

基于超级电容器的充放电电路系统研制及其在 EAST 限制器探针测量中的应用*

张问博¹⁾²⁾ 刘少承^{1)†} 廖亮¹⁾ 魏文崧¹⁾ 李乐天¹⁾
王亮^{1)‡} 颜宁¹⁾ 钱金平¹⁾ 臧庆¹⁾

1) (中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

2) (中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 合肥 230026)

(2023 年 10 月 25 日收到; 2023 年 12 月 6 日收到修改稿)

EAST 限制器探针安装在低场侧限制器, 在环向上共有两个阵列, 可以同时工作在悬浮电位测量、离子饱和流测量和扫描单探针模式. 当朗缪尔静电探针运行在离子饱和流测量模式时, 需要为其提供稳定的偏压. 本文采用大容量电容器为探针提供偏压, 相比于其他磁约束聚变装置上使用的 9 V 干电池组, 大容量电容器具有电压设置灵活、易于维护和环保等优点. 为此, 研发和测试了整套超级电容器的充放电控制电路. 本文还基于 Python 语言开发了超级电容器充放电控制电路的控制软件, 通过该软件可以实现对电路的远程控制和自动控制. 经实验测试, 电容器充放电控制电路可以在长脉冲放电条件下为探针输出稳定的偏压, 适用于磁约束聚变的复杂电磁环境. 通过将超级电容器充放电控制电路应用于 EAST 限制器探针诊断, 测量了 2.45 GHz 和 4.6 GHz 两种低杂波加热条件下刮削层等离子体离子饱和流、悬浮电位、电子温度和密度等特征参数的三维分布, 发现 2.45 GHz 低杂波加热时刮削层电子密度较高, 而双波协同加热时刮削层电子密度最高. 这一系列测试与物理实验充分验证了超级电容器充放电控制电路的可靠性和稳定性.

关键词: 朗缪尔探针, 超级电容器, 磁约束聚变等离子体, 托卡马克

PACS: 52.55.Fa, 28.52.-s

DOI: 10.7498/aps.73.20231697

1 引言

朗缪尔静电探针可以较为精确地测量磁约束聚变装置中边界等离子体的电子温度、电子密度^[1]、离子饱和流、悬浮电位^[2]和输运通量^[3]等参数, 具有研制费用低和测量物理量丰富的优点, 因此广泛应用于世界上各大磁约束装置, 例如国内的 HL-2A^[4], EAST^[5,6], J-TEXT^[7], 国际上的 AI-

cator C-Mod^[8], JT-60^[9], DIII-D^[10] 等.

EAST 限制器探针于 2021 年安装在低场侧 G-H 窗口间的限制器, 通过切换探针电路可以使其工作在悬浮电位测量、离子饱和流测量和扫描单探针 3 种模式, 能够观测到边界等离子体分布特征和涨落信息^[11]. 当探针工作在离子饱和流测量模式时, 需要为探针提供稳定且足够高的偏压^[12]. 目前, 一些磁约束聚变装置的静电探针系统使用多节 9 V 干电池串联成的电池组为探针提供偏压^[13].

* 国家磁约束聚变重点研发专项 (批准号: 2019YFE03040000)、国家自然科学基金 (批准号: 12275310, 12275312)、中国科学院等离子体物理研究所基金 (批准号: DSJJ-2021-01)、中国科学院合肥大科学中心协同创新基金 (批准号: 2021HSC-CIP019) 和中国科学院合肥大科学中心高端用户基金 (批准号: 2021HSC-UE014, 2021HSC-UE012) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lsch@ipp.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: lwang@ipp.ac.cn

由于测量聚变装置中等离子体湍流^[14]、边界局域模^[15]、射频鞘层^[16]等结构需要静电探针系统具有很高的采样率,以保证足够的精度分析信号中的湍流信息,这就要求电路及测量系统具有很高的信噪比^[17],从而最大程度地抑制电路噪声对等离子体信号的干扰.干电池输出电压纹波极小,使用干电池为探针提供偏压,所得测量信号具有较低信噪比.但是,干电池的电量有限,在磁约束聚变装置实验过程中需要频繁更换干电池组,影响测量效率且维护成本较高,而且干电池废弃后难以回收利用,含有汞、镉、铅、锌等重金属还可能会污染环境.如果采用普通电源为探针提供偏压,虽然可以满足 EAST 长期的实验测量需求,但是不能很好满足输出电压低噪声的需求.以本文中所示直流电源为例,最大纹波 300 mV p-p,其输出电压波动会影响我们观测高频的湍流现象.同时,使用直流电源会导致参考地不统一,我们希望所有测量都使用装置壁作为参考地.为了满足探针所测数据具有高信噪比,同时适应 EAST 长周期实验下探针电源系统稳定和易维护的需求,采用超级电容器为探针提供偏压,同时发展了整套超级电容器充放电控制电路.该电路能实现远程控制和自动化运行,使得整套电容供电系统能够工作在聚变装置的强辐射环境下.

本文的主要内容安排如下:第 2 节说明超级电容器充放电控制电路的设计思路和方案、电路中各个硬件的选型、电路自动控制的逻辑和电路控制软件各操作界面的功能.第 3 节,我们在实验室组装并测试了超级电容器充放电控制电路的各项功能,包括工作输出、电阻放电和充电模式,还一并测试了电容器的自然漏电速度,确认电路各项功能可以正常使用且符合 EAST 实验需求.第 4 节,在长脉冲放电实验中测试此电容供电系统,发现探针偏压稳定、测量所得数据可靠;最后将限制器探针应用在一次低杂波驱动电流实验中,测量到低杂波加热下刮削层等离子体三维参数特征.

