

激光谐振腔和光束传输的分析与设计

薛峻文 苏秉华 裴雪丹 赵慧元 孙鲁

(北京理工大学珠海学院, 广东 珠海 519085)

摘要 使用 $ABCD$ 矩阵方法, 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内, 基于 Visual Basic 可视化编程语言, 开发出通用的激光谐振腔和光束传输分析设计软件。该软件可分析设计稳定驻波腔、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。使用该软件可以方便地任意增减元件, 进行多种光学元件组合选取, 分析倾斜放置元件引起的子午面和弧矢面内光束参数的异同, 以及进行热透镜、距离容差等参数的优化分析与设计。谐振腔稳定条件、光束传输等参数可以通过数据表格、文本、图形显示或以文件的方式输出。

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 **doi**: 10.3788/LOP48.081402

Analysis and Design of Laser Resonator and Beam Transformation

Xue Junwen Su Binghua Pei Xuedan Zhao Huiyuan Sun Lu

(Zhuhai Campus, Beijing Institute of Technology, Zhuhai, Guangdong 519085, China)

Abstract $ABCD$ matrix mechanism is used to analyze and design laser resonators. In order to obtain a general method for programming, all elements of the matrix are considered as complex. Meantime, the beam quality factor M^2 and the index of media are also considered. Based on Visual Basic programme language, a resonator software is developed. It can be used to analyze and design stable standing cavity, stable travelling cavity, unstable standing cavity, unstable travelling cavity, phase conjugate cavity and beam transmission and so on. One can add or delete optical elements at will. In addition to one general complex element, eighteen elements can be combined for resonators and beam transformation. When tilted elements are inserted into optical path, the beam parameters of three planes such as ideal, tangential and sagittal are provided for comparison. Tolerance of thermal lens and optical length etc. can be optimized by dragging the button in the software easily. Cavity parameters such as stability condition, beam waist radius, beam waist position, beam radius at any position can displayed or output in certain file formats.

Key words lasers; laser resonator; $ABCD$ theory; beam quality factor

OCIS codes 140.0140; 140.3410; 140.4780

1 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。关于这方面的研究, 在基本理论著作中已有了详尽的讨论和分析^[1]。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(参见 <https://las-cad.com/index.php>, <http://www.sciopt.com>, <http://www.winlase.com/index.html>)。为使激光研究人员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, 开发出

收稿日期: 2011-02-22; **收到修改稿日期**: 2011-03-14; **网络出版日期**: 2011-07-07

基金项目: 北京理工大学珠海学院青年教师科研发展基金(ky-2010-0016)资助课题。

作者简介: 薛峻文(1978—), 男, 博士, 讲师, 主要从事新型激光器及其应用等方面的研究。E-mail: xuejunwen001@126.com

谐振腔软件。该软件更具有—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。软件用 Visual Basic 语言开发,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。

2 理论分析

对稳定的驻波腔或行波腔,选定腔内的任意—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数。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 为光束的复参数,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(2)式关于 $1/q$ 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

$$e = (A + D)^2 - (a + d)^2 - 4, \quad f = 2(A + D)(a + d). \quad (6)$$

将(5)式代入(4)式,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(3)式和(7)式可以得到光束的等相位面曲率半径和光斑半径

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

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

由(5)式可得

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

将(1)式中的各个实数代入(6)式得到 e 和 f , 结果再代入(10)式经判断取有物理意义的 x 和 y , 最后代入(8)式和(9)式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 q 参数为初始点,对于腔内其他任何位置处的光束参数,利用光束传输定律可以方便地得到。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数, $A_1, B_1, C_1, D_1, a_1, b_1, c_1, d_1$ 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(11)式,将结果分离实部、虚部变量并与 q_1 参数的定义式相比较,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数的方法也即是求解光束空间传输变换的方法。

3 软件实现

根据上面的理论模型,使用 Visual Basic 语言编写了激光谐振腔设计软件,程序界面如图 1 所示。软件由一个主窗口和 4 个子窗口构成,具体功能如表 1 所示。

