



·脉冲功率技术·

50 MW 速调管用分数比脉冲调制器*

李运海¹, 郭翔², 杨荣¹, 阮征², 童义¹, 谢晓峰¹

(1. 合肥雷科电子科技有限公司, 合肥 230094; 2. 合肥华耀电子工业有限公司, 合肥 230088)

摘要: 研制了一套 S 波段 50 MW 速调管用分数比脉冲调制器, 具有脉冲变压器变比 1:300、初级电源电压 1.25 kV、输出峰值功率 113 MW 等特点。分数比脉冲调制器属于加法器式固态调制器的类型, 其原理为分开铁心使其磁场感应叠加, 再高变比脉冲变压器升压。利用 1:60 的高变比升压脉冲变压器技术, 实现了初级单元电路为较低工作电压、各组件模块化、放电单元接地等优点, 同时实现了脉冲变压器初级低漏感值、次级绕组低分布电容值、放电单元及传输回路低电感值。工程样机测试结果为输出脉冲电压大于 312 kV、脉冲电流大于 360 A、脉冲前后沿小于 1.4 μ s 的高功率全固态脉冲调制器, 为国内工业辐照加速器、自由电子激光加速器等需要高稳定射频功率源的应用提供一种解决方案。分数比脉冲调制器具有输出脉冲宽度可较大范围调节, 可以适应负载阻抗的较大范围变化, 非线性调制器中使用的氢闸流管的寿命限制, 较低工作电压的高运行可靠性等优点。

关键词: 脉冲调制器; 分数比脉冲变压器; 50 MW 速调管; 放电回路; 脉冲前沿

中图分类号: TN787

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.210220

Fractional-turn ratio solid-state modulator for 50 MW klystron

Li Yunhai¹, Guo Xiang², Yang Rong¹, Ruan Zheng², Tong Yi¹, Xie Xiaofeng¹

(1. Hefei LeiKe Electronics Technology Co, Ltd, Hefei 230094, China;

2. ECU Electronics Industrial Co, Ltd, Hefei 230088, China)

Abstract: This paper introduces The fractional ratio pulse modulator for S-band 50 MW klystron, which has the characteristics of pulse transformer ratio of 1 : 300, primary voltage of 1.25 kV and output peak power of 113 MW. The selection of five sub cores, the design of transformation ratio, the calculation of primary voltage and current, and the calculation of average output power are carried out. It is analyzed that the total inductance of single discharge circuit which affects the output front of solid-state modulator should be less than 0.4 μ H. The loop inductance is distributed in the discharge module, the discharge cable, the internal wiring of the pulse transformer and the primary leakage inductance. The low inductance design of the internal loop of the discharge module, the low leakage inductance design of the pulse transformer and the modeling and simulation results are mainly analyzed. The results show that the high-power all solid-state pulse modulator with 312 kV output pulse voltage, 360 A pulse current and less than 1.4 μ s front and back edges can be realized. It has promising applications in the fields of accelerator driving RF power source, high-power radar transmitter and so on, which need high-voltage pulse modulator.

Key words: pulse modulator; fractional-turn ratio pulse transformer; 50 MW klystron; discharge circuit; pulse front

在加速器驱动用微波功率源、高功率雷达发射机等应用中都需要高功率脉冲调制器。高功率脉冲调制器分为线性软管调制器和固态刚管调制器两种^[1], 其中固态刚管调制器在近年来获得了迅猛发展。在国际上, 以瑞士的 ScandiNova 公司为代表的固态调制器产品系列最为齐全, 分为 M 系列磁控管用脉冲调制器和 K 系列速调管用脉冲调制器^[2]。本文研制的分数比脉冲调制器可以为 50 MW 高功率速调管提供脉冲功率。

1 背景介绍

无论是雷达发射机还是加速器中的射频功率放大器, 都要求视频高压脉冲调制器提供合乎要求的高压脉冲。

* 收稿日期: 2021-06-03; 修订日期: 2021-08-03
联系方式: 李运海, liyunhai1315@126.com。

加速器中的功率源脉冲功率可为几 MW~100 MW, 而脉冲调制器峰值功率最大应有 300 MW 以上, 国内常用的日本东芝 E3730A 速调管(S 波段 50 MW)和美国 CPIVKX-8311A 速调管(X 波段 50 MW)参数指标如表 1 所示。

