

# 电磁发射系统中脉冲电源的能量存储与快速释放技术

李少鹏 费香邦

上海航天电子技术研究所

DOI: 10.32629/jpm.v7i4.8858

**[摘要]** 文章围绕着脉冲电源能量的存储和快速释放技术进行分析，主要分析了电容储能、电感储能和其他储能技术的基本原理和特性，并分析了开关器件选择、电路拓扑结构快速释放过程所产生的影响。基于此，提出了能量转换效率与保障系统稳定的关键技术与解决方案，以期给电磁发射系统的发展提供更多支持。

**[关键词]** 电磁发射系统；脉冲电源；能量存储；快速释放；关键技术

## Energy Storage and Rapid Release Technology for Pulse Power Sources in Electromagnetic Emission Systems

Li Shaopeng Fei Xiangbang

Shanghai Aerospace Electronic Technology Research Institute

**[Abstract]** This article analyzes the technology for storing and rapidly releasing energy in pulse power sources. It primarily examines the fundamental principles and characteristics of capacitor-based energy storage, inductor-based energy storage, and other energy storage techniques, while also investigating the impact of switching device selection and circuit topology on the rapid energy release process. Based on this analysis, the paper proposes key technologies and solutions to enhance energy conversion efficiency and ensure system stability, aiming to provide stronger support for the development of electromagnetic emission systems.

**[Key words]** Electromagnetic emission system; Pulse power supply; Energy storage; Rapid release; Key technologies

电磁发射系统是一种新型的发射装置，通过其发射速度高、动能大、可控性好及能量转化效率高特点，在军事和航空航天等领域中均有着重要的应用价值。脉冲电源是电磁发射系统的主要组成部分，其能力存储和快速释放技术直接地决定了系统能不能高效且稳定地运行。而能量存储技术则决定了脉冲电源可以提供的能量的规模和持续的时间，快速释放技术则会影响能量的输出效率和响应的速度，二者以期作用在电磁发射系统的射程、精度和效率等的关键参数并产生深远的影响。

### 一、脉冲电源性能对电磁发射系统的影响

脉冲电源在性能上的指标，主要包含能量、功率和放电的速度等，其对于电磁发射系统的射程、精度和效率等关键性参数有着深远的影响。

首先，脉冲电源的实际能量水平会直接的决定电磁发射系

统可以达到的最大的速度和射程。所以，提升脉冲电源能量的密度和输出电压的能力，对于提升电磁发射系统的射程与输出电压为例非常重要。但是，因为现有的储能技术存在不同程度的制约，如电容储能的储能密度的问题，限制了可移动平台之上电磁发射系统的更好发展。

其次，脉冲电源的功率特点对于电磁发射系统的效率与精度也有着非常重要的影响。高功率的脉冲电源可以在较短的时间之内释放大量的能量，进而大幅的提升电磁发射系统加速的效率<sup>[1]</sup>。但是，过高的功率输出可能会使得系统热管理和电磁干扰问题加重，从而影响到发射的精度和系统的稳定性。为了能够解决这样的情况，相关研究人员提出了多元化的优化方案，如借助改进电路拓扑结构与使用新型开关器件来提升电源系统的能量转换效率与放电速度等。

最后, 脉冲电源的实际放电速度对于电磁发射系统的动态响应与连续发射的能力都有着决定性的作用。在一些重频快读发射的场景中, 脉冲电源要有着快速充电和放电的能力, 以此保证系统可以持续且稳定地工作。有相关研究表示, 使用门极可关断晶闸管 (GTO)、绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 等的新型开关机件的脉冲电源设计, 可以有效地提升电源的实际开关速度和耐压耐流等的性能, 进而满足高频电磁发射的实际需求。

因此, 脉冲电源的相关性能指标不仅会直接的影响电磁发射系统的相关关键参数, 还可以给系统的优化设计提供技术的方向。

## 二、脉冲电源能量存储技术

### (一) 电容储能技术

电容的储能技术是最为基础的能量存储方式, 其主要是借助电场效应把电能以电荷的方式存储在电容器的两极板之间。按照电容的基本公式<sup>[2]</sup>:

$$C=QV \quad (1)$$

其中,  $C$  为电容量,  $Q$  为储存的电荷量,  $V$  为两极板之间的电压差。

从以上的公式可以看出电容的储能密度和电容量及电压的平方成正比。所以, 提升电容器的储能密度需要增大电容量或者提升工作电压。但是, 传统的电容器在储能的密度上比较低, 这就限制了其在一些高能量需求场景中的实际应用。尽管如此, 电容器也因其有着极高的充放电的速度和良好的循环寿命, 在电磁发射系统容中有着非常重要的位置。

在电磁发射系统中, 电容的储能技术在应用上的优势主要表现在, 其可以提供瞬时的大功率的输出, 可以满足电磁轨道炮等设备对于快速能量释放的相关需求。但其也有着一定的局限性, 主要包含储能密度比较低, 能量维持时间短和在高电压之下容易发生击穿等问题。为了能够克服以上问题, 目前的研究主要集中在开发新的介质材料来提升电容器击穿电压及储能的密度, 并在此基础上优化电容器结构来降低等效串联电阻 (ESR) 来提升充放电的效率。

