

基于混合电容储能的500 kW级电磁推进脉冲电源设计

杨博¹, 巩帅奇², 谭磊¹, 王辰³, 吴宇桐³

(1. 国网北京市电力公司, 北京 100000; 2. 上海电力大学, 上海 200092;
3. 国网北京市电力公司电力科学研究院配电技术研究所, 北京 100000)

摘要: 针对500 kW级电磁推进系统对脉冲电源在能量密度、转换效率及输出稳定性方面的高需求, 本研究设计了一种基于超级电容与薄膜电容混合储能的电磁推进脉冲电源。该电源利用超级电容组进行能量存储, 依靠薄膜电容组完成大功率瞬时放电, 通过放电拓扑结构保障电能向负载模块的高效稳定传输, 并结合三级保护机制保障系统放电过程的安全性与可靠性。实验结果表明, 该电源样机的能量密度为18.3 Wh/kg, 转换效率为91.74%, 脉冲电流过冲量控制在5.00%以内, 各项指标均满足500 kW级电磁推进系统的技术要求。本研究设计的脉冲电源解决了现有中功率电磁推进脉冲电源存在的能量密度低、转换效率差及负载适配性不足等问题。

关键词: 混合电容储能; 电磁推进; 脉冲电源; 多模块并联放电拓扑; 复合控制策略

中图分类号: TN86

文献标识码: A

DOI: 10.14106/j.cnki.1001-2028.2025.0373

引用格式: 杨博, 巩帅奇, 谭磊, 等. 基于混合电容储能的500 kW级电磁推进脉冲电源设计 [J]. 电子元件与材料, 2025, 44(10): 1220-1228.

Reference format: YANG Bo, GONG Shuaiqi, TAN Lei, et al. Design of a 500-kW electromagnetic propulsion pulse power supply based on hybrid capacitor energy storage [J]. Electronic Components and Materials, 2025, 44(10): 1220-1228.

Design of a 500-kW electromagnetic propulsion pulse power supply based on hybrid capacitor energy storage

YANG Bo¹, GONG Shuaiqi², TAN Lei¹, WANG Chen³, WU Yu tong³

(1. State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100000, China; 2. Shanghai Electric Power University, Shanghai 200092, China; 3. Distribution Technology Research Institute, Electric Power Science Research Institute of State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100000, China)

Abstract: To meet the high demands of 500-kW electromagnetic propulsion systems on pulse power supplies in terms of energy density, conversion efficiency, and output stability, this paper presented a pulse power supply design based on a hybrid energy storage system combining supercapacitors and film capacitors. The power supply employed supercapacitor banks for energy storage and film capacitor banks for instantaneous high-power discharge. An efficient discharge topology ensured stable power transmission to the load module, while a three-level protection mechanism enhanced the safety and reliability of the discharge process. Experimental results indicate that the prototype achieves an energy density of 18.3 Wh/kg, and a conversion efficiency of 91.74%. The pulse current overshoot is controlled within 5.00%. All these metrics satisfy the technical requirements of 500-kW class electromagnetic propulsion systems. The proposed pulse power supply effectively addresses issues such as low energy density, poor conversion efficiency, and insufficient load adaptability in existing medium

收稿日期: 2025-09-10

基金项目: 上海市自然科学基金 (24ZR1425800)

通信作者: 杨博, 高级工程师, 硕士, 研究方向为智慧能源、柔性配用电与电能质量领域等。E-mail: 18600862181@163.com

-power electromagnetic propulsion pulse power supplies.

Keywords: hybrid capacitor energy storage; electromagnetic propulsion; pulse power supply; multi-module parallel discharge topology; compound control strategy

电磁推进技术凭借其无工质消耗、推力调节范围宽、响应速度快等优势, 已被广泛应用于微型卫星姿态控制、轨道交通辅助驱动等领域^[1-2]。而脉冲电源作为该技术的能量核心, 需要同时满足 MW 级的高峰值功率、 μs 至 ms 级的短脉冲宽度以及高重复频率的要求, 其性能直接影响着电磁推进系统的推力密度与运行稳定性^[3-4]。目前, 脉冲电源的储能方案主要包括电池储能、电感储能与电容储能三类, 但电池与电感储能在响应速度、波形调控等方面存在局限, 而超级电容、薄膜电容等电容储能方式凭借其充放电时间常数小、功率密度高、循环寿命长等优势, 正逐渐成为中低功率电磁推进脉冲电源的主要储能载体^[5-8]。

近年来, 国内外大量学者对电容储能进行了研究, 虽然取得了一定成果, 但仍存在较为明显的研究缺口。例如, 针对电容储能系统难以在短期内大幅提升储能密度的问题, 叶文怡团队提出了一种无电抗器电容储能型脉冲功率电源方案, 该方案通过简化拓扑结构有效突破了储能密度提升的瓶颈^[9]。但该研究未考虑到不同类型电容的性能互补, 因此难以兼顾储能密度与功率密度的协同优化。在薄膜电容的可靠性研究方面, Zhang 等分析了脉冲数对金属化薄膜电容器性能的影响, 发现有效自愈能够维持电容性能的稳定, 而破坏性自愈与致死性自愈会导致电容容量衰减并增大介质损耗^[10]。但该研究仅聚焦于单一电容类型的失效机制, 未结合电磁推进脉冲电源的实际工况探讨多电容协同工作下的可靠性设计。张昌海小组通过将 BaTiO_3 与 [6, 6]-苯基 C61 丁酸甲酯 (PCBM) 相复合, 对薄膜电容的复合介质性能进行了优化, 发现质量分数 3% 的 BaTiO_3 与 2% 的 PCBM 复配时, 介质的极化强度与击穿场强均达到最优^[11]。但该研究局限于电容材料层面的性能改进, 未延伸至脉冲电源拓扑设计与负载需求的匹配问题。而在超级电容的应用研究中, Vykhotsev 等学者设计了一个基于超级电容器的能量密集型存储装置, 通过降压电流调节器实现电流的稳定输出, 为大功率微波发生器磁系统的稳定供电提供了可行方案^[12]。但该方案仅依赖单一超级电容储能, 无法满足电磁推进系统对瞬时大功率放电的需求。

