



·强流加速器与粒子束技术·

## MHz 重频双极性脉冲感应加速组元研制\*

黄子平, 龙继东, 王 卫, 湛 怡, 丁明军

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 脉冲功率科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 采用感应同步加速原理, 能在 MHz 重复频率下连续运行的双极性脉冲感应加速单元可以替代传统的射频加速单元应用于环形加速器中。针对 MHz 重频双极性脉冲功率源设计、感应腔负载特性等关键技术开展了实验研究, 研制了一套 MHz 重频双极性脉冲感应加速单元。相比于日本高能加速器研究机构 (KEK) 研制的感应同步加速单元, 该加速单元对电路结构进行了优化, 在加速脉冲具备相同顶降的前提下, 将加速腔纵向尺寸缩小了 5 倍以上, 可有效改善现有脉冲感应加速单元在加速电压调节方面的局限性, 提高了功率系统的稳定性, 减小了组元连续运行时的功率损耗, 更加适应各类环形加速器对重频脉冲感应加速组元的应用需求。

**关键词:** MHz 重频; 感应同步加速; 双极性脉冲; 脉冲感应加速单元

中图分类号: TL503.3

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202234.210513

## Development of the MHz repetition bipolar pulse induction acceleration system

Huang Ziping, Long Jidong, Wang Wei, Chen Yi, Ding Mingjun

(Key Laboratory of Pulsed Power, Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 919-106, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** Based on the principle of Induction Synchrotron (IS), the high-repetition pulse induction acceleration module can replace the radio frequency acceleration cavity in circular accelerators, thereby obtaining more application prospects. In this paper, a set of MHz continuous repetition bipolar pulse induction acceleration module suitable for IS is developed, and its circuit design and experimental results are introduced. Compared with the induction acceleration module of KEK, which is the only IS acceleration module in use at present, this induction module adopts different circuit structures to make the longitudinal dimension of the induction cell be reduced by 5 times at the same pulse flat voltage drop, which can effectively improve the adjustment ability of the accelerating voltage in a limited space, reduce the power consumption and the cost of system cooling, and improve the reliability of continuous operation of the pulse power system.

**Key words:** MHz repetition, induction synchrotron, bipolar pulse, pulse induction acceleration module

日本科学家 Takayama 在 2000 年首次提出了感应同步加速器 (IS) 的概念, 利用高重频连续运行的脉冲感应加速组元替代同步加速器中原有的射频加速腔, 将脉冲感应加速在流强上的优势与同步加速器在能量上的优势结合起来, 有望大幅提高现有高能加速器的束流强度<sup>[1]</sup>。随后日本 KEK 研制成功了适用于感应同步加速器的双极性脉冲感应加速单元<sup>[2]</sup>, 并实验验证了感应同步加速器的可行性<sup>[3]</sup>。

KEK 的研究证明了将双极性脉冲感应加速单元应用于环形加速器的可行性。但由于其加速单元的电路结构决定了其加速脉冲顶降主要由传输线等效阻抗和加速腔回路电感间的分压导致, 因此无论腔压的高低, 都需要足够多的磁芯来维持加速腔回路电感量, 同时匹配电阻消耗了功率源过半的输出功率, 这导致了 KEK 感应加速单元存在体积大、功耗高的缺点, 而为了维持足够的加速梯度, 其单腔电压设定为 2~2.5 kV, 这要求功率源需采用多个 MOSFET 开关串联工作, 一定程度上降低了功率系统的可靠性。

文献 [4] 提出了一种更为紧凑可靠的感应加速单元设计方案, 将功率源和感应腔直接相连形成类似 LC 的放电回路, 去除了传输线和匹配电阻的影响, 能够显著降低脉冲顶降对感应腔电感量的要求, 可实现感应腔尺寸和脉冲

\* 收稿日期: 2021-11-23; 修订日期: 2022-03-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11675159, 11735012)

联系方式: 黄子平, hzp106@caep.cn.

