

飞秒激光治疗白内障技术的研究进展

张道森¹, 曹海峰¹, 吴明星², 王月虹¹, 赵刚平³, 周 辉¹

引用: 张道森, 曹海峰, 吴明星, 等. 飞秒激光治疗白内障技术的研究进展. 国际眼科杂志, 2025, 25(9): 1436-1440.

基金项目: 季华实验室科研项目 (No.X200011TK200)
作者单位: ¹ (528200) 中国广东省佛山市, 季华实验室;
² (510080) 中国广东省广州市, 中山大学中山眼科中心;
³ (528000) 中国广东省佛山市, 佛山华夏眼科医院
作者简介: 张道森, 硕士, 中级工程师, 研究方向: 光学工程、生物医学、眼科医疗设备。
通讯作者: 周辉, 博士, 研究员, 研究方向: 医疗器械、人工智能、医学影像、临床医学. mhzhou01@126.com
收稿日期: 2025-04-07 修回日期: 2025-07-21

摘要
白内障是全球范围内主要的致盲性眼病, 手术是治疗白内障最有效的方法。随着飞秒激光技术和眼科手术设备的发展, 飞秒激光系统在白内障手术领域的应用日益广泛。它可以完成角膜切口、晶状体前囊切开、晶状体碎核以及弓状切口等关键手术操作。相较于传统白内障手术, 飞秒激光治疗白内障技术 (FLACS) 在精准性、安全性和术后视觉质量方面有很大的优势, 也赢得了越来越多临床医生的认可。然而, 当前 FLACS 的核心技术和设备被欧美国家垄断, 我国在该领域的研究起步相对较晚。文章系统梳理了 FLACS 的研究进展, 重点介绍飞秒激光技术、光学相干层析技术 (OCT)、人工智能的应用以及临床应用进展, 旨在为我国眼科医疗技术的发展提供理论依据与实践参考。
关键词: 白内障; 飞秒激光; 光学相干层析技术; 人工智能
DOI: 10.3980/j.issn.1672-5123.2025.9.09

Research progress of technology in femtosecond laser assisted cataract surgery

Zhang Daosen¹, Cao Haifeng¹, Wu Mingxing², Wang Yuehong¹, Zhao Gangping³, Zhou Hui¹

Foundation item: Research Project of Jihua Laboratory (No. X200011TK200)
¹Jihua Laboratory, Foshan 528200, Guangdong Province, China;
²Zhongshan Ophthalmic Center, Sun Yat - sen University, Guangzhou 510080, Guangdong Province, China; ³Foshan Huaxia Eye Hospital, Foshan 528000, Guangdong Province, China
Correspondence to: Zhou Hui. Jihua Laboratory, Foshan 528200, Guangdong Province, China. mhzhou01@126.com
Received: 2025-04-07 Accepted: 2025-07-21

Abstract

• Cataract is the world's leading cause of blindness, and

surgery is the most effective treatment for cataract. With the development of femtosecond laser technology and ophthalmic surgical equipment, the application of femtosecond laser systems in cataract surgery is becoming increasingly widespread. It can be used in cataract surgery for corneal incisions, anterior capsulotomy, lens fragmentation, arcuate incisions and other key operations. Compared to traditional surgery, femtosecond laser assisted cataract surgery (FLACS) offers significant advantages in precision, safety and postoperative visual outcomes. Its clinical benefits have garnered growing recognition among ophthalmologists. However, the key technologies and high - precision equipment for FLACS remain predominantly controlled by Western countries. In China, the research in this field began later. This article reviews the technological advancements in FLACS, with a focus on femtosecond laser technology, optical coherence tomography (OCT), artificial intelligence, and clinical application progress. The objective is to provide theoretical foundations and practical insights for the development of ophthalmic medical technology in China.

• **KEYWORDS:** cataract; femtosecond laser; optical coherence tomography; artificial intelligence

Citation: Zhang DS, Cao HF, Wu MX, et al. Research progress of technology in femtosecond laser assisted cataract surgery. Guoji Yanke Zazhi (Int Eye Sci), 2025, 25(9): 1436-1440.

