DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.3.270 **中图分类号**：TM442 **文献标志码**：A

电池–有源电容脉冲负载供电系统容量优化配置

杨 磊[1]，黄玉平[1]，陈家伟[2](中国电源学会高级会员)，
敖文杰[2](中国电源学会学生会员)
(1.北京精密机电控制设备研究所，北京 100076；2.重庆大学自动化学院，重庆 401331)

摘要：混合供电技术可有效整合不同供电单元的优势，是实现高功率密度脉冲负载供电系统的关键技术之一。针对现有航天伺服脉冲负载供电系统容量大、功率密度低等问题，提出了1种电池–有源电容脉冲负载混合供电系统及其容量优化配置技术。首先对系统架构及运行状态进行了分析，确立了优化目标及关键约束条件；其次利用分析法对电池和有源电容的容量进行了优化，确立了脉冲负载功率在电池和有源电容间的分配关系，实现了供电系统的体积最小化。最后，在实验室搭建了1台常值功率2.7 kW/峰值功率35.0 kW的脉冲负载用供电系统实验样机，实验结果验证了理论分析的正确性。

关键词：脉冲供电系统；低频脉冲负载；容量配置；有源电容

Optimal Capacity Configuration of Battery-active Capacitor Pulse Load Power Supply System

YANG Lei[1], HUANG Yuping[1], CHEN Jiawei[2], *Senior Member*, *CPSS*,
AO Wenjie[2], *Student Member*, *CPSS*
(1. Beijing Institute of Precision Mechatronics and Controls, Beijing 100076, China; 2. School of Automation, Chongqing University, Chongqing 401331, China)

Abstract: The hybrid power supply technology can effectively integrate the advantages of different power supply units, which is one of the key technologies to realize high power density pulse load power supply systems. Aimed at the problems in the existing aerospace servo pulse load power supply system such as a large capacity and a low power density, a battery-active capacitor pulse load hybrid power supply system and the corresponding optimal capacity configuration technology are proposed. First, the system architecture and operation state are analyzed, and the optimization target and key constraints are established. Second, the capacity of the battery and active capacitor are optimized using an analytical method, and the distribution manner of pulse load power between the battery and active capacitor is established, so as to realize the volume minimization of the power supply system. Finally, an experimental prototype of the pulse load power supply system with a constant power of 2.7 kW and a peak power of 35.0 kW was constructed in the laboratory, and experimental results verified the theoretical analysis.

Keywords: Pulse power supply system; low-frequency pulse load; capacity configuration; active capacitor

近年来，多电/全电技术在航空航天领域快速发展[1-3]。航空航天器中存在大量脉冲型负载，如飞机中舵面伺服作动系统[4]、火箭发动机喷管伺服系统[5]及雷达[6]等，这些脉冲负载呈高峰均比特性，脉冲频率低且不固定，脉冲负载加载时会对母线电压造成较大冲击，引起电压大幅跌落，而脉冲负载卸载时产生的回馈能量则会引起母线电压泵升。供电源电压的变化不仅会导致负载性能难以保证，而且会威胁系统安全稳定运行。

为了在负载功率脉冲过程中将供电系统输出

收稿日期：2023-07-05；**修回日期**：2023-09-22；**录用日期**：2023-11-01；**网络首发日期**：2024-02-28

电压跌落限制在允许范围内，可采用并接有源电容方案，构成脉冲负载混合供电 PLHPS(pulse load hybrid power supply)系统。文献[7-9]针对雷达型脉冲负载提出了并接有源电容的混合供电方案，然而这些研究仅关注对有源电容单元的优化设计与控制，而未综合考虑主供电源与有源电容间的耦合关系，致使供电系统的功率密度未能进一步提升。为此，需探寻电池和有源电容承担负载脉冲功率的最佳占比，实现容量协同优化配置。

对于多源系统容量配置，一般可借鉴分布式电源及微电网中常用的容量协同配置方法。通过确立优化目标，采用合适的优化算法在运行约束条件下可求解出多源容量优化配置方案。文献[10]考虑了光伏出力在不同工况下的波动对储能规模的影响，采用密度峰值聚类算法对全部光伏出力运行场景进行聚类，实现了集中式发电场景下储能优化配置；文献[11]针对风电混合储能系统容量优化配置提出了 1 种基于改进滑动平均滤波和集合经验模态分解的平抑风电功率波动的方法，基于全寿命周期成本理论构建储能系统经济成本计算模型，得到经济最优的配置方案；文献[12]针对城市轨道交通混合储能系统采用小波包分解技术，对牵引负荷与风光输出功率信号进行多尺度分解与重构得到低频风光并网功率和中高频分量，使用电池与超级电容分别吸收中频与高频分量，结合粒子群算法，实现混合储能系统年综合成本最小化和内部功率容量配置优化方案。可以看出，现有研究中优化目标常以成本和经济性为主，未考虑系统功率密度指标(体积、重量)，不利于实现系统轻量化设计。文献[13]以高功率密度为优化目标，提出了基于等效时间概念及空间矢量法的混合储能系统优化配置方法，但容量配置时并未考虑主供电源的有限容量约束，所得方法应用受限。

