

航天器新型功率电源系统设计

赵岩, 张翔, 杨友超, 王健康, 梁君

(中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

摘要: 近年来航天器整体技术发展迅速, 对电源系统的轻质小型化要求越来越高; 传统的功率电源系统储能单元采用蓄电池组或贮备电池, 由于脉冲类负载存在脉冲电流用电的工作特性, 在储能单元设计时通常采用增加电池设计容量的方式来满足脉冲类负载供电要求, 导致功率电源系统轻质小型化设计受到限制; 提出一种新型功率电源系统方案设计思路, 引入超级电容器与蓄电池组联合供电输出, 充分发挥超级电容器大脉冲放电的优势, 有利于实现航天器功率电源系统轻质小型化, 具有一定的应用前景。

关键词: 航天器; 超级电容; 功率电源

Design of New Power Supply System for Spacecraft

Zhao Yan, Zhang Xiang, Yang Youchao, Wang Jiankang, Liang Jun

(China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: In recent years, the overall technology of spacecraft has developed rapidly, and the requirement for lightweight and miniaturization of power supply system is becoming higher and higher. The traditional energy storage unit of power supply system uses battery pack or disposable battery. Because of the working characteristics of pulse current, the design of energy storage unit usually uses the method of increasing the design capacity of battery to meet the demand of pulse load, the design of light and miniaturization of power supply system is limited. A new design idea of power supply system is proposed, Supercapacitors and batteries are combined to supply power output, The advantages of large pulse discharge of supercapacitors are brought into full play, which helps to realize the lightweight and miniaturization of power system of spacecraft, and has a certain application prospect.

Keywords: spacecraft; ultracapacitor; power supply

0 引言

航天器电源系统通常情况下根据负载工作特性的不同设置不同的电源母线: 控制电母线、功率电母线、高压母线等。控制电母线为航天器所有的器载计算机、GNC 控制器等仪器设备供电, 功率电母线为航天器所有的火工品、电磁阀等机电类负载供电, 高压母线为航天器舵机或有效载荷等高压设备供电, 为保证电源系统的稳定性, 控制电母线通常采用单独的主电池进行供电, 高压母线采用单独的高压电池进行供电, 功率电母线则可采用单独的电源进行供电, 亦可通过高压电池抽头获取供电。

在航天器发射及飞行过程中, 需要按照一定的时序通过电磁阀对油液气路的通断进行控制, 并且通过引爆火工品完成点火、分离等规定动作。电磁阀工作电流为恒定电流模式, 量级为 1 A 以下, 火工品工作电流为脉冲电流模式, 目前广泛使用了钝感电火工品, 一般单桥带钝感火工品发火电流为 5~10 A。为了提供足够大的驱动电流, 传统的功率电源系统储能单元使用蓄电池组或一次贮备电池, 其中锌银电池使用较多。

超级电容器是近几年批量生产的一种新型储能器件, 具有功率密度高 (大于 1 kw/kg, 甚至几十 kw/kg), 循环使用寿命长 (约 10 万次), 温度特性好等特点, 在汽车、火车等

领域刹车制动系统应用趋于成熟。在航天领域的应用, 文献 [1] 将超级电容器作为运载器火工品的起爆电源, 开展了相应的试验研究, 可以达到减重效果。本文根据功率电母线负载的不同提出一种蓄电池组和超级电容联合供电系统。

1 超级电容器

超级电容器 (Super-capacitor, Ultra-capacitor, SC) 是 1897 年德国人亥姆霍兹 (Helmholtz) 发现的双电层原理工作的电容, 一般又叫双电层电容器、法拉电容^[2-7]。上世纪 60-70 年代率先在美国出现, 并于 80 年代逐渐走向市场, 其技术也不断的完善与成熟, 其应用范围也不断地拓展, 在家用电器、仪器设备、信息通讯、交通运输、工业生产、军事装备等领域均具有较好的应用前景^[8]。

从小容量的特殊储能到大规模的电力储能, 从单独储能到与蓄电池或燃料电池等组成的混合储能, 超级电容器都展示出了独特的优越性。美、欧、日、韩等发达国家和地区对超级电容器的应用进行了卓有成效的研究, 电磁弹射系统、装甲车辆和电动汽车等领域的应用正处于研究或试用阶段。

超级电容的储能原理和结构如图 1 所示。主要由集流体、活性电极、隔膜组成。由于活性电极采用高反应界面的电极材料, 使得其相比于传统电解电容器具有更高的容值, 从而提高储能能量^[3]。

