Opto-Electronic Engineering
光 电 工 程
数智光场调控专题

Editorial
2025 年, 第 52 卷, 第 11 期

DOI: 10.12086/oee.2025.250373 CSTR: 32245.14.oee.2025.250373

数智光场调控专题导读

程鑫彬[1,2]，李仲阳[3]，蒲明博[4,5,6]

[1]同济大学物理科学与工程学院，上海 200092；
[2]同济大学精密光学工程技术研究所，先进微结构材料教育部重点实验室，上海市数字光学前沿科学研究基地，上海 200092；
[3]武汉大学电子信息学院，湖北 武汉 430072；
[4]中国科学院光场调控科学技术全国重点实验室，四川 成都 610209；
[5]中国科学院大学材料科学与光电技术学院，北京 100049；
[6]中国科学院光电技术研究所矢量光场研究中心，四川 成都 610209

摘要：数智光场调控技术是在传统光场调控硬件中引入人工智能算法与数字建模所形成的新范式，因其在高维参数搜索、复杂光场重建、智能逆向设计与自适应优化中的独特优势，正成为微纳光子学领域的革命性驱动力。随着人工智能技术的迅速演进，数智光场调控在高效率、多功能与智能化方面展现出前所未有的潜力。基于这一背景，《光电工程》于 2025 年组织了“数智光场调控”专题，共收录 12 篇来稿，包括 8 篇综述和 4 篇原创论文，旨在呈现近年来该领域的重要研究进展与成果，帮助读者深入理解数智光场调控的研究现状、发展趋势及应用前景，并为相关科研人员提供有益的参考与启发。

关键词：数智光场；光场调控；专题
中图分类号：O436.1；O439 **文献标志码：**A

程鑫彬，李仲阳，蒲明博. 数智光场调控专题导读 [J]. 光电工程，2025，**52**(11): 250373
Cheng X B, Li Z Y, Pu M B. Special issue on digital and intelligent optical field manipulation[J]. *Opto-Electron Eng*, 2025, **52**(11): 250373

Special issue on digital and intelligent optical field manipulation

Cheng Xinbin[1,2], Li Zhongyang[3], Pu Mingbo[4,5,6]

[1]School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
[2]Shanghai Frontiers Science Center of Digital Optics, MOE Key Laboratory of Advanced Micro-Structured Materials, Institute of Precision Optical Engineering Tongji University, Shanghai 200092, China;
[3]Electronic Information School, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China;
[4]State Key Laboratory of Optical Field Manipulation Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;
[5]College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
[6]Research Center on Vector Optical Fields, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

收稿日期：2025-11-18；修回日期：2025-11-22；录用日期：2025-11-22；网络出版日期：2025-11-25
版权所有©2025 中国科学院光电技术研究所

Abstract: Digital and intelligent optical field manipulation is a new paradigm that integrates artificial intelligence algorithms and digital modeling into traditional optical field control systems. With its advantages in high-dimensional parameter search, complex field reconstruction, intelligent inverse design, and adaptive optimization, it is becoming an important driving force in micro- and nano-photonics. With the rapid evolution of artificial intelligence, this technology shows great potential for achieving higher efficiency, multifunctional operation, and intelligent control. The special issue on digital and intelligent optical field manipulation has received 12 manuscripts, including 8 review articles and 4 original articles. It aims to present the significant research advances and achievements in this field in recent years, to provide a comprehensive understanding of the current status, developmental trends, and application prospects of digital and intelligent optical field manipulation, and to offer valuable reference and insight for researchers engaged in related disciplines.

