

基于平板量热的大面积激光光斑能量测量方法*

方波浪 栾昆鹏 武俊杰 吴勇 杨太旗
张洋 李天植 王大辉 杨鹏翎†

(西北核技术研究所, 西安 710024)

(2025年8月1日收到; 2025年8月28日收到修改稿)

强激光到靶总能量测量对激光系统性能评价十分重要. 然而, 到靶光斑具有功率密度高、时空分布不均匀及光斑尺寸大等特点, 给总能量准确测量带来极大挑战. 瞄准大面积光斑总能量高精度测量需求, 本文发展了平板量热技术. 首先, 开展了激光加热平板物理过程研究, 得到了温度场变化解析解, 并基于此发现, 均匀排布的阵列温度传感器可显著缩短调整段时间; 然后, 针对传统能量反演算法中需要预热吸收体和可能受非均匀温度影响的问题, 提出了改进方法; 最后, 研制了平板测量装置, 开展了激光标定实验, 得到了系统的重复性 2.7% 和线性度 0.3%, 合成标准不确定度为 4%. 本文研究为平板测量技术在到靶总能量测量中的应用奠定了理论基础, 对装置的优化设计、好用易用性提升、能量高精度反演具有重要参考价值.

关键词: 激光参数测试, 能量, 平板量热技术, 能量反演算法

PACS: 06.20.Dk, 06.90.+v, 42.81.Cn, 47.50.Ef

DOI: 10.7498/aps.74.20251032

CSTR: 32037.14.aps.74.20251032

1 引言

到靶总能量测量对激光系统的性能评价具有重要且必要的价值^[1-3]. 因为激光在大气中传输会经历湍流、微尘、水汽等介质的随机散射与吸收, 远场光斑与理想情况下相去甚远, 难以理论估算^[4,5], 所以必须在靶目标处进行能量测量, 才能获得准确可靠的到靶总能量. 然而, 到靶总能量测量具有极大的挑战. 在靶目标处测量要求测量装置具有以下特点: 1) 质量轻, 能够满足搭载平台的要求; 2) 可靠性好, 能够适应振动、高低温等恶劣环境; 3) 抗激光损伤阈值高, 必须首先在强激光照射下生存且性能不变. 在满足上述基本条件的前提下, 还应尽可能提升测量精度. 根据使用场景的不同, 测量不确定度要求达到 10%—5%, 甚至 1%^[6]. 由于远场光斑具有尺寸大、分布不均匀等特点^[7], 测量装置

的感光面积、分辨率、背景噪声、环境影响和标定误差等均会对测量精度产生影响^[8,9].

实现到靶总能量测量的一种技术路线是由离散空间采样光斑得到总能量, 即阵列探测法. 该方法中, 首先由每个探测器单独获得对应位置的功率或能量, 然后通过插值算法重建光斑分布, 最后积分得到总功率或总能量^[10,11]. 阵列探测法的优点是测量信息丰富、时间分辨率高、结构紧凑、动态范围大等, 不足是空间分辨率相对有限, 对于分布均匀性较差的光斑误差可能较大. 例如, Higgs 等^[12]的阵列探测器的空间分辨率为 4 cm. 杨鹏翎等^[13]的 Si 光电探测器阵列的空间分辨率为 2.5 cm. 庞森等^[14]的阵列探测器的空间分辨力 5 mm. Semquest 实现了最高 2.6 mm 的空间分辨率. 近年来, 项目组采用贴片式 InGaAs 传感器结合介质膜衰减实现了最大 2 mm 的空间分辨.

另外一种路线是直接获取总能量, 典型代表为

* 激光与物质相互作用全国重点实验室基金 (批准号: SKLLIM-KB-2404) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yangpengling@nint.ac.cn

平板测量技术. 平板测量技术基于量热原理, 利用与光斑尺寸相匹配的平板作为吸收体, 通过测量吸收体在激光作用下的温升获得激光能量^[15]. Ophir公司的 Comet 系列功率计利用金属圆盘作为吸收体, 可用于短时间高功率激光测量. 雷俊杰等^[16]基于热释电原理实现了口径为 $\phi 100$ mm 的激光光斑能量测量. 唐菱等^[17]研制了平板玻璃体吸收式能量计, 实现了 400 mm \times 400 mm 口径的激光总能量测量. 但是, 现有工作大多聚焦于装置研制, 理论研究相对较为薄弱. 当应用于高强激光大面积光斑总能量测量时, 光斑尺寸变大, 装置的优化设计, 如吸收体材料的选择、温度传感器排布等, 急需理论支撑.

此外, 量热法需利用温度计算激光总能量. 理想情况下, 如果吸收体对外无热损失, 那么采用激光照射前后的温升计算即可. 然而, 实际总是存在热损失. 一种解决方式为后沿拟合, 利用下降沿采用单指数衰减拟合, 将温度回推至出光的某一时刻, 由该时刻的温度减去初始温度得到温升^[18]. 后沿拟合的计算结果与回推时刻有关, 并且由于是指数衰减, 不同时刻的结果差异可能较大. 另一种方法是热量计法, 该方法在集总参数假定下, 通过算法补偿热损失, 被广泛应用于 NIST 的恒温热量计中^[19,20]. NIST 的能量计作为计量溯源装置, 采用了外壳温控和光学锥将激光散射至内腔尽量均匀加热, 分别使得吸收体可以预热且温度变化尽量接近集总参数假定. 然而, 到靶光斑测量中, 受限于重量和可靠性约束, 难以采用这些方法.

