

# 动力锂电池均衡拓扑结构研究综述\*

刘睿<sup>1</sup> 江艳<sup>1,2</sup> 王海<sup>1,2</sup>

(1. 肇庆学院电子与电气工程学院, 肇庆 526061; 2. 肇庆学院机械与汽车工程学院, 肇庆 526061)

【欢迎引用】刘睿, 江艳, 王海. 动力锂电池均衡拓扑结构研究综述[J]. 汽车文摘, 2025(2): 23-31.

【Cite this paper】LIU R, JIANG Y, WANG H. Review of Power Lithium Battery Equalization Topology Research[J]. Automotive Digest (Chinese), 2025(2): 23-31.

【摘要】为了满足系统性能需求, 锂离子电池在实际使用中通常需要成组使用, 但不同电池单体之间存在不一致性问题, 如内阻、电压和自放电率的差异。这些差异会降低电池组的能量利用率、使用寿命, 并可能危及电池系统的安全性, 电池均衡技术是解决这一问题的有效手段。深入分析了电池均衡原理, 并详细综述了常见的电池均衡电路拓扑结构。对电池均衡技术的发展现状进行了梳理, 分析了现有电池均衡拓扑结构的优缺点。同时, 研究了近年来涌现的新技术和解决方案。在分析目前电池均衡技术存在的难题的基础上, 提出了未来研究发展的方向。

关键词: 锂离子电池; 不一致性; 均衡技术; 均衡拓扑结构

中图分类号: TM912 文献标志码: A DOI: 10.19822/j.cnki.1671-6329.20240109

## Review of Power Lithium Battery Equalization Topology Research

Liu Rui<sup>1</sup>, Jiang Yan<sup>1,2</sup>, Wang Hai<sup>1,2</sup>

(1. School of Electronics and Electrical Engineering, Zhaoqing University, Zhaoqing 526061; 2. School of Mechanical and Automotive Engineering, Zhaoqing University, Zhaoqing 526061)

【Abstract】In order to meet the system performance requirements, lithium-ion batteries usually need to be used in groups in practical use, but there are inconsistency problems between different battery monomers, such as internal resistance, voltage and self-discharge rate. These differences will reduce the energy utilization of the battery pack, service life, and may jeopardize the safety of the battery system. Equalization technology is an effective means to solve this problem. The principle of equalization is analyzed in depth, and common topologies of equalization circuits are introduced in detail. The development status of equalization technology is sorted out, and the advantages and disadvantages of existing equalization topologies are analyzed. At the same time, the new technologies and solutions emerging in recent years are studied. On the basis of analyzing the difficulties existing in the current equalization technology, the direction of future research and development is proposed.

Key words: Lithium-ion battery, Inconsistency, Equalization technology, Equalization topology

## 0 引言

锂离子电池(Lithium-Ion Battery, LIB)因具有能量密度高、循环寿命长、无记忆效应、自放电率低等优点, 被广泛应用于汽车、电网、便携式电器、通信和电力监控系统及储能等领域<sup>[1]</sup>。每颗单体锂离子电池的电压范围通常为2~4.2 V, 多数情况下不足以满足储能系统高电压、大容量需求, 通常需要将若干个单体电池串连使用, 有时为了满足更大的能量需求, 电池

组会并联后再串联。受限于生产加工技术水平, 同批次的单体锂电池初始容量、内阻、电压、自放电率等各项关键性能特性存在差异, 而且由于工作环境的差异性及锂电池本身特有的化学属性, 这些特性的差异在电池组工作过程中越加明显, 呈现出不一致性。电池的不一致性使得电池组容量的利用率降低, 同时容易过充过放, 加速电池老化, 存在安全隐患。

电池组放电过程中会产生“木桶效应”, 如图1所示, 电池4在放电过程中电压达到放电截止电压时,

\*基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金(2022A1515110775); 广东省普通高校特色创新类项目(2023KTSCX154)。

整个电池组随即放电结束,此时其他电池仍有剩余电量未耗尽,进而造成了电池容量浪费,若继续放电将导致电池过放,会对电池造成不可逆的损坏。在充电过程中,电池1先达到充电截止电压而使电池组整体充电结束,此时其他电池尚未充满,造成电池组不能充电至最大容量,若继续充电则会导致过充。电池的差异越大容量浪费问题越严重,并且随着单体电池的数量及循环次数增加,不一致性更加明显。

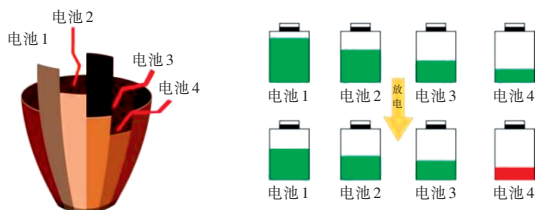


图1 木桶效应

电池组的不一致性无法完全消除,但可采取一些措施来缓解<sup>[2]</sup>。现阶段电池均衡技术在优化不一致性方面效果最为显著,很多学者对此展开大量研究。

均衡技术包括均衡控制策略和均衡拓扑结构。均衡控制策略是指根据电路结构,选取恰当的不一致性动态评估指标,采用合适算法控制均衡拓扑电路中的开关通断,为能量转移选取最优路径。均衡控制动态评估指标通常包括电压、荷电状态(State of Charge, SOC)和剩余电量。出色的均衡策略具有精确度高、执行速度快和操作简便等特点,可有效改善电池组的不一致性。因算法难度较大且过于复杂,目前均衡策略大多处于模拟试验阶段。相较而言,电池组均衡拓扑结构的研究比较成熟。电池组均衡拓扑结构的划分多种多样,按照均衡过程中均衡电路是否存在能量损耗可分为能量耗散型均衡(被动均衡)和非能量耗散型均衡(主动均衡);按照功能不同可分为充电均衡、放电均衡及双向均衡;根据均衡电路与主电路是否同时工作,可分为在线均衡和离线均衡。通常,根据能量在均衡过程中的处理方式进行分类,即主动均衡和被动均衡<sup>[3]</sup>。