表 1 速调管参数表
Table 1 Klystron parameters

type	beam voltage/kV	beam current/A	frequency/GHz	peak power/MW	average power/kW	gain/dB	efficiency/%	duty/%
E3730A	312	360	2.856	51	10.5	51	45	0.020
VKX-8311A	410	310	11.994	50	5	48	40	0.009

为速调管阴极供电的高压脉冲调制器经历了电感电容谐振充电和氢闸流管放电技术为代表的软管调制器、真空管开关或半导体开关技术的固态刚管调制器的发展历程。固态刚管调制器又分为采用固态开关串并联的直接耦合型全固态调制器、采用固态开关推变压器耦合型全固态调制器、加法器式全固态调制器、Marx 固态调制器等类型^[3]。国内有关加法器式固态调制器的报道, 有中国科学技术大学国家同步辐射实验室尚雷等研制的 2.3 kV, 1.9 kA 单元电路^[4], 南京电子技术研究所杨景红等研制的 80 kV, 2 kA 固态脉冲调制器^[5], 其特点为脉冲变压器的初次级均为 1 匝。

本次研制的分数比脉冲调制器属于加法器式固态调制器的类型, 其原理为利用分开铁心感应叠加, 再高变比脉冲变压器升压, 其输出高压可达几百 kV、电流几百 A 的视频脉冲。研制难点为: 利用 1: 60 的升压脉冲变压器技术, 结合单匝初级绕组和 5 付子磁心组合, 保证初级单元电路均为较低工作电压、模块化组件、单元接地等优点的同时, 需解决高变比脉冲变压器低漏感、次级绕组低分布电容、放电单元及传输回路低电感等技术难点。

2 系统设计

2.1 主要技术指标

本次研制的 S 波段 50 MW 速调管用分数比脉冲调制器指标如表 2 所示。

表 2 脉冲调制器设计参数
Table 2 Design parameters of pulse modulator

pulse voltage/kV	pulse current/A	repetition rate/Hz	flat top pulse duration/ μ s	charge power voltage/kV	pulse flatness/%	pulse-pulse regulation/%	rise time (10%~90%)/ μ s	fall time (90%~10%)/ μ s
≥ 312	≥ 360	50	4	≤ 1.25	1(p-p)	0.1(p-p)	≤ 1.5	≤ 1.5

2.2 主要指标设计

设计 S 波段 50 MW 速调管用分数比脉冲调制器为初级电压约 1 kV 的加法器式全固态调制器^[6], 系统组成原理如图 1 所示。采用分数比脉冲变压器方案, 分为 5 付子磁心, 次级绕组匝数为 60 匝, 脉冲变压器变比为 1: 300, 即初级电压约为 1.04 kV 时, 经过脉冲变压器 1: 300 升压到 312 kV 以上, 以满足速调管阴极电压指标要求。按脉冲变压器变比, 将次级 360 A 脉冲电流折算到脉变初级为 108 000 A, 脉冲变压器初级设计 180 个绕组, 每 3 个绕组对应一路固态开关放电单元, 总对应 60 路放电单元, 则单路放电单元脉冲电流为 1800 A。

如图 1 所示, AC 380 V 三相电给 1.25 kV 充电电源供电, 1.25 kV 充电电源再为 60 路固态开关放电单元充电。每路固态开关放电单元内, 都设置有储能电容、放电 IGBT 开关、续流二极管、充电电阻等。监控系统对 60 路放电单元分别送同步信号, 同步信号频率、脉宽和延时都可单独调节, 结合放电单元内的 IGBT 器件为开启和关断都可控的固态开关器件, 从而实现放电脉宽可以在大范围内调节的固态调制器特性。

脉冲变压器内设置有高压电容分压器 CVT、电流互感器 CT, 分别测量输出脉冲电压和脉冲电流波形。脉冲变压器次级绕组低压端并绕偏磁绕组, 经过偏磁电感隔离高压后, 由低压直流偏磁电源供电。

监控系统设置有本地面板操作和远程上位机界面操作两种功能。同时设置有充电电源过压、放电单元过流、负载高压短路打火、环境过温、冷却水流量偏低等故障保护, 确保调制器本身及对后级速调管负载的有效保护。监控系统满足实验物理和工业控制系统 (EPICS) 的要求, 便于加速器控制系统集中控制。