综上所述，本文对低频宽变频脉冲负载供电系统展开了研究，提出了电池-有源电容 PLHPS 方案，解决了高峰均比脉冲负载、能量回馈、低频宽变频等条件下的电池/电容容量优化配置问题，提升了 PLHPS 的功率密度。

1　PLHPS 架构及负荷特性

本文以航天伺服系统用电池-有源电容 PLHPS 为研究对象，系统结构如图 1 所示，图中：V_{OCV} 为电池开路电压；i_{BAT} 为电池输出电流；r_{BAT} 为电池内阻；i_{load} 为负载电流；i_o 为有源电容变换器输出电流；V_{C_s} 为储能电容 C_s 的电压；V_{bus} 为母线电压。

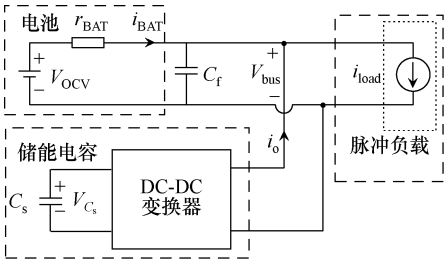


图 1　电池-有源电容脉冲负载供电系统

Fig. 1 Battery-active capacitor pulse load power supply system

图 2 为伺服系统的典型负载特性(示意)[3]，负载脉冲峰值电流为 120 A，常值电流为 10 A，脉冲频率在 0.2~5.0 Hz 范围变化，脉冲宽度为 20~50 ms，当脉冲结束后，立即有能量回馈至母线上，回馈电流为-10 A，回馈时间 30 ms。

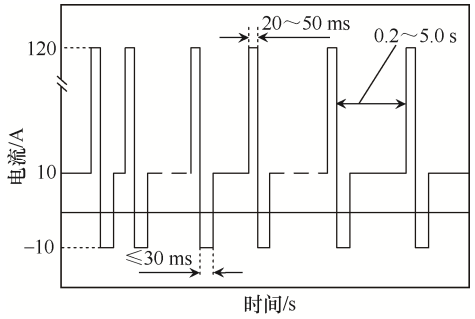


图 2　伺服系统典型负载特性

Fig. 2 Typical load characteristics of servo system

图 3 为本文所研究电池-有源电容 PLHPS 正常工作时的关键波形，主要可分为 4 个阶段。

阶段一：脉冲运行阶段，电池和有源电容共同为脉冲负载供电。

阶段二：能量回馈阶段，脉冲负载结束后，伺服系统制动产生的回馈能量全部由有源电容吸收，同时电池给电容充电。

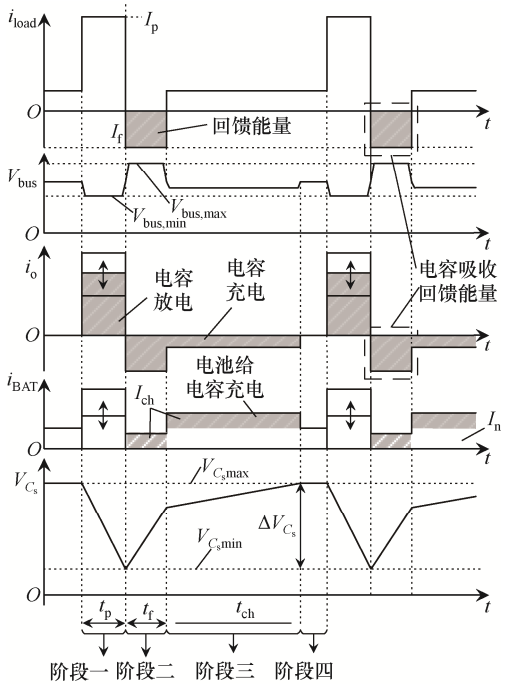


图 3 脉冲负载供电系统正常工作关键波形

Fig. 3 Key waveforms of pulse load power supply system under normal operation

阶段三：电容充电阶段，能量回馈结束后，电池继续给电容充电至最大值，同时向负载供给所需常值功率。

阶段四：脉冲准备阶段，电池仅提供负载常值功率，系统准备好提供脉冲功率。

2 PLHPS 容量优化配置方法

2.1 优化目标

因本文所研究电池−有源电容 PLHPS 为独立供电系统(电池存储能量固定且随着用电一直下降)，工作时长固定，因此选用系统总体积为优化指标(选用总重量为优化指标时方法类似)。系统的体积主要由电池、电容、DC-DC 变换器及控制系统构成。考虑不同容量和端电压的电池由多个相同电芯单体串并联组成时，电池体积 $V_{ol,BAT}$ 与电池容量 Q_{BAT} 及其标称电压 V_{BAT} 满足关系

