

· 测试、试验与仿真 ·

## 激光发射光学系统聚焦分析

张春龙<sup>1,2</sup>, 杜少军<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学 光电科学与工程学院, 长沙 410073; 2. 西北核技术研究所, 西安 710024)

**摘要:** 基于较简单的物理模型和矩阵光学方法, 推导了激光发射光学系统发射平面波、球面波和高斯光束的调焦公式, 并计算分析三种波的聚焦特性: 平面波调焦时, 随着调焦量绝对值减小, 聚焦距离增大, 当调焦量靠近零时, 聚焦距离增加的速度较快; 球面波调焦时, 存在聚焦距离为无穷大的准直发射状态, 若调焦量逾越该状态对应的值后, 则发射光束成为发散光束, 同时, 随着入射球面波的曲率中心距次镜的距离增大时, 准直发射状态对应的调焦量右移趋近于零; 高斯光束调焦时, 在相同调焦量下, 高斯光束的束腰位置与平面波焦点位置在远距离上存在明显的差距, 可以通过增加入射高斯光束的束腰宽度、增加激光发射光学系统的扩束比、选用波长更短的光束来减小这种差距。

**关键词:** 矩阵光学方法; 发射光学系统; 平面波; 球面波; 高斯光束

中图分类号: TN249

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2015)-01-0058-05

## Focusing Adjustment Analysis of Laser Optical Transmitting System

ZHAGN Chun-long<sup>1,2</sup>, DU Shao-jun<sup>1</sup>

(1. College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 2. North West Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

**Abstract:** Based on simple physical model and matrix optical method, the focusing adjustment formulas of plane wave, spherical wave and Gaussian beam from laser optical transmitting system are deduced. And the focusing adjustment properties of the three kinds of waves are calculated and analyzed. During plane wave focusing adjustment, with the decreasing of focusing adjustment quantity absolute value, focusing distance increases. When focusing adjustment quantity closes to zero, the increasing speed of focusing distance is faster. During spherical wave focusing, collimation emission status with infinity focusing distance exists. The emission wave beam becomes divergent if focusing adjustment quantity is over the values corresponding to the state. At the same time, with the increasing of the distance between spherical wave curvature center and secondary mirror, the focusing adjustment quantity corresponding to collimating emission state move right and close to zero. During Gaussian beam focusing and with same focusing adjustment quantity, there is an obvious difference between Gaussian beam waist and plane wave focus position in far distance. The difference can be reduced through increasing the waist width of incoming Gaussian beam and the expanded beam ratio of laser optical transmitting system and choosing shorter wavelength optical beam.

**Key words:** matrix optics method; optical transmitting system; plane wave; spherical wave; Gaussian beam

在激光的广泛应用中, 如激光加工、信息存储、高能激光发射等, 经常需要将激光聚焦到空间中的某个位置, 然后在该位置附近开展相关研究<sup>[1-4]</sup>。因此发射光学系统在激光应用中是不可或缺的组成

部分, 传统的发射光学系统的调焦公式是以发射平面波为基准推导得到, 在将发射激光准确聚焦到目标上的同时, 经发射光学系统对目标进行跟踪的成像系统也能对目标清晰成像。实际发射激光并不

总是平面波<sup>[4-5]</sup>,当发射激光为球面波或高斯光束时,准确聚焦在目标上,所追求的同样为目标处的光斑尺寸最小,即球面波经发射系统聚焦后的球面波曲率中心在目标处,或者高斯光束经发射系统变换后的束腰位置在目标处,与发射平面波相比,激光发射光学系统的调焦量将发生变化,同时跟踪成像系统也需进行相应的调节,对成像系统的聚焦装置进行调整,或者移动成像系统的相机位置,才能对目标清晰成像。

由于跟踪成像系统的调整方式多样,调节量大小与系统在光路中的位置有关,文中暂不作详细讨论。详细分析了三种光束经发射光学系统的聚焦特性,基于矩阵光学方法<sup>[6]</sup>,推导出了发射系统的矩阵表达式,并研究一些参量变化对发射激光性能的影响。