为了解决远场到靶光斑总能量测量难题, 本文围绕平板测量技术开展理论研究. 首先对激光加热平板物理过程进行理论分析, 获得温度场的时空变化规律, 为平板吸收体和温度传感器的优化设计提供理论指导. 然后, 介绍能量反演算法, 针对其需要预热和非均匀温度影响的不足提出改进方法. 最后研制测量装置原型, 开展标定实验, 获得测量不确定度. 本文的理论研究工作, 为平板测量技术的研制打下了良好基础, 所提出的能量反演算法可推广使用至其他量热型能量测量技术中, 为激光能量高精度测量服务.

2 方法

本节首先理论分析激光加热平板过程, 为平板

测量装置优化设计奠定理论基础, 然后给出平板测量技术的组成、测量原理和传统能量反演算法, 最后针对能量反演算法中存在的需预热和非均匀温度影响问题, 给出免预热和非均匀温度校正算法.

2.1 平板测量理论分析

为了解决上述问题, 对激光加热平板物理过程进行细致分析, 从而掌握温度场的变化规律. 文献^[20]采用分离变量法得到 NIST 恒温热量计的温度场变化过程服从多指数组合衰减过程. 本部分针对激光加热薄平板特定工况, 给出具体的形式解. 平板迎光面 (xy 平面) 覆盖被测激光光斑区域, 同时其厚度 (z 向) 远小于横向尺寸 ($d \ll a, b$), 满足二维热传导简化条件, 可忽略厚度方向的温度梯度. 采用薄平板的目的是: 1) 减轻系统重量; 2) 缩短系统响应时间; 3) 便于准确测量平板吸收体的平均温度. 坐标系建立如图 1(a) 和图 1(b) 所示, 原点与平板形心重合. 对于薄平板, 热传导控制方程可以简化为二维热传导方程, 并将后表面的对流热流和激光热流当作内热源处理, 得到方程^[21]

$$\rho c_p \frac{\partial T^*}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T^*}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T^*}{\partial y^2} \right) + \frac{f}{d} - \frac{h}{d} T^*, \quad (1)$$

其中

$$T^* = T - T_0, \quad (2)$$

ρ 为吸收体材料密度, k 表示热导率, f 表示激光功率密度, q 表示表面热对流, d 表示平板厚度, h 为对流换热系数. 方程 (1) 中忽略了辐射热流, 该假定在温升较低的情况下满足. 在实际使用时, 可以

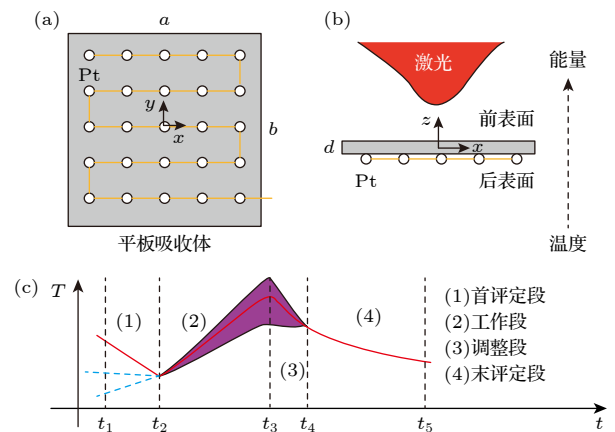


图 1 物理模型 (a) 后视图; (b) 侧视图; (c) 典型温度变化历程

Fig. 1. Physics model: (a) Rear view; (b) side view; (c) temperature changing curve.

依据待测激光能量, 设计平板厚度、吸收率等控制温升, 满足该假设条件. 初始条件为

$$T^*|_{t=0} = 0, \quad (3)$$

吸收体平板与周边隔热连接, 因此, 平板侧面为绝热边界条件

$$\begin{aligned} k \frac{\partial T^*}{\partial x} \Big|_{x=\frac{a}{2}} &= k \frac{\partial T^*}{\partial x} \Big|_{x=-\frac{a}{2}} = k \frac{\partial T^*}{\partial y} \Big|_{y=\frac{b}{2}} \\ &= k \frac{\partial T^*}{\partial x} \Big|_{x=-\frac{b}{2}} = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

(1) 式为线性非齐次方程, 方程中关于 T^* 及其导数的项均为线性的, 可以采用分离变量法求解. 相关研究^[21-23] 已获得了带有第一类边界条件的相近偏微分方程的解, 但本文的边界条件为第二类. 求解过程如下: 假设温度可表示为

$$T^* = \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \Theta_{ij}(t) X_i(x) Y_j(y), \quad (5)$$

