

文章编号: 1001-3806(2002)05-0346-04

## 具有最大输出功率的 CO<sub>2</sub> 激光器谐振腔

程 成<sup>1,2</sup> 马养武<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>浙江工业大学应用物理系,杭州,310032)

(<sup>2</sup>浙江大学光及电磁波研究中心现代光学仪器国家重点实验室,杭州,310027)

**摘要:** 提出了一种优化设计激光器谐振腔参数的新方法。应用遗传算法,以最大输出激光功率为目标函数,对典型 CO<sub>2</sub> 激光器谐振腔和放电管参数进行了优化,给出了谐振腔的 3 个优化参数:放电管直径、谐振腔凹面反射镜曲率半径和出射镜透射率。对于 1.2m 长谐振腔,优化设计的基模激光功率可从原先的 55W 提高到 89W,实际测量提高到 74W。

**关键词:** CO<sub>2</sub> 激光;谐振腔;遗传算法;优化

**中图分类号:** TN248.2<sup>+</sup>2 **文献标识码:** A

## Investigation of CO<sub>2</sub> laser resonator with maximum output power

Cheng Cheng<sup>1,2</sup>, Ma Yangwu<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Department of Applied Physics, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, 310032)

(<sup>2</sup> Centre for Optical and Electromagnetic Research, State Key Laboratory for Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, 310027)

**Abstract:** A new design method to optimize a laser resonator is presented. Applying a genetic algorithm and taking a laser output power as an objective function, we optimize a typical CO<sub>2</sub> laser resonator with a length of 1.2m. The optimal laser output with a fundamental mode increases to 89W comparing with the non-optimized laser output of 55W, and the measured output increases to 74W in an experiment.

**Key words:** CO<sub>2</sub> laser; resonator; genetic algorithm; optimization

### 引 言

CO<sub>2</sub> 激光器是应用最广泛的一种重要激光器。在汽车工业以及其它许多部门,CO<sub>2</sub> 激光器已经广泛应用于切割、焊接、烧蚀、打孔、雕刻等。据统计,我国规模较大的 CO<sub>2</sub> 激光器生产厂家就达 41 家<sup>[1]</sup>。

对于普通封离型 CO<sub>2</sub> 激光器谐振腔的设计,人们通常沿用传统的、经验和理论相结合的设计方法,即:首先根据激光功率  $P$  的要求来确定谐振腔长度  $L$ 。根据经验选取凹面反射镜的曲率半径  $R_1$ ,按腔场模式分布理论定出在凹面反射镜上的光斑尺寸。然后,根据经验公式,确定小信号增益系数  $\sigma_0$ 。由激光放电管的内径  $d$  和谐振腔长度  $L$  等几何尺寸和衍射理论,定出激光腔衍射损耗的菲涅耳数  $N$  和

谐振腔的几何参数  $g$ ,再由  $N$  和  $g$  值从衍射损耗与菲涅耳数  $N$  之间的关系,得到对应模式的衍射损耗。根据经验,选取反射镜的吸收、散射等,最后,由理论公式,算出激光功率随出射镜透射率的变化,确定最佳透射率和其它参数。

这样的设计方法存在一些缺陷,例如,设计思想是局域化的,因而,它所确定的参数是局域的。对于整个激光系统,这些参数相互组合后可能并不是最佳。此外,这样所给出的激光器参数实际可选范围大,甚至仅仅是半定量或定性的。可以说,优质、高效、大功率的 CO<sub>2</sub> 激光器仍有待于人们大力研发。

近年来,一些全局优化方法已经被应用于许多领域。与传统的梯度优化法不同,全局优化方法没有“局部最小(大)”的问题。其中一种全局优化方法是遗传算法<sup>[2,3]</sup>,它的思想来源于自然界的基因组合和优化原理。由于遗传算法思想新颖,全局优化,并且计算机程序也比较简单,因而,近年来,它得到了很大的推广和应用。用遗传算法优化了铜蒸气激光器(CVL)放电电路的 LC 参数<sup>[4]</sup>,优化了铜蒸气

作者简介:程 成,男,1953 年出生。教授。现从事激光等离子体、气体电子学和激光动力学方面的研究。

收稿日期:2001-07-30;收到修改稿日期:2001-09-25

激光器整体参数<sup>[5]</sup>,等等。从结果来看,采用优化和未采用优化,结果大不相同。对整个 CVL 系统进行优化后,激光输出功率可提高约 89%,这是十分吸引人的。

