

文章编号 1004-924X(2009)04-0707-06

# 基于人眼光学模型建立的角膜模型

孔梅梅<sup>1</sup>,高志山<sup>1</sup>,陈磊<sup>1</sup>,李新华<sup>2</sup>,瞿小妹<sup>3</sup>

(1. 南京理工大学电光学院,江苏南京210094;2. 金陵科技学院视光学技术学院,江苏南京210001;  
3. 复旦大学附属眼耳鼻喉科医院,上海200031)

**摘要:**考虑角膜面型的非球面特性,应用光学设计软件Zemax,从光学成像角度提出了结合人眼光学模型的角膜双二次曲面模型的建立方法;结合国人正视眼和近视眼的有关实测数据和分析结果,以人眼的波像差为评价函数,对初始模型眼进行优化,给出了符合国人眼特点的正视眼和近视眼模型中的角膜模型。讨论了矫正近视的矫正眼模型中的角膜理想模型和可用于角膜屈光手术中的切削模型,切削深度的最大值在角膜中心处,约 $26.5\ \mu\text{m}$ 。结果表明:基于人眼光学模型的角膜双二次曲面模型,符合角膜的面型特点,适合临床实际应用,可为波像差引导的个性化角膜切削方案提供更适用的数字化模型。

**关键词:**医用光学与生物技术;视觉光学;模型眼;角膜模型;角膜屈光手术

**中图分类号:**O435.2;R778 **文献标识码:**A

## Corneal model based on human eye optical models

KONG Mei-mei<sup>1</sup>, GAO Zhi-shan<sup>1</sup>, CHEN Lei<sup>1</sup>, LI Xin-hua<sup>2</sup>, QU Xiao-mei<sup>3</sup>

(1. *School of Electronic Engineering & Optoelectronic Technique, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China*; 2. *School of Optometry & Ophthalmology, Jinling Institute of Technology, Nanjing 210001, China*;  
3. *Department of Ophthalmology, EENT Hospital of Fudan University, Shanghai 200031, China*)

**Abstract:** In consideration of corneal aspheric surfaces and from the point of view of an optical imaging, a way combining of a corneal bi-conic model with human eye models was proposed with the optical design software Zemax (Zemax Development Corp. San Diego, Calif.). On analysis of measured results of Chinese emmetropic cornea and the collected data of Chinese myopic eyes, the initial model eye was optimized based on choosing the wavefront aberration of a human eye as the merit function. The corneal models of the emmetropic and myopic eyes and corrected eye models were presented and the relevant corneal ablation model was also given. The results show that the maximum ablation depth located at the center is about  $26.5\ \mu\text{m}$ . It is concluded that the corneal bi-conic model combining with the human eye models is accord with corneal surface characters, which can be applied in clinical analysis and can also provide a useful digital model of calculating wavefront ablation profiles for wavefront aberration supported customized corneal ablations.

收稿日期:2008-06-30;修订日期:2008-07-23.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60678048)

**Key words:** medical optics and biotechnology; visual optics; model eye; corneal model; corneal refractive surgery

## 1 引言

从光学角度而言,人眼是一个由多界面组成的复杂而又精密的光学系统,角膜是该系统中的主要光学分界面之一,位于眼球最前端,其屈光力占整个眼球光学系统静止状态时屈光能力的 $3/4$ <sup>[1]</sup>,是人眼屈光系统的重要组成部分。角膜表面较小的改变都可能对视力产生较大影响,而且,角膜形状、厚度及屈光力的测量对于眼科学上角膜功能的评价、角膜病变的诊断、角膜屈光手术的设计<sup>[2-3]</sup>、疗效观察等都是非常重要的。所以,通过建立模型分析角膜形态,进行角膜研究和临床应用尤为必要。

基于角膜面型的非球面性,目前已有不少角膜模型的有关研究。早先有一些学者提出的角膜前表面的椭球面的假设和研究结论<sup>[4]</sup>,后来在医学统计分析的基础之上,人们也给出了角膜非球面的具体表达,但是,除了人眼模型中的角膜形态表示,大多是独立的角膜数学模型或角膜屈光手术中的切削模型<sup>[5-7]</sup>,并没有与人眼整个系统完全密切结合的研究。角膜是人眼中重要屈光部分,人眼的作用是让人眼看清物体,对物体成像,从成像的角度,建立合理的尤其是与人眼的成像功能紧密联系的数字化角膜模型,具有实用的临床价值。而且,现有的人眼模型研究中,角膜的表述都是基于国外人眼数据的,由于人眼的种族差异性,需要基于中国人眼角膜的数据分析,进行具有我国人眼特点的角膜模型的建立研究,为进一步建立具有我国人眼特点的人眼模型提供研究基础。