## 1 理论推导

所研究的发射光学系统示意如图1所示。

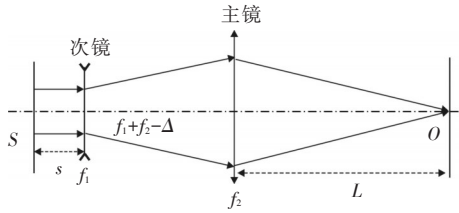


图1 激光发射光学系统示意图

光束从距离次镜为 $s$ 的入射面 $S$ 处入射,经过次镜 $f_1$ 传输一段距离 $f_1+f_2-\Delta$ 后,再经过主镜 $f_2$ 聚焦到距离主镜为 $L$ 的目标 $O$ 处,该发射光学系统传输变换矩阵为

$$\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & f_1+f_2-\Delta \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_r + \frac{\Delta}{f_1} & f_1+f_2-\Delta \\ -\frac{\Delta}{f_1 f_2} & \frac{1}{M_r} + \frac{\Delta}{f_2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, $f_1$ 为次镜焦距; $f_2$ 为主镜焦距; $\Delta$ 为调焦量; $M_r = -f_2/f_1$ ,为激光发射光学系统的扩束比。

通过改变次镜与主镜之间的距离,即式(1)中调焦量 $\Delta$ ,达到改变发射距离 $L$ 的目的。

不同入射光束情况下,为使目标处的光束尺寸最小,所要求的调焦量 $\Delta$ 也各不相同。不同曲率半

径的球面波入射(平面波为特例,即曲率半径为 $\infty$ 的球面波),调焦量 $\Delta$ 会发生变化;而作为傍轴条件下等相面为球面、曲率中心位置不断变化的高斯光束,其调焦量 $\Delta$ 随光束参数和聚焦距离的改变,更需开展研究。

### 1.1 球面波、平面波调焦公式推导

设距离次镜为 $s$ 的入射面上的光线坐标为 $\begin{bmatrix} x_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix}$ ,经激光发射光学系统变换后,聚焦于主镜后方 $L$ 处的出射面上,对应光线坐标为 $\begin{bmatrix} x_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix}$ ,该过程总的光线坐标变换可表示为<sup>[6]</sup>

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a+cL & as+b+L(cs+d) \\ c & cs+d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

由式(2)可得下式

$$x_2 = Ax_1 + B\theta_1 = (a+cL)x_1 + (as+b+Lcs+Ld)\theta_1 \quad (3)$$

近轴条件下,入射光束经过发射光学系统变换后汇聚于出射面上 $O$ 点处,其意义为, $\theta_1$ 取任意值的光线,经变换后的 $x_2$ 均相同,即 $x_2$ 与 $\theta_1$ 无关,即

$$B = as + b + Lcs + Ld = 0 \quad (4)$$

此时,入射面和出射面构成一对物像共轭面,则 $s$ 和 $L$ 分别为物距和像距,对于球面波而言, $s$ 为入射球面波的曲率半径; $L$ 为出射球面波的曲率半径,化简式(4)得

$$L = -\frac{as+b}{cs+d} \quad (5)$$

将式(1)中的 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 代入式(5)可得球面波的调焦公式为

$$L = f_2 - \frac{f_2^2}{\Delta - \frac{f_1^2}{f_1-s}} \quad (6)$$

当平面波入射时,可认为入射球面波的曲率半径 $s$ 趋近于无穷大,根据式(6)可得平面波调焦公式为

$$L = f_2 - \frac{f_2^2}{\Delta} \quad (7)$$

比较式(6)和式(7),可得球面波调焦公式相比平面波的调焦公式,调焦量 $\Delta$ 平移 $\frac{f_1^2}{f_1-s}$ (负值左移,正值右移)距离。