2 超级电容器的充放电控制电路系统设计

2.1 电路设计方案

超级电容器是电路的核心部件,为了收集离子饱和流,电容器需要为探针输出稳定且足够高的偏

压以阻挡电子进入探针.在等离子体放电过程中,探针表面会形成等离子体鞘层.对于静态鞘层,考虑 EAST 放电常用的氢氦混合等离子体,如果外加偏压 $\phi_0 > 3(T_e/e)$,其中 T_e 为电子温度, e 为单位电荷,探针所测电流为离子饱和流^[18].EAST 限制器位于低场侧 G-H 窗口中间,一般放电情况下,限制器中平面附近边界等离子体电子温度约为 20 eV^[19],即要求偏压 ϕ_0 大于 60 V.在离子回旋波加热下,由于射频鞘的影响,等离子体电位可能被抬高上百伏^[20],因此将探针偏压加至 150 V 以上,可以保证在绝大多数放电条件下稳定收集离子饱和流.我们选用力容新能源技术有限公司生产的 SM0006-180-P 超级电容,该超级电容器模组由 60 个单体电容器串联而成,每个电容器会并联一个 120 Ω 的电阻,用来平衡电压,电容 6 F,最高输出电压 180 V,该输出电压可以满足离子饱和流测量需求.在放电过程中电容输出电压会不断衰减,对于 EAST 进行的长脉冲放电实验,还应保证电容电压衰减不会影响到离子饱和流测量.

考虑 100 s 的长脉冲放电,将电容器初始电压设定为 $V_0 = 170$ V,假设超级电容器的放电电流为 1 A.每次等离子体放电所消耗的电量为

$$Q = 1 \text{ A} \times 100 \text{ S} = 100 \text{ C}. \quad (1a)$$

对应的电压降为

$$\Delta V_1 = \frac{Q}{C} = \frac{100 \text{ C}}{6 \text{ F}} = 16.7 \text{ V}. \quad (1b)$$

平衡电阻产生的漏电流所造成的电压降:

$$\Delta V_2 = V_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) = 170 \text{ V} \left(1 - e^{-\frac{t}{12 \text{ h}}}\right), \quad (1c)$$

其中 $R = 7200 \Omega$ 为总平衡电阻, $C = 6 \text{ F}$ 为电容,则总的电压降为

$$\Delta V = \Delta V_1 + \Delta V_2 = 16.7 \text{ V} + 0.4 \text{ V} = 17.1 \text{ V}. \quad (1d)$$

100 s 放电结束后电容电压为 152.9 V,仍高于要求的 150 V 输出偏压.因此,理论上该型号电容器能够在长脉冲放电条件下为探针输出稳定且足够高的偏压.对于连续放电的情况,由于每次放电间隔通常在 5 min 以上,只要电源功率足够高就能在下次放电前将电容充满电,不会造成电容器输出电压衰减.综上所述,我们选用的电容器理论上能在连续放电或长脉冲放电条件下为限制器探针提供稳定可靠的偏压.

根据实验需求设计了整套超级电容器充放电

控制电路: EAST 实验期间, 常规单次放电时长 10 s, 两次放电时间间隔约 5 min. 实验开始之前, 电容器需要充电升压; 在装置放电过程中, 电容器需要为探针输出稳定的偏压以满足离子饱和流测量需求; 为了保证下一次放电时电容器能为探针正常输出偏压, 放电间隔时电路应进入充电状态, 直流电源为电容器充电恢复电压; 当需要降低电容输出电压时, 可通过电阻放电实现. 同时, 还希望对电路实行远程控制和自动控制, 即不同工作模式之间的切换可以在远程计算机上完成, 并且电路可以根据放电信号自动切换工作模式. 为了使超级电容充放电控制电路实现上述功能, 其电路设计如图 1 超级电容器充放电控制电路所示.

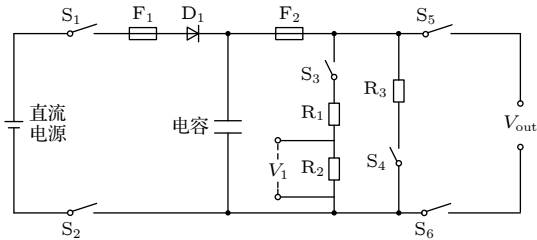


图 1 超级电容器充放电控制电路设计图
Fig. 1. Supercapacitor charge-discharge control circuitry.

通过控制继电器开关, 电路能够实现上述 4 种功能, 包括电容充电、工作输出、电阻放电和关断模式, 电路 4 种功能的实现方式具体如下.

充电模式: 闭合 S_1, S_2, S_3 , 断开 S_4, S_5, S_6 ; 直流电源和电容器串联. 此时可以设置直流电源输出电压, 超级电容器电压将逐渐提升至设定值.

工作输出: 闭合 S_5, S_6 , 断开 S_1, S_2, S_3, S_4 ; 此时 V_{out} 输出至探针, 同时断开充电、测量和放电电路, 这是为了保证电容输出电压不受其他部件影响, 不干扰探针的测量地.

电容放电: 闭合 S_3, S_4 , 断开 S_1, S_2, S_5, S_6 ; 此时电容器和大功率散热电阻 R_3 串联, 通过释放电容器的电量降低电容输出电压.

关断模式: 所有继电器开关断开, 切断直流电源和电容器的输出.

各个电路模式对应的继电器开关状态组合, 见表 1 超级电容器充放电电路 4 种模式下继电器开关的状态组合.

2.2 硬件设计方案

除了电容器以外, 超级电容器充放电控制电路中硬件还包括直流电源、继电器开关、电阻、二极管、保险丝、智能控制器等, 组装完成后才能最终实现电路的充电、放电、测量、电路保护、远程和自动控制等功能, 以下分别介绍电路中的主要硬件选型.

1) 直流电源

直流充电电源采用 ITECH 可编程宽量程直流电源, 最大输出电压/电流/功率分别为 300 V/6 A/850 W, 输出电压纹波 ≤ 300 mV p-p, 充电功率足够高, 可以在下一次放电前将电容电压充至设定值. 电源采用 SCPI 通信协议, 将电源和计算机设置在同一 IP 地址, 就可以通过在计算机上输入命令远程控制电源. 电源共有 9 台, 每一台可以同时为 4 台电容器充电.

2) 继电器开关

电路运行时依靠控制开关使电路工作在不同状态, 开关应当能被远程控制, 同时保证电路的安全, 防止出现短路、漏电等现象. 综上考虑, 电路中的开关选用高压直流继电器, 均为常开开关, 由专用芯片 NUD3112D 驱动. 这种继电器共 6 个 (图 1 中 S_1-S_6) 可以在高压条件下工作, 未收到控制指令情况下均处于断开状态, 以保证电路的运行安全.

