

人工智能在人工晶状体屈光度计算中的应用

杨 帅,邵 杰,张 君

引用:杨帅,邵杰,张君. 人工智能在人工晶状体屈光度计算中的应用. 国际眼科杂志 2022;22(5):716-720

作者单位:(310000)中国浙江省杭州市,杭州明视康眼科医院
杭州医学院明视康眼科医院

作者简介:杨帅,毕业于华北理工大学,眼科学硕士,住院医师,研究方向:视光学的诊疗。

通讯作者:张君,毕业于宁夏医科大学,眼科学硕士,院长,主治医师,研究方向:眼视光. zhangjun@mskyk.onaliyun.com

收稿日期:2021-12-29 修回日期:2022-03-29

摘要

伴随老龄化社会的形成,以白内障为代表的年龄相关性疾病成为全球共同关注的公共卫生问题。通过手术方式实现人工晶状体置换成为当今世界解决白内障的唯一有效手段,而准确计算人工晶状体屈光度是手术治疗白内障的关键,但仍有部分患者由于人工晶状体屈光度计算不准确导致出现术后屈光误差,不能获得满意的术后效果。由于人工智能技术具有大数据分析和机器自学习特性,可实现对复杂临床数据的深度分析和自主决策,因此借助该技术有望提升人工晶状体屈光度的计算精度、降低术后屈光误差、提高患者满意度。本文通过查阅国内外相关文献,阐述人工智能技术在人工晶状体屈光度计算中的基本原理,分析比较不同原理的人工智能计算公式的特性、优点以及存在的局限性,展望人工智能技术未来在人工晶状体屈光度计算中的应用前景。

关键词:人工智能;白内障;人工晶状体;屈光度

DOI:10.3980/j.issn.1672-5123.2022.5.04

Application of artificial intelligence in intraocular lens power calculation

Shuai Yang, Jie Shao, Jun Zhang

Hangzhou MSK Eye Hospital; MSK Eye Hospital of Hangzhou Medical Collage, Hangzhou 310000, Zhejiang Province, China

Correspondence to: Jun Zhang. Hangzhou MSK Eye Hospital; MSK Eye Hospital of Hangzhou Medical Collage, Hangzhou 310000, Zhejiang Province, China. zhangjun@mskyk.onaliyun.com

Received: 2021-12-29 Accepted: 2022-03-29

Abstract

• With the formation of an aging society, cataract caused by age has become a public common concern about health problem all over the world. Surgery by intraocular lens replacement is the only effective mean to treat

cataract. The most important thing to treat cataract is accurately calculating the intraocular lens diopter. However, some patients did not feel satisfied because the error of calculation of intraocular lens diopter. With big data analysis and self-learning, artificial intelligence can deeply analyze and autonomously decide on complex clinical data. Therefore, this technology is expected to improve the calculation accuracy of intraocular lens diopter, to reduce postoperative refractive error and to improve patients' satisfaction. By referring to relevant literature at domestic and abroad, this paper is aimed to introduce the basic principle of artificial intelligence in intraocular lens diopter calculation, analyze and compare the characteristics, advantages and limitations of artificial intelligence based on different principles.

• KEYWORDS: artificial intelligence; cataract; intraocular lens; diopter

Citation: Yang S, Shao J, Zhang J. Application of artificial intelligence in intraocular lens power calculation. *Guoji Yanke Zazhi (Int Eye Sci)* 2022;22(5):716-720