0 引言

白内障是全球范围内导致失明和视力损害的主要眼病之一, 其发病率随着年龄的增长而显著增高^[1], 随着人口老龄化程度加深, 白内障患者人数不断扩大。近年来, 得益于飞秒激光技术的飞速发展, 飞秒激光治疗白内障的手术方法得到广泛应用和推广。相较于传统的白内障手术方式, 飞秒激光治疗白内障技术 (femtosecond laser assisted cataract surgery, FLACS) 展现出了诸多显著优势, 如更高的精准度、可控性、更短的恢复周期, 以及更少的术后副作用。深入研究 FLACS 的技术进展, 对提升手术的安全性和有效性, 改善患者的术后视觉健康状况, 促进我国 FLACS 及设备的创新发展, 具有极其重要的意义, 本文对 FLACS 的研究进展进行介绍。

1 飞秒激光简介

飞秒激光是一种以脉冲形式运转的激光, 其脉冲持续时间极为短暂, 1 飞秒等于 10^{-15} s。它是在传统激光技术基础上发展起来的, 通过锁模技术获得超短激光脉冲, 然后借助啁啾脉冲放大技术得到高能量的激光脉冲。飞秒激光以超短脉冲时间和高峰值功率的独特优势, 在众多领

域得到了广泛应用,特别是在眼科医疗领域。目前飞秒激光已应用于眼角膜屈光手术^[2]、白内障晶状体摘除手术^[3]、青光眼手术^[4]、近视矫治^[5]和角膜移植^[6]等眼科手术中。

2 FLACS 的基本原理

飞秒激光经过整形聚焦后能量密度极高,形成强大的电场。当该电场能量大于介电击穿阈值时,使原子周围的电子离开原子核而成为等离子体。生物组织中的自由电子通过多光子吸收引发电子雪崩效应,形成等离子体微腔^[7]。该微腔在纳秒时间内发生绝热膨胀与溃灭,产生高速冲击波,诱导局部产生剪切应力^[8]。当应力大于组织抗拉强度时,会产生光致破裂作用,实现亚细胞级的组织切割。这种过程可以由不断的激光脉冲重复而完成,形成精密的生物组织切割效果。飞秒激光的脉冲持续时间远小于生物组织热弛豫时间,将热损伤限制在微米量级空间内,热损伤极小,实现所谓的“冷切割”。人眼晶状体组织的含水量大于60%,对1 030~1 060 nm波段的近红外光有较高的吸收,而且光散射相对较低,穿透能力较强,因此该波段的飞秒激光更适合白内障的治疗。

飞秒激光在白内障手术中的临床应用包括角膜切口、晶状体前囊切开、晶状体碎核以及弓状切口等^[9]。与传统超声乳化白内障手术(conventional phacoemulsification cataract surgery, CPCS)相比,其优势在于能更精确地控制切割的深度、位置,避免传统手术中手术刀所带来的误差和风险;减少手术中对角膜内皮等组织的损伤,降低术中及术后并发症的发生率^[10-12]。FLACS手术时间短,可以减少患者术中不适,加快术后恢复并改善术后视觉质量。

3 FLACS 的发展历程

1975年,Krasnov^[13]率先采用调Q纳秒激光进行晶状体穿刺术治疗软性白内障,该研究证实调Q纳秒激光能够有效地击穿晶状体囊膜,为白内障的治疗开辟新思路。1995年,Gwon等^[14]使用1 053 nm的Nd:YLF皮秒激光器在兔子眼睛中进行实验,结果研究表明,皮秒激光能够安全且有效地消融正常及混浊的晶状体,为后续临床研究奠定基础。1998年,Kurtz等^[15]首次将飞秒激光用于动物眼角膜屈光手术中,与皮秒激光的实验结果相比,飞秒激光的手术效果更好。这开启了飞秒激光在眼科应用的新篇章,飞秒激光以其独特的优势展现了它在眼科手术中的巨大潜力。2009年,Nagy等^[16]将飞秒激光首次应用于白内障手术中,实验结果表明飞秒激光的撕囊精度更高,可以减少超声乳化能量和时间,该方法是安全、有效的,这标志着飞秒激光正式用于白内障治疗领域。2015年,Eom等^[17]将高速扫描的扫频源光学相干层析(sweep source optical coherence tomography, SS-OCT)系统和飞秒激光器相结合,建立了一套激光治疗白内障手术系统,OCT的轴向分辨率为8 μm ,横向分辨率为10 μm ,成像深度超过14 mm。该系统可实时监控整个白内障手术过程,为医生提供更准确、详细的手术信息,进一步提高了手术的效率和安全性。

在国内,飞秒激光技术在眼科手术中的应用研究起步比较晚。2006年,姜发纲等^[18]使用脉冲宽度为50 fs、中心波长为800 nm的飞秒激光在兔眼巩膜上进行实验,实验结果表明飞秒激光能够在兔眼巩膜上完成打孔,蛇形扫描和线性切割三种方式的光离解作用,预示其在青光眼治疗中的潜在应用价值。2009年,侯文博等^[19]搭建了飞秒