电池均衡技术诞生初期,由于技术水平和成本的限制,均衡拓扑结构较为单一,主要采用被动均衡拓扑,但该拓扑热堆积严重、抗干扰能力差,且控制策略较为简单。随着电力电子技术的发展,电动汽车、储能等领域对电池组一致性的要求越来越高,主动均衡技术迅速发展。以电感、电容、变压器、变换器等元件为基础的各类拓扑结构不断优化精进,并采用合适的均衡控制策略能有效提高能量利用率。近年来,随着时代的推进和能源存储技术不断革新,电池均衡技术

取得突破性进展,其发展更趋向于拓扑结构集成化、均衡策略智能化。通过均衡技术,可确保每个电池单体在充放电过程中都能达到相似的状态,从而提高电池组的整体容量和性能,有效减少能量损失,提高能量利用效率,延长电池组的使用寿命。

由于均衡电路自身的复杂性、高成本等因素,同时降低了电池系统的可靠性和安全性,此外,多数均衡电路实用价值偏弱,很难对先天不足的电池单体实现有益的均衡,所以,多数均衡电路并没有真正实现工程上的推广和应用。

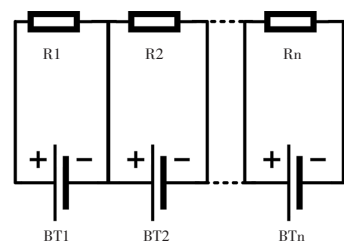
当前,国内外学者在均衡拓扑结构的综述方面,主要聚焦于不同拓扑结构之间的对比分析,而对于拓扑结构的具体改进研究及其成果的研究综述较少。本文介绍了在实际应用中的几类典型被动均衡与主动均衡拓扑结构,通过阐述每种拓扑结构的均衡工作原理,对比分析各拓扑结构在性能表现上的优势与局限。在此基础上,详尽论述国内外学者针对这些拓扑结构所开展的创新研究与改进尝试,最后展望电池均衡技术的发展方向。

## 1 被动均衡

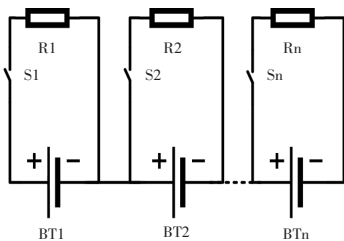
被动均衡采用电阻放电的方式,通过将高电量的单体电池中的一部分电能以热能形式消耗掉,从而改善电池单体之间的电压和电量不一致性。被动均衡的方式并未真正实现电能的有序分配,而只是通过损耗的手段来缓解部分电池组内部的不均衡情况。该方法往往以电池组内电量最低的单体为基准进行均衡,这意味着电池之间不仅没有能量分配,而且无法为低容量单体补充能量<sup>[4-5]</sup>。除此之外,该技术经过多年研究已经非常成熟。按照控制方式可分为固定分流电阻均衡电路(图2a)和开关型分流电阻均衡电路(图2b)。

固定分流法通过在每个单体电池两端并联一个均衡电阻形成回路,该均衡电路无需外部控制,控制策略比较简单。然而,因放电过程不可控,在实际应用中很少被采用。相较之下,开关分流法在固定分流电阻的基础上串联一个可控开关,该电路可采用2种控制模式:简单控制模式和检测模式<sup>[6]</sup>。在简单控制模式下,所有单体电池由单个开关控制,通过控制开关的通断来对不一致的单体电池进行均衡。在检测模式下,系统会定时检测各电池电压,一旦发现不一致性单体电池,控制开关会选择适当的导通路径以实现均衡。相对于固定分流电阻均衡电路,开关分流法

的均衡过程更加灵活,可减少能量损耗。



(a)固定分流电阻均衡电路



(b)开关型分流电阻均衡电路

图2 被动均衡拓扑结构

被动均衡的拓扑电路结构具有简单的控制逻辑,容易在硬件上实现,而且成本相对较低,是当前均衡控制最常用的方案。然而,被动均衡的主要问题在于释放电池的能量,导致相当一部分能量浪费。此外,电路热效应显著,需要及时通过热管理系统散发出去,否则容易导致局部温差较大,从而缩短电池的使用寿命,给电池的安全使用带来潜在隐患。为规避上述问题,需减小均衡电流以控制元件的散热,然而这会导致电池组的均衡时间变得较长<sup>[7-8]</sup>。因此,在被动均衡中,需在能量效率和热管理之间寻找平衡,以确保电池组的安全性和性能表现。尤其是单一的被动均衡方案所存在的局限性,令上述问题更加凸显。这也意味着在实际应用中,选择合适的被动均衡方案时需要综合考虑各方面的因素<sup>[9-10]</sup>。

如今,在均衡技术中主被动混合均衡的方式应用广泛。图3为多绕组变压器与被动均衡结合电路,该方法巧妙融合了主动均衡与被动均衡各自的优势,旨在实现经济高效且稳定可靠的电池均衡控制。这种创新的混合均衡技术不仅显著降低了整体系统的成本,更在均衡效率与系统稳定性之间实现了较好的平衡。通过精心设计与优化,电池管理系统能够灵活适应各种工况,实现最佳的电池均衡效果,从而显著提升电池组的整体性能与可靠性。马春艳等<sup>[11]</sup>提出了一种基于多绕组变压器均衡与被动均衡相结合的均衡方案。该方案所采用的均衡策略考虑了锂电池SOC不同离散情况。试验和模拟结果表明,该方案可提高均衡速度并降低电池组能耗。廖力等<sup>[12]</sup>研究了一种结合了单绕组反激变压器均衡与