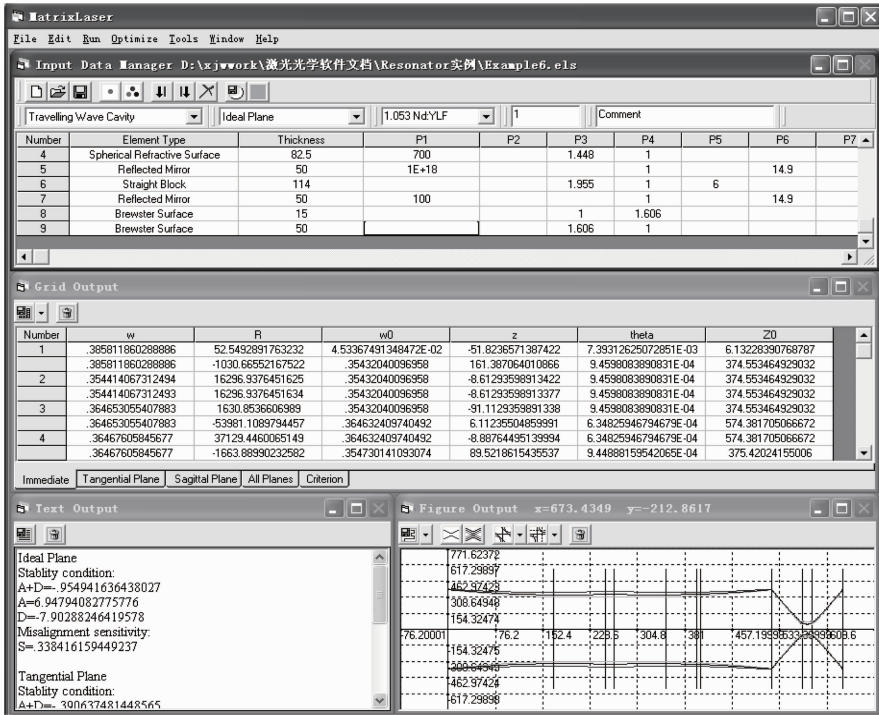


图 1 激光谐振腔软件界面

Fig. 1 Interface of laser resonator software

表 1 窗口名称和作用说明

Table 1 Name and function of the windows

Number	Window	Name	Function
1	Main	Matrix Laser	Manage four sub-windows and show the menus of sub-windows
2	Sub	Input Ddata Manager	Input data and set parameters
3	Sub	Grid Output	Output results as grids
4	Sub	Text Output	Output results as text
5	Sub	Figure Output	Output results as figure

这里以图 2 所示的腔内倍频稳定行波腔为例^[12],使用该软件分析设计腔内和腔外光束的传输变换。

首先在 Input Data Manager 子窗口输入该谐振腔的初始结构参数,对于已经存在的数据文件,当然也可通过文件菜单直接打开。然后直接点击工具条上的运行按钮,在 Grid Output 子窗口以表格形式输出子午面和弧矢面内各个元件处的光斑半径和等相位面曲率半径等光束参数;在 Text Output 子窗口以文本形