3) 电阻

为了测量电容器电压, 与超级电容器串联两个电阻 R_1, R_2 , 再和继电器开关 S_3 串联, 通过测量取样电阻 R_2 两端的电压差, 即可获得电容器的电压

表 1 超级电容器充放电电路 4 种模式下继电器开关的状态组合

Table 1. State combinations of relay switches in four modes of supercapacitor charging and discharging circuits.

电路模式	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
充电	闭合	闭合	闭合	断开	断开	断开
工作输出	断开	断开	断开	断开	闭合	闭合
电容放电	断开	断开	闭合	闭合	断开	断开
关断	断开	断开	断开	断开	断开	断开

V_1 , R_3 为大功率发热电阻, 与超级电容器串联, 再和继电器开关 S_4 串联. 需要降低电容电压时, 闭合 S_3, S_4 , 电路切换至电阻放电模式.

4) 保护装置

聚变装置放电过程中, 探针表面可能会产生高压^[21], 为防止直流电源遭到外部高压信号损害, 在电路中安装二极管 (图 1 中 D_1), 能够承受较高的反向电压而不被击穿, 同时可以防止电容器电压高于直流电源输出电压时, 不会形成倒灌电流从而保护直流电源. 另外还在电路中安装玻璃保险丝 (图 1 中 F_1, F_2), 分别在电容器充电和放电情况下保护电路元件和线缆.

5) 智能控制器

为了实现电容充放电路的远程控制, 我们还需要智能控制器, 其功能包括反馈电路信息、控制电路中硬件、接受并执行计算机发出的指令等. 智能控制器采用模块化设计, 在一个机箱内有通讯模块、电源模块, 以及 6 个控制模块, 每一个控制模块可以控制 4 路电容器. 通讯模块将以太网传输的信号转换为 RS485 信号, 并与各个控制模块通讯. 电源模块将 220 V 交流电转换为 12 V 直流电, 供其他模块使用.

2.3 自动控制逻辑及控制软件

控制电路的运行方式有手动和自动两种, 进行手动控制时, 需要在计算机下达进入所需电路工作模式的指令, 该指令通过以太网传输给控制器, 再由控制器发送命令给各继电器, 最终通过继电器开关完成电路工作模式的切换. 当切换到自动控制模式后, 控制电路会根据 EAST 总控系统给出的放电信息自动控制 and 切换电路模式, 同时自动测量并记录数据. EAST 在每次放电前会发出炮号、放电时长、TTL 电平触发信号等信息, 计算机接收这些信息并传输给控制器, 再由控制器改变继电器开关的状态, 使电容器充放电控制电路工作在相应的模式. 超级电容器充放电电路的自动控制模式的控制流程见图 2.

电路的自动控制逻辑如下: 在 EAST 实验开始前, 先打开直流电源, 并设置好输出电压, 再进入自动控制模式, 此时控制电路会进入等待状态. 智能控制器发出指令, 继电器开关 S_1, S_2, S_3 闭合, 其余开关保持断开, 电路进入充电模式, 电源将电容器电压充至给定值. EAST 总控会在每次放电开

始前发送炮号和放电时长 t_L 等信息, 除此之外, 还会通过 TTL 电平信号的方式发送触发信号, 作为放电开始的标志. 智能控制系统会循环监控上述信号, 若先接收到炮号和放电时长 t_L 信息, 智能控制系统将闭合开关 S_5, S_6 , 并断开其余开关, 电路进入工作输出模式并开始计时 t_1 , 同时控制系统继续等待触发 TTL 电平信号. 若在给定时间 t_{set} 内接收到触发信号, 说明放电即将开始, 则开始计时至 t_2 时间内继续保持工作输出模式 (一般 $t_2 \geq t_L$). 接收到炮号和放电时长信息后, 若在给定时间 t_{set} 内未接收到触发信号 (即 $t_1 > t_{set}$), 则计时 t_3 时间后电路将进入关断状态 (一般 $t_3 \geq t_L$). 若先接收到触发信号, 控制器会控制电路直接进入工作输出模式, 保持工作输出模式 t_4 时间后关断 (t_4 为 EAST 常规放电时长). 最后控制电路切换回到充电模式, 开始等待下一次放电. 在自动方式下, 可随时终止程序, 并进入关断模式.

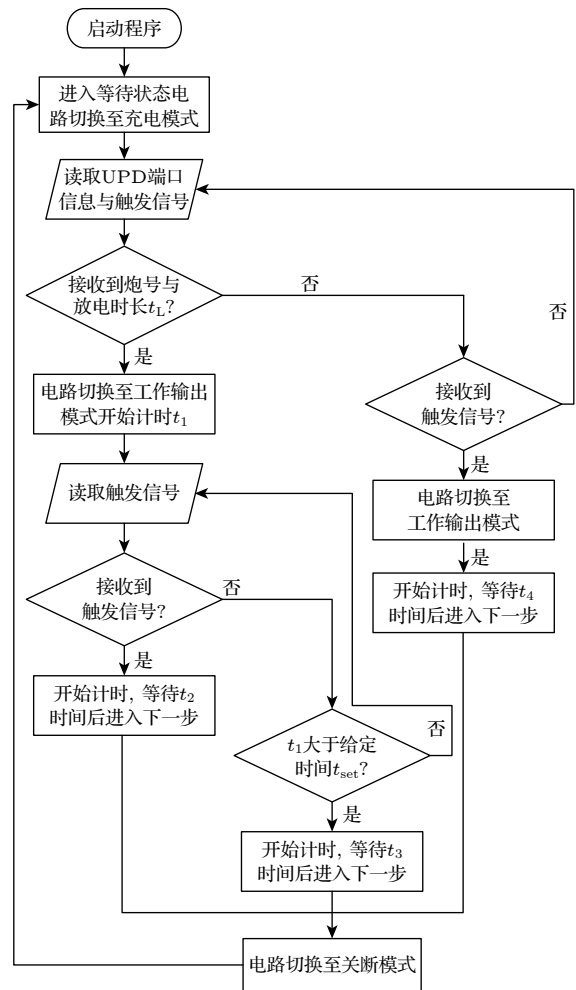


图 2 电容充放电控制电路的自动控制流程图
Fig. 2. Flow diagram of the automatic control mode.