被动均衡的新型均衡方案。该方案采用了基于区间搜索的时间优化算法,以在不同情况下提高均衡效率、均衡速度,并兼顾成本问题。试验和模拟仿真结果验证了该方案结构与控制策略的可行性,同时也验证了时间优化算法在不同情况下的有效性。针对传统Buck-Boost均衡电路只能对相邻单体电池进行均衡的问题,高钊<sup>[6]</sup>提出了一种基于双向桥式变换器均衡与被动均衡融合的拓扑结构。试验结果表明,该均衡电路可明显缩短均衡时间,提升均衡效率。刘威等<sup>[13]</sup>设计了一种自适应电阻器与隔离型DC-DC变换器相结合的主被动均衡拓扑电路。试验结果表明,相比于基于集中式DC-DC均衡电路,该电路的均衡速度最高提升了13.3%。田丽永<sup>[14]</sup>提出了一种主动均衡与被动混合的均衡拓扑,并采用基于模糊控制的多种变量融合的均衡策略。测试结果表明,均衡后电池组单体之间的最大电池差为25 mV,有效减少了不一致性。宁雪峰等<sup>[15]</sup>发明了一种双层主被动混合均衡电路,均衡电路结构简单,开关损耗小,能够有效减少能量损耗,提高能量传输效率。针对现有技术中电池系统存在整体容量损失的技术问题,楼冲等<sup>[16]</sup>提出了一种主被动一体化均衡控制方案,能有效减少电池单体间的性能差异和电压差异,提高电池系统整体容量的损失。

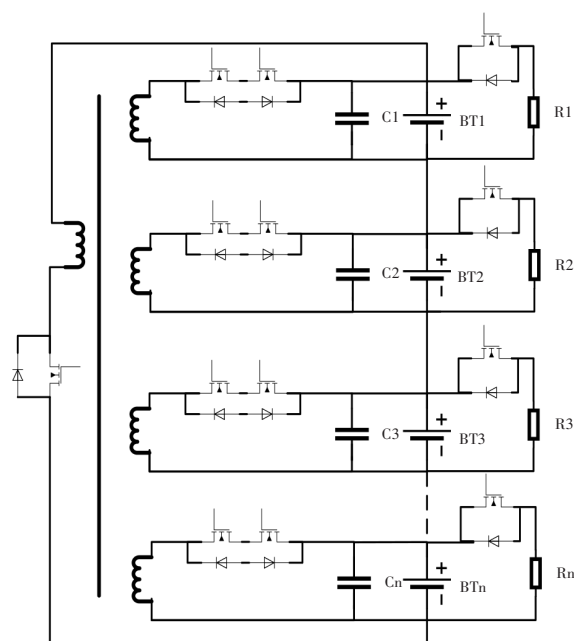


图3 多绕组变压器与被动均衡结合电路<sup>[11]</sup>

## 2 主动均衡

主动均衡是一种运用电力电子器件控制电池之间能量转移的方法,以实现电池组电压的一致性均衡

系统。与被动均衡不同,主动均衡通过主动调整电能分配,以调整电池之间的电荷分布,从而保持一致的电压水平。主动均衡电路通常包括各种电子元件和控制策略,可在电池组内部实现准确的电能分配,进而提高整个电池系统的性能和稳定性。随着电力电子技术的不断发展,现存的主动均衡拓扑种类变得更加多样。

目前常见的主动均衡电路拓扑结构包括基于电容、电感、变压器和变换器等方式。它们的区别在于将电感、电容或变压器作为能量转换和缓冲的器件。这种多样性提供了更灵活的选择,以满足不同应用场景和性能要求<sup>[17]</sup>。每种类型的主动均衡拓扑结构在均衡速度、电路成本、体积和效率等方面都各有独特之处。相较于被动均衡,主动均衡拥有更高的能量利用率和均衡效率。然而,目前主动均衡技术面临的挑战在于在充分利用各种拓扑结构均衡优势的同时,尽可能地均衡成本和复杂度控制难度。在不同应用场景下,选择适当的主动均衡拓扑结构需要综合考虑各方面因素,以实现最佳的性能和经济效益。

### 2.1 基于电容的均衡拓扑结构

基于电容的电池均衡,即电荷转移均衡,主要依赖于电容电压不可突变的特性。它充分利用电容的电荷穿梭特性,将电容作为能量转移的中间桥梁,实现单体电池均衡。通过根据单体电池间的电压差调整开关的通断状态,将高电压电池的电量传递给低电压电池,实现能量在相邻单体电池之间转移<sup>[18]</sup>。这种均衡拓扑具有体积小、电路结构简单、易于扩展和成本低等优点,因此在实际应用中得到广泛使用。根据电路中开关和电容的数量不同,电池均衡电路可以分为多种类型,包括传统开关电容、单开关电容、双层开关电容、模块化开关电容、链状结构开关电容以及谐振开关电容等。这些不同类型的均衡电路在结构和工作原理上有所差异,典型结构如图4所示。