## 1.2 高斯光束调焦公式推导

高斯光束可以由高斯光束的束宽 $\omega$ 、高斯光束的等相位曲率半径 $R$ 和坐标 $z$ 中的任意两个确定<sup>[4]</sup>,因此可以用复参数 $q$ 将这三个量联系起来。 $q$ 定义为: $1/q = 1/R - i\lambda/\pi\omega^2$ ,复参数 $q$ 通过光学系统的变换遵守ABCD定律<sup>[5]</sup>,即入射光束 $q_0$ 与出射光束 $q_1$ 之间满足下式

$$q_1 = \frac{Aq_0 + B}{Cq_0 + D} \quad (8)$$

假设入射高斯光束束腰位置在图1中入射面 $S$ 处,出射光束的束腰在出射面 $O$ 处,此时等相位曲率半径为无穷大,则 $1/q_0 = -i\lambda/\pi\omega_0^2 = -i/Z_0$ , $1/q_1 = -i\lambda/\pi\omega_1^2 = -i/Z_1$ 。其中, $Z_0 = \pi\omega_0^2/\lambda$ , $Z_1 = \pi\omega_1^2/\lambda$ ; $\omega_0$ 为入射光束的束腰宽度; $\omega_1$ 为出射光束的束腰宽度,代入式(8),可得

$$B + CZ_0Z_1 + (AZ_0 - DZ_1)i = 0 \quad (9)$$

由式(9)中,实部、虚部均为零,可求得 $BD + ACZ_0^2 = 0$ ,将式(2)中的参数代入,可得

$$L = -\frac{a}{c} + \frac{s + d/c}{(d + cs)^2 + c^2Z_0^2} \quad (10)$$

将式(1) $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 具体表达式代入式(10)可得出

$$L = \frac{f_2(\Delta - f_2)}{\Delta} + \frac{f_1^2 f_2^2 \left[ s + \frac{f_1}{\Delta}(f_1 - \Delta) \right]}{\Delta^2 \left\{ \left[ s + \frac{f_1}{\Delta}(f_1 - \Delta) \right]^2 + \left( \frac{\pi\omega_0^2}{\lambda} \right)^2 \right\}} \quad (11)$$

式(11)即为高斯光束的调焦公式。相比平面波的调焦公式,高斯光束聚焦距离 $L$ (出射高斯光束的束腰位置与主镜的距离)与主镜焦距、次镜焦距、波长、入射束腰宽度、入射束腰位置有关。

## 2 数值计算及分析

### 2.1 球面波、平面波数值计算及分析

设激光发射光学系统的参数为:次镜的焦距 $f_1 = 0.25$  m,主镜的焦距 $f_2 = 1$  m,平面波聚焦距离 $L$ 随调焦量 $\Delta$ 的变化如图2所示。

计算结果表明,随着调焦量 $\Delta$ 绝对值减小,聚焦距离 $L$ 增大;当调焦量越靠近0时,聚焦距离 $L$ 增大的速率越快。当调焦量 $\Delta$ 等于零时,为准直发射状态,即发射光学系统(发射望远镜)共焦,此时聚焦

