

高功率脉冲激光器能量离散的计算机模拟^{*}

程晓峰, 景 峰, 张小民, 彭志涛, 刘兰琴, 朱启华

(中国工程物理研究院 高温高密度等离子体物理国家重点实验室, 四川 绵阳 919-988 信箱 621900)

摘 要: 用统计方法研究高功率脉冲激光器能量离散问题, 描述了能量离散度的定义, 给出了估算打靶成功率的方法。并以 9-5 排布为例, 模拟计算了在输入能量离散和光学元件参数的误差服从正态随机规律时, 1ns 指数形输入脉冲经四程放大后输出能量的离散度。

关键词: 能量离散; 模拟; 正态分布

中图分类号: TN 241

文献标识码: A

激光器装置是一个复杂的光学系统, 不但光学元件参数存在加工误差, 元件装校也有误差, 大型 ICF 激光器主放大级的注入能量也因为一些不确定因素而存在波动, 这样就造成激光器的输出能量偏离最初的设计值而随机分布。在 ICF 中, 对输出偏离设计值的分布的研究极为重要, 因为输出能量太小会造成打靶不成功, 太大会破坏装置的某些光学元件, 甚至造成灾难性破坏。本文引入统计方法来研究能量离散问题, 并以四程放大中的 9-5 排布为例模拟计算了装置输出能量的离散度。本文的研究结果为提高装置运行的成功率提供了可行的办法, 并为装置运行的风险评估提供了理论依据。

1 能量离散定义

1.1 随机误差的方均根值(RMS)

实验指出, 极大多数情况下随机误差服从正态分布, 这时的标准差是各个随机误差平方的算术平均值的平方根。实际应用中, 常用 Bessel 公式来计算标准差 σ , 以算术平均值 \bar{L} 来代替真实值^[1], 即

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (L_i - \bar{L})^2} \quad (1)$$

这里, N 为测量次数, L_i 为第 i 次测量结果。上式即为测量误差的方均根值(RMS)。

1.2 能量离散度

对激光装置输出的时间平顶脉冲的多次实验统计, 可用能量离散度 σ_E 来描述系统输出能量的稳定性。把能量离散度定义为系统输出能量的 RMS 值与平均能量的比值, 根据(1)式写出 σ_E 的定义

$$\sigma_E = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (E_j - \bar{E})^2} \quad (2)$$

或者表示成相对误差形式

$$\frac{\sigma_E}{\bar{E}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left[\frac{E_j - \bar{E}}{\bar{E}} \right]^2} \quad (3)$$

式中 \bar{E} 为激光器装置输出的平均能量或能量期望值, $(E_j - \bar{E})$ 为单次输出的能量起伏值, N 为求平均范围内的统计次数。

2 估算打靶成功率

对于实际的激光装置, 由于存在误差, 不可能每一次输出的能量都恒定不变, 输出必然有高有低。根

^{*} 收稿日期: 2000-09-06; 修订日期: 2000-11-08
基金项目: 国家 863 惯性约束聚变领域资助课题
作者简介: 程晓峰(1967-), 男, 1991 年毕业于重庆大学应用物理专业, 助理研究员。

据概率论,对多次输出的统计结果应有约 50% 的输出值在平均值之上,因此适当增大单次脉冲的输出能量可以相应地增大输出能量大于期望值的概率。但是增大单次输出能量又相应地增大了激光破坏装置的几率,因此研究输出能量的分布概率是一项十分重要的工作。

输出能量离散与增益系数有很大的关系。放大器工作在线性区时,输出能量离散度与增益系数误差和系统总增益之间有如下关系^[2]

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{\Delta g_0}{g_0} \ln G$$

(4)

式中 G 为放大器系统总增益, $\Delta g_0/g_0$ 为放大器片增益系数百分误差,计算时取 1%。对于四程放大系统的 9-5 排布方式, $G=600$, 则由(4)式计算得 $\sigma_E/E=6.4\%$ 。考虑到增益饱和和效应,系统实际的能量离散度比 6.4% 小。

根据误差分布理论,正态随机误差的概率分布密度^[3]为

$$\varphi(E - \bar{E}) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(E - \bar{E})^2}{2\sigma^2}}$$

(5)

式中 $(E - \bar{E})$ 为能量误差, φ 为误差的概率密度。设大于能量 E_0 的概率为 P ($0 \leq P \leq 1$), 则

$$P = \int_{E_0}^{+\infty} \varphi(E - \bar{E}) dE = \int_{E_0}^{+\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(E - \bar{E})^2}{2\sigma^2}} dE$$

