

中国脉冲功率科技进展简述*

丛培天

(西北核技术研究院 强脉冲辐射环境模拟及效应国家重点实验室, 西安 710024)

摘 要: 从脉冲功率科学技术的基本内涵出发, 回顾我国脉冲功率发展历史, 按照高功率脉冲加速器建设历程, 我国脉冲功率技术发展史可大致分成三个阶段: 自主创业、加速成长到创新超越; 尝试以国际视野介绍我国在闪光照相、Z 箍缩、高功率微波、电磁发射和工业应用等方面的发展成就; 简要阐述脉冲功率技术未来发展趋势, 建议大力发展先进辐射源技术, 关注爆磁压缩技术, 加强 HPM、抗核加固和电磁发射等各类负载技术攻关, 加大协同创新和应用推广。

关键词: 脉冲功率; 高功率微波; 加速器; 电磁发射; Z 箍缩; X 射线; 工业应用

中图分类号: TM85 **文献标志码:** A **doi:** 10.11884/HPLPB202032.200040

Review of Chinese pulsed power science and technology

Cong Peitian

(State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, P. O. Box 69-10, Xi'an 710024, China)

Abstract: This paper begins with the concept of pulsed power science and technology, briefly introduces the Chinese history of pulsed power science and technology, which, according to the construction process of high power pulse accelerator, can be divided into three stages: self-dependent startup, accelerated growth, innovation and invention; principally describes the national progress and applications of pulsed power science and technology with an international perspective, such as X-ray flash photography, Z-pinch, high-power microwave, electromagnetic emission and industrial applications; presents the development trend of pulse power technology in the future and ends with suggestions for its domestic development as follows: vigorously developing advanced radiation source technology, putting more concerns on explosive magnetic compression technology, strengthening explorations into high power microwaves, nuclear hardening and electromagnetic emission for more breakthroughs, and increasing collaborative innovations and application promotions.

Key words: pulsed power; high power microwave; accelerator; electromagnetic emission; Z-pinch; X-ray; industrial applications

脉冲功率科学技术兴起于美俄核武器与高新技术武器研制, 是研究高功率电脉冲的产生、加载及其相关物理过程的交叉学科, 是当代高科技的主要基础学科之一。我国的脉冲功率研究始于 1960 年代, 经过几代人的努力, 已逐步进入国际领先行列, 并在推动相关学科发展建设、人才培养、国内外学术交流等方面取得了令人瞩目的成绩。中国核学会脉冲功率技术及其应用分会成立于 2008 年, 次年在安徽芜湖举办首届全国脉冲功率会议, 2010 年, 在四川绵阳举办首届脉冲功率暑期培训班, 此后这两项活动每年轮流进行, 既引领了脉冲功率学术技术和人才成长, 也带动了特种电源、等离子体、高电压工程和绝缘材料等相关领域的发展应用。由中国作为主要发起人的亚欧脉冲功率会议已举办 7 届, 现已成为国际脉冲功率领域最重要的学术交流平台之一。2019 年, 第 6 届全国脉冲功率会议在浙江杭州召开。为促进脉冲功率知识交流和协同创新, 《强激光与粒子束》将脉冲功率技术作为重点报道栏目并长期跟踪该领域的科研进展和科研动态, 出版过多期“脉冲功率技术专辑”。本文应邀乘风回望我国脉冲功率发展历史, 粗略梳理发展成就, 浅析今后发展趋势, 冀以不忘初心、把握现在、启迪未来。

1 我国脉冲功率科技发展历程

脉冲功率科学技术是研究通过能量的时空压缩以产生高功率电脉冲并加以转化利用的学问。脉冲功率系统

* 收稿日期: 2020-01-15; 修订日期: 2020-02-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51707163, 51577156)

作者简介: 丛培天(1974—), 男, 博士, 研究员, 主要从事脉冲功率技术研究; congpeitian@nint.ac.cn。

主要涉及脉冲电源和负载两部分,大致的工作过程是脉冲电源首先启动初级储能系统通过能量快速释放产生初始电脉冲,再经过适当的中间储能、脉冲压缩成形和汇聚等过程,输出符合一定要求的高功率脉冲波形,最后在负载上完成脉冲能量的转化利用。脉冲电源常用的初级储能系统主要包括:以电场储能的电容器或者 Marx 发生器、以磁场储能的电感或者脉冲变压器、具有一定转动惯量的各类机械能发电机、化学能装置与核能装置等。常用的中间储能和脉冲成形系统包括:中间储能电容、脉冲形成线、脉冲变压器、磁通压缩器(磁放大器)和发电系统等。需要指出,这些系统包括了不可或缺且至关重要的各种转换开关。负载有多种应用类型,最常见的是辐射型负载,如高功率粒子束二极管、等离子体和天线等,电子束二极管进一步与微波器件或谐振腔结合还可以产生高功率微波和激光;动能型负载则是将脉冲电磁能转化为自身的动能,如电磁发射。这些手段正在被广泛应用在国防科研、高新技术和民用工业等诸多领域。

按照高功率脉冲装置建设历程,我国脉冲功率技术发展史可大致分成三个阶段:自主创业、加速成长到创新超越^[1-7]。

(1)自主创业期。从 1960 年代左右开始,以王淦昌等老一辈科学家为代表的创业者,自力更生、艰苦探索,初步掌握了 Marx 发生器、传输线、辐射转换靶和测量等关键技术,建成了系列脉冲 X 射线机,并应用到闪光照相、辐射探测和抗核加固等研究领域。1970 年代,中国工程物理研究院(以下简称“中物院”)研制了 6 MV 高阻抗电子束加速器“闪光一号”;1990 年代,西北核技术研究所(现改称“西北核技术研究院”,以下简称“西核院”)建成了 1 MA 低阻抗电子加速器“闪光二号”(图 1),中物院建成了 12 MeV 的直线感应加速器。这些大型高功率脉冲装置的建成,标志着我国脉冲功率加速器研制能力开始进入国际先进行列。

(2)加速成长期。进入 1990 年代以后,国际脉冲功率学科日趋活跃,我国脉冲功率步入快速发展阶段。2000 年以后,西核院建成了集成多项先进技术的多功能加速器“强光一号”(图 2),中物院建成了“阳”加速器,清华大学建成了 PPG-1 装置,这些装置奠定了国内 Z 箍缩研究的实验基础。2002 年,中物院研制了输出电子能量 20 MeV 的“神龙一号”直线感应加速器,我国精密闪光照相技术水平继美、法之后步入世界前三甲。国防科技大学、中物院和西核院等单位,进一步把应用拓展到高功率激光和高功率微波领域,并开始取得了国际瞩目的成就。



Fig. 1 Flash II
图 1 闪光二号



Fig. 2 Qiangguang-I
图 2 强光一号

(3)创新超越期。2010 年以后,中物院相继建成了 10 MA 的 Z 箍缩装置“聚龙一号”(图 3)与猝发多脉冲 20 MV 的闪光照相装置“神龙二号”(图 4),预示着我国脉冲功率技术正在实现从追赶 to 超越的转变。前者使我国装置规模从单台单路驱动发展到了多路并联汇聚,电功率水平从 TW 级提升到 10 TW 级,成为继美国之后第二个



Fig. 3 Julong I
图 3 聚龙一号

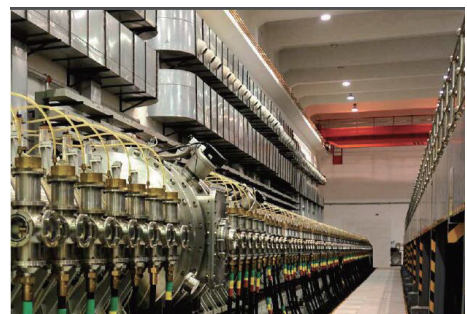


Fig. 4 Dragon-II
图 4 神龙二号

拥有此类设备的国家；“神龙二号”在多脉冲 X 射线产生方面独辟蹊径，开创了多脉冲直线感应加速器(LIA)技术新高度，成为了美国后续同类装置建设的范本。

2 主要进展

如今脉冲功率正迎来学术技术全面发展的历史机遇期。2019 年脉冲功率会议为我们展示了国内各行业最新动态，在本次会议基础上，下面撷取部分代表性领域概略叙述近年来的主要进展。

