DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.9.288 中图分类号：TM724 文献标志码：A

一种基于 WPT 的新型电池均衡结构系统

刘意轩[1]，张 淼[1]，肖伸平[2](中国电源学会高级会员)
(1.广东工业大学自动化学院，广州 510006；2.湖南工业大学电气与信息工程学院，株洲 412007)

摘要：为解决均衡系统中电池外部接线复杂、集成度低、不利于维护的问题，提出一种基于无线电能传输WPT(wireless power transfer)的新型电池均衡结构系统。该系统将无线传能线圈、电池、均衡控制单元集成，利用中继线圈，使任意2个不均衡单元之间建立能量交换通道；通过引入LCC谐振网络，抑制来自非均衡单元的能量影响。同时，针对均衡过程中电池负载变化引起的效率下降问题，提出一种最大效率追踪MET(maximum efficiency tracking)的均衡控制方案。该方案控制半有源整流器SAR(semi-active rectifier)模拟最佳负载，使系统始终运行在最大效率点。为了验证系统的可行性，设计了一个六线圈均衡实验平台。实验结果证实了所提出的新型结构系统及控制方案的有效性，与同类型基于WPT的均衡系统相比，均衡过程中能量传递的效率明显提高。

关键词：无线电能传输；最大效率追踪；电池均衡；电动汽车

A Novel Battery Balancing Structure System Based on Wireless Power Transfer

LIU Yixuan[1], ZHANG Miao[1], XIAO Shenping[2], *Senior Member*, *CPSS*
(1. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China)

Abstract: A novel architecture for battery balancing systems based on wireless power transfer (WPT) is proposed to address the challenges of complex external wiring, low integration and poor maintainability. In this system, wireless power transfer coils, batteries, and the balancing control unit are integrated into a single structure. By incorporating relay coils, energy exchange pathways between any two imbalanced units are established. An LCC resonant network is introduced to suppress interference from non-imbalanced units during energy transfer. To overcome efficiency degradation caused by variations in battery load during balancing, a maximum efficiency tracking (MET) control strategy is developed. This strategy employs a semi-active rectifier (SAR) to emulate the optimal load, ensuring the system consistently operates at its maximum efficiency. To verify the feasibility of the proposed system, a six-coil balancing experimental platform is constructed. Experimental results confirm the effectiveness of the proposed architecture and control strategy, demonstrating significantly enhanced energy transfer efficiency during balancing compared with existing WPT-based systems.

Keywords: Wireless power transfer (WPT); maximum efficiency tracking (MET); battery equalization; electric vehicles

锂离子电池单体采用串联和并联方式构成电池组，广泛应用于电动汽车中[1]。由于制造工艺差异，电池单元间的参数常存在明显的不一致问题，这不仅降低电池组容量，缩短使用寿命，还增加了过充、过放的风险[2]。电池均衡技术作为解决电池组参数不一致问题的有效手段，已得到广泛关注[3-5]。

均衡方式可分为被动均衡和主动均衡2大类。

收稿日期：2024-12-02；**修回日期：**2025-01-02，2025-01-17；
录用日期：2025-02-17；**网络首发日期：**2025-03-26
基金项目：国家重点研发计划资助项目(2019YFE0122600)
This work is supported by National Key Research and Development Program of China under the grant 2019YFE0122600

被动均衡方式通过分流电阻耗散多余的能量[6]，成本低、结构简单，但存在较大的能量损失和热管理问题。主动均衡方式能量利用率高、均衡速度快，已成为研究热点。文献[7]采用多输出变压器实现模块间能量交换，有效减少了开关数量[8-9]，但均衡性能受变压器不同绕组参数一致性(如漏电感)影响，给变压器设计带来一定难度。文献[10-11]提出一种基于脉冲宽度调制 PWM(pulse-width modulation)变换器实现电压均衡的方法，具有较高的集成密度，但这种方法往往需要大量导线连接至电池管理系统 BMS(battery management system)，增加了高密封环境下的维护难度，影响系统可靠性。

无线电能传输 WPT(wireless power transfer)技术利用电磁耦合传输能量，输出与接收设备之间无需导线连接，已广泛应用于医疗设备[12]、无人机[13]及电动汽车[14]等领域。文献[15-16]采用 WPT 均衡技术实现了电池组间能量均衡，避免了多绕组变压器因铁心损坏引发短路和过热问题[17]。但该方案需要一个额外的能量储存单元，无法实现电池组间能量的直接传递，导致传递环节增多、能量损耗增加。基于 WPT 技术在电池组均衡过程中的效率优化问题仍需解决。