(6)

如果说 E_0 代表了打靶成功的最低阈值,那么 P 就是打靶成功率。这个公式就是估算打靶成功率的公式。

已知 \bar{E} 、 E_0 和标准差 σ , 就可以估算打靶成功率 P 。反过来也可以在已知打靶成功率 P 、 E_0 和标准差 σ 的情况下,解方程(6)得到输出期望值 \bar{E} 。图 1 是当 $E_0=2.2$ kJ, $\sigma=0.14$ kJ 时的 $P - \bar{E}$ 关系曲线。计算表明,如果平均输出能量为 2.325 kJ 就可以让输出能量大于 2.2 kJ 的几率在 80% 以上,即是打靶成功率为 80%。

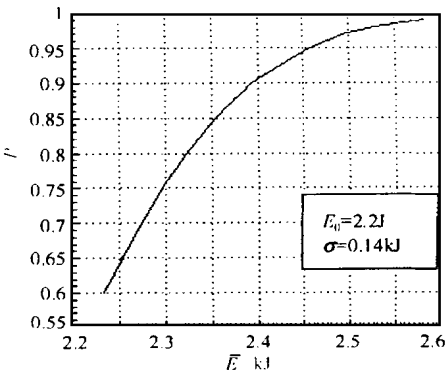


Fig. 1 Probability that output energy is bigger than 2.2 kJ vs average output energy

图 1 输出大于期望值的概率随平均输出能量的变化曲线

3 模拟计算参数

模拟计算所采用的参数及其标准差如表 1 所示,对系统能流分布的模拟计算所选择参数参见文献

表 1 光学元件参数及其标准差

Table 1 Mean values and standard deviations of component parameter distributions

Component	Mean value	Standard deviation
Amplifier gain coefficient/cm ⁻¹	0.0575	0.00115
Amplifier loss coefficient/cm ⁻¹	0.0045	0.0001125
Transmissivity		
Laser glass at Brewster's angle	0.995	0.0015
Lens	0.99	0.0015
Window glass	0.99	0.0015
Hole of space filter	0.90	0.005
KDP switch crystal	0.90	0.002
Polarizer in transmission (P polarization)	0.98	0.005
Sol-gel AR per surface	0.99	0.0015
Reflectivity of Mirror	0.99	0.0015

[4]。根据我国新型磷酸盐钕玻璃的特性,动态情况下的损耗系数增大到 0.0045cm⁻¹,同时根据设计需要把钕玻璃的增益系数 g_0 适当提高到 0.0575cm⁻¹,但钕玻璃片的厚度从 4.0cm 降低到 3.43cm。表中

光学参数的误差是由制造工艺差异、装校不准、粒子掺杂不均匀等因素引起的。计算时认为这些误差严格按照正态规律分布; 并且元件参数不出现粗大误差, 也就是表中罗列的元件参数的真实值与平均值之间的差值的绝对值不超过表中所列标准差的 3 倍。

根据 NIF 公布的数据, 增益系数的标准误差取 2%, 根据引起增益系数误差的不同原因可对它进行分解。误差的一部分是由片厚误差、基质材料的细微差异以及粒子掺杂浓度差异引起, 这部分误差可以通过实验手段补偿, 具体方法是通过调节主放大级注入能量来平衡; 另一部分由氙灯发光不均匀以及热效应不平衡等引起, 这部分误差是在实验过程中动态发生的, 补偿难度较大, 但可以通过统计方法来估算它们对输出脉冲造成的影响。计算时假定这两种原因引起的增益系数误差各占一半, 这样做可以使计算过程简便。本文模拟计算不可补偿的那一部分误差引起的输出能量离散问题。

4 模拟计算结果

注入适当前后沿比的指数上升脉冲(图 2 所示), 经四程放大后可输出时间平顶脉冲(图 3 所示)。对于 9-5 排布, 如果要让输出能量大于 2.2 kJ 的几率大于 80%, 注入脉冲经四程放大后最佳输出能量平均值应为 2.325 kJ, 此时对注入脉冲的要求应为: 输入能量 3.354 J、前后沿比 0.475。