2.1 X 射线闪光照相与抗核加固

利用强流脉冲电子束加速器产生高能脉冲 X 射线(0.5~20 MeV)，主要用于爆轰物理的闪光照相诊断与抗核加固的辐照效应测试，两类应用的 X 射线时空参数不同，前者要求点源(直径在 mm 级)，后者通常是面源(直径在 cm 级以上)，对波形和出光时刻精确性要求不如前者严格。

我国类似用途的加速器主要涉及传输线型、LIA 型和感应电压叠加型三种。

1960 年代，英国原子武器中心(AWE)的 J. C. Martin，在原有的 Marx 后面加入传输线，将 μs 级脉冲成功压缩为 ns 级脉冲，解决了高储能 Marx 到二极管电子束能量转换效率低的瓶颈问题，研制了传输线型的闪光 X 射线机 SWARF。我国的“闪光一号”和“闪光二号”同属于传输线型加速器，前者采用高阻抗的变压器油绝缘 Blumlein 线，获得了能量高达 6 MeV 的电子束，后者采用低阻抗的去离子水绝缘单同轴线，获得了 1 MA 的电子束流^[3,8-9]。“强光一号”相对复杂，除了超低阻抗的水介质传输线，又采用了电感储能+断路器技术，兼具低阻抗和高阻抗两类运行状态，分别输出强电流(1~2 MA)和高电压脉冲(1~4 MV)，驱动多种负载产生能量百 eV~MeV、宽度 20~200 ns 的 X 射线脉冲^[10-13]。这些装置适合产生 10 MeV 以下的电子束及 X 射线，当电压超过 10 MV 以后，迅速增大的负载绝缘堆栈电感(正比于电压平方)限制了脉冲的有效输出。

为进一步提高脉冲 X 射线能量，美国和前苏联分别提出了新的多腔电子加速技术，期间直线感应加速器(LIA)逐渐得到发展。最迟的 LIA 装置电子束品质不高(发射度偏大、能散度偏高)，X 射线光斑较大，如：美国利弗莫尔实验室(LLNL)早期的 FRX 装置和中国中物院 12 MeV 的 LIA 型 X 射线机。新一代的精密闪光 X 射线照相装置出现在 2000 年左右，美国、法国和中国相继研制了 DARHT-I, AIRIX 和“神龙一号”，这三台装置的指标基本相当^[3,14]，X 射线能量高达 20 MeV，脉宽约 60 ns，光斑 1~2 mm，1 m 处照射量约 500 R。2010 年前后，美国和中国先后研制成功了 LIA 型多脉冲 X 射线源 DARHT-II 和“神龙二号”^[15-16]，DARHT-II 产生 16~17 MeV/1.7 kA 四脉冲电子束，“神龙二号”产生 18~20 MeV/2 kA 三脉冲电子束(图 5)，从已公开的实验结果看，“神龙二号”的脉冲波形一致性明显占优。两台装置最大区别在于产生多脉冲的技术路线不同，DARHT-II 产生并加速一个 1.6 μs 平顶的长脉冲电子束，打靶前通过踢束器将其切割成时间间隔一定的四个脉冲束，除了踢束器、热阴极和阳极靶，LIA 技术与此前的 DARHT-I 基本相同，主体仍然为单脉冲模式。“神龙二号”则是直接产生并加速三个 60 ns 的脉冲电子束，主体在猝发脉冲串模式下工作，是真正意义上的多脉冲 LIA 加速器，这种设计最大优点是三脉冲可以独立调节，工程实用性强。美国最新规划装置已放弃 DARHT-II 昂贵的电子束切割方案，转而采取更为先进的中国方案。

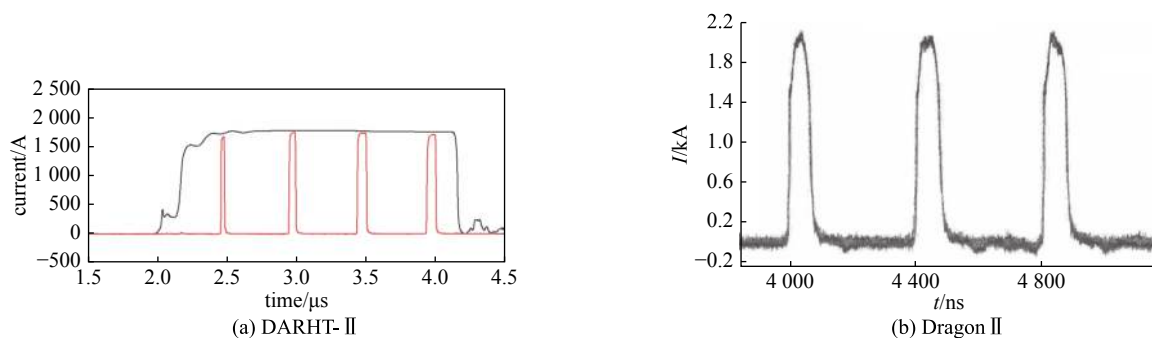


Fig. 5 Electron beam waveforms

图 5 电子束波形

为了获得更高亮度的脉冲高能 X 射线，人们发展了感应电压叠加(IVA)技术。如图 6 所示，IVA 技术最早用于 LIA 的注入器^[17]，它利用感应腔可将脉冲压缩和电压倍增功能相对分离，每个感应腔的初级脉冲被控制在绝缘相对容易的电压下，通过 N 个感应腔串联在其共用的次级中央导体(MITL/VTL)输出近似 N 倍的电压并直接驱动二极管，它解决了单纯传输线型装置对 10 MV 以上电压难以可靠绝缘的问题，巧妙地实现了低阻抗驱动源到高阻

抗负载的结合,同时可以输出比LIA高1个量级以上的电子束流,从而获得更高亮度的高能X射线。美国圣地亚实验室(SNL)利用IVA技术建立了世界最大的核爆伽马射线模拟装置Hermes-III(图7),产生大面积辐照用于抗核加固。随RPD等强聚焦二极管技术出现^[18],美国先后建立了IVA型闪光灯照相研究装置SABRE和RITS和Cygnus(图8),其中2 MV电压的Cygnus已用于内华达试验场(NTS)的次临界试验^[19-20]。当前IVA型装置输出10 MeV的X射线光斑为2~3 mm,3 MeV的X光斑1~2 mm。我国西核院2008年和2019年研制了2 MV的“剑光一号”(图9)和4 MV的“剑光二号”,2018年中物院设计了高可靠4 MV“天蝎”装置,并重点进行了可靠性实验研究^[21-24]。

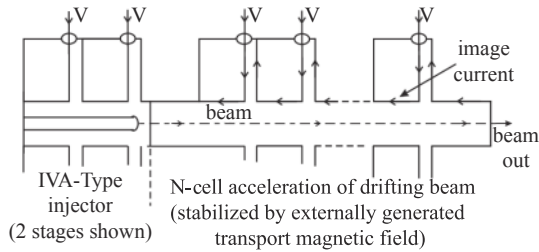


Fig. 6 LIA with IVA injector

图6 直线感应加速器(左端为IVA注入器)

2.2 Z箍缩与惯性约束聚变

Z箍缩主要用以高强度低能X射线(10 keV量级以下)产生、高能密度物理和惯性约束聚变研究。Z箍缩是采用脉冲强电流驱动圆柱筒型负载形成的等离子体自箍缩效应,负载依靠轴向(Z方向)大电流产生的洛伦兹力,沿径向(r方向)高速运动到对称中心Z轴附近止滞,将电磁能转换为物质动能、内能和辐射能。Z箍缩因其电能到X射线的转化效率高($\geq 15\%$)和辐照均匀性好等优点,被认为是一条有竞争力的惯性约束聚变(ICF)技术路线,基于Z箍缩的聚变能源(IFE)研究也得到了国际上普遍重视^[25-26]。实现Z箍缩驱动聚变的关键是高功率驱动器与高性能聚变靶。驱动器产生幅度为数十MA量级的百ns脉冲电流,Z箍缩负载在脉冲强电流加载下内爆压缩氘氚靶达到聚变条件,从而为出中子、增殖和放能等后续系列物理过程创造条件。

1997年,美国在18 MA/100 ns的PBFA-Z装置上的Z箍缩实验取得突破,获得了功率250~300 TW的X射线,引起了国际Z箍缩研究热潮。2000年,国内三家单位在自然科学基金委支持下启动了Z箍缩研究,中物院组建了集理论、实验、测试、制靶和驱动器“五位一体”的科研群体,针对电磁内爆、能量耦合、X射线转化机制、RT不稳定性、D-D聚变中子产生规律和驱动器关键技术,进行了系统深入的理论和实验研究;西核院主要依托“强光一号”开展Z箍缩X射线实验和应用研究,清华大学和较晚加入的西安交通大学则主要开展Z箍缩早期过程及基础研究^[27-28]。