目前超级电容单体电压较低, 通常为 2.7 V 左右, 为了提高储能能量, 需要采用多个单体串联、并联或者串-并联组合构成, 从而形成超级电容模组。

收稿日期: 2018-09-25; 修回日期: 2018-10-23。

作者简介: 赵岩 (1987-), 男, 山西阳泉市人, 硕士, 工程师, 主要从事航天器供电及综合测试系统方向的研究。

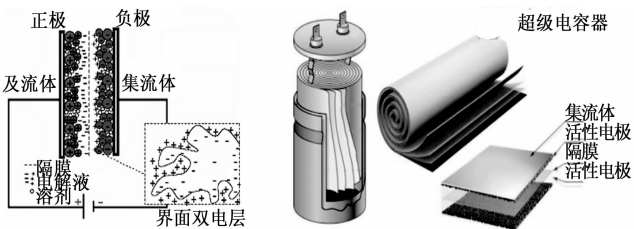


图 1 超级电容的储能原理和结构

超级电容器功率密度大：可达 $10^2 \sim 10^4$ W/kg，远大于蓄电池组现有的功率密度水平；反应时间短：由于超级电容的充放电过程为纯物理变化，反应时间能达到毫秒级别；循环寿命长：充放电物理变化为可逆过程，循环次数最多可达数万次；工作温度相对宽限：温度范围一般是 $-40^\circ\text{C} \sim 65^\circ\text{C}$ ；另外，超级电容还具有绿色环保无污染、维修次数较少等优点^[2]。超级电容器与常见蓄电池组的相关数据对比表见表 1。

表 1 超级电容器与常用蓄电池组对比表

属性	单位	超级电容	锂电池
功率密度	kW/L	10	3
能量密度	Wh/L	6	200
工作最低温度	$^\circ\text{C}$	-40	-20
工作最高温度	$^\circ\text{C}$	65	40
倍率性能	C/x	100	50

2 需求分析

全航天器有 5 个电磁阀和 6 个电爆阀，单个电磁阀的工作电流为 $0.96 \pm (0.15)$ A，工作电压要求为 $28 (\pm 3)$ V，单桥丝电爆阀工作电流为 5~10 A，通电时间为 ≥ 200 ms，根据飞行时序，功率电放电曲线见图 2。

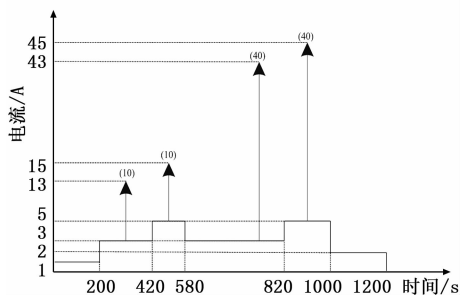


图 2 功率电放电曲线图

3 系统总体设计

功率电源系统是航天器整个电源系统的重要组成部分，负责全器电磁阀、火工品等功率负载的电源供给及分配，通常包括储能单元和综合控制器，为满足多次重复使用要求，储能单元拟采用锂电池方案。传统的功率电源系统储能单元仅采用锂电池，系统设计框图见图 3，由于功率负载尤其是火工品类负载的脉冲电流工作特性，在锂电池设计时，会采用增加电池容量的方式，满足在脉冲负载工作时电池的输出电压要求，传统的方案造成了电池容量的浪费

和系统重量的增加。

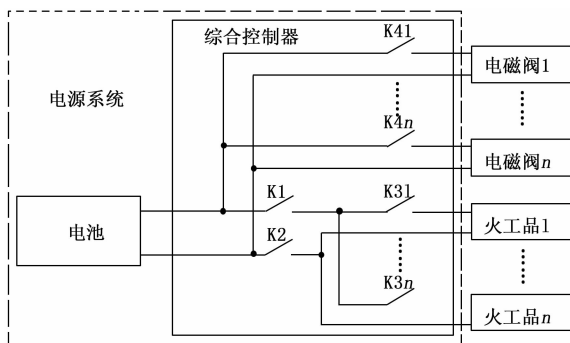


图 3 系统总体设计框图（传统）

新型功率电源方案储能单元采用锂电池组和超级电容器联合设计，系统设计框图见图 4，锂电池组负责电磁阀小电流工作时的系统供电，超级电容器则负责脉冲大电流火工品负载工作时的系统供电，综合控制器负责锂电池组和超级电容器供电切换和配电时序的控制实现。

