

智能调控多维激光技术与应用

马云聪¹, 梁兆恒¹, 凌琳¹, 郭元锴¹, 李子豪¹, 韦小明^{1*}, 杨中民^{1,2**}¹华南理工大学物理与光电学院, 广东 广州 510610;²华南师范大学未来技术研究院, 广东 广州 510006

摘要 多维(多模)激光是突破单模激光技术瓶颈的重要途径,有望推动多学科交叉与创新发展。不同于传统的单模激光,多维激光具有光场结构复杂、可控参数多等特点,其性能调控面临诸多挑战。近年来,随着人工智能的兴起,机器学习等智能调控技术被广泛用于光学系统性能的优化,推动了智能光学及相关学科快速发展,为多维激光的智能调控提供了新思路。从激光谐振腔内部和外部调控两方面,介绍了智能调控技术在激光调控领域中的研究进展,并展望了智能调控多维激光技术在光学微操控、激光微加工和空间光通信等领域中的应用前景。

关键词 激光光学; 激光束整形; 光场调控; 机器学习; 多维度

中图分类号 TN248

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230628

1 引言

激光已经被广泛应用于加工、通信、军事和医疗等领域,成为了重要的战略技术。尤其是在物理学、生物学、材料学和天文学等学科中,激光已成为观测复杂、多维度光学现象不可或缺的工具。空域、时域、频域、幅度、相位和偏振等物理维度作为光的基本维度,是激光调控的主要对象。通过空间光场调控获得的涡旋光场^[1]、艾里光场^[2]和贝塞尔光场^[3]等新型结构激光在光学微操纵^[4]、超分辨成像^[5]、激光微加工^[6]、信息传输^[7]等领域中具有重要的应用价值。为了探索高维度物理新现象,激光调控不再局限于单一维度,对激光的偏振、相位、幅度等物理维度进行联合调控使激光具有了“多维”的特性。

多维激光与物质的相互作用涉及许多复杂的物理现象,包括光的自旋轨道相互作用^[8]、等离子体形成^[9]、受激拉曼散射^[10]和非线性光学^[11]等。多维激光的自旋和轨道角动量之间的紧密耦合显著地影响和控制光在非均匀场和结构化介质中的强度和传播,可应用于亚波长光学探测^[12]等。多维激光和物质之间可以通过吸收、电离、流体动力学膨胀和热化等复杂的相互作用产生等离子体,具有空间和时间变化特性的激光脉冲可以产生具有复杂动态结构的等离子体。通过调整激光的参数(如强度、脉冲持续时间和频率)可增强或控制受激拉曼散射,该方法可控制和操纵各种尺度的物质。

此外,多维激光与物质之间的相互作用还会产生多种非线性光学效应,如二次谐波产生、四波混频效应、光学克尔效应、非线性吸收和自聚焦等。多维光场通过整合不同学科的知识和技术来解决复杂问题,促进了跨学科领域(如散射波^[13]、自由空间光通信^[14]和非线性光学系统的物理学^[15]等)的发展,是当今科学研究前沿以及未来多学科发展的重要基础。

激光的多维度联合调控有望推动交叉学科的发展,在信息、物理、材料等领域中具有广阔的应用场景。根据激光的产生和传输环节,激光调控可以大致分为激光谐振腔内和外部调控。激光谐振腔内多维调控是指在激光产生过程中通过调控激光谐振腔内部参数或者器件来输出特定结构激光;激光谐振腔外部调控是指在激光传输过程中通过改变激光物理参数来获得新结构激光。

近年来,人工智能领域的快速发展促进了机器学习与光学系统的结合,使激光系统获得了新功能且性能提升。基于模式识别^[16]、图像重建^[17]、光学组件设计^[18]和大数据集^[19]等遗传算法的机器学习使大数据分析、隐藏结构搜索等任务变得简单,为复杂非线性光学问题的研究提供了新思路^[20],催生了智能调控多维激光,引起了广泛关注。本文对智能调控多维激光技术与应用进行了归纳总结。首先介绍了光的多维自由度以及机器学习的基本概念和工作原理;然后对激光谐振腔内外多维度调控的相关技术进行了介绍;

收稿日期: 2023-03-21; 修回日期: 2023-04-19; 录用日期: 2023-04-24; 网络首发日期: 2023-05-04

基金项目: 国家重大科研仪器研制项目(61927816)、广东省“珠江人才计划”引进创新创业团队(2021ZT09Z109)、广东省自然科学基金(2021B1515020074)、中德合作交流项目(M-0296)、华南理工大学高水平大学建设项目(D6211170)、国家自然科学基金(U1609219, 62235014)、广东省科技计划项目(2020B1212060002)

通信作者: *xmwei@scut.edu.cn; **yangzm@scut.edu.cn

接着对智能调控多维激光技术在光学微操纵、光学微加工和自由空间光通信等领域中的应用研究进行了总结;最后展望了智能调控多维度激光技术的未来发展前景。

2 基本原理

2.1 光的多维自由度

光波的传统表达式^[21]为

$$\mathbf{E} = A\hat{\mathbf{e}}\cos(\omega t + \mathbf{k}\cdot\mathbf{r} + \varphi), \quad (1)$$

式中: \mathbf{E} 为光波的电场强度矢量; A 为振幅; $\hat{\mathbf{e}}$ 为偏振态; ω 为频率; t 为时间; \mathbf{r} 为空间位置; φ 为相位; \mathbf{k} 为波矢。根据式(1)可知,光波在时域、空域、频域、幅度、相位和偏振这六个维度上承载信息(图1),且每个维度都具有多个可调控的物理量,如波长(λ)、时间、振幅和传播方向等。通过控制光的自由度来创建多维结构光场,可衍生出更多的应用场景。光的振幅自由度决定激光功率强度,通过其调控可实现高亮度光束;光的偏振态自由度决定斯托克斯参数,通过其调控可实现矢量光束;光的频率自由度决定光谱,通过其调控可实现光学频率梳;光的时间自由度决定脉冲间隔与脉冲宽度,通过其调控可产生超短脉冲;光的空间自由度决定空间模式,通过其调控可实现激光模式控制;光的相位自由度决定轨道角动量,通过其调控可产生涡旋光束^[22]。若对其中多个自由度进行调控,可获得高维度光场,该方法为探索复杂的光学现象以及光与物质作用提供了新思路。

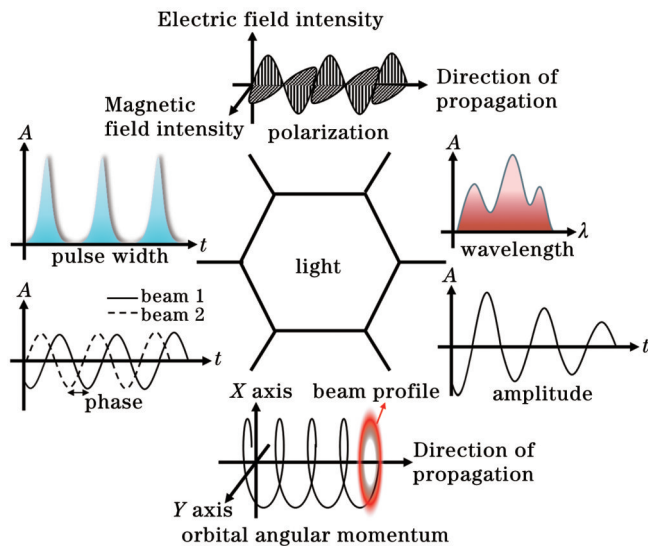


图1 光的多个维度

Fig. 1 Multiple dimensions of light

2.2 机器学习

人工智能的概念在20世纪50年代被首次提出^[23]。机器学习是发展人工智能的核心技术之一,在人工智能领域中扮演着重要角色^[24],具有强大的数据分析和处理能力,已经被广泛应用于自动驾驶^[25]、自然语言处

理^[26]、数据挖掘^[27]和计算机视觉^[28]等众多领域。将机器学习技术应用到基础学科也已经成为当下研究的热点^[29]。

目前常用于多维激光调控的机器学习形式包括监督学习、无监督学习、半监督学习和强化学习等。监督学习是一种利用标记数据进行学习的方法,常用于预测未知数据的标签^[30],如研究多模光纤传播动力学^[31]等。无监督学习是一种利用未标记数据进行学习的方法,常用于挖掘数据之间的关系^[32],如光纤调制不稳定性极端事件分析^[33]等。半监督学习是一种利用标记数据和无标记数据优化学习性能的方法,常用于挖掘数据内在特征^[34],如提高多模光纤的信息传输能力^[35]等。强化学习是一种基于奖励函数最大化动态调整参数的方法,常用于最优控制^[36],如控制白光超连续谱生成的时空动态过程^[37]等。

机器学习与光学技术的结合可以丰富光学系统的功能并提高系统鲁棒性,如神经网络^[38]、遗传算法^[39]、粒子群算法^[40]、支持向量机^[41]、核方法^[42]和极限学习机^[43]等方法在光学系统中都有着广泛的应用,尤其是以神经网络和遗传算法为代表的优化手段在多维激光系统中发挥着重要作用。神经网络在McCulloch和Pitts^[38]利用神经元模型模拟人类大脑行为的研究中首次被提出,经过不断的发展和完善^[44-46],已成为一种可胜任多种机器学习任务的强大工具。利用神经网络进行预测的基本思路如图2所示,经训练集优化后的网络结构可以对新数据作出较好预测。遗传算法属于搜索算法的一种,其本质是在解空间中寻找问题解^[47]。该算法通过模仿生物进化的自然选择过程来求解非线性优化问题^[39],已被应用于光纤激光器的自锁模技术^[48]中,促进了机器学习技术在多维激光调控方面的应用研究。

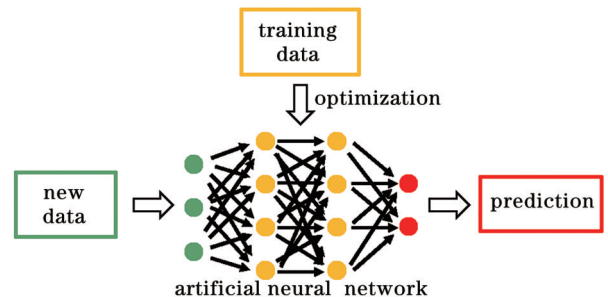


图2 神经网络预测示意图

Fig. 2 Schematic of prediction based on artificial neural network

3 多维激光谐振腔内调控

通过对激光器谐振腔内光脉冲的偏振、相位和幅度等多维度物理参数进行调控,可以实现激光器智能化的自锁模操作。不同应用场景和使用需求往往要求对谐振腔内激光的特定状态进行精确调控。

3.1 超快光纤激光器的自锁模

基于非线性偏振演化的被动锁模技术是产生超短脉冲的主要方式,只用调节激光器腔内的偏振控制器即可实现锁模,其具有结构简单、制造成本低以及性能优异等特点而受到广泛关注。然而,通过手动调节偏振控制器来获得锁模的方法通常耗时极长,并且环境扰动、偏振退却、长工作时间下的等效可饱和吸收体参数易变化等因素都会导致锁模状态发生改变甚至失锁。基于非线性偏振演化的激光器的长期稳定性和自启动能力较差,极大地限制了其应用范围和应用场景,亟须研制能抵抗外界环境干扰的智能自动锁模激光器。

得益于自动化控制技术的日益成熟和电控偏振控制器件的开发,非线性偏振演化锁模光纤激光器不断发展,其能够快速遍历所有可能的锁模状态及对应的电控偏振控制器件的偏振状态^[49-50]。该类激光器在启动过程中利用脉冲计数法确定锁模状态,然后调取电控偏振控制器件的偏振状态数据库复现锁模。然而,这种方法需要大量数据积累以形成完整的数据库,且数据库随着激光器物理状态的变化而变化,这在一定程度上限制了实际应用。

随着各种智能算法的提出以及控制技术的逐渐成熟,2015年 Andral 等^[51]利用电控偏振控制器件,结合基因演化算法,实现了基于非线性偏振演化的锁模。该实验装置利用系统反馈并自动判断激光谐振腔内的激光偏振状态,进而通过控制电压智能地调节电控偏振控制器件以实现锁模。但其算法结构复杂,需要花费 30 min 左右的时间才能实现锁模。

此外,被动锁模激光器的不稳定性会对系统的光学元件造成损伤,特别是调 Q 包络下的锁模脉冲往往

具有很高的脉冲能量。因此,智能锁模激光器不但需要实现自动锁模操作,还需要快速识别锁模脉冲状态,及时消除锁模脉冲的不稳定性。针对这些问题,2019年义理林团队将激光器锁模状态的人为调控方式融入机器学习中,将人的逻辑和判断与智能调节的速度和准确度相结合,研制了基于拟人算法的智能锁模激光器^[52]。该激光器通过分析和归类多种锁模状态的时域物理特征,利用模数转换器采集激光器输出的波形以模拟人为调节锁模的识别过程;利用现场可编程门阵列对采集到的波形进行分析和鉴别以运行拟人算法;最后通过数模转换器利用输出的直流信号调节电控偏振控制器以改变偏振态。实验结果表明,基于拟人算法的智能激光器完成自启动锁模仅需 220 ms,失锁恢复则仅需 14.8 ms。这些研究证明了拟人算法可以明显提高锁模激光器的稳定性和抗干扰能力。除了自启动锁模控制外,拟人算法还可以通过提取不同输出状态的特征来建立不同的鉴别标准,实现谐波锁模、调 Q 锁模等多种状态的自动切换。

拟人算法在调节过程中是按照固定的步长来修改控制器的输入电压,在调整偏振状态时有值得注意的地方:当随机初始化的状态远离目标状态时,自动锁模时间增加,需要进一步优化深度学习算法。2021年,江天团队实现了一种基于深度确定性策略梯度的低延迟深度强化学习算法^[53]。如图 3 所示,该算法包括两个“执行”神经网络和两个“判断”神经网络。深度强化学习算法和低延迟算法与基于可饱和吸收体的超快光纤激光器相结合,构成了自动锁模控制系统。实验结果表明,该算法可以实现最快 0.472 s 的锁模恢复时间且平均恢复时间为 1.948 s,可以实现大尺度的偏振态调整,满足激光器基本锁模状态的日常维护和监测要求。

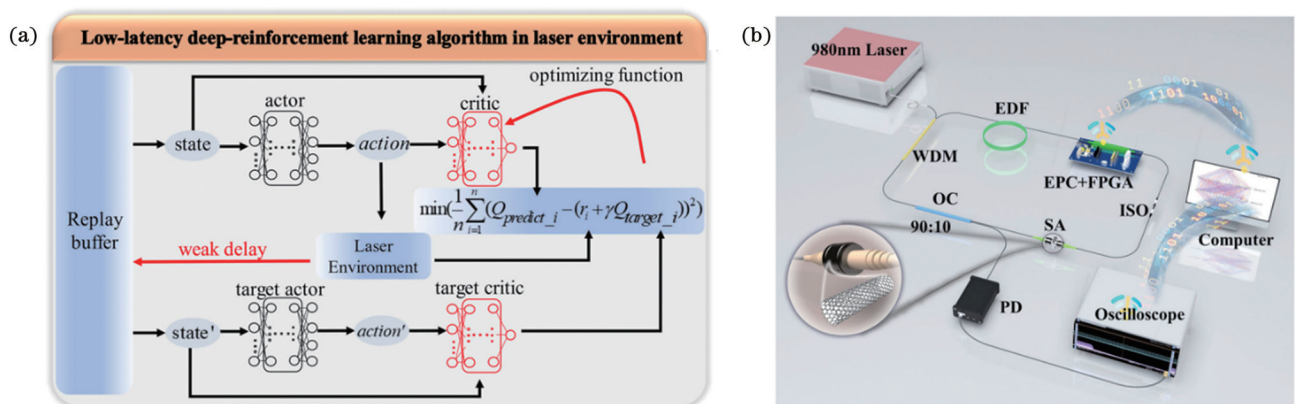


图 3 基于深度确定性策略梯度的低延迟深度强化学习算法的智能激光器^[53]。(a)算法架构;(b)实验装置

Fig. 3 Intelligent laser with low delay depth reinforcement learning algorithm based on depth deterministic strategy gradient^[53].

