

<http://bhxb.buaa.edu.cn> jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0855

基于混合开关器件的可重构电池组串并联拓扑结构

叶泽雨^{1,2}, 尹靖元^{1,2,*}, 张桐硕¹, 师长立^{1,2}, 韦统振^{1,2}

(1. 中国科学院电工研究所 北京 100090; 2. 中国科学院大学 电子电气与通信工程学院, 北京 100049)

摘 要: 临近空间飞行器储能电池组需要将大量电池单体串并联连接, 部分单体电池故障将严重影响电池组性能并可能导致故障蔓延。通过在电池组中配置电力电子开关可以使电池单体或部分单体可重构, 具备故障电池隔离及电池间容量均衡等功能。为实现飞行器的电源高效、高可靠度, 提出一种基于混合开关的可重构电池组。使用响应时间快的电力电子器件隔离电池串, 进一步使用机械继电器控制单体电池的投入和切除; 提出混合开关器件结构下的电池切换策略, 利用二极管辅助的母线电压调节方法; 搭建 10 串 2 并的混合开关可重构电池组样机, 并进行电池组放电阶段的重构实验。实验结果表明: 所提结构可以通过开关器件实现电池串联均衡、故障隔离和母线电压调节等多种功能。损耗、可靠性和质量分析表明: 所提结构少量系统损耗和质量即可以实现对电池单体控制, 提升电池组的可靠度。

关键词: 电池管理; 可重构电池组; 混合开关; 故障重构; 可靠性; 电池容量均衡

中图分类号: V242; TM912

文献标志码: A **文章编号:** 1001-5965(2025)08-2674-11

可长期运行的临近空间飞行器的供电系统主要包括太阳电池阵列、储能电池组、电源控制和配电器等^[1]。白天太阳电池的能量充足时为负载供电同时也为储能电池充电; 当负载功率较大时, 由太阳电池和储能电池联合为负载供电; 夜晚由储能电池组供电^[2]。实现高效、可靠的电能供应, 满足长航时飞行是临近空间飞行器的关键技术问题之一。

与一般的航天器相比, 临近空间飞行器需要更高的电压等级和更大的输出功率, 如平流层飞艇的功率需求一般达到数十至上百千瓦^[3]。锂离子电池具有高能量比, 已经广泛应用于航空航天等领域。由于其单体电压较低且输出能力有限, 对于输出功率达到 100 kW 的空间飞艇, 通常采用 400 V 以上的高压母线^[4], 需要大量电池单体串并联使用。

临近空间飞行器需要在长达 10 h 以上的阴影期完全依赖储能电池组运行, 需要储能电池组具有

足够容量。储能电池组的管理水平对提升其使用容量和寿命起到重要作用。电池单体间的不一致性将造成单体间容量差异, 单体电池的内阻差异会造成并联的单体或电池串出现环流, 可能导致部分电池单体过流, 同时会造成每个循环周期放电深度不同, 影响电池单体寿命。单体间的容量差异将严重影响电池组的实际使用容量, 还可能导致部分单体过压或欠压故障。

使用均衡电路有助于缓解电池单体不一致造成的影响。现有的电池均衡方法包括主动均衡和被动均衡, 需要用到开关、电阻、电容、电感或变压器等器件^[5-8], 如果均衡电路增加了过多的质量, 反而可能增加系统的能耗。在临近空间飞行器电源系统电池组均衡方法的选择上, 还需要考虑额外质量等因素。

电池单体还存在过压、欠压和短路等故障, 长

收稿日期: 2022-10-30; 录用日期: 2023-02-23; 网络出版时间: 2024-11-07 09:28

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20241106.1525.005

基金项目: 国家重点研发计划 (2021YFB2601602); 中国科学院电工研究所科研基金 (E155610201); 中国科学院青年创新促进会 (2020144)

* 通信作者. E-mail: yinjingyuan@mail.iee.ac.cn

引用格式: 叶泽雨, 尹靖元, 张桐硕, 等. 基于混合开关器件的可重构电池组串并联拓扑结构 [J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51 (8): 2674-2684. YE Z Y, YIN J Y, ZHANG T S, et al. Series-parallel topology of reconfigurable battery pack based on hybrid switching devices [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51 (8): 2674-2684 (in Chinese).

期滥用的电池单体可能过热, 如果不能及时隔离阻止故障蔓延, 还会造成热失控并引发火灾^[9]。为提高安全性, 电池管理系统中还需要配置保护开关或保险丝进行故障隔离。

通过在电池组中配置电力电子开关的可重构电池组有助于简单高效的解决上述问题^[10]。已有大量文献针对可重构电池组的拓扑进行研究, 包括不同的开关数量和位置, 可以实现电池组单体在串联和并联形式上的投入和切除。从结构上看主要包括先串后并 (series parallel, SP) 型、先并后串 (parallel series, PS) 型和混合型 3 种。文献 [11] 为串联连接的单体电池各配置 2 个开关, 使每个单体电池具备投入和切除的功能。使用电池的模块化多电平变换器也可以视作一个 SP 型的可重构的电池组^[12]。文献 [13] 提出了一种 PS 型结构, 为 m 节并联电池单体配备 $m+1$ 个开关。文献 [14] 的结构为每节电池单体配置 4 个开关, 使其具备串联、并联和旁路的功能。文献 [15] 所使用的结构仅使用 3 个开关即可实现串联、并联和旁路单体电池的功能。

通过配置可重构开关控制电池单体的投入和切除, 可重构电池组具备了包括主动均衡^[16]、故障隔离^[17]和电池组电压调节^[18]等多种功能。更多关于已有的可重构电池组的结构和功能的介绍可以参考文献 [19] 和文献 [20]。

可重构电池组中使用大量的与电池单体串联的固态开关器件, 造成不可忽视的能量损耗。针对临近空间飞行器的高可靠性和高效率的要求, 本文设计了基于混合开关的可重构电池组架构。利用固态开关的快速性进行实时保护, 再利用机械开关的低损耗进行进一步重构。本文介绍了单体重构和母线电压调节的切换策略并进行了实验验证。通过对不同切换方式、结构损耗与可靠性的分析和对比, 论证了本文拓扑与切换方式的优势。

1 电池组结构及功能

1.1 基于固态开关的可重构电池组连接方式

可重构电池通过在电池单体或电池包周围配置开关, 控制其投入/切除或电池单体间的串并联连接方式。已有的连接方式可以分为 SP 型、PS 型和混合型, 基本结构如图 1 所示^[20-21]。

图 1 的可重构电池组所使用的开关大多为固态开关 (电力电子开关), 在已有的应用中金属-氧化物半导体场效应晶体管 (metal oxide semiconductor field effect transistor, MOSFET) 是最常见的开关选择之一^[22], 开关的连接方式包括四开关和两开关

