

文章编号: 1001-3806(2002)05-0346-04

具有最大输出功率的 CO₂ 激光器谐振腔

程 成^{1,2} 马养武²

(¹浙江工业大学应用物理系,杭州,310032)

(²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 CO₂ 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: CO₂ 激光;谐振腔;遗传算法;优化

中图分类号: TN248.2⁺2 **文献标识码:** A

Investigation of CO₂ laser resonator with maximum output power

Cheng Cheng^{1,2}, Ma Yangwu²

(¹ Department of Applied Physics, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, 310032)

(² 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 CO₂ 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: CO₂ laser; resonator; genetic algorithm; optimization

引 言

CO₂ 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,CO₂ 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 CO₂ 激光器生产厂家就达 41 家^[1]。

对于普通封离型 CO₂ 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 σ_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 CO₂ 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^[2,3],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^[4],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^[5],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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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 800×24 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 CO₂ 激光功率理论公式中的 r, T, d 。由以下公式^[6,7] 计算激光功率,并将激光功率作为代价函数返回给主程序。

$$P = d^2 T I_s / 4 \quad (1)$$

式中, d 为激光管直径, η 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:

$$\eta = \frac{V_m}{V_{tube}} = \frac{\int_0^L E^2(z) dz}{d^2 L / 4} = \frac{4L}{d^2} \sqrt{-1} \left[1 + \frac{1}{3(-1)} \right] \quad (2)$$

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

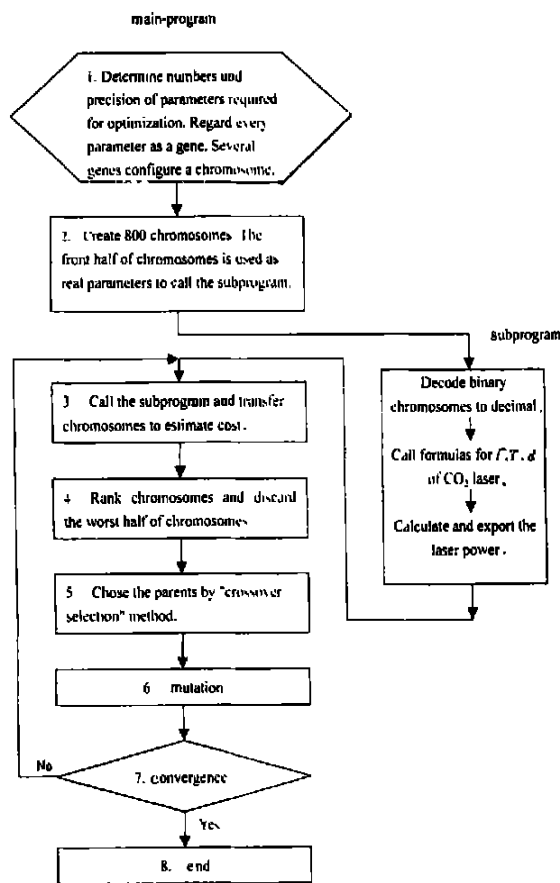


Fig. 1 The programming flow of a CO₂ laser resonator optimized by a genetic algorithm

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 α_1 可由实验确定。重要的单程衍射损耗 α_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^[8]。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 TEM₀₀ 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 01010110	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, 应为如下:

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_{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_{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 CO₂ 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 (CO₂, N₂, He, Xe, H₂) 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。

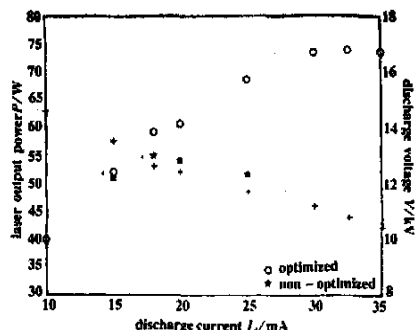


Fig. 2 Operational parameters of the optimized laser tube

3 结 论

提出了一种优化设计 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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.