距离 $L$ 为无穷远。

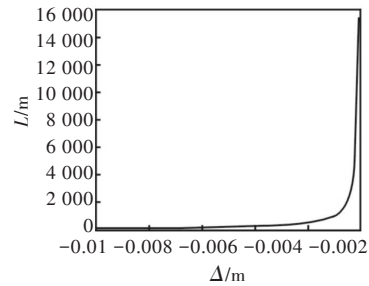


图2 发射平面波时聚焦距离 $L$ 与调焦量 $\Delta$ 的关系

设入射球面波的曲率中心距次镜的距离为 $s = 100$  m,聚焦距离 $L$ 与调焦量 $\Delta$ 的关系如图3所示。

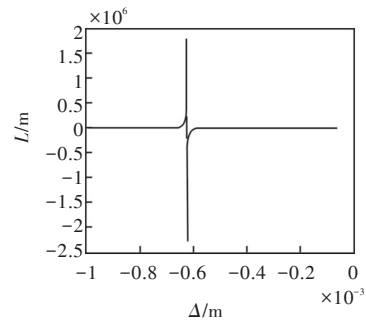


图3 发射球面波时聚焦距离 $L$ 随着调焦量 $\Delta$ 的变化关系

结果表明,随着调焦量 $\Delta$ 绝对值的减小,聚焦距离 $L$ 先是不断增大到极大值附近,随后跳变为负的极小值,且聚焦距离 $L$ 的绝对值随着调焦量 $\Delta$ 绝对值的减小而减小。对应的物理解释是:图3中自左至右,随着调焦量 $\Delta$ 绝对值的减小,聚焦距离 $L$ 不断增大,当调焦量 $\Delta = f_1^2/(f_1 - s) = -6.23 \times 10^{-4}$ 时,由式(6)可知,聚焦距离 $L$ 达到无穷大,即此时出射光束为平面波,若调焦量 $\Delta$ 绝对值继续减小,则聚焦距离 $L$ 转为负值,即像距已为负值,说明此时发射光束是发散的光束,不能在主镜右方聚焦。设 $s = 100$  m、 $500$  m、 $1000$  m时, $s$ 对聚焦距离 $L$ 的影响结果如图4所示。

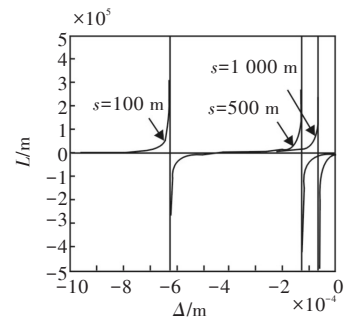


图4 发射球面波时入射球面波焦点 $s$ 对聚焦距离 $L$ 的影响

图4表明,当 $s$ 增大时,聚焦距离 $L$ 的极大值位置所对应的调焦量 $\Delta$ 越靠近零,即准直发射对应的调焦量 $\Delta$ 右移。可以推断,当 $s$ 趋近于无穷大时,那么在准直发射时对应的调焦量 $\Delta$ 趋近于零,即球面波调焦公式转变为平面波调焦公式。

### 2.2 高斯光束数值计算及分析

为了比较高斯光束与平面波在调焦时的数值差别,将平面波与高斯光束对比讨论。计算参数为:次镜的焦距 $f_1=0.25$  m,主镜的焦距 $f_2=1$  m,入射高斯光束束腰宽度为 $\omega_0=0.05$  m、波长 $\lambda$ 为 $3.8 \mu\text{m}$ 、束腰位置为 $s=0.1$  m。图5为发射高斯光束与平面波情况下聚焦距离 $L$ 随着调焦量 $\Delta$ 的变化关系。

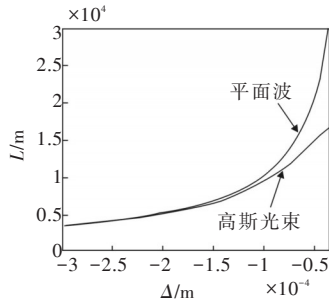


图5 发射平面波及高斯光束时聚焦距离 $L$ 随着调焦量 $\Delta$ 的变化关系

当调焦量 $\Delta$ 接近零时,平面波的聚焦距离上升速度快于高斯光束。当平面波聚焦距离在30 km时,对应的调焦量 $\Delta$ 下降,出射高斯光束的聚焦位置(束腰相距主镜的距离)在16 km附近,相差约14 km。这说明,当同一个激光发射光学系统按照平面波的调焦公式对高斯光束聚焦时,实际出射高斯光束的束腰位置与平面波的焦点位置不是在同一位置的。

下面分析入射高斯光束的参数对平面波焦点位置与出射高斯光束束腰位置之差 $\Delta L$ 的影响(简称聚焦距离之差)。以平面波的调焦距离为自变量,考虑当入射高斯光束束腰宽度 $\omega_0$ 、波长 $\lambda$ 、激光发射光学系统扩束比 $M_r = -f_2/f_1$ (通过改变 $f_1$ )变化时,对聚焦距离之差 $\Delta L$ 的影响。

(1) 入射高斯光束束腰宽度对聚焦距离之差的影响

计算参数为:次镜的焦距 $f_1=0.25$  m,主镜的焦距 $f_2=1$  m,入射高斯光束波长 $\lambda$ 为 $3.8 \mu\text{m}$ 、束腰位置为 $s=0.1$  m。入射高斯光束束腰宽度分别为 $\omega_0=0.05$  m、

