

# 模拟退火算法优化设计钕玻璃放大器氙灯抽运

刘 涛 周申蕾 张攀政 王 利 张军勇

(中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800)

**摘要** 氙灯提供的有效抽运能量决定了钕玻璃中反转粒子的数目。针对氙灯供能的要求,建立了氙灯放电回路与氙灯辐射数值模型。将数值模拟结果与实验结果进行了对比,提出了利用模拟退火算法求解最优抽运状态的电路参数的方法,并模拟计算不同电路参数下氙灯的工作状态。定义了两个更实用的评价参数:有效辐射效率和有效输出光谱效率,用于筛选最佳的抽运能量和进灯功率。计算结果表明,在氙灯参数与工作电压一定的条件下,通过利用模拟退火算法可以快速优化放电回路中的电容、电感参数,以选择最佳的进灯能量,避免抽运带内有效能量份额因光谱蓝移而降低,同时可保证氙灯的使用寿命。

**关键词** 激光光学;高功率激光驱动器;氙灯放电;光谱效率;模拟退火算法;光谱蓝移

**中图分类号** O433 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201434.0214002

## Optimization Design of Xenon Flashlamp Pumping in Nd Glass Slab Amplifier Based on Simulated Annealing Algorithm

Liu Tao Zhou Shenlei Zhang Panzheng Wang Li Zhang Junyong

(National Laboratory on High Power Laser and Physics, Chinese Academy of Engineering Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** For the number of inversion is decided by the effective pumping power provided by xenon flashlamp, the xenon discharge circuit and flashlamp radiation numerical model are built. With the use of the numerical method and the model above, the xenon flashlamp characters under different circuit parameters are calculated and compared to the experimental results. Two more practical concepts effective radiation efficiency and effective spectral efficiency are defined, to select optimal pumping energy and power entering xenon lamp. The results show that simulated annealing algorithm can be used to choose best capacitor and inductance rapidly, when the coefficients of xenon lamp and operating voltage remain constant. And the optimal power entering the lamp is also picked in this way. This method not only avoids the lowering of valuable energy proportion in the pumping area due to the violet-shift in spectrum, but also guarantees the life of the xenon lamp.

**Key words** laser optics; high power laser driver; xenon lamp discharge; spectral efficiency; simulated annealing algorithm; blue-shift in spectral

**OCIS codes** 140.5560; 200.3760; 260.2160

## 1 引 言

钕玻璃高功率固体激光驱动器<sup>[1]</sup>的抽运来源于氙灯放电,足够的有效氙灯抽运能够增加钕玻璃<sup>[2]</sup>上能级反转粒子数,提高放大器的性能,而且合理优化的氙灯及相应的能源配置对于提高驱动器的性价比也至关重要。当前,国际上在建的驱动器规模巨大,放大器设计也采用了多程放大和组合结构的设

计,目的之一就是为了提高驱动器的性价比。与此同时,大口径氙灯的广泛应用对氙灯的结构和工作性能提出了更高的要求。国内外针对氙灯的工作特性建立了相应类稳态放电模型<sup>[3]</sup>,分析电流波形及发光波形和光谱特性<sup>[4]</sup>,对氙灯的辐射光谱包括连续谱和线光谱的特性开展了详细的研究,进灯电功率与辐射光谱间的关系<sup>[5]</sup>及有效抽运量等个体问题

**收稿日期:** 2013-09-05; **收到修改稿日期:** 2013-09-25

**作者简介:** 刘 涛(1989—),男,硕士研究生,主要从事高功率激光放大器方面的研究。E-mail: yiliutao@163.com

**导师简介:** 周申蕾(1977—),男,博士,研究员,主要从事高功率激光光束匀滑和放大器方面的研究。

E-mail: slzhou@mail.shnc.ac.cn

也有了具体分析。

本文从放大器整体设计出发,利用优化算法合理配置供电网络,实现了钽玻璃吸收波形的最佳匹配,实现高的增益输出,提高系统建造性价比。计算参数已定的氙灯所能提供的最大增益,从改变氙灯脉冲形状入手,利用退火算法<sup>[6]</sup>,通过建立高功率脉冲氙灯放电的数值模型,快速优化氙灯的供电网络的电容、电感参数,使氙灯辐射能量和光谱蓝移在整体输出上达到最佳,提高了氙灯的抽运效率以及钽玻璃上的抽运能量密度。

