

波前像差引导的角膜切削模型及实现技术的研究

叶 寒, 廖文和, 沈建新

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 对波前像差概念和表示方法做了必要的叙述, 深入研究了波前像差引导的角膜个性化切削模型, 推出了角膜手术区域中角膜修正量的基本公式, 给出了实现个性化像差矫正手术的软硬件框图。采用该模型引导的扫描频率为 120 Hz, 光斑直径为 0.9 mm 的准分子激光眼科治疗机做 PMMA 试验, 对比传统的屈光不正矫正模型, 在手术区域直径为 6.5 mm 条件下, 给出了近视、远视、近视散光各种情况下手术的最大切削深度和切削时间。试验结果表明, 各种情况下角膜最大切削深度基本相同, 波前像差矫正切削模型的切削时间稍大, PMMA 板切削效果良好。

关键词: 激光角膜切除术; 波前像差; 模型; 眼球跟踪系统

中图分类号: TH773 文献标识码: A

Wavefront guided ablation on cornea

YE Han, LIAO Wen he, SHEN Jiar xin

(College of Mechanical and Electrical Engineering

Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The customized ablation based on the individual eye's wavefront aberrations and the ablation depth in corneal zone were studied and the hardware and software used for wavefront aberrations were developed for refractive surgery. According to this model, a scanning-spot laser with a 1.0 mm spot size and a 200 Hz repetition rate were used. Under the condition that the treatment area diameter is 6.5 mm, the PMMA result to myopia, hyperopia, astigmatism is that the maximal depth is equal and the time needed is a little bigger than the refractive errors of guided Lasik model, the result shows that the wavefront guided Lasik model is acceptable.

Key words: laser keratotomy; wavefront aberration; model; eye tracking system

1 引言

准分子激光角膜切削术经过了放射状角膜切开术 (RK, Radial keratotomy)、准分子激光切削术 (PRK, Photorefractive Keratectomy)、准分子激光原位磨镶术 (LASIK, Laser assisted in situ keratomileusis)、准分子激光上皮磨镶术

(LASEK, laser epithelial keratomileusis) 等几个发展阶段, 手术的稳定性、安全性越来越好, 适用范围越来越广, 手术的治疗效果也越来越好。但随着各项技术的不断完善, 治疗效果也达到瓶颈, 治疗近视只能到 0.8~1.0, 而且术后会出现眩光、光晕和夜间视力下降等有关视觉成像质量问题^[1]。这是因为传统 LASIK 是由屈光不正程度

收稿日期: 2003-11-21; 修订日期: 2003-12-14.

基金项目: 江苏省高技术研究计划资助 (No. BG2002012); “十五”国家计委产业化项目 (计产业: [2002] 1329 号)

(离焦和散光程度) 来对角膜建立数学模型, 制定手术的切削方案的^[2], 这种切削模型忽略了眼睛内在的高阶像差, 由这种模型指导的屈光手术还会增加人眼的高阶像差。

对于人眼, 由于波前像差的存在, 像面在视网膜上的准确聚焦并不能保证视网膜成像的高度清晰, 其像差主要来源于人的视光系统的缺陷:

(1) 角膜和晶状体的表面不理想, 其表面曲率存在局部偏差; (2) 角膜与晶状体、玻璃体不同轴; (3) 角膜和晶状体以及玻璃体的内含物质不均匀, 以致折射率有局部偏差。这些结构上的偏差使得经过偏差部位的光线偏离理想光路, 结果使整个视网膜成像对比下降, 视觉模糊。如果能够消除人眼的高阶像差, 人眼视力可以达到 1.5~2.0 的超视力^[3]。本文详细描述人眼波前像差理论, 由 Zernike 多项式表示的波前像差导出由波前像差引导的角膜切削量的基本公式, 给出了个性化像差矫正手术的软硬件框图, 在国产的准分子激光系统上实现了波前像差引导的角膜手术。