超级电容器控制电路的控制程序是基于 Python 语言开发的, 可实现控制电路的远程和自动控制, 同时更直观地监测控制器回传的电路信息. 此外, 控制软件还具有运行日志记录功能, 将每次运行的状态信息进行记录并予以保存, 供实验后进行查看. 控制程序有 4 个不同的操作界面, 如图 3 电容充放电控制软件的设置界面, 可以设置电路中各模块的 IP 地址和 UDP 通讯端口等信息. 计算机有两张网卡, 其中一张和电源、控制器模块设置处于同一局域网, 各模块之间通过以太网传输信息. 另一张网卡和 EAST 内部通讯网络连接, 用于接收炮号和放电时长信息.

图 4 运行界面上排列着 40 个通道的信息, 可以显示各个电容器的电压, 每个通道的状态用灰色、黄色、蓝色、橙色和红色, 分别代表受控开路、充电模式、查看电量、电阻放电和电容输出模式. 并且可以勾选部分或者全部电容器通道, 进行相应的控制.

如图 5 电容充放电控制软件的电源设置界面上排列着 10 台直流电源的信息, 可以设置各个电源的输出电压和电流, 以及电源的连接和输出状态. 同样可以勾选部分或者全部通道, 进行相应的控制.



图 3 电容充放电控制软件的设置界面

Fig. 3. Setting interface of the capacitor charge-discharge control software.



图 4 电容充放电控制软件的操作界面

Fig. 4. Operating interface of capacitor charge-discharge control software.



图 5 电容充放电控制软件的电源设置界面

Fig. 5. Power supply setting interface of capacitor charge-discharge control software.

3 电容器充放电控制电路测试

超级电容器控制电路加工完成后将安装到 EAST 实验大厅预留的机柜中, 包括 9 台直流电源模组、35 台电容器模组和 2 台智能控制器模组, 组装完成的部分电路如图 6 所示. 安装完成后, 对控制电路系统进行电容充电、工作输出、电阻放电等



图 6 组装完成的超级电容器控制电路实物图

Fig. 6. Photo of the assembled supercapacitor control circuit.

功能的测试.

3.1 电容充电测试

在控制程序电源界面将 9 台直流电源全部打开, 在运行界面点击测量电压, 电路切换至测量状态, 如图 7 所示, 35 台电容器的当前电压约为零. 在电源界面将输出电压设置为 170 V, 在运行界面点击充电模式, 直流电源开始为电容器充电, 最终测得全部 35 台电容器充电曲线如图 8 所示. 对于通道 1—32, 使用一台直流电源同时为 4 台电容器充电, 对于通道 33—35, 使用 1 台直流电源为 3 台电容器充电, 因此 CH33—35 的电容器充电速率会更快. 从图 8 可以看出, 各电容器充电曲线基本吻合, 证明了充电电路及电容器性能的稳定性. 电容器电压从零充至 167 V 左右, 耗时约 16 min. 为保护超级电容器, 当电容电压超过 140 V 后主动降低电源的输出功率, 从 140 V 充至 167 V 耗时 4 min, 该时间小于 EAST 一般放电间隔 5 min, 因此可以保证连续放电实验条件下, 电容器输出电压在下次放电时能达到设定值.

3.2 电阻放电测试

如图 9 所示, 在运行界面点击下方橙色按钮, 电路切换至电阻放电模式, 此时大功率散热电阻和电容器串联. 电容电压从 167 V 降低至 140 V 耗时 4 分 50 秒, 这证明控制电路能够通过电阻放电快速调整电容器电压.



图 7 电容器的初始电压

Fig. 7. Initial voltage of the capacitors.

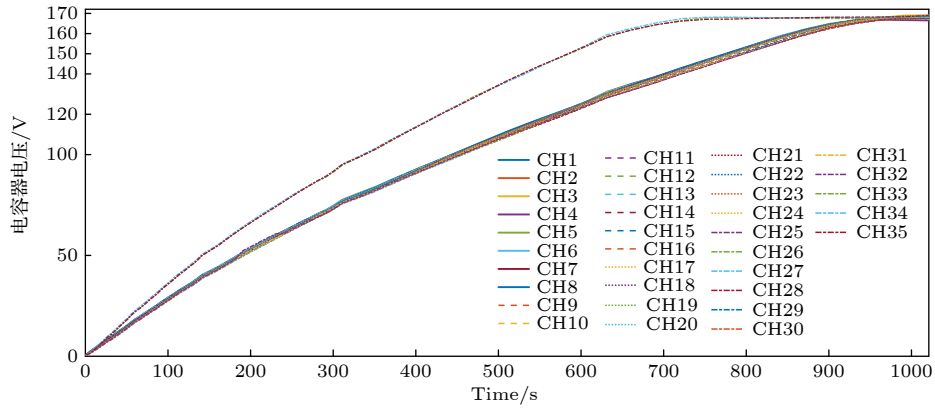


图 8 电容器充电曲线, 其中通道 1—32, 使用 1 台直流电源同时为 4 台电容器充电; 通道 33—35, 使用 1 台直流电源为 3 台电容器充电
Fig. 8. Charge curve of capacitor. Note that one power supply is used to charge four capacitors for channel 1—32, and one power supply is used to charge three capacitors for channel 33—35.



图 9 电阻放电的界面

Fig. 9. Interface of resistance discharge.

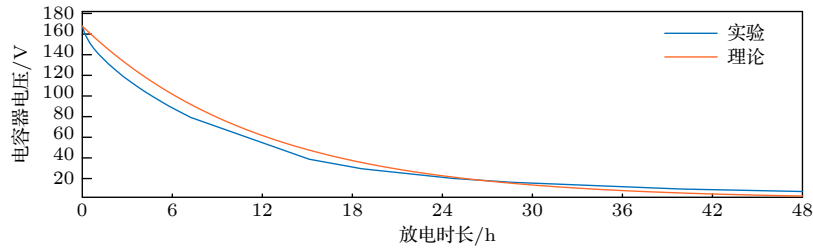


图 10 电容自然漏电曲线图

Fig. 10. Natural leakage curve of capacitor.

