

眼部结构对个性化人眼模型建立影响及应用

颜山杰^{1*}, 林佩珊¹, 马代金^{2,3#}

¹暨南大学附属爱尔眼科医院, 眼科, 广东 广州

²长沙爱尔眼科医院屈光手术科, 湖南 长沙

³爱尔眼科医院集团股份有限公司, 湖南 长沙

收稿日期: 2026年2月3日; 录用日期: 2026年2月26日; 发布日期: 2026年3月6日

摘要

个性化人眼模型的建立在角膜屈光手术中可在术前预测术后全眼光学性能, 提升屈光手术术后视觉质量。文章对角膜、前房、瞳孔、晶状体、玻璃体、视网膜以及视轴和光轴等多维结构参数构建个性化人眼模型的影响进行综述, 讨论个性化人眼模型在角膜屈光手术中的应用, 为个性化屈光手术发展提供更多思路。

关键词

个性化人眼模型, 光迹追踪FS-LASIK

The Influence and Application of Ocular Structure on the Establishment of Personalized Human Eye Models

Shanjie Yan^{1*}, Peishan Lin¹, Daijin Ma^{2,3#}

¹Department of Ophthalmology, Aier Eye Hospital, Jinan University, Guangzhou Guangdong

²Department of Refractive Surgery, Changsha Aier Eye Hospital, Changsha Hunan

³Aier Eye Hospital Group Co., Ltd., Changsha Hunan

Received: February 3, 2026; accepted: February 26, 2026; published: March 6, 2026

Abstract

The establishment of personalized human eye models in corneal refractive surgery can predict the

*第一作者。

#通讯作者。

postoperative optical performance and improve the postoperative visual quality. This article summarizes the influence of multi-dimensional structural parameters such as the cornea, anterior chamber, pupil, lens, vitreous body, retina, visual axis and optical axis on the construction of personalized human eye models, and discusses the application of personalized human eye models in corneal refractive surgery, providing more ideas for the development of personalized refractive surgery.

Keywords

Personalized Human Eye Model, Ray-Tracing FS-LASIK

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

人眼作为人体器官中具有复杂精密结构和功能的光学系统元件, 既往研究对其各结构进行大量实测取其平均值设定各折射面及屈光介质的面型、曲率建立光学模型, 这样的光学模型被称为“模型眼”或“示意眼” [1]。人眼各介质的折射率、各折射面的曲率等都大致相同, 有很多共同的特征, 可用一个相对比较简单的示意眼模型来表示一般人眼并对光线传播进行研究。然而光线从非球面形态的角膜通过不同折射率的屈光介质到具有神经感知机制的视网膜, 人眼结构微小解剖差异, 会导致独立个体间的视觉质量表现不同。传统基于人眼解剖学参数统计平均值构建的人眼模型如 Gullstrand 模型眼虽能反映光线在人眼传播的基本规律, 但在对眼科相关手术设计、人眼视觉质量的评估方面等仍具有局限性。人眼模型一直被作为视觉科学的工具来建立及解释视觉中的光学概念, 预测人眼生物测量的变化如何影响屈光及像差, 探讨人眼光学系统的限制, 提供用于设计或测试眼成像仪器的物理标准, 人眼模型的建立在指导屈光不正配镜矫正、屈光手术消融切削平面设计、白内障手术晶体选择等领域扮演关键角色。这里我们将眼部各结构个性化人眼模型构建的影响进行综述, 并讨论其在角膜屈光手术中的应用, 对个性化人眼模型在眼科研究及临床应用发展注入新动力。

2. 国内外人眼模型的发展

自 19 世纪中叶以来, 人眼模型经历了多年的发展, 1851 年由 Listing 首次提出的含 3 个折射面的旋转对称的近轴人眼模型, 开启了人眼模型研究与应用 [2]。Gullstrand 后续提出了用于研究光在眼内传播的简化模型眼, 包括角膜前后表面、晶状体皮质及核前后表面的 Gullstrand I 号模型眼也被称为 Gullstrand 精密模型眼, 以及具有角膜及晶状体前后共三折射面的 Gullstrand II 号模型眼, Gullstrand I 号模型眼模拟了一个内核较外层皮质折射率更高表面更弯曲的双层晶体透镜的近轴模型眼, 考虑到了晶状体的不均一折射率 [3]。Emsley 改良提出了 Gullstrand-Emsley 模型眼以及提出了仅有一个折射面但具有基本屈光特性光学结构的 Emsley 简略眼, Le-Grand 简化 Gullstrand I 号为具有四个折射面及固定折射率为 1.42 的晶状体组成 Gullstrand-Le Grand 模型。近轴模型对准确预测大入射角光线和大瞳孔直径下的单色像差和视网膜成像质量具有一定局限性 [4]。为了对大视场视网膜成像和像差进行更加精准的计算, 各学者提出了有限元模型。包括 Lotmar 首次将角膜前表面和晶体后表面设定为非球面折射应用于人眼模型。Blaker 提出首个具有梯度渐变折射率分布的晶状体可调节模型眼。Kooijman 在 Gullstrand-Le Grand 模型基础上提出了非球面角膜和晶状体且用于分析视网膜照度的模型眼。1985 年 Navarro 提出了可调节的非球面人眼模

