可通过弹出式菜单选择指定模式进行仿真分析, 并以曲线的形式显示仿真结果。系统 GUI 界面操作简单, 便于学生熟悉电池的充放电特性; Simulink 仿真模型为学生进行均衡设计及算法学习提供实例, 有助于提高学生的电池管理系统综合设计能力。基于该系统, 可设计电池充放电虚拟仿真实验、电池均衡虚拟仿真实验两个实验项目, 帮助其了解电池特性, 熟悉电池均衡方法。

关键词: 电池; 仿真模型; 虚拟实验; Simulink

中图分类号: TP391.9; TM911.3

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20190463

Virtual Experiment System of Battery Charging and Discharging and Balance Based on MATLAB/Simulink

ZHAO Huiyong

(School of Automotive Engineering, Hubei University of Automotive Technology, Shiyan 442002, China)

Abstract: To reduce the experiment cost, a virtual experiment system for battery charging, discharging and equalization is designed using the MATLAB/Simulink software. Consisting of simulation models that are comprised of the GUI (Graphical User Interface) and Simulink/Simscape components, the system has numerous simulation modes, such as charging, discharging and equalization. Simulation analysis can be conducted by choosing designated model through the pop-up menu, and the simulation results are displayed in the form of curves. The GUI is easy to operate, so that students may be familiar with the charging and discharging characteristics of batteries. The Simulink simulation model provides students with examples of balanced design and algorithm learning, which is conducive to improving their integrated design ability of the battery management system. Two experimental projects of battery charging and discharging virtual simulation experiment and battery equalization virtual simulation experiment designed based on this system can improve students' understanding of the characteristics and equalization methods of the battery.

Key words: battery; simulation model; virtual experiment; Simulink

为应对能源危机与环境污染问题, 国家自“十五”以来一直大力发展以电动汽车为主的新能源汽车^[1]。为应对产业发展战略, 很多高校都开设了电动汽车方向相关课程, “动力电池及管理系统”是其中的核心课程之一。该课程的特点是实践性、综合性、设计性及工程性较强, 内容较

抽象, 学生很难快速熟悉电池特性并进行相应管理系统的设计与分析。此外, 电池的充放电时间较长, 开设相关实验耗时耗力, 且存在一定的安全隐患, 如误接短路导致电池起火等^[2]。这也制约着学生对该课程内容的掌握和理解。

虚拟实验通过计算机程序模拟实验对象的

收稿日期: 2019-12-05; 修回日期: 2020-11-05

基金项目: 湖北汽车工业学院“动力电池及管理系统”课程改革项目(JY2019026); 湖北汽车工业学院博士启动基金(BK201410)。

作者简介: 赵慧勇(1980-), 男, 博士, 副教授, 主要从事汽车转向技术、电动汽车、动力电池及其管理技术方面的研究。

特性, 具有安全便捷等优点, 一直是教学研究的热点之一。许多研究者采用不同的软件和策略进行了虚拟实验平台的研究。他们采用 Labview、MATLAB、AuthorWare、Virtools、Proteus 等软件, 进行了过程控制、电机驱动、数控切削加工、火箭炮兵器结构原理、微机原理等教学的虚拟实验平台的设计与研究, 且取得了良好的效果^[3-7]。然而, 目前关于电池及电池管理的虚拟实验的研究文献还未看到。

为突破实验条件的局限性, 让学生快速熟悉电池特性, 以便于进行 SOC (state of charge) 计算、均衡控制等算法的设计与研究, 本文采用 MATLAB GUI 及 Simulink 中的物理模型, 搭建了电池充放电及均衡虚拟仿真实验系统。该平台包括电池充放电、电池均衡等实验, 可通过仿真模式选择完成指定的实验, 满足课程的需要。MATLAB GUI 可视化的界面简洁友好, 便于参数设置、仿真及结果查看; Simulink 模型及 Stateflow 模块可构建复杂的仿真模型及控制算法, 便于进行算法设计与改进, 方便学生的学习和操作。