2009年,我国科学家提出了Z箍缩驱动聚变与次临界裂变堆结合的聚变能源新途径(Z-FFR),这一途径的提出有可能加快聚变能源的解决和实验室演示进程^[29]。国外基于中心点火的聚变方案对驱动器要求较高,理论上需60 MA左右的电流才可实现聚变点火,大于90 MA的电流才能实现有价值的能量增益。中物院提出创新的负载黑腔靶设计和基于“局部整体点火”的物理思想,能够更好地克服能量加载不对称性。理论分析表明:在30~40 MA电流条件下有可能实现点火,在60~70 MA下可以实现有商业价值的能源输出。负载构型对于提高内爆加载效率有重要作用,球形结构具有最小的面积/体积比,理论上准球形比圆柱形负载有更高的能量加载密度和利用效率,中物院设计了一种全新的准球形负载并完成了实验验证,国际上首次获得了有明显聚心效果的准球形内爆^[30]。

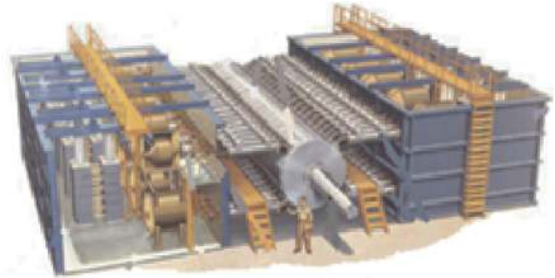


Fig. 7 Hermes III

图7 Hermes III

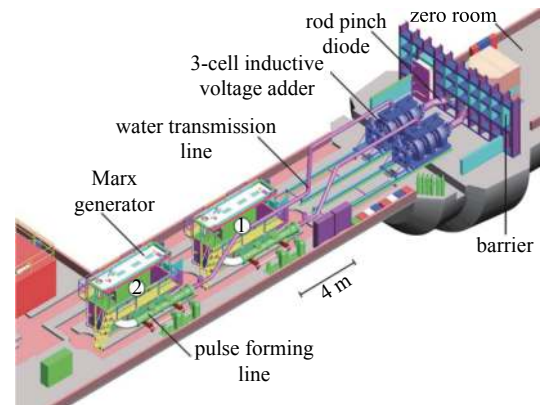


Fig. 8 Dual axis Cygnus

图8 双轴布放的两台Cygnus



Fig. 9 Jiangguang I

图9 剑光一号

2013年,中物院 10 MA/90 ns 的“聚龙一号”研制成功,使我国 Z 箍缩实验能力超越俄罗斯仅次于美国。为开发新一代 Z 箍缩驱动器,国际上正大力发展直线变压器(LTD)和 Marx 发生器技术^[31-32]。中国进一步针对聚变能源需求,开展了体现重频运行要求的相关研究,并初步完成了 Z 箍缩驱动的聚变-裂变混合堆总体概念设计^[31-36]。

2.3 高功率电磁辐射

高功率电磁辐射主要包括高功率微波(HPM)和高空核爆炸电磁脉冲(HEMP)。脉冲驱动源主要为高功率电磁辐射提供高功率电脉冲或电子束,从产生脉冲波形的特点,可大致分为高重频、长脉宽和快前沿等三种类型^[37-38]。

提高重复频率目的之一是提高平均功率,俄罗斯的重复频率脉冲驱动源性能优越,托木斯克强流电子学研究所的 Tesla 型 SINUS 系列驱动源,输出从几 ns 到数十 ns 的脉冲,重复频率 100 Hz,峰值功率最大 40 GW;叶卡捷琳堡电物理研究所的 SOS 型 S 系列全固态驱动源,输出几十 ns 脉冲,重复频率可达几 kHz,峰值功率 GW 级。2000 年以来,西核院等单位分别研制了涵盖上述指标的 Tesla 型和 SOS 型两个系列的重复频率脉冲源^[39-46],包括 Tesla 型 2×5 GW 双路输出的 880 kV/4 ns 脉冲源;SOS 型“胡杨 200”脉冲源(210 kV/1 kA/35 ns),在 2 kHz 超过 10 kW 的平均功率下稳定运行 30 s,在 300 Hz 下可稳定运行 12 h 以上,显示了固态脉冲源长寿命的优点^[47]。提高平均功率的另一措施是延长脉冲宽度,使之达到 100 ns 以上。国防科技大学采用脉冲变压器和高储能密度液体介质技术路线,与螺旋脉冲形成线相结合,研制出紧凑型重频 HEART 系列加速器,峰值功率 1~35 GW、阻抗 10~50 Ω、脉冲宽度 10~200 ns、重复频率 10~100 Hz^[48]。美国海军实验室研制了基于磁开关技术的 Marx 发生器(200 kV/4.5 kA/300 ns),实现了 10 Hz 重复频率下超过千万次的运行寿命^[49]。中物院和国防科技大学在 Marx 型长脉冲重频驱动源研制方面成效显著,中物院研制 1 MV/20 kA/180 ns 的 Marx 型脉冲源(图 10),重复频率 1~50 Hz,平面二极管负载在 30 Hz/16 GW 状态下稳定运行 10 s,系统体积 2.5 m³、重量 2.2 t^[50]。国防科技大学研制了 10 GW/100 ns/5 Hz 的 PFN-Marx 型脉冲源^[51]。

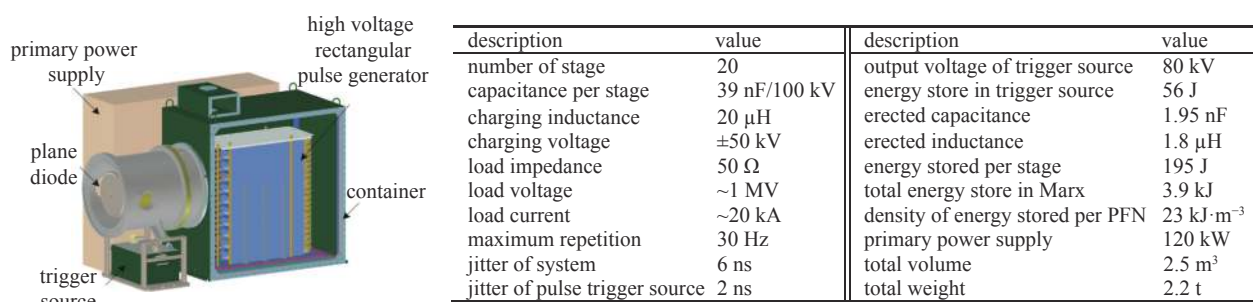


Fig. 10 1 MV/20 kA/180 ns Marx type pulse generator developed by CAEP

图 10 中物院研制 1 MV/20 kA/180 ns 的 Marx 型脉冲源

国内的固态脉冲源新技术探索比较活跃,国防科技大学利用大功率晶闸管组件、磁脉冲压缩网络、双线型低阻抗脉冲形成网络和感应电压叠加器等技术研制了一种全固态长脉冲源,在水电阻负载上获得了功率 2.1 GW, 170 ns 的脉冲输出^[52]。西南交通大学采用 Blumlein 型 PFN 驱动 LTD,在 20 Hz/40 Hz 下获得了抖动小于 2 ns 的 200 ns 脉冲输出^[53]。中物院采用半导体开关研制了 500 kV 全固态 Marx 发生器,在 50 Hz 下实现数十个脉冲的猝发输出,脉冲宽度 3~10 μs,峰值功率约 0.5 GW^[54];研制了四模块 LTD 型直接驱动负载的长脉冲发生器,电子束功率数 GW,重频 25 Hz,波形前沿 40 ns,脉冲宽度 160 ns^[55]。