电压幅度的同步降低,在总加速电压和加速段总尺寸不变的前提下,可通过增加加速腔的数量大幅减小单个感应腔的功耗,提高功率系统的稳定性。本文针对 MHz 重频双极性脉冲功率源和重频脉冲感应腔开展了实验研究,研制了基于 LC 放电回路的感应加速单元样机,并在 MHz 连续重频下进行了实验考核。研究表明,新研制的感应加速单元相比 KEK 的加速单元,实现相同电压顶降所需的加速腔纵向尺寸缩小了 5 倍,在同样脉宽和电压幅度下的总功耗降低了 75%。

## 1 MHz 重频双极性脉冲功率源电路设计

KEK 的感应加速单元由功率源、感应腔、连接电缆和匹配电阻构成,如图 1 所示:功率源采用全桥电路结构,通过四组开关实现双极性脉冲输出,每组开关包含 7 个串联的 MOSFET 开关,输出电压 2.5 kV,可在 MHz 重复频率下连续运行;感应腔等效为 300  $\Omega$ 、110  $\mu\text{H}$ 、280 pF 的 RLC 并联电路;功率源和感应腔间通过长 40 m、阻抗 120  $\Omega$  的电缆连接,为保持阻抗匹配,在感应腔馈入端并联 210  $\Omega$  的匹配电阻。在实际使用中,将 3 到 4 个感应腔串联,以产生 6~8 kV 的加速电压。利用该加速单元,KEK 在多种环形加速器上开展了一系列卓有成效的实验研究<sup>[5-7]</sup>。

