

文章编号 1004-924X(2003)03-0291-05

准分子激光矫正复性近视散光的屈光学机理及应用

张运海, 沈建新, 廖文和

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要:提出一种矫正复性近视散光的角膜修正模型,将近视和散光的矫正融合在一起。用患眼的球镜度数和散光度数等建立了修正模型的数学方程,用散光的轴位角度确定了模型建立时所用的坐标系与激光切削角膜时所用坐标系之间的转换关系。模型确定的角膜修正区域形状随散光的变化而变化。该模型已经用于临床指导眼屈光性手术;33 只复性近视散光眼接受了该模型指导的 LASIK 手术。术前平均球镜度为 -6.00 ± 2.14 D,平均等量球镜度为 -6.43 ± 2.18 D,平均柱镜度为 -0.86 ± 0.41 D,平均裸眼视力为 0.12 ± 0.08 ;术后一天这些值分别为: -0.22 ± 0.74 D, -0.43 ± 0.85 D, -0.42 ± 0.62 D, 0.88 ± 0.18 。结果表明:手术后眼睛的球镜度、柱镜度减退了,裸眼视力提高了。

关键词:复性近视散光;角膜;数学模型;LASIK

中图分类号:R779.63, R778.1 文献标识码:A

Use of excimer to correct compound myopic astigmatism

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

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

Abstract: With the relationship between the coordinate used to construct the model and the coordinate used to control excimer laser beams established by the astigmatic axis, a cornea ablation model was constructed using the sphere and the cylinder for correction of refractive errors of compound myopic astigmatism. The 33 eyes with compound myopic astigmatism has a mean sphere of -6.00 ± 2.14 D, a mean spherical equivalent refraction of -6.43 ± 2.18 D, a mean cylinder of -0.86 ± 0.41 D, and a mean uncorrected visual acuity of 0.12 ± 0.08 before LASIK operation using the model, and had a mean sphere of -0.22 ± 0.74 D, a mean spherical equivalent refraction of -0.43 ± 0.85 D, a mean cylinder of -0.42 ± 0.62 D, and a mean uncorrected visual acuity of 0.88 ± 0.18 one day after LASIK operation using the model. Practice proved the mathematic cornea ablation model is safe and effective for correction of compound myopic astigmatism.

Key words: compound myopic astigmatism; corneal; mathematical model; LASIK

1 引言

近视患者中,复性近视散光占有较大的比

例。目前流行用准分子激光矫正近视,手术具有较高的有效性和安全性^[1]。手术方法主要有两种:准分子激光原位角膜磨镶术 LASIK(Laser in Situ Keratomileusis)和准分子激光屈光性角膜切削术 PRK(Photorefractive Keratectomy)。两者

收稿日期:2003-01-20;修订日期:2003-03-24。

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

都是用波长为 193 nm 的 ArF 准分子激光对角膜进行切削,改变角膜前表面的曲率,也即改变角膜的屈光力,使平行光线重新聚焦在视网膜上,达到治疗近视的目的。在单纯近视的情况下,角膜修正的机理较简单^[2]。在复性近视散光时,一方面要矫正近视,另一方面要矫正散光,角膜修正的机理较复杂。Paolo Vinciguerra 等人先在角膜的两条主子午线上各削掉一半的散光力量,然后再矫正近视,这样实现了治疗复性近视散光^[3]。

针对复性近视散光情况,将近视和散光的矫正融合在一起,提出了一种角膜修正模型,并研究了散光的轴位和散光的程度对角膜修正区域的影响。文中的方法已经运用到临床中,取得了很好的手术效果。

2 角膜修正量的数学模型

2.1 角膜修正原理

角膜位于眼的最前端,其屈光力占眼屈光系统总屈光力的 70%,而角膜的屈光力主要决定于其前表面,因此改变角膜前表面的屈光力以矫正近视是可行且有效的^[4]。

复性近视散光是规则散光的一种,平行光线经过眼屈光系统后在视网膜之前形成两条焦线,两条焦线之间焦间距 (focal distance) 代表散光的程度。矫正目的是使焦间距减小,且使焦线本身缩短,还要使两条焦线向视网膜方向移动,最终使两条焦线在视网膜上融合成为一个焦点^[5]。

