❖特约专栏❖

高能光纤激光器光束合成技术

程 雪[1,2],王建立[1,3],刘昌华[1,2]

(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;
3. 中国科学院紫金山天文台 中国科学院空间目标与碎片观测重点实验室,江苏 南京 210008)

摘 要:高能光纤激光器光束合成技术是近年来高能激光器尤其是定向能源应用中的研究热点,可突破单根单模光纤激光的输出功率限制,为高功率高光束质量的激光武器应用奠定了理论基础。介绍了光纤激光非相干合成和相干合成的国内外研究现状,给出了非相干合成技术中光束重叠和光谱合成的基本合成原理,重点介绍了国内外多家研究机构光谱合成近年来所达到的技术水平;介绍了国内外相干合成技术的最新研究进展,对相干合成等效大口径激光阵列输出中几种不同的透射式相干合成阵列输出和反射式相干合成阵列输出的关键合成装置,以及相干合成单一孔径输出中的核心光学元件进行详细分析。最后简要对比了高能光纤激光器光束相干合成技术和非相干合成技术的优缺点和应用范围。

关键词:光纤激光器; 相干合成; 非相干合成; 激光合束

中图分类号:TN253 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201847.0103011

Beam combining of high energy fibre lasers

Cheng Xue[1,2], Wang Jianli[1,3], Liu Changhua[1,2]

(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; 3. Key Laboratory of Space Objective and Debris Observation, Chinese Academy of Sciences, Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Beam combining of high energy fibre lasers is the research hotspot especially for the directed energy application in recent years, which can overcome the output power lever limits of one single-mode fibre laser, and establish the theoretical foundation for the application of laser weapons with high power and perfect beam quality. Research status of fibre laser incoherent combining and coherent combining were presented. In the section of incoherent combining, the combining principle and combining level of beam overlap and spectral beam combining were introduced. In the section of coherent combining, the key combining apparatus of transmission-type and reflection-type equivalent large aperture laser array output and optical element of single aperture output were analyzed in detail. The advantages and disadvantages and range of application of high power fibre laser beam coherent combining and incoherent combining were compared briefly.

Key words: fibre laser; coherent combining; incoherent combining; laser beam combining

收稿日期:2017-06-14; **修订日期**:2017-08-20

基金项目:吉林省与中国科学院科技合作高新技术产业化专项资金项目(2015SYHZ003)

作者简介:程雪(1988-),女,博士生,主要从事激光光束合成方面的研究。Email:littlesnow@126.com

导师简介:王建立(1971-),男,研究员,博士生导师,博士,主要从事大口径高分辨率成像光电望远镜总体技术和空间目标探测技术方面的研究。Email:wangjianli@ciomp.ac.cn

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

0 引 言

1960 年第一台可运行激光器的发明，极大地促进了全世界军用高能激光器项目的研发。经过几十年的尝试，2014 年实现了里程碑式的突破[1]。由于激光器具有轻量化、高效、成本低的特点，因而比其他定向能源得到更多研发基金的支持。与传统导弹的超音速或亚音速不同，高能激光器发出的能量可达到光速[2]，促进高能激光武器发展的另一个因素是较低的点对点作战成本，采用激光将大大降低武器的发射成本，作战人员可在导弹和激光之间自由选择以应对敌方威胁，增强了军事力量，就像拥有了无尽的弹药库，不必担心弹药耗尽。

激光器指向目标时将其气化实际上就是制造作战高能激光武器的简化理念。对于研究人员来说，面临的巨大挑战是制造一种在追踪大量目标的条件下，能够同时汇聚高能量并击中或部分摧毁目标的激光器。目前国内外研究中使用的激光器主要有光纤激光器、半导体泵浦固态激光器、自由电子激光器以及液态激光器等。光纤激光器由于结构紧凑、光束质量好等优势，成为近年来高能激光器尤其是定向能源应用中的研究热点[3]。由于非线性效应、光效应、热效应、泵浦源亮度等因素的影响，单根单模光纤激光的输出功率存在极限，最高可产生约 20 kW 的连续功率[4-5]。若想得到更高输出的功率水平，则需要对多束激光进行合成以形成单束聚焦光束，并保证光束在湍流大气中长距离传输后的光束质量[6]。

光纤激光光束合成按照光束相位关系的不同，可分为非相干合成和相干合成两大类，下面将分别介绍国内外光纤激光光束非相干合成和相干合成技术的研究现状，并对两类合成技术进行简要比较。

1 非相干合成技术的研究现状

非相干合成是指单独控制各光束聚集并指向目标，使光纤激光阵列在目标处进行简单的光强叠加，如图 1 所示，实现输出功率的提高，但是会造成光束质量降低。与相干合成相比，非相干光束合成不要求相位锁定、偏振匹配或窄线宽，因而系统更加简单且鲁棒性更高[6]。衍射长度由各个光束的衍射长度决定，由于目标强度与衍射长度无关，因而中强湍流对非相干合成基本没有影响。

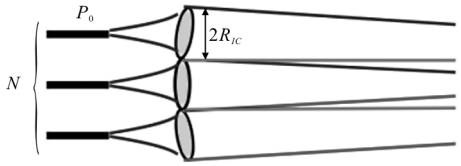


图 1 非相干合成示意图

Fig.1 Incoherent combining

1.1 光束重叠

最简单的非相干合成方法是光束重叠，已经应用在国外新一代的激光武器样机中，如辅助近程防御武器系统的美国海军舰载固态激光武器系统(LaWS)[7]，德国欧洲导弹集团(MBDA)公司战术激光演示系统[8]等。光束重叠合成的基本原理见图 2[9]，系统结构简单，在目标功率密度方面受到限制，由于激光束发散、指向稳定性和大气传播等因素影响，目标上的合成光束的直径随传输范围的增加而显著增加。