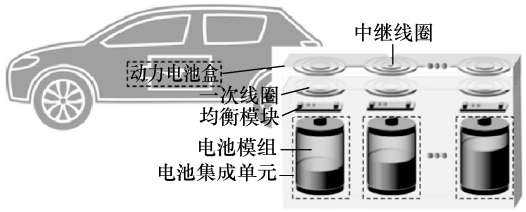
最大效率追踪 MET(maximum efficiency tracking)控制方案常用于提高 WPT 系统效率。文献[18]采用无源 T 型匹配网络实现阻抗匹配，但额外引入继电器、电容和电感增大了系统的体积和质量，降低了系统的能量密度；文献[19]通过控制半无桥有源整流器 SAR(semi-bridgeless active rectifier)移相角优化负载阻抗；文献[20]同时调节逆变器的脉冲宽度、SAR 的移相角和脉冲宽度，在失谐条件下实现了阻抗匹配。然而，这些方案中的移相控制会引入额外的无功分量，降低系统整体效率。

针对上述问题，本文提出一种基于 WPT 的新型多线圈动力电池均衡结构和 MET 均衡控制方法，实现电池组与均衡控制单元的集成。基于此结构设计的 LCC-S-LCC 拓扑无需中间储能单元，可以实现电池组间能量的直接传递，便于维护，适用于电动汽车。此外，所提控制方法能实现负载纯阻性匹配，减少无功分量，进而提高在能量传递过程中的传输效率。

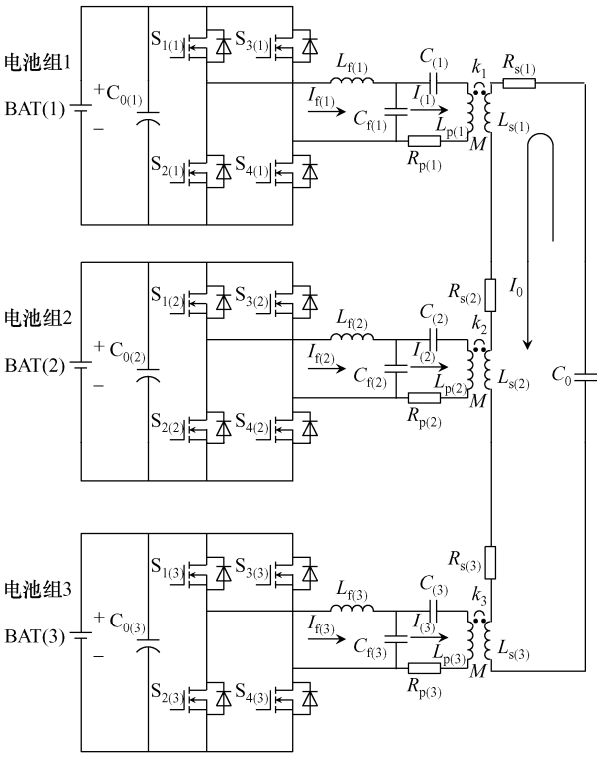
1　理论分析

1.1　系统结构

所提新型系统结构框架如图 1 所示。3D 示意如图 1(a)所示，由 n 个功率交换单元和 1 个中继谐



(a) 3D示意



(b) 系统拓扑结构

图 1　系统框架图

Fig. 1 Frame diagram of system

振电路组成，所有单元具有相同的电路配置。以 3 个电池组系统为例，其拓扑结构如图 1(b)所示，系统包含电池组 BAT(1)~BAT(3)、直流滤波电容 $C_{0(1)}$~$C_{0(3)}$、高频全桥变换器、LCC 谐振网络和一次侧耦合线圈自感 $L_{p(1)}$~$L_{p(3)}$。LCC 谐振网络由并联谐振电感 $L_{f(1)}$~ $L_{f(3)}$、并联谐振电容 $C_{f(1)}$~$C_{f(3)}$和串联谐振电容 $C_{(1)}$~ $C_{(3)}$组成。$R_{p(1)}$~$R_{p(3)}$和 $R_{s(1)}$~$R_{s(3)}$分别为一次侧耦合线圈和二次侧耦合线圈的寄生电阻。中继谐振电路由中继串联谐振电容 C_0 和二次侧耦合线圈自感 $L_{s(1)}$~$L_{s(3)}$组成。所有一次线圈与二次线圈的耦合系数 k_1~k_3 均相同。