$$V_{ol,BAT} = k_{BAT} Q_{BAT} V_{BAT} \tag{1}$$

式中，k_{BAT} 为与电池型号及种类相关的常数。

电容体积 $V_{ol,C}$ 与电容耐受电压 V_C 及容量 Q_C 满足关系

$$V_{ol,C} = k_C Q_C \qquad k_C \propto V_C \tag{2}$$

式中，k_C 为与电容耐受电压及电容类型相关的常数，特定 V_C 值下表示为 k_{C,V_C}。

因负载为短时脉冲负荷，常值功率较低，且运行时间较短，因此，在航天伺服供电应用场合有源电容双向 DC-DC 变换器中功率管紧贴机壳，无需安装额外散热器。双向 DC-DC 变换器及其控制系统体积 $V_{ol,CTRL}$ 主要由采样系统、主控单元、功率管及电感器组成。考虑到采样系统及主控单元体积恒定，功率管及电感器的体积与变换器的功率等级有关，功率等级不同时功率管和电感器的设计有所不同，导致体积有所变化，本文中，负载功率确定且大部分脉冲功率仍由有源电容提供，其体积变化较小。为简化分析，此处视为定值(具体值根据工程经验估计)。至此，优化目标函数确定为

$$\min J = \min(V_{ol,BAT} + V_{ol,C} + V_{ol,CTRL}) \tag{3}$$

2.2 约束条件

2.2.1 母线电压约束

为了保证脉冲负载正常工作，在极端情况下应保证母线电压维持在一定范围内。根据图 1 所示，电池的输出电压(即母线电压)可表示为

$$V_{bus} = V_{OCV} - r_{BAT} i_{BAT} \tag{4}$$

在系统运行过程中，母线电压变化应满足 $V_{bus,min} \leqslant V_{bus} \leqslant V_{bus,max}$，$V_{bus,min}$、$V_{bus,max}$ 分别为母线电压最小和最大允许值。

2.2.2 电池容量约束

由于电池的能量是供电系统的全部能量来源，故电池的容量(能量)应大于系统全工作时段消耗的所有能量，即

$$Q_{BAT} V_{BAT} \geqslant W_{load} - W_{febk} + W_{loss} \tag{5}$$

式中：W_{load} 为负载在整个工作时间段消耗的能量；W_{febk} 为伺服系统的回馈能量；W_{loss} 为电池、变换器等的损耗能量。W_{load} 和 W_{febk} 可根据图 2 脉冲负载特性计算得出，W_{loss} 由变换器效率及电池参数估算。

2.2.3　电容充电时间约束

在电容放电结束后，应在下一次脉冲到来前将电容充电至设计电压上限，以应对下一次脉冲负载冲击，故电容充电电流应满足

$$V_{\text{bus}}I_{\text{ch}}(t_{\text{ch}}+t_{\text{f}})+V_{\text{bus}}I_{\text{f}}t_{\text{f}}\geqslant\frac{1}{2}Q_C V_{C\max}^2-\frac{1}{2}Q_C V_{C\min}^2 \tag{6}$$

式中：I_{ch}为电池给电容的充电电流；I_{f}为回馈电流；t_{ch}、t_{f}分别为I_{ch}、I_{f}的持续时间。

2.3 容量协同配置方法

根据2.1节分析，有源电容的DC-DC变换器(含控制系统)体积可视为定值，根据式(1)和式(2)，电池、电容的体积与其容量成正比，因此需要根据2.2节的约束条件及图3所示的工作波形找到电池与电容的容量与脉冲负载的供电占比之间的耦合关系。在电池-有源电容PLHPS运行的第一阶段，电池和电容共同出力对脉冲负载进行供电。设脉冲功率在电池和电容 C_{s} 之间的分配比率分别为 λ_{BAT} 和 λ_C，两者满足 $\lambda_{\text{BAT}}+\lambda_C=1$，$\lambda_{\text{BAT}}$、$\lambda_C\in(0,1)$。根据图2所示负载特性，电容 C_{s} 的最小容量可确定为

$$Q_{C_{\text{s}}}=\frac{2V_{\text{bus}}I_{\text{p}}t_{\text{p}}\lambda_C}{V_{C_{\text{s}}\max}^2-V_{C_{\text{s}}\min}^2} \tag{7}$$

式中：I_{p} 为脉冲电流大小；t_{p} 为脉冲宽度；$V_{C_{\text{s}}\max}$、$V_{C_{\text{s}}\min}$ 分别为电容 C_{s} 电压的上、下限。

锂电池的内阻与标称电压及电池容量近似满足[14](忽略温度及电池荷电状态SOC(state-of-charge)对内阻的影响)关系

$$r_{\text{BAT}}=k_{\text{r}}\frac{V_{\text{BAT}}}{Q_{\text{BAT}}} \tag{8}$$

式中，k_{r}为与电池型号及种类相关的常数。

系统运行时电池能量不断消耗，为确保系统在全工作时段正常运行，需以最后一次脉冲负载到来时电池的性能来计算电池容量。考虑到 SOC 小于 SOC 阈值 $S_{\text{OC,th}}$(通常为 15%)时开路电压骤降，因此工作结束时电池 SOC 应维持在 $S_{\text{OC,th}}$ 以上，此时其开路电压 V_{OCV} 约为其标称电压 V_{BAT}。因此，在第一阶段，结合式(4)和式(8)，可得电池的最小容量应满足

$$Q_{\text{BAT}}\geqslant\frac{k_{\text{r}}V_{\text{BAT}}(1-\lambda_C)I_{\text{p}}}{V_{\text{BAT}}-V_{\text{bus,min}}} \tag{9}$$

