

主编 Zoltán Z. Nagy

主译 赵云娥 黄锦海

飞秒激光辅助白内障手术

FEMTOSECOND LASER-ASSISTED
CATARACT SURGERY

► Facts and Results ◀

飞秒激光辅助白内障手术

Femtosecond Laser-Assisted Cataract Surgery Facts and Results

第5版

主 编 Zoltán Z. Nagy

主 审 王勤美 温州医科大学附属眼视光医院

主 译 赵云娥 黄锦海

副主译 胡 亮

译者(按姓氏笔画排序)

丁锡霞 温州医科大学附属眼视光医院

卢 奕 复旦大学附属眼耳鼻喉科医院

毕宏生 山东中医药大学附属眼科医院

李 明 温州医科大学附属眼视光医院

张 红 天津医科大学眼科医院

张劲松 中国医科大学附属第四医院

张素华 山西省眼科医院

张铭志 汕头大学·香港中文大学联合汕头国际眼科中心

赵云娥 温州医科大学附属眼视光医院

赵陈培 山东省眼科研究所青岛眼科医院

赵银莹 温州医科大学附属眼视光医院

胡 亮 温州医科大学附属眼视光医院

高蓉蓉 温州医科大学附属眼视光医院

黄子旭 河南省立眼科医院/河南省眼科研究所

黄锦海 温州医科大学附属眼视光医院

常平骏 温州医科大学附属眼视光医院

人民卫生出版社

The original English language work:

Femtosecond laser-assisted cataract surgery: facts and results, by Zoltán Z. Nagy, has been published by SLACK, INC.

Thorofare, New Jersey, U. S. A.

Copyright © 2014 All Rights Reserved.

图书在版编目 (CIP) 数据

飞秒激光辅助白内障手术/(匈)佐尔坦·Z. 纳吉 (Zoltan Z. Nagy) 主编; 赵云娥, 黄锦海主译. —北京: 人民卫生出版社, 2017

ISBN 978-7-117-25398-7

I. ①飞… II. ①佐… ②赵… ③黄… III. ①白内障摘除术 IV. ①R779.66

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 285953 号

人卫智网	www.ipmph.com	医学教育、学术、考试、健康, 购书智慧智能综合服务平台
人卫官网	www.pmph.com	人卫官方资讯发布平台

版权所有,侵权必究!

图字:01-2016-3243

飞秒激光辅助白内障手术

主 译: 赵云娥 黄锦海

出版发行: 人民卫生出版社(中继线 010-59780011)

地 址: 北京市朝阳区潘家园南里 19 号

邮 编: 100021

E - mail: pmph@pmph.com

购书热线: 010-59787592 010-59787584 010-65264830

印 刷: 三河市潮河印业有限公司

经 销: 新华书店

开 本: 889×1194 1/16 印张: 9

字 数: 279 千字

版 次: 2018 年 3 月第 1 版 2018 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

标准书号: ISBN 978-7-117-25398-7/R·25399

定 价: 120.00 元

打击盗版举报电话: 010-59787491 E-mail: WQ@pmph.com

(凡属印装质量问题请与本社市场营销中心联系退换)

中文版序

科技的进步促进医疗新技术的飞速发展,现代眼科仪器的持续更新和改进促使现代白内障手术方式和技术的持续创新和发展。飞秒激光因其在眼组织的切割与分离中具有精确性高的优点,近7年来已成功应用于眼科屈光手术领域。

2009年Nagy教授首次报道用LenSx飞秒激光系统辅助进行白内障手术并取得成功,开创了飞秒激光应用于白内障手术的新纪元。与传统超声乳化吸除术相比,飞秒激光辅助的白内障手术在晶状体前囊膜切开、晶状体核裂解及角膜切口制作等方面有着明显的优越性。传统术式采用连续环形撕囊的方法,操作准确性和安全性因医师手术技巧不同而异,故术后人工晶状体移位的程度与发生率也因术者而异;而飞秒激光可以精确量化前囊膜切开这一步骤,通过OCT显像设备进行准确定位,其制作的前囊状切开的位置、大小与形状均具有良好的准确性和可重复性。飞秒激光辅助的白内障手术使白内障手术技术和效果进一步提升。