1.2 模型分析

假设电池组 1 与电池组 2 工作在均衡过程中，且电池组 1 电压高于电池组 2。控制电池组 3 的 MOSFET 管 $S_{2(3)}$、$S_{4(3)}$导通，系统的等效电路如图 2 所示。图中：Z_{in} 为电池组 1 发射端的等效总阻抗；$R_{BAT(2)}$为电池组 2 在其交流侧的等效电阻。电池组直流电压 $U_{BAT(i)}$(i=1, 2, 3)与逆变器输出电压 $U_{ac(i)}$的关系可表示为

$$U_{ac(i)}=\frac{2\sqrt{2}U_{BAT(i)}}{\pi} \qquad i=1,2,3 \tag{1}$$

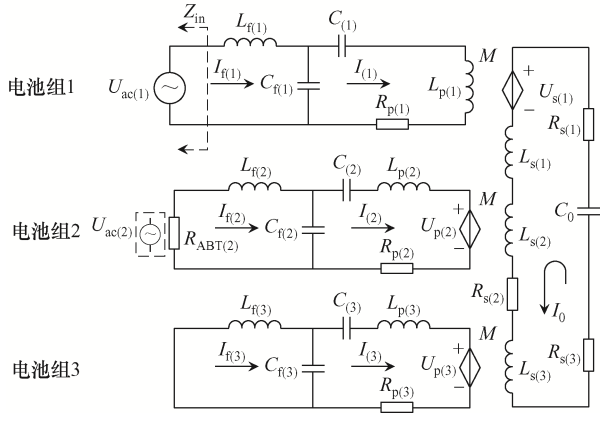


图 2 等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit

为了便于分析，采用基波近似分析法 FHA(first harmonic approximation)。假设耦合线圈的寄生电阻具有相同阻值 R，基于基尔霍夫电压定律 KVL (Kirchhoff's voltage law)，该拓扑可描述为

$$\begin{cases}
U_{ac(1)}=\left(\mathrm{j}\omega L_{f(1)}+\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C_{f(1)}}\right)I_{f(1)}-\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C_{f(1)}}I_{(1)}\\
\left(\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C_{(1)}}+\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C_{f(1)}}+\mathrm{j}\omega L_{p(1)}+R\right)I_{(1)}+\mathrm{j}\omega MI_0-\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C_{f(1)}}I_{f(1)}=0\\
\left(\sum_{i=1}^{3}\mathrm{j}\omega L_{s(i)}+\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C_0}+3R\right)I_0+\mathrm{j}\omega MI_{(1)}+\mathrm{j}\omega MI_{(2)}=0\\
\left(\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C_{(2)}}+\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C_{f(2)}}+\mathrm{j}\omega L_{p(2)}+R\right)I_{(2)}+\mathrm{j}\omega MI_0-\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C_{f(2)}}I_{f(2)}=0\\
\left(R_{BAT(2)}+\mathrm{j}\omega L_{f(2)}+\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C_{f(2)}}\right)I_{f(2)}-\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C_{f(2)}}I_{(2)}=0\\
\left(\mathrm{j}\omega L_{f(3)}+\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C_{f(3)}}\right)I_{f(3)}-\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C_{f(3)}}I_{(3)}=0\\
\left(\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C_{(3)}}+\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C_{f(3)}}+\mathrm{j}\omega L_{p(3)}+R\right)I_{(3)}+\mathrm{j}\omega MI_0-\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C_{f(3)}}I_{f(3)}=0
\end{cases} \tag{2}$$

式中：ω 为角频率；$I_{f(i)}$、$I_{(i)}$、I_0 分别为第 i 组电池电流、其所在一次侧线圈电流、中继线圈电流；M 为互感。

为了消除系统的无功功率，需使系统工作在谐振状态，即

$$\omega^2=\frac{1}{L_{f(i)}C_{f(i)}}=\frac{1}{\sum_{i=1}^{3}L_{s(i)}C_0}=\frac{1}{(L_{p(i)}-L_{f(i)})C_{(i)}}$$
$$i=1,2,3 \tag{3}$$

将式(3)代入式(2)，可得非工作电池组 3 中流经一次侧耦合线圈的电流为

$$I_{(3)}=0 \tag{4}$$

由式(2)~式(4)可得，Z_{in} 为

$$Z_{in}=\frac{3\omega^4L_{f(1)}^2L_{f(2)}^2R+3\omega^2L_{f(1)}^2R^2R_{BAT(2)}+\omega^4L_{f(1)}^2M^2R_{BAT(2)}}{3\omega^2L_{f(2)}^2R^2+\omega^4L_{f(2)}^2M^2+3R^3R_{BAT(2)}+2\omega^2M^2RR_{BAT(2)}} \tag{5}$$

当系统工作在谐振状态时，耦合线圈的内阻一般远小于线圈电感和电池等效电阻，故可以忽略。若各支路参数均相同，则

$$Z_{\text{in}} \approx R_{\text{BAT(2)}} \tag{6}$$

由式(2)、式(5)、式(6)可知，在满足式(3)条件下，均衡系统仅传输有功功率，谐振频率与负载及互感无关。由式(2)~式(4)可知，非工作电池组的一次侧耦合线圈不会在中继线圈上产生感应电压，也不会对进行能量交换电池组的传输性能产生影响。

