

基于计算技术的超快光纤激光研究进展与展望(特邀)

周 朴, 粟荣涛, 黄良金, 李 俊

(国防科技大学 前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 计算技术的引入给超快光纤激光带来了全新的研究方法和实际效果。文中简要总结计算技术应用于脉冲光纤激光的研究历程, 梳理发展脉络, 全面展示了计算技术促进超快光纤激光研究发展的使能特性。计算技术与超快光纤研究的进一步深度融合, 有可能开辟新的研究与应用领域。

关键词: 光纤激光; 超快光学; 智能算法; 计算技术

中图分类号: O438 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0803001

Research progress and future perspective on ultrafast fiber laser enabled by computing technique (invited)

Zhou Pu, Su Rongtao, Huang Liangjin, Li Jun

(College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: New research method and laser performance had been achieved in ultrafast fiber lasers when computing technique was introduced in. In this paper, the research progress on ultrafast fiber lasers based on computing technique was briefly summarized and analyzed, the enabling property of computing technique for ultrafast fiber lasers was revealed. The further combination of ultrafast fiber laser and computing technique may open a new avenue for research and application.

Key words: fiber laser; ultrafast optics; intelligent algorithm; computing technique

收稿日期: 2018-04-07; 修订日期: 2018-05-12

基金项目: 中国科协青年人才托举工程; 湖南省科协中青年学者培养计划

作者简介: 周朴(1984-), 男, 研究员, 博士, 主要从事光纤激光与光束合成技术等方面的研究。Email: zhoupu203@163.com

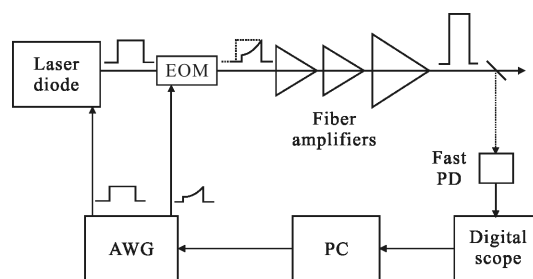
0 引言

超快光纤激光是激光技术领域的研究前沿与热点^[1-4],在材料加工等领域得到了广泛应用^[5-7]。脉冲光纤激光在产生和放大过程中极易受到外部因素(如振动)和内部因素(如增益饱和)的影响^[8-9],造成脉冲畸变甚至无法稳定运行。在光纤激光器(放大器)的架构中引入反馈机制,针对外部因素和内部因素带来的影响实施闭环控制,是实现脉冲光纤激光稳定运行、保持脉冲形态的可行方案^[10]。近年来,随着信息技术的飞速发展,泛在获取、高速传输、海量存储、普遍互联等正在逐步实现,促进以深度学习为代表的计算技术全面融入社会生产和科学研究等领域,也为光纤激光领域的发展带来了新的机遇。文中简要总结计算技术应用于脉冲光纤激光的研究历程,梳理发展脉络,旨在展示计算技术促进超快光纤激光研究的使能特性,并对计算技术与超快光纤激光的全面深度融合进行展望。

1 算法驱动的腔外调制式脉冲光纤激光

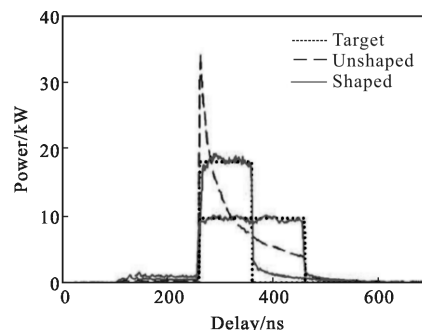
依据调制方式的不同,脉冲光纤激光的产生方式可以分为腔内调制和腔外调制两种,常见的锁模和调 Q 方法产生脉冲激光通常属于腔内调制方法,而对连续激光进行“斩波”获得脉冲则属于腔外调制,其中尾纤耦合的电光调制器和声光调制器是常用的“斩波”器件^[11-12]。由于“斩波”器件耐受功率有限,注入该器件的功率一般不高,“斩波”后的激光功率往往较低(一般在毫瓦以下),通常要采用多级级联功率放大的方式才能满足应用需求。由于增益饱和和效应^[10],在功率放大过程中激光的脉冲波形会发生畸变。英国南安普顿大学是较早引入算法对脉冲畸变进行自适应补偿的单位。2009 年, Malinowski 等采用遗传算法生成对电光调制器的驱动信号,如图 1(a)所示,取样后的激光脉冲时域特性经光电转换后作为算法的输入信号,算法根据该输入信号不断调整驱动电光调制器的信号,直至输出脉冲波形满足目标需求,图 1(b)所示为算法执行前后激光放大器的输出波形以及与目标波形的对比,不难看出,通过执行算法可以获得近乎理想的脉冲形态。最终该课题组获得了单脉冲能量为毫焦级、脉宽为百纳