Keywords: digital and intelligent optical field; optical field manipulation; special issue

数智光场调控是指基于传统光场调控硬件体系，融合数字建模与智能算法，以数据驱动与智能优化为核心的新范式[1-2]。近年来，数智光场调控在生物医学[3-4]、微纳光学[5-6]、计算成像[7-8]、精密制造[9]等领域呈现出广阔的应用潜力，也是光学领域的前沿研究方向之一。

相比传统光学成像方法主要依赖光场强度与几何相位信息，数智光场调控进一步将波前整形与智能算法深度融合，实现了光场振幅、相位与偏振的多维度协同调控[10]。通过引入衍射神经网络[11-12]、智能逆向设计框架[13]及端到端协同优化等前沿方法，该领域在超大视场成像[14]、高维光场调控[15]及轻量化系统设计[16]等方面取得了重要突破，展现出智能光学设计在精细化和高效化设计方面的巨大潜力。

在此背景下，《光电工程》于 2025 年组织推出了“数智光场调控”专题，旨在系统呈现该领域的最新研究进展、关键技术突破及潜在应用趋势。本期共精选来自中国科学技术大学、哈尔滨工业大学、武汉大学、同济大学、国防科技大学、西北工业大学、湖南大学、浙江工业大学、合肥工业大学、长江大学、湖南工商大学、河北科技大学、四川师范大学、湘潭大学、中国科学院光电技术研究所等高校、科研院所的 12 篇最新研究成果，包括 8 篇综述和 4 篇科研论文，全面展示了数智光场调控的发展脉络与前沿进展。这些成果不仅从理论、方法到器件实现进行了系统梳理与创新探索，也为读者深入了解数智光场调控的研究现状与未来趋势提供了重要参考。

在 8 篇综述论文中，《融合神经网络的超表面设计和光场调控研究进展》总结了神经网络在超表面设计与光场调控领域的最新应用。文章从理论与方法两方面阐释了神经网络赋能超表面以实现精准光场调控的基本机理，并梳理了正向预测、逆向设计、物理驱动建模以及端到端优化四类设计范式的演进路径。该综述不仅为突破传统超表面设计在效率与性能上的瓶颈提供了新的智能化思路，也展示了神经网络驱动的超表面在成像、通信、传感等应用场景中的卓越潜力。《数智光场调控赋能生物医学成像：系统性综述》一文通过 PRISMA 方法论对近十年文献进行了系统筛选与整合，构建了一个统一的技术发展框架，并深入剖析了智能算法与自适应光学融合技术在活体成像、神经科学及临床诊断中的应用图景。文章进一步指出，构建具备实时反馈能力的“闭环智能”光学系统，将是实现下一代自适应成像的关键。《水凝胶微纳结构的动态光场操控》系统梳理了如何利用水凝胶的湿度响应特性实现动态可调的光学器件。文章展示了将水凝胶材料引入纳米薄膜和超构表面的设置，利用其湿度响应的膨胀特性导致的结构与光学性质变化，实现了从光学滤波、气体传感、全息显示、光学模拟计算等一系列可调谐功能，为主动式光子器件提供了新材料解决方案。《大气湍流成像模拟与复原算法研究进展》系统总结了大气湍流成像模拟与复原算法的研究进展。文章剖析了湍流引发图像几何畸变和模糊退化的物理机制，并在此基础上讨论了传统方法到深度学习方法的技术演进路径。该综述为解决复杂环境下稳定成像问题提供了全新思路，并展示了相关技术在提升系统整体性能方面的广阔潜力。《BIC 有源纳米光子器件研究进展》给出了连续谱中的束缚态 (BIC) 在当前多种有源光子学器件中的研究进展。凭借其增强

光-物质相互作用、可调控涡旋手性辐射方向等多样光场特性，以及能够与其他物理效应耦合以实现复杂光场精确操控的优势，BIC 有望进一步强化与拓展现有微纳光子器件的功能。在保持高 Q 因子的同时，BIC 可支持更复杂的光场输出，为新一代高性能与多功能光子器件的设计提供重要支撑。《基于空间光调制器的飞秒激光光场调制技术及其在增材制造中的应用》综述了飞秒激光结合空间光调制器实现光场调制的技术原理、系统构成、算法方法及其在微纳结构制造与生物学中的多样化应用。通过在加工系统中引入空间光调制器，可实现加工模式的转变，极大地提升了复杂微纳结构的制备效率，推动了飞秒激光加工技术在微纳器件制备领域的持续发展。《基于直接二进制搜索算法的硅基片上光子器件》系统介绍了直接二进制搜索算法在硅基光子器件逆向设计中的原理、改进策略和在多物理维度调控中的应用。《超表面逆向设计》则围绕优化算法与深度学习两大类逆向设计方法展开，阐述其理论基础、适用范围及优势与局限，并对未来逆向设计方法的融合发展与智能化趋势进行了展望。