(a) Algorithm; (b) experimental setup

在大多数情况下,激光器的输出状态受色散、偏振、非线性及耗散效应等诸多因素的影响,因此激光系统的操纵以及自锁模会变得更为复杂。为了实现自锁模,需要同时考虑多个自由度并对多个决定参数同时

进行控制和优化。2016年,Woodward等^[48]在“8”字形光纤激光器中使用基于复合适应度函数的遗传算法,智能搜索光纤激光器中单脉冲稳定锁模的最佳参数,实现了全光纤超短脉冲源的自启动运转。如图 4 所示,

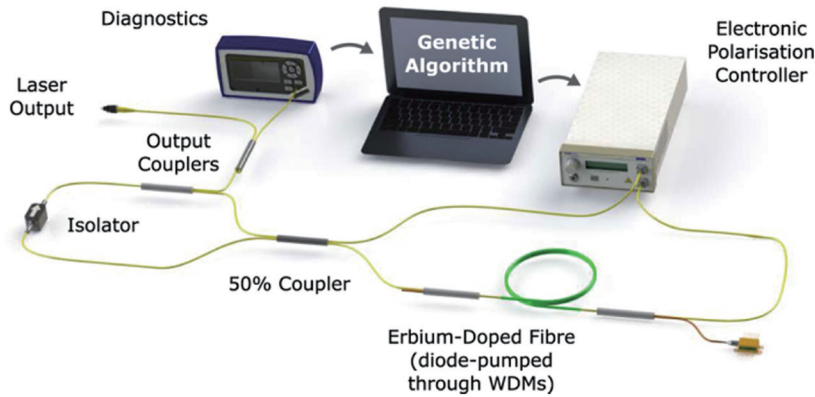


图 4 自动优化锁模激光器示意图^[48]

Fig. 4 Configuration of self-optimizing mode-locked laser^[48]

该实验证明了利用一个复合适应度函数监测激光器的时间和光谱输出特性可以获得稳定的超短脉冲,同时存在外部干扰的情况下,此自寻优方案能实现准确定位并保持全局最优。

3.2 激光参数精确调控

一些特殊的应用场景需要具有特定功率、脉冲间隔以及光谱特性的激光。由于超窄脉冲激光的产生受增益、损耗、非线性及色散的影响,因此需要平衡多个参数以达到稳定的运行状态。基于试错法的调节方式可通过反复平衡多个参数来获取目标结果,但其时间和经济成本还有优化空间。近年来,基于机器学习的优化设计方法因对复杂的多参数光学系统具有极高的适应度而备受关注。

基于偏振滤波技术的光纤激光器可以实现光谱调谐且支持多种锁模运转状态。2017年,Woodward等^[54]基于偏振滤波技术,利用遗传算法和电子控制腔传递函数,实现了波长和重复频率的大范围调谐,并探讨了光纤激光器同步光谱和时间自校正的实用性和局限性,如图 5 所示。通过控制自动偏振和泵浦功率并结合适应度函数,他们获得了大于 55 nm 的波长调谐

范围,证明了人工智能在基于线性和非线性偏振效应的激光系统控制方面具有巨大的应用潜力。

此外,利用波前整形技术不仅可以调控多模光纤输出光场的偏振和相位分布,还可以控制光的非线性效应。2018年,Tzang等^[55]提出了一种用于控制多模光纤中非线性现象的自适应波前整形方法:通过使用空间光调制器(SLM),结合实时光谱反馈技术和遗传算法优化,他们对耦合到光纤中的模式进行了叠加的灵活调控,以控制高度非线性的多模受激拉曼散射级联及其与四波混频的相互作用。该系统对斯托克斯峰和反斯托克斯峰进行移动、抑制和增强等多方面的光谱处理,展现了波前整形技术在控制和优化非线性光波传播方面的强大功能。

呼吸子作为超快光纤激光器中的一个重要的动态工作模式,与一系列重要的非线性动力学现象相关。2019年,曾和平团队基于进化算法的优化程序,设计了呼吸子状态特殊特征量相关的目标函数,实现了对呼吸子振荡周期和呼吸比等重要参数的智能控制^[56]。通过对呼吸子参数进行多维度、高精度的控制,他们展示了光纤激光器中呼吸子模式的自我优化,如图 6 所示。

为了研究和控制激光腔内动力学过程,需要通过单次光谱测量并利用智能遗传算法对超快锁模光纤激光器中的飞秒脉冲进行实时优化。2020年,义理林团队利用时间拉伸色散傅里叶变换(TS-DFT)技术,将快速光谱分析技术与智能偏振态搜索算法相结合,实现了对锁模飞秒脉冲的光谱宽度和形状的实时操纵,同时揭示了锁模激光器中复杂且可重复的飞秒脉冲频谱展宽的动力学过程^[57],如图 7 所示。同年,Girardot等^[58]利用演化算法在非线性和偏振演化正常色散光纤激光谐振腔中实现了锁模,通过调控腔内偏振相关的液晶延迟器,利用 TS-DFT 技术,实现了激光器锁模状态的有效优化,使光谱宽度调谐更为高效。

基于腔内调制技术的空间光系统可更好地利用空域维度,在空间光通信、结构光等领域中发挥重要作用。

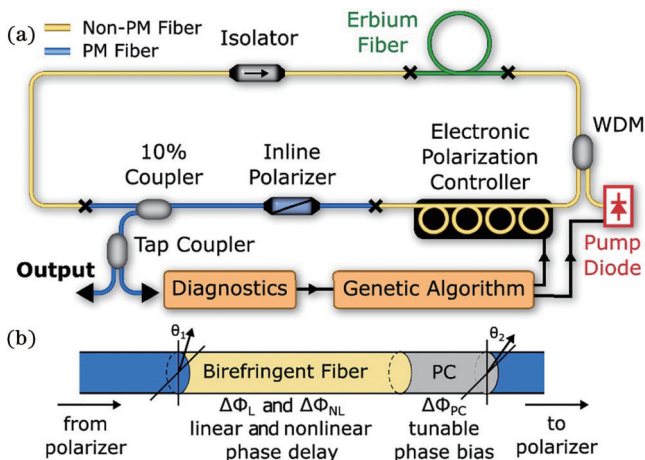


图 5 自动调谐激光器^[54]。(a)实验装置;(b)光纤双折射引起相位延迟示意图

Fig. 5 Self-tuning laser^[54]. (a) Experimental setup; (b) schematic of phase delay due to fiber birefringence

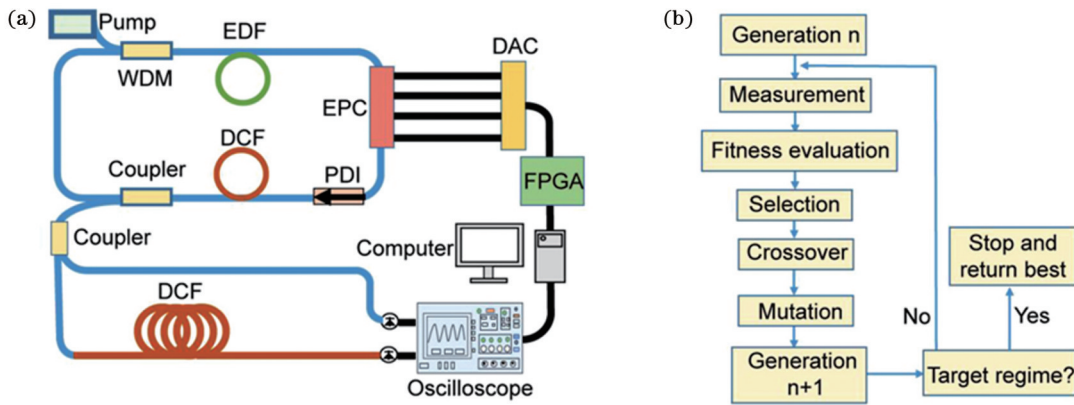


图 6 自动优化呼吸锁模光纤激光器^[56]。(a)实验装置;(b)进化算法流程图

Fig. 6 Self-optimization of breathing soliton in mode-locked fiber lasers^[56]. (a) Experimental setup; (b) flow chart of evolutionary algorithm

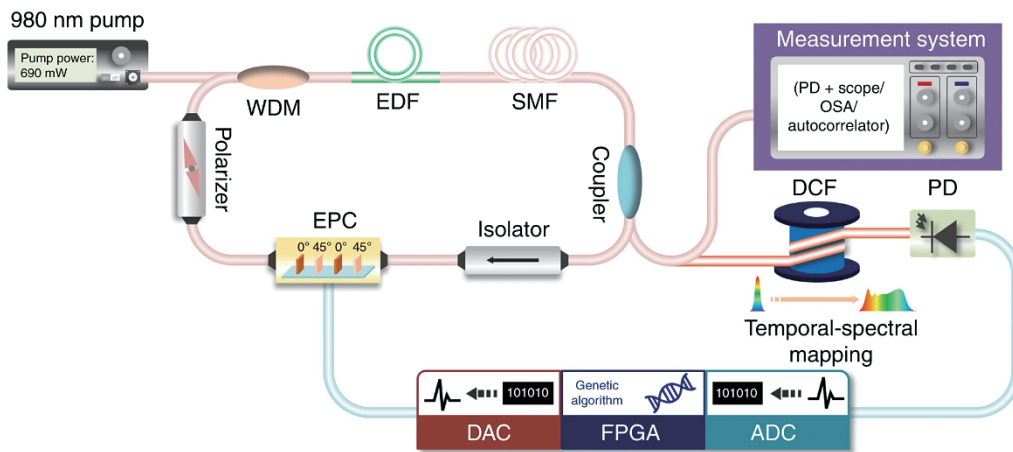


图 7 基于嵌入式时间拉伸辅助实时脉冲控制器的智能锁模光纤激光器^[58]

Fig. 7 Intelligent mode-locked fiber laser with embedded time-stretch assisted real-time pulse controller^[58]

用。简并腔激光器能够产生具有低时间相干性和低空间相干性的激光,有利于输出光束近场和远场特性的操纵^[59]。简并腔激光器的基本结构包括增益介质、成像系统和两个端镜^[60]。2019年 Tradonsky 等^[61]提出了一种基于数字简并腔激光器的快速相位检索光学系统,可根据激光器的最可能模式快速有效地重建物体。该实验装置将计算出的物体散射强度分布加载到 SLM 上,通过腔内非线性过程产生满足约束条件的自洽解,可在 100 ns 的时间内收敛到稳定解,比传统相位计算系统快了几个数量级。实验结果表明,多种激光模式之间的增益竞争就像一个高度并行的计算机,可以快速解决相位检索问题。

结构光源对光的调整能力通常指的是对振幅、相位和偏振的空间控制能力以及在空间和时间上定制光场的能力。尽管目前已经有多种方法可在光源外部创建结构光,但腔内调制方法与外部调制方法相比可更好地发挥谐振腔的滤波效应,提高了所需的模式纯度和功率占比^[62]。2015年, Burger 等^[63]通过引入腔内 SLM 实现了光束整形,产生了特定结构的光场。实验证明激光谐振腔可作为一种有效的滤波器,放大具有

最低损耗的模式并抑制其他模式。

超宽带、超连续、全相干的白光超连续谱的产生需要经历复杂的三阶非线性过程,在超快光学和激光光谱学领域中具有重大意义。由于时空动力学的复杂性,对时空非线性过程进行精确模拟有助于产生宽而稳定的白光超连续谱。2021年, Valensise 等^[37]利用强化学习来控制白光超连续谱产生的时空动态过程,通过调整半波片的取向角、虹膜的孔径和晶体相对于激光焦点的位置,分别优化泵浦脉冲的能量、聚焦光束的数值孔径以及非线性板相对于光束束腰的位置这三个参数,得到了宽而稳定的白光超连续谱。在实验过程中,系统会以随机的状态启动,利用神经网络控制白光超连续谱产生的时空动态过程,在经历四轮调整后,便将系统调节到稳定状态,激发后的白光超连续谱宽度大于 400 nm,且 40 min 内光谱间的相关性达到了 99.9%,证明了深度强化学习可以处理和优化复杂的非线性过程。

3.3 时空锁模的多模光纤激光器

时空锁模的多模光纤激光器作为一种多维度的光学耗散系统,可在时空色散、非线性、增益和损耗相互作

用下实现纵模和横模的同时锁定,产生具有复杂空间结构的飞秒脉冲激光^[64]。时空锁模技术为产生具有极高脉冲能量的飞秒激光提供了新的思路,推进了多维非线性动力学、时空相干光场产生等研究^[65]。然而,多模锁模光纤激光器的时空光场结构复杂,各维度信息的耦合程度较高,且时空非线性耦合显著增加了非线性传输的复杂性,其特性的精确调控面临诸多技术挑战。

多模光纤中的时空锁模现象最早由 Wright 等^[64]于 2017 年在 1 μm 波段中实现,研究者利用空间滤波和光谱滤波平衡模式和色散,实现了对多个横模和纵模的锁定。为了进一步探索多模光纤中的时空锁模机制和现象,2020 年 Wright 等^[66]提出了基于吸引子剖析的理论框架,即将谐振腔内器件对脉冲的作用转换成算符,以研究谐振腔内各个部件的配置对锁模脉冲形成的贡献。为了探索横模模式中对锁模过程影响最大的区域,他们基于吸引子剖析理论搭建了由可调空间滤波器、光谱滤波器和时空可饱和吸收体组成的多模激光器,利用多模增益光纤中的非线性偏振演化实现了时空锁模。通过改变该系统的空间滤波器参数,可以观察到时空锁模稳态脉冲的各种状态变化。