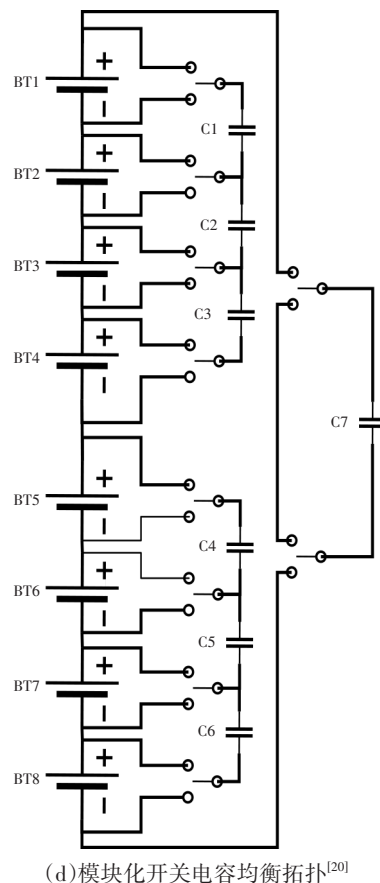
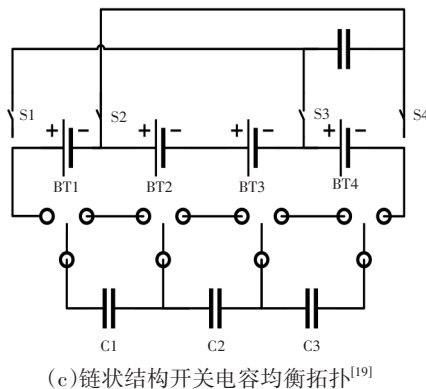
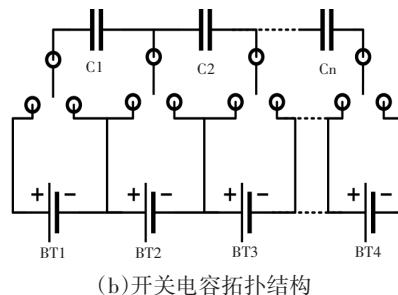
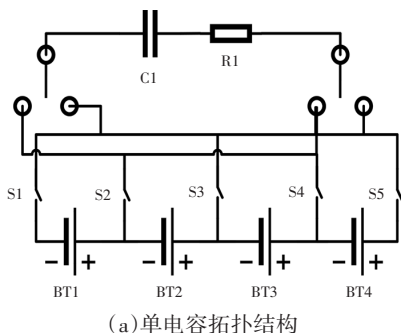


图4 电容均衡拓扑结构

图4a为单电容拓扑结构,该结构以单个电容作为能量转移通道,具有控制简单、成本较低的优点。但大多数情况下,单个电容的传输满足不了均衡速度上的要求。图4b所示的开关电容拓扑结构,能进一步改善均衡速度,但仍受限于均衡速度。为改善这一

不足,国内外学者提出了更为优化的拓扑结构,如链状结构开关电容均衡拓扑(图4c)。该结构通过优化的开关控制和电容配置,给能量传输提供了更多的通道,能够有效提高了均衡速度,但在实际应用中应较高的开关电压应力,会使稳定性下降。模块化开关电容均衡拓扑采用将总体拓扑结构分为众多子模块的方法,不仅可以实现模组内的能量传递,而且可以进行模组间的能量转移,显著提升了电池组的一致性和稳定性(图4d)。

电容均衡电路在实际使用中也有很多问题。由于能量的转移仅能通过电压差进行控制,当电容电压与均衡目标电压差较小时,均衡速度显著下降,导致电池均衡效果不理想。尤其是当不一致电池单体距离较远、均衡目标较多时,均衡效率下降明显,可能出现电量损耗现象,从而使能量效率降低。此外,过多的开关增加了控制的难度,同时也带来了开关器件上的能量损耗<sup>[21]</sup>,这进一步限制了电容均衡在高精度均衡方面的适用性。Baughman等<sup>[22]</sup>设计了一种2层电容的均衡拓扑结构。试验结果表明,该均衡拓扑结构能够通过增加电荷交换路径,有效提高了均衡速度。针对传统开关电容变换器的能量损害问题,黄驿舟<sup>[23]</sup>提出了一种可实现零电压开通和软充电的开关电容拓扑结构。试验和模拟结果均验证了该拓扑结构可行性。针对传统飞渡电容式均衡技术无法实现跨电池均衡、电池数目较多时均衡速度较慢和结构复杂等问题,陈煌<sup>[24]</sup>提出了一种高性能的飞渡电容均衡拓扑结构。试验和模拟结果表明,该方案有效减少电路损耗,缩短均衡时间。与传统飞渡电容均衡技术相比,该方案避免了无法实现跨电池均衡的局限性,同时有效减少了开关损耗,进一步提高了均衡速度。邢程等<sup>[25]</sup>发明了一种单电感单电容串联电池组自适应主动均衡方法,该方案仅利用一个电感电容串联电路就能够实现充放电均衡,控制简单,且有效减少了拓扑体积。KANG等<sup>[26]</sup>发明了一种电感(Inductance, L)电容(Capacitance, C)串联谐振电路及均衡控制方法,能有效减少均衡时间,提高均衡效率。Wang等<sup>[27]</sup>提出了一种基于飞渡电容的均衡方法,能快速平衡相邻2个单元间电池的电压。

## 2.2 基于电感的均衡拓扑结构

基于电感的均衡拓扑主要依赖于电感电流不可突变的特性,将电感作为能量传递的载体。通过精确控制开关的导通与关断,首先将电量较高的单体电池中多余的电量转移到电感中储存。随后,通过形成能