HEMP 脉冲源要求输出前沿为亚 ns 或 ns 级的高达数 MV 的快脉冲电压^[56-57]。由于 HEMP 的作用距离远、影响范围广,所以不少国家都重视 HEMP 的研究。当前全球多达 14 个国家现有 HEMP 模拟器 40 多台^[58],其中美国数量最多,其 Trestle 是世界最大的 HEMP 模拟器(图 11),输出电压 6~8 MV、脉冲宽度 500 ns、前沿 20 ns。1995 年,西核院研制了 1 MV 的 HEMP 模拟器“春雷号”(图 12)^[59],输出脉宽 300 ns、前沿 10 ns;2013 年,研制了 2.5 MV 的脉冲源,输出脉冲宽度 56 ns、前沿 1.2 ns,可驱动天线输出符合 IEC61000-2-9 的电磁脉冲^[60]。

2.4 电磁驱动

电磁驱动是利用大电流产生强磁场推动待发射物体加速,把电磁能转换为动能的技术,主要用于材料力学性能研究和电磁发射。进行材料力学性能研究时,驱动质量小,但速度高(>10 km/s),前述的 ZR 和“聚龙一号”用途



Fig. 11 Trestle EMP simulator

图 11 Trestle 电磁脉冲模拟设施

之一就是进行材料加载实验。我国中物院还建立了电流上升沿 200~600 ns、幅值 1~7 MA 的 CQ 系列装置,专门用于材料等熵加载和高速飞片实验^[61]。

电磁发射质量大,速度一般为 3~8 km/s。美国通用原子能 GA 和英国 BAE 研制的 32 MJ 轨道炮代表了当今电磁发射的最高水平。2014 年,电磁弹射装置已应用于“福特号”航母。2000 年以前,我国主要处于跟踪研究阶段,最近十几年发展迅速。我国电磁发射电源研究单位包括:海军工程大学,中科院电工研究所、等离子体研究所,北京特种机电技术研究所,中物院流体物理研究所,南京理工大学和华中科技大学等^[62-64]。

大功率脉冲电源是电磁发射关键技术之一,按照储能原理不同,主要分成电容储存电能、电感储能磁能和电机惯性储存动能等类型。其中电容型储能技术相对成熟,应用最为广泛。尤其是自愈式金属膜电容器和半导体开关技术的发展,使其成为工程应用的主要选择^[65-66]。2003 年,华中科技大学针对电磁发射用的金属化薄膜电容器,综合分析了储能密度与寿命的关系,结合国际电容器制造水平,给出了金属化膜电容器寿命指标选取建议^[67]。2008 年,海军工程大学完成了电磁弹射原理样机攻关,开展了验证设备研制工作。2016 年,研制了 13 MJ 脉冲电源^[68],输出电流峰值 1.1 MA,脉冲宽度 3.5 ms。2017 年利用 RSD 研制了输出电流 960 kA 的 1 MJ 电源模块^[69]。

2.5 工业应用

脉冲功率与特种电源、等离子体和加速器的发展相辅相成,逐渐进入新能源、环境保护、先进制造、农业生产、生物医学、科学仪器等各领域^[70]。

在装置研制方面,由于工业领域的负载类型广泛,在功率水平适当的前提下,对装置的通用性、紧凑化、灵活可调、免维护和长期稳定运行等方面有着更高的要求。正像会议上展现的一样,更加紧凑、灵活的全固态脉冲功率源是未来民用领域的发展趋势。国内高校如:复旦大学、西安交通大学、浙江大学、重庆大学、西南交通大学、上海理工大学等高校积极发展基于全控半导体器件的固态 Marx, LTD 及脉冲形成线技术。中科院体系:电工研究所、高能物理研究所、上海硅酸盐研究所等分别发展了磁压缩、感应叠加、碳化硅光导开关陶瓷形成线等高压纳秒短脉冲技术。中物院基于国产砷化镓光导开关和陶瓷基板传输线实现了 300 kV/10 ns 脉冲输出,但在长寿命运行方面有待进一步研究。在国家科技部的支持下,中物院和重庆大学联合承担了“高重复频率高压脉冲源研制与产业化”重点研发项目。本项目成果预期能实现我国 10 kV/400 kHz/10 ns~100 μ s 的系列全固态脉冲电源产品化,有效替代同类进口产品。

在应用研究方面,俄罗斯、德国、荷兰和日本等国的研究应用比较突出^[71-73]。近年来,葡萄牙牵头成立了欧洲 18 个国家参与的脉冲功率技术协会(A³P²),专门从事脉冲功率推广应用^[74],已有产品推出。日本特别注重脉冲功率技术在深紫外光源、废气废水处理、食品杀菌保鲜等方面的应用,长冈技术科学大学正在开发的 10 kA/100 ns/10 kHz 固态 LTD 已成为日本光刻机巨头 Gigaphoton(千兆光子)会社新一代光刻机光源用高压脉冲电源备选方案。俄罗斯约菲物理研究所一直致力于研发 RSD 的矿业开采用百 kA 级大电流脉冲源。美国弗吉尼亚理工大学的研究人员配合美国 AngioDynamics 公司研发团队,开发了脉冲电场消融肿瘤设备“纳米刀”已经进入中国市场,美国欧道明大学正力图通过皮秒脉冲聚焦技术实现癌症的无创治疗。

国内的重频脉冲功率技术应用研究近几年也呈现出旺盛的发展态势^[75-80]。在环境保护和治理领域,浙江大学领导的电除尘^[81]项目已走出国门,成套装备和示范工程正出口印度;新能源探测和开采领域,浙江大学依托科技部重点研发计划“深拖式高分辨率多道地震探测技术与装备研究”,正将脉冲功率技术用于天然气水合物资源勘查^[82]和试采工程研究^[83-84]。华中科技大学与西安交通大学将脉冲放电产生的液电效应应用于石油开采领域,效果明显。在先进制造领域,华中科技大学,三峡大学和重庆大学等高校正在拓展强电磁成形技术^[85]在材料加工工艺中的应用。山东大学、大连理工大学和南京农业大学等高校在脉冲放电等离子体材料表面处理应用也取得突破。生物医学领域,由中物院牵头、清华大学参与的“重要病原体的现场快速多模态谱学识别与新型杀灭技术”重点研发项目中,脉冲电场联合低温等离子体杀灭病原体应用研究也取得了突破^[86]。重庆大学在脉冲电场治疗肿瘤应用方面成就明显,研发的国产首台微秒脉冲电场治疗肿瘤设备已通过国家第三类医疗器械的特别审批,多中心临床疗效显著^[87]。



Fig. 12 Chunlei EMP simulator

图 12 春雷号电磁脉冲模拟器

3 结束语

我国脉冲功率发展世界瞩目,在装置建设、部件研制、技术研究和应用开发方面取得了全面系统的进步。建议继续做好以下工作:

(1)大力发展先进辐射源技术。Z-FFR 目前处于概念与技术研究阶段,亟需加快工程前沿技术研究,创新 30 MA 以上的 Z 箍缩驱动器概念设计,搞好 LTD/Marx 开关、绝缘和汇流等关键技术验证,尽早拿出切实可行的工程方案,围绕聚变物理及聚变靶研究,建立脉冲功率基础数据库,发展辐射磁流体力学数值模拟能力路-场联合仿真计算软件^[88-91]。发展 10 MV 电压等级的 IVA 型高能 X 射线源。脉冲功率离不开种类繁多的放电过程,这些放电与高压绝缘、脉冲产生和能量转化息息相关,深入理解放电等离子体物理,有助于上述问题的解决^[92-93]。

(2)关注爆磁压缩技术。爆磁压缩发生器(EMG)是把炸药化学能转化为电磁能加以利用的紧凑脉冲源,可产生数十至百 MA 的大电流,获得高达 100 T 的强磁场,用于极端高能量密度物理研究和电磁武器研制^[94-95]。我国从事 EMG 研究的主要是流体物理研究所和国防科技大学^[96-97]。俄罗斯 EMG 技术世界领先,其最新动向值得特别关注。现有 EMG 只能输出微秒级电流脉冲,目前正在发展 100 ns 前沿的 10 MA 电流的 EMG 装置^[98];利用爆炸磁压缩发生器驱动 D-T 等离子体焦点负载^[99],获得了 2×10^{12} 个 14 MeV 中子。

(3)加强 HPM、抗核加固和电磁发射等各类负载技术攻关。明确应用需求和目标要求,深化科学认识,摸清原理找准问题,是推动科技进步的根本。最近 10 年来,国防科技大学、中物院和西核院在电子束二极管和微波器件方面的创新成果突出^[100-102]。负载技术与驱动源技术的发展互为依托,以“强光一号”、“闪光二号”为例,在适应负载物理实验要求的过程中,开关和绝缘等技术水平才持续提升,不断使驱动源焕发出新活力。