根据指标要求, 要实现脉冲顶部宽度 4 μ s 时, 根据以往调制器产品经验^[7]脉冲半宽 τ_d 应该达到 6.5 μ s, 按 6.5 μ s 半宽计算调制器输出平均功率

$$P = UI\tau_d f \quad (1)$$

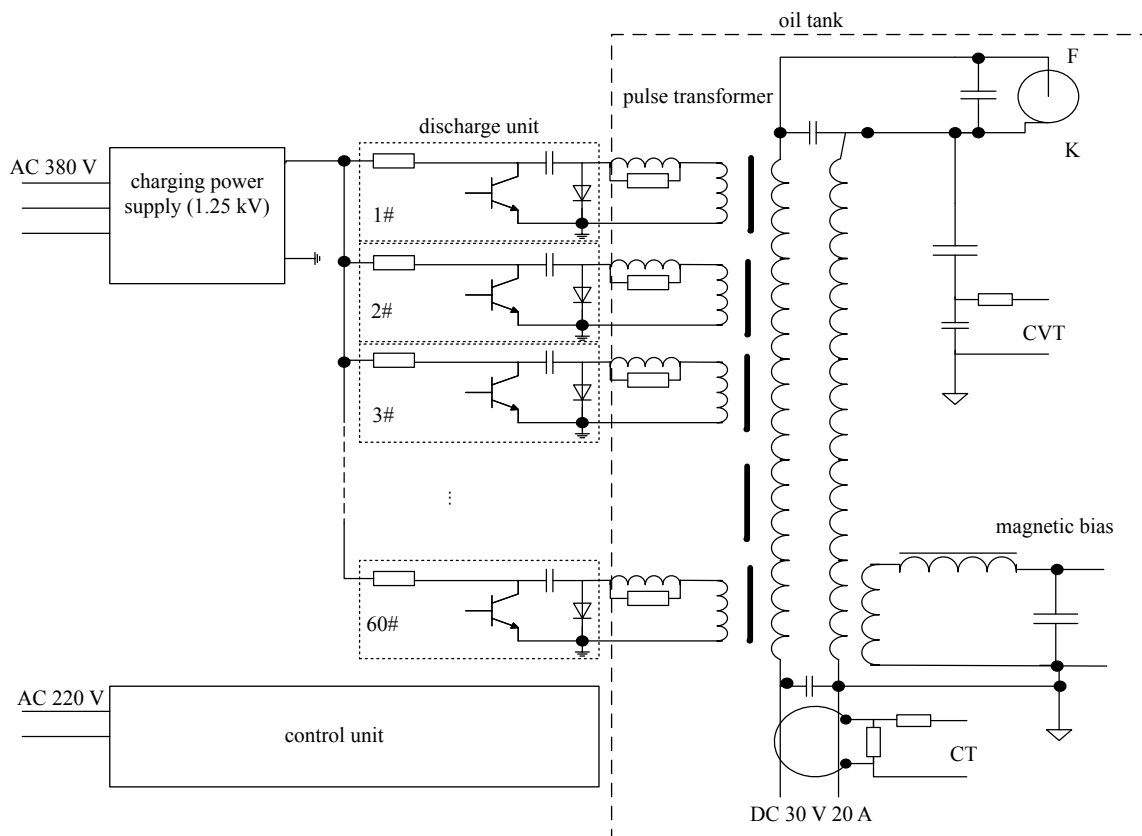


Fig. 1 Schematic diagram of solid state modulator system

图 1 脉冲调制器系统组成原理图

式中： U 为输出脉冲电压； I 为输出脉冲电流； f 为重复频率。计算结果是输出平均功率为 36.5 kW。

2.3 关键技术分析

脉冲调制器的输出脉冲前后沿直接影响射频功率源系统的效率，是脉冲调制器研制的关键指标之一。本固态调制器脉冲变压器的变比高达 1 : 300，为了实现顶宽 4 μs 时对应脉冲半宽小于等于 6.5 μs ，设计目标为脉冲前后沿均应小于 1.5 μs 。