秒级的脉冲光纤激光输出^[13]。随后,该课题组运用类似方法,将激光器的输出平均功率提升至百瓦级,最短脉宽可达 500 ps^[14-15]。近期,本课题组成功运用随机并行梯度下降算法实现了脉冲波形的自适应控制^[16]。需要说明的是,除了掺镱光纤工作的 1 μm 波段外^[13-16],采用控制输入波形实现目标波形的方式也已经成功应用于掺铒光纤激光(1.5 μm 波段)^[17]和掺铊光纤激光(2 μm 波段)^[18-19],但都没有运用算法,而是依据参考文献[8, 10]直接生成驱动信号的。相比而言,若激光器运行过程中有异常扰动发生,基于算法的自适应控制系统将具有更好的鲁棒性。



(a) 系统结构

(a) Experimental setup



(b) 算法执行前后激光放大器的输出波形与目标波形

(b) Unshaped, shaped and target pulse shapes

图 1 遗传算法补偿脉冲激光放大过程中引入的波形畸变
Fig.1 Pulse distortion induced by power amplification of active pulse shaping based on genetic algorithm

受限于驱动器的响应时间等因素,算法驱动的腔外补偿式脉冲光纤激光一般无法获得超短脉冲光纤激光输出,目前最短的脉宽为 500 ps 量级^[10-19],要获得 ps、fs 级脉宽的超短激光,需采用腔内调制的方法。

2 算法驱动的腔内调制式脉冲光纤激光

腔内调制产生超快光纤激光主要可以分为被动

锁模和主动锁模两种方式,其中被动锁模又可分为基于实体可饱和吸收体(如碳纳米管、二维材料)被动锁模^[20-21]和基于虚拟可饱和吸收体(非线性偏振演化 NPE、非线性偏振旋转 NPR 和非线性光学环形镜 NOLM)被动锁模^[22-24]两类。考虑到算法的可执行性,基于算法产生和控制脉冲激光目前主要应用于主动锁模和基于虚拟可饱和吸收体被动锁模上(实体可饱和吸收体由于没有电子信号接口暂时无法实施算法控制),其中又以基于 NPR 型的被动锁模光纤激光为主,它是目前商用超短脉冲光纤激光的主流实现方式^[25-26]。

2.1 遍历式控制

NPE 型和 NPR 型被动锁模光纤激光器的腔体组成中含有偏振控制器^[27-29],该类型的偏振控制器可以由电驱动,从而为计算技术的运用提供了接口。早期,计算技术运用于 NPR 型被动锁模光纤激光器一般是“遍历式”。如在最早的一篇将计算技术与 NPR 型被动锁模光纤激光器结合的参考文献中^[27],作者通过扫描整个 Poincare 球空间的方式,获得所有可能实现锁模的偏振控制信号的状态图;在不同的泵浦功率下,通过调用并复现状态图中的控制信号,可以实现不同输出功率的超快脉冲激光。参考文献^[28]的作者通过扫描偏振控制信号的同时监测输出脉冲信号的相对强度,当相对强度达到极值时判断处于锁模状态;参考文献^[29]的作者扫描偏振控制信号的同时监测输出脉冲信号的偏振态,当输出激光的 Stokes 参数发生突变时判断处于锁模状态。上述三种方式均实现了锁模脉冲输出,图 2(a)所示为参考文献^[27]中激光器在输出平均功率分别为 6 mW 和 2~5 mW 时的激光光谱图,对应的激光脉宽分别为 310 fs 和 250 fs;图 2(b)为参考文献^[28]中激光器从未锁模至锁模过程中脉冲波形的演化过程,当激光器处于锁模状态时,激光脉宽约为 1 ps。

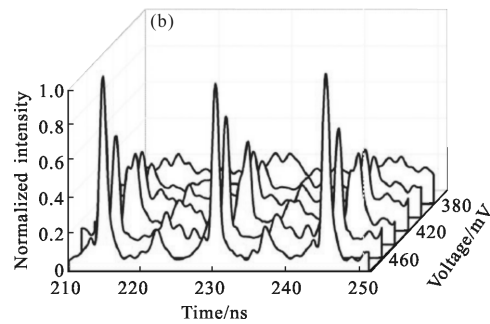
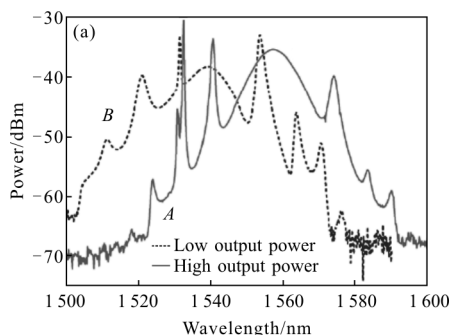