4 篇原创论文则将作者们的最新科研成果展现给了读者们。《衍射神经网络中修正线性单元非线性函数的理论研究》构建了一个衍射神经网络模型，并表明在衍射神经网络中，非线性函数的形式、位置与网络深度之间的复杂耦合关系，为衍射网络中集成物理非线性材料提供理论支撑。《深度学习辅助的二次相位超透镜实现 170°视场高质量成像》通过二次相位超透镜与 U-Net 图像协同设计，融合超透镜的前端光学设计和神经网络的后端图像处理，在不增加光学复杂度下实现了 170°超大视场的高质量成像。《EBI-DNN 驱动的多通道超表面设计与优化》构建 EBI-DNN 双向神经网络框架，将前向预测网络与逆向预测网络深度融合，实现超表面快速、精准、自动化逆向设置，是实现复杂超表面设计的有力工具。《基于改进遗传算法优化的大视角单透镜设计》使用改进的维纳逆卷积端到端单透镜成像系统，通过引入自适应交叉变异算子和多目标适应度函数，在保证成像质量的同时显著提升了系统的实时性和实用性，为轻量化、高性能系统设计提供新思路。

本专题所汇集的论文全面展示了数智光场调控在理论建构、方法创新与器件应用等方面的前沿进展。从生物医学成像、自适应光学、湍流复原，到超表面智能设计、飞秒激光加工，相关研究不仅系统总结了关键技术路径，也展示了智能算法与光场调控深度融合带来的突破性成果。未来，随着神经网络模型、加工和检测技术的不断进步，数智光场调控有望在更多领域发挥重要作用，为新一代光学技术和工程应用开辟更广阔的发展空间。

希望本次推出的“数智光场调控”专题能够集中呈现该领域的新理念、新方法与新应用，为广大科研工作者提供有益的参考与交流平台，进一步推动数智光场调控技术的发展。期待相关研究不断深化，为科技创新注入持续动力。

参考文献

[1] Luo X G. Multiscale optical field manipulation via planar digital optics[J]. *ACS Photonics*, 2023, **10**(7): 2116−2127.

[2] Zhu S K, Zheng Z H, Meng W J, et al. Harnessing disordered photonics via multi-task learning towards intelligent four-dimensional light field sensors[J]. *PhotoniX*, 2023, **4**(1): 26.

[3] Wang Z Q, Zhu L X, Zhang H, et al. Real-time volumetric reconstruction of biological dynamics with light-field microscopy and deep learning[J]. *Nat Methods*, 2021, **18**(5): 551−556.

[4] Zhu L X, Sun J H, Yi C Q, et al. Adaptive-learning physics-assisted light-field microscopy enables day-long and millisecond-scale super-resolution imaging of 3D subcellular dynamics[J]. *Nat Commun*, 2025, **16**(1): 7132.

[5] Li L L, Zhao H T, Liu C, et al. Intelligent metasurfaces: control, communication and computing[J]. *eLight*, 2022, **2**(1): 7.

[6] Zhao Y, Wang HJ, Huang T, et al. Tripolarization and multimode holography via a neural metasurface for high-capacity security encryption[J]. *Intell Opto-Electron*, 2025, **1**: 250001

[7] Li J X, Li Y H, Gan T Y, et al. All-optical complex field imaging using diffractive processors[J]. *Light Sci Appl*, 2024, **13**(1): 120.