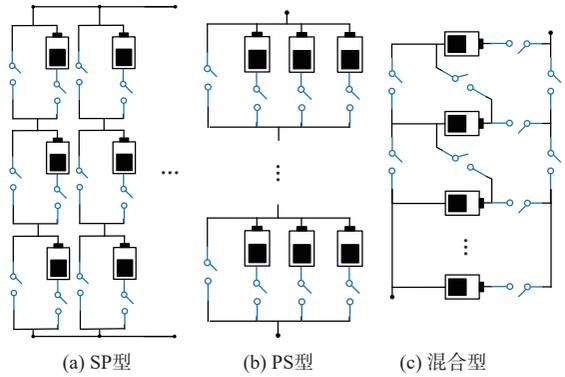


图 1 不同的可重构电池组结构^[20-21]

Fig. 1 Structure of different reconfigurable battery packs^[20-21]

2 种类型。以 SP 型为例, 四开关式的结构如图 2(a) 所示, 每节电池需要配置 4 个 MOSFET, S_1 和 S_2 闭合, S_3 和 S_4 断开, 电池投入; S_3 和 S_4 闭合, S_1 和 S_2 断开, 电池旁路。两开关式的结构如图 2(b) 所示, 可以节省一半的开关器件, 但是电流会流经寄生二极管^[23], 由于二极管存在较大的压降, 会增加损耗, 而且该种连接方式无法直接将支路完全断开, 还需要额外的主支路开关。

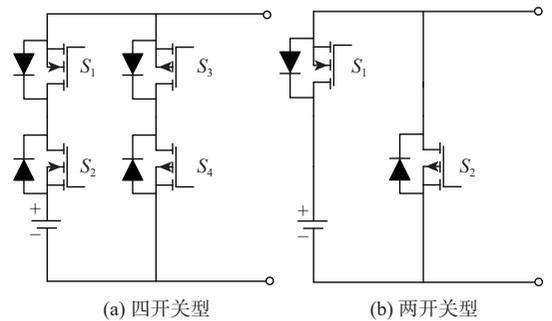


图 2 开关连接方式

Fig. 2 Connection mode of switch

1.2 混合开关的可重构电池组结构

现有的可重构电池组架构每节电池都至少需要配置 2 个开关, 且为固态开关 (电力电子开关), 存在导通压降和不可忽视的内阻。尤其是对于电压等级较低 (大多额定电压在 3.6 V) 的锂离子电池单体, 在正常运行时每个电池单体都至少需要串联一个固态开关, 而旁路某节电池单体, 也需要串联一个固态开关。当电池组在大电流下充电或放电时, 额外的固态开关将会在很大程度上降低效率。为提高能量转化效率, 尽可能减少电池组充电和放电过程中的能量损失。通过增加单个可重构单元串联的电池单体数量可以降低固态开关的电压降与电池串电压的占比, 然而这将使系统无法实现对单节电池的精确控制, 只能以多节单体串联的电池串作为最小控制单元, 当发生故障时也需要切除多节电池。

机械式的开关或继电器具有低内阻的优点,但存在开断速度慢、易拉弧、电气寿命短等缺点。通过将固态开关和机械开关并联组成混合式开关可以弥补两者的不足。典型的应用为混合式断路器,在闭合时先闭合固态开关,后闭合机械开关;在断开时先断开机械开关,后断开固态开关。在正常工作时电流主要从机械开关流过,降低了导通损耗,且可以避免机械开关断开时产生电弧。

如果采用这种混合开关组合结构,为实现电池单体的投入和切除,几乎每个电池单体都至少需要配置4个开关,严重的增加了系统使用的开关数量、成本和体积。基于以上结构的思路,本文提出一种基于混合开关的可重构电池组架构。为单节电池配备机械式的单刀双掷继电器,利用机械开关的低内阻,实现电池单体级别的精确控制。同时为一定数量串联的电池串配置固态开关,利用固态开关的快速性实现单体电池故障时的快速切除,在需要切换电池时,先断开固态开关,为机械开关切换过程创造零电流条件,避免其断开过程中产生电弧,还可以延长机械开关的使用寿命。

通过控制单体电池投切改变电池组串联电池的数量从而调整母线电压是可重构电池组的一项重要功能。由于开关的动作时间可能存在一定程度的不一致,导致出现短暂的并联电池串节数不同的情况,造成并联环流甚至短路。当使用机械开关时,切换速度较慢,该问题更为严重。为解决可重构电池组的母线电压调节问题,每个电池串的主支路固态开关并联了一个带开关的二极管,其导通方向与电池的放电方向一致,利用二极管单向导通性来抑制电池串间的短路电流。

本文提出的基于混合开关的可重构电池组串联型结构,其电路拓扑如图3所示。与已有的串联型可重构电池组相比,不需要使用大量的固态开关,而是为每节电池单体串联一个单刀双掷的机械继电器,为每个电池串配置一个固态开关和一个由二极管和开关组成的防短路电路。

1.3 可重构电池切换步骤

当检测到单体电池出现故障或需要进行容量均衡时,可以通过控制开关切换电池单体,在切换过程中先断开需要切换支路的主开关,此时流经该电池串的电流为0,流入/流出的电流由其他并联电池串提供,在完成切换后再重新闭合该支路的主开关。具体切换步骤如下,切除过程如图4所示。

步骤1 断开主支路固态开关。

步骤2 控制单刀双掷的机械开关切换电池。

步骤3 闭合主支路固态开关。

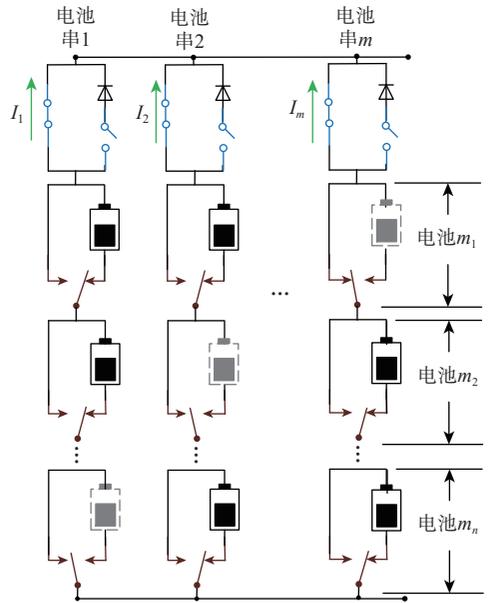


图3 混合开关器件可重构电池组拓扑架构

Fig. 3 Reconfigurable battery pack topology architecture based on hybrid switching device

