

角膜屈光手术后角膜光焦度测量误差的研究

刘永基¹ 王雁² 王肇圻¹ 左彤² 孔强³

¹南开大学现代光学研究所光学信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071
²天津眼科医院, 天津 300020
³天津宇光光学公司, 天津 300384

摘要 测量了角膜屈光手术后人眼角膜前后表面的生理数据。在角膜数据的基础上,从理论上分析了等效折射率和曲率半径测量误差对屈光手术后角膜光焦度测量的影响。结果表明,由等效折射率和角膜曲率半径测量误差导致的角膜光焦度测量误差随着角膜前表面非球面系数的增大而增大,且有统计学意义($P < 0.05$);等效折射率和角膜曲率半径测量误差均会导致测量得到的角膜光焦度偏大,这两种误差存在叠加效应,使得屈光手术后临床仪器给出偏高的角膜光焦度。另外,角膜光焦度测量误差与 Q 值成正比关系,且有统计学意义($P < 0.05$)。屈光角膜手术后人眼角膜光焦度的测量,不仅要考虑等效折射率带来的误差,也要考虑角膜曲率半径测量误差造成的角膜光焦度测量误差。

关键词 医用光学;角膜光焦度;等效折射率;曲率半径误差;角膜屈光手术

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.s104003

Study on the Measurement Error on Corneal Vergence for Eyes After Corneal Refractive Surgery

Liu Yongji¹ Wang Yan² Wang Zhaoqi¹ Zuo Tong² Kong Qiang³

¹Key Laboratory of Optical Information Science and Technology, Ministry of Education, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China
²Tianjin Eye Hospital, Tianjin 300020, China
³Tian Optics Incorporation, Tianjin 300384, China

Abstract The radius of anterior and posterior corneal surface, central corneal thickness and Q value of anterior and posterior corneal surface are obtained. Based on the corneal data, the effects of equivalent refractive index and error in radius of curvature on the corneal vergence measurement after refractive surgery are studied theoretically. The measurement error induced by equivalent refractive index and error in radius of curvature increases with the Q value of corneal anterior surface ($P < 0.05$). Both the equivalent refractive index and error in radius of curvature lead to the overestimation of the corneal vergence, and the additive effects of the equivalent refractive index and error in radius of curvature lead to the overestimation of the corneal vergence by the clinical instruments. In addition, the measurement error linearly relates to the Q value of anterior corneal surface ($P < 0.05$). The error in radius of curvature as well as the equivalent refractive index should be considered in the corneal vergence measurement for eyes after refractive surgery.

Key words medical optics; corneal vergence; equivalent refractive index; error in radius of curvature; corneal refractive surgery

OCIS codes 330.7328; 330.7335; 330.7326

1 引言

临床数据表明,角膜屈光手术后人眼并发白

内障后,根据现有的人工晶体(IOL)公式计算出的人工晶体度数偏小,使得人工晶体植入术后人眼出

收稿日期: 2011-07-15; 收到修改稿日期: 2011-08-31

基金项目: 自然科学基金(60978068)、天津市科技攻关项目(10ZCKFGX18800)和中央高校基本科研业务费资助课题。

作者简介: 刘永基(1977—),女,博士,讲师,主要从事视光学方面的研究。E-mail: yjliu@nankai.edu.cn

现不同程度的远视。我国近几年接受屈光手术的人数年均超过 50 万^[1,2],并且仍呈上升趋势。相信随着时间的推移,具有角膜屈光手术史的年龄相关性白内障患者将成为一个庞大的患者群体,因此,解决屈光手术后人工晶体度数的准确计算这一问题迫在眉睫,已成为世界范围内的研究热点。