其中, Θ_{ij} 为特征值; X_i 和 Y_j 分别为关于 x 和 y 的正交基函数. 由绝热边界条件 (4) 式得到

$$\begin{aligned} \frac{dX_i(x)}{dx} \Big|_{x=-\frac{a}{2}} &= \frac{dX_i(x)}{dx} \Big|_{x=\frac{a}{2}} = \frac{dY_j(y)}{dy} \Big|_{y=-\frac{b}{2}} \\ &= \frac{dY_j(y)}{dy} \Big|_{y=\frac{b}{2}} = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

一种满足 (6) 式的基函数为

$$X_i(x) = \cos \frac{i\pi(x+a/2)}{a}, \quad (7)$$

$$Y_j(y) = \cos \frac{j\pi(y+b/2)}{b}. \quad (8)$$

将热流项在基函数 (7) 式和 (8) 式上展开:

$$\frac{f}{d} = \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \phi_{ij}(t) X_i(x) Y_j(y), \quad (9)$$

其中

$$\phi_{ij}(t) = \frac{4}{ab} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \frac{f}{d} X_i(x) Y_j(y) dx dy. \quad (10)$$

将对流项同样展开:

$$\frac{h}{d} T^* = \frac{h}{d} \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \Theta_{ij}(t) X_i(x) Y_j(y). \quad (11)$$

将 (9) 式和 (11) 式代入 (1) 式, 得到

$$\frac{d\Theta_{ij}(t)}{dt} - \alpha_{ij}\Theta_{ij}(t) = \Omega_{ij}(t), \quad (12)$$

其中

$$\alpha_{ij} = \frac{k}{\rho c_p} \left(\left(\frac{i\pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{j\pi}{b} \right)^2 \right) + \frac{h}{d\rho c_p}, \quad (13)$$

$$\Omega_{ij}(t) = \frac{\phi_{ij}(t)}{\rho c}. \quad (14)$$

由初始条件 (3) 式得

$$\Theta_{ij}(0) = 0, \quad (15)$$

于是,

$$\Theta_{ij}(t) = e^{-\alpha_{ij}t} \int_0^t \Omega_{ij}(\tau) e^{\alpha_{ij}\tau} d\tau. \quad (16)$$

将 (16) 式和 (5) 式代入 (2) 式, 得到

$$\begin{aligned} T(x, y, t) &= T_0 + \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} e^{-\alpha_{ij}t} \int_0^t \Omega_{ij}(\tau) e^{\alpha_{ij}\tau} d\tau \\ &\quad \times X_i(x) Y_j(y), \end{aligned} \quad (17)$$

该解所表示的物理意义是: 1) 温度场可以表示为众多基函数 ((7) 式与 (8) 式) 之和; 2) 在激光施加的初期, 所产生的温度场由激光分布决定, 且具有时间累积效应, 如 $\int_0^t \Omega_{ij}(\tau) e^{\alpha_{ij}\tau} d\tau$ 所示, 因而非均匀光斑将产生短时间的非均匀温度场; 3) 受热传导影响, 不同的频率成分的温度场具有不同的衰减速率, 如 $e^{-\alpha_{ij}t}$ 所示, 高频成分衰减较快, 低频成分衰减较慢, $\frac{k}{\rho c_p} \left[\left(\frac{i\pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{j\pi}{b} \right)^2 \right]$ 表示平板尺寸 a 和 b 越大, k 越小, 低频成分消失得越缓慢, 最终只保留频率为 0 的成分, 即进入单指数衰减区间, 由 $h/(d\rho c_p)$ 控制, h 越小, d 越大, 衰减得越慢.

该结果与文献 [20] 中的 (6) 式相符合, 并对当前的特定构型给出了具体的基函数形式. 该结果对于平板测量装置设计的启发如下.

1) 因各温度场成分具有余弦形式的分布, 所以在全平板内均匀排布, 而非采用单只温度传感器, 如图 1(a) 所示, 可有效消除非均匀光斑带来的非均匀温度场对测量结果的影响, 缩短系统响应时间. 传感器加密策略可以依照 $i\pi/a$ 和 $j\pi/b$ 确定.

2) 采用热导率高的材料有利于缩短非均匀温度场匀化时间.

3) 材料的 ρ 和 c_p 的增加, 一方面会减缓非均匀温度场的匀化时间, 另一方面会降低单指数衰减时间.

4) 在满足热薄板近似下, 增加板厚 d , 减少对流换热 h , 有利于减缓单指数下降速率, 降低对测

温传感器响应频率的要求。

2.2 传统能量反演算法

传统采用热量计法^[20]实现能量反演,即由温度 T 计算得到激光总能量 Q . 为满足热量计法要求,需在激光照射前预热吸收体,使其温度历程进入首评定段 t_1-t_2 ,在该时间段内,温度服从随时间单指数下降规律;然后激光加热吸收体,温度随时间持续升高,温度变化进入工作期 t_2-t_3 ;接着激光停止照射,由于热损失,温度下降,进入调整期 t_3-t_4 ;最后温度进入单指数下降区,即末评定段 t_4-t_5 . 由于激光分布的不均匀性,测量段和调整段可能不满足集总参数假定. 而首末评定段满足集总参数假定,温度随时间呈单指数变化规律,可以表示为

$$T = \begin{cases} T_1 \exp\left[-\frac{S}{mc_p}(t-t_1)\right] + T_0, & t_1 < t < t_2, \\ T_4 \exp\left[-\frac{S}{mc_p}(t-t_4)\right] + T_0, & t_4 < t < t_5, \end{cases} \quad (18)$$