目前,全世界飞秒激光辅助的白内障手术实施量已经超过700 000例,随着飞秒激光系统应用范围的逐渐扩大,其优良的临床效果已得到验证。LenSx系统于2013年进入我国并应用于临床,全国已有上百家医院开展该手术,但是缺乏相应的参考书籍和专著,因此,及时引进和翻译国外权威著作可以弥补国内这一领域的空白。

本书的主编Zoltán Z. Nagy博士,是匈牙利森梅威思大学的眼科学教授,目前担任森梅威思大学健康科学学院的院长,他成功实施了全球首例飞秒激光辅助的白内障手术,并随后被授予“华林奖”(the Waring Prize)、“凯斯毕尔奖”(the Casebeer Prize)等多项荣誉。Nagy教授及其团队长期从事飞秒激光白内障手术领域的临床和基础研究工作,并取得了丰富的研究成果,近5年来已在国际权威期刊发表飞秒激光白内障手术相关论著20余篇。本书主译赵云娥教授在白内障、屈光手术领域已经开展了近30年的基础研究和临床研究工作,现任中华医学会眼科学分会专家会员,中华医学会眼科学分会白内障学组委员。主持多项国家级、省部级课题,在国际权威期刊IOVS、AJO、JCRS等发表SCI文章20余篇,以及中华眼科杂志、中华眼视光学和视觉科学杂志等文章数十篇。翻译团队成员中既有白内障和屈光手术医生、科研经验丰富的研究人员,又有一线临床工作的年轻医生,他们在付出辛勤汗水的同时也提升了自己的理论水平。

本书总结了Nagy教授及其团队5年来的研究成果,第一部分包含了飞秒激光白内障手术的研究热点和最新研究进展;第二部分则是Nagy教授等人发表的权威论著的合集。每个章节均以原版论著的形式呈现,章节末还附有参考文献,可供感兴趣的读者参阅。此著作不仅有临床研究进展,还包含了相关的基础研究成果,内容新颖、丰富,图文并茂,可供从事本专业和相关学科工作的临床医生和研究生参考,对力求在临床实践中与时俱进、不断创新的眼科医生而言,本书颇值一读。

姚克

2017年12月 于杭州

主 译 简 介



赵云娥,教授、主任医师、硕士研究生导师,现任温州医科大学眼视光学院附属眼视光医院、生物医学工程学院副院长,杭州院区白内障、屈光手术中心主任。任中华医学会眼科学分会专家会员、白内障学组委员、中国女医师协会视光学专业委员会副主任委员、中国医师协会眼科医师委员会白内障学组委员、浙江省康复医学会视觉功能专业委员会委员、温州市医学会眼科学分会委员。

赵云娥教授在我国晶状体病和视觉科学领域已经开展了近 30 年的基础研究和应用研究工作。研究方向主要有:白内障手术精准测量和精准手术方面的研究,屈光性白内障手术的功能学方面的研究,儿童晶状体病的基础和临床研究。在该领域的研究目前处于国内外先进水平,相关研究已在 *Investigative Ophthalmology & Visual Science*、*American Journal of Ophthalmology*、*Journal of Cataract & Refractive Surgery* 等权威专业期刊上发表论文。主持国家自然科学基金、省自然科学基金、省重点研发项目以及其他省部级课题多项,参与国家重点研发项目两项,主持浙江省创新学科儿童晶状体病学。致力于眼视光学的教学和教学改革探索,曾作为主要完成者获国家级教学成果二等奖、浙江省教学成果一等奖、浙江省高等教育教学成果奖二等奖等。开展白内障超声乳化手术技能训练和新进展继续教育项目已持续 10 年,多次在全国眼科年会进行现场手术演示,并开展数千人培训。