首先简要描述了遗传算法的思想,给出了实现遗传算法优化设计 CO<sub>2</sub> 激光器谐振腔的计算机程序流程。应用遗传算法,以输出激光功率为目标函数,通过全局优化来确定激光器谐振腔参数等。结果表明,对 1.2m 长的谐振腔,优化后 CO<sub>2</sub> 激光基模输出功率可提高 62%。同时,为了检验优化设计,在实验上,根据优化参数特制了一根新的激光管,与普通谐振腔参数的 CO<sub>2</sub> 激光器进行了实测对比。实测的激光光强仍为基模,但激光功率比未优化时提高了 35%。

### 1 优化原理和方法

将遗传算法作为一个主程序包,激光器的理论模型作为一个子程序包。把需要优化的激光器参数从子程序包中分离出来,作为主程序遗传算法中的基因(或参数)。参数经二进制转换,根据所需的精度,设定各个二进制基因的位数(字节数)。基因随机地组成数百条染色体。调用子程序并对染色体作二进制转换,计算代价函数(即激光功率)并进行优劣排队,保留代价函数值大的,淘汰代价函数值小的。用“二元竞争”法或交叉选择法选择母本,形成新一代的子染色体。经历基因突变,再重复循环若干代,最终使计算的各代价函数值趋于最大一致,可确定最佳染色体的基因组合,亦即最优的一系列组合参数。

计算机流程图见图 1,具体包括以下步骤:

(1) 首先确定需要优化的参数个数、参数精度。每个参数为一个基因,若干个基因按序组成一条染色体。本方案需要确定优化的参数个数为  $N_c = 3$  个( $r, T, d$ ),即有 3 个基因,基因按  $r, T, d$  这样的顺序排列。每个参数的精度可确定为  $1/2^8$ ,即每个参数有  $N_g = 8$  个字节。对每一条染色体总共有  $N_{tot} = N_c \times N_g = 3 \times 8 = 24$  个字节。

(2) 在主程序中,由计算机随机函数产生由 0-1 组成的、 $M_i (= 800)$  条二进制初始染色体。例如,某一条染色体可以是: [ 01011100 11001011 01100101 ], 其中前 8 位对应的参数是  $r$ , 第 9~16 位对应的参数是  $T$ , 第 17~24 位对应的参数是  $d$ 。

一共有  $M_i = 800$  条不同 0-1 排列的染色体,形成  $800 \times 24$  字节的矩阵。对前  $M_w (= M_i/2 = 400)$  条染色体,将其二进制矩阵作为实参,调用子程序。

在子程序中,设定待优化参数的变动范围,对主程序中传过来的染色体 0-1 列阵进行二进制解码,分别将对应的十进制基因(参数)值赋给 CO<sub>2</sub> 激光功率理论公式中的  $r, T, d$ 。由以下公式<sup>[6,7]</sup> 计算激光功率,并将激光功率作为代价函数返回给主程序。

$$P = d^2 T I_s / 4 \tag{1}$$

式中,  $d$  为激光管直径,  $\eta$  为放电管利用率,  $T$  为出射镜透射镜率,  $I_s$  为激光饱和光强,  $I$  为在出射镜上的归一化光强。

放电管利用率 为:

$$\eta = \frac{V_m}{V_{tube}} = \frac{\int_0^L I^2(z) dz}{d^2 L / 4} \tag{2}$$

式中,  $R = R/L$  ( $R$  为腔镜曲率半径,  $L$  为谐振腔总长),  $\lambda$  为激光波长。

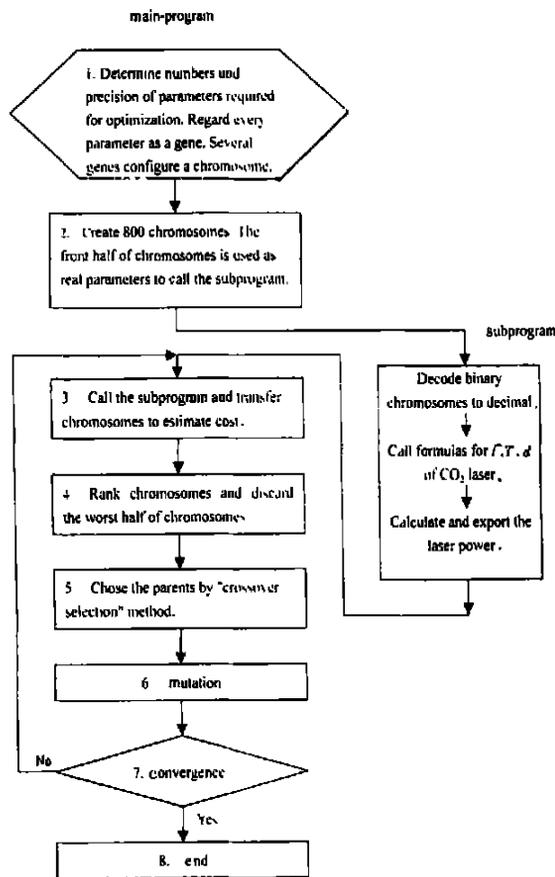


Fig. 1 The programming flow of a CO<sub>2</sub> laser resonator optimized by a genetic algorithm

归一化光强

$$= \frac{\sqrt{1 - f_0 l + \ln[(1 - ) (1 - - T)]^{1/2}}}{(\sqrt{1 - } + \sqrt{1 - - T}) [1 - \sqrt{1 - } \sqrt{1 - - T}]} \quad (3)$$

式中, 为反射镜单程光学损耗, 小信号增益  $\alpha_0 = 0.012 \sim 0.0025 d$ ,  $l$  为电极间距。

$$\text{饱和光强 } I_s \text{ 为: } I_s = 72 / d^2 \quad (4)$$

归纳以上公式, 可见当激光腔长度  $L$  一定时 (电极间距  $l$  可稍短于  $L$ ), 激光功率  $P$  最终取决于 3 个独立参量: (或者反射镜曲率半径  $R$ )、出射镜透射率  $T$ 、激光管直径  $d$ 。

对于反射镜光学损耗, 它由衍射损耗和吸收散射等损耗这两部分组成, 即:  $\alpha = \alpha_0 + \alpha_1$ 。比较小的吸收等损耗  $\alpha_1$  可由实验确定。重要的单程衍射损耗  $\alpha_0$  的计算比较复杂, 没有解析表达式, 只有一对腔场衍射积分方程, 可通过交叉叠代逼近法求解之<sup>[8]</sup>。单程衍射损耗最终可表达为  $\alpha_0 = \alpha_0(g, N)$  (其中谐振腔几何参数  $g = 1 - L/R$ , 菲涅耳数  $N = d^2/4L$ )。可见, 只要确定了  $R$  和  $d$  ( $L$  为设计之前给定), 就可确定  $\alpha_0 = \alpha_0(R, d)$ 。详细论述可见文献[8]。为了方便, 亦可采用近似表达式: 对平-凹腔 TEM<sub>00</sub> 模, 有效菲涅耳数:

$$N_{\text{eff1}} = N \sqrt{g(1-g)} \quad (5)$$

$$N_{\text{eff2}} = N \sqrt{1/g \cdot (1-g)} \quad (\text{这里 } N = d^2/4L \text{ 为共焦腔菲涅耳数}) \quad (6)$$

平凹镜的衍射损耗分别为:  $\alpha_0 = \exp(-2 N_{\text{eff1}})$ ,  $\alpha_0 = \exp(-2 N_{\text{eff2}})$ 。总衍射损耗:  $\alpha_0 = \alpha_0(g, N) = \sqrt{\alpha_0 \alpha_0} \quad (7)$

(3) 在主程序中, 对  $M_w$  条染色体调用子程序, 估计代价函数值 (激光功率), 并将激光功率返回给主程序。例如, 随机产生的前 8 条染色体可为:

No.	arrangement of the chromosomes	objective functions
1	01011100 11001011 01100101	2.3
2	00110101 11010111 00010011	6.7
3	10011110 01001000 11010010	5.2
4	11010010 11001010 00011010	13.0
5	01010101 10110101 00011010	1.8
6	10101011 11100001 00011010	10.4
7	10011010 11100110 010101100	3.7
8	11100001 10101100 10100010	0.5