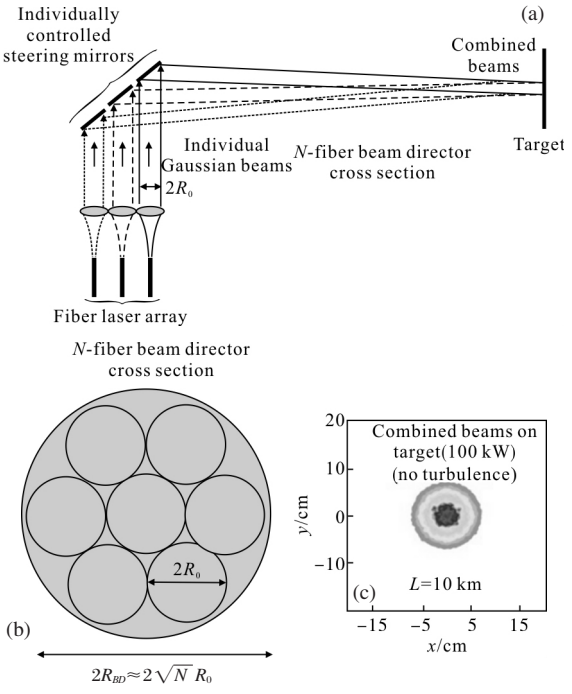


图 2 光束重叠合成示意图

Fig.2 Beam overlap combining

由于激光具有可扩展性，假设系统完全对准，通常合成光束质量 M^2≥光束合成数量，即 5~6。随着激光数量的增加，将出现对准和指向稳定性问题，因

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

此，8 路以上的激光很难进行非相干合成[10]。

1.2 光谱合成

光谱合成是指有一定波长差异的激光阵列通过色散元件进行同轴叠加，以单一或共同方向出射，它的基本原理[11]如图 3 所示，图 3(a)使用色散元件棱镜进行非相干合成，图 3(b)使用光栅提高合成性能，并添加了主动反馈控制激光波长。光谱合成作为非相干合成方法的一种，结构简单，对单元光束稳定性和控制性要求不高，合成光束质量接近衍射极限，性能良好。

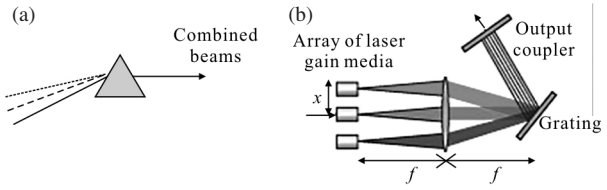


图 3 (a) 棱镜合成示意图；(b) 光栅合成示意图

Fig.3 (a) Prism combining; (b) grating combining

光谱合成的主要限制是衍射光栅的损伤阈值和热敏感性。由于最终要接收来自 N 路激光光束功率之和，所以光栅应能承受较高功率，同时保证光束不出现失真。

虽然增加光束直径能将功率密度控制在损伤阈值以下，但是入射到光栅上的高功率的微量吸收仍会导致光栅本身出现较大温度梯度，改变光栅衍射特性，并显著降低光谱合成效率。

校准光谱合成的角精度要求很高，需较长光路，限制了系统的紧凑性，系统仅能对最大功率处进行校准，而对发生在光栅局部的吸收和超过系统允许范围的角精度很难校准，从而增加了系统标定和校准过程的复杂性。

1.2.1 棱镜光谱合成

基于棱镜的光谱合成原理是不同波长的激光光束以同一入射角通过色散棱镜时，由于折射率不同，因而各光束折射角不同，若分别调节各路单元光束的入射角度，保证各路光束以同一角度出射，如图 4 所示，实现多波长光束合成单一孔径输出。

由于棱镜抗激光损伤阈值高，产生的杂散光较少，适用于高功率光纤激光合成。但是存在色散较弱

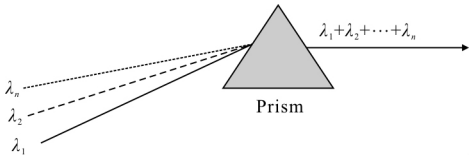


图 4 基于棱镜的光谱合成示意图

Fig.4 Spectrum combining based on prism

的问题，难以分辨 nm 级窄线宽激光，较难进行大规模阵列扩展，应用不多。

1.2.2 体布拉格光栅光谱合成

体布拉格光栅合成是指利用光热折变 (Photo-Thermo-Refractive，PTR) 玻璃制作具有高光谱分辨力的体布拉格光栅 (Volume Bragg Gratings，VBG)，将 VBG 作为色散元件用于高功率光纤激光的 VBG 光谱合成，其合成原理如图 5 所示[12]，当两路不同波长的光束入射到体布拉格光栅 VBG 上，两束光角度共轭、光斑发生重叠，如果 λ_1 满足布拉格条件($\lambda_1=\lambda_{Bragg}$)，反射式体布拉格光栅衍射效率≈100%，光束以最大衍射效率发生衍射，而 λ_2 偏离布拉格条件($\lambda_2=\lambda_{Bragg}\pm\Delta\lambda$)，衍射效率≈0，光束经过光栅发生透射，波长为 λ_1 和 λ_2 的两束光经过光栅作用后实现了两束不同波长光束的光谱合成单一孔径输出。

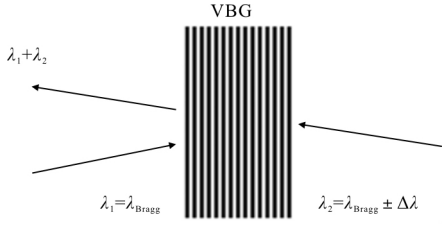


图 5 两束光进行体布拉格光栅光谱合成示意图

Fig.5 Spectrum combining of two beams based on VBG

在此基础上，通过级联 N 个 VBG 可以实现 N+1 路光束阵列的光谱合成。2008 年，中佛罗里达大学将 4 个体布拉格光栅级联，实现了 5 路光谱合成[13]如图 6 所示，合成前各路光束质量因子 M_2=1.05，光纤激光器的波长分布在 1 062.08~1 064.55 nm 之间，合成后输出功率>750 W，光谱带宽 1 nm，合成效率>90%，光束质量因子 M^2=1.11。

