

# 大功率固态脉冲调制器关键技术研究

李 锋 陈志豪 吴勇华

(中国科学院上海应用物理研究所 嘉定园区 上海 201800)

**摘要** 为了满足自由电子激光装置对于直线加速器微波功率源更新更高的性能指标,设计了基于绝缘栅双极性晶体管(IGBT)模块为开关的大功率固态调制器系统。调制器采用感应叠加拓扑结构,设计输出峰值脉冲功率 13 MW,脉冲电压 130 kV,脉冲电流 100 A。详细介绍了大功率调制器的单元电路以及单元模块中关键的辅助电路,包括开关管的保护电路、阻尼吸收回路、去磁电路和补偿电路。利用软件对调制器系统进行模拟仿真,并对可能出现的模块差异性进行比较。结果表明,感应叠加型固态脉冲调制器技术是可行的。

**关键词** 固态调制器, 感应叠加, 单元模块, 绝缘栅双极性晶体管(IGBT)

**中图分类号** TL53

长期以来,大功率脉冲调制器大多采用“线性调制器”的方案,即采用高压恒流电源、氢闸流管、脉冲形成网络(PFN)和脉冲变压器等部件。利用高压电源供电,氢闸流管作为放电开关,然后由脉冲成形网络形成所需的脉冲波形,最后利用脉冲变压器进行升压。但该方案存在脉冲宽度不能自由调节,脉冲顶部有波动;充电电源电压很高(40 kV 以上),稳定性不高;脉冲上升下降时间不够快,效率低,使用寿命有限等不足之处<sup>[1,2]</sup>。

随着电子学技术的发展,特别是绝缘栅双极性晶体管(IGBT)固态开关器件的技术应用愈发成熟,将其应用在调制器上面,使得固态开关脉冲调制器和传统调制器相比具有更多优点:输出脉冲波形的重复频率以及脉宽可以由触发时间进行调节,且重复频率更高<sup>[3]</sup>;使用储能电容或采取补偿电路,使得脉冲底部振荡小,平均功率更大;充电电源电压较低,一般在 2 kV 左右,稳定性更好;采用模块化设计,制造成本更低,系统的可维护性更好<sup>[4]</sup>。该技术不仅能用于高能粒子加速器,还可以用于雷达发射、激光脉冲及工业辐照加速器等领域,前景十分广阔。

## 1 调制器系统设计

感应叠加型调制器最基本的特性是:变压器次级的输出电流等于每个单元模块在初级的输出电流,次级的输出电压则等于每个单元模块初级的输出电压的叠加<sup>[5]</sup>。基于此,采用 7 个相同的单元模块,利用感应变压器进行耦合叠加。其中,感应变

压器由多个环形磁芯组成,共用一匝次级线圈。将叠加后的信号通过一个 1:11 的脉冲变压器进行升压,每个单元模块的输出电压为 1688 V,7 个相同模块进行感应叠加,总的输出为 11.8 kV。再通过升压变压器将信号耦合到负载端,最终负载得到输出电压 130 kV,电流 100 A,脉宽 6  $\mu$ s,重复频率 1000 Hz,脉冲顶部下降小于 0.5% 的脉冲信号。大功率调制器原理,如图 1 所示。

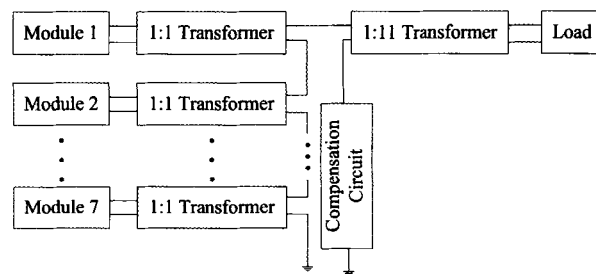


图 1 大功率调制器原理框图

Fig.1 Block diagram of high-power modulator.