本文应用光学设计软件 Zemax (Zemax Development Corp. San Diego, Calif.),以 Navarro 等<sup>[8-9]</sup>提出的人眼光学模型作为原始模型,结合国人正视眼和近视眼的有关数据收集和分析结果,从眼球光学系统成像角度,根据角膜的光学特性,建立了角膜模型和可用于屈光手术中的理想角膜模型。

## 2 正视眼模型中的角膜双二次曲面模型

用 Matlab 软件进行最小二乘法拟合角膜面型相对比较复杂,不适于实际临床应用,因此,现有的各种人眼模型中相应的角膜数学模型中,除了一些个性化人眼模型<sup>[10-11]</sup>外,大都采用了旋转对称的二次曲面方程:

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

其中, $R$ 为角膜表面顶点的曲率半径, $k$ 为二次曲面系数(当 $-1 < k < 0$ 时表示椭球面),如 Navarro 等<sup>[8-9]</sup>提出的人眼模型中角膜前表面 $k = -0.26$ ; Liou 等<sup>[12]</sup>提出的模型眼中,角膜前后表面的 $k$ 取值分别为 $-0.18$ 和 $-0.60$ 。

但是,用旋转对称的椭球面方程来表示角膜存在不足之处,因为,角膜表面上存在正交的陡峭子午线(曲率半径最小)和扁平子午线(曲率半径最大),是一个近似椭球面的 Toric 面<sup>[7]</sup>,即,从光学结构角度,角膜面在子午面和弧矢面上的曲率半径是不相等的,这也是角膜散光产生的原因<sup>[13]</sup>。所以,双二次曲面(Biconic)其实更适合表示角膜这一面型特点。Zemax 中,双二次曲面的表达式是表面矢高 $z$ 关于 $x$ 、 $y$ 的函数方程:

$$z = \frac{c_x x^2 + c_y y^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k_x)c_x^2 x^2 - (1+k_y)c_y^2 y^2}}, \quad (2)$$

其中,表面的顶点为坐标原点,光轴为 $z$ 轴,弧矢面在平面 $xoz$ 内,子午面在平面 $yo z$ 内, $c_x$ 和 $c_y$ 分别表示角膜在弧矢面和子午面内顶点的曲率, $c_x = \frac{1}{R_x}$ , $c_y = \frac{1}{R_y}$ ,分别称 $R_x$ 和 $R_y$ 为弧矢半径和子午半径, $k_x$ 和 $k_y$ 分别表示角膜在弧矢面和子午面内的二次曲面系数。

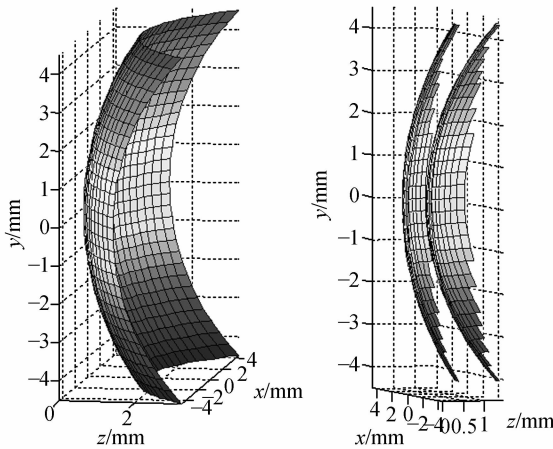
文献<sup>[7]</sup>在对角膜模型的建立研究中,根据我国人眼的实测数据,先由角膜面上各子午线的截痕曲线方程推断出角膜面型为椭球面,再由计算机分别随机取角膜前、后表面的3个点,应用椭球面的公式,求系数值,得到相应的角膜前后表面的椭球面数学表达式,其角膜前表面:

$$\frac{x^2}{8.053^2} + \frac{y^2}{7.973^2} + \frac{(z-8.226)^2}{8.226^2} = 1, \quad (3)$$