根据设计指标要求脉冲电压为 312 kV，脉冲电流为 360 A，计算负载阻抗为 867 Ω ，折算到单个脉变初级绕组输入端的阻抗为 1.73 Ω ，3 个脉变初级绕组并联后阻抗为 0.58 Ω 。为了实现更快地脉冲上升沿，从理论上应尽可能地压低放电回路的电感。放电回路的电感，分布在放电模块内部、放电电缆、油箱内部连线及脉冲变压器漏感等方面。

放电模块内部采用母排设计方案，从储能电容、IGBT 开关到输出端子处的回路电感设计值小于 0.05 μH ，实物照片如图 2(a)所示。放电电缆采用扁平低电感电缆技术，单根 1.5 m 长电缆及端头安装件的总电感设计小于 0.05 μH 。放电模块接 1.5 m 长电缆后在 0.58 Ω 无感电阻负载上的测试波形如图 2(b)所示，2 通道(红色)为脉冲电流，测量峰

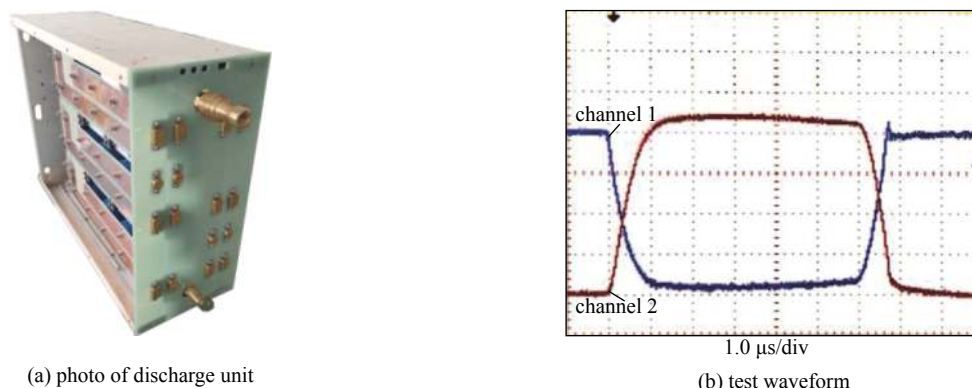


Fig. 2 Photo and test waveforms of discharge module

图 2 放电模块实物照片及测试波形

值电流为 1808 A, 前沿为 804 ns, 后沿为 568 ns。

分数比脉冲变压器的低漏感设计为本调制器的关键技术^[8-9], 其原理结构如图 3(a)所示, 脉冲变压器的磁心被分割为 5 付子磁心, 初级绕组分别绕制在每付子磁心上, 次级绕组包围所有子磁心, 次级绕组的匝数为 60 匝。理论上, 当每个初级绕组同步输入脉冲电压时, 次级绕组上将得到与初级电压之比为 1 : 300 的脉冲电压^[10], 即初次级等效变比为 1 : 300。实际绕制的脉冲变压器初、次级绕组均匀分布于磁心两柱上, 每柱绕 18 个单匝初级绕组, 10 个磁柱绕 180 个单匝绕组; 次级对 5 付子磁心柱全包围, 采用锥形绕组顶端均压环结构形式。

根据带脉冲变压器的固态调制器模型分析, 在脉冲前沿时变压器的励磁电感影响较小, 故变压器可看做开路, 可以忽略, 脉冲变压器及放电电路模型如图 3(b)所示^[7]。 R_o 为脉冲电源的内阻, L_s 为变压器漏感, C_o 为变压器分布电容, R_L 为速调管负载阻抗。