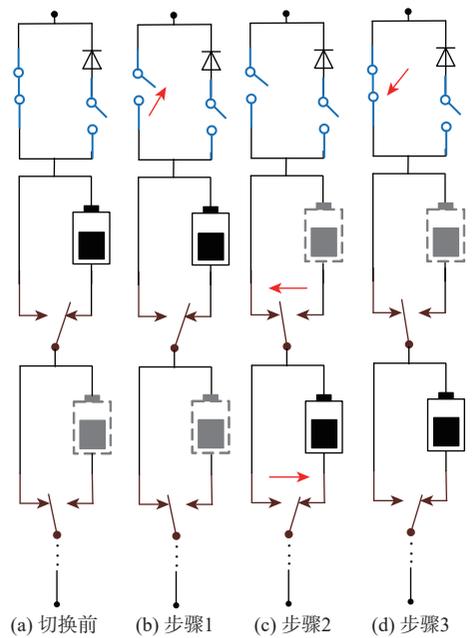


图4 电池单体投入/切除过程

Fig. 4 Insertion and removal process of a battery cell

除常规的电池切换,调整电池组输出电压大小也是可重构电池组的重要功能之一。由于锂离子电池在工作期间电压变化范围较大(通常在2.6~4.2 V),且为多节串联使用,对于电压等级较低的系统,通过改变电池节数,可以省去DC-DC变换器,对于电压等级较高或一定需要使用DC-DC变换器的系统,减少电池组的电压变化范围也有利于减低DC-DC变换器的设计要求及提高其效率。

多串并联的可重构电池组在改变电池节数时,存在不同电池串间电池节数不同造成短路的风险,

其切换过程的电流分析将在第 2 节详细介绍。在本文电池组结构中, 由于使用了机械继电器, 切换速度更慢, 切换过程中导致故障的可能性大大增加。为避免在切换过程中造成电池串间短路故障对电池造成损坏, 对于含有 m 个并联支路的电池组, 在支路主固态开关旁增加一个二极管, 将所有电池串分为 2 组依次改变电池节数, 避免不同电池串之间电池节数不同造成短路故障。图 5 为电池组增加一节串联电池的电压调节过程。为简化结构, 图 5 中只绘制了切换的电池单体及其控制开关, 在切换前后所有支路均串联了相同数量的电池单体, 步骤如下。

- 步骤 1 投入电池串 1~电池串 $m/2$ 的二极管, 断开电池串 $m/2+1$ ~电池串 m 的主支路固态开关。
- 步骤 2 断开电池串 1~电池串 $m/2$ 的主支路固态开关, 动作机械继电器使电池串 $m/2+1$ ~电池串 m 增加一节电池。
- 步骤 3 闭合电池串 $m/2+1$ ~电池串 m 的主支路固态开关。
- 步骤 4 切除电池串 1~电池串 $m/2$ 的二极管。

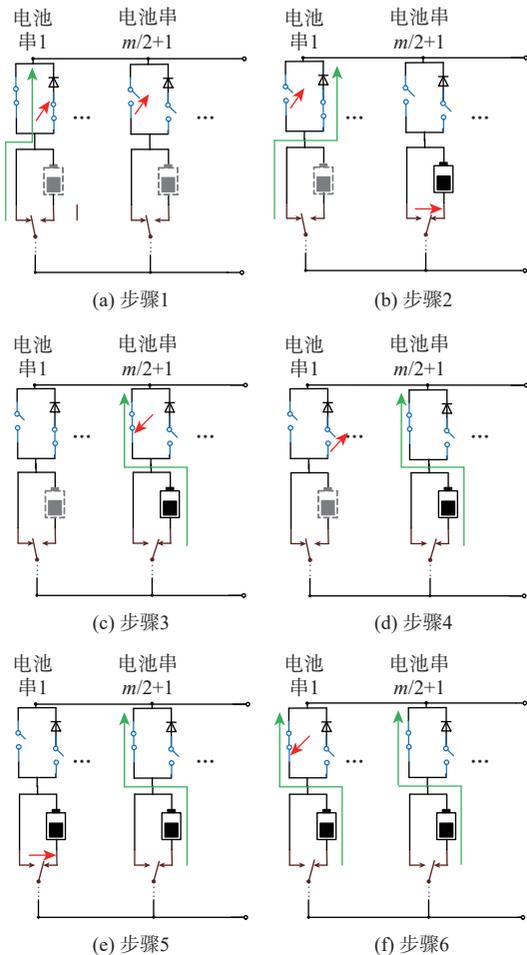


图 5 电池组电压调节过程

Fig. 5 Battery pack voltage regulation process

步骤 5 动作机械继电器使电池串 1~电池串 $m/2$ 增加一节电池。

步骤 6 闭合电池串 1~电池串 $m/2$ 的主支路固态开关。

在步骤 3 中, 电池串 1~电池串 $m/2$ 会比电池串 $m/2+1$ ~电池串 m 少一节电池, 由于串联了二极管, 避免了电池串 1~电池串 $m/2$ 被充电。

2 电池节数切换方案对比

2.1 直接切换

本文电池组结构使用了单刀双掷的机械继电器, 在减少电池单体数量时直接切除电池单体会造成拉弧。在增加电池单体的操作中, 继电器闭合时不会产生电弧, 但是切换时间较长, 会造成母线电压跌落。如果同时切换所有支路单刀双掷开关增加串联电池数量, 当负载为恒流源时, 母线电压跌落为

$$\Delta U_m = I_{load} t_s / C_m \tag{1}$$

式中: ΔU_m 为母线电压跌落值; I_{load} 为负载电流; t_s 为开关切换时间; C_m 为母线电容。

当负载为阻性负载时, 母线电压跌落为

$$\Delta U_m = U_m \left(1 - e^{-\frac{t_s}{R_{load} C_m}} \right) \tag{2}$$

式中: U_m 为母线电压; R_{load} 为负载电阻。

当电池组单独为负载供电时, 为避免压降较大影响负载供电, 需要额外安装数值较大的电容器或选择在负载功率较小时切换。

2.2 分步切换

如果不同支路依次切换, 可能造成电池组不同支路的串联电池数量不同的情况, 该情况类似于单节电池短路, 会造成电池组内出现较大的环流, 部分电池可能因过流造成损坏。

以电池组放电阶段为例, 串并联连接的电池模型简化为如图 6 所示。其中, 电池组模型可简化为开路电压 E 及一个等效内阻 R 串联。由于并联连接的电池串两端的电压相等, 开路电压、支路电流