在第二阶段，电池在此阶段仅给电容充电，输出电流小于第三阶段，因此约束条件从属于第三阶段。在第三阶段，电池给电容充电的同时给负载供给常值功率。此阶段电池的输出电流为

$$i_{\text{BAT}}=I_{\text{ch}}+I_{\text{n}} \tag{10}$$

式中，I_{n}为负载常值电流。结合式(4)、式(6)~式(8)、式(10)可得电池的最小容量为

$$Q_{\text{BAT}}\geqslant\frac{[\lambda_C I_{\text{p}}t_{\text{p}}-I_{\text{f}}t_{\text{f}}+I_{\text{n}}(t_{\text{ch}}+t_{\text{f}})]k_{\text{r}}V_{\text{BAT}}}{(t_{\text{ch}}+t_{\text{f}})(V_{\text{BAT}}-V_{\text{bus,min}})} \tag{11}$$

在第四阶段，输出电流小于等于第三阶段，即第二至第四阶段的电池容量均要满足式(11)。关于 Q_{BAT} 的 3 个约束条件如式(5)、式(9)和式(11)所示，分别用 Q_{BAT1}、Q_{BAT2}、Q_{BAT3} 表示。至此，系统的最小体积 $V_{\text{ol,PLHPS}}$ 可表示为

$$V_{\text{ol,PLHPS}}=\min\left\{k_{\text{BAT}}Q_{\text{BAT}i}V_{\text{BAT}}+k_C\frac{2V_{\text{buc}}I_{\text{p}}t_{\text{p}}\lambda_C}{V_{C_{\text{s}}\max}^2-V_{C_{\text{s}}\min}^2}+V_{\text{ol,CTRL}}\right\}$$
$$i=1,2,3 \tag{12}$$

由式(12)可知，PLHPS 体积最优值仅随 Q_{BAT} 取值变化，而 Q_{BAT} 取值随 λ_C 变化。因此，确定出 Q_{BAT} 最优时的 λ_C 取值即可保证系统体积最优。当负载特性发生变化时，Q_{BAT1}、Q_{BAT2}、Q_{BAT3} 与 λ_C 的关系曲线将会发生变化，产生多种形状组合，如图 4(a)所示，致使最优容量配置结果变化。需结合实际脉冲负载及 DC-DC 变换器的特性，确定实际关系曲线形状，具体分析如下。

Q_{BAT2} 在 λ_C 为 0 和 1 处的取值及 Q_{BAT3} 在 λ_C=1 处的取值分别为

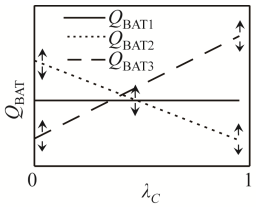
$$Q_{\text{BAT2}}\big|_{\lambda_C=0}=\frac{k_{\text{r}}V_{\text{BAT}}(I_{\text{n}}+I_{\text{p}})}{V_{\text{BAT}}-V_{\text{bus,min}}} \tag{13}$$

$$Q_{\text{BAT2}}\big|_{\lambda_C=1}=\frac{k_{\text{r}}V_{\text{BAT}}I_{\text{n}}}{V_{\text{BAT}}-V_{\text{bus,min}}} \tag{14}$$

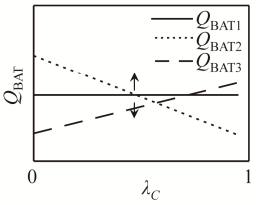
$$Q_{\text{BAT3}}\big|_{\lambda_C=1}=\frac{(I_{\text{p}}t_{\text{p}}-I_{\text{f}}t_{\text{f}}+I_{\text{n}}t_{\text{ch}})k_{\text{r}}V_{\text{BAT}}}{t_{\text{ch}}(V_{\text{BAT}}-V_{\text{bus,min}})} \tag{15}$$

结合式(13)和式(15)分析可知

$$Q_{\mathrm{BAT2}}\big|_{\lambda_C=0}\geqslant Q_{\mathrm{BAT3}}\big|_{\lambda_C=1}\Leftrightarrow I_{\mathrm{p}}t_{\mathrm{ch}}\geqslant I_{\mathrm{p}}t_{\mathrm{p}}-I_{\mathrm{f}}t_{\mathrm{f}}\quad(16)$$