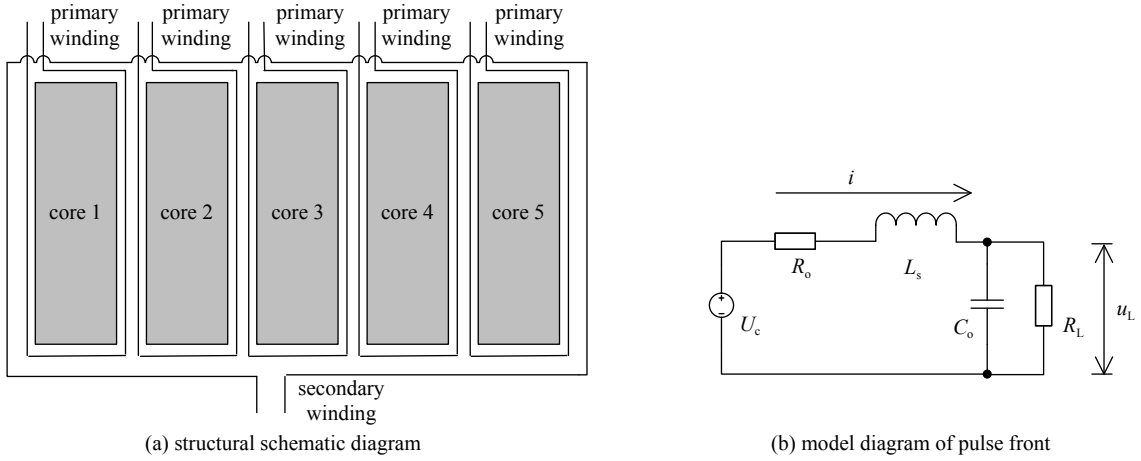


Fig. 3 Structure principle and model diagram of fractional-turn ratio pulse transformer

图 3 分数比脉冲变压器结构原理及模型

速调管在额定工作点时, 其阻抗 R_L 为常数, 则根据图 3(b)等效电路可以列出下面的回路方程

$$U_c = iR_o + L_s \frac{di}{dt} + u_L \quad (2)$$

$$i = C_o \frac{du_L}{dt} + \frac{u_L}{R_L} \quad (3)$$

式中: i 为回路电流; u_L 为负载电压。电路初始条件是 $t=0, u_L=0, du_L/dt=0$ 。

得式(2)和式(3)方程式的解为

$$u_L = \frac{R_L}{R_L + R_o} U_c \left[1 - e^{-\alpha t} \left(\text{ch}\beta t + \frac{\alpha}{\beta} \text{sh}\beta t \right) \right] \quad (4)$$

式中: $\alpha = \frac{1}{2} \left(\frac{R_o}{L_s} + \frac{1}{C_o R_L} \right)$, $\beta = \sqrt{\alpha^2 - \frac{1}{L_s C_o} \left(1 + \frac{R_o}{R_L} \right)}$ 。

若 $\beta^2 > 0$, 是过阻尼的情况, 脉冲上升较缓慢; 若 $\beta^2 < 0$, 则是振荡状态, 脉冲上升较快, 但有 overshoot 现象。令 $\beta = j\omega$, 由式(4)可得

$$u_L = \frac{R_L}{R_L + R_o} U_c \left[1 - e^{-\alpha t} \left(\cos\omega t + \frac{\alpha}{\omega} \sin\omega t \right) \right] \quad (5)$$

引入 δ 参数定义: $\delta = \alpha \sqrt{R_L L_s C_o / (R_L + R_o)}$, 参数 δ 表示出了放电电路的高频特性, 它把调制器的工作状态与脉冲变压器的分布参数 L_s 和 C_o 联系起来。当 $\delta < 1$ 时, 负载电压 u_L 振荡上升, 脉冲前沿过程短, 有 overshoot; 当 $\delta > 1$ 时, 负载电压 u_L 过阻尼上升, 脉冲前沿长, 无 overshoot; $\delta=1$ 是临界状态, 前沿介于前两者之间, 无 overshoot。

根据以上分析, 本次设计单路固态开关放电回路总电感小于 0.4 μH , 放电回路电感详细分配如表 3 所示。

按表 3 的放电回路电感参数及脉冲变压器变比 1 : 300、速调管额定工作点阻抗值 867 Ω , 使用 Saber 软件对脉冲调制器主回路建模仿真。在充电电源电压为 1250 V 时, 调制器输出脉冲电压仿真波形如图 4 所示。输出峰值脉冲电压为 -321 kV、前沿为 1.15 μs 、后沿为 1.25 μs , 仿真结果符合本调制器的设计参数要求。

利用 Maxwell 仿真软件对脉冲变压器模型进行电场仿真, 如图 5 所示; 仿真结果最高电场强度为 15 kV/mm。

表 3 放电回路电感分配表

Table 3 Inductance distribution table of discharge circuit

item	inductance/ μH
discharge unit	<0.05
discharge cable	<0.05
pulse transformer connection	<0.1
pulse transformer leakage inductance (after three coils in parallel)	<0.2