### (二) 电感储能技术

电感储能技术借助磁场效应把电能用磁能的方式存储在电感的线圈中, 其原理可以借助公式<sup>[3]</sup>:

$$W = \frac{1}{2LI^2} \quad (2)$$

其中,  $W$  为储存的能量,  $L$  为电感值,  $I$  为通过电感线圈的电流。

和电容储能相比较, 电感储能有着较好的储能密度和能量的传输效率, 较为适用在需要长时间保持能量的场景中。但是这一技术也面临着一些挑战, 如电流中断的时候会产生高压尖峰, 能量的释放中损耗比较大等, 所以在电磁发射协同中的应用要通过精心设计控制电路与相关保护对策。

近几年, 基于高温超导材料 (HTS) 的电感储能技术有了显著的发展, 有研究提出基于单模块高温超导脉冲变压器的连续脉冲电源电路, 在高耦合的系数之下实现了高效能量的传输。其仿真结果显示, 在一些特定的参数之下, 这一系统可以驱动 21.6g 抛体达到 510m/s 的发射速度, 也验证了电感储能能在电磁发射系统中的可行性。

### (三) 其他储能技术

除了电容和电感储能之外, 飞轮储能与超导储能在电磁发射系统中也有着较好的应用潜力。其中, 飞轮储能会借助电能转化成为旋转的功能存储, 其优点是储能的密度较高、响应的速度较快且非常环保, 缺点则是对于轴承和材料强度的要求比较高, 有着机械摩擦与空气阻力的损耗。超导储能则借助超导材料的零电阻特点, 把电能用磁能的形式无损地存储在超导线圈之中, 有着较高的能量转换效率和快速充放电的能力, 但是其成本较高、复杂性较强, 均限制了其广泛的应用。

不同的储能技术在应用上要按照实际的场景开展综合的评估, 短时间的高功率输出场景, 较为适合电容储能与超导储能, 而长时间的稳定功能场景则适合电感储能和飞轮储能。氢燃料电池作为新兴的初级能源方式, 可以给电磁发射系统提供持续的能量支持, 会和其他的储能技术之间形成互补。

## 三、脉冲电源快速释放技术

### (一) 开关器件的选择与特性

开关器件的选择会直接的决定脉冲电源在能量的转换效率和释放的速度。而晶闸管则作为传统的半控型的器件, 可以承受较高的电压与电流, 但是一旦导通就没有办法通过门极信号关断, 因此限制了其在一些需要精确的时序控制的电磁发射系统中的实际应用。GTO、IGBT 等的全控型的器件因为其开关速度较快且灵活性较高, 逐渐成了小型化的脉冲电源主要组件。其中 GTO 借助门极负脉冲来实现快速的关断, 较为适合用在高频放电的场景中。IGBT 则结合了 MOSFET 高输入阻抗及双极型晶体管低导通压降的优势, 耐压耐流的特点较好, 尤其适合用在高功率密度的场合中。

### (二) 电路拓扑结构对快速释放的影响

电路拓扑结构设计是实现脉冲电源快速能量释放的关键。LC 振荡电路主要由电感  $L$  和电容  $C$  所组成, 借助二者之间的能量交换形成谐振回路, 能量在释放的过程中较为平稳且有着较高的放电频率, 但是释放的速度相对来讲比较慢, 很难满足对于时间精度要求较高的场景。

RLC 放电电路在 LC 振荡电路的基础上增减了电阻  $R$ , 由此形成了阻尼振荡系统, 可以有效地调节能量释放的速度与效率, 在快速放电的场景中有着较好的表现。合理的选择电阻值可以显著的缩短放电的时间并提升能量的综合利用率, 如, 电磁轨道炮使用 RLC 放电电路可以在几毫秒之内完全地释放电容的存储能量, 给电枢提供足够的加速度。为了能够深入提升性能, 相关研究人员提出了多模块分时放电等改进型的拓扑。这

一设计借助协调多个放电单元的触发时序,实现了能量阶梯式的释放,在减轻单个开关器件负担的基础上,降低电磁干扰。

因此,合理的电路拓扑设计对于脉冲电源的快速释放能力是非常重要的,未来要充分结合不同的应用场景,开发出高效且稳定的拓扑方案。

#### 四、能量存储与快速释放技术的提升策略

##### (一) 混合储能拓扑设计优化

单一的储能技术很难满足电磁发射系统对于储能密度、释放速度和可靠性的多样化需求,所以,混合储能拓扑设计成为提升的主要方向,借助把不同类型的储能技术结合在一起,充分发挥其自身优势,弥补相互之间的短板,最终实现性能的互补。如,超级电容和锂电池的混合储能拓扑,借助超级电容充放电速度较快且循环寿命较长的优势,来实现能量的快速释放。借助锂电池能量密度较高且自放电率较低的优势,实现了能量的长期存储和补充,二者之间的协同工作,可以平衡储能密度和释放的速度,进而满足重大功率电磁发射系统的相关需求。