为了减小输出信号脉冲顶部的降落,在升压变压器的初级加上一个补偿电路。其中,每个模块利用电流互感器对输出电流进行监测,在负载出现短路或电路故障的情况下能迅速关断触发电路,使模块开关关断,停止输出高压大电流脉冲,保护开关管和关键器件。

## 2 调制器单元模块电路

调制器的单元模块是感应叠加固态调制器的基本组成部分。每个调制器单元模块都是由直流充电

第一作者:李锋,男,1988 年出生,2010 年毕业于武汉科技大学,现为中国科学院上海应用物理研究所硕士研究生,信号与信息处理专业

通讯作者:陈志豪, E-mail: chenzzhihao@sinap.ac.cn

收稿日期:2013-03-12, 修回日期:2013-04-29

电源、储能电容、IGBT 固态开关管及其驱动保护电路、阻尼吸收回路、去磁回路和补偿电路等关键辅助电路, 以及用于耦合叠加的感应变压器组成。单元模块的输出指标是: 电压 1688 V, 电流 1100 A,

脉冲上升下降时间  $\leq 1 \mu\text{s}$ , 脉冲平顶宽度  $6 \mu\text{s}$ , 脉冲重复频率 1000 Hz。调制器单元模块电路原理, 如图 2 所示。

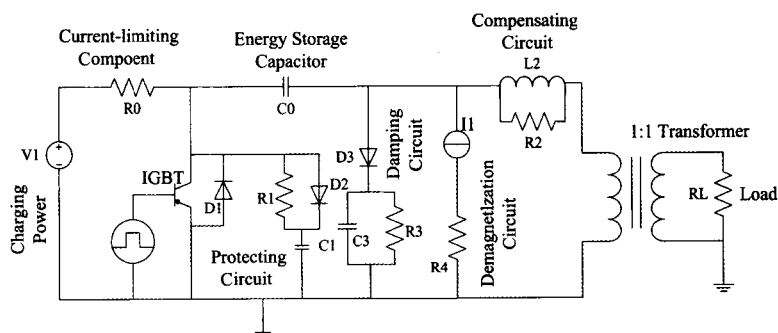


图 2 单元模块原理图  
Fig.2 Schematic of module circuit.

### 3 辅助电路

由于电路中存在着杂散电感和电容以及变压器漏感等, 会引起诸多问题, 包括使信号上升下降时间变慢、开关关断时引起尖峰电压以及电容放电引起的脉冲顶降等<sup>[4]</sup>。另外, 铁心材料的剩余磁感应强度越高, 可能的磁感应增量就越低, 局部磁滞回环的平均脉冲磁导率也就越小, 会导致脉冲波形失真。在模块中加入一些辅助电路可以减小这些影响。

(1) IGBT 保护电路, 用于吸收开关关断时脉冲变压器的漏感和主功率回路分布电感引起的尖峰电压, 保护开关管。当 IGBT 关断时, 缓冲二极管 D2 正向偏置, 缓冲电路处于工作状态, 环路杂散电感中的能量通过二极管 D2 对电容 C1 充电, 这样集电极电流有了分路, 集电极电流能迅速减小, 当 IGBT 导通时, 电容 C1 通过电阻 R1 和 IGBT 振荡放电。可以通过开关管关断时的能量转移关系得到电容值, 同时合理选择 RC, 可以使得电容能在开关管导通时间内完成放电。

(2) 阻尼吸收回路, 二极管 D3 为快恢复二极管, 与 R3、C3 组成阻尼回路, 用于吸收在开关管关断时, 脉冲变压器初级产生的振荡尖峰电压, 以防止过大的反冲电压使得开关管打火。

(3) 去磁回路, 用于增大变压器的脉冲磁感应增量, 提高脉冲磁导率, 减轻脉冲波形的失真程度。由于铁心材料的剩余磁感应强度越高, 可能的磁感应增量就越低, 局部磁滞回环的平均脉冲磁导率也就越小。因此剩余磁感应强度越低, 铁心的利用程度也就越高。降低剩余磁感应强度的有效方法是对脉冲变压器的铁心施加去磁磁场。根据去磁电流的不同, 分为脉动电流去磁与直流电流去磁<sup>[6]</sup>。在大功率线路中, 充电电流很小, 不能满足需要, 需要

