

文章编号: 1001-4322(2005)04-0559-05

SES 微波脉冲压缩系统瞬态特性的模拟研究*

陶小魁, 何志文, 邢庆子, 童德春

(清华大学 加速器实验室, 北京 100084)

摘 要: 通过 MATLAB 编程, 实现了储能切换(stored energy switch)方式产生高功率微波脉冲瞬态响应过程的模拟。程序可用于研究微波压缩系统的功率增益、储能转换效率及脉宽压缩比等主要指标与系统开关耦合腔的固有品质因数、输入与输出耦合系数的关系; 并可用于对工作频率失谐、“开关”导通前的泄漏及“开关”启动时间的影响等进行分析, 输出瞬态响应过程图像。

关键词: 储能切换(SES); 微波脉冲压缩; 瞬态响应; MATLAB
中图分类号: TN015 文献标识码: A

开关储能切换法(stored energy switch)是应用较为广泛的一种脉冲压缩技术, 用于将较低功率的宽脉冲微波在谐振腔内储能, 再通过切换开关快速放能, 获得脉宽被压缩的高峰值功率的微波脉冲。

SES 系统如图 1 所示。高功率微波压缩技术的主要指标是功率增益 $M = P_c / P_0$ 、储能转换效率 $\eta = P_c \tau_c / P_0 \tau_0$ 、及脉宽压缩比 $C = \tau_c / \tau_0$ 。其中 P_0, τ_0 为微波源输入的矩形脉冲功率和脉冲宽度; P_c, τ_c 为压缩后输出的峰值功率和脉冲宽度。系统可能达到的指标与所用储能腔的结构及其具有的功率特性有关, 也和实际采用的开关技术的水平有关^[1,2]。

R. A. Alvarez 等人讨论了 SES 系统储能和相关的量与时间的关系以及储能以什么样的方式依赖于源对腔的耦合等问题^[3~5], 但其模型为单口耦合腔, 并且没有考虑微波功率源的频率失谐。

本文采用图 2 所示的传输型双口耦合腔等效电路分析系统的工作特性, 仅就主要指标 M, η 及 C 与储能开关耦合腔的固有品质因数 Q_0 、输入与输出耦合系数 β_1, β_2 的关系进行分析; 通过 MATLAB 编程模拟 SES 方式的瞬态响应过程, 并给出直观的图像。软件对系统工作频率失谐、“开关”导通前的泄漏及“开关”启动时间的影响也能进行分析探讨。

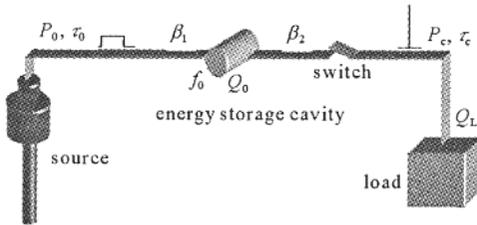


Fig. 1 Representative circuit of pulse compression system
图 1 SES 系统示意图

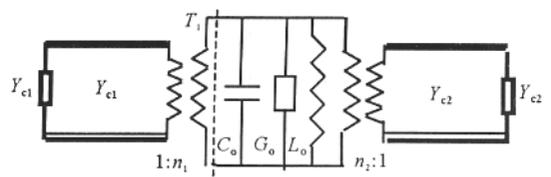


Fig. 2 Equivalent circuit of two-port coupled resonant cavity
图 2 传输型双口耦合腔等效电路

1 系统等效电路及 SES 压缩系统瞬态方程的建立

图 2 所示等效电路中储能腔等效为并联谐振回路; 分别经无损变压器网络通过特性导纳为 Y_{c1} 和 Y_{c2} 的馈电波导与匹配源和匹配负载耦合。具有下列参量定义及关系式^[6,7]

$$\omega_0 = 2\pi f_0, \quad P_d = \frac{\omega_0 W}{Q_0}, \quad P_{c1} = \frac{\omega_0 W}{Q_{e1}} \beta_1 P_d, \quad P_{c2} = \frac{\omega_0 W}{Q_{e2}} = \beta_2 P_d, \quad Q_L = \frac{Q_0}{1 + \beta_1 + \beta_2} \quad (1)$$