## 2 基本理论

### 2.1 氙灯基本理论

钽玻璃放大器的脉冲氙灯的供电电路包括电感电容(LC)供电网络和预电离电路,预电离电路是为了提高电容储能的利用率,这里不做详细说明。图1为氙灯供电网络示意图。

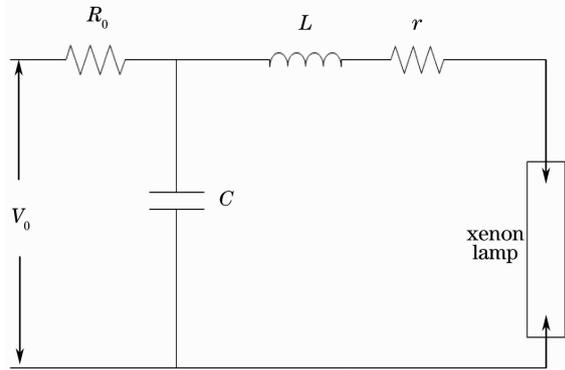


图1 氙灯放电回路示意图

Fig. 1 Schematic of xenon flashlamp circuit

图1中  $r$  为回路中由导线、氙灯电极以及接触电阻引入的回路损耗,  $V_0$  为电容的充电电压,  $R_0$  为充电电阻,放电回路中的电流满足<sup>[7-8]</sup>

$$L \frac{di}{dt} + K_0 |i|^{1/2} + \frac{1}{C} \int_0^t i dt + ri = V_0. \quad (1)$$

为了防止放电回路中的电流发生震荡、保证较高的峰值以及避免过长的延续时间,设计的放电回路要处于临界阻尼状态。同时要保证氙灯的负载系数在一定的范围之内,负载系数由输入氙灯的能量和氙灯单发爆炸能量的比值决定。

氙灯辐射出的能量由抽运带、紫外区、红外区三部分能量组成<sup>[9-10]</sup>,其中抽运带内辐射出的功率密度求解最为复杂,它直接关系到氙灯抽运的效率以及钽玻璃片表面接收到的能量。氙灯在抽运带内辐射的功率密度为

$$P_{\text{pump}} = \int_{0.4}^{1.0} I(\lambda) d\lambda. \quad (2)$$

式中  $I(\lambda)$  为光强,  $\lambda$  为光波长。氙灯的进灯功率和经反射重回氙灯的光线数目决定了灯内等离子体的不透明度,即氙灯等离子体的吸收系数,这里忽略反射回氙灯光线的影响。氙灯抽运带内的吸收系数为  $\alpha(\lambda) = [\alpha_c(\lambda) + \alpha_l(\lambda)]M(i, d, p)$ , (3) 式中  $M(i, d, p)$  为标定函数,依赖氙灯工作状态,用以确定电流、气压以及内径对氙灯吸收-发射系数的影响,  $\alpha_c$  与  $\alpha_l$  分别代表光谱吸收的连续曲线和离散线,均为固定的与波长有关的表达式。

根据基尔霍夫定理,温度为  $T$  观察方向长度为  $l$  的等离子体辐射强度为

$$I(\lambda) = \{1 - \exp[-\alpha(\lambda)l]\} I_B(T, \lambda), \quad (4)$$

式中  $I_B(T, \lambda)$  为普朗克黑体辐射函数。

### 2.2 改进的模拟退火算法

模拟退火算法是在设定的一个或者多个自变量范围内随机搜索,寻找满足条件的最佳优化组合的算法。它应用广泛,不易陷入局部最优的陷阱,且不易受初始解限制<sup>[11]</sup>。对模拟退火算法进行了改进,过程如下:

1) 设定初始解  $[L_0, C_0]$  (它是两个变量的组合,确定初始温度与最低温度即控制参数的最大值与最小值),每个控制参数下随机搜索的次数为  $m$ ,以及目标函数  $f(L, C)$ ,计算初始解处的目标函数值  $f(L_0, C_0)$ 。

2) 在初始解的基础上增加随机变量,得到新解  $[L_i, C_i]$ ,计算新解处的目标函数值  $f(L_i, C_i)$ ,令  $\Delta = f(L_i, C_i) - f(L_0, C_0)$ ,若  $\Delta < 0$ ,则删除数组中优化效果最差的元素,将新解存入数组,并扫描存储数组中目标函数值重新选取  $[L_j, C_j]$  作为初始值,即  $f(L_0, C_0) = f(L_j, C_j)$ ;若  $\Delta > 0$ ,则计算  $r = \exp[\Delta/(kT)]$ ,当  $r > \text{rand}()$  时同样进行上述过程 ( $k$  为波尔兹曼常数,  $\text{rand}()$  为取  $[0, 1)$  之间的随机数)。

3) 否则对每个控制参数下搜索次数以及控制参数进行判断,决定是否重复过程 2)。

为更有效地评价氙灯的抽运能力,引入两个参数:有效辐射效率 (ERE) 和有效输出光谱效率 (ESE)。有效辐射效率是指氙灯在抽运带内辐射出的功率密度与进灯功率的比值,即

$$\eta_{\text{ERE}} = \frac{\int_{S_1} I(\lambda)}{P_{\text{pump}} + P_{\text{ir}} + P_{\text{uv}}}, \quad (5)$$

式中  $S_1$  为抽运带波长范围,  $P_{\text{ir}}$  和  $P_{\text{uv}}$  分别是氙灯在

红外和紫外区的辐射功率。有效输出光谱效率是指氙灯辐射出的光谱中位于钨玻璃五个吸收带内的光谱功率与进灯功率的比值，

$$\eta_{ESE} = \frac{\int_{S_2} I(\lambda)}{P_{\text{pump}} + P_{\text{ir}} + P_{\text{uv}}}, \quad (6)$$

式中  $S_2$  为钨玻璃的五个吸收带波长范围。

用 ERE 和 ESE 进行评价时,不再单纯地考查氙灯总的辐射功率和辐射效率,而是更直接考查氙灯辐射出的有用功率。氙灯中的电流密度波形决定了氙灯的光谱特性和抽运效率,当进灯功率超过一定数值或者灯的负载达到一定程度时,氙灯辐射光谱蓝移现象明显,有效光谱效率和有效输出光谱效率均下降,因此需要对有效输出光谱效率优化,限制电容与电感

的取值,保证氙灯的发射光谱和抽运效率<sup>[12]</sup>。在退火算法中将由放电回路方程(1)式确定的随时间变化的电流密度函数以及由该电流密度确定的氙灯辐射光谱函数(6)式一起作为目标函数,在整体上平衡输出光谱能量和光谱蓝移。当抽运的峰值电流接近时,适当减小抽运的宽度可以提高抽运效率<sup>[9,13]</sup>,脉冲宽度减小 10%时,抽运效率提高 5%。因此在算法中加入存储功能,以在相似的电流密度和有效输出光谱效率下选择最优的脉冲宽度,进而提高工程效益。

通过优化算法可以筛选出峰值电流以及每个峰值电流对应的电感值、电容值、有效输出光谱效率。图 2 为改进后算法的流程图(图中  $\Delta C$  与  $\Delta L$  分别代表随机产生的电容、电感增量)。图 2 中有两个约束