型, 该模型给出了晶状体折射率、前后表面曲率半径、非球面系数、晶状体厚度以及前房腔深度随着屈光力变化之间的关系[5]。Liou 后续提出了一个基于解剖数据的, 由四个非球折射面和一个梯度渐变折射系数晶体组成的人眼模型, 并将视轴相对光轴倾斜 5° 、瞳孔中心向鼻侧偏移 0.5 mm 考虑在内[6]。Popiolek-Masajada and Kasprzak 提出了基于双曲余弦函数和双曲正切函数组合的解析函数来近似拟合晶状体轮廓的模型[7], 1999 年 Esudero-Sanz 与 Navarro 合作提出了 60° 乃至更宽大视场模型眼[8]。2004 年 Siedlecki 等提出了径向渐变折射率的非球面晶状体模型眼[9]。2006 年 Atchison 提出了个光学元件参数随近视程度改变的近视人眼光学模型[2]。2014 年 Navarro 提出了一种老化自适应模型眼[10]。2018 年, Seven 提出基于个体角膜几何与生物力学参数预测 LASIK 术后角膜曲率变化的有限元模型[11]。2023 年 Tabernero 等建立了个体周边屈光及像差预测模型[12]。

我国国内对人眼模型的研究较国外起步晚, 温州医学院于 1973 年介绍了精密模型眼参数计算, 后续多基于国外模型开展应用研究, 2002 年赵秋玲等在 Gullstrand-Le Grand 模型基础上研究非球面和晶状体梯度折射率在眼光学成像中的作用[13]; 2006 年王杨等人研究了基于个性化人眼模型的大视场波像差特性[14]; 2007 年朱海丰等以 Liou 眼模型为基础研究不同因素对可调节人工晶体屈光调节力的影响[15]。2012 年陈等人提出了一种考虑眼内介质散射特性用于模拟眩光对对比敏感度影响的人眼模型[16]。2020 年 Li 等首次构建了儿童晶状体参数人眼模型[17]。

人眼模型由简化眼到精密模型眼, 由近轴模型到宽视场模型和有限元模型, 人眼模型发展呈个性化与精密化趋势, 以更好满足眼科临床需求。

3. 人眼各结构对模型眼建立的影响

对于不同的个体, 人眼有着许多相同的特征, 如各界面的曲率半径, 各介质的折射率, 各折射面之间的距离等等, 可以利用这些相同的参数来构建通用的人眼成像系统, 但沿着光入射方向人眼的主要结构: 角膜, 前房液, 瞳孔, 晶状体, 玻璃体和视网膜。不同个体之间存在眼部结构差异, 需要额外考虑这些眼部结构的影响, 从而建立更精密符合独立个体的人眼模型, 并在眼科各领域进行运用[18]。

3.1. 角膜

角膜屈光度占人眼屈光度约 70%, 角膜在个性化人眼模型构建中占有重要地位, 对屈光手术的选择、手术切削深度、防止继发性圆锥角膜的发生具有重要意义。角膜前后表面的曲率半径及二次圆锥系数的测量对人眼模型的构建具有重要影响。既往国外多位学者对角膜的描述及模型建立是旋转对称的, 曲率半径及非球面系数是恒定的, 但角膜表面存在正交方向不同的两个曲率半径, 即扁平轴和陡峭轴, 是一个近似椭球面的环曲面, 双二次曲面更适于表示角膜面型特点[19][20]。角膜前表面各子午和弧矢方向屈光度的不同, 轴向产生了两个不同的焦点, 会使角膜产生散光, 利用双二次曲面或等效环曲面模拟角膜散光能进一步复现个体真实像差[21][22]。角膜是一个中央陡峭而周边较平的非球面形, Q 值作为非球面系数常用来反映角膜形状和光学特性, 前表面 Q 值约为 -0.26 , 一项对中国 30 岁以上的角膜非球面性的分布特征表示角膜前表面 Q 值平均值在 $-0.28\sim-0.29$, 后表面 Q 值约为 -0.26 , 而中国人群前表面 Q 值 (-0.28) 比欧美报道 ($-0.20\sim-0.24$) 更负, 且随年龄增加而轻微变负[23]。角膜前表面顶点曲率半径会随等效球镜度的增加而减小[24], 若构建人眼模型时设定其为固定值会增大等效球镜屈光误差。角膜高阶像差在全眼像差中起主导地位, 其中球差与垂直彗差贡献最大[25]。正常角膜 Q 值约为 -0.26 , 中央陡周边平的正常角膜可抵消自身正球差, 近视激光消融使中央变平而周边相对变陡, 角膜由长椭圆形变为扁椭圆形, Q 值正向漂移, 周边光线提前汇聚, 产生额外正球差[26][27]。理想个性化人眼模型构建可再屈光矫正使加入负球差补偿, 使术后总球差下降甚至零增长。人眼角膜厚度的测量可用于眼角膜屈光手术前的检查

和术后疗效评价。角膜厚度从中央到周边呈非线性陡降,若将角膜简化为均匀厚度模型,会使高估周边屈光力[28]。角膜厚度与屈光术后角膜生物力学改变也有关,患者术前等效球镜越高,屈光手术切削角膜组织越多。术前角膜越厚即基质层越厚,在相同条件下,术后残余基质厚度更高,可更好抵抗眼压对角膜的影响,减少角膜表面的位移和应力,使角膜形变较小,术后相对更好地维持角膜生物力学[29]-[31]。角膜生物力学改变,也可能是导致高阶像差和光学性能恶化的另一个因素,将生物力学因素整合到更复杂的眼睛模型中可能会提高屈光手术预测的准确性[32]。