激光角膜切削实验平台,使用不同能量的飞秒激光并在兔眼角膜上进行切削实验,电镜结果表明飞秒激光切屑的表面平整、光滑,验证了飞秒激光辅助深板层切削的突出优势。2015年,刘一州等^[20]自主搭建的飞秒光纤激光器,实现19.1 MHz、109 fs、4 W、73.2 nJ的激光输出,并在猪眼角膜上实现爆破打孔,最小孔径约30 μm ,证明了自主搭建的飞秒光纤激光器在眼角膜制瓣上应用的可能性。2018年,张佳莹等^[21]利用国产自主研发的高平均功率钛宝石飞秒激光器开展兔眼晶状体切割实验,基于该激光器优异的性能取得了良好的实验效果,可以稳定产生晶状体纤维组织切割效果。2020年,苏州大学陈聪等^[22]搭建出一套由光学相干层析技术(optical coherence tomography, OCT)系统、相机系统和激光切割组建的飞秒激光辅助白内障手术系统,SS-OCT系统成像深度10 mm、轴向分辨率<20 μm ,该套系统可以在图像引导下完成样品指定位置、指定深度的轨迹切割。这一系列的研究表明,飞秒激光技术在眼科手术中的应用经历了从初步尝试到广泛应用的发展历程。随着技术的不断进步和完善,飞秒激光在白内障手术等眼科手术中的作用将更加凸显。

4 FLACS 系统的现状

随着技术革新与进步,越来越多的临床试验结果表明,飞秒激光在白内障手术治疗中是安全的、有效的。这不仅给众多的白内障患者带来了新的希望和更好的治疗选择,也为眼科医疗设备领域的发展注入了新的活力。因此,许多公司开始致力于开发FLACS系统。目前,市场上商业化的FLACS系统均来自于欧美国家^[23-24]。

在国内,科研单位和医疗设备公司也积极投入飞秒激光眼科手术设备的开发中。季华实验室和广东麦特维逊医学研究发展有限公司联合开发了一款新型双频域OCT实时图像引导的飞秒激光眼科手术治疗仪,已经进入医疗器械产品注册通道。相较于欧美同类产品,该设备采用风冷一体化设计的全光纤飞秒激光器,脉冲重复频率250 kHz,单脉冲能量最大可达20 μJ ,相比传统的半导体泵浦固体激光器,该设备具有结构紧凑、性能稳定可靠等优点。其手术导航系统采用全新设计的双频域OCT系统,组织中成像深度大于8 mm,轴向分辨可达5 μm ,扫描速度大于100 kHz,相比同类产品,该设备在成像深度和分辨率方面具有显著优势,能够实时动态监测手术过程。

5 FLACS 系统的关键技术

FLACS系统通常由飞秒激光系统、手术导航系统、光路传输系统以及控制系统等构成,其中飞秒激光系统和手术导航技术是飞秒激光手术系统的核心技术。

5.1 飞秒激光技术 飞秒激光器在白内障治疗中扮演着“手术刀”的关键角色,其技术参数与稳定性至关重要。脉冲能量强度直接决定能否有效切开组织,不同组织部位需不同脉冲能量;脉冲重复频率则影响手术切割效率;而激光器的稳定性关乎手术安全。现有的商业化设备多采用半导体泵浦的固体飞秒激光器,单脉冲能量约10 μJ ,重复频率从几十kHz到几百kHz,甚至达到MHz。然而固体飞秒激光器结构复杂、体积大且对工作环境要求高,不利于设备集成。近年来,随着技术发展,光纤飞秒激光器因稳定性好、成本低且易于集成等优点,越来越多地应用于激光手术设备中。

