

一种靶材表面激光辐照功率的间接测量方法

汪彬^{1,2}, 李恒年¹, 谢石林², 王奥¹

(1. 西安卫星测控中心宇航动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710043; 2. 西安交通大学航天航空学院, 陕西 西安 710049)

摘要:现有的激光功率测量技术难以满足高能激光器到靶功率的测量需求。本文提出了一种基于埋入式FBG(光纤布拉格光栅)传感的靶材表面激光辐照功率间接测量方法。利用两个埋入式FBG传感器实现对靶材内不同深度处温度变化的精确测量,通过对两个FBG传感器测得的温度差进行函数拟合,即可求得靶材表面的激光辐照功率。仿真结果表明,本文所提方法能够有效、精确、不受波长和功率水平限制的间接测得靶材表面的辐照功率。

关键词:高能激光;到靶功率;间接测量;FBG传感器;埋入式

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2022.03.006

An indirect measuring method for laser power on target surface

WANG Bin^{1,2}, LI Heng-nian¹, XIE Shi-lin², WANG Ao¹

(1. State Key Laboratory of Astronautic Dynamics, Xi'an Satellite Control Center, Xi'an 710043, China;

2. Department of Aerospace, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The present measure technologies of laser power is difficult to meet the measurement requirements of the superficial power of targets produced by high energy laser device. An indirect method embedded FBG (fiber Bragg grating) sensors for measuring the superficial power on targets produced by high energy laser is proposed in this paper. Two FBG sensors are embedded in different depths of the target, to realize accurate measurement of temperature changes at different depths within the target. By curve-fitting the temperature difference of the two FBG sensors, the superficial power of targets produced by high energy laser can be measured indirectly. The result of simulations indicates that the proposed method in this paper is effective and accurate, and can indirectly measure the superficial power of targets produced by high energy laser, which is not limited by wavelength and power-level.

Keywords: high energy laser; superficial power; indirect measurement; FBG (fiber Bragg grating) sensor; embedded

1 引言

由于高能激光具有能量密度高、瞬间作用、机动灵活、精准辐照、不受电磁干扰等特点,已有多型高能激光器在工业、国防^[1-2]等领域得到了应用。激光辐照功率是衡量高能激光器照射到靶材表面能量/功率密度的重要参数,决定了对靶材的损伤能力和效果。因而,对于被辐照的对象,高能激光辐照功率的快速测量具有重要的防护应用价值。

激光是受激产生的电磁辐射,本质上是一种能量。因此,可基于能量转换原理将其转换成热能等其他形式能量进行测量。目前,中低水平功率的激光计量测试技术已相当成熟。按照工作方式的不同,现有的激光功率测量方法可分为^[3-5]:光电型、热释电型、光辐射计型、体吸收型、量热计型和流水式等。然而,对于波长范围为0.5~3.8 μm、功率密度为10¹~10³ W/cm²、照射飞机等目标表面的高能激光辐照,现有的激光功率测量技术还存在着一定

的不足。一方面,现有的激光功率测量系统在测量波长和功率范围等方面存在限制,难以满足高能激光器多型波长、宽域到靶功率的需求;另一方面,虽然有关激光功率的测量系统精度很高,但普遍装置结构繁琐、体积庞大^[6],对于非合作、区域辐照的复杂高能激光辐照情况难以开展表面到靶功率的直接分布式测量。此外,到靶功率较高时,容易造成激光能量计损坏和测量不确定度增加,使得直接测量其功率会是一件比较困难的工作。因此,针对波长范围宽、功率范围广的高能激光辐照功率测量问题,还需要开展相关研究。