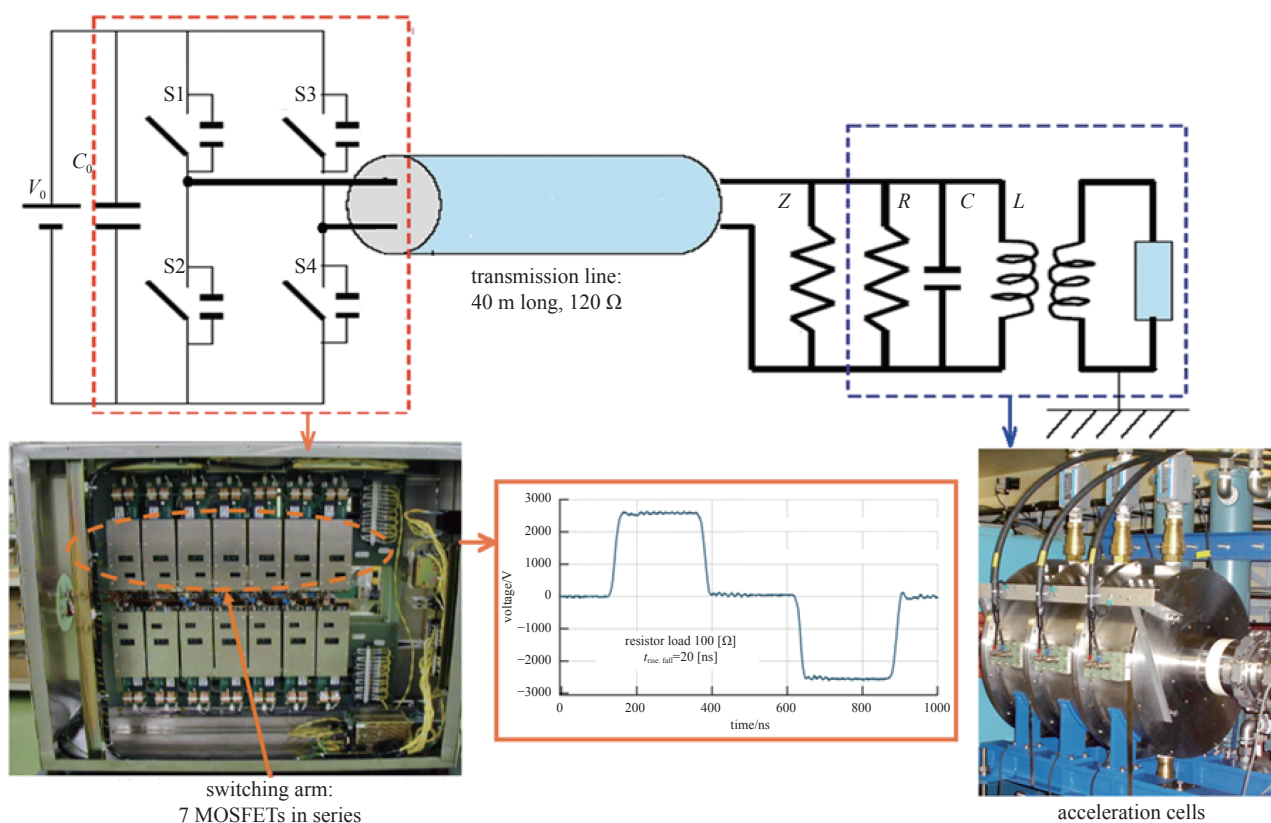


Fig. 1 The bipolar pulse induction acceleration system of KEK-IS

图 1 KEK 的双极性脉冲感应加速单元

本项目研制的 MHz 重频双极性脉冲功率源设计最高输出电压 1 kV,可驱动加速腔负载在 1 MHz 的重复频率下连续运行。功率源采用和 KEK 类似的方案,即 MOSFET 半导体开关结合全桥电路结构。MOSFET 开关使用美国 IXYSRF 品牌的 IXZ631 芯片,该芯片是功率芯片 DE375 和驱动芯片 IXRFD630 的整合体,额定工作电压 1 kV。全桥电路设计了两个版本,其中 V1 版电路如图 2 所示。由于作为负载的加速腔外壳需要接地,即图中的 O 点为接地点,因此储能电容 C1 和 C2 的低压端均需处于悬浮电位。C1、C2 焊接在电路板的背面,C1 连接开关 S1 的高压端和开关 S4 的低压端,C2 连接 S2 的高压端和 S3 的低压端,C1、C2 分别充正电压  $U_1$ 、 $U_2$ 。当所有开关都处于断开状态时,负载电压为零;当 S1、S4 同时闭合,S2、S3 保持断开时,C1 通过 S1、S4 对负载放电,则电流从 A 点流向 O 点,负载电压为正脉冲,幅度为  $U_1$ ;当 S1、S4 断开,负载电压降为零,正脉冲结束;当 S2、S3 同时闭合,S1、S4 保持断开时,C2 通过 S2、S3 对负载放电,电流从 O 点流向 A 点,负载电压为负脉冲,幅度为  $-U_2$ ;当 S2、S3 断开,负载电压降为零,负脉冲结束。

利用电阻负载对功率源输出波形进行测试,实验发现,由于电路板中电容 C1、C2 的放电回路不够紧凑,导致

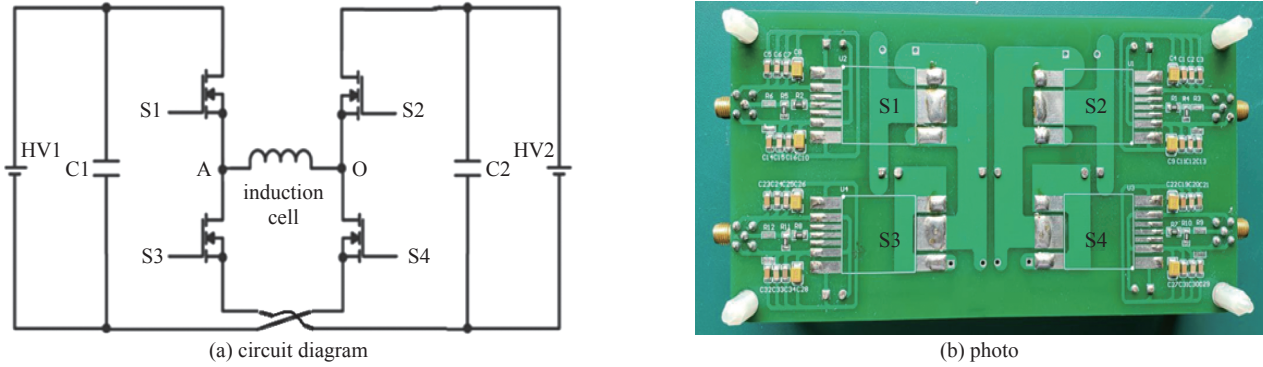


Fig. 2 V1 version of the full bridge circuit

图2 V1版全桥电路

回路电感较大,全桥电路所产生的双极性脉冲有明显的高频振荡。随后设计了V2版全桥电路,如图3所示。更改了电容的连接方式,C1和C2的高压端分别连接S1和S3的高压端;将全桥电路版对折成两块,S1,S2和C1在一块上,S3,S4和C2在另一块上,两块电路板层叠放置,C1,C2焊接在两块板之间,最大程度减小了电容放电的回路长度。两版全桥电路输出的双极性脉冲波形分别如图4(a)和图4(b)所示,负载均为30Ω电阻。采用新设计后,V2版全桥电路输出的脉冲平顶有了明显改善。

