

质子治疗装置脉冲电源研制

缪亚运^{1,2} 谷鸣¹ 陈志豪¹ 童金¹

1 (中国科学院上海应用物理研究所 张江园区 上海 201204)

2 (中国科学院大学 北京 100049)

摘要 上海质子治疗装置项目中质子注入系统凸轨磁铁需要脉冲电源励磁, 要求两台电源脉冲峰值幅度可调, 且波形一致, 且运行可靠。本文介绍了凸轨磁铁脉冲电源的设计和测试。脉冲电源电路采用 LC 串联谐振作为脉冲成形发生电路, 电路设计可调电感用于调整波形脉宽。晶闸管为电流开关, 快恢复二极管串联晶闸管弥补大功率晶闸管的关断延迟和下冲, 并增加饱和电抗器抑制励磁电流反向电流尖峰。测试结果表明, 当励磁电流峰值为 3 732 A 时, 励磁电流触发抖动小于 ± 25 ns, 励磁电流峰值重复稳定度小于 0.1%, 反向电流尖峰下降为峰值电流的 3.75%, 快恢复二极管和饱和电感器对抑制励磁电流反冲的效果明显, 满足了设计要求。

关键词 质子治疗, 脉冲电源, LC 谐振, 饱和电抗

中图分类号 TL503.5

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.040401

Development of pulsed power supply in proton therapy

MIAO Yayun^{1,2} GU Ming¹ CHEN Zhihao¹ TONG Jin¹

1(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Zhangjiang Campus, Shanghai 201204, China)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Background: Proton therapy centers have been operated worldwide recently. The central rationale for proton therapy is its superior spatial dose distribution in the patient. Injection system of synchronous storage ring in Shanghai proton therapy equipment requires two bump magnets. **Purpose:** Two new pulsed power supplies of the same parameters used in the bump magnet have been proposed and developed. **Methods:** The principle of pulse forming circuit is that LC series resonance generates when thyristor is turned on by trigger signals. Energy storage capacitor is charged to the setting voltage which determines the amplitude of the pulse waveform based on constant current by charging power supply. The main circuit employs variable inductance to adjust the pulse width. Fast recovery diode in series of thyristor could compensate for the turn-off delay of the thyristor while the peak of reverse current decreases due to saturable inductor. **Results:** Test results showed that when the half-sine excitation current peak was set to 3 732 A, its trigger jitter and reproducibility were less than ± 25 ns and 0.1%, respectively. Reverse current could be reduced to 3.75% of the peak current. **Conclusion:** Experimental results indicate that the pulse power supply reaches the design requirements and saturable inductor restrains reverse current effectively.

Key words Proton therapy, Pulsed power supply, LC resonance, Saturable inductor

上海市自主创新和高新技术产业发展重大项目

第一作者: 缪亚运, 女, 1990 年出生, 2013 年毕业于中南大学, 现为硕士研究生, 从事加速器凸轨磁铁脉冲电源研究

通信作者: 谷鸣, E-mail: guming@sinap.ac.cn

Supported by Independent Innovation and Development of High-tech Industry Project of Shanghai

First author: MIAO Yayun, female, born in 1990, graduated from Central South University in 2013, master student, focusing on pulsed power supply applied in bump magnet

Corresponding author: GU Ming, E-mail: guming@sinap.ac.cn

收稿日期: 2016-02-01, 修回日期: 2016-03-07

在肿瘤放射治疗领域, 质子因其 Bragg 峰^[1]物理性能, 使其具有显著的治疗优势。国际上质子治疗装置正在快速发展, 并已投入正式医疗运行, 如美国 Anderson 质子治疗中心、加拿大 TRIUMF 癌症治疗中心^[2]等。上海质子治疗装置由质子注入器、同步环形加速器储存环和束流输运线组成的系统提供治疗束流。同步环形加速器储存环的质子束流注入系统包括静电切割器、静磁切割磁铁和凸轨磁铁构成。质子注入器输出的 7 MeV 质子束流采用局部凸轨的多圈水平涂抹方式^[3]注入到储存环, 由储存环加速到需要的治疗能量 70–250 MeV。静电切割器和静磁切割磁铁将注入器质子束流调整到靠近储存环束流循环中心的位置, 两台参数相同的凸轨磁铁系统为储存环凸轨注入设备。凸轨磁铁采用窗型结构的铁氧体磁轭, 单圈线圈励磁, 每块磁铁配备独立的励磁脉冲电源。储存环束流轨道在凸轨磁铁作用下局部凸轨, 束流注入的水平涂抹是通过凸轨高度的不断下降实现注入点在相空间的移动, 最后累积束流储存到储存环中心轨道^[4]。在凸轨磁场下降沿多束团涂抹注入是增加束流注入效率最有效的方式, 因此要求磁场波形即励磁电源提供均衡平滑的脉冲励磁电流。本文介绍的脉冲电源设计为半正弦励磁电流脉冲波形, 在其下降沿涂抹注入。