矫正时应将角膜表面切削得较平坦一些,使得术前眼屈光力最大的方位角膜表面屈光力减小较多,眼屈光力最小的方位角膜表面屈光力减小较少。

2.2 模型坐标系的建立及修正量的数学描述

在复性近视散光时,角膜各子午线的曲率半径大小不同,其中两条互相垂直且屈光力相差最大的子午线称为主子午线,一条曲率半径最小,屈光力最大;一条曲率半径最大,屈光力最小。

如图 1 所示, x 轴位于曲率半径最大的主子午线所在的平面内, y 轴位于曲率半径最小的主子午线所在的平面内, z 轴和视轴重合,坐标系原点位于曲率半径最小的主子午线的曲率中心。

图中 $BAQCP$ 表示修正前的角膜表面, PBQ 圆弧表示曲率半径最小的主子午线,其曲率半径

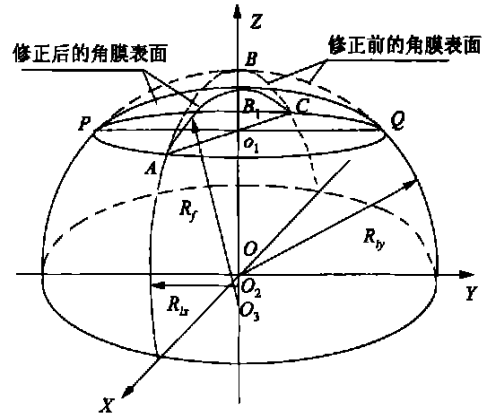


图 1 复性近视散光时的角膜修正模型

Fig. 1 Correction model for compound myopic astigmatism

为 R_{ix} , 曲率中心为 O_2 。 $BAQCP$ 圆弧表示曲率半径最大的主子午线,其曲率半径为 R_{ix} , 曲率中心为 O_2 。 $B1AQC$ 表示修正后的角膜表面,它是一个球面,半径为 R_f , 曲率中心为 O_3 。两个曲面之间的部分为角膜的修正量。线段 AC 为曲率半径最大的主子午线的修正区间,其长度记为 $2X_0$; 线段 PQ 为曲率半径最小的主子午线的修正区间,其长度记为 $2Y_0$ 。

角膜的修正量可以用下述方程表示:

$$z(x, y) = \sqrt{(\sqrt{R_{ix}^2 - x^2} + R_{iy} - R_{ix})^2 - y^2} - \sqrt{R_f^2 - x^2 - y^2} + c, \quad (1)$$

c 的值由边界条件 $z(X_0, 0) = z(0, Y_0) = 0$ 给定:

$$c = \sqrt{R_f^2 - X_0^2} - \sqrt{R_{ix}^2 - X_0^2} - R_{iy} + R_{ix}$$

$$\text{或: } c = \sqrt{R_f^2 - Y_0^2} - \sqrt{R_{iy}^2 - Y_0^2}$$

在 $(0, 0)$ 点处修正深度最大, 设其值为 H , 则:

$$\begin{aligned} H &= R_{ix} - R_f + \sqrt{R_f^2 - X_0^2} - \sqrt{R_{ix}^2 - X_0^2} \\ &= R_{iy} - R_f + \sqrt{R_f^2 - Y_0^2} - \sqrt{R_{iy}^2 - Y_0^2}, \end{aligned} \quad (2)$$

3 修正量模型的具体实现

3.1 修正量模型公式中参数的确定

为了确定角膜修正量公式 (1) 中 R_{ix} 、 R_{iy} 和 R_f , 术前应检查出眼的屈光状态, 用静态检影法或

主观插片法测量出患眼的矫正镜片值(球镜度 D_{sph} 、散光度 D_{cyl} 和散光角度 a),尚需用角膜地形图仪测量出患眼的角膜 K 值(用 D_k 表示),它能精确分析角膜表面 95% 的屈光度状况,对角膜中央 8.0 mm 范围内屈光度测量精度达 $0 \sim 0.07 D^{[6]}$ 。

D_{sph} 和 D_{cyl} 相当于普通眼镜的屈光度,需将其转换为人眼上的屈光不正度 D_{sphc} 和 $D_{cylc}^{[7]}$:

$$D_{sphc} = D_{sph} / (1 - dD_{sph}), \quad (3)$$

$$D_{cylc} = D_{cyl} / (1 - dD_{cyl}), \quad (4)$$

d 为镜目距离(单位为 m,国人一般约为 0.012 m)。 D_{sph} 、 D_{sphc} 、 D_{cyl} 和 D_{cylc} 的单位均为 D , D_{sph} 和 D_{cyl} 为负数形式。