1 虚拟实验系统总体设计

1.1 平台的结构与功能

电池组充放电及均衡虚拟仿真系统所具备的功能主要为: 电池参数输入、仿真类型选择、结果显示及仿真过程中电池电量以 3D 模式实时显示。该系统以 MATLAB 为开发平台, 采用 Simulink 的电池模型、电路元件模型、3D Animation 模块的元件模型, 对主界面、仿真模型、数据通信、3D 显示进行设计。其结构骨架如图 1 所示。

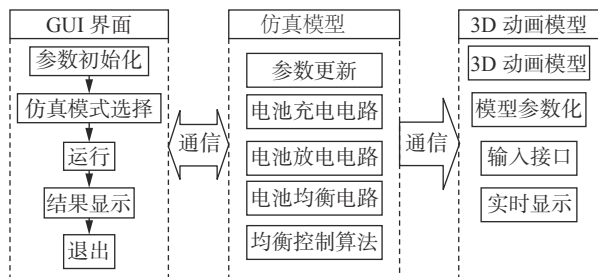


图 1 虚拟仿真平台系统框架图

主界面以下拉菜单的形式显示多个试验子系统, 供用户选择。其参数设置、运行及结果显示布置在同一个界面, 简洁明了。程序设置参数输入范围, 如输入在合理范围之外的参数, 则系统弹出警告并清空。如磷酸铁锂、钴酸锂、锰酸锂

电池的额定电压分别为 3.2 V、3.6 V、3.7 V^[8], 考虑到电池组为串联模式, 输入的数值应当为这些值的倍数。参数输入后, 需点击“设置”按钮后, 才能点击“运行”按钮进行仿真; 否则, 不启动仿真且运行状态文本框不会显示“计算开始”文字, 避免误操作。如需要多次仿真, 改变参数后再次点击“运行”按钮即可。仿真运行时, 用户可以查看后台的 Simulink 仿真模型, 并采用 Simulink 的探针功能查看实时仿真数据。

1.2 平台设计思路

电池组充放电及均衡控制虚拟实验平台的设计, 不但要与课程内容、实验教学需求保持一致, 还应具有灵活性、可扩展性并达到简单实用的要求。本文采用前后台程序调用的思路规划该试验系统, 具体如下:

1) 采用 Simulink/Simscape 物理元件建立电池组充放电及均衡电路模型, 采用 Stateflow、MATLAB function 等建立均衡控制模型。模型仿真的算法采用 Simulink 自带的 ode23tb 算法;

2) 采用 MATLAB GUI 建立该系统的各个控件, 通过 GUI 程序的回调函数进行参数的输入和输出;

3) 考虑到电池组通常为多节电池组成, 本实验系统采用 3 节电池串联组成, 以便于进行均衡电路的分析。

2 实验平台模型设计

2.1 仿真模型搭建

Simulink/Simscape 元件库中提供了电池模型、IGBT (insulated gate bipolar transistor) 模型、可控电压源、可控电流源模型、电阻模型、Switch 选择元件及 Stateflow 状态控制模块^[9]。运用这些模块可快捷地建立电池组的充放电及均衡控制底层仿真模型。该模型由电池、充放电控制、负载、电压电流源、3D 显示 4 部分组成, 如图 2 所示。

其中, 电池系统模型由电池模型和均衡电路组成, 如图 3 所示, 电池模型来自于 Simscape 库。该电池模型是一种基于内阻模型和可控电压源组成的通用等效电路模型, 包含电流积分、温度、内阻、容量、效率等参数, 能最大限度地模拟电池的特性^[10-12]。均衡电路由均衡选择模块、能耗均衡、能量转移均衡 3 部分组成。均衡选择模块根据均衡模式选项, 激活指定的均衡电路。能耗均衡通过消耗电量的方式降低电池的 SOC,

实现各电池 SOC 相同^[13]。能量转移均衡通过电容、电感等储能元件，将 SOC 高的电池的一部分电量转移到 SOC 低的电池中，实现各电池 SOC 一致。

能耗均衡模块、能量转移均衡模块分别为由 IGBT、电阻、Stateflow 模块的 Chart、电容或电感等组成均衡电路。以能耗均衡为例，其结构如图 4 所示^[14]。输入参数 va、vb、vc 分别接收各均

