

激光的光纤传输片光整形研究

孙保定 顾绍庭

(中国科学院上海光机所, 上海 201800)

提要 报道了 Nd:YAG 倍频激光的光纤传输整形研究, 实现了发散角为 60° 的均匀片光输出。研究表明, 该系统可满足 0.6 m 及 1.2 m 风洞的测量要求。

关键词 Nd:YAG 倍频激光器, 片光

1 引 言

片光技术发展得较早, 主要用于测量流体内的层流、涡流、气泡及空气内的尘埃的断层分析等。和逐点测量技术相比, 片光测量技术的优点是显然的。随着激光技术的出现, 片光测量技术有了很大的发展, 测量手段和测量对象也发生了很大变化, 广泛用于测量流体内的快速变化过程, 如用于军事及航空模拟实验等^[1]。

有两种方法实现片光, 其一是在激光器的输出端加一个快速转动的反射镜, 把输出光束扫开。利用这种方法可以产生多种形状的投射光, 并且投射光的均匀性很好。但这种方法产生的投射光不适用于测量快速变化的过程, 也不能用于脉冲输出的激光系统中。其二是利用光学系统对输出激光束进行整形, 采用这种方法得到的片光可用于测量各种快速变化的流体过程, 如用于军事及航空模拟实验。但由于光学系统像差的影响, 利用这种方法得到的片光的光强均匀性及片厚度的均匀性都受到限制, 并且要求的输出发散角越大, 这种不均匀性就越严重, 因此实现大发散角的均匀片光有很高的技术难度。目前, 美国的 Aerometrics^[2] 公司已实现了各种不同发散角、片光厚度及调焦范围的光学整形系统的商品化, 英国也有这种片光整形技术的专利报道。开展片光投射系统的研究具有较大的科学意义, 在军事及工业上有着广泛的应用前景。

2 理论计算

为保证片光有足够大的发散角, 我们采用玻璃棒聚焦, 但棒透镜极短的焦距也同时带来了较大的像差, 使片光的均匀性变坏。下面我们从理论上研究玻璃棒的光传输问题。

图 1 所示是光线经过玻璃棒的光路图。图中 u_0 为入射光束的半发散角, θ 为入射点法线与光轴的夹角, ψ 为入射角, ω 为出射点法线与光轴的夹角, u 为出射光束的半发散角。

令棒的直径为 D , 入射到棒上的光束直径为 d , d/D 称为相对孔径。棒的材料采用 ZK₃ 光学

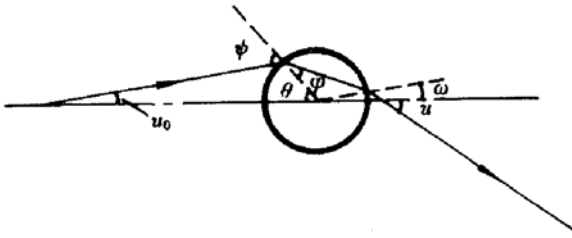


Fig. 1 Light transmitted through glass rod

玻璃, 对 0.532 μm 波长的折射率为 $n = 1.59252$ 。

2.1 反射损失计算

对自然光入射, 表面反射率为^[3]

$$R = (R_p + R_s)/2 \tag{1}$$

其中

$$R_p = \text{tg}^2(\psi - \varphi)/\text{tg}^2(\psi + \varphi), R_s = \sin^2(\psi - \varphi)/\sin^2(\psi + \varphi)$$

$$\psi = u_0 + \arcsin(d/D), \varphi = \arcsin(\sin\psi/n)$$

对不同相对孔径的入射光束边缘光线, 棒的表面反射损失如表 1 所示。其中 R^* 表示入射光束的半发散角为 5° 时的计算结果。从表中可以看出, 当相对孔径大到 0.7 以上时, 棒的表面反射损失迅速增大。

Table 1 The rod surface reflecting loss

d/D	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
R (%)	10.44	10.46	10.48	10.56	10.78	11.30	12.54	15.70	26.0
R^* (%)	10.46	10.47	10.54	10.74	11.18	11.30	14.00	19.10	35.40