0.10 m、0.15 m时, $\omega_0$ 对聚焦距离之差 $\Delta L$ 的影响结果如图6所示。

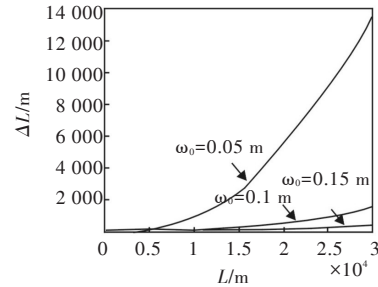


图6 入射高斯光束束腰宽度 $\omega_0$ 对聚焦距离之差 $\Delta L$ 的影响

调焦距离之差随着入射束腰宽度的增加明显降低,在3 km处,当入射高斯光束的束腰宽度由0.05 m变为0.15 m时,调焦距离之差由原来的24.42 m降低到0.3 m。表1中记录了在1 km、3 km、5 km、10 km、20 km、30 km处,聚焦距离之差随入射束腰宽度变化的数值。

表1 入射高斯光束束腰宽度 $\omega_0$ 对调焦距离之差 $\Delta L$ 的影响记录表

$L/\text{m}$	1 000	3 000	5 000	10 000	20 000	30 000
$\Delta L(\omega_0=0.05)/\text{m}$	0.91	24.42	111.56	837.18	5 354.88	13 542.25
$\Delta L(\omega_0=0.10)/\text{m}$	0.06	1.54	7.12	56.78	446.81	1 467.21
$\Delta L(\omega_0=0.15)/\text{m}$	0.01	0.30	1.41	11.27	89.87	301.66

(2) 入射高斯光束波长对聚焦距离之差的影响

计算参数为:次镜的焦距 $f_1=0.25$  m,主镜的焦距 $f_2=1$  m,入射高斯光束束腰宽度为 $\omega_0=0.05$  m、束腰位置为 $s=0.1$  m,入射高斯光束波长 $\lambda$ 分别为 $3.8 \mu\text{m}$ 、 $1.3 \mu\text{m}$ 、 $0.55 \mu\text{m}$ 时,波长 $\lambda$ 对聚焦距离之差 $\Delta L$ 的影响结果如图7所示。

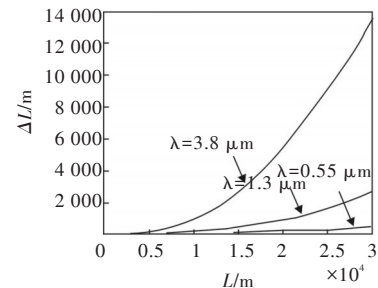


图7 入射高斯光束波长 $\lambda$ 对聚焦距离之差 $\Delta L$ 的影响

随着入射高斯光束波长减小,平面波与高斯光束的调焦距离之差有明显的下降。在3 km处,当入射高斯光束的波长由 $3.8 \mu\text{m}$ 变为 $0.55 \mu\text{m}$ 时,聚焦

距离之差 $\Delta L$ 由原来的24.42 m降低到-0.59 m,负号表示高斯光束的束腰位置远于平面波的焦点位置。表2中记录了在1 km、3 km、5 km、10 km、20 km、30 km处,聚焦距离之差 $\Delta L$ 随入射高斯光束波长变化的数值。

表2 入射高斯光束波长 $\lambda$ 对调焦距离之差 $\Delta L$ 的影响记录表

$L/m$	1 000	3 000	5 000	10 000	20 000	30 000
$\Delta L (\lambda=3.8 \mu\text{m})/m$	0.91	24.42	111.56	837.18	5 354.88	13 542.25
$\Delta L (\lambda=1.3 \mu\text{m})/m$	0.11	2.88	13.32	105.8	820.69	2 635.03
$\Delta L (\lambda=0.55 \mu\text{m})/m$	-0.1	-0.59	-0.67	6.88	103.79	402.47

(3) 发射光学系统扩束比对聚焦距离之差的影响计算参数为:主镜的焦距 $f_2=1$  m,入射高斯光束束腰宽度为 $\omega_0=0.05$  m、波长 $\lambda$ 为3.8  $\mu\text{m}$ 、束腰位置为 $s=0.1$  m,次镜焦距 $f_1$ 分别为-0.25 m、-0.167 m、-0.125 m,对应的激光发射光学系统扩束比 $M_r$ 为4倍、6倍、8倍,发射光学系统扩束比 $M_r$ 对聚焦距离之差 $\Delta L$ 的影响如图8所示。