2 波前像差理论

基于几何光学原理对人眼光学系统特性的传统评价方法存在一定的局限性, 近代物理学研究发现光有波粒两重性, 根据光的波动学理论可以完整地评价和描述人眼的成像偏差。光的波动理论认为光线 (rays) 是一个行进电磁波, 波前是光波的连续性的同相位面。波前像差是实际的波前和理想的波前之间的光程差 (OPD, optical path difference)。对于聚焦在无限远处的理想眼睛, 发自无像差人眼的理想波前是一个平面^[4]。

人眼波前像差的描述方法通常有两种。一种为波前像差图, 在瞳孔面上不同部位引起的像差直接用伪彩色图谱以二维或三维形式绘出^[5]。这种描述方法直观, 方便医生定性了解病人眼睛像差的分布情况。

另一种为 Zernike 多项式表示法, 这种方法可以定量地描述人眼像差的大小, 可以用函数的形式来描述人眼的像差分布。Zernike 函数项中有些波前像差项 (函数项) 对应于几何光学的像差项, 例如第 4 项为离焦, 第 3 项和第 5 项分别表示为

0° 和 45° 方向的散光, 第 7 项和第 8 项为 x 和 y 方向的慧差, 第 12 项是球差, 而其他项则超越了传统几何光学描述的范围^[6]。

Zernike 项是正交于单位圆上的一组多项式, 由 3 部分组成: 标准化系数, 半径依赖性成分 (n), 方位角依赖性成分 (m)。Zernike 多项式表示为^[7]:

$$Z_n^m(\rho, \theta) = \begin{cases} N_n^m R_n^{1m}(\rho) \cos m\theta & m \geq 0 \\ -N_n^m R_n^{1m}(\rho) \cos m\theta & m < 0 \end{cases}, \quad (1)$$

式中:

$$R_n^{1m}(\rho) = \sum_{l=0}^{(n-m)/2} \frac{(-1)^l (n-l)!}{l! [\frac{1}{2}(n+m)-l]! [\frac{1}{2}(n-m)-l]!} \rho^{n-2l}, \quad (2)$$

$$N_n^m = \sqrt{\frac{2(n+1)}{1+\delta_{m0}}}$$

$$\begin{cases} \delta_{m0} = 1 & \text{当 } m = 0 \\ \delta_{m0} = 0 & \text{当 } m \neq 0 \end{cases}, \quad (3)$$

根据式 (1)、(2) 和 (3), 可以导出任意 Zernike 项, 这里不重复。这里 Zernike 项采用了极坐标形式, 可以用下面式 (4) 转换为直角坐标形式。

$$\begin{cases} \rho = \sqrt{x^2 + y^2} \\ \theta = \arctan(y/x) \end{cases}, \quad (4)$$

波前像差仪将测量到多点的波前像差通过 Zernike 函数项拟合, 求得 Zernike 系数 $C(i)$, 因此瞳孔面上任意点的波前像差可以由式 (5) 确定。

$$W(x, y) = \sum_i^n C(i) \times Z_i(x, y), \quad (5)$$

3 波前像差引导的角膜切削模型

为了矫正人眼像差, 将光线传播的方向反过来, 假设理想的波前为 $w(x, y)$, 进入眼睛的情况是: 这一波前 $w(x, y)$ 的存在可以很好地消除视觉像差并聚焦在黄斑上形成一个点。为了使一个无限远的点光源在一个存在像差的眼睛上很好的聚焦, 需要将一个透镜放置在角膜表面, 使平

面波前转换成理想的波前 $w(x, y)$ 。这个透镜的作用可以通过准分子激光在角膜上的组织消融来实现。要达到消除整个人眼的波前像差, 必须在角膜上切削出无数个这样的透镜来改变光程差。

消融一个单位的角膜组织, 由于角膜与空气的折射率不同, 引起的光程的变化为^[8]:

$$\Delta OPL = D \times (n_{\text{cornea}} - n_{\text{air}}), \quad (6)$$

式中: D 为消融的角膜厚度; n_{cornea} 为角膜的折射率, 通常取 1.376; n_{air} 为空气的折射率, 通常取 1; 去除角膜组织可以减少波前的延迟。