主译简介



黄锦海,副主任主治医师、医学博士、硕士研究生导师。现任“国家眼视光工程技术研究中心·眼科和视光仪器评估与应用研究所”副所长,温州医科大学附属眼视光医院临床研究中心副主任,OCULUS 亚太科研培训中心副主任,眼科和视光学新技术评估与应用研究组组长,中国眼科超声委员会委员,中华预防医学会循证预防医学专业委员会循证医学方法学组委员。访美、访澳学者。美国白内障和屈光手术协会(ASCRS)会员,欧洲白内障和屈光手术协会(ESCRS)会员,美国眼科学会(AAO)会员,美国眼科和视觉研究学会(ARVO)会员。PLOS ONE 编委,Ophthalmology、JCRS 等 7 家国际权威眼科杂志专业审稿人。

对屈光手术、眼球生物测量技术、中高端医疗设备进行了大量的试验研究和临床应用评估,完成具有自主知识产权的眼科三维眼前节测量分析仪的研制,首次提出并建立了 SS-OCT 作为新的眼科生物测量技术“金标准”。被美国科学家与工程技术人员名人传记 MARQUIS WHO'S WHO 2015—2016 年第 33 版收录。获浙江省医药卫生科技奖一等奖、温州市科技进步一等奖、“Faculty of 1000 Medicine”优秀 F1000 论文、“国际眼科学学术会议”青年论文奖等奖励。先后主持和参与了国家自然科学基金、“十三五”国家重点研发计划、国家重大行业专项、浙江省卫生厅重大项目等 20 个研究项目,在 NEJM、Lancet、JAMA、BMJ、Ophthalmology 等国内外权威专业核心期刊发表及收录学术论文 110 篇,主编(译)、参编(译)眼科专著 5 部,其中高等教育“十二五”国家级规划教材、卫计委“十三五”国家级规划教材 2 部。

编者名录

Ahmed A. Abdou, MD, PhD (Classic Paper 12)

Vissum Corporation
Alicante, Spain
Ophthalmology Department
Assiut University Hospital
Egypt

Jorge L. Alió, MD, PhD (Classic Papers 2, 7, 12)

Department of Ophthalmology
Universidad Miguel Hernández
Vissum Corporation
Alicante, Spain

Roberto Bellucci, MD (Foreword)

Director of Hospital Ophthalmology
Hospital and University of Verona
Verona, Italy

Zoltán I. Bocskai (Original Chapter 5)

Department of Structural Mechanics
Budapest University of Technology and Economics
Budapest, Hungary

Imre Bojtár, PhD, CSc (Original Chapter 5)

Department of Structural Mechanics
Budapest University of Technology and Economics
Budapest, Hungary

Eric Donnenfeld, MD (Foreword; Classic Papers 2, 9)

Clinical Professor of Ophthalmology
New York University
New York, New York
Trustee
Dartmouth Medical School
Hanover, New Hampshire

Árpád Dunai, MD (Original Chapter 8)

Department of Ophthalmology
Semmelweis University
Budapest, Hungary

Mónika Ecsedy, MD, PhD (Original Chapter 9; Classic Paper 10)

Department of Ophthalmology
Semmelweis University
Budapest, Hungary

8 编者名录

Roberto Fernández-Buenaga, MD (Classic Paper 12)
Vissum Corporation
Alicante, Spain

Tamás Filkorn, MD (Original Chapters 6, 7; Classic Papers 1, 2, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15)
Department of Ophthalmology
Semmelweis University
Budapest, Hungary

Róbert Gergely, MD (Classic Papers 13, 15)
Department of Ophthalmology
Semmelweis University
Budapest, Hungary