时空锁模现象的实现为多模光纤激光器的非线性效应研究提供了新思路^[67]。为了建立光学孤子分子的理论模型并厘清其产生与稳定机理,2018 年肖晓晟团

队搭建了基于非线性偏振旋转技术的 1 μm 波段时空锁模多模光纤激光器,通过调整腔内的波片或改变泵浦功率,实现了单脉冲稳定产生以及孤子分子的观测,并且在相同束缚状态下比较了输出光束不同空间部分的自相关轨迹和相应的光谱,为实现孤子分子的多维度精密特性调控奠定了基础^[68]。光束波前调控技术已被广泛应用于生物光子学、非线性光学和激光物理等领域的光子操纵中。通过在光束的传播路径中加入 SLM,对光束的波阵面进行整形,实现对强度、相位、偏振态等物理量的调控。2020 年,Wei 等^[69]将光束波前调控技术与遗传算法相结合,研制了可实现智能调控的多维激光器。如图 8 所示,他们利用多模光纤激光谐振腔的时空复杂性,通过在基于非线性偏振演化的多模锁模光纤激光器的谐振腔中加入 SLM,并引入一组重要的激励参数和特定遗传算法的目标函数,实现了对多维度光纤激光器的输出功率、模式分布、光谱以及时空锁模等性能的智能控制,证明了时空锁模激光器中时间和空间场变量之间的强耦合状态。基于遗传算法的波前整形技术具有较高的灵敏性,在使用遗传算法进行约 30 次迭代后,可将准连续波状态下的激光输出光功率提高约 5%,在进行约 300 次迭代后,输出光功率将提高约 1 倍,且光谱由双波段变为单波段,时域信号噪声降低,模式分布也更为集中。

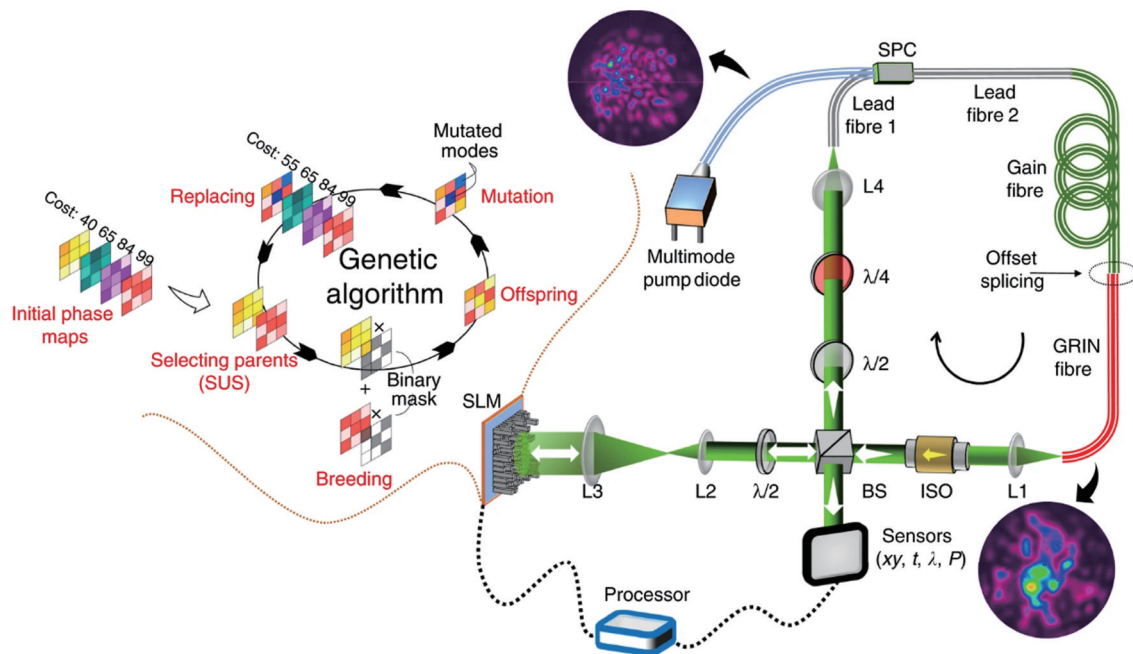


图 8 基于波前整形技术的多维光纤激光器^[69]

Fig. 8 Multi-dimensional fiber laser based on wavefront shaping^[69]

关于时空锁模光纤激光器的相关研究主要集中在 1 μm 波段,其他波段如 1.5 μm 的研究较少。1.5 μm 波段激光器位于低损耗通信波段内,研究 1.5 μm 波段的新颖时空锁模光纤激光器对现代光通信具有重要意义。2021 年,罗爱平团队通过在激光腔中引入多模干涉滤波效应,实现了中心波长可调谐的 1.5 μm 波段的

时空锁模^[70]。该激光器采用基于半导体可饱和吸收镜的全光纤线性腔结构,锁模阈值低至 104 mW,中心波长可从 1557 nm 连续调谐到 1567 nm。具备这种可调谐特性的激光器可以满足光通信、光学传感、光学测量、微波光子学等领域对柔性波长的要求,为研究不同波段的时空锁模和探索时空锁模脉冲的非线性特性提

供了较为灵活的测试平台。

4 多维激光外部调控

在光学调控领域,多维激光腔内调控受限于谐振器内部结构的复杂性和不同参数之间的相互耦合,这使得通过直接设计激光谐振腔来输出特定光场结构存在困难。智能调控光学元件的逐渐成熟和机器学习技术的快速发展为利用外部调控技术实现多维激光精确控制提供了便利。

4.1 激光束参数调控

多维激光系统具有可调控参数多、非线性效应丰富等特点,按需输出特殊光场一直是个难题。常用的解决思路是通过多维激光外部调控,对激光器输出光束进行控制。往往利用腔外转换器件实现对激光特性的调控,如将高斯光束转换为轨道角动量(OAM)光束。OAM光束具有模式正交、可编码信道多等优点,在通信领域中具有广阔的应用前景。然而,激光器通常直接输出的OAM光束(如拉盖尔-高斯光束和贝塞尔-高斯光束等)直径会随OAM模式值的增大而增大,不利于长距离传输^[71]。为了解决这个问题,2013年Ostrovsky等^[72]利用计算机控制的液晶SLM调控腔外激光光场的相位模式,生成了完美涡旋光束,并且光束直径不会随OAM模式的变化而变化。针对OAM光束高阶模式的产生,Beijersbergen等^[73]使用由两个

圆柱形透镜构成的转换系统,通过适当地调节光场相位,实现了高阶的厄米-高斯模式向拉盖尔-高斯模式的转换。OAM本身作为一种全新的自由度也可参与到光场调控中,实验中可将自旋角动量(SAM)和OAM结合,实现SAM-OAM耦合^[74]。

在光与物质相互作用的过程中,激光的偏振态、相位、幅度等会对微观粒子的状态产生影响。为实现实时、动态、三维独立操纵,需要精准、有效地对光场的多个维度信息进行操纵。但在光学系统中,传播波前的畸变会降低光场的空间相干性,使得光斑尺寸偏离理论衍射极限,这种像差严重损害了成像精度、纳米加工质量和粒子操控能力。2010年,Čizmar等^[75]提出了一种基于正交模态分解的像差校正方法,可应用于对波前畸变非常敏感的粒子操控领域。该实验通过分析光学像差来源(样品本身的折射率和空间光扩散的变化是光学像差的主要来源,且光学像差随着激光逐渐深入样品而增大,直到光消散成随机散斑形式),实现了高度混浊扩散介质中的粒子捕获,为生物物理中的光学微操纵开辟了新的前景。2015年,赵建林团队分析了在对称性、面积、相位延迟等不同参量共同作用下扇形光场掩模的调制规律,为光场的偏振、角动量、聚焦场分布的多维调控提供了指导^[76]。2018年,袁小聪团队通过操纵圆柱矢量光束的顺序、极化和强度,实现了纳米颗粒的捕获^[77]。图9给出了不同偏振阶数(n_0)下

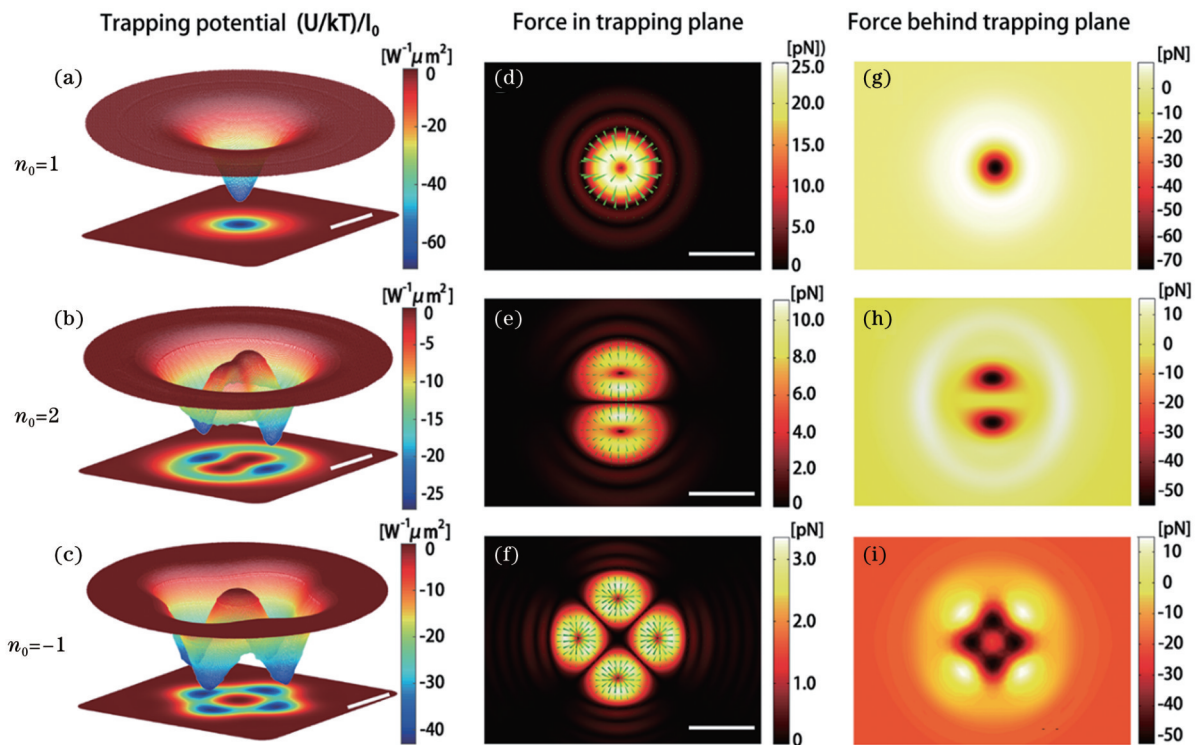


图9 金纳米颗粒在非线性的状态下的俘获势和俘获力分布^[77]。(a)~(c)在俘获平面上的俘获势分布;(d)~(f)俘获平面上梯度力的空间变化;(g)~(i)俘获平面后200 nm处的力分布

Fig. 9 Trapping potential and force distributions in nonlinear regime for gold nanoparticle^[77]. (a)~(c) Trapping potential distributions on trapping plane; (d)~(f) spatial variation of gradient force on trapping plane; (g)~(i) distributions of force at 200 nm behind trapping plane

柱矢量光场分布中金纳米颗粒在非线性状态下的俘获势和俘获力分布,展示了光场的多维智能调控在微粒操纵中的优势。同年,Comin 等^[20]利用神经网络控制激光脉冲整形,实现了对近场等离子体纳米天线的操纵。该实验将神经网络与遗传算法相结合,利用神经网络加速遗传算法的迭代以优化入射场的频谱相位整形,最终实现了利用神经网络预测入射激光脉冲不同光谱的相位分布。结果表明,神经网络是一种能在纳米尺度上控制近场的强大工具。

光脉冲在光纤中传输时会受到初始脉冲强度、相位、非线性等因素的影响而发生演化,该特性在多模光纤中尤为明显,因此可以基于这个特性对光场的脉冲进行整形。2018 年, Liu 等^[78]利用光脉冲整形技术实

现了多模光纤中的时空聚焦。如图 10 所示,他们使用脉冲整形器对多模光纤传输激光脉冲频域进行相位补偿,使锁相放大器读取的二次谐波强度与脉冲整形器施加的相位值呈正弦关系,在多模光纤中实现了被模态色散扭曲的宽带超短脉冲的时空聚焦。近年来,机器学习的快速发展为脉冲整形技术提供了一种新的处理手段。2020 年, Boscolo 等^[79]基于神经网络的监督机器学习模型解决了光纤中非线性传播时发生的光脉冲整形问题。他们利用神经网络分别预测了在正常和反常色散光纤中非线性传播时脉冲的时间和频谱强度分布,评估了该神经网络依据输出脉冲确定非线性传播参数的能力,并根据初始脉冲形状对输出脉冲进行了分类。

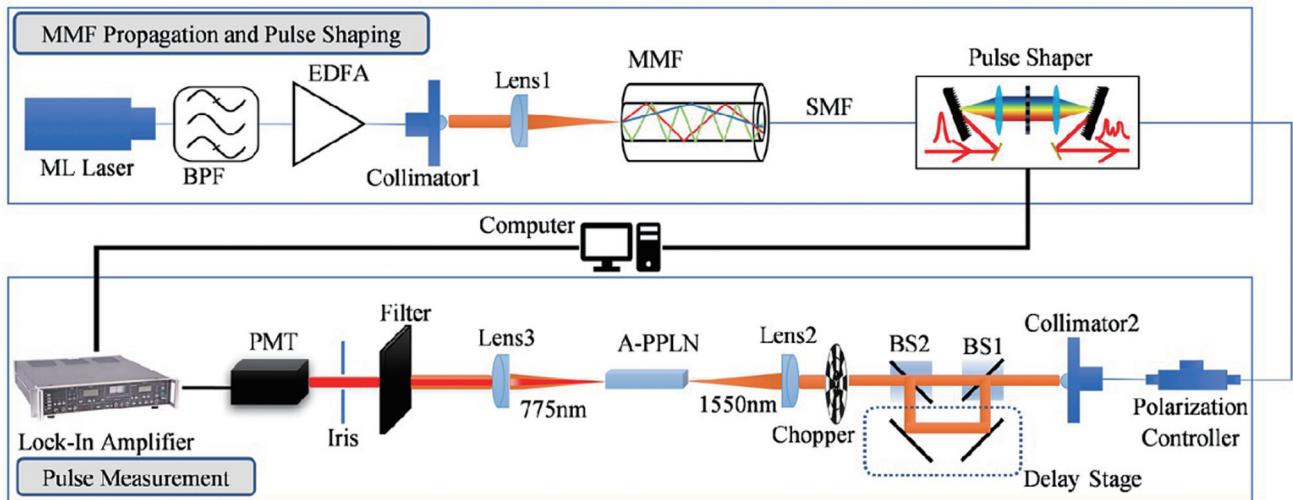


图 10 光场表征和脉冲补偿的实验装置^[78]

Fig. 10 Experimental setups for optical field characterization and pulse compensation^[78]