在测量得到了 D_k 和计算出 D_{sphc} 和 D_{cylc} 后, R_{ix} 、 R_{iy} 和 R_f 可用下列公式计算:

$$R_{ix} = \frac{(n-1)}{D_k + (1/2) D_{cylc}}, \quad (5)$$

$$R_{iy} = \frac{(n-1)}{D_k - (1/2) D_{cylc}}, \quad (6)$$

$$R_f = \frac{(n-1)}{(D_k + (1/2) D_{cylc} + D_{sphc})}, \quad (7)$$

上述公式中 n 为角膜折射率,通常取为 1.376, R_{ix} 、 R_{iy} 和 R_f 的单位为 m。

这样就可以用公式(1)计算角膜上每一点的切削深度。

3.2 散光轴位的确定

在修正量数学模型公式(1)的建立过程中,坐标系的 x 轴在角膜曲率半径最大的主子午线所在的平面上, x 轴和水平位的夹角即为散光的轴位角度,如图 2 所示。散光轴位严格地位于水平位的人很少,事实上,轴位分布在 $180 \pm 20^\circ$ 范围内的散光眼也只占整个散光眼的 39%^[8]。由于不同的患眼散光轴位很可能不同,上述修正量模型所采用的坐标系在不停地变动,需将上述修正量对应的位置坐标转换为用一个静态的坐标系表示(如图 2 所示)。

图 2 中虚线坐标系 xOy 为修正量模型公式(1)所采用的坐标系,实线坐标系 XOY 为静态坐标系, OX 轴位于水平位。

在 xOy 坐标系中,角膜上位置为 (x, y) 的点在 XOY 坐标系中的坐标为:

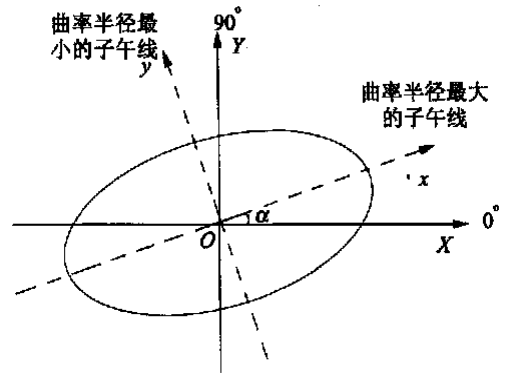


图 2 两主子午线的位置示意图

Fig. 2 Positions of the two primary meridians

$$\begin{aligned} X &= x \times \cos \alpha - y \times \sin \alpha \\ Y &= y \times \cos \alpha + x \times \sin \alpha \end{aligned}, \quad (8)$$

这样,计算角膜上某一位置的修正深度用 XOY 坐标系较方便;在用激光切削该位置时用 xOy 坐标系的坐标值控制激光脉冲的移动位置较方便。

3.3 散光对修正区域的影响

曲率半径最大的主子午线上的修正区间 AC 常取为 6.5 mm (X_0 为 3.25 mm),可根据病人的情况作些调整,病人的角膜较厚、近视的度数不太高,可适当取大一些。已知了 X_0 ,即可以用(2)式得出曲率半径最小的主子午线上的修正区间 PQ ($2 Y_0$):

$$Y_0 = \sqrt{\left(\frac{R_f^2 - R_{iy}^2 - b^2}{2b}\right)^2 + R_{iy}^2}, \quad (9)$$

其中:

$$b = \sqrt{R_f^2 - X_0^2} - \sqrt{R_{ix}^2 - X_0^2} - R_{iy} + R_{ix}$$

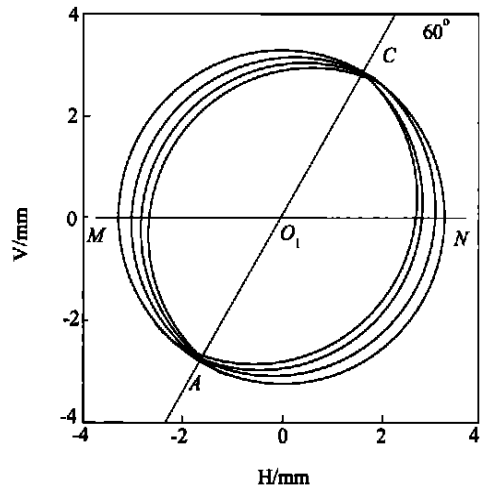


图 3 散光对角膜修正区域的影响

Fig. 3 Influence of astigmatism on the correction field

在给定了曲率半径最大的子午线的修正区间 AC 时,角膜修正区域形状随散光的度数改变而发生变化,如图 3 所示。

图中 $\angle NO_1C$ 为散光角, MN 为水平位, AC 为角膜曲率半径最大的主子午线所在的位置。从外到内对应的眼屈光情况分别为: - 6.0 DS, -