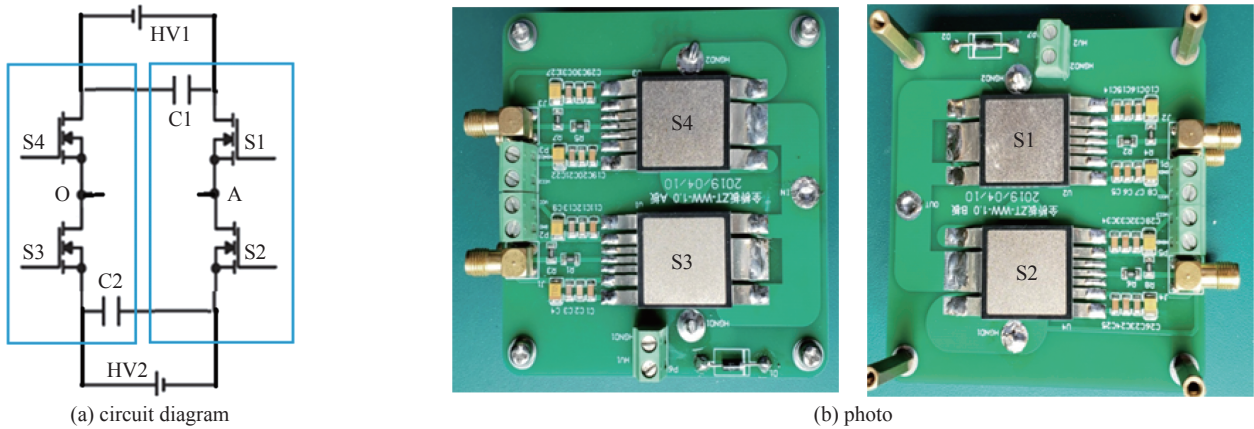


Fig. 3 V2 version of the full bridge circuit

图3 V2版全桥电路板

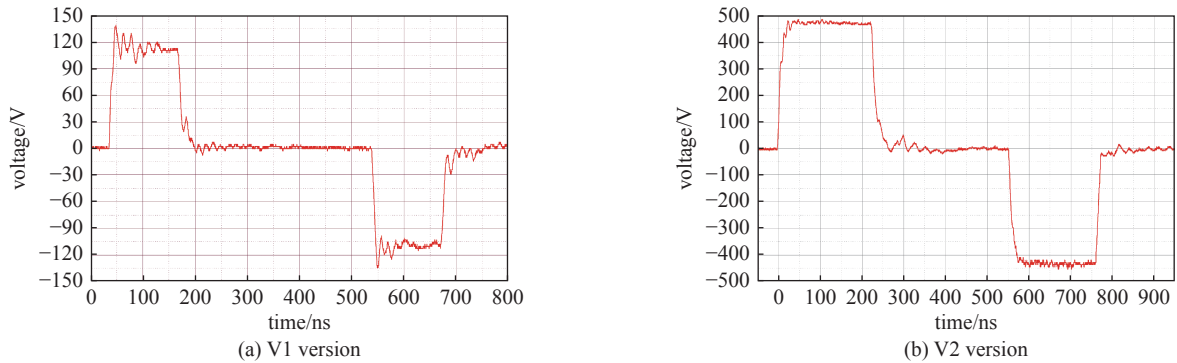


Fig. 4 Bipolar pulse waveform on 30Ω resistor obtained by different version of full bridge circuit

图4 不同版本全桥电路在30Ω电阻上获得的双极性脉冲波形

MOSFET 高压开关的通断由驱动芯片控制,驱动芯片需要连接15V的直流供电和5V的控制脉冲信号。在实际应用中发现,驱动芯片的地电极和开关芯片的低压电极间并未实现完全隔离,开关芯片低压电极的电位会对驱动电路和触发电路的地电位产生影响,这便要求驱动芯片的地电位必须处于悬浮状态,以确保多个开关间的地电位变化不会影响开关的驱动电压幅度和触发信号。全套的MHz重频双极性脉冲功率源组成如图5所示,包含全桥电路板、两路1kV高压电源模块、四路15V驱动电源模块和两组分路隔离触发模块,所用模块均自带2kV高