针对高能激光辐照的功率特点和工作场景,可采用靶材内部埋入传感器的间接测量方式。光纤布拉格光栅(FBG)作为新型温度、应变传感器件,具有精度高、可绕曲、可植入、易于分布式组网等优点,能够实现大空间、多测点、多物理量的传感网络^[7],因而得到了广泛的研究和应用。周林^[7]研究了基于光纤传感技术的结构热属性监测方法和结构应变形态感知与重构算法。耿湘宜^[8]开展了 FBG 与复合材料的集成、信号处理及特征提取等研究,建立了智能复合材料固化变形及状态监测系统。李琪^[9]针对建筑结构健康监测需求提出了一种埋入分布式光纤传感系统的整体设计方案。对于埋入式 FBG 的应变传递问题,梁德志^[10]仿真研究了 FBG 传感器所测应变与实际结构应变的关系。杨吉祥^[11]研制出了基于碳纤维复合材料(CFRP)封装、用于混凝土内部应变测量的 FBG 应变传感器,并分析了传感器轴向应变分布与结构参数的关系。前述研究,为开展靶材表面高能激光辐照功率的间接测量提供了理论和技术支撑。

针对波长范围宽、功率范围广的高能激光辐照功率测量需求,本文提出了一种基于埋入式 FBG 传感的靶材表面激光辐照功率间接测量方法。基于高能激光辐照的靶材升温模型,提出了利用靶材内不同深度处温度差变化规律开展表面激光辐照功率的间接测量方法,设计了利用两个埋入式 FBG 传感开展靶材表面激光辐照功率间接测量的系统方案。本方法具有不受激光波长限制、测量功率范围广、可测量较高功率、易于分布式测量等优点,可广泛用于飞机、航天器等对象表面受到远距离、非合作、高能激光照射的辐照功率

间接测量。最后,通过仿真试验,验证了该方法的有效性,并分析了其测量的灵敏度。

2 高能激光辐照的靶材升温模型

高能激光照射靶材表面时,激光能量会被靶材表面反射、吸收和透射。激光与靶材相互作用的过程遵守能量守恒定律:

$$E_{inc} = E_R + E_T + E_A \quad (1)$$

其中, E_{inc} 表示照射到靶材表面的激光能量; R 、 T 、 A 分别表示靶材表面对激光能量的反射率、透射率和吸收率。通常,靶材为不透明材料,此时有 $R + A = 1$ 。

当靶材受高能激光照射表面时,简单起见可做出如下基本假设^[12-13]: (1) 高能激光束垂直、均匀分布的照射在靶材表面,光斑区域内可按一维情况处理; (2) 辐照功率密度为常值,且忽略传热过程中的辐照热交换和对流热交换; (3) 辐照期间靶材升温但未发生相变,同时材料光学特性(吸收率和反射率)和热物理特性不随温度的变化而变化。

对于矩形时间波形、辐照周期为 t_p 的高能激光,假设其传输到靶材表面处的到靶功率密度为 q_{inc} ,则靶材的辐照加热升温模型为^[13]:

$$T(z, t) = \frac{2Aq_{inc}}{k} \sqrt{\kappa t} \cdot \text{ierfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{\kappa t}}\right), t < t_p \quad (2)$$

其中, z 为与激光入射方向一致的靶材深度; $\kappa = k/\rho c$ 为热扩散系数; k 为材料导热率; ρ 为密度; c 为比热; ierfc 表示积分余误差函数。

3 基于埋入式 FBG 的靶材表面辐照功率间接测量方法

对于非合作高能激光辐照,由于升温模型的特点及温度传感器的分辨率约束,难以确定辐照起始时刻,无法通过单个传感器测量出辐照功率。因此,本文提出了一种采用两个埋入式 FBG 的靶材表面激光辐照功率间接测量方法。

3.1 基于温度差的靶材表面辐照功率间接测量原理

对于靶材内部深度为 z_1 和 z_2 的两个位置处,由式(2)可得:

$$\begin{cases} T_1(t) = \frac{2Aq_{inc}}{k} \sqrt{\kappa t} \cdot \text{ierfc}\left(\frac{z_1}{2\sqrt{\kappa t}}\right) \\ T_2(t) = \frac{2Aq_{inc}}{k} \sqrt{\kappa t} \cdot \text{ierfc}\left(\frac{z_2}{2\sqrt{\kappa t}}\right) \end{cases} \quad (3)$$