(4) 将染色体排序, 方法是: 根据染色体对应的代价函数值, 将代价函数值最大 (小) 的染色体排到最前 (后) 面, 并丢弃最差的一半数量的染色体。丢弃的染色体数是  $M_w/2$ , 留存的好的染色体数也是

$M_w/2$ 。排序后, 应如下:

No.	arrangement of the chromosomes	objective functions	remain
4	11010010 11001010 00011010	13.0	Yes
6	1010 1011 1110 0001 0001 1010	10.4	Yes
2	00110101 11010111 00010011	6.7	Yes
3	1001 1110 0100 1000 1101 0010	5.2	Yes
7	00111010 11100110 01011100	3.7	No
1	0101 1100 1100 1011 0110 0101	2.3	No
5	01010101 10110101 00011010	1.8	No
8	1110 0001 1010 1100 1010 0010	0.5	No

(5) 交叉法选择母本, 产生新一代的子染色体。例如, 如上表所示, 将代价函数值最大的 No. 4 染色体每一个基因的前 (后) 半部分与次最大 No. 6 染色体对应基因的后 (前) 半部分进行交叉交换, 将 No. 2 与 No. 3 染色体分别进行两两交叉交换, 形成新的子染色体。新的子染色体数目为  $M_w/2$ , 它们与原留存的好的染色体 (数目为  $M_w/2$ ) 一起组成数目为  $M_w$  的下一代子染色体。交换后, 新一代的子染色体可如下表所示:

No.	arrangement of the chromosomes	objective functions
1	10110010 00011010 10101010	
2	1010 1101 1110 1100 0001 0001	
3	11100101 10000111 00100011	
4	1001 0011 0100 1101 1101 0001	
5 (old 4)	11010010 11001010 00011010	13.0
6 (old 6)	1010 1011 1110 0001 0001 1010	10.4
7 (old 2)	00110101 11010111 00010011	6.7
8 (old 3)	1001 1110 0100 1000 1101 0010	5.2

(6) 新的  $M_w$  条子染色体发生突变 (0 变 1, 1 变 0), 突变几率可选为 2%。这一步的目的是: 在初始给定待优化参数范围时, 可能有尚未包括进来的优化范围, 通过突变, 可包括进来, 全局优化, 以免遗漏。

(7) 检查各染色体的代价函数值是否已经趋向一致或基本一致。如果尚未一致, 说明仍未到达最优, 仍需继续寻找, 返回上述第 3 步, 继续循环。否则, 说明已经找到最佳的 3 个基因。假定上表中的代价函数值已经收敛 (即 No. 1 ~ No. 8 染色体的代价函数值已经趋向一致, 则其 1 ~ 8 位的 10110010 对应于参数 (或  $R$ ), 9 ~ 16 位的 00011010 对应于参数  $T$ , 17 ~ 24 位的 10101010 对应于参数  $d$ 。这

时,只需对 3 个基因各自的 0-1 系列进行二-十进制转换,即可获得 (或  $R$ ),  $T$ ,  $d$  优化后的具体数值。

设定的 3 个待优化参数的变动范围是: (a) 值:  $d = R/L = 2 \sim 10$  ( $L = 120\text{cm}$ ); (b) 平面出射镜反射率:  $R_2 = 1 - T = 0.1 \sim 1$  (由  $R_2$  可确定透射率  $T$ , 当反射镜光学损耗  $(g, N)$  给定时, 可见前所述如何确定); (c) 放电管直径  $d$  与凹面镜上的光斑半径  $r_{\text{opt}}$  之比:  $d/r_{\text{opt}} = 1 \sim 10$ , 其中,  $r_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{L}{L(R-L)}} R^2$  的 1/4, 由  $d/r_{\text{opt}}$  可确定放电管直径  $d$  (当反射镜曲率半径  $R$  和激光管长度  $L$  等确定时)。

## 2 优化结果与实验

表 1 给出优化计算和实验结果。为了检验优化设计的正确性, 委托上海激光研究所特意定制了一个由优化参数构成的激光谐振腔。谐振腔总长与未

Table 1 The optimization/ no-optimization and experimental results of a CO<sub>2</sub> laser resonator with a length of 1.2m

	diameter $d$ of dis- charge tube	curvature radius $R$ of concave reflector	reflectivity $R_2$ of out- mirror	laser out- put power $P$
no-opti- mization	1.0cm	3 ~ 5m	0.51	55W
opt. calculation	1.10cm	10m	0.711	89W
opt. experiment	1.07cm	10m	0.714 ~ 0.718	74W