1.3 效率分析

由式(2)和式(3)可得，输出电流 $I_{\text{f(2)}}$为

$$I_{\text{f(2)}} = \frac{L_{\text{f(2)}} M^2 U_{\text{ac(1)}} \omega^2}{L_{\text{f(1)}}(L_{\text{f(2)}}^2 R\omega^2 + R^2 R_{\text{BAT(2)}} + M^2\omega^2 R_{\text{BAT(2)}})} \tag{7}$$

根据电池组 1 输出功率 $P_1 = U_{\text{ac(1)}} I_{\text{f(1)}}$，电池组 2 输出功率 $P_2 = I_{\text{f(2)}}^2 R_{\text{BAT(2)}}$，可得系统效率 η 为

$$\begin{aligned}\eta = {} & L_{\text{f(2)}}^2 M^4 \omega^6 R_{\text{BAT(2)}} / (L_{\text{f(2)}}^4 R^3\omega^4 + L_{\text{f(2)}}^4 M^2 R\omega^6 + \\ & 2L_{\text{f(2)}}^2 R^4\omega^2 R_{\text{BAT(2)}} + 4L_{\text{f(2)}}^2 M^2 R^2\omega^4 R_{\text{BAT(2)}} + \\ & L_{\text{f(2)}}^2 M^4\omega^6 R_{\text{BAT(2)}} + R^5 R_{\text{BAT(2)}}^2 + \\ & 3M^2 R^3\omega^2 R_{\text{BAT(2)}}^2 + 2M^4 R\omega^4 R_{\text{BAT(2)}}^2)\end{aligned} \tag{8}$$

根据式(8)可知，η 与 M 和 $R_{\text{BAT(2)}}$相关。当线圈间耦合系数恒定时，η 对 $R_{\text{BAT(2)}}$的二阶导数恒为负，系统效率存在 1 个最佳负载数 $R_{\text{BAT,opt}}$。假设每个单元的参数相同，若 η 对 $R_{\text{BAT(2)}}$的导数为 0($\partial\eta/\partial R_{\text{BAT(2)}}$=0)，则系统最大效率 η_{MAX} 对应的最佳负载点阻值 $R_{\text{BAT,opt}|\eta=\eta_{\text{MAX}}}$ 为

$$R_{\text{BAT,opt}|\eta=\eta_{\text{MAX}}} = \frac{L_{\text{f}}^2\omega^2\sqrt{R^2 + M^2\omega^2}}{\sqrt{R^4 + 3M^2R^2\omega^2 + 2M^4\omega^4}} \tag{9}$$

为使上述分析结果更加直观，根据式(9)和表 1 所列出的系统参数，图 3 给出了 $R_{\text{BAT(2)}}$在 0~50 Ω 范围下对应不同耦合系数 k 的效率曲线。可以看出，在均衡过程中，当等效负载偏离最佳负载时，明显影响了系统均衡效率。

表 1　设计参数

Tab. 1 Design parameters

参数	数值
系统频率 f/kHz	85.00
并联谐振电感 $L_{\text{f(1)}}$~ $L_{\text{f(3)}}$/μH	15.00
并联谐振电容 $C_{\text{f(1)}}$~$C_{\text{f(3)}}$/nF	62.74
串联谐振电容 $C_{\text{(1)}}$~$C_{\text{(3)}}$/nF	233.73
耦合线圈 $L_{\text{p(1)}}$~ $L_{\text{p(3)}}$、$L_{\text{s(1)}}$~$L_{\text{s(3)}}$/μH	70.00
中继串联谐振电容 C_0/nF	25.042
寄生电阻 $R_{\text{s(1)}}$~$R_{\text{s(3)}}$、$R_{\text{p(1)}}$~$R_{\text{p(3)}}$/Ω	0.15
耦合系数 k	0.10~0.25

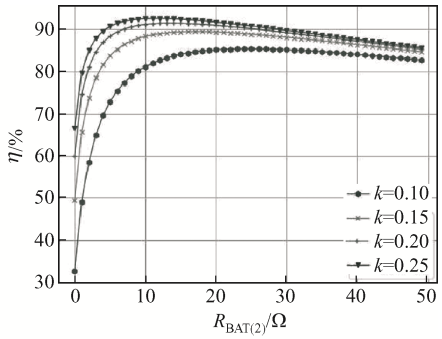


图 3　$R_{\text{BAT(2)}}$为 0~50 Ω 时不同 k 条件下的效率曲线

Fig. 3 Efficiency curves under different k conditions when the $R_{\text{BAT(2)}}$ is 0~50 Ω