3.2. 前房

前房充满了房水,折射率为 1.336,前房深度(Anterior Chamber Depth, ACD)可影响眼球整体屈光度,人眼在调节状态时物距由远及近的过程中,ACD 逐渐变浅,人眼的总屈力慢慢增加[33]。高度近视患者因眼轴延长,眼球前后径扩张,前房深度通常比正视眼增加 0.2~0.4 mm,而远视患者眼轴较短,前房多偏浅常<2.5 mm,且随着年龄的增长,晶状体逐渐增厚前移,ACD 逐渐减小,此外性别、种族等因素也会导致 ACD 差异[34]。相关研究表明,ACD 还可通过影响角膜与晶状体间的光学间隔长度从而影响个性化人眼模型的光学性能模拟精度。ACD 每增加 1 mm,眼内球差向正向漂移 0.011 μm ,色差焦移增加,ACD 可因调节彗差升高[35][36]。相关研究表明当眼轴 >24.5 mm 且 ACD>3.60 mm 时,30°颞侧周边屈光远视漂移幅度大于单纯长眼轴组,在近视模型构建中,应考虑 ACD 影响,精准模拟光线在中央级周边聚焦于视网膜前方的近视状态[34]。ACD 测量数据与个性化人眼模型构建可术前筛选预期行 ICL 手术的患者,若 ACD<2.8 mm,ICL 植入后会导致前房空间进一步缩小,晶状体前移更易诱发眼压升高、白内障等并发症,人眼模型还可模拟 ICL 植入后的前房空间变化,预测术后光线聚焦状态与像差分布,为手术效果评估提供依据[37]。

3.3. 瞳孔

瞳孔的直径会随环境光线的明暗发生变化从而改变进光量,个性化人眼模型构建时应将瞳孔直径作为变量,在暗视场下瞳孔直径变大,周边光线大量进入眼内,暴露角膜与晶状体中央及周边折射率差异,导致球差、彗差等高阶像差增加影响视觉质量,在明视场下若瞳孔 ≤ 2 mm 则把像差压缩到衍射极限附近,掩盖角膜面型测量误差,瞳孔大小可与术前近视程度共同决定术后光学质量[32]。瞳孔大小可直接影响有效晶体位置的预测和术后可能出现的眩光、光晕等现象。传统人眼模型普遍假设瞳孔中心与光轴重合,有研究表明,瞳孔每放大 1 mm,瞳孔中心向颞下方偏移约 0.03~0.05 mm,若个性化模型构建时忽略入瞳中心的动态偏移,会将偏心误判为彗差,降低大瞳孔状态下对人眼术前和术后的像差预测精度[38][39]。个性化模型若需高精度复现夜间星芒、眩光或 60 cpd 以上的超分辨率视觉,还应将瞳孔有限厚度、椭圆度及边缘毛刺作为衍射考虑在内[40]。

3.4. 晶状体

晶状体的折射率和面型是个性化人眼模型构建时需考虑的主要光学参数。人眼模型建立时将晶状体的折射率通常采用均匀分布和梯度渐变折射率分布两种形式,随科学发展,解剖发现晶状体折射率存在梯度分布而非固定值,组织学上晶状体由四部分组成,包括晶状体囊膜、晶状体上皮、晶状体纤维和晶状体悬韧带,复杂的晶状体纤维结构决定了晶状体折射率的非均匀分布特点。渐变折射率分布的形式中非连续的层状结构可产生多焦点影响成像,当层状结构趋向于无穷多层时,即为连续的状态[1]。真实人眼晶状体的中心处折射率最大约为 1.418,随后由中心向外周逐渐变小,边缘约 1.37。晶状体折射率随轴向及径向会发生变化且变化趋势不同,但年轻时呈近似抛物线型[41][42]。更好地了解折射率梯度,将

有助于准确预测晶状体的像差。既往由于技术限制及人眼调节等因素,晶状体面型难以测量,有研究表明采用双二次曲面和基于双二次曲面叠加 Zernike 多项式表示残余自由晶状体曲面时,晶状体面型复杂程度的增加,能够提高对于晶状体面型测量的精度,整个模型眼的成像特点与真实人眼最为相符。晶状体表面并非球面,非球面系数 Q 值会随年龄增大而正向漂移,引入更多正球差,维持整体眼像差平衡减弱[43]。对于个性化人眼模型的建立需要进行晶体的双二次曲面优化以精确的晶体轮廓,考虑晶体轮廓与实际个体晶体轮廓偏差,同时也需要引入眼内像差,以实现总的人眼波前像差测量。晶状体厚度随年龄增长而增厚,但我国人群晶状体中心厚度较国外人群偏小,而西方普遍采用 4.6~4.8 mm 晶状体厚度进行人眼模型建立,个性化人眼模型构建时应考虑我国国人晶体较国外更薄的情况[44]。此外人眼的调节是通过睫状肌的收缩改变晶状体表面的曲率半径,来改变人眼自身的屈光度,调节过程中当由远及近观察物体时,晶状体由扁平松弛状态慢慢变厚,前表面曲率半径减小,屈光度也逐渐变大,从而保证物像在经过人眼光学系统折射后落在视网膜上的成像清晰。随年龄增加晶状体调节能力下降。由于生理和病理因素影响,晶状体可出现倾斜和偏心,年龄越大,晶状体倾斜度和偏心量越大,个体间差异较大,可诱发彗差、三叶草差等高阶像差影响视觉质量[45]。