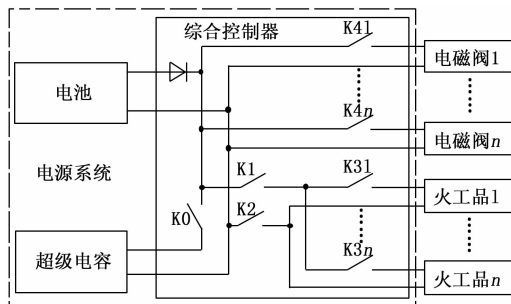


图 4 系统总体设计框图（新型）

4 关键技术研究

4.1 综合控制策略

锂电池和超级电容并联供电，为防止超级电容给锂电池充电而消耗其容量，综合控制器中在锂电池输入端设置防反灌二极管^[10]，在超级电容输入端设置控制开关 K_0 。

综合控制器负责时序控制策略的实现，传统模式下，为保证火工品可靠起爆以及防止火工品误爆，火工品起爆控制电路通常采用三级控制（ K_1, K_2, K_{3n} ）模式，而该新型方案中，增加 K_0 一级控制，为四级控制（ K_0, K_1, K_2, K_{3n} ）模式，以火工品 1 和 2 起爆控制为例，控制时序图见图 5。

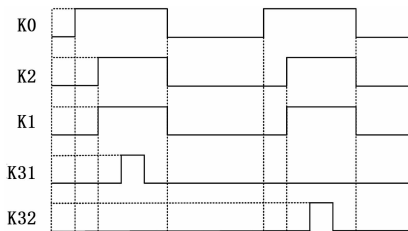


图 5 火工品起爆控制时序图

4.2 超级电容器选型

超级电容所释放的能量 W_c 与其最大电压和最小电压有关，若超级电容的容值为 C ，最大电压为 U_{\max} ，最小电压为 U_{\min} ，那么，超级电容理论上释放的能量 W_c 计算如下：

$$W_c = C(U_{max}^2 - U_{min}^2)/2 \quad (1)$$

该新型功率电源系统采用超级电容与锂电池联合供电, 超级电容仅负责火工品起爆时所有负载所需的能量, 主要包括电磁阀稳态工作和火工品瞬态起爆工作时所需的能量 W_s , I_i 为火工品起爆时电磁阀工作总电流, I_j 为火工品起爆工作电流, t_i 火工品起爆电磁阀工作总电流持续时间, 按照 800 ms 计算, t_j 火工品起爆工作电流持续时间, 按照 200 ms 计算, 具体计算过程如下:

$$W_s = \sum U_i I_i t_i + \sum U_j I_j t_j \quad (2)$$

超级电容理论上释放的能量 W_c 与火工品起爆时负载需求能量 W_s 的关系如下:

$$W_c \geq W_s \quad (3)$$

结合上述公式 (1)、(2)、(3), 确定超级电容选择美国 Maxwell 公司的 12 只 BCAP0310P270T10 型超级电容单体进行串联, 超级电容器具体参数见表 2 所示。

表 2 超级电容器具体参数

参考指标	具体参数
额定容量/F	310
额定电压/V	2.70
内阻/mΩ	2.2
质量/g	60
能量密度/Wh/kg	5.2
功率密度/W/kg	14000

4.3 轻质小型化设计

根据负载放电曲线, 计算额定工作电流需求容量约为 1 Ah。传统的功率电源方案采用锂电池单独供电, 为满足脉冲电流负载工作时锂电池输出电压不低于供电下限电压要求, 通常情况下, 锂电池容量设计时预留一定的余量。若采用 2 Ah 的标准单体, 传统的方案需要 5 并 8 串可满足要求, 而新型方案锂电池模块仅进行 8 串, 选用 12 只成熟的 BCAP0310P270T10 型超级电容单体进行串联后与锂电池组并联即可满足要求, 传统与新型功率电源设计方案对比分析见表 3。

表 3 传统与新型功率电源设计方案对比表

参考指标	传统方案		新型方案
	方案简介	采用 2Ah 的标准单体进行 4 并 8 串	采用 2 Ah 的标准单体进行 5 并 8 串
输出电压/V	23.16~30.99	25.61~30.99	25.19~30.82
容量需求(Ah)	8Ah	10Ah	2Ah/25.8F
重量(kg)	2.6kg	3.3kg	2.1kg
外形尺寸 (mm×mm×mm)	175×120×95	175×140×95	175×100×95
满足情况	不满足	满足	满足