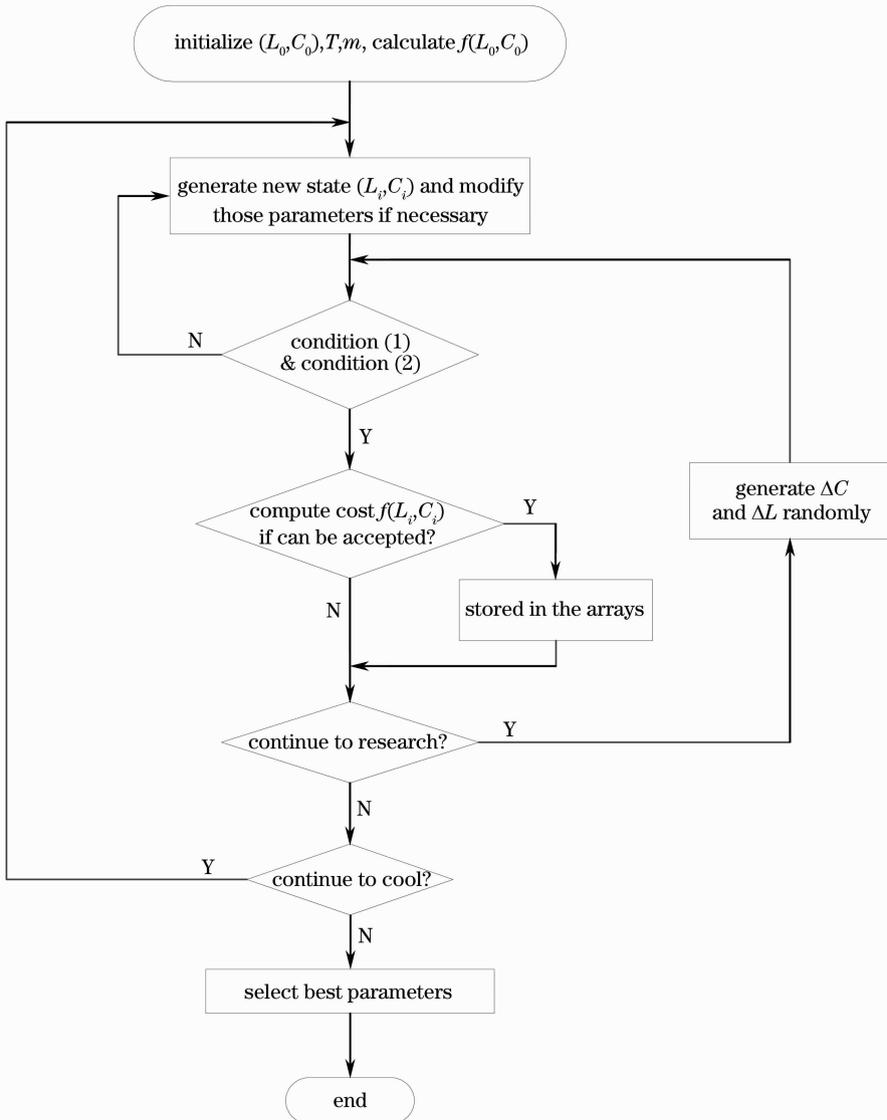


图 2 改进模拟退火算法流程图

Fig. 2 Flow charts of improved simulated annealing algorithm

条件分别用以判断放电回路的阻尼系数和氙灯的负载系数范围<sup>[14]</sup>,约束条件(1)为 $0.7 < C_1 < 1.1$ ,是为了让放电回路处于合适的阻尼状态;约束条件(2)为 $C_2 < 0.3$ ,这是基于氙灯的负载系数的考虑,以保证氙灯的使用寿命。

### 3 模拟计算

基于上述分析,选取神光 II 装置中的 350 mm 口径片放使用氙灯作为分析对象。计算中使用的氙灯规格参数为:内径为 17 mm、外径为 22 mm、长度为 1270 mm、灯内压强为 26664.4 Pa(200 Torr)。放电电路为单级感容网络且为双灯串联。由于实际放电回路中存在分布电容和分布电感并且模拟计算过程中由于近似取值引入了误差,实际测量结果与模拟计算结果存在较大的差距<sup>[15]</sup>。在模拟计算中取分布电容值 2  $\mu\text{F}$  和分布电感值 50  $\mu\text{H}$  用以修正放电回路方程。图 3 为模拟计算的放电波形与实际测量的放电波形,表 1 为修正前后结果与实验结果的比较,其中  $L = 250 \mu\text{H}$ ,  $C = 125 \mu\text{F}$ ,  $V = 21.7 \text{ kV}$ 。比较氙灯放电波形时,主要考虑脉冲波形的 1/10 峰值宽度(FWTM)、半峰全宽(FWHM)、上升

