

文章编号: 1001-3806(2007)05-0522-04

## TEA CO<sub>2</sub> 激光器高频开关充电电源的谐振周期跟踪

胡群力, 左都罗\*, 程祖海

(华中科技大学 光电子科学与工程学院, 武汉 430074)

**摘要:** 为了达到提高高功率 TEA CO<sub>2</sub> 激光器充电电源控制器适应性和可靠性的目的, 采用了对电源使用 DSP 芯片全数字控制, 对电源串联谐振回路的谐振周期使用比较捕获实时跟踪的方法。与并和采样计算方式对比, 在谐振电流信号较强、信噪比较高时, 两种方式均能在 3 个开关周期内跟踪到谐振周期, 但当谐振电流信号较弱、信噪比不高时, 采样计算方式不能实现准确跟踪。结果表明, 比较捕获方式是一种较好的保证串联谐振回路零电流开关的跟踪方法。

**关键词:** 激光技术; 谐振周期实时跟踪; 数字控制; TEA CO<sub>2</sub> 激光器

中图分类号: TN248.2<sup>+</sup>2 文献标识码: A

### Resonant period tracking for high frequency switch mode capacitor charging power supply of TEA CO<sub>2</sub> laser

HU Qun-li, ZUO Du-luo, CHENG Zu-hai

(Institute of Optoelectronics Science and Engineering Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074 China)

**Abstract** Fully digital control implemented by DSP for the capacitor charging power supply of TEA CO<sub>2</sub> laser was studied in order to improve its applicability and reliability. A real-time resonant period tracking scheme of "comparing capture" was proposed, based on which comparing studies was conducted with the scheme of "sampling calculation". Both of them can complete the tracking in 3 switching periods when the resonant current is strong and the signal noise ratio (SNR) is high, but the "sampling calculation" scheme can not realize tracking when the resonant current is weak or the SNR is low. These experimental results and its insensitivity to the waveform distortion of resonance current show that the "comparing capture" scheme is a better tracking scheme to ensure the zero current switching of serial resonant circuit.

**Key words** laser technique; real-time tracking of resonant period; digital control; TEA CO<sub>2</sub> laser

## 引 言

脉冲 CO<sub>2</sub> 激光器, 特别是 TEA CO<sub>2</sub> 激光器, 在工业加工、航天、国防等领域的应用日益广泛, 对激光器性能指标的要求也越来越高。对激光电源的研究也日益深入<sup>[1~4]</sup>。TEA CO<sub>2</sub> 激光器的典型应用之一激光推进, 要求激光器能提供高重复率、高能量的激光辐射, 因此, 激光器的电容充电电源应具有快充电速度、高功率、高效率的特点。在众多的充电电源技术中, 恒流串联谐振充电技术以其结构简单, 可靠性好, 抗负载短路能力强等优点逐渐取代工频 LC 谐振充电技术用于高功率激光器电源<sup>[5]</sup>。随着数字技术的广泛应用, 数字处理器性能的不不断提升, 充电电源的数字化成为高功率脉冲激光器研究的一个重要方向。

目前, 国内高功率 TEA CO<sub>2</sub> 激光器主要采用工频 LC 谐振充电技术, 如中国科学院电子学所 WAN 等人报道的 12kW 脉冲 CO<sub>2</sub> 激光器即采用了这一充电技术<sup>[6]</sup>。近年, 作者实验室对模拟控制的恒流串联谐振充电电源进行了研究, 获得了单模块充电电流 800mA、最高充电电压 50kV、最高平均功率 20kW 的结果<sup>[7]</sup>, 并且在研究中发现模拟控制方法对环境变化、负载及元件变化适应性差、并且参数调节困难。

在模拟控制的串联谐振充电电源研究的基础上, 作者尝试采用 DSP 芯片进行数字控制, 希望借此改善充电电源控制器的适应性、提高充电电源的可靠性。本文中报道了作者在谐振周期自动跟踪方面的研究结果。实现谐振周期自动跟踪, 可以可靠地实施零电流关断 (zero current switching ZCS), 降低开关管的功率损耗, 提高充电电源控制器对谐振回路参数变化、负载变化的适应性, 可以自动将死区时间降到最低, 在保证电源安全工作的同时提高充电速度和放电重复频率以及电源效率。而且适当改变程序, 这一电源控制器即