图 2 激光器锁模后的输出激光特性(a)输出光谱图(b)输出时域特性

Fig.2 (a) Spectral and (b) temporal characteristics of the mode locked fiber laser

参考文献^[30]中作者通过分析输出脉冲激光信号的模间拍频信号判断 NPE 式被动锁模光纤激光器是否处于锁模状态,图 3 所示为稳定锁模和不稳定锁模状态时模间拍频信号的截然不同的形态,据此作者设置了激光器的工作方式与启动流程,实现了平均功率为 2.5 mW 的超快脉冲激光输出,激光功率放大至 100 mW 时测量脉宽约为 170 fs。

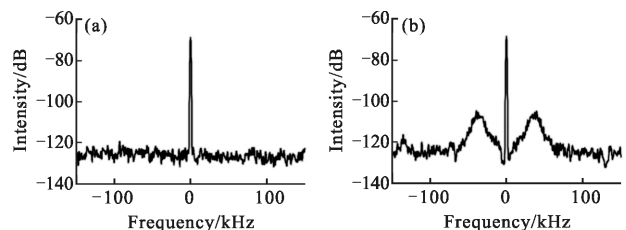


图 3 激光器锁模(a)和未锁模(b)状态时模间拍频信号

Fig.3 Inter-mode beat laser spectrum of the fiber laser most stable (a) and less stable (b) mode-locked operation

2.2 智能算法控制

2.1 节描述的“遍历式”控制的执行速度一般较慢,当激光器的状态空间参数较多时难以得出理想的结果,并且有可能陷入局部极值,引入智能算法是面对较多状态空间参数时仍能获得全局极值的可行方案^[31]。目前研究较为深入的是美国华盛顿大学 Kutz 课题组^[26,32-33]、法国勃艮第大学 Grelu 课题组^[34-35]和英国帝国理工学院 Woodward 课题组^[31,36]等。

美国华盛顿大学 Kutz 课题组是较早将智能算法引入超快光纤激光研究领域的单位,这可能与他们工作在大学的应用数学系有关。该课题组的研究对象主要是 NPR 型被动锁模光纤激光器。2013 年,

该课题组研究表明采用多参量寻极值控制(Multi-parameter extremum-seeking control)算法,在外界扰动较为剧烈的情形下,仍可实现锁模运行^[32]。2014年,该课题组将数据驱动的机器学习策略与多参量寻极值控制算法结合,实现激光器的自调谐;多参量寻极值控制算法可以实现并保持锁模状态,用以描述激光腔体特性的机器学习算法可以快速识别激光器状态并优化改进控制策略;其中机器学习算法旨在学

习激光器的“底层”特性和行为,记忆激光器运行的关键参数、在外界扰动等因素导致激光器失调(或者处于非最优状态)时可以自行调节。2018年,该课题组提出深度学习与多参量寻极值控制算法结合,研究发现该方法可以从未知参数的系统中自我学习,并可以运用学习得到的知识,在双折射发生随机漂移的情况下保持激光器工作在最优状态^[25],图 4 是基于深度学习算法控制的锁模激光器系统结构图。