角膜后表面:

$$\frac{x^2}{6.836^2} + \frac{y^2}{6.745^2} + \frac{(z-8.080)^2}{7.527^2} = 1, \quad (4)$$

经化简可得到,上述方程式(3)、(4)对应的双二次曲面方程中的参数分别为,角膜前表面: $R_x \approx 7.884, k_x \approx -0.042, R_y \approx 7.728, k_y \approx -0.061$ ,角膜后表面: $R_x \approx 6.208, k_x \approx -0.175, R_y \approx 6.044, k_y \approx -0.197$ 。分别将这些参数代入式(2),得到了角膜前后表面面型在 Zemax 中双二次曲面的表达式,它们的面型如图 1 所示,图 1(a)和(b)分别为双二次曲面表示的角膜前表面和角膜前后表面在同一坐标上的三维图。



(a)角膜前表面 (a)Corneal anterior surface  
(b)角膜前后表面 (b)Corneal anterior and posterior surfaces

图 1 双二次曲面表示的角膜表面的三维图

Fig. 1 Three dimensional plots of corneal surfaces expressed by bi-conic

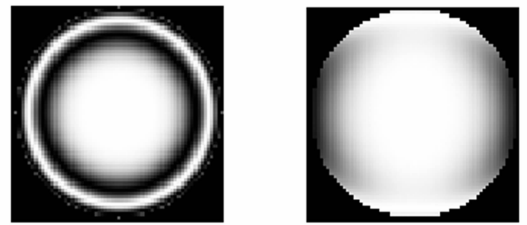
Navarro 模型眼的光学结构参数和波像差分别如表 1 和图 2(a)所示,以该模型为初始结构,将角膜前后表面用前述的我国人眼角膜参数的双二次曲面形式表示,未知的晶状体结构也用双二次曲面表示——人眼的散光除了与角膜散光有关外,还与晶状体表面的曲率不等有关<sup>[13]</sup>。将晶状体的结构设为变量,变量取值的范围参考大量文献中有关晶状体的测量值<sup>[12]</sup>,以原模型的像差作为评价函数,对系统进行优化,得到的新模型眼的波像差与原模型的像差误差为  $0.022\lambda$  ( $\lambda=0.543 \mu\text{m}$ ),如图 2(b)所示;两种模型眼内的主要屈光

元件——角膜和晶状体的面型结构如表 2 所示。新模型眼中的角膜数据采用我国正视眼角膜的实测数据,在此基础上,通过优化出国人正视眼中晶状体应该满足的参数特征,优化的模型眼符合一般正视眼的成像特征。

表 1 Navarro 模型眼的光学参数

Tab. 1 Optical parameters of Navarro model eye

眼球光学系统	面型		厚度 (mm)	折射率 ( $n_d$ )	
	曲率半径 (mm)	二次曲面系数 $k$			
角 膜	前表面	7.72	-0.26	0.55	1.367
	后表面	6.5	0		
前房	—	—	3.05	1.337 4	
晶状体	前表面	10.2	-3.131 6	4	1.42
	后表面	-6	-1		
玻璃体	—	—	16.4	1.336	
视网膜	-12.3	0	—	—	



(a)Navarro 模型眼的波像差 (a) Wavefront aberration of Navarro model eye  
(b)新模型眼的波像差与 Navarro 模型眼的误差 (b) Wavefront aberration error of new model eye with Navarro model eye

图 2 新模型眼与 Navarro 模型眼的波像差的对比

Fig. 2 Wavefront aberration contrast between new model eye and Navarro model eye

表 2 Navarro 模型眼与国人正视眼模型中主要屈光元件的面型

Tab. 2 Surfaces of main refractive elements in Navarro model eye and optimized Chinese emmetropic eye

主要屈光元件	Navarro 模型眼		国人正视眼模型		
	曲率半径 (mm)	二次曲面系数 $k$	子午面/弧矢面曲率半径 (mm)	二次曲面系数 $k$	
角 膜	前表面	7.72	-0.26	7.728/7.884	-0.061/-0.042
	后表面	6.5	0	6.044/6.208	-0.197/-0.175
晶 状 体	前表面	10.2	-3.13 16	10.608/9.787	-5.0/-3.719
	后表面	-6	-1	-6.070/-5.851	-2.0/-2.0

