

激光谐振腔设计软件的算法研究与计算机实现

于殿宝¹, 薛竣文², 高凯²

(1 徐州建筑职业技术学院, 江苏 徐州 221116)

(2 济南波谱光电有限公司, 济南 250100)

摘 要:为使激光工作者可以方便地进行谐振腔诸如热透镜、容差等参量的优化分析与设计, 研究了激光谐振腔设计软件的算法并在计算机上得到实现. 使用 ABCD 矩阵方法分析激光光束的传输与变换. 为使分析和设计更具有一般性和通用性便于计算机编程, 考虑矩阵元素均为复数的情况, 同时将光束质量因子 M^2 和介质中的光束传输考虑在激光谐振腔模的传输变换当中, 这样当矩阵元素虚部都为零, 而 $M^2=1$ 和介质折射率为 1 时, 就可以过渡到通常的基模高斯光束在空气中经实元件矩阵传输变换. 并以此为基础使用 VB 在国内成功开发出具有稳定驻波腔、稳定行波腔、非稳驻波腔、非稳行波腔、相位共轭腔、光束传输变换等多种功能的可视化谐振腔软件.

关键词:激光器; 激光谐振腔; ABCD 理论; 光束质量因子

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)08-2104-5

0 引言

在众多谐振腔分析方法中, ABCD 矩阵法以其处理问题简明、书写规范和便于计算机求解的特点得到了广泛的应用. 国内关于这方面的研究, 在基本理论研究著作^[1]中进行了详尽的讨论和分析, 目前研究人员又将 ABCD 矩阵扩展到非球面光学系统的研究^[2]以及非同心高斯光束的传输当中^[3], 并将 ABCD 理论应用到 Z-扫描理论的研究当中^[4], 同时开发了谐振腔软件^[5]. 国外对腔镜为高斯反射镜的谐振腔^[6]、非稳谐振腔^[7]、含光束质量因子的高斯光束传输^[8]、高功率固体激光器谐振腔等方面进行了研究^[9-11], 同时也开发了相应的谐振腔软件^[12].

为使激光工作者可以方便快捷地进行谐振腔的分析与优化设计, 本文考虑矩阵元素均为复数的情况, 同时将光束质量因子 M^2 和介质中的光束传输考虑在激光谐振腔模的传输变换当中, 更具有一般性和通用性, 同时也便于翻译成计算机语言进行程序设计. 在国内使用 VB 成功开发出具有稳定驻波腔、稳定行波腔、非稳驻波腔、非稳行波腔、相位共轭腔、光束传输变换等多种功能的可视化谐振腔软件.

1 理论分析

对稳定的驻波腔或行波腔, 选定腔内的任意一位置设为初始点, 就可以写出腔内的往返矩阵或环绕矩阵^[1], 根据腔模的自再现条件就可以得出该处

的光束参量. 设该处往返矩阵或环绕矩阵为

$$ABCD = \begin{bmatrix} A+ia & B+ib \\ C+ic & D+id \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} + i \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 A, B, C, D, a, b, c, d 均为实数.

此时自再现条件为

$$q = \frac{(A+ia)q + (B+ib)}{(C+ic)q + (D+id)} \quad (2)$$

式中 q 为光束的复参量, 包含了等相位面曲率半径 R 、光束光斑半径 ω 、光束质量因子 M^2 、介质中激光波长 $\lambda = \lambda_0/n$ (λ_0 为空气中的波长近似等于真空中的波长, n 为介质折射率) 等信息, 具体为

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{R} - i \frac{\lambda M^2}{\pi \omega^2} \quad (3)$$

解式(2)关于 $1/q$ 的方程, 取有物理意义的解得到

$$\frac{1}{q} = \frac{(D-A) + i(d-a)}{2(B+ib)} + \frac{\sqrt{[(A+D)^2 - (a+d)^2 - 4] + i2(A+D)(a+d)}}{2(B+ib)} \quad (4)$$