作者简介: 胡群力 (1982-), 男, 硕士研究生, 主要从事高功率脉冲激光器电源研究。

\* 通讯联系人。E-mail: zuoduluo@hust.edu.cn

收稿日期: 2006-06-20 收到修改稿日期: 2006-08-22

可应用于连续放电激励激光器电源。

## 1 TEA CO<sub>2</sub> 激光电源控制器工作原理

如图 1 所示, 电源采用串联谐振结构, 工作在 ZCS 下。控制器使用 TI 公司 2000 系列 DSP

TM S320LF2407A 作为主控芯片。2407A 的事件管理器 EVB 中的 T<sub>3</sub> 计数器循环增计数, T<sub>3</sub>CNT 计数值与 CM PR<sub>4</sub> 寄存器比较, 改变 CM PR<sub>4</sub> 引脚状态, 产生原始驱动信号, 原始驱动信号经过电路分频、放大形成全桥 IGBT 驱动脉冲。

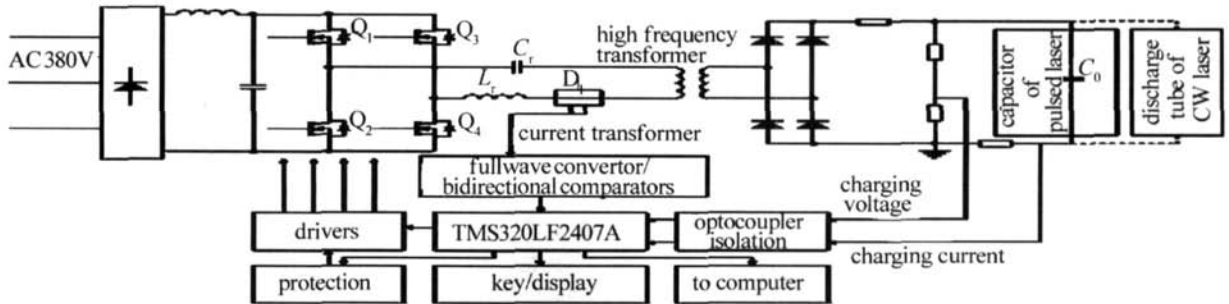


Fig 1 Structure module of TEA CO<sub>2</sub> laser power system

电源控制器使用电流互感器检测谐振电流, 谐振电流检测信号经过全波精密整流或过零比较后, 由 DSP 计算出其谐振周期  $T_r$ 。根据  $T_r$  在 EVB 中对原始驱动信号调整完成谐振周期跟踪 (将计算所得的  $T_r$  加上预设死区时间  $T_d$  写入 T<sub>3</sub>PR 周期寄存器,  $T_r/2$  写入 CM PR<sub>4</sub> 寄存器)。

## 2 谐振周期实时跟踪的实现

随环境温度的变化或工作时间长短的变化, 谐振回路参数和负载参数均可能发生变化, 这将引起谐振周期的变化。在驱动脉宽不能实时变化的情况下只能增加死区时间留出余量。这样不仅降低了充电电流, 而且无法保证 ZCS 工作状态, 使电源能耗增加, 甚至损坏电源。谐振周期实时跟踪, 可以使驱动脉冲脉宽实时与谐振周期相等, 死区时间固定为最小值, 充电电流达到最大。而且对于不同的谐振电路或电源谐振参数的改变 (例如更换充电电容), 无须重新计算测量谐振周期, 设置控制电路参数, 提高了电源控制器的适应性。

作者提出一种利用 DSP 捕获单元的“比较捕获”谐振周期实时跟踪方式, 并和“采样计算”方式进行比较研究。首先给出这两种谐振周期实时跟踪方式的基本原理, 再给出这两种方式的实验结果, 并进行比较分析。

### 2.1 采样计算方式

“采样计算”方式指 HATTRUP 等人提出的等间隔采样、三角函数拟合的谐振周期快速估算方法<sup>[8]</sup>。采样的谐振电流信号经过精密整流电路后, 在等间隔时刻分别采样 3 次。设采样间隔为  $T_s$ , 采样电流值分别为  $I_1, I_2, I_3$ , 由下式可计算出谐振周期值  $T_r$ <sup>[8]</sup>:

$$T_r = \frac{2}{\pi} \times \arccos \left[ \frac{2I_1 I_2 + I_2 I_3}{2 \cdot (I_1^2 + I_2^2)} \right] \times T_s \quad (1)$$

等间隔采样通过设置 EVB T<sub>4</sub>PR 周期值为 T<sub>3</sub>PR 周期值的 1/4, 由 T<sub>4</sub> 计数周期中断事件触发 A/D 转换实现 (见图 2)。