沿宽度(REW)以及底宽(FW)。从图 3 和表 1 中可知,修正放电回路的参数后,模拟计算的结果能较好地吻合实验结果。在放电的末期和峰值电流区域修正后计算的结果与实验测出的结果仍然存在一定的差别,这主要由两个原因导致:1) 在实际的放电回路中分布电容在放电末期释放自身存储的能量,减缓氙灯中电流下降的速度;2) 不能准确测出实际电路中存在的分布电感,分布电感的存在进一步限制了峰值电流增大。

为提高计算速度,可以初步估算电容和电感的取值范围,利用上述改进的模拟退火算法选取最佳氙灯放电电流以及最佳有效输出光谱效率时的电容电感组合,在保证氙灯辐射光谱的条件下,尽可能提高抽运能量密度。在将电容值和电感值的范围分别设置为 100~300  $\mu\text{F}$ , 100~350  $\mu\text{H}$  时,计算出符合要求的电容电感组合并存储在数组中,结果如表 2 所示。

当前装置中氙灯的供电网络配置为 125~250  $\mu\text{H}$ ,其对应的放电脉宽和光谱效率如表 3 所示。通过上述退火算法优化筛选之后,发现表 2 中的第 6 组参数配置更合理,氙灯能源配置更小而获得的

表 1 实验结果和修正前后模拟计算结果比较

Table 1 Comparison between experimental results and simulation results before and after revision

	FWTM pulse length / $\mu\text{s}$	FWHM pulse length / $\mu\text{s}$	REW pulse length / $\mu\text{s}$	Peak current /A
Experimental results	689	430	265	6265
Results before revised	622	401	227	6688
Results after revised	665	436	252	6319

表 2 使用模拟退火算法的计算结果

Table 2 Results of simulated annealing algorithm

Number	Peak current /A	ESE	C / $\mu\text{F}$	L / $\mu\text{H}$	REW / $\mu\text{s}$	FWTM / $\mu\text{s}$	FWHM / $\mu\text{s}$	Explosion fraction	Damping factor
1	7325.8	0.2200	139	202	210	617	384	0.2401	0.9976
2	7321.4	0.2201	149	217	226	662	411	0.2485	0.9970
3	7316.5	0.2202	137	200	208	609	378	0.2381	0.9964
4	7311.1	0.2204	138	202	210	614	382	0.2388	0.9958
5	7305.7	0.2205	139	204	212	619	385	0.2396	0.9951
6	7312.4	0.2203	121	177	184	539	334	0.2237	0.9959
7	7319.0	0.2202	155	226	235	689	428	0.2534	0.9967
8	7306.3	0.2205	122	179	186	544	338	0.2244	0.9952
9	7319.0	0.2202	155	226	235	689	428	0.2534	0.9967
10	7325.6	0.2200	150	218	227	666	413	0.2495	0.9975

表 3 当前供电网络配置下氙灯的放电脉宽和效率

Table 3 Pulse length and efficiency of xenon lamp under current configuration

Peak current /A	ESE / $\mu\text{s}$	REW / $\mu\text{s}$	FWTM / $\mu\text{s}$	FWHM / $\mu\text{s}$	Explosion fraction	Damping factor
6687.8	0.2357	227	622	401	0.2380	0.9663

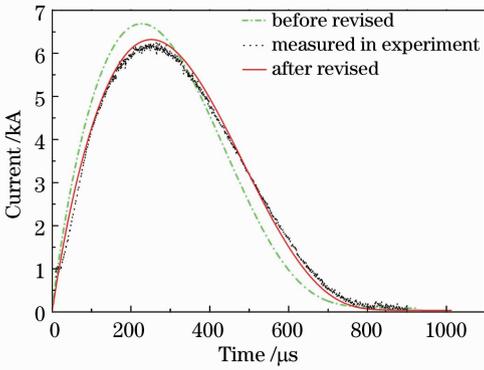


图 3 修正前后模拟计算电流脉冲波形与实验中测出的电流脉冲波形

Fig. 3 Comparison between current pulse shapes obtained from experiment calculated by simulation and experiment output peak current higher (relative to higher small signal gain coefficient), that is engineering value higher. Selecting this group of data as optimization after discharge circuit parameter value, for analysis and comparison of energy distribution scheme before and after optimization.