另外,电感-电容混合储能拓扑也是主要的提升方向,借助电感储能密度较高且释放速度较快的优势,充分结合电容储能的响应迅速及波形容易调控等特点,借助合理的拓扑结构设计,来实现能量的高效存储和快速的释放,并降低电感关断时候的电压应力,最终提升系统的可靠性。如,可以把电容脉冲成形单元(CPFU)和 meat grinder 电路结合在一起,来优化电感储能的拓扑结构,可以有效地提升电容器预充电电压的自恢复率和电感储能的实际密度,并有效改善能量释放的脉冲波形质量。

##### (二) 开关器件性能优化

开关器件的性能会直接的决定能量释放的速度与效率,所以,开关器件的提升主要会集中在器件的选型、驱动电路优化和多器件协同的控制这三个方向。其中,在期间的选型中,要优先选择 SiC MOSFET、GaN HEMT 等的宽禁带半导体的器件,用其替代传统的 IGBT 和晶闸管,借助其开关速度较快损耗比较低且耐压耐流能力较强等的优势,提升能量的实际释放速度和效率。在驱动电路的提升上,对于 SiC MOSFET 等器件的栅极驱动的需求,可以优化栅极驱动电压、驱动电阻和驱动信号上升的速率等参数,以此减少开关延迟与开关的损耗。如,将谈汉族栅极升级驱动器的设计方式,可以显著地缩减 SiC MOSFET 的实际导通时间,进而提升脉冲上升的沿速度到纳秒的级别。在多器件协同控制上,要设计精准的时序控制电路与电压的均分电路,以此保证多个开关器件之间的串联或者并联工作的时候的同步性和电压均分,避免局部的器间承受了过高的电压或者电流,以此减少器件出现损坏的风险。榆次同时,使用冗余的设计,增加备用的开关器件,以此提升系统的可靠性,可以保证能量在快速释放过程中的连续性。

##### (三) 智能控制策略优化

智能控制对策略的优化是提升能量存储和快速释放中稳定性和精准性的关键,借助引入先进的控制算法来实现对储能过程和释放过程的精准性控制,并优化脉冲的波形,降低能量的损耗,最终提升系统的自适应能力。如,使用模糊控制、PID 控制和模型预测控制等的算法,对于储能系统的充电过程和方便点过程开展精准的控制,并按照电磁发射系统的实际需求,动态化地调整充放电的实际参数,以此保证能量存储的合理性与释放的精准性。对于多模块协同同步这一问题,可以使用分布式的协同控制算法,借助信息交互和误差的补偿,提升各个模块在同步上的精度,避免脉冲波形出现畸变。另外,可以引入智能监测和诊断技术,实施的检测储能的器件、开关的器件和回路电路的实际工作状态,及时地发现相关异常的情况,并自动地触发相关保护对策,以此来提升系统的综合可靠性和安全性,避免故障扩大进而影响能量的释放全过程。

##### (四) 系统集成与小型化优化

对于电磁发射系统在适装性上的实际需求,脉冲电源的系统集成和小型化的优化是非常重要的,可以借助优化点库的布局、使用集成化的器件和简化系统的结构,来实现体积的缩小并减轻整体质量,保证系统的综合性能不受影响。如,使用集成式的 PFN 结构,把 LC 元件、开关器件、驱动电路集成在单一的模块中,以此减少器件之间连接的导线,进而在降低寄生参数所产生的影响的同时,缩小系统的体系。也可以使用小型化的储能器件,如柔性超级电容和微型的锂电池等,在结合轻量化的结构设计的同时,降低系统的整体质量。也可以优化冷却的系统,使用高效的小型化的散热器件来减少散热系统的体积与质量,最终提升系统的整体适装性。与此同时,在系统的集成中,要注意电磁的兼容设计,减少各个模块之间出现的电磁干扰,保证能量在存储和释放中的稳定性,避免出现电子干扰所导致的控制信号失真或者脉冲波形畸变等问题。借助合理的屏蔽设计和接地设计,可以大幅提升系统的整体抗干扰能力,保证脉冲电源在复杂的电磁环境之下能够稳定地工作。

#### 结束语:

脉冲电源在能量的存储和快速释放方面的技术是电磁发射系统的主要支持。文章分析了主流的储能技术特点和快速释放的主要影响因素,并提出了混合储能、器件升级和智能控制等提升路径,以期推动电磁发射系统向着高功率、小型化和高可靠化的方向发展,拓展其在国防和民用领域中的应用范围。

#### [参考文献]

- [1]张宏娟,王云,肖智铎. 高温对电驱动系统电磁发射特性影响的研究[J].中国汽车(中英文对照),2026,36(02):109-112.
- [2]赵哲,仇佳仪,张新平等. 电磁轨道炮发射过程中引信抗冲击防护研究[J/OL].兵器材料科学与工程,1-6[2026-05-09].
- [3]安海龙,董立成,刘宝殿,等. 新能源汽车电池管理系统电磁发射测试研究[J].环境技术,2024,42(09):22-27.