造成人工晶体度数不准确的原因主要是角膜屈光手术后角膜光焦度测量值偏大。在临床应用中^[3],临床仪器实际测量的是角膜前表面的曲率半径 r ,然后根据 $(n-1)/r$ 计算出角膜的光焦度临床上常用 k 值表示。采用这种方法计算角膜光焦度,实际上是将角膜看做单一折射面的薄透镜。其中 n 并不是角膜的真实光焦度,而是等效折射率,绝大多数仪器取为 1.3375。这种测量方法,基于两个基本假设:角膜前后表面曲率半径之比为常数。由此假设得到等效折射率 1.3375。另外一个假设是,角膜在 3~4 mm 的区域内可以认为是球面,这是因为临床仪器如角膜曲率计是在角膜顶点外 3 或 4 mm 的圆环上测量角膜的曲率半径。基于第二个假设,角膜曲率计采集的角膜前表面的曲率半径就可以认为是角膜顶点处的曲率半径。尽管这两个假设对于没有屈光手术史的人眼是否成立也存在争议^[4,5],但是对于没有屈光手术史的人眼,由测量得到的角膜光焦度计算出的人工晶体度数却是正确的。

但是,对于屈光手术后的人眼,这两个假设显然都不成立。矫正近视的角膜屈光手术使角膜前表面变得更为平滑^[6],而角膜后表面基本上是不变的,这样角膜前后表面的曲率半径之比发生了变化,如果还用 1.3375 计算角膜的光焦度,显然会带来误差。另外,角膜屈光手术后,角膜前表面变为扁圆椭球,第二个假设不再成立。为了补偿这两个假设带来的误差,临床上一般根据临床数据,采用统计的方法,修正临床仪器得出的角膜的光焦度,进而提出适用于有屈光手术史人眼的人工晶体计算公式。但是目前仍没有得到准确度高的计算有屈光手术史人眼的人工晶体公式。因此,研究这两个假设对于屈光手术后角膜光焦度测量误差的影响具有重要意义。对于第一个假设,国际上研究的比较多,普遍认为等效折射率 1.3375 会造成角膜光焦度测量值偏大^[7]。对于第二个假设,就我们所知鲜有人研究。本文力图分析假定这两个基本假设会造成多大的测量误差,它们对于角膜屈光手术后角膜光焦度的测量各有什么影响。

2 方 法

测量了接受飞秒 LASIK 手术的 14 个人,28 只眼。受试者的平均年龄为 26 ± 6 岁,最大年龄为 39 岁,最小年龄为 18 岁。手术前这些眼睛的等效球度为 $-6.87 \pm 1.42D$,其中最大光焦度为 $-9.25D$,最小光焦度为 $-4D$ 。用 Pentacam 工具(oculus,德国)测量了人眼术后的前后表面曲率半径、角膜前后表面的 Q 值、角膜中央厚度。

将角膜表面看做旋转对称二次曲面,根据测得的数据,建立角膜模型。角膜的表面可以用二次曲面表示:

$$x^2 + y^2 + (1 + Q)z^2 - 2zR = 0, \quad (1)$$

式中 R 为顶点处的曲率半径, Q 为非球面系数, x 为水平坐标, y 为竖直坐标, z 为旋转对称轴。为简化起见,可以表示成 $x-z$ 平面的形式:

$$x^2 + (1 + Q)z^2 - 2zR = 0. \quad (2)$$

角膜前表面上任意一点处的曲率半径可以由如下公式求出:

$$R_a = \left| \frac{(1 + x'^2)^{3/2}}{x''} \right|. \quad (3)$$

式中 x' 为对 z 的一阶偏导数, x'' 为对 z 的二阶偏导数。

另外,角膜在后顶点处的光焦度计算公式为

$$F_v = \frac{F_g}{1 - \frac{d}{n_c} F_a}. \quad (4)$$

式中 F_v, F_g, F_a, d 和 n_c 分别表示角膜后顶点处的光焦度,由高斯公式计算出的角膜光焦度,角膜前表面的光焦度,角膜中心处的厚度和角膜的折射率。为清晰起见,后面的计算中,由(4)式得到的光焦度用 F 表示;由 $(1.3375-1)/r$ 得到的光焦度用 k 表示。