2　MET 均衡控制策略

2.1 MET 原理分析

为了便于分析，定义控制参数 α 为开启点，β 为占空比，γ 为从 SAR 交流电压 $U_{\text{o,ac}}$ 正半循环开始至 β 中点的角度。通过控制 $U_{\text{o,ac}}$ 的形状，改变交流电压的基波分量 $U_{\text{o,ac1}}$，实现对负载 $Z_{\text{o,ac}}$ 的控制，即

$$Z_{\text{o,ac}} = \frac{U_{\text{o,ac1}}}{I_{\text{o,ac1}}} \tag{10}$$

式中，$I_{\text{o,ac1}}$ 为交流电流的基波分量。

SAR 的开关顺序和波形如图 4 所示。对 $U_{\text{o,ac1}}$ 进行傅里叶变换，可得

$$\begin{cases} U_{\text{o,ac1}} = a_1\cos(\omega t) + b_1\sin(\omega t) \\ a_1 = \dfrac{2U_{\text{BAT}(i)}}{\pi}[\sin\alpha - \sin(\alpha+\beta)] & i = 1, 2, 3 \\ b_1 = \dfrac{2U_{\text{BAT}(i)}}{\pi}[\sin\alpha - \cos(\alpha+\beta) + 2] & i = 1, 2, 3 \end{cases} \tag{11}$$

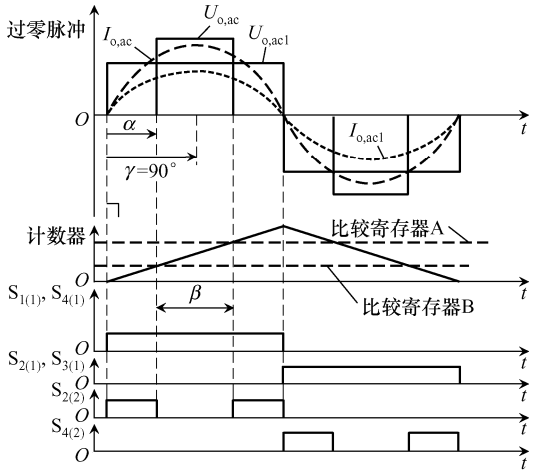


图 4 SAR 的开关顺序和工作波形

Fig. 4 Switching sequence and operating waveforms of SAR

根据系统具有的选频特点，只有 $U_{o,ac1}$ 与 $I_{o,ac1}$ 参与有功传输。假设全桥变换器的导通损耗忽略不计，即变换前、后功率一致，由直流接收侧功率 P_0 与 $U_{o,ac1}$ 可得

$$I_{o,ac1}=\frac{P_0}{U_{o,ac1}} \tag{12}$$

因此，所提出的 MET 控制策略如图 5 所示。图中：$U_{BAT,r}$ 与 $I_{BAT,r}$ 分别为均衡接收侧电池的电压与电流；P_{ref} 为此时系统的参考功率。该策略将 $P_{BAT,r}$ 与 P_{ref} 进行比较，继而将其差值送入比例积分 PI(proportional integral)控制器，得到的控制信号，与过零检测产生的相位角 α 共同产生 PWM 驱动信号，送入 SAR。在此过程中，对 α 的控制保证接收侧 SAR 的 MOSFET 启动时间和电流相位同步；控制 γ 保持在 90°，确保 $Z_{o,ac}$ 呈纯阻性，避免因额外电抗引起的无功功率传输；控制 β 调节 $U_{o,ac}$ 的大小使 $Z_{o,ac}$ 至最佳阻抗。

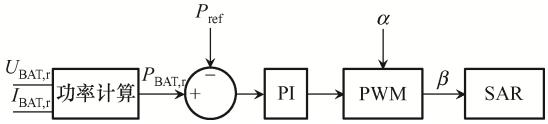


图 5 MET 控制策略

Fig. 5 Control strategy of MET

2.2 均衡策略

电池单体的一致性差异可通过一致性指标来表征，本文选用电压作为一致性指标。所提均衡控制策略的工作方式及流程如下。

步骤 1 测量电池组电压并设置均衡阈值 ε。

步骤 2 根据控制器间的通信鉴别均衡电池组与非工作电池组。设最大电压与平均电压之差为 $U_{BAT,\Delta1}$，平均电压与最小电压之差为 $U_{BAT,\Delta2}$。