0 引言

近年来,随着科学技术的迅猛发展,医疗水平也得到显著提升,其中计算机领域内的人工智能(artificial intelligence, AI)技术作为20世纪和21世纪世界尖端技术的代表之一,已在很多学科领域获得广泛应用,并逐步渗透进人类社会的各个层面。AI是研究赋予计算机模拟人的某些思维过程和智能行为(如学习、推理、思考、规划等)的学科,计算机借助系统深度学习等算法,可拥有智能处理信息的能力。目前AI技术已应用在更高层次的场景中,如在医学临床诊断领域,AI能够快速处理庞大的医学数据信息,准确地为临床决策提供科学参考^[1]。AI能够辅助快速完成急诊治疗^[2];AI能够辅助医学影像,快速筛查CT图像中的异常显影^[3];AI也可以辅助病理检查,更加快速、准确地得出病理结果^[4-5]。此外,AI在眼科的应用也已日益广泛,极大地提高了眼科学疾病的诊疗效率。由于AI具有很强的自组织、自适应和容错能力,特别是在处理非线性问题上的巨大优势,可显著优化以往通过线性回归算法发现的多数数据间的关联问题,实现对临床数据库的深度分析和自主决策^[6]。计算白内障手术植入的人工晶状体(intraocular lens, IOL)屈光度就是AI技术在眼科应用中的典型代表。

1 白内障治疗与人工晶状体屈光度计算误差

伴随我国老龄化社会进程加快,年龄相关性眼病发病率也日益增高^[7],其中,晶状体透明性降低引起的白内障

逐渐成为老龄化社会常见的可致盲性眼科疾病^[8]。据世界卫生组织统计,目前全球白内障患病人数逾 3500 万,而部分发展中国家因白内障致盲人数占总致盲人数超过 50%^[9],可见白内障患病率和致盲率均达到较高水平。由于目前尚无可逆转晶状体老化、改善其透明度的药物,晶状体置换成为现阶段解决晶状体老化引起白内障的唯一有效手段^[10-11]。随着医疗技术的不断发展以及人们生活水平的不断提升,患者对晶状体置换手术的要求从过去的看得见,发展到如今的看得清、看得舒适,因此精准计算人工晶状体屈光度就显得尤为重要。目前的人工晶状体屈光度计算公式经过数代发展已经将屈光误差控制在较低水平,约 71%~81%的常规角膜患者术后出现小于 0.50D 的屈光误差,约 95%~98%的患者术后出现小于 1.00D 的屈光误差^[12-14],但仍有约 5%~20%的患者会出现较大的屈光误差,而导致其术后满意度不高^[14],需再次进行屈光调整。

最大限度地减少屈光误差,需要准确计算人工晶状体屈光度。对于人工晶状体屈光度计算主要有 3 种方法,即标准屈光度法、临床判断法和公式计算法。前两种计算方法因个体差异引起的屈光误差较为明显,已趋于淘汰,因而目前主流的计算方法是公式计算法,该方法基于物理光学理论,通过角膜屈光力、眼轴长度、术后有效晶状体位置 (effective lens position, ELP) 这 3 个主要参数,计算所需植入的人工晶状体屈光度。ELP 是指在视轴上,角膜后顶点到人工晶状体光学平面的垂直距离,它代表着人工晶状体在眼球内的纵向位置^[15]。随着眼前节检查设备和眼科光学生物测量设备精度的逐步提高,角膜屈光力和眼轴长度测量误差问题已得到显著改善^[16-18]。但 ELP 因无法通过术前测量得出^[19],仅能通过临床主观经验进行预测,因此提高 ELP 的准确性仍是人工晶状体屈光误差待以解决的关键。在公式计算法中,从初期公式到目前主流的三、四代公式,如 SRK/T、Hoffer Q、Holladay II、Haigis、Barrett Universal II,均基于统计学中的回归性研究理论对 ELP 进行预估。如果 ELP 预测偏低,会低估人工晶状体的屈光力作用,反之亦然,且误差量与 ELP 偏差距离和人工晶状体屈光力强度呈正相关^[20]。因此精准预测 ELP,对于人工晶状体植入术来说显得尤为重要^[21]。伴随着 AI 技术逐渐应用到医疗领域,依托 AI 技术有望优化 ELP 预测精度,进一步降低人工晶状体屈光度误差^[22],提高患者满意度。