3.5. 玻璃体

玻璃体长度是眼轴长度的主要组成部分,玻璃体长度测量精度会影响模型的准确性。现代眼科生物测量仪如 IOL Master、OCT 等能为个性化人眼模型提供多段眼轴参数,用过光学相干干涉可在一次测量中同时输出角膜厚度、前房深度、晶状体厚度和玻璃体长度[46]。高度轴性近视患者玻璃体腔深度增长占眼轴增长的主要部分,玻璃体腔长度与视网膜曲率不匹配可导致视网膜随玻璃体腔扩张后移,使焦点前移出现视物模糊,当建立周边视场人眼模型时也可能引入更多像差[47]。对于高精度个性化人眼模型还可考虑玻璃体随年龄产生的液化出现局部折射率不均匀改变导致光线散射带来的影响[48]。

3.6. 视网膜

视网膜形状测量受视网膜前光学元件产生的光学畸变限制,传统模型假设视网膜为理想球面,真实人眼视网膜是不对称的。Verkharla 等人把正视眼后级部视网膜拟合为扁椭球形,给出了顶点曲率半径约等于 12 mm,非球面系数 $Q \approx +0.14$ 的面型特征,当近视患者随近视加深,视网膜水平径向曲率半径增加,垂直径向变化不显著,若未对个体视网膜参数进行修正,仍采用 12 mm 球面曲率半径,会使模型眼对人眼视觉功能预测存在偏差[49]。有学者认为视网膜存在非均匀离焦和散光,周边视网膜光学性能逐渐下降,椭圆形视网膜沿水平和垂直经线有两种不同的偏心,高阶像差呈不对称性增加,且鼻侧高于颞侧,若忽略离焦会系统性地低估离轴像差、误判周边屈光状态[2] [50]。

3.7. 眼轴

个性化人眼模型普遍以眼轴为纵向轴,若眼轴实测值出现偏差,则人眼模型会出现整体形变。我国眼轴长度相对欧美同龄人较短[51]。正视人群中眼轴越长,角膜曲率越平坦,角膜、晶状体的总屈光力与眼轴长度匹配,以维持屈光系统的平衡;病理性近视时眼轴长度主要表现为玻璃体腔并非均匀性扩张,晶状体前移,角膜曲率无显著改变,光线不能聚焦于视网膜黄斑中心凹。眼轴延长还可引起角膜前表面曲率规则性下降,进而引入更多高阶像差。在不同点位测量眼轴也尽可能完善视网膜非拟合球面面型,降低周边像差误差[12]。

3.8. 视轴和光轴

由于视轴和光轴二者不重合,有约 5° 的夹角存在,且夹角具有个体差异。忽略视轴-光轴偏差会导致

轴外像差测量误差升高,在屈光手术中个性化人眼模型构建时补偿大 Kappa 角可减少术后屈光预测误差,降低诱发彗差、三叶草差,术后眩光、夜视力下降的情况[52]。

4. 个性化人眼模型在屈光手术中的应用

人眼是一个非对称光学系统,仅在未调节状态下用旋转对称简略眼作为模型眼对眼科屈光手术进行手术设计及术后预测是远远不够的。目前可根据需求不同,屈光手术可分为依据患者年龄、职业等需求的功能性个性化切削;按角膜厚度、瞳孔直径变化的解剖性个性化切削;以及利用角膜地形图、波前像差引导等的光学性个性化切削。屈光手术从标准切削逐渐发展为个性化定制切削,屈光手术模型眼也需要从平均值简化模型眼发展为个性化人眼模型[53]。现研究需要聚焦在个性化人眼模型的构建如何整合角膜非球面地形、晶状体参数、波前像差、眼轴长度等眼部结构数据并用于术前预测与术后评估。传统 FS-LASIK 手术在矫正屈光不正时,其消融模式基于 Gullstrand 模型眼,忽略了眼内多透镜结构和个体间的差异带来的影响,标准简化模型眼对术后效果评估差异显著。利用个性化人眼模型,可在术前进行全眼预测,如 SMILE 手术可在术前预估最优微透镜偏心量,术中导航实时调整吸引中心;对于高度近视复杂角膜病例,可术前预测切削后角膜中央曲率和厚度变化,减少术后角膜中央岛的发生以及对术后角膜扩张高危眼进行识别;老视患者术前模拟负球差轮廓,调整 Q 值,在不牺牲远视力的前提下增加景深;术前保留个性化人眼模型,可对术后屈光矫正及视觉质量效果评估,对需二次切削患者可利用原有个性化人眼模型进行二次计算设计切削手术区域及手术量;个性化模型可通过眼轴数据评估角膜切削深度与术后屈光回退的关联,优化切削参数;而在 ICL 植入术中,模型可结合眼轴长度与前房深度,精准匹配 ICL 晶体型号[54][55]。