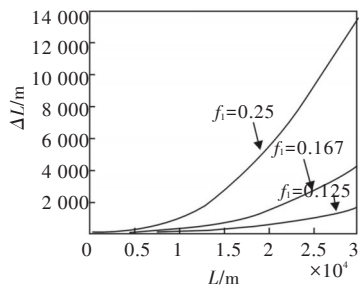


图8 激光发射光学系统扩束比(改变 $f_1$ )对聚焦距离之差 $\Delta L$ 的影响

当扩束比 $M_r$ 由4倍变为8倍时,在3 km处,聚焦距离之差 $\Delta L$ 由24.42 m降低到1.53 m。表3中记录了在1 km、3 km、5 km、10 km、20 km、30 km处,聚焦距离差 $\Delta L$ 随激光发射光学系统扩束比(改变 $f_1$ )变化的数值。

表3 激光发射光学系统扩束比(改变 $f_1$ )对调焦距离之差 $\Delta L$ 的影响记录表

$L/m$	1 000	3 000	5 000	10 000	20 000	30 000
$\Delta L (f_1=-0.25)/m$	0.91	24.42	111.56	837.18	5 354.88	13 542.25
$\Delta L (f_1=-1/6)/m$	0.19	5.25	24.26	191.54	1 449.89	4 487.65
$\Delta L (f_1=-0.125)/m$	0.06	1.5	7.11	56.73	446.62	1 466.82

### 3 结论

基于较简单的物理模型和矩阵光学的方法,对

激光发射光学系统发射平面波、球面波、高斯光束时的调焦公式进行了推导,并做了数值计算及分析。结果表明,(1)平面波调焦时,随着调焦量 $\Delta$ 绝对值减小,聚焦距离 $L$ 增大,当调焦量靠近零时,聚焦距离 $L$ 增加的速度较快。(2)球面波在通过激光发射光学系统时,当调焦量增大时,存在聚焦距离 $L$ 为无穷大的准直发射状态,若调焦量继续增大,则聚焦距离为负值,此时球面波将不再汇聚,而成为发散光束;当入射球面波的曲率中心距次镜的距离 $s$ 增大时,聚焦距离 $L$ 的极大值位置所对应的调焦量 $\Delta$ 向零的方向移动,即准直发射对应的调焦量 $\Delta$ 右移,趋近于零。(3)在同一调焦量 $\Delta$ 下,出射高斯光束的束腰位置与平面波的焦点位置之差,即聚焦距离之差,特别是在远距离上存在明显差异,可以通过增加入射高斯光束的束腰宽度 $\omega$ 、增加激光发射光学系统的扩束比 $M_r$ 、选用波长更短的光束来减小距离之差 $\Delta L$ 。

### 参考文献

- [1] O' keefe J D, Skeen C H. Laser induced deformation modes in thin metal target[J]. Appl Phys, 1973, 44(10): 4622-4626
- [2] Sanders D J. Temperature distributions produced by scanning Gaussian laser beam[J]. Applied Optics, 1984, 23(1):30-35
- [3] Prokhorov M A, Konov I V. Laser Heating of Metals[M]. New York:IOP Publishing Ltd, 1990.
- [4] 官邦贵,刘颂豪,章毛连,等. 激光精密加工技术应用现状及发展趋势[J]. 激光与红外, 2010, 40(3):229-232.
- [5] Holmes D A, Avizonis P V. Approximate optical system model[J]. Appl Opt, 1976, 15: 1075.
- [6] LI You-kuan, CHEN Dong-quan, DU Xiang-wan. Analysis of optical transmitting system, high power laser and particle beams[M]. 2000, 12(1): 15-18.
- [7] 周炳琨,高以智,陈倜嵘,等. 激光原理[M].4版. 北京:国防工业出版社,2000:74-82.
- [8] 吕百达. 激光光学[M]. 3版. 北京:高等教育出版社, 2003:33-36,99-101,105-107.
- [9] 李俊昌. 激光的衍射及热作用[M]. 北京:科学出版社, 2008:175-176