Andrea Gyenes, MD (Original Chapter 13; Classic Paper 15)
Department of Ophthalmology
Semmelweis University
Budapest, Hungary

Éva Horváth, MD (Original Chapter 6; Classic Paper 8)
Department of Ophthalmology
Semmelweis University
Budapest, Hungary

Jaime Javaloy, MD, PhD (Classic Paper 12)
Vissum Corporation
Alicante, Spain
Division of Ophthalmology
Universidad Miguel Hernández
Alicante, Spain

Éva Juhász, MD (Original Chapter 13; Classic Paper 14)
Department of Ophthalmology
Semmelweis University
Budapest, Hungary

Tibor Juhasz, PhD, DSc (Original Chapter 1; Classic Paper 2)
Department of Ophthalmology
Semmelweis University
Budapest, Hungary
Department of Ophthalmology
University of California-Irvine
Irvine, California

Zoltán Kiss, PhD (Original Chapter 5)
Department of Polymer Engineering
Budapest University of Technology and Economics
Budapest, Hungary

Michael C. Knorz, MD (Original Chapters 6, 7, 8; Classic Papers 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 14)
Medical Faculty
Mannheim of Heidelberg University
FreeVis LASIK Center
Medical University of Mannheim
Mannheim, Germany

Illés Kovács, MD, PhD (Original Chapters 6, 7, 9, 11; Classic Papers 3, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 15)
Department of Ophthalmology
Semmelweis University
Budapest, Hungary

Kinga Kránitz, MD (Original Chapters 4, 6, 8, 11, 13; Classic Papers 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 13, 15)
Department of Ophthalmology
Semmelweis University
Budapest, Hungary

Ronald R. Krueger, MD, MSE (Foreword)
Professor of Ophthalmology
Lerner College of Medicine of Case Western Reserve University
Medical Director
Department of Refractive Surgery
Cole Eye Institute
Cleveland, Ohio

Kata Miháلتz, MD, PhD (Original Chapter 7; Classic Papers 3, 4, 5, 6, 7, 10, 11)
Department of Ophthalmology
Semmelweis University
Budapest, Hungary

Rudy M. Nuijts, MD, PhD (Classic Paper 9)
University Eye Clinic Maastricht
Maastricht University Medical Centre
Maastricht, The Netherlands

Gábor László Sándor, MD (Original Chapter 5; Classic Papers 5, 9, 14)
Department of Ophthalmology
Semmelweis University
Budapest, Hungary

Melvin Sarayba, MD (Classic Paper 1)
LenSx Lasers Inc
Aliso Viejo, California

Gabor Mark Somfai, MD, PhD (Original Chapter 9)
Department of Ophthalmology
Semmelweis University
Budapest, Hungary

Felipe Soria, MD (Classic Paper 12)
Vissum Corporation
Alicante, Spain

10 编者名录

Andrea Szigeti, MD (Classic Papers 6, 14)
Department of Ophthalmology
Semmelweis University
Budapest, Hungary

Ágnes I. Takács, MD (Original Chapters 5, 6, 7, 13; Classic Papers 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 13, 14, 15)
Department of Ophthalmology
Semmelweis University
Budapest, Hungary

目 录

第一部分 原创章节

第1章	竞争激烈的白内障手术飞秒激光技术	3
第2章	对决飞秒激光辅助的白内障手术	10
第3章	飞秒激光辅助的白内障手术的眼部药理学	19
第4章	飞秒激光前囊膜切开术:术后人工晶状体的定位更好	21
第5章	飞秒激光前囊膜切开术的力学特征	26
第6章	飞秒激光辅助的白内障手术及常规白内障手术术后的人工晶状体计算结果及屈光状态	28
第7章	飞秒激光辅助的白内障手术和常规白内障手术后角膜变化的比较	31
第8章	飞秒激光辅助的透明角膜切口及其对术源性散光的影响	35
第9章	飞秒激光辅助的白内障手术对黄斑的影响	38
第10章	飞秒激光辅助的白内障手术的并发症及其处理	41
第11章	飞秒激光前囊膜切开术对后囊膜混浊发展的影响	48
第12章	Verion 图像导航系统	52
第13章	使用 LenSx 多功能飞秒激光系统制作角膜瓣	57