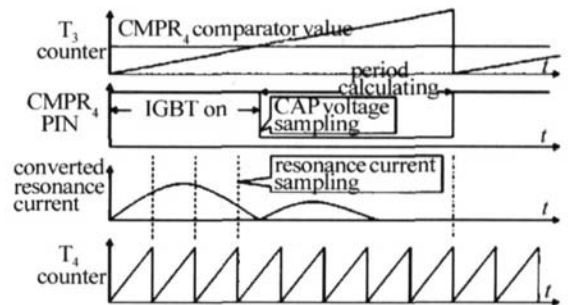


Fig 2 Sketch map of sampling and calculating mode

### 2.2 比较捕获方式

在 DSP 2407A 的事件管理器中, 有 6 个 CAP 捕获单元用于捕获 CAP 输入引脚的变化, 并记录其变化的时刻。EVB 的捕获单元 4 和 5 和 6 对应于捕获输入引脚 CAP<sub>4</sub>, CAP<sub>5</sub> 和 CAP<sub>6</sub>。捕获输入引脚上出现跳变 (可设置为正跳变或负跳变) 时, 将此时计时器的计数值记录在对应的寄存器中, 完成捕获。

采样谐振电流, 送入双向比较电路, 将谐振电流正弦波信号转化为方波信号, 由 CAP<sub>4</sub>, CAP<sub>5</sub> 捕获下降沿, 捕获值即为谐振电流半周期值, 过程如图 3 所示。

图 3a 图 3b 所示分别为初始驱动脉冲脉宽大于、小于谐振半周期的跟踪过程。图 3b 的第 1 次开关, IGBT 处于硬开关状态, 谐振电流在驱动脉冲由高变低后延迟一段时间才能归零, 跟踪可能要经过多个周期才能完成。为了加速跟踪, 对 CAP 寄存器的记录值增加一小量赋给 CM PR<sub>4</sub> 寄存器, 使驱动脉冲脉宽略大于

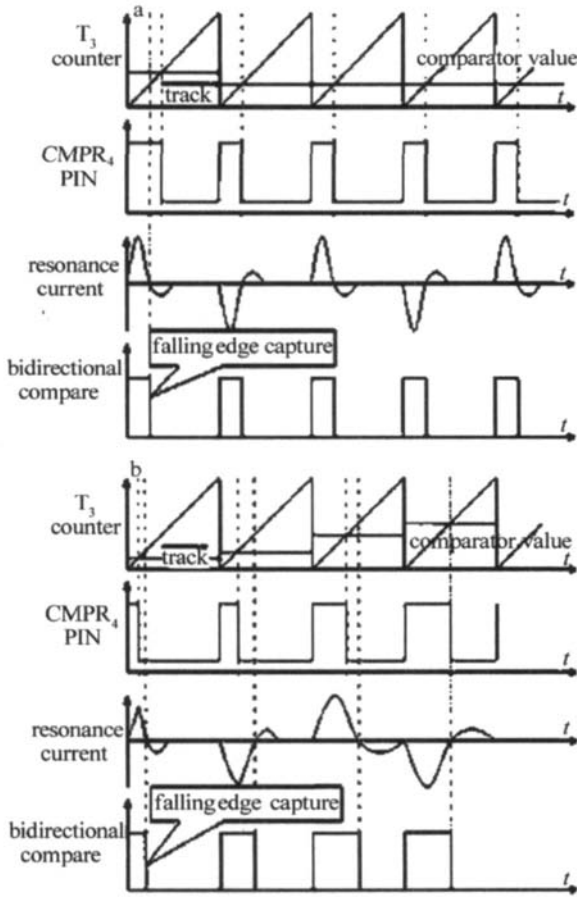


Fig. 3 Sketch map of capture mode

谐振电流半周期的反馈值。

### 2.3 实验结果及对比分析

采集计算方式的理论基础为假定串联谐振电路中所有器件为理想器件, 谐振电流为标准正弦波形。但是导线电阻、IGBT、整流二极管以及电容负载的寄生电阻对谐振电流波形有衰减影响, 使其不是标准正弦波, 计算存在理论误差。采样、整流电路带来的信号延时和相移对谐振周期的计算结果不产生误差, 但计算精度很大程度上受精密整流电路过零判断精度、电路噪声影响, 电路硬件要求较高。

