文章编号:1672-3392(2024)04-0001-06

基于辐射压力测量技术的千瓦级高能激光功率测量装置

周志刚 杜继东 郭 靖 邓 培 王加朋

(北京振兴计量测试研究所,北京 100074)

摘要 随着高能激光功率的不断增加,在实际应用中对高能激光功率的实时精确测量的需求愈发显著。传统的激光功率测量方式以吸收式量热功率计为主。吸收式量热功率计存在体积庞大、测量速度慢、测量精度难以提升等共同问题,不适合高能激光的实时功率测量需求,而辐射压力功率测量装置能够有效解决上述问题。基于辐射压力功率测量原理,设计并研制能够实时测量激光功率最高达6 kW的辐射压力功率测量装置。该辐射压力功率测量装置针对1 080 nm高能红外激光器输出激光功率进行测量,实际功率测量范围可达1~6 kW,测量分辨率低至50 W,测量重复性优于1%,研究成果能够满足千瓦量级高能激光功率的实时精确测量需求,实现对高能激光的功率实时监测与传输损耗评估,在高能激光加工、激光制导与激光通信等领域的实际应用中具备研究意义。

关键词 红外激光;高功率激光;激光功率测量;辐射压力测量;测量重复性

中图分类号 TN249 **文献标识码** A

1 引 言

随着高能激光技术不断取得重大突破,激光功率在千瓦量级以上的高功率激光器的应用领域不断扩展,高功率激光器输出功率早已突破万瓦量级,并且在激光加工、激光制导与激光通信等领域中广泛应用[1,2]。随着高能激光技术的不断发展,高能激光的输出功率不断提高,高能激光在实际应用中能够对目标起到更明显的直接作用。这种高能激光对目标的作用效果不仅取决于激光器输出功率,而且直接取决于到达目标处的激光功率。激光在大气传输中,受到湍流、热晕和消光等的影响,远场激光功率相对于激光器出口有较大变化[3-5]。为了对这种变化进行实时监测,实际应用中对高能激光功率的实时测量技术提出了新的更高要求。

目前,传统的激光功率测量方式以吸收式量热功率计为主[6-9]。量热计通过吸收腔吸收光子,将光能转换为热能后,引起温度变化,从而在热电探测器两端产生温差电动势,通过对电流或电压进行测量的方式实现激光功率测量。由于传统的吸收式量热计在测量时需要吸收激光能量并将其转换为热能,因此在测量高能激光功率时热效应的影响将极为显著,导致量热计的测量精度显著下降。为了获得更加准确的测量结果,需要通过大幅增大光敏面尺寸以降低单位面积上的光功率密度,并通过设计水冷循环系统及时传递功率计吸收光功率后产生的热量[10]。上述设计将导致吸收式量热功率计存在体积庞大、测量速度慢、测量精度难以提升等共同问题,因此不适合于高能激光的实时功率测量需求。

与吸收式量热功率计相比,辐射压力功率计为反射式功率计,通过测量高能激光辐射压力的方式精确测量高能激光功率,无需对高能激光进行吸收,因此能够避免热效应对功率计内各元器件的影响,保证了功率计在接收高功率激光时仍能进行精确测量,大幅提高了可测量高能激光的

收稿日期 2023-08-03 **收修改稿日期** 2023-10-16
作者简介 周志刚(1992—),男,博士,工程师,主要研究方向为激光参数测量技术。

功率范围与功率测量精度[11-13]。不仅如此，辐射压力功率计的响应时间完全由压力传感器的响应时间决定，相比于传统的量热功率计响应时间更快，因此更加适合在实际应用中对高能激光功率进行实时测量的需求[14,15]。

本文基于辐射压力测量技术，设计并研制了一种能够准确测量高能激光功率的辐射压力功率测量装置。所研制的辐射压力功率测量装置能够测量输出功率最高达到 6 kW 的高能激光功率，测量分辨率低至 50 W，测量重复性优于 1%。