令

$$\sqrt{[(A+D)^2 - (a+d)^2 - 4] + i2(A+D)(a+d)} = \sqrt{e+if} = x+iy \quad (5)$$

则

$$\begin{aligned} e &= (A+D)^2 - (a+d)^2 - 4 \\ f &= 2(A+D)(a+d) \end{aligned} \quad (6)$$

将式(5)代入式(4), 整理并分离实部和虚部得到

$$\frac{1}{q} = \frac{(D-A+x)B + (d-a+y)b}{2(B^2+b^2)} + i \frac{(D-A+x)b + (d-a+y)B}{2(B^2+b^2)} \quad (7)$$

对比式(3)和(7)可以得到光束的等相位面曲率半径

和光斑半径分别为

$$R = \frac{2(B^2 + b^2)}{(D - A + x)B + (d - a + y)b} \quad (8)$$

$$\omega^2 = M^2 \frac{\lambda_0}{n\pi} \frac{2(B^2 + b^2)}{(D - A + x)b + (d - a + y)B} \quad (9)$$

由式(5)可得

$$x = \pm \sqrt{\frac{e \pm \sqrt{e^2 + f^2}}{2}} \quad y = \pm \sqrt{\frac{-e \pm \sqrt{e^2 + f^2}}{2}} \quad (10)$$

将上面的式(1)中的各个实数代入式(6)得到 e 和 f , 再代入式(10), 经判断取有物理意义的 x 和 y , 最后代入式(8)和(9)得到稳定的驻波腔或行波腔在考察点处光束的等相位面曲率半径 R 和光斑半径 ω .

以上的 q 参量为初始点, 对于腔内其它任何位置处的光束参量, 利用光束传输定律可以方便的

得到, 其方法如下

$$q_1 = \frac{(A_1 + ia_1)q + (B_1 + ib_1)}{(C_1 + ic_1)q + (D_1 + id_1)} \quad (11)$$

式中 q_1 为腔内任意位置处的光束复参量, $A_1, B_1, C_1, D_1, a_1, b_1, c_1, d_1$ 均为实数, 是初始点到腔内任意位置处的光束传输矩阵元素. 整理式(11), 将结果分离实部、虚部变量并与 q_1 参量的定义式相比较, 即可得到等相位面曲率半径 R_1 和光斑半径 ω_1 .

同时, 上面求解腔内任何位置处的光束参量的方法也即是求解光束空间传输变换的方法.

2 软件实现

根据上面的理论模型, 使用 VB 语言编写了激光谐振腔设计软件, 程序界面如图 1.