通过表 3 对比分析, 新型方案在轻质小型化方面均有一定的优势。

5 试验验证

针对上述三种设计方案按照同样的放电曲线 (如图 2) 进行了电池的放电测试试验, 放电曲线最大恒值电流为 5 A, 最大脉冲电流为 45 A, 并要求脉冲放电时电压不低于 25 V。三种设计方案放电测试图见图 6~图 8。

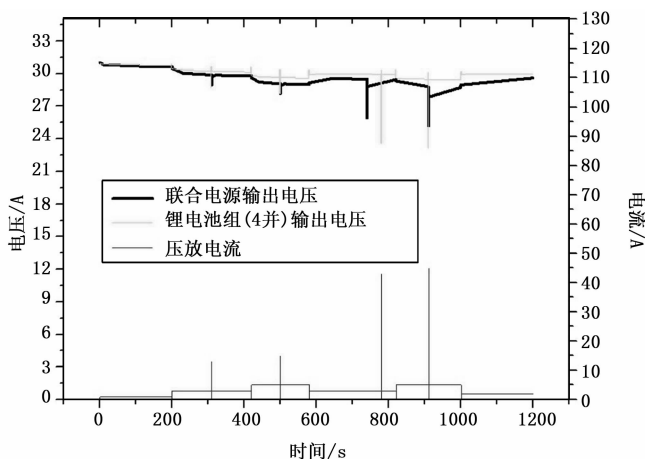


图 6 锂电池组 (四并) 放电测试图

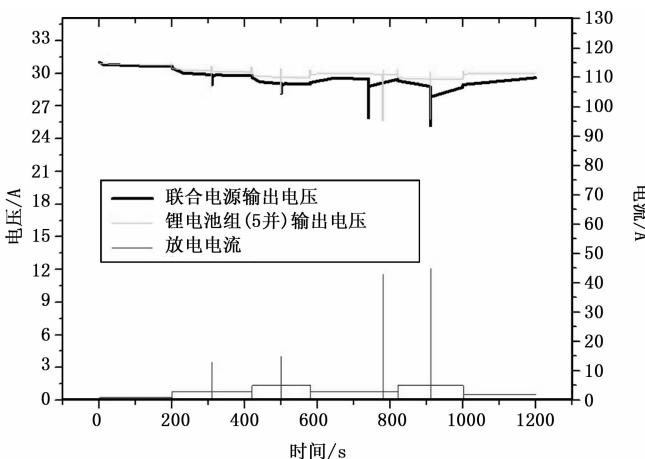


图 7 锂电池组 (五并) 放电测试图

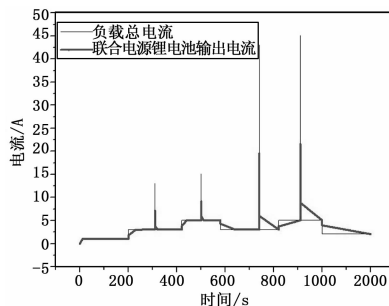


图 8 联合电源中锂电池组实测放电图

图 6 为锂电池组 (四并) 与联合电源的放电测试比较曲线, 图 7 为锂电池组 (五并) 与联合电源的放电测试比较曲线, 由图 6、图 7 可知, 小电流恒值放电时锂电池组 (四并及五并) 放电电压略高于联合电源, 大电流脉冲放电时联合电源电压和五并锂电池组电压基本一致, 并且大于 25 V, 而四并锂电池组电压相对较低, 且小于 25 V。图 8

为联合电源放电时锂电池承担的输出电流曲线，由图可知，联合电源脉冲放电时电池仅提供小部分电流，而超级电容器提供了更多的电流，因此，小容量的锂电池和超级电容器组成的联合电源可以达到大容量锂电池的脉冲放电性能，并且联合电源的脉冲放电能力主要取决于超级电容器的高功率输出性能，超级电容器从中发挥了重要作用。

6 结束语

新型功率电源系统采用锂电池组和超级电容器联合供电技术，充分发挥了超级电容脉冲放电的优势，在综合控制器中采用综合控制策略实现了锂电池组和超级电容器联合供电，与传统的蓄电池组方案相比，具有轻质小型化、高可靠等特点，在地面试验中进行了试验验证。该功率电源系统在航天航空供电领域有着广泛的应用前景。

参考文献:

[1] 陈 曦, 等. 贮能式电源在航天火工品驱动的应用研究 [J]. 电源技术, 2016, 40 (4): 792-794.