(4)加大协同创新和应用推广。依托工业技术进步,搞好融合创新,发展高功率半导体器件及其智能化电源^[103-108],开发工业化的气体开关、二极管等关键部件系列产品^[109-110],推动脉冲测量技术标准化^[111],联合攻克介电壁加速器关键技术^[112]。全面融入国民经济建设,积极参与医用高端数字诊疗设备、先进制造、新能源、环境保护等领域技术开发^[113],弥补国家关键设备制造领域的短板弱项,助力中国制造 2025 计划实施。

当前脉冲功率技术正朝着重复频率、模块化、阵列化、紧凑化、固态化和长寿命方向发展,从国防和高新技术领域逐渐向工业、民用领域延伸,发挥更大的推动作用,同时工业应用也正在拓展脉冲功率科技内涵的深广度。我国的脉冲功率科技在基础研究水平和创新能力方面,总体上与欧美发达国家还有差距。全国同仁仍需要不忘初心使命,坚定理想信念,以国家重大需求为牵引,勇抓机遇,强化基础研究,突出关键技术、前沿引领技术和颠覆性技术的创新,不断实现脉冲功率科学技术研究应用的新突破,为建设创新型国家和世界科技强国而努力奋斗。

致谢 衷心感谢在本文撰写过程中中物院石金水研究员、国防科技大学张自成副研究员和重庆大学余亮博士等的宝贵意见。

参考文献:

- [1] 陶祖聪,张寿云,刘锡三. CAEP 闪光 X 射线机的发展[J]. 强激光与粒子束, 1991, 3(3): 269-285. (Tao Zucong, Zhang Shouyun, Liu Xisan. Development of flash X-ray machines at CAEP[J]. High Power Laser and Particle Beams, 1991, 3(3): 269-285)
- [2] 曾正中. 实用脉冲功率技术引论[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2003. (Zeng Zhengzhong. Introduction of pulsed power technology[M]. Xi'an: Shaanxi Technology Press, 2003)
- [3] 刘锡三. 高功率脉冲技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005. (Liu Xisan. High pulsed power technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005)
- [4] 邓建军. 直线感应电子加速器[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006. (Deng Jianjun. Linear induction electron accelerator[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006)
- [5] 韩旻, 邹晓兵, 张贵新. 脉冲功率技术基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006. (Han Min, Zou Xiaobing, Zhang Guixin. Application of pulsed power technology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006)
- [6] 布鲁姆 H. 脉冲功率系统的原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008. (Bлум H. Pulsed power system principles and applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008)
- [7] 邱爱慈. 脉冲功率技术应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2016. (Qiu Aici. Application of pulsed power technology[M]. Xi'an: Shaanxi Technology Press, 2016)
- [8] 邱爱慈, 李玉虎, 王知广, 等. 强流脉冲相对论电子束加速器—闪光二号[J]. 强激光与粒子束, 1991, 3(3): 340-348. (Qiu Aici, Li Yuhu, Wang Zhiguang, et al. Flash II—A relativistic electron beam accelerator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 1991, 3(3): 340-348)
- [9] 刘国治, 邱爱慈, 苏建仓, 等. 1.5 特斯拉脉冲强磁场装置的研制[J]. 强激光与粒子束, 1992, 4(1): 41-46. (Liu Guozhi, Qiu Aici, Su Jiancang, et al. Development of 1.5 T pulsed magnetic field device[J]. High Power Laser and Particle Beams, 1992, 4(1): 41-46)

- [10] 蒯斌, 邱爱慈, 曾正中, 等. 短脉冲高剂量率 γ 射线源技术研究[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(4): 595-598. (Kuai Bin, Qiu Aichi, Zeng Zhengzhong, et al. Research on source of high dose rate gamma-ray with short pulse duration[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(4): 595-598)
- [11] 蒯斌, 邱爱慈, 曾正中, 等. 长脉冲高阻抗抗电子束二极管[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(11): 1133-1136. (Kuai Bin, Qiu Aichi, Zeng Zhengzhong, et al. Long pulse high impedance intense e-beam diode[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2003, 15(11): 1133-1136)
- [12] 郭军, 曾正中, 丛培天, 等. XH-1装置电感储能系统的电路模拟[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(4): 509-511. (Guo Jun, Zeng Zhengzhong, Cong Peitian, et al. The circuit-code simulation of inductive energy storage system of XH-1[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2000, 12(4): 509-511)
- [13] 王文生, 何多慧, 邱爱慈, 等. 高功率Z箍缩软X射线功率测量[J]. 核技术, 2003, 26(10): 756-758. (Measurement of soft X ray power from Z pinch plasma[J]. Nuclear techniques, 2003, 26(10): 756-758)
- [14] 邓建军, 丁伯南, 王华岑, 等. 神龙一号直线感应加速器物理设计[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(5): 502-504. (Deng Jianjun, Ding Bonan, Wang Huacen, et al. Dragon-I linear induction electron accelerator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2003, 15(5): 502-504)
- [15] Ekdahl C, Abeyta E O, Aragon P, et al. Suppressing beam-centroid motion in a long-pulse linear induction accelerator[J]. *Phys Rev Special Topics—Accel Beams*, 2011, 14: 120401.
- [16] 石金水, 邓建军, 章林文, 等. 神龙二号加速器及其关键技术[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28: 010201. (Shi Jinshui, Deng Jianjun, Zhang Linwen, et al. Dragon-II accelerator and its key technology[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28: 010201)
- [17] Smith I D. Induction voltage adders and the induction accelerator family[J]. *Phys Rev Special Topics—Accel Beams*, 2004, 7: 064801.
- [18] 马成刚, 邓建军, 谢敏. Rod-pinch二极管综述[J]. 爆轰波与冲击波, 2005(4): 174-177. (Ma Chenggang, Deng Jianjun, Xie Min. Overview of rod pinch diode[J]. Detonation and Shock Waves, 2005(4): 174-177)
- [19] Smith J, Carlson R, Fulton R, et al. Cygnus dual beam radiography source[C]//Proc of the 15th Pulsed Power Conference. 2005: 334-337.
- [20] Smith J, Nelson D, Ormond E, et al. Cygnus performance in subcritical experiments[C]//Proc of the 16th Pulsed Power Conference. 2007: 1089-1094.
- [21] 孙凤举, 邱爱慈, 杨海亮, 等. 感应电压叠加器驱动阳极杆箍缩二极管型脉冲X射线源[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(4): 936-940. (Sun Fengju, Qiu Aichi, Yang Hailiang, et al. Pulsed X-ray source based on inductive voltage adder and rod pinch diode for radiography[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(4): 936-940)
- [22] 魏浩, 尹佳辉, 张鹏飞. 4 MV/80 kA IVA型脉冲X射线照相装置研制进展[C]//第六届全国脉冲功率会议. 2019: 591-598. (Wei Hao, Yin Jiahui, Zhang Pengfei, Status of radiographic X-ray source driven by 4 MV, 80 kA induction voltage adder[C]//The 6th National Pulsed Power Conference. 2019: 591-598)
- [23] Xie Weiping. The introduction of flash X-ray sources for radiography in Institute of Fluid Physics[C]//Proc of 7th Europe-Asia Pulsed Power Conference and High Power Particle Beams Conference. 2018.
- [24] 马成刚, 李洪涛, 邓明海, 等. 1 MV X光机系统可靠性实验研究[C]//第六届全国脉冲功率会议. 2019: 353-358. (Ma Chenggang, Li Hongtao, Deng Minghai, et al. Experimental research on reliability of 1 MV X-ray system for radiography[C]//The 6th National Pulsed Power Conference. 2019: 353-358)
- [25] Olson C L. Progress on Z pinch IFE[C]//20th IAEA Fusion Energy Conference. 2004.
- [26] 华欣生, 彭先觉. 快Z箍缩等离子体研究与能源前景[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(6): 801-807. (Hua Xinshegn, Peng Xianjue. Fast Z-pinch plasma research and application prospect for fusion energy[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(6): 801-807)
- [27] Wang Xinxin. Research at Tsinghua University on electrical explosions of wires[J]. Matter and Radiation at Extremes, 2019, 4: 74-84.
- [28] Wu Jian, Lu Yihan, Sun Fengju, et al. Research on preconditioned wire array Z pinches in Xi'an Jiaotong University[J]. Matter and Radiation at Extremes, 2019, 4: 85-95.
- [29] 彭先觉, 师学名. 核能与裂变混合能源堆[J]. 物理, 2010, 39(6): 385-389. (Peng Xianjue, Shi Xueming. Nuclear energy and fusion-fission hybrid reactor for pure energy production[J]. Physics, 2010, 39(6): 385-389)
- [30] Li Zhenghong, Wang Zhen, Xu Rongkun, et al. Experimental investigation of Z-pinch radiation source for indirect drive inertial confinement fusion[J]. Matter and Radiation at Extremes, 2019, 4: 53-73.
- [31] 丰树平, 李洪涛, 曹文斌, 等. Z箍缩实验装置高压低抖动Marx发生器[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(1): 152-156. (Feng Shuping, Li Hongtao, Cao Wenbin, et al. High voltage low jitter Marx generator of prototype module of primary test stand[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(1): 152-156)
- [32] 陈林, 周良骥, 蒋吉昊, 等. 10级1 MA快脉冲LTD模块串联装置设计与初步实验[C]//第五届全国脉冲功率会议. 2017. (Chen Lin, Zhou Liangji, Jiang Jihao, et al. Preliminary experiment and design of LTD of 10 stages with 1 MA current[C]//The 5th Chinese Pulsed Power Conference. 2017)
- [33] 蔡红春, 陈林, 蒋吉昊, 等. 热核聚变装置“贝加尔”概念设计[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28: 110201. (Cai Hongchun, Chen Lin, Jiang Jihao, et al. Conceptual design of thermonuclear facility “Baikal”[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28: 110201)
- [34] 邓建军, 王勳, 谢卫平, 等. 面向Z箍缩驱动聚变能源需求的超高功率重复频率驱动器技术[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26: 100201. (Deng Jianjun, Wang Meng, Xie Weiping, et al. Super-power repetitive Z-pinch driver for fusion-fission reactor[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 100201)
- [35] 周林. 基于LTD技术的重频Z箍缩驱动器设计[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2017. (Zhou Lin. Design of repetitive operation Z-pinch driver based on LTD technology[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2017)
- [36] 李正宏, 黄洪文, 王真, 等. Z箍缩驱动聚变-裂变混合堆总体概念研究进展[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26: 100202. (Li Zhenghong, Huang Hongwen, Wang Zhen. Nuclear energy and fusion-fission hybrid reactor for pure energy production[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 100202)
- [37] 周碧华, 陈彬, 高成. 现代战争面临的高功率电磁环境分析[J]. 微波学报, 2002, 18(1): 88-92. (Zhou Binhua, Chen Bin, Gao Cheng. Analysis on high power electromagnetic environment in modern war[J]. *Journal of Microwaves*, 2002, 18(1): 88-92)