基于此, 本研究设计了一种基于超级电容与薄膜电容混合储能的电磁推进脉冲电源, 旨在通过两种电

容的性能互补, 突破单一方案的局限。本研究通过分析 500 kW 级电磁推进负载的等效电路模型, 明确了脉冲电源的性能需求。并设计了结合超级电容与薄膜电容的混合储能方案, 该方案利用超级电容提供基础能量储备, 再由薄膜电容进行瞬时大功率放电。同时, 本研究还设计了一种基于碳化硅金属-氧化物-半导体场效应晶体管模块 (Silicon Carbide Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor, SiC MOSFET) 的多模块并联放电拓扑, 并将其与负载电流预测和电压闭环调节的复合控制策略结合, 以降低开关损耗、抑制脉冲波形振荡。最后, 本研究通过仿真实验与性能测试, 验证了方案的可行性与优越性, 为中功率电磁推进系统提供了新的脉冲电源解决方案。

1 电磁推进对脉冲电源的性能需求与电容储能特性分析

1.1 500 kW 级电磁推进负载等效建模

电磁推进系统的核心负载为推进线圈, 其电气特性直接决定了脉冲电源的设计指标^[13]。本研究以微型卫星轨道调整用电磁推进系统为研究对象, 通过 ANSYS Maxwell 建立推进线圈的电磁模型, 其具体结构如图 1 所示。

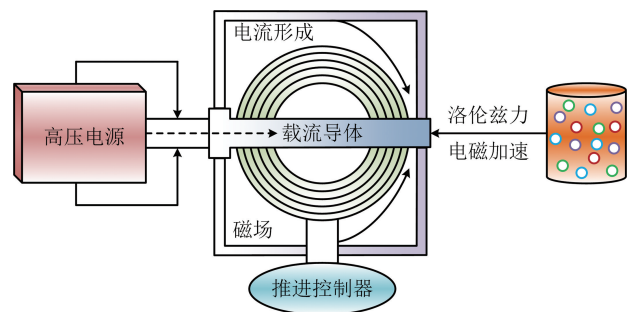


图 1 500 kW 级电磁推进系统的结构图

Fig. 1 Structure of the 500-kW electromagnetic propulsion system

由图 1 可知, 该电磁模型主要包括电源供电、电流形成、洛伦兹力产生、加速运动与推进控制五部分。电磁模型以电源供电为能量输入基础, 通过电流形成环节转化推进线圈所需的电流, 并在特定磁场下产生洛伦兹力, 从而驱动相关部件实现加速运动^[14]。同时

模型借助推进控制器实时调控电流、洛伦兹力的输出及加速状态,进而满足卫星轨道的调整需求^[15]。研究通过对该电磁模型进行电路参数拆解得到以下数据:在 25 ℃ 下的线圈直流电阻为 0.8 Ω,等效电感为 120 μH。负载功率需求如下:当线圈磁感应强度为 0.5 T 时,峰值电流为 8.3 kA,对应峰值功率为 550 kW,加入系统损耗后,峰值功率要求不低于 500 kW,脉冲宽度在 0.8~1.2 ms,重复频率为 10 Hz。其中峰值功率的推导公式如式(1)所示。

$$P_{\text{peak}} = U_{\text{coil}} \cdot I_{\text{peak}} \quad (1)$$

式中: P_{peak} 定义为负载峰值功率; U_{coil} 是线圈两端电压; I_{peak} 表示线圈峰值电流。而电磁推进推力与电流的关系如式(2)所示。

$$F = B \cdot I_{\text{peak}} \cdot L_{\text{coil}} \quad (2)$$

式中: F 代表电磁推进系统的推力; B 为线圈磁感应强度; L_{coil} 是线圈有效长度。

1.2 电容储能元件特性对比与选型依据

为了明确电容选择的依据,本研究选择型号为 EDLC-500 F/2.7 V 的超级电容与型号为 MKP-10 μF/1200 V 的薄膜电容进行了能量密度 (Energy Density, ED)、功率密度 (Power Density, PD)、等效串联电阻 (Equivalent Series Resistance, ESR)、充放电时间常数 (Charge-Discharge Time Constant, CDTC)、循环寿命 (Cycle Life, CL) 的性能测试。测试环境温度为 25 ℃,测试结果如表 1 所示。

表 1 超级电容与薄膜电容性能对比表

Tab.1 Performance comparison of supercapacitor and film capacitor

电容	ED (Wh/kg)	PD (kW/kg)	ESR (mΩ)	CDTC (ms)	CL (次)
超级电容	12	5	45	8.2	>5×10 ⁵
薄膜电容	5	20	8	0.6	>1×10 ⁶