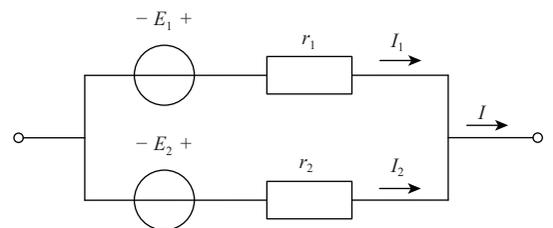


图 6 串并联电池组等效模型

Fig. 6 Equivalent model of a series-parallel connected battery pack

和内阻间存在以下关系:

$$E_1 - I_1 R_1 = E_2 - I_2 R_2 \quad (3)$$

流经电池串支路1和支路2的电流 I_1 和 I_2 分别为

$$I_1 = \frac{E_1 - E_2 + I R_2}{R_1 + R_2} \quad (4)$$

$$I_2 = \frac{E_2 - E_1 + I R_1}{R_1 + R_2} \quad (5)$$

综合可得2条支路的电流差为

$$I_1 - I_2 = \frac{2(E_1 - E_2) + I(R_2 - R_1)}{R_1 + R_2} \quad (6)$$

由式(5)可知,由于 R_1 和 R_2 较小,如果 E_1 和 E_2 存在单节电池的差距,流经支路1和支路2的电流会有较大差异,严重时可能导致一条支路处于大电流充电状态同时另一条支路处于大电流放电状态造成短路故障。

2.3 投入限流电阻切换

当 I_1 大于 I_2 ,通过加入限流电阻可能减少 I_1 和 I_2 的电流差,为电池串2增加限流电阻 R_0 后,支路1的电流 I_1' 和支路2的电流 I_2' 差为

$$I_1' - I_2' = \frac{2(E_1 - E_2) + I(R_2 - R_1 + R_0)}{R_1 + R_2 + R_0} \quad (7)$$

式(7)的分母趋近于0时, I_1' 和 I_2' 的差将趋近于0。均衡电阻在选择时应满足以下条件:

$$I_1' < I_{\max} \quad (8)$$

$$I_2' < I_{\max} \quad (9)$$

即平衡每个电池串的放电电流,使其不大于电池单体的最大放电电流 I_{\max} 。

此时电阻自身功率 W_R 为

$$W_R = I_1'^2 R_0 \quad (10)$$

基于电池储能系统的常规使用情况及电阻自身的可承受功率能力,普通的贴片电阻或直插电阻难以满足电池放电电流的功率,使用功率电阻将大大增大系统的体积和质量。

2.4 投入二极管切换

二极管可承载较大电流且具有单相导通能力。当每个支路的串联电池节数不同时可投入和电池放电电流方向相同的二极管避免环流。二极管只有在电池组电压调节的过程中才需要投入工作,在正常运行中可以被切除。在切换过程中,二极管承受的最大反向电压为电池单体电压 V_{bat} ,切换过程中的短时功耗为

$$W_d = V_D I_i \quad (11)$$

式中: W_d 为二极管切换过程中的功耗; V_D 为二极管

压降; I_i 为电池串的电流。

3 电池组剩余容量均衡控制策略

已有的可重构电池组的均衡方式包括等时间切换、排序均衡、动态规划算法和强化学习均衡算法等^[11,24-26]。

等时间切换法是指运行过程中每隔一段时间切换一定数量的电池。该方法无法解决电池单体间一致性差异造成的容量不均衡问题,仅适合电池单体间一致性较好的场景。排序均衡法根据每组电池单体的剩余容量(state of charge, SOC)或电压进行均衡,当每组电池数量和冗余电池数量较多时,排序算法的运行时间较长,均衡判断依据也会更为复杂。为提升均衡效果,需要更高的切换频率和更多的均衡次数。使用动态规划算法可以在一定时间内以均衡容量为依据尽可能减少切换次数。但是根据模型预测出的结果可能存在一定的误差。

强化学习是近年来应用于控制领域的热门方法,已有一些研究将其应用于可重构电池组的均衡控制中。这是一种基于奖励函数而进行数值或逻辑运算的控制方法。在实施过程中需要设计智能体的观察、动作和回报。

以Q学习或深度Q学习算法为例,为实现其基本功能,如容量均衡、故障隔离和电池组电压调节,观察需要包括所有电池单体的剩余容量 J 、当前的开关状态 S 、电压单体电压 V_{bat} 、电池故障状态 F 和母线电压 V_m ,对于 n 节串联的电池单体,表示为

$$J = [J_1, J_2, \dots, J_n] \quad (12)$$

$$S = [S_1, S_2, \dots, S_n] \quad (13)$$

$$V_{\text{bat}} = [V_{\text{bat}1}, V_{\text{bat}2}, \dots, V_{\text{bat}n}] \quad (14)$$

$$F = [F_1, F_2, \dots, F_n] \quad (15)$$

式中:开关状态 S_i 为0或1,0表示断开,1表示接入;故障状态 F_i 为0或1,0表示正常,1表示故障。

控制对象为可重构电池组中的开关,动作空间为下一个决策周期的开关状态 S^+ :

$$S^+ = [S_1^+, S_2^+, \dots, S_n^+] \quad (16)$$

回报包括4个部分,分别为电池单体的容量均衡程度 r_1 、故障电池单体隔离情况 r_2 、母线电压波动 r_3 和开关动作次数 r_4 :

$$r_1 = (J_{\max} - J_{\min}) / J_{\text{mean}} \quad (17)$$

$$r_2 = \sum_{i=1}^n F_i \quad (18)$$

$$r_3 = (V_m - V_r) / V_m \quad (19)$$

$$r_4 = \sum_{i=1}^n |S_i^+ - S_i| \quad (20)$$

式中: J_{\max} 为当前所有电池单体剩余容量的最大值; J_{\min} 为当前所有剩余容量的最小值; J_{mean} 为当前所有的平均值; V_m 为母线电压; V_r 为系统额定电压。最终的回报 r 为

$$r = a_1 r_1 + a_2 r_2 + a_3 r_3 + a_4 r_4 \quad (21)$$

式中: $a_1 \sim a_4$ 为各项奖励的权重, 其中, a_1 和 a_4 是互斥的, 增加开关动作次数可以增加电池单体的容量均衡程度, 但是要牺牲机械开关的使用寿命。 a_2 和 a_3 可以避免故障电池投入并使电池组工作在规定的电压范围之内, 这 2 个参数在 a_1 和 a_4 满足要求后, 从 0 逐渐增加绝对值进行调试。各项奖励乘以权重计算结果的数值大小差别不能过大, 否则智能体将忽视权重过小的回报。

4 实验结果与讨论

4.1 实验设置

实验平台如图 7 所示, 制作了一台母线电压范围为 22~32 V 的电池组样机, 使用了 20 节松下 18650 型电池, 采用 10 节串联, 2 串并联的方式连接。其中, 单体电池的额定容量为 3 200 mAh, 根据母线电压的变化范围, 串联电池数量可以在 7 节和 8 节间切换。使用电子负载进行放电阶段的实验, 电子负载的型号为惠普 6050A。