(a) 3种约束下电池容量的变化



(b) 高峰均比短时脉冲负载用电下电池容量的变化

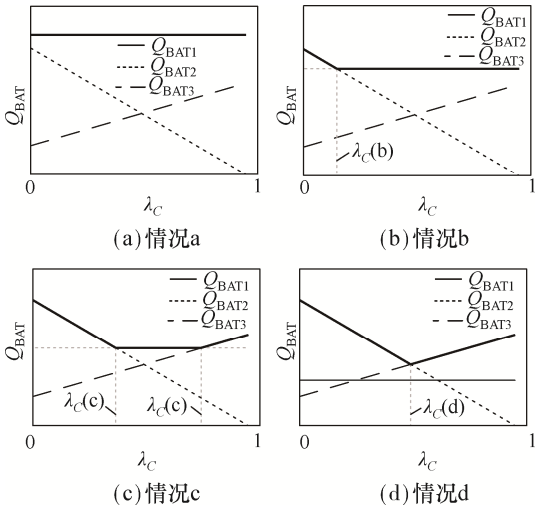
图 4 电池容量与 λ_C 的关系

Fig. 4 Relationship between battery capacity and λ_C

由于 Q_{BAT3} 单调递增，所以 Q_{BAT2} 在 $\lambda_C=0$ 处的取值也大于 Q_{BAT3} 在 $\lambda_C=0$ 处的取值。根据图 2 所示伺服系统负载特性，其回馈能量一般低于脉冲能量，结合式(14)和式(15)分析可知

$$Q_{\mathrm{BAT3}}\big|_{\lambda_C=1}\geqslant Q_{\mathrm{BAT2}}\big|_{\lambda_C=1}\Leftrightarrow I_{\mathrm{p}}t_{\mathrm{p}}\geqslant I_{\mathrm{f}}t_{\mathrm{f}}\quad(17)$$

因此，Q_{BAT} 与 λ_C 的关系曲线可确定为图 4(b)所示，其中 Q_{BAT2} 和 Q_{BAT3} 的曲线相对固定，电池容量最优值随 Q_{BAT1} 的上下移动而改变。图 5 所示为 Q_{BAT1} 上下移动过程产生的 4 种取值情况：情况 a，Q_{BAT1} 大于 Q_{BAT2min} 与 Q_{BAT3min} 中的最大值；情况 b，Q_{BAT2min} 部分大于 Q_{BAT1min} 且 Q_{BAT1min} 大于 Q_{BAT3min}；情况 c，Q_{BAT2min} 部分大于 Q_{BAT1min} 且 Q_{BAT3min} 大于 Q_{BAT1min}；情况 d，Q_{BAT1min} 小于 Q_{BAT2min} 与 Q_{BAT3min} 中的最小值(Q_{BAT1min}、Q_{BAT2min}、Q_{BAT3min} 分别为 Q_{BAT1}、Q_{BAT2}、Q_{BAT3} 的最小值)。考虑到 Q_{BAT} 的 3 个约束条件需同时满足，因此电池容量取值边界为图中粗实线所示。



(a) 情况a (b) 情况b

(c) 情况c (d) 情况d

图 5 电池容量的 4 种优化情况

Fig. 5 Four optimization cases of battery capacity

结合图 5，可得不同情况下的系统最优体积分别为

$$V_{\mathrm{ol,PLHPS}}=\begin{cases}k_{\mathrm{BAT}}Q_{\mathrm{BAT1}} & \lambda_C\in(0,1),\ \text{情况a}\\ k_{\mathrm{BAT}}Q_{\mathrm{BAT1}}V_{\mathrm{BAT}}+k_{C,V_C}Q_{C_{\mathrm{s}}}+V_{\mathrm{ol,CTRL}} & \lambda_C=\lambda_C(\mathrm{b})=\lambda_C(\mathrm{c})=1-Q_{\mathrm{BAT1}}\dfrac{V_{\mathrm{BAT}}-V_{\mathrm{bus,min}}}{k_{\mathrm{r}}V_{\mathrm{BAT}}I_{\mathrm{p}}},\ \text{情况b/情况c}\\ k_{\mathrm{BAT}}\dfrac{k_{\mathrm{r}}V_{\mathrm{BAT}}[I_{\mathrm{p}}t_{\mathrm{ch}}-I_{\mathrm{f}}t_{\mathrm{f}}+I_{\mathrm{n}}(t_{\mathrm{ch}}+t_{\mathrm{f}})]}{(V_{\mathrm{BAT}}-V_{\mathrm{bus,min}})(t_{\mathrm{p}}+t_{\mathrm{f}}+t_{\mathrm{ch}})}V_{\mathrm{BAT}}+k_{C,V_C}Q_{C_{\mathrm{s}}}+V_{\mathrm{ol,CTRL}} & \lambda_C(\mathrm{d})=\dfrac{I_{\mathrm{p}}(t_{\mathrm{ch}}+t_{\mathrm{f}})+I_{\mathrm{f}}t_{\mathrm{f}}-I_{\mathrm{n}}(t_{\mathrm{ch}}+t_{\mathrm{f}})}{I_{\mathrm{p}}(t_{\mathrm{p}}+t_{\mathrm{f}}+t_{\mathrm{ch}})},\ \text{情况d}\end{cases}\quad(18)$$