2 基于 AI 技术的人工晶状体屈光度计算公式

AI 人工晶状体计算公式目前基于两大原理:(1)将多组正确匹配的眼基础参数及人工晶状体屈光度预先输入数据库中,将患者的眼球参数与数据库进行对比,得出患者所需的人工晶状体屈光度,该原理最具代表性的 AI 公式是 Hill-RBF 和 Kane 公式;(2)基于目前广泛使用的多个传统人工晶状体计算公式,将患者的眼参数通过系统数据对比,在传统公式中选择最适合的一个进行运算,该方法可有效降低选择偏倚,提高计算精度,此类 AI 公式最具代表性的是 Ladas Super 公式。

2.1 Hill-RBF 公式 该公式由 Warren Hill 教授开发,是一种基于 AI 的径向基函数模型公式,该公式应用模式识别

和数据内插技术^[23],将拟定的多组自变量数据,如角膜屈光力、前房深度、眼轴长度等与相应因变量,即人工晶状体屈光度建立非线性联系。在临床应用中,如果输入的自变量在相应数据库范围内,理论上可获得准确结果。与目前临床使用的人工晶状体屈光度计算公式相比,Hill-RBF 公式具有如下特点:(1)不存在“可视化”公式^[24],即外界无法获知系统内部的眼基础参数与人工晶状体屈光度之间的联系;(2)需要对系统进行训练,即构建数据间联系的数据库,一定程度上数据量与输出结果准确性相关;(3)数据库内已存在的数据准确性直接影响系统输出结果的准确性。随着数据库内已有数据量的扩展以及更多眼参数的纳入,目前该公式已经发展到 V3.0 版本。

Roberts 等^[25]对比了 400 例眼轴长度 19~30mm 的患者,发现 Hill-RBF 公式的人工晶状体屈光误差为 0.32±0.24D,而 Holladay II、SRK/T、Hoffer、Barrett Universal II 公式的屈光误差分别为 0.32±0.27、0.31±0.25、0.34±0.28、0.30±0.24D,表明 Hill-RBF 公式已经与传统公式计算误差相差不大。单独分析不同计算公式在较长、中等、较短眼轴的计算结果发现,当眼轴长度 > 24.51mm 时,Hill-RBF、Holladay II、SRK/T、Hoffer、Barrett Universal II 公式的屈光误差分别为 0.32±0.26、0.32±0.29、0.33±0.29、0.39±0.34、0.30±0.24D;当眼轴轴长度为 21.01~24.5mm 时,Hill-RBF、Holladay II、SRK/T、Hoffer、Barrett Universal II 公式的屈光误差分别为 0.37±0.33、0.31±0.24、0.29±0.22、0.32±0.24、0.30±0.23D。由此可见,在单独计算中等长度眼轴和较长眼轴时,基于 AI 技术的 Hill-RBF 公式与传统计算公式的屈光误差相差并不大,而这能够保持一致的计算精度。但是,当眼轴长度 < 22mm 时,Hill-RBF 公式的人工晶状体屈光误差为 0.37±0.33D,而经 Holladay II、SRK/T、Hoffer、Barrett Universal II 公式的屈光误差分别为 0.52±0.52、0.44±0.41、0.45±0.41、0.43±0.36D,因此可见,在计算较短眼轴人工晶状体屈光度时,传统计算公式的计算误差显著提高,计算精度明显下降,而基于 AI 技术的 Hill-RBF 公式计算误差并不明显,计算精度保持稳定,因此当计算短眼轴人工晶状体屈光度时,使用 Hill-RBF 公式可以获得较为准确的计算结果。

Khatib 等^[26]将 Hill-RBF 公式与 Barrett Universal II 公式进行对比,结果发现对于全眼轴范围,Hill-RBF 公式平均绝对误差为 0.304D,Barrett Universal II 平均绝对误差为 0.322D,Hill-RBF 公式的计算误差略高。Hill 等^[23]研究也发现 Hill-RBF 公式计算准确性劣于其他传统公式;而 Gökce 等^[24]研究认为,Hill-RBF 公式计算准确性优于其他传统公式。上述研究结果表明 Hill-RBF 公式与传统公式的比较尚无定论,该差异的原因可能与样本量或纳入的眼参数分布不同有关。随着数据库样本量的丰富,最新版本 Hill-RBF 公式数据库中的眼轴长度范围显著扩增,提升了其适用性和准确性^[27-28],多项研究表明其准确性已优于传统计算公式^[29-31]。此外,Hill-RBF 公式可在线上免费使用,无需支付额外使用费,节省开支。虽然基于 AI 技术的 Hill-RBF 公式在评估人工晶状体屈光度时通过大数据分析和智能算法所得结果整体上不亚于传统计算公式^[32],但是其应用范围仍存在局限性,其输出人工晶