从表 1 中可以看出,超级电容的能量密度为 12 Wh/kg,虽高于薄膜电容,但功率密度较低,仅有 5 kW/kg,难以满足 500 kW 峰值功率的需求。而薄膜电容尽管功率密度较高,但能量密度低,无法支撑 10 Hz 重复频率下的连续放电。其中电容储能能量的计算如式(3)所示。

$$E_{\text{cap}} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U_{\text{rated}}^2 \quad (3)$$

式中: E_{cap} 表示电容储能能量; C 是电容总容量; U_{rated} 为电容额定电压。

2 基于电容储能的脉冲电源系统设计

2.1 混合储能单元拓扑结构设计

超级电容能通过电化学双层效应或法拉第反应实现储能^[16]。薄膜电容主要通过介质薄膜的极化效应储存电荷^[17]。但单一的超级电容与薄膜电容均存在明显的局限性,因此本研究将其结合,设计了一个混合储能单元,其具体结构如图 2 所示。

由图 2 可知,该混合储能单元采用了超级电容组、直流-直流 (Direct Current/Direct Current, DC/DC) 变换器、薄膜电容组的级联结构。首先由超级电容组通过双向 DC/DC 变换器为薄膜电容组充电,实现能量的动态分配。再利用 DC/DC 变换器选择移相全桥拓扑,其中开关器件是 SiC MOSFET,其转换效率超 95.00%,可实现 0~120 kV 的电压调节范围。为了降低参数影响,超级电容组采用 4 串 12 并的集成方式,薄膜电容组采用 7 串 12 并的结构。其中混合储能单元的容量匹配如式(4)所示。

$$E_{\text{sc,fc}} = P_{\text{peak}} \cdot t_{\text{pulse}} \cdot N \quad (4)$$

式中: $E_{\text{sc,fc}}$ 为混合储能单元的能量; t_{pulse} 是单次脉冲宽度; N 代表连续脉冲次数。薄膜电容放电后的剩余能量计算如式(5)所示。

$$E_{\text{fc,rem}} = \frac{1}{2} \cdot C_{\text{fc}} \cdot U_{\text{min}}^2 \quad (5)$$

式中: $E_{\text{fc,rem}}$ 代表薄膜电容剩余能量; C_{fc} 是薄膜电容总容量; U_{min} 为放电后最低电压。而 DC/DC 变换器的补能功率计算过程如式(6)所示。

$$P_{\text{charge}} = \frac{E_{\text{fc}} - E_{\text{fc,rem}}}{t_{\text{charge}}} \quad (6)$$

式中: P_{charge} 是补能功率; E_{fc} 表示薄膜电容的能量; t_{charge} 为补能时间; $E_{\text{fc,rem}}$ 定义为薄膜电容放电后剩余能量。

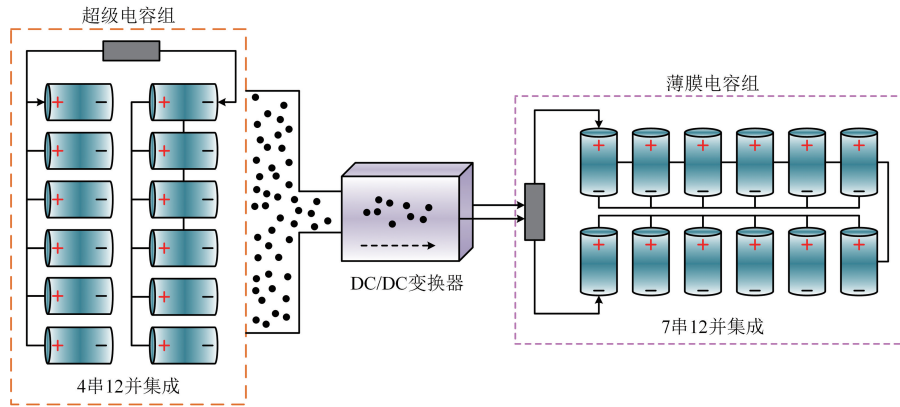


图2 混合储能单元的结构示意图

Fig. 2 Schematic of the hybrid energy storage unit

2.2 SiC MOSFET 多模块并联放电拓扑设计

SiC MOSFET 是一种基于宽禁带碳化硅 (SiC) 材料的第三代半导体器件, 可以凭借 SiC 耐高压、耐高温、高导热率的特性与 MOSFET 电压控制电流的结构实现

高频、低损耗、高功率密度的电力控制^[18-19]。因此本研究采用电感均流混合电阻均流的方案, 设计了一个基于 SiC MOSFET 的多模块并联放电拓扑结构, 其具体结构如图 3 所示。

