

基于主被动混合均衡的锂电池管理系统设计

王培仑, 栾兰, 李建, 刘宗振

(山东电工电气集团科学技术研究有限公司, 山东 济南 250101)

摘要:针对锂电池组因单体电池容量不一致导致的可用容量降低和寿命缩短问题,提出了一种基于主被动混合均衡的锂电池管理系统。该系统在充电阶段采用被动均衡“消峰”,通过负载电阻消耗电压最高电池的多余能量,在放电或静止阶段采用主动均衡“填谷”,利用整组能量为电压最低电池充电,从而提升整体性能。相较于传统反激式变压器方案,该设计电路更简单,且能同时满足充放电过程的实时均衡需求。实验结果表明,该系统显著提高了电池电压一致性,促进了容量恢复,为电池组的高效稳定运行提供了可靠保障。

关键词:锂离子电池组;电池管理系统;混合均衡;电压一致性

中图分类号:TP273

文献标志码:A

文章编号:1002-4026(2026)03-0121-08

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



Design of a lithium battery management system based on hybrid active-passive balancing

WANG Peilun, LUAN Lan, LI Jian, LIU Zongzhen

(Shandong Electrical Engineering & Equipment Science and Technology Research Co., Ltd., Jinan 250101, China)

Abstract : To address the issues of reduced available capacity and shortened lifespan in lithium battery packs caused by inconsistent capacities of individual cells, this paper proposes a lithium battery management system based on hybrid passive-active balancing. The system employs passive balancing for “peak clipping” during the charging phase by dissipating excess energy from the highest-voltage battery cell through a load resistor. During the discharging or idle phase, active balancing is used for “valley filling” by charging the battery cell with the lowest voltage using the energy from the entire pack, thereby enhancing the overall performance. Compared with traditional flyback transformer-based solutions, the proposed design features a simpler circuit and can meet the real-time balancing requirements during charging and discharging processes. The experimental results show that the system significantly improves the voltage consistency of the battery cells and facilitates capacity recovery, thus providing reliable support for the efficient and stable operation of the battery pack.

Key words : lithium-ion battery pack; battery management system; hybrid balancing; voltage consistency

锂离子电池管理技术是电化学储能、电动汽车领域的核心技术,随着国内工艺水平的提升,单体电池的安全性和循环寿命问题已得到显著改善,但电池成组后的一致性控制仍是行业技术瓶颈^[1-3]。研究表明,电池组 80% 的容量衰减和安全隐患源于单体间的不一致性,这使得电池均衡技术成为当前研究的重点方向。

当前电池均衡技术主要分为被动均衡^[4]和主动均衡^[5-8]两大类型。被动均衡通过开关控制电阻耗散多余能量^[9],虽然结构简单、成本低廉,但被动均衡的均衡原理导致了供电系统的能量浪费,且难以实现快速均衡,只能应用于电池不一致性相对较小的情况,而且由于被动均衡通常通过热量的形式进行能量的耗散,会导致在实际应用中存在较为严重的安全隐患^[10]。主动均衡方式可将能量高的电池能量转移到能量低的电池(即分散式主动均衡),或使用整组能量补充到单体最低的电池(即集中式主动均衡)^[11-14]。最新研究显示^[15],第三代主动均衡芯片已实现 3A 均衡电流和 92% 的峰值效率,但仍面临电路复杂度高、成本昂贵以及电磁干扰等技术挑战,如基于电容的主动均衡电路体积较小、成本较低,易于控制,但均衡速度受电池压差影响较大,在压差较小时均衡速度慢、效率低,难以实现零压差均衡;基于电感的均衡电路均衡速度快、均衡电流可控,但拓扑结构单一,往往仅能应用于集中式的电路结构^[16-17];变压器型均衡电路^[18-21]均衡速度快,但效率较低,电路体积较大,适合大功率均衡的场合;DC/DC 变换器型均衡电路均衡速度快、效率高,但控制复杂,且使用过多功率器件成本较高。

综上,本研究提出一种创新的主被动混合均衡架构。其技术突破体现在两个方面:(1)在充电过程中,系统采用高精度电压监测方案,实时识别电压最高单体电池,并通过开关将其接入负载电阻回路。相较于传统被动均衡方案,本系统采用分布式散热设计,避免局部温升过高,解决了传统方案热失控风险高的问题。(2)在静止或放电阶段,系统切换至主动均衡模式,以整组电池电压为输入源,利用特定的充电芯片对整组电池中电压值最低的单体电池进行精准补能,该方案均衡效率高,还能有效克服主动均衡技术在设计结构上的复杂性、较高的设计成本以及较大的空间占用等问题。通过上述方案,电池组的均衡管理得以在高效且经济的模式下达成,为电池管理系统的广泛推广和实际应用提供了有力支持。