上式中两式相减可得:

$$\begin{aligned} \Delta T(t) &= T_1 - T_2 \\ &= \frac{2Aq_{\text{inc}}\sqrt{\kappa t}}{k} \cdot \left[\text{ierfc}\left(\frac{z_1}{2\sqrt{\kappa t}}\right) - \text{ierfc}\left(\frac{z_2}{2\sqrt{\kappa t}}\right) \right] \quad (4) \end{aligned}$$

显然,对于靶材内部给定的两个深度处,其相互间温度差的变化规律完全相同,而幅值则取决于 q_{inc} 的大小。因此,当已知靶材材料参数及内部两个位置间的温度差 ΔT 变化规律时,即可通过函数拟合的方式确定其功率系数 q_{inc} 。特别的,这种到靶功率间接测量方法不受激光波长的限制。

3.2 埋入式 FBG 温度测量原理

FBG 传感器是一种典型的波长调制型光纤传感器,其栅区仅对某个特定波长附近的光进行反射,而其他波长的光则没有影响^[7]。FBG 反射光谱的中心波长由光纤光栅周期 Λ 和有效折射率 n_{eff} 所决定,可表示为^[14]:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (5)$$

当 FBG 所处环境改变时,光纤会产生相应的弹性应力和弹性形变,导致光栅周期和折射率产生变化,进而改变反射光谱的中心波长。研究表明,正常使用情况下温度和应变对 FBG 反射谱中心波长的影响可看作是完全相互独立的^[9]。因此,当 FBG 受温度和应变同时作用时,其反射光谱中心波长的总变化为:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \xi) \cdot \Delta T + (1 - P_e) \cdot \varepsilon \quad (6)$$

式中, α 为光纤材料热膨胀系数; ξ 为光纤材料热光系数; ΔT 表示 FBG 环境温度改变量; P_e 为光纤材料有效弹光系数; ε 表示 FBG 所受的应变。

当 FBG 埋入靶材内部时,其纤芯温度与当地基体的温度相同。而研究表明^[9-10],埋入式 FBG 传感器纤芯的轴向应变与当地基体应变接近而不相等,二者之间的应变传递率取决于涂覆层、胶结层、裸光纤的材料性质及几何尺寸等因素。简化起见,假设 FBG 纤芯的轴向应变 ε_g 均匀分布且满足:

$$\varepsilon_g = k_g \varepsilon_m \quad (7)$$

其中, ε_m 为当地基体的应变; k_g 为应变传递系数,取值范围通常为 $[0.8, 1]$ 。

考虑到垂直、均匀照射的基本假设,由材料力学知,当地基体轴向应变满足:

$$\varepsilon_m = \alpha_m \cdot T_m \quad (8)$$

其中, α_m 为靶材的热膨胀系数。

综上可得,埋入式 FBG 的温度测量原理为:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = [(\alpha + \xi) + (1 - P_e) \cdot k_g \cdot \alpha_m] \cdot \Delta T \quad (9)$$

3.3 基于埋入式 FBG 的辐照功率间接测量系统设计

采用两个埋入式 FBG 的激光辐照功率间接测量系统如上图所示。当在激光辐照靶材内部埋入参数相同的 FBG1 和 FBG2 时,由式(4)和式(9)可得:

$$\begin{aligned} \Delta T(t) &= \frac{2Aq_{\text{inc}}\sqrt{\kappa t}}{k} \cdot \left[\text{ierfc}\left(\frac{z_1}{2\sqrt{\kappa t}}\right) - \text{ierfc}\left(\frac{z_2}{2\sqrt{\kappa t}}\right) \right] \\ &= \frac{\Delta\lambda_{B1} - \Delta\lambda_{B2}}{\lambda_B [(\alpha + \xi) + (1 - P_e)k_g\alpha_m]} \quad (10) \end{aligned}$$