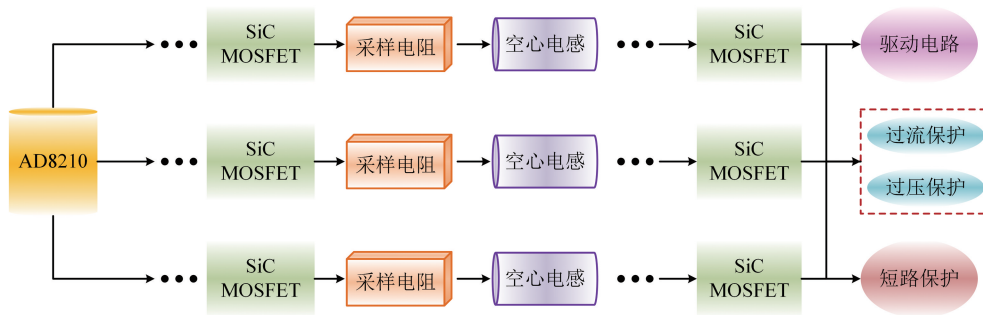


图3 基于 SiC MOSFET 的多模块并联放电拓扑的结构示意图

Fig. 3 Multi-module parallel discharge topology based on SiC MOSFET

从图 3 中可以看出, 每组 SiC MOSFET 串联了 1 μH 的空心电感, 利用电感的电流抑制特性减少模块间的电流差异。并在电感前端串联了 0.5 Ω 的采样电阻, 通过电流采样芯片 (AD8210) 监测每组电流, 并反馈至驱动电路, 以调节栅极电压。针对电磁推进的负载冲击特性, 本研究设计了三级保护机制: 当放电电流超过额定值的 120.00% 时, 快速熔断器被熔断, 并切断主回路实现过流保护。当薄膜电容组并联压敏电阻的电压超过额定值的 125.00% 时, 钳位电压实现过压保护。同时借助绝缘栅双极型晶体管搭建旁路电路, 可在短路的 0.5 μs 内将短路电流引至接地端, 从而实现短路保护。并联模块的电流不平衡度计算如式 (7) 所示。

式中: ΔI 表示电流不平衡度; I_{\max} 和 I_{\min} 分别为并联模块最大电流、最小电流; I_{avg} 是其平均电流。

3 仿真验证与性能测试

3.1 仿真模型构建

本研究借助矩阵实验室 (Matrix Laboratory, MATLAB) 与 Simulink, 构建了一个基于混合电容储能的电磁推进脉冲电源系统仿真模型。关键步骤如下: 首先新建空白模型并添加模块库, 从 Simulink 库中添加电力系统模块库、控制系统模块库等基础模块库。接着设置电容的串并联数、内阻与变换器开关频率等参数, 依次搭建混合储能模块、放电拓扑模块、负载模块以及控制模块。之后集成各模块统一接地, 并添加母线电压、电容电流等测量点, 选择合适的求解器与仿真时间, 最终构建出基于混合电容储能的电磁推

$$\Delta I = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\text{avg}}} \quad (7)$$

进脉冲电源系统模型，其具体结构如图 4 所示。

由图 4 可知，该模型主要包含四个模块，其中混合储能模块由超级电容组、DC/DC 变换器、薄膜电容组组成，放电拓扑模块为多组 SiC MOSFET 的并联电路与保护电路，负载模块是电磁推进线圈等效模型。而控制模块主要借助反向传播 (Back Propagation, BP) 神经网络预测负载电流，同时利用比例积分微分 (Proportion Integral Differentiation, PID) 控制调节电压。其中超级电容组的单只容量、串联数、内阻分别为 50 F, 10 串, 20 mΩ; 薄膜电容组的单只容量、并联数与寄生电阻分别为 100 μF, 20 并, 0.5 Ω。而 DC/DC 变换器的开关频率设置为 10 kHz, SiC MOSFET 的导通电阻为 20 mΩ, 电磁线圈的电阻与电感分别为 0.5 Ω, 10 mH。在此基础上制备实验整机。其中电源的转换效率计算如式 (8) 所示。

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (8)$$

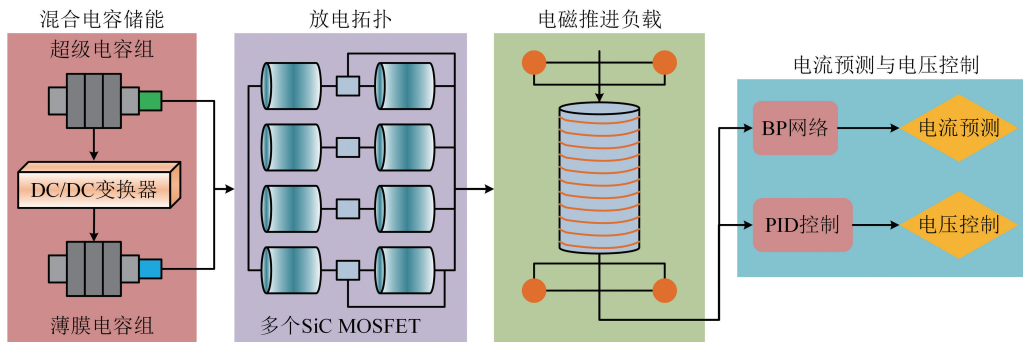


图 4 基于混合电容储能的电磁推进脉冲电源仿真模型的结构示意图

Fig. 4 Simulation model of the electromagnetic propulsion pulse power supply with hybrid capacitor energy storage

3.2 性能测试方案设计

为了证明方案的可行性，本研究对模型进行了可靠性测试与仿真实验，对整机进行了单模块性能测试与整体性能测试。可靠性测试实验过程如下：在 10 Hz 的重复脉冲下，进行每天 10 h，累计 100 h 的连续运行测试，测试期间监测混合电容模块的容量衰减、功率模块的结温等指标。

单模块性能测试的实验过程如下：超级电容组采用 1C 充放电循环方式，测试 1000 次循环后的容量衰减率。单次循环为充电至 129.6 V，放电至 103.7 V。其中 1C 对应超级电容额定容量下的标准充放电速率，符合常规储能元件的寿命测试规范。充电至 129.6 V