由于波前像差等于光程差即

$$w(x, y) = -\Delta OPL(x, y), \quad (7)$$

其中 x, y 的取值在手术区域的范围内, 通常取 6 ~ 6.5 mm 的圆域范围。而

$$w(x, y) = \sum_{j=0}^n c_j Z_j(x, y), \quad (8)$$

根据以上 3 式, 角膜上某点的切削深度:

$$D(x, y) = \sum_{j=0}^n c_j Z_j(x, y) / (n_{\text{cornea}} - n_{\text{air}}), \quad (9)$$

这样根据式 (9) 就可以计算出任意角膜手术区域上的深度, 对人眼角膜切削深度用 matlab 进行计算和图形模拟, 图 1 对应的传统屈光不正为 -5DS × -3DC × 0° (球度为 -5D, 柱度为 -3D, 散光轴角 0 度, 波前像差仪输出 Zernike 系数 C_i)。图 1 中水平面坐标表示术区直径 (d) 为 6 mm 范围内, 深度方向 (D) 的单位为 μm 。

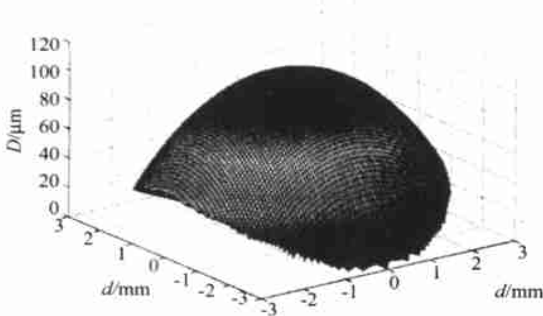


图 1 某眼波前像差的切削深度

Fig. 1 Ablation depth of one eye with wavefront aberration in the ablation zone

4 实现波前像差引导的角膜切削术的关键技术

为了实现波前像差引导的角膜切削手术, 首先需要准确地测量人眼的波前像差。根据上式 (9) 计算出角膜手术区域中任意点的切削深度, 需要有准确测量波前像差的波前像差仪。其次需要实现准分子激光在角膜手术区域范围内的精确切削, 将理论上的模型转换为精确的切削量。目前采用高频率、小光斑的准分子激光的飞点扫描算法和高速眼球跟踪系统, 才能保证角膜的精确消融。波前像差仪和准分子激光眼科治疗机的直接连接, 原理如图 2 所示。其实现过程是: 引入像差测量技术, 以像差作为手术的主要参数, 结合波像差图, 参考 Zernike 函数系数, 进行数学建模, 将像差转换为切削量, 采用高速自动跟踪技术, 准确定位人眼, 进行飞点式扫描切削角膜, 达到消除人眼像差。

准分子激光切削过程中, 如果采用闪烁的绿激光作固定眼球, 会由于眼球不自主的颤动或头部移动, 造成激光束的偏心切削, 难于消除人眼高阶的像差, 这里采用高速眼球跟踪系统。在人的角膜表面贴一直径 1 mm 左右的红外反射点, 精确捕捉眼球的运动量, 将得到的位置偏移量转化成相应的电信号叠加到 X, Y 扫描器上(见图 2), 重新把激光及时聚焦到切削点进行扫描。红外跟踪频率为 2 000 Hz, 比准分子激光发射脉冲频率 150~200 Hz 快 8~10 倍, 足以配合激光雕刻角膜, 因而术中患者眼球向任何方向转动也不会出现偏中心切削, 不会影响手术的精确性和术后效果^[9]。