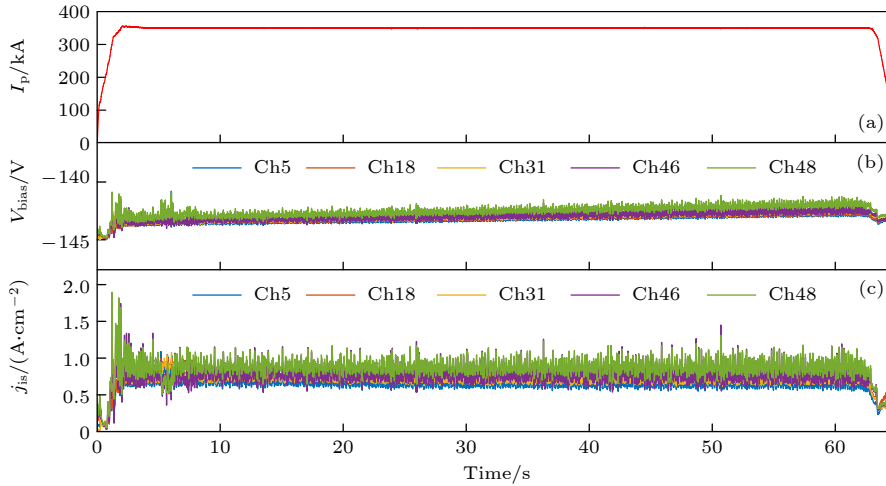


图 11 EAST 长脉冲放电过程中 (a) 等离子体电流、探针 (b) 偏压和 (c) 离子饱和流随时间演化

Fig. 11. Temporal evolution of (a) plasma current, (b) biasing voltage and (c) ion saturation current of limiter probe during a long-pulse discharge on EAST.

3.3 电容漏电测试

在控制界面点击电压测量, 使电路再次切换到电压监测模式, 由于平衡电阻的存在会产生漏电流, 电容器电压将持续下降. 实际测量得到电容电压下降随时间的变化曲线及理论计算结果如图 10 电容自然漏电曲线所示. 实际电压从 167 V 降低至 150 V 经过了半小时, 虽然比理论计算稍快但仍然远大于放电时长, 漏电导致的电压衰减不会影响限制器探针的测量需求.

4 电容充放电控制电路在 EAST 物理实验中应用

4.1 电容输出电压稳定性测试

在一次 EAST 的长脉冲放电过程中, 等离子体电流 $I_p = 350$ kA, 如图 11(a) 所示, 此外低杂波加热功率 1.6 MW, 电子回旋波加热功率 1 MW. 如图 11(b), (c) 所示, 放电过程中超级电容器的输出电压基本保持恒定, 限制器探针测量得到的离子饱和流正常. 放电结束后电容器输出电压仅下降

2 V, 符合探针测量离子饱和流的测量需求.

4.2 限制器探针在 EAST 物理实验中的应用

限制器探针在限制器极向上分布着 52 根探针, 环向上共有两列, 通过切换电路可以使探针工作在悬浮电位、离子饱和流和扫描单探针三种模式下, 其中探针的离子饱和流测量电路如图 12 所示. 通过取样电阻 R_3 两端的测量电压 V_{is} , 可计算得到离子饱和流:

$$I_{i,s} = V_{is}/R_3. \quad (2)$$

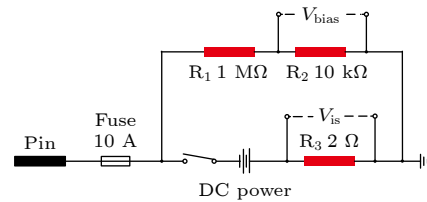


图 12 限制器探针的离子饱和流测量电路

Fig. 12. Electrical circuit for ion saturation current measurement of limiter probe.

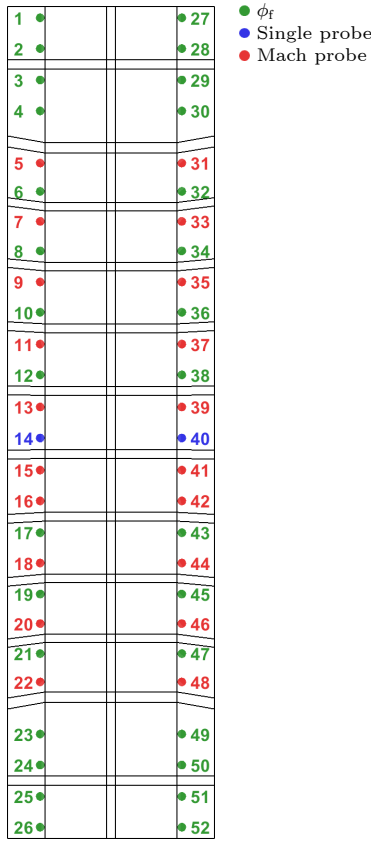


图 13 #106532 次放电的限制器探针工作状态分布图

Fig. 13. Circuit setup of limiter probe array for discharge #106532.

利用限制器探针可以测量边界等离子体悬浮电位、离子饱和流、电子密度和温度等参数的三维空间分布。在一次低杂波电流驱动的物理实验中，限制器探针同时工作在上述 3 种模式下，测量边界等离子体各参数的三维空间分布，探针运行状态如图 13 所示。在 #106532 次放电中，等离子体电流 $I_p = 320$ kA，在 5 s 之前为 2.45 GHz 低杂波单独加热，7 s 之后为 4.6 GHz 低杂波单独加热，5—7 s 之间为两种频率的低杂波协同加热，如图 14(a) 所示。离子饱和流和悬浮电位信号呈现出明显的脉冲形式，这是由于超声分子束注入 (SMBI) 引起了刮削层参数的扰动。从图 14(b), (c) 可观察到，离子饱和流在 2.45 GHz 低杂波加热时升高较 4.6 GHz 低杂波加热时更为明显，而最大的离子饱和流出现在两种低杂波协同加热时。对比图 14(b), (c) 同时刻所测数据可知，限制器右侧的离子饱和流显著高于左侧。

当探针工作在扫描单探针模式时，在探针上施加 $-200—30$ V 的高频扫描偏压，从而获得探针电流和扫描电压曲线。将散点按 (3) 式用非线性最小二乘法拟合后得到单探针的 $I-V$ 扫描曲线，经过计算得到电子密度和电子温度等参数：