式中： η 定义为脉冲电源的转换效率； P_{out} 是电源输出功率； P_{in} 为输入功率。PID 控制电压的离散化公式如式 (9) 所示^[20]。

$$U_{out}(k) = K_p \cdot e(k) + K_i \cdot \sum_{i=0}^k e(i) \cdot T_s + K_d \cdot \frac{e(k) - e(k-1)}{T_s} \quad (9)$$

式中： $U_{out}(k)$ 为 PID 控制器的输出电压； K_p 、 K_i 、 K_d 分别表示比例、积分及微分系数； $e(k)$ 是电压偏差； T_s 代表控制周期。而电容寿命衰减预测方法如式 (10) 所示。

$$\Delta C(N) = a \cdot N + b \quad (10)$$

式中： $\Delta C(N)$ 是 N 次脉冲次数下电容的容量衰减量； a 表示衰减系数； b 为初始衰减率。

是为了匹配系统设计的母线电压上限，确保测试工况贴合实际运行电压条件，103.7 V 是超级电容安全工作的电压下限，能避免过放损伤元件。薄膜电容组采用 1 ms 脉冲放电循环测试 10000 次循环后的容量衰减与介损值，重复频率为 10 Hz，SiC MOSFET 并联模块通入 8.3 kA 的峰值电流，以检测每组电流的偏差。其中 1 ms 脉冲放电契合电磁推进脉冲电源短脉冲、高功率的放电特性，用于模拟实际工况下的瞬时能量释放过程。10 Hz 对应了系统设计的脉冲输出频率，保障了测试工况与实际运行的频率相符。而在 SiC MOSFET 并联模块通入 8.3 kA 的峰值电流主要是为了模拟模块实际运行中的极限电流工况。

整体性能测试实验过程如下: 本研究在 500 kW 级负载下进行整机测试, 实验过程中实时记录整机的峰值功率、脉冲宽度、重复频率、转换效率等核心指标的数据。以上参数旨在验证整机在额定工况下的功率输出、运行稳定性以及能量转换效率, 从而确保整机测试结果具有实际应用意义。

本研究统一采用单一超级电容与单一薄膜电容作为对照组, 通过比较实验结果验证研究模型及整机的优越性与可行性。其中定义 SiC MOSFET 的结温计算公式如式(11)所示。

$$T' = T'_0 + P_{\text{loss, dev}} \cdot R_{\text{th}} \quad (11)$$

式中: T' 表示 SiC MOSFET 的结温; T'_0 代表环境温度; R_{th} 是结到环境的热阻; $P_{\text{loss, dev}}$ 为总损耗。而电源综合性能评价指数设置如式(12)所示。

$$S = \frac{\eta \cdot E_d \cdot P_d}{k^*} \quad (12)$$

式中: S 定义为脉冲电源的综合性能评价指数; η 为转换效率; E_d 是能量密度; P_d 代表功率密度; k^* 表示寿命衰减速率。

4 结果与讨论

4.1 仿真实验结果

为了检验研究模型的可行性, 本研究将其与对照模型进行了可靠性测试, 结果如表 2 所示。

表 2 三组电容储能的可靠性测试结果对比表

Tab. 2 Reliability test results of the three energy storage models

储能模型	运行时间 (h)	容量衰减 (%)	功率结温 (°C)	响应时间 (μs)
混合电容	10	5.30	43.4	0.71
	20	4.73	46.8	0.68
	30	4.21	47.1	0.70
超级电容	10	7.45	61.0	1.32
	20	6.68	67.9	1.26
	30	5.82	70.2	1.29
薄膜电容	10	10.1	57.6	1.17
	20	7.59	61.3	1.21
	30	6.94	66.5	1.18

从表 2 中可以看出, 混合电容储能模型在运行 30

h 时的容量衰减仅有 4.21%, 明显低于单一超级电容储能模型的 5.82% 与单一薄膜电容储能模型的 6.94%。此外, 还能从表 2 中看出, 混合电容储能模型的平均功率结温与平均响应时间分别为 45.77 °C, 0.70 μs, 均低于对比模型。这是因为混合电容储能模型凭借超级电容与薄膜电容的协同工作使脉冲电流应力与能量损耗在双储能单元间合理分配, 在降低功率器件导通损耗与开关损耗的同时减少热量生成, 从而实现电源综合性能的全面提升。接着本研究对三种模型进行了仿真实验, 其中峰值功率及其偏差的比较结果如图 5 所示。

由图 5(a) 可知, 混合电容储能模型的峰值功率均大于 500 kW, 平均值为 504.3 kW, 明显高于超级电容模型的 493.7 kW 以及薄膜电容模型的 494.6 kW。从图 5(b) 中可以看出, 混合电容储能模型的峰值功率偏差全部为正值, 并且偏差范围均在 1.00% 以内, 平均偏差低至 0.33%, 性能显著优于对比模型。这归功于 BP 网络的负载电流预测与 PID 闭环调节的动态优化, 使模型能通过 BP 网络提前预判负载功率需求, 实时调节超级电容对薄膜电容的补能电压与速率, 并

