doi: 10.12419/2309040004
View this article at: https://dx.doi.org/10.12419/2309040004

·论著·

人工智能在人工晶状体屈光力计算的应用

娄炜[1]，陈子盎[1]，章尧[1]，吴明星[2]，金海鹰[1]

（1. 同济大学附属上海东方医院，上海 200120；2. 中山大学中山眼科中心，眼病防治全国重点实验室，广东省眼科视觉科学重点实验室，广州 510060）

[摘　要] **目的：**评估新一代基于人工智能(artificial intelligence,AI)的人工晶状体(intraocular lens,IOL)计算公式的准确性。**方法：**本研究为回顾性研究，纳入因白内障行晶状体超声乳化联合IOL植入术的262例患者262眼。在术前，通过IOLMaster700获取角膜曲率、角膜白到白、中央角膜厚度、前房深度、晶状体厚度以及眼轴长度。使用第三代公式(SRK/T、Holladay 1和Hoffer Q)、Barrett Universal Ⅱ(BU Ⅱ)、新一代AI公式(Kane、Pearl-DGS、Hill-RBF 3.0、Hoffer QST和Jin-AI)对术后屈光状态进行计算，并与术后实际的屈光状态进行比较。在将预测误差(prediction error,PE)归零后，分析了各公式的标准差(standard deviation,SD)、绝对误差均值(mean absolute error,MAE)、绝对误差中位数(median absolute error,MedAE)以及PE在 ± 0.25、± 0.50、 ± 1.00、 ± 2.00 D范围内的百分比。**结果：**基于AI的IOL屈光力计算公式的SD、MAE和MedAE的范围分别为0.37 D(Kane和Jin-AI)至0.39 D(Hoffer QST)、0.28 D(Hill-RBF 3.0和Jin-AI)至0.31 D(Hoffer QST)以及0.21 D(Hill-RBF3.0和Jin-AI)至0.24 D(Hoffer QST)；均低于第三代公式(SD：0.43 D~0.45 D；MAE：0.34 D；MedAE：0.25 D~0.28 D)。在所有公式中，Jin-AI公式预测误差在 ± 0.50 D的比例最高，为84.73%，Kane(84.35%)和BU Ⅱ(83.97%)公式次之。**结论：**在IOL屈光力预测上，与传统第三代公式相比，新一代基于AI的公式表现出更高的准确性，可以使更多的患者在术后获得预期的屈光状态。

[关键词] 人工智能；人工晶体屈光力计算；白内障

引用本文：娄炜, 陈子盎, 章尧, 吴明星, 金海鹰. 人工智能在人工晶状体屈光力计算的应用[J]. 眼科学报, 2023, 38(12): 790-799. doi: 10.12419/2309040004

收稿日期(Date of reception): 2023-09-04

通信作者(Corresponding author): 金海鹰，Email: eagle_jin@163.com; 吴明星，Email: wumingx@mail.sysu.edu.cn

基金项目(Foundation item): 上海市科委医学创新研究专项(20Y11910900)。This work was supported by the Shanghai Science and Technology Innovation Fund(20Y11910900), China.

作者贡献声明: 构思设计: 娄炜, 金海鹰; 行政支持: 金海鹰; 提供研究材料: 金海鹰,吴明星; 数据收集与汇总: 娄炜, 陈子盎, 章尧, 金海鹰; 数据分析与解读: 娄炜, 金海鹰; 稿件撰写: 所有作者; 稿件最终修订与同意: 所有作者

Contributions: Conception and design: LOU Wei, JIN Haiying; Administrative support: JIN Haiying; Provision of study materials: JIN Haiying, WU Mingxing; Collection and assembly of data: LOU Wei, CHEN Ziang, ZHANG Yao, JIN Haiying; Data analysis and interpretation: LOU Wei, JIN Haiying; Manuscript writing: All authors; Final approval of manuscript: All authors

电子全文

Application of artificial intelligence in intraocular lens power calculation

LOU Wei, CHEN Ziang, ZHANG Yao, WU Mingxing, JIN Haiying

(1. Department of Ophthalmology, Dongfang Hospital Affiliated to Tongji University, Shanghai 200120, China; 2. State Key Laboratory of Ophthalmology, Zhongshan Ophthalmic Center, Sun Yat-sen University, Guangdong Provincial Key Laboratory of Ophthalmology and Visual Science,Guangzhou 510060, China.)

Abstract **Objective:** To evaluate the accuracy of new generation artificial intelligence (AI)-based intraocular lens (IOL)power calculation formulas. **Methods:** This retrospective study included a total of 262 eyes from 262 patients with cataract who underwent uneventful phacoemulsification combined with IOL implantation. Keratometry, corneal white-to-white, central corneal thickness, anterior chamber depth, lens thickness, and axial length were measured by the IOL Master 700 before surgery. Predicted refractive errors were calculated by the third-generation formulas (SRK/T, Holladay 1, and Hoffer Q), Barrett Universal Ⅱ (BUⅡ), and the newer-generation AI formulas (Kane, Pearl-DGS, Hill-RBF 3.0, Hoffer QST, and Jin-AI), and were compared with the actual postoperative refractive value. After adjusting the prediction error (PE) to zero, the standard deviation (SD), mean absolute error (MAE), median absolute error (MedAE), and the percentage of a PE within the range of ±0.25 diopter (D), ±0.50 D, ±1.00 D, and ±2.00 D were analyzed. **Results:** The SD, MAE, and MedAE of the AI-based formulas ranged from 0.37 D (Kane and Jin-AI) to 0.39 D (Hoffer QST), 0.28 D (Hill-RBF 3.0 and Jin-AI) to 0.31 D (Hoffer QST), and 0.21 D (Hill-RBF 3.0 and Jin-AI) to 0.24 D (Hoffer QST), respectively. These values were all lower than those of the third-generation formula (SD: 0.43 D to 0.45 D; MAE: 0.34 D; MedAE: 0.25 D to 0.28 D). Among all the formulas, the Jin-AI formula had the highest proportion of a PE within ±0.50 D (84.73%), followed by Kane (84.35%) and BUⅡ (83.97%) formulas. **Conclusion:** The new AI-based IOL formulas show higher accuracy compared with the traditional third-generation ones in predicting IOL power. thereby enabling more patients to achieve the expected refractive outcomes after surgery.