图 4 为采集计算方式的试验记录波形。驱动脉冲

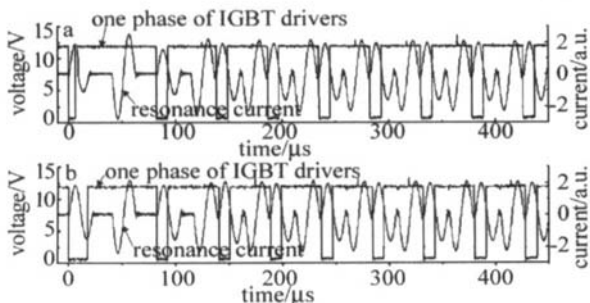


Fig. 4 Waveforms of sampling and calculating mode

初始设置为脉宽  $8\mu s/19.2\mu s$  周期  $44.8\mu s$  经过 3 个周期, 自动跟踪完成。串联谐振电路半周期为  $10\mu s$

最终跟踪到的周期为  $9.8\mu s$

比较捕获方式使用 DSP 的 CAP 端, 硬件结构简单, 双向过零比较电路易实现, 随机误差小。但是 DSP 的驱动脉冲信号发生后经过分频电路、IGBT 响应、比较电路得到的检测信号与原驱动脉冲信号有延迟, 而且 CAP 端检测信号的下降延跳变需要 13 个机器周期。这些都造成比较捕获方式的误差。

图 5 为比较捕获方式的试验记录波形。驱动脉冲初始设置: 脉宽  $8\mu s/19.2\mu s$  周期  $44.8\mu s$  同样经过 3 个周期完成跟踪, 跟踪到的周期为  $11.5\mu s$

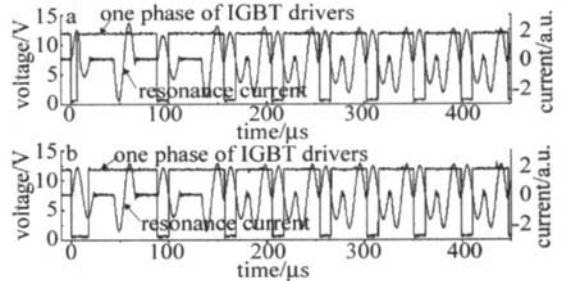


Fig. 5 Waveforms of CAP mode

在谐振电流较小时, 精密整流电路的噪声对采集计算方式精度影响较大, 由图 6 可看出, 经过精密整流电路的谐振电流信号受到干扰有很多毛刺, 计算误差较大, 驱动脉冲脉宽抖动。

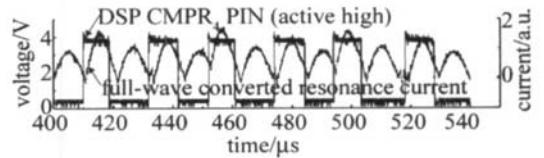


Fig. 6 Waveform of sampling and calculating mode working in low resonant current

比较捕获方式使用双向比较器只对谐振电流信号做过零比较, 在相同条件下受干扰较小, 驱动脉冲脉宽稳定 (见图 7)。

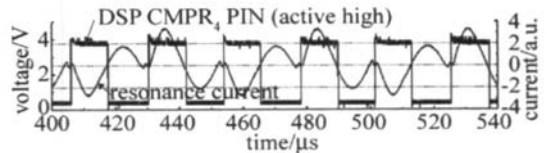


Fig. 7 Waveform of CAP mode working in low resonant current

在电源对高压充电电容充电的过程中, 谐振电流峰值是线性上升的。在充电初期, 谐振电流较小, 精密整流电路后的谐振电流信号会比较微弱, 容易受到干扰影响采集计算方式的跟踪精度。所以, 比较捕获方式比较适用于 TEA CO<sub>2</sub> 激光器高压充电电源的谐振电流周期跟踪。