式中: f_0, Q_0 是储能腔的固有谐振频率和品质因数; W 是腔内储能, P_d 是腔壁损耗功率; P_{c1}, P_{c2} 分别为腔向输入端和输出端辐射的功率; Q_{e1} 和 Q_{e2} 分别是输入及输出回路外观品质因数; Q_L 是负载品质因数, β_1, β_2 分别为

* 收稿日期: 2004-07-13; 修订日期: 2004-11-26

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 陶小魁(1973—), 男, 硕士, 从事加速结构及微波技术研究, 清华大学工程物理系加速器研究室讲师; E-mail: taoxk@mail.tsinghua.edu.cn.

输入及输出耦合系数。

设功率源输入频率为 ω , 脉冲功率为 P_0 、脉宽为 τ_0 , 在 $t \leq \tau_0$ 系统储能过程中, 根据能量守恒定律, 应有下列关系成立

$$P_{in} = P_d + P_{e2} + \frac{dW}{dt} = P_0 - P_r, \quad P_{in} = (1 - |\Gamma|^2)P_0 \quad (2)$$

式中: P_{in} 是进腔的功率; P_r 是输入端的反射功率; Γ 是输入回路的反射系数, 可通过失谐短路面归一化输入导纳 y_{in} 的关系导出

$$\begin{aligned} \Gamma &= \frac{1 - \tilde{y}_{in}}{1 + \tilde{y}_{in}} = \frac{[(1-g) - jb]}{[(1+g) + jb]}, \\ \tilde{y}_{in} &= \frac{Q_{e1} P_{in}}{\omega_0 W} + jQ_{e1} \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) = g + jb, \\ g &= \frac{Q_{e1} P_{in}}{\omega_0 W}, \quad b = Q_{e1} \delta f_0 \end{aligned} \quad (3)$$

联立(2),(3)式, 可以推导出储能腔建场的微分方程为

$$\frac{\omega_0 W}{Q_L} + \frac{dW}{dt} - \frac{\omega_0 W}{Q_{e1}} \sqrt{\frac{4Q_{e1} P_0}{\omega_0 W} - (Q_{e1} \delta f)^2} = 0 \quad (4)$$

$\omega = \omega_0$ ($\delta f = 0$) 的谐振工作状态时, 微分方程可简化并有解析解为

$$\frac{dW}{dt} + \frac{\omega_0 W}{Q_L} - 2 \sqrt{\frac{\omega_0 W P_0}{Q_{e1}}} = 0 \quad (5)$$

$$W(t) = \frac{4\beta_1 Q_0 P_0}{(1 + \beta_1 + \beta_2)^2 \omega_0} (1 - e^{-\frac{\omega_0 t}{2Q_L}})^2 \quad (6)$$

我们拟分析更为一般的情况, 由于(4)式不便求取解析解, 因此在 MATLAB 中利用龙格库塔法求数值解, 并可直观地看到上述方程表示的物理过程。

对于 $t \geq \tau_0$, 功率源输出脉冲终结后, 由于 $P_0 = 0$, 微分方程及其解析表达式为

$$\frac{dW}{dt} + \frac{\omega_0 W}{Q_L} = 0, \quad t \geq \tau_0 (P_0 = 0) \quad (7)$$

$$W(t) = W(\tau_0) e^{-\frac{\omega_0 (t-\tau_0)}{Q_L}}, \quad W(\tau_0) = \frac{4\beta_1}{(1 + \beta_1 + \beta_2)^2} \frac{Q_0 P_0}{\omega^2} (1 - e^{-\frac{\omega_0 \tau_0}{2Q_L}})^2 \quad (8)$$

2 SES 瞬态过程分析

设功率源为理想矩形脉冲(P_0, τ_0)的情形, 功率源起始时刻为 $t=0$, 终止时刻为 t_0 ($t_0 = \tau_0$); “放能开关”在 t_s 时刻快速导通, 因此瞬态过程分为三个阶段求解。

