

文章编号 1674-2915(2012)06-0610-08

光锥导光装置耦合效率分析与测试

崔爽^{1,2}, 郭立红^{1*}, 李岩¹, 王建军¹, 于国权^{1,2}, 路明¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:介绍了光锥导光装置的优势,分析了影响光锥导光装置耦合效率的主要因素,得出了影响光锥导光装置耦合效率的理论模型误差曲线。以光锥端面反射损耗及光纤辐射损耗为主要误差源,测试了光锥导光装置的耦合效率及误差对耦合效率的影响;采用分光比标定的方法测量导光装置的耦合效率,消除了由于激光器输出能量变化给试验中脉冲能量测量环节带来的影响;根据试验测量数据,拟合出误差对耦合效率的影响曲线,通过与理论误差曲线进行对比,验证了理论模型的正确性,同时测得该耦合装置的耦合效率为70.26%。在激光束的入射角度误差 $<5^\circ$,且在光纤耐受弯折允许范围内甩动光纤的情况下,总误差对耦合效率的影响 $<10\%$,满足实际工程误差的允许范围。该耦合装置已经应用到实际工程中。

关键词:光锥导光装置;耦合效率;分光比;激光欺骗干扰;半实物仿真

中图分类号: TN256; TN977 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20120506.0610

Analysis and test of coupling efficiency of optical vertebra transmitting device

CUI Shuang^{1,2}, GUO Li-hong^{1*}, LI Yan¹, WANG Jian-jun¹, YU Guo-quan^{1,2}, LU Ming¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: guolh@ciomp.ac.cn

Abstract: The superiority of an optical vertebra transmitting device is introduced. The main factors that impact the coupling efficiency of the optical vertebra transmitting device are analyzed, and the theoretical model error curves which impact the coupling efficiency of the optical vertebra transmitting device are gained. By taking the reflection loss of an optical vertebra end face and the fiber radiation loss as the main error sources, the coupling efficiency of optical vertebra transmitting device and the impact of errors on the coupling efficiency are tested, and a calibration method using the split ratio to measure the coupling efficiency of the transmitting

收稿日期:2012-09-16;修订日期:2012-11-15

基金项目:激光与物质相互作用国家重点实验室研究基金资助项目(No. SKLLIM0902-01);中国科学院知识创新工程领域前沿资助项目

device is proposed; furthermore, the impact of the changing of laser output on pulse energy measuring is eliminated. Based on the testing data, the impact curve of error on the coupling efficiency is fitted, then the accuracy of the theoretical model is verified by comparison with the theoretical error curve, meanwhile the coupling efficiency of the coupling device is measured to be 70.26%. Under the condition that the laser beam incident angle error is less than 5° and the fiber is swung under the tolerance in the fiber bending extent, the effect of total error on the coupling efficiency is less than 10%, which meets the allowable error of the actual project. The coupling device has been applied to practical engineering.

Key words: optical vertebra transmitting device; coupling efficiency; split ratio; laser deception jamming; hardware-in-loop simulation

1 引言

近年来,随着光电子技术的发展及其在军事领域中的应用,军事技术装备的作战效能得到较大提升。为了对付光电新威胁,各国正在大力发展光电对抗技术和装备,并已取得了较大进步,光电对抗作为一种战争形态在现代化战争中发挥了越来越重要的作用^[1]。然而,作为武器装备的研制及鉴定的重要环节,建立经济、高效、可靠的光电对抗装备性能试验验证系统势在必行。光电对抗内场半实物仿真以其独特的可控性、可复用性和经济性特点,在这一领域得到了广泛的应用^[2]。

光电对抗半实物仿真主要用于对外场光电对抗装备性能的验证。大多数情况下,外场装备无法直接参与到仿真系统中来,例如激光角度欺骗干扰装备^[3]主要用于保护重要军事目标,接收并识别敌方激光威胁指示信号,同时发射相同信号来诱骗来袭目标^[4],起到欺骗干扰的作用。由于其体积庞大,无法直接合理地放置到内场去参与仿真试验,因此需要利用导光装置^[5]将激光侦查告警装备发射的激光信号导出,进而参与到仿真试验中来,并对其性能进行验证。因此,导光装置在光电对抗半实物仿真系统中主要扮演着中介的角色,其功能必不可少。传统的导光装置多数使用光纤来进行导光,由于工艺等方面的原因,一般光纤的端面都很小,如果使用的入射激光光斑过大,不但加大了对准光纤的难度,同时也会导致漏光,大大降低了装置的耦合效率。光电对抗半实物仿真系统中使用的导光装置由导光锥和 50 m