### 3 基于近视眼模型的可用于屈光手术的理想角膜模型

通过对角膜屈光手术术前 20 例患者(37 只近视度数  $< -6.00 \text{ m}^{-1}$  的中低度近视眼)——平均年龄  $(27.6 \pm 5.4)$  岁,屈光力为  $-(3.40 \pm 1.52) \text{ m}^{-1}$  的检测,收集有关的数据作为近视眼模型建立的基础。检测时角膜的前表面参数和人眼像差由结合角膜地形图测量和波前像差分析的 CRS-Master Twinline 系统(Carl Zeiss, Jena, Germany)测得,角膜的后表面参数及中心厚度、前房深度和晶状体厚度由 Pentacam 眼前节成像系统仪(Oculus, Wetzlar, Germany)测得,眼轴长由 IOL-Master 光学生物测量仪(Carl Zeiss, Jena, Germany)测得(表 3)。

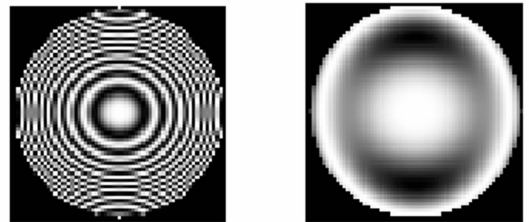
表 3 近视眼眼内有关参数的平均值及检测仪器

Tab. 3 Mean values of intraocular parameters in myopic eyes and relevant examining instruments

	眼内参数	平均值	检测仪器
角膜	前表面		CRS-Master Twinline
	子午面/弧矢面上的	7.717/	
	曲率半径(mm)	7.898	
	二次曲面系数 $k$	-0.204	
	后表面		Pentacam
	子午面/弧矢面上的	6.147/	
曲率半径(mm)	6.550		
	二次曲面系数 $k$	0.030	
	中心厚度(mm)	0.530	
	前房深度(mm)	3.146	
晶状体	中心厚度(mm)	3.378	
	眼轴长(mm)	24.838	IOL-Master

将收集的近视眼参数测量值进行整理分析,得到:瞳孔直径为 3 mm 时眼内有关参数的平均值如表 3 所示;人眼波像差的 PV 值约  $(5.33 \pm 1.59) \mu\text{m}$ 、RMS 值约  $(1.45 \pm 0.45) \mu\text{m}$ 。表 3 中,晶状体的中心厚度均值  $(3.378 \text{ mm})$  略小于人眼非调节状态时的厚度(约  $3.6 \text{ mm}^{[14]}$ ),可能是因为检测过程中患者的人眼没有完全处于松弛状态,所以在后面的优化过程中,将晶状体厚度设为变量,而该均值只作为一个参考值。

基于表 3 中的参数值,应用 Zemax 软件,仍以 Navarro 模型眼为初始结构,将角膜的测量均值代入双二次曲面模型,由于仪器不能给出角膜前后表面子午面和弧矢面两个方向上的二次曲面系数,所以,将这两个方向上的  $k$  设为变量,表 3 中的  $k$  值作为评价函数中的平均参考值;未知的晶状体结构设为变量;以测得的像差作为评价函数,对系统进行优化,建立了一个屈光度约为  $-4.87 \text{ m}^{-1}$  的近视眼模型,其波像差 PV 值约  $5.97 \mu\text{m}$ 、RMS 值约  $1.57 \mu\text{m}$ ,如图 3(a)所示,近视眼的像差主要表现为球差。



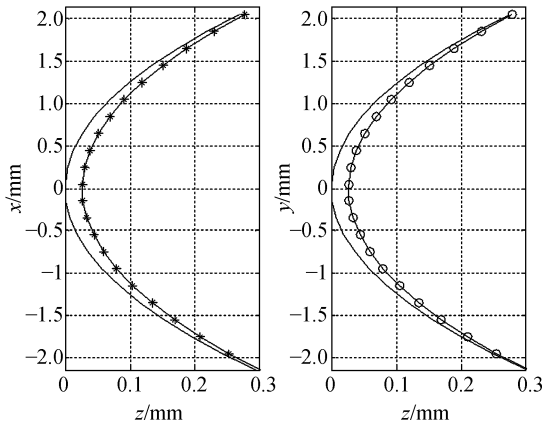
(a) 近视眼模型的波像差 (b) 近视眼优化模型的波像差

(a) Wavefront aberration of myopic eye model (b) Wavefront aberration of myopic eye optimized model