Keywords artificial intelligence; IOL power calculation; cataract

Cite this article as: LOU Wei, CHEN Ziang, ZHANG Yao, WU Mingxing, JIN Haiying. Application of artificial intelligence in intraocular lens power calculation[J]. Yan Ke Xue Bao, 2023, 38(12): 790-799. doi: 10.12419/2309040004

在世界范围内，白内障是最常见的致盲性眼病[1-2]。晶状体超声乳化联合人工晶状体(intra ocular lens, IOL)植入术已成为治疗白内障的标准术式。现代白内障手术在重建视功能的同时，还格外关注术后的屈光状态[3]。在术前，对眼部生物学指标进行精准测量，并通过IOL屈光力计算公式合理选择需植入IOL的屈光度，是影响术后屈光结果的两个重要因素[4]。基于光学原理的生物测量设备的普及和IOL屈光力计算公式的更新，已显著提升眼部生物测量结果和IOL屈光力计算的准确性，共同推动白内障手术朝着精准的屈光性手术发展。以SRK/T、Holladay 1和HofferQ为代表的第三代IOL屈光力计算公式，已被广泛内置于各类生物测量仪器中，在临床工作中得到了广泛的使用。相较于第一代和第二代计算公式，第三代公式在进行IOL屈光力计算时，考虑了有效晶体位置(effective lens position,ELP)，使术后屈光状态的预测变得更为精准[5-7]。随着计算机技术的发展，人工智能(artificial intelligence,AI)已被广泛应用于诸多学科。IOL屈光力计算并非简单的线性关系，在处理此类非线性问题上，AI具有独特的优势。因此，在IOL屈光力计算领域，目前已涌现出多个与AI相结合的新型计算公式，如Kane、Pearl-DGS、Hill-RBF、

HofferQST、Jin-AI等[3, 8-10]。本研究拟分析，相较于传统的第三代公式，新一代基于AI的IOL屈光力计算公式在国人白内障患者中的准确性，并初步探究在不同眼部生物特征下各个公式的表现，现将研究结果报告如下。

1 对象与方法

1.1 研究对象

本研究为回顾性研究，纳入因白内障行晶状体超声乳化联合IOL植入术的262例患者262眼。本研究方案遵循《赫尔辛基宣言》，并经同济大学附属上海东方医院伦理委员会批准(批件号：2023166)，患者在手术前均已签署知情同意书。

1.1.1 排除标准

1) 诊断明确的白内障患者，年龄≥55岁；2) 接受晶状体超声乳化联合IOL植入术；3) 有术后≥1个月的主觉验光结果；4) 术后最佳矫正视力≥0.5；5) 植入同一类型IOL(SN60WF，美国爱尔康公司)。

1.1.2 纳入标准

1) 伴有术中或术后的并发症者；2) 既往有角膜、玻璃体或视网膜手术史者；3) 合并其他影响术后屈光状态测量的眼部疾病者，如角膜溃疡、角膜瘢痕、圆锥角膜等；4) 缺失眼部生物测量结果者；5) 缺失术后主观验光结果者；6) 缺失所植入IOL对应的型号和屈光度的信息者；7) 术中额外的手术操作者，如角膜松解术、囊袋张力环植入术等。

若双眼均符合纳入标准，则随机选取一侧眼进行后续分析。

1.2 方法

1.2.1 术前检查

所有患者在术前均接受详细的眼部检查，包括裸眼视力、最佳矫正视力、眼压、裂隙灯检查、角膜内皮、角膜地形图、眼底检查等。由经过培训的技师使用IOLMaster700 (德国卡尔蔡司公司)进行眼部生物测量。收集的眼部生物测量指标包括：角膜曲率(Keratometry,K)、角膜白到白(white to white,WTW)、中央角膜厚度(central corneal thickness,CCT)、前房深度(anterior chamber depth,ACD)、晶状体厚度(lens thickness,LT)以及眼轴长度(axial length,AL)。

1.2.2 IOL屈光力计算

根据电子病历确定各例患者实际植入IOL所对应的屈光度，于ULIB网站(http://ocusoft.de/ulib/c1.htm)上获取IOL的优化常数(119.0)。为确保IOL优化常数的一致性，所有计算均在线完成。共分析了9款IOL屈光力计算公式，具体如下：

1) SRK/T、Holladay 1和HofferQ：基于薄透镜理论的第三代公式，输入的眼部生物测量的变量为K和AL。计算方式：采用Scansys(中国美沃公司)内置的软件进行计算(图1)。

2) Kane：结合了理论光学、回归公式和AI的新一代公式[11]。输入的眼部生物测量的变量为K、ACD、AL、LT和CCT。在线计算网址：www.iolformula.com。

3) Pearl-DGS：采用AI预测角膜后表面曲率和ELP的新一代公式[9]。输入的眼部生物测量的变量为K、ACD、AL、LT、CCT和WTW。在线计算网址：iolsolver.com。

4) Hill-RBF 3.0：为Hill-RBF公式的3.0版本，采用基于模式识别和数据插值的AI算法，实现了不依赖ELP的IOL屈光力计算的新一代公式[12]。输入的眼部生物测量的变量为K、ACD、AL、LT、CCT和WTW。在线计算网址：rbfcalculator.com。