1 主被动混合均衡系统设计

本文所设计的电池管理系统整体结构框图如图 1 所示。该系统主要由主控制器、电池状态检测模块、被动均衡模块、主动均衡模块、CAN 通信模块等部分构成。系统运行时,电池状态检测模块会实时采集电池箱内单体电池的电压、温度以及充放电电流等关键信息,随后将这些数据传输至主控制器。主控制器对采集到的数据进行分析与处理,并依据分析结果,通过控制被动均衡模块或主动均衡模块,实现整组电池的均衡功能。不仅如此,主控制器还肩负着将采集及控制信息,通过 CAN 通信模块上传至上位机或主控系统的重要任务,确保整个系统的信息交互与协同工作顺畅进行。

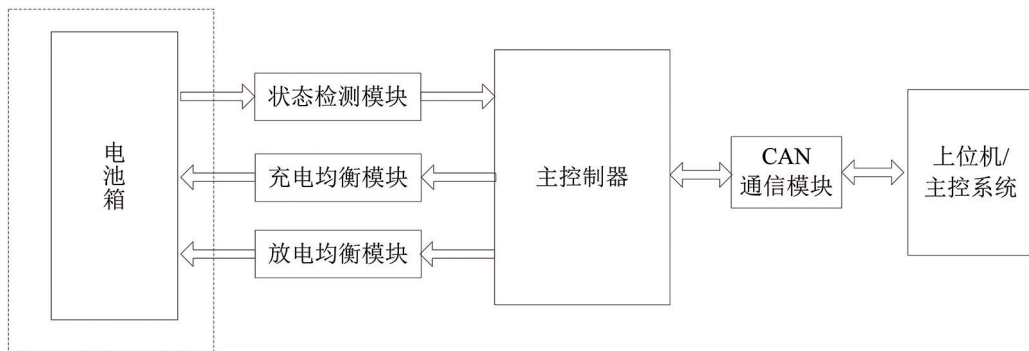


图 1 电池管理系统框图

Fig.1 Battery management system block diagram

1.1 电池状态检测模块

电池状态检测模块主要包括凌特 LTC6804 电池管理芯片^[22]及其相关电路,通过多个布置于电池箱内的热敏电阻温度传感器和一个充放电电流传感器,可实现电池箱内单体电池电压、电池总压、电池温度及充放电电流监测功能。每个 LTC6804 电池管理芯片可监测 12 节串联电池电压,并具备 5 路通用模拟输入接口和 12 路控制端口,芯片可串联使用,可堆叠式架构能支持几百个电池的监测。在本方案设计中,采用一个 LTC6804 芯片的电压检测端口(C0-C12)采集电池箱内 12 节单体电池电压,并自动计算 12 节电池总压;采用超光 FL-2 型 300 A/75 mV 分流器采集整箱电池充放电电流,电流转换信号经凌特 LT1636 运算放大器后接入 LTC6804 模拟输入接口 GPIO1,实现充放电电流检测功能;将 4 个布置于电池箱内的热敏电阻温度传感器接入 LTC6804 的模拟输入接口 GPIO2-GPIO5,实现电池箱内电池温度检测功能;通过芯片内置 SPI 接口将电池电压、电池温度、充放电电流等数据上传至主控制器。

1.2 主控制器

主控制器选用飞思卡尔 MC9S12G128F0MLH 主控芯片,MC9S12 系列主控芯片是一款专注于低功耗、高性能、低引脚数量的高效汽车级 16 位微控制器产品。该芯片具备一路 SPI 通信接口,可实现与 LTC6804 芯片通信功能,接收电池电压、温度、电流数据,并计算整箱单体电池电压最大值 V_{\max} 、最小值 V_{\min} 、平均值 V_{ave} 等参数;同时根据电流、电压值计算电池荷电状态(SOC);该芯片通过一路 CAN 通信接口与主控系统通信,实现实时数据和报警信息上传功能。