中佛罗里达大学进行的多路传输体布拉格光栅 (MVBG)光谱合成结构示意[12,14]如图 7 所示，其中光

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

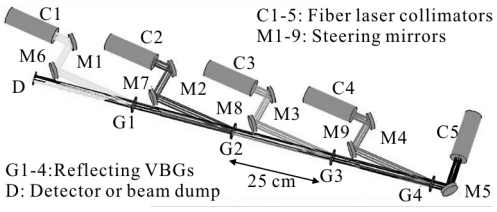


图 6 5 路 VBG 光谱合成示意图

Fig.6 5-channel spectrum combining based on VBG

学元件中含有 4 个 VBG，在合成时 4 路不同波长光束进行衍射，而中间的第 5 路光束实现透射，系统与图 6 类似，但是更为紧凑，容易校准。采用该结构进行 2路合成时，合成功率为 282 W，合成效率 99%，光束质量因子 M^2=1.05，其中 M_x^2=1.15，M_y^2=1.08；3 路合成时，输出功率 420 W，合成效率 96.5%，光束质量因子 M_x^2=1.38，M_y^2=1.20，由于光束传输造成玻璃升温，使光束质量下降。

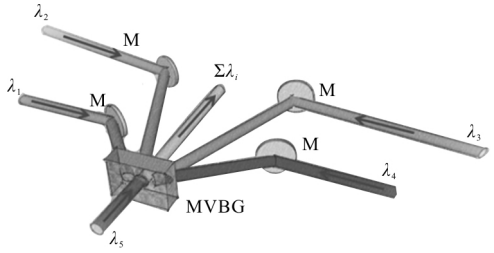


图 7 5 路 MVBG 光谱合成示意图

Fig.7 5-channel spectrum combining based on MVBG

1.2.3 多层介质衍射光栅MLDG 光谱合成

多层介质衍射光栅(MLDG)指将多路不同波长的光束以不同方向入射到光栅上的同一位置，保证各路出射方向一致，实现多波长光束的 MLDG 光谱合成，如图 8 所示。

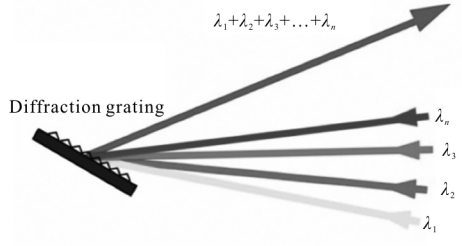


图 8 基于衍射光栅的光谱合成示意图

Fig.8 Spectrum combining based on MLDG

2011 年，德国 IAP Jena 团队使用标准衍射光栅将 4 路 2.1 kW 的窄线宽光纤激光器进行光谱合成[15]，如图 9 所示，单路光束包含种子激光源①，一级预放大器②，二级预放大器③，主放大器④，反射镜⑤和光栅⑥。合成前单路光束的平均光束质量 M^2=1.2，合成后实现了 8.2 kW 的总功率输出，合成效率 99%，但光栅升温剧烈，光束质量降低到 M^2=4。若将合成功率限制在 2 kW 内 (即单束激光功率为 500 W) 进行 4 路光谱合成，可保持较高光束质量，合成后光束质量 M_x^2=2.0，M_y^2=1.8。

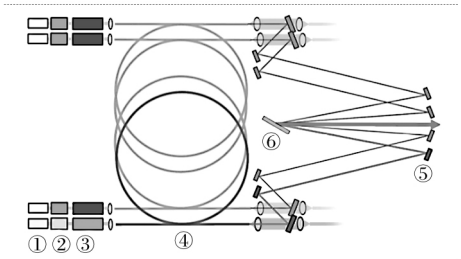


图 9 4 路 MLDG 光谱合成实验结构

Fig.9 Experimental setup for 4-channel spectrum combining based on MLDG

2007 年，洛马公司(Lockheed Martin Aculight)基于多层介质衍射光栅光谱实现 3 路 MLDG 光谱合成，单元光束功率 200 W，线宽 1 GHz，合成后输出功率 522 W [16]，合成效率 93%。2013 年，该团队 Honea 使用标准光栅对 12 路掺镱光纤激光器 (单光束 M^2=1.1)进行光谱合成实验[17]，获得了卓越的成果，光纤激光器的波长分布在 1 051~1 068 nm 之间，单元光束功率 300 W，线宽 3 GHz，合成后输出功率 3.1 kW，光谱合成效率 97%，电光转换效率 39%，光束质量较好 M^2=1.35。2015 年，Honea 等将该系统合成阵列扩展至 96 路[18]，单元光束功率仍为 300 W，线宽 3 GHz，光谱合成输出功率达到 30 kW。

1.2.4 双光栅光谱合成

双光栅合成[19]基本原理示意图如图 10 所示，对输出的多束高功率光纤激光进行合成，保持近衍射极限的光束质量。两个光栅呈菱形对边平行放置，可以随波长进行调整，保证入射光束和出射光束平行，与普通单光栅固定角度色散不同，双光栅的最大优势是降低了对线宽的要求。

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

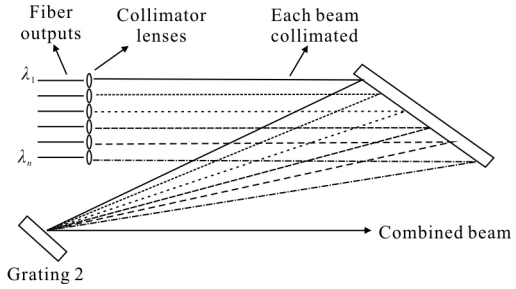


图 10 双光栅光谱合成示意图

Fig.10 Spectrum combining based on dual-grating

2015 年，中国工程物理研究院马毅等采用国产 MLDG 实现了 5 路 kW 级窄谱激光光谱双光栅合成[20]，输出功率 5.07 kW，M^2<3(M_x^2=2.0，M_y^2=1.8)，合成效率 91.2%，是当时国内光纤激光光谱合成单一孔径输出得到的最高功率。2016 年，该团队又将系统进行扩展，实现了 10 路 9.6 kW 光谱合成[21]。

2016 年，中国科学院上海光学精密机械研究所采用自主研制的 MLDG 实现 7 路窄线宽 11.27 kW 光谱合成[22]，如图 11 所示，所有光束通过一块 MLDG 进行合束，另一块平行的 MLDG 则对 1 070.9 nm 进行色散补偿，7 路光束平均输出波长为 1 071.6 nm，单元光束口径均为 12 mm，合成效率 92.8%。