2 工作原理

基于辐射压力的功率计系统的工作原理为：通过测量高能激光对物体施加的压力，并通过计算方式得到激光功率。实际的测量过程中，一般通过压力传感器测量以一定角度入射的激光的辐射压力，如图 1 所示，图中高能激光以角度 θ 入射，在压力传感器的表面安装高反射率反射镜，反射高能激光的同时测量得到高能激光入射时产生的辐射压力，之后根据辐射压力计算得到对应的激光功率。

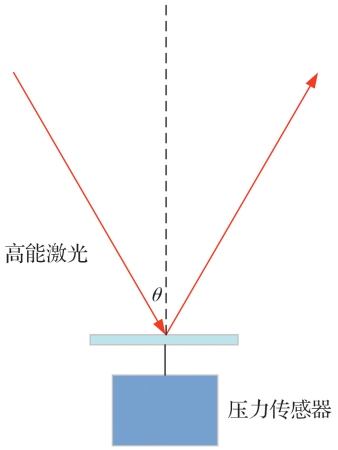

图 1 辐射压力功率测量原理

Fig. 1 Schematic diagram of radiation pressure power measurement

一般情况下，压力传感器测量得到的入射信号光压 F_R 与激光功率 P 的关系为

$$P = \frac{cF_R}{[2R + (1 - R)\alpha]\cos\theta} \tag{1}$$

式中，c 为光速，R 为压力传感器上表面反射率，α 为被反射膜层吸收的光子数百分比，θ 为激光入射角。对于本文所描述的测试系统，反射镜反射率远大于被反射膜层吸收的光子数百分比，因此可以忽略掉吸收项，将式(1)改写为

$$P = \frac{cF_R}{2R\cos\theta} \tag{2}$$

根据式(2)能够由光压值计算得到入射激光的光功率，从而实现高能激光输出功率的实时精确测量。

3 系统设计

本文设计的辐射压力功率计系统如图 2 所示。该光压测试系统由高透过率窗口片、高反射率方形反射镜、高反射率圆形反射镜、压力传感器与信号处理系统组成。

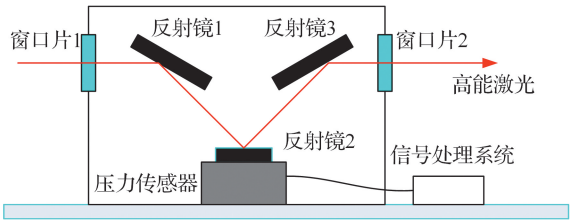

图 2 辐射压力功率测量装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of radiation pressure power measurement device

高能激光经过高透射率窗口片 1 入射至高反射率方形反射镜 1，高透过率窗口片主要为石英玻璃窗口，以康宁 7980 玻璃为基底，在石英玻璃外侧镀多层高低折射率周期性交替分布的增透介质膜，每层材料厚度为 $\lambda/4$，以实现高透射率增透。本文所采用的高透过率窗口在 970~1 100 nm 内达到最高 99.9% 的透射率。

高反射率方形反射镜 1 为大角度的高反射率反射镜，以康宁 7980 为基底，镀金属膜以及介质膜。在金属膜外侧镀多层高低折射率周期性交替分布的介质防护膜，每层材料厚度为 $\lambda/4$，以实现高反射率反射。由于入射至高反射率方形反射镜 1 的光斑在沿光路入射方向要明显长于垂直于光路入射方向的尺寸，因此高反射率方形反射镜 1 设计为长方形反射镜，长轴的方向与光

传播方向共面。

高能激光经高反射率方形反射镜 1 反射后入射至高反射率圆形反射镜 2 处，高反射率圆形反射镜 2 为小角度的高反射率反射镜，同样以康宁 7980 为基底，镀金属膜以及介质膜。在金属膜外侧镀多层高低折射率周期性交替分布的介质防护膜，每层材料厚度为 $\lambda/4$，以实现高反射率反射。本文所采用的方形与圆形高反射率反射镜在 970~1 100 nm 内达到最高 99.99% 的反射率。