3 容量配置案例及实验分析

3.1 容量优化配置分析

本文所研究的负载特性如图 2 所示，其中系统总运行时间为 300 s，期间脉冲个数为 320 个，脉冲平均宽度为 40 ms。选用 Mouser 公司生产的型号为 ASR00050 的锂电池及 Vishay 公司生产的型号为 MAL 250059102E3 电容作为计算依据。查阅数据手册可知，ASR00050 电池的能量密度约为 450 W·h/dm^3，即 $k_{\mathrm{BAT}}\approx1/450$，其 $k_{\mathrm{r}}\approx0.02$。MAL 250059102E3 电容的容量与体积的关系为 0.002 86 F/dm^3，即 $k_C\approx350$。根据负载特性，其脉冲最小间隔为 0.25 s，除去脉冲 0.04 s 和能量回馈 0.03 s，其最小充电时间为 0.18 s，即要在 0.18 s 内将电容充电至标称值才能保证系统正常运行。在进行优化配

置算法时，t_{ch}取 0.18 s。根据本文所述容量优化配置方法，经计算此时 Q_{BAT1}=1.35 A·h，Q_{BAT2}在 λ_C=0 处的取值为 21.60 A·h，Q_{BAT3}在 λ_C=1 处的取值为 5.65 A·h，Q_{BAT2} 与 Q_{BAT3} 交点处的 λ_C 取值 λ_C(d)=0.78，Q_{BAT2} 与 Q_{BAT3} 交点处的电池容量为 Q_{BAT}=4.75 A·h。因此，该情况与图 5(d)所示的情况相同，即对于典型航天伺服系统，由于其工作时间较短，因此采用电池为主供电源时，Q_{BAT1} 的计算值通常较小，在对电池容量进行优化设计时，通常满足图 5(d)所示的优化情况。

在相同负载特性下计算出纯电池、电池+有源电容(提供 100%脉冲功率，传统方案)及电池+有源电容(提供 78%脉冲功率，本文方案)3 种方案下系统的体积，结果见表 1。可以看出，本文所采用的方案在体积上分别相较纯电池方案和有源电容提供全部脉冲功率方案时降低 31.25%和 17.50%。表 1 中本文方案所需要的电池容量低于传统方案，其原因为随着脉冲阶段电池提供的脉冲电流占比越来越少，电池的容量逐渐变少，相应地，非脉冲阶段电池给有源电容的充电电流越来越高(储存更多能量以提供更大的脉冲电流)，因此电池的容量逐渐增加。

表 1　供电方案体积比较

Tab. 1 Comparison of volume among power supply schemes

方案	电池容量/A·h	电容容量/mF	总体积/L
纯电池供电	21.60	0	12.96
电池+有源电容(提供 100%脉冲功率)	5.65	17.56	10.80
电池+有源电容(提供 78%脉冲功率)	4.75	13.70	8.91

3.2 脉冲功率控制实验分析

为了验证系统在所提容量配置及功率控制方法下的有效性，在实验室建立了测试系统，实验平台如图 6 所示，对于有源电容变换器，采用两路交错并联同步整流 Boost 变换器，其中每个开关管用 2 个型号为 IPP65R045C7 的 SiC MOSFET 并联，系统参数见表 2。

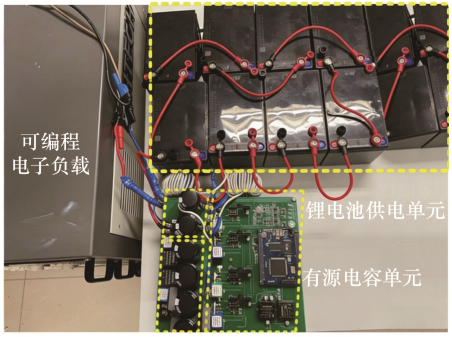


图 6　实验平台

Fig. 6 Experimental platform

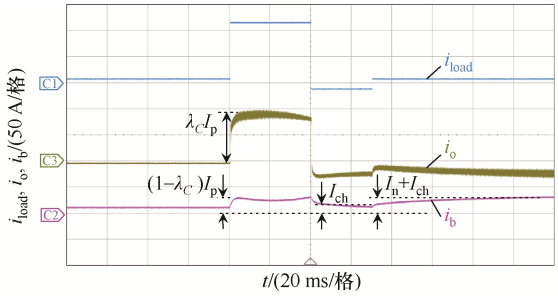
表 2　系统参数

Tab. 2 Parameters of system

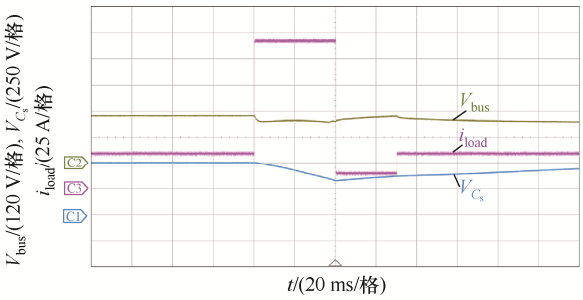
参数	数值
电池额定电压 V_{BAT}/V	270
电池容量 Q_{BAT}/A·h	4.75
母线电压 V_{bus}/V	270
储能电容 C_s	13.7 mF/600 V
储能电容电压 V_{C_s} 变化范围/V	320~500
母线滤波电容	2 700 μF/350 V
双向 DC-DC 变换器电感/μH	133
开关频率 f_s/kHz	100