第二部分 经典论文

经典论文1	飞秒激光辅助的白内障手术的初步临床评估	65
经典论文2	飞秒激光辅助的白内障手术术后眼前节 OCT 成像	71
经典论文3	比较飞秒激光前囊膜切开和手工撕囊术后的 IOL 偏心参数	74
经典论文4	飞秒激光前囊膜切开和手动连续环形撕囊参数及其对人工晶状体偏心的影响	79
经典论文5	Scheimpflug 成像测量手动连续环形撕囊和飞秒激光前囊膜切开术后人工晶状体 倾斜度和偏心度的研究	84
经典论文6	5.5mm 和 6.0mm 直径飞秒激光前囊膜切开术后植入单焦点可调节 IOL 的长期视觉效果和 IOL 位置的对比	88
经典论文7	白内障手术中飞秒激光前囊膜切开术后的眼内像差和光学质量	93
经典论文8	飞秒激光辅助的白内障手术与传统超声乳化白内障手术的人工晶状体度数计算和术后 屈光状态的比较	98
经典论文9	飞秒激光前囊膜切开术对后囊膜混浊发展的影响	103
经典论文10	飞秒激光辅助的白内障手术对黄斑的影响	108
经典论文11	飞秒激光辅助的屈光性白内障手术与传统超声乳化术后中央角膜体积及角膜内皮细胞 计数的比较	113

12 目录

经典论文 12	飞秒激光辅助的白内障切口形态及角膜高阶像差分析	118
经典论文 13	飞秒激光在穿通伤或钝挫伤引起的外伤性白内障中的应用	123
经典论文 14	病例报告:飞秒激光辅助的白内障手术在全层角膜移植术后的应用	126
经典论文 15	飞秒激光辅助的白内障手术在膨胀期白内障继发性青光眼患者中的应用	127
译后记		131

原创章节

竞争激烈的白内障手术

飞秒激光技术

Tibor Juhasz, PhD, DSc

摘 要

在过去几年间,飞秒激光技术在白内障手术中的应用快速发展。这些设备在外形、软件和患者接口方面有所不同,但它们有相同的基本特点。它们都采用三维光学成像模式来确定手术目标的准确位置,且应用飞秒激光脉冲完成手术切口。由于飞秒激光的局部组织效应和最小化的周边组织损伤,飞秒激光在 20 世纪 90 年代初期成为实用技术,其在高精度眼科手术中的价值很快得到关注。由于其相对简单地通过接触镜置于眼球表面进行激光传输,该技术在 20 世纪 90 年代后期首先被尝试应用于飞秒激光角膜手术。在过去 10 年里,这些设备成为许多国家准分子激光手术(LASIK)制作角膜瓣的主要工具。更高精度的成像技术能够越过角膜精确地定位其他组织,如晶状体,这促使了飞秒激光白内障手术的发展。在此章节中,将简要描述飞秒激光白内障手术技术的基本原理和操作特点,并讨论各技术间的异同点。

最近发展的激光技术,如飞秒激光,在眼科手术中获得早期的应用。手术主要利用了飞秒激光光爆破的特性。光爆破是一个基于透明组织离子化的复杂非线性过程^[1]。在无机材料中,组织光爆破开始于激光诱导光学分解,高度聚焦的、瞬时高频的激光脉冲生成高强度电场,从而形成由自由电子和离子混合而成的等离子态。激光生成的热等离子体以超音速向周围组织扩张^[1-5]。随着等离子体扩张减速,超音速光波前移,像一个冲击波穿过组织。这个冲击波随着传播损失能量和速度,降为普通的声波并最终消散^[6]。相较于局部的热扩散时间常数,等离子体传热扩张发生在一个非常短时间内,因此限制了热损伤。等离子体在冷却过程中会蒸发掉小部分组织,最终形成一个空泡。这个空泡主要由 CO_2 、 N_2 和 H_2O 构成,这些可以从组织扩散出去^[7]。