4.2 动力学研究

作为研究光纤动力学的优质平台,多模系统由于具有参数多、复杂度高、非线性效应强等特点,能够产生丰富的非线性动力学现象。尤其是在多模耗散孤子系统中,系统的复杂性使得脉冲在往返过程中可以生成各种时空剖面。这个过程常涉及多个光学效应之间的复合平衡,因此相关研究存在极大困难^[80]。

2020 年, Jing 等^[80]利用自由空间角啁啾增强延迟 (FACED),实现了多维激光光场调控,并用该方法研究了非重复耗散孤子动力学的时空光谱成像,如图 11 所示。多模光纤中光传输的特性与其波长紧密相关,这使得单个脉冲在不同的光谱波段可以表现出不同的空间分布。多模耗散孤子系统中发生的光学事件被实验装置分为两个分支:用于往返脉冲观测的事件直接被发射到压缩超快摄影 (CUP) 单元,而光谱分辨单脉冲则被 FACED 器件赋予了波长相关的时间延迟,从而可实现单个光学事件光谱的分割。

开展非线性光学不稳定性的实时研究一直是个难点,近年来机器学习技术的快速发展为相关研究开辟了新道路,2018 年 Närhi 等^[33]运用神经网络分析光

谱和时域的数据。他们先利用模拟数据训练神经网络以关联调制不稳定性的光谱和时间特性,然后将训练后的神经网络用于分析高动态范围的实验光谱以获得不稳定性场中最高时间峰值的概率分布。此外,他们以时间动态结构为标准,使用无监督学习将噪声调制不稳定性谱分为不同的子集,最终利用光谱强度的测量信息,结合训练完成的神经网络,研究了光纤内调制不稳定性的时域特性。该工作为难以直接进行时域观测的显示不稳定系统的研究打开了新的视角。

多模光纤中的非线性效应在很大程度上取决于激励条件,2020 年 Teğin 等^[81]使用深度神经网络实现了对多模光纤时空非线性的调控,证明了时空非线性脉冲传播可以被机器学习工具学习和控制。如图 12 所示,他们先用相位型 SLM 调制峰值功率可调的激光脉冲,再利用成像系统将反射光耦合进多模光纤,最后在输出端监测光谱。他们利用实验数据对神经网络进行训练,学习泵浦脉冲的输入空间光束轮廓与多模光纤输出光谱之间的关系。该系统根据所需要的目标频谱,利用神经网络,直接得到应用于光纤输

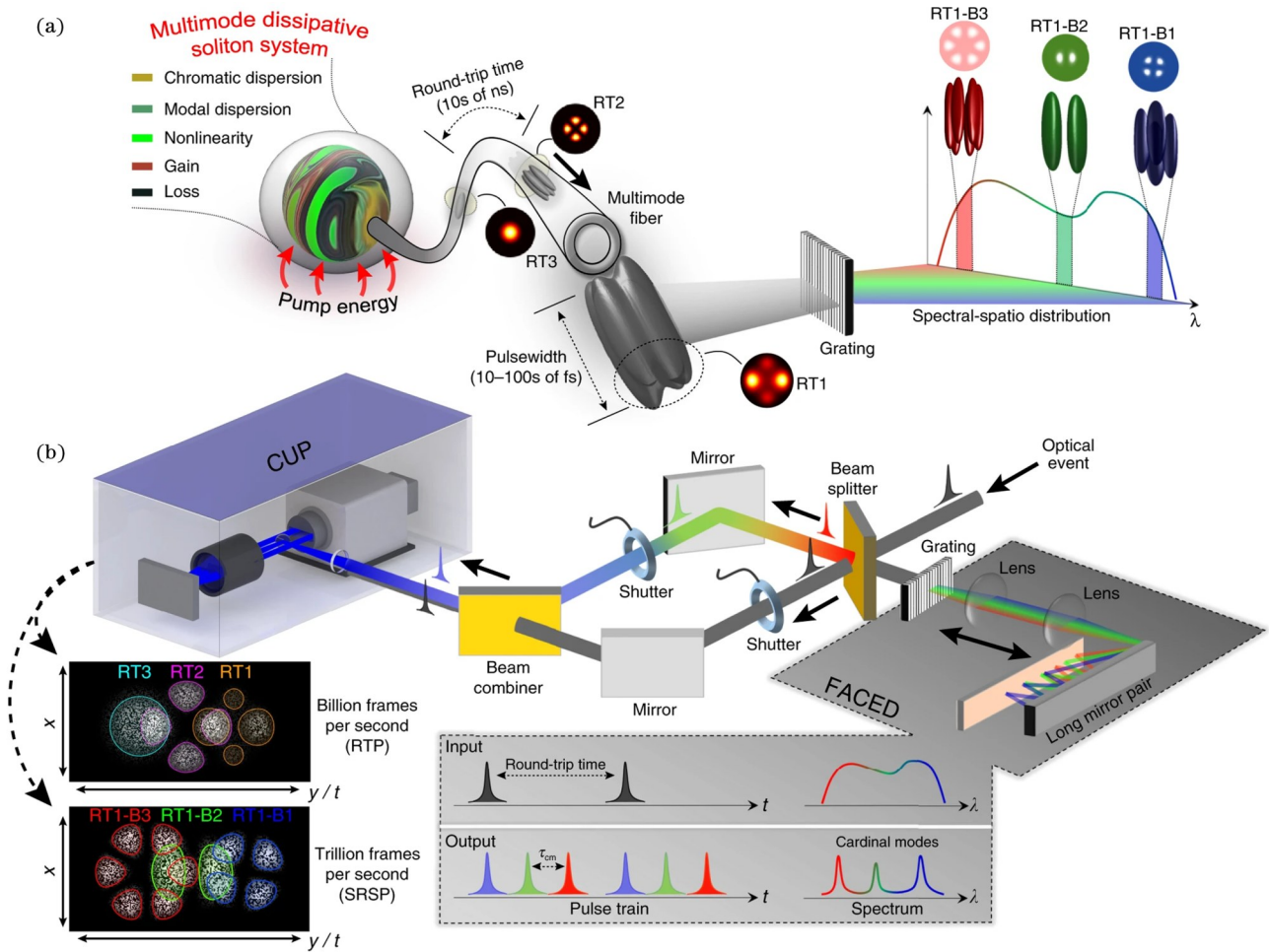


图 11 多维系统耗散孤子的实验装置^[80]。(a)时空频激光动力学；(b)压缩超快多维成像技术(STS-CUP)示意图

Fig. 11 Experimental setup of dissipative solitons in multidimensional systems^[80]. (a) Spatio-temporal-spectral laser dynamics; (b) schematic diagram of spatio-temporal-spectral compressed ultrafast photography (STS-CUP)

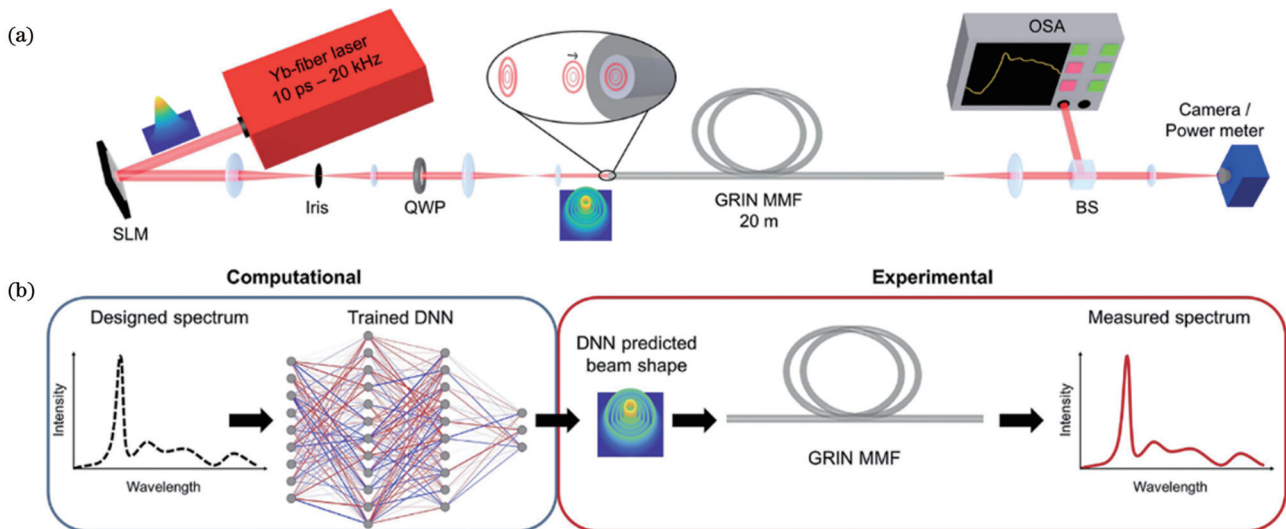


图 12 多模光纤中时空非线性频率转换控制^[81]。(a)实验装置图；(b)实验训练控制原理

Fig. 12 Control of spatiotemporal nonlinear frequency conversion in multimode fibers^[81]. (a) Experimental setup; (b) experimental training control principle

入端的空间波束轮廓。神经网络具有非线性、自适应性、并行处理机制等特点,已成为光纤动力学研究的重要科学工具。

4.3 多维信息重构

传统的光场信息传输研究主要是在平面光波的偏振、相位和幅度等维度上开展的。多维激光光场拥

有更多自由度,具有搭载更多通道的潜力。但是,光场在多维传输过程中存在的信号损耗和失真等问题严重制约了光场多维信息传递的应用。基于智能调控的多维激光系统为光通信领域的应用研究提供了新思路。

在光通信系统中,OAM光场具有丰富的空间维度资源,可实现超高的传输容量和频谱效率。2018年,高春清团队分别对OAM的模式和幅度两个维度进行调控,在有限的模式数下扩充了OAM光场通信的信道容量^[82]。同年,李岩团队基于傅里叶变换定理调控了完美涡旋光束阵列中的电荷数量、位置和拓扑荷数(TC),提出并验证了一种可实现大容量数据传输的编码/解码方法^[83]。2018年,郝士琦团队利用神经网络实现了具有不同光强分布特征的多维度信息提取^[84]。他们提出了一种基于卷积神经网络(CNN)的OAM模式检测方法,提高了多角度OAM光束的检测精度。

光在入射样品时,随机散射极大地扭曲了入射波前,使得入射光的空间相干性消失,形成了随机散斑图案。2007年,Vellekoop等^[85]基于非迭代算法实现了漫反射光的精确控制。他们构造了反转光扩散的波阵面,使得光可以通过不透明的物体形成一个或多个焦点,并基于统计光学的模型解释了其中焦点的亮度,为

散射光的重构研究提供了新思路。2014年,Katz等^[86]进一步分析了散斑相关性的“记忆效应”,利用视觉上不透明的层对物体进行了非侵入性成像。实验中使用高分辨率相机记录了散射光经散射介质扩散后的模式,通过计算物体强度模式和随机散斑模式实现了图像还原。

多模光纤是目前通信和非线性光学领域的研究热点之一。然而,在大多数情况下,携带有图像信息的激光在多模光纤中传输时会相互耦合,出现多个光纤模式。由于这些模式沿着光纤以不同的传播常数传播,因此多模光纤输出了不容易解调的散斑图。为了解决这一问题并使多模光纤实用化,可以将机器学习与多模光纤信号传输结合^[87]。2018年,Borhani等^[88]使用深度神经网络,根据多模光纤输出的散斑模式强度,对输入图像进行分类,识别和重建了多模光纤中输出的扭曲图像。2022年,秦玉文团队基于端到端神经网络,成功实现了多模光纤光学散斑图像的传输^[89],实验装置如图13(a)所示。首先利用SLM将待传输的灰度图像调制编码在激光光束的波前上,然后利用该光束的输入相位调制图像,并以多模光纤的输出散斑图作为训练数据优化神经网络。图13(b)所示结果表明,利用神经网络重建光斑图像后,能获得具有较高保真度的灰度图像。

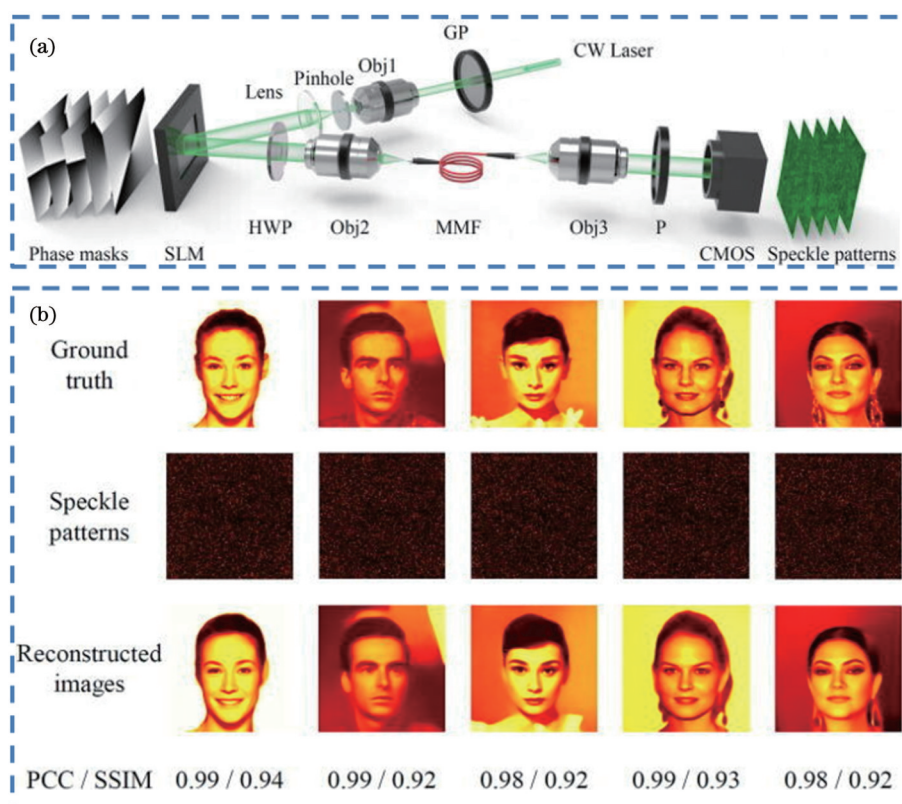


图 13 通过多模光纤获得由输入相位调制图像和输出散斑图像组成的训练数据^[89]。(a)实验装置;(b)利用神经网络对人脸相位编码图像的光学散斑图像进行真实度重建

Fig. 13 Obtaining training data consisting of input phase modulation images and output speckle images through multi-mode fiber^[89]. (a) Experimental setup; (b) optical speckle image of face phase coded image reconstructed by neural network

光学相位是生物医学成像中的重要信息载体维度,由于记忆效应限制,现有方法在不同深度的相位提取上存在困难。针对这一难题,2022年张德龙团队通过类比生成对抗神经网络,设计了由一个“生成器”和一个“鉴别器”组成的散斑三维重建网络,无需任何参考或扫描过程即可识别随机介质中的重叠相位图像,实现了从单个二维散斑图案中检索不同深度的三维相位信息^[90]。

