

脉冲调制方式对高功率微波源输出特性的影响分析

唐玉珠

江南机电设计研究所 贵州 贵阳 550009

【摘要】：针对高功率微波源输出性能受脉冲调制方式直接制约，而现有研究多聚焦单一调制方式优化、鲜有多种典型调制方式输出特性系统性对比分析，工程选型缺乏量化数据支撑的实际问题，本文选取硬开关、软开关、线性调频三种工程常用脉冲调制方式，围绕峰值功率稳定性、脉冲波形质量、频率相位特性、系统效率四大核心指标，剖析各种调制方式对微波源输出特性的影响机制；在此基础上搭建X波段高功率微波源仿真实验平台，开展多组对照性能测试，完成各项指标的量化对比与验证。结果表明，软开关调制在功率稳定性、波形保真度及系统效率方面综合表现最优；硬开关调制结构简单、成本低廉，但开关损耗大、波形畸变问题突出；线性调频调制可实现频率捷变功能，仅存在可控范围内的相位抖动。本文明确了三种调制方式的性能差异与适配场景，为高功率微波系统工程化调制方式选型提供了实践参考。

【关键词】：脉冲调制；高功率微波源；输出功率；波形质量；频率稳定性

DOI:10.12417/3041-0630.26.06.048

1 引言

高功率微波技术属于现代电磁工程的重要分支，一般指峰值功率大于100MW、频率范围在1~300GHz之间的相干电磁辐射，在电子干扰、雷达探测、材料加工等领域起着不可替代的作用^[1]。脉冲调制器是高功率微波源的重要配套设备，其工作方式直接决定微波源的输出功率、波形是否完整、频率是否稳定等。目前工程中常用的脉冲调制方式中，硬开关调制结构简单但损耗大，软开关调制可以降低损耗但设计复杂度高，线性调频调制适合频率捷变需求但容易引入相位偏差。现有研究大多侧重单个调制方式的改进，缺少多种调制方式影响输出特性的对比分析。本文通过对三种典型调制方式对高功率微波源输出特性影响规律的理论分析和实验验证，给实际工程选型提供数据支持。

2 脉冲调制与高功率微波源输出特性基础

2.1 典型脉冲调制方式原理

硬开关脉冲调制开关过程中的电压和电流会急剧变化，采用固定频率PWM控制，结构简单、成本低。软开关脉冲调制利用谐振电路使开关器件在零电压或者零电流下通断，从而降低开关损耗和电磁干扰，提高系统的效率。线性调频脉冲调制在脉冲持续时间内线性地改变微波频率，从而实现频率捷变。

2.2 高功率微波源核心输出特性

高功率微波源的输出特性评价主要参照以下几个指标。

(1) 峰值功率稳定性：脉冲峰值功率的波动幅度，反映输出能量的一致性；

(2) 脉冲波形质量有上升沿、下降沿时间、过冲量、顶部平坦度，决定信号时域特性；

(3) 频率与相位特性：频率漂移量与相位抖动，影响信号的频谱纯度与相干性；

(4) 系统效率：微波输出功率与调制器输入功率的比值，体现能量利用效率。

3 典型脉冲调制方式对输出特性的影响分析

3.1 硬开关脉冲调制的影响

硬开关调制的核心问题为开关过程中的电压电流交叠产生的损耗和噪声对输出特性的影响。开关器件反向恢复电流和电压尖峰叠加，造成功率稳定性最大变化幅度可达5%~8%左右，且随开关频率增大而增大。开关速度低，上升沿、下降沿时间一般大于10ns，使得脉冲顶部容易出现削平和过冲，过冲量可达峰值功率的10%~15%，产生谐波失真和互调失真^[2]。电压波动引起电子注参数改变，造成频率漂移量大干±5MHz，相位抖动幅度也大于±3°，干扰了信号的相干性。系统效率开关损耗占总损耗的60%以上，系统效率一般小于70%，散热压力大，重复频率难以提高^[3]。

3.2 软开关脉冲调制的影响

软开关调制利用谐振电路改善开关过程，有效解决了硬开关的损耗和噪声问题，对于输出特性有明显改善。通过调节峰值功率稳定度，零电压、零电流开关降低电压尖峰，供电电压波动范围控制在2%之内，峰值功率稳定度提高到98%以上。开关过程平滑，上升沿和下降沿时间可以缩短到5ns以下，使得脉冲波形过冲量控制在3%以内，波形畸变程度大大降低^[4]。电子注的参数稳定，频率漂移量小干±1MHz，相位抖动幅度小干±1°。系统效率高，开关损耗降低80%以上，系统效率达到85%~90%，散热压力小，可以承受更高的重复频率^[5]。