衡电池的 SOC，bal_ct 为均衡开启状态控制(0 为不均衡，1 为均衡)，a、b、c 为控制对应 IGBT 接通或断开的控制量。在 Stateflow 的 Chart 中创建逻辑控制电路，筛选 SOC 最低的电池，进行各电池均衡的开启或关闭。以该电池的 SOC 数值为中心，以输入的均衡误差为半径，组成邻域，作为电池均衡的目标范围。

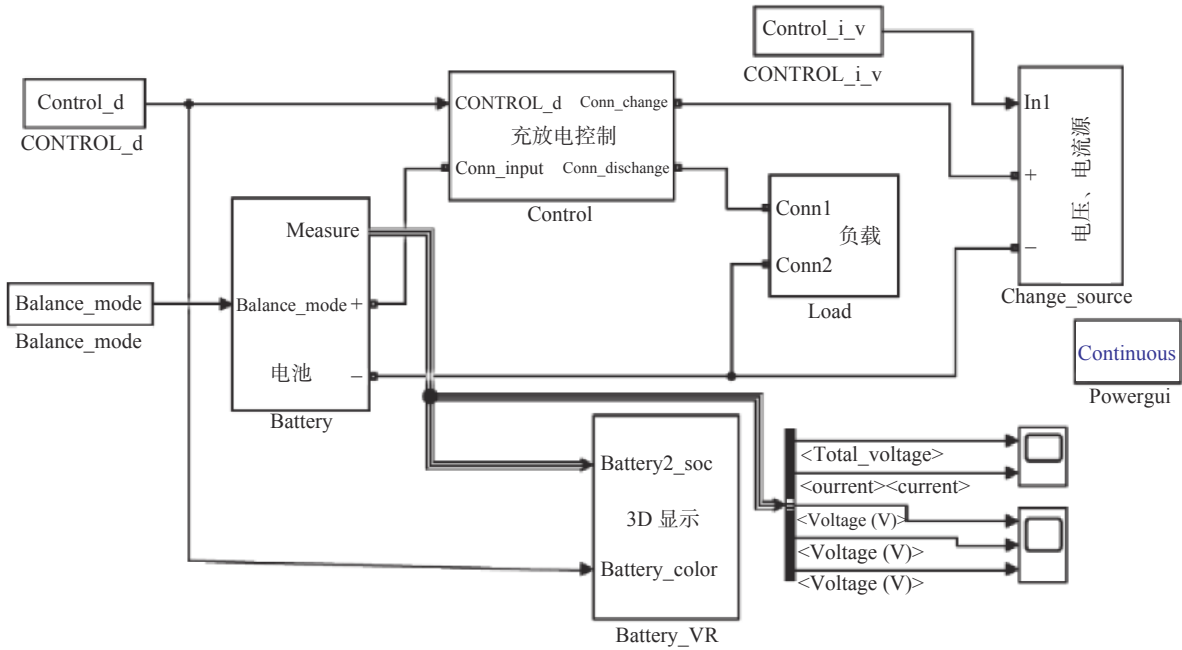


图 2 Simulink 仿真模型

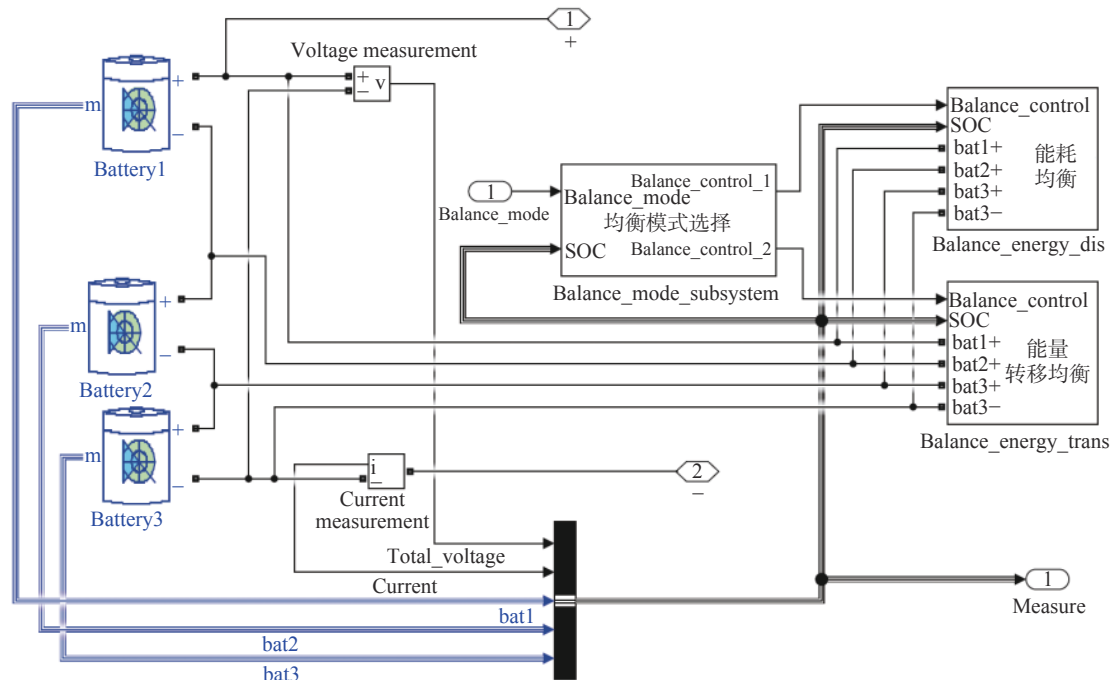


图 3 电池系统模型