其中, S 为热损失系数, m 为质量, c_p 为比热容, T_0 为环境温度, T_1 为首评定段的起始时刻温度, T_4 为末评定段的起始时刻温度. 利用最小二乘法拟合首末评定段,即可得到 S 和 T_0 . 该式假定吸收体在激光照射前后所处环境边界条件 S 和 T_0 不变. 校正的温度变化表示为^[24]

$$\Delta T = T - T_2 + \frac{S}{mc_p} \int_{t_2}^t T(\tau) d\tau, \quad t_4 < t < t_5, \quad (19)$$

该式中, t 可以在 t_4-t_5 任取. 当末评定段服从单指数下降规律时,校正后的温升不变. 该现象可以用于判断是否进入末评定段. 最后,激光总能量可表示为

$$Q = c_p m \Delta T. \quad (20)$$

该算法存在两方面的改进空间. 1) 热量计法中,两个评定段的目的是—方面使得吸收体在激光前后满足集总参数假设,初末状态具有确定的校正能量,另一方面计算热损失和环境温度. 于是,要求对吸收体进行预热,常采用外置加热器的方式实现,增加了系统的复杂性,不利于在系统质量受限的场景中应用. 2) 在 (19) 式中,使用了实际的温度变化历程校正热损失,而测量段和调整段的温度变化可能偏离集总参数假定,由于测温具有离散采样

误差,测得温度与实际平均温度可能存在差异,导致热损失校正不准确.

2.3 免预热算法

免预热的热量计法与传统热量计法相近,同样根据测量前后两个评定段计算环境温度和热损失系数,然后基于温度变化曲线修正热损失得到激光能量,区别是免除了对首评定段内吸收体温度高于环境温度的限制. 传统算法主要是受限于下降沿拟合 (18) 式中,吸收体温度始终满足 $T \geq T_0$. 而更一般的实际情况是,吸收体温度可能等于或低于环境温度,如图 1 中首评定段的蓝色虚线所示. 为此,将问题转化为优化问题,基于热损失校正后的温度不变原理,如 (19) 式所示,不断调整环境温度 T_0 和热损失系数 S ,使得首评定段的能量保持不变,末评定段依然采用 (18) 式拟合. 计算步骤如图 2 所示,具体如下:

- 1) 初始化环境温度 T_0 , 选择首评定段的最低温;
- 2) 利用末评定段,根据环境温度 T_0 , 由 (18) 式拟合得到热损失系数 S ;
- 3) 将 T_0 和 S 代入 (19) 式,计算首评定段的校正温度曲线;
- 4) 计算校正温度波动

$$\mathcal{L} = \|\Delta T - \overline{\Delta T}\|_2; \quad (21)$$

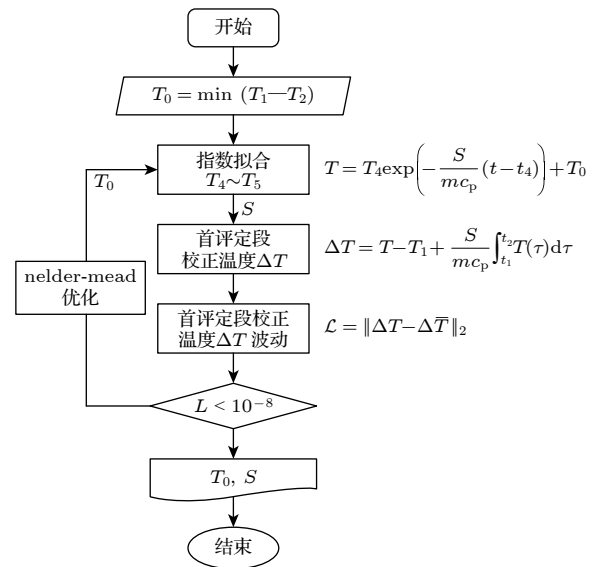


图 2 免预热热量计算法流程图

Fig. 2. Flowchart for preheating-free calorimetry method algorithm.

5) 如果 \mathcal{L} 小于预设值 (本文取 10^{-8}), 则迭代结束, 输出环境温度 T_0 和热损失系数 S . 否则, 更新环境温度 T_0 , 回到第 2) 步继续计算. 本文选用 nelder-mead 优化算法, 该算法无需计算梯度, 鲁棒性好.

2.4 非均匀温度校正算法

在工作段和调整段, 测得温度变化历程可能与实际的平均温度变化不符, 导致能量反演误差增大, 该问题产生的原因主要是传感器采样率有限. 为此, 建立温度历程修正算法, 使得温度变化历程更符合集总参数假定. 该算法根据末评定段、出光及停光时刻修正工作段和调整段的温度变化. 计算步骤如下:

- 1) 根据首末评定段得到热损失和环境温度, 算法如前文所示;
- 2) 利用末评定段将温度历程回推至停光时刻 t_3 , 采用 (18) 式计算;
- 3) 在测量段 t_2-t_3 采用线性温升补全, 起始温度为 T_2 , 终止温度为上一步中修正后的 T_3 .