在既往的个性化角膜屈光手术中仅通过收集患者每只眼的角膜地形图、角膜波前数据等完成角膜激光手术量的设计,具有一定局限性。光迹追踪 FS-LASIK 即“全光塑”,是一种采用个性化人眼模型,将全眼多维数据采集与光迹追踪及角膜生物力学预测相集成在一起的个性化屈光手术流程。“全光塑”通过 innoveyes sightmap 系统通过单个诊断设备捕获数据,进行视线内所有解剖屈光面的精确测量后构建理论模型眼,2000 条光线通过角膜、前房、晶状体、玻璃体到达视网膜后以逆光迹追踪方式返回波前数据,由 Scheimpflug 断层扫描图像和投射到角膜前表面的光线入射来计算并矫正倾斜,系统拟合最佳符合的人眼前角膜表面上进行高阶像差校正。“全光塑”通过多点扫描、动态追踪或高阶像差分析能生成角膜形态、瞳孔大小随光照变化的序列数据,提供更多维度参数,构建了独属于患者的 3D 眼数字模型[53][56]。但未来个性化手术还需在术前模拟中把“上皮愈合差异”作为额外变量,才能真正实现“零像差”目标[57]。

眼部结构具有高度复杂性及眼科仪器的测量误差等多因素相互影响,既往在个体人眼参数的输入精度受限,如角膜、晶状体的面型和折射率在个性化模型构建中占据重要地位,而眼科仪器如 placido 盘成像可在角膜表面反射后检测到一系列同心环,但只能测量角膜前表面的曲率;Scheimpflug 可快速获取角膜和晶状体轮廓,但晶状体成像受瞳孔大小影响,且需进行畸变校正;OCT 轴向分辨率较 Scheimpflug 高,但晶状体后表面及赤道成像可被虹膜色素上皮影响;MRI 测量晶状体等结构时可不受角膜-房水-晶状体界面折射影响,可直接获得真实几何轮廓,但扫描时间长,空间分辨率低,眼部微小运动将产生伪影,不适用于日常个性化屈光手术的术前检查。早期个性化人眼模型建立多聚焦于单一眼部结构参数,如仅以角膜曲率、晶状体厚度、眼轴长度等参数为核心构建模型,局限于对人眼基础光学模拟。且传统眼部结构测量采用多设备、分步骤方式采集,测量误差及设备间的协同性不足,个体特异性参数的精准输入受到一定限制。见表 1。近年来,临床对个性化诊疗需求不断提升,眼科设备精度提升,个性化人眼模型建立也逐步发展,如 Navarro 等人通过把晶状体梯度折射率(Gradient Index, GRIN)从传统抛物线-指数

形式升级为整合 GRIN 与等折射率曲面(Isoindicial Surfaces, IIS)曲率梯度的 GRINCUC 形式,引入 5 个曲率梯度参数 G,相较于均质和单纯 GRIN 模型更能精准模拟晶状体内部结构对人眼光学性能的影响。但 Navarro 等研究是基于 SyntEyes 合成人眼样本得出,仍无法完全替代真实人眼的个体差异,有待结合真实人眼生物测量数据,进一步验证 GRINCUC 模型的适用性[58]。随着现代光迹追踪技术发展,光迹追踪通过模拟光线在人眼内部的传播路径,精准分析光线经过角膜、晶状体、玻璃体等不同眼部结构后的折射、散射与成像规律,可同时考虑角膜与晶状体 GRIN 及 IIS 等参数对光线传播的影响,为后续个性化屈光手术进一步发展提供更多思路。

Table 1. Partial modeling of eye structures and feature table
表 1. 部分眼部结构相关建模及特征表

作者	研究内容	主要参数	优势	局限
Janunts, E.等[19]	线性双锥角膜拟合模型	曲率顶端半径(Rx, Ry)、圆锥常数(Qx, Qy)、主子午线的旋转角	拟合时间短,精度优于椭圆面	对极度不规则角膜引入系统偏差
孔梅梅, 等[22]	利用角膜地形数据及眼轴数据在 Zemax 中拟合个体角膜像差模型	前表面 Zernike 系数、眼轴、角膜 Q 值等	地形图 Zernike 直接导入 Zemax,避免二次拟合误差	未实测角膜后表面,高度近视或圆锥角膜患者可引入系统误差
汪新超, 等[29]	SMILE 术后角膜个性化生物力学响应预测模型	残余基质厚度、眼内压、角膜生物力学风险系数 KBRC 等	通过角膜生物力学参数预测角膜组织的弹性模量,建立个性化人眼三维有限元模型	未考虑到角膜的微观结构,将角膜认为是各向同性材料
Lan, G.等[32]	LASIK 手术前后个体角膜 Zemax 模型	角膜 Q 值、角膜半径、Zernike 系数等	将角膜个性化非球面参数融入模型,评估 LASIK 术后视觉光学质量	将晶状体、玻璃体等眼部结构简化,未考虑角膜病理状态的非球面形态变异
Chen, Y. L.等[42]	年龄趋势相关晶状体折射率模型	晶状体曲率半径、厚度、GRIN 等	年龄范围广泛,校正性别因素,完善晶状体老化表征	忽略调节与动态变化,等效均匀折射率替代真实 GRIN
Fan, Q.等[51]	探讨眼轴长度(AL)与屈光不正的联系	眼轴长度、等效球镜等	大样本实测数据,聚焦青年人群	仅针对眼轴与屈光状态关联,未涉及其他眼部结构参数
Lockett-Ruiz, V. 等[58]	比较不同梯度折射率晶体模型的光学性能	IIS 曲率梯度参数 G、GRIN	整合 GRIN 与 IIS 曲率梯度的 GRINCUC 模型更能精准模拟晶状体光学行为	基于 SyntEyes 合成人眼模型,无法完全替代真实人眼