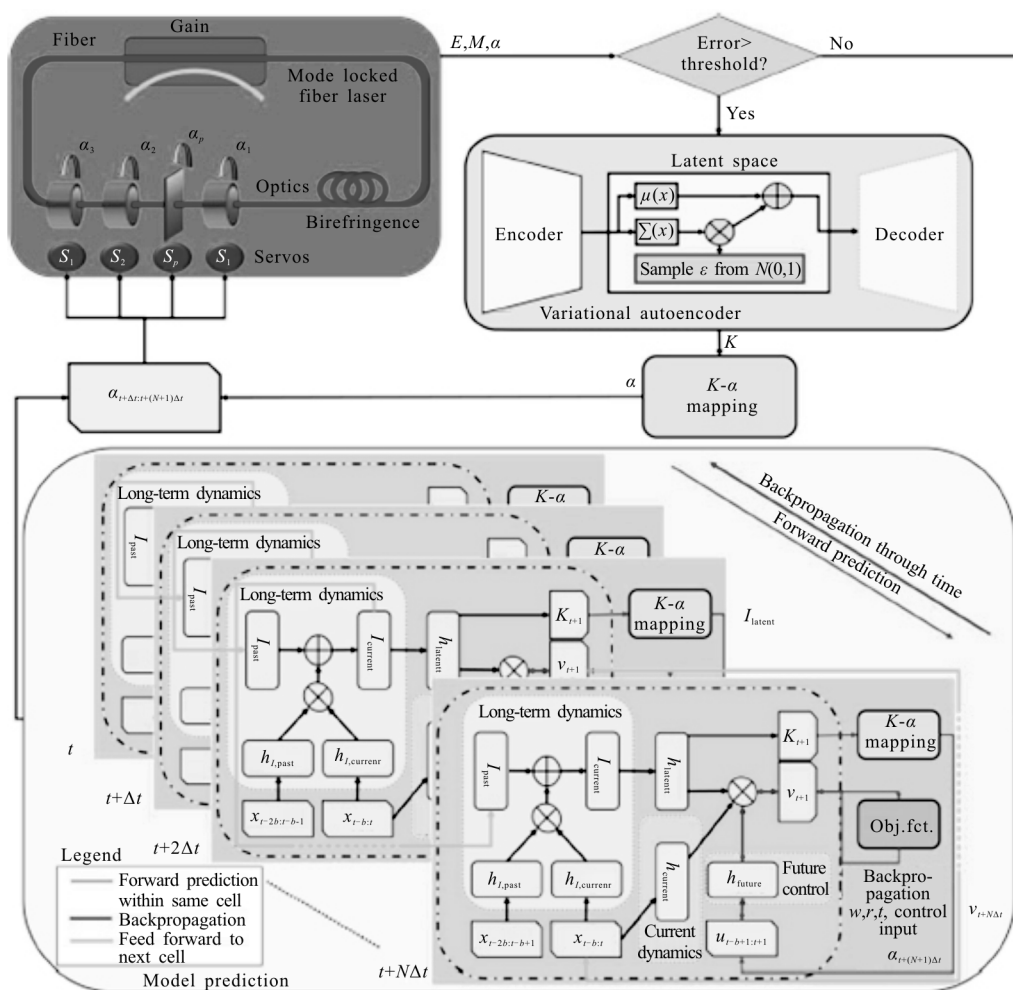


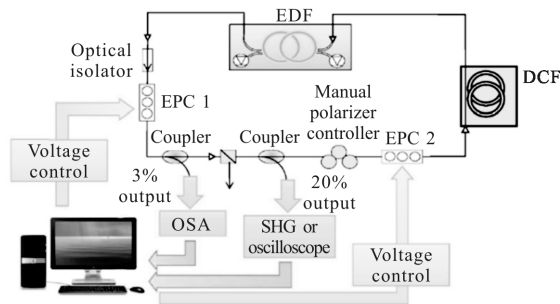
图 4 基于深度学习算法控制的锁模激光器系统结构图

Fig.4 Mode-locked fiber laser system based on deep learning algorithm control

法国勃艮第大学 Grelu 课题组的研究对象主要是 NPE 型被动锁模光纤激光器。2015 年,该课题组研究发现运用遗传算法可以得出 NPE 型被动锁模光纤激光器稳定运行所需要的腔体参数集。与 NPR 型类似,在 NPE 型被动锁模光纤激光器中,算法通过驱动电动偏振控制器来实现对激光器的控制。

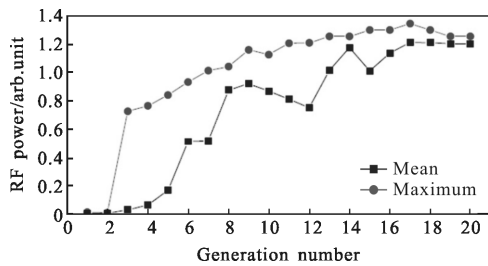
图 5(a)所示为实验结构图^[34],激光器的一个输出端输出的激光通过 BBO 晶体后产生二次谐波的强度(标量信号)或时序(矢量信号)作为遗传算法的评价函数。实验过程中,经过大约 20 次“遗传”,可获得稳定的锁模信号输出,如图 5(b)所示。2016 年,该课题组对算法产生的脉冲信号、运用于谐波锁模以及可

重复性等方面进行了进一步的深入研究^[36]。2017 年，来自美国 Kapteyn-Murnane 实验室、科罗拉多州立大学等单位的联合课题组运用遗传算法和爬山法相结合的方式实现了 NPE 型被动锁模光纤激光器的稳定启动和锁模^[37]，获得了脉宽为百 fs 级的超快激光输出。