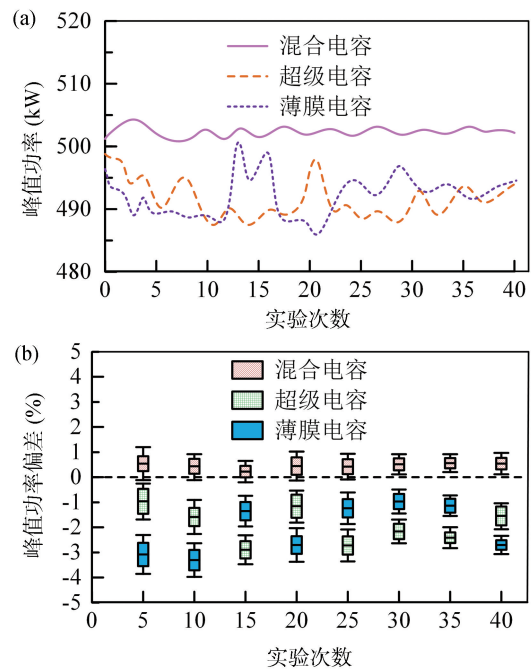


图 5 三种电容储能模型的峰值功率及偏差对比图。(a) 峰值功率; (b) 峰值功率偏差

Fig. 5 Peak power and deviation comparisons of the three capacitor energy storage models. (a) Peak power; (b) Peak power deviations

结合 PID 快速修正放电过程中的电压波动，从而有效降低了功率偏差。之后，对各电容储能模型的脉冲宽度与电流过冲量进行比较，实验结果如图 6 所示。

从图 6(a)中可以看出，混合电容储能模型的脉冲宽度在第 25 次实验时达到最大值 1.28 ms，明显优于对比模型。其原因在于，混合电容储能模型优化了电荷存储与释放的稳定性，减少了超级电容因电极活性物质损耗、薄膜电容因介质极化疲劳导致的电荷存储能力衰减。由图 6(b)可知，超级电容储能模型的平均电流过冲量高达 7.62%，并出现骤升骤降的现象，而混合电容储能模型的平均电流过冲量仅有 3.10%，同时全程变化平稳。这是由于混合电容通过结构与性能的协同优化，弥补了单一电容的短板，有效提升了电流承载与缓冲能力。综合来看，混合电容储能模型通过超级电容与薄膜电容的协同作用，实现了对单一电容模型的全面优化，有效弥补了单一电容短板，能够更好地满足 500 kW 级电磁推进系统的需求。

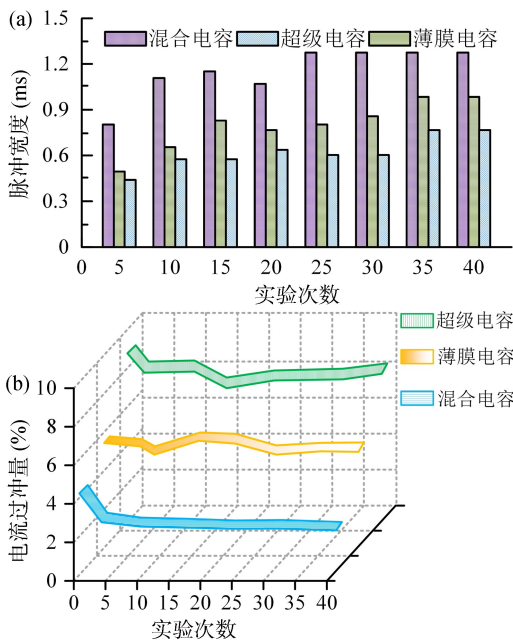


图 6 各电容储能模型的脉冲宽度及电流过冲量比较结果图。(a) 脉冲宽度；(b) 电流过冲量

Fig. 6 Pulse width and current overshoot of different capacitor energy storage models. (a) Pulse width; (b) Current overshoot

4.2 性能测试结果

在检验了基于混合电容储能模型的可靠性与适配性后，为了证明整机的可行性与优越性，本研究将其与基于单一超级电容储能的整机、基于单一薄膜电容的整机分别命名为整机 1~整机 3，并进行了性能测试

比较。首先对各整机进行了单模块性能测试，其中容量衰减率及电流偏差的对比结果如表 3 所示。

由表 3 可知，整机 1 的容量衰减率在 50 次实验中全程低于 2%，并从 1.34% 降至 1.20%，同时下降趋势更平缓。此外，整机 1 的电流偏差在第 20 次实验时趋于稳定，在 30 次实验时达到最小值 2.83%，显著低于整机 2 与整机 3。这表明，整机 1 的混合储能单元在循环充放电过程中的电荷存储能力损耗更小，材料及结构的抗疲劳性更强，并且整机 1 的电路控制精度更高，能有效抑制电流波动，确保输出电流的一致性。接着，对不同整机进行了多模块整体性能测试，其中转换效率与峰值功率的比较结果如图 7 所示。

从图 7(a)中可以看出，整机 1 的转换效率在 15 次实验时达到最大值 91.74%，并且其转换效率的偏移量全程低于对比整机。这主要得益于整机 1 的混合电容储能可以减少能量在充放电过程中因电荷转移不平衡、极化损耗等产生的能量耗散。由图 7(b)可知，整机 1 的峰值功率全程在 500~505 kW 区间内，平均值为 502.7 kW，明显高于对比整机。原因在于整机 1 的 SiC MOSFET 具备开关速度快、导通损耗低等特性，能更高效地传递大电流以减少功率在开关与传输过程中的损耗。同时可以显著提升整机的总电流承载能力，并将混合电容的储能快速、均匀地转化为更大的输出功率并提升功率输出的稳定性。之后本研究对各整机

表 3 三个整机单模块性能测试的容量衰减率及电流偏差对比表

Tab. 3 Comparison table of capacity attenuation rate and current deviation in the performance tests of three single modules of complete machines