6.0 DS \wedge - 1.5DC $\times 60^\circ$, - 6.0 DS \wedge - 3.0 DC $\times 60^\circ$, - 6.0 DS \wedge - 4.5 DC $\times 60^\circ$ (假设它们的初始角膜 K 值 D_k 为 44.0 D)。

表 1 手术前后的眼屈光情况

Tab. 1 Refractive states before surgery, one day and one month after surgery

	平均球镜度	平均等量球镜度	平均柱镜度	平均裸眼视力
术前	- 6.00 \pm 2.14 D	- 6.43 \pm 2.18 D	- 0.86 \pm 0.41 D	0.12 \pm 0.08
术后 1 天	- 0.22 \pm 0.74 D	- 0.43 \pm 0.85 D	- 0.42 \pm 0.62 D	0.88 \pm 0.18
术后 1 月	- 1.02 \pm 0.91 D	- 1.34 \pm 0.89 D	- 0.64 \pm 0.57 D	0.87 \pm 0.23

4 临床应用结果

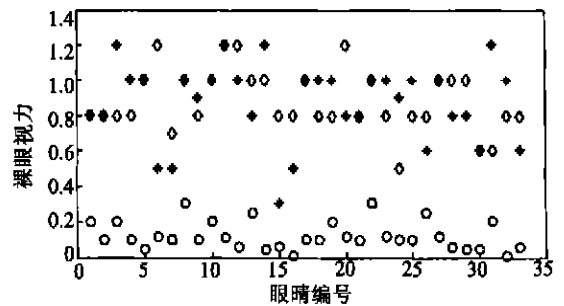
文中角膜修正的方法已经用于临床指导眼屈光性手术。我们统计了 33 例使用文中角膜修正方法指导的 LASIK 手术,手术前进行了常规裂隙灯及眼底检查、散瞳后检影及电脑验光、测量角膜地形图、超声角膜厚度测量、眼压检查、获得最佳矫正视力。手术后 1 天及 1 月分别检查了屈光状态(散瞳后电脑验光及裸眼视力检查)。这 33 例术前均为复性近视散光眼。

手术前后的眼屈光情况见表 1。手术后眼睛的球镜度大大地减退了。手术前球镜度为 - 10.00 ~ - 2.75 D,有 60.6% 的眼睛球镜度 < - 5 D,81.8% 的眼睛球镜度 < - 3.5 D;手术后 1 天球镜度为 - 1.75 ~ + 1.0 D,84.8% 的眼睛球镜度在 - 1.0 ~ + 1.0 D,63.6% 在 - 0.5 ~ + 0.5 D;手术后 1 月 48.5% 的眼睛球镜度在 - 1.0 ~ 0.5 D(没有球镜度大于 0.5 D 的眼睛),33.3% 在 - 0.5 ~ + 0.5 D。

手术后柱镜度显著减退了。术前柱镜度为 - 2.25 ~ - 0.5 D,45.5% 的眼睛柱镜度 7 - 1.0 D;术后第一天柱镜度为 - 1.25 ~ + 0.81 D,87.9% 的眼睛柱镜度在 - 1.0 ~ 1.0 D,39.4% 的眼睛柱镜度在 - 0.5 ~ + 0.5 D;手术后 1 月 84.8% 的眼睛柱镜度在 - 1.0 ~ 1.0 D,51.5% 在 - 0.5 ~ + 0.5 D。

手术后裸眼视力大大地提高了(参见图 4)。手术前裸眼视力为 0.01 ~ 0.3,有 87.9% 的眼睛

裸眼视力 0.2;术后第 1 天裸眼视力为 0.5 ~ 1.2,87.9% 的眼睛裸眼视力 0.8,45.4% 的眼睛裸眼视力 1.0;术后 1 月 84.8% 的眼睛裸眼视力 0.8,51.5% 的眼睛裸眼视力 1.0。术前有 19 只眼睛裸眼视力 0.1,术后 1 天这些眼睛中



“o”术前裸眼视力(Uncorrected visual acuity before surgery)
 “+”术后第 1 天的裸眼视力(Uncorrected visual acuity 1 day after surgery)
 “*”术后 1 月的裸眼视力(Uncorrected visual acuity 1 month after surgery)