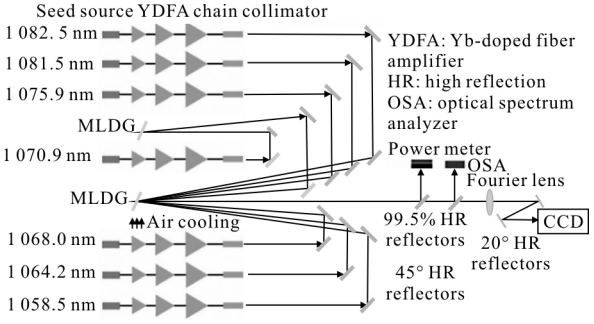
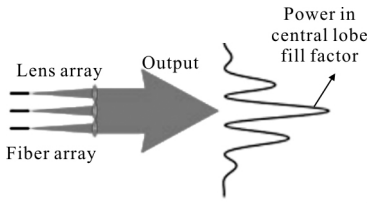


图 11 7 路 11.27 kW MLDG 双光栅光谱合成系统

Fig.11 7-channel spectrum combining based on dual-grating with 11.27 kW output

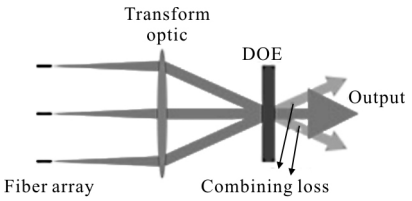
2 相干合成技术研究现状

相干合成是指通过精确控制各路光束的相位，使具有相同波长、偏振一致的光纤激光阵列在远场目标以相互干涉的方式叠加。利用小孔径光束组成拼接光纤阵列并对各路光束进行相位控制，得到等效大口径激光阵列输出，合成光束是各子孔径光束在远场稳定干涉的结果，如图 12(a)所示，利用特殊的合束装置或光学元件实现光束合成单一孔径输出，合成光束在近场和远场都是单束光，如图 12(b)所示。提高激光输出功率并保证较高光束质量，是光纤阵列在高能激光器中应用的基础，也是高能激光武器系统的重要发展方向之一[23]。



(a) 等效大口径阵列输出

(a) Equivalent large aperture array output



(b) 单一孔径输出

(b) Single aperture output

图 12 相干合成示意图

Fig.12 Coherent combining

2.1 相干合成等效大口径输出

光纤激光相干合成等效大口径输出主要有两种合成方式：反射式相干合成和透射式相干合成。反射式相干合成可实现较高占空比，但系统中光学元件较分散，可扩展性不好；透射式相干合成结构紧凑，可扩展性好，近年来在激光武器等军事方面具有较好的应用前景，由于受到激光阵列填充因子的限制，光束质量无法达到衍射极限，如何提高占空比是等效大口径输出的关键。

2.1.1 反射式相干合成阵列输出

(1) 分块能动反射镜

中国科学院光电技术研究院 7 单元分块能动反射镜[24]采用集成 7 路子反射镜实现，如图 13 所示，各子镜紧密排布，每个子镜分别由背部 3 个呈正三角排布的驱动电极驱动，3 个电极可独立控制，因此每个子镜有 3 个自由度，即沿轴线(Z 轴)的平移以及沿 X、Y 轴的旋转，分别对应校正入射光束的平移像差以及 X、Y 方向的倾斜像差。

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

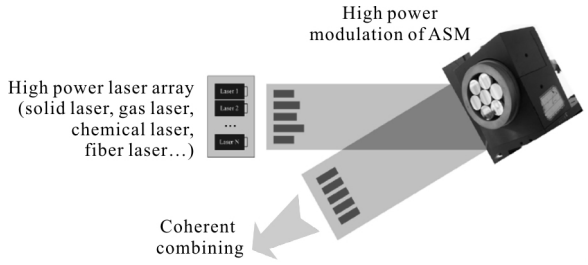


图 13 分块能动反射镜示意图

Fig.13 Diagram of Active Segmented Mirrors(ASM)

ASM 校正平移像差是通过前后平移运动来补偿光束传播方向的光程长度实现，如图 14(a)所示，校正倾斜像差是以子镜的倾斜运动实现的，如图 14(b)所示，同时校正平移和倾斜如图 14(c)所示。

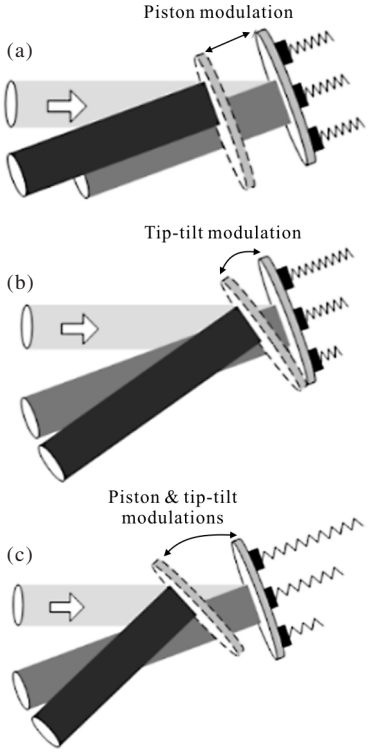


图 14 (a) 仅校正平移像差，(b) 仅校正倾斜像差，(c) 校正平移像差和倾斜像差

Fig.14 (a) Correct only piston aberration, (b) correct only tip&tilt aberration, (c) correct both piston aberration and tip&tilt aberration

(2) 六棱台合束器

哈尔滨工业大学设计的六棱台光束合束器[25]由 1 个中心通孔和 6 个与底面呈 45°镀金膜的对称均布反射面构成，实物如图 15(a)所示。当进行光束合成时，中心光束直接沿中心通孔出射，6 束沿圆周分布的光分别入射到对应镀膜反射面后，沿与中心光束平行的方向出射，因此将不同方向的 7 束光合成为沿同一方向出射的等效大口径的 7 单元平行光束阵列，如图 15(b)所示；当进行光束分束时，正好与合束过程相逆，即 7 束平行光射向六棱台合束器后，被分成 7 个不同方向的光束，如图 15(c)所示。