5) HofferQST：将HofferQ公式与AI结合，以提升对ELP的预测和长眼轴眼IOL屈光力计算准确性的新一代公式[10]。输入的眼部生物测量的变量为K、ACD和AL。在线计算网址：hofferqst.com。

6) Jin-AI：使用多层神经网络进行ELP预测和IOL屈光力计算的新一代公式。输入的眼部生物测量的变量为K、ACD、AL和LT。计算方式：采用Scansys(中国美沃公司)内置的软件进行计算(图1)。该算法的构建基于Python 3.8和Scikit-Learn软件包，激活函数为Relu，优化器为Adam，采用反向传播算法对神经网络的权重进行优化；其训练目标为基于薄透镜理论公式反算得出的ELP(图2)[13]。该算法具有三层隐藏层，第一层至第三层神经元的数量分别为：128、64和32个。

此外，由于Barrett Universal Ⅱ (BU Ⅱ)公式的准确性已被广泛证实[8, 14]，因此将其纳入研究。BU Ⅱ为基于近轴光线追踪的第五代公式。输入的变量为K、ACD、AL、LT和WTW。在线计算网址：calc.apacrs.org/barrett_universal2105。

1.3 观察指标

预测误差(prediction error,PE)定义为术后实际屈光度减去IOL屈光力计算公式预测的术后屈光度。随后，采用将PE归零的方式消除由IOL常数引起的系统误



图1 第三代公式和Jin-AI公式操作界面概览

Figure 1 Overview of the operation interfaces of the third-generation formulas and Jin-AI formula

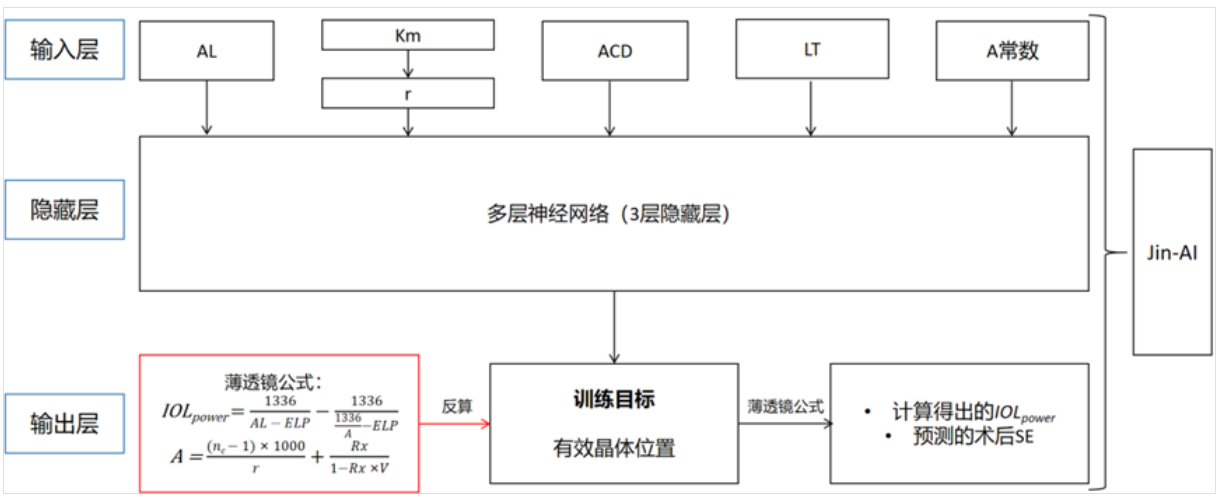


图2 Jin-AI结构概览

Figure 2 The structure of the Jin-AI

红色标识计算步骤仅在算法构建时使用；**r**为角膜曲率半径(mm)，*r* = 337.5/Km；nc为角膜屈光指数(1.333)；Rx为术后屈光度(D)；V为镜眼距(12 mm)；其余缩略语请参阅正文。

The procedures outlined by the red box and line were employed solely in the context of the algorithm's development. AL, axial length (mm); ACD, anterior chamber depth (mm); IOL power, intraocular lens power (D); Km, mean keratometry (D); LT, lens thickness (mm); *r*, corneal radius of curvature (mm), *r* = 337.5/Km; nc = the fictitious refractive index of the cornea (1.333); Rx = postoperative refraction (D); SE, spherical equivalent (D); V = vertex distance (12 mm).

差[15]。进一步计算得出标准差(standard deviation,SD)、绝对误差均值(mean absolute error,MAE)、绝对误差中位数(median absolute error,MedAE)以及PE在 ± 0.25、 ± 0.50、 ± 1.00和 ± 2.00 D范围内的百分比。术后实际屈光度以及计算公式预测的术后屈光度均以等效球镜(spherical equivalent,SE)表示，其计算公式为：球镜+柱镜/2。

1.4 统计学方法

使用Prism 8.0、EXCEL和SPSS 26.0进行数据处理、图表绘制以及统计分析。采用Kolmogorov-Smirnov检验判断数据是否符合正态分布，该结果显示除MAE外，其余计量资料均符合正太分布。因此，采用Dunn事后校正的Friedman检验比较各组间MedAE的差异。采用经 Bonferroni事后校正的Cochran Q检验比较各组间PE在 ± 0.25、 ± 0.50、 ± 1.00和 ± 2.00 D范围内的百分比。将校正后P<0.05定义为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 受试者资料

共纳入262例受试者的262眼，其中男112例、女150例。AL、K和ACD的均值分别为(23.97 ± 1.58) mm、(44.14 ± 1.38) D和(3.17 ± 0.46) mm。详细生物测量结果见表1。

2.2 不同IOL屈光力计算公式总体准确性的比较

所有第三代公式的SD均大于0.40 D，范围为0.43 D(SRK/T)~0.45 D(Holladay 1和HofferQ)。BUⅡ公式的SD为0.38 D，新一代AI公式的SD为0.37 D(Kane和Jin-AI公式)~0.39 D(HofferQST公式)，见表2。