量传输通道,将电感中储存的电量传递给电量较低的单体电池,从而实现电池之间的均衡。这种设计充分利用了电感的能量储存和传递特性,通过控制电流的流向,有效地调整电池组中各单体电池的电量分布,达到均衡的目的。目前常见的基于电感的均衡电路主要分为单开关电感均衡电路和多开关电感均衡电路,见图5。

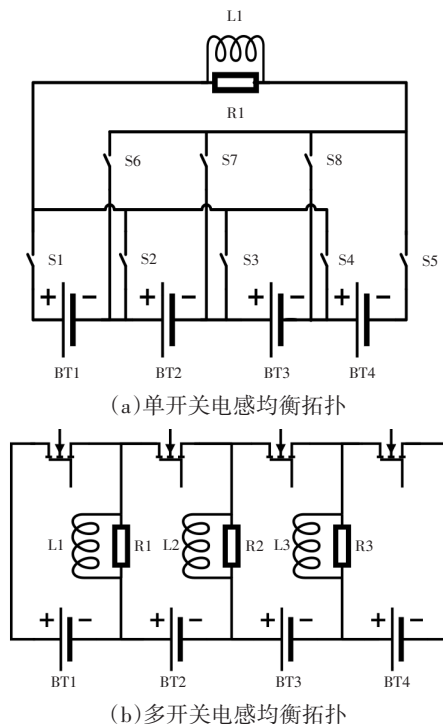


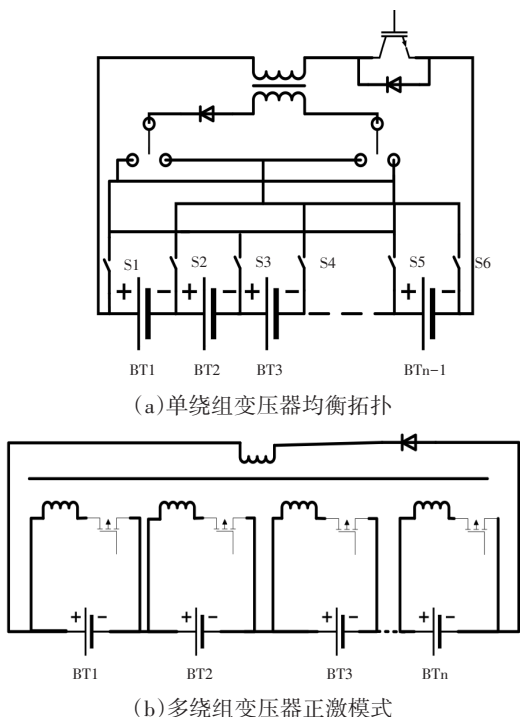
图5 电感均衡拓扑结构

电感均衡拓扑具有简单结构、易于控制和较低的成本优势。相较于电容均衡拓扑的局限性,电感均衡电路通过电流传递能量,即使相邻电池单体间的电压差异较小,仍可有效实现均衡。这使其特别适用于充放电始末端电压变化较快的电池系统。然而,电感均衡也存在一些不足之处。由于其结构的限制,当电池组串联数目较多、能量传输路径较长时,无法同时对多个电池进行均衡,从而导致均衡速度减缓,并引起一定的能量损耗。这一局限性需在实际应用中谨慎考虑,特别是对于大规模电池系统。针对传统多开关电感型均衡电路只能在相邻单体进行均衡,均衡速度慢、元器件较多的问题,吴磊威<sup>[28]</sup>设计了一种基于开关电感与谐振式LC支路的均衡电路拓扑结构。试验结果表明。该结构能有效控制成本,提高均衡速度。郭向伟等<sup>[29]</sup>提出了一种基于LC-L的串联电池组均衡拓扑结构。具有均衡速度快、电路结构简单且易扩展的特点。刘智轩<sup>[30]</sup>设计了一种基于电感的改进型双路交错并行架构均衡拓扑,试验证明该结构有效提升

了均衡速度,但其电路结构复杂,且电感数量较多,成本高。针对传统式双层电感主动均衡电路(Active Equalization Circuit, AEC)拓扑结构,第一层电路逐节传递的问题,刘晓飞<sup>[31]</sup>研究了一种改进的双层电感主动均衡拓扑结构,该结构在多工况下比传统式双层电感AEC所需的均衡时间要短,但仍存在电路拓扑结构复杂,成本高的问题。宁雪峰等<sup>[32]</sup>设计了一种双层电感开关的均衡电路调控方法及系统,实现了储能系统内部电池单体之间的实时均衡,有效解决了因储能单元SOC不一致导致整体电容量下降的问题,相较于传统方法具有显著优势。黄伟等<sup>[33]</sup>研究的均衡电路拓扑结构,实现了单体电池间和电池组与单体电池间的有效均衡,解决了模块组中间两节单体电池无法均衡的问题,显著提升了均衡效率。

### 2.3 基于变压器的均衡拓扑结构

与上述2种均衡模式不同,基于变压器的均衡拓扑结构属于隔离型均衡。该均衡利用变压器作为能量存储和传递元件,通过变压器的互感作用实现电能与磁能的互相转换,从而进行能量传递。均衡过程中当检测到电池电量不一致时,电量较高的电池单体或电池组首先将能量存储在初级绕组中,然后通过互感器将能量传递到次级绕组上,最终通过控制开关将次级绕组上的能量传递给低电量的电池单体或电池组,以达到均衡效果。常见的变压器均衡拓扑结构包括单绕组变压器拓扑与多绕组变压器拓扑,其典型结构如图6所示。



(c)多绕组变压器反激模式  
图6 变压器均衡拓扑结构

单绕组变压器式均衡拓扑又称为开关变压器式均衡拓扑,当检测到电量不一致电池单体时,通过控制开关的通断来选择合适的路径进行能量转移。因原边与副边的线圈互不接触,不受均衡电流大小的制约,故可采取提高均衡电流大小的方式提高均衡效率。