5 重要应用

5.1 光学微操纵

自光镊技术发明以来^[91],光学操纵便引起了学术界广泛的关注。目前,该技术已被应用于物理、化学和生物等学科中。光镊可用于操纵尺寸为几十微米到几纳米的物体,包括细胞、病毒乃至单个分子。光镊产生的力超过了生物相互作用中力的振幅,这一特点使其成为生物力学和分子力学中的强大工具包^[92]。同时,光学操纵的非侵入性有利于实现细胞或纳米颗粒的体内操纵,因此可用于活体生物相互作用的研究^[93]。此外,由于激光的多维度以及维度可调控性越来越高,光学微操纵可以实现尺寸更小粒子的捕获和分析,为基础科学研究提供了复杂的光学操作,包括短程力探测^[94]、宏观量子态实现^[95]和非平衡稳态系统构建^[96]等。

早期的光镊技术通常利用光场强度梯度力实现对微粒的三维束缚,通过改变光势阱位置实现微粒移动操作,因此操纵能力有限。随着多维度激光光场的引入,光学微操纵技术得到了进一步发展。2008年, Roichman 等^[97]从理论和实验上证明了光束中的相位梯度会产生垂直于光轴的力,这种作用力可用于新型光势阱。将激光光场中的相位梯度与强度梯度结合不仅有助于操纵微观物体,还有利于粒子相互作用的快速测量。2011年, Shanblatt 等^[98]提出了一种投影全息光镊技术,其光场在沿三维任意曲线延伸方向上具有独立指定的相位和幅度分布,可用于捕获和移动微观物体。除了幅度和相位自由度外,光的偏振在光学操纵中也起着重要作用。2014年, Shvedov 等^[99]通过调控光束的径向、旋向偏振状态,在宏观尺度(几十厘米)上实现了空心玻璃球的稳定转移,并且可以随意停止球体或反转其运动方向。2015年,崔一平团队通过在公共路径干涉仪中引入衰减器,实现了由线性偏振矢量场、椭圆偏振矢量场和圆偏振涡旋光束耦合而成的调控场^[4]。利用椭圆偏振矢量场提供的附加自由度可以控制偏振空间结构,并操纵电介质瑞利粒子上的光学力和扭矩,实现电介质瑞利粒子的稳定捕获。

多维矢量光场同时受到偏振、相位和幅度的影响,因此灵活调控这三个参量有利于提高光学微操纵能力。2015年,赵建林团队通过对角向偏振光场进行幅

度调制和相位调制,重构了焦场的能流分布,并控制了焦场偏振奇点的转化,实现了沿不同路径操纵具有吸收性的粒子^[76]。2018年,袁小聪团队将具有复杂偏振态的广义柱面矢量光束与非线性捕获结合,通过操纵圆柱形矢量束的顺序、偏振和强度,实现了纳米颗粒的确定性捕获和操纵^[77]。2023年,李新忠团队基于改进的摆线参数方程与全息塑形技术得到了摆线结构光束(COVB),添加分段附加相位梯度并调整摆线结构参数,使微粒在任意轨迹下可灵活启停和变速运动,并将其应用于聚苯乙烯微粒的操纵^[100]。在拓扑荷数($m=40$)相同但摆线摆动幅度的曲率调控参数(n)不同的条件下,COVB的力场分析和微粒沿摆线结构轨迹运动时的延时图像如图14所示。随着 n 的增大,梯度力逐渐指向尖点,同时OAM逐渐减小,导致微粒运动变得困难甚至停止(当曲率增加到 $n=0.6$ 时)。此外,在相关应用需求的驱动下,一些特殊光场(如柱面矢量场^[101]、混合偏振矢量场^[102]和全庞加莱球光束^[103]等)被广泛用于捕获微米级介电颗粒、金属颗粒和金纳米颗粒等。

通过智能控制不同维度的光场分布,可实现对三维空间微粒更多样化的光学微操纵。在全息光场整形调控技术中,利用相位型SLM加载计算全息图(CGH)可将入射光场转换为期望的光场强度分布。常用的CGH算法包括直接搜索法^[104]、Gerchberg-Saxton(GS)算法^[105]和遗传算法^[106]等。其中,伪随机编码的GS算法具有计算量少、耗时短和实时操作等优点,只需要较少的迭代次数就可得到具有较高衍射效率的图像。2011年,李银妹团队利用伪随机编码的GS算法,结合激光相位信息和幅度信息,通过光幅度调制有效地减少了远场衍射的背景噪声^[105]。为了探索更高自由度和更复杂的现象,通常需要对光学操纵中微观粒子的运动过程进行模拟。将机器学习技术(如神经网络)与物理光场模型结合,可更准确地预测作用在微观粒子上的光学力,提升对粒子的操纵能力并提高模型计算效率。2020年, Lenton 等^[107]将神经网络与激光散射模型结合,快速且准确地预测了作用在微观粒子上的光学力,这种方法被用于研究叠加拉盖尔-高斯光束中微粒的旋转速率。实验示意图如图15(a)所示,一个粒子被放置在两个 ± 5 级拉盖尔-高斯光束叠加态中,从而生成具有固定功率的光束。图15(b)表明基于神经网络的预测结果与实验结果具有很好的 consistency。时间平均实验轨迹[图15(c)]和模拟轨迹[图15(d)]的吻合进一步说明了网络预测结果与实验结果的一致性。因此,神经网络有助于快速探索不同参数对观察粒子的旋转速率和轨迹的影响,从而获得更精确的概率分布。

5.2 激光微加工

超快激光在高分辨率、低热效应的三维制造方面具有独特优势,是微加工的理想光源之一。在超短脉

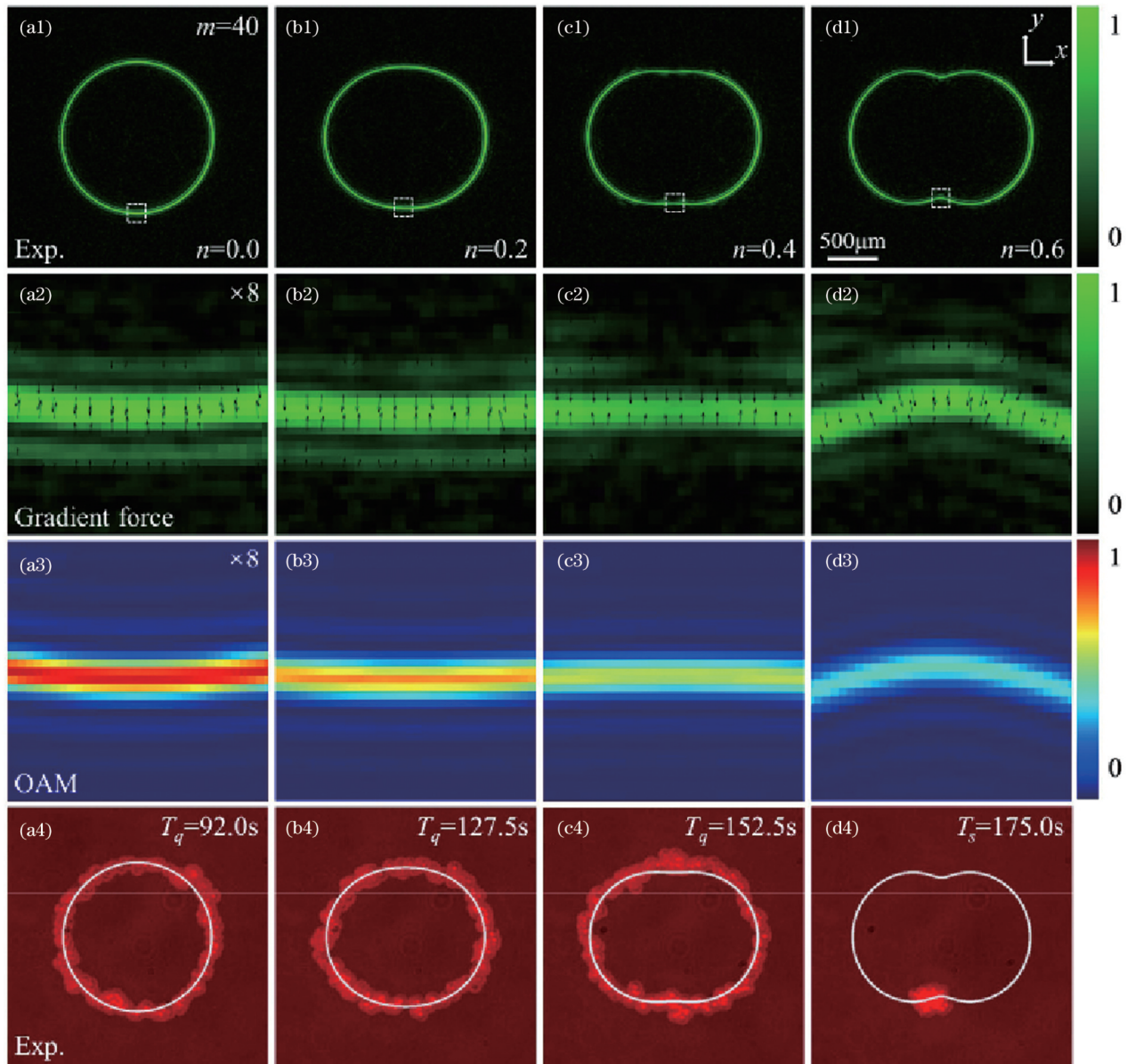


图 14 COVBs 的力场分析和微粒沿摆线结构轨迹运动时的延时图像^[100]。(a1)~(d1) m 不变时不同 n 下 COVBs 的实验光强图；(a2)~(d2)图 14(a1)~(d1)中方框处的梯度力放大图；(a3)~(d3)图 14(a1)~(d1)中方框处的 OAM 放大图；(a4)~(d4)图 14(a1)~(d1)对应的微粒沿 COVBs 轨迹运动时的延时图像

Fig. 14 Force field analysis of COVBs and time-lapse images of particles moving along cycloidal tracks^[100]. (a1)–(d1) Experimental intensity patterns of COVBs under different n when m is constant; (a2)–(d2) enlarged gradient force at box in Figs. 14 (a1)–(d1); (a3)–(d3) enlarged OAM at box in Figs. 14 (a1)–(d1); (a4)–(d4) delay images of particles along COVBs trajectory corresponding to Figs. 14 (a1)–(d1)

冲激光加工材料过程中,激光与物质的相互作用涉及复杂的极端的动态物理现象,对激光参数(如脉冲能量、重复频率和脉冲数)非常敏感,而多维调控为优化超快激光微加工材料提供了新技术。

激光加工的质量和效率与激光和材料间的相互作用有关,受到脉宽、波长和偏振的强烈影响。例如,光的偏振会影响材料钻孔^[108]和表面结构化^[109]等激光加工的速度和质量。通过控制影响激光材料能量耦合的偏振,可以提高微加工的灵活性。已有一系列的方法被用于产生特定的偏振模式,如激光腔重设计或使用

静态腔外偏振转换器。然而,这些方法存在步骤繁琐且难以灵活操控的局限性。随着动态可编程液晶 SLM 技术的出现,灵活产生特定光偏振模式的方式逐渐被应用于光学微加工领域。2012 年,Allegre 等^[6]提出了一种基于快速响应液晶偏振旋转器的灵活调控方式,通过在微加工过程中动态切换飞秒激光束的偏振方向,提高了激光微加工的质量。这种方式产生的径向极化光束可在焦点处生成更宽 $[(40 \pm 5) \mu\text{m}]$ 的光斑,这有助于在加工高纵横比结构时保持高烧蚀率。相比于圆偏振光束,径向极化光束能够以更短的时间

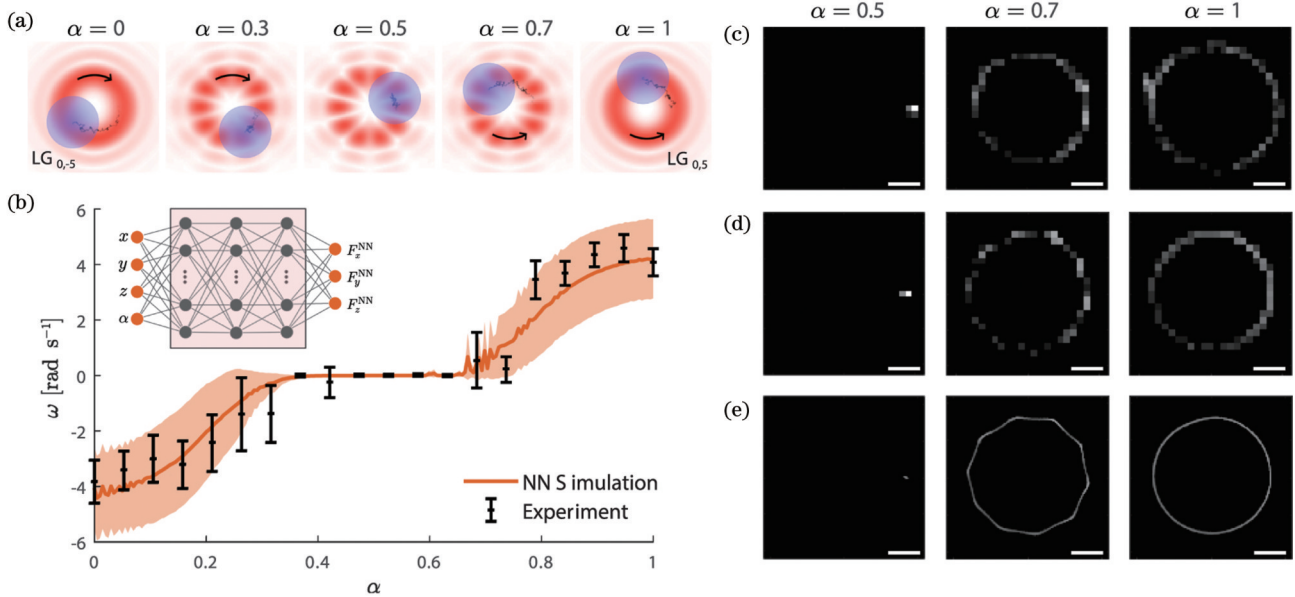


图 15 拉盖尔-高斯光束叠加中粒子的动力学^[107]。(a)实验示意图;(b)从实验结果和基于神经网络的模拟结果中获得的粒子旋转速率;(c)粒子的实验轨迹以及导致的限制势;(d)对应于图 15(c)的模拟轨迹;(e)100个模拟轨迹的平均值
 Fig. 15 Dynamics of particles in Laguerre-Gaussian beam superposition^[107]. (a) Experimental diagram; (b) particle rotation rates obtained from experiment and simulation results based on neural network; (c) experimental trajectories of particles and resulting limiting potential; (d) simulated trajectories corresponding to Fig. 15(c); (e) average of 100 simulated trajectories

(该实验中为 8 min)完成 310 μm 厚的平板的切割,可使加工过程中的激光最小曝光时间缩短约 5%,同时维持较好的侧壁表面粗糙度 [$R_a = (1.0 \pm 0.7) \mu\text{m}$],实现高质量的激光加工效果。

