

文章编号 1004-924X(2004)04-0406-05

准分子激光眼屈光手术中的一种过渡区模型

张运海, 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:提出了一种在准分子激光眼屈光手术中过渡区模型的构造方法。首先设计一种修边函数,然后提取光学区边界的切削深度,并将其扩展到整个过渡区,最后通过修边函数和过渡区上扩展切削深度的乘积得到过渡区模型。再将该模型进行计算机仿真研究和临床研究。临床上统计了8名患者16只眼睛接受该模型指导的激光手术情况:术前平均裸眼视力为 0.09 ± 0.04 ,术后第1天平均裸眼视力为 1.06 ± 0.24 ,之后视力逐渐升高,在术后一个月时平均裸眼视力为 1.42 ± 0.36 ,裸眼视力最小值为1.0。仿真结果,特别是临床结果表明:过渡区模型实现了光学区与非切削区之间光滑平坦地过渡。采用参数化控制的模型,特别适用于光学区直径和过渡区宽度经常调整的情况,对各种眼屈光不正情况均适用;在光学区直径确定后,过渡区宽度的改变不影响光学区的切削深度;模型有较强的通用性,适用于传统仅矫正屈光不正(近视、远视、散光)的光学区模型,也适用于波前像差引导的激光眼屈光手术。利用过渡区模型可提高手术后患眼的视觉质量。

关键词:过渡区;光学区;数学模型;波前像差;LASIK

中图分类号:R779.63; R778.1 **文献标识码:**A

Blend zone model for excimer laser refractive surgery

ZHANG Yun-hai, LIAO Wen-he, SHEN Jian-xin

(College of Mechanical & Electrical Engineering, Nanjing University
of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A blend zone model for excimer laser refractive surgery is presented. Firstly, a blend function is designed. Then, an expand ablation depth in the blend zone is constructed using the ablation depth on the edge of the optical zone. Finally, the model is developed by multiplying the blend function and the expand ablation depth. The simulation of the model on computer and results of clinical practice have been studied. Sixteen eyes with myopic astigmatism underwent LASIK using the blend zone model. One day postoperatively, mean uncorrected visual acuity was 1.06 ± 0.24 compared to 0.09 ± 0.04 preoperatively. One month after surgery, mean uncorrected visual acuity was 1.42 ± 0.36 . All eyes reached uncorrected visual acuity of 1.0 or better. The computer simulation and especially LASIK results show that the model gradually smoothes out the connection of the optical zone and untreated zone. The model has two parameters that make it very useful in adjusting the diameter of the optical zone and changing the width of the blend zone. The ablation depth in the optical zone does not increase when the width of the blend zone is changed. The

收稿日期:2004-02-18;修订日期:2004-06-08.

基金项目:江苏省“十五”高技术研究计划项目(No. B G2002012)和“十五”国家计委产业化项目(计产业[2002]1329号)资助

model not only can be applied to the correction of refractive errors such as myopia and astigmatism, but also can be used in wavefront guided laser refractive surgery. Visual acuity after excimer laser refractive surgery has been remarkably improved using this model.

Key words: blend zone; optical zone; mathematical model; wavefront aberration; LASIK

1 引言

近年来,用波长为 193 nm 的准分子激光矫正各种眼屈光不正(近视、远视和散光)已很普及,国内外对这种手术的安全性和有效性做了较多的研究^[1-4]。目前,由波前像差引导的激光眼屈光手术成为研究的热点问题^[5-7]。这些手术都是用激光对角膜进行切削(消融),以改变角膜的折光能力,使得平行光线进入眼屈光系统后能准确地聚焦在视网膜上。

为确保切削后的角膜有光滑的表面,切削区分为光学区和过渡区两部分,光学区主要起光学成像作用,过渡区起到光学区和非切削区之间的光滑过渡作用,减少术后角膜上皮的增生和暗环境下的眩光。Kyoung Yul Seo 等分别采用 6.0 mm 光学区、无过渡区和采用 6.5 mm 光学区、0.75 mm 宽的过渡区做了 LASEK 手术(laser-assisted subepithelial keratectomy),发现采用过渡区的患眼术后高阶像差(higher-order aberrations)明显小于没有采用过渡区的患眼^[8];M. Alaa El Danasoury 分别采用 5.5 mm 光学区、无过渡区和采用 5.5 mm 光学区、0.5 mm 宽的过渡区做了 LASIK 手术(Laser in situ Keratomileusis),发现在采用了过渡区的病人中,LASIK 术后夜间眩光显著减少^[9];Scott MacRae 对一种椭圆性的过渡区模型做过研究,这种模型的光滑性较好,缺点是会增加角膜的切削深度^[10]。