图 3 近视眼模型与近视眼优化模型的波像差对比  
Fig. 3 Wavefront aberration contrast between myopic eye model and myopic eye optimized model

在近视眼模型中,将角膜的中心厚度、前表面的曲率半径和二次曲面系数设为变量,以波像差最小为评价函数进行优化,得到的新模型眼的波像差 PV 值约  $0.162 \mu\text{m}$ 、RMS 值约  $0.032 \mu\text{m}$ ,如图 3(b)所示,并与 Navarro 模型眼(图 2(a))比较可知,近视眼的优化模型不仅提高了近视眼的成像质量,而且优于一般正视眼的像质。该优化模型可作为角膜屈光手术术后的矫正眼模型,其中角膜前表面模型即手术中需切削出的理想模型。如图 4 所示,近视眼中的原角膜模型(实线)和矫正眼中的理想角膜模型(星点线和圆点线)分别为弧矢  $xoz$  和子午  $yoZ$  平面上的二维面型图,由图可知,通过对角膜原模型厚度的切削使角膜

曲率半径增大,达到改善人眼成像质量提高视力的目的。图5为相应的切削模型,切削深度的最大值在角膜中心处,约为 $26.5\ \mu\text{m}$ 。通过对模型眼的优化方法得到的角膜切削模型精度优于光程差方法<sup>[11]</sup>,本文中的角膜采用了符合实际的双二次曲面模型表述,更适用于临床应用。



(a)弧矢面( $xoz$ 平面) (b)子午面( $yoz$ 平面)

(a)Sagittal plane( $xoz$  plane) (b)Meridian plane( $yoz$  plane)

图4 弧矢面( $xoz$ 平面)和子午面( $yoz$ 平面)上的原角膜模型(实线)和理想角膜模型(星点线和圆点线)的二维面型图

Fig.4 Two dimensional surface plots of initial corneal model (solid line) and optimized corneal model (star dot line & dot line) on the sagittal plane ( $xoz$ ) and meridional plane ( $yoz$ )

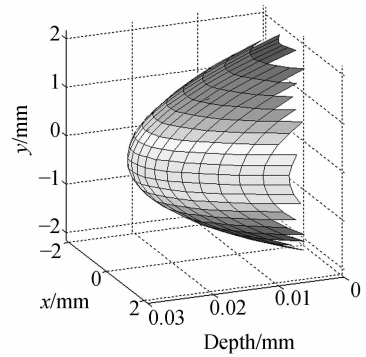


图5 角膜切削模型

Fig.5 Corneal ablation model

## 4 结论

根据角膜表面存在正交子午线上最大最小曲率半径的面型特点,以及临床眼视光检查角膜时记录该两个曲率半径值代表角膜面型,提出了在人眼模型中的角膜模型采用双二次曲面表示,符合角膜的面型特点,更适合实际的临床应用。在国人正视眼和近视眼的有关分析结果和数据收集基础之上,讨论模拟了我国人眼特点的正视眼、近视眼和矫正眼模型中的角膜双二次曲面模型,以及得到矫正眼时相应的角膜切削模型,切削深度的最大值在角膜中心处,约 $26.5\ \mu\text{m}$ 。基于人眼光学模型的角膜双二次曲面模型,可为角膜形态分析研究和波像差引导的个性化角膜切削方案提供了一个实用的数字化模型。

## 参考文献:

- [1] 刘祖国,林跃生.角膜地形图学[M].广州:广东科技出版社,2001:32.  
LIU Z G, LIN Y SH. *Corneal Topography* [M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 2001:32. (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]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11 (3): 291-295. (in Chinese)
- [3] 曹正林,廖文和,沈建新. Zernike 多项式拟合人眼波前像差的一种新算法[J].光学精密工程,2006,

14(2):308-314.