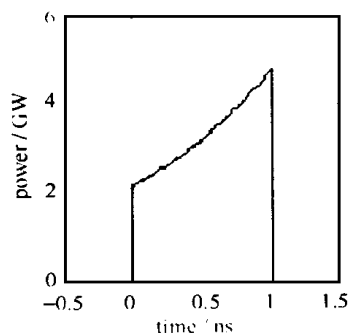


Fig 2 Baseline pulse shape of input energy

图 2 输入脉冲时间波形

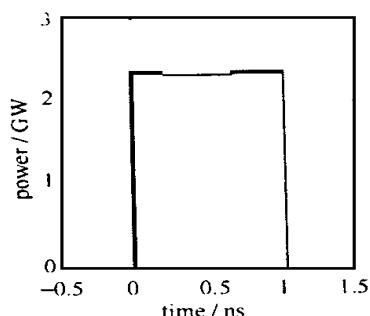


Fig 3 Baseline pulse shape of output energy

图 3 输出脉冲时间波形

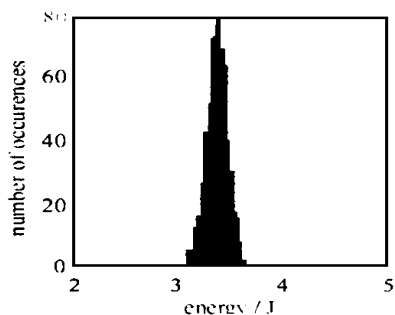


Fig 4 Histogram of inject energy

图 4 输入能量离散直方图

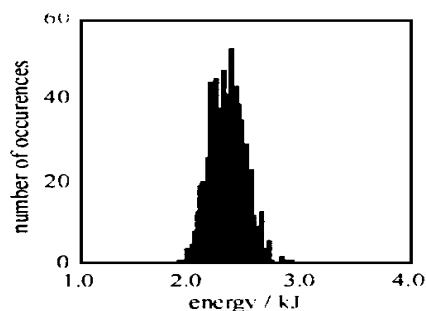


Fig 5 Histogram of output energy

图 5 输出能量离散直方图

为使能量离散模拟计算的结果具有代表意义并考虑到适当减少计算量, 统计次数 N 取 640。注入能量的随机分布情况如图 4 所示, 能量平均值为 3.52 J, 能量离散度为 3.0%。光学参数取表 1 中的值, 误差按正态规律随机分布, 其输出能量的离散分布如图 5 所示, 输出平均值为 2.330 kJ, 能量离散度为 6.83%, 输出能量大于 2.2 kJ 的几率为 77.98%。同时给出最大输出能量为 2.901 kJ, 最小输出能量为 1.961 kJ。

5 讨论

通过引进统计方法来研究高功率脉冲激光器输出能量随机分布的性质, 找到了估算装置运行成功率的方法, 并且可以通过适当提高输出能量期望值的方法来提高装置运行成功率。但是, 输出能量增大

的一个严重后果是能量向上漂移可能造成装置损坏, 因此我们提供了装置可能输出的最大能量值, 从而为系统冗余设计提供理论依据。

估算输出能量离散度的(4)式只考虑了系统总增益和增益系数百分误差, 实际情况比这个式子表示的形式复杂得多, 但这个式子结合(6)式在限定输出能量离散度的情况下能大致估算出输出能量大于期望值的几率, 这在一定程度上满足了我们的要求。

模拟计算中剔除了粗大误差, 即是将误差大于 3σ 的参数值和实验结果去掉, 这样做是符合物理实验规律的。如果不剔除粗大误差, 则会出现一部分偏差太大的结果, 这不但跟我们的预期结果不符合, 跟实际情况也相悖。

参考文献:

- [1] 何圣静 物理实验手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989. 46
- [2] Burkhart S C, Beach R J, Crane J H, et al The national ignition facility front-end laser system[J]. SPIE, 1995, 2633
- [3] 张叔涵[译]. 测量误差理论[M]. 北京: 中国工业出版社, 1966. 52
- [4] 景峰, 张小民, 罗斌, 等 四程放大系统能流分布的模拟计算和分析[J]. 强激光与离子束, 1998, 10(1): 11~ 15

Computer simulation method research for energy spread of high power pulse laser system

CHENG Xiao-feng, JING feng, ZHANG xiao-min, PENG Zhi-tao, LU Lan-qing, ZHU Qi-hua

(National Key Laboratory of Laser Fusion, CAEP. P. O. Box 919-988, Mianyang 621900, China)

Abstract The high power pulse laser energy spread is researched by statistic method, the energy spread is described in this paper. Supposing the output energy spread be known, the relation between the average energy and the probability of that which output energy is bigger than a given value is also described. Supposing the injected energy and parameters of optical elements obey normal distribution, basing on the multipass amplifier system where the main amplifier has 9 slabs and the booster has 5 slabs, the output energy spread about 1ns exponential injected pulse is simulated.

Key words: energy spread; simulation; normal distribution