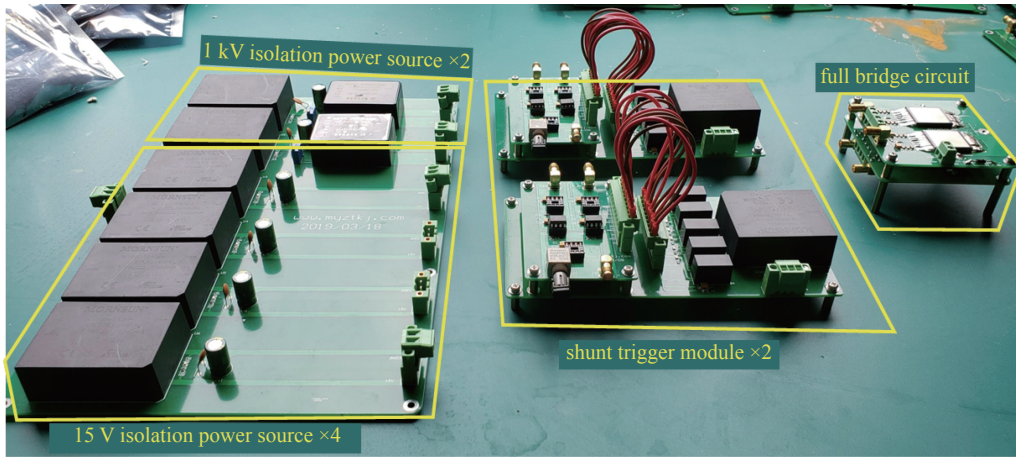


Fig. 5 The components of the bipolar pulse power source for MHz repetition rate

图 5 MHz 重频双极性脉冲功率源组成

压隔离。电源模块的功率较低,仅能支持全桥电路短时间的猝发运行,当功率源需要长时间连续运行时,则需要更换更大功率的电源模块,并为高压开关添加冷却模块。

## 2 MHz 重频双极性脉冲感应腔设计

KEK 感应同步加速腔通过长电缆和双极性功率源连接,最高工作电压 2.5 kV。如图 6(a)所示,感应腔纵向长度 25 cm,包含 6 块纳米微晶磁芯(日立金属 Finement 系列的 FT-3M 磁芯)<sup>[8]</sup>,单块磁芯尺寸为外径 50 cm、内径 22 cm、厚 1.5 cm,总截面积 126 cm<sup>2</sup>,脉冲励磁期间感应腔等效电感量 110 μH,脉宽 250 ns 时对应的顶降为 10%~15%<sup>[9]</sup>。当工作电压 2.5 kV 时,KEK 感应腔高重频运行总功耗为 25.9 kW(50% 占空比),其中磁芯功耗 11.4 kW,匹配电阻功耗 14.5 kW,功率源、磁芯和匹配电阻均需配套大功率液体冷却系统<sup>[10]</sup>。

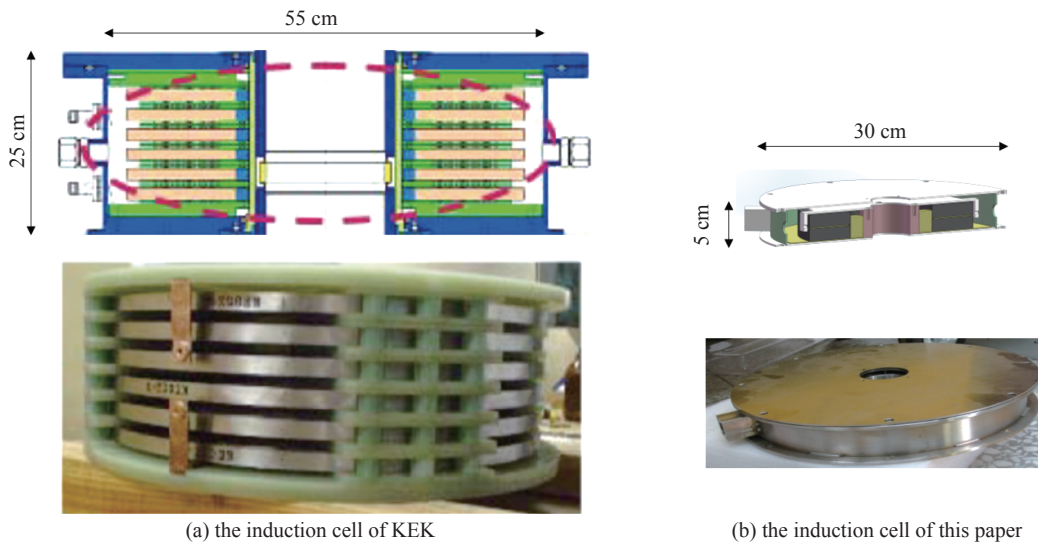


Fig. 6 The structures and dimensions of the two kinds of induction cells

图 6 两种双极性脉冲感应腔结构和尺寸对比

本项目研制的基于 LC 放电回路的加速组元,其感应腔作为负载直接和脉冲功率源的输出端相连,维持脉冲顶降所需的感应腔电感量要远小于功率源和感应腔间通过电缆连接的情况。感应腔如图 6(b)所示,工作电压 500 V,纵向长度 5 cm,包含两块纳米微晶磁芯(国产 1K107,性能和 FT-3M 相当),磁芯外径 21.5 cm、内径 11.5 cm、厚 1 cm,总截面积 10 cm<sup>2</sup>。