根据上述模型和硬件原理, 设计了准分子激光手术控制软件。软件的基本流程如图 3 所示, 不再赘述^[10]。

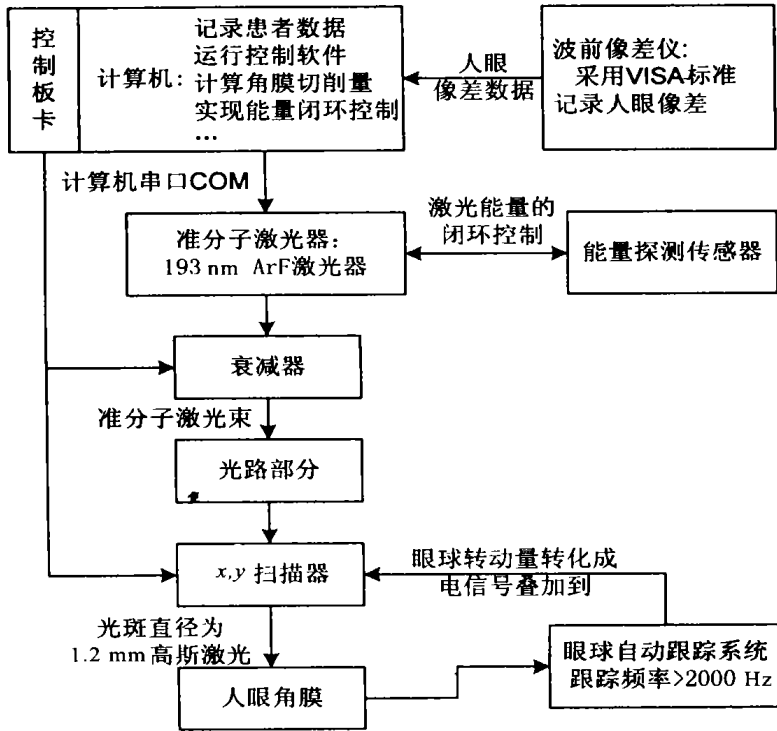


图 2 准分子激光切削角膜装置的原理框图

Fig. 2 Schematic of the excimer laser surgery system simplified equipment structure

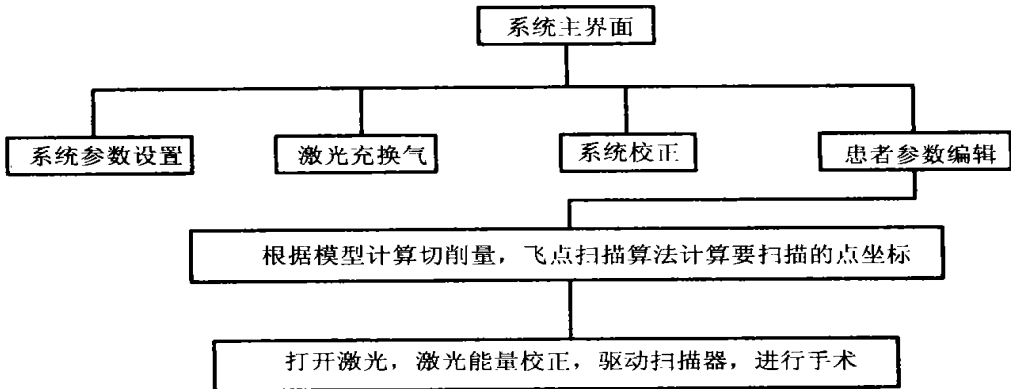


图 3 准分子激光矫正系统软件流程简图

Fig. 3 Soft process of the excimer laser surgery system

5 实验结果

应用本文的数学模型, 在国产准分子眼科治疗机实现了波前像差引导的角膜切削术。采用 PMMA 实验进行波前像差引导的角膜切削取得

的初步效果使该模型正确性得到验证。与传统的由离焦和散光引导的角膜切削比较, 结果表明: 在相同球度、柱度、术区直径和频率的条件下, 波前像差引导的角膜切削深度及时间值偏大一些, 实验结果如表 1 所示。

表 1 屈光不正引导的切削和像差引导的切削的实验结果比较

Tab. 1 Result of PMMA experiment of wavefront guided ablation compared with ametropia guided ablation