这种方法虽然减少了光学元件的使用，简化了系统结构，但是沿圆周分布的 6 路光束要保证共面、和出射光束垂直、沿周向的均布对称，增加了系统中入射光束元件放置的难度，且扩展性较差。

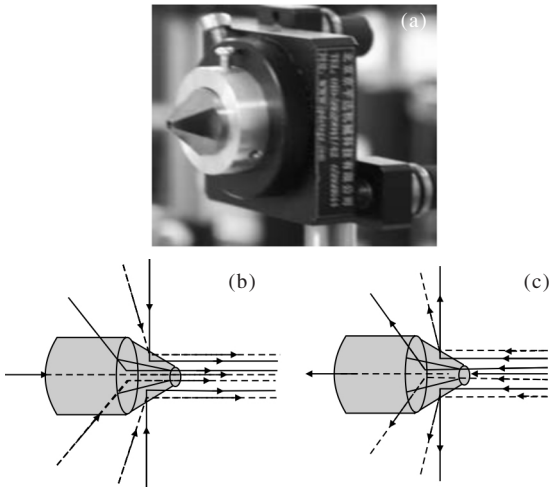


图 15 (a) 六棱台，(b) 六棱台合束，(c) 六棱台分束

Fig.15 (a) Hexagonal prism combiner, (b) combining of hexagonal prism combiner, (c) splitting of hexagonal prism combiner

(3) 多光束高占空比合束器

国防科技大学设计的高占空比台阶状合束器[26]，由台阶状基座和若干个 45°高反射镜组成，如图 16所

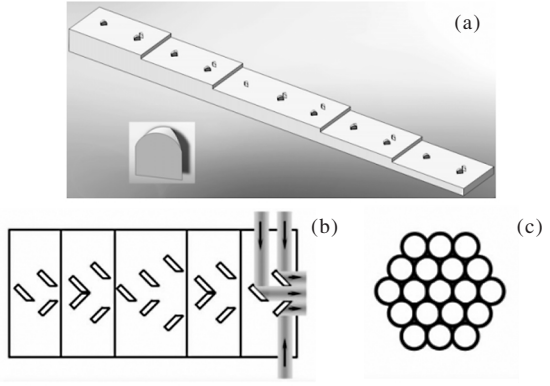


图 16 (a) 台阶状合束器，(b) 台阶状合束器光束合成原理，(c) 合成光斑

Fig.16 (a) Step combiner, (b) combining principle of step combiner, (c) combination spot

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

示，子光束分别从合束器左右两侧横向与高反镜成45°入射到高反镜上且平行于基座台阶水平面，经过高反镜后沿纵向输出，实现了纵向和横向的解耦，合理布置各台阶上高反镜的位置可提高光束沿水平方向的占空比，合理设置各层台阶高度可提高光束沿竖直方向的占空比。

台阶状合束器提高了合成光束的占空比，理论上改变台阶层数和各层台阶上反射镜个数、位置，可实现任意排列方式、光束数量的光束合成，但是随着光纤合成向大规模阵列发展时可扩展程度不高。

2.1.2 透射式相干合成阵列输出

透射式相干合成是校正光束倾斜的新方法，采用智能光纤准直阵列实现，光纤准直阵列内的光纤定位器可以直接驱动光纤尖端，运动惯性小，机械谐振频率高，结构紧凑，有利于阵列化集成。光纤准直阵列系统[27]如图 17 所示，准直透镜安装在铝制透镜座上，使用干涉仪对各透镜进行校准，以减小透镜各光学轴线的角度偏差，使用 6 个不锈钢管将透镜座和基座连接，定位器安装在特殊支架中，连接到基座背面，实现光束倾斜控制。通过校准螺丝实现光纤定位器校准。

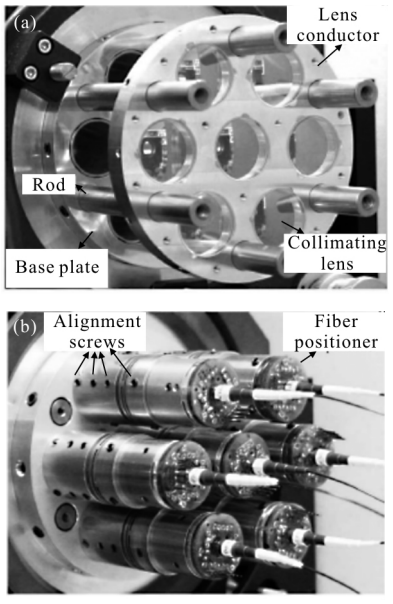


图 17 (a) 准直阵列正面，(b) 准直阵列背面

Fig.17 (a) Frontside of collimating array, (b) backside of collimating array

2005 年，美国陆军研究室 Vorontsov 团队在与 DARPA、MIT、Optonicus 合作下，对光纤激光阵列系统的相位锁定、多路光束合成以及自适应光纤准直阵列等方面进行了研究和实验。为提高合成光束中的占空比，在增加各子孔径光斑有效口径的同时尽量减小相邻子孔径的间距，即提高阵列光束的占空比，APPLE 项目研制的 19 单元光纤阵列光束合成[28]见图 18(a)。考虑到未来在军事应用中的可扩展性，excalibur 项目中研制了 7 单元一体化模块，子孔径直径 33 mm，相邻子孔径间距 37 mm，填充因子 0.9，见图 19(a)，并在 7 单元基础上实现了 21 单元扩展(3×7)的光学相位阵列系统[29]，如图 18(b)所示，并实现了基于目标回路的相干合成技术，其未来目标是研发可扩展光学相位控制阵列技术的激光武器。