系统储能阶段 ($0 \leq t \leq t_s$; $t=0$ 时, $W(0)=0$): 考虑开关未导通, 但输出端可能有泄漏, β_2 取为 β_{20} ($\beta_{20} \ll 1$), $Q_L = Q_{L0} = Q_0 / (1 + \beta_1 + \beta_{20})$ 。

系统放能阶段 ($t_s \leq t \leq t_0$; $t=t_s$ 时, $W(t_s^-) = W(t_s^+)$): 设“开关” t_s ($\leq t_0$) 时刻导通, $\beta_2 = \beta_{2s}$ ($\beta_{2s} \gg 1$), $Q_L = Q_{Ls} = Q_0 / (1 + \beta_1 + \beta_{2s})$ 。

脉冲收尾阶段 ($t \geq t_0$, 功率源关闭, $P_0 = 0$): $Q_L = Q_{Ls} = Q_0 / (1 + \beta_1 + \beta_{2s})$

解得不同阶段腔中储能随时间的变化规律 $W(t)$ 后, 便可按输入耦合系数 β_1 和不同阶段相应的 β_{20} 或 β_{2s} 求得相应的反射功率 P_r 、输出功率 P_{out} (即 P_{e2}) 及储能效率 F, η 等特性。储能效率 $F(t)$ 定义为 t 时刻谐振腔内储能 $W(t)$ 与功率源输出能量 $P_0 t$ 之比; 系统能量转换效率 $\eta(t)$ 则定义为 $W(t)$ 与功率源在脉冲期间总输出能量 $P_0 t_0$ 之比, 即 $F(t) = W(t) / P_0 t, \eta(t) = W(t) / P_0 t_0$ 。

3 MATLAB 编制程序 HPM-MAT 界面

如图 3 所示, 主界面的右边是输入的参数, 包括系统的 Q_0, f_0, β_1 及 β_{20} 和 β_{2s} 以及功率源工作频率 f 、输出脉冲幅值和起止时间 (脉宽) 等。并可用滚动条连续调变开关导通时刻 t_s 。主界面的左边是计算结果图形区。可输出的曲线有 Power Source (P_0), Energy Stored ($W(t)$), Power Reflected (P_r / P_0), Power out (P_{out} / P_0), $W(t) / (P_0 t)$ 和 $W(t) / (P_0 \tau)$ 。“Grid”键用来打开和关闭网格, “Hold All”键用来控制所有图形窗口的重画方式 (在一个窗口中层叠显示多条曲线), 每个图形窗口下面的“New”键用来在新窗口中打开曲线, “Hold”键用来控制该窗口的重画方式。