2.2 出射光束发散角计算

由简单的几何光学考虑可以导出出射光束的半发散角的计算公式为

$$u = 2\{\arcsin(d/D) - \arcsin[\sin[u_0 + \arcsin(d/D)]/n]\} + u_0 \tag{2}$$

对不同的 u_0 和 d/D 的计算结果如表 2 所示。从表中可以看出, 1) 棒透镜的出射光束发散角主要取决于入射光束的相对孔径, 另外也受棒材料的折射率及入射光束发散角的影响。2) 出射光束的发散角和入射光束的发散角不是单调关系, 随着入射光束发散角的增大, 出射光束的发散角有一个最小值, 并且该最小值随入射光束相对孔径的增大而向 u_0 小的方向移动, 当 $d/D = 0.7, u_0 = 0^\circ$ 时, 出射光束的发散角达到最小值。

Table 2 The output light diverge angle

u (°) d/D	u_0 (°)						
	-15	-10	-5	0	5	10	15
0.1	8.1	6.8	5.5	4.3	3.0	1.9	0.8
0.2	12.4	11.1	9.9	8.6	7.5	6.4	5.5
0.3	16.8	15.6	14.3	13.2	12.2	11.3	10.5
0.4	21.4	20.2	19.1	18.1	17.2	16.5	16.1
0.5	26.3	25.2	24.2	23.4	22.8	22.4	22.3
0.6	31.7	30.8	30.0	29.5	29.2	29.2	29.6
0.7	37.9	37.3	36.9	36.7	36.9	37.4	38.4
0.8	45.6	45.4	45.5	45.9	46.8	48.1	50.0
0.9	56.6	57.1	58.1	59.5	61.4	64.0	67.2

2.3 球差计算

我们用光线追迹法计算了平行光入射和发散光入射的球差, 计算结果如表 3 所示。可见入射光束的发散角对球差影响较大, 但对出射光束发散角的影响却不大。

Table 3 Rod lens aberration

d/D	$u_0 = 0^\circ$		$u_0 = 6^\circ$	
	$\Delta x/R$	$\Delta r/R$	$\Delta x/R$	$\Delta r/R$
0.1	0.0037	0.0003	0.1763	0.0086
0.2	0.0137	0.0021	0.1363	0.0175
0.3	0.0299	0.0070	0.1574	0.0335
0.4	0.0529	0.0172	0.1944	0.0594
0.5	0.0850	0.0367	0.2416	0.1011
0.6	0.1245	0.0700	0.2955	0.1651
0.7	0.1730	0.1290	0.3600	0.2703
0.8	0.2300	0.2378	0.4342	0.4656
0.9	0.2996	0.5100	0.5140	0.9546

* $\Delta x/R$ 表示纵向相对球差； $\Delta r/R$ 表示横向相对球差

3 实验研究

我们考虑了两种片光整形系统，下面分别对它们进行实验研究。

3.1 玻璃棒-柱面透镜系统

实验装置如图 2 所示。图中 1 是芯径为 0.3 mm 的石英光纤，2 是孔径为 8 mm 的圆形光阑，3 是半径为 7.5 mm 的玻璃棒，4 是焦距为 65 mm 的柱面透镜，5 是光屏。