状体屈光度范围还必须处于 $-5.00\sim+30.00D$,目标屈光力范围处于 $-2.50\sim+1.00D$,若超出上述范围,计算时还需配合其他程序进行预先调整,因此目前 Hill-RBF 公式仍处于初级应用阶段,但未来随着该系统功能逐渐完善,Hill-RBF公式有望成为可靠性更高、使用更方便的人工晶状体屈光度计算工具^[33]。

2.2 Kane 公式 该公式由 Jack X Kane 教授创建,其利用 AI 技术,将物理光学理论与回归方程结合,在云计算模式下,借助虚拟超级计算机的大数据处理能力,对人工晶状体的屈光度进行计算,是一种准确性较高的人工晶状体屈光度计算公式^[34-35]。Kane 公式数据库内包含约 30 000 个典型的临床案例,虽然公式细节未公开,但其原理类似于 Hill-RBF 公式。Kane 公式并非通过眼参数直接获得人工晶状体屈光度,而是通过眼轴长度、角膜曲率、前房深度、性别、晶状体厚度、角膜厚度等数据,首先预估 ELP,再基于物理光学理论,输出人工晶状体屈光度计算结果。由于年龄增加,晶状体悬韧带功能减退甚至松弛或玻璃体液化,可导致晶状体囊袋后移,因此患者年龄越大,越容易出现术后实际 ELP 大于预测值的情况,进而出现远视漂移,因此 Kane 公式引入年龄等更多的自变量,可进一步提高计算准确性。自 2020-02-16 起,Kane 公式已在 www.iolformula.com 网站公开免费使用,帮助降低经济成本,有助于该公式的广泛推广应用。

Kane 等^[36]对比 182 例眼轴长度 18.86~22.45mm 患者术后情况,发现 Kane 公式的平均绝对误差为 0.533D,Haigis、Holladay II、SRK/T、Barrett Universal II 公式的平均绝对误差分别为 0.602、0.619、0.698、0.818D;Kane 公式的标准差为 0.707D,Haigis、Holladay II、SRK/T、Barrett Universal II 公式的标准差分别为 0.775、0.773、0.824、0.867D,说明 Kane 公式具有一定临床优势。对于特殊的较长眼轴或较短眼轴,Kane 公式具有更显著的优势。其中,在眼轴长度 $<22mm$ 的较短眼轴患者中,Kane 公式的平均绝对误差为 0.441D,而 Haigis、Holladay II、SRK/T、Barrett Universal II 公式的平均绝对误差分别为 0.486、0.458、0.492、0.493D;在眼轴长度 $>26mm$ 的较长眼轴患者中,Kane 公式的平均绝对误差为 0.329D,而 Haigis、Holladay II、SRK/T、Barrett Universal II 公式的平均绝对误差分别为 0.359、0.352、0.363、0.338D,由此可见,对于较短或较长眼轴,AI 公式计算的平均绝对误差较低,计算精度更高。

Darcy 等^[37]研究纳入 10930 眼进行多公式对比,Kane 公式不仅表现出优于 Barrett Universal II、Olsen、Haigis、Holladay I、Holladay II、Hoffer Q、SRK/T 公式,还优于上述 Hill-RBF 2.0 公式。其他研究中,Kane 公式也显示出更高准确度^[38]。但 Priji 等^[39]在对短眼轴人工晶状体屈光度研究时,发现当眼轴长度 $<22mm$,Kane、Barrett Universal II、Hoffer、Holladay I、SRK/T 公式的平均绝对误差分别为 0.47、0.39、0.33、0.33、0.35D,Kane 公式并无优势;Connell 等^[35]通过对比 Holladay I、Barrett Universal II、SRK/T、Hoffer Q、Kane 公式也未见差异。可见,Kane 公式是否与其他传统公式之间存在差异也暂无定论,究其原因,可能是由于样本量差别和眼参数因素的影响所致。