多绕组变压器存在正激模式和反激模式,其核心差异体现在能量传递的方式和工作机制上。正激模式在开关管导通时传递能量到负载,而反激模式则在开关管关断后释放能量到负载。这两种模式各具特色,适用于不同的应用场景。

相较于单绕组变压器,多绕组变压器结构拥有更多的副边绕组,每个副边与相应的电池单体和开关器件组成单个回路。在这种结构中,单芯原边变压器可以实现电能的双向传输,即可以从单元获取电能,也可以将电能传回给相应的单元。这一设计使得系统的能量传输效率更高,因为它消除了开关损耗。

然而,多绕组变压器的优势也伴随着一些不足之处。随着串联电池数量的增加,变压器线圈绕制使得电路的复杂度递增,电路成本也随之提高。此外,存在漏感问题可能对系统性能产生一定的影响。任诗雨<sup>[34]</sup>研究了一种基于三绕组反激式变压器的多层主动均衡拓扑结构,用于锂电池组。该结构能够实现子电池组与电池组之间、以及子电池组与子电池组之间的能量转移。刘征宇等<sup>[35]</sup>提出了基于耦合绕组的锂电池组主动均衡拓扑结构,试验数据表明,在均衡速度上该拓扑与Buck-Boost拓扑相比,均衡速度提升了21%,与Flyback拓扑相比,提高了12%,且兼顾了均衡效率和成本问题。缪家森<sup>[36]</sup>设计了一种双向正激电路的均衡拓扑,能够实现双向的电路均衡。均衡一定时间后电池组初始SOC最大差异降到5%以内,且电池分散度有效降低。张金磊等<sup>[37]</sup>提出了一种新型的多绕组变压器均衡系统拓扑,该均衡拓扑有效避免了多绕组变压器的涡流效应,显著提升了其可靠性。

## 2.4 基于变换器的均衡拓扑结构

基于变换器的均衡拓扑结构利用DC/DC变换电路作为能量转移的桥梁,通过将能量从高能量电池单体或电池组转移到低能量电池单体或电池组,实现均衡的目的。这种均衡拓扑结构通常需要利用电容、电感或变压器等能量储存和传递元件。相比其他类型的均衡电路,基于变换器的均衡结构具有较高的控制精度和良好的均衡性能,因此成为当前主动均衡研究的重点之一。与此同时,较高的集成度也带来了结构复杂和成本较高的问题。常见的基于变换器的均衡拓扑结构包括 Buck、Boost、Buck-Boost 和 Cuk 拓扑,其典型结构如图7所示。

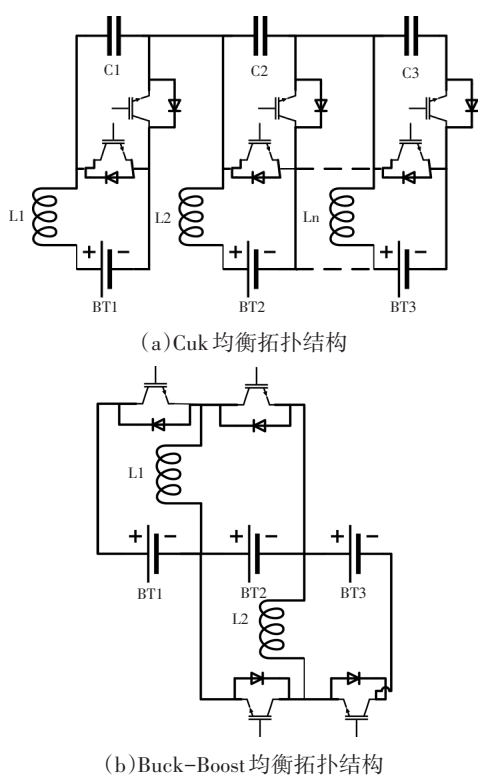


图7 变换器均衡拓扑结构

Boost、Buck 均衡拓扑通常为单向均衡,使用升压/降压变换器将能量从低/高电压电压的电池单体转移到高/低电压的电池单体,实现能量均衡<sup>[38]</sup>。

Buck-Boost 均衡拓扑结构相对简单,通过DC/DC变换器将高电量单体电池的电能传输至储能装置中,然后转移至低单体电池。该结构所需元件较少并且控制比较简单,可以实现电池之间能量的单向或双向传递,但当不一致性电池数目较多时,电量传输过程会出现支路电流叠加的情况,均衡速度和均衡效率也会相应降低。Buck-Boost 电路适合双向均衡控制器的高效模块化设计,均衡速度较快但成本相对较高,设计也较复杂<sup>[39]</sup>。周英杰<sup>[40]</sup>针对传统 Buck-

Boost 均衡电路在电池数量增多时,均衡时间长,效率低等问题,提出了一种改进 Buck-Boost 的分层均衡电路拓扑结构,并将单体电池和电池包的 SOC 值作为均衡变量。试验结果表明,在静置状态下分层均衡所需时间比直接均衡快 9.18%,且均衡后分层均衡的容量比直接均衡高 1.1%。针对传统 Buck-Boost 电路拓扑结构复杂、均衡损耗大等优点,刘飞等<sup>[41]</sup>发明了一种控制难度小、电路简单、单体均衡速度一致的新型拓扑结构,能有效改善现有 Buck-Boost 型均衡拓扑的部分缺点。