步骤 3 当 $U_{BAT,\Delta1}$ 或 $U_{BAT,\Delta2}$ 大于 ε 时，对应最高电压电池对最低电压电池进行能量均衡。此时，根据式(10)~式(12)实现 MET 控制，根据式(3)和式(4)控制非工作电池组单元开关，使其工作在并联谐振状态，削弱能量干扰。

步骤 4 当 $U_{BAT,\Delta1}$ 和 $U_{BAT,\Delta2}$ 均小于 ε 时，均衡电路停止工作。

随着电池单元数量的增加，最大电压电池或最小电压电池的数量不止一个，如何有效选择均衡对象是均衡策略的核心问题。通过制定相应的规则，可以依次选择最大电压电池或最小电压电池。在本文中：当最高电压电池的个数不为 1 时，选择序号最小的电池进行放电均衡；当最低电压电池的个数不为 1 时，选择序号最大的电池进行充电均衡。

3 实验验证

为更好地验证所提控制方案与均衡拓扑的可行性，搭建如图 6 所示的实验样机，实验参数见表 2。因实验存在误差，表 2 实验参数与表 1 设计参数略有不同。

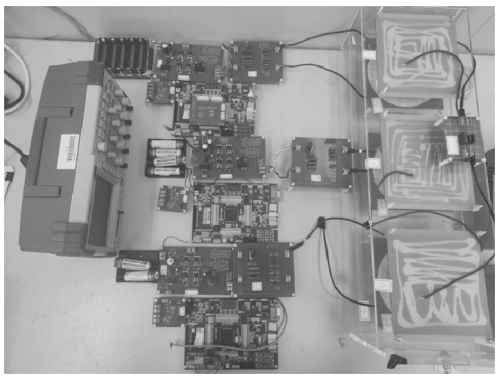


图 6 实验样机示例

Fig. 6 Example of experimental prototype

3.1 均衡拓扑验证

在 $U_{BAT(1)}$=17.2 V、$U_{BAT(2)}$=13.78 V、$U_{BAT(3)}$=15.49 V 实验条件下，自然均衡状态对应的 $U_{ac(1)}$、

表 2　实验参数

Tab. 2 Experiment parameters

参数	数值
系统频率 f/kHz	85.00
并联谐振电感 $L_{f(1)}$, $L_{f(2)}$, $L_{f(3)}$	16.82, 16.47, 15.59
并联谐振电容 $C_{f(1)}$, $C_{f(2)}$, $C_{f(3)}$	208.44, 212.94, 224.80
串联谐振电容 $C_{(1)}$, $C_{(2)}$, $C_{(3)}$	54.90, 55.50, 55.70
中继串联谐振电容 C_0/nF	15.57
耦合线圈自感 $L_{p(1)}$, $L_{p(2)}$, $L_{p(3)}$	81.04, 79.19, 78.28
中继耦合线圈 $L_{s(1)}+L_{s(2)}+L_{s(3)}$/μH	225.15
耦合系数 k	0.164

$I_{f(1)}$与 $U_{ac(2)}$、$-I_{f(2)}$的实验波形如图 7 所示。可以看出，在自然均衡状态下，$U_{ac(1)}$和 $I_{f(1)}$间的相位差接近 0，表明该拓扑在能量传递过程中几乎仅传递有功功率。此外，电池组 3 作为非工作单元工作在并联谐振状态，不会对能量传输产生干扰。实验结果有效地证明了第 1.2 节所述理论分析的正确性和合理性。

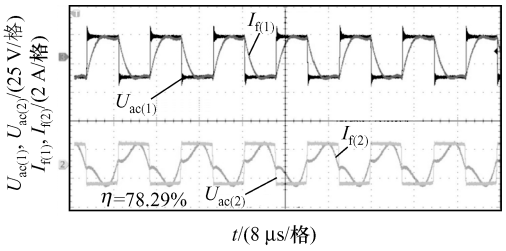


图 7　$U_{ac(1)}$、$I_{f(1)}$与 $U_{ac(2)}$、$-I_{f(2)}$波形

Fig. 7 Waveforms of $U_{ac(1)}$、$I_{f(1)}$ and $U_{ac(2)}$、$-I_{f(2)}$

3.2 最大效率追踪的均衡控制验证

为了验证所提出的 MET 均衡控制的有效性，在第 3.1 节实验条件下，图 8 给出了采用和不采用所提控制时，SAR 输入电压与输入电流波形。可以看出，两者具有相同的相位，交流等效负载为纯阻性，采用所提控制时的电流波形明显优于不采用所提控制。

图 9(a)为整个均衡过程中各电池组的电压变化情况。可以看出，所有电池组的电压都能收敛至相同水平，验证了所提系统的可行性。根据实验测试结果，不同方法的效率如图 9(b)所示。可以看出，本文所提均衡系统的效率在均衡过程中基本不变，始终保持在最大效率 85%左右。这表明，本文所提控制方法在效率性能方面明显优于其他同类均衡方法。