1.3 被动均衡模块

被动均衡模块包括电池选择回路及负载电阻接入回路,电池选择回路采用如图 2 所示的电路实现 V_{\max} 对应电池接入均衡母线,选择主控制器的 I/O₁ 端口及 LTC6804 芯片平衡输出接口($S_1 \sim S_{12}$)作为控制端口。上述 13 个出口依次控制 $J_0 \sim J_{12}$ 共 13 个 AB47S 光耦继电器,实现电池的隔离选通。如主控制器判断 B_2 电池电压最高,则输出控制命令使 S_2 、 S_3 管脚输出高电平,其余管脚输出低电平,继电器 J_1 、 J_2 导通,其余闭合,则 B_2 电池负极接入 B_x ,正极接入 B_y 。

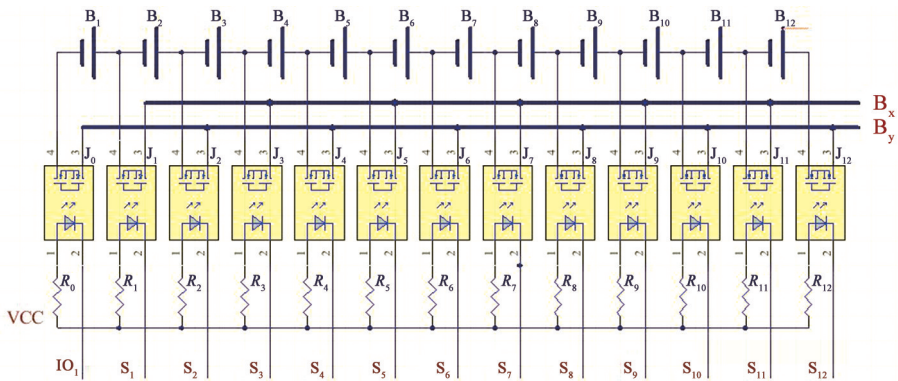


图 2 单体电池控制回路

Fig.2 Single cell control circuit

负载电阻接入回路如图 3 所示,由主控制器的 I/O₂ 端口控制开关 J_{20} 的通断状态实现负载电阻接入与切出母线。如电池 2 满足被动均衡条件,主控芯片通过 I/O₂ 管脚闭合 J_{20} 开关, B_2 电池通过均衡母线与负载电阻 R_{20} 形成回路,开始进行放电均衡。不同于常规被动均衡方式每一个电池单体都具有独立的开关和放电电阻,方案共用一个放电电阻,因此可适当增加电阻尺寸和均衡电流,方案选取 2 个 2512 封装 20Ω 贴片电阻并联作为负载

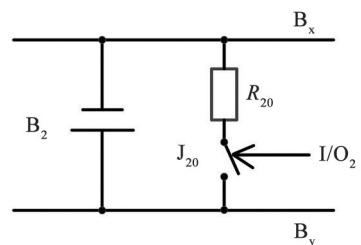


图 3 负载电阻接入回路

Fig.3 Circuit with load resistor connected

电阻,等效电阻 $10\ \Omega$,在电池电压超过 $4\ \text{V}$ 时均衡电流可达 $400\ \text{mA}$ 以上,相较于常规被动均衡方式的 $100\ \text{mA}$,均衡效果提升显著。

1.4 主动均衡模块

主动均衡模块包括充电回路和电池极性选择回路^[23]。充电回路可将整组电池做为电源给整组电压最低的单体电池进行充电,考虑磷酸铁锂电池电压范围是 $2.0\sim 3.7\ \text{V}$,三元锂电池电压范围是 $3.0\sim 4.3\ \text{V}$,12串电池总电压范围是 $24\sim 51.6\ \text{V}$,选用金升阳 URB4812YMD-15WR3 宽压输入隔离稳压电源模块进行电压变换,电源模块电压输入范围 $18\sim 75\ \text{V}$ 、输出端 $\text{DC}12\ \text{V}$ 、功率 $15\ \text{W}$;电源模块输出端与凌特 LT1511 充电芯片输入端相连,可实现最大 $3\ \text{A}$ 的输出电流,输出电流用于对电压最低的单体电池充电,充电效率 90% 以上。充电回路如图 4 所示。