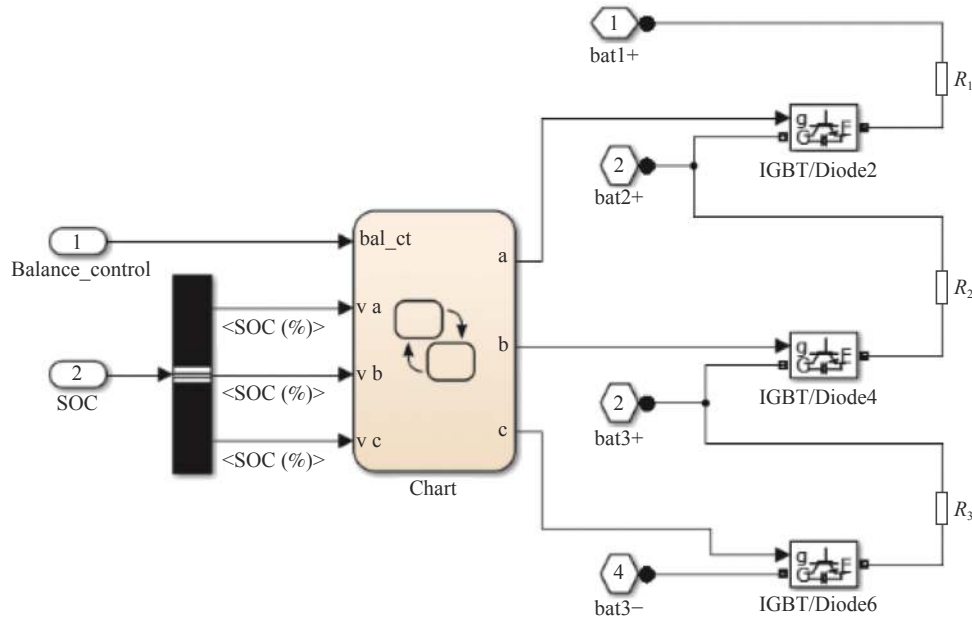


图 4 能耗均衡子模型

电池状态的图形化显示采用 Simulink 的 3D Animation 实现，其 Simulink 子模块如图 5 所示。为方便辨别，根据参数 Control_d 的状态数值确定电池的充放电状态，并通过不同的颜色显示。电池电量在充电状态下采用绿色显示，在放电状态

下采用红色显示，在断电状态下采用蓝色表示。电池及其电量状态通过三维模型设计软件建立圆柱形三维模型，在 VR(virtual reality) sink 元件中显示。电池电量在三维模型中以与电池 SOC 数值正相关的高度值表示。