长的光纤组成,由于光锥在接收端的端面可以做足够大,从而方便了激光对准,也防止了漏光的发生,可以明显提高装置的耦合效率^[6]。

本文首先分析了影响导光装置耦合效率的主要因素,得出了理论模型误差曲线,同时对该导光装置的耦合效率进行了试验验证。在试验过程中使用了分光比标定的方法,消除了由于激光器输出能量变化给试验中脉冲能量测量环节带来的影响。根据试验测量的数据,拟合出误差对耦合效率的影响曲线,通过与理论误差曲线进行对比,验证了该理论模型的正确性,同时测得了该导光装置的耦合效率及稳定性,其结果满足系统指标。目前,该装置已经应用到实际工程中。

2 理论模型

影响光纤耦合效率的因素主要有以下 4 个方面^[7-8]:

(1) 光纤端面反射损耗。当电场矢量与边界平面平行时,传输系数和反射系数随入射角的变化而变化。

(2) 光纤的吸收。光纤吸收与光纤材料的共振有关,吸收因子是材料中的杂质,并以发热的形式消耗。

(3) 散射损失。散射损失是由材料密度的微观变化,成分起伏及制造过程中产生结构不均匀性或缺陷引起的,它们使玻璃的内折射率变化,引起瑞利散射。

(4) 辐射损耗。光纤弯曲时会产生辐射损耗,损耗量随半径的减小而增加,达到一定值时,效率会急剧下降,这是由于光纤弯曲时,内部材料

均匀性受到破坏,改变了全反射条件。

以上各种损耗中,反射损耗影响最大,其主要体现在光束与光纤失准引起了耦合效率下降。激光与光纤的对准误差包括光束与光纤端面位置的纵向间距误差 s , 光束的光轴与光纤光轴的横向误差 d , 光束光轴与光纤光轴的角度误差 θ , 具体

$$\eta_d = 1 - \frac{w^2(\alpha - \sin\alpha \cdot \cos\alpha) - R^2(\theta - \sin\theta \cdot \cos\theta)}{\pi w^2}, \quad (1)$$

式中: $\theta = \arcsin \frac{d^2 + R^2 - w^2}{2dR}$, $\alpha = \arcsin \left(\frac{R}{w} \cdot \sin\theta \right)$ 。

(2) 纵向误差 s

纵向偏移误差是指激光的束腰不在光纤的端面上,而是与光纤端面有一定的距离,这个距离就是纵向误差。假设聚焦激光光斑半径与光纤芯径相等,耦合进光纤的光功率与光纤和光斑的重叠面积成正比,则光纤耦合效率就等于光纤纤芯的面积与激光光斑面积之比。通过计算可以得到激光光斑与光纤端面的纵向偏移对耦合效率的影响^[10]:

$$\eta_s = \frac{w}{w + s \cdot \tan\theta_c}, \quad (2)$$

式中: w 为激光光斑半径, θ_c 为光纤的临界入射角。

(3) 角度误差 Q

当激光束的光轴与光纤的中心轴不在一条直线上,而是存在一个夹角时,称为激光与光纤之间具有角度误差 Q , 可以用 D. Marcuse 推导的公式来表示^[10]:

$$\eta_\theta = \exp\left[-\left(\frac{\pi n_2 w \theta}{\lambda}\right)^2\right], \quad (3)$$

式中: w 为激光束的光斑半径, n_2 为光纤的包层折射率,随着 θ 的增大,损耗将急剧增大。

本文的导光装置中使用了导光锥,导光锥大端半径为入射激光束光斑半径的 2 倍,这样简化了光束对接,而且也消除了由于激光束未能完全覆盖在光纤端面上所引起的耦合效率的下降。此外,根据导光锥的导光特性,可以忽略由于光束与光纤未同轴引起的误差,至此在光束与光纤失准引起的耦合效率下降的 3 个因素中,主要原因是激光束的光轴与光纤的中心轴不在一条直线上。根据理论模型得出的角度误差对耦合效率的影响