Nd:YAG 纳秒脉冲激光(钕铝石榴石激光)光爆破在 20 世纪 80 年代早期已经被临床广泛地应用在后囊膜切开术、深层巩膜切开术方面^[8]。由于纳秒脉冲激光的持续时间和高能量阈值,这些手术会产生相对较大的周围组织损伤。激光-组织交互作用的研究表明,当脉冲持续时间缩短到几百飞秒范围内^[9],光爆破阈值(和组织内累积的激光能量值)可以明显地减小。激光脉冲能量的减少导致更小的冲击波和空泡。切口的制作是通过扫描激光脉冲的焦点,将相邻的空泡融合,从而形成组织裂解。飞秒激光光爆破,明显地降低了空泡大小,形成了更精准的切口,而冲击波范围减小后更重要的结果是对周边组织损伤的最小化。此外,小型二极管泵浦飞秒激光的发展,例如基于 Nd:玻璃和镱的激光晶体,在眼科手术领域展现出长远的商业发展潜力^[10]。

眼科飞秒激光的操作原理

白内障摘除联合人工晶状体植入手术是目前世界上最常见的眼科手术,也是最常见的用于矫正屈光不正的眼科手术,手术量更是角膜屈光手术的5倍以上^[11]。在发达国家,超声乳化手术是白内障手术的主流术式,占比超过90%^[12,13]。虽然最近晶状体(IOL)技术有一定的发展,然而在过去二十年里,包括角膜切口的制作,撕囊和超声乳化劈核在内的最基本的超声乳化术步骤仍大致保持不变。

尽管有很高的成功率,但每个手工步骤在安全和效率方面仍有改善的空间。例如,手工撕囊有近1%概率造成囊膜破裂以及有限的撕囊直径预测性,这些因素都会影响到人工晶状体的居中性、术后前房深度及后囊膜混浊发生率^[14-18]。尽管有证据表明,与传统超声乳化技术相比,劈核技术可以减少超声能量的使用,但是充满挑战的劈核技术难度阻碍了它的广泛应用^[18]。

精密的飞秒激光技术可应用于白内障手术的各个步骤^[9,19-22]。为了更深刻地理解白内障飞秒激光技术的原理,简单回顾角膜屈光手术中飞秒激光的特性是非常有必要的,因为它的发展要早于白内障飞秒激光技术。

一、角膜飞秒激光操作原理

角膜成为应用飞秒激光手术的首个靶组织,因为它位于眼表,无血管,中心厚度只有500~600 μm ,故角膜能够用可忽略的非线性效应传递飞秒脉冲。近红外线波段的飞秒激光应用没有任何限制,角膜在小于1.2 μm 波长的近红外线波段有高度的透光度。

图1角膜飞秒激光的结构框架图。最主要的结构框架是激光光源(或者发动机),传输系统,患者接口和控制系统。

由于高精密度的角膜切割需要产生直径小于10 μm 的空气泡,所以必须使用低能量的激光脉冲。这需要极大的限制激光脉冲持续时间。既往针对角膜表面光爆破损伤阈值的研究表明,脉冲时长从纳秒降至几百飞秒内时,损伤阈值会显著降低^[10]。因此,商业上可获得的飞秒激光脉冲持续时间范围是200~800fs。

为了将周围组织的损伤降至最低,每次脉冲的能量最好设定在尽可能接近爆破阈值的范围。第一个商用激光采用的脉冲能量是1~3 μJ ,近期角膜激光系统的能量在亚微焦范围。