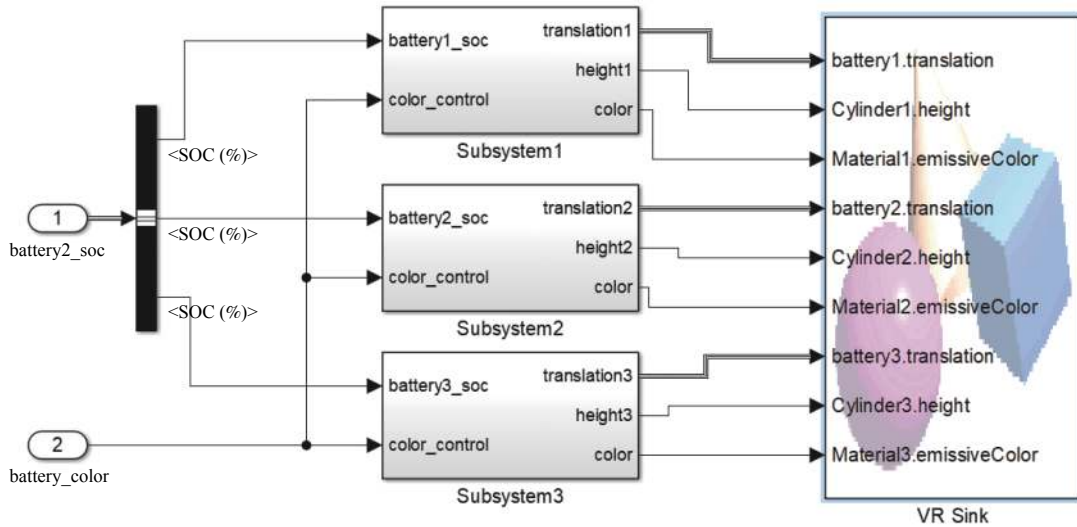


图 5 电池状态 3D 显示模块

2.2 人机交互界面设计

GUI 界面用于输入电池参数、选择仿真类型、运行仿真、绘制图形等。MATLAB Guide 模块提供了包含静态文本框、可编辑文本框、按钮等丰富的控件^[15-16]。其中，静态文本框(static text)用于显示仿真计算状态；可编辑文本框(edit text)用作参数数值的输入窗口；普通按钮(button)用于

实现参数设置、运行、绘图、结束的控制；弹出式菜单(listbox)作为仿真选项设置和绘制曲线选择；坐标区(axes)用于显示曲线；“多曲线显示”单选按钮用于实现多条曲线在同一坐标区内的显示。基于这些按钮控件，所设计的人机交互界面如图 6 所示。

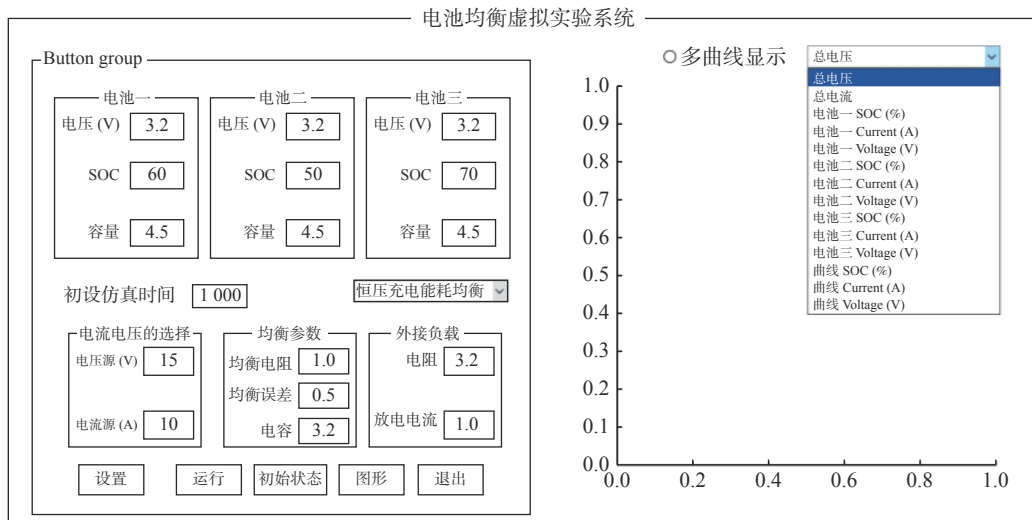


图 6 电池均衡虚拟实验系统 GUI 界面

仿真类型由充电、放电、均衡 3 种模式组合而成。其中，充电模式有恒压充电、恒流充电两种类型；放电模式有定倍率放电和定电阻负载放电两种类型；均衡模式有充电均衡、放电均衡、断电均衡 3 种类型，均衡方式有能耗均衡、能量转移均衡两种类型。为此，设置 3 个控制变量：