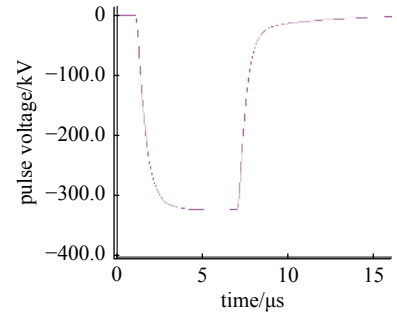


Fig. 4 Simulation waveform of modulator output voltage

图 4 调制器输出仿真波形

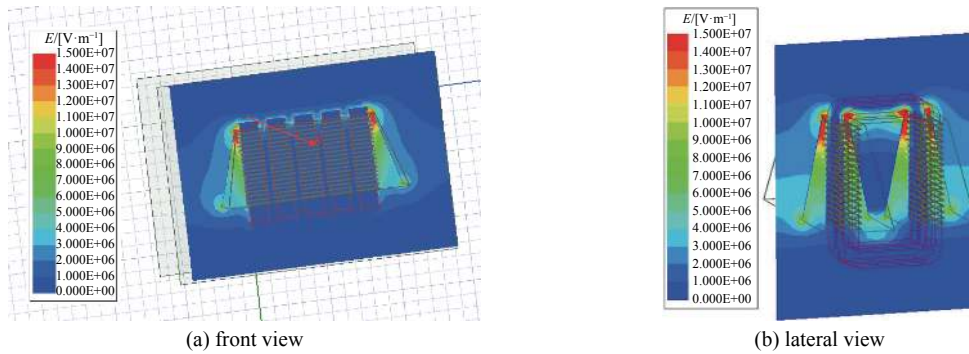


Fig. 5 Electric field simulation of pulse transformer

图 5 脉冲变压器电场仿真

利用 Maxwell 仿真软件对脉冲变压器模型进行磁场仿真, 如图 6 所示; 仿真结果最高磁感应强度为 1.98 T, 初级单匝绕组漏感为 0.43 μH 。

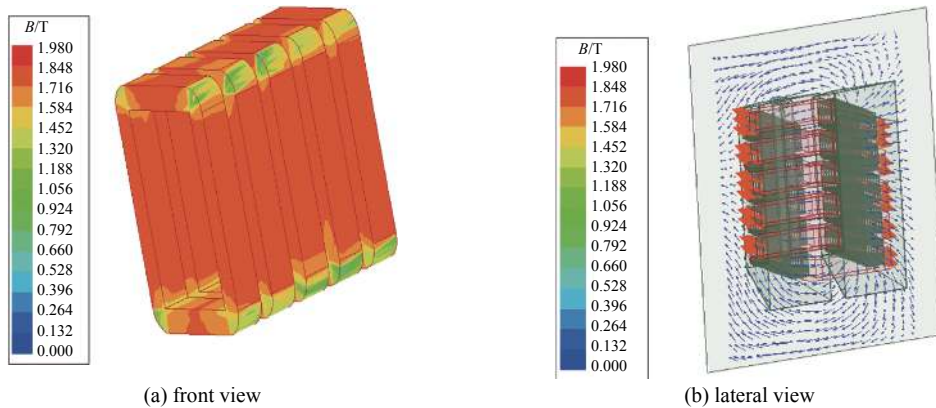


Fig. 6 Magnetic field simulation of pulse transformer

图 6 脉冲变压器磁场仿真

实际安装完成的脉冲变压器照片如图 7 所示, 图 7(a)为内部照片, 图 7(b)为油箱外观照片。整体油箱尺寸为长 1700 mm×宽 900 mm×高 800 mm; 油箱总重量小于 2000 kg。



Fig. 7 Photos of pulse transformer

图 7 脉冲变压器实物照片

3 工程样机测试结果分析

50 MW 速调管用分数比脉冲调制器工程样机研制完成后,参照 S 波段和 X 波段 50 MW 速调管额定工作点的阻抗值,利用高压无感负载进行了实际测试,测试现场照片及主要测试波形如图 8、图 9 所示。

50 MW 速调管用分数比脉冲调制器工程样机测试数据如表 4 所示。

由图 9、表 4 可知,利用类似速调管阻抗变化特性的高压水负载时脉冲上升时间小于 1.4 μs 、脉冲下降时间小于 1.3 μs ,与第 2 节的分析和仿真相吻合。当负载阻抗由 0.80 k Ω 提高到 1.23 k Ω 时,已经出现脉冲上升后顶部过冲。如果运行在 1.23 k Ω 负载阻抗时,需加大放电回路电感,让 δ 接近 1,减小脉冲顶部过冲。