用专门的直流去磁电流, 而且电路更易实现和效率更高。

(4) 补偿电路, 补偿电容放电期间脉冲顶部的降落。用电阻 R 与电感 L 并联的网络和负载串联组成的补偿电路等效电路如图 3。在脉冲顶部开始时, 电感 L 中几乎没有电流, 电容 C 中的放电电流全部通过 R, 因而 R 两端的压降较大。随着时间的增长, L 中的电流逐渐增加, 网络有效阻抗减小, 两端电压也随着逐渐减小, 因而负载脉冲顶部降落可以得到补偿<sup>[7]</sup>。

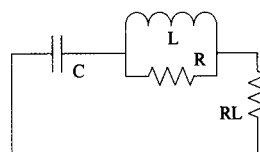


图 3 补偿电路原理图  
Fig.3 Compensation circuit schematic.

### 4 辅助电路功能仿真

利用 Pspice 软件, 对调制器单元模块进行模拟仿真。由于元件库里没有合适的高压大电流 IGBT 开关管, 根据选择器件的参数自建了 3.3 kV 的 IGBT 的 Pspice 模型, 经过验证, 在最大输入电压 2 kV 时 IGBT 满足性能要求, 然后对辅助电路在单元模块中的作用进行了原理性仿真。图 4 为加入 IGBT 保护电路前后, IGBT 集电极电压的仿真对比; 图 5 为加入阻尼吸收电路前后单元等效负载两端电压的仿真对比; 图 6 为加入补偿电路前后单元模块等效负载两端电压的仿真对比。

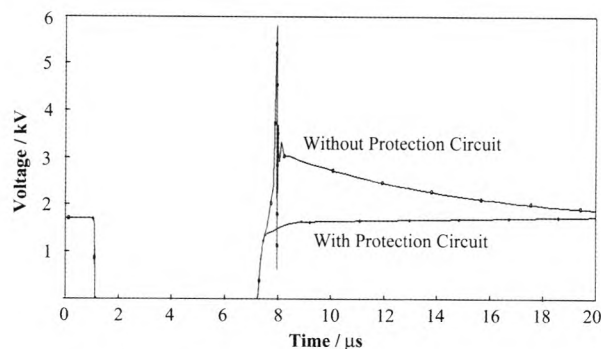


图 4 加入保护电路前后集电极电压

Fig.4 Collector voltage with and without protection circuit.

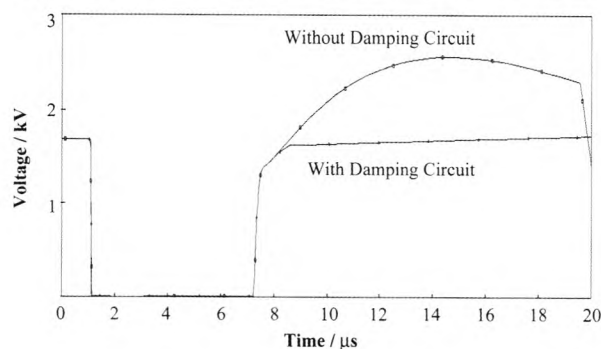


图 5 加入阻尼回路前后的等效负载两端电压

Fig.5 Load voltage with and without damping circuit.

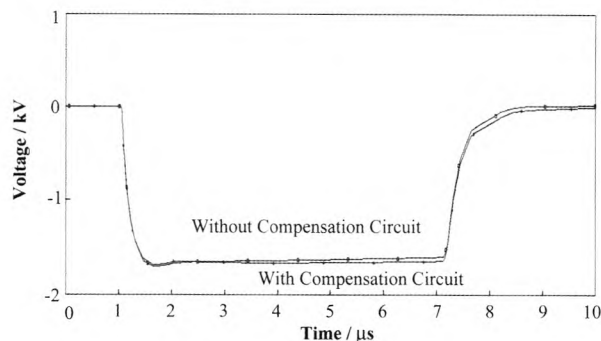


图 6 加入补偿电路前后的等效负载两端电压

Fig.6 Load voltage with and without compensation circuit.