(a) 系统结构

(a) Experimental setup



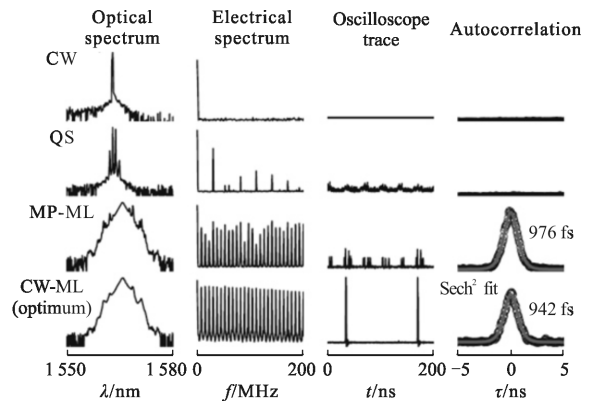
(b) 算法执行效果

(b) Effectiveness of the active control

图 5 遗传算法控制 NPE 型锁模激光器

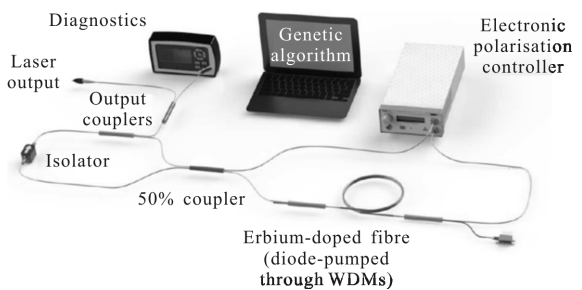
Fig.5 Mode-locked laser system based on NPE and deep genetic algorithm control

英国帝国理工学院 Woodward 课题组的研究对象主要是 NALM 型(NOLM 的一种特殊情况)被动锁模光纤激光器。2016 年，课题组提出将遗传算法运用于 NALM 型被动锁模光纤激光器，旨在实现一种“聪明的”可以自我优化的超快光纤光源（原文为“Towards ‘smart lasers’”）^[31]。论文指出，激光器运行在连续(CW)、调 Q(QS)、部分锁模(MP-ML)以及稳定锁模(CW-ML, 目标状态)时，输出激光的光谱、时序信号、时序信号的射频谱以及自相关信号都呈现出截然不同的特征，如图 6(a)所示，用时序信号、射频谱以及光谱作为遗传算法的复合评价函数对 NALM 型激光器进行控制(如图 6(b)所示)，可以实现锁模脉冲输出。



(a) 操作原理

(a) Operating principle



(b) 系统结构

(b) Experimental setup

图 6 遗传算法控制 NLAM 型锁模激光器

Fig.6 Mode-locked laser based on NLAM and deep genetic algorithm control

实验中，算法经过约 10 次“遗传”，可实现 600~800 fs 量级的超快激光输出；在外界产生机械振动破坏了锁模状态后，再经过 10 次“遗传”，仍可实现锁模状态，如图 7 所示。2017 年，课题组将遗传算法拓

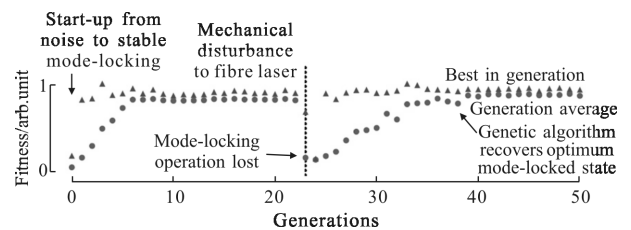


图 7 遗传算法控制的 NLAM 型锁模激光器在外界扰动前后的表现

Fig.7 Output properties of mode-locked laser (based on NLAM and deep genetic algorithm) before and after the mechanically perturbing

展至基于双折射滤波的脉冲激光器中^[38]，实现了自

调 Q 激光器的自调谐输出, 在大于 20 nm 的调谐范围内均可实现稳定脉冲。

2.3 可编程超快光纤激光器

经过算法的自动寻优后, 2.2 节中总结的光纤激光一般可以稳定工作在目标锁模状态, 即便存在外界扰动也可实现“自我恢复”; 但激光器都属于“被动锁模”类型, 工作状态较为单一, 不可定制。2010 年, 加拿大 Genia Photonics 公司研究人员基于“主动锁模”类型的光纤激光, 实现了超快光纤激光的“可编程”^[39]。激光器的系统结构如图 8(a)所示, 通过驱动腔内的电光调制器(驱动信号的频率、波形、占空比等可变)可以实现激光器输出波长、重复频率、脉宽等参数的灵活控制, 并且设置了图形化的交互界面(如图 8(b)所示), 用户通过界面定制激光器的输出特性, 在某种意义上就是实施对激光器的“编程”。参考文献[39]报道的实验结果中, 激光器的中心波长的典型调节范围为 100 nm (如 1 030~1 130 nm), 脉宽可调节范围为 20~500 ps, 重复频率的调节范围为 10~50MHz。上述激光器在中红外激光产生^[40]、光学相干层析、非线性频率变换等领域有广泛的应用前景。