Fig. 8 Photo of engineering prototype test site
图 8 工程样机测试现场照片

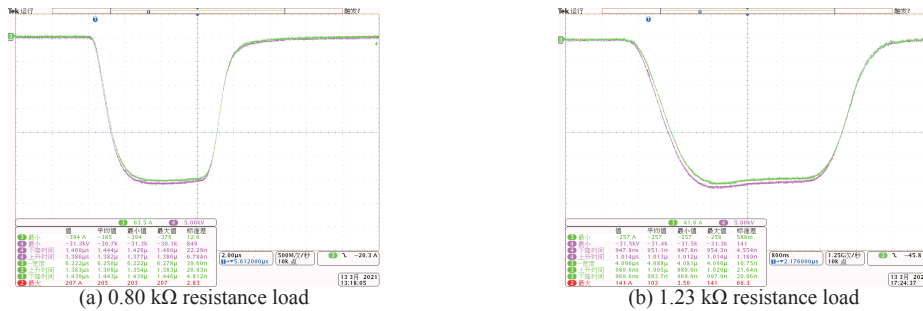


Fig. 9 Test waveforms of engineering prototype
图 9 工程样机测试波形

表 4 工程样机测试数据

Table 4 Test data of engineering prototype

parameter	pulse voltage/kV	pulse current/A	repetition rate/Hz	flat top pulse duration/ μs	rise time (10%~90%)/ μs	fall time (90%~10%)/ μs	pulse top fluctuation/%	pulse top down/%	charge power voltage/kV	discharge pulse current/A
0.80 k Ω resistance load	313	394	50	4.0	1.46	1.39	0.16	2.67	1150	2070
1.23 k Ω resistance load	315	257	10	2.5	0.95	1.01	-	1.8	1100	1380
0.77 k Ω water load	301	393	50	4.3	1.38	1.27	0.48	2.6	1080	2130

50 MW 速调管用分数比脉冲调制器与现有报道的国内外高压脉冲调制器产品^[11-15] 指标对比如表 5 所示。

表 5 测试数据对比

Table 5 Test data comparison

reference No.	pulse voltage/kV	pulse current/A	load impedance/k Ω	peak power/MW	repetition rate/Hz	flat top pulse duration/ μs	rise time (10%~90%)/ μs	fall time (90%~10%)/ μs	charge power voltage/kV	principle
11	325	400	0.81	130	10	2	1.0	1.8	50.0	PFN
12	450	600	0.75	270	50	2.5	1.1	1.7	26.5	PFN
13	450	400	1.13	180	100	2~10	0.5	-	4.5	solid state
14	350	414	0.85	145	120	3.5	1.5	1.0	3.0	solid state
15	80	2000	0.04	160	50	2	0.6	2.0	2.0	solid state
this article	301	393	0.77	118	50	4.3	1.38	1.27	1.25	solid state

由表 5 可知,本文研制的分数比脉冲调制器与其他五种调制器相比,输出峰值功率偏小,脉冲重复频率、脉冲宽度、脉冲前后沿参数相似。但充电电源电压降低到 1.25 kV 时,带来的典型优点为低工作电压带来的高运行可靠性。调制器预期稳定工作时间大于 10 a,没有特殊的短寿命器件,特别适应工业辐照等连续运行的应用场合。

4 结 论

50 MW 速调管用分数比脉冲调制器工程样机测试结果,满足日本东芝 E3730A 速调管(S 波段 50 MW)的工作

要求。与国内普遍使用的 PFN(脉冲形成网络)型线性调制器相比,具有输出脉冲宽度较大范围调节,适应负载阻抗的较大范围变化,无充氢闸流管的寿命限制,低电源工作电压的高运行可靠性,调制器整体体积小、效率高等优点;其缺点为对脉冲变压器的设计要求高,放电回路的电感控制追求最小化,目前国内变压器铁心材料的研制还没有完全解决。在进一步提高脉冲变压器变比及增大放电回路电感后,就可以满足美国 CPIX-8311A 速调管(X波段 50 MW)参数要求。后期在脉冲波形顶部修正,连续稳定运行情况,需要进一步观测分析。