分 类	实验输入到数学模型的屈光度数	像差引导的切削结果		传统的屈光不正引导的结果	
		结果转换为角膜度数	最大深度和时间 (μm , s)	结果转换为角膜度数	最大深度和时间 (μm , s)
纯近视	- 2. 0DS× 0DC× 180°	- 2. 083 DS× 0DC× 180°	31, 22	- 2. 92 DS× 0DC× 180°	31, 22
	- 7. 0DS× 0DC× 180°	- 7. 33 DS× 0DC× 180°	100, 78	- 6. 82DS× 0DC× 180°	100, 78
纯散光	0DS× - 3. 0DC× 180°	0DC× - 3. 33DS× 180°	46, 78	0DS× - 2. 92DC× 180°	46, 51
	0DS× - 5. 0DC× 180°	0DS× - 5. 25DC× 180°	75, 131	0DS× - 5. 0DC× 180°	75, 85
纯散光 (不规则轴位)	0DS× - 2. 0DC× 60°	0DS× - 2. 33DC× 60°	31, 56	0DS× - 2. 5DC× 60°	31, 33
	0DS× - 3. 0DC× 90°	0DS× - 3. 0DC× 80°	46, 79	0DS× - 3. 33DC× 90°	46, 51
近视散光	0DS× - 4. 0DC× 120°	0DS× - 4. 33DC× 120°	61, 115	0DS× - 4. 33DC× 120°	61, 68
	- 5DS× - 1. 0DC× 180°	- 5DS× - 0. 83DC× 180°	73, 72	- 5. 67DS× - 1. 67DC× 180°	73, 51
	- 5DS× - 3. 0DC× 180°	- 5DS× - 2. 5DC× 180°	73, 99	- 5. 42S× - 2. 92DC× 180°	73, 44
	- 5DS× - 3. 0DC× 60°	- 4. 72DS× - 2. 90DC× 60°	73, 97	- 5. 42S× - 2. 92DC× 60°	73, 44

目前波前像差理论在眼科中应用蓬勃发展, 波前像差引导的屈光手术已经有所开展, 波前引导技术改进了对波前像差的矫正, 但结果尚不能取得超视力。基于对一些涉及到年龄、调节和色

像差等问题的基础研究已经向我们提出了实现完美矫正的严峻挑战, 如何优化波前引导的屈光手术仍是一个非常重要的问题^[1]。

参考文献:

[1] 周翔天, 瞿佳. 波前理论在视觉质量方面的应用及其意义 [J]. 眼视光学杂志, 2000, 2 (3): 182-185.
ZHOU X T, QU J. The principle of the wavefront using in visual performance [J]. *China J Optomophthalmol*, 2000, 2 (3): 182-185. (in Chinese)

[2] 张运海, 沈建新, 廖文和. 准分子激光矫正复性近视散光的屈光学机理和应用 [J]. 光学精密工程, 2003, 11 (3): 293-295.
ZHANG Y H, SHEN J X, LIAO W H. Use of excimer to correct compound myopic astigmatism [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11 (3): 293-295. (in Chinese)

[3] 刘后仓. 波前像差技术与屈光手术 [J]. 中国实用眼科杂志, 2002, 20 (7): 484-485.
LIU H C. Wavefront aberration and ocular surgery [J]. *Chinese Journal of Practical Ophthalmology*, 2002: 484-485. (in Chinese)

[4] 刘风, 综述, 唐罗生. 波前像差及波前像差仪在眼科中的应用及发展 [J]. 中国实用眼科杂志, 2001, 19 (12): 883-886.
LIU F, ZONG S, TANG L SH. The using and development in the ocular surgery with wavefront and wavefront sensor [J]. *Chinese Journal of Practical Ophthalmology*, 2001, 19 (12): 883-886. (in Chinese)

[5] 金红颖, 王勤美. 波阵面像差技术在临床上的应用 [J]. 眼视光学杂志, 2002, 4 (1): 57-58.
JIN H Y, WANG Q M. Use of wavefront aberration techniques in clinical procedures [J]. *Chinese Journal of Optometry & Ophthalmology*, 2002, 4 (1): 57-58. (in Chinese)

[6] CHARMAN W N. Wavefront aberration of the eye: a review [J]. *Optom Vis Sci*, 1991, 68 (8): 574-583.