可以由多种方法构造出光学区模型,这些模型之间相差很大。另外,患眼屈光不正情况往往差异较大,即便是同一种光学区模型,在其边界处计算出的切削深度通常也没有规律可寻。设计出对各种屈光不正情况均适用的过渡区模型是激光眼屈光手术中的一个难点问题,是这种手术的关键技术之一。本文提出了一种过渡区模型,该模型对各种屈光不正情况均适用;这种过渡区模型的宽度可由参数控制,对光学区没有影响,在增大过渡区时不会增加角膜的切削深度;有很强的通

用性,适合于多种光学区模型。

2 过渡区模型的设计

在激光眼屈光手术中,光学区角膜切削模型可由多种方法构造,如:(1)在角膜上切削出一个球镜和一个柱镜^[11];(2)用几何曲面的方法拟合出术前术后的角膜曲面,两曲面的几何差值即为切削模型^[12-14];(3)将眼波前像差转换成角膜的切削深度^[15-16]。这些模型之间差别很大,在数学上表示形式各异。

假定光学区的半径为 R ,则上面提出的各种光学区模型可用一个通用函数表示:

$$Z(x, y) = f(x, y) \quad 0 \leq x^2 + y^2 \leq R, \quad (1)$$

坐标系定义为: x 轴对应眼水平位(对于左眼 x 轴正向位于颞侧,对于右眼 x 轴正向位于鼻侧), y 轴对应眼竖直位(正向指向发侧), z 轴由眼内指向眼外,坐标原点位于瞳孔中心。

假定过渡区的宽度为 $R \times a$ (过渡区的内半径为光学区半径 R ,外半径为 $R + R \times a$, a 为修边系数),则下式构造出一种通用的过渡区角膜切削模型:

$$Z(x, y) = Z_t(x, y) \times Z_b(x, y) \\ R \leq \sqrt{x^2 + y^2} \leq R + R \times a, \quad (2)$$

其中

$$Z_t(x, y) = 1 - \frac{\sin\left[\frac{\pi}{2} \times \left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2} - R}{R \times a}\right)\right]}{2} + 1, \quad (3)$$

$$Z_b(x, y) = f\left(R \times \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}, R \times \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right), \quad (4)$$

$Z_t(x, y)$ 为修边函数,其值在内边界为 1,由内到外逐渐减小,到外边界时为 0; $Z_b(x, y)$ 为过渡区上的扩展切削深度,它是由光学区模型的边界值扩展到整个过渡区上形成的。

3 模型的计算仿真

为便于说明过渡区模型的作用,仿真计算时采用顺规性近视散光(Myopic With-the-rule (WTR) Astigmatism)这样一种眼屈光不正情况。

激光治疗顺规性近视散光时,在光学区,角膜上最平的子午线上切削的角膜组织最多,而最陡的子午线上切削的角膜组织最少,其目的是使最陡的子午线变平,同时保持最平的子午线曲率不变,这样在最平的子午线上,从中央到边缘切削深度都一样,在最陡的子午线上,中央部位切削深度比边缘部位要大。

术前屈光情况为 0D-5D \times 180 的眼睛在计算机上模拟出的切削量分布情况见图 1、图 2 和图 3 (光学区半径 R 取 3.0 mm,修边系数 $a=0.25$)。图中 z 轴单位为 μm (角膜切削深度在 μm 量级), x 轴和 y 轴单位为 mm。光学区模型采用几何曲面构造,即上文中提到的第 2 种方法。