3 实验系统与测量结果

为了验证上述的理论分析及能量反演算法, 研制了平板测量装置, 如图 3 所示, 装置由金属平板、阵列温度传感器、蜂窝铝板、玻璃钢垫块及螺钉等组成. 金属平板的材质为铝合金, 热导率高, 密度低, 尺寸为 $50\text{ cm} \times 50\text{ cm} \times 2\text{ mm}$, 可用于光斑尺寸小于半米的激光光斑测量. 对平板前表面进行毛化 (防止定向反射回光) 和镀金 (提升抗激光损伤阈值) 处理, 保障实验安全和可靠性. 阵列温度传感器粘贴于平板背面, 采用 5×5 均匀排布, 间隔 10 cm . 根据 (13) 式, 预计可将时间常数减小至原来的 $1/25$. Pt 热电阻具有对温度近似线性响应、无需冷端参考的特点, 因此被选作温度传感器. 所有温度传感器采用薄膜封装成阵列模块, 提升可靠性. 温度传感器两两串联, 总电阻通过电桥电路探测. 蜂窝铝板为能量计的支撑结构, 使得平板具有足够的刚度, 保持平整, 且质量较轻. 平板和蜂窝铝板通过螺栓连接. 为了实现隔热, 平板、蜂窝板和螺栓间采用玻璃钢垫块转接. 平板测量装置的总重量为 4.1 kg , 质量轻盈.

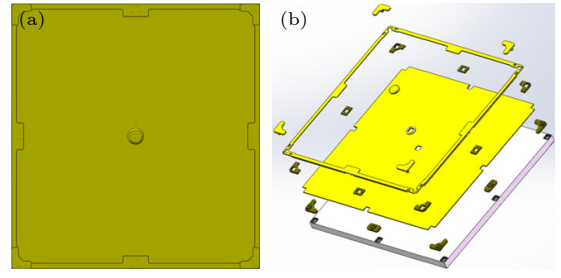


图 3 机械结构 (a) 前视图; (b) 爆炸图
Fig. 3. Mechanical structure: (a) Front view; (b) exploded view.

采用直接替代法标定测试, 获得平板测量系统的重复性和线性度^[8]. 直接替代法指在相同的激光功率输入条件下, 通过被测设备与标准功率计相互替代, 利用标准功率计给出的参考能量和被测设备的响应得到响应系数. 实验光路组成如图 4 所示, 包含光源、光闸、分束镜、功率监测探测器、标准功率计、扩束镜和平板测量装置. 光源采用 YAG 光纤激光器, 功率在 $100\text{ W}-2\text{ kW}$ 范围内可调, 波长为 1070 nm . 该激光器长时间出光功率稳定性优于 2% . 激光器输出单模高斯光束, 经光纤准直器后光斑直径约为 9 mm . 分束器采用楔镜, 相比平面镜, 可抑制干涉效应, 提升分光的精度和稳定性. 楔镜可将激光分为一束透射的强光和两束空间上分离的反射弱光. 前表面的反射光辐照到光电探测器上用于功率监测. 强光用于辐照平板测量装置和标准功率计 (Ophir, 不确定度 1.3%). 为了采用大光斑照射平板能量计, 采用透镜 ($f = 50\text{ cm}$) 对激光进行扩束. 通过调节透镜与平板能量计的相对位置, 控制到达平板的光斑大小为 25 cm . 由数值仿真分析得 (受限于篇幅, 本文未给出), 对于 10 cm 的采样间隔, 光斑半径大于 12 cm 即可满足响应与激光照射位置无关的要求.

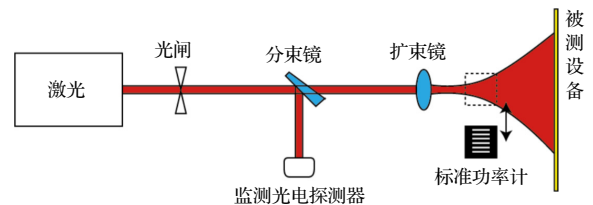


图 4 标定实验系统
Fig. 4. Calibration experimental system.

典型的监测激光功率变化和平板测量装置的响应分别如图 5(a) 和图 5(b) 所示. 功率结果显示, 在出光阶段, 激光功率随时间发生抖动, 不确定度

为 0.9%, 在厂家标称的 2% 范围内. 平板测量装置的响应曲线分为 4 个阶段: 首评定段 0—150 s, 工作段 150—180 s, 调整段 180—300 s 和末评定段 >300 s. 首评定段温度略微有所下降, 这是受前一次标定的影响, 吸收体的温度高于环境温度. 有的发次中首评定段也可能升温, 本文的算法均适用. 在工作段, 温度近似直线上升, 原因是在激光照射下, 激光热流远大于热损失, 吸收体的温度变化受激光热流主导. 当激光停止后, 进入调整段, 吸收体的温度未按照单指数衰减下降. 当前显示调整段时长约 2 min. 如根据热扩散速率估算, 当前构型热平衡时间可达 $l^2 \rho c_p / k = 57.6 \text{ min}$, 缩短为原来的 1/28, 与理论估计值 1/25 相当. 实际的调整段与被测光斑分布有关, 被测光斑越大越均匀, 调整段越短.