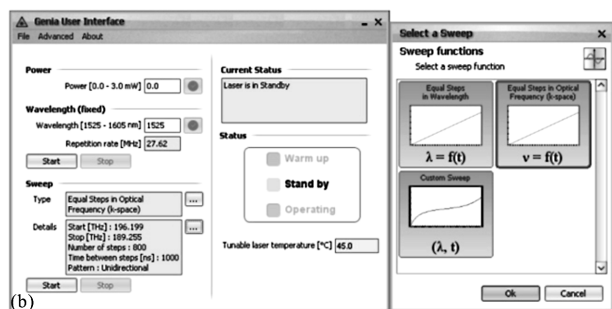
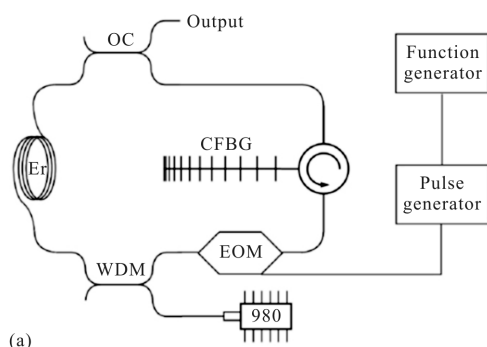


图 8 可编程光纤激光器(a)系统结构; (b)用户界面

Fig.8 (a) Experimental setup and (b) user interface of the programmable fiber laser

3 展望

文中主要总结了基于计算技术的超快光纤激光研究进展, 侧重于对激光“时序”特性的生成与保持上。随着信息技术的发展, 光纤激光研究的深入和应用范围的拓展, 计算技术有望与光纤激光的研究和应用进一步融合。在研究方面, 对多束超快光纤激光相干合成是获得强场的有效技术途径, 有望成为新型台式激光加速器的实施方案^[41-42]。尽管多束连续激光相干合成已有大量研究成果^[43], 大量算法(如模拟退火算法、遗传算法、随机并行梯度下降算法等)已经得到成功应用^[44-47], 但超快光纤激光相干合成将会涉及脉冲同步控制、色散管理、光程高灵敏度动态调节等连续波激光很少涉及的领域^[48-51], 控制维度更多、系统模型更复杂。随着研究的深入, 模式不稳定效应已经成为限制功率提升和光束质量保持的重要物理因素^[51], 模式不稳定效应的分析也涉及复杂建模和大数据量计算^[52]。智能算法在上述领域都有望“大显身手”。在应用方面, 如能基于计算技术实现 MOPA 结构光纤激光与物质相互作用过程的闭环控制, 根据作用效果定制激光输出特性, 有望提升材料处理等激光制造领域的效率^[53]; 激光切割是高平均功率光纤激光器的主要应用领域, 如能有效运用机器学习辅助激光切割方面的成果^[54], 有望进一步提升光纤激光切割的效能。总之, 计算技术的引入, 不仅能给光纤激光带来全新的研究方法和应用效果, 甚至将开辟全新的研究与应用领域, 或许具有典型机器思维的“智能激光器”^[55]已经并不遥远。

参考文献:

- [1] Fermann M E, Hartl I. Ultrafast fibre lasers [J]. Nat Photonics, 2013, 7(11): 868-874.
- [2] Liu M, Luo A, Yan Y, et al. Successive soliton explosions in an ultrafast fiber laser [J]. Opt Lett, 2016, 41 (6): 1181-1184.
- [3] Mou C, Sergeev S, Rozhin A, et al. All-fiber polarization locked vector soliton laser using carbon nanotubes [J]. Opt Lett, 2011, 36(19): 3831-3833.
- [4] Liu Y, Li W, Luo D, et al. Generation of 33 fs 93.5 W average power pulses from a third-order dispersion managed self-similar fiber amplifier [J]. Opt Express, 2016, 24 (10):