2.3 Ladas Super 公式 该公式由 John G Ladas 教授创建,与 Hill-RBF 公式和 Kane 公式原理不同,Ladas Super 公式是根据输入的眼轴长度,从目前广泛使用的人工晶状体屈光度计算公式中自动选择合适的公式进行计算。由于现在使用的人工晶状体屈光度计算公式各自拥有最适的使用范围,眼轴长度 $<21mm$ 时使用 Hoffer Q 公式计算精度较高;眼轴长度为 23.5~26mm 时,使用 Holladay I 公式可获得较准确的计算结果;眼轴更长时,使用 SRK/T 公式的计算结果更为准确。因此可见,将所测得的眼球参数导入适宜的公式,有望获得更为准确的结果。以往上述公式选择工作依靠人工主观筛选,不仅显著增加工作负担,还会产生人为误差。但借助 Ladas Super 公式,系统可在 Hoffer Q、Holladay I、Holladay II (辅助 Wang-Koch 调整)和 SRK/T^[37]公式中自动筛选最适宜的公式,取长补短,进一步提高计算效率和准确性。

Ladas Super 公式的程序运行步骤是:当眼轴长度为 20~21.49mm 时,系统自动选择 Hoffer Q 公式;当眼轴长度为 21.49~25mm 时,使用 Holladay I 公式;当眼轴长度 $>25mm$ 时,使用 Holladay II 公式;对于极长眼轴、人工晶状体度数为负数者,则选用负度数人工晶状体专用的晶状体常数进行计算。这样不仅避免了依赖单一公式引起的计算结果不准确的问题,还节省了人工筛选时间,降低人为误差,诊疗效率得到提高。自 2020-07-11 起,Ladas Super 公式已在 www.iolcalc.com 网站公开使用。但是,由于 Ladas Super 公式仍基于传统计算公式,依然无法避免传统公式本身存在的缺点,即眼轴过长或过短时,Ladas Super 公式的计算误差也随之增大。根据 Cooke 等^[40]研究,当眼轴长度为 20.84~29.51mm 时,Ladas Super 公式的平均绝对误差为 0.321D;当眼轴长度为 25.97~29.44mm 的较长眼轴时,平均绝对误差为 0.348D;当眼轴长度为 20.87~22.01mm 的较短眼轴时,平均绝对误差为 0.401D。因此,相较于不存在数学运算过程的 Hill-RBF 公式和 Kane 公式,Ladas Super 公式所计算的眼轴长度范围较小,其实用性较为局限。

2.4 其他公式 除上述提到的公式外,近期也公布了几种其他类别 AI 计算公式,如 Pearl-DGS 公式和 FullMonte 公式。Pearl-DGS 公式是由三位法国眼科教授(Guillaume Debellemanière、Damien Gatinel、Alain Saad)研发,取姓首字母而命名。其原理类似于 Hill-RBF 公式,即先利用 AI 机器学习模型,使用 4000 多例患者参数搭建数据库,通过非线性关系的多元回归方程预测理论人工晶状体位置(类似 ELP)^[41]。随后 Pearl-DGS 公式通过选择厚透镜方程精细计算人工晶状体屈光度。自 2020-02-16 起,Pearl-DGS 公式已在 www.iolsolver.com 网站公开免费使用。FullMonte 公式则是使用 Monte Carlo Markov Chain 模拟器和神经网络来预测术后人工晶状体度数,该系统的特点是不断获取系统内更新的数据,实现自主更新学习不断完善计算准确性。由于上述两款公式尚未推广应用,仍处于使用初期,目前的临床研究较少,还需进一步对比上述两种计算公式的准确性。