误差分析如下^[9-10]:

(1) 轴向误差 d

轴向误差是指光束与光纤未同轴引起的误差。设激光光束光轴与光纤光轴的横向偏移误差为 d , R 为光纤芯径, w 为激光光斑半径,经计算可得到横向偏移误差与耦合效率的关系式^[10]:

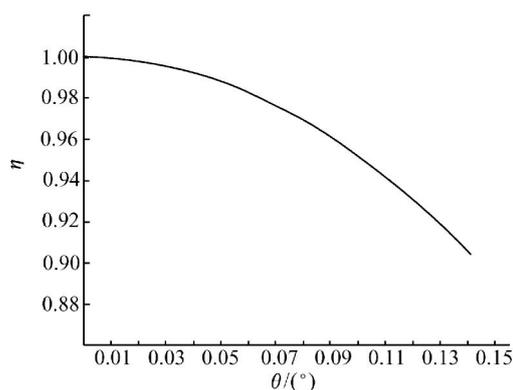


图1 入射角度 θ 对耦合效率的影响曲线

Fig.1 Curve of effect of incident angle θ on coupling efficiency

曲线如图 1 所示。

由于激光束由导光锥导入光纤,所以此时激光束的入射角度误差经导光锥到达光纤端面时,角度会有一个变化,如图 2 所示。

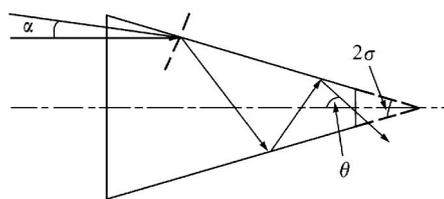


图2 导光锥光路图

Fig.2 Beam path of optical vertebra

图中: α 为入射激光束相对于光锥轴线的角度偏差, θ 为经过光锥内表面反射后到达光纤端面,激光束相对于光纤轴线的角度误差, σ 为导光锥顶角的一半。经过计算可得:

$$\theta = \alpha + (2m - 1)\sigma, \quad (4)$$

式中: m 为光束在光锥内反射的次数,取平均反射次数为 3,有:

$$\theta = \alpha + 5\sigma. \quad (5)$$

这样,角度误差公式变换为:

$$\eta_\alpha = \exp\left[-\left(\frac{\pi n_2 w (\alpha + 5\sigma)}{\lambda}\right)^2\right]. \quad (6)$$

对应的理论模型曲线变换如图3所示。

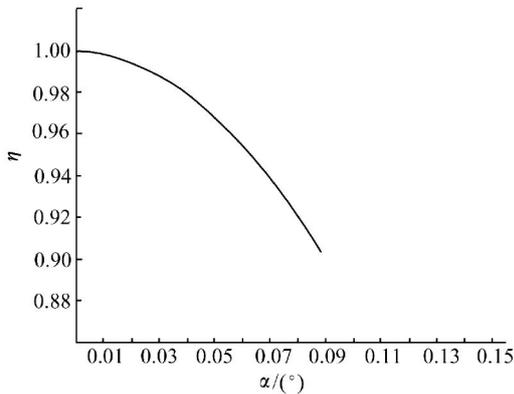


图3 入射角度 α 对耦合效率的影响曲线

Fig.3 Curve of effect of incident angle α on coupling efficiency

3 试验

光锥导光装置耦合效率测试光路图如图4所示。使用 $1.06 \mu\text{m}$ Valiant4 ω -100 脉冲激光器,激光能量探头为 PE9F 和 PE50,此外还使用了分光镜、红外测试卡、小孔光阑、 $1.06 \mu\text{m}$ 衰减片、光学夹具等。耦合装置由导光锥和 50 m 长的光纤组成。

试验方法及过程如下:

(1) 监测激光器出光稳定性

激光器开机预热 10 min,设置输出 10 Hz 重频、 1064 nm 脉冲激光。将能量探头 PE50 置于激光器出光口前,监测激光器输出能量的稳定性。通过测量发现,试验所用激光器稳定性不好,输出光斑总能量和光斑位置有一定变化,试验中采用调整激光器激励电流,选择出光稳定状态和在激光器出口前加 $\Phi 1 \text{ mm}$ 小孔光阑的方法来保证激光器输出光束指向固定。

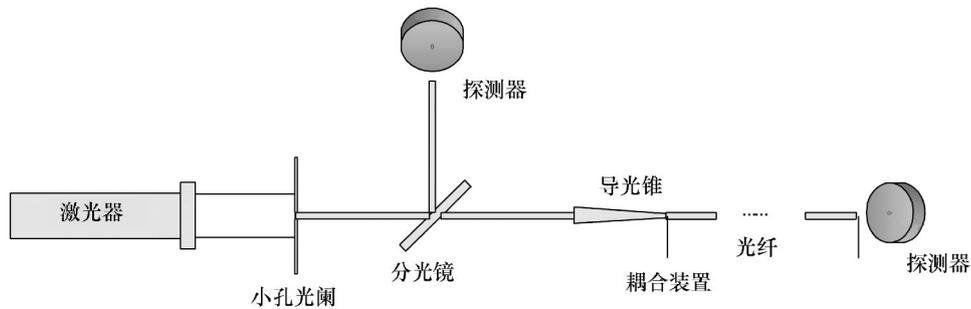


图4 光纤耦合装置耦合效率测试光路图

Fig.4 Beam path of coupling efficiency testing for fiber-coupled devices

(2) 标定分光比

为消除激光器输出能量变化给试验中脉冲能量测量环节带来的影响,在小孔光阑后相对输入光束 45° 放置一半透半反镜来完成分光。操作中发现, $\Phi 30 \text{ mm}$ 口径分光镜尺寸较小,光路对准困难,故改用厚度为 15 mm 的大块分光镜。此时由于其厚度较大,入射光束在镜体前后表面两次反射,用红外测试卡在反射方向上可观察到两个光斑,相距约 10 mm,其中前表面反射光斑能量较

强。试验中,测量分光镜反射方向能量时,要保证仅分光镜前表面反射光斑进入能量探头有效表面,从而减小因能量计测量精度导致的测量结果误差。使用能量探头 PE50 和 PE9F 分别置于分光镜透射和反射两个方向测量能量,同步监测分光镜透射和反射两路能量的变化。两个能量探头接于同一转接器上,采集软件同时采集两路能量。重复测量,标定分光镜分光比,记为 m 。

(3) 光路对准

保证激光器输出光束对准光路。在分光镜后面再加一小孔光阑,调整此光阑位置保证分光镜透射光束可通过前后两个光阑且用红外测试卡观察小孔后光斑最亮。调整光纤耦合装置光锥位置和指向。用绿光对准光纤出口端连续照射,保证入射绿光光束正对光纤出口平面,光锥处出射绿光光斑最亮且为均匀圆形。调整光锥位置和指向,保证光锥出射绿光光斑中心在第二个小孔处且绿光光束可以穿过两个小孔光阑照射到激光器出口处。此时即保证了激光器出射光束垂直光锥入口平面入射。光路对准后,撤掉第二个小孔光阑。

(4) 测量光纤耦合效率

将光纤出口对准能量探头 PE50,尽可能保证光纤出口接近能量探头有效面积中心,用 PE9F 测量分光镜反射能量,同时测量光纤出口处能量和分光镜反射能量,获得两路能量测量值之比,记为 n 。在光纤静止不动、出口端方向 5 m 处起 2 Hz 频率 400 mm 幅度正弦甩动,出口端方向 5 m 处起弯折位置反复变化,出口/入口端双路同时甩动、双路同时弯折等不同情况下测量 n 值。每种

情况下测量 3 组,统计出 n 的均值、标准差、最大值、最小值,结合已标定获得的分光比 m ,可以获得光纤耦合装置效率及其稳定性,即:

$$\eta = n/m. \quad (7)$$

转动光锥接收平面相对入射光线角度,使其偏转 0.5, 1, 2, 5°, 重复上述试验步骤,获得近似平行激光以不同入射角度进入光锥时静止和运动情况下的光纤耦合效率及其稳定性数据。