## 5 调制器系统仿真

调制器采用多个模块进行感应叠加, 由于每个模块之间存在差异, 于是对 7 个单元模块组成的调制器系统进行模拟仿真。

(1) 对于充电电源的电压大小不一致, 通过仿真发现, 由于感应变压器的耦合作用, 使得每个模块的电流大小仍保持一致, 但输出电压不同, 最终负载上的电压为所有模块输出电压的叠加, 对信号波形的前后沿没有影响, 也不会对器件产生破坏。

(2) 电容大小的误差使得本模块的放电常数 RC 不同, 影响放电过程中电压下降的快慢, 主要

是脉冲顶部平坦度, 通过仿真发现, 电容大小的差异对本模块和负载上电压大小影响可以忽略, 对器件也不会产生损坏, 因此对电容无特殊要求。

(3) 当模块出现导通触发提前, 会导致其他模块出现脉冲尖峰电流, 时间越长尖峰越大, 同时负载脉宽变窄, 前后沿变慢; 当模块出现导通触发延时, 会导致本模块出现脉冲尖峰电流, 而且延时时间越大, 尖峰电流也越大, 同时使得其他模块前后沿变慢, 负载上前后沿也随之变慢, 大脉冲尖峰电流甚至会打坏开关管, 如图 7。通过仿真模拟发现, 将导通触发误差时间控制在 100 ns 以内, 可以使得脉冲尖峰小于平顶电流, 保护开关管。当模块出现关断延时和提前关断, 会导致脉宽变窄, 后沿变慢, 但对其他器件不会产生影响, 如对脉冲后沿无特殊要求, 则影响可以忽略。

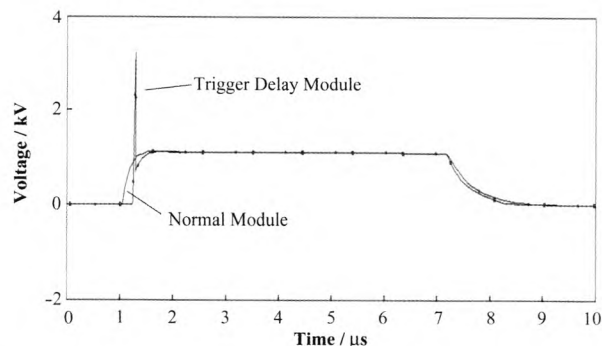


图 7 出现模块导通触发延时和模块正常导通时的集电极电流

Fig.7 Collector current with trigger delay module and normal module.

(4) 当某个模块 IGBT 导通后出现短路, 本模块和最终负载脉冲后沿都将出现严重的拖尾电流, 如图 8。如果 IGBT 在导通之前短路, 则只是负载电压电流值变小, 而对波形无影响, 出现模块 IGBT 短路对其他模块以及器件均无影响。出现某个模块 IGBT 开路时, 本模块集电极电压上升, 会对电源产生影响, 而且调制器无法正常工作, 如图 9。可以在电压源后加一个二极管保护充电电源。

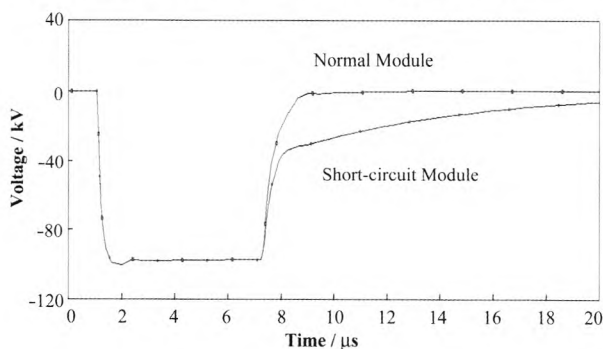


图 8 出现模块短路和正常模块的负载电流

Fig.8 Load current with short-circuit module and normal module.