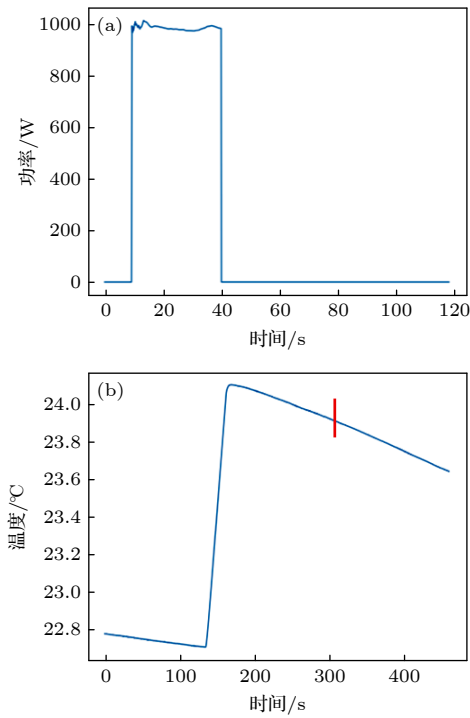


图 5 测量结果 (a) 监测光强; (b) 温度变化历程
Fig. 5. Measurement results: (a) Monitor power; (b) temperature changing curve.

通过改变入射激光能量, 获得平板测量装置的线性响应特性. 固定激光照射时间为 30 s, 调节激光功率分别为 100, 200, 500, 1000, 1500 和 2000 W, 改变入射激光的能量. 平板能量计在不同激光能量下的响应如图 6 所示. 横坐标为入射激光总能量. 纵坐标表示平板所吸收的能量. 平板吸收的能量随入射激光能量增大而增大, 采用线性拟合, 结果如图 6 中红色直线所示. 线性度优于 99.99%. 拟合曲

线斜率的相对不确定度为 0.3%. 因此, 在 100—2000 W 范围内, 系统响应随着激光能量的增加而线性增大. 该结果表明, 该平板能量计具有良好的线性响应.

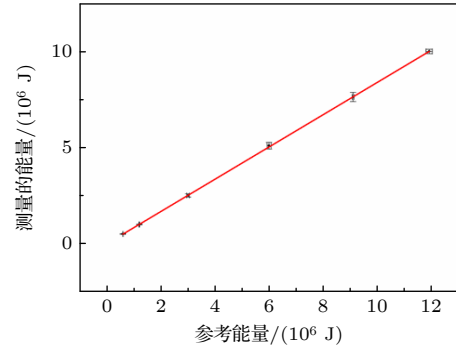


图 6 标定结果
Fig. 6. Calibration results.

参考 GJB9894-2020 进行测量不确定度分析. 系统的不确定度来源于标定结果的重复性、响应线性度、参考功率计的不确定度、标定光源的不确定度和环境变化, 合成标准相对不确定度的表达式为

$$u_{\text{rel}} = [u_{\text{rel}}^2(Q_m) + u_{\text{rel}}^2(R_l) + u_{\text{rel}}^2(Q_s) + u_{\text{rel}}^2(Q_{\text{laser}}) + u_{\text{rel}}^2(Q_e)]^{1/2}. \quad (22)$$

$u_{\text{rel}}(Q_m)$ 为重复性引入的相对不确定度, 由给定功率下的多次重复标定实验得到, 本文在 1000 W 下重复标定 5 次, 该不确定度的值为 2.7%.

$u_{\text{rel}}(R_l)$ 为响应线性度的相对不确定度, 由多个能量下标定得到, 数值为 0.3%.

$u_{\text{rel}}(Q_s)$ 为参考功率计的不确定度, 由厂家给出, 数值为 1.3%.

$u_{\text{rel}}(Q_{\text{laser}})$ 为标定光源引入的不确定度, 由实验测量得到, 数值为 2%.

$u_{\text{rel}}(Q_e)$ 为环境变化引入的不确定度, 主要表现在环境温度的变化. 实验中, 需尽量控制环境温度稳定. 考虑到平板吸收体升温后会引入周围环境的变化, 好在测量时间较短, 环境温度变化通常较小. 该部分通过仿真分析进行评估, 相对不确定度为 1%.

最终, 合成标准相对不确定度为 4%.

4 讨论部分

激光加热平板的理论分析结果表明, 温度场可以分解为多种频率的余弦函数组合, 且高频成分快

速衰减. 该结果与文献 [20] 相符合. 改进之处在于给出了矩形平板温度场分量的具体表达形式为余弦函数. 鉴于此, 通过均布的温度传感器阵列使得能够尽早测得准确的平均温度. 传统的恒温能量计为了使得吸收体的温度均匀, 常采用光学锥体散射和腔体结构, 被测激光进入后会散射近似均匀加热吸收体, 因此只采用单只温度传感器. 在实验中, 观察到调整段从约 1 h 缩短为约 2 min, 与理论估计相当, 验证了理论分析的准确性. 基于热损失补偿后的校正温度不变迭代算法, 相比传统算法, 无需要求平板测量装置增加额外的加热器预热, 能够在多种工况下进行能量反演, 算法的适应性更强. 针对由于温度传感器采样率有限导致的工作段和调整段的非均匀温度影响, 提出了非均匀温度校正算法, 该算法将工作段和调整段的温度变化过程按照稳功率均匀光斑产生的理想温度历程进行修正, 使得热损失校正准确性更高, 提升了能量反演精度.