指标	实验次数	整机类型		
		整机 1	整机 2	整机 3
容量衰减率 (%)	10	1.34	2.17	3.70
	20	1.31	2.13	3.64
	30	1.25	2.11	3.56
	40	1.22	2.08	3.56
	50	1.20	2.08	3.56
电流偏差 (%)	10	3.09	8.25	5.31
	20	2.86	7.76	4.95
	30	2.83	7.30	5.27
	40	2.83	7.14	5.22
	50	2.83	7.14	5.09

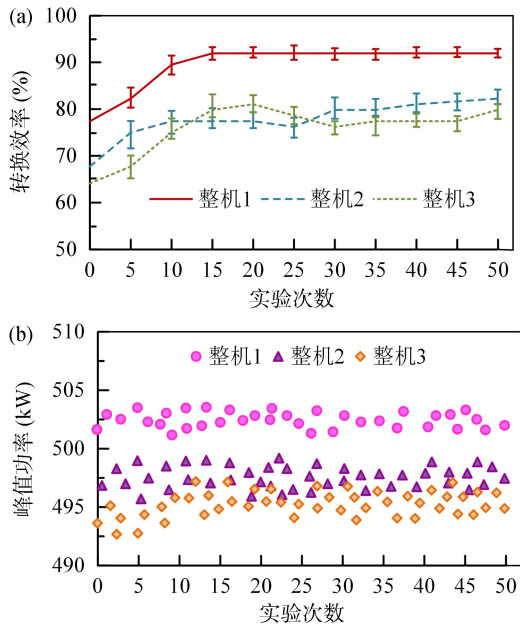


图7 不同整机的转换效率及峰值功率对比图。(a)转换效率; (b)峰值功率

Fig. 7 Conversion efficiency and peak power of different complete machines. (a) Conversion efficiency; (b) Peak power

的能量密度与功率密度做对比实验, 其结果如表 4 所示。

表 4 各整机能量密度与功率密度对比表

Tab. 4 Comparison table of energy density and power density for each complete machine

指标	实验次数	整机类型		
		整机 1	整机 2	整机 3
能量密度 (Wh/kg)	10	15.4	8.2	10.3
	20	16.8	9.7	12.1
	30	17.6	11.3	13.8
	40	18.3	11.3	14.6
	50	18.3	12.5	15.0
功率密度 (Wh/kg)	10	12.7	8.4	6.8
	20	15.2	10.9	8.5
	30	17.4	12.2	10.3
	40	18.1	12.7	10.3
	50	18.1	12.7	10.3

由表 4 可知, 整机 1 的能量密度可高达 18.3 Wh/kg, 功率密度同样高至 18.1 kW/kg。而整机 2 的最大功率密度仅有 12.7 Wh/kg, 整机 3 的最大能量密度为

15.0 Wh/kg, 均逊色于整机 1。这得益于混合储能方案有效结合了超级电容的高能量密度与薄膜电容的高功率密度特性, 从而解决了单一电容的性能矛盾。最后, 本研究对三个整机的电压、电流波动变化进行对比, 实验结果如图 8 所示。

从图 8(a~b)中可以看出, 整机 1 的电压始终保持稳定且波动幅度最小, 全程维持在额定电压的 $\pm 3.00\%$ 以内, 其电流变化同样能精准适配系统需求, 60 min 末仍能保持在额定电流的 98.00% 以上。而整机 2 的电压随运行时间的增加整体呈缓慢下降趋势, 电流在小幅波动的同时缓慢降至额定电流的 90.00%。整机 3 的电压与电流均在运行 30 min 后出现明显下降, 均不如整机 1。其原因在于整机 1 可以通过混合电容快速响应电磁推进的瞬时功率需求并抑制长期运行时的电压漂移, 同时借助 SiC MOSFET 多模块并联拓扑大幅降低了单器件的电流应力, 有效减少了开关损耗与热量积聚。综上所述, 整机 1 在各项测试中的表现均优于对比整机, 有效解决了单一电容的性能瓶颈, 充分证明其在 500 kW 级电磁推进系统中的优越性与可行性。

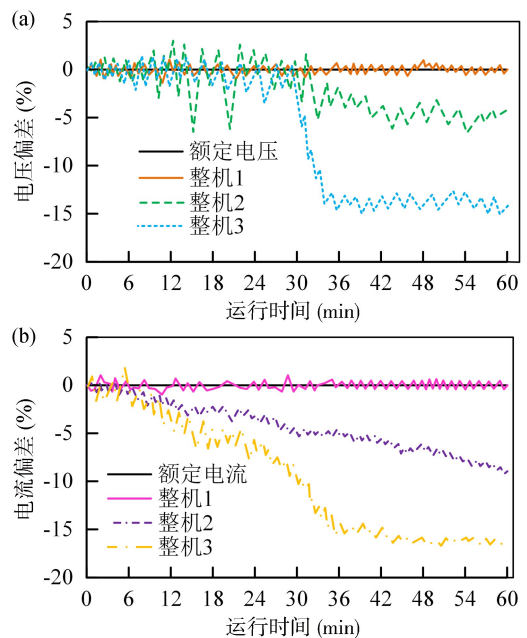


图 8 三个整机的电压和电流波动变化比较。(a)电压波动变化; (b)电流波动变化

Fig. 8 Voltage and current fluctuations of the three complete machines. (a) Voltage fluctuation; (b) Current fluctuation