1 脉冲电源设计

质子治疗注入系统凸轨磁铁脉冲电源的电流波形为准正弦波, 参数指标如下: 凸轨磁铁电感为 $0.47 \mu\text{H}$, 电流波形为半正弦, 峰值电流为 $3\ 732\ \text{A}$, 脉冲底宽为 $40\ \mu\text{s}$, 重复频率为 $0.1\text{--}0.2\ \text{Hz}$, 励磁电流重复稳定性为 $\pm 0.1\%$, 励磁电流触发抖动 $< \pm 25\ \text{ns}$ 。励磁电流下降部分作用于凸轨磁铁线圈产生满足多圈注入所需的凸轨磁场。储存环注入要求两台凸轨磁铁的脉冲波形一致, 幅度可调, 励磁电流反向尖峰抑制在 5% 以内。凸轨磁铁有一定的反向电流, 有助于消减磁铁的剩余磁场, 但是反向磁场过大, 则会影响注入效率。若凸轨磁铁的反向磁场为 10% , 则质子注入效率将下降 6% ; 当反向磁场在 5% 时, 则注入效率仅下降 1% 。综合考虑, 将反向磁场控制在 5% 以内是合适的。

1.1 主电路设计

脉冲电源电路采用 LC 串联谐振作为脉冲成形发生电路, 采用恒流充电方式^[5]对储能电容充电, 选用晶闸管固态开关触发输出^[6], 设计能量回授电路。凸

轨电源原理框图如图 1 所示, 由充电回路、脉冲成形电路、能量回授电路、保护电路和控制电路组成。脉冲电源充电回路选取恒流充电电源通过 $30\ \text{m}$ 电缆给储能电容 C_1 恒流充电, 充电时间小于电源最大重复频率 $0.2\ \text{Hz}$ 。晶闸管电流开关 T_1 控制开通 C_1 放电振荡。 LC 振荡主路由 C_1 、 L_2 、 L_{bump} 组成。当 LC 振荡半周期电流反向时, 晶闸管 T_1 和二极管 D_4 阻断该振荡回路; 由 L_1 、 D_3 与 C_1 构成振荡回路, 将 C_1 的反向储能电荷回授, 达到能量回授的目的。能量回授可以减小对恒流充电电源的功率需求。电路中设计可调电感用于调整波形脉宽^[7]。快恢复二极管 D_4 串联晶闸管 T_1 弥补大功率晶闸管较大的关断延迟, 加快关断振荡回路。

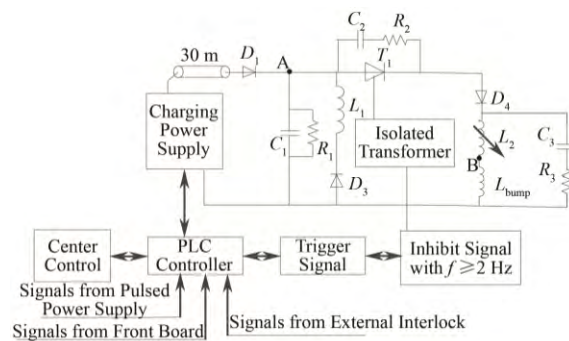


图 1 凸轨电源原理图

Fig.1 Schematic of pulsed power supply.