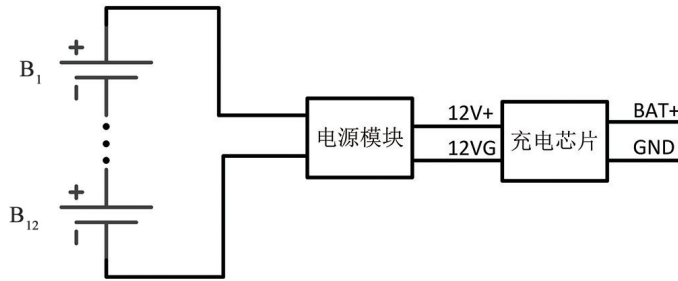


图 4 充电回路

Fig.4 Charging circuit

电池极性选择电路用于将接入母线的 V_{\min} 电池正负极与充电芯片的输出端正确相连。在主动均衡模式下,主动均衡模块复用电池选择回路,使开关 J_{20} 断开,将负载电阻 R_{20} 切出母线回路,然后将 V_{\min} 对应单体电池接入均衡母线,并通过图 5 控制电路使母线 B_x 、 B_y 与充电芯片 BAT+ 、 GND 正确相连。如主控制器判断 B_2 电池电压最低,则输出控制命令使 S_2 、 S_3 管脚输出高电平,其余控制管脚输出低电平,继电器 J_1 、 J_2 导通,其余闭合,则 2# 电池负极接入 B_x ,正极接入 B_y ,因此 OP_1 导通、 OP_2 关断,为了使 2# 电池正负极与充电芯片输出端准确相连,使主控制器控制端口 I/O_3 、 I/O_4 为输出高电平,则 J_{13} 、 J_{14} 导通, J_{15} 、 J_{16} 关断, B_y 与 BAT+ 导通、 B_x 与 GND 导通;反之,如 V_{\min} 电池正极接入 B_x ,负极为 B_y ,则 OP_2 导通、 OP_1 关断, I/O_3 、 I/O_4 输出高电平,相应 J_{15} 、 J_{16} 导通, J_{13} 、 J_{14} 关断,故 B_y 接入 GND , B_x 接入 BAT+ 。

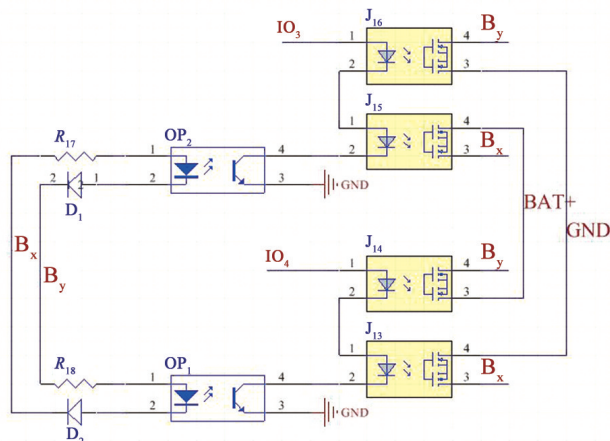


图 5 电池极性选择回路

Fig.5 Battery polarity selection circuit

2 系统软件设计

基于主被动混合均衡的电池管理系统通过电池状态检测模块实时检测电池组内单体电池电压、温度和充放电电流等信息,并计算整组电池总电压 V_{total} 、平均电压 V_{ave} 、最高电压 V_{max} 和最低电压 V_{min} 、充放电电流 I ,其中 $I>0$ 时为充电状态, $I\leq 0$ 时为放电或静止状态。判断充放电电流值,若 $I>0$,同时 $(V_{\text{max}} - V_{\text{ave}}) > 10 \text{ mV}$,证明电池组处于充电电压不平衡状态,此时开启被动均衡模式,将 V_{max} 对应单体电池接入负载电阻,直到 V_{max} 与 V_{ave} 的差值小于设定值;若 $I\leq 0$ 且 $(V_{\text{ave}} - V_{\text{min}}) > 10 \text{ mV}$,则开启主动均衡,将整组电压经 DC/DC 转换后接入充电芯片输入侧,充电芯片输出侧接入 V_{min} 对应单体电池,直到 V_{min} 与 V_{ave} 的差值小于设定值。混合均衡的系统流程图如图 6 所示。