图 7 为系统向频率为 0.2 Hz 的脉冲负载供电时的实验测试结果。从图 7(a)可以看出，在脉冲负载工作期间，电容变换器提供了 78%(93.6 A)的脉冲功率，吸收了全部的回馈能量，实现了再生能量回收。电池则提供 22%脉冲功率及常值功率，并在非脉冲周期为电容充电。从图 7(b)可以看出，在供电周期中，母线电压始终维持在允许的范围内(≥240 V)。因此，采用优化设计的容量配置及控制方法可保证系统良好稳定运行。

图 8 为脉冲负载频率从 1 Hz 变化到 4 Hz 时系统动态实验波形。可知，在脉冲负载频率发生变化时，有源电容提供了 78%(93.6 A)的脉冲功率，并吸收全部的回馈能量，电池则提供了常值功率及部分脉冲功率，符合系统运行要求。图 9(a)和(b)分别为 1 Hz 和 4 Hz 脉冲频率下的母线电压及电容电压变化波形，可以看出，在整个工作期间，母线电压均维持在允许范围内(≥240 V)，运行符合预期。



(a) 电流在脉冲期间的分配关系实验结果



(b) 母线电压及电容电压在脉冲期间的变化实验结果

图 7 系统带 0.2 Hz 脉冲负载实验结果

Fig. 7 Experimental results of system with 0.2 Hz pulse load

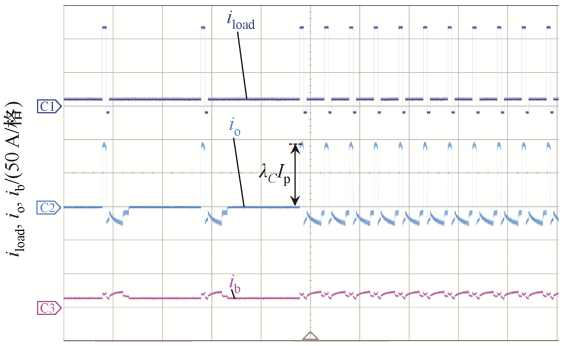
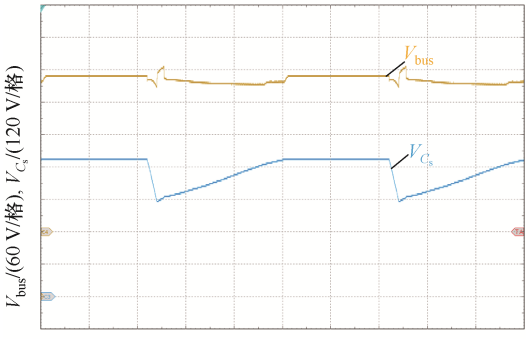
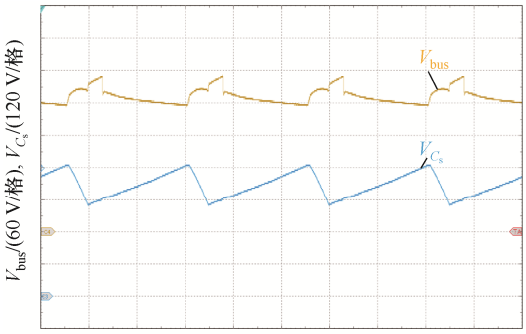


图 8 脉冲负载由 1 Hz 切换到 4 Hz 时的实验结果

Fig. 8 Experimental results when pulse load is switched from 1 Hz to 4 Hz



(a) 1 Hz脉冲频率



(b) 4 Hz脉冲频率

图 9 不同脉冲频率下母线电压及电容电压变化

Fig. 9 Changes in bus voltage and capacitor voltage at different pulse frequencies

4 结语

针对航天伺服超低频变频脉冲负载用混合供电系统，本文提出 1 种电池–有源电容容量协同配置方法。该方法主要基于 4 个原则：保证母线电压稳定；保证系统总体积最小；保证电容能及时充满电；保证电池容量(能量)大于系统在全工作时段消耗的能量。在优化配置过程中充分考虑电池在系统不同工作时段的放电电流限制、电容的充电时间限制、母线电压波动限制等，建立了系统总体积与电容对脉冲负载的供电占比 λ_C 的关系，充分利用了各供电单元的性能，使配置结果更加合理，系统总体积大幅降低，提升了功率密度。

参考文献：

[1] Shang Yaoxing, Li Xiaobin, Qian Hao, et al. A novel electro hydrostatic actuator system with energy recovery module for more electric aircraft [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(4): 2991-2999.