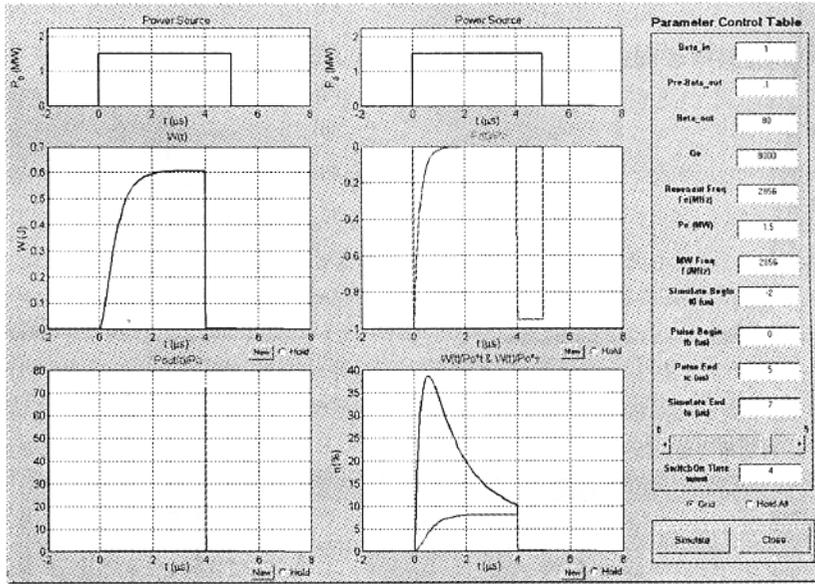


Fig. 3 Main interface of HPM-MAT

图 3 HPM-MAT 程序主界面

4 HPM-MAT 应用举例

利用 HPM-MAT 程序模拟高功率微波压缩系统的瞬态过程,对输出图像进行分析,可以得出系统中影响输出功率增益和储能效率的因数以及影响程度,供系统设计及调配参考。下面举例说明 HPM-MAT 的功能。

1. Q_0, β_1 与储能曲线

假定功率源输入为 $f=2856$ MHz,脉冲功率 $P_0=2.0$ MW,脉宽 $\tau=5 \mu s$ 的微波脉冲。计算系统 Q_0, β_1 取不同值的 $W(t)$ 曲线如图 4、图 5 所示。可见: β_1 固定, Q_0 越高,储能稳态值 W_{max} 越高,但建立稳态场越慢。而 Q_0 固定, β_1 越大,建立稳态场越快, $\beta_1=1$ 时储能稳态值 W_{max} 最大。

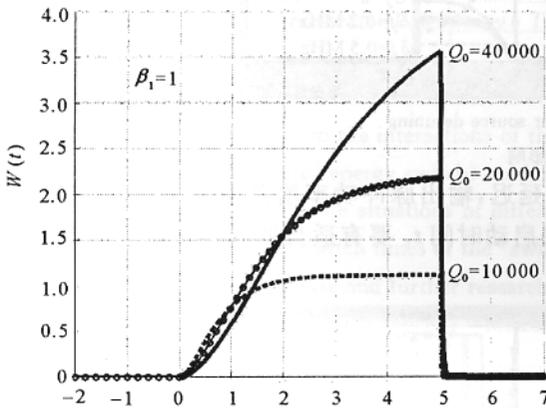


Fig. 4 Energy storage vs time and Q_0

图 4 Q_0 对储能的影响

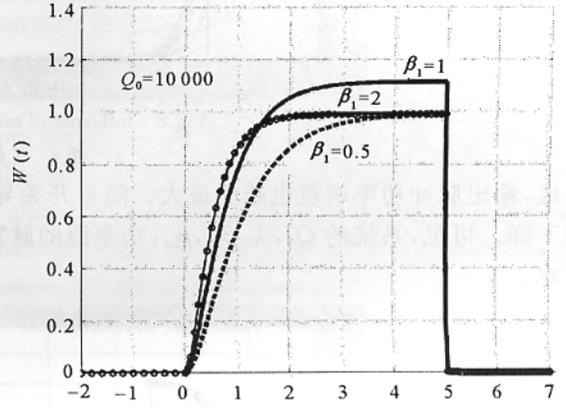


Fig. 5 Energy storage vs time and β_1

图 5 β_1 对储能的影响

2. β_{20}, β_{2s} 与功率增益

改变不同的 β_{20}, β_{2s} ,得到不同的功率增益曲线,如图 6、图 7 所示。可见在其它条件相同的情况下,泄漏 β_{20} 越大,输出脉冲功率增益越小,脉宽越窄。因此要尽可能地降低储能阶段的泄漏。而 β_{2s} 越大,输出脉冲功率增益越大,脉宽越窄。

3. 工作频率失谐的影响

输入微波频率与储能腔的谐振频率偏差取不同的 δf 时,得到图 8 所示的曲线。可见频率偏差越大,储能越小,输出功率增益也会越小,储能效率和能量转换效率越低。

4. “开关”启动时间的影响

如图 9 所示,在微波脉冲开始的一定时间内,开关导通时刻越迟,腔内储能越多,输出脉冲功率增益越大,储能效率和能量转换效率越高。当储能时间达到大约 5 倍时间因子 ($\tau_0 = (Q_0/\omega_0)(1 + \beta_1 + \beta_{off})$) 时,储能趋于