[8] Yang K, Liu F, Liang SY et al. Data-driven polarimetric imaging: a review[J]. *Opto-Electron Sci*, 2024, **3**: 230042

[9] Oropeza-Gomez G A, Orozco-López J O, Casillas-Rodríguez F J, et al. High-precision spatial filtering with AI-driven control and multicolor laser testing for interferometric application[J]. *Integration*, 2025, **103**: 102406.

[10] Zhou S Y, Li L, Gao L L, et al. Hybrid strategy in compact tailoring of multiple degrees-of-freedom toward high-dimensional photonics[J]. *Light Sci Appl*, 2025, **14**(1): 167.

[11] He C, Zhao D, Fan F, et al. Pluggable multitask diffractive neural networks based on cascaded metasurfaces[J]. *Opto-Electron Adv*, 2024, **7**: 230005

[12] Han YN, Xiang SY, Song ZW, et al. Pattern recognition in multi-synaptic photonic spiking neural networks based on a DFB-SA chip[J]. *Opto-Electron Sci*, 2023, **2**: 230021

[13] Ma TG, Wang HZ, Guo LJ. OptoGPT: A foundation model for

inverse design in optical multilayer thin film structures[J]. *Opto-Electron Adv*, 2024, **7**: 240062

[14] Zhu L, Soldevila F, Moretti C, et al. Large field-of-view non-invasive imaging through scattering layers using fluctuating random illumination[J]. *Nat Commun*, 2022, **13**(1): 1447.

[15] Gu Z J, Shi Y, Zhu Z M, et al. All-integrated multidimensional optical sensing with a photonic neuromorphic processor[J]. *Sci Adv*, 2025, **11**(22): eadu7277.

[16] Xue Y J, Davison I G, Boas D A, et al. Single-shot 3D wide-field fluorescence imaging with a computational miniature mesoscope[J]. *Sci Adv*, 2020, **6**(43): eabb7508.

作者简介

程鑫彬 (1980-)，同济大学教授、博士生导师，物理科学与工程学院院长，同济大学精密光学工程技术研究所所长，国家杰出青年科学基金获得者，国家科技创新团队负责人，国家级计量创新团队负责人。致力于纳米计量和微纳光学的交叉研究，以第一/通讯作者在 *eLight*、*Light: Science & Applications*、*Opto-Electronic Advances*、*Optica*、*Physical Review Letters*、*Science Advances*、*Nature Communications* 等期刊发表文章 50 余篇，获得国家技术发明奖二等奖等荣誉。担任光电期刊集群副主编，*Fundamental Research* 等期刊编委，ISO 国际标准化组织光学材料与器件委员会委员，中国计量测试学会理事。

蒲明博 (1986-)，中国科学院光电技术研究所研究员、博士生导师、学术委员会委员，国家优秀青年科学基金项目获得者。长期致力于亚波长数字光学、矢量光场调控、光学结构功能材料智能设计和应用，在 *Nature Communications*、*Science Advances*、*Physical Review Letters*、*Advanced Materials* 等学术期刊上发表 SCI 论文百余篇。获国家自然科学奖二等奖、四川省科技进步特等奖等荣誉。担任光电期刊集群副主编。

E-mail：pmb@ioe.ac.cn

李仲阳 (1988-)，武汉大学教授、博士生导师，国家高层次青年人才，国家重点研发计划首席青年科学家，湖北省杰出青年。博士毕业于美国西北大学，长期致力于超构光芯片实现多维光信息加密存储与显示技术方面的研究，以第一/通讯作者在权威学术期刊 *Science*、*Nature Communications*、*Advanced Materials*、*Optica*、*ACS Nano* 等期刊发表论文 50 余篇，申请或授权发明专利 40 余项。担任 IEEE Wuhan Section 副主席等学术任职，曾获 SPIE 光学与光子学教育奖、湖北省向上向善好青年、国家优秀自费留学生“特别优秀奖”等。

E-mail：zhongyangli@whu.edu.cn