中国科学院连富强等^[25]设计的用于眼科手术的高稳定性、高质量脉冲压缩飞秒光纤主振荡功率放大系统,重

复频率 19.4 MHz、平均功率 1.2 W、脉冲宽度 183 fs 的激光脉冲,是国内首台用于动物角膜实验的有自主知识产权的飞秒光纤激光器。北京大学周耕稷^[26]设计了眼科诊疗所需飞秒光纤激光器,并搭建脉冲放大系统,获得单脉冲能量 15 μ J、重复频率 20 kHz 的脉冲激光。天津大学刘博文等^[27]研究了基于掺 Yb³⁺ 单偏振大模场面积光子晶体光纤的高单脉冲能量光纤飞秒激光放大器,最后得到 124 fs 的激光脉冲,单脉冲能量 1.56 μ J,对应峰值功率 12.6 MW。上海理工大学周锋全等^[28]开发的一种新的高功率、便携式 1 030 nm 光纤飞秒激光系统,平均功率 1.34 W、重复频率 300 kHz、脉冲宽度 202 fs,对应单脉冲能量 4.5 μ J、峰值功 2 MW。整套系统便携稳定且成本低,利于生产应用。北京工业大学洪畅等^[29]搭建一套高单脉冲能量、高峰值功率全光纤飞秒系统,单脉冲能量 27 μ J、脉冲宽度 172 fs、峰值功率 13 MW,系统仅压缩器和主放大泵浦耦合存在空间结构光路,兼顾了能量、功率、稳定性与集成性。

我国工业级飞秒激光器技术已逐步缩小与国外先进水平的差距,但医用飞秒激光设备仍存在短板,主要原因是医疗领域的应用经验不足,缺乏数据积累。随着医用飞秒激光器技术的提升,正朝着高稳定性、高质量、高集成度、智能化^[30]、小型化、低成本的方向快速发展,为国产高端眼科设备的研发奠定基础。

5.2 OCT 技术 在现有的商业化 FLACS 设备中,除了 LENSAR 采用基于 Scheimpflug 的三维共焦结构光自动生物成像系统,其他几款设备都采用 OCT 技术作为激光手术导航系统^[7]。OCT 技术是一种非接触式的断层成像技术,该技术基于低相干光的干涉原理,通过测量组织中后向散射光的干涉信号获取被测物内部结构信息,具有非侵入、速度快、分辨率高等优点,在临床与科学研究中获得了广泛应用。

OCT 技术根据其发展过程,可以分为时域 OCT 技术和频域 OCT。频域 OCT 根据宽带光源类型,又分为谱域光学相干层析 (spectral domain optical coherence tomography, SD-OCT) 和 SS-OCT。1991 年 Huang 等^[31]首次将研制的 OCT 用于眼科测量,并获得了清晰的眼底视网膜成像。在 1995 年 Fercher 等^[32]提出了频域 OCT 的概念,开始从时域 OCT 转为频域 OCT。Chinn 等^[33]使用波长可协调激光取代了宽带光源,并用光电探测器替换了成像光谱仪,搭建了 SS-OCT 系统。Li 等^[34]使用 SS-OCT 开发了一套手术显微镜集成 OCT 系统对离体兔眼进行青光眼手术引导,轴向分辨率 7.6 μ m (在空气中)。为实现白内障手术导航需求,苏州大学沈超逸^[35]设计了一套 1 310 nm 的 SS-OCT 系统,在空气中成像深度可达 17 mm 以上,纵向分辨率在 13.23 μ m,完成了白内障手术中指定手术部位的不同模式成像及参数获取。任天慧等^[36]基于 SS-OCT 技术研制了全眼组织参数测量系统,在空气中的理论纵向分辨 12.4 μ m,理论最大探测深度 46.69 mm,实验结果与商业化设备 IOL Master 700 的测量结果具有一致性。季华实验室团队开发的双频域 OCT 系统,将 SD-OCT 系统和 SS-OCT 系统相结合,采用图像深度融合算法可实现眼前节实时成像,组织中成像深度大于 8 mm,轴向分辨率可达 5 μ m。Chen 等^[37]利用定制化的 SS-OCT 构建光学相干弹性成像测量系统,用于晶状体生物力学原位测量,量化白内障发展过程中晶状体弹性的损失情况。

目前,随着 OCT 技术的发展,国内多个团队和公司已

在 OCT 技术领域取得了显著进展,其性能在重复性和稳定性方面已可与国外同类设备相媲美^[38]。

6 人工智能在 FLACS 中的应用

近年来,人工智能 (artificial intelligence, AI) 发展迅速, AI 与医疗技术的深度融合已成为推动现代医学进步的重要力量。在眼科白内障诊疗领域, AI 的应用也越来越广泛。在白内障术前检测中,将获得的白内障图像信息作为训练集,结合深度学习算法, AI 可以对白内障进行自动检测和分级^[39]。根据白内障的不同核硬度等级,可以在手术过程中优化调整飞秒激光的脉冲能量,从而在保证手术效果的同时,减少手术损伤。AI 可用于人工晶状体屈光度计算^[40],使人工晶状体的参数达到更高的精确度,进而选择更合适的人工晶状体植入,从而改善患者白内障术后的屈光效果。AI 可以预测白内障术后人工晶状体的位置, Xin 等^[41]提出基于 OCT 图像结合深度学习算法,量化人工晶状体空间位置。AI 还能用于白内障术后视力预测, Wei 等^[42]利用 OCT 技术结合深度学习算法预测白内障术后高度近视患者的视力。