致谢 感谢中科院高能物理研究所何大勇老师对 S 波段 50 MW 速调管用分数比脉冲调制器工程样机测试给予的指导和帮助。

参考文献:

- [1] 郑新,李文辉,潘厚忠. 雷达发射机技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 240-242. (Zheng Xin, Li Wenhui, Pan Houzhong. Technique of radar transmitter[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006: 240-242)
- [2] Crewson W, Lindholm M, Elmquist K. Green pulsed power achieved by efficient solid state pulsed power technology[C]//Proceedings of 2011 IEEE Pulsed Power Conference. 2011: 1471-1473.
- [3] 黄军,戴广明,田为. 几种全固态刚管调制器的对比[J]. 现代雷达, 2010, 32(3): 80-83. (Huang Jun, Dai Guangming, Tian Wei. Comparison of several all-solid-state hard tube modulators[J]. Modern Radar, 2010, 32(3): 80-83)
- [4] 尚雷,李为民,丛晓艳,等. 大功率固态脉冲调制器技术分析[J]. 高压技术, 2005, 31(11): 28-30. (Shang Lei, Li Weimin, Cong Xiaoyan, et al. Study on the technology of high power, solid-state modulators[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(11): 28-30)
- [5] 杨景红,郑新,钱猛. 加法器结构的大功率固态脉冲调制器的研究[J]. 现代雷达, 2009, 31(4): 80-83. (Yang Jinghong, Zheng Xin, Qian Meng. A study on high-power solid-state pulse modulator of adder topology[J]. Modern Radar, 2009, 31(4): 80-83)
- [6] 朱永亮,王玮. 多路初级绕组脉冲变压器固态调制器[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(4): 765-768. (Zhu Yongliang, Wang Wei. Solid state modulator based on multi-primary winding pulse transformer[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(4): 765-768)
- [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: 582, 90-93. (Wei Zhi. Design and practice of transmitter high voltage pulse modulator[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009: 582, 90-93)
- [8] 沈坚,刘超,戴广明. 用于全固态调制器320 kV分裂式脉冲变压器研制[J]. 磁性元件与电源, 2020(5): 10175-10180. (Shen Jian, Liu Chao, Dai Guangming. Development of 320 kV split pulse transformer for all solid state modulator[J]. Magnetic Components and Power, 2020(5): 10175-10180)
- [9] 沈坚,钱猛,汤长岭,等. 400 kV高压脉冲变压器设计与仿真[J]. 现代雷达, 2008, 30(12): 89-91. (Shen Jian, Qian Meng, Tang Changling, et al. Design and simulation of 400 kV high voltage pulse transformer[J]. Modern Radar, 2008, 30(12): 89-91)
- [10] 谭志远,甘孔银,黎明,等. 初次级等效比为1: 43.4分数比脉冲变压器[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(1): 277-280. (Tan Zhiyuan, Gan Kongyin, Li Ming, et al. 1: 43.4 fractional-turn ratio pulse transformer[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(1): 277-280)
- [11] 张建华,尚雷,王旭明,等. 130 MW大功率线型脉冲调制器的设计与研究[J]. 雷达科学与技术, 2013, 11(1): 87-91, 96. (Zhang Jianhua, Shang Lei, Wang Xuming, et al. Design of 130 MW high power pulse modulator[J]. Radar Science and Technology, 2013, 11(1): 87-91, 96)
- [12] 蔡政平,徐旭哲,武志勇. 450 kV高功率速调管调制器系统[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(7): 1677-1681. (Cai Zhengping, Xu Xuzhe, Wu Zhiyong. 450 kV high power klystron modulator system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(7): 1677-1681)
- [13] Qrtiz G, Müsing A, Biela J, et al. A 180 MW, 450 kV solid state modulator based on press pack IGBT technology[C]//Proceedings of 2010 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference. 2010: 303-306.
- [14] de Lamare J E, Cassel R L, Nguyen M N, et al. A solid state modulator for driving SLAC 5045 klystrons[C]//PPPS-2001 Pulsed Power Plasma Science 2001. 28th IEEE International Conference on Plasma Science and 13th IEEE International Pulsed Power Conference. Digest of Papers. 2001: 1276-1279.
- [15] 杨景红,郑新,钱猛,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, 80. (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, 80)