上述高反射率反射镜在设计时考虑了高能激光可能造成的膜层损伤。膜层损伤指激光辐照下光学薄膜或基底造成永久和不可逆损伤情况。造成薄膜损伤的因素包括热破坏、热应力、气化、烧蚀、冲击波等。其中对应高能连续激光，造成损伤的主要原因为热破坏与热应力。具体为当激光入射至膜层时被膜层吸收的能量转化为热能。热量通过热传导在膜层内扩散并形成温度场。高激光功率所产生的热量可能导致物质的特性和状态发生变化，微观上可能表现为电子或空穴的激发、跃迁，分子的解理和原子的电离等；宏观上可能表现为温升、膨胀、熔融、气化等。本文所采用的高反射率反射镜采用镀介质保护膜的方式，以保护反射膜层，防止高能激光对膜层产生损伤。

高反射率圆形反射镜 2 与压力传感器进行一体化设计。压力传感器选择高精度电子天平（WXSS205DU，瑞士梅特勒-托利多公司）。该型号的高精度电子天平在 0~110 g 的称重范围内具有 10 μg 的测量精度，对应的力测量精度可达 98 nN。压力传感器将入射至高反射率圆形反射镜 2 前表面的高能激光所造成的光子流压力转换为电信号，经由连接计算机的信号处理系统对电信号进行反演，得到入射激光的光压值。

考虑到高能激光每个反射镜与窗口均存在一定程度的吸收与损耗，设反射镜的反射率为 r，石英窗口的透射率为 t，那么对应输入系统之前与从系统输出的光功率 Pin 与 Pout 分别为

$$P\text{in} = \frac{P}{r^{3/2}t} \tag{3}$$

$$P\text{out} = Ptr^{3/2} \tag{4}$$

入射光在经过高反射率圆形反射镜 2 反射后，再次反射至一块与高反射率方形反射镜 1 尺寸相同的高反射率方形反射镜 3，激光经由高反射率方形反射镜 3 反射后，沿原光路传播方向通过高透射率窗口片 2 输出。通过这一设计保证本功率测试系统不改变激光光路的传播方向。

4　测量结果及分析

采用本文所研制的辐射压力功率测量装置对波长 1 080 nm、1~6 kW 范围内不同功率的高能红外激光进行测量，随时间变化的功率测量结果如图 3~图 5 所示。图中分别给出了采用量热计（红线）与光压测试系统（黑线）测量激光功率的测量结果，在测量高能激光功率时，光压测试系统达到稳定的时间远快于量热计，并且测量结果与额定激光功率的符合程度更好。