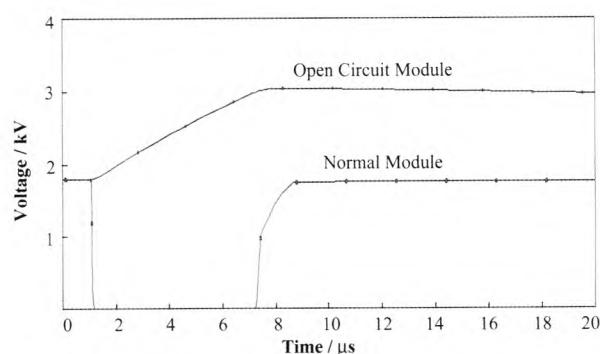


图9 出现模块开路和正常模块的集电极电压

Fig.9 Collector current with open circuit module and normal module.

## 6 结语

通过对感应叠加型固态调制器技术进行研究,在单元模块中加入一些辅助电路,可以有效改善信号波形,同时保护关键器件;充电电源电压和储能电容的大小差异对调制器影响不大,需要控制触发导通时间,避免对器件产生损坏,出现 IGBT 短路影响脉冲波形和电压大小,对其他模块和器件无影响,为防止 IGBT 开路对充电电源产生破坏,需在充电电源后加二极管保护电源。研究结果为以后的工程设计提供了有力支持并具有很好的指导作用。

## 参考文献

- 1 Delamare J E, Cassel R L, Nguyen M N. A solid state modulator for driving SLAC 5045 klystrons[J]. Pulsed Power Plasma Science, Digest of Technical Papers, 2001,

2: 1276-1279

- 2 Beloglazov V I, Dyomin V S, Dovbush L S, *et al.* High voltage modulators based on solid-state elements for linacs (Review)[J]. Nuclear Physics Investigations, 2004, 43(2): 117-119
- 3 Watson J A, Cook E G, CHEN Y J, *et al.* A solid-state modulator for high speed kickers[C]. Proceedings of Particle Accelerator Conference, Chicago, 2001, 5: 3738-3740
- 4 尚雷, 谭泓, 丛晓艳, 等. 大功率 IGBT 在固态脉冲调制器中的应用[J]. 电力电子技术, 2007, 41(4): 56-57  
SHANG Lei, TAN Hong, CONG Xiaoyan, *et al.* Application of 3.3kV/800A IGBT in high power solid state modulator[J]. Power Electronics, 2007, 41(4): 56-57
- 5 杨景红, 郑新, 钱锰, 等. 160 mW 大功率固态调制器的设计与实验[J]. 现代雷达, 2011, 33(9): 72-75  
YANG Jinghong, ZHENG Xin, QIAN Meng, *et al.* Design and Testing of a 160 mW high-power solid-state modulator[J]. Modern Radar, 2011, 33(9): 72-75
- 6 王瑞华. 脉冲变压器设计(第二版)[M]. 北京: 科学出版社, 1996  
WANG Ruihua. Pulse transformer design[M]. Beijing: Science Press, 1996
- 7 魏智. 发射机高压脉冲调制器的设计与实践[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009  
WEI Zhi. The design and practice of transmitter high voltage pulse modulator[M]. Second Ed. Beijing: Publish House of Electronics Industry, 2009

## Research on the key technology of high-power solid-state pulse modulator

LI Feng CHEN Zhihao WU Yonghua

(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Jiading Campus, Shanghai 201800, China)

**Abstract Background:** For construction of free-electron laser (FEL) apparatus, we designed a high-power solid-state modulator system based on the module of insulated gate bipolar transistor (IGBT) switch. **Purpose:** To meet the higher performance requirements of linear accelerator microwave power source for the FEL. **Methods:** The module circuit of the high-power modulator is introduced, as well as the critical auxiliary circuit including protection circuit of IGBT, damping circuit, demagnetization circuit and compensating circuits. **Results:** The whole modulator system is simulated by using software and the module differences that may occurred. The modulator with inductive adder topology can generate a 130 kV, 100 A and 13 MW pulse power. **Conclusions:** The results show that the inductive adder pulse modulator technology is feasible.

**Key words** Solid-state modulator, Inductive adder, Cell module, Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)

CLC TL53