### 3 结论

研究结果显示, 采样计算和比较捕获两种跟踪方

式均可以在 3 个开关周期内跟踪到谐振周期: 采样计算方法, 能准确地跟踪到谐波的周期, 但对非简谐振荡, 存在理论误差; 比较捕获方式, 跟踪到的周期包含了电路延时, 比实际的谐振周期长 (可通过减少死区时间  $T_d$  进行校正)。但比较捕获方式对谐振电流信噪比要求低、抗干扰能力较强, 更适用于强脉冲放电环境的 TEA CO<sub>2</sub> 激光器高压充电电源。能准确跟踪到串联谐振回路谐振周期的全数字控制方法, 可以使开关管工作在零电流开关状态, 并且可以自动地将开关频率调节至最高值, 保证了充电电源控制器的高适应性和可靠性。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] MA XM, GUO Z J, CAO H B *et al*. 15kW constant voltage & current limiting switching power supply for YAG pulse laser [ J ]. *Laser Technology* 2003 27(5): 466~469( in Chinese).
- [ 2 ] WANG J L, WANG Y P, LI D Y *et al*. A fiber-stated laser optic feedback controlled power supply [ J ]. *Laser Technology* 2004 28(3): 306~308( in Chinese).
- [ 3 ] LIN F C, LI J, PAN H *et al*. The Whole design of the energy module of SG-III [ J ]. *High Voltage Engineering* 2002 28(120): 26~28( in Chinese).
- [ 4 ] ZHAO Z Y, XU Z X, ZHONG H Q. Constant current charging power supply design based on DSP [ J ]. *Power Electronics* 2003 37(6): 50~52( in Chinese).
- [ 5 ] CHEN J, XU Z X, ZHONG H Q. Charging techniques of laser power supply [ J ]. *Telecom Power Technologies* 2002(6): 1~4( in Chinese).
- [ 6 ] WAN Ch Y, YAN N Y, YAN L *et al*. Retating spark gap switched discharge TEA CO<sub>2</sub> laser with average power up to 12kW [ J ]. *Proc SPIE* 2005 5777: 426~432.
- [ 7 ] ZUO D L, LU H, XIE M J *et al*. Key technologies of high power pulsed CO<sub>2</sub> laser [ J ]. *Chinese Journal of Laser* 2006 33(S1): 74~77( in Chinese).
- [ 8 ] HATTRUP C, van der BROECK H W, OSSMANN M. Fast estimation techniques for digital control of resonant converters [ J ]. *IEEE Transactions on Power Electronics* 2003, 18(1): 365~372.

· 简 讯 ·

### 体现刊物特色 把握行业方向

#### 《激光与光电子学进展》杂志特色栏目受到广大专家读者好评

2006年9月,中国科技核心期刊《激光与光电子学进展》杂志全新改版,本着“办一本大家爱看、好看、实用的期刊的办刊方向”,杂志采用全彩色印刷,并推出了“名家讲坛”、“中国光学重大科研成果”、“关注国家中长期发展规划”、“走进实验室”、“市场分析”、“名企访谈”等特色栏目。力求为广大读者呈现一本全新的光电期刊。

杂志改版半年多以来,在“中国光学重大科研成果”中,收到了包括范滇元、张杰、姚建铨、母国光、彭堃嶸等院士的最新科研成果介绍的文章。“名家讲坛”栏目发表了众多研究员和教授亲自撰写的综述文章,如中科院上海光机所徐军研究员的“激光晶体材料的发展和思考”,中科院上海硅酸盐所冯锡淇研究员的“激光陶瓷中的缺陷”,华中科技大学周治平教授的“硅基集成光电子器件的新进展”,南开大学物理科学学院宋峰教授的“Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>共掺磷酸盐玻璃的发光与1.54μm激光性能”等。这些文章充分反映国内外光学发展的最新进展和我国科研工作的最新动态。

“关注国家中长期发展规划”栏目密切联系国家战略发展,挖掘光电行业在未来20年期间可能的突破和发展方向,指引光电子学领域的科技研究人员把握好研究方向及重点,掌握核心技术;光电行业尽快调整产业发展结构,尽可能早日推出实用性强的高端光电子产品;科研开发与产业相互促进,科学家与企业家结合,光电子产业链进一步完善。

《激光与光电子学进展》杂志注重科研、生产、市场的密切联系,以科技创新带动产业发展。借助光学期刊联合编辑部整体优势,通过协办或与展览公司合作的方式参与国内重大光电展览,从而和一批国内外知名光电企业建立了良好的合作关系,国外公司如肖特、相干、普爱纳米等;国内企业如楚天激光、江苏曙光光电、上海嘉光、科艺仪器、瀚宇光纤、高意激光、长春新产业、福建福晶科技、山大鲁能、江西连胜等。《激光与光电子学进展》杂志希望通过积极了解公司的需求,推动科研成果的转化,从而成为光电科研成果转化中的关键一环和重要舞台。

期刊改版以来,《激光与光电子学进展》以其专业的特色赢得了广大专家、读者、同行、企业的大量好评,发行量和文献电子版浏览量不断上升。中国科协科技期刊发展报告(2007年)对刊物的发展给予了很高的评价,称其为“光学界发展的风向标”。

《激光与光电子学进展》杂志和中国光学事业的发展离不开广大专家、读者、同行、企业的大力支持。随着中国光电事业的蓬勃发展,不断提升在国际竞争中的影响力。《激光与光电子学进展》杂志将一如既往地光电事业的发展服务,为构建一个权威、专业、优秀的行业媒体而努力。