图 4 术前、术后 1 天和术后 1 月的裸眼视力

Fig. 4 Uncorrected visual acuity before surgery, 1 day and 1 month after surgery

有 16 只眼睛裸眼视力 0.8,占 84.2%。

术后 1 月内手术效果产生了一些回退,可以在术前改善激光光斑的形状从而提高角膜切削表面的光滑度,术后点用激素类药水来预防。

5 结 论

本文探讨了复性近视散光的屈光矫正机理,提出了角膜修正的数学模型。本文的角膜修正机理在临床应用中取得了很好的手术效果。33例复性近视散光眼睛接受了用文中的方法指导的LASIK手术,术后第1天同术前相比,散瞳后电

脑验光中的球镜度大大地减退了,84.8%的眼睛球镜度在 $-1.0 \sim +1.0$ D;柱镜度也明显减退,87.9%的眼睛柱镜度在 $-1.0 \sim 1.0$ D;裸眼视力大大提高了,87.9%的眼睛裸眼视力 ≥ 0.8 。术后1个月,产生了一些屈光回退,但仍有84.8%的眼睛裸眼视力 ≥ 0.8 。这说明,该角膜修正量模型具有较高的精确性,在眼屈光性手术如LASIK和PRK中,可以直接利用本文的方法指导手术。

参考文献:

- [1] ZALDIVAR R, DAVIDORF J M, OSCHEROW S. Laser in situ keratomileusis for myopia from -5.50 to -11.50 diopters with astigmatism[J]. *Journal of Refractive Surgery*, 1998, 14:19-25.
- [2] 江海河,余吟山,陆志贤,等. 近视眼激光角膜切除术原理及控制方法[J]. 激光生物学报, 1998, 7(4):249-253.
JIANG H H, YU Y SH, LU ZH X, *et al.* The principle and controlling method of excimer laser photorefractive kerectectomy [J]. *Acta Laser Biology Sinica*, 1998, 7(4):249-253. (in Chinese)
- [3] VINCIGUERRA P, SBORGIA M, EPSTEIN D, *et al.* Photorefractive kerectectomy to correct myopic or hyperopic astigmatism with a cross-cylinder ablation[J]. *Journal of Refractive Surgery*, 1999, 15:183-186.
- [4] 陆文秀. 准分子激光屈光性角膜手术学[M]. 北京:科学技术文献出版社, 2000. 57-58.
LU W X. *Excimer laser refractive corneal surgery* [M]. Beijing: Scientific and Technical Document Publishing House, 2000. 57-58. (in Chinese)
- [5] 徐广第. 眼科屈光学[M]. 北京:军事医学科学出版社, 1995. 67-77.
XU G D. *Eye Refractive Theory* [M]. Beijing: Military Science Publishing House, 1995. 67-77. (in Chinese)
- [6] 徐方,扬冠,陈英华,等. 角膜曲率计与角膜地形图仪测量角膜屈光度的对比研究[J]. 临床眼科杂志, 2001, 9(6):454-455.
XU F, YANG G, CHEN Y H, *et al.* The study of comparison of corneal diopter measured by corneal keratometer and corneal topographer[J]. *Journal of Clinical Ophthalmology*, 2001, 9(6):454-455. (in Chinese)
- [7] 虞启琏. 验光与配镜[M]. 天津:天津大学出版社, 1990. 327-328.
YU Q L. *Optometry and providing glasses* [M]. Tian Jin: Tian Jin University Publishing House, 1990. 327-328. (in Chinese)
- [8] 唐学玲,方臻. 582例散光轴向分布的研究[J]. 中国实用眼科杂志, 1999, 17(3):179-181.
TANG X L, FANG ZH. A clinic analysis of astigmatic axes in 582 cases [J]. *Chinese Journal of Practical Ophthalmology*, 1999, 17(3):179-181. (in Chinese)

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, E-mail: zhangguanyunhai@sohu.com Tel:025-4891003;
沈建新(1969-),男,江苏常熟人,副教授,南京航空航天大学教师,主要研究方向 CAD/CAM、制造业企业信息化、生物工程,发表学术论文 20 余篇;
廖文和(1965-),男,江西万安人,教授,博士生导师,南京航空航天大学研究生院副院长,主要研究方向 CAD/CAM、制造业企业信息化,发表学术论文 40 余篇。