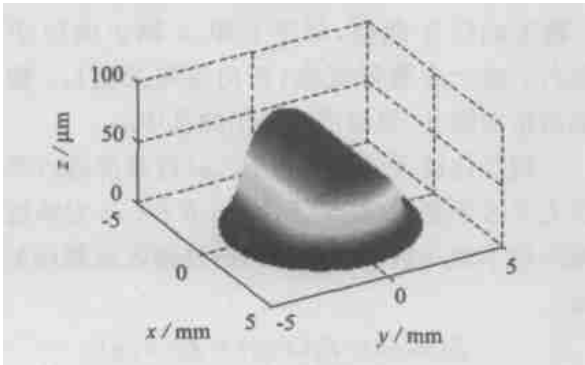


图 1 单纯近视性散光在全切削区上的切削量分布情况

Fig. 1 Ablation profile for myopic astigmatism in the whole ablation zone

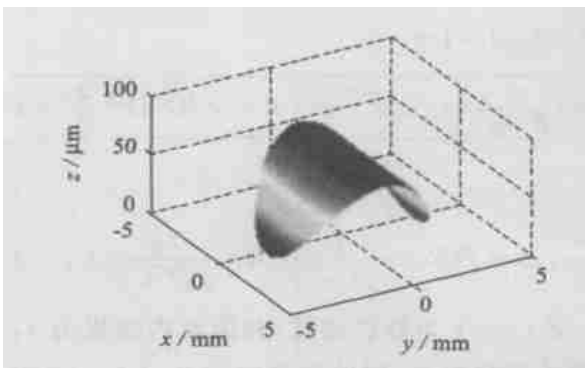


图 2 光学区上切削量分布情况

Fig. 2 Ablation profile in optical zone

图 1 和图 3 中 z 坐标轴和 x 、 y 轴的单位不同,使得过渡区图形看起来很陡直,这种假象是由于图形显示时过渡区内的高度大于宽度造成的。事实上过渡区的宽度远大于过渡区上的切削深度(图形的高度),例如,本例中过渡区的宽度为 0.75 mm,而过渡区上的最大切削深度小于 $68 \mu\text{m}$ 。

过渡区上的扩展切削深度 $Z_b(x, y)$ 分布情况见图 4,从图中可以看出,对于每一条半子午线来说,过渡区上的扩展切削深度处处相等,该深度值为光学区模型在该边界处的值。

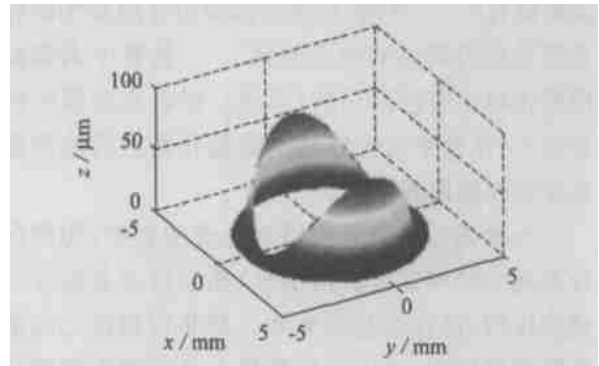


图 3 过渡区上切削量分布情况
Fig. 3 Ablation profile in the blend zone

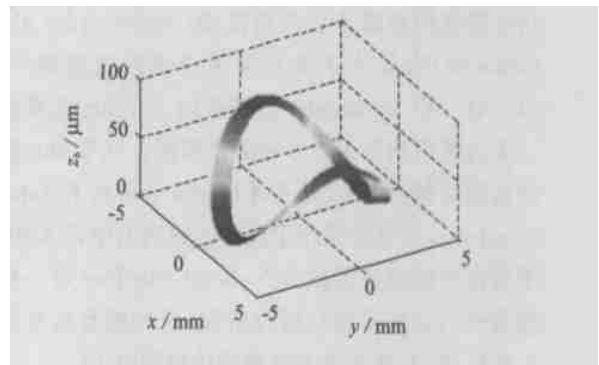


图 4 过渡区上的扩展切削量
Fig. 4 Expand ablation profile in the blend zone

修边函数的分布情况见图 5,函数关于 z 轴是旋转对称的,为便于看清其分布规律,图中只画出 x - z 截面内的二维轮廓图形。从图中可以看出,图形在靠近过渡区内边缘时较陡直(这样保证光学区和过渡区衔接时,相接处不会产生鼓包现象),图形在靠近过渡区外边缘时较平坦(这样保证切削区能很平滑光顺地过渡到非切削区)。