简单模型眼转变为个性化人眼模型并应用于角膜屈光手术中,将让屈光手术从原先的安全性、有效性、稳定性和可预测性,逐渐向微创化、个性化、多元化、智能化发展。基于个性化人眼模型构建屈光手术未来将具有更多可能性[59]。

5. 小结

综合考虑人眼的各结构对个性化人眼模型构建的影响, 结合人眼实测光学结构参数和人眼像差, 在术前准确预测屈光手术后的全眼光学性能, 将提供更好的个性化手术术前方案的选择, 推动实现真正个性化屈光手术。

参考文献

- [1] 孔梅梅. 人眼光学数字化模型及其光学参数干涉测试方法的研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- [2] Atchison, D.A. (2006) Optical Models for Human Myopic Eyes. *Vision Research*, **46**, 2236-2250. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2006.01.004>
- [3] 李雪卉, 宋慧. 模型眼及光学分析软件在眼部疾病的应用进展[J]. 国际眼科杂志, 2024, 24(11): 1774-1778.
- [4] Esteve-Taboada, J.J., Montés-Micó, R. and Ferrer-Blasco, T. (2018) Schematic Eye Models to Mimic the Behavior of the Accommodating Human Eye. *Journal of Cataract and Refractive Surgery*, **44**, 627-641. <https://doi.org/10.1016/j.jcrs.2018.02.024>
- [5] Navarro, R., Santamaría, J. and Bescós, J. (1985) Accommodation-Dependent Model of the Human Eye with Aspherics. *Journal of the Optical Society of America A*, **2**, 1273-1281. <https://doi.org/10.1364/josaa.2.001273>
- [6] Liou, H. and Brennan, N.A. (1997) Anatomically Accurate, Finite Model Eye for Optical Modeling. *Journal of the Optical Society of America A*, **14**, 1684-1695. <https://doi.org/10.1364/josaa.14.001684>
- [7] Popiolek-Masajada, A. and Kasprzak, H.T. (1999) A New Schematic Eye Model Incorporating Accommodation. *Optometry and Vision Science*, **76**, 720-727. <https://doi.org/10.1097/00006324-199910000-00024>
- [8] Escudero-Sanz, I. and Navarro, R. (1999) Off-Axis Aberrations of a Wide-Angle Schematic Eye Model. *Journal of the Optical Society of America A*, **16**, 1881-1891. <https://doi.org/10.1364/josaa.16.001881>
- [9] Siedlecki, D., Kasprzak, H. and Pierscionek, B.K. (2004) Schematic Eye with a Gradient-Index Lens and Aspheric Surfaces. *Optics Letters*, **29**, 1197-1199. <https://doi.org/10.1364/ol.29.001197>
- [10] Navarro, R. (2014) Adaptive Model of the Aging Emmetropic Eye and Its Changes with Accommodation. *Journal of Vision*, **14**, Article No. 21. <https://doi.org/10.1167/14.13.21>
- [11] Seven, I., Vahdati, A., De Stefano, V.S., Krueger, R.R. and Dupps, W.J. (2016) Comparison of Patient-Specific Computational Modeling Predictions and Clinical Outcomes of LASIK for Myopia. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, **57**, 6287-6297. <https://doi.org/10.1167/iovs.16-19948>
- [12] Tabernero, J., Kallamata, E., Velonias, G. and Vera-Diaz, F.A. (2023) Individualized Modeling for the Peripheral Optics of the Human Myopic Eye. *Biomedical Optics Express*, **14**, 2726-2735. <https://doi.org/10.1364/boe.489792>
- [13] 赵秋玲, 王肇圻, 张春书. 非球面和梯度折射率在眼光学成像中的作用[J]. 光子学报, 2002(11): 1409-1412.
- [14] 王杨, 王肇圻, 刘铭, 等. 基于个性化人眼模型的大视场波像差特性的研究[J]. 光学学报, 2006(11): 1727-1733.
- [15] 朱海丰, 方志良, 刘永基, 等. 不同因素对可调节人工晶体屈光调节力的影响[J]. 应用光学, 2007(1): 109-114.
- [16] Chen, Y.C., Jiang, C.J., Yang, T.H. and Sun, C. (2012) Development of a Human Eye Model Incorporated with Intraocular Scattering for Visual Performance Assessment. *Journal of Biomedical Optics*, **17**, Article ID: 0750091. <https://doi.org/10.1117/1.jbo.17.7.075009>
- [17] Li, Q. and Fang, F. (2020) Physiology-Like Crystalline Lens Modelling for Children. *Optics Express*, **28**, 27155-27180. <https://doi.org/10.1364/oe.402372>
- [18] 赵亚丽, 戴培山, 李玲, 等. 人眼有限元建模与仿真的研究进展[J]. 中国医学物理学杂志, 2015, 32(2): 203-206.
- [19] Janunts, E., Kannengießer, M. and Langenbacher, A. (2015) Parametric Fitting of Corneal Height Data to a Biconic Surface. *Zeitschrift für Medizinische Physik*, **25**, 25-35. <https://doi.org/10.1016/j.zemedi.2014.02.005>
- [20] Pang, G., Wang, C., Wang, X., Li, X. and Meng, Q. (2024) A Review of Human Cornea Finite Element Modeling: Geometry Modeling, Constitutive Modeling, and Outlooks. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, **12**, Article ID: 1455027. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2024.1455027>
- [21] Harvey, E.M. (2009) Development and Treatment of Astigmatism-Related Amblyopia. *Optometry and Vision Science*, **86**, 634-639. <https://doi.org/10.1097/oxp.0b013e3181a6165f>
- [22] 孔梅梅, 高志山, 陈磊, 等. 基于人眼光学模型建立的角膜模型[J]. 光学精密工程, 2009, 17(4): 707-712.
- [23] Xiong, Y., Li, J., Wang, N., Liu, X., Wang, Z., Tsai, F.F., et al. (2017) The Analysis of Corneal Asphericity (Q Value)