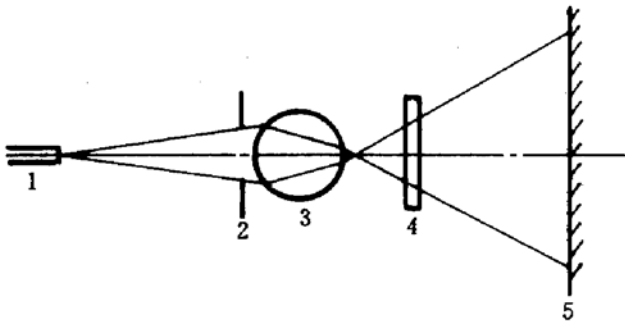


Fig. 2 Experimental setup of glass rod-cylindrical lens system

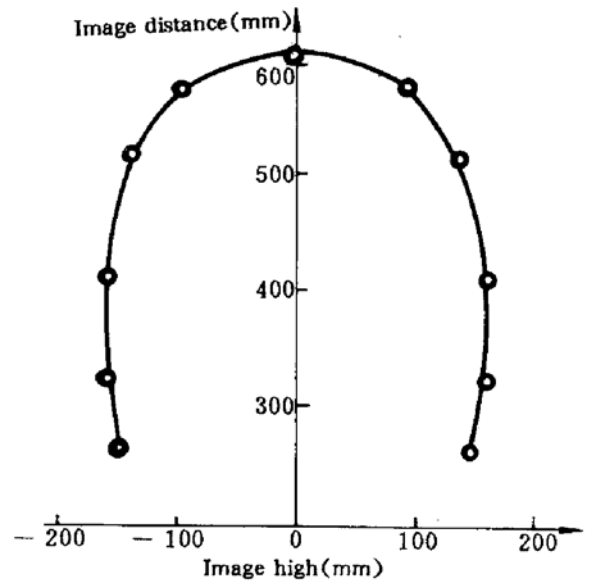


Fig. 3 The image field shown by image high versus image distance

实验用 He-Ne 激光作为光源，光纤输出的光束发散角为 $u_0 = 5^\circ$ ，光阑置于棒前 6 mm 处。调整柱面透镜使片光成像在距离为 600 mm 的屏上，调整棒的位置，使输出片光的发散角为 60° ，测得此时投射到棒上的光束直径为 10 mm，与我们的计算结果基本相符。

观察表明，屏上的片光不均匀，片中心厚度为 3.5 mm，而两端厚度为 9 mm，发散严重。将屏逐渐前移，发现片光的两端逐渐收缩。这说明该系统有严重场曲。利用逐点成像法，我们测出系统的像场如图 3 所示。从图中可以看出，随着发散角的增大，场曲显著增大。

调整柱面透镜,使片光分别成像于不同的像距的地方,分别测出它们的相对场曲(两端像距/中心像距)。我们得出相对场曲与像距的关系如图4所示。

实验发现,发散角不大于 45° 时,在屏上可接到一个厚度均匀的片光。

在棒-柱面镜系统中,柱面镜焦距的加长给系统的设计及调焦带来困难。为此,我们设计了棒-双透镜系统。此系统中,棒后的透镜的焦距可以取较大的数值。

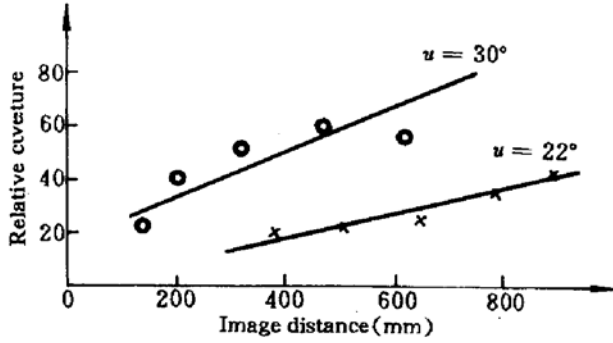


Fig. 4 The relative field curvature vs image distance

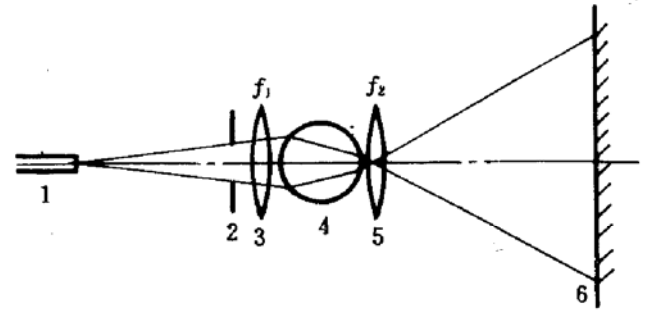


Fig. 5 Experimental setup of a glass rod and double lenses system

3.2 玻璃棒-双透镜系统

实验装置如图5所示,图中1是芯径为0.3 mm的石英光纤,2是孔径为8 mm的圆形光阑,3,5是球透镜,4是半径为7.5 mm的玻璃棒,6是光屏。

调整系统使输出片光的发散角为 60° 。

图6给出 f_2 (棒后透镜的焦距)取不同值时,系统的相对像差随片中心像距的变化关系曲线。从图中可以看出,远距离投射并采用长焦距透镜时系统的场曲明显减小。焦距 f_2 变短,图中曲线的斜率逐渐变大。值得注意的是,当 $f_2 = 70$ mm 时,系统的场曲和棒-柱面镜系统的场曲相当。