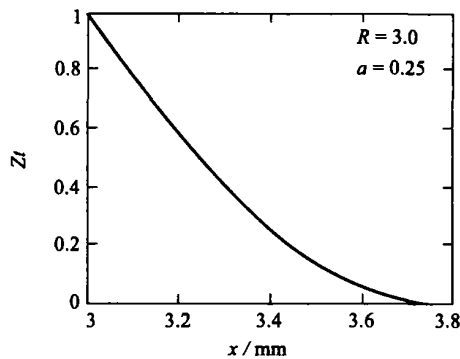


图 5 修边函数图形

Fig. 5 The profile of blend function

4 过渡区模型的讨论

对于有散光的情况,若不采用过渡区模型,切削后将在较平的子午线两端各形成一个台阶。在波前像差引导的激光眼屈光手术中,角膜上切削量的分布情况要更复杂,光学区边界处的切削深度对不同的眼睛来说是无规律分布的。若不采用过渡措施,切削区与非切削区交界处会产生复杂的台阶现象,患眼在术后暗环境下视物会产生眩光,并会发生角膜上皮增生,使得屈光手术的效果产生回退。

采用上述过渡区模型后,光学区与过渡区实现了自然光滑衔接,过渡区与非切削区之间也实现了自然光滑衔接。经过这样的处理后,手术后角膜表面较光滑,病人在暗环境下的眩光将大大减小,角膜上皮的增生也将大大减小。

由于患眼的屈光不正程度差异较大,而角膜的厚度是有限的,为 $550\ \mu\text{m}$ 左右,这样在近视或

散光程度很高时,为给术后留下安全的角膜厚度,就要控制光学区直径,同时为避免术区直径过大,也要控制过渡区的宽度。在过渡区模型的设计时已经考虑到这些,在模型中引入两个参数:光学区半径 R 和修边系数 a ,分别控制光学区的大小和过渡区的宽度。另外,过渡区模型对光学区的边界切削深度也没有要求,这样就可以通过控制 R 和 a 来适应各种屈光不正情况。

当光学区半径 R 确定之后,光学区上的切削深度完全由光学区模型确定,这时改变修边系数对光学区上的切削深度没有影响,当 a 增大时不会增加光学区上的切削深度。

在设计过渡区模型时并没有对光学区模型做任何要求,例如上面的光学区模型采用一个通用函数 $f(x, y)$ 表示,这将使该过渡区模型有较好的通用性,适合上述诸种光学区模型。

5 过渡区模型的应用情况

文中的过渡区模型已经用到临床中,目前已经做了大量的手术,手术结果表明该模型是安全和有效的。下面是 2003 年 7 月 27 日采用该过渡区模型做的 LASIK 手术情况。共有 8 名近视眼患者 16 只眼睛接受了手术。病人平均年龄 20.8 ± 2.3 岁,手术前裸眼视力均小于 0.15,手术后一天 35.3% 的眼睛裸眼视力大于等于 1.2,手术后一周 70.6% 的眼睛裸眼视力大于等于 1.2,手术后两周 70.6% 的眼睛裸眼视力大于等于 1.2,手术后一月 88.2% 的眼睛裸眼视力大于等于 1.2。手术前后的裸眼视力及屈光度见表 1。

表 1 手术前后屈光度及裸眼视力

Tab. 1 Refractive states before and after surgery

	术前裸视	术前球镜 (D)	术前柱镜 (D)	术后一天 裸视	术后一周 裸视	术后两周 裸视	术后一月 裸视
平均值	0.09	- 6.75	- 0.62	1.06	1.23	1.25	1.42
标准差	0.04	1.83	0.34	0.24	0.27	0.24	0.36
最小值	0.02	- 9.25	- 1.0	0.6	0.8	0.8	1.0
最大值	0.15	- 3.75	0.0	1.5	1.5	1.5	2.0

6 结 论

在采用 193 nm 准分子激光切削角膜矫正眼

屈光性疾病的手术中,手术的光学区同非切削区之间需要光滑平坦地过渡。本文提出的过渡区模型,实现了光学区与过渡区之间及过渡区与非切削区之间的光滑连接;模型采用参数化控制,特别

适用于光学区直径和过渡区宽度经常调整的情况,对各种眼屈光不正情况均适用;在光学区宽度确定后,过渡区宽度的改变不影响光学区的切削

深度;模型有较强的通用性,它适用于不同的光学区矫正模型;临床手术表明该模型是有效和安全的。

参考文献:

- [1] QUESNEL N M, LOVASIK J V, FERREMI C H, *et al.* Laser in situ keratomileusis for myopia and the contrast sensitivity function[J]. *Journal of Cataract and Refractive Surgery*, 2004, 30(6): 1209-1218.
- [2] RICHARD L, NEPOMUCENO B S, WACHLER B, *et al.* Use of large optical zones with the LADAR Vision laser for myopia and myopic astigmatism [J]. *Ophthalmology*, 2003, 110(7): 1384-1390.
- [3] DITZEN K, FIEDLER J, PIEGER S. Laser in situ keratomileusis for hyperopia and hyperopic astigmatism using the meditec MEL 70 spot scanner[J]. *Journal of Refractive Surgery*, 2002, 18(4): 430-434.
- [4] ZADOK D, RAIFKUP F, LANDAU D, *et al.* Long-term evaluation of hyperopic laser in situ keratomileusis[J]. *Journal of Cataract and Refractive Surgery*, 2003, 29(11): 2181-2188.
- [5] BUEELER M, MROCHEN M, SEILER T H. Maximum permissible torsional misalignment in aberration-sensing and wavefront-guided corneal ablation[J]. *Journal of Cataract and Refractive Surgery*, 2004, 30(1): 17-25.
- [6] AIZAWA D, SHIMIZU K, KOMATSU M, *et al.* Clinical outcomes of wavefront-guided laser in situ keratomileusis: 6-month follow-up[J]. *Journal of Cataract and Refractive Surgery*. 2003, 29(8): 1507-1513.
- [7] NAGY Z Z, ILONA P D, EDIT K, *et al.* Wavefront-guided photorefractive keratectomy for myopia and myopic astigmatism[J]. *Journal of Refractive Surgery*, 2002, 18(5): 615-619.
- [8] SEO K Y, LEE J B, KANG J J, *et al.* Comparison of higher-order aberrations after LASEK with a 6.0 mm ablation zone and a 6.5 mm ablation zone with blend zone[J]. *Journal of Cataract and Refractive Surgery*, 2004, 30(3): 653-657.
- [9] DANASOURY M ALAA E L. Prospective bilateral study of night glare after laser in situ keratomileusis with single zone and transition zone ablation[J]. *Journal of Refractive Surgery*, 1998, 14(5): 512-516.
- [10] MACRAE S. Excimer ablation design and elliptical transition zones[J]. *Journal of Cataract and Refractive Surgery*, 1999, 25(9): 1191-1197.
- [11] VINCIGUERRA P, SBORGIA M, EPSTEIN D, *et al.* Photorefractive keratectomy to correct myopic or hyperopic astigmatism with a cross-cylinder ablation[J]. *Journal of Refractive Surgery*, 1999, 15(2): 183-186.
- [12] 张运海, 沈建新, 胡利刚, 等. LASIK 和 PRK 术中角膜数学建模[J]. *中国生物医学工程学报*, 2003, 22(4): 289-295.
ZHANG Y H, SHEN J X, HU L G, *et al.* Mathematical models for laser in situ keratomileusis and photorefractive keratectomy[J]. *Chinese Journal of Biomedical Engineering*, 2003, 22(4): 289-295. (in Chinese)
- [13] 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及应用[J]. *光学 精密工程*, 2003, 11(3): 291-295.
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): 291-295. (in Chinese)
- [14] CHANG A W, TSANG A C, CONTRERAS J E, *et al.* Corneal tissue ablation depth and the Munnerlyn formula[J]. *Journal of Cataract and Refractive Surgery*, 2003, 29(7): 1204-1210.
- [15] 沈建新, 周儒荣, 廖文和. 准分子激光人眼像差矫正系统的研究[J]. *中国生物医学工程学报*, 2003, 22(5): 410-417.
SHEN J X, ZHOU R R, LIAO W H. The principle of excimer laser aberration correction system[J]. *Chinese Journal of Biomedical Engineering*, 2003, 22(5): 410-417. (in Chinese)
- [16] MANN S F, HO A, PAREL J M, *et al.* Ablation profiles for wavefront-guided correction of myopia and primary spherical aberration[J]. *Journal of Cataract and Refractive Surgery*, 2002, 28(5): 766-774.

作者简介:张运海(1975 -),男,湖北枣阳人,南京航空航天大学博士研究生,研究方向 CAD/CAM 技术、生物医学工程。