Cuk 均衡拓扑结构也可实现能量双向传递,但当均衡单体数量增多时,会大大增加元件成本和控制难度,且均衡速度及均衡效率也会受到影响。且仅能在相邻的电池单体之间进行能量传递,实用性受限。胡治国等<sup>[42]</sup>提出了一种基于双向 DC-DC 变换器的串联电池组主动均衡电路。通过将双向 MOS 管和缓冲电路 RLD 与双向对称变换器相连,以电压和 SOC 双变量作为均衡策略。该结构能有效减少能量损失,提高均衡效率。阚加荣等<sup>[43]</sup>公开一种基于双向 Cuk 斩波电路的“E”型锂电池均衡器,一方面纵向 Cuk 电路的使用,有效的降低了元件成本及拓扑体积,简化了控制;另一方面“E”型均衡方式的引入缩短了电池单元间的均衡路径,实现了快速均衡。

## 3 各均衡拓扑特征对比分析

根据具体应用需要,选取合适的均衡拓扑至关重要,因此全面了解各种均衡拓扑的特点非常必要。

被动均衡拓扑结构简单、成本低、控制容易,但均衡速度慢且电路热效应显著,因此适用于小电流低功率场景。对于均衡速度有一定要求且预算紧凑的情况,可考虑电感均衡拓扑结构和电容均衡拓扑结构,其中电感均衡拓扑适用于充放电始末端电压变化较快的电池系统,电容均衡拓扑因其电压差控制机理,适用于精度要求不高的场景。变压器均衡拓扑结构因其隔离传输的特性,适用于高电压、大电流的应用场景,但因其体积大、成本高、控制复杂、且存在漏感现象,普及受限。变换器均衡拓扑因均衡效率高、且便于集成的特点使其成为预算充足情况下的首选,但复杂的控制技术也阻碍了其推广。

表1及图8对各基本均衡拓扑的多个方面进行了对比分析,可直观的分析各种电路拓扑结构的优缺点,便于对不同的适用范围做出合理的拓扑结构选择。

表1 各均衡拓扑特征对比

均衡拓扑结构	复杂程度	均衡效率	控制难度	均衡速度	拓扑体积	成本	适用范围
被动均衡拓扑	低	低	较低	慢	较小	低	中小功率
电感均衡拓扑	中等	适中	中等	快	一般	一般	中大功率
电容均衡拓扑	中等	适中	中等	较慢	较小	较低	中小功率
变压器均衡拓扑	高	较高	较高	快	较大	高	大功率
Cuk均衡拓扑	较高	适中	较高	快	一般	较高	中小功率
Buck-Boost均衡拓扑	较高	适中	中等	较快	一般	较高	大功率

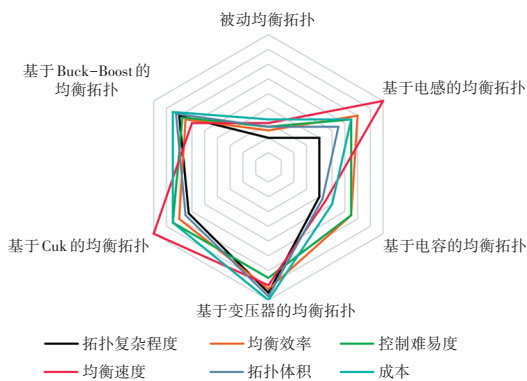


图8 各均衡拓扑特征对比

#### 4 结束语

本文对锂离子电池组均衡拓扑结构的研究进展进行了系统综述,对被动均衡方式和主动均衡方式的拓扑结构进行了横向比较,分析其均衡拓扑结构及其均衡原理,揭示所具有的优点及存在的不足之处。纵向阐述了近年来学者们在现有拓扑结构的基础上,考虑经济成本、电路体积、复杂度等因素所做的改善研究。虽然近年来在理论研究和实际应用方面取得了一定的突破,但仍然面临着如何在提高均衡精度、均衡速度和均衡效率的同时解决电路复杂性和成本的综合难题。对于均衡技术来说,未来的研究重点在于优化均衡策略的控制算法使其更加智能化,设计经济高效多样的均衡拓扑电路,提升整体均衡效率减少能量损耗,以达到高水平的均衡效果,确保电池均衡技术长足发展。

#### 参考文献

- [1] YANG Z, ZHANG J, KINTNER-MEYER M C W, et al. Electrochemical Energy Storage for Green Grid[J]. Chemical Reviews, 2011, 111(5): 3577-3613.
- [2] 陆文祺. 电动汽车锂离子电池均衡控制技术[D]. 广

西: 广西科技大学, 2019.