表1 受试眼生物测量结果

Table 1 Biometric measurements of the studied eyes

生物测量结果	平均值 ± 标准差
眼轴长度/mm	23.97±1.58
平坦轴角膜曲率/D	43.75±1.39
陡峭轴角膜曲率/D	44.53 ± 1.42
角膜曲率平均值/D	44.14 ± 1.38
前房深度/mm	3.17 ± 0.46
中央角膜厚度/μm	540.74 ± 32.98
晶状体厚度/mm	4.43 ± 0.46
角膜白到白/mm	11.81 ± 0.44

表2 不同人工晶状体屈光力计算公式预测误差值及预测误差分布

Table2 Prediction errors and prediction error distribution of different IOL power calculation formulas

公式	预测误差值 /D			预测误差分布 /%			
	PE±SD	MAE±SD	MedAE	± 0.25 D	± 0.50 D	± 1.00 D	± 2.00 D
SRK/T	0.00±0.43	0.34 ± 0.27	0.28	48.47	77.10	98.47	100.00
Holladay 1	0.00 ± 0.45	0.34 ± 0.30	0.25	50.38	76.34	96.95	100.00
Hoffer Q	0.00 ± 0.45	0.34 ± 0.29	0.26	46.95	74.81	96.18	100.00
BUⅡ	0.00 ± 0.38	0.28 ± 0.25	0.21	55.73	83.97	98.09	100.00
Kane	0.00 ± 0.37	0.29 ± 0.24	0.22	56.11	84.35	98.85	100.00
Pearl-DGS	0.00 ± 0.38	0.29 ± 0.25	0.23	55.73	81.30	98.47	100.00
Hill-RBF 3.0	0.00 ± 0.38	0.28 ± 0.25	0.21	56.87	82.82	97.71	100.00
Hoffer QST	0.00 ± 0.39	0.31 ± 0.25	0.24	53.82	81.30	98.47	100.00
Jin-AI	0.00 ± 0.37	0.28 ± 0.25	0.21	56.11	84.73	98.47	100.00
校正P值			<0.0001*	0.001#	<0.0001#	0.02#	>0.05#

注：BUⅡ示Barrett Universal Ⅱ； *示Friedman检验； #示Cochran Q检验。

Notes: BUⅡ shows Barrett Universal Ⅱ; * shows Friedman test; # shows Cochran Q test.

在将PE进行归零后，比较了不同公式间MAE和MedAE的差异。在MAE的大小上，第三代计算公式的值均为0.34 D。与之相对，BUⅡ和所有AI公式的MAE均≤0.30 D，其中BUⅡ、Hill-RBF 3.0和Jin-AI公式的MAE值最小(0.28 D)。在MedAE的大小上，第三代计算公式的值为0.25~0.28 D，BUⅡ和所有AI公式的值均低于0.25 D，其中BUⅡ、Hill-RBF 3.0和Jin-AI公式的值最小(0.21 D)。Friedman检验显示，9个公式在MedAE上比较差异有统计学意义。三种第三代公式的MedAE大于BUⅡ、Kane、Hill-RBF 3.0和Jin-AI公式(P<0.05)。SRK/T和HofferQ公式的MedAE大于Pearl-DGS公式(P<0.01)，见表2和图3。

Cochran Q检验显示，除±2.0 D外，9个公式在其余PE分布范围上比较差异均有统计学意义。在PE位于±0.25 D范围内的百分比上，Hill-RBF 3.0公式的值最高(56.87%)，Kane和Jin-AI公式次之(均为56.11%)；第三代公式的百分比为46.95%(HofferQ)至50.38%(Holladay 1)，其中HofferQ的百分比显著低于Hill-RBF 3.0公式(P=0.028)，略低于Kane和Jin-AI公式(P=0.069)。在PE位于±0.50 D范围内的百分比上，BUⅡ和AI公式的值均大于80%(81.30%~84.73%)，其中，Jin-AI公式的百分比最高(84.73%)，Kane和BUⅡ公式次之，分别为84.35%和83.97%。而第三代公式的值均小于78%(74.81%~77.10%)，低于BUⅡ、Kane和Jin-AI公式(P<0.05)；Holladay1和HofferQ公式的值还低于Hill-RBF 3.0公式(P<0.05)。此外，HofferQ公式的值还低于Pearl-DGS和HofferQST公式(P=0.04)。在PE位于±1.00 D范围内的百分比上，BUⅡ和AI公式的范围为97.71%(Hill-RBF 3.0公式)至98.85%(Kane公式)，第三代公式的范围为96.18%(HofferQ公式)至98.47%(SRK/T公式)，其中HofferQ公式的值低于Kane公式(P=0.04)，详见表2和图4。

2.3 在不同眼部生物特征下IOL屈光力计算公式准确性的比较

进一步分析不同眼部生物特征下各个公式的准确性，结果显示第三代计算公式在AL较短或长、K较平坦或陡峭、ACD较浅或深的情况下，易出现较大的PE；而BUⅡ和结合了AI的新一代公式的整体准确性较为稳定，详见图5。由于AL是影响IOL屈光力计算的最为重要变量，且国人AL较长[4, 16-18]。因此，笔者着重分析了不同AL范围下，IOL屈光力计算公式的表现。当AL处于22.0~26.0 mm时，所有公式的预测准确性相似。而对于短眼轴的患者(AL≤22.0 mm)，使用HofferQ公式会出现−0.20 D的近视漂移；对于长眼轴的患者(AL≥26.0 mm)，运用第三代公式会出现远视漂移。在短眼轴组中，除Holladay 1和HofferQST公式的MAE均为0.45 D外，三种第三代公式的MedAE和MAE均大于BUⅡ和其余AI公式；在长眼轴组中，第三代公式的MedAE和MAE均大于BUⅡ和所有AI公式，详见图6。