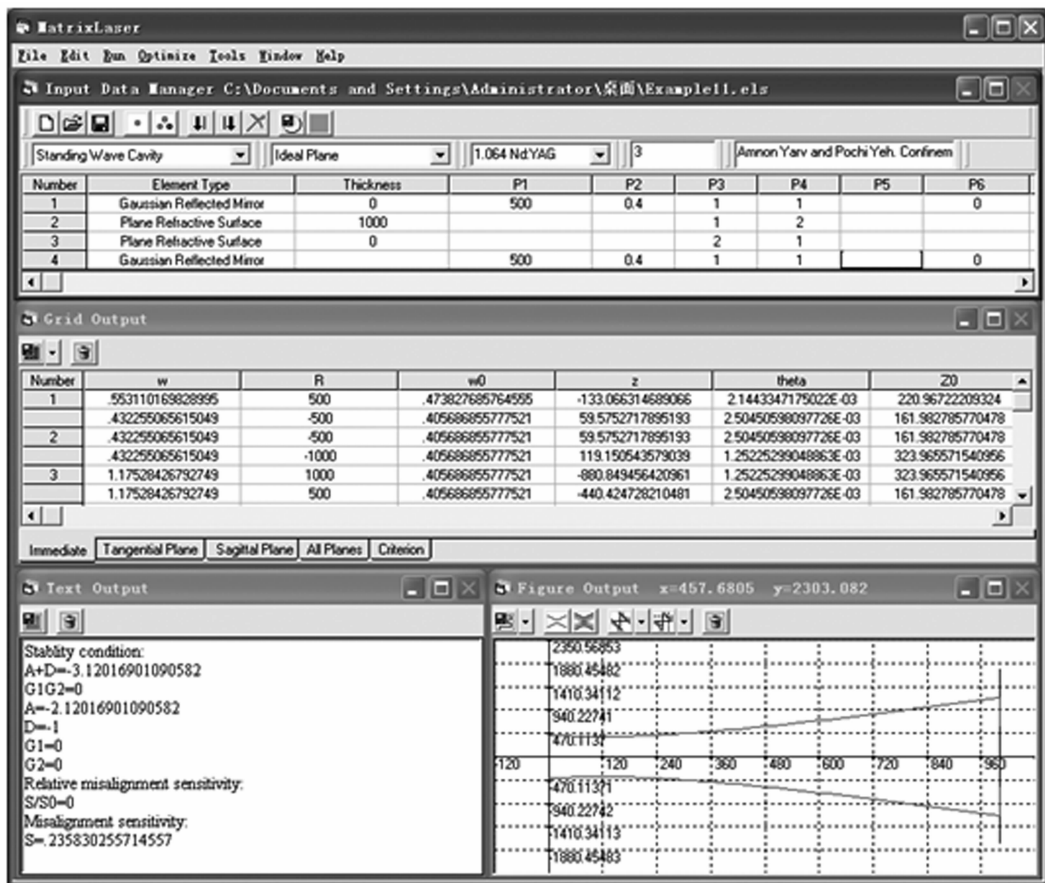


图 1 激光谐振腔软件界面

Fig. 1 The interface of laser resonator software

图 1 分析了由两个复元件腔镜高斯反射镜腔构成的共焦腔的情况^[2]. 高斯反射镜的复数 $ABCD$ 矩阵表示为^[1]

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{\rho} - i \frac{\lambda_0}{n\pi\omega_m^2} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{\rho} & 1 \end{bmatrix} +$$

$$i \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{\lambda_0}{n\pi\omega_m^2} & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中 ρ 为高斯反射镜的曲率半径, ω_m 强度反射率半径. 设构成共焦腔的高斯反射腔镜的曲率半径分别为 ρ_1 和 ρ_2 , 腔几何长度为 L , 考虑光束质量因子

$M^2=3$ 和腔内充满折射率为 2 的介质, 则 $\rho_1=\rho_2$ 并设为 500 mm, 为构成共焦腔此时的腔长 L 应取为 1 000 mm. 激光波长为 1 064 nm, 高斯反射镜的强度反射率半径 w_m 取 0.4 mm. 将这些数值输入软件, 如图 1 的 Input Data Manager 子窗口所示, 利用计算机计算出腔镜 1 处的光束参量, 再利用光束传输变换计算腔内和腔镜 2 处的光束参量, 如 Grid Output 子窗口所示, 并绘出腔内光束的传输图形, 如 Figure Output 子窗口所示, 同时可以求出腔的稳定参量和失调灵敏度等参量, 如 Text Output 所示.

在上面的分析中基本上是考虑了一般的情况, 而对于特殊情况: 高斯反射镜的强度反射率半径 w_m 取 10 mm, 则式(12)中的虚数元素近似可以忽略则过渡到了实元件的分析; 如果 $M^2=1$ 则变为基模高斯光束的分析; 如果腔内为空气, 此时腔长需变为 500 mm 以便构成共焦腔, 则过渡到无源腔的分析.

另外, 对于具有确定矩阵的元件, 可以在程序界面中直接选择进行分析设计, 而对于一些特殊的光学元件, 如克尔透镜锁模工作物质、折射率既沿径向分布又沿轴向分布的非均匀介质等, 只要能够求得其变换矩阵, 无论是实矩阵还是复矩阵, 在软件中输入矩阵的各个元素的实部虚部就可以方便的分析光束的传输变换情况.