AI 作为一种强大的机器学习技术,能够通过分析大量的医疗影像数据和手术结果,优化 FLACS 手术参数。AI 技术结合实时追踪技术和深度学习算法,可以为白内障手术过程中提供技术支持。Morita 等^[43]提出了一种对白内障手术过程的实时自动分析系统,利用神经网络模型技术对连续环形撕囊、核摘除及其他白内障手术阶段进行实时自动分析。赵文涛^[44]开发了基于深度学习的白内障手术导航系统,可以完成眼球中心定位和眼球旋转角度测量。结合患者术前手术规划信息,可以实现一系列的白内障手术导航功能。

目前 AI 技术在白内障手术中的应用主要集中在人工晶状体屈光度计算、术前诊断、术中影像数据分析、术后并发症预测等方面^[45],在 FLACS 中的应用研究较少,但已经有一些厂商开始将 AI 技术融入到 FLACS 系统中。在 2024 年视觉与眼科研究协会中 (Association for Research in Vision and Ophthalmology, ARVO), LENSAR 负责人表示将深度学习模型整合到下一代飞秒激光系统中。

AI 技术在 FLACS 技术中的应用,不仅提高了手术的精确性和安全性,也为患者带来了更加个性化的治疗体验。未来,随着 AI 技术的不断发展和完善,其在 FLACS 中的应用将更加广泛深入,尤其是在手术方案的智能化设计和自动化操作方面。

7 FLACS 的临床应用进展

飞秒激光技术在白内障手术中的临床应用包括角膜切口、晶状体前囊切开、晶状体碎核以及弓状切口等。与 CPCS 相比, FLACS 在手术并发症和术后视觉质量方面有一定的优势。Song 等^[46]统计近几年的白内障手术数据,结果表明:术后 1 wk, 12 mo 后, FLACS 组的裸眼远视力优于 CPCS 组; FLACS 能够减少超声乳化时间和能量,减少角膜内皮细胞丢失; FLACS 组人工晶状体偏心的发生率低于 CPCS 组。但该文章仍然存在一些局限性,需要更多的样本量、更好的随机试验方案和更长的随访时间,来验证 FLACS 的安全性和有效性。

飞秒激光技术通过精准控制激光的扫描方式,能够制作出三平面结构的角膜切口,比传统的手工单平面切口结构稳定性和安全性更高。Uy 等^[47]的研究显示,在白内障手术中,飞秒激光制作的角膜切口只有 22.6% 需要前房改

造和切口补水,远高于手工切口的 77.4%,飞秒激光组的切口密封性优于手工组,术后愈合效果更佳。前囊膜撕囊是白内障手术的关键步骤之一。FLACS 系统通常集成瞳孔识别技术,能够精准地识别瞳孔大小和位置,进而准确地引导飞秒激光对前囊膜进行切割,提升手术质量。Zhu 等^[48]的临床研究表明,与 CPCS 相比,FLACS 能够有效降低前囊膜撕裂的风险;飞秒激光撕囊更精准,囊膜切口更圆,直径更稳定可控,人工晶状体的居中效果更佳。在超声碎核过程中,超声能量可能对角膜内皮细胞造成损伤,而飞秒激光实现的“冷切割”可以有效降低这种损伤。Assaf 等^[49]的研究指出,飞秒激光对晶状体碎核后可以降低有效超声乳化时间;在中等密度硬核(Ⅲ级和Ⅳ级)中,FLACS 平均有效超声乳化时间为 22.37 ± 6.82 s,低于 CPCS 的 30.34 ± 6.2 s,降低效果明显。在国内,闫军等^[50]也做了 FLACS 治疗硬核白内障(Ⅳ-Ⅴ级)的临床效果分析,试验结果显示,FLACS 组的平均超声功率 $15.15\% \pm 2.48\%$,低于 CPCS 组的 $19.74\% \pm 3.08\%$;实际超声乳化时间,FLACS 组为 63.31 ± 9.52 s,低于 CPCS 组的 81.36 ± 10.71 s,FLACS 组术后的视力改善优于 CPCS 组。