图 4 为能源配电优化前后氙灯中的电流随放电时间的变化情况。优化后放电脉宽明显变窄, REW, FWHM, FWTM 与优化之前相比分别减小 18.9%、16.7%、13.4%, 而且峰值电流相对于未优化前提高约 9.33%, 电流脉冲宽度的降低和峰值电流的增加均有助于抽运效率的提高。

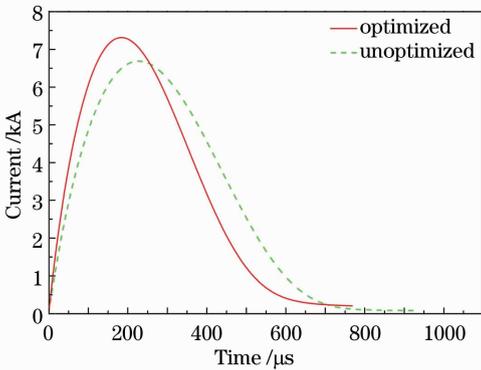


图 4 优化前后两种放电回路的电流脉冲波形  
Fig. 4 Current pulse shapes of discharge circuit before and after optimization

由于氙灯峰值电流的增加在一定程度上会导致输出光谱带蓝移, 为研究该因素的影响, 对氙灯有效辐射效率和有效输出光谱效率进行分析计算, 图 5 为优化前后放电回路下氙灯在抽运带内辐射出的能量波形。优化后, 虽然在峰值电流处氙灯的有效辐射效率从 39.17% 下降到 36.95%, 有效输出光谱效率从之前的 23.57% 下降到 22.03%, 但是优化之后氙灯在抽运带内辐射出的功率密度提高了 7.944%, 在钨玻璃吸收带内辐射出的功率密度提高

了 7.91%。由于在提高氙灯抽运能量过程中会出现蓝移, 因此需要通过上述退火算法选择合适的配电参数, 确定最佳的电流波形和氙灯辐射光谱。

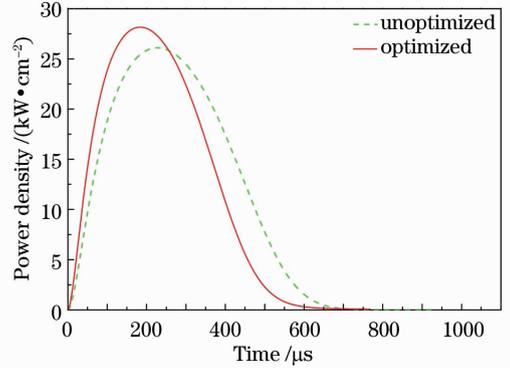


图 5 两种参数放电回路在抽运带内辐射功率随时间的变化

Fig. 5 Power density pulse shapes in pumping region of discharge circuit before and after optimization versus time

图 6 为氙灯的辐射效率、有效辐射效率以及有效输出光谱效率随输入功率密度的变化。可知随着进灯功率增大, 氙灯的辐射效率、有效辐射效率、有效光谱效率均先有一个先变大, 达到一定数值后逐渐降低的过程。在对放电回路进行优化之后, 氙灯的电光转换效率在 64% 以上。氙灯辐射出的功率主要由三部分组成: 抽运区、紫外区、红外区, 图 7 具体说明了这三部分在氙灯进灯功率改变时所占比例的变化情况。可知在氙灯放电过程中, 氙灯辐射的光谱会发生明显变化, 抽运带辐射出的能量先增加然后缓慢降低, 即当进灯功率大于一定值时, 氙灯辐射光谱会发生明显蓝移。氙灯的这种随进灯功率变化的辐射特性决定了在优化氙灯抽运的过程中不能单纯地根据峰值电流大小或者氙灯中的电流脉冲波形选择电容电感值, 需要考虑到氙灯辐射光谱的蓝