凸轨磁铁线圈电感与储能电容形成 LC 振荡, 产生正弦振荡波形的励磁电流。当回路振荡超过半周期, 电流到零转为负时, 晶闸管和二极管的反向关断使电路停止振荡, 因此输出的脉冲电流波形为半正弦波形。

在 LC 振荡主回路中, 忽略辅助电路 C_2/R_2 、 C_3/R_3 的影响, 应用基尔霍夫定律可得到:

$$RC \frac{du_c(t)}{dt} + LC \frac{d^2u_c(t)}{dt^2} + u_c(t) = 0 \quad (1)$$

式中: C 、 $u_c(t)$ 是储能电容 C_1 电容、电压; $L=L+L_{\text{bump}}+L_1$ (L_1 引线电感); R 为电感电阻以及开关导通电阻等回路电阻的等效串联电阻。

$i(t) = C \frac{du_c(t)}{dt}$ 是振荡回路电流, 即在此电源应用中的励磁电流。由此推解上述方程可得到:

$$u_c(t) = e^{-\beta t} [A_1 e^{j\omega t} + A_2 e^{-j\omega t}] \quad (2)$$

式中: $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}$; $\beta = \frac{R}{2L}$; A_1 、 A_2 为常数。

本电源电路设计中磁铁线圈电阻和开关导电阻很小,即 $(R/2L)^2 \ll 1/LC$,回路振荡为欠阻尼振荡,简化得到:

$$u_c(t) = A_3 e^{-\beta t} \sin(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

实际设计中凸轨磁铁等效电阻小于 1 mΩ,回路中采用大截面积铜导线接线,电阻可忽略不计,可以近似为纯 LC 振荡。由于电路具备可调充电电压和可调电感,采用无电阻 LC 振荡电路来简化估算电路运行参数,得到励磁脉冲电流:

$$i_d(t) = \frac{U_0}{\omega L} \sin \omega t \quad (4)$$

式中: $\omega = 1/\sqrt{LC}$; U_0 为初始充电电压。励磁脉冲宽度 $T_d = \pi\sqrt{LC}$; 脉冲电流峰值 $I_0 = U_0\sqrt{C/L}$ 。

根据式(1)-(4),设计电路参数为: $C=75 \mu\text{F}$; $L=2.162 \mu\text{H}$; $U_0=634 \text{V}$ 。

在 PSpice 仿真电路储能电容 75 μF,总电感 2.2 μH,电路模拟仿真得出波形如图 2。设置充电电压 660 V,峰值电流为 3 890 A,脉宽为 40 μs,储能电容上电压可回授到 624 V。因仿真时电路无寄生参数,故仿真波形为理想波形。

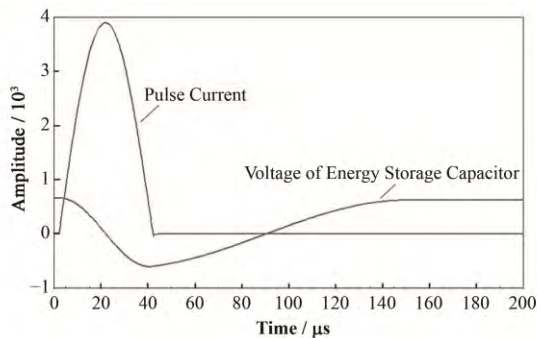


图 2 脉冲电源上的脉冲电流和储能电容电压 PSpice 仿真波形

Fig.2 Simulation waveform of excitation current and voltage on energy storage capacitor of pulse power supply.

凸轨磁铁设计电感为 0.47 μH,经验预估主回路中引线电感约为 0.5 μH。由于不能精确地判断电路中引线电感和寄生电感值,在设计中振荡回路串联一个 0.8-2.0 μH 的可调电感。串联可调回路电感主要考虑:匹配选择合适容量的储能电容和合适的充电电压;同时为在实际电源调试过程中补偿接线电感和其他寄生电感的误差,调节脉冲电流脉宽。

在激励电流的下降阶段,磁铁线圈上的能量开始对储能电容进行反向充电,反充到接近负峰值电压。电路中设计 LCD 能量回授电路继续 C_1 电容的振荡,使其反向电压通过回授电路振荡,再次反充

转换成 C_1 的正电压,达到能量回授的目的。LCD 能量回授可以减小焦耳损失,降低充电电源功率需求^[8]。能量回授电路的振荡电流不经过凸轨磁铁,因此不会产生磁场影响储存环束流。从测试结果得知,回授电压约为充电电压的 73%,由 $W=1/2CV^2$ 可知,能量回收率约 53%。LCD 回路电感量的选择要兼顾对主振电路的影响和回授时间。综合考虑,设计为主振电感的 10 倍 22 μH。回授振荡周期与 \sqrt{L} 成正比,可得电压回授时间约为 126 μs。恒流充电模式下充电电流和电容电压的关系是 $i_c = Cu_c/t$, 0.2 Hz 周期充电 700 V 需要的充电电流需要 10.5 mA;有了能量回授后,充电电压仅需补充充电 200 V,也就是充电电流仅需 3 mA 即可,因此降低了对充电电源的功率要求。