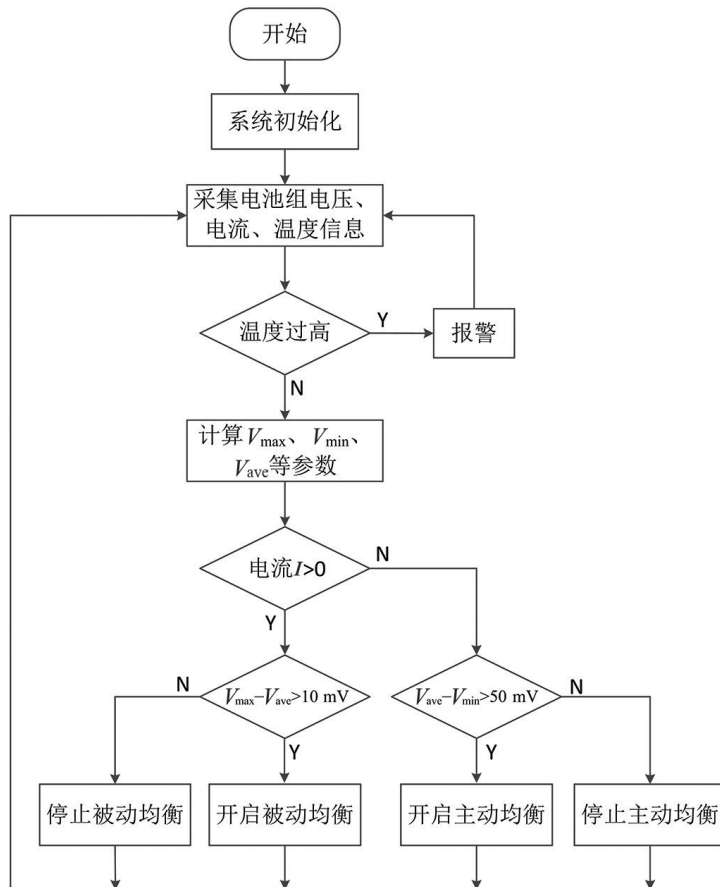


图 6 系统主流程图

Fig.6 Main system flowchart

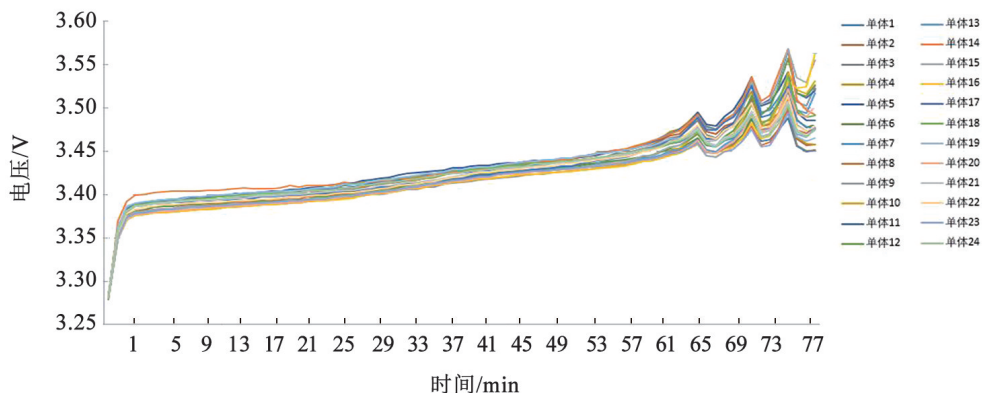
3 均衡效果评价

为进一步验证该混合均衡技术的实际应用效果,在青岛某电站开展了均衡功能对比试验。在试验期间,对一段时间内的电池组运行数据进行了详细统计。通过对比分析电池在具备均衡功能与不具备均衡功能两种条件下的各项性能指标,包括但不限于电池组整体电压一致性、各单体电池的充放电深度差异、电池寿命损耗情况等,精准评估该均衡技术所带来的实际效果。