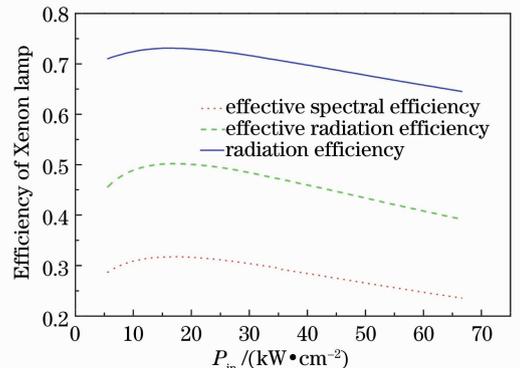


图 6 氙灯的效率随输入功率的变化  
Fig. 6 Efficiency of Xenon lamp versus input power

移特性。上述算法中选取的目标函数正是将光谱蓝移和提高氙灯辐射能量结合在一起,充分考虑了氙灯放电过程中有效辐射效率和光谱的变化,在综合效益上实现了最优。图 8 为优化前后峰值电流处氙灯辐射光谱随波长变化的模拟结果,可见优化后氙灯在抽运带内辐射出更多的能量,这有助于提高钽玻璃片上的反转粒子数。

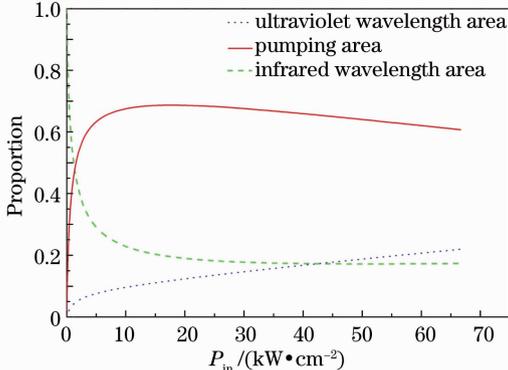


图 7 氙灯辐射功率中红外、紫外、抽运带内的比例  
Fig. 7 Proportion of radiation in UV, IR and pump regions of xenon lamp radiation

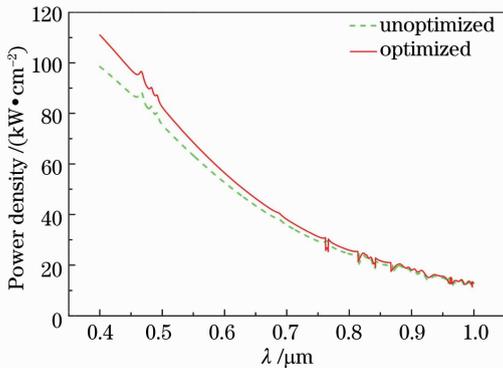


图 8 优化前后峰值电流处氙灯在抽运带内的辐射光谱  
Fig. 8 Radiation spectrum of xenon lamp at the peak of current before and after optimization

## 4 结 论

在放大器氙灯抽运的优化中引入了模拟退火算法,可以在电容电感组成的二维空间内随机搜索,快速找到满足条件的优化组合,在保证有效输出光谱效率的前提下,尽可能保持氙灯的光谱特性,获得最佳的进灯能量,提高氙灯抽运效率。对比了优化前后两种放电回路参数的氙灯电光特性。结果表明,优化之后氙灯中的电流波形宽度变窄,氙灯在抽运带内辐射出的能量明显增加,抽运效率提高,并能有效降低驱动器的工程造价,提高性价比,在放大器的优化设计时具有一定的指导意义。在今后的工作