散光是眼科常见疾病,也是白内障手术后可能出现的并发症,角膜松解切口可用于纠正部分角膜散光。Hu 等^[51]研究了对称弧形切口矫正角膜散光在飞秒激光白内障手术中的效果,实验证明飞秒激光制作的角膜松解切口可以有效矫正散光。此外,还可通过 FLACS 植入散光矫正型人工晶状体来解决散光问题^[52]。在高度近视合并白内障的手术中,FLACS 同样表现出安全性和有效性。Zhao 等^[53]研究表明,FLACS 治疗高度近视合并白内障不仅能缩短有效超声乳化时间,而且在促进角膜、黄斑、脉络膜厚度恢复方面更具优势。对于青光眼患者,FLACS 也是一种有效的手段。Alvarez-Ascencio 等^[54]研究显示,FLACS 在早期、中期的青光眼患者中具有显著效果。对于复杂的白内障病例,FLACS 也是一种有效的手术技术^[55]。

随着 FLACS 的推广,其在白内障手术中的优势得到了越来越多临床医师的认可,但 FLACS 仍存在一些局限性,如禁忌证、并发症^[56]。随着技术的革新,以及对 FLACS 的深入研究,其在白内障手术治疗中的应用范围将会不断拓展,其安全性和有效性将进一步提高。

8 小结与展望

随着社会的发展,对白内障手术提出更高的要求,飞秒激光技术的应用可以提高白内障手术的安全性和手术效果。飞秒激光技术、手术导航系统等也将随着科技的不断发展而不断完善和提高,其适用范围也将不断扩大。但 FLACS 也存在一定的不足,如 FLACS 设备昂贵,普及率低;新技术新设备的使用培训周期长、学习成本高等。目前,国内有一些课题组正在研究 FLACS 系统,通过国产化设备替代,可以大幅度降低手术设备购置成本,提高设备的普及率。未来,设备厂家可以与医院合作建立培训中心,降低眼科医生的学习成本,提高手术技能。随着 AI 等新技术的融入,通过深度学习分析 OCT 等眼科检测设备获取的眼睛组织信息,自动生成最优手术参数,为患者量身定制最佳手术方案,未来可以实现手术全过程的智能化设计和自动化操作,可降低眼科医生的上手操作难度。通过技术创新和跨学科融合,FLACS 将进入一个全新的时代,未来国产化 FLACS 系统与欧美设备一起将为更多白内障患者带来更好的治疗效果和体验。

利益冲突声明: 本文不存在利益冲突。

作者贡献声明: 张道森论文选题与修改,初稿撰写;曹海峰、王月虹文献检索,数据分析;吴明星、赵刚平论文修改及审阅;周辉选题指导,论文修改及审阅。所有作者阅读并同意最终的文本。

参考文献

- [1] Fang R, Yu YF, Li EJ, et al. Global, regional, national burden and gender disparity of cataract: findings from the global burden of disease study 2019. *BMC Public Health*, 2022,22:14491.
- [2] Lin M, Tan H, Chang C. Myopic regression after FS-LASIK and SMILE. *Cornea*, 2024,43(12):1560-1566.
- [3] Castilla-Martinez G, Fernandez-Martinez C, Pardo-Lopez S, et al. FLACS (Femtosecond-Laser-Assisted Cataract Surgery) combined with pupiloplasty in iris-lens coloboma. *Am J Ophthalmol Case Rep*, 2024,34:102039.
- [4] 张燕妮, 刘姗姗, 王继兵. 飞秒激光辅助白内障手术在青光眼治疗中的应用进展. *国际眼科杂志*, 2024,24(8):1254-1259.
- [5] Naujokaitis T, Hallak MK, Blöck L, et al. Refractive outcomes of cataract surgery in patients with intrastromal femtosecond laser treatment of presbyopia (INTRACOR). *J Refract Surg*, 2023,39(10):727-733.
- [6] Schmidinger G, Seiler TG, Donner R. Femtosecond-laser assisted deep anterior lamellar keratoplasty (F-DALK). Cham: Springer International Publishing, 2021:213-222.
- [7] Asshauer T, Latz C, Mirshahi A, et al. Femtosecond lasers for eye surgery applications: historical overview and modern low pulse energy concepts. *Adv Opt Technol*, 2021,10(6):393-408.
- [8] 魏升升, 李勇, 李晶, 等. 飞秒激光在眼科圆锥角膜治疗中的新进展. *中国激光*, 2022,49(15):36-46.
- [9] Kecik M, Schweitzer C. Femtosecond laser-assisted cataract surgery: Update and perspectives. *Front Med*, 2023,10:1131314.
- [10] Kolb CM, Shajari M, Mathys L, et al. Comparison of femtosecond laser-assisted cataract surgery and conventional cataract surgery: a meta-analysis and systematic review. *J Cataract Refract Surg*, 2020,46(8):1075-1085.
- [11] Xu JJ, Chen XY, Wang HL, et al. Safety of femtosecond laser-assisted cataract surgery versus conventional phacoemulsification for cataract: a meta-analysis and systematic review. *Adv Ophthalmol Pract Res*, 2022,2(1):100027.
- [12] Jin EY. Comparison of complication rates between femtosecond laser-assisted cataract surgery and conventional phacoemulsification cataract surgery. *Int J Ophthalmol*, 2023,16(1):156-158.
- [13] Krasnov MM. Laser-phakopuncture in the treatment of soft cataracts. *Br J Ophthalmol*, 1975,59(2):96-98.
- [14] Gwon A, Fankhauser F, Puliafito C, et al. Focal laser photophacoablation of normal and cataractous lenses in rabbits: Preliminary report. *J Cataract Refract Surg*, 1995,21(3):282-286.
- [15] Kurtz RM, Horvath C, Liu HH, et al. Lamellar refractive surgery with scanned intrastromal picosecond and femtosecond laser pulses in animal eyes. *J Refract Surg*, 1998,14(5):541-548.
- [16] Nagy Z, Takacs A, Filkorn T, et al. Initial clinical evaluation of an intraocular femtosecond laser in cataract surgery. *J Refract Surg*, 2009,25(12):1053-1060.
- [17] Eom TJ, Kim CS, Kim BM, et al. High speed optical coherence tomography image guided femtosecond laser cataract surgery system. *Proceedings of the International Conference on Control*, 2015:1234-1237.
- [18] 姜发纲, 杨晓波, 戴能利, 等. 飞秒激光对离体兔巩膜的光离解作用. *中国激光*, 2006,33(12):1689-1693.