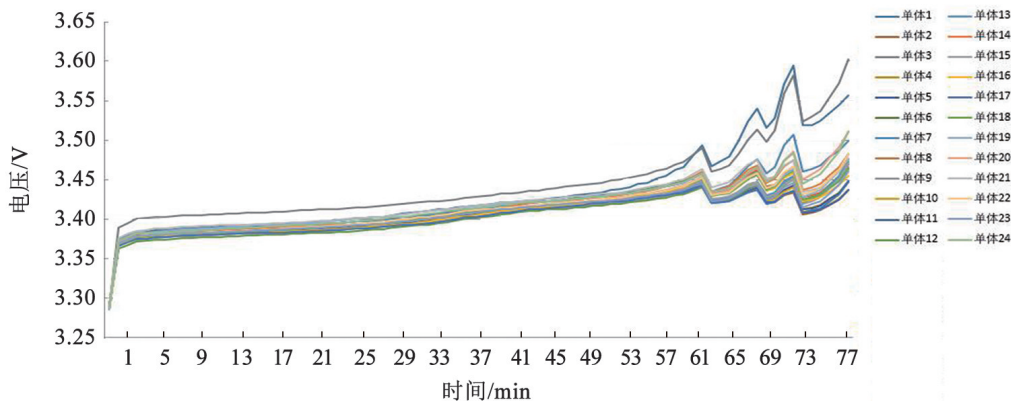
3.1 充电曲线历史趋势分析

图 7 为 2 组电池充电曲线,其中 1 箱第 8 节电池性能较差,容量较低,2 箱第 3、7 节性能较差,但第 1 箱电池具有均衡功能,在充电前期该电池电压高于其他单体,但后期均衡功能起作用后单体电压向平均电压收

敛,其终端充电电压低于最高电压,电池普遍达到满充状态。第2箱由于没有均衡功能,其容量较差的两节电池电压从充电初期一直高于平均电压,在充电末期高于其他电池 100 mV 并率先充满,不仅导致其余电池不能完全充满,长期过程更会加剧电池的不均衡性。



(a) 1箱电池充电曲线



(b) 2箱电池充电曲线

图7 有无均衡充电对比情况

Fig.7 Comparison of charging with and without balancing

以上可以看出,充电过程中,较差单体电池(容量较其他电池变小)很快会达到或接近满电状态,此时主动均衡功能可将其电量转移到最低电压单体,抑制较差单体电池电压过快上升,保证正常电池充电的同时,避免了较差电池单体的过充,使充电容量得到增加。

3.2 静态电压压差、标准差对比分析

电池静态电压的压差、标准差是衡量均衡功能是否有效的因素,表1为2组电池使用50 d后记录数据,无均衡电池箱内电池压差及标准差均明显高于有均衡电池箱。

表1 电池组压差、标准差对比

Table 1 Comparison of battery pack voltage difference and standard deviation

状态	箱组号	有/无均衡	V_{\max}/V	V_{\min}/V	压差/mV	标准差/mV
初始状态	1-1	有	3.640	3.631	9	248
	1-2	无	3.630	3.619	11	226
	2-1	有	3.636	3.631	5	160
	2-2	无	3.639	3.634	5	130

表1(续)

状态	箱组号	有/无均衡	V_{\max}/V	V_{\min}/V	压差/mV	标准差/mV
当前状态	1-1	有	3.576	3.514	62	1 653
	1-2	无	3.604	3.381	223	4 701
	2-1	有	3.594	3.547	47	1 178
	2-2	无	3.613	3.478	135	4 471

4 结论

该方案在充电均衡阶段,运用母线法将最高电压电池并联到负载电阻接入回路,借助负载电阻耗散能量,实现整组电池均衡,该方式采用单一负载电阻,电路布局简洁,并通过增大导线宽度及负载电阻功率适当提高其过流能力;在放电均衡阶段,采用DC-DC电源模块与专用充电芯片相结合方式,取代了反激式变压器架构的主动均衡方案,所选用电源模块及充电芯片具备体积小,成本低廉等优势,且无需大量外围电路支持,特别是取消反激式变压器的运用,极大简化了设计电路,使整个系统更为精简高效。

经现场应用验证,本方案提出的主被动混合均衡策略,在提升电池电压一致性、促进电池容量恢复方面成效显著。与文献[24]中提出的多模块协同均衡方法相比,本方案在电路复杂度和成本控制上更具优势。同时,该策略有效减少了外部均衡操作的频次,极大地降低了工作强度,为电池组的稳定运行与高效使用提供了有力保障。

参考文献:

- [1]徐俊,郭喆晨,谢延敏,等.储能锂电池系统综合管理研究进展[J].西安交通大学学报,2024,58(10):1-23. DOI:10.7652/xjtub202410001.
- [2]郭向伟,王晨,钱伟,等.电池储能系统均衡方法研究综述[J].电工技术学报,2024,39(13):4204-4225. DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.230684.
- [3]GUO X W, WU Q, XING C, et al.An active equalization method based on an inductor and a capacitor for series battery pack[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(3): 4040-4052. DOI:10.1109/TPEL.2022.3222333.
- [4]杜吉祥. 电池管理系统被动全均衡技术研究[D]. 重庆:重庆理工大学,2022.
- [5]刘红锐,李海瑞,韦向阳,等.一种模块化的高性能蓄电池均衡器研究[J].电工技术学报,2023,38(17):4574-4585. DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.221212.
- [6]阮观强,曹金良,符啸宇,等.主被动均衡电池管理系统设计[J].科学技术与工程,2023,23(34):14609-14617. DOI:10.3969/j.issn.1671-1815.2023.34.016.
- [7]VOUGA T, BAUD R, FASOLA J, et al.INSPIRE-a modular and passive exoskeleton to investigate human walking and balance [C]//2023 International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR). Singapore: IEEE, 2023: 1-6. DOI:10.1109/ICORR58425.2023.10304706.
- [8]郭兆东. 储能锂电池状态估计及主动均衡策略研究[D]. 北京:北方工业大学,2024. DOI:10.26926/d.cnki.gbfgu.2024.000425.
- [9]陈涛. 电池系统均衡技术研究[J]. 通信电源技术, 2020, 37(9): 32-35. DOI:10.19399/j.cnki.tpt.2020.09.008.
- [10]KIM C H, PARK H S, KIM C E, et al. Individual charge equalization converter with parallel primary winding of transformer for series connected lithium-ion battery strings in an HEV[J]. Journal of Power Electronics, 2009, 9(3): 472-480.
- [11]蔡敏怡,张娥,林靖,等.串联锂离子电池组均衡拓扑综述[J].中国电机工程学报,2021,41(15):5294-5311. DOI:10.13334/j.0258-8013.psee.201749.
- [12]QU F, LUO Q M, LIANG H, et al.Systematic overview of active battery equalization structures: Mathematical modeling and

- performance evaluation[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2022, 37(3): 1685-1703. DOI:10.1109/TEC.2022.3142818.
- [13]GHAEMINEZHAD N, OUYANG Q, HU X S, et al.Active cell equalization topologies analysis for battery packs: A systematic review[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(8): 9119-9135. DOI:10.1109/TPEL.2021.3052163.
- [14]FENG F, HU X S, LIU J F, et al.A review of equalization strategies for series battery packs: Variables, objectives, and algorithms[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 116: 109464. DOI:10.1016/j.rser.2019.109464.
- [15]邓端庆, 罗文广. 基于 SOC 的储能锂电池分层主动均衡研究[J]. *自动化仪表*, 2025, 46(3): 13-18. DOI:10.16086/j.cnki.issn1000-0380.2024020059.
- [16]GALLARDO-LOZANO J, ROMERO-CADAVAL E, MILANES-MONTERO M I, et al. Battery equalization active methods[J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 246: 934-949. DOI:10.1016/j.jpowsour.2013.08.026.
- [17]KIM M Y, KIM C H, CHO S Y, et al. A cell selective charge equalizer using multi-output converter with auxiliary transformer [C]//8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia. Jeju: IEEE, 2011: 310-317. DOI:10.1109/ICPE.2011.5944610.
- [18]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. DOI:10.1109/TIE.2020.3003661.
- [19]LI Y, XU J, MEI X S, et al.A unitized multiwinding transformer-based equalization method for series-connected battery strings [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(12): 11981-11989. DOI:10.1109/TPEL.2019.2910205.
- [20]SHANG Y L, CUI N X, ZHANG C H. An optimized any-cell-to-any-cell equalizer based on coupled half-bridge converters for series-connected battery strings[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(9): 8831-8841. DOI:10.1109/TPEL.2018.2888514.
- [21]QIN D C, QIN S, WANG T T, et al.Balanced control system based on bidirectional flyback DC converter[J]. *Energies*, 2022, 15(19): 7226. DOI:10.3390/en15197226.
- [22]孙秀娟, 姜宇, 王传江, 等. 基于 LTC6804 的电池组主动均衡实验设计[J]. *电气电子教学学报*, 2024, 46(5): 209-213. DOI:10.3969/j.issn.1008-0686.2024.05.049.
- [23]徐鹏. 锂离子电池组主动均衡电路的研究及设计[D]. 广州: 华南理工大学, 2023. DOI:10.27151/d.cnki.ghnlu.2023.003642.
- [24]沈镇, 张陈斌, 陈宗海, 等. 基于双向反激式变压器的锂离子电池组主动均衡系统设计[C]//第 18 届中国系统仿真技术及其应用学术年会论文集. 兰州, 2017: 303-307.