5 结 论

本文围绕平板测量技术开展研究, 得到的主要结论有:

1) 通过对平板测量技术进行理论研究, 获得了激光加热平板引起的温度场变化规律, 证实了温度场变化可以表示为多个余弦函数之和. 基于此认识, 采用均匀排布的温度传感器设计, 以缩短调整期时间, 同时降低非均匀温度对测温的影响.

2) 提出了免预热且非均匀温度校正能量反演算法, 免除了平板吸收体的加热部件, 能量反演算法的适用性更强, 对工作段和调整段的温度变化历程进行了校正, 降低了非均匀温度的影响.

3) 研制了原理样机, 开展了激光标定实验, 结果表明, 系统重复性为 2.7% 和线性度为 0.3%, 合成标准不确定度为 4%.

强激光参数测量通常在外场进行, 与实验室环境相比更加恶劣, 可能会出现许多意想不到的问题, 从而引发更多有价值的研究, 因此, 后续我们将积极开展平板测量技术在外场试验中的使用.

参考文献

- [1] Williams P A, Spidell M T, Hadler J A, et al. 2020 *Metrologia* **57** 015001
- [2] Wei J F, Hu X Y, Zhang K, Sun L Q 2017 *Infrared and Laser Engineering* **46** 706004 (in Chinese) [魏继锋, 胡晓阳, 张凯, 孙利群 2017 红外与激光工程 **46** 706004]
- [3] Xu X J 2020 *High Power Laser and Particle Beams* **32** 30 (in Chinese) [许晓军 2020 强激光与粒子束 **32** 30]
- [4] Andrews L C, Phillips R L 2005 *Laser Beam Propagation through Random Media* (2nd Ed.) (Bellingham: SPIE Press) pp9–26
- [5] Du P B, Liu Y, Chen Z H, Guan Q, Xia H F, Cai L B 2021 *Modern Applied Physics* **12** 020301 (in Chinese) [杜配冰, 刘钰, 陈志华, 关奇, 夏洪富, 蔡利兵 2021 现代应用物理 **12** 020301]
- [6] Lazov L, Karadzhov T 2021 *Environment Technologies Resources Proceedings of the International Scientific and Practical Conference* **3** 173
- [7] Sprangle P, Hafizi B, Ting A, Fischer R 2015 *Appl. Opt.* **54** F201
- [8] Li X, Hadler J, Cromer C, Lehman J, Dowell M 2008 *High Power Laser Calibrations at NIST* Tech. Rep. NIST SP 250-77
- [9] Luan K P, Zhao H C, Wu J J, Wang P, Cui M, Wu Y, Wang D H, Shi Y B, Chen S W, Yang P L, Wu L X 2022 *Modern Applied Physics* **13** 030302 (in Chinese) [栾昆鹏, 赵海川, 武俊杰, 王平, 崔萌, 吴勇, 王大辉, 师宇斌, 陈邵武, 杨鹏翎, 吴丽雄 2022 现代应用物理 **13** 030302]
- [10] Feng G B 2015 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Xidian University) (in Chinese) [冯国斌 2015 博士学位论文 (西安: 西安电子科技大学)]
- [11] Guan W L, Tan F F, Dou Z H, Luo J, Qin L A, He F, Zhang S L, Wu Y 2022 *Acta Optics Sinica* **42** 0214002 (in Chinese) [管雯璐, 谭逢富, 侯再红, 罗杰, 秦来安, 何枫, 张巳龙, 吴毅 2022 光学学报 **42** 0214002]
- [12] Higgs C, Grey P C, Mooney J G, Hatch R E, Carlson R R, Murphy D V (edited by Steiner T D, Merritt P H) 1999 *AeroSense99* (Orlando: FL) pp216–226
- [13] Yang P, Feng G, Wang Q, Wang J, Cheng J (edited by Zhou L) 2007 *International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging: Technology and Applications* Beijing, China p66220T
- [14] Pang M, Rong J, Zhou S, Wu J, Fan G, Zhang W, Hu X 2014 *Rev. Sci. Instrum.* **85** 013105
- [15] Gunn S R 1973 *J. Phys. E: Sci. Instrum.* **6** 105
- [16] Lei J J, Wang Liang, Duan Y Y, Gu Heng, Liu X Y 2015 *Electronic Design Engineering* **23** 138 (in Chinese) [雷俊杰, 王亮, 段园园, 谷衡, 刘晓英 2015 电子设计工程 **23** 138]
- [17] Tang L, Li X Q, Dang Z, Wang C, Chen J 2010 *Electronic Measurement Technology* **33** 5 (in Chinese) [唐菱, 李小群, 党钊, 王超, 陈骥 2010 电子测量技术 **33** 5]
- [18] Fang B L, Han J, Wang D H, Feng G, Tao B, Wang Z B, Wang J G 2022 *Modern Applied Physics* **13** 040301 (in Chinese) [方波浪, 韩静, 王大辉, 冯刚, 陶波, 王振宝, 王建国 2022 现代应用物理 **13** 040301]
- [19] West E, Case W, Rasmussen A, Schmidt L 1972 *Journal of Research of the National Bureau of Standards Section A: Physics and Chemistry* **76A** 13
- [20] West E D, Churney K L 1970 *J. Appl. Phys.* **41** 2705
- [21] Mejia D, Moreno A, Arbelaz A, Posada J, Ruiz-Salguero O, Chopitea R 2018 *J. Manuf. Sci. Eng.* **140** 031006
- [22] Jiang H J, Dai H L 2015 *Int. J. Heat Mass Transfer* **82** 98
- [23] Mejia-Parra D, Moreno A, Posada J, Ruiz-Salguero O, Barandiaran I, Poza J C, Chopitea R 2019 *Math. Comput. Simul.* **166** 177
- [24] Johnson E G 1977 *Appl. Opt.* **16** 2315