1.2 脉冲电源保护电路和工艺设计

充电串联保护二极管目的是防止主放电回路发生故障时电流不会反向流向充电电源。储能电容两端增加泄放电阻 R_1 。晶闸管两端并联 RC 缓冲电路,用于吸收晶闸管的关断过电压,抑制 du/dt ,减小器件的关断损耗^[9]。

在凸轨磁铁两端需并联 RC 电路用于晶闸管关断时为电路中的电流提供通路,使电流不立即停止,可减小电流突变量 di/dt ,消除磁铁两端的电压高频振荡。

晶闸管门极上的触发信号由外触发信号通过控制电路板上的触发联锁和功率放大,经过可控硅触发电路板上隔离变压器加到脉冲电源中晶闸管门极,阻止通过晶闸管的电流回流到触发电路内,造成器件损坏。触发电路板采用可再触发单稳态多谐振荡器,可设置通过信号的最高频率为 2 Hz。当频率高于 2 Hz 时不输出触发信号,显示触发故障,在高频干扰环境中可保护晶闸管。在电源系统设计中,还设计了温度联锁、风机联锁、机柜门联锁和接地棒联锁等保护信号,其中温度传感器模块置于晶闸管旁边,可保证系统的正常运行。

脉冲电源结构设计时主要考虑电路中寄生参数的影响和电磁屏蔽^[10]。机箱内采用了表面积大的铜排接地,供所有设备、元器件接地,使回路中电阻和寄生电感小。框架使用优质冷板接缝满焊而成,整体镀锌后喷塑,侧板做喷塑保护并加屏蔽布,为了增强屏蔽效能,所有板材厚度均为 2 mm。风口采用高通风率的蜂窝孔。同轴电缆机箱上的输出口用 EMC (Electro Magnetic Compatibility)屏蔽锁头,有屏蔽和电缆锁紧作用。

1.3 脉冲电流反冲的抑制方法

在脉冲成形电路中, 高功率脉冲开关选用固态半导体开关晶闸管, 采用晶闸管和快恢复二极管串联的方式可减小正弦波电流反冲的恢复时间。晶闸管选用 Westcode 的指状分布门快速可控硅 R1700MC18E, 其通态电流最大上升率为 $1500 \text{ A} \cdot \mu\text{s}^{-1}$, 能满足最大电流上升率约为 $778 \text{ A} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ 、脉宽 $40 \mu\text{s}$ 、峰值幅度 10 kA 的电流脉冲。晶闸管门极开通时间为 $1.5 \mu\text{s}$, 关断时间为 $30 \mu\text{s}$, 开通损耗小。快恢复二极管选用 Westcode 的 M1502NC200, 反向恢复时间典型值为 $3.5 \mu\text{s}$, 小于晶闸管的关断时间, 有效辅助晶闸管关断回路电流。

设计中采用饱和电抗器^[11]来进一步抑制反冲电流。利用饱和电抗器在大电流时饱和电感很小, 对 LC 振荡回路的影响很小; 小电流时电感急剧增大, 抑制励磁电流过零后的下冲幅度。铁氧体磁芯的磁饱和强度较低, 因此在脉冲电源的应用中退饱和的电流值也较低, 对励磁电流波形的影响比较小。当励磁电流下降到零附近, 电抗器退出饱和, 电感急剧增大。增大的电感可有效降低振荡电流的下降速率, 有利于缩短晶闸管和二极管的关断时间, 同时也减小了电流下冲的反向电流尖峰幅度。

2 测试结果和分析

2.1 测试方法

脉冲电源测试触发信号由信号发生器生成的 $0.2 \text{ Hz}/5 \text{ V TTL}$ (Transistor-Transistor Logic)信号触

发。充电电源恒流充电时将充电电流设为 20 mA , 测试时将充电电压从 $0\text{--}700 \text{ V}$ 逐渐调高。采用美国 LeCroy 104MXs 型示波器和 LeCroy 100:1 型高压探头测量储能电容电压, 探头分别接在图 1 中 A 点和电源的地。采用 Pearson101 电流互感器置于图 1 中点 B 测量输出脉冲电流, 信号转换率为 $0.01 \text{ V} \cdot \text{A}^{-1}$, 信号直接从机箱上 BNC (Bayonet Nut Connector)插座引出到示波器监测。电源测试步骤如图 3 所示。