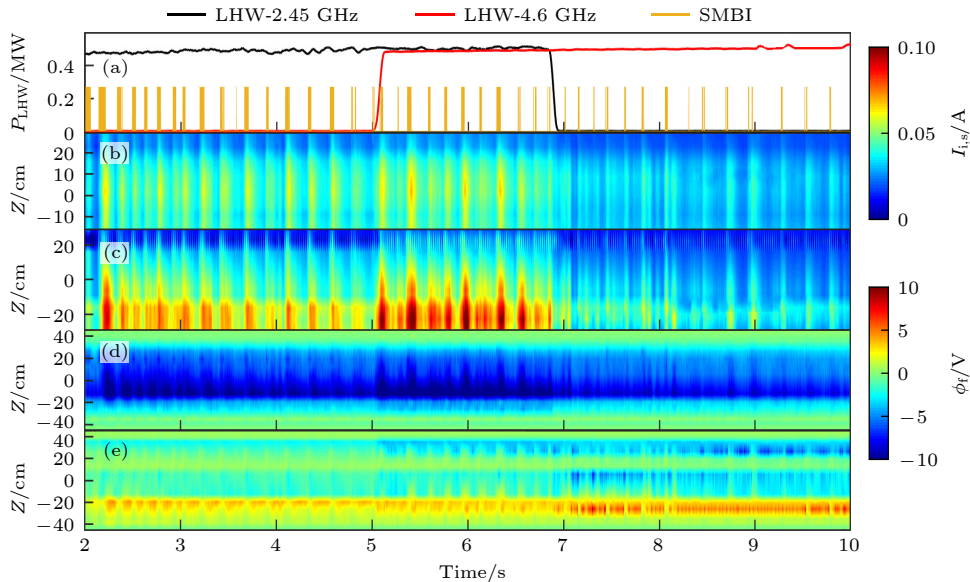


图 14 #106532 次放电低杂波注入功率与限制器探针测量参数随时间演化 (a) 2.45 GHz (黑色) 与 4.6 GHz (红色) 低杂波注入功率，超声分子束注入信号 (橘黄色); (b) 限制器探针左侧离子饱和流分布; (c) 右侧离子饱和流分布; (d) 左侧悬浮电位分布; (e) 右侧悬浮电位分布

Fig. 14. Temporal evolutions of LHW power and SOL parameters measured by limiter probe are presented as follows: (a) LHW heating power of 2.45 GHz antenna (black) and 4.6 GHz antenna (red), along with the SMBI signal (orange); (b) distribution of ion saturation current of the limiter probe on the left side; (c) distribution of ion saturation current on the right side; (d) distribution of floating potential on the left side; (e) distribution of floating potential on the right side.

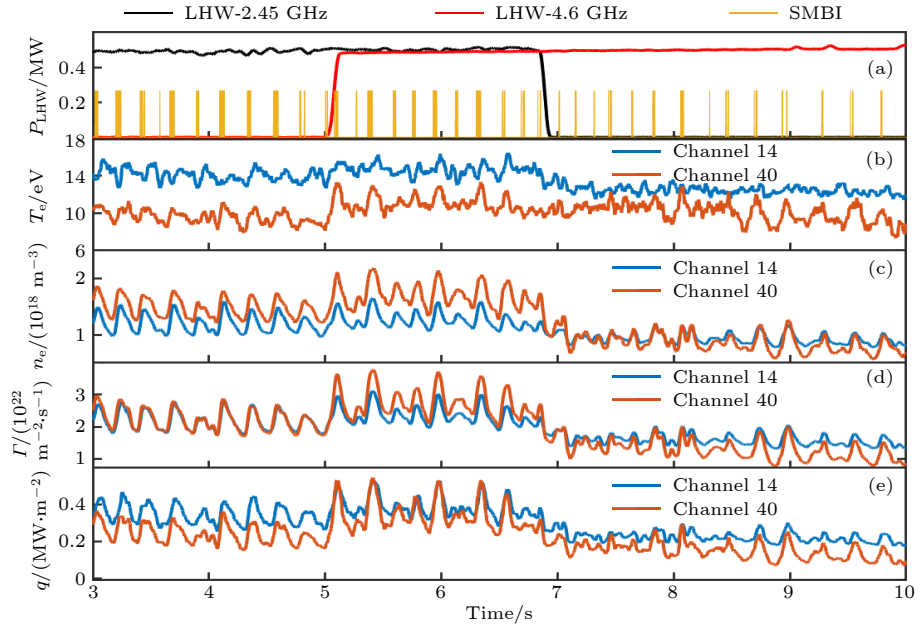


图 15 #106532 次放电低杂波注入功率与限制器探针测量参数随时间演化 (a) 2.45 GHz (黑色) 与 4.6 GHz (红色) 低杂波注入功率, 超声分子束注入信号 (橘黄色); 限制器探针测量的 (b) 电子温度、(c) 电子密度、(d) 粒子通量和 (e) 热通量, 其中蓝色线条代表第 14 号探针 (位于限制器左侧阵列中部), 红色线条代表第 40 号探针 (位于限制器右侧阵列中部)

Fig. 15. Temporal evolution of LHW power and SOL parameters measured by limiter probe are presented as follows: (a) LHW power of 2.45 GHz antenna (black) and 4.6 GHz antenna (red), along with the SMBI signal (orange); (b) electron temperature; (c) electron density; (d) particle flow; (e) heat flow. The blue lines represent channel 14 (in the left array of the limiter, near the midplane), and the red lines represent channel 40 (in the right array of the limiter, near the midplane).

$$I = A_{\text{eff}} j_{i,s} \left\{ 1 - \exp \left[e \left(\frac{V - V_{\text{fl}}}{T_e} \right) \right] \right\}, \quad (3)$$

其中 I 和 V 代表探针电流和电压, A_{eff} 为探针的有效收集面积, $j_{i,s}$ 为离子饱和流密度, e 为单位电荷, V_{fl} 为悬浮电位。

探针所测数据同样呈现出明显的脉冲形式, 也是由图 15(a) 中的 SMBI 引起。图 15(b), (c) 展示了低杂波加热下电子温度和密度随时间的演化过程, 2.45 GHz 低杂波加热时, 限制器右侧探针所测电子密度约为 $1.5 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$, 高于左侧的 $1.25 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$; 但右侧探针所测电子温度约为 9.5 eV, 低于左侧的 14 eV。2.45 GHz 低杂波加热时电子密度明显高于 4.6 GHz 低杂波, 协同加热时电子密度达到最高, 约为 $2 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 。图 15(d), (e) 展示了低杂波加热条件下粒子通量和热通量随时间的演化过程, 2.45 GHz 低杂波加热比 4.6 GHz 低杂波加热对于粒子和热通量的提升更显著。最大粒子通量和热通量出现在两种低杂波协同加热时, 最高分别可达 $3.7 \times 10^{22} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 0.5 MW/m^2 。这表明低杂波能够提高刮削层中电子密度、粒子通量和热通量等参数, 在高参数长脉冲放电情况下有可能会给限制器和第一壁材料造成较高的局部热负