(上接第 233 页)

从实验结果可知，系统能够从复杂背景中提取乒乓球，采用质心算法对乒乓球进行准确定位，并通过单目摄像头对目标进行精确测距，最终能够结合云台旋转角度和距离值控制机器人进行追踪。

表 3 单摄像头测距实验数据 mm

	1	2	3	4	5	6	7
测试值	127	102	87	71	53	32	17
实测值	150	120	100	80	60	40	20

5 结束语

充分考虑了乒乓球所固有的颜色特征，在分析各颜色模型的基础上，提出了 Lab 模型下的乒乓球分割算法，结合 Lab 颜色模型对复杂环境下的乒乓球进行分割操作，以质心法对乒乓球进行精确定位。提出了单摄像头对乒乓球进行距离测量方法，最后单片机根据测量数据和云台数据对电机进行控制，达到实时跟踪的目的。实验表明，该算法处理时间小于 100 ms，定位误差小于 30 mm，满足乒乓球机器人追踪需要。

设计并实现了颜色乒乓球追踪机器人如图 9 所示，结合图像处理技术、光学原理、单片机技术、电机驱动技术，

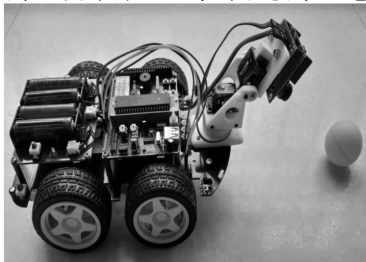


图 9 乒乓球追踪机器人

[2] 曹广华, 等. 超级电容的原理及应用 [J]. 自动化技术与应用, 2016, 35 (5): 131-134.

[3] 孙 晓. 智能化超级电容储能系统研究 [D]. 华北电力大学, 2016.

[4] 张慧妍, 齐智平. 超级电容器储能单元的设计分析 [J]. 电源技术, 2006 (4): 322-325.

[5] 曹广华, 等. 超级电容的原理及应用 [J]. 自动化技术与应用, 2016 (5): 131-134.

[6] 商 森. 超级电容系统的研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2004, 5-6.

[7] 朱 磊, 等. 超级电容器研究及其应用 [J]. 稀有金属, 2003, 13: 915-920.

[8] 张步涵, 王云玲, 曾 杰. 超级电容器储能技术及其应用 [J]. 水电能源科学, 2006 (5): 50-51.

[9] 敬光红. 基于超级电容与蓄电池复合动力电源的研究 [J]. 电源技术, 2015 (2): 290-291.

[10] 张纯江, 等. 蓄电池与超级电容混合储能系统的控制策略 [J]. 电工技术学报, 2014 (4): 336-338.

可实现乒乓球识别、中心定位、测距、跟踪等功能，后续将加入机械手臂，对小球实现精准夹起功能。

参考文献:

[1] Sun Y C, Xiong R, Zhu Q G, et al. Balance motion generation for a humanoid robot playing table tennis [A]. Proceedings of the 11th IEEE - RAS International Conference on Humanoid Robots [C]. Bled, the Republic of Slovenia, 2011: 19-25.

[2] 张学峰, 等. 多颜色模型下的乒乓球快速检测与实时跟踪研究 [J]. 计算机系统应用, 2018, 27 (5): 232-237.

[3] 史成林, 等. 基于 LabVIEW 的乒乓球机器人设计 [J]. 测控技术, 2018, 3: 47-54.

[4] 王晓彤, 等. 基于单目天花板视觉的扫地机器人定位算法设计及实现 [J]. 微电子学与计算机, 2018, 35 (3): 125-134.

[5] 雷海东, 等. 基于 OV7725 单目摄像头的激光测距系统 [J]. 江汉大学学报 (自然科学版), 2017, 4: 120-126.

[6] 苏博妮, 化希耀, 范振岐, 等. 基于颜色特征的水稻病害图像分割方法研究 [J]. 计算机与数字工程, 2018, 8: 1638-1642.

[7] 王 礼, 方陆明, 等. 基于 Lab 颜色空间的花朵图像分割算法 [J]. 浙江万里学院学报, 2018, 5: 67-73.

[8] 郑海峰. 无标记仿人乒乓球机器人本体视觉系统及其轨迹预测研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2016.

[9] 李贤辉. 基于人眼定位的单目测距方法及 ARM 平台实现 [D]. 深圳: 深圳大学, 2017.

[10] 张希田. 视频图像动目标检测与定位方法的研究 [D]. 大连: 大连海线海事大学, 2016.

[11] 张正涛. 乒乓球机器人视觉测量与控制 [D]. 北京: 中国科学院研究生院 (自动化研究所), 2010.

[12] 张远辉. 基于实时视觉的乒乓球机器人标定和轨迹跟踪技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2009.