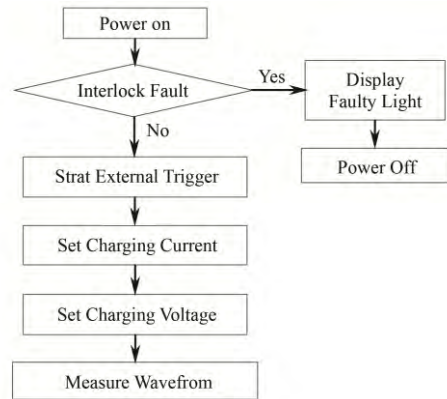


图 3 脉冲电源开机测试流程

Fig.3 Testing process of pulsed power supply.

2.2 测试结果分析

将脉冲电源加在 bump 磁铁两端, 测得励磁电流波形如图 4 中波形所示。脉冲电流峰值为 3727 A , 反冲电流峰值 394 A , 反向电流尖峰占励磁峰值电流幅值 10.6% 。脉冲宽度可调范围为 $[36 \mu\text{s}, 46 \mu\text{s}]$ 。反向恢复时间约为 $3.5 \mu\text{s}$ 。由于脉冲电流脉宽很短, 可将电流下降率近似为直线下降率: $di/dt=2I_0/T_d \approx 200 \text{ A} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ 。

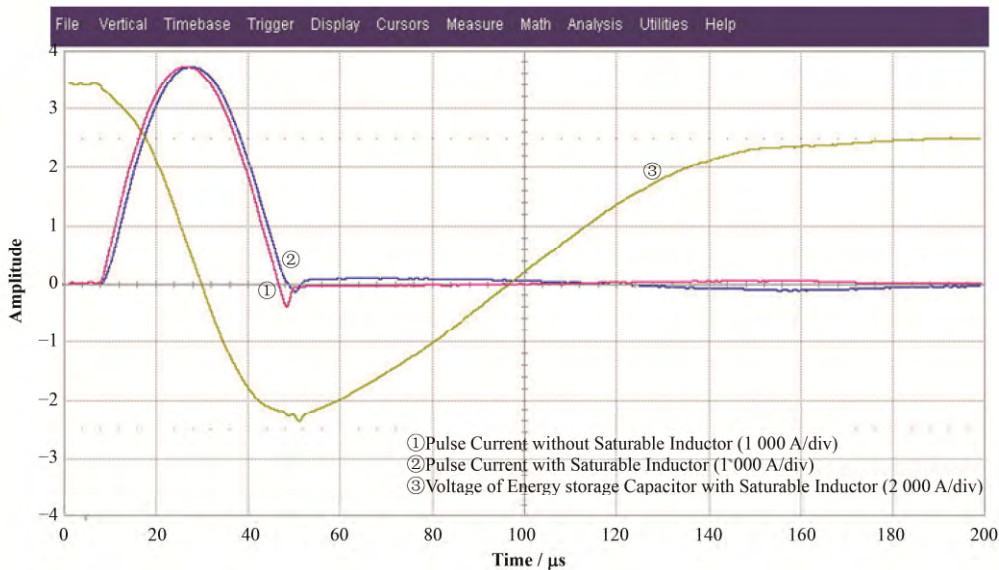


图 4 未串联饱和电感和串联饱和电感后励磁电流波形对比和串联饱和电感后储能电容电压波形

Fig.4 Waveform comparison between pulse current without saturable inductor and with saturable inductor, voltage of energy storage capacitor with saturable inductor.

查阅快恢复二极管 M1502N250 的性能参数，当通过快恢复二极管 M1502N250 峰值电流约为 4 kA，电流变化率为 $200 \text{ A}\cdot\mu\text{s}^{-1}$ 时，反向恢复电流 $I_{rm}\approx 440 \text{ A}$ ，恢复时间 $t_{rr}\approx 3.2 \mu\text{s}$ 。由此可知实验中测得的励磁电流反冲电流峰值和反向恢复时间由快恢复二极管 M1502N250 的特性决定。