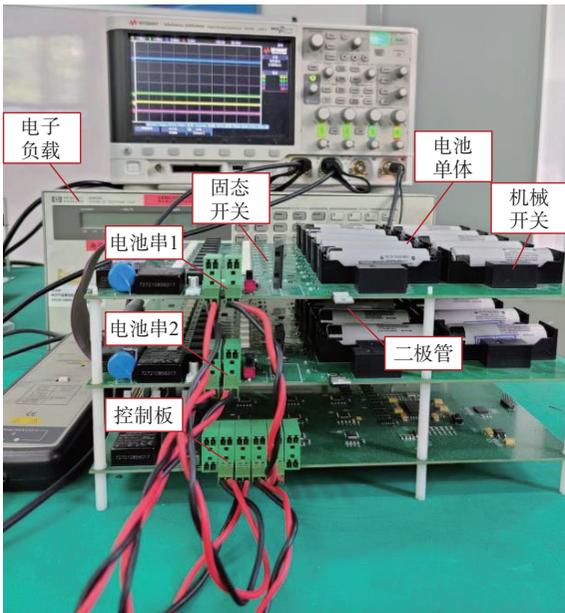


图 7 实验测试平台

Fig. 7 Experimental test platform

4.2 不同模式的切换过程

4.2.1 容量均衡/故障重构

串联电池单体间容量均衡的实验结果如图 8

所示, 其切换过程如图 4 所示。图 8 中, 通道 1 和通道 2 分别为 2 串电池串的电流 I_1 和 I_2 , 通道 3 为电池串 1 的电池单体 1 的电压 V_{BAT1} , 通道 4 为电池串 1 的电池单体 2 的电压 V_{BAT2} 。2 节电池单体电压的测量方法如图 3 所示。

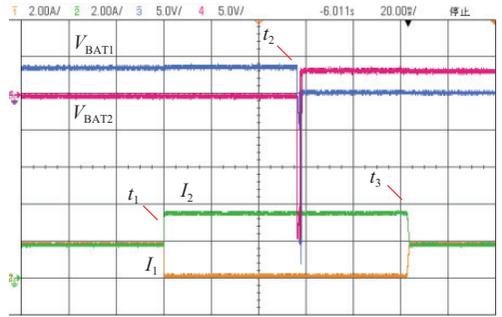


图 8 容量均衡切换过程实验

Fig. 8 Capacity balancing switching process experiment

当达到均衡的判断条件后, 先开启均衡算法, 选择切除和投入的电池单体, 之后切换过程开始。先在 t_1 时刻断开电池串 1 支路的主开关, 在 t_2 时刻旁路电池单体 1 并投入电池单体 2。在 t_3 时刻电池串 1 的支路主开关闭合, 切换过程完成。

发生故障时的电池单体的切换过程如图 9 所示, 在 t_1 时刻, 电池单体 1 发生短路故障, t_2 时刻检测到故障并同时断开该支路的主开关和该节电池单体, 之后开启电池均衡算法选择投入的电池单体, t_3 时刻投入电池单体 2, t_4 时刻重新闭合电池串 1 的主开关, 故障重构完成。与串联均衡的切换过程不同的是故障重构的均衡算法是在断开主支路之后才进行的。

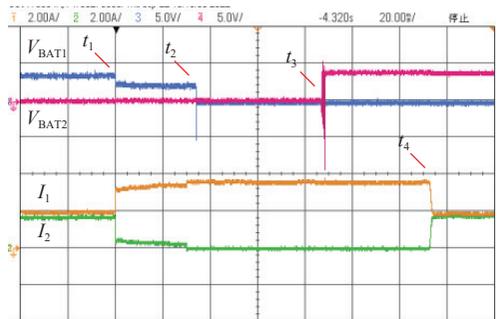


图 9 电池单体故障重构实验

Fig. 9 Fault reconstruction experiment of battery cell

4.2.2 电池组电压调节

电池组电压调节的实验结果如图 10 所示, 示波器通道 1 为电池串 1 电流 I_1 , 通道 2 为电池串 2 电流 I_2 , 通道 3 为电池组电压 V_m 。切换步骤如图 5 所示, 为避免 2 串电池串的开关同时动作造成干扰, 同时使切换步骤更为清晰, 实际切换过程中, 每个切换步骤分为 2 步完成, 先动作电池串 1, 后动作

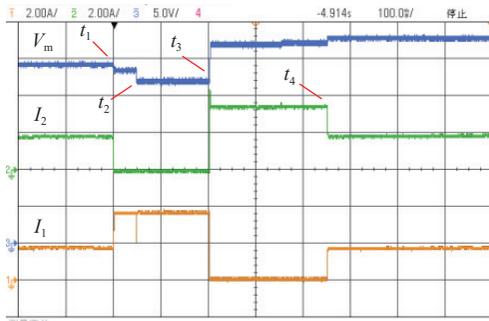


图 10 电池组电压调节实验

Fig. 10 Voltage regulation experiment of battery pack

电池串 2, 每个切换步骤的时间间隔为 50 ms。

在 t_1 时刻断开电池串 2 的主开关, 电池组电压有所下降, t_2 时刻断开电池串 1 主开关, 放电电流从二极管流过。在 t_3 时刻电池串 2 完成串联电池数量的增加并重新投入, 在 t_4 时刻电池串 1 完成串联电池数量的增加并重新投入, 此时 2 串支路均增加了一节串联电池单体, 电池组电压增加, 放电电流略有下降。

4.2.3 电池串短路

电池串短路保护过程如图 11 所示, 其中, 通道 1 为电池串 1 的电流 I_1 , 通道 2 为电池串 2 的电流 I_2 , 通道 3 为负载电流 I_{load} , 通道 4 为母线电压 V_m 。在 t_1 时刻对电池串 2 短路, 电池串 2 将无法对负载输出电流, 测量值从放电变为充电; 而电池串 1 不仅需要为负载供电同时需要为电池串 2 提供电流, 放电电流将大大增加, 在 t_2 时刻检测到故障并同时切除电池串 2, 负载由电池串 1 继续供电。

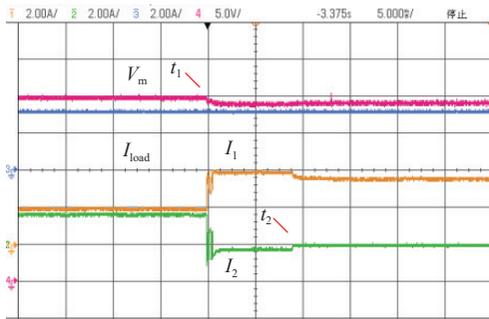


图 11 电池串短路保护实验

Fig. 11 Experiment of battery string short-circuit protection

4.3 结构与控制策略对比

不同结构使用的器件对比和损耗如表 1 所示, 本文认为 MOSFET 的导通损耗为 l_1 , MOSFET 寄生二极管的导通损耗为 l_2 , 机械开关的损耗为 l_3 ($l_2 > l_1 > l_3$)。由于可重构电池组的切换频率较低, 忽略开关损耗。