2013年,Allegre等^[110]通过组合两个SLM构造了皮秒脉冲激光束的光场,实现了对光束波前和偏振的同时控制,其光束具有涡旋波前和各种偏振状态(包括线性、径向和角向偏振等)。实验中可利用两个SLM(SLM1和SLM2)施加不同相位延迟以产生具有不同结构的光场。例如,当SLM2施加的相位延迟为0且SLM1施加的相位延迟为 $0 \sim 2\pi$ 时,该装置可产生具有涡旋波前的线偏振光束,利用该光束在不锈钢样品表面上可产生具有环形结构的焦点。对光场波前和偏振的控制可以为薄膜领域的材料微结构应用带来更多的可能性。2022年,涂成厚团队先通过控制波前上周期性变化的偏振或相位操纵光场,然后通过SLM上实时加载CGH构造了焦点轨迹^[111],如图16所示。图16(a)~(d)中箭头表示入射场的偏振方向,分别对应于 $n'=1, 13, 25, 37$ (n' 为笛卡尔坐标系中椭圆焦点轨迹点的整数)。焦点的位置随着 n' 的增加而改变,如图16(e)~(h)所示。当 n' 增加时,两个焦点的运动轨迹最终形成椭圆,如图16(i)~(l)所示。基于生成的焦斑轨迹,该研究演示了在LiNbO₃晶片中制造的各种微结构,如椭圆、汉字“南”和不规则四边形网格结构等。该系统在微结构加工的连续性和均匀性方面都有良好的表现。

为了进一步提高激光微加工效率和质量,理解激光加工参数之间的相互关系并找到最佳的激光加工参

数尤为重要。基于多维度激光参数之间的复杂相关性,机器学习(如人工神经网络)是一种新颖的智能调控光学微加工方式,它无须描述基础物理的任何方程,便可以提供识别特定激光参数的方法,并直接训练数据(如幅度)和模拟物理过程(如光学衍射极限)^[112]。2015年,Teixidor等^[113]在硬化钢材材料实验中为每个输出变量建立了高精度的模型,使用神经网络、决策树算法和线性回归模型等机器学习技术,研究了不同的脉冲强度、脉冲频率和扫描速度对微通道阵列最终特征的影响。2018年,Mills等^[112]利用神经网络预测了具有特定空间强度分布的激光的加工结果,该网络可将激光空间强度分布转换为激光加工目标的等效扫描电子显微镜(SEM)图像。为了证明这种预测技术的准确性,他们对接近实验分辨率极限的数字微镜器件(DMD)图案进行测试,结果如图17所示。基于神经网络预测的激光加工结果与实验测量结果相符,进一步验证了神经网络的预测能力。通过附加不同激光加工参数(波长、偏振等)的训练数据,可以进一步完善神经网络对加工结果的预测能力,实现激光加工结果的实时可视化。

2019年,Xie等^[114]建立了用于监测光束平移和旋转的神经网络模型,在激光加工过程中通过系统监控以及实时闭环反馈实现了高效激光加工,证明了神经网络在监测和智能控制激光加工方面的潜力。2021年,McDonnell等^[115]在金属表面轮廓加工中应用神经网络预测激光表面加工结果,同时对激光加工数据进行训练与参数优化,在不影响精度和性能的情况下显著降低了激光加工的成本和工作量。此外,该技术还

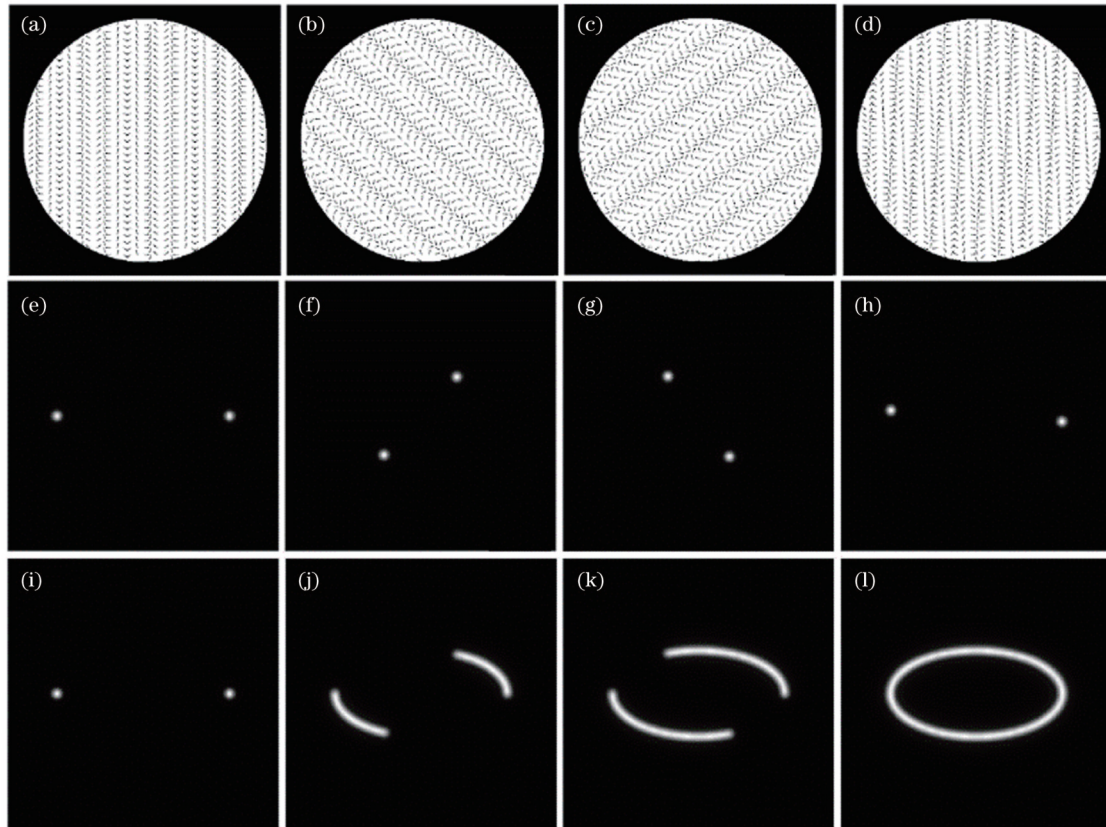


图 16 椭圆焦点轨迹形成示意图^[111]。(a)~(d)当 n' 分别为 1、13、25 和 37 时所构建的光场的偏振分布和周期变化；

(e)~(h)图 16(a)~(d)中焦平面对应的焦场分布；(i)~(l)图 16(a)~(d)中对应的焦点轨迹

Fig. 16 Schematics of elliptic focus locus formation^[111]. (a)~(d) Polarization distributions and periodic changes of constructed light field when n' is 1, 13, 25, and 37, respectively; (e)~(h) focal field distributions corresponding to focal planes in Figs. 16 (a)~(d); (i)~(l) corresponding focus locus in Figs. 16 (a)~(d)

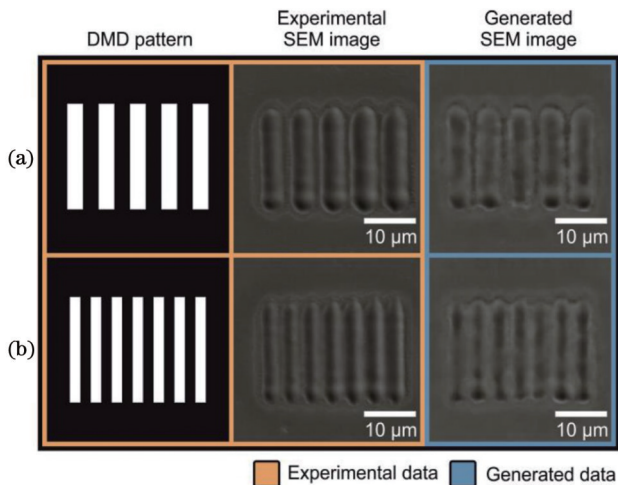


图 17 激光微加工效果^[112]

Fig. 17 Laser machining results^[112]

可以扩展到波长和偏振等更多维度上。2023 年, Behbahani 等^[116]比较了线性/多项式回归、XGBoost 和神经网络等不同算法的性能,建立了一个用于识别光束频率和幅度等维度的基于神经网络的模型,通过计算激光经过衬底的次数及光源与衬底的垂直距离等加工参数,制造出具有所需特性的高质量氧化铝陶瓷切

割结构。

5.3 自由空间光通信

随着物联网、大数据和云计算等技术的快速发展,自由空间光通信技术须更高效地传输大量数据以满足不断增长的带宽需求。为了提高系统传输容量,研究人员一直在努力寻找新的方法以利用光的物理维度。

光信号的多维传输是下一代光通信系统的基本特征之一。光的多个物理维度独立地或共同地承载光信号,可以增加光通信系统的数据承载能力,相关的多维信号传输技术包括时分复用、波分复用、空分复用和偏振复用等^[117]。虽然许多大容量光纤通信系统已通过采用时分、波分和偏振复用以及多级调制得到实现,但呈指数增长的数据传输需求仍然逼近带宽容量极限。OAM 作为激光的空间自由度之一,是克服带宽容量限制的潜在解决方案,能够进一步增加光学通信系统的容量。光学涡旋光束是一种具有螺旋相位波前并携带 OAM 的结构光场,已得到广泛研究,并被应用于多种 OAM 装置。2014 年, Huang 等^[118]研究了 OAM 与其他复用域的正交性,提出了一种结合 OAM 及偏振和波分复用的自由空间数据链路,实现

了大于 $100 \text{ Tbit}\cdot\text{s}^{-1}$ 的总数据传输速率。2015 年,李朝晖团队利用达曼光学涡旋光栅(DOVG)实现了独立的共线 OAM 信道生成、传输和检测^[119]。如图 18 所示,高斯光束通过 DOVG 可以产生多个 OAM 光束,使用 DOVG 和针孔滤波器将不同衍射角下的入射光束合成并将其加载到具有不同 OAM 通道的同轴光学涡旋光束中,通过单个 DOVG 可以并行解复用携带大量

OAM 信道的入射同轴光学涡旋光束。基于 DOVG 的 OAM 复用具有与标准波分、偏振和其他现有复用技术合并的能力,可以大幅提高光通信系统容量。为了实现长距离低串扰的高阶 OAM 复用传输,2018 年,王健团队利用渐变折射率环形芯光纤抑制径向高阶模,通过高阶 OAM 模式组复用以及波分复用,最终在 18 km 长的 OAM 光纤中实现了低串扰数据传输^[120]。

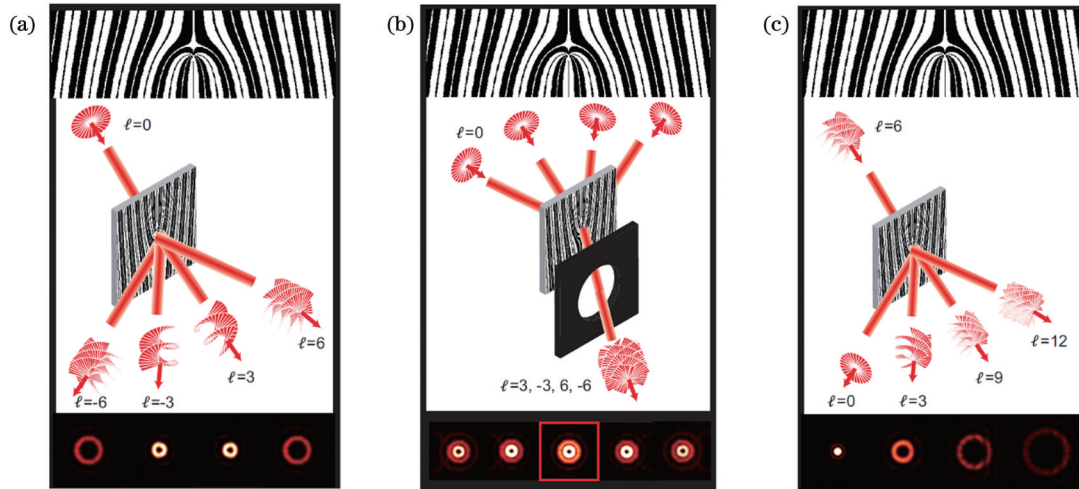


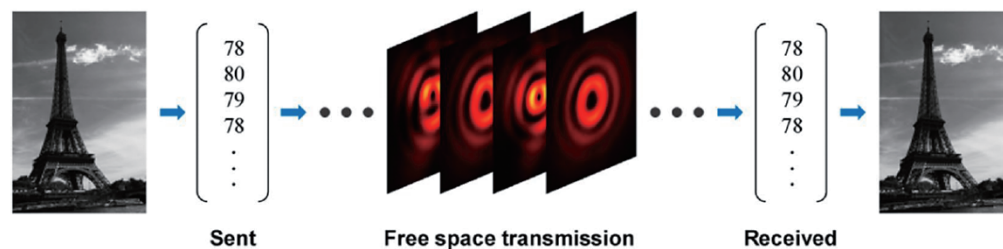
图 18 DOVG 产生 OAM 光束^[119]。(a)平面相位波前高斯光束经过 DOVG 衍射并被编码为 OAM 状态;(b)由多个衍射方向入射的多个高斯光束在零阶方向上组合成具有多个 OAM 状态的光学涡旋光束;(c)OAM 光束被相同的 DOVG 衍射并在相应方向上被转换回高斯光束

Fig. 18 OAM beams produced by DOVG^[119]. (a) Planar phase wavefront Gaussian beams are diffracted by DOVG and coded as OAM; (b) multiple Gaussian beams incident in multiple diffraction directions are combined in zero-order direction to form optical vortex beams with multiple OAM states; (c) OAM beams are diffracted by same DOVG and converted back to Gaussian beams in corresponding direction

OAM 模式的有效识别是基于 OAM 的通信系统的关键。然而,基于 OAM 的自由空间光学信号在传输过程中会受到包括物理障碍物、温度变化、水汽吸收以及大气湍流等^[121]因素的影响,其实际应用受到阻碍。在这些影响中,大气湍流导致的信号失真和信道之间的串扰将会使误码率上升,并破坏系统的任何经典或量子优势^[122]。为了减轻干扰和环境的影响,过去的研究主要采用两种方法:一种是被用于校正 OAM 模式湍流效应的自适应光学^[123];另一种方法是将光学设置的复杂性转移到数字域,并使用多输入多输出(MIMO)数字信号处理(DSP)来减轻 OAM 复用系统中的串扰^[124]。近年来,机器学习算法因具有识别结构化光束模式的潜力,已被广泛用于解决自由空间光信号中的干扰和环境影响问题。2018 年,Lohani 等^[125]利用机器学习技术设计了一个光学反馈网络,通过仿真证明了该网络在校正湍流传播导致的激光模式畸变方面的能力。通过修改湍流发送的发射模式分布,可实现与期望分布几乎相同的接收处的校正光学模式分布,且均方差指数接近零。2019 年,郭忠义团队在对系统的计算复杂性和识别效率进行权衡后搭建了 6 层的 CNN 模型,用于对接收到的拉盖尔-高斯光束的