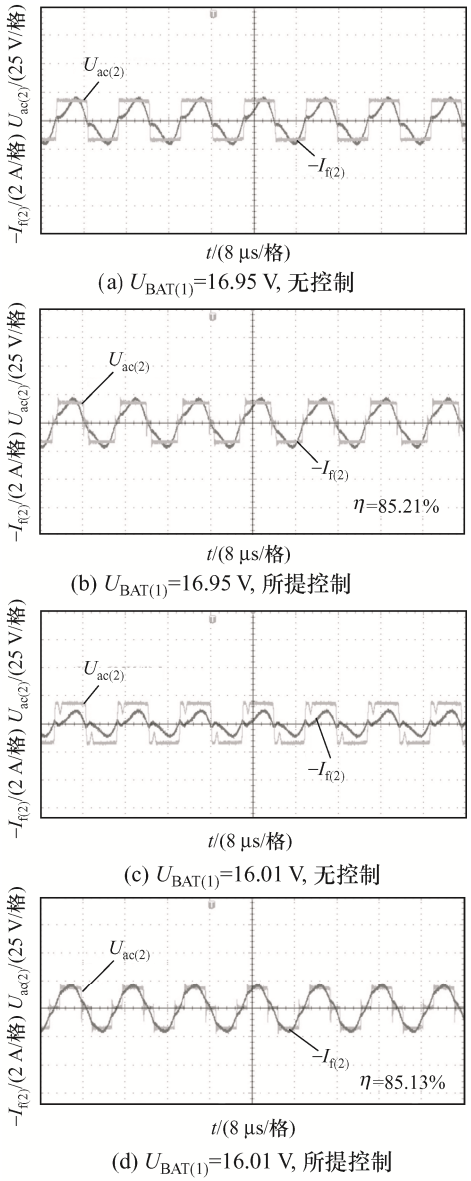
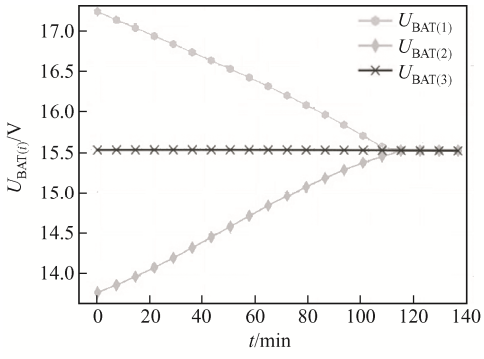
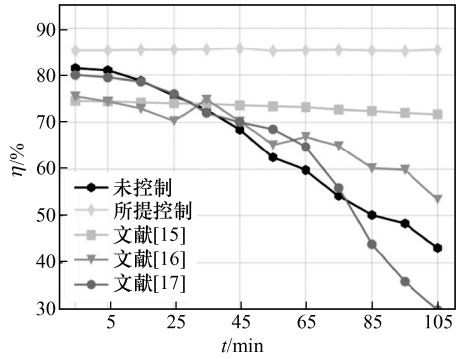


图 8　SAR 的电流电压波形

Fig. 8 Waveforms of SAR current and voltage



(a)各单元均衡电压



(b) 均衡过程中的效率对比

图 9 均衡特性图

Fig. 9 Diagram of balancing characteristic

4 结语

本文提出一种基于 WPT 的新型电池均衡结构系统及其均衡过程中效率优化的控制方法，抑制了不相关电池组的干扰。与现有均衡方法相比，本文所提方法减少了导线连接，简化了维护和安装过程，提升了系统的可靠性。此外，所提出的 MET 控制方法在均衡过程中，控制等效负载阻抗为纯阻性并保持在最佳值，使系统始终处于高效状态。实验验证了拓扑的有效性与控制方法的可行性。结果表明，与同类均衡方法相比，MET 均衡控制效率始终保持在 85%左右，效率得到明显改善。

参考文献：

[1] 齐火箭, 张新瑞, 王嘉宏, 等. 动力锂离子电池组均衡策略研究[J]. 电源学报, 2024, 22(2): 205-215.
Qi Huojian, Zhang Xinrui, Wang Jiahong, et al. Research on equalization strategy for power lithium-ion batteries [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(2): 205-215. (in Chinese)

[2] Wang Shiyu, Wang Yue, Chen Guicheng, et al. An efficient and compact equalizer based on forward-flyback conversion for large-scale energy storage systems [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2024, 10(1): 1222-1232.

[3] Liu Fulin, Zou Runmin, Liu Yonglu. An any-cell-to-any-cell battery equalizer based on half-bridge LC converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(4): 4218-4223.