在角膜模型的基础上,为了分析等效折射率和曲率半径测量误差对屈光手术后角膜光焦度的影响,计算如下:

1) 在角膜顶点处,角膜后顶点处的光焦度 F_v 和由 $(1.3375-1)/R$ 计算出的角膜光焦度 K_{apex} 。

2) 在距离角膜顶点 1.5 mm 处,计算了由 $(1.3375-1)/R$ 计算出的角膜光焦度 K_{manual} 。 K_{manual} 相当于角膜曲率计的测量值。

3) 计算了 $\Delta F_{\text{apex}} = K_{\text{apex}} - F_v, \Delta K = K_m - K_{\text{apex}}, \Delta F = K_{\text{manual}} - F_v$,其具体含义将在后面具体说明和讨论。

以上计算均在 Matlab(Version 7.0, Mathworks)中编程完成,而统计分析则是用 SPSS(Version 11.5,

SPSS, Inc.)完成。

3 结果与分析

3.1 角膜数据

角膜屈光手术前,人眼的等效球度平均值为 $-7.12 \pm 1.72\text{D}$ ($-4\text{D} \sim -10.5\text{D}$),角膜屈光手术后,人眼的等效球度平均值 $-0.26 \pm 0.71\text{D}$ ($-1.69\text{D} \sim 1.44\text{D}$)。术后角膜各个参数值如表 1 所示。

表 1 角膜屈光手术后角膜参数

Table 1 Corneal parameters after refractive surgery

	R_a/mm	R_p/mm	d/mm	Q_a	Q_p
After surgery	9.02 ± 0.35	6.31 ± 0.14	0.44 ± 0.06	1.05 ± 0.41	-0.26 ± 0.11

表 1 中的 R_a, R_p, d, Q_a 和 Q_p 分别表示角膜前表面的曲率半径,后表面曲率半径,角膜中心厚度和角膜前表面非球面系数角膜后表面非球面系数。表 1 的数据显示,屈光角膜手术后,前表面的非球面系数为正值,其平均值大小为 1.05。Anera^[8]报道了角膜屈光手术一个月后人眼角膜前表面的 Q 值为 0.65。而 Hersh 等^[9]则报道屈光手术后的角膜前表面的 Q 值为 0.95。本文结果略大于他们的结果,这可能由如下两个因素造成。本课题组采集的人眼,其术前屈光不正比较大,平均值为 $-7.12 \pm 1.72\text{D}$ ($-4\text{D} \sim -10.5\text{D}$)。而在文献[8]的报道中,其人眼术前屈光不正的平均值为 $-4.8 \pm 2.4\text{D}$, ($-1.25\text{D} \sim -9\text{D}$),在文献[9]中,其人眼术前屈光不正的平均值为 $-5.85 \pm 1.71\text{D}$ ($-3.75\text{D} \sim -10.75\text{D}$)。研究表明^[8],术前较高的屈光不正会导致术后较高的 Q 值。另外一个原因就是,在本课题组研究中, Q 值的采集在 1 个月左右,而文献[8]的研究表明,屈光手术后,在前三个月里, Q 值呈下降趋势。

3.2 等效折射率对角膜屈光手术后人眼角膜光焦度的影响

对于没有接受屈光手术的人眼,当用 1.3375 计算角膜的光焦度时,由仪器得到的角膜光焦度的含义是角膜后顶点处的光焦度。因此,在分析等效折射率和角膜曲率半径测量误差对角膜光焦度的影响时,我们主要与角膜屈光手术后角膜后顶点处的光焦度比较。