对于 n 节串联的电池组, 由表 1 可知, 本文混合式可重构电池组结构所使用的开关个数远小于

表 1 不同可重构电池组的器件使用和损耗分析

Table 1 Analysis of device usage and loss of different reconfigurable battery packs

结构名称	MOSFET 数量	机械开关数量	损耗
纯固态结构 (四开关式)	$4n$	0	$2nl_1$
纯固态结构 (两开关式)	$2n+2$	0	$(n+2)l_1$
常规混合式结构	$4n$	$2n$	nl_3
本文混合式结构	2	n	$2l_1 + nl_3$

其他结构, 损耗仅略大于常规混合式结构, 具有较大的结构性优势。

根据第 2 节给出的计算方式和本文样机所使用的参数进行计算, 不同切换方式的注意事项或参数要求如表 2 所示。其中, 负载电流为 3 A, 电池切换时刻电池单体电压设定为 3.5 V, 根据数据手册单体电池内阻为 0.03 Ω , 机械继电器释放时间为 5 ms。

表 2 不同切换过程对比

Table 2 Comparison of different switching processes

切换方式	注意事项或参数要求
同时切换	10% 的电压跌落需要 5 mF 母线电容
分步切换	瞬时短路电流超过 50 A
投入限流电阻切换	将电流差限制在 6 A 以内需要 1 Ω 电阻, 电阻功率为 9 W
投入二极管切换	切换过程电池承受 2 倍额定放电电流

由表 2 可知, 本文分析的 4 种电池组电压调节方法中, 从器件选型要求上看, 针对本文样机的参数, 前 3 种方法均不可行。投入二极管的切换方案仅需电池单体短时间承受 2 倍放电电流, 这对于所选的电池型号而言完全可以接受。

4.4 可靠性分析

临近空间飞行器电池组需要将大量电池单体串联使用, 较多的串环节数降低了系统的可靠性, 当串联的电池组中有一节电池发生故障将不得不切除整串电池。

在本文混合开关可重构电池组架构中, 单节电池发生故障时配置的开关可以将故障单体切除, 即可以增加少量损耗的情况下大大增加系统的可靠性。本节对该结构的可靠度进行计算分析。

假设元件和系统寿命呈指数分布, 单体器件其失效率可靠度转换式为

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (22)$$

式中: λ 为失效率, 计算中只考虑电池、固态开关 (MOSFET)、机械开关 (单刀双掷开关) 和二极管这些主要器件的可靠性。不同器件的详细计算式参考文献 [27], 见附录 A。

可靠度按使用一年时间计算, 其中, 电池单体的可靠度 R_{BAT} 为 0.994 1, MOSFET 的可靠度 R_M 为 0.999 7, 单刀双掷机械继电器的可靠度 R_S 为 0.998 8, 二极管的可靠度 R_D 为 1。

串联电池串的可靠度模型如图 12 所示, 其可靠度计算式为

$$R(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (23)$$

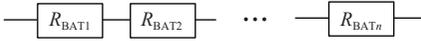


图 12 串联电池组可靠度模型

Fig. 12 Reliability model of battery packs connected in series

对于本文混合开关可重构电池组结构, 其可靠度分为 2 部分, 第 1 部分为单刀双掷开关、主支路开关的 MOSFET 和二极管及控制其投入切除的 MOSFET, 这些单元的可靠性结构为串联模型; 第 2 部分为冗余电池的串联电池组, 每个电池单体之间采用 $k/n(G)$ 备用形式, 也称为 n 中取 k 表决系统, 表示含有 n 个单元模块的子系统中有 k 个及以上正常工作时, 系统就可以正常工作^[28], 当支路中故障的电池数量超过 $n-k$ 个时, 该支路必须完全切除。可靠度模型的计算式为

$$R_{n,k}(t) = \sum_{i=k}^n [C_n^i R^i(t) (1-R(t))^{n-i}] \quad (24)$$

本文结构的可靠度模型如图 13 所示。

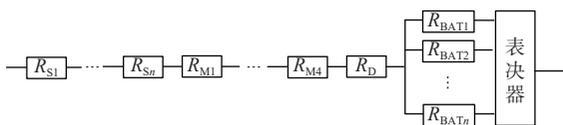


图 13 本文结构的可靠度模型

Fig. 13 Reliability model of the proposed structure

不同串环节数和冗余数量的电池串的可靠度计算结果如图 14 所示。随着串联电池节数增加, 电池串的可靠度不断下降, 当串环节数超过 20 节时, 可靠度低于 0.9。通过使用本文结构增加一定的冗余电池可以大大提升可靠度, 在相同的串联电池数下, 可靠度随着冗余电池数的增加而增加。对于 40 节串联的电池串, 其基本可靠度为 0.789 2, 当有 1 节冗余电池时可靠度可以增加 0.141 3, 当有 3 节冗余电池时可靠度可以增加 0.163 5。从图 14 中还可以看出, 当冗余电池节数超过 3 节后串联电池串的可靠度几乎不再提升。

4.5 系统质量分析

增加冗余电池提升电池组可靠度的同时还会增加系统的体积和质量, 所以冗余电池的数量并非越多越好, 在设计时需要综合考虑电池组的可靠度

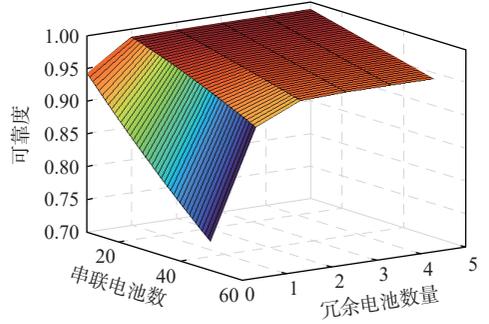


图 14 不同串环节数和冗余电池数量的电池组可靠度
Fig. 14 Reliability of battery pack with different number of series-connected cells and redundant cells

要求、系统体积和质量。使用可重构电池组架构, 可以省去传统电池组管理电路中的保险丝和均衡电路。本文不考虑电池组中其他的机械和电气元件, 只计算增加的机械继电器和冗余电池对电池组质量的影响。

3 200 mAh 的 18650 型电池单体的质量约为 50 g, 欧姆龙 G6C 系列的功率继电器质量约为 5.6 g, 电池组的可靠度与质量的关系如图 15 所示。其中, 横坐标为增加不同数量的开关和冗余电池后的电池组与没有冗余电池的电池组的质量比, 纵坐标为系统的可靠度。分别计算了 10 节、20 节、30 节和 40 节电池单体组成的电池串在增加机械开关和冗余电池后的重量和可靠度的关系。从图中可以看出, 一个机械开关的质量仅占电池单体质量的 11.2%。增加的冗余电池单体虽然会增加系统的质量, 但同时提升了电池组的容量。对于 10 节串联的电池串, 电池组配置机械开关并增加 1 节冗余电池, 质量将增加至原先的 1.13 倍, 可靠度可以从 0.931 提升至 0.986, 使用容量也增加了 10%。对于 40 节串联的电池串, 增加一节电池单体和 41 个机械开关增加了 11.66% 的质量, 可以提升 24% 的可靠度和一节电池的使用容量。