3 结论

使用 ABCD 矩阵法分析激光光束的传输变换, 将矩阵元素均考虑为复数的情况, 同时将光束质量因子 M^2 和介质中的光束传输也考虑在激光谐振腔模的传输变换当中. 这样当矩阵元素虚部都为零, 而 $M^2=1$ 和介质折射率为 1 时, 就可以过渡到通常的基模高斯光束在空气中经实元件矩阵传输变换, 对分析更具有一般性和通用性, 并以此为基础在国内首次使用 VB 编写软件实现对各种激光谐振腔型和光束传输的分析与设计, 方便激光工作者使用.

参考文献

- [1] LÜ Bai-da. Laser optics[M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2003.
吕百达. 激光光学[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [2] LIU Hong-zhan. ABCD matrix for parabolic lens of revolution [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(12): 2303-2306.
刘宏展. 旋转抛物透镜的 ABCD 矩阵[J]. 光子学报, 2007, **36**(12): 2303-2306.
- [3] XU Qiang, CAO Chang-qing, ZENG Xiao-dong, et al. Propagation of double decent gaussian beam through an ABCD optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(12): 1912-1916.
徐强, 曹长庆, 曾晓东, 等. 双偏心椭圆高斯光束在一阶 ABCD 光学系统中的传输特性[J]. 光子学报, 2006, **35**(12): 1912-1916.
- [4] WANG Chao, LI Wei-long, TANG Yi-fan, et al. Z-scan theory based on ABCD formalism[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(3): 444-447.
王超, 李渭龙, 唐轶凡, 等. 基于 ABCD 矩阵的 Z-扫描理论[J]. 光子学报, 2007, **36**(3): 444-447.
- [5] TIAN Lai-ke, TIAN Dong-tao, YANG Zhi-yong, et al. Optical resonators CAD[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(8): 998-1002.
田来科, 田东涛, 杨志勇, 等. 光学谐振腔的 CAD[J]. 光子学报, 2002, **31**(8): 998-1002.
- [6] YARV A, YEH P. Confinement and stability in optical resonators employing mirrors with Gaussian reflectivity tapers [J]. *Opt Commun*, 1975, **13**(4): 370-374.
- [7] SIEGMAN A E. Unstable optical resonators[J]. *Appl Opt*, 1974, **13**(2): 353-369.
- [8] BELANGER P A. Beam propagation and the ABCD ray matrices[J]. *Opt Lett*, 1991, **16**(4): 196-198.
- [9] MAGNI V, de SILVESTRI S, QIAN Lie-jia, et al. Rod-imaging supergaussian unstable resonator for high power solid-state lasers[J]. *Opt Commun*, 1992, **94**(1): 87-91.
- [10] HODGSON N, BOSTANJOGLO G, WEBER H. Multirod unstable resonators for high-power solid-state lasers[J]. *Appl Opt*, 1993, **32**(30): 5902-5917.
- [11] de SILVESTRI S, LAPORTA P, MAGNI V. Rod thermal lensing effects in solid-state laser ring resonators[J]. *Opt Commun*, 1988, **65**(5): 373-376.

Laser Resonator Software Arithmetic and Realization by Computer

YU Dian-bao¹, XUE Jun-wen², GAO Kai²

(1 Xuzhou Institute of Architectural Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

(2 Jinan Wave Spectrum Optoelectronics Co., Ltd., Jinan 250100, China)

Abstract: In order to make analysis and design of the parameters of laser resonators easily, laser resonator software arithmetic is studied and realized using computer. ABCD matrix mechanism is used to analyze and design laser resonators. To obtain the generic and universal method, which is used to program, the matrix of all elements is considered as complex matrix. And, beam quality factor M^2 and the index of the media are also considered. When the imaginary parts of the complex matrix are zero, and the beam quality factor M^2 and media index equal to one, the stated method will be transformed to the usual conditions which are fundamental mode transmitting through real elements in the air. Based on the method of multi-mode transmitting through complex elements in the media, laser resonator software, which can analyze and design stable standing cavity, stable travelling cavity, unstable standing cavity, unstable travelling cavity, phase conjugate cavity and beam transmission, is realized by VB programmed language.

Key words: Laser; Laser resonator; ABCD theory; Beam quality factor



YU Dian-bao is a professor and works as a director at Xuzhou Vocational Institute of Technology. His research interests focus on safety engineering.