结合双极性脉冲功率源,对感应腔的励磁电流波形和感应产生的腔压脉冲波形进行了测试。双极性脉冲重复频率 1 MHz,脉冲宽度 250 ns,占空比 50%。

图 7 为前 10 个重频周期所对应的电压和电流波形,以及感应腔磁芯的脉冲磁化曲线。可以看出,磁芯的磁化过程在几个励磁周期后趋于稳定,后续励磁周期的磁化曲线基本重合,正负脉冲励磁的通量跳变  $\Delta B$  均为 0.13 T,

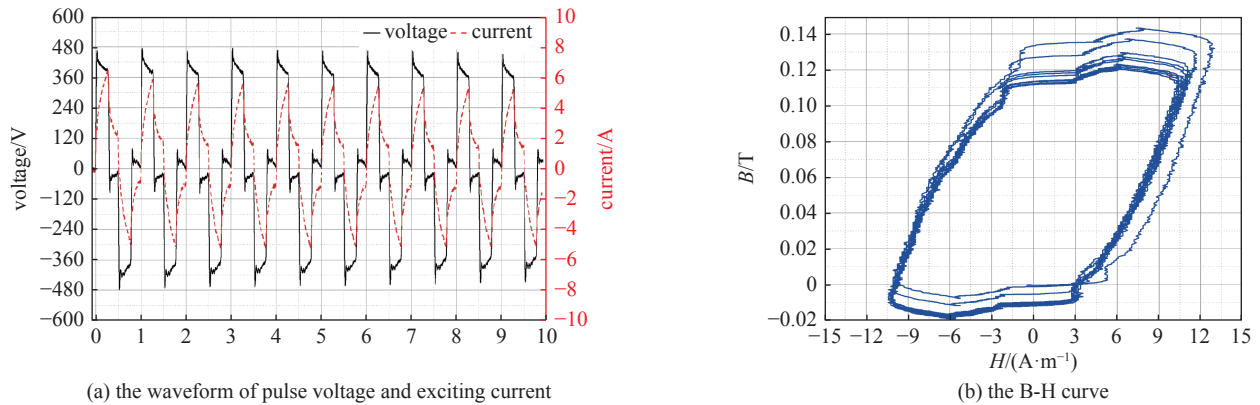


Fig. 7 The induction voltage and the exciting current of the acceleration cell and the B-H curve of the magnetic cores

图 7 感应腔的电压电流波形及磁芯磁化曲线

脉冲励磁期间感应腔的等效电感量约  $18 \mu\text{H}$ 。图 8 显示了加速电压平顶的波形细节和第 4、5、6 这 3 个励磁周期时正负脉冲所对应的感应腔等效电阻。在脉宽 250 ns 时, 脉冲平顶的电压降落约为 9%, 略优于 KEK 感应腔的顶降; 在不同周期时, 感应腔在脉冲期间的等效阻抗变化趋势一致, 阻抗最小值  $70 \Omega$ , 平均值约  $100 \Omega$ 。由于没有匹配电阻, 感应腔功耗即磁芯功耗, 可以算出, 工作电压 500 V 时, 感应腔在 1 MHz 双极性重频脉冲励磁下的功耗 (50% 占空比时) 约为 1.25 kW, 仅为 KEK 感应腔总功耗的 5%。使用 5 个 500 V 感应腔叠加可产生和 KEK 感应腔相同的加速电压 (2.5 kV), 此时总功耗约 6.3 kW, 为 KEK 感应腔磁芯功耗的 55%, 总功耗的 25%。