- 10939-10945.
- [5] Shah L, Fermann M E, Dawson J W, et al. Micromachining with a 50 W, 50 μJ , sub-picosecond fiber laser system [J]. *Opt Express*, 2006, 14(25): 12546-12551.
- [6] Lu H K O, Elahi P, Aalan A, et al. High-repetition-rate ultrafast fiber lasers for material processing [J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2018, 24(3): 8800312.
- [7] Limpert J, Roser F, Schimpf D N, et al. High repetition rate gigawatt peak power fiber laser systems: challenges, design, and experiment [J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2009, 15(1): 8800312.
- [8] Frantz L M, Nodvik J S. Theory of pulse propagation in a laser amplifier[J]. *J Appl Phys*, 1963, 34(8): 2346-2349.
- [9] Wang Y, Po H. Dynamic characteristics of double-clad fiber amplifiers for high-power pulse amplification [J]. *J Lightwave Technol*, 2003, 21(10): 2262-2270.
- [10] Schimpf D N, Ruchert C, Nodop D, et al. Compensation of pulse-distortion in saturated laser amplifiers[J]. *Opt Express*, 2008, 16(22): 17637-17646.
- [11] Su R, Zhou P, Wang X, et al. Active coherent beam combination of two high-power single-frequency nanosecond fiber amplifiers[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(4): 497-499.
- [12] Su R, Zhou P, Wang X, et al. Active coherent beam combining of a five-element, 800 watt nanosecond fiber amplifier array[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(19): 3978-3980.
- [13] Malinowski A, Vu K T, Chen K K, et al. High power pulsed fiber MOPA system incorporating electro-optic modulator based adaptive pulse shaping [J]. *Opt Express*, 2009, 17(23): 20927-20937.
- [14] Lin D, Alam S, Chen K, et al. 100W, fully-fiberised ytterbium doped master oscillator power amplifier incorporating adaptive pulse shaping [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference, 2009, CFM4.
- [15] Malinowski A, Gorman P, Codemard C A, et al. High-peak-power, high-energy, high-average-power pulsed fiber laser system with versatile pulse duration and shape [J]. *Opt Lett*, 2013, 38(22): 4686-4689.
- [16] Jiang M, Su R, Zhang P, et al. Arbitrary temporal shape pulsed fiber laser based on SPGD algorithm [J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15(6): 065101.
- [17] Sobon G A K P. Pulsed dual-stage fiber MOPA source operating at 1 550 nm with arbitrarily shaped output pulses [J]. *Appl Phys B*, 2011, 105(4): 721-727.
- [18] Li Z, Heidt A M, Teh P S, et al. High-energy diode-seeded nanosecond 2 μm fiber MOPA systems incorporating active pulse shaping[J]. *Opt Lett*, 2014, 39(6): 1569-1572.
- [19] Shi H A T F. High-power diode-seeded thulium-doped fiber MOPA incorporating active pulse shaping [J]. *Appl Phys B*, 2016, 122(10): 269.
- [20] Zhang H, Tang D Y, Zhao L M, et al. Large energy mode locking of an erbium-doped fiber laser with atomic layer graphene[J]. *Opt Express*, 2009, 17(20): 17630-17635.
- [21] Sun Z, Hasan T, Torrisi F, et al. Graphene mode-locked ultrafast laser[J]. *ACS Nano*, 2010, 4(2): 803-810.
- [22] Wang X, Zhou P, Wang X, et al. Pulse bundles and passive harmonic mode-locked pulses in Tm-doped fiber laser based on nonlinear polarization rotation [J]. *Opt Express*, 2014, 22(5): 6147-6153.
- [23] Fermann M E, Andrejco M J, Silberberg Y, et al. Passive mode locking by using nonlinear polarization evolution in a polarization-maintaining erbium-doped fiber [J]. *Opt Lett*, 1993, 18(11): 894-896.
- [24] Yu Y, Teng H, Wang H, et al. Highly-stable mode-locked PM Yb-fiber laser with 10 nJ in 93-fs at 6 MHz using NALM[J]. *Opt Express*, 2018, 26(8): 10428-10434.
- [25] Haus H A. Mode-locking of lasers [J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2000, 6(6): 1173-1185.
- [26] Baumeister T, Brunton S L, Kutz J N. Deep learning and model predictive control for self-tuning mode-locked lasers [J]. *J Opt Soc Am B*, 2018, 35(3): 617-626.
- [27] Hellwig T A W T. Automated characterization and alignment of passively mode-locked fiber lasers based on nonlinear polarization rotation[J]. *Appl Phys B*, 2010, 101(3): 565-570.
- [28] Shen X, Li W, Yan M, et al. Electronic control of nonlinear-polarization-rotation mode locking in Yb-doped fiber lasers [J]. *Opt Lett*, 2012, 37(16): 3426-3428.
- [29] Olivier M, Gagnon M, E M P. Automated mode locking in nonlinear polarization rotation fiber lasers by detection of a discontinuous jump in the polarization state[J]. *Opt Express*, 2015, 23(5): 6738-6746.
- [30] Radnatarov D, Khripunov S, Kobtsev S, et al. Automatic electronic-controlled mode locking self-start in fibre lasers with non-linear polarisation evolution[J]. *Opt Express*, 2013, 21(18): 20626-20631.
- [31] Woodward R I, Kelleher E J R. Towards "smart lasers": self-optimisation of an ultrafast pulse source using a genetic algorithm[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 37616.
- [32] Brunton S L, Fu X, Kutz J N. Extremum-seeking control of a mode-locked laser [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2013,