4 结果与分析

4.1 试验结果

按照第三节所述的测试方法及流程,测得试验数据如下:

(1) 分光比标定: 使用能量探头 PE50 和 PE9F 分别置于分光镜透射和反射两个方向测量能量,同步监测分光镜透射和反射两路能量变化,两个能量探头接于同一转接器上,采集软件同时采集两路能量。重复测量,测得数据及分光比如表 1 所示。

表 1 分光比标定结果

Tab. 1 Calibrating results of split ratio

编号	项目	均值/J	方差/J	最大偏差/%	最小偏差/%
1	直射方向	3.5768×10^{-4}	5.7136×10^{-6}	4.56	6.65
	反射方向	6.4953×10^{-6}	9.7935×10^{-8}	3.81	6.22
	分光比	55.066 9	0.376 8	2.58	1.93
2	直射方向	3.5556×10^{-4}	5.9162×10^{-6}	5.09	5.39
	反射方向	6.4445×10^{-6}	9.7558×10^{-8}	4.06	4.63
	分光比	55.170 1	0.363 0	2.92	1.79
3	直射方向	3.5285×10^{-4}	6.1672×10^{-6}	5.29	5.00
	反射方向	6.3997×10^{-6}	9.9429×10^{-8}	3.79	4.68
	分光比	55.132 4	0.380 2	2.43	1.86

(2) 垂直入射光纤耦合效率标定,是指入射光束正对光纤耦合装置光锥接收平面时,PE50 和 PE9F 分别放于光纤出口处和分光镜反射两个方向进行能量测量,连续测量 3 组,其测量结果如表 2 所示。

表 2 光纤耦合效率标定结果

Tab. 2 Calibrating results of fiber coupling efficiency

序号	均值/J	方差/J	最大偏差/%	最小偏差/%
1	38.706 5	0.334 2	2.72	2.81
2	38.740 2	0.311 0	2.48	1.99
3	38.747 6	0.329 9	3.26	2.21

(3)入射光束与光纤耦合装置光锥接收平面不同夹角情况下光纤耦合效率的标定:调整入射光束与光纤耦合装置光锥接收平面的夹角分别为0,0.5,1,2和5°,在光纤静止和甩动光纤的情况下,连续测量3组,测得试验数据如表3所示。

表3 入射光束与光纤耦合装置光锥接收平面不同夹角情况下的光纤耦合效率

Tab.3 Fiber coupling efficiencies in the case of different angles between incident beam and optical vertebra end face of fiber-coupled devices

项目	序号	均值/J	方差/J	最大偏差/%	最小偏差/%	结果
垂直入射不动光纤	1	38.509 7	0.358 1	3.17	2.19	均值:38.526 7 耦合效率:69.89%
	2	38.515 0	0.331 2	2.76	2.14	
	3	38.555 2	0.354 7	2.51	2.01	
垂直入射甩动光纤	1	38.447 3	0.350 7	3.28	2.42	均值:38.448 3 耦合效率:69.75%
	2	38.445 6	0.331 2	2.45	2.54	
	3	38.452 0	0.338 9	2.22	1.97	
0.5°入射不动光纤	1	38.451 3	0.375 3	6.47	7.89	均值:38.448 2 耦合效率:69.75%
	2	38.447 2	0.356 2	7.42	6.43	
	3	38.446 1	0.344 7	8.32	6.97	
0.5°入射甩动光纤	1	38.370 7	0.359 8	6.89	7.17	均值:38.371 1 耦合效率:69.61%
	2	38.354 8	0.352 3	7.34	6.56	
	3	38.387 9	0.352 3	7.84	6.83	
1°入射不动光纤	1	38.337 9	0.918 3	6.47	7.89	均值:38.332 8 耦合效率:69.54%
	2	38.331 0	0.995 4	7.42	6.43	
	3	38.329 5	1.112 1	8.32	6.97	
1°入射甩动光纤	1	38.293 3	1.050 1	6.89	7.17	均值:38.293 9 耦合效率:69.47%
	2	38.295 0	1.007 1	7.34	6.56	
	3	38.293 4	1.044 9	7.84	6.83	
2°入射不动光纤	1	37.888 4	0.406 3	5.80	3.31	均值:37.870 5 耦合效率:68.70%
	2	37.820 6	0.375 5	2.72	3.87	
	3	37.902 5	0.373 5	3.08	2.83	
2°入射甩动光纤	1	37.795 5	0.356 3	2.97	2.64	均值:37.793 5 耦合效率:68.56%
	2	37.779 1	0.371 3	2.79	2.36	
	3	37.805 9	0.364 0	3.28	2.29	
5°入射不动光纤	1	35.047 5	0.406 6	4.07	3.63	均值:35.050 8 耦合效率:63.59%
	2	35.052 5	0.364 5	3.09	2.73	
	3	35.036 3	0.350 4	3.51	3.33	
5°入射甩动光纤	1	34.860 6	0.361 1	3.12	3.39	均值:34.875 5 耦合效率:63.27%
	2	34.852 5	0.368 1	2.98	2.44	
	3	34.913 5	0.353 6	3.25	2.78	