荷, 形成的热斑会导致杂质的产生和聚集, 使得芯部约束恶化或放电破裂。限制器探针测量的三维等离子体参数是研究低杂波形成热斑机理的一个关键实验依据, 对于维持高性能长脉冲放电具有重要意义。

5 结 论

EAST 限制器探针安装在限制器两侧, 具有很高的空间分辨率, 为了提高使用效率, 限制器探针将会根据物理测量需求同时运行在 3 种测量模式下: 悬浮电位测量、离子饱和流测量和扫描单探针模式。针对需求量较大的离子饱和流测量, 我们研发了基于大容量电容器的充放电控制电路。相比于一些磁约束聚变装置使用 9 V 干电池组作为探针偏压, 大容量电容器为探针供电具有电压设置灵活、易于维护和环保等优点。首先, 根据限制器探针诊断的测量需求, 设计了超级电容器充放电控制电路, 能够实现电容充电、工作输出、电阻放电和关断 4 种功能。对于电路对核心部件电容器, 根据 EAST 实验放电时长和间隔、边界等离子体参数等信息, 经过理论计算, 选择了容量为 6 F 和最高电

压为 180 V 的超级电容器. 随后, 对电路中的直流电源、继电器开关、电阻、二极管、保险丝和智能控制器等硬件进行了选型. 限制器探针是 EAST 的常规诊断, 并且工作在强辐射环境中, 因此需要实现电容电路的远程和自动控制. 我们基于 Python 语言编写了电容器充放电控制电路的控制程序, 它具有手动和自动两种运行模式. 在自动运行模式下, 控制电路可自动实现在 EAST 放电期间切换至工作模式, 即电容器为探针输出偏压, 在放电间隔时切换至充电模式, 为电容器充电, 同时监测和记录电容器的工作状态. 将电容器充放电控制电路在实验室安装好后, 对电路的充电、电阻放电、工作输出功能和自然漏电速率进行了测试, 结果表明电路系统均可正常工作, 满足 EAST 物理实验的需求. 最后, 将限制器探针应用于 EAST 实验, 在 60 s 长脉冲放电中, 电容器输出偏压稳定, 所测离子饱和流数据正常. 在一次低杂波电流驱动实验中, 利用限制器探针同时观测到悬浮电位、离子饱和流、电子温度、密度、粒子通量和热通量的空间分布. 研究发现 2.45 GHz 低杂波加热相较于 4.6 GHz 时离子饱和流的提升更明显, 当两种低杂波协同加热时离子饱和流达到最大值, 且限制器右侧离子饱和流显著高于左侧; 同时扫描单探针测量到, 2.45 GHz 低杂波加热相较于 4.6 GHz 低杂波加热, 刮削层电子密度、粒子通量和热通量有更明显的提升, 且限制器右侧电子密度高于左侧. 这一物理观测有利于理解低杂波加热等离子体的物理机制和改善低杂波引起的第一壁热斑效应. 本文研发的基于大容量电容器的充放电控制电路, 能够在强辐射环境中安全和可靠地运行, 且能够进行远程控制, 在未来的聚变堆环境中具有重要应用潜力.

参考文献

- [1] Johnson E O, Malter L 1950 *Phys. Rev.* **80** 58
 [2] Perkins R J, Hosea J C, Taylor G, Bertelli N, Kramer G J,

- Luo Z P, Qin C M, Wang L, Xu J C, Zhang X J 2019 *Plasma. Phys. Contr. F* **61** 045011
 [3] Wang F M, Gan K F, Gong X Z, Team E 2013 *Plasma Sci. Technol.* **15** 225
 [4] Yan L W, Hong W Y, Qian J, Luo C W, Pan L 2005 *Rev. Sci. Instrum.* **76** 093506
 [5] Ming T F, Zhang W, Chang J F, Wang J, Xu G S, Ding S, Yan N, Gao X, Guo H Y 2009 *Fusion. Eng. Des.* **84** 57
 [6] Xu J C, Wang L, Xu G S, Luo G N, Yao D M, Li Q, Cao L, Chen L, Zhang W, Liu S C, Wang H Q, Jia M N, Feng W, Deng G Z, Hu L Q, Wan B N, Li J, Sun Y W, Guo H Y 2016 *Rev. Sci. Instrum.* **87** 083504
 [7] Yang J, Chen Z P, Liu H, Wang T, Zhu M C, Song Z, Wang Z, Zhuang G, Ding Y, Team J T 2019 *Plasma Sci. Technol.* **21** 105105
 [8] Labombard B, Lipschultz B 1986 *Rev. Sci. Instrum.* **57** 2415
 [9] Asakura N, Shimizu K, Hosogane N, Itami K, Tsuji S, Shimada M 1995 *Nucl. Fusion* **35** 381
 [10] Buchenauer D, Hsu W L, Smith J P, Hill D N 1990 *Rev. Sci. Instrum.* **61** 2873
 [11] Liu S C, Liao L, Wei W Y, Liang Y, Xu J C, Cao L, Li S, Li L, Meng L Y, Qian J P, Zang Q, Wang L, Xu S, Cai J, Yan N, Ma Q, Zhao N, Chen R, Hu G H, Liu J B, Liu X J, Ming T F, Li L T, Sun Y, Zeng L, Li G Q, Yao D M, Xu G S, Gong X Z, Gao X, EAST Team 2022 *Fusion. Eng. Des.* **180** 113162
 [12] Demidov V I, Ratynskaia S V, Rypdal K 2002 *Rev. Sci. Instrum.* **73** 3409
 [13] Li Y C, Ding B J, Li M H, Wang M, Liu L, Wu C B, Yan G H 2022 *Nucl. Electron. Detect. Technol.* **42** 116 (in Chinese) [李永春, 丁伯江, 李妙辉, 王茂, 刘亮, 吴陈斌, 阎广厚 2022 *核电子学与探测技术* **42** 116]
 [14] Back R, Bengtson R D 1997 *Rev. Sci. Instrum.* **68** 377
 [15] Yan N, Naulin V, Xu G S, Rasmussen J J, Wang H Q, Liu S C, Wang L, Liang Y, Nielsen A H, Madsen J, Guo H Y, Wan B N 2014 *Plasma Phys. Contr. F* **56** 095023
 [16] Myra J R, Lau C, Van Compernelle B, Vincena S, Wright J C 2020 *Phys. Plasmas* **27** 072506
 [17] Xu G S, Wan B N, Zhang W 2006 *Rev. Sci. Instrum.* **77** 063505
 [18] Myra J R 2021 *J. Plasm. Phys.* **87** 1
 [19] Liu P, Xu G S, Wang H Q, Jiang M, Wang L, Zhang W, Liu S C, Yan N, Ding S Y 2013 *Plasma Sci. Technol.* **15** 619
 [20] Colas L, Urbanczyk G, Goniche M, Hillairet J, Bernard J M, Bourdelle C, Fedorczak N, Guillemaut C, Helou W, Bobkov V, Ochoukov R, Jaquet P, Lerche E, Zhang X, Qin C, Klepper C C, Lau C, Van Compernelle B, Wukitch S J, Lin Y, Ono M, Contributors J, Team A U, Team E, Team W, Ios I 2022 *Nucl. Fusion* **62** 016014
 [21] Ochoukov R, Whyte D G, Brunner D, D'Ippolito D A, LaBombard B, Lipschultz B, Myra J R, Terry J L, Wukitch S J 2014 *Aip. Conf. Proc.* **1580** 267