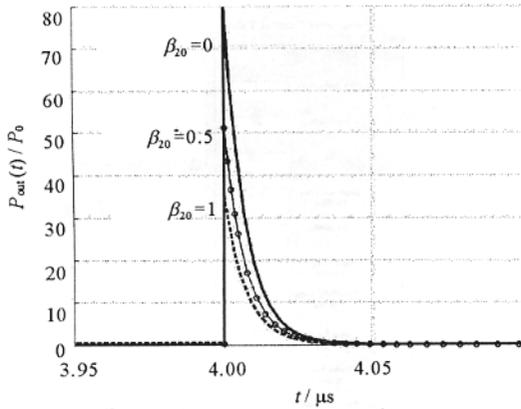


Fig. 6 Power gain vs time and β_{20}

图 6 β_{20} 对功率增益的影响

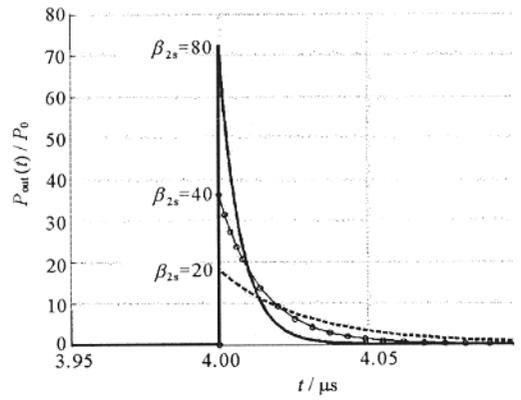


Fig. 7 Power gain vs time and β_{2s}

图 7 β_{2s} 对功率增益的影响

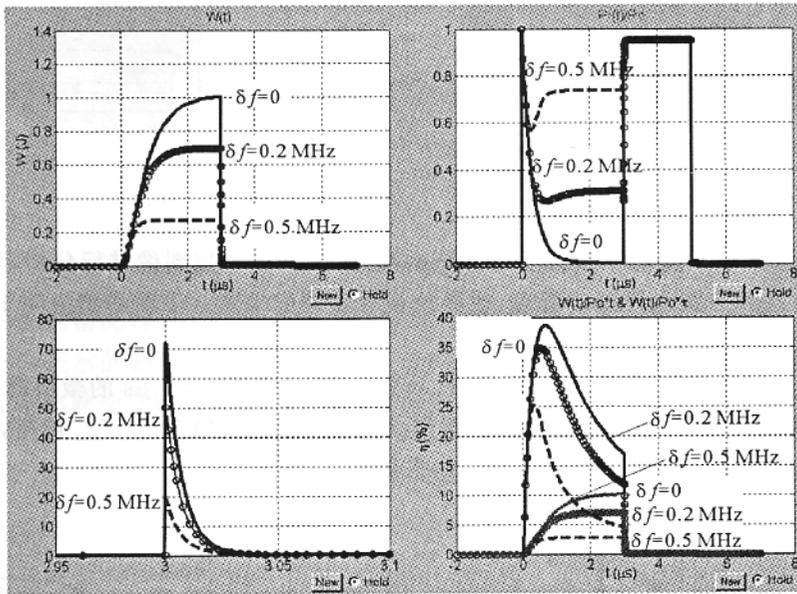


Fig. 8 Influence of microwave power source detuning

图 8 工作频率失谐的影响

最大值,输出脉冲功率增益也趋于最大。随着开关导通时刻的延迟,输出脉冲功率增益变化不大,而储能效率急剧下降。可见,系统的 $Q_0, \beta_1, \beta_{20}, \beta_{2s}$, 功率源的脉宽 τ 及开关启动时间 t_s 要有适当的配合才能取得高增益和高效率。