由于角膜瓣制作需要几百万激光脉冲以及极短

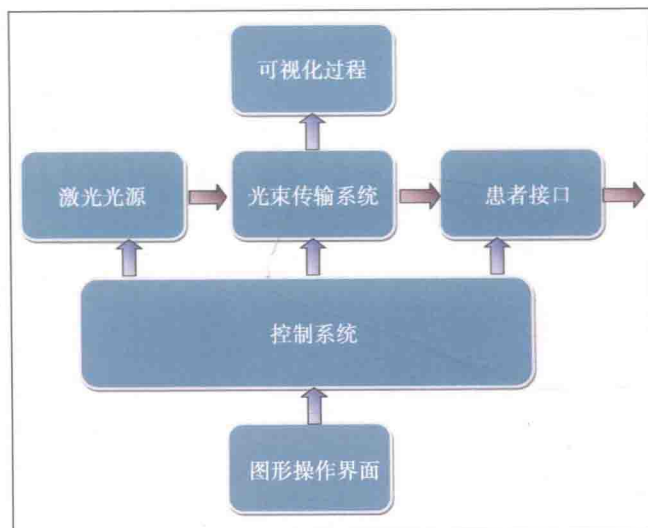


图1 角膜飞秒激光的原理图

的操作时间,故角膜飞秒激光的重复率必须要非常高。事实上,在角膜飞秒激光发展过程中,重复率是技术关键。第一台飞秒激光的重复率是15kHz(IntraLase Inc,加利福尼亚州尔湾市),现在市场上的所有系统都有更高的重复率,从150kHz到兆赫范围(Ziemer AG,瑞士波里)。尽管重复率是十分重要的参数,但操作时间并不与这个值成反比。因为高重复率的激光会使用低能量脉冲且各脉冲间的能量相近,所以比低重复率的激光需要更多的脉冲,这在一定程度上限制了操作时间的缩短。第一台飞秒激光系统(IntraLase),操作时间约1分钟,现在市场上大部分激光创建角膜瓣时间为10~20秒。

尽管飞秒激光光源在角膜激光系统中是技术上最先进的组成模块,但光束传输设备也同样重要且价格高。光束传输设备最重要的特性是聚焦物镜的数值孔径,这决定了系统的光斑大小。为了获得更小的光斑尺寸,系统使用更小的脉冲能量,从而提供更精确的角膜瓣深度。因此,所有商业化的角膜飞秒激光系统的设计者们绞尽脑汁,尽可能地设计出最小的光斑尺寸。对比不同角膜激光系统的光斑尺寸是十分困难的,因为关于光斑尺寸的定义五花八门,但许多企业声称他们的光斑尺寸是在2~3 μm 直径范围。光束传输系统设计中最具挑战的难点,是在通常尺寸为直径10mm、深度1mm的整个柱形扫描范围内,实现均质的、无失真的光斑。光束应用三维扫描系统进行扫描。深度扫描(通常被称为Z轴扫描)是通过一个移动的镜头获得,侧向扫描(X-Y轴扫描)是通过改变快速扫描电机上小镜片的角度获得。

飞秒激光的密闭空间手术效应,与角膜表面激光

焦点的精细空间控制,共同决定了高精度的角膜切割。为了达到以上效果,所有角膜手术都采用负压吸引环、接触镜(或平或弯曲),放置在激光输出系统的末端。负压吸引环固定眼球,使得角膜前表面曲率暂时与接触镜曲率一致(图2)。切割深度校准与接触镜下表面相关,它提供了一个校准激光的参考平面,切割深度的精度在 $10\mu\text{m}$ 以内^[23]。角膜瓣制作是通过激光脉冲螺旋或者光栅模式扫描预定深度,创建一个平行于角膜压平平面的切割面。然后,在接近角膜表面开始渐进弧形扫描,创建一个铰链侧切。制作好角膜瓣,释放负压吸引环,移除压平接触镜。随后,翻起角膜瓣以便于激光治疗。