- [38] 钱宝良. 国外高功率微波技术的研究现状与发展趋势[J]. *真空电子技术*, 2015(2): 1-7. (Qian Baoliang. Development status and trend of abroad high power microwave technology[J]. *Vacuum Electronics*, 2015(2): 1-7)
- [39] 刘金亮, 钟辉煌, 谭启美, 等. Tesla型变压器电子束加速器初步实验[J]. *强激光与粒子束*, 2002, 14(6): 938-940. (Liu Jinliang, Zhong Huihuang, Tan Qimei, et al. Tesla-Transformer-type electron beam accelerator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(6): 938-940)
- [40] Fan Yajun, Liu Guozhi, Liu Xiaolong, et al. A compact subnanosecond pulse generator[C]//Proc of the 1st Euro-Asia Pulsed Power Conference. 2006: 246-248.
- [41] 康强, 常安碧, 李名佳, 等. 带脉冲形成线的1.0 MV 100 Hz紧凑型Tesla变压器的研制[J]. *强激光与粒子束*, 2006, 18(3): 451-454. (Kang Qiang, Chang Anbi, Li Mingjia, et al. Development of a 1.0 MV 100 Hz compact Tesla transformer with PFL[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(3): 451-454)
- [42] 张喜波, 苏建仓, 潘亚峰, 等. 倍宽脉冲形成线[C]//第四届全国脉冲功率会议论文集. 2015: A38. (Zhang Xibo, Su Jiancang, Pan Yafeng, et al. Multi-width pulse forming lines[C] //The 4th Chinese Pulsed Power Conference. 2015: A38)
- [43] 潘亚峰, 刘胜, 张喜波, 等. 一种非均匀的双路脉冲产生结构[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(12): 125004. (Pan Yafeng, Liu Sheng, Zhang Xibo, et al. Theoretical analysis of pulse-forming line based on three-conductor coaxial-line and Tesla transformer with dual secondary windings[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(12): 125004)
- [44] 彭建昌, 苏建仓, 宋晓欣, 等. 40 GW重复频率脉冲驱动源研制进展[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(4): 712-7161. (Peng Jianchang, Su Jiancang, Song Xiaoxin, et al. Progress on a 40 GW repetitive pulsed acclerator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(4): 712-7161)
- [45] 石磊, 樊亚军, 周金山, 等. 2×5 GW级双路输出脉冲驱动源Tesla变压器研制[J]. *现代应用物理*, 2013, 4(1): 24-28. (Shi Lei, Fan Yajun, Zhou Jinshan, et al. Development of a Tesla transformer for a 2×5 GW level dual output pulse generator[J]. *Modern Applied Physics*, 2013, 4(1): 24-28)
- [46] 张喜波, 苏建仓, 李锐, 等. 8 GW Tesla-PFN型脉冲功率源[C]//第三届全国脉冲功率会议论文集. 2013: A127-A133. (Zhang Xibo, Su Jiancang, Li Rui, et al. An 8 GW pulse generator of Tesla-PFN type[C]//The 3rd National Pulsed Power Conference. 2013: A127-A133)
- [47] 苏建仓, 刘国治, 丁臻捷, 等. 基于SOS的脉冲功率源技术新进展[J]. *强激光与粒子束*, 2005, 17(8): 1195-1200. (Su Jiancang, Liu Guozhi, Ding Zhenjie, et al. Experiment and applications of SOS-based pulsed power[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(8): 1195-1200)
- [48] Yang Jianhua, Zhang Zicheng, Yang Hanwu, et al. Compact intense electron beam accelerators based on high energy density liquid pulse forming lines[J]. *Mater and Radiation at Extremes*, 2018, 3(6): 278-292.
- [49] Hegeler F, McGeoch M, Sethian J, et al. A durable gigawatt class solid state pulsed power system[J]. *IEEE Trans Dielectrics and Electrical Insulation*, 2011, 18(4): 1205-1213.
- [50] 宋法伦, 金晓, 李飞, 等. 20 GW紧凑Marx型重复频率脉冲驱动源研制进展[J]. *强激光与粒子束*, 2017, 29: 020101. (Song Falun, Jin Xiao, Li Fei, et al. Progress on 20 GW compact repetitive Marx generator development[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2017, 29: 020101)
- [51] 李志强, 杨建华, 张建德, 等. 紧凑重频PFN-Marx脉冲发生器[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28: 015013. (Li Zhiqiang, Yang Jianhua, Zhang Jiande, et al. A compact repetitive PFN-Marx generator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28: 015013)
- [52] 高景明, 李嵩, 杨汉武, 等. 基于磁开关技术的长脉冲驱动源初步研究[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26: 065003. (Gao Jingming, Li Song, Yang Hanwu, et al. Preliminary researches on high power long pulse generator based on magnetic switches[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 065003)
- [53] 王庆峰, 刘庆想, 李相强, 等. 直线变压器驱动源两单元模块实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(4): 789-792. (Wang Qingfeng, Liu Qingxiang, Li Xiangqiang, et al. Double-cell experimental study of linear transformer drivers[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(4): 789-792)
- [54] 李洪涛, 王传伟, 王凌云, 等. 500 kV全固态Marx发生器[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(4): 917-920. (Li Hongtao, Wang Chuanwei, Wang Lingyun, et al. 500 kV all-solid-state Marx generator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(4): 917-920)
- [55] 向飞, 谭杰, 罗敏, 等. 多模块快直线变压器高功率脉冲源的研究[J]. *物理学报*, 2011, 60: 064102. (Xiang Fei, Tan Jie, Luo Min, et al. Fast linear transformer high power pulse generator[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60: 064102)
- [56] Schilling H, Schüter J, Peters M, et al. High voltage generator with fast risetime for EMP simulation[C]//IEEE 10th International Pulse Power Conference. 1995: 1359-1364.
- [57] Gilman C, Lam S K, Naff J T, et al. Design and performance of the FEMP-2000: A fast risetime, 2 MV EMP pulser[C]//IEEE 12th International Pulse Power Conference. 1999: 1437-1440.
- [58] Giles J C, Prather W D. Worldwide high-altitude nuclear electromagnetic pulse simulators[J]. *IEEE Trans Electromagnetic Compatibility*, 2013, 55(3): 475-483.
- [59] 孙蓓云, 周晏, 郑振兴, 等. 有界波EMP模拟器脉冲高压源[J]. *强激光与粒子束*, 2000, 12(8): 505-508. (Sun Beiyun, Zhou Yan, Zheng Zhenxing, et al. The development of high voltage pulse generator for bounded-wave EMP simulator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, 12(8): 505-508)
- [60] 陈维青, 何小平, 贾伟, 等. 2.5 MV快沿电磁脉冲模拟器脉冲功率源的研制[C]//第十四届全国核电子学与核探测技术学术年文集. 2008: 689-693. (Chen Weiqing, He Xiaoping, Jia Wei, et al. Development of fast rising pulse source for EMP simulator[C]//The 14 National Nuclear Electronics and Nuclear probing technology. 2008: 689-693)
- [61] 罗斌强, 陈学秒, 王桂吉, 等. 电磁驱动高能量密度实验装置CQ-7研制简介[J]. *高能量密度物理*, 2015(1): 29-32. (Luo Binqiang, Chen Xuemiao, Wang Guiji, et al. Introduction of electromagnetic driving apparatus CQ-7 for high energy density experiment[J]. *High Energy Density Physics*, 2015(1): 29-32)
- [62] 李军, 严萍, 袁伟群. 电磁轨道炮发射技术的发展与现状[J]. *高电压技术*, 2014, 40(4): 1052-1064. (Li Jun, Yan Ping, Yuan Weiqun. Electromagnetic gun technology and its development[J]. *High Voltage Engineering*, 2014, 40(4): 1052-1064)