[7] THIBOS L N, APPLIGATE R A, SCHWIEGERLING J T, et al. Standards for reporting the optical aberrations of eyes [Z]. jrs.slackinc.com/vol185/thi.pdf

[8] Larry N, Thibos O D. Wavefront guided contact lens design principles [J]. *Techniques and Limitations*, 2003 (1): 35-37.

[9] 叶寒, 沈建新, 廖文和. 准分子激光屈光矫正系统设计与实现 [J]. 应用激光, 2003, 23 (3): 164-166.
YE H, SHEN J X, LIAO W H. Design and implementation of the ophthalmic excimer laser system [J]. *Applied Laser*, 2003, 23 (3): 164-166. (in Chinese)

- [10] 沈建新, 胡利刚, 廖文和. 准分子激光角膜的数学模型与切削技术研究 [J]. 激光生物学报, 2003, 12 (1): 1-6.
SHEN J X, HU L G, LIAO W H. The corneal model and ablation in excimer laser surgery system [J]. *Laser Biology*, 2003, 12 (1): 1-6. (in Chinese)
- [11] 贺极苍. 波前像差及其在眼科学和视光学中的应用 [C]. 第五届青岛国际眼科学术研讨会.
HE J CH. Wavefront aberration & its applications in ophthalmology and optometry [C]. *Qingdao: The Fifth International Conference on Ophthalmology*. (in Chinese)

作者简介: 叶 寒 (1976-), 男, 江西南昌人, 南京航空航天大学博士研究生, 研究方向为 CAD/CAM 技术, 生物工程学工程;

廖文和 (1965-), 男, 江西万年人, 教授, 博士生导师, 南京航空航天大学科技部部长, 主要研究方向为 CAD/CAM, 制造业企业信息化, 发表学术论文 40 余篇;

沈建新 (1969-), 男, 江苏常熟人, 副教授, 主要研究方向为 CAD/CAM, 制造业企业信息化, 生物工程, 发表学术论文 20 余篇。

《发光学报》

——中文核心期刊 (物理学类; 无线电电子学、电信技术类)

《发光学报》是中国物理学会发光分学会与中国科学院长春光学精密机械与物理研究所共同主办的中国物理学会发光分学会学术会刊。该刊是以发光学、凝聚态物质中的激发过程为专业方向的综合性学术刊物。

《发光学报》于 1980 年创刊, 曾于 1992 年, 1996 年和 2000 年连续三次被《中文核心期刊要目总览》评为“物理学类核心期刊”, 并于 2000 年同时被评为“无线电电子学、电信技术类核心期刊”。2000 年获中国科学院优秀期刊二等奖。现已被《中国学术期刊 (光盘版)》、《中国期刊网》和“万方数据资源系统”等列为源期刊。英国《科学文摘》(SA)自 1999 年; 美国《化学文摘》(CA)和俄罗斯《文摘杂志》(P Ж)自 2000 年; 美国《剑桥科学文摘社网站》自 2002 年已定期收录检索该刊论文。2001 年在国家科技部组织的“中国期刊方阵”的评定中,《发光学报》被评为“双效期刊”。2002 年获中国科学院 2001-2002 年度科学出版基金“择重”资助。本刊内容丰富、信息量大, 主要反映本学科专业领域的科研和技术成就, 及时报道国内外的学术动态, 开展学术讨论和交流, 为提高我国该学科的学术水平服务。

《发光学报》将自 2004 年第 25 卷第 1 期始, 改在吉林省长春市出版、印刷和发行。

《发光学报》为双月刊, A4 开本, 100 页, 国内外公开发行。2004 年国内定价: 20.00 元, 全年 120 元, 全国各地邮局均可订阅。《发光学报》欢迎广大作者、读者广为利用, 踊跃投稿。

地 址: 长春市东南湖大路 16 号

《发光学报》编辑部

邮 编: 130033

电 话: (0431) 6176862

E mail: fgxb@ciomp. ac. cn

国内统一刊号: CN 22- 1116/04

国际标准刊号: ISSN 1000- 7032

国内邮发代号: 12- 312

国外发行代号: 4863BM

http: //www. ciom. ac. cn