3 总结与展望

老龄化进程加快已成为中国乃至全世界面临的社会问题,而伴随老龄化社会的形成,以白内障为代表的年龄

相关性疾病也成为全球共同关注的公共卫生问题。经过近几十年的发展,通过手术方式实现人工晶状体置换成为当今世界解决白内障的唯一有效手段。但是,仍有部分患者由于人工晶状体屈光度计算不准确导致出现术后屈光误差,不能获得满意的术后效果。因此提高人工晶状体屈光度的计算准确性成为提高患者术后满意度的关键。虽然传统人工晶状体计算公式历史久远且应用广泛,但其运算过程固定,无法针对不同患者进行个性化调整,在面临特殊眼参数时可导致误差增大,影响术后满意度。

伴随 AI 技术引入眼科领域,依托其大数据分析和机器学习功能,上述问题有望得到改善。临床中利用基于模式识别和数据内插技术的 Hill-RBF 公式将患者眼参数与数据库进行对比,可得出目标人工晶状体屈光度,并且 Hill-RBF 公式与传统计算公式具有较一致的计算准确性。此外,与 Hill-RBF 公式原理类似的 Kane 公式同样具有与传统公式接近的计算精度,且 Hill-RBF 公式和 Kane 公式都能够在特殊情况,如计算较短眼轴时得出较为准确的计算结果,甚至准确性高于传统计算公式。而 Ladas Super 公式的运行原理与上述两种 AI 公式运行原理不同,其根据不同的眼轴长度,自动选择最适合的传统计算公式,进而得出结果,这样避免了依赖单一公式引起的计算结果不准确的问题,还节省了人工筛选时间,降低人为误差,诊疗效率得到提高。但是,目前关于 AI 公式临床应用的相关研究尚不够充分,AI 系统也尚不完善。目前关于 AI 公式的临床研究,对于各公式计算不同眼轴长度的研究较多,关于各公式计算不同角膜曲率的准确性分析较少,且目前的研究并没有将年龄、性别等其他因素纳入数据库并进行分组对比,无法分析 AI 计算公式是否具有独特的个性化计算优势,因此,未来还可比较各公式计算正常角膜曲率、较大及较小角膜曲率的计算结果;比较各公式计算不同年龄、不同性别的计算结果,进一步探讨 AI 在人工晶状体屈光度计算方面的优势。

AI 技术用于医疗领域仍处于初级阶段,尚有其弊端:(1)对于依赖大数据的 AI 系统来说,数据库中病例信息仍不够充足;(2)对数据库中样本信息的准确性要求较高,即便计算机拥有快速计算能力和完善的程序算法,当预先植入的数据库信息不准确时,输出结果也会存在误差;(3)系统内算法并未成熟,运行的系统程序可能存在缺陷,导致无法顺利输出计算结果;(4)尚不能用于特殊角膜,如屈光术后角膜、存在严重影响曲率的斑翳角膜、圆锥角膜等。未来随着特殊角膜的样本量日益增多,凭借 AI 技术的自学习功能和智能算法,有望解决上述问题,进一步发挥 AI 的优势。但目前 AI 只能辅助人工晶状体屈光度计算,尚不能完全依赖其结果,这也成为包括 Hill-RBF 公式和 Kane 等公式在内的 AI 计算公式共同存在的缺陷和不足。

未来随着各医疗机构信息共享平台的互联互通,数据库信息实时共享更新日益便捷,数据库中样本信息的准确性将大大提高,而计算机软件行业的高速发展也为程序算法提供保障。相信随着时间的推移、AI 系统数据库中各相关变量数据的日益完善,AI 技术有望突破其瓶颈,在精准计算的同时,实现更多临床辅助功能,提高患者术后满意度。