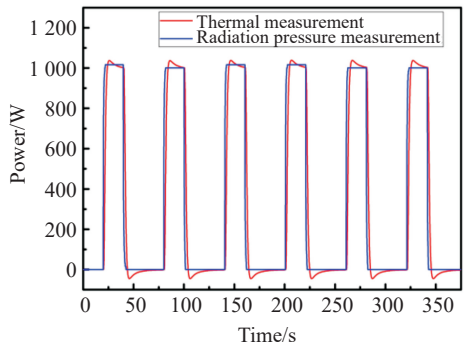

图 3　1 kW 红外激光功率测量结果

Fig. 3　Infrared laser power measurement result of 1 kW

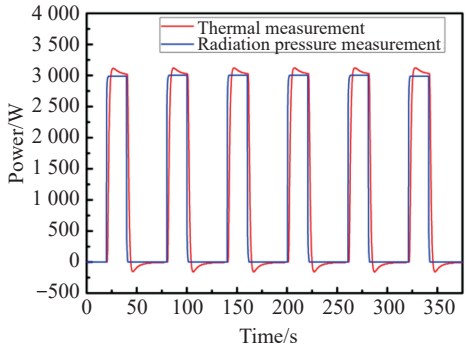

图 4　3 kW 红外激光功率测量结果

Fig. 4　Infrared laser power measurement result of 3 kW

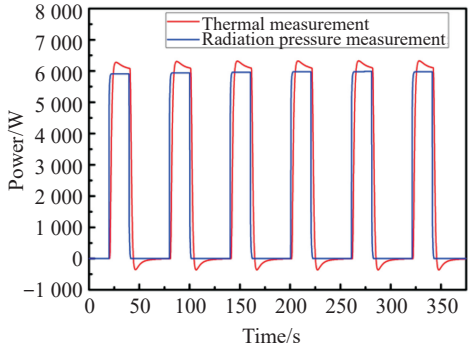

图5 6 kW红外激光功率测量结果

Fig. 5 Infrared laser power measurement result of 6 kW

针对上述功率的详细测量结果如表1所示。对应额定功率1 kW、3 kW与6 kW条件下，测量到的激光功率分别为1 008.78 W、2 997.67 W与5 958.84 W。按照相对标准偏差方式计算激光功率的稳定度，对应额定功率1 kW、3 kW与6 kW条件下，测量到的激光功率相对标准偏差分别为0.85%、0.27%与0.47%。上述测量结果表明，对于功率在1~6 kW范围的高能激光，其功率的测量重复性能够优于1%。

表1 高能激光功率详细测量结果

Table 1 Detailed measurement result of laser power W

额定功率	测量数据1	测量数据2	测量数据3	测量数据4	测量数据5	测量数据6	平均功率	相对标准偏差
1 kW	1 016.6	1 000.96	1 016.6	1 016.6	1 000.96	1 000.96	1 008.78	0.008 491 823
3 kW	2 987.24	3 002.88	3 002.88	3 002.88	3 002.88	2 987.24	2 997.67	0.002 694 249
6 kW	5 911.92	5 943.2	5 958.84	5 974.48	5 990.12	5 974.48	5 958.84	0.004 695 156

本文所研制的辐射压力功率测量装置的测量不确定度可以通过给出的测量不确定度评定方法进行评定[14]。测量不确定度由A类不确定度分量与B类不确定度分量合成计算得到。其中A类不确定度分量为测量重复性，结果由表1给出。B类不确定度包含多个不同的B类不确定度分量，包括反射镜反射率、激光入射角度、测量分辨率与线性度等。具体的高能激光功率测量不确定度分量分析结果如表2所示。

表2 激光功率测量不确定度分量分析结果

Table 2 The uncertainty component analysis results of laser power

不确定度分量名称	测量不确定度类型	1 kW	3 kW	6 kW
测量重复性	A类测量不确定度	0.85%	0.27%	0.47%
标准砝码质量不确定度 U_m	B类测量不确定度	0.16%	0.05%	0.03%
反射镜反射率 U_θ	B类测量不确定度	0.03%	0.03%	0.03%
激光入射角度 U_r	B类测量不确定度	0.30%	0.30%	0.30%
测量分辨率 U_{res}	B类测量不确定度	0.45%	0.15%	0.08%
线性度 U_l	B类测量不确定度	0.10%	0.10%	0.10%

根据各不确定度分量分别计算得到系统的A类与B类测量不确定度，其中A类测量不确定度 u_a 为表1给出的测量重复性，B类测量不确定度 u_b 的计算公式如式(5)所示：

$$u_b = \sqrt{u_m^2 + u_\theta^2 + u_r^2 + U_{res}^2 + U_l^2} \tag{5}$$

式中，各分量分别对应表2中所给出的各B类不确定度分量。

根据式(5)计算得到的A类与B类测量不确定度计算得到合成标准不确定度，计算公式如式(6)所示：

$$u = \sqrt{u_a^2 + u_b^2} \tag{6}$$

计算得到的合成标准不确定度如表3所示。根据计算结果，在1 kW时，本辐射压力功率测量装置的合成标准不确定度最高，为1.02%。随着激光功率的逐渐提高，本测量装置的测量不确定度逐渐降低。上述结果表明本测量装置非常适合于高能激光功率的测量。