- [63] 马伟明, 鲁军勇. 电磁发射技术[J]. 国防科技大学学报, 2016, 38(6): 1-5. (Ma Weiming, Lu Junyong. Electromagnetic launch technology[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2016, 38(6): 1-5)
- [64] 胡荣芳, 张玲玲. 电磁发射技术发展探讨[J]. 水面兵器, 2018, 27(3): 10-13. (Hu Rongfang, Zhang Lingling. Electromagnetic launching technology[J]. *Surface Weapons*, 2018, 27(3): 10-13)
- [65] 孙连华, 孙麟鸿, 严萍. 重复推进系统中脉冲功率源研制及应用[J]. 电工电能新技术, 2010, 29(4): 76-80. (Sun Lianhua, Sun Yaohong, Yan Ping. Development and applications of pulsed power supply in multi-shot electromagnetic launch[J]. *Adv Technol Electr Eng Energ*, 2010, 29(4): 76-80)
- [66] 郑宇锋, 鲁军勇, 江汉红. 基于分布式馈电的电磁发射系统效能分析[J]. 海军工程大学学报, 2015, 27(5): 9-15. (Zheng Yufeng, Lu Junyong, Jiang Hanhong. System efficiency analysis of electromagnetic launching system in distributed-current-feed mode[J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2015, 27(5): 9-15)
- [67] 林福昌, 李劲, 姚宗干. 电磁发射兵器用电容器的选取[J]. 兵工学报, 2016, 38(6): 1-5. (Lin Fuchang, Li Jin, Yao Zonggan. Choice of capacitors used in electromagnetic launcher[J]. *Acta Armamentarii*, 2016, 38(6): 1-5)
- [68] 张亚舟, 李贞晓, 金涌, 等. 电磁发射用13 MJ脉冲功率电源系统研究[J]. 兵工学报, 2016, 37(5): 416-418. (Zhang Yazhou, Li Zhenxiao, Jin Yong, et al. Research and development on a 13 MJ pulsed power supply for electromagnetic launcher[J]. *Acta Armamentarii*, 2016, 37(5): 416-418)
- [69] 张亚舟, 李贞晓, 田慧, 等. 基于反向开关晶闸管的脉冲电源在电磁发射中的应用[J]. 兵工学报, 2017, 38(4): 658-663. (Zhang Yazhou, Li Zhenxiao, Tian Hui, et al. Application of pulsed power supply with RSD switch in electromagnetic launch[J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 38(4): 658-663)
- [70] 张适昌, 严萍, 王珏. 民用脉冲功率源的进展与展望[J]. 高电压技术, 2009, 35(3): 618-631. (Zhang Shichang, Yan Ping, Wang Jue. Development situation and trends of pulsed power sources for civil applications[J]. *High Voltage Engineering*, 2009, 35(3): 618-631)
- [71] Ebert U. The stages of a pulsed gas discharge[C]//The 19th Asian Conference on Electrical Discharge. 2019.
- [72] Komurasaki K. Thirty years development of Hall thruster in Japan[C]//The 19th Asian Conference on Electrical Discharge. 2019.
- [73] Gennady R. Electrodischarge technologies and pulsed sources of high-intensity charged-particle beams and dense plasma[C]//The 19th Asian Conference on Electrical Discharge. 2019.
- [74] Redondo L M S. Pulsed power technology, application and dissemination[R]. Workshop at Xi'an Jiaotong University, 2019.
- [75] 李德明. 国产首台质子治疗装置研制进展及上海应物所电源系统介绍[C]//第七届全国特种电源学术交流会. 2018. (Li Deming. Development of the first proton therapy device made in China and introduction of the power supply system of Shanghai Institute of Applied Physics[C]//The 7th National Symposium on special power supply. 2018)
- [76] 张小宁. 单极性双极性纳秒脉冲电源及其应用[C]//全国高电压与放电等离子体学术交流会. 2018. (Zhang Xiaoning. Monopolar bipolar nanosecond pulse power supply and its application[C]//National Symposium on High Voltage and Discharge Plasma. 2018)
- [77] 史平君. 几种特殊领域应用的高压电源及脉冲电源[J]. 电力电子技术, 2014, 48(12): 18-20. (Shi Pingjun. High-voltage power supplies and pulse power supplies for special applications[J]. *Power Electronics*, 2014, 48(12): 18-20)
- [78] 刘克富, 罗彦, 邱剑. 一种基于固态开关的高重复频率脉冲功率源[C]//第十一届高功率粒子束学术交流会文集. 2008: 63-66. (Liu Kefu, Luo Yan, Qiu Jian. A high repetition rate pulse power source based on solid state switch[C]//Proceedings of the 11th High Power Particle Beam Symposium. 2008: 63-66)
- [79] Mei Danhua. Plasma catalysis—A promising tool for energy conversion[C]//The 19th Asian Conference on Electrical Discharge. 2019.
- [80] 毛志国, 邹晓兵, 王新新, 等. 电爆金属丝产生纳米粉体[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(3): 691-695. (Mao Zhiguo, Zou Xiaobing, Wang Xinxin, et al. Nano-power production by electrical explosion of wires[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(3): 691-695)
- [81] 闫克平, 李树然, 郑钦臻, 等. 电除尘技术发展与应用[J]. 高电压技术, 2017, 43(2): 476-486. (Yan Keping, Li Shuran, Zheng Qinzen, et al. Development and application of electrostatic precipitation technology[J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(2): 476-486)
- [82] 严辉, 黄逸凡, 裴彦良, 等. 等离子体震源及在海洋勘探中的应用[J]. 高电压技术, 2012, 38(7): 1711-1718. (Yan Hui, Huang Yifan, Pei Yanliang, et al. Plasma seismic source and its application in oceanic seismic exploration[J]. *High Voltage Engineering*, 2012, 38(7): 1711-1718)
- [83] 马晋辉, 王荣华, 闫克平. 燃煤电厂电除尘器的节能和提效[J]. 电力环境保护, 2008, 24(6): 33-35. (Ma Jinhui, Wang Ronghua, Yan Keping. Energy-saving measures of electrostatic precipitator in coal-fired power plants[J]. *Electric Power Environmental Protection*, 2008, 24(6): 33-35)
- [84] 闫克平. 脉冲功率技术及工业应用[C]//第六届全国脉冲功率学术交流会. 2019. (Yan Keping. Pulsed power technology and industry application[C]//The 6th Pulsed Power Conference. 2019)
- [85] 李亮. 我国多时空脉冲强磁场成形制造基础研究进展[J]. 中国基础科学, 2016, 18(4): 25-35. (Li Liang. Progress of the basic research on the space-time-controlled multi-stage pulsed magnetic field forming and manufacturing technology[J]. *China Basic Science*, 2016, 18(4): 25-35)
- [86] 赵剑衡, 朱礼国, 周平伟, 等. 重要病原体的现场快速多模态谱学识别与新型杀灭技术[J]. 科技成果管理与研究, 2019(1): 74-78. (Zhao Jianheng, Zhu Ligu, Zhou Pingwei, et al. Identification of important pathogens by on-site fast multimodal spectroscopy and new killing technology[J]. *Management and Research on Scientific & Technological Achievements*, 2019(1): 74-78)
- [87] 姚陈果. 新型复合脉冲不可逆电穿孔治疗肿瘤关键技术及临床应用研究进展[J]. 高电压技术, 2018, 44(1): 248-263. (Yao Chenguo. Key technology and progress of novel composite pulse irreversible electroporation for tumor treatment with its clinical application[J]. *High Voltage Engineering*, 2018, 44(1): 248-263)
- [88] 薛创, 丁宁, 孙顺凯, 等. 脉冲功率驱动器与Z箍缩负载耦合的全电路数值模拟[J]. 物理学报, 2014, 63: 064102. (Xue Chuang, Ding Ning, Sun Shunkai, et al. Whole circuit numerical simulation of pulsed power driver and Z pinch load[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63: 064102)
- [89] 李永东, 闫杨娇, 林舒, 等. 微波器件微放电阈值计算的快速单粒子蒙特卡罗方法[J]. 物理学报, 2014, 63: 047902. (Li Yongdong, Yan Yangjiao, Lin Shu,