为了单纯分析等效折射率对角膜光焦度测量的影响,我们计算了顶点处的 K_{apex} 和角膜后顶点处的光焦度 F_v ,并比较了它们的差,结果如图 1 所示。

由图 1 可以看出, K_{apex} 与 F_v 之差为正值,这表明由等效折射率 1.3375 计算出的角膜光焦度高估

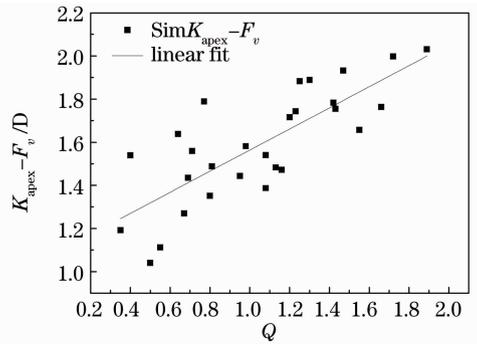


图 1 角膜顶点处由 1.3375 计算出的光焦度与角膜后顶点光焦度之差随角膜前表面 Q 值的变化

Fig. 1 Difference between the corneal vergence obtained by 1.3375 and central corneal back vertex power versus Q value at apex

了角膜后表面顶点处的光焦度。随着 Q 值的增大, $K_{\text{apex}} - F_v$ 也呈增大的趋势。图 1 中的实线为线性拟合结果。线性拟合表明, $K_{\text{apex}} - F_v$ 与 Q 有线性关系 ($r=0.62$),且具有统计学意义 ($p<0.05$)。当 Q 值由 0.35 增加到 1.89 时, K_{apex} 与 F_v 之差也从 0.61D 增加到 2.39D。这表明,术后角膜前表面的 Q 值越大,等效折射率越会高估角膜后表面顶点处的光焦度。为了解释这一现象,分析了屈光手术后角膜前表面的非球面系数 Q 与人眼矫正度数的关系,结果如图 2 所示。

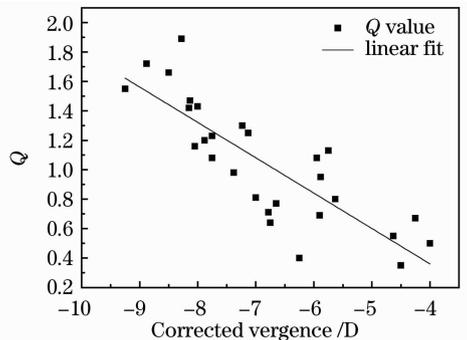


图 2 矫正光焦度与手术后角膜前表面 Q 值的关系

Fig. 2 Q value of anterior corneal surface versus the corrected vergence after surgery

图 2 的结果表明,屈光手术后角膜前表面的 Q 值与人眼的矫正度数成正比关系 ($r=0.67, p<0.05$)。矫正度数越大,术后角膜前表面的 Q 值越大。结合图 1 的分析结果,可知,当矫正度数大时, K_{apex} 与 F_v 之差也就越大。这是因为,当矫正度数大时,屈光角膜手术后角膜前表面变得更为平坦,角膜前后表面曲率半径之比的变化较大,那么当用原来的 1.3375 计算角膜的光焦度时,就会带来更大的误差。这与国际上的研究结果一致^[4]。

3.3 曲率半径测量误差对角膜屈光手术后人眼角膜光焦度的影响

曲率半径误差主要是由于测量点不在角膜顶点,那么测得的角膜曲率半径与角膜顶点处的曲率半径之间存在差别,从而给角膜光焦度的测量带来了误差。为了单纯分析曲率半径测量误差的影响,比较了距角膜顶点 1.5 mm 处的光焦度 K_{manual} 与角膜顶点处 K_{apex} 的差别,结果如图 3 所示。

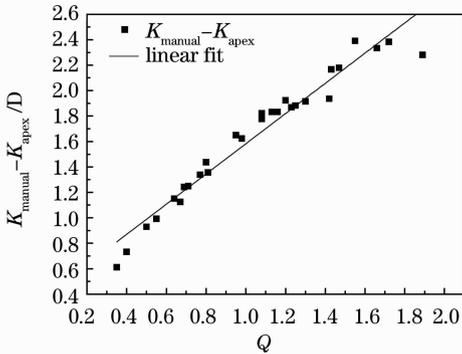


图 3 由 1.5 mm 处的曲率半径和 1.3375 计算出的角膜光焦度值与由角膜顶点处曲率半径和 1.33375 计算出的角膜光焦度值之差同 Q 值的关系

Fig. 3 Difference between corneal vergence obtained by 1.3375 on 1.5 mm ring and corneal vergence obtained by 1.3375 at apex versus Q-value