3 讨论

得益于手术技术的革新、IOL制造工艺的精进、眼部生物测量准确性的提升，以及IOL屈光力计算公式的发展，白内障手术的治疗目标已由原先改善视力，转变为追求可预测的、精确的屈光结果。如何通过IOL屈光力计算公式，准确计算出所需植入IOL

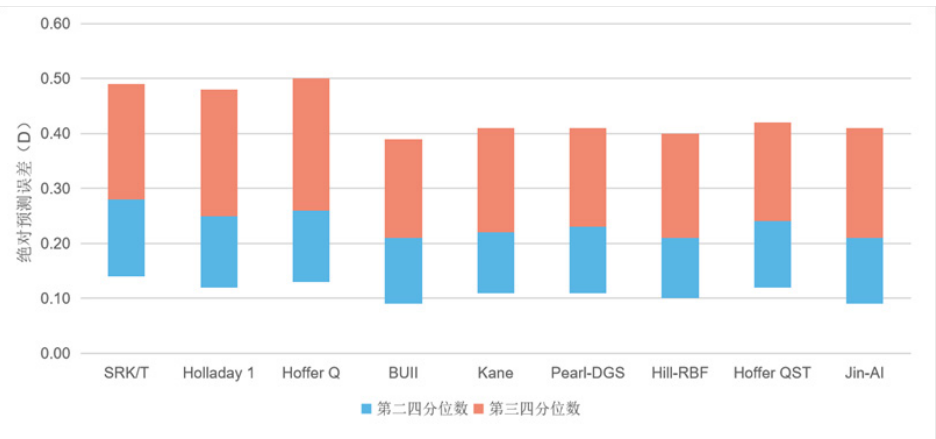


图3 九种公式绝对预测误差的箱式图

Figure 3 Box plot graph of absolute prediction errors of the 9 formulas

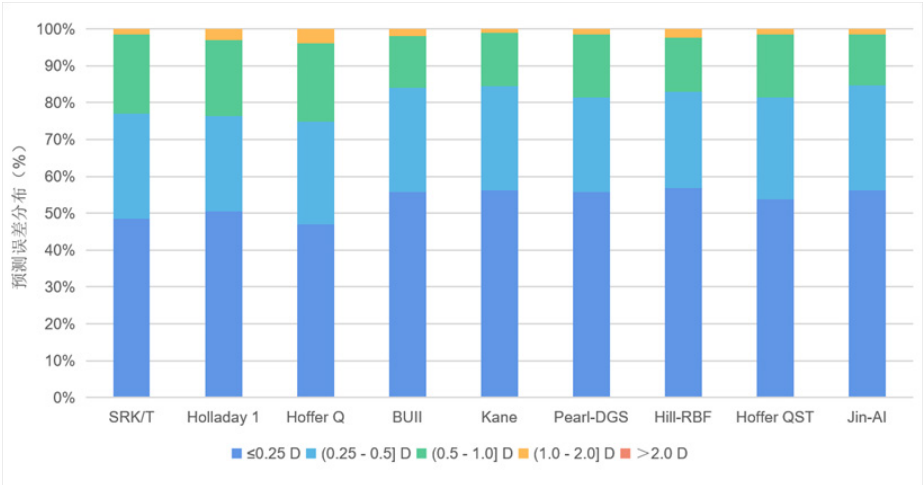


图4 九种公式绝对预测误差的箱式图

Figure 4 Box plot graph of absolute prediction errors of the 9 formulas

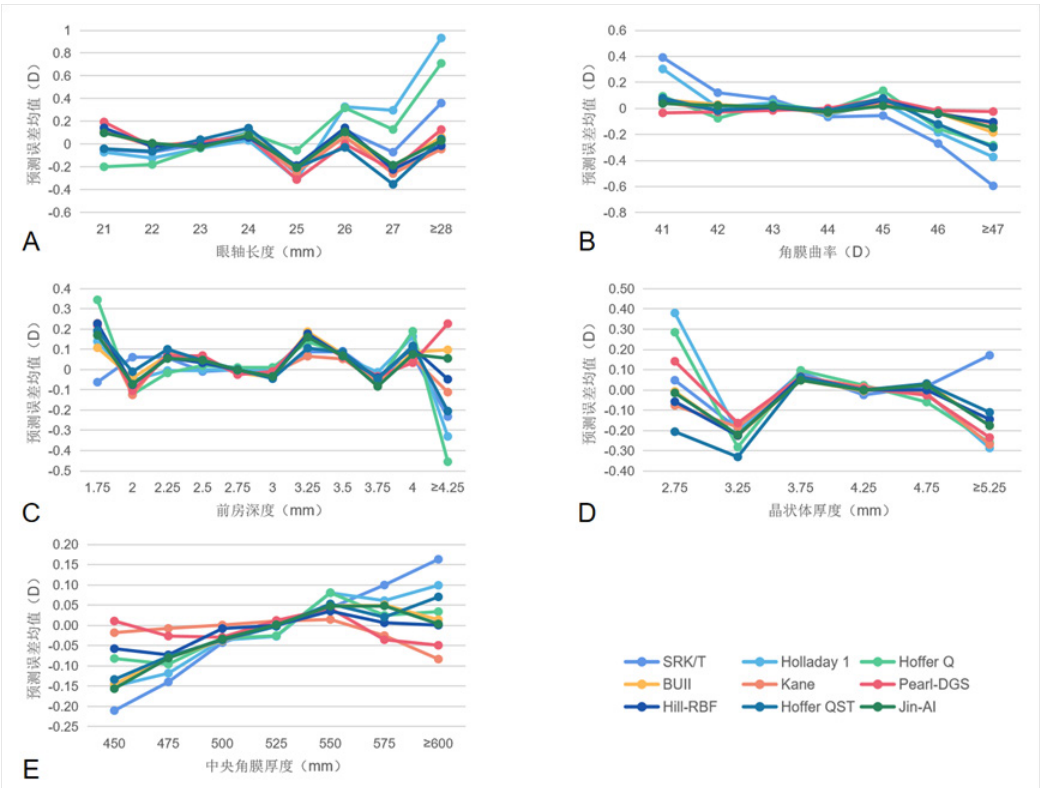


图5 9种公式的预测误差与眼轴长度(A)、角膜曲率(B)、前房深度(C)、晶状体厚度(D)和中央角膜厚度(E)比较的折线图

Figure 5 Line graph comparing the prediction errors of the 9 formulas against axial length (A), keratometry, (B), anterior chamber depth (C), lens thickness (D), and central corneal thickness (CCT)

的屈光度，是影响术后屈光状态的关键因素。早期依据Gullstrand模型眼的标准屈光度法，由于未考虑个体间眼部生物测量结果的差异，可导致5%的患者在术后产生大于5 D的PE[19]。随后问世的以SRKI和SRKⅡ公式为代表的基于回归方程的第一代和第二代计算公式，虽然考虑了AL和K，但依旧可致20%的患者在术后出现超过1 D的PE[20]。与先前公式相比，SRK/T、Holladay 1和HofferQ公式等第三代公式，将

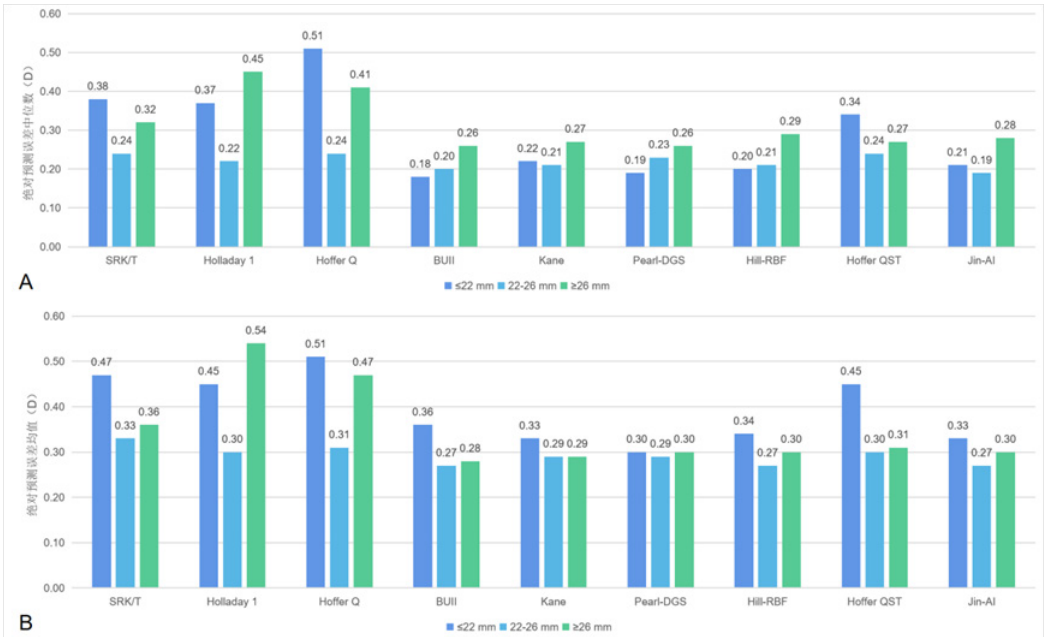


图6 9种公式在不同眼轴长度范围下绝对误差中位数(A)和绝对误差均值(B)的条形图