Large-spot laser energy measurement based on flat-plate calorimetry*

FANG Bolang LUAN Kunpeng WU Junjie WU Yong YANG Taiqi
ZHANG Yang LI Tianzhi WANG Dahui YANG Pengling†

(Northwest Institute Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

(Received 1 August 2025; revised manuscript received 28 August 2025)

Abstract

The measurement of total energy on a target is a critical step in evaluating the performances of high-power laser systems. However, the laser spot on the target exhibits characteristics such as high power density, non-uniform spatial distribution and temporal distribution, and large spot size, which present a significant challenge to the accurate measurement of total energy. To meet the requirement for high-precision measurement of the total energy of a large spot, this work focuses on plate-based energy measurement technology. First, we investigate the physical processes of laser-heated plates and obtain analytical solutions, demonstrating that uniformly arranged temperature sensor arrays can shorten the relaxation period. Second, to overcome the limitations of traditional energy inversion algorithms, such as the need to preheat the absorber and potential non-uniform temperature effects, we propose correction methods. The non-preheated calorimetry method eliminates the requirement that the absorber temperature must be higher than the ambient temperature during the initial rating period. It iteratively optimizes the ambient temperature and heat loss coefficients based on corrected temperature invariance. Additionally, a non-uniform temperature correction algorithm is employed to minimize the errors caused by limited sensor sampling rates through reconstructing the temperature curve during the injection and adjustment periods. Finally, we develop a plate measurement device and conduct laser calibration tests, achieving a system repeatability of 2.7%, linearity of 0.3%, and a combined standard uncertainty of 4%. This study lays a theoretical foundation for flat-plate laser energy measurement technology, offering important insights into optimizing the apparatus design, improving usability, and achieving high-precision energy inversion.

Keywords: laser parameter measurement, energy, flat-plate calorimetry, energy inversion algorithm

PACS: 06.20.Dk, 06.90.+v, 42.81.Cn, 47.50.Ef

DOI: [10.7498/aps.74.20251032](https://doi.org/10.7498/aps.74.20251032)

CSTR: [32037.14.aps.74.20251032](https://cstr.net.cn/detail/32037.14.aps.74.20251032)

* Project supported by the State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, China (Grant No. SKLLIM-KB-2404).

† Corresponding author. E-mail: yangpengling@nint.ac.cn



基于平板量热的大面积激光光斑能量测量方法

方波浪 栾昆鹏 武俊杰 吴勇 杨太旗 张洋 李天植 王大辉 杨鹏翎

Large-spot laser energy measurement based on flat-plate calorimetry

FANG Bolang LUAN Kunpeng WU Junjie WU Yong YANG Taiqi ZHANG Yang LI Tianzhi
WANG Dahui YANG Pengling

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 200601 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20251032

CSTR: 32037.14.aps.74.20251032

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20251032>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

电驱动引发液滴弹跳过程中的能量转换

Energy conversion during electrically actuated jumping of droplets

物理学报. 2022, 71(11): 114702 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212133>

基于旋转不变技术信号参数估计的激光扫频干涉测量方法

Laser frequency scanning interferometry based on estimating signal parameters via rotational invariance technique

物理学报. 2021, 70(3): 034205 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201135>

基于Z扫描技术的超快脉冲激光焦深测量方法

A method of measuring depth of focus in ultrafast pulsed laser systems based on Z-scanning technology

物理学报. 2025, 74(7): 074202 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241658>

中能质子注量率测量

Measurement of medium-energy proton flux

物理学报. 2022, 71(1): 012902 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211561>

基于热超构材料的能量收集与热电转换特性

Energy harvesting and thermoelectric conversion characteristics based on thermal metamaterials

物理学报. 2022, 71(20): 207304 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221061>

基于空谱干涉和频域分割的超快激光时空耦合特性的单次测量方法

Single-frame measurement of complete spatiotemporal field of ultrashort laser pulses using frequency domain separate spectral interferometry

物理学报. 2022, 71(3): 034203 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211665>