表3 激光功率测量不确定度

Table 3 Uncertainty of laser power

测量不确定度类型	1 kW	3 kW	6 kW
A类测量不确定度	0.85%	0.27%	0.47%
B类测量不确定度	0.57%	0.354%	0.329%
合成标准不确定度(k=1)	1.02%	0.59%	0.42%

采用本文所研制的辐射压力功率测量装置分别对额定功率 1 kW 与 1.05 kW 的激光功率进行了测量，以测量系统的功率分辨率，测量结果如表 4 所示。

表 4　高能激光功率分辨率测量结果

Table 4　Measurement resolution of laser power　　W

额定功率	测量数据 1	测量数据 2	测量数据 3	测量数据 4	测量数据 5	测量数据 6	平均功率
1 kW	1 016.6	1 000.96	1 016.6	1 016.6	1 000.96	1 000.96	1 008.78
1.05 kW	1 063.52	1 047.88	1 047.88	1 063.52	1 063.52	1 063.52	1 058.31

对于额定功率差为 50 W 的激光功率，采用本文所研制的辐射压力功率测量装置测量得到的激光平均功率分别为 1 008.78 W 以及 1 058.31 W，平均功率之差为 49.53 W，测量得到的平均功率差与额定功率差之间的偏差小于 1%，表明系统的有效分辨率能够达到 50 W。

5　结　论

本文设计并研制了一种能够准确测量高能激光功率的辐射压力功率测量装置，能够测量到的输出功率范围覆盖 1~6 kW，测量分辨率低至 50 W，测量重复性优于 1%，测量不确定度优于 1.02%（k=1）。所研制的辐射压力功率测量装置能够以高分辨率精确测量千瓦量级的高能激光功率，从而进一步推动高能激光功率测量领域的发展。

参 考 文 献

[1] 奚小明，杨保来，王鹏，等．万瓦级光纤激光双色镜合成技术[J]．物理学报，2023，72(18)：184203.
XI Xiao-ming，YANG Bao-lai，WANG Peng，*et al*. Over 10-kW fiber laser spectral beam combination based on dichromatic mirror[J]. Acta Physica Sinica，2023，72(18)：184203.

[2] 肖起榕，田佳丁，李丹，等．级联泵浦高功率掺镱光纤激光器：进展与展望[J]．中国激光，2021，48(15)：1501004.
XIAO Qi-rong，TIAN Jia-ding，LI Dan，*et al*. Tandem-pumped high-power ytterbium-doped fiber lasers：Progress and opportunities[J]. Chinese Journal of Lasers，2021，48(15)：1501004.

[3] 马康，刘传波．基于阵列式探测器的高能激光大气传输试验与评估方法研究[J]．光学与光电技术，2017，15(4)：16-20.
MA Kang，LIU Chuan-bo. Test and evaluation method of the high-energy laser atmospheric transmission based on the detector array[J]. Optics and Optoelectronic Technology，2017，15(4)：16-20.

[4] 谈斌，杨晓燕．卡式系统装调对高功率激光光束远场聚焦性能影响研究[J]．光学与光电技术，2021，19(5)：61-66.
TAN Bin，YANG Xiao-yan. Study on the influence of alignment of cassegrain system on the propagation properties and beam control of high-power lasers[J]. Optics and Optoelectronic Technology，2021，19(5)：61-66.

[5] 原冰鑫．相位预校正高能激光大气传输与毁伤效应研究[D]．成都：电子科技大学，2023.
YUAN Bing-xin. Propagation and damage effect modeling of phased corrected high energy laser in the atmosphere [D]. Chengdu：University of Electronic Science and Technology of China，2023.