3.3 线性调频脉冲调制的影响

线性调频调制的优点是频率捷变，在频率变化期间，微波源的电子注同慢波结构的耦合效率出现波动，波动范围约为3%~5%。线性调频会造成脉冲顶部轻微的幅度调制，波形平坦度比恒频调制低。频率捷变速度快，线性变化范围可达几百MHz，相位随频率变化呈线性偏移，抖动幅度约为±2°，需要使用相位补偿来改善。采用软开关拓扑的线性调频调制系统，系统效率可达85%以上。

4 仿真实验验证与结果分析

4.1 仿真实验平台搭建

仿真实验对象是X波段行波管高功率微波源，其主中心频率9.7GHz、峰值功率1.2GW、脉冲宽度100ns、重复频率5Hz。分别搭建硬开关、软开关、线性调频三种脉冲调制实验平台，主要设备有示波器（带宽1GHz）、频谱分析仪（频率范围0~20GHz）、功率计、高压脉冲电源。

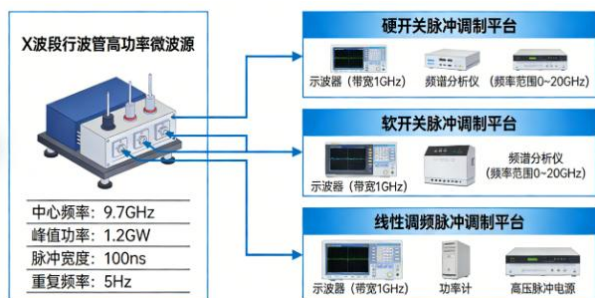


图1 仿真试验系统

4.2 仿真测试指标与结果

对三种调制方式的主要输出特性进行测试，测试指标涵盖峰值功率波动幅度、上升沿时间、过冲量、频率漂移量、相位抖动幅度及系统效率，具体测试结果见表1。软开关调制的峰值功率波动幅度、频率漂移量、相位抖动幅度均最小，上升沿时间最短、过冲量最低、系统效率最高；硬开关调制的峰值功率波动幅度、频率漂移量、相位抖动幅度、过冲量均最大，上

升沿时间最长、系统效率最低；线性调频调制的各项指标介于软开关与硬开关调制之间，系统效率达到86%。

表1 测试指标与结果

调制方式	峰值功率波动幅度	上升沿时间	过冲量	频率漂移量	相位抖动幅度	系统效率
硬开关	6.8%	12ns	12%	5.2MHz	3.5°	68%
软开关	1.7%	4.5ns	2.8%	0.9MHz	1.2°	87%
线性调频	3.9%	5.2ns	3.5%	1.8MHz	2.1°	86%

4.3 结果分析

软开关调制在峰值功率稳定性、波形质量、效率方面最好，是工业加工、连续波雷达等场合最佳选择。硬开关调制结构简单、成本低，但是功率稳定性和效率较低，只适合对性能要求不高的低成本应用场景。线性调频调制在保持高效率的基础上实现频率捷变，频率漂移和相位抖动都在可控制范围内，适合于电子对抗、频率捷变雷达等对频率变化有要求的场合。

5 结论

本文对硬开关、软开关、线性调频三种脉冲调制方式对高功率微波源输出特性的影响进行了系统分析，并通过仿真实验验证。研究发现，软开关调制在峰值功率稳定、脉冲波形品质和系统效率方面综合效果最好，是高性能高功率微波系统最佳选择；硬开关调制适合低成本、低性能需求的场景；线性调频调制具有频率捷变的特点，可满足电子对抗、雷达等特殊应用需求。实际工程中，要依照应用场景的性能要求和成本预算，恰当选取脉冲调制方式。

参考文献:

[1] 张帆,田川,马世川,等.一种紧凑型宽带高功率微波源设计与测试研究[J].强激光与粒子束,2023,35(02):77-81.
 [2] 陈彬,万红,华叶.高功率微波源用电子收集极材料:强流高能电子束轰击下的物理效应及对材料性能的要求[J].材料导报,2017,31(07):108-113.
 [3] 张亦弛,蔡军,冯进军.高功率微波源的硬管化技术分析[J].真空电子技术,2016,(06):20-26+71.
 [4] 宋志敏,孙钧,曹亦兵,等.高功率微波源中强场击穿机理探讨[J].现代应用物理,2016,7(01):26-30.
 [5] 纪安,孙方礼,张建华.高功率微波源四极管发射机设计与研究[J].雷达科学与技术,2016,14(01):95-99+106.