强度分布进行特征提取,实现了 OAM 模式的准确识别^[126]。研究表明,基于 CNN 方法的 OAM 模式复用技术即使在严重湍流的长传输距离下也可以获得较高的识别精度。2020 年,Ragheb 等^[127]使用 CNN、支持向量机(SVM)和 K-近邻算法,对沙尘暴条件下拉盖尔-高斯和厄米-高斯光束的检测进行了研究,并准确预测了沙尘通道的能见度。2021 年,Na 等^[128]提出了一种基于分数模式编码和深度学习解码的数据传输系统,通过切换显示在 SLM 上的相位全息图,实现了携带数据符号的空间模式的生成和调制。研究表明,CNN 模型经训练后可以在没有任何模式分类器的情况下同时识别两个独立的空间模式,并准确识别相邻模式之间的微小差异。他们利用所提出的数据传输系统成功地实现了图像传输,如图 19 所示。100 pixel \times 150 pixel 的发送图像和接收图像之间的测量误差率仅为 0.05%,这意味着重建图像与发送图像几乎相同。基于深度学习技术的数据传输为先进的光通信系统提供了一种可实现更高数据传输速率的新方法。

另外,智能调控多维激光技术在超分辨率成像^[5]、远程探测^[129]及信息传输与加密^[130]等领域中也有广阔的应用前景。

图 19 基于深度学习数据传输系统的图像传输^[128]Fig. 19 Image transmission based on deep learning data transmission system^[128]

6 结束语

在前沿探索的驱动下,智能调控多维激光技术以光的多物理维度为基础,以光学元件和机器学习等工具为手段,已经成为研究复杂物理现象和交叉学科问题的重要方法。通过谐振腔内的智能调控可以实现激光器的自锁模和自优化,并可对需求的特定状态进行精准调控。通过结合时空锁模的多模光纤激光器,还可进一步探索智能算法在时空频多维度调控中的应用。谐振腔外的智能调控完善了按需输出的多维激光光场的精确调控手段,推动了光纤动力学研究和光场多维信息重构技术的发展。随着相关技术手段的发展,智能调控多维激光技术极大地丰富了光学微操纵、光学微加工和自由空间光通信等应用场景,并为其他相关领域的研究提供了重要的科学工具。

尽管现有的研究已经取得了一定的成果,但潜在的问题和挑战仍然存在。相关智能调控算法的应用多集中在多维激光系统的数值数据分析和参数验证方面,未能与多维激光系统深度融合,基于光学系统的实时调控能力亟待进一步提高。光学系统特别是多维激光系统缺乏有针对性的可供机器学习的开放数据库,使不同机器学习方法的效果评估受限。随着激光系统复杂度的不断增加,数据量大、计算成本高、可解释性差等问题将进一步限制机器学习的应用。

激光系统可调控维度的不断增加使得传统的基于光学器件的调控方法逐渐达到它们的极限。随着计算机性能的不断增强,能够发现数据的隐藏特征并对新数据有较强适应性的机器学习技术将成为调控多维激光光场的一种强有力工具。如半监督学习算法,能够利用部分标记数据和部分未标记数据进行学习优化,或能为未来更复杂动力学系统的研究提供一种思路。同时,基于反馈信息优化的强化学习网络可进一步开发多维激光系统中的实时调控。在未来的研究中,可进一步将机器学习等智能技术与多维度激光结合,并将其扩展到实时动态的全场成像、全息存储、三维激光加工等方面,促进全新光学应用的出现,从而推动医学、天文学、信息科学、材料科学等多学科的发展,为现代光学的发展带来新的机遇。

参 考 文 献

- [1] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J, et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. *Physical Review A*, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [2] Siviloglou G A, Broky J, Dogariu A, et al. Observation of accelerating airy beams[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(21): 213901.
- [3] Zhao J Y, Zhang P, Deng D M, et al. Observation of self-accelerating Bessel-like optical beams along arbitrary trajectories [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(4): 498-500.
- [4] Gu B, Xu D F, Rui G H, et al. Manipulation of dielectric Rayleigh particles using highly focused elliptically polarized vector fields[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(27): 8123-8129.
- [5] Hofmann M, Eggeling C, Jakobs S, et al. Breaking the diffraction barrier in fluorescence microscopy at low light intensities by using reversibly photoswitchable proteins[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2005, 102(49): 17565-17569.
- [6] Allegre O J, Perrie W, Edwardson S P, et al. Laser microprocessing of steel with radially and azimuthally polarized femtosecond vortex pulses[J]. *Journal of Optics*, 2012, 14(8): 085601.
- [7] Wang J, Yang J Y, Fazal I M, et al. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(7): 488-496.
- [8] Bliokh K Y, Rodríguez-Fortuño F J, Nori F, et al. Spin-orbit interactions of light[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(12): 796-808.
- [9] Conrads H, Schmidt M. Plasma generation and plasma sources[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2000, 9(4): 441-454.
- [10] Blow K J, Wood D. Theoretical description of transient stimulated Raman scattering in optical fibers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1989, 25(12): 2665-2673.
- [11] Agrawal G P. *Nonlinear fiber optics*[M] // Christiansen P L, Sorensen M P, Scott A C. *Nonlinear science at the dawn of the 21st Century. Lecture notes in physics*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2007, 542: 195-211.
- [12] Du L P, Yang A P, Zayats A V, et al. Deep-subwavelength features of photonic skyrmions in a confined electromagnetic field with orbital angular momentum[J]. *Nature Physics*, 2019, 15(7): 650-654.
- [13] Gateau J, Rigneault H, Guillon M. Complementary speckle patterns: deterministic interchange of intrinsic vortices and maxima through scattering media[J]. *Physical Review Letters*, 2017, 118(4): 043903.
- [14] Wan Z S, Shen Y J, Wang Z Y, et al. Divergence-degenerate spatial multiplexing towards future ultrahigh capacity, low error-rate optical communications[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11: 144.
- [15] Wright L G, Wu F O, Christodoulides D N, et al. Physics of highly multimode nonlinear optical systems[J]. *Nature Physics*, 2022, 18(9): 1018-1030.
- [16] Mahlab U, Shamir J, Caulfield H J. Genetic algorithm for optical

- pattern recognition[J]. *Optics Letters*, 1991, 16(9): 648-650.
- [17] Kihm K D, Lyons D P. Optical tomography using a genetic algorithm[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(17): 1327-1329.
- [18] Eisenhammer T, Lazarov M, Leutbecher M, et al. Optimization of interference filters with genetic algorithms applied to silver-based heat mirrors[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(31): 6310-6315.
- [19] Zibar D, Wymeersch H, Lyubomirsky I. Machine learning under the spotlight[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(12): 749-751.
- [20] Comin A, Hartschuh A. Efficient optimization of SHG hotspot switching in plasmonic nanoantennas using phase-shaped laser pulses controlled by neural networks[J]. *Optics Express*, 2018, 26(26): 33678-33686.
- [21] 夏珉. 激光原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
Xia M. *Laser principle and technology*[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [22] He C, Shen Y J, Forbes A. Towards higher-dimensional structured light[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11: 205.
- [23] McCarthy J, Minsky M, Rochester N, et al. A proposal for the Dartmouth summer research project on artificial intelligence, August 31, 1955[J]. *AI Magazine*, 2006, 27: 12-14.
- [24] 周志华. 机器学习[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.
Zhou Z H. *Machine learning*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016.
- [25] Kiran B R, Sobh I, Talpaert V, et al. Deep reinforcement learning for autonomous driving: a survey[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(6): 4909-4926.
- [26] Cambria E, White B. Jumping NLP curves: a review of natural language processing research[review article][J]. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 2014, 9(2): 48-57.
- [27] Wang S Z, Cao J N, Yu P S. Deep learning for spatio-temporal data mining: a survey[J]. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2022, 34(8): 3681-3700.
- [28] Khan R A, Crenn A, Meyer A, et al. A novel database of children's spontaneous facial expressions (LIRIS-CSE)[J]. *Image and Vision Computing*, 2019, 83/84: 61-69.
- [29] Wu T L, Tegmark M. Toward an artificial intelligence physicist for unsupervised learning[J]. *Physical Review. E*, 2019, 100(3): 033311.
- [30] Møller M F. A scaled conjugate gradient algorithm for fast supervised learning[J]. *Neural Networks*, 1993, 6(4): 525-533.
- [31] Xiong W, Redding B, Gertler S, et al. Deep learning of ultrafast pulses with a multimode fiber[J]. *APL Photonics*, 2020, 5(9): 096106.
- [32] Barlow H B. Unsupervised learning[J]. *Neural Computation*, 1989, 1(3): 295-311.
- [33] Närhi M, Salmela L, Toivonen J, et al. Machine learning analysis of extreme events in optical fibre modulation instability[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 4923.
- [34] Zhou X Y, Belkin M. Semi-supervised learning[M]//Academic Press library in signal processing. Amsterdam: Elsevier, 2014: 1239-1269.
- [35] Fan P F, Ruddlesden M, Wang Y F, et al. Semi-supervised learning enabled scalable high-spatial-density channel multiplexing over multimode fibers[C] //2022 27th OptoElectronics and Communications Conference (OECC) and 2022 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC), July 3-6, 2022, Toyama, Japan. New York: IEEE Press, 2022.
- [36] Sutton R S, Barto A G. Reinforcement learning: an introduction [M]. 2nd ed. Cambridge: MIT Press, 2018.
- [37] Valensise C M, Giuseppe A, Cerullo G, et al. Deep reinforcement learning control of white-light continuum generation[J]. *Optica*, 2021, 8(2): 239-242.
- [38] McCulloch W S, Pitts W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity[J]. *Bulletin of Mathematical Biology*, 1990, 52(1/2): 99-115.
- [39] De Jong K. Learning with genetic algorithms: an overview[J]. *Machine Learning*, 1988, 3(2): 121-138.
- [40] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C] // Proceedings of ICNN '95-International Conference on Neural Networks, November 27-December 1, 1995, Perth, WA, Australia. New York: IEEE Press, 2002: 1942-1948.
- [41] Hearst M A, Dumais S T, Osuna E, et al. Support vector machines[J]. *IEEE Intelligent Systems and Their Applications*, 1998, 13(4): 18-28.
- [42] Hofmann T, Schölkopf B, Smola A J. Kernel methods in machine learning[J]. *The Annals of Statistics*, 2008, 36(3): 1171-1220.
- [43] Huang G B, Zhu Q Y, Siew C K. Extreme learning machine: theory and applications[J]. *Neurocomputing*, 2006, 70(1/2/3): 489-501.
- [44] Rosenblatt F. The perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain[J]. *Psychological Review*, 1958, 65(6): 386-408.
- [45] Hopfield J J. Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1982, 79(8): 2554-2558.
- [46] Rumelhart D E, Hinton G E, Williams R J. Learning representations by back-propagating errors[J]. *Nature*, 1986, 323(6088): 533-536.
- [47] Torczon V. On the convergence of pattern search algorithms[J]. *SIAM Journal on Optimization*, 1997, 7(1): 1-25.
- [48] 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.
- [49] Shen X L, Li W X, Yan M, et al. Electronic control of nonlinear-polarization-rotation mode locking in Yb-doped fiber lasers[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(16): 3426-3428.
- [50] Hellwig T, Walbaum T, Groß P, et al. Automated characterization and alignment of passively mode-locked fiber lasers based on nonlinear polarization rotation[J]. *Applied Physics B*, 2010, 101(3): 565-570.
- [51] Andral U, Fodil R S, Amrani F, et al. Fiber laser mode locked through an evolutionary algorithm[J]. *Optica*, 2015, 2(4): 275-278.
- [52] Pu G Q, Yi L L, Zhang L, et al. Intelligent programmable mode-locked fiber laser with a human-like algorithm[J]. *Optica*, 2019, 6(3): 362-369.
- [53] Yan Q Q, Deng Q H, Zhang J, et al. Low-latency deep-reinforcement learning algorithm for ultrafast fiber lasers[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(8): 1493-1501.
- [54] Woodward R I, Kelleher E J R. Genetic algorithm-based control of birefringent filtering for self-tuning, self-pulsing fiber lasers[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(15): 2952-2955.
- [55] Tzang O, Caravaca-Aguirre A M, Wagner K, et al. Adaptive wavefront shaping for controlling nonlinear multimode interactions in optical fibres[J]. *Nature Photonics*, 2018, 12(6): 368-374.
- [56] Wu X Q, Peng J S, Boscolo S, et al. Intelligent breathing soliton generation in ultrafast fiber lasers[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(2): 2100191.
- [57] Pu G Q, Yi L L, Zhang L, et al. Intelligent control of mode-locked femtosecond pulses by time-stretch-assisted real-time spectral analysis[J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9: 13.
- [58] Girardot J, Billard F, Coillet A, et al. Autosetting mode-locked laser using an evolutionary algorithm and time-stretch spectral characterization[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2020, 26(5): 1100108.
- [59] 张昆鹏, 张笑琪, 冯滔, 等. 基于热效应的 4F 简并腔时空输出特性分析[J]. *中国激光*, 2022, 49(24): 2401002.
Zhang K P, Zhang X Q, Feng T, et al. Analysis of temporal and spatial output characteristics of 4F degenerate cavity based on thermal effect[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(24): 2401002.
- [60] Tradonsky C, Chriki R, Barach G, et al. Digital degenerate cavity laser[C] //Frontiers in Optics 2017, September 18-21, 2017, Washington, D.C.. Washington, D.C.: Optica Publishing Group,