优化时相同, 为 1.2m; 激光管的结构、电极间距、充气成分 (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, He, Xe, H<sub>2</sub>) 以及各气体组分的比例与常规普通管子完全相同, 总气压  $P_{\text{gas}} = 25 \times 133.322\text{Pa}$ 。谐振腔全反射镜基片为 K9 玻璃, 镀金, 金斑直径 13mm。反射镜直径 30mm, 边厚 3mm, 曲率半径 10m, 反射率大于 98%。平面出射镜基片材料为 ZnSe, 直径 30mm, 厚度 2.5mm, 反射率如上表所示。激光管实测的最佳工作电流为 30mA, 对应工作电压 11.2kv。激光功率计为 SJG-100A 型, 经上海市计量测试技术研究院鉴定。实测的工作参数等见图 2, 作为对照, 图中“\*”表示未优化激光管的输出功率, 其最大值为 55W。

优化后, 实测的激光输出光强仍为基模, 稳定输出的最大激光功率从未优化时的 55W 提高到 74W, 但小于计算值 89W。实测激光功率小于优化计算功率, 估计这是由于在激光管的加工过程中实际参数偏离计算值造成的。例如, 优化设计的出射

镜反射率为 0.711, 但实测镜片镀膜的反射率是 0.714 ~ 0.718。另外, 实际激光放电毛细管的粗细或圆度稍不均匀, 衍射损失增大, 对激光功率有极大影响。此外, 注意到表 1 中反射镜曲率半径 10m 远大于通常用的 3 ~ 5m。从光场分布看, 反射镜曲率半径大, 可以改善输出光束的发散角。但是, 对激光管加工偏心度的要求将提高, 稳定度也可能会有所下降, 这有待于实验的长期观测。

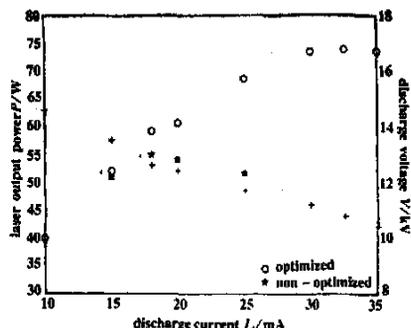


Fig. 2 Operational parameters of the optimized laser tube

## 3 结 论

提出了一种优化设计 CO<sub>2</sub> 激光器谐振腔参数的新方法。应用遗传算法, 优化设计了普通封离型 CO<sub>2</sub> 激光器的 3 个谐振腔参数: 放电管直径、反射镜曲率半径和出射镜透射率。优化后输出的激光仍为基模, 设计的激光功率可提高 62%, 实测激光功率提高 35%。由于 CO<sub>2</sub> 激光器应用的广泛性, 这一优化改进是有意义的。

优化设计方法成本低、周期短, 并可确保优化得到的参数为全局最佳。由于计算机程序的可维护性, 此方法很容易应用到对 He-Ne 激光以及其它具有类似谐振腔结构的激光器上, 也容易应用到对 CO<sub>2</sub> 激光器充气成分及其配比的优化, 以及推广应用到其它激光器的优化设计与工程问题上。

### 参 考 文 献

- [1] 激光集锦编辑部. 激光集锦, 2000(4): 5 ~ 8.
- [2] Haupt R L. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 1995, 37(2): 7 ~ 15.
- [3] Goldberg D E. Genetic algorithms in search, Optimization and Machine Learning. New York: Addison Wesley, 1989.
- [4] 程 成, 何赛灵. 物理学报, 2000, 49(4): 713 ~ 718.
- [5] 程 成, 何赛灵. 光学学报, 2001, 21(3): 278 ~ 282.
- [6] Wittman W J. The CO<sub>2</sub> Laser, Berlin: Springer, 1987.
- [7] 马养武, 陈钰清. 激光器件, 杭州: 浙江大学出版社, 1994.
- [8] Tingye L. The Bell System Technical Journal, 1965(3): 917 ~ 933.