[2] 张卓然, 许彦武, 于立, 等. 多电飞机高压直流并联供电系统发展现状与关键技术[J]. 航空学报, 2021, 42(6): 624069.
Zhang Zhuoran, Xu Yanwu, Yu Li, et al. Parallel HVDC electric power system for more-electric-aircraft: State of the art and key technologies [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(6): 624069. (in Chinese)

[3] 陈克勤, 赵守军, 刘会祥, 等. 运载火箭大功率多余度电静压伺服机构技术研究[J]. 导弹与航天运载技术,

2020(4): 79-84, 122.
Chen Keqin, Zhao Shoujun, Liu Huixiang, et al. The study on the high power redundant electro-hydrostatic actuator for launch vehicles [J]. Missiles and Space Vehicles, 2020(4): 79-84, 122. (in Chinese)

[4] Ebrahimi H, El-Kishky H, Biswass M, et al. Impact of pulsed power loads on advanced aircraft electric power systems with hybrid APU [C]// 2016 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC). San Francisco, CA, USA, 2017: 434-437.

[5] 史晨虹, 陈晨, 徐志书, 等. 基于机电伺服技术的固体火箭发动机球窝喷管限位技术研究[J]. 机电信息, 2020(3): 58-60.
Shi Chenhong, Chen Chen, Xu Zhishu, et al. Research on limit technology of ball socket nozzle of solid rocket motor based on electromechanical servo technology [J]. Mechanical and Electrical Information, 2020(3): 58-60. (in Chinese)

[6] 孙勇, 林松, 卢胜利, 等. 相控阵雷达阵面供电系统功率波动机理研究[J]. 现代雷达, 2021, 43(12): 92-99.
Sun Yong, Lin Song, Lu Shengli, et al. A study on power fluctuation mechanism of phased array radar power system [J]. Modern Radar, 2021, 43(12): 92-99. (in Chinese)

[7] Huang Xinze, Ruan Xinbo, Du Fangjun, et al. A pulsed power supply adopting active capacitor converter for low-voltage and low-frequency pulsed loads [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(11): 9219-9230.

[8] 朱泽宇, 杨平, 曹琎, 等. 具有快速动态响应的大功率脉冲负载电源设计与实现[J]. 电工电能新技术, 2019, 38(5): 13-20.
Zhu Zeyu, Yang Ping, Cao Jin, et al. Design and implementation of pulsed load power supply with fast dynamic response [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 38(5): 13-20. (in Chinese)

[9] Gu Yu, Zhang Donglai, Fang Mingzhu, et al. Research on low input current ripple two-stage converter for low frequency pulsed-power applications [J]. IET Power Electronics, 2020, 13(2): 340-345.

[10] 杨夯, 郭宜果, 李哲. 计及光伏工况的集中式发电场景下储能优化配置[J]. 电源学报, 2024, 22(S1): 116-126.
Yang Hang, Guo Yiguo, Li Zhe. Optimal allocation of energy storage in centralized power generation scenarios considering photovoltaic working conditions [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(S1): 116-126. (in Chinese)

[11] 程昱明, 孟高军, 贾鹏, 等. 用于平抑风电功率波动的混合储能容量优化配置方法[J]. 电源学报, 2025, 23(5): 251-261.
Cheng Yuming, Meng Gaojun, Jia Peng, et al. Optimal hybrid energy storage capacity configuration method for mitigating fluctuations of wind power [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(5): 251-261. (in Chinese)

[12] 刘仕兵, 武沛池, 喻星, 等. 基于小波包分解的城市轨道交通混合储能容量优化配置研究[J]. 电源学报, 2024, 22(4): 143-151.
Liu Shibing, Wu Peichi, Yu Xing, et al. Research on optimal allocation of hybrid energy storage capacity of urban rail transit based on wavelet packet decomposition [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(4): 143-151. (in Chinese)

[13] 程龙, 张方华, 谢敏, 等. 基于等效时间的混合储能系统高功率密度优化配置[J]. 航空学报, 2018, 39(10): 197-207.
Cheng Long, Zhang Fanghua, Xie Min, et al. High power density optimal configuration for hybrid energy storage system based on equivalent time [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(10): 197-207. (in Chinese)

[14] Tremblay O, Dessaint L A, Dekkiche A I. A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles [C]// 2007 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Arlington, TX, USA, 2008: 284-289.



杨磊

作者简介：

杨磊(1982—　)，男，博士，高级工程师。研究方向：电源系统。E-mail：ylforeverbit@126.com。

黄玉平(1967—　)，男，硕士，研究员。研究方向：精密机电控制设备。E-mail：huangyp@2008.sina.com。

陈家伟(1986—　)，男，中国电源学会高级会员，通信作者，博士，教授。研究方向：电气化交通技术，新能源发电与微电网技术。E-mail：echenjw@cqu.edu.cn。

敖文杰(1996—　)，男，中国电源学会学生会员，博士研究生。研究方向：脉冲电源，直流电源系统先进控制与稳定性分析。E-mail：wenjieao@cqu.edu.cn。

(责任编辑：郭凯凯)