图 3 的结果表明, K_{manual} 与 K_{apex} 之差为正值,这表明,用距顶点 1.5 mm 处的曲率半径计算得到的角膜光焦度要比角膜顶点处的真实光焦度要大。角膜屈光手术后角膜前表面面型由扁长椭球,变为扁圆椭球。对于扁圆椭球,角膜顶点处的曲率半径大,而其他地方的曲率半径逐渐变小,进而导致在 1.5 mm 处测得的角膜光焦度大于角膜顶点处的光焦度。由图 3 可以看出,随着 Q 值的增大, K_{manual} 与 K_{apex} 之差越大,且具有较强的线性关系 ($r=0.95$, $p<0.05$)。结果如图 3 所示,可知当矫正度数越大时,曲率半径测量带来的误差越大。

对于角膜曲率半径测量误差对屈光手术后角膜光焦度测量的影响,研究很少。本课题组只看到了 Savini^[10] 的研究结果。他根据临床统计数据,发现角膜近中心区域的光焦度和角膜瞳孔区域的光焦度的差异没有统计学意义,得出了曲率半径测量误差对角膜光焦度测量没有影响的结论。但是, Maeda 等^[11] 却发现角膜近中心区域的光焦度和角膜瞳孔区域的光焦度的差异有统计学意义。另外,我们的数据是比较 1.5 mm 处和角膜顶点处的光焦度,而不是采用平均值的方式,因此更能准确地反映出角

膜曲率半径测量误差对角膜光焦度的影响。

3.4 等效折射率和曲率半径测量误差对角膜屈光测量的影响

为了综合分析等效折射率和角膜曲率半径测量误差对角膜光焦度的影响,我们计算了由 1.5 mm 处的曲率半径和 1.3375 计算出的角膜光焦度 K_{manual} 与角膜后表面顶点处的光焦度 F_v 之差,其结果如图 4 所示。

由图 4 可以看出, K_{manual} 与 F_v 差别较大,最小值为 1.80D,最大值则高达 4.38D,而平均值也高达 3.23D。这表明,等效折射率给角膜光焦度测量带来的误差和曲率半径测量误差带来的光焦度误差存在叠加关系,使得总的测量误差更大。

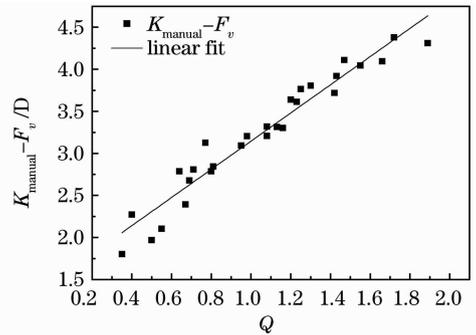


图 4 由 1.5 mm 处的曲率半径和 1.3375 计算出的角膜光焦度值与角膜后表面顶点处角膜光焦度值之差同 Q 值的关系

Fig. 4 Difference between corneal vergence obtained by 1.3375 on 1.5 mm ring and central corneal back vertex vergence versus Q-value

也就是说,对于接受屈光手术的人眼,角膜光焦度测量误差由两个因素造成,一个是等效折射率,另外一个因素是曲率半径测量误差。曲率半径测量误差对术后人眼角膜光焦度测量的影响大,不能够忽略。另外, K_{manual} 与 F_v 之差与角膜前表面的 Q 值存在有统计学意义的线性关系 ($r=0.94$, $p<0.05$)。Q 值越大, K_{manual} 与 F_v 之差越大,也就是说测量误差越大。这表明,屈光手术后人眼角膜前表面的 Q 值能够定性反映角膜光焦度的测量误差。