[19] 侯文博, 张明昌, 陆培祥, 等. 飞秒激光辅助兔眼角膜深板层切削实验. 中国激光, 2009,36(10):2670-2675.

[20] 刘一州, 崔一凡, 孔梓昀, 等. 角膜屈光手术用飞秒脉冲光纤激光器. 中华眼视光学与视觉科学杂志, 2015,17(7):385-388.

[21] 张佳莹, 汪礼峰, 魏志义, 等. 飞秒激光晶状体切割适用性研究. 中国激光医学杂志, 2018,27(2):144.

[22] 陈聪, 杨帆, 范立成, 等. 图像引导下的飞秒激光白内障手术系统及轨迹验证. 应用激光, 2020,40(4):763-767.

[23] Grewal DS, Schultz T, Basti S, et al. Femtosecond laser-assisted cataract surgery—current status and future directions. Surv Ophthalmol, 2016,61(2):103-131.

[24] Latz C, Asshauer T, Rathjen C, et al. Femtosecond-laser assisted surgery of the eye: overview and impact of the low-energy concept. Micromachines, 2021,12(2):122.

[25] 连富强, 樊仲维, 白振香, 等. 高稳定性、高质量脉冲压缩飞秒光纤激光系统研究. 物理学报, 2015,64(16):164207.

[26] 周耕稷. 眼科诊疗系统所需飞秒光纤激光器设计. 北京大学, 2013.

[27] 刘博文, 胡明列, 宋有建, 等. 微焦耳、百飞秒光子晶体光纤飞秒激光放大器. 中国激光, 2010,37(9):2415-2418.

[28] 周锋全, 袁帅, 郭政儒, 等. 高功率小型光纤飞秒激光放大系统. 激光与光电子学进展, 2018,55(10):103201.

[29] Chang H, Cheng ZC, Sun RY, et al. 172-fs, 27-μJ, Yb-doped all-fiber-integrated chirped pulse amplification system based on parabolic evolution by passive spectral amplitude shaping. Opt Express, 2019,27(23):34103-34112.

[30] 罗超, 义理林, 蒲国庆. 智能技术赋能飞秒激光: 表征与控制. 激光与光电子学进展, 2024,61(1):243-263.

[31] Huang D, Swanson EA, Lin CP, et al. Optical coherence tomography. Science, 1991,254(5035):1178-1181.

[32] Fercher AF, Hitzenberger CK, Kamp G, et al. Measurement of intraocular distances by backscattering spectral interferometry. Opt Commun, 1995,117(1-2):43-48.

[33] Chinn SR, Swanson EA, Fujimoto JG. Optical coherence tomography using a frequency-tunable optical source. Opt Lett, 1997,22(5):340-342.

[34] Li XQ, Wei L, Dong XC, et al. Microscope-integrated optical coherence tomography for image-aided positioning of glaucoma surgery. J Biomed Opt, 2015,20(7):076001.