在实际的应用中, 电池组还需要很多额外的机

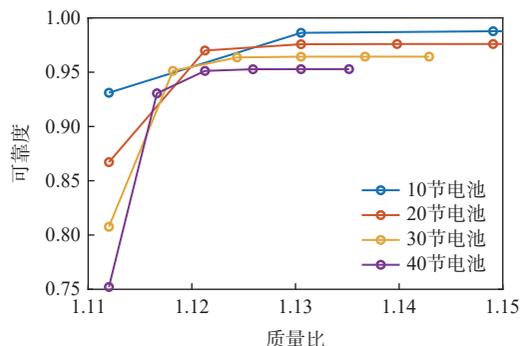


图 15 电池组可靠度和系统质量的关系
Fig. 15 Relationship between reliability of battery pack and system weight

械和电气部件,使用本文结构所增加的质量占比要远小于图15的计算结果。

5 结论

本文针对临近空间飞行器电池组大量电池单体串联造成可靠性较低的问题,提出一种基于混合开关的可重构电池组架构,以满足系统高效、可靠的供电需求。主要结论如下。

1) 本文结构在几乎不增加损耗的情况下可以精确控制所有电池单体,增加电池组的可重构程度。相较于纯固态开关结构和常规的混合开关结构,本文结构每节电池单体只需要配置一个开关,减少了所需使用的开关器件的数量。

2) 本文提出基于混合开关的可重构电池组架构的切换方法,包括电池单体的容量均衡和故障重构。设计基于二极管的防短路电路实现了混合开关可重构电池组调节电压的功能,并给出切换过程。

3) 本文结构相较于传统电池组省去了均衡电路和保险丝,只需要增加少量的机械开关和冗余电池。对于多节电池串联的电池串,增加较少的质量即可以显著提升电池串的可靠度。

参考文献 (References)

[1] 高阳,徐国宁,王生,等.平流层飞艇能源系统建模与小信号稳定性分析[J].太阳能学报,2022,43(8):50-57.
GAO Y, XU G N, WANG S, et al. Modeling and small signal stability analysis of stratospheric airship energy system[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(8): 50-57(in Chinese).

[2] 刘乾石,徐国宁,李兆杰,等.长航时高空科学气球能量平衡分析与优化[J].太阳能学报,2021,42(5):276-285.
LIU Q S, XU G N, LI Z J, et al. Energy balance analysis and optimization of long-term high altitude scientific balloon[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(5): 276-285(in Chinese).

[3] 赵新路,杨希祥,侯中喜,等.平流层飞艇再生能源能量平衡的关键技术分析研究[J].科学技术与工程,2016,16(30):85-91.
ZHAO X L, YANG X X, HOU Z X, et al. Pivotal technology analysis of stratospheric airship based on energy balance in regenerative energy system[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(30): 85-91(in Chinese).

[4] 林晓辉,陆翀,张兴浩,等.临近空间飞艇电源系统新型拓扑结构研究[J].航天器工程,2014,23(6):41-46.
LIN X H, LU C, ZHANG X H, et al. Study of new topology of electrical power system used on near space airship[J]. Spacecraft Engineering, 2014, 23(6): 41-46(in Chinese).

[5] XU J, MEI X S, WANG J P. A high power low-cost balancing system for battery strings[J]. Energy Procedia, 2019, 158: 2948-2953.

[6] 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, 2014, 61(8): 3989-3999.

[7] 林鸿业,康龙云,卢楚生,等.基于电感储能的新型锂离子电池组C2C均衡电路[J].电力电子技术,2020,54(7):39-41.
LIN H Y, KANG L Y, LU C S, et al. A novel lithium-ion battery pack C2C equalization circuit based on inductive energy storage[J]. Power Electronics, 2020, 54(7): 39-41(in Chinese).

[8] 叶凌云,朱幸,黄添添,等.变压器分立的动力电池组主动均衡技术研究[J].仪器仪表学报,2018,39(7):83-91.
YE L Y, ZHU X, HUANG T T, et al. Research on active balance technology of power battery pack based on multi-transformer method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(7): 83-91(in Chinese).

[9] 张宇,白伟,史砚磊,等.基于热失控风险指数的锂电池安全评价方法[J].北京航空航天大学学报,2021,47(5):912-918.
ZHANG Y, BAI W, SHI Y L, et al. Evaluation method of lithium battery safety based on thermal runaway risk index[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(5): 912-918(in Chinese).

[10] 王子毅,朱承治,周杨林,等.基于动态可重构电池网络的OCV-SOC在线估计[J].中国电机工程学报,2022,42(8):2919-2929.
WANG Z Y, ZHU C Z, ZHOU Y L, et al. OCV-SOC estimation based on dynamic reconfigurable battery network[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2919-2929(in Chinese).

[11] MANENTI A, ABBA A, MERATI A, et al. A new BMS architecture based on cell redundancy[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(9): 4314-4322.

[12] KERSTEN A, KUDER M, HAN W J, et al. Online and on-board battery impedance estimation of battery cells, modules or packs in a reconfigurable battery system or multilevel inverter[C]/Proceedings of the 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1884-1891.

[13] KIM T, QIAO W, QU L Y. Power electronics-enabled self-X multicell batteries: a design toward smart batteries[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(11): 4723-4733.

[14] CI S, ZHANG J C, SHARIF H, et al. A novel design of adaptive reconfigurable multicell battery for power-aware embedded networked sensing systems[C]/Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2007: 1043-1047.

[15] GUNLU G. Dynamically reconfigurable independent cellular switching circuits for managing battery modules[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(1): 194-201.

[16] 廖力,纪锋,吴铁洲,等.采用附加电源的均衡电路与容量自均衡方法[J].电测与仪表,2020,57(7):48-53.
LIAO L, JI F, WU T Z, et al. Equalization circuit with additional power supply and capacity self-balancing method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(7): 48-53(in Chinese).

[17] 王友仁,黄薛,耿星,等.容错航空蓄电池电源及其均衡管理[J].航空学报,2018,39(5):321722.
WANG Y R, HUANG X, GENG X, et al. Fault-tolerant battery power supply for aircraft and its active equalization management[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(5): 321722(in Chinese).

[18] JI F, LIAO L, WU T Z, et al. Self-reconfiguration batteries with stable voltage during the full cycle without the DC-DC converter[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 28: 101213.