[4] Bin Wali S, Hannan M A, Reza M S, et al. Battery storage systems integrated renewable energy sources: A biblio metric analysis towards future directions [J]. Journal of Energy Storage, 2021, 35: 102296.

[5] Hannan M A, Wali S B, Ker P J, et al. Battery energy-storage system: A review of technologies, optimization objectives, constraints, approaches, and outstanding issues [J]. Journal of Energy Storage, 2021, 42: 103023.

[6] Shang Yunlong, Zhu Chong, Fu Yuhong, et al. An integrated heater equalizer for lithium-ion batteries of electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(6): 4398-4405.

[7] Nazi H, Babaei E. A modularized bidirectional charge equalizer for series-connected cell strings [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(8): 6739-6749.

[8] Nie Jianglin, Fu Rui, Cai Chunjian, et al. A high efficiency battery equalizing circuit based on half bridge topology with multiport transformer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(3): 2522-2532.

[9] 吴冬春, 朱飞, 唐佳维. 基于多绕组变压器与倍压整流器级联的电池均衡充电器研究[J]. 电源学报, 2024, 22(6): 244-252.
Wu Dongchun, Zhu Fei, Tang Jiawei. Research on equalizing charger based on multi-winding transformer and cascaded double-voltage rectifiers [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(6): 244-252. (in Chinese)

[10] Uno M, Kukita A. PWM converter integrating switched capacitor converter and series-resonant voltage multiplier as equalizers for photovoltaic modules and series-connected energy storage cells for exploration rovers [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(11): 8500- 8513.

[11] Uno M, Tanaka K. Single-switch multioutput charger using voltage multiplier for series-connected lithium-ion battery/supercapacitor equalization [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(8): 3227-3239.

[12] 陈伟华, 宋宇航, 闫孝姮, 等. 心脏起搏器无线电能传输 LCC-LCC 磁集成印刷螺旋线圈研究[J]. 电工技术学报, 2024, 39(17): 5289-5299.
Chen Weihua, Song Yuhang, Yan Xiaoheng, et al. Research

on wireless power transmission for cardiac pacemakers using LCC-LCC magnetic integrated printed spiral coil [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(17): 5289-5299. (in Chinese)

[13] Shao Yaoxia, Kang Ning, Zhang Huan, et al. A light-weight and robust drone MHz WPT system via novel coil design and impedance matching [J]. IEEE Transac- tions on Industry Applications, 2023, 59(3): 3851-3864.

[14] 谢诗云, 杨奕, 李恋, 等. 基于双极性耦合磁场调控的高抗偏移偏转无线电能传输系统[J]. 电工技术学报, 2023, 38(18): 4838-4852.
Xie Shiyun, Yang Yi, Li Lian, et al. Wireless power transfer system with high misalignment tolerance based on bipolar coupling magnetic-field control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(18): 4838-4852. (in Chinese)

[15] Liu Ming, Fu Minfan, Wang Yong, et al. Battery cell equalization via megahertz multiple-receiver wireless power transfer [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(5): 4135-4144.

[16] Zhang Pengcheng, Yu Xinjie, Yang Qingxin, et al. Wireless power transfer-based voltage equalizer for scalable cell-string charging [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(1): 493-503.

[17] Liu Xinghua, Ma Tianyu, Tian Jiaqiang, et al. A novel double-layer active equalization scheme for lithium-ion batteries combining wireless power transfer [J]. Energy, 2024, 291: 130335.

[18] Li Siqi, Li Weihan, Deng Junjun, et al. A double-sided LCC compensation network and its tuning method for wireless power transfer [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(6): 2261-2273.

[19] Colak K, Asa E, Bojarski M, et al. A novel phase-shift control of semibridgeless active rectifier for wireless power transfer [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(11): 6288-6297.

[20] Mai Ruikun, Liu Yeran, Li Yong, et al. An active-rectifier-based maximum efficiency tracking method using an additional measurement coil for wireless power transfer [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(1): 716-728.



刘意轩

作者简介：

刘意轩(1998—　)，男，硕士，工程师。研究方向：无线电能传输。E-mail：2112204026@mail2.gdut.edu.cn。

张淼(1968—　)，男，通信作者，博士，教授。研究方向：电力电子与电力传动。E-mail：bezhangm@gdut.edu.cn。

肖伸平(1965—　)，男，中国电源学会高级会员，博士，教授。研究方向：时滞系统鲁棒控制理论及应用，电力时滞系统稳定性分析，工业网络控制、智能控制、过程控制。E-mail：xsp@hut.edu.cn。

(责任编辑：郭凯凯)