[6] 黎高平，杨鸿儒，杨斌，等．绝对吸收式激光能量计高准确度校准技术研究[J]．应用光学，2014，35(3)：438-440，458.
LI Gao-ping，YANG Hong-ru，YANG Bin，*et al*. High-accuracy optical calibration technology for absolute-absorbing laser energy meter[J]. Journal of Applied Optics，2014，35(3)：438-440，458.

[7] 王德飞，范婕，楚振锋，等. 基于非球面分光镜的高能激光功率和能量测试研究[J]. 科学技术与工程，2013，13(19)：5653-5656.
WANG De-fei，FAN Jie，CHU Zhen-feng，*et al*. Research on test of power and energy for high-energy laser based on aspheric spectroscope[J]. Science Technology and Engineering，2013，13(19)：5653-5656.

[8] TIAN X，BAI Y，LI B，*et al*. Finite element thermal analysis of optical elements in a laser incoherent space beam combiner[J]. Journal of Russian Laser Research，2022，43(5)：579-589.

[9] Meuken D，Van Binsbergen S A，Scheers L C W，*et al*. Reflection measurements in TNO's 30 kW laser facility[J]. Conference of High-Power Lasers and Technologies for Optical Countermeasures，2022，12273：122730D.

[10] Williams P A，Hadler J A，Cromer C，*et al*. Flowing-water optical power meter for primary-standard，multikilowatt laser power measurements[J]. Metrologia，2018，55(3)：427-436.

[11] 孙青，马冲，林延东，等. 基于光压原理的高功率激光测量装置[J]. 中国激光，2021，48(3)：0315002.
SUN Qing，MA Chong，LIN Yan-dong，*et al*. High-power laser measurement device based on light pressure principle[J]. Chinese Journal of Lasers，2021，48(3)：0315002.

[12] Williams P A，Artusio-Glimpse A B，Hadler J A，*et al*. Radiation-pressure-enabled traceable laser sources at CW powers up to 50 kW[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement，2019，68(6)：1833-1839.

[13] Artusio-Glimpse A B，Rogers K A，Williams P A，*et al*. High amplification laser-pressure optic enables ultra-low uncertainty measurements of optical laser power at kilowatt levels[J]. Metrologia，2021，58(5)：055010.

[14] 赵利强，孙振山，于东钰，等. 光压型高功率激光测量装置的测量重复性研究[J]. 中国光学，2023，16(2)：382-389.
ZHAO Li-qiang，SUN Zhen-shan，YU Dongyu，*et al*. Measurement repeatability of high power laser measuring device based on light pressure[J]. Chinese Optics，2023，16(2)：382-389.

[15] Pinot P，Silvestri Z. Optical power meter using radiation pressure measurement[J]. Measurement，2019，131：109-119.

Kilowatt-Level High Laser Power Measurement Device Based on Radiation Pressure Measurement Technology

ZHOU Zhi-gang DU Ji-dong GUO Jing DENG Pei WANG Jia-peng

（Beijing Zhenxing Institute of Metrology and Measurement，Beijing 100074，China）

Abstract With the continuous increase of high power laser，the demand for real-time accurate measurement of laser power in practical applications is becoming more and more significant. The traditional laser power measurement mainly depends on absorption calorimeter. The absorption calorimeter has some common problems，including large volume，slow measurement speed and low measurement accuracy. As a result，it is not suitable for the real-time power measurement of high power laser. The radiation pressure power measurement can effectively solve those problems. Based on the principle of radiation pressure power measurement，this paper designs and develops a rediation pressure power measurement device which can measure laser power up to 6 kW in real time. The device measures the output power of high-power infrared laser at 1 080 nm. The power range reaches 1 kW to 6 kW，the resolution of measurement reaches 50 W，and the measurement stability is better than 1%. The device can meet the real-time and accurate measurement requirements of kilowatt high power laser. The device can monitor the laser power in real-time，and can evaluate the transmission loss. The device will have great research value in the practical applications including high energy laser processing，laser guidance and laser communication.

Key words infrared laser；high power laser；laser power measurement；radiation pressure measurement；measurement repeatability