- 2017: FTu4C.4.
- [61] Tradonsky C, Gershenson I, Pal V, et al. Rapid laser solver for the phase retrieval problem[J]. Science Advances, 2019, 5(10): eaax4530.
- [62] Forbes A. Structured light from lasers[J]. Laser & Photonics Reviews, 2019, 13(11): 1900140.
- [63] Burger L, Litvin I, Ngcobo S, et al. Implementation of a spatial light modulator for intracavity beam shaping[J]. Journal of Optics, 2015, 17(1): 015604.
- [64] Wright L G, Christodoulides D N, Wise F W. Spatiotemporal mode-locking in multimode fiber lasers[J]. Science, 2017, 358(6359): 94-97.
- [65] Wright L G, Ziegler Z M, Lushnikov P M, et al. Multimode nonlinear fiber optics: massively parallel numerical solver, tutorial, and outlook[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018, 24(3): 5100516.
- [66] Wright L G, Sidorenko P, Pourbeyram H, et al. Mechanisms of spatiotemporal mode-locking[J]. Nature Physics, 2020, 16(5): 565-570.
- [67] 邱明伟. 基于多模非线性的时空锁模光纤激光器[D]. 南京: 南京邮电大学, 2022.
- Qiu M W. Space-time mode-locked fiber laser based on multimode nonlinearity[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2022.
- [68] Qin H Q, Xiao X S, Wang P, et al. Observation of soliton molecules in a spatiotemporal mode-locked multimode fiber laser[J]. Optics Letters, 2018, 43(9): 1982-1985.
- [69] Wei X M, Jing J C, Shen Y C, et al. Harnessing a multi-dimensional fibre laser using genetic wavefront shaping[J]. Light: Science & Applications, 2020, 9: 149.
- [70] Ma Z L, Long J G, Lin W, et al. Tunable spatiotemporal mode-locked fiber laser at 1.55 μm [J]. Optics Express, 2021, 29(6): 9465-9473.
- [71] 郭忠义, 龚超凡, 刘洪郡, 等. OAM 光通信技术研究进展[J]. 光电工程, 2020, 47(3): 95-128.
- Guo Z Y, Gong C F, Liu H J, et al. Research advances of orbital angular momentum based optical communication technology[J]. Opto-Electronic Engineering, 2020, 47(3): 95-128.
- [72] Ostrovsky A S, Rickenstorff-Parrao C, Arrizón V. Generation of the "perfect" optical vortex using a liquid-crystal spatial light modulator[J]. Optics Letters, 2013, 38(4): 534.
- [73] Beijersbergen M W, Allen L, van der Veen H E L O, et al. Astigmatic laser mode converters and transfer of orbital angular momentum[J]. Optics Communications, 1993, 96(1/2/3): 123-132.
- [74] Sukhov S, Dogariu A. Non-conservative optical forces[J]. Reports on Progress in Physics, 2017, 80(11): 112001.
- [75] Čizmár T, Mazilu M, Dholakia K. *In situ* wavefront correction and its application to micromanipulation[J]. Nature Photonics, 2010, 4(6): 388-394.
- [76] Li P, Liu S, Xie G F, et al. Modulation mechanism of multi-azimuthal masks on the redistributions of focused azimuthally polarized beams[J]. Optics Express, 2015, 23(6): 7131-7139.
- [77] Zhang Y Q, Shen J F, Min C J, et al. Nonlinearity-induced multiplexed optical trapping and manipulation with femtosecond vector beams[J]. Nano Letters, 2018, 18(9): 5538-5543.
- [78] Liu B H, Weiner A M. Space-time focusing in a highly multimode fiber via optical pulse shaping[J]. Optics Letters, 2018, 43(19): 4675-4678.
- [79] Boscolo S, Finot C. Artificial neural networks for nonlinear pulse shaping in optical fibers[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 131: 106439.
- [80] Jing J C, Wei X M, Wang L V. Spatio-temporal-spectral imaging of non-repeatable dissipative soliton dynamics[J]. Nature Communications, 2020, 11: 2059.
- [81] Teġin U, Rahmani B, Kakkava E, et al. Controlling spatiotemporal nonlinearities in multimode fibers with deep neural networks[J]. APL Photonics, 2020, 5(3): 030804.
- [82] Fu S Y, Zhai Y W, Yin C, et al. Mixed orbital angular momentum amplitude shift keying through a single hologram[J]. OSA Continuum, 2018, 1(2): 295-308.
- [83] Li X K, Li Y, Zeng X N, et al. Perfect optical vortex array for optical communication based on orbital angular momentum shift keying[J]. Journal of Optics, 2018, 20(12): 125604.
- [84] Zhao Q S, Hao S Q, Wang Y, et al. Mode detection of misaligned orbital angular momentum beams based on convolutional neural network[J]. Applied Optics, 2018, 57(35): 10152-10158.
- [85] Vellekoop I M, Mosk A P. Focusing coherent light through opaque strongly scattering media[J]. Optics Letters, 2007, 32(16): 2309-2311.
- [86] Katz O, Heidmann P, Fink M, et al. Non-invasive single-shot imaging through scattering layers and around corners via speckle correlations[J]. Nature Photonics, 2014, 8(10): 784-790.
- [87] Liu Z J. Convolutional neural networks for multimode fiber study: a review[C]//2020 International Conference on Computing and Data Science (CDS), August 1-2, 2020, Stanford, CA, USA. New York: IEEE Press, 2020: 174-178.
- [88] Borhani N, Kakkava E, Moser C, et al. Learning to see through multimode fibers[J]. Optica, 2018, 5(8): 960-966.
- [89] Tang P S, Zheng K P, Yuan W M, et al. Learning to transmit images through optical speckle of a multimode fiber with high fidelity[J]. Applied Physics Letters, 2022, 121(8): 081107.
- [90] Fan W R, Chen T R, Xu X Q, et al. Single-shot recognition of 3D phase images with deep learning[J]. Laser & Photonics Reviews, 2022, 16(10): 2100719.
- [91] Ashkin A, Dziedzic J M, Bjorkholm J E, et al. Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles[J]. Optics Letters, 1986, 11(5): 288-290.
- [92] Lipfert J, van Oene M M, Lee M N, et al. Torque spectroscopy for the study of rotary motion in biological systems[J]. Chemical Reviews, 2015, 115(3): 1449-1474.
- [93] Johansen P L, Fenaroli F, Evensen L, et al. Optical micromanipulation of nanoparticles and cells inside living zebrafish[J]. Nature Communications, 2016, 7: 10974.
- [94] Geraci A A, Papp S B, Kitching J. Short-range force detection using optically cooled levitated microspheres[J]. Physical Review Letters, 2010, 105(10): 101101.
- [95] Delić U, Reisenbauer M, Dare K H, et al. Cooling of a levitated nanoparticle to the motional quantum ground state[J]. Science, 2020, 367(6480): 892-895.
- [96] Hoang T M, Pan R, Ahn J, et al. Experimental test of the differential fluctuation theorem and a generalized Jarzynski equality for arbitrary initial states[J]. Physical Review Letters, 2018, 120(8): 080602.
- [97] Roichman Y, Sun B, Roichman Y, et al. Optical forces arising from phase gradients[J]. Physical Review Letters, 2008, 100(1): 013602.
- [98] Shanblatt E R, Grier D G. Extended and knotted optical traps in three dimensions[J]. Optics Express, 2011, 19(7): 5833-5838.
- [99] Shvedov V, Davoyan A R, Hnatovsky C, et al. A long-range polarization-controlled optical tractor beam[J]. Nature Photonics, 2014, 8(11): 846-850.
- [100] Wei W J, Zhu L H, Tai Y P, et al. Cycloid-structured optical tweezers[J]. Optics Letters, 2023, 48(4): 972-975.
- [101] Zhan Q W. Trapping metallic Rayleigh particles with radial polarization[J]. Optics Express, 2004, 12(15): 3377-3382.
- [102] Wang X L, Chen J, Li Y N, et al. Optical orbital angular momentum from the curl of polarization[J]. Physical Review Letters, 2010, 105(25): 253602.
- [103] Beckley A M, Brown T G, Alonso M A. Full Poincaré beams[J]. Optics Express, 2010, 18(10): 10777-10785.
- [104] Meister M, Winfield R J. Novel approaches to direct search algorithms for the design of diffractive optical elements[J]. Optics Communications, 2002, 203(1/2): 39-49.

- [105] 孙晴, 任煜轩, 姚焜, 等. 阵列光镊衍射元件的算法设计[J]. 中国激光, 2011, 38(1): 0109003.
- Sun Q, Ren Y X, Yao K, et al. Algorithm for diffractive optical element of array optical tweezers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(1): 0109003.
- [106] Rinne J W, Wiltzius P. Design of holographic structures using genetic algorithms[J]. Optics Express, 2006, 14(21): 9909-9916.
- [107] Lenton I C D, Volpe G, Stilgoe A B, et al. Machine learning reveals complex behaviours in optically trapped particles[J]. Machine Learning: Science and Technology, 2020, 1(4): 045009.
- [108] Nolte S, Momma C, Kamlage G, et al. Polarization effects in ultrashort-pulse laser drilling[J]. Applied Physics A, 1999, 68(5): 563-567.
- [109] Venkatakrishnan K, Tan B, Stanley P, et al. The effect of polarization on ultrashort pulsed laser ablation of thin metal films [J]. Journal of Applied Physics, 2002, 92(3): 1604-1607.
- [110] Allegre O J, Jin Y, Perrie W, et al. Complete wavefront and polarization control for ultrashort-pulse laser microprocessing[J]. Optics Express, 2013, 21(18): 21198-21207.
- [111] Cai M Q, Wang Q, Tu C H, et al. Dynamically taming focal fields of femtosecond lasers for fabricating microstructures[J]. Chinese Optics Letters, 2022, 20(1): 010502.
- [112] Mills B, Heath D J, Grant-Jacob J A, et al. Predictive capabilities for laser machining via a neural network[J]. Optics Express, 2018, 26(13): 17245-17253.
- [113] Teixidor D, Grzenda M, Bustillo A, et al. Modeling pulsed laser micromachining of micro geometries using machine-learning techniques[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2015, 26(4): 801-814.
- [114] Xie Y H, Heath D J, Grant-Jacob J A, et al. Deep learning for the monitoring and process control of femtosecond laser machining[J]. Journal of Physics: Photonics, 2019, 1(3): 035002.
- [115] McDonnell M D T, Arnaldo D, Pelletier E, et al. Machine learning for multi-dimensional optimisation and predictive visualisation of laser machining[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2021, 32(5): 1471-1483.
- [116] Behbahani R, Yazdani Sarvestani H, Fatehi E, et al. Machine learning-driven process of alumina ceramics laser machining[J]. Physica Scripta, 2023, 98(1): 015834.
- [117] Yi A L, Yan L S, Pan Y, et al. Transmission of multi-dimensional signals for next generation optical communication systems[J]. Optics Communications, 2018, 408: 42-52.
- [118] Huang H, Xie G D, Yan Y, et al. 100 Tbit/s free-space data link enabled by three-dimensional multiplexing of orbital angular momentum, polarization, and wavelength[J]. Optics Letters, 2014, 39(2): 197-200.
- [119] Lei T, Zhang M, Li Y R, et al. Massive individual orbital angular momentum channels for multiplexing enabled by Damman gratings[J]. Light: Science & Applications, 2015, 4(3): e257.
- [120] Zhu L, Zhu G X, Wang A D, et al. 18 km low-crosstalk OAM + WDM transmission with 224 individual channels enabled by a ring-core fiber with large high-order mode group separation[J]. Optics Letters, 2018, 43(8): 1890-1893.
- [121] Kaushal H, Kaddoum G. Optical communication in space: challenges and mitigation techniques[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(1): 57-96.
- [122] Rodenburg B, Lavery M P J, Malik M, et al. Influence of atmospheric turbulence on states of light carrying orbital angular momentum[J]. Optics Letters, 2012, 37(17): 3735-3737.
- [123] Ren Y X, Xie G D, Huang H, et al. Adaptive-optics-based simultaneous pre- and post-turbulence compensation of multiple orbital-angular-momentum beams in a bidirectional free-space optical link[J]. Optica, 2014, 1(6): 376-382.
- [124] Huang H, Cao Y W, Xie G D, et al. Crosstalk mitigation in a free-space orbital angular momentum multiplexed communication link using 4×4 MIMO equalization[J]. Optics Letters, 2014, 39(15): 4360-4363.
- [125] Lohani S, Glasser R T. Turbulence correction with artificial neural networks[J]. Optics Letters, 2018, 43(11): 2611-2614.
- [126] Wang Z K, Dedo M I, Guo K, et al. Efficient recognition of the propagated orbital angular momentum modes in turbulences with the convolutional neural network[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(3): 7903614.
- [127] Ragheb A, Saif W, Trichili A, et al. Identifying structured light modes in a desert environment using machine learning algorithms [J]. Optics Express, 2020, 28(7): 9753-9763.
- [128] Na Y, Ko D K. Deep-learning-based high-resolution recognition of fractional-spatial-mode-encoded data for free-space optical communications[J]. Scientific Reports, 2021, 11: 2678.
- [129] 姜会林, 付强, 张雅琳, 等. 空间碎片激光探测成像通信一体化技术探讨[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(4): 0401001.
- Jiang H L, Fu Q, Zhang Y L, et al. Discussion of the laser ranging with polarization spectral imaging observations and communication technology for space debris[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(4): 0401001.
- [130] Zhao Y F, Wang J. High-base vector beam encoding/decoding for visible-light communications[J]. Optics Letters, 2015, 40(21): 4843-4846.

Intelligent Manipulation of Multi-Dimensional Laser Technologies and Applications

Ma Yuncong¹, Liang Zhaoheng¹, Ling Lin¹, Guo Yuankai¹, Li Zihao¹, Wei Xiaoming^{1*}, Yang Zhongmin^{1,2**}

¹School of Physics and Optoelectronics, South China University of Technology, Guangzhou 510610, Guangdong, China;

²Research Institute of Future Technology, South China Normal University, Guangzhou 510006, Guangdong, China

Abstract

Significance Laser is an important strategic technology that has been widely used in the processing, communication, military, and medical fields. Lasers are also indispensable tools for observing complex, multi-dimensional optical phenomena, especially in physics, biology, materials science, and astronomy. Laser possesses various modulable orthogonal physical dimensions, including wavelength, pulse width, repetition rate, intensity, phase, and polarization, which are the main objectives of laser manipulation. To explore new phenomena with high dimensions, laser manipulation is no longer limited to a single dimension, and the joint manipulation of multiple dimensions of laser is imperative.

Multi-dimensional (multi-mode) laser is important for breaking the bottleneck of single-mode laser performance, and it provides new opportunities for multidisciplinary research. Different from traditional single-mode lasers, multi-dimensional lasers exhibit a complex optical field that can be controlled through delicate tuning of the numerous parameters, but this complicity also results in challenging manipulation of the performance of the multi-dimensional laser. Recently, with the rapid development of artificial intelligence, intelligent control techniques, particularly machine learning, have been widely applied to improve the performance of complex optical systems, which promotes the fast iteration of intelligent optics and related fields, elucidating the intelligent control of multi-dimensional lasers.

Progress Here, we provide a literature review on the research progress of intelligent control in the field of multi-dimension laser manipulation from the aspects of in-cavity and out-of-cavity manipulation. First, in-cavity manipulation can be used in self-optimizing mode-locked lasers (Fig. 4) and precise control of the specific state (Fig. 5). The application of intelligent algorithms in multi-dimensional manipulation can be further explored using spatiotemporal mode-locked fiber lasers based on in-cavity manipulation. Subsequently, the applications of out-of-cavity manipulation in parameter control of laser beam (Fig. 10), dynamics in fibers (Fig. 11), and multi-dimensional information reconstruction of the light field (Fig. 13) are elaborated. Finally, we discuss the potential of intelligently-controlled multi-dimensional laser technology in the fields of optical micromanipulation (Fig. 15), laser micromachining (Fig. 17), and laser communication (Fig. 19). Future developments of multi-dimensional laser technologies with intelligent manipulation are discussed, and the possible problems and challenges are also discussed.

Conclusions and Prospects Driven by frontier exploration, intelligent manipulation of multi-dimensional laser technologies based on machine learning tools has become an important foundation for the study of complex physical phenomena and cross-disciplinary problems. With the increasing complexity of multi-dimensional laser systems, new intelligent manipulation techniques should be exploited.

Key words laser optics; laser beam shaping; optical field modulation; machine learning; multi-dimensions