- and Its Related Factors of 1,683 Chinese Eyes Older than 30 Years. *PLOS ONE*, **12**, e0176913. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176913>
- [24] Scott, R. and Grosvenor, T. (1993) Structural Model for Emmetropic and Myopic Eyes. *Ophthalmic and Physiological Optics*, **13**, 41-47. <https://doi.org/10.1111/j.1475-1313.1993.tb00424.x>
- [25] 刘永基, 王肇圻, 方志良, 等. 人眼模型中各折射面对人眼像差的贡献[J]. 光子学报, 2005(10): 1554-1556.
- [26] 黄益琪. 个性化人眼模型及精准角膜手术研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 中国科学院研究生院(上海应用物理研究所), 2017.
- [27] Kwon, Y. and Bott, S. (2008) Postsurgery Corneal Asphericity and Spherical Aberration Due to Ablation Efficiency Reduction and Corneal Remodelling in Refractive Surgeries. *Eye*, **23**, 1845-1850. <https://doi.org/10.1038/eye.2008.356>
- [28] Oh, J.Y., Lee, S.H., Chun, Y.S. and Kim, K.W. (2025) Astigmatism-Type-Specific Impact of Peripheral Corneal Thickness on Anterior Keratometric Profile Changes after Temporal Clear Corneal Incision Cataract Surgery. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 26439. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-12300-3>
- [29] 汪新超, 方利华, 郭济西, 等. 基于个性化人眼参数 SMILE 术后角膜生物力学响应分析[J]. 医用生物力学, 2025, 40(3): 733-740.
- [30] 许波, 黄加兵. 成人近视患者的角膜生物力学特征[J]. 临床眼科杂志, 2023, 31(1): 1-4.
- [31] Memmi, B., Knoeri, J., Leveziel, L., Georgeon, C., Bouheraoua, N. and Borderie, V. (2024) Analysis of Corneal Remodeling Post-Myopic Photorefractive Keratectomy with the Wavelight® EX500 Excimer Laser. *Scientific Reports*, **14**, Article No. 20888. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71604-y>
- [32] Lan, G., Zeng, J., Li, W., Ma, G., Shi, Q., Shi, Y., et al. (2021) Customized Eye Modeling for Optical Quality Assessment in Myopic Femto-Lasik Surgery. *Scientific Reports*, **11**, Article No. 16049. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-95730-z>
- [33] Richdale, K., Sinnott, L.T., Bullimore, M.A., Wassenaar, P.A., Schmalbrock, P., Kao, C., et al. (2013) Quantification of Age-Related and per Diopter Accommodative Changes of the Lens and Ciliary Muscle in the Emmetropic Human Eye. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, **54**, 1095-1105. <https://doi.org/10.1167/iovs.12-10619>
- [34] Khorrami-Nejad, M., Baghban, A.A. and Khosravi, B. (2021) Effect of Axial Length and Anterior Chamber Depth on the Peripheral Refraction Profile. *International Journal of Ophthalmology*, **14**, 292-298. <https://doi.org/10.18240/ijo.2021.02.17>
- [35] Inooka, T., Kominami, T., Tomita, R., Suzumura, A., Matsuno, T., Ota, J., et al. (2024) Assessment of Factors Affecting Anterior Chamber Depth from Data Obtained from Health Checkup Participants in Japan. *Scientific Reports*, **14**, Article No. 30342. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-82096-1>
- [36] Domínguez-Vicent, A., Monsálvez-Romín, D., Albarrán-Diego, C., Sanchis-Jurado, V. and Montés-Micó, R. (2014) Changes in Anterior Chamber Eye during Accommodation as Assessed Using a Dual Scheimpflug System. *Arquivos Brasileiros de Oftalmologia*, **77**, 243-249. <https://doi.org/10.5935/0004-2749.20140062>
- [37] Huang, T., Zhang, H. and Li, K. (2024) Assessment of Clinical Efficacy and Safety of ICL Implantation in Patients with Relatively Shallow Anterior Chamber Depth in Early and Midterm Postoperative Time. *Heliyon*, **10**, e39791. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39791>
- [38] 朱青, 王雁, 宁文星, 等. 暗视到明视状态下近视眼瞳孔直径和瞳孔中心位移变化[J]. 中华实验眼科杂志, 2020, 38(6): 510-514.
- [39] Culemann, W., Heine, A. and Hooge, I.T.C. (2025) The Impact of the Pupil Size Artifact on Pupil-Based Eye-Tracking Data in Reading Tasks: Assessment and Compensation. *Behavior Research Methods*, **58**, Article No. 27. <https://doi.org/10.3758/s13428-025-02912-y>
- [40] 黄益琪, 李卓, 李宾. 个性化角膜屈光手术的建模及对散光修正的分析[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(10): 390-399.
- [41] Bassnett, S. and Costello, M.J. (2017) The Cause and Consequence of Fiber Cell Compaction in the Vertebrate Lens. *Experimental Eye Research*, **156**, 50-57. <https://doi.org/10.1016/j.exer.2016.03.009>
- [42] Chen, Y., Shi, L., Lewis, J.W.L. and Wang, M. (2012) Normal and Diseased Personal Eye Modeling Using Age-Appropriate Lens Parameters. *Optics Express*, **20**, 12498-12507. <https://doi.org/10.1364/oe.20.012498>
- [43] 阳婷, 徐晓立, 张学典, 等. 三种年龄相关性人眼模型的成像质量比较研究[J]. 光学仪器, 2020, 42(4): 47-55.
- [44] Wang, Y.H., Zhong, J. and Li, X.M. (2022) Age-Related Changes of Lens Thickness and Density in Different Age Phases. *International Journal of Ophthalmology*, **15**, 1591-1597. <https://doi.org/10.18240/ijo.2022.10.05>
- [45] 吴义芬, 张莹, 王勇, 等. 年龄相关性白内障患者晶状体倾斜和偏心分布特征及其影响因素分析[J]. 中华实验眼科杂志, 2025, 43(3): 233-240.
- [46] 杨青华, 黄一飞. 眼轴长度测量的研究进展[J]. 解放军医学院学报, 2014, 35(5): 505-508.