参考文献

- 1 Durand WM, Daniels AH, Hamilton DK, *et al.* Artificial intelligence models predict operative versus nonoperative management of patients with adult spinal deformity with 86% accuracy. *World Neurosurg* 2020; 141: e239-e253
- 2 吕文晖,夏菲,周长圣,等.深度学习胸部 CT 辅助诊断系统在急诊创伤人群中应用.中华医学杂志 2021; 101(7): 481-486
- 3 Wu JT, Wong KCL, Gur Y, *et al.* Comparison of chest radiograph interpretations by artificial intelligence algorithm vs radiology residents. *JAMA Netw Open* 2020; 3(10): e2022779
- 4 Wang SD, Yang DM, Rong RC, *et al.* Pathology image analysis using segmentation deep learning algorithms. *Am J Pathol* 2019; 189(9): 1686-1698
- 5 Esteva A, Kuprel B, Novoa RA, *et al.* Dermatologist - level classification of skin cancer with deep neural networks. *Nature* 2017; 542(7639): 115-118
- 6 刘蓬然,霍彤彤,陆林,等.人工智能在医学中的应用现状与展望.中华医学杂志 2021; 101(44): 3677-3683
- 7 吕帆,李瑾,潘安鹏.年龄相关视觉问题探索及其功能康复的科学对策.中华实验眼科杂志 2021; 39(8): 670-675
- 8 Fricke TR, Tahhan N, Resnikoff S, *et al.* Global prevalence of presbyopia and vision impairment from uncorrected presbyopia: systematic review, meta-analysis, and modelling. *Ophthalmology* 2018; 125(10): 1492-1499
- 9 王婷,汪瑞昕,林浩添.基于人工智能的白内障新诊疗模式.中华实验眼科杂志 2021; 39(9): 832-836
- 10 Fernández-García JL, Llovet-Rausell A, Ortega-Usobiaga J, *et al.* Unilateral versus bilateral refractive lens exchange with a trifocal intraocular lens in emmetropic presbyopic patients. *Am J Ophthalmol* 2021; 223: 53-59
- 11 Miyata K, Yoshikawa T, Morikawa M, *et al.* Effect of cataract surgery on cognitive function in elderly: results of Fujiwara-kyo Eye Study. *PLoS One* 2018; 13(2): e0192677
- 12 Aristodemou P, Knox Cartwright NE, Sparrow JM, *et al.* Intraocular lens formula constant optimization and partial coherence interferometry biometry: Refractive outcomes in 8108 eyes after cataract surgery. *J Cataract Refract Surg* 2011; 37(1): 50-62
- 13 Melles RB, Holladay JT, Chang WJ. Accuracy of intraocular lens calculation formulas. *Ophthalmology* 2018; 125(2): 169-178
- 14 李晨.眼前节分析系统在有效晶状体位置及白内障术后屈光效果预测中的作用.眼科新进展 2021; 41(10): 969-973
- 15 王静,罗娟,张劲松.人工晶状体眼内稳定性的影响因素.国际眼科纵览 2021; 45(5): 404-408
- 16 王子杨,杨文利,李栋军,等.新型生物测量仪 Pentacam AXL、IOLMaster 700 与 IOLMaster 500 对白内障眼部生物学参数测量的比较.中华眼科杂志 2019; 55(7): 515-521
- 17 Lee HK, Kim MK. Comparison of a new swept - source optical biometer with a partial coherence interferometry. *BMC Ophthalmol* 2018; 18(1): 269
- 18 邓小慧,常平骏,黄锦海,等.基于新型光学生物测量仪的人工晶状体屈光度计算公式准确性比较.中华眼科杂志 2021; 57(7): 502-511
- 19 郭冬香,熊义斌,林秀琴,等.前房深度对人工晶体术后屈光度的影响探讨.中国卫生标准管理 2021; 12(21): 30-32
- 20 李修远,常平骏,赵云娥.人工晶状体屈光度计算公式中有效晶状体位置的预测及其影响因素.国际眼科纵览 2021; 45(5): 409-414
- 21 Wan KH, Lam TCH, Yu MCY, *et al.* Accuracy and precision of intraocular lens calculations using the new hill-RBF version 2.0 in eyes with high axial myopia. *Am J Ophthalmol* 2019; 205: 66-73