5 结论

本研究将超级电容与薄膜电容相结合形成混合储

能方式，并与 SiC MOSFET 多模块并联拓扑相融合，设计了一个适用于 500 kW 级电磁推进系统的脉冲电源方案。本研究通过仿真实验明确了该方案在功率密度与能量密度协同平衡的作用机制，揭示了其提升电源输出稳定性的内在原理，为后续样机的研制提供了可靠理论支撑。实测结果表明：在额定工况下，混合电容储能模块的容量衰减率为 1.20%，SiC MOSFET 并联模块的电流均分偏差控制在 2.83% 以内，整机转换效率高达 91.74%，峰值功率的平均值为 502.7 kW，能量密度与功率密度分别为 18.3 Wh/kg，18.1 kW/kg。在持续 60 min 的运行测试中，电源母线电压与负载电流的波动幅度均处于正常范围，未出现明显的漂移现象，验证了方案长期运行的稳定性。相较于现有研究，该脉冲电源方案的创新优势体现在以下三个方面：其一是实现了混合电容储能特性与多模块并联拓扑的深度耦合，突破了单一储能或单一拓扑方案的性能瓶颈。二是构建了涵盖储能、放电、控制与保护的全流程测试体系，实测数据的完整性与指标精度均得到显著提升。三是丰富了中功率电磁推进系统脉冲电源的设计理论，为 500 kW 级电磁推进系统的工程化应用提供了技术支撑。未来研究需优化系统的模块化架构设计，实现 200~1000 kW 功率范围的灵活适配，从而扩大该技术方案的应用覆盖面。

参考文献：

- [1] Zhang X, Zhang W, Zhang X, et al. Experimental research on aero-propulsion coupling characteristics of a distributed electric propulsion aircraft [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2023, 36(2): 201-212.
- [2] 闫荣格, 王学谦, 赵浩凯, 等. 考虑动态接触电阻的电磁能推进装置运动和温度特性研究 [J]. *高电压技术*, 2024, 50(10): 4749-4759.
- [3] 林志宏, 唐雄民, 张森, 等. 一种占空比连续可调的双极性准方波脉冲电源 [J]. *电力电子技术*, 2024, 58(10): 58-61.
- [4] 李海涛, 梁晓宇, 赵博, 等. 超导储能连续脉冲电源 ICCOS 模块参数分析 [J]. *电机与控制学报*, 2023, 27(12): 137-144.
- [5] 王凯丰, 叶林, 王启亨, 等. 电池储能参与传统第三道防线频率调整的协调控制策略 [J]. *电网技术*, 2024, 48(11): 4669-4679.
- [6] 吴铁洲, 谢有焰, 查欢. 基于电感储能的退役电池双层均衡方法研究 [J]. *电源技术*, 2023, 47(9): 1148-1152.
- [7] 朱琼海, 肖晃庆. 基于模块化多电平换流器的超级电容储能系统高效仿真方法 [J]. *电力自动化设备*, 2024, 44(6): 185-191.
- [8] 李浩波, 李化, 张国豪, 等. 基于共轭梯度法的金属化薄膜电容器热点温度反演 [J]. *高电压技术*, 2024, 50(9): 4163-4170.
- [9] 叶文怡, 徐伟东, 付荣耀, 等. 无电抗器电容储能型脉冲功率电源 [J]. *电工技术学报*, 2023, 38(6): 1564-1570.
- [10] Zhang C, Feng Y, Kong F, et al. Accelerated damage in metallized film capacitors under pulse surge combined with rated DC voltage [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2023, 51(6): 1494-1501.
- [11] 张昌海, 闫炜东, 张统钦, 等. 掺杂改性 PMMA/PVDF 共混聚合物基复合介质的储能性能提升 [J]. *复合材料学报*, 2023, 40(7): 3950-3963.
- [12] Vykhodtsev P V, Karpov Y A, Stepchenko A S, et al. Regulated DC sources for powering magnetic systems of microwave generators based on supercapacitor storages [J]. *Instruments and Experimental Techniques*, 2024, 67(3): 471-483.
- [13] 闫荣格, 安康, 杨庆新, 等. 趋肤深度对增强型电磁推进器电感梯度的影响 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2025, 53(1): 21-27.
- [14] 薛睿, 曹广忠, 黄苏丹, 等. 考虑端部效应的动磁式磁悬浮平面电机电磁力解析模型 [J]. *微电机*, 2023, 56(6): 21-25.
- [15] 李渊文, 祝长生. 主动电磁轴承 μ 控制器的多目标优化设计 [J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(13): 5192-5202.
- [16] 季鸣童, 陈雷, 刘亭亭. 自组装 NiO/还原氧化石墨烯复合材料及其超级电容性能研究 [J]. *电子元件与材料*, 2022, 41(12): 1286-1293.
- [17] 肖萌, 陈毓妍, 赵亦烁, 等. 高压直流金属化薄膜电容器绝缘性能提升方法研究进展 [J]. *高电压技术*, 2024, 50(6): 2319-2331.
- [18] 刘勇, 肖岚, 伍群芳, 等. 负载大小对 SiC MOSFET 开关速度的影响 [J]. *电力电子技术*, 2023, 57(10): 133-136.
- [19] 郑翔, 杭丽君, 曾庆威, 等. SiC MOSFET 新型负压关断串扰抑制驱动电路 [J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(20): 8038-8047.
- [20] 李智辉, 杨曦, 肖刚, 等. 基于模糊 PID 控制的燃料电池稳压技术研究 [J]. *武汉理工大学学报*, 2024, 46(1): 138-143.