Figure 6 Histograms of the median absolute error (A) and mean absolute error (B) of the 9 formulas against different axial length ranges

回归分析和Fyodorov等[13]提出的ELP计算方法相结合，提升了术后屈光状态预测的准确性，目前已被内置于各类生物测量仪器中，在临床工作中得到了广泛的应用[5-7, 13]。

虽然第三代公式的总体准确性得到了明显的改善，但当眼部生物学指标偏离正常范围时，使用这些公式依旧会出现较大的误差。在诸多生物测量指标中，与IOL屈光力计算关系最为密切的、研究最多的是AL[16, 21-22]。在Kane等[23]开展的共纳入3 241例受试者的研究中发现，在短眼轴(≤22.0 mm)组和长眼轴(≥26.0 mm)组中，这三个第三代公式的MAE和MedAE的值均大于正常眼轴组(>22.0至<24.5 mm)和中长眼轴组(>24.5至<26.0 mm)。与本研究的结果一致，也与邓小慧等[24]的发现相同。不同公式在不同AL范围内的准确性也存在差异，Aristodemou等[22]在8 108眼中评估了SRK/T、Holladay 1和Hoffer Q公式的预测性能，结果表明，当AL处于23.5 ~26.0 mm时，Holladay 1具有最高的准确性，而当AL>26.0 mm时，SRK/T公式最准。通过进一步分析不同AL范围内第三代公式的MedAE和MAE的差异，笔者也观察到了相同的现象，即当AL处于22.0~26.0 mm时，Holladay 1的MedAE和MAE的值最低；而对于长眼轴而言，SRK/T则是最准确的公式，再次证实了这些公式在特定人群中的表现。Aristodemou等[22]的结果还显示，当AL低于21.0 mm时，Hoffer Q是表现最好的公式。然而近期多项研究表明，在短眼轴人群中，HofferQ公式的准确性并非第三代公式中最高的[14, 25]。在一项纳入了13 301例受试者的迄今为止样本量最大的研究中，研究人员发现，使用HofferQ公式可导致接近−0.25 D的PE，是所有公式中误差最大的[14]。Cooke等[25]报道，当AL≤22 mm时，HofferQ公式的MedAE和MAE的值高于Holladay 1和SRK/T公式，与本研究结果一致。