22 季家利. 六种人工晶状体计算方法对高度近视眼的预测准确性比较. 上海交通大学 2019

23 Hill DC, Sudhakar S, Hill CS, *et al.* Intraoperative aberrometry versus preoperative biometry for intraocular lens power selection in axial myopia. *J Cataract Refract Surg* 2017; 43(4): 505-510

24 Gökce SE, Zeiter JH, Weikert MP, *et al.* Intraocular lens power calculations in short eyes using 7 formulas. *J Cataract Refract Surg* 2017; 43(7): 892-897

25 Roberts TV, Hodge C, Sutton G, *et al.* Comparison of Hill-radial basis function, Barrett Universal and current third generation formulas for the calculation of intraocular lens power during cataract surgery. *Clin Exp Ophthalmol* 2018; 46(3): 240-246

26 Khatib ZI, Haldipurkar SS, Shetty V, *et al.* Comparison of three newer generation freely available intraocular lens power calculation formulae across all axial lengths. *Indian J Ophthalmol* 2021; 69(3): 580-584

27 Liu JW, Wang L, Chai FY, *et al.* Comparison of intraocular lens power calculation formulas in Chinese eyes with axial myopia. *J Cataract Refract Surg* 2019; 45(6): 725-731

28 Nithianandan H, Sharma S, Stam E, *et al.* Evaluating newer generation intraocular lens calculation formulas in manual versus femtosecond laser-assisted cataract surgery. *Int J Ophthalmol* 2021; 14(8): 1174-1178

29 Ma J, El-Defrawy S, Lloyd J, *et al.* Prediction accuracy of intraoperative aberrometry compared with preoperative biometry formulae for intraocular lens power selection. *Can J Ophthalmol* 2021[Epub ahead of print]

30 Turnbull AMJ, Hill WE, Barrett GD. Accuracy of intraocular lens power calculation methods when targeting low myopia in monovision. *J Cataract Refract Surg* 2020; 46(6): 862-866

31 谭燕, 李灿. 人工晶状体度数计算公式的研究进展. 山东大学耳鼻喉眼学报 2019; 33(6): 95-98

32 张佳晴, 罗莉霞. 白内障合并高度近视患者术后屈光力预测的研究进展. 国际眼科杂志 2019; 19(6): 929-932

33 张莉, 田晶, 欧晓春. 多种人工晶体计算公式对角膜屈光术后白内障晶体计算准确性的分析. 中国药物与临床 2019; 19(8): 1287-1289

34 Melles RB, Kane JX, Olsen T, *et al.* Update on intraocular lens calculation formulas. *Ophthalmology* 2019; 126(9): 1334-1335

35 Connell BJ, Kane JX. Comparison of the Kane formula with existing formulas for intraocular lens power selection. *BMJ Open Ophthalmol* 2019; 4(1): e000251

36 Kane JX, Melles RB. Intraocular lens formula comparison in axial hyperopia with a high-power intraocular lens of 30 or more diopters. *J Cataract Refract Surg* 2020; 46(9): 1236-1239

37 Darcy K, Gunn D, Tavassoli S, *et al.* Assessment of the accuracy of new and updated intraocular lens power calculation formulas in 10930 eyes from the UK National Health Service. *J Cataract Refract Surg* 2020; 46(1): 2-7

38 Morya AK. Commentary: Era of endless possibilities-Looking for a near-perfect intraocular lens calculating formula. *Indian J Ophthalmol* 2021; 69(3): 584-585

39 Priji P, Jacob SC, Kalikivayi L, *et al.* Correlating Kane formula with existing intraocular lens formulae for corneal curvatures and axial lengths. *Oman J Ophthalmol* 2021; 14(2): 94-99

40 Cooke DL, Cooke TL. Comparison of 9 intraocular lens power calculation formulas. *J Cataract Refract Surg* 2016; 42(8): 1157-1164

41 Debellemanière G, Dubois M, Gauvin M, *et al.* The PEARL-DCS formula: the development of an open-source machine learning-based thick IOL calculation formula. *Am J Ophthalmol* 2021; 232: 58-69