CAO ZH L, LIAO W H, SHEN J X. A new algorithm for human eye's wavefront aberration fitting with Zernike polynomial[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(2):308-314. (in Chinese)

- [4] 张艳玲,邵婷婷,施明光.正常人角膜椭圆形态光学轨迹的初步验证[J].中华眼科杂志,2006,42(11):992-997.

ZHANG Y L, SHAO T T, SHI M G. A study on the spaceform of the schematic cornea of the normal adult eye-ball [J]. *Chin. J. Ophthalmol.*, 2006,42 (11):992-997.

- [5] 张运海,廖文和,沈建新.准分子激光眼屈光手术中的一种过渡区模型[J].光学精密工程,2004,12(4):406-410.

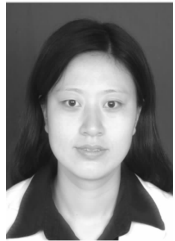
ZHANG Y H, LIAO W H, SHEN J X. Blend zone

- model for excimer laser refractive surgery [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004,12(4):406-410. (in Chinese)
- [6] SCHWIEGERLING J, SNYDER R. Custom photorefractive keratectomy ablations for the correction of spherical and cylindrical refractive error and higher-order aberration [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1998,15:2572-2579.
- [7] 张艳玲. 正常成人角膜数学模型的探讨[D]. 杭州: 浙江大学, 2004:13-43.
- ZHANG Y L. *A Study on the Mathematical Model of Normal Adult Cornea* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004:13-43. (in Chinese)
- [8] NAVARRO R, SANTAMARIA J, BESCOS J. Accommodation-depend model of the human eye with aspherics [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1985,2(8):1273-1281.
- [9] ESCUDERO-SANZ I, NAVARRO R. Off-axis aberrations of a wide-angle schematic eye model [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1999,16(8):1881-1891.
- [10] NAVARRO R, GONZALEZ L, HERNANDEZ-MATAMOROS J L. On the prediction of optical aberrations by personalized eye models [J]. *Optom. Vis. Sci.*, 2006,83(6):371-381.
- [11] 刘铭, 王肇圻, 王雁, 等. 考虑视轴方向的个性化眼模型的构建[J]. 光学学报, 2008,28(2):331-336.
- LIU M, WANG ZH Q, WANG Y, *et al.*. Construction of individual eye model considering the orientation of visual axis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008,28(2):331-336. (in Chinese)
- [12] HWEY-LAN L, NOBEL A B. Anatomically accurate, finite model eye for optical modeling [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997,14(8):1684-1695.
- [13] 李凤鸣. 眼科全书[M]. 北京: 人民卫生出版社, 1996:2585-2594.
- LI F M. *Ophthalmologic Encyclopedia* [M]. Beijing: People Sanitation Press, 1996:2585-2594. (in Chinese)
- [14] 瞿佳. 视光学理论和方法[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2004:79-81.
- QU J. *Optometry Theory & Method* [M]. Beijing: People Sanitation Press, 2004:79-81. (in Chinese)

#### 作者简介:



**孔梅梅**(1983—), 女, 江苏南京人, 南京理工大学博士研究生, 主要从事光学设计、光学测试与眼视光学方面的研究。  
E-mail: kongmm2004@163.com



**李新华**(1978—), 女, 吉林四平人, 助教, 金陵科技学院教师, 2006 年在南京理工大学光学工程专业获取硕士学位, 研究方向为视光学, 从事视光学教育。  
E-mail: lixinhua416@sohu.com



**瞿小妹**(1965—), 女, 上海人, 副主任医师, 90 年毕业于上海医科大学医疗系, 2002 年获眼科学博士学位, 主要从事眼视光学工作, 近视、斜视、弱视及小儿眼病的诊治。E-mail: quxiaomei2002@126.com

#### 导师简介:



**高志山**(1966—), 男, 江苏淮阴人, 教授, 中国光学学会光学测试专业委员会副主任兼秘书长, 主要从事光学设计、光学测试、眼科医学光学方面的研究工作。E-mail: zhishgao@mail.njust.edu.cn



**陈磊**(1964—), 男, 江苏南京人, 教授, 主要从事光学计量测试与光电智能化仪器的研究工作。E-mail: chenlei@mail.njust.edu.cn