如何改进IOL屈光力计算公式，使公式在眼部特征超出正常范围的情况下依旧保持稳定的预测性能，一直是眼科学界探讨的课题。目前的研究认为，对术后ELP错误的估计是影响术后屈光结果准确性的最主要因素[4]。Barrett教授等[26]提出在计算ELP时需考虑到ACD、IOL在眼内的实际位置以及IOL光学主平面等相关因素。由此设计出的BUⅡ公式提升了对长眼轴眼预测的准确性，与本研究结果一致[14, 23, 25]。但在对短眼轴人群进行IOL屈光度的计算上，其准确性依旧存在分歧。Cooke等[21, 27]发现BUⅡ的MedAE低于第三代计算公式[25]，而有研究则观察到第三代公式的MedAE和(或)MAE低于BUⅡ公式。

随着计算机技术的发展，AI也被用于IOL屈光力计算。Hill-RBF是较早将AI运用于IOL屈光力计算的

公式。有别于传统方法，该算法使用模式识别和数据内插技术，从而实现了不依赖任何理论公式的屈光力计算，计算结果完全由数据驱动。截至目前，该公式历经了1.0、2.0以及3.0版本，随着版本的更新，准确性也得到了相应的提升[12, 28]。Kane公式则将理论光学、薄透镜公式与AI相结合，使用超过3万例高质量样本构建算法[11]。诸多已发表的研究证实，该公式是目前最准确的公式之一[3, 29]。Pearl-DGS和HofferQST公式则是目前新近上线的由AI驱动的计算公式。前者使用超过4 000例样本构建基于厚透镜公式的算法，通过AI实现对角膜后表面曲率和ELP的预测，进而提升对IOL屈光力计算的准确性[9]。后者则是将HofferQ公式与AI结合，通过对ELP进行修正以及对长眼轴眼的AL进行校正，以提升准确性[10]。Jin-AI公式是由笔者团队参与构建的新进问世的算法，与Hill-RBF公式使用径向基函数不同，该算法由多层神经网络驱动，共包含3层隐藏层。考虑到ELP是影响IOL屈光力计算准确性的关键因素，在算法构建时，通过对真实病例的术后屈光状态进行分析，使用基于薄透镜公式的ELP反算法，计算出术后实际的ELP[4, 30]，且在随后将反算后的ELP纳入算法的训练。

在对上述新一代基于AI的计算公式进行分析后，笔者发现无论是在MedAE或MAE上，还是在预测误差分布范围上，新一代AI公式的准确性均优于第三代计算公式，即新公式有更低的MedAE和MAE，以及能够使更高比例的患者在术后获得预期的屈光状态，这与先前别的研究者所报道的结果一致[3, 8-9, 11, 29]。对眼生物测量结果位于正常范围以外预测性能的提升，是新一代AI公式有较好预测性能的原因(图5)。以AL为例(图6)，在各个区间内，新一代AI公式的MedAE和MAE均低于第三代计算公式。虽然HofferQST公式在短眼轴组的表现不及预期，但相较于HofferQ以及其他第三代公式仍有提升。不同AI公式间的准确性也存在差异，在总体人群中，使用Jin-AI公式均可获得最低的SD、MedAE和MAE。此外，在PE位于 ± 0.50 D范围内，该公式拥有最高的百分比。进一步观察短眼轴组的MedAE和MAE，笔者发现，BUⅡ和所有AI公式的MedAE的值均小于MAE。这是可以理解的，因为MedAE反映的是绝对误差的集中趋势，受离群值的影响较小，而MAE考虑了所有误差，对离群值更为敏感[15]。一个有趣的发现是，虽然新一代AI公式在短眼轴组的MedAE均小于对应公式在长眼轴组的MedAE，但在MAE上，上述公式在短眼轴组的MAE均大于对应公式在长眼轴组的MAE。短眼轴组较少的样本量可能是导致这一差异的原因(短眼轴组：n=13；长眼轴组：n=32)。后续更大样本量的研究有助于进一步确定AI公式在不同AL范围内的准确性。需要指出的是，虽然AI公式提升了对短眼轴和长眼轴预测的准确性，但与AL处于22.0~26.0 mm眼相比，短眼轴眼和长眼轴眼的MedAE和MAE仍然较大。考虑到世界范围内白内障手术的规模以及患者对术后获得期望的屈光状态预期的不断提升，即使微小的改善也能带来显著的临床获益。而通过增加针对特定人群训练的样本量，以提升计算公式对此类人群预测的准确性，正是AI的优势。

本研究存在以下局限性：第一，本研究仅纳入了一种类型的IOL。因此，本研究的结论可能无法推广到其他类型IOL。第二，本研究为小样本量的单中心研究。未来大样本量的多中心的研究，有助于进一步明确新进问世的如Pearl-DGS、HofferQST和Jin-AI等公式的准确性，并为指导在中国人群中使用基于AI的公式提供更高级别的证据。

综上所述，相对于传统第三代IOL屈光力计算公式，基于AI的新一代公式提升了在不同眼部生物特征下计算的准确性，可以使更多的患者获得预期的屈光状态，值得进一步在临床推广、使用和优化。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

开放获取声明

本文适用于知识共享许可协议(Creative Commons)，允许第三方用户按照署名(BY)-非商业性使用(NC)-禁止演绎(ND)(CC BY-NC-ND)的方式共享，即允许第三方对本刊发表的文章进行复制、发行、展览、表演、放映、广播或通过信息网络向公众传播，但在这些过程中必须保留作者署名、仅限于非商业性目的、不得进行演绎创作。详情请访问：https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/。

参考文献

1. Lam D, Rao SK, Ratra V, et al. Cataract[J]. Nat Rev Dis Primers, 2015, 1: 15014.
2. Lee CM, Afshari NA. The global state of cataract blindness[J]. Curr Opin Ophthalmol, 2017, 28(1): 98-103.