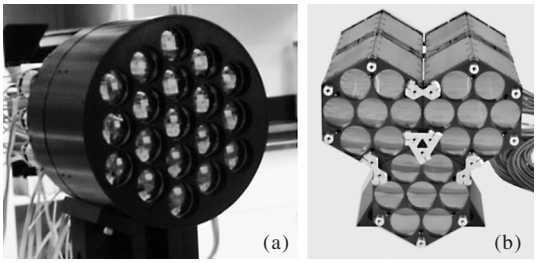


图 18 (a) APPLE 19 单元，(b) 圣剑 21 单元

Fig.18 (a) APPLE 19-channels, (b) excalibur 21-channels

由于光纤激光阵列合束在定向能源应用、激光武器、自由空间光通讯方面较好的应用前景，中国科学院光电技术研究所李新阳团队从 2011 年开展自适应光纤准直阵列的研制[30]，并取得了较好的研究成果，准直器在-400~400 V 电压范围内的实测结果与理论分析偏差控制在 5 %内，选用焦距为 60 mm 的准直透镜，获得了±2 mrad 的出射光束偏转角。国防科技大学利用该装置也进行了相关的理论和实验研究[31]。为了提高阵列光束的占空比，中国科学院光电技术研究所又研制了 7 单元高占空比光纤准直器如图 19(b)所示，子孔径直径 28 mm，填充因子 0.88。

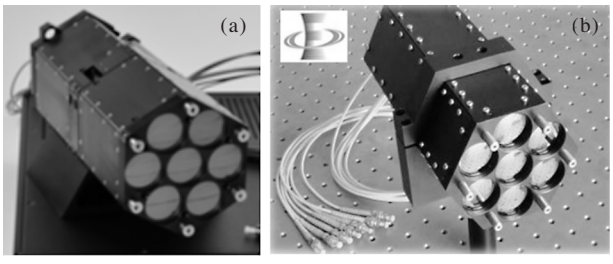


图 19 (a) 圣剑 7 单元，(b) 中国科学院光电技术研究所 7 单元

Fig.19 (a) Excalibur 7-channels, (b) IOE 7-channels

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2.2 相干合成单一孔径输出

光纤激光相干合成单一孔径输出主要有光波导自成像相干合成、DOE 相干合成和相干偏振合成等合成方式，都能实现较高的合成效率和合成光束质量，合成光束相干性好。由于 DOE、光波导及相干偏振的最后一级 PBC 均要承受所有光束的输出功率，其合成功率受限于所采用的光学元件。当入射光束质量较差时，还会造成功率在光学元件上的损失，使合成效率下降，合成元件温度上升。因此，相干合成单一孔径输出的几种合成方式对入射光束质量、合成元件功率承受能力要求较高，且目前还不能实现较大功率连续激光的合成。

2.2.1 光波导自成像

2007 年，美国洛马公司提出基于多模波导自成像效应进行光纤激光自成像光波导相干光束合成[32]，光束在传输过程中多次成像，如图 20 所示，当光束相位与波导尺寸相匹配时，在输出端会得到近衍射极限的单一孔径光束输出，实现光纤阵列光波导自成像相干合成。2010 年，洛马已实现 4 路光纤激光自成像波导合成，输出功率大于 100 W，合成效率 80%，光束质量因子 M^2<1.25[33]，光束合成装置保持<30 ℃工作环境且无额外的冷却装置。

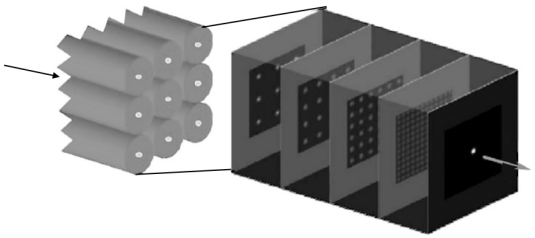


图 20 自成像波导 9 路相干光束合成示意图

Fig.20 9-channel coherent combining based on self imaging waveguide

2.2.2 衍射光学元件

利用光路可逆原理，将衍射光学元件(Diffractive Optical Element，DOE)逆向使用，将多路光束沿特定角度入射，通过 DOE 实现光束相干合成单一孔径输出，美国诺格公司将其用于多路光纤激光阵列主动锁相相干合成，基本原理如图 21 所示。

DOE 的使用消除了平面相干激光阵列中通常观察到的远场旁瓣和伴随的光束质量损失。2008 年，诺格公司进行五路光纤激光器的低功率 DOE 合成[34]，合成效率 91%，M^2=1.04。即使在输入激光阵列单元上出现较大振幅和相位波动，合成效率和相位锁定仍然具有鲁棒性。计算和功率测量分析表明，该方法可扩展到多路高功率合成中。

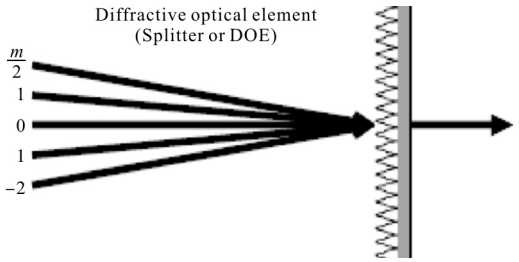


图 21 基于 DOE 相干合成示意图

Fig.21 Coherent combining based on DOE

2012 年，MIT 使用 DOE 实现 5 路 500 W 光纤放大器的相干合成[35]，合成后输出功率 1.93 kW，光束质量因子 M^2=1.1 优于输入光束的质量，由于光纤阵列末端的热增长，合成效率由低功率时的 90%降到高功率时的 79%。同时，该器件对激光存在约 20%的损耗，随着功率的增加，将造成光束质量的退化，甚至是 DOE 元件的损坏。2012 年，美国空军实验室实现 15 路(3×5 阵列) 百瓦级光纤放大器的相干合成[36]，入射功率 684 W，合成后输出功率 600 W，光束质量因子 M^2=1.1。

2.2.3 相干偏振

2010 年洛马公司提出了相干偏振合成方法[37]，如图 22 所示，将参与合成的两路正交偏振光的相位差锁定为 $n\pi$，经过偏振合束器(PBC)合成为新的线偏振光，通过半波片(HWP)旋转后和另一束与其偏振方向垂直的线偏振光进行合成，由此级联下去，实现合成光束单一孔径输出，理论上相干偏振合成技术可以实现合成级数的无限扩展。