考虑到 FBG 的高灵敏度,上式中 t 的拟合起始值可选为 FBG1 温度变化的时刻。

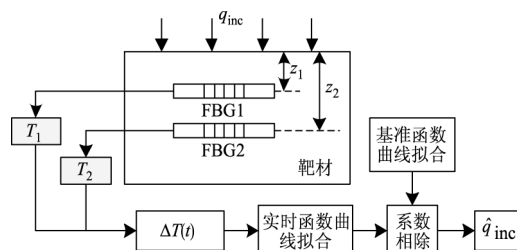


图1 基于埋入式 FBG 的辐照功率间接测量系统示意图

Fig. 1 The indirect measurement system of superficial power based on embedded FBG

4 仿真验证

令靶材材料为铝合金,FBG 类型为石英光纤光栅,开展基于埋入式 FBG 的辐照功率间接测量方法仿真试验验证。靶材和 FBG 的各类参数见表 1。

表 1 仿真试验材料及光纤的参数

Tab. 1 the parameters of target material and FBG

基体参数	密度/(g·cm ⁻³)	比热容/(g·°C)	热导率/(cm·°C)	热膨胀系数/°C ⁻¹	吸收率
铝合金	2.7	0.9	2.0	23.8×10 ⁻⁶	0.02
FBG 参数	热光系数/°C ⁻¹	热膨胀系数/°C ⁻¹	弹光系数/°C ⁻¹	中心波长/nm	温度分辨率/°C
石英光纤	6.3×10 ⁻⁶	0.55×10 ⁻⁶	0.22	1545	0.01

假设两个 FBG 的埋入深度分别为 3 mm 和 6 mm,应变传递系数取值为 0.95。考虑到靶材表面的升温模型,温差函数选用 1 阶多项式进行拟合。基于上述参数,令仿真步长为 0.01 s,在 $t=1$ s 时开始激光辐照,采用两个算例分别开展本文所提靶材表面辐照功率间接测量方法的有效性和灵敏度

验证。

4.1 算例一 到靶功率间接测量精度研究

假设到靶功率分别为 $[1, 10, 100, 1000]$ (W/cm^2),与此同时,令拟合时长分别为 $[0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10]$ (s),研究不同情况下的到靶功率间接测量精度。估计结果和估计误差如表 2 和表 3 所示。

表 2 不同到靶功率和拟合时长时的估计结果

Tab. 2 measurement results of different power with various estimate time

$q_{\text{inc}}/(\text{W} \cdot \text{cm}^{-2})$	拟合时长/s						
	0.1	0.2	0.5	1	2	5	10
1	NaN	1.7915	0.41017	0.51258	0.61691	0.73347	0.80202
10	11.6262	9.0295	8.7175	8.9122	9.1512	9.4224	9.578
50	53.5164	49.0175	48.0286	48.2379	48.5977	49.0367	49.2943
100	107.0329	98.035	96.0572	96.4757	97.1954	98.0733	98.5885
500	500	500	500	500	500	500	500
1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000

表 3 不同到靶功率和拟合时长时的估计误差

Tab. 3 measurement errors of different power with various estimate time

$q_{\text{inc}}/(\text{W} \cdot \text{cm}^{-2})$	拟合时长/s						
	0.1	0.2	0.5	1	2	5	10
1	NaN	79.15	58.983	48.742	38.309	26.653	19.798
10	16.262	9.705	12.825	10.878	8.488	5.776	4.22
50	7.0328	1.965	3.9428	3.5242	2.8046	1.9266	1.4114
100	7.0329	1.965	3.9428	3.5243	2.8046	1.9267	1.4115
500	0	0	0	0	0	0	0
1000	0	0	0	0	0	0	0
5000	0	0	0	0	0	0	0

由表 2 和表 3 可知:①当功率为 $1 \text{ W}/\text{cm}^2$ 且拟合时长为 0.1 s 时,基准温差和实时温差的多项式拟合系数均为 0,导致辐照功率间接测量失败;②在 $100 \text{ W}/\text{cm}^2$ 及以下,间接测量精确度随拟合时间的增加而提高,并最终趋近于一个极限值;③在 $500 \text{ W}/\text{cm}^2$ 及以上水平,不同拟合时长时到靶功率的间接测量误差均为 0;④在相同拟合时长时,随着到靶功率的量级增加,间接测量的精确度阶梯式升