- [19] CI S, LIN N, WU D L. Reconfigurable battery techniques and systems: a survey[J]. *IEEE Access*, 2016, 4: 1175-1189.
- [20] HAN W J, WIK T, KERSTEN A, et al. Next-generation battery management systems: dynamic reconfiguration[J]. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2020, 14(4): 20-31.
- [21] CUI H Y, WEI Z B, HE H W, et al. Novel reconfigurable topology-enabled hierarchical equalization of lithium-ion battery for maximum capacity utilization[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023, 70(1): 396-406.
- [22] HUANG X R, SUI X, STROE D I, et al. A review of management architectures and balancing strategies in smart batteries[C]//Proceedings of the 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Piscataway: IEEE Press, 2019: 5909-5914.
- [23] TASHAKOR N, ARABSALMANABADI B, NASERI F, et al. Low-cost parameter estimation approach for modular converters and reconfigurable battery systems using dual Kalman filter[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2022, 37(6): 6323-6334.
- [24] 王莹, 严晓, 林文魁, 等. 具备冗余单元的电池组放电效率研究[J]. *电源技术*, 2018, 42(12): 1832-1834.
WANG Y, YAN X, LIN W K, et al. Research on discharge efficiency of battery pack with redundant cells[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2018, 42(12): 1832-1834(in Chinese).
- [25] 李结胜. 高效高精度电池管理系统的设计和开发[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
LI J S. Design and development of high efficiency and high precision battery management system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019(in Chinese).
- [26] 叶泽雨, 尹靖元, 师长立, 等. 基于多智能体强化学习的可重构电池组串并联均衡方法[J]. *实验技术与管理*, 2022, 39(6): 68-72.
YE Z Y, YIN J Y, SHI C L, et al. Reconfigurable battery series and parallel equalization method based on multi agent reinforcement learning[J]. *Experimental Technology and Management*, 2022, 39(6): 68-72(in Chinese).
- [27] 中国人民解放军总装备部. 电子设备可靠性预计手册: GJB/Z 299C—2006[S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 2006.
General Armaments Department of the People's Libe. Reliability prediction handbook for electronic equipment: GJB/Z 299C—2006 [S]. Beijing: General Armaments Department of the People's Libe, 2006(in Chinese).
- [28] 程林, 万宇翔, 周杨林, 等. MMC 型电力电子变压器运行可靠性分析及其应用[J]. *电网技术*, 2022, 46(3): 1073-1083.
CHENG L, WAN Y X, ZHOU Y L, et al. Operational reliability

analysis and application of MMC power electronic transformers[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(3): 1073-1083(in Chinese).

附录 A:

所有器件的可靠性计算如下, 所有器件的电应力比均取 0.2, 温度取 55 °C, 质量等级按照民用产品的最高等级, 环境类别为地面良好。

电池的工作失效率预计模型:

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_E \pi_Q \quad (A1)$$

式中: λ_p 为工作失效率, 单位为 $10^{-6}/h$; λ_b 为基本失效率, 单位为 $10^{-6}/h$, 其中锂电池为 1.5; π_E 为环境系数, 取 1.0; π_Q 为质量等级, 取 0.45。

机电继电器的工作失效率预计模型:

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_E \pi_Q \pi_{C1} \pi_{CYC} \pi_r \pi_A \pi_C \quad (A2)$$

式中: λ_b 取 0.087 2; π_E 为环境系数, 环境为 G_B , 取 1.0; π_Q 为质量等级, 质量等级为 A_2 , 取 0.3。 π_{C1} 为触电形式系数, 1 刀双掷取 1.7。 π_{CYC} 为动作速率系数, 动作速率 f 为 10 次/h, π_{CYC} 为 1。 π_r 为额定负载系数, 触电负载额定值 (I/I_A) 取 1.0 ($1 < I < 10$)。 π_A 为应用系数, 通用型为 0.94; π_C 为结构系数, 为磁保持式, 取 3.2。

硅场效应晶体管的工作失效率预计模型:

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_E \pi_Q \pi_A \pi_C \pi_K \pi_r \quad (A3)$$

式中: λ_b 取 0.151; π_E 取 1.0, 环境为 G_B , π_Q 取 0.2, 质量等级为 A_5 , 开关应用 π_A 取 0.70; 单管 π_C 取 1.0; π_K 为种类系数, 硅场效应晶体管的类型取 1.0; π_r 为额定功率系数, 其中额定功率表示为 P/W , 取 1.5 ($1 < P \leq 5$)。

普通二极管的工作失效率预计模型:

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_E \pi_Q \pi_r \pi_A \pi_{S_2} \pi_C \quad (A4)$$

式中: λ_b 取 0.023; π_E 取 1.0, 环境为 G_B ; π_Q 取 0.2 质量等级, 质量等级为 A_5 ; π_r 取 2.0 (额定电流 $3 < I \leq 10$); 电源整流 π_A 取 1.5; π_A 取 0.2, 电压力 ≤ 0.3 ; π_C 取 1.0, 接触结构为冶金键合。

Series-parallel topology of reconfigurable battery pack based on hybrid switching devices

YE Zeyu^{1,2}, YIN Jingyuan^{1,2,*}, ZHANG Tongshuo¹, SHI Changli^{1,2}, WEI Tongzhen^{1,2}

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100090, China;

2. School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Near-space vehicles require battery packs composed of a large number of cells connected in series and parallel. The failure of battery cells can seriously affect the performance of the battery pack and may cause the propagation of the failure. By configuring power electronic switches in the battery pack, cells or certain sections of them can be reconfigured, enabling fault battery isolation and capacity balance between batteries. In order to achieve high efficiency and reliability of power supply, a reconfigurable battery pack based on a hybrid switch was proposed. First, fast-response power electronic devices were used to isolate the battery string, and mechanical relays were used to control the insert and removal of a battery cell. Then, a battery switching strategy based on a hybrid switching device structure was proposed, incorporating a diode-assisted bus voltage regulation method. At last, a prototype of a hybrid-switch-based reconfigurable battery pack with 10-series, 2-parallel connections was built, and a reconstruction experiment under discharge conditions was carried out. The experimental results show that the proposed structure can realize battery balancing, fault isolation, and bus voltage regulation through switching devices. Analyses of loss, reliability, and weight show that the structure can manage cells with minimal additional system loss and weight, improving overall battery pack reliability.

Keywords: battery management; reconfigurable battery pack; hybrid switch; fault reconstruction; reliability; balance of battery capacity

Received: 2022-10-30; **Accepted:** 2023-02-23; **Published Online:** 2024-11-07 09:28

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20241106.1525.005

Foundation items: National Key Research and Development Project of China (2021YFB2601602); Scientific Research Fund of Institute of Electrical Engineering, CAS (E155610201); Youth Innovation Promotion Association, CAS (2020144)

* **Corresponding author.** E-mail: yinjingyuan@mail.iee.ac.cn