4.2 结果分析

(1)分光比标定试验中,分光镜反射方向探测器接收能量均值为6.446 5 μJ,直射方向探测器接收能量均值为355.36 μJ,分光比标定均值为55.123,最大波动为0.1%,此分光比标定均值作为耦合效率测试的基准值;

(2)垂直入射光纤耦合效率标定试验中,在

入射光束正对光纤耦合装置光锥接收平面时,光纤输出端与分光镜反射方向能量比例均值为38.731 4,即在光纤吸收及散射损失的系统误差影响情况下,光纤耦合装置耦合效率均值为70.26%;

(3)调整入射光束与光纤耦合装置光锥接收平面的夹角分别为0,0.5,1,2和5°,在光纤静止

和甩动光纤的情况下,连续测量3组数据,以垂直入射测得的耦合效率作为基准点,对测得数据进行插值拟合得到的曲线如图5所示。

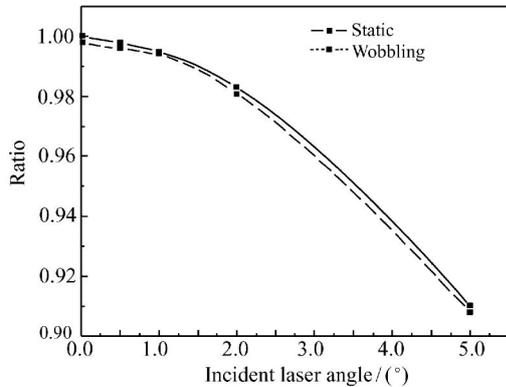


图5 试验测量数据拟合曲线图

Fig.5 Fitting curves of experimental measuring data

图5所示横坐标表示入射光束与光纤耦合装置光锥接收平面的夹角,纵坐标为在该夹角下测得的耦合效率与垂直入射测得的耦合效率的比值。从图中可以看出,在光纤静止和甩动光纤两种情况下,两条曲线几乎重合,即在光纤耐受弯折能力范围内对光纤进行甩动的情况下,其对耦合效率的影响极小,甚至可以忽略不计。将拟合曲线与理论曲线进行对比,可以看出试验结果与理论模型相吻合,即验证了理论模型的正确性,同时将该测量结果作为对光锥导光装置的检测结果。

5 结 论

光电对抗半实物仿真系统主要用于对设备的检测及鉴定,光锥导光装置在光电对抗半实物仿真系统中主要起到导光作用。由于被测试设备无法直接参与到仿真系统中,光锥导光装置的使用,不但可将其发射的激光导出并参与到仿真系统中,同时还克服了以往直接使用光纤进行导光所带来的漏光及低耦合效率的缺点。激光在光纤传输的过程中,影响其能量的因素除了固有的光纤吸收损失和散射损失外,主要随机因素有入射激光相对于耦合装置中光锥平面的入射角度及光纤的运动状态,本文使用了分光比标定的方法来对导光装置的耦合效率进行测试,消除了由于激光器输出能量变化给试验中脉冲能量测量环节带来的影响,并且在不同的激光入射角度及在光纤耐受弯折的能力范围内甩动光纤的情况下,对激光能量进行了多组连续测量,通过对测量结果的分析及其与理论模型的对比,验证了理论模型的正确性,同时得出了光纤耦合装置的耦合效率及其稳定性。试验结果表明,该光纤耦合装置在入射激光垂直光锥平面的误差 $<5^\circ$ 、在光纤耐受弯折的能力范围内且光纤运动状态下,耦合效率 $>60\%$,满足系统参数指标。目前,该耦合装置已经应用到实际工程中。