3. Kane JX, Chang DF. Intraocular lens power formulas, biometry, and intraoperative aberrometry: a review[J]. Ophthalmology, 2021, 128(11): e94-e114.
4. Norrby S. Sources of error in intraocular lens power calculation[J]. J Cataract Refract Surg, 2008, 34(3): 368-376.
5. Holladay JT, Prager TC, Chandler TY, et al. A three-part system for refining intraocular lens power calculations[J]. J Cataract Refract Surg, 1988, 14(1): 17-24.
6. Hoffer KJ. The Hoffer Q formula: a comparison of theoretic and regression formulas[J]. J Cataract Refract Surg, 1993, 19(6): 700-712.
7. Retzlaff JA, Sanders DR, Kraff MC. Development of the SRK/T intraocular lens implant power calculation formula[J]. J Cataract Refract Surg, 1990, 16(3): 333-340.
8. Savini G, Taroni L, Hoffer KJ. Recent developments in intraocular lens power calculation methods-update 2020[J]. Ann Transl Med, 2020, 8(22): 1553.
9. Debellemanière G, Dubois M, Gauvin M, et al. The PEARL-DGS formula: the development of an open-source machine learning-based thick IOL calculation formula[J]. Am J Ophthalmol, 2021, 232: 58-69.
10. Taroni L, Hoffer KJ, Pellegrini M, et al. Comparison of the new Hoffer QST with 4 modern accurate formulas[J]. J Cataract Refract Surg, 2023, 49(4): 378-384.
11. Connell BJ, Kane JX. Comparison of the Kane formula with existing formulas for intraocular lens power selection[J]. BMJ Open Ophthalmol, 2019, 4(1): e000251.
12. Tsessler M, Cohen S, Wang L, et al. Evaluating the prediction accuracy of the Hill-RBF 3.0 formula using a heteroscedastic statistical method[J]. J Cataract Refract Surg, 2022, 48(1): 37-43.
13. Fyodorov SN, Galin MA, Linksz A. Calculation of the optical power of intraocular lenses[J]. Invest Ophthalmol, 1975, 14(8): 625-628.
14. Melles RB, Holladay JT, Chang WJ. Accuracy of intraocular lens calculation formulas[J]. Ophthalmology, 2018, 125(2): 169-178.
15. Wang L, Koch DD, Hill W, et al. Pursuing perfection in intraocular lens calculations: III.Criteria for analyzing outcomes[J]. J Cataract Refract Surg, 2017, 43(8): 999-1002.
16. Sanders DR, Kraff MC. Improvement of intraocular lens power calculation using empirical data[J]. J Am Intraocul Implant Soc, 1980, 6(3): 263-267.
17. Tan CS, Chan YH, Wong TY, et al. Prevalence and risk factors for refractive errors and ocular biometry parameters in an elderly Asian population: the Singapore Longitudinal Aging Study (SLAS)[J]. Eye, 2011, 25(10): 1294-1301.
18. Yin G, Wang YX, Zheng ZY, et al. Ocular axial length and its associations in Chinese: the Beijing Eye Study[J]. PLoS One, 2012, 7(8): e43172.
19. Olsen T. Pre- and postoperative refraction after cataract extraction with implantation of standard power IOL[J]. Br J Ophthalmol, 1988, 72(3): 231-235.
20. Dang MS, Raj PP. SRK II formula in the calculation of intraocular lens power[J]. Br J Ophthalmol, 1989, 73(10): 823-826.
21. Hoffer KJ, Savini G. IOL power calculation in short and long eyes[J]. Asia Pac J Ophthalmol, 2017, 6(4): 330-331.
22. Aristodemou P, Knox Cartwright NE, Sparrow JM, et al. Formula choice: Hoffer Q, Holladay 1, or SRK/T and refractive outcomes in 8108 eyes after cataract surgery with biometry by partial coherence interferometry[J]. J Cataract Refract Surg, 2011, 37(1): 63-71.
23. Kane JX, van Heerden A, Atik A, et al. Intraocular lens power formula accuracy: comparison of 7 formulas[J]. J Cataract Refract Surg, 2016, 42(10): 1490-1500.
24. 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数计算公式准确性比较[J]. 中华眼科杂志, 2021, 57(7): 502-511.
Deng XH, Chang PJ, Huang JH, et al. Comparison of the accuracy of intraocular lens power calculation formulas based on the new swept-source optical coherence tomography biometry[J]. J Command Contr, 2021, 57(7): 502-511.
25. Cooke DL, Cooke TL. Comparison of 9 intraocular lens power calculation formulas[J]. J Cataract Refract Surg, 2016, 42(8): 1157-1164.
26. Barrett GD. An improved universal theoretical formula for intraocular lens power prediction[J]. J Cataract Refract Surg, 1993, 19(6): 713-720.
27. Vilaltella M, Cid-Bertomeu P, Huerva V. Accuracy of 10 IOL power calculation formulas in 100 short eyes (≤22mm)[J]. Int Ophthalmol, 2023, 43(8): 2613-2622.
28. 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[J]. Am J Ophthalmol, 2019, 205: 66-73.
29. Melles RB, Kane JX, Olsen T, et al. Update on intraocular lens calculation formulas[J]. Ophthalmology, 2019, 126(9): 1334-1335.
30. Jin H, Rabsilber T, Ehmer A, et al. Comparison of ray-tracing method and thin-lens formula in intraocular lens power calculations[J]. J Cataract Refract Surg, 2009, 35(4): 650-662.

(**责任编委**：吴晓航；**责任编辑**：李扬杵)