图2 平坦的压平式患者接口

临床研究表明,角膜飞秒激光系统可以制作重现性很好的 $100\mu\text{m}$ 厚度的角膜瓣^[23]。飞秒激光角膜瓣的精确性和重复性通常超过传统机械角膜板层刀,从而实现更一致的手术效果和安全性^[23,24]。

自2001年,数台角膜飞秒激光系统进入市场,主要用于LASIK角膜瓣制作^[24]。尽管在当前的市场可获得各种新设备,但大部分角膜瓣制作手术仍采用不同代的IntraLase设备进行(Abbott Medical Optics,加利福尼亚州圣安娜市)。

角膜瓣制作是角膜飞秒激光系统最常见的应用。一些采用全飞秒激光进行屈光手术的技术还处于临床研究阶段,包括移除激光切割微透镜^[25],以及选择性飞秒激光治疗诱导的组织结构破坏和角膜生物力学改变等^[26]。

除了角膜屈光手术,角膜飞秒激光技术在各种角膜移植手术中也显现出其价值。已有报道指出,飞秒激光切割术在全厚角膜移植术中创建角膜切口,可以

更快地恢复视力、改善屈光结果^[27]。

二、白内障飞秒激光操作原理

在角膜与白内障激光手术系统中有几个重要的不同点,其中最重要的差异在于目标组织不同。角膜激光目标只有角膜组织,然而白内障激光有三个目标组织:晶状体、晶状体前囊膜和角膜。这导致了在激光技术需求上的主要差异。角膜激光系统的激光只需穿透大约 $150\mu\text{m}$ 深度,而白内障激光系统要求切割的组织距离角膜面 9mm 之深。因为激光能量需要传输至眼内相当的深度,发生在光束传播过程中的能量损失也必须通过激光光源补偿。由于光锥角的限制,当以晶状体或晶状体囊膜为目标时,晶状体内激光光斑的尺寸必须要大于角膜内的光斑,才能产生更高的能量以便切割晶状体核。虽然,随着传输系统技术的改善,激光能量需求将来可能减少,但是目前晶状体的脉冲能量仍然需要 $5\mu\text{J}$ 。

尽管切割角膜可以应用与晶状体系统程序相同尺寸的激光斑,但是从我们了解到的角膜激光经验来看,使用更小的光斑、更小的激光脉冲能量,是非常有好处的。因此,开发能够传递不同光锥角的激光传递系统是有必要的,尽管这会大大地增加激光传递系统的复杂性。

因为不同患者有不同的前房深度和晶状体厚度,必须要有一个精确测距装置,这样可以确定手术目标的准确位置。迄今为止,所有飞秒激光白内障手术系统的测距装置都是基于一些光学成像系统。三家公司(Alcon LenSx Inc,亚里索维耶荷市,加利福尼亚州;OptiMedica Corp,圣克拉拉市,加利福尼亚州;Bausch+Lomb-Technolas Perfect Vision AG,慕尼黑,德国)应用光学相干断层成像技术(OCT),然而有一家公司(LensAR Inc,温特帕克,佛罗里达州)采用基于Scheimpflug成像装置定位目标组织。获得眼前段成像后,为了定位和可视化目标组织,必须经过一定程度的成像处理。因此,图3示关于白内障激光手术系统框架图,比角膜激光系统更复杂,附加的高精度三维成像系统,光束传输装置、成像加工系统和可视化单元,给使用者提供信息并反馈给控制系统。虽然在图像加工系统和光束扫描系统之间精确的交叉校正很重要,但三维成像系统分辨率是由手术光束传输设备决定的。与手术聚焦物镜景深的精度相比,更高的精准度不那么重要,但其深度的精准度要求也要大概在 $10\mu\text{m}$ 。

显著增加的光束传输范围和三维成像设备的加入,增加了白内障激光光束传输系统的复杂性。显