- [47] 于伟泓 陈晓隆. 4-13 岁屈光不正儿童眼球生物测量结果分析[J]. 眼科研究, 2004(5): 544-546.
- [48] Harmer, S.W., Luff, A.J. and Gini, G. (2021) Optical Scattering from Vitreous Floaters. *Bioelectromagnetics*, **43**, 90-105. <https://doi.org/10.1002/bem.22386>
- [49] Verkicharla, P.K., Mathur, A., Mallen, E.A., Pope, J.M. and Atchison, D.A. (2012) Eye Shape and Retinal Shape, and Their Relation to Peripheral Refraction. *Ophthalmic and Physiological Optics*, **32**, 184-199. <https://doi.org/10.1111/j.1475-1313.2012.00906.x>
- [50] Bakaraju, R.C., Ehrmann, K., Papas, E. and Ho, A. (2008) Finite Schematic Eye Models and Their Accuracy to *In-Vivo* Data. *Vision Research*, **48**, 1681-1694. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2008.04.009>
- [51] Fan, Q., Wang, H. and Jiang, Z. (2022) Axial Length and Its Relationship to Refractive Error in Chinese University Students. *Contact Lens and Anterior Eye*, **45**, Article ID: 101470. <https://doi.org/10.1016/j.clae.2021.101470>
- [52] 李彦青, 李立, 伍先慧. Kappa 角在眼科手术中的临床应用及研究进展[J]. 国际眼科杂志, 2023, 23(5): 778-782.
- [53] Luo, L., Fan, Y., Wang, X., Yang, L., Tan, S., Zhang, Y., *et al.* (2025) Ray Tracing-Guided LASIK for High Myopia and Astigmatism: Initial Clinical Outcomes. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, **55**, Article ID: 104715. <https://doi.org/10.1016/j.pdpdt.2025.104715>
- [54] Yoo, T.K., Kim, D., Kim, J.S., Kim, H.S., Ryu, I.H., Lee, I.S., *et al.* (2024) Comparison of Early Visual Outcomes after SMILE Using VISUMAX 800 and VISUMAX 500 for Myopia: A Retrospective Matched Case-Control Study. *Scientific Reports*, **14**, Article No. 11989. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-62354-y>
- [55] Reinstein, D.Z., Archer, T.J., Potter, J.G., Gupta, R. and Wiltfang, R. (2023) Refractive and Visual Outcomes of SMILE for Compound Myopic Astigmatism with the VISUMAX 800. *Journal of Refractive Surgery*, **39**, 294-301. <https://doi.org/10.3928/1081597x-20230301-02>
- [56] 梁玉耕, 梁凤康. InnovEyes Sightmap 光迹追踪引导准分子激光手术在近视患者治疗中的应用效果研究[J]. 科技与健康, 2025, 4(7): 37-40.
- [57] Li, J., Huang, Y., Song, Y., Xu, Y., Zhang, Y., Wen, J., *et al.* (2025) Epithelial Remodeling Associated with Corneal Power and Corneal Higher-Order Aberrations after Ray-Tracing Guided FS-LASIK for Myopia. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, **56**, Article ID: 105230. <https://doi.org/10.1016/j.pdpdt.2025.105230>
- [58] Lockett-Ruiz, V., Navarro, R. and Rozema, J. (2025) Effect of Gradient-Index Lenses on the Optical Performance of Synteyes. *Journal of Optometry*, **18**, Article ID: 100568. <https://doi.org/10.1016/j.optom.2025.100568>
- [59] 刘晓鹏, 孙芳芳, 王晓璇, 等. 飞秒激光辅助的个性化准分子激光原位角膜磨镶术的临床应用进展[J]. 国际眼科杂志, 2025, 25(7): 1116-1121.