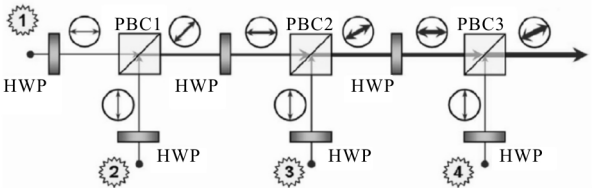


图 22 相干偏振合成示意图

Fig.22 Coherent-polarization combining

2010 年，洛马公司实现了 4 路光纤 25 W 相干偏振合成[38]。2012 年，国防科技大学实现 8 路低功率

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

和 4 路高功率单抖动法相干偏振合成，输出功率达到 60 W[39-40]，2017 年实现了 4 路 5.02 kW 的近衍射极限的相干偏振合成[41]，入射功率 5.35 kW，合成效率 93.8%，合成后光束质量 M^2<1.3。

3 结 论

无湍流条件下，相干合成在传输距离和远场目标光强上具有明显的优势，然而在典型大气湍流条件下，这些优势将不明显。例如在水平传输~5 km，中等湍流强度(C_n^2>5×10^{-15} m$^{-2/3}$)条件下，相干合成与非相干合成在目标上的峰值强度和光斑大小几乎相同，对于 km 级传输距离和中等湍流强度，传输到目标上的光强存在一个最大值，与初始光束子孔径大小和光束质量 M^2 无关，强湍流时倾斜校正的效果不如弱湍流条件下校正效果好，当自适应光学不能实现有效校正时，长距离传输不必对入射光束质量要求过高，光束质量因子 M^2<3 即可[6]。

由于需要将相位控制在较小波长范围内，保证窄线宽，光程、偏振态一致，相干合成较难实现，但能得到较高光谱亮度，并对光束进行相位调节或大气补偿。非相干合成较易实现，但谱宽较宽，适用于传输原始功率，对光谱亮度要求不高的场合。随着合成技术的进步，光纤激光合成高能激光源将逐步代替单台高能激光源，实现远距离高功率高光束质量的合成光束输出，是高效紧凑型定向能源应用的未来方向，在可扩展便携式激光武器、小行星防御、太空碎片清理等领域具有广阔的应用前景。

参考文献：

[1] Coffey V. High-energy lasers: new advances in defense applications [J]. ***Optics and Photonics News***, 2014, 25(10): 28-35.

[2] Jones Q. Targets destroyed-at the speed of light [J]. ***Boeing Frontiers***, 2014, 8(2): 32-35.

[3] Wang Huisheng, Liu Yang, Wei Shangfang, et al. Coherent combination of Michelson cavity fibre lasers [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2009, 17(8): 1520-1527. (in Chinese)
王会升, 刘洋, 韦尚方, 等. 迈氏腔光纤激光器的相干合成[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(8): 1520-1527.

[4] Dawson J W, Messerly M J, Beach R J, et al. Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power [J]. ***Optics Express***, 2008, 16(17): 13240-13266.

[5] Zervas M N, Codemard C A. High power fiber lasers: A review [J]. ***IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics***, 2014, 20(5): 219-241.

[6] Sprangle P, Penano J, Hafizi B. Beam combining and atmospheric propagation of high power lasers [R]. Washington, DC: Naval Research Laboratory Beam Physics Branch& Icarus Research, Inc., 2011.

[7] Staton R, Pawlak R. Laser weapon system (LAWS) adjunct to the close-in weapon system (CIWS) [R]. Dahlgren, VA: Naval Surface Warfare Center Dahlgren Division, Corporate Communication, 2012.

[8] Mohring B, Dietrich S, Tassini L, et al. High-energy laser activities at MBDA Germany [C]//SPIE Defense, Security, and Sensing. International Society for Optics and Photonics, 2013, 8733: 873304-1-9.

[9] Sprangle P A, Penano J R, Hafizi B, et al. Apparatus for incoherent combining of high power lasers for long-range directed-energy applications: US, US Patent7970040 [P]. 2011-06-28.

[10] Bourdon P, Lombard L, Durécu A, et al. Coherent combining of fiber lasers [C]//XXI International Symposium on High Power Laser Systems and Applications. International Society for Optics and Photonics, 2017, 10254: 1025402-1-10.

[11] Lowenthal D. Lasers & Sources Across the Spectrum [J]. ***SPIE's Oemagazin***e, 2005, 4: 28.

[12] Divliansky I. Volume Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Laser Beam Combining and Beam Phase Transformations [M]//Naydenova I, Nazarova D, Babeva T. Holographic Materials and Optical Systems. London: InTech, 2017.

[13] Sevian A, Andrusyak O, Ciapurin I V, et al. Efficient power scaling of laser radiation by spectral beam combining [J]. ***Optics Letters***, 2008, 33(4): 384-386.

[14] Divliansky I, Ott D, Anderson B, et al. Multiplexed volume Bragg gratings for spectral beam combining of high power fiber lasers [C]//Proc SPIE, 2012, 8237: 823705.

[15] Wirth C, Schmidt O, Tsybin I, et al. High average power spectral beam combining of four fiber amplifiers to 8.2 kW [J]. ***Optics Letters***, 2011, 36(16): 3118-3120.

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[16] Loftus T H, Liu A P, Hoffman P R, et al. 522W average power, spect rally beam-combined fiber laser with near-diffraction-limited beam quality [J]. ***Optics Letters***, 2007, 32 (4): 349-351.

[17] Honea E, Afzal R S, Savage-Leuchs M, et al. Spectrally beam combined fiber lasers for high power, efficiency, and brightness [C]//SPIE, 2013, 8601: 8601155.

[18] Honea E, Afzal R S, Savage-Leuchs M, et al. Advances in fiber laser spectral beam combining for power scaling [C]// SPIE, 2016, 9730: 97300Y.

[19] Madasamy P, Jander D R, Brooks C D, et al. Dual-grating spectral beam combination of high-power fiber lasers [J]. ***IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronic***s, 2009, 15(2): 337-343.