高,在 $1 \text{ W}/\text{cm}^2$ 的极限误差率小于 20 %, $10 \text{ W}/\text{cm}^2$ 极限误差率小于 5 %, $50 \text{ W}/\text{cm}^2$ 和 $100 \text{ W}/\text{cm}^2$ 的极限误差率小于 1.5 %。

4.2 算例二 到靶功率间接测量灵敏度研究

令拟合时长为 5 s,到靶功率分别为 $[5, 50, 500]$ (W/cm^2),令到靶功率摄动为 $[1, 10^{-1}, 10^{-2}, 10^{-3}, 10^{-4}]$ (W/cm^2),开展功率间接测量的灵敏度研究。结果见表 4。

表 4 不同到靶功率时的间接测量灵敏度

Tab. 4 The sensitivity of indirect measurement for different power

功率摄动/ ($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$)	5		50		500	
	功率估计	摄动估计	功率估计	摄动估计	功率估计	摄动估计
0	4.5296	—	49.0367	—	500	—
1	5.5423	1.1179	50.0174	1	501	1
0.1	4.6202	0.1	49.1347	0.0999	500.1	0.1
0.01	4.5387	0.01	49.0465	0.01	500.01	0.01
0.001	4.5305	9.9347×10^{-4}	49.0376	9.1768×10^{-4}	500.001	0.001
0.0001	4.5297	1.1039×10^{-4}	49.0368	1.0196×10^{-4}	500.0001	0.0001

由表4可知,不同到靶功率时均具有极高的功率测量灵敏度。特别的,当到靶功率为 500 W/cm^2 时,可精确测出 10^{-4} W/cm^2 的摄动。此结论与算例一的结论保持一致。

综上所述,本文所提的基于埋入式 FBG 的靶材表面激光辐照功率间接测量方法能够有效、精确的测出靶材表面的激光辐照功率。一方面,对于 10 W/cm^2 以上的辐照功率均具有较高的精度水平,且随着拟合时长的增加而趋近于精确值;另一方面,不同到靶功率时均具有极高的功率测量灵敏度。此外,考虑到间接测量精确度,建议本方法用于 10 W/cm^2 以上辐照功率且拟合时长不少于 0.2 s 。

5 结 论

对于受高能激光辐照的对象,激光辐照功率的快速测量具有重要的防护应用价值。然而,现有的激光功率测量技术存在着测量波长和功率范围受限、装置结构繁琐且体积庞大、高功率时易损坏和测量不确定度增加等不足,难以满足波长种类多、功率范围广的高能激光辐照功率测量需求。基于此,本文提出了一种基于埋入式 FBG 的靶材表面激光辐照功率间接测量方法。基于高能激光辐照的靶材升温模型,提出了利用靶材内不同深度处温度差变化规律开展表面激光辐照功率的间接测量方法。利用埋入式 FBG 实现对靶材内不同深度处温度变化的精确测量,设计了基于两个埋入式 FBG 开展靶材表面激光辐照功率间接测量的系统方案。最后,通过对两个 FBG 测得的温度差曲线进行函数拟合,即可求解得到靶材表面激光辐照功率。仿真结果表面,本文所提方法能够有效、精确、不受波长限制的间接测量出靶材表面的激光辐照功率。对于 10 W/cm^2 以上的辐照功率均具有较高的精度水平,且随着拟合时长的增加而趋近于精确值。同时,不同到靶功率时均具有极高的功率摄动灵敏度。

参考文献:

[1] Chai Dong, Tong Zhongxiang, Lu Yanlong, et al. Simulation and technique of airborne directional laser IR countermeasure system[J]. Laser & Infrared, 2010, 40(9): 981-984. (in Chinese)

柴栋,童中翔,芦艳龙,等. 机载定向激光红外对抗技术及仿真研究[J]. 激光与红外, 2010, 40(9): 981-984.