balance_mode、Control_d、Control_i_v，分别表示均衡状态、充放电控制选择、电压电流源选择。3 个变量组合，产生充电能耗均衡、恒流充电能耗均衡、恒流放电不均衡等共 15 种仿真类型选项。定义变量 P_mode 为 Listbox 控件空间的输出值，15 种仿真类型与 P_mode 之间的逻辑关系如表 1 所示。

表 1 仿真状态表

仿真类型	恒压充电能耗均衡	恒流充电能耗均衡	断电能耗均衡	放电能耗均衡	恒流放电能耗均衡	恒压充电能量转移均衡	恒流充电能量转移均衡	断电能量转移均衡	放电能量转移均衡	恒流放电能量转移均衡	断电不均衡	恒压充电不均衡	恒流充电不均衡	放电不均衡	恒流放电不均衡
balance_mode	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0
Control_d	1	1	0	-1	-1	1	1	0	-1	-1	0	1	1	-1	-1
Control_i_v	1	-1	0	0	-1	1	-1	0	0	-1	0	1	-1	0	-1
P_mode	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

2.3 数据通信

前面板与 Simulink 程序分属两个不同的参数空间，前面板 GUI 的 Edit 控件所输入的为字符串类型，Simulink 无法读取前面板所赋值的参数。因此需要通过函数 str2num() 和 assignin() 将 GUI 界面输入的字符串型数据转化为数字数据，并分配到 Simulink 空间。以电池 1 的 SOC 初值赋值为例，通过输入程序“SOC1=str2num(get(handles.edit2, 'String'))；”实现将编辑框 edit2 中输入的字符串变成数值赋给参数 SOC1，通过“assignin('base','SOC1',SOC1);”程序实现将 GUI 中的 SOC1 参数变成 Simulink 可以调用的参数 SOC1。

此外，点击前面板的“运行”按钮时，需

调用 Simulink 仿真模型，才能进行仿真，并输出仿真结果。通过在回调函数中添加程序语句“simout=sim('zong_bat_sim_system_1.mdl','Save-Output','on','OutputSaveName','youtNew');”可实现这一功能。

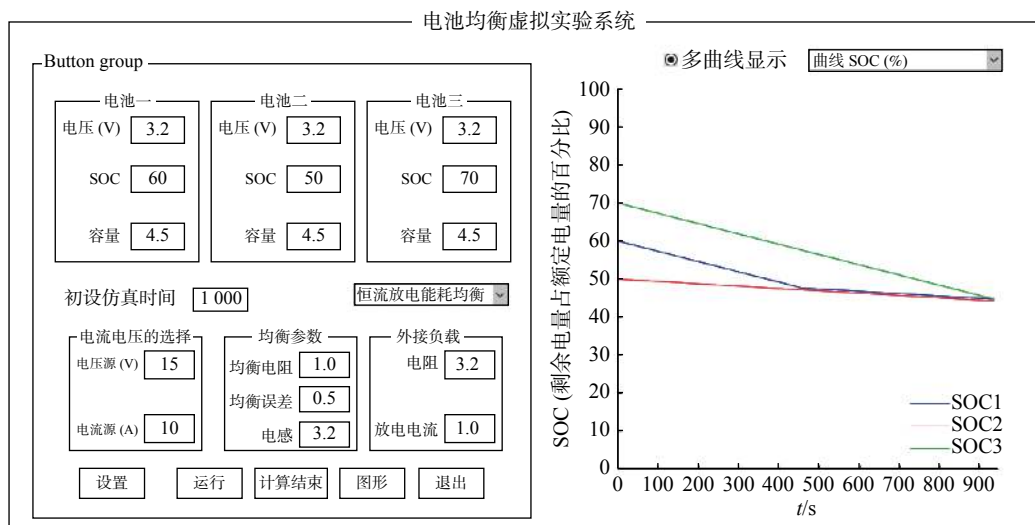
3 仿真实例测试

为验证系统功能，以恒流放电均衡为例，进行均衡过程的仿真测试。首先设置电池的参数、放电电流及初步预估的运行时间，选择均衡类型为“恒流放电能耗均衡”或“恒流放电能量转移均衡”；然后点击设置按钮，将参数传送到 Simulink 参数区中；最后点击“运行”按钮，开