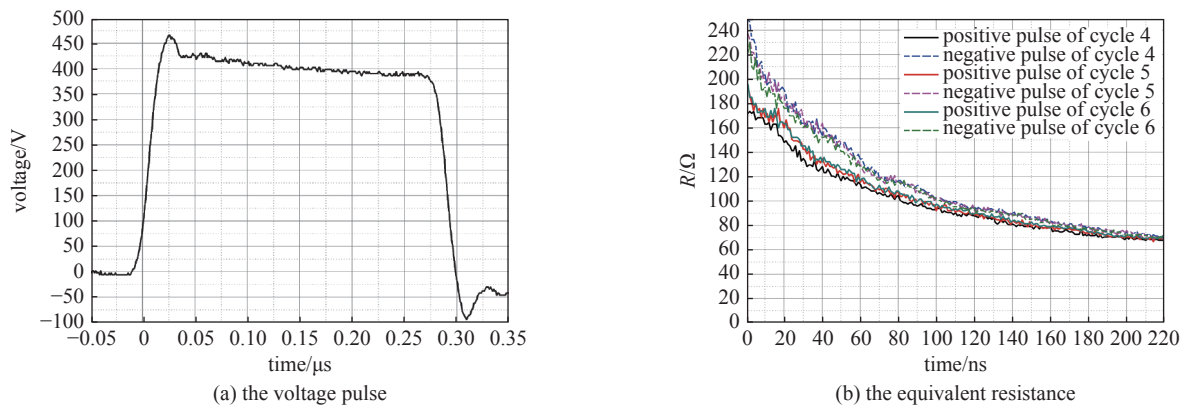


Fig. 8 The induction voltage pulse waveform and equivalent resistance curve of the induction cell

图 8 感应腔的腔压脉冲波形及等效电阻

### 3 感应加速组元 MHz 连续重频测试

在 1 MHz 连续重频下对感应加速组元进行了实验测试。图 9 是适用于连续重频运行的双极性脉冲功率源, 其中充电电源更换为额定功率 2 kW 的高压电源 (1 kV/2 A), 开关驱动电源更换为 75 W 开关电源和 100 W 隔离变压器的组合, 全桥电路上增加了两个  $100 \mu\text{H}$  的次级储能电容以减小储能电容充放电引起的电压波动, MOSFET 开关上贴合了散热片和风冷装置。

在感应腔上获得的连续重频脉冲波形如图 10 所示。测试时, 正负脉冲使用了不同的电压幅度和脉宽, 其中正脉冲幅度 500 V, 脉宽 200 ns, 负脉冲幅度 200 V, 脉宽 500 ns。感应加速组元在 1 MHz 的重复频率下能够长时间稳定运行 (测试时长 1 h), 经风冷后, 紧贴 MOSFET 开关的散热片温度维持在  $40^\circ$  以下, 感应腔磁芯的温度维持在  $60^\circ$  左右。

### 4 结论

脉冲感应加速单元要更好的应用到环形加速器中, 需要解决两个主要问题: (1) 如何实现更小的加速腔体积以在有限的空间内更好满足加速电压调节对更多加速单元数量的要求; (2) 如何降低加速电压的脉冲平顶压降以满足长脉冲束团运输对能散度的要求。由于减小加速腔体积必然会导致加速腔等效电感量下降, 从而增加脉冲平顶压降, 要实现这两个指标相对现有水平的同时提高, 需要从结构上对加速单元进行优化<sup>[11]</sup>。

本文验证了一种新加速单元结构的可行性, 研制了基于 LC 放电回路的双极性脉冲感应加速单元, 将感应腔纵

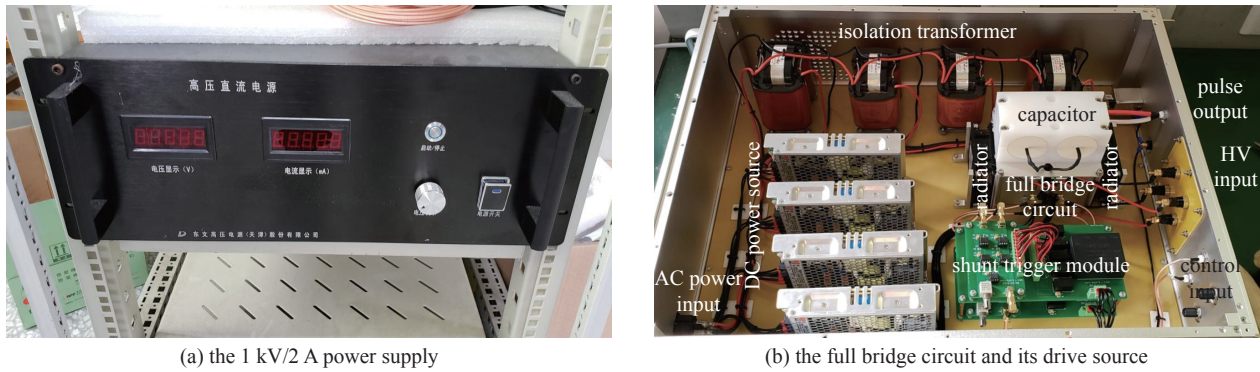


Fig. 9 The components of the bipolar pulse power source for MHz continuous operation