[35] 沈超逸. 面向飞秒激光白内障手术导航的 OCT 系统设计. 苏州大学, 2019.

[36] 任天慧, 吴洪军, 王立伟, 等. 基于扫频源 OCT 的全眼组织参数测量系统. 医疗卫生装备, 2021,42(3):21-27.

[37] Chen YL, Ye SL, Wang QY, et al. *In situ* assessment of lens elasticity with noncontact optical coherence elastography. Biomed Opt Express, 2022,13(12):6671-6681.

[38] 刘岩. 新型 SS-OCT 眼生物测量设备准确性研究. 温州医科大学, 2023.

[39] 冯媛媛, 王婷, 肖钧, 等. 人工智能在白内障手术治疗和教学中的应用与展望. 眼科学报, 2022,37(3):178-184.

[40] Nemeth G, Kemeny-Beke A, Modis L Jr. Comparison of accuracy of different intraocular lens power calculation methods using artificial intelligence. Eur J Ophthalmol, 2022,32(1):235-241.

[41] Xin C, Bian GB, Zhang HJ, et al. Optical coherence tomography-based deep learning algorithm for quantification of the location of the intraocular lens. Ann Transl Med, 2020,8(14):872.

[42] Wei L, He WW, Wang JR, et al. An optical coherence tomography-based deep learning algorithm for visual acuity prediction of highly myopic eyes after cataract surgery. Front Cell Dev Biol, 2021,9:652848.

[43] Morita S, Tabuchi H, Masumoto H, et al. Real-time extraction of important surgical phases in cataract surgery videos. Sci Rep, 2019,9:16590.

[44] 赵文涛. 基于深度学习的白内障手术导航系统研究. 太原理工大学, 2023.

[45] Ahuja A, Paredes A, Eisel M, et al. Applications of artificial intelligence in cataract surgery: a review. Clin Ophthalmol, 2024,18:2969-2975.

[46] Song XZ, Li L, Zhang XM, et al. Comparing the efficacy and safety between femtosecond laser-assisted cataract surgery and conventional phacoemulsification cataract surgery: systematic review and meta-analysis. Can J Ophthalmol, 2025,60(1):e1-e10.

[47] Uy HS, Shah S, Packer M. Comparison of wound sealability between femtosecond laser-constructed and manual clear corneal incisions in patients undergoing cataract surgery: a pilot study. J Refract Surg, 2017,33(11):744-748.

[48] Zhu Y, Chen X, Chen P, et al. Lens capsule-related complications of femtosecond laser-assisted capsulotomy versus manual capsulorhexis for white cataracts. J Cataract Refract Surg, 2019,45(3):337-342.

[49] Assaf AH, Aly MG, Zaki RG, et al. Femtosecond laser-assisted cataract surgery in soft and hard nuclear cataracts: a comparison of effective phacoemulsification time. Clin Ophthalmol, 2021,15:1095-1100.

[50] 闫军, 赵旭东. 飞秒激光辅助白内障手术治疗硬核白内障. 系统医学, 2021,6(21):121-123,139.

[51] Hu ZX, Cao JG, Ke Y, et al. Symmetrical femtosecond laser arc incision in correcting corneal astigmatism in cataract patients. Int J Ophthalmol, 2023,16(12):1996-2003.

[52] Shen JY, Hua ZX, Zhang LM, et al. Comparison of astigmatism correction and visual outcomes in mix-and-match implantations of trifocal intraocular lenses with femtosecond laser-assisted arcuate keratotomy and contralateral bifocal Toric intraocular lenses. Front Med, 2023,10:1237319.

[53] Zhao LJ, Tan MJ, Zhang JF, et al. Comparative study of FLACS vs conventional phacoemulsification for cataract patients with high myopia. J Cataract Refract Surg, 2024,50(6):624-630.

[54] Alvarez-Ascencio D, Prado-Larrea C, Jimenez-Roman J, et al. Long-term visual field changes after femtosecond laser-assisted cataract surgery in glaucoma patients, case series. Am J Ophthalmol Case Rep, 2021,23:101163.

[55] Larco P, Larco C, Borroni D, et al. Efficacy of femtosecond laser for anterior capsulotomy in complex white cataracts. J Français Ophthalmol, 2023,46(5):501-509.

[56] 中华医学会眼科学分会白内障及人工晶状体学组. 我国飞秒激光辅助白内障摘除手术规范专家共识(2018年). 中华眼科杂志, 2018,54(5):6.