反复实验表明,采用适当形状的光阑,可以有效地改善屏上片光的宽度均匀性,并控制像面前后的片光厚度。

图7所示是我们设计的 8×5 mm 倒角光阑。

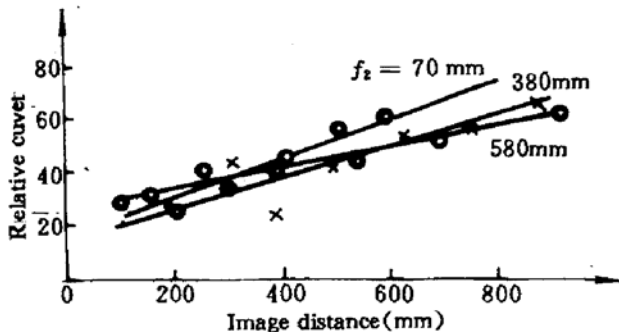


Fig. 6 The relative field curvatures for different f_2

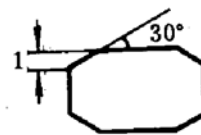


Fig. 7 Diagram of a designed 8×5 mm diaphragm

把棒-双透镜系统中的圆孔光阑换成 8×5 mm 倒角光阑。透镜 f_2 的焦距为 380 mm。调整平行光,测得此时片光的发散角为 59° 。前后移动光屏,测得片光宽度如表4所示。

Table 4 Light sheet width

Distance (mm)	150	200	250	300	380	450	500	550
Central thickness (mm)	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	3.0	4.0	4.5
Eagl thickness (mm)	2.0	1.8	1.5	1.8	2.5	3.0	3.5	4.0

从表中可以看出,在 150~550 mm 的范围内,片光厚度均不超过 5 mm。这说明该系统可以满足 0.6 m 风洞的测量要求。

整个系统平移,使片光成像于不同的地方,当移动 12 mm 时,像距从 300 mm 变到 800 mm。系统输出的片光的发散角从 56° 变成 62.6° ,在整个调焦过程中,屏上片光的厚度都比较均匀。

将透镜 f_2 的焦距换成 580 mm,调整平行光,再分别测出屏处于不同位置时的片光厚度,我们得出:透镜的焦距越长,片光的可利用范围越大。调焦使系统成像于 600 mm 处,前后移动光屏,发现在 200~900 mm 的广阔范围内片光的厚度均不超过 5 mm。该系统能满足 1.2 m 风洞的测量要求。

综上所述,我们实验研究了两种片光投射系统:玻璃棒-柱面透镜系统和玻璃棒-双透镜系统。研究表明:片光的发散角对系统的场曲影响很大。在棒-双透镜系统中,棒后透镜 f_2 的焦距取得较长时,场曲显著减小,片光的厚度均匀性也随之变好。

利用适当形状的光阑,两种片光投射系统都可实现均匀片光,但棒-双透镜系统片光的均匀性要好,且可用于大型风洞测量。但是,棒-双透镜系统调焦时,片光的发散角有所改变。

参 考 文 献

- 1 Y. A. Carts. Laser rangefinder invades speed-gun. *Laser Focus World*, 1992, 28(2): 21~25
- 2 M. Philbert, J. Surget, C. Veret. Light sheet technique. Aerometrics, Inc. Manual, 1993. 211~213
- 3 A. 加塔克 著,梁铨廷等译. 光学. 北京:机械工业出版社,1984. 45~48

Light Sheet Shaping of Laser Beam Transmitted Through Fibre

Sun Baoding Gu Shaoting

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

Abstract The study of Nd : YAG laser second harmonic, beam shaping transmitted through fibre is reported. It is indicated that the resulted 60° divergence angle output uniform light sheet can be used in the test of 0.6 and 1.2 m wind tunnels.

Key words Nd : YAG laser second harmonic, light sheet