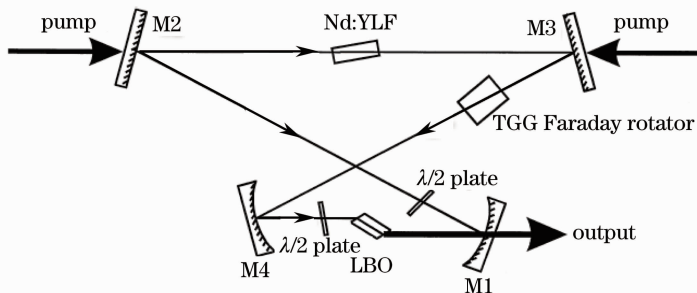


图 2 稳定行波腔

Fig. 2 Stable travelling resonator

式输出谐振腔的稳定判据等参数;在 Figure Output 子窗口以图形形式输出腔内任意位置处的光束传输图形以及稳区图中的工作点等。操作的结果如图 1 所示。

在上面分析的基础上,点击 Tools 菜单下的“转换到腔外参数”,即可非常方便地将谐振腔的分析转换为光束在腔外的传输的分析。设置并载入变量,选择需要考察的变量,鼠标拖动滚动条如图 3 所示,设置优化方案,可以对比分析子午面和弧矢面的光束参数,也可以分析相同变量同步按照一定的比例关系改变,还可以在腔内任意移动一个光学元件,这些变化在 4 个子窗口可以动态地实时观察。优化后的数据可以通过各个子窗口的菜单导出成为文本或图形格式。

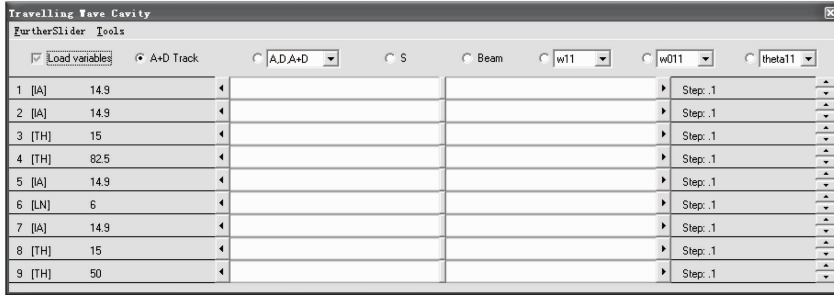


图 3 谐振腔的优化设计

Fig. 3 Optimization design for the resonator

改变激光波长或光束质量因子可以做进一步的分析。类似地,使用软件可以分析设计稳定驻波腔、非稳驻波腔、非稳行波腔、相位共轭腔等不同的结构。同时软件包含了一些常用谐振腔的设计方法,如两镜谐振腔、大基模高对准稳定性谐振腔、TEM₀₀模选择技术谐振腔、望远镜腔、非稳腔等,还包含了腔模匹配、高斯反射镜设计、腔内外光束转换工具等功能。

4 结 论

使用 ABCD 矩阵法分析激光谐振腔和光束传输变换,将矩阵元素均考虑为复数,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中。这样当矩阵元素虚部都为 0,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的情形,对分析更具有-般性和通用性。以此为基础使用 Visual Basic 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。

参 考 文 献

- Lü Baida. Laser Optics[M]. 3rd ed., Beijing: Higher Education Press, 2003
吕百达. 激光光学[M]. 第三版,北京:高等教育出版社,2003
- Liu Hongzhan. 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
- Xu Qiang, Cao Changqing, Zeng Xiaodong 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
- Wang Chao, Li Weilong, Tang Yifan 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
- Tian Laike, Tian Dongtao, Yang Zhiyong 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
- Amnon Yariv, Pochi Yeh. Confinement and stability in optical resonators employing mirrors with Gaussian reflectivity tapers [J]. Opt. Commun., 1975, 13(4): 370~374

- 7 A. E. Siegman. Unstable optical resonators[J]. *Appl. Opt.*, 1974, **13**(2): 353~369
- 8 P. A. Belanger. Beam propagation and the ABCD ray matrices[J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(4): 196~198
- 9 Vittorio Magni, Sandro De Silvestri, Liejia Qian *et al.*. Rod-imaging supergaussian unstable resonator for high power solid-state lasers[J]. *Opt. Commun.*, 1992, **94**(1): 87~91
- 10 Norman Hodgson, Georg Bostanjoglo, Horst Weber. Multirod unstable resonators for high-power solid-state lasers[J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(30): 5902~5917
- 11 S. De Silvestri, P. Laporta, V. Magni. Rod thermal lensing effects in solid-state laser ring resonators[J]. *Opt. Commun.*, 1988, **65**(5): 373~376
- 12 P. J. Hardman, W. A. Clarkson, D. C. Hanna. High-power diode-bar-pumped intracavity-frequency-doubled Nd:YLF ring laser[J]. *Opt. Commun.*, 1998, **156**(1): 49~52