在快恢复二极管阴极串联饱和电抗，测得励磁电流波形如图 4 中波形 所示。脉冲峰值电流 3 732 A，反冲电流 140 A，反向电流尖峰占励磁峰值电流幅值从 10.6% 下降到 3.75%。储能电容上电压为波形 ，电压可回授至 500 V 左右。如果饱和电抗器的非饱和电感容量更大一些，还可以进一步抑制反冲幅度。在不影响输出电流脉冲波形的情况下，合金纳米磁芯^[12]或许是更好的选择。

在电源稳定运行 1 h 后，综合测量脉冲电源的性能参数，测试结果表明，当励磁电流峰值为 3 732 A 时，励磁电流触抖动优 $\pm 20 \text{ ns}$ ，励磁电流峰值重复稳定度优于 0.05%，满足应用要求。

3 结语

本文介绍了用于上海质子治疗装置同步储存环注入系统凸轨磁铁脉冲电源的研制。通过整机测试，各参数指标符合要求且能够长期稳定运行。实验测试饱和电抗器对抑制脉冲电流下冲有明显作用。设计的脉冲电源电路兼容性好，冗余量大。脉冲宽度可以精确调节，峰值电流可调，实际设计参数可运行更高的峰值电流(10 kA)。在适配合适的饱和电抗器后，可以完全抑制励磁电流反冲波形。能量回授电路在这台电源中节约的能量不大，如果该方法在高重复频率、更大电流的大功率脉冲电源中应用将有可观的节能效果，可降低对充电电源的功率要求。

参考文献

- 1 Newhauser W D, Zhang R. The physics of proton therapy[D]. UK: Institute of Physics and Engineering in Medicine, 2015. DOI: 10.1088/0031-9155/60/8/R155
- 2 刘世耀. 质子和重离子治疗及其装置[M]. 北京: 科学出版社, 2012
LIU Shiyao. Proton and heavy ion therapy and its device[M]. Beijing: Science Press, 2012
- 3 Marinov K, Clarke J A, Marks N, *et al.* Design, tests and commissioning of the EMMA injection septum[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2013, **701**: 164–170
- 4 Takayanag T, Kamiya J, Watanabe M, *et al.* Design of the injection bump system of the 3-GeV RCS in J-PARC[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2006, **16**(2): 1358–1361
- 5 杨实, 任书庆, 来定国, 等. 大功率高压恒流充电电源研制[J]. 强激光与粒子束, 2015, **27**: 095006. DOI: 10.11884/HPLPB201527.095006
YANG Shi, REN Shuqing, LAI Dingguo, *et al.* High power high voltage constant current capacitor charging power supply[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, **27**: 095006. DOI: 10.11884/HPLPB201527.095006
- 6 王磊, 章程, 高迎慧, 等. 晶闸管串联开关及同步触发系统研制[J]. 强激光与粒子束, 2015, **27**: 115001. DOI: 10.11884/HPLPB201527.115001
WANG Lei, ZhANG Cheng, GAO Yinghui, *et al.* Design of series-connected thyristor switch and synchronous triggering circuit[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, **27**: 115001. DOI: 10.11884/HPLPB201527.115001
- 7 Kunio Koseki. The fast extraction kicker power supply for the main ring of J-PARC[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2013, **729**: 3–7
- 8 Kunio Koseki. Development of the 320 kA pulsed magnetic horn power supply with a novel energy recovery system for the T2K experiment[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2014, **735**: 633–639
- 9 王兆安, 刘进军. 电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009
WANG Zhaoan, LIU Jinjun. Power electronic technology[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2009
- 10 李长兴, 谷鸣, 陈志豪, 等. 脉冲调制器机柜屏蔽效能分析测试[J]. 核技术, 2007, **30**(2): 81–86
LI Changxing, GU Ming, CHEN Zhihao, *et al.* Analysis and measurement of shielding effectiveness of LINAC modulator cabinet[J]. Nuclear Techniques, 2007, **30**(2): 81–86
- 11 Kunio Koseki, Hiroshi Matsumoto. The fast extraction kicker for J-PARC with a novel pulse compression system[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2014, **739**: 63–67
- 12 高适. 非晶纳米晶软磁合金的特性及在电力电子设备中的应用[J]. 磁性元件与电源, 2012, **06**(7): 133–139. DOI: 1606-7517(2012)06-7-133
GAO Shi. The characteristics of a amorphous and nanocrystalline and its application in power electronics devices[J]. Magnetic Components and Power Supply, 2012, **06**(7): 133–139. DOI: 1606-7517(2012)06-7-133