- 49(10): 852-861.
- [33] Brunton S L, Fu X, Kutz J N. Self-tuning fiber lasers[J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2014, 20(5): 1101408.
- [34] Andral U, Fodil R S, Amrani F, et al. Fiber laser mode locked through an evolutionary algorithm[J]. Optica, 2015, 2(4): 275-278.
- [35] Andral U, Buguet J, Fodil R S, et al. Toward an autsetting mode-locked fiber laser cavity [J]. J Opt Soc Am B, 2016, 33(5): 825-833.
- [36] Woodward R I, Kelleher E J. Self-optimizing mode-locked laser using a genetic algorithm[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, 2016, STu3P.6.
- [37] Winters D G, Kirchner M S, Backus S J, et al. Electronic initiation and optimization of nonlinear polarization evolution mode-locking in a fiber laser [J]. Opt Express, 2017, 25(26): 33216-33225.
- [38] Woodward R I, Kelleher E J R. Genetic algorithm-based control of birefringent filtering for self-tuning, self-pulsing fiber lasers[J]. Opt Lett, 2017, 42(15): 2952-2955.
- [39] Burgoyne B, Illeneuve A V. Programmable lasers: design and applications[C]//SPIE, 2010, 7580: 758002.
- [40] Théberge F, Daigle J F, Villeneuve A, et al. Tunable mid-infrared generation using synchronized programmable fiber lasers[C]//SPIE, 2012, 8381: 83810E.
- [41] Mourou G, Brocklesby B, Tajima T, et al. The future is fibre accelerators[J]. Nat Photonics, 2013, 7(4): 258-261.
- [42] Moustazis S D, Lalousis P, Perrakis K, et al. ICAN: High power neutral beam generation [J]. Eur Phys J Special Topics, 2015, 224(13): 2639-2643.
- [43] Liu Z, Zhou P, Xu X, et al. Coherent Beam Combining of High Average Power Fiber Lasers [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2016. (in Chinese)
刘泽金, 周朴, 许晓军, 等. 高平均功率光纤激光相干合成 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.
- [44] Vorontsov M A, Carhart W, Ricklin J C. Adaptive phase-distortion correction based on parallel gradient-descent optimization[J]. Opt Lett, 1997, 22(12): 907-909.
- [45] Zhou P, Ma Y, Wang X, et al. Coherent beam combining of fiber amplifiers based on stimulated annealing algorithm [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(5): 973-977. (in Chinese)
周朴, 马阎星, 王小林, 等. 模拟退火算法光纤放大器相干合成[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(5): 973-977.
- [46] Jiang M, Su R, Zhang Z, et al. Coherent beam combining of fiber lasers using a CDMA -based single-frequency dithering technique[J]. Appl Opt, 2017, 56(15): 4255-4260.
- [47] Jiang M, Su R, Zhang Z, et al. Joint multiple access based efficient coherent beam combining of fiber lasers [J]. Laser Phys, 2018. (Submitted)
- [48] Goodno G D, Weiss S B. Automated co-alignment of coherent fiber laser arrays via active phase-locking [J]. Opt Express, 2012, 20(14): 14945-14953.
- [49] Su R, Zhou P, Zhang P, et al. Review on the progress in coherent beam combining of ultra-short fiber lasers [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(1): 0103001. (in Chinese)
栗荣涛, 周朴, 张鹏飞, 等. 超短脉冲光纤激光相干合成 [J]. 红外与激光工程, 2018, 47(1): 0103001.
- [50] Yu H L, Zhang Z X, Wang X L, et al. High average power coherent femtosecond pulse combining system based on an all fiber active control method[J]. Laser Phys Lett, 2018, 15(7): 075101.
- [51] Jauregui C, Limpert J, Tunnermann A. High-power fibre lasers[J]. Nat Photon, 2013, 7(11): 861-867.
- [52] Tao R, Wang X, Zhou P. Comprehensive theoretical study of mode instability in high-power fiber lasers by employing a universal model and its implications [J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2018, 24(3): 0903319.
- [53] Pangovski K, Sparkes M, Cockburn A, et al. Control of material transport through pulse shape manipulation -a development toward designer pulses [J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2014, 20(5): 0901413.
- [54] Tercan H A K T. Improving the laser cutting process design by machine learning techniques [J]. Production Engineering, 2017, 11(2): 195-203.
- [55] Zhou P. Intelligent laser: a versatile tool for multidisciplinary education in photonics [C]//International Conference on Education and Training in Optics and Photonics (ETOP), 2017.