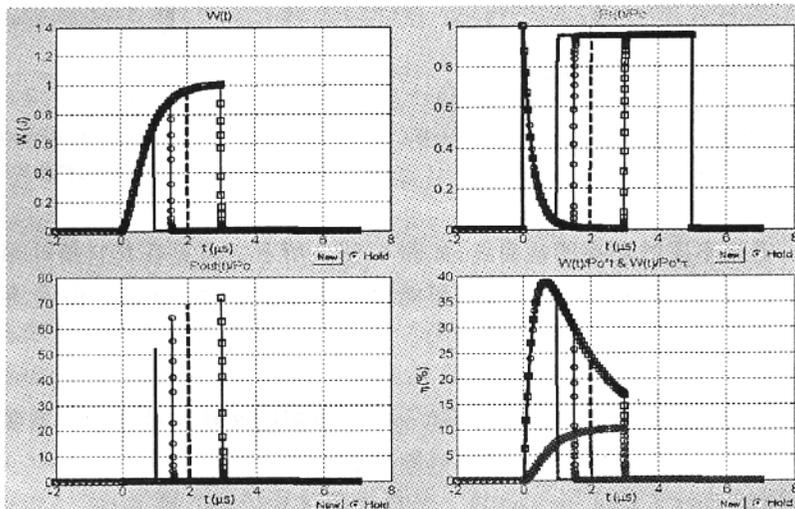


Fig. 9 Influence of switch time

图 9 “开关”启动时间的影响

5 结束语

所编 HPM-MAT 软件可以很好地模拟 SES 方式产生高功率微波的瞬态响应过程,并给出直观的物理图像,有助于对整个过程的理解。下一步正在研究输出波导包括 H-T 分支电路^[8]及可调短路面定位公差对系统特性影响的问题。

参考文献:

- [1] 宁辉,方进勇,李平,等.脉冲压缩方法产生高功率微波技术研究[J].强激光与粒子束,2001,13(4):471—474.(Ning H, Fang J Y, Li P, et al. Experimental research on HPM pulse compression. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, 13(4): 471—474)
- [2] Gekat F, Klingenberg H H. Design of microwave pulse compression circuits for the excitation of pulsed high power gas lasers [A]. Conference Record of the Twentieth Power Modulator Symposium[C]. 1992. 37.
- [3] Alvarez R A, Byrne D P, Joho son R M. Prepulse suppression in microwave pulse compression cavities[J]. *Rev Sci Instrum*, 1986, 57(10): 2475—2480.
- [4] Alvarez R A. Some properties of microwave resonant cavities relevant to pulse compression power amplification[J]. *Rev Sci Instrum*, 1986, 57(10): 2481—2488.
- [5] Alvarez R A, Birx D, Byrne D, et al. Generation of high-power microwave pulses using a spherical superconducting cavity and interference-type switch[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1981, 17(1): 935—938.
- [6] 沈致远等.微波技术 [M].北京:国防工业出版社,1982.(Shen Z Y, et al. Technique of microwave. Beijing: National Defense Industry Press, 1982)
- [7] 王九庆.谐振腔传输特性的研究 [D].北京:清华大学,1992.(Wang J Q. Research on the transmission characteristics in a resonator. Beijing: Tsinghua University, 1992)
- [8] Birx D, Scalapino D. A cryogenic microwave switch [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1979, 15(1): 33—35.

Simulation research on the instantaneous response of HPM pulse compression by SES method

TAO Xiao-kui, HE Zhi-wen, XING Qing-zi, TONG De-chun
(Accelerator Laboratory, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The paper presents the instantaneous response of stored energy, reflected power in the input coupler and output power in the output coupler due to the interactions of the power source and the “switch” under generating high power microwave pulse compression by SES (stored energy switch) method. Meanwhile, the whole process has been simulated by MATLAB code. The program developed can simulate situations of different intrinsic quality factors, input coupling coefficients, output coupling coefficients, power sources and switch times of the “switch” and so on, and display images of the process. It is helpful for understanding the instantaneous response and further research on the technique of HPM pulse compression.

Key words: Stored energy switch (SES); Microwave pulse; Instantaneous response; MATLAB