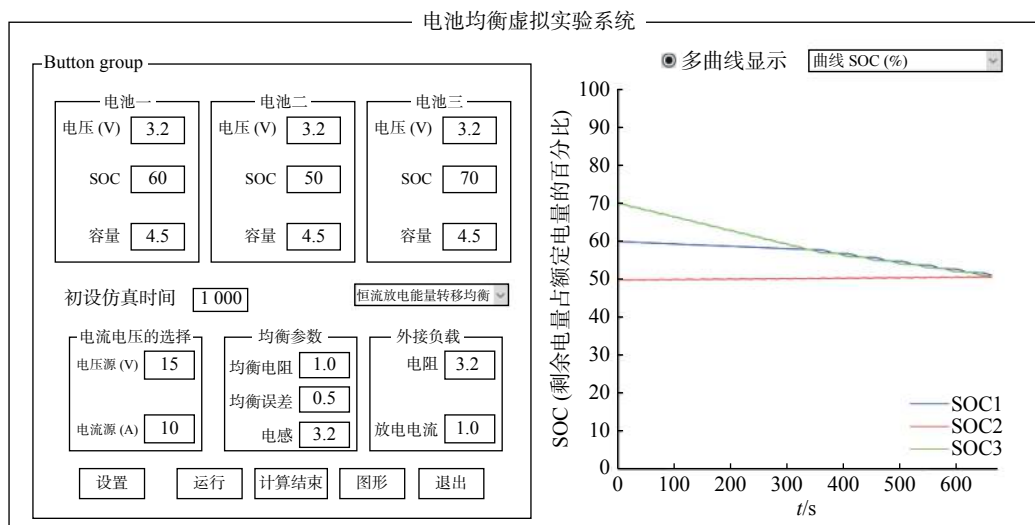
始仿真。此时，“运行”按钮旁边的静态文本框中的文字由“初始状态”变成“计算开始”。仿真完成时，该静态文本框的文字重新变为“计算结束”。

“恒流放电能耗均衡”及“恒流放电能量转移均衡”的参数设置及均衡后的 SOC 曲线分别在

图 7(a)、图 7(b)中显示。图 7(a)的 SOC 曲线表明，3 个电池都在放电，原 SOC 较大的电池在加速放电，直至其 SOC 与原 SOC 最小的电池的 SOC 一样后，放电速度减小到与原 SOC 最小的电池的放电速度一致。整个过程均衡时间小于 1 000 s，均衡误差在 0.5 之内。



(a) 恒流放电能耗均衡



(b) 恒流放电能量转移均衡

图 7 恒流放电均衡参数设置及结果

图 7(b)中的 SOC 曲线表明：开始时，原 SOC 最大的电池在加速放电，但原 SOC 处于中间的电池放电速度很慢；当两个电池 SOC 一样时，两电池同时加速放电；原 SOC 最小的电池的 SOC 一直处于缓慢上升状态。两种均衡模式的仿真，直观地验证了能量转移均衡相对于能耗

均衡的优越性，加深了学生对电池均衡功能的理解。

计算过程中，Simulink 会自动弹出 3D 仿真场景。图 8(a)为仿真进行过程中的场景状态，图 8(b)为仿真结束时的场景状态。该场景可以清晰地展示出电池的 SOC 动态变化状态。