[20] Ma Yi, Yan Hong, Tian Fei, et al. Common aperture spectral beam combination of fiber lasers with 5kW power high-eficiency and high-quality output [J]. ***High Power Laser and Particle Beams***, 2015, 27(4): 7-9. (in Chinese)
马毅, 颜宏, 田飞, 等. 光纤激光共孔径光谱合成实现 5kW **高效优质输出**[J]. **强激光与粒子束**, 2015, 27(4): 7-9.

[21] Ma Yi, Yan Hong, Peng Wanjing, et al. 9.6 kW common aperture spectral beam combination system based on multi-channel narrow-linewidth fiber lasers [J]. ***Chinese Journal of Lasers***, 2016, 43(9): 0901009. (in Chinese)
马毅, 颜宏, 彭万敬, 等. 基于多路窄线宽光纤激光的 9.6 kW **共孔径光谱合成光源**[J]. **中国激光**, 2016, 43(9): 0901009.

[22] Zheng Ye, Yang Yifeng, Zhao Xiang, et al. Research progress on spectral beam combining technology of high-power fiber lasers [J]. ***Chinese Journal of Lasers***, 2017, 44 (2): 0201002. (in Chinese)
郑也, 杨依枫, 赵翔, 等. 高功率光纤激光光谱合成技术的研究进展[J]. **中国激光**, 2017, 44(2): 0201002.

[23] Vorontsov M. Adaptive photonics phase-locked elements (APPLE): system architecture and wavefront control concept [C]//SPIE, 2005, 5895: 1-9.

[24] Zhang Yudong, Rao Changhui, Li Xinyang. Adaptive Optics and Laser Control [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016. (in Chinese)
张雨东, 饶长辉, 李新阳. 自适应光学及激光操控 [M]. **北京: 国防工业出版社**, 2016.

[25] Fan Xinyan. Research of active phase-locking fiber laser coherent combining technique [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
范馨燕. 主动锁相光纤激光相干合成技术研究 [D]. **哈尔滨: 哈尔滨工业大学**, 2010.

[26] Liu Zejin, Xu Xiaojun, Chen Jinbao, et al. Multi beams combiner with high duty ratio: CN Patent,ZL200920065407.7 [P]. 2010-06-23. (in Chinese)
刘泽金, 许晓军, 陈金宝, 等. 多光束高占空比合束器: 中国专利, ZL200920065407.7[P]. 2010-06-23.

[27] Vorontsov M A, Weyrauch T, Beresnev L A, et al. Adaptive array of phase-locked fiber collimators: analysis and experimental demonstration [J]. ***IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics***, 2009, 15(2): 269-280.

[28] Jenna Brady. Army develops first-of-its kind phase-coherent fiber laser array system [EB/OL]. (2014-06-11) [2017-06-01].U.S. Army Research Laboratory, https//www..army.mil/article/127565/Army_develops_first_of_its_kind_phase_coherent_fiber_laser_ array_system/.

[29] Adaptive Fiber Array Technology [EB/OL]. [2017-06-01]. http://www.optonicus.com/conformal_optical_systems/.

[30] Geng Chao, Zhang Xiaojun, Li Xinyang, et al. Structural design of adaptive fiber optics collimators [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2011, 40(9): 1682-1685. (in Chinese)
耿超, 张小军, 李新阳, 等. 自适应光纤光源准直器的结构设计[J]. **红外与激光工程**, 2011, 40(9): 1682-1685.

[31] Wang Xiong, Wang Xiaolin, Zhou Pu, et al. Experimental research of tilt-tip wavefront and phase-locking control in fiber lasers coherent beam combining [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2013, 42(6): 1443-1447. (in Chinese)
王雄, 王小林, 周朴, 等. 光纤激光相干合成中倾斜和锁相同时控制的实验研究 [J]. **红外与激光工程**, 2013, 42(6): 1443-1447.

[32] Christensen S E, Koski O. 2-dimensional waveguide coherent beam combiner [C]//Advanced Solid-State Photonics. Optical Society of America, 2007.

[33] Uberna R, Bratcher A, Alley T G, et al. Coherent combination of high power fiber amplifiers in a two-dimensional re-imaging waveguide [J]. ***Optics Express***, 2010, 18(13): 13547-13553.

[34] Cheung E, Ho J G, Goodno G D, et al. Diffractive-optics-based beam combination of a phase-locked fiber laser array [J]. ***Optics Letters***, 2008, 33(4): 354-356.

[35] Redmond S M, Ripin D J, Yu C X, et al. Diffractive coherent combining of a 2.5 kW fiber laser array into a 1.9 kW Gaussian beam [J]. ***Optics Letters***, 2012, 37(14): 2832-2834.

[36] Thielen P A, Ho J G, Burchman D A, et al. Two-dimensional diffractive coherent combining of 15 fiber amplifiers into a 600 W beam [J]. ***Optics Letters***, 2012, 37

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(18): 3741-3743.

[37] Uberna R, Bratcher A, Tiemann B G. Coherent polarization beam combination [J]. ***IEEE Journal of Quantum Electronics***, 2010, 46(8): 1191-1196.

[38] Uberna R, Bratcher A, Tiemann B G. Power scaling of a fiber master oscillator power amplifier system using a coherent polarization beam combination [J]. ***Applied Optics***, 2010, 49(35): 6762-6765.

[39] Ma P, Zhou P, Ma Y, et al. Coherent polarization beam combining of four high power fiber amplifiers using single frequency dithering technique [J]. ***IEEE Photonics Technology Letters***, 2012, 24(12): 1024-1026.

[40] Ma P F, Zhou P, Su R T, et al. Coherent polarization beam combining of eight fiber lasers using single-frequency dithering technique [J]. ***Laser Physics Letters***, 2012, 9(6): 456-458.

[41] Liu Zejin, Zhou Pu, Ma Pengfei, et al. 4-channel polarize coherent combination of high-power narrow-linewidth linear polarization fiber amplifiers with 5 kW high intensity laser output [J]. ***Chinese Journal of Lasers***, 2017, 44(4): 0415004. (in Chinese)

刘泽金, 周朴, 马鹏飞,等. 4 **路高功率窄线宽、线偏振光纤放大器相干偏振合成实现** 5 kW **级高亮度激光输出**[J]. **中国激光**, 2017, 44(4): 0415004.

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net