参考文献:

- [1] 李丹. 光电侦察告警技术浅析[J]. 中国科技信息, 2007(22): 309-311.
LI D. A brief analysis of the electro-optical warning reconnaissance technology[J]. *China Science and Technology Information*, 2007(22): 309-311. (in Chinese)
- [2] 孙少军, 张继勇. 光电对抗仿真试验系统综述[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(6): 551-552.
SUN SH J, ZHANG J Y. Overview of simulation test system used for photoelectronic countermeasure[J]. *Infrared and Laser Eng.*, 2003, 32(6): 551-552. (in Chinese)
- [3] 宁天夫. 激光侦察告警技术的装备概况与发展[J]. 红外与激光工程, 2008(S3): 327-330.
NING T F. Overview of the laser warning reconnaissance technology[J]. *Infrared and Laser Eng.*, 2008(S3): 327-330. (in Chinese)
- [4] 韩冰. 激光告警与欺骗和致盲的干扰技术[J]. 舰船电子工程, 2007, 27(2): 48-53.
HAN B. Laser warning and the interference technology of deception and blinding[J]. *Ship Electronic Eng.*, 2007, 27(2): 48-53. (in Chinese)
- [5] 陈兆兵, 郭劲, 林森. 有限元-边界法在光电目标散射计算中的应用[J]. 中国光学, 2011, 4(2): 169-174.
CHEN ZH B, GUO J, LIN S. Application of FE-BI to calculation of opto-electronic target scattering[J]. *Chinese Optics*,

- 2011,4(2):169-174. (in Chinese)
- [6] 刘杰,肖希. 光电对抗仿真系统研究[J]. 光学与光电技术,2011,9(5):93-95.
LIU J,XIAO X. Research of electro-optical countermeasure simulation systems[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2011,9(5):93-95. (in Chinese)
- [7] 侯镇宁. 激光欺骗干扰技术研究[J]. 应用光学,2002,23(1):34-39.
HOU ZH N. Research on laser deception jamming technology[J]. *J. Appl. Optics*,2002,23(1):34-39. (in Chinese)
- [8] 张辉,朱永,王涌天. 基于光纤传输的激光引信仿真系统[J]. 红外与激光工程,2003,32(6):556-559,576.
ZHANG H,ZHU Y,WANG Y T. Optical fiber-based simulation system for laser fuze[J]. *Infrared and Laser Eng.*,2003, 32(6):556-559,576. (in Chinese)
- [9] 王祥鹏,梁雪梅,李再金,等. 880 nm 半导体激光器列阵及光纤耦合模块[J]. 光学精密工程,2010,18(5):1021-1026.
WANG X P,LIANG X M,LI Z J,*et al.*. 880 nm semiconductor laser diode arrays and fiber coupling module[J]. *Opt. Precision Eng.*,2010,18(5):1021-1026. (in Chinese)
- [10] 赵兴海,高杨. 一种新型高峰值功率激光注入光纤耦合技术[J]. 中国激光,2007,34(12):1639-1642.
ZHAO X H,GAO Y. A novel coupling technique of optical fiber for high peak power pulse laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007,34(12):1639-1642. (in Chinese)

作者简介:崔爽(1982—),男,吉林辉南人,博士,助理研究员,主要从事光电对抗半实物仿真等方面的研究。

E-mail:csh0908@gmail.com

郭立红(1964—),女,吉林舒兰人,博士,研究员,博士生导师,主要从事光电对抗半实物仿真等方面的研究。

E-mail:guolh@ciomp.ac.cn