- [3] 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.
- [4] HAN W, ZHANG L. Battery Cell Reconfiguration to Expedite Charge Equalization in Series-Connected Battery Systems[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2017, 3(1): 22-28.
- [5] REHMAN M M U, EVZELMAN M, HATHAWAY K, et al. Modular Approach for Continuous Cell-Level Balancing to Improve Performance of Large Battery Packs[C]//2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). IEEE, 2014: 4327-4334.
- [6] 高钊. 融合主被动均衡控制的动力电池BMS实现[D]. 西安: 长安大学, 2023.
- [7] 黄燕琴, 聂金泉, 王敖, 等. 锂离子电池不一致性综述[J]. 时代汽车, 2022, 5: 102-107.
- [8] 熊莹燕. 锂离子电池SOC估计及均衡控制研究[D]. 南昌: 江西理工大学, 2022.
- [9] HUA Y, CORDOBA-ARENAS A, WARNER N, et al. A Multi Time-Scale State-of-Charge and State-of-Health Estimation Framework Using Nonlinear Predictive Filter for Lithium-Ion Battery Pack with Passive Balance Control[J]. Journal of Power Sources, 2015, 280: 293-312.
- [10] GALLARDO-LOZANO J, ROMERO-CADAVAL E, MILANES-MONTERO M I, et al. A Novel Active Battery Equalization Control with On-Line Unhealthy Cell Detection and Cell Change Decision[J]. Journal of Power Sources, 2015, 299: 356-370.
- [11] 马春艳, 王庆龙, 张迪, 等. 基于SOC的串联连接锂电池能量均衡控制研究[J/OL]. 电源学报, [2023-12-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20220215.1535.010.html>.
- [12] 廖力, 张瑾, 汪屹, 等. 基于时间优化算法的锂离子电池主被动均衡[J]. 电池, 2023, 53(4): 393-397.
- [13] 刘威, 王友仁, 许煜辰, 等. 基于自适应选择主被动均衡拓扑的机载锂电池电源能量均衡方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(2): 244-252.
- [14] 田丽永. 基于主被动混合均衡的电池组管理策略研究与电路实现[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2019.
- [15] 宁雪峰, 芦大伟, 李龙, 等. 双层主被动混合均衡电路: CN202310443543. X[P]. 2023-07-28.
- [16] 楼冲, 赵德骥, 舒瑛, 等. 一种电池均衡控制系统、方法和电池: CN202410306470.4[P]. 2024-06-14.
- [17] SHANG Y, XIA B, ZHANG C, et al. An Automatic Equalizer Based on Forward - Flyback Converter for Series-Connected Battery Strings[J]. IEEE Transactions on Industrial

- Electronics, 2017, 64(7): 5380–5391.
- [18] 徐封杰. 基于电感的电池主动均衡研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
- [19] KIM M Y, KIM C H, KIM J H, et al. A Chain Structure of Switched Capacitor for Improved Cell Balancing Speed of Lithium-Ion Batteries[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 61(8): 3989–3999.
- [20] DU J, WANG Y, TRIPATHI A, et al. Li-Ion Battery Cell Equalization by Modules with Chain Structure Switched Capacitors[C]//2016 Asian Conference on Energy, Power and Transportation Electrification (ACEPT). IEEE, 2016: 1–6.
- [21] BARONTI F, FANTECHI G, RONCELLA R, et al. High-Efficiency Digitally Controlled Charge Equalizer for Series-Connected Cells Based on Switching Converter and Super-Capacitor[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2012, 9(2): 1139–1147.
- [22] BAUGHMAN A C, FERDOWSI M. Double-Tiered Switched-Capacitor Battery Charge Equalization Technique[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(6): 2277–2285.
- [23] 黄驿舟. 软开关型 Ladder 开关电容变换器及其在电池均衡中的应用研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2021.
- [24] 陈煌. 一种高性能的飞渡电容均衡技术[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2020.
- [25] 郭向伟, 邢程, 曾志辉, 等. 一种单电感单电容串联电池组自适应主动均衡方法: CN202111057453.4 [P]. 2023-06-27.
- [26] KANG K B, LEE M K, CHUNG C Y, et al. BATTERY CELL BALANCING METHOD: US201615064831 [P]. 2016-09-22.
- [27] WANG R, XU M, ZHAO Q. Battery Balancing Circuit Balancing Voltages between Battery Units with AFly Capacitor: US201816032004[P]. 2020-12-29.
- [28] 吴磊威. 基于开关电感与 LC 支路的锂电池组均衡技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2022.
- [29] 郭向伟, 刘震, 胡治国, 等. 基于 LC-L 储能的串联电池组均衡方法研究[J]. 电源学报, 2022, 20(4): 78–85.
- [30] 刘智轩. 锂离子电池主动均衡系统与荷电状态估计研究[D]. 西安: 长安大学, 2023.
- [31] 刘晓飞. 车载动力串联锂离子电池组的主动均衡控制设计与验证[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- [32] 宁雪峰, 芦大伟, 李龙, 等. 双层主被动混合均衡电路: CN202310443543.X [P]. 2023-05-23.
- [33] 黄伟, 李笑, 范耀华. 一种锂电池快速均衡电感式拓扑电路: CN201910299288.X [P]. 2024-02-13.
- [34] 任诗雨. 基于三绕组反激式变压器锂电池组多层主动均衡研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2022.
- [35] 刘征宇, 夏登威, 姚利阳, 等. 基于耦合绕组的锂电池组主动均衡方案研究[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(2): 54–64.
- [36] 缪家森. 储能锂电池组 SOC 估算及均衡控制策略研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2020.
- [37] 张金磊, 李晨光, 陈小平, 等. 一种新型的多绕组变压器均衡系统拓扑: CN202011598344.9 [P]. 2021-03-12.
- [38] 王双. 动力电池主动均衡系统及控制策略研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2022.
- [39] WANG Y, ZHANG C, CHEN Z, et al. A Novel Active Equalization Method for Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles[J]. Applied Energy, 2015, 145: 36–42.
- [40] 周英杰. 基于改进 Buck-Boost 的分层均衡电路研究[J]. 电工材料, 2023(1): 1–5.
- [41] 刘飞, 庄一展, 刘舟扬, 等. 一种采用双向 buck-boost 及串联 LC 的电压均衡拓扑及控制方法: CN202010870584.3 [P]. 2020-12-04.
- [42] 胡治国, 司少康, 朱富超. 基于双向 DC-DC 变换器的串联锂电池组主动均衡电路[J]. 全球能源互联网, 2023, 6(6): 650–659.
- [43] 阙加荣, 王森, 郑皓文, 等. 基于双向 Cuk 斩波电路的“E”型锂电池均衡器: CN202210354506.7[P]. 2022-08-09.

(责任编辑 明慧)