Development of charge-discharge circuitry based on supercapacitor and its application to limiter probe diagnostics in EAST*

Zhang Wen-Bo¹⁾²⁾ Liu Shao-Cheng^{1)†} Liao Liang¹⁾ Wei Wen-Yin¹⁾
 Li Le-Tian¹⁾ Wang Liang^{1)‡} Yan Ning¹⁾ Qian Jin-Ping¹⁾ Zang Qing¹⁾

1) (*Institute of Plasma Physics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China*)

2) (*Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

(Received 25 October 2023; revised manuscript received 6 December 2023)

Abstract

The EAST limiter probe is installed on the front surface of guard limiter, which consists of two columns and can operate in floating potential mode, ion saturation current mode, and swept single-probe mode simultaneously. When Langmuir probe operates in the ion saturation current mode, it requires a stable biasing voltage. To meet this requirement, a large capacitor is used to provide a biasing voltage for the probe. Comparing with the 9 V dry batteries that are commonly used in magnetic confinement fusion devices, employing a large capacitor offers advantages such as flexible voltage adjustment, easy maintenance, and environmental friendliness. Therefore, we have designed and tested a complete set of supercapacitor charge-discharge control circuitry. In this work, a control software is developed for the supercapacitor charge-discharge control circuitry based on the Python language to enable the remote and automatic controlling of the circuitry operation. As demonstrated in experiments, the capacitor charge-discharge control circuitry can supply stable biasing voltage output for the probe under long-pulse discharge, and it is workable in complex electromagnetic environment of magnetic confinement fusion device. By implementing the supercapacitor charge-discharge control circuitry in EAST limiter probe diagnostics, the three-dimensional distributions of plasma parameters are measured, such as ion saturation current, floating potential, electron temperature, and plasma density. In a lower hybrid wave (LHW) heating experiment, the 2.45 GHz LHW is found to generate larger electron density than the 4.6 GHz LHW, and the largest electron density appears when both the 2.45 GHz and 4.6 GHz LHWs are turned on simultaneously. These experimental results confirm that supercapacitor charge-discharge control circuitry can be operated reliably and stably.

Keywords: Langmuir probe, supercapacitor, magnetic confinement fusion plasma, tokamak

PACS: 52.55.Fa, 28.52.-s

DOI: 10.7498/aps.73.20231697

* Project supported by the National MCF Energy R&D Program of China (Grant No. 2019YFE03040000), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12275310, 12275312), the Science Foundation of Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences (Grant No. DSJJ-2021-01), the Collaborative Innovation Program of Hefei Science Center, CAS (Grant No. 2021HSC-CIP019), and the Users with Excellence Program of Hefei Science Center, CAS (Grant Nos. 2021HSC-UE014, 2021HSC-UE012).

† Corresponding author. E-mail: lsch@ipp.ac.cn

‡ Corresponding author. E-mail: lwang@ipp.ac.cn



基于超级电容器的充放电电路系统研制及其在EAST限制器探针测量中的应用

张问博 刘少承 廖亮 魏文峯 李乐天 王亮 颜宁 钱金平 臧庆

Development of charge–discharge circuitry based on supercapacitor and its application to limiter probe diagnostics in EAST

Zhang Wen-Bo Liu Shao-Cheng Liao Liang Wei Wen-Yin Li Le-Tian Wang Liang Yan Ning Qian Jin-Ping Zang Qing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 065203 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231697

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231697>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于中性水凝胶/取向碳纳米管阵列高电压柔性固态超级电容器

High-voltage flexible solid state supercapacitor based on neutral hydrogel/carbon nanotube arrays

物理学报. 2019, 68(10): 108201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182288>

可拉伸超级电容器的研究进展:电极、电解质和器件

Stretchable supercapacitors: Electrodes, electrolytes, and devices

物理学报. 2020, 69(17): 178801 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200881>

基于对苯二酚/碳纳米管阵列氧化还原增强固态超级电容器的研究

Redox-enhanced solid-state supercapacitor based on hydroquinone-containing gel electrolyte/ carbon nanotube arrays

物理学报. 2020, 69(12): 126101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200204>

基于收缩高密度碳纳米管阵列的柔性固态超级电容器

Flexible solid-state supercapacitors based on shrunk high-density aligned carbon nanotube arrays

物理学报. 2018, 67(2): 028201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171855>

柔性纤维状超级电容器的研究进展

Recent advances in flexible fiber-shaped supercapacitors

物理学报. 2020, 69(17): 178201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200159>

HL-2A中环向旋转影响等离子体对共振磁扰动的响应过程

Effect of toroidal rotation on plasma response to resonant magnetic perturbations in HL-2A

物理学报. 2020, 69(19): 195201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200519>