4 结 论

在临床数据的基础上,分析了等效折射率与曲率半径测量误差对屈光手术后人眼角膜光焦度的影响。结果表明,等效折射率带来的误差和角膜光焦度测量误差均会导致角膜光焦度测量偏大,且这两个误差存在叠加作用,使得屈光手术后临床仪器给出偏高的角膜光焦度。另外发现,角膜光焦度测量

误差与角膜前表面的 Q 值存在有统计学意义的强线性关系。屈光角膜手术后人眼角膜光焦度的测量,不仅要考虑等效折射率带来的误差,也要考虑角膜曲率半径测量误差造成的角膜光焦度的测量误差。

参 考 文 献

- 1 Qu Jia, Wang Qinmei, Zhou Xiangtian. Primary analysis on the safety and efficacy study of refractive surgery through multi-centers cooperative investigation [J]. *Chinese Journal of Optometry and Ophthalmology*, 2008, **10**(5): 321~324
瞿 佳, 王勤美, 周翔天. 中国屈光手术安全性和有效性的多中心协同研究初步分析 [J]. *眼视光学杂志*, 2008, **10**(5): 321~324
- 2 Li Rui, Wang Zhaoqi. Study on neural contrast sensitivity function at temporal frequencies [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(s1): 100504
李 蕊, 王肇圻. 时间频率下神经对比敏感度的研究 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(s1): 100504
- 3 Yang Jinsheng, Rao Xuejun, Rao Changhui. A corneal topography based on Hartmann-Shack sensor [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 826~831
杨金生, 饶学军, 饶长辉. 基于哈特曼-夏克传感器的角膜地形图测量仪 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 826~831
- 4 T. Olsen. Calculation of intraocular lens power: a review [J]. *Acta Ophthalmol. Scand.*, 2007, **85**(5): 472~485
- 5 G. Savini, P. Barboni, M. Carbonelli *et al.*. Agreement between pentacam and videokeratography in corneal power assessment [J]. *J. Refract. Surg.*, 2009, **25**(6): 534~538
- 6 Liu Yongji, Wang Zhaoqi, Lü You *et al.*. Effects of the reflection losses and nonnormal incidence of laser on the eye's visual quality after refractive procedure on a cornea [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 110~114
刘永基, 王肇圻, 吕 尤 等. 激光斜入射和反射对角膜屈光手术后人眼成像质量的影响 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(7): 110~114
- 7 H. Hashemi, S. Mehravaran. Day to day clinically relevant corneal elevation, thickness, and curvature parameters using the Orbscan II scanning slit topographer and the Pentacam scheimpflug imaging device [J]. *Middle East Afr J. Ophthalmol.*, 2010, **17**(1): 44~55
- 8 R. Anera, J. R. Jiméñez, L. G. Barco *et al.*. Changes in corneal asphericity after laser in situ keratomileusis [J]. *J. Cataract. Refract. Surg.*, 2003, **29**(4): 762~768
- 9 P. S. Hersh, K. Fry, J. W. Blaker. Spherical aberration after laser in situ keratomileusis and photorefractive keratectomy, clinical results and theoretical models of etiology [J]. *J. Cataract. Refract. Surg.*, 2003, **29**(11): 2096~2104
- 10 G. Savini, M. Carbonelli, P. Barboni *et al.*. Clinical relevance of radius of curvature error in corneal power measurements after excimer laser surgery [J]. *J. Cataract. Refract. Surg.*, 2010, **36**(1): 82~86
- 11 K. Maeda, S. D. Klyce, M. Smolek *et al.*. Disparity between keratometry-style readings and corneal power within the pupil after refractive surgery for myopia [J]. *Cornea.*, 1997, **16**(5): 517~524

栏目编辑: 韩 峰