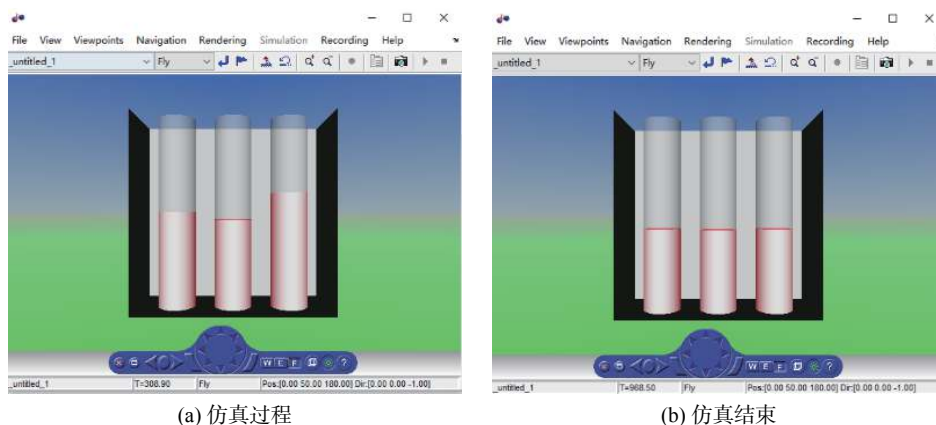


图8 恒流放电能耗均衡电池 SOC 三维场景显示

4 虚拟实验设计

作为课堂教学的补充，该系统提供了一个电池组充放电、均衡仿真平台。学生可通过修改参数，进行15种类型的仿真，测试电池SOC、电压、电流变化规律；理解能耗、能量转移均衡的实现过程。基于该平台，可设计以下两个虚拟实验项目。

1) 电池充放电虚拟实验

该实验主要完成断电、充电、放电3种模式下的测试，目的是让学生认识开路电压、SOC、工作电压、电流等参数的关系，为进一步的电池等效电路模型设计做准备。

① 断电状态下，通过修改电池SOC的值，查看、记录电池的电压时间曲线，绘制开路电压-SOC曲线，思考开路电压与SOC之间的关系。

② 充放电模式下，通过设置高、中、低3种不同倍率的电流，进行充电和放电，获取电压、SOC随时间的变化曲线，思考SOC的计算方法。

③ 在放电模式下，采用外接负载为电阻，进行放电测试，记录电压时间曲线、电流时间曲线。

实验结束后，基于电池等效电路模型的理论知识，进行数据分析。首先将开路电压-SOC曲线和充放电的电池工作电压-SOC曲线放在一张图上，对比分析开路电压与工作电压之间的区别和联系；其次分析恒电阻放电的电压曲线、电流曲线与恒电流放电的曲线，思考它们之间的区别。这一虚拟实验，可加深学生对电池模型及电池的充放电特性的理解和掌握。

2) 电池均衡虚拟实验

该实验的目的是让学生熟悉电池的两类均衡方法及均衡效果，理解均衡算法的设计思路，便

于进行均衡系统设计。该实验内容分成演示验证、原理分析两部分。

① 在演示验证部分，3节电池输入不同的SOC值，选择不同均衡模式进行仿真分析，记录SOC曲线、电流曲线、电压曲线，分析电池电流的变化规律，思考能耗均衡与能量转移均衡的作用及应用场景。

② 在原理分析部分，打开软件调用的Simulink仿真模型，找到均衡模块，分析、学习能耗均衡、能量转移均衡的硬件电路及均衡算法的实现原理，为进一步的基于模型的算法设计做准备。

5 结束语

本文给出了基于MATLAB软件及其Simulink模块的电池组充放电均衡的虚拟仿真平台的设计方法，并进行了电池恒流放电均衡的仿真验证。该平台依托于Simulink电池模型，进行充放电均衡仿真实现，通过GUI界面控制，具有很高的仿真精度与可靠性，且便于操作，可行性与实用性很强。

与传统实验教学过程相比，该仿真平台具有以下3点优势。

1) 可视化效果好，能显示各电池的SOC状态，展示电池充放电、均衡等过程的电压、电流、SOC变化规律，便于学生理解课程知识，进行均衡控制、电池充放电的实验。

2) 已开发15种仿真模式，实现了充电、断电、放电等过程的能耗均衡、基于电容的能量转移均衡。以此为基础，可以拓展出更多的仿真模型和仿真模式，涵盖整个电池管理系统的所有知识点，便于教师合理安排实验教学和进行翻转课堂教学。

(下转第62页)