图9 可连续重频运行的双极性脉冲功率源

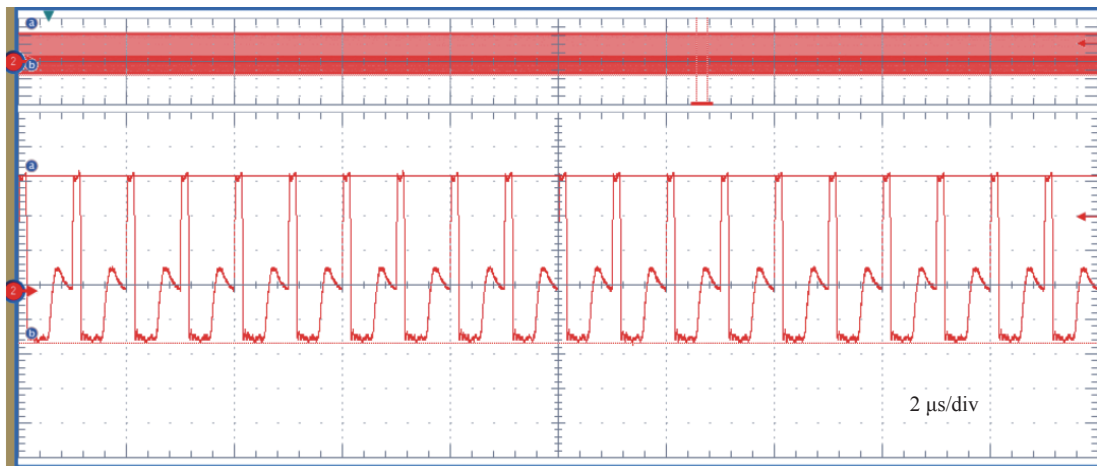


Fig. 10 The voltage pulse waveform of the induction cell in 1 MHz continuous operation

图10 1 MHz 连续重频运行时的双极性脉冲波形

向尺寸从 25 cm(KEK 感应腔)缩小到 5 cm, 获得了脉冲顶降优于 KEK 感应腔的双极性脉冲电压; 在相同的加速梯度下, 该结构下单个加速单元的工作电压为 KEK 加速单元的 1/5, 功耗仅为 KEK 的 5%, 规避了多个开关串联运行带来的可靠性风险, 降低了连续运行时加速单元的冷却成本; 在 1 MHz 的重复频率下, 对加速单元连续工作能力进行了实验测试, 证明仅采用简单的风冷设计, 即可保障该加速单元的连续稳定运行。

#### 参考文献:

- [1] Takayama K, Kishiro J. Induction synchrotron[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2000, 451(1): 304-317.
- [2] Wake M, Arakida Y, Koseki K, et al. Switching power supply for induction accelerators[C]//2007 IEEE Particle Accelerator Conference (PAC). 2007: 251-253.
- [3] Takayama K, Arakida Y, Dixit T, et al. Experimental demonstration of the induction synchrotron[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 98: 054801.
- [4] Huang Ziping, Wang Wei. Design of compact accelerator module of the induction synchrotron[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, 47(3): 1637-1640.
- [5] Takayama K, Arakida Y, Iwashita T, et al. All-ion accelerators: an injector-free synchrotron[J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 101(6): 063304.
- [6] Takayama K. Radioisotope ion beam production in KEK digital accelerator[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2009, 602(1/2): 69-74.
- [7] Takayama K, Adachi T, Arai T, et al. Heavy ion beam factory for material science based on the KEK digital accelerator[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2013, 314: 11-17.
- [8] Takayama K. Induction synchrotron experiment in the KEK PS[C]//2007 IEEE Particle Accelerator Conference (PAC). 2007: 836-840.
- [9] Takayama K, Koseki K, Torikai K, et al. Observation of the acceleration of a single bunch by using the induction device in the KEK proton synchrotron[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94: 144801.
- [10] Torikai K, Arakida Y, Inagaki S, et al. Design study of 1MHz induction cavity for induction synchrotron[C]//Proceedings of the 2003 Particle Accelerator Conference. 2003: 1784-1786.
- [11] 黄子平, 吕璐, 陈思富, 等. 脉冲感应加速在环形加速器中的应用[J]. *强激光与粒子束*, 2017, 29: 020201. (Huang Ziping, Lv Lu, Chen Sifu, et al. Application of pulse induction module in circular accelerators[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2017, 29: 020201)