中,可以结合反射器的设计,使尽可能多的光线到达钽玻璃表面,从而进一步优化放大器的总体设计。

## 参 考 文 献

- W Gan-chang. A brief review of the progress of laser inertial confinement fusion in recent years [J]. Chinese J Nuclear Science and Engineering, 1997, 17(3): 266–269.
- Jiang Zhonghong, Yang Zhongmin. Progress on research and development of laser glass in China [J]. China J Lasers, 2010, 37(9): 2198–2201.  
姜中宏, 杨中民. 中国激光玻璃研究进展[J]. 中国激光, 2010, (9): 2198–2201.
- Cao Shuguang, Shao Ruoyan, Lin Wenzheng, *et al.*. Study on dynamic model of high power flash lamp for simulation with PSpice [J]. Applied Laser, 2006, 26(6): 457–459.  
曹曙光, 邵若燕, 林文正, 等. 高功率脉冲氙灯的动态 PSpice 模型研究[J]. 应用激光, 2006, 26(6): 457–459.
- I J Rasiah, B Tan, H Lee. Voltage-current relationship for flashlamps; an empirical approach [J]. Appl Opt, 1991, 30(4): 485–488.
- Li Haibing, Hu Lili, Lin Wenzheng, *et al.*. Study on cerium-doped silica glass tube for xenon flash lamp [J]. Chinese J Lasers, 2004, 31(6): 654–658.  
李海兵, 胡丽丽, 林文正, 等. 脉冲氙灯用掺杂紫外石英玻璃管性能的研究[J]. 中国激光, 2004, 31(6): 654–658.
- S Brooks, B Morgan. Optimization using simulated annealing [J]. The Statistician, 1995: 241–257.
- Zhang Hua, Fan Dianyuan. Transient property of xenon flash lamp discharge [J]. Optic and Precision Engineering, 1999, 17(4): 28–34.  
张 华, 范滇元. 氙灯的瞬态放电特性研究[J]. 光学精密工程, 1999, 17(4): 28–34.
- R Dishington, W Hook, R Hilberg. Flashlamp discharge and laser efficiency [J]. Appl Opt, 1974, 13(10): 2300–2312.
- Zhang Hua, Gao Yanxia, Fan Dianyuan. Optimized design of xenon flashlamp pumping of Nd:glass amplifier [J]. Acta Optica Sinica, 1998, 18(12): 1616–1623.  
张 华, 高艳霞, 范滇元. 钽玻璃放大器氙灯抽运的优化设计[J]. 光学学报, 1998, 18(12): 1616–1623.
- H T Powell, A C Erlandson, K S Jancaitis. Flashlamp pumping of Nd:glass disk amplifier [C]. SPIE, 1990, 1277: 103–120.
- Wang Ailian. Study on extreme-value of two-dimensional function based on SA algorithm [J]. Computer Development & Application, 2009, 22(10): 13–14.  
王爱莲. 基于模拟退火算法的函数极值分析[J]. 电脑开发与应用, 2009, 22(10): 13–14
- H T Powell, A C Erlandson, K S Jancaitis. Characterization of high power flashlamp and application to Nd:glass laser pumping [C]. SPIE, 1986, 609: 78–94.
- Zhang Hua, Huang Guosong, Xu Shixiang, *et al.*. The influence of fluorescence lifetime and loss in phosphate laser glass on its gain property [J]. Acta Optica Sinica, 1998, 18(9): 1186–1192.  
张 华, 黄国松, 徐世祥, 等. 磷酸盐钽玻璃的荧光寿命和损耗对激光增益特性的影响[J]. 光学学报, 1998, 18(9): 1186–1192.
- Liu Jianjun, Jiang Baocai, Tang Xianzhong, *et al.*. High power xenon flashlamp with relative small-bore and large arc-length [J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(3): 326–329.  
刘建军, 蒋宝财, 唐贤忠, 等. 细长型高功率脉冲氙灯[J]. 中国激光, 2006, 33(3): 326–329.
- Huang Donghai, Xu Zhenhua, Yuan Cunde, *et al.*. Theory model of the discharge circuit for analysing great current discharge induced electromagnetic interference in “Sheng Guang” facility [J]. Chinese J Lasers, 1995, A22(10): 766–770.  
黄东海, 徐振华, 远存德, 等. 用于分析“神光”装置中大电流放电干扰的放电回路理论模型[J]. 中国激光, 1995, A22(10): 766–770.

栏目编辑: 张 腾