- et al. A fast single particle Monte-Carlo method of computing the breakdown threshold of multipactor in microwave device[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63: 047902)
- [90] 陈再高, 王建国, 张殿辉, 等. 3维并行全电磁粒子模拟软件UNIPIC-3D[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(9): 2103-2110. (Chen Zaigao, Wang Jianguo, Zhang Dianhui, et al. Three-dimensional parallelized fully-electromagnetic particle simulation code UNIPIC-3D[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(9): 2103-2110)
- [91] 杨长鸿, 蒙林, 张开志, 等. 直线感应加速器中聚束磁场的数值计算方法[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(6): 1103-1110. (Yang Changhong, Meng Lin, Zhang Kaizhi, et al. Numerical calculation method of focus magnetic field in LIA[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(6): 1103-1110)
- [92] Shao Tao. Pulsed discharge plasma for energy applications at atmospheric pressure[C]//The 19th Asian Conference on Electrical Discharge. 2019.
- [93] Rose D V, Waisman E M, Hutsel B T, et al. Understanding current loss in the Z machine double post-hole convolute[C]//The 6th Euro-Asian Pulsed Power Conference. 2016: 159.
- [94] 毛超, 刘忠, 邱志明, 等. 爆磁压缩电磁脉冲弹引战配合分析[J]. *弹道学报*, 2012, 24(2): 58-61. (Mao Chao, Liu Zhong, Qiu Zhiming, et al. Analysis on coordination system of fuse and warhead of electromagnetic pulse bomb with cascaded flux compression[J]. *Journal of Ballistics*, 2012, 24(2): 58-61)
- [95] 龚兴根, 孙奇志, 刘正芬, 等. 爆磁压缩技术综述[J]. *爆轰波与冲击波*, 2003(3): 130-137. (Gong Xinggen, Sun Qizhi, Liu Zhengfen, et al. Overview of explosive magnetic compression technology[J]. *Detonation and Shock Waves*, 2003(3): 130-137)
- [96] 杜枢, 孙奇志, 刘伟, 等. 圆盘型爆磁压缩发生器的数值模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28: 085001. (Du Shu, Sun Qizhi, Liu Wei. Numerical simulation of disk explosive magnetic generator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28: 085001)
- [97] 杨汉武. 爆磁压缩发生器及功率调制研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2002. (Yang Hanwu. Study on flux compression generator and pulse power conditioning system[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2002)
- [98] Zimenkov A A, Duday P V, Evguenyi, et al. Formation of current pulses with the amplitude to 10 MA and rise time ~100 ns in experiments with EMG[C]//The 6th Euro-Asian Pulsed Power Conference. 2016: 264.
- [99] Duday P V, Kalinychev A E, Bazanov A A, et al. Plasma focus neutron source powered by explosive magnetic generator[C]//The 6th Euro-Asian Pulsed Power Conference. 2016: 277.
- [100] Xiao Renzhen, Chen Changhua, Sun Jun, et al. A high-power high-efficiency klystronlike relativistic backward wave oscillator with a dual-cavity[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 38(10): 2730-2733.
- [101] 常超. 高功率微波等离子体放电研究进展[J]. *科学通报*, 2018, 14: 357-404. (Chao Chang. Research development of high power microwave plasma discharge[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 14: 357-404)
- [102] Zhang Jun, Zhang Dian, Fan Yuwei, et al. Progress in narrowband high-power microwave sources[J]. *Physics of Plasma*, 2020, 27: 010501.
- [103] 袁建强, 李洪涛, 刘宏伟, 等. 大功率光导开关研究[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(4): 791-795. (Yuan Jianqiang, Li Hongtao, Liu Hongwei, et al. Study on high-power photoconductive semiconductor switches[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(4): 791-795)
- [104] 王卫, 邓建军, 夏连胜, 等. 基于大功率激光二极管的光导开关导通特性[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26: 045102. (Wang Wei, Deng Jianjun, Xia Liansheng, et al. Conduction characteristics of photoconductive semiconductor switches based on high power laser diodes[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 045102)
- [105] Hu Long, Su Jiancang, Qiu Ruicheng, et al. Ultra-wideband microwave generation using a low-energy-triggered bulk gallium arsenide avalanche semiconductor switch with ultrafast switching[J]. *IEEE Trans Electron Devices*, 2018, 65(4): 1308-1313.
- [106] 肖龙飞, 徐现刚. 宽禁带碳化硅单晶衬底及器件研究进展[J]. *强激光与粒子束*, 2019, 28(4): 18-23. (Xiao Longfei, Xu Xiangang. Recent development of wide bandgap semiconductor SiC substrates and device[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 28(4): 18-23)
- [107] 王淦平, 李飞, 金晓, 等. 快速关断半导体开关工作特性及实验研究[C]//第六届全国脉冲功率会议. 2019: 435-443. (Wang Ganping, Li Fei, Jin Xiao, et al. Study of ultrafast semiconductor opening switch[C]//The 6th Chinese Pulsed Power Conference. 2019: 435-443)
- [108] Jiang Weihua. Solid-state LTD module using power MOSFETs[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 2018, 38(10): 2730-2733.
- [109] 荀涛, 杨汉武, 张军, 等. 高性能强流脉冲电子束源关键技术[C]//第六届全国脉冲功率会议. 2019: 363-371. (Xun Tao, Yang Hanwu, Zhang Jun, et al. Development of high performance, high-current pulsed electron beam sources[C]//The 6th Chinese Pulsed Power Conference. 2019: 363-371)
- [110] 周亮, 王文川, 周林, 等. 透射式X光管研制[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 025019. (Zhou Liang, Wang Wenchuan, Zhou Lin, et al. Development of transmission target X-ray tube[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 025019)
- [111] 卫兵, 卿燕玲, 傅贞, 等. 脉冲高电压测量的不确定度分析[J]. *强激光与粒子束*, 2009, 21(10): 1561-1565. (Wei Bing, Qing Yanling, Fu Zhen, et al. Uncertainty in amplitude measurement of high voltage pulse[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(10): 1561-1565)
- [112] 章林文, 夏连胜, 谌怡. 介质壁加速器关键技术[J]. *高电压技术*, 2015, 41(6): 1769-1775. (Zhang Linwen, Xia Liansheng, Shen Yi. Technologies of dielectric wall accelerator[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(6): 1769-1775)
- [113] 陈怀璧. 低能电子直线加速器应用[C]//第三届中国粒子加速器会议. 2018. (Chen Huaibi. Application of low energy electron beam accelerators[C]//The 3rd Chinese Particle Beam Accelerator Conference. 2018)