- [2] Wang Jing, Li Jianliang, Du Hongjie. Current situation and development trend of american anti-satellite laser weapons [J]. Electronic Warfare, 2015, (2): 1-5. (in Chinese)
王京,李建良,杜洪杰. 美国反卫星激光武器发展现状与趋势[J]. 电子对抗, 2015, (2): 1-5.
- [3] Yi Hongjing, Zhuang Ling, Tan Huiming. The study of photoelectric power meter for measuring W-class laser [J]. Laser & Infrared, 2006, 36(7): 590-592. (in Chinese)
伊红晶,壮凌,檀慧明. 测量瓦级激光的光电型功率计的研制[J]. 激光与红外, 2006, 36(7): 590-592.
- [4] Tian Jian, Deng Nianping, Wu Chuanxin, et al. Study on laser power measurement method under different orders of magnitude and research [J]. Metrology & Measurement Technique, 2017, 44(12): 41-43. (in Chinese)
田健,邓念平,吴传昕,等. 不同量级下激光功率测量方法探讨与研究[J]. 计量与测试技术, 2017, 44(12): 41-43.
- [5] Hu Zheng, Shao Lifan, Li Chuan, et al. Study on the technique for measuring the peak power of narrow pulsed semiconductor laser arrays [J]. Laser & Infrared, 2019, 49(6): 670-674. (in Chinese)
胡峥,邵莉芬,李川,等. 窄脉冲阵列激光器峰值功率测试的研究[J]. 激光与红外, 2019, 49(6): 670-674.
- [6] Mo Xuqing. Research about the measurement of the laser power with hundred watt level[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2015. (in Chinese)
莫旭清. 百瓦级激光功率的测量方法研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2015.
- [7] Zhou Lin. Monitoring method of structure thermal properties and deformation based on optical fiber[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018. (in Chinese)
周林. 基于光纤传感技术的结构热属性与变形监测方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- [8] Geng Xiangyi. Construction and condition monitoring technology research of smart composites based on fiber Bragg

- grating sensors[D]. Ji'nan: Shangdong University, 2018. (in Chinese)
- 耿湘宜. 基于光纤光栅传感器的智能复合材料构建与状态监测技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.
- [9] Li Qi. The study on embedded FBG distributed sensing system for dual-measurement of temperature and strain [D]. Ji'nan: Shangdong Jianzhu University, 2014. (in Chinese)
- 李琪. 埋入式光纤光栅温度应变双参量分布式传感系统的研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2014.
- [10] Liang Dezhi, Sun Li, Huang Changtie, et al. Comparison of strain transfer of embedded FBG sensors calculated by FEM and theory formula[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2008, 24(1): 72 - 76. (in Chinese)
- 梁德志, 孙丽, 黄昌铁, 等. 埋入式 FBG 传感器应变传递的有限元计算与理论分析比较[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2008, 24(1): 72 - 76.
- [11] Yang Jixiang, Chen Dong, Yu Shangjiang, et al. Design and sensing characteristics of embedded fiber bragg grating strain sensor[J]. Instrument Technique and Sensor, 2010, (11): 3 - 6. (in Chinese)
- 杨吉祥, 陈东, 余尚江, 等. 埋入式 FBG 应变传感器的设计及其传感特性研究[J]. 仪表技术与传感器, 2010, (11): 3 - 6.
- [12] Song Naiqiu, Zhang Haochun, Wang Li, et al. Damage power modeling and simulation of high energy laser weapon[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(1): 146 - 51. (in Chinese)
- 宋乃秋, 张昊春, 王丽, 等. 高能激光武器毁伤威力仿真建模[J]. 兵工学报, 2016, 37(1): 146 - 51.
- [13] Li Qingyuan. Damage effects of vehicles irradiated by intense lasers [M]. Beijing: Chinese Astronautic Public, 2012. (in Chinese)
- 李清源. 强激光对飞行器的毁伤效应[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2012.
- [14] Hopf B, Koch A, Roths J. Temperature dependence of glue-induced birefringence in surface-attached FBG strain sensors[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(4): 1 - 2.