

# 人工晶状体度数计算公式的研究现状

张玉婷<sup>1</sup>, 赵春梅<sup>2</sup>, 刘湘云<sup>2</sup>, 万佳昱<sup>2</sup>

引用: 张玉婷, 赵春梅, 刘湘云, 等. 人工晶状体度数计算公式的研究现状. 国际眼科杂志 2021;21(3):462-466

作者单位:<sup>1</sup>(063000) 中国河北省唐山市, 华北理工大学;  
<sup>2</sup>(063000) 中国河北省唐山市眼科医院

作者简介: 张玉婷, 在读硕士研究生, 研究方向: 白内障。

通讯作者: 赵春梅, 毕业于天津医科大学, 博士, 副院长, 研究方向: 白内障. chunmei-ts@sohu.com

收稿日期: 2020-07-01 修回日期: 2021-01-26

## 摘要

随着屈光性白内障手术的发展, 白内障术后屈光效果具有更高的准确性和可预测性。现在各种类型人工晶状体(IOL)应用于临床, 对IOL度数计算公式精确度的要求越来越高。根据计算原理以及所需参数的不同, 本文就IOL度数计算公式的研究现状作一综述。

关键词: 白内障; 人工晶状体; 计算公式; 研究现状; 屈光性白内障

DOI: 10.3980/j.issn.1672-5123.2021.3.17

## Research status of the formulas for calculating the degree of intraocular lens

Yu-Ting Zhang<sup>1</sup>, Chun-Mei Zhao<sup>2</sup>, Xiang-Yun Liu<sup>2</sup>, Jia-Yu Wan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>North China University of Science and Technology, Tangshan 063000, Hebei Province, China; <sup>2</sup>Tangshan Eye Hospital, Tangshan 063000, Hebei Province, China

Correspondence to: Chun-Mei Zhao. Tangshan Eye Hospital, Tangshan 063000, Hebei Province, China. chunmei-ts@sohu.com

Received: 2020-07-01 Accepted: 2021-01-26

## Abstract

• With the progress in refractive cataract surgery, the refractive effects after cataract surgery are more accurate and predictable. Various types of intraocular lens have been applied to clinical practice and there is an increasingly higher demand on the precision of intraocular lens (IOL) calculation formula. According to calculation principles and different parameters required, this article aims to give a review on the research progress of IOL calculation formula.

• KEYWORDS: cataract; intraocular lenses; calculation formulas; research status; refractive cataract

Citation: Zhang YT, Zhao CM, Liu XY, et al. Research status of the formulas for calculating the degree of intraocular lens. *Guoji Yanke Zazhi (Int Eye Sci)* 2021;21(3):462-466

## 0 引言

白内障是指由于老化、遗传、局部营养障碍、外伤等原因所引起的晶状体代谢紊乱, 导致晶状体蛋白质变性而发生混浊的一种疾病。白内障是当今世界主要致盲眼病之一, 全球约超过 47% 的失明是由白内障所致<sup>[1]</sup>。随着白内障手术和人工晶状体 (intraocular lenses, IOL) 的发展, 白内障术后屈光效果具有更高的准确性和可预测性, 白内障手术逐渐演变为精准屈光性手术<sup>[2]</sup>。为了获得更佳的手术效果, IOL 度数的计算至关重要, IOL 度数计算的准确性主要取决于眼部生物学参数测量和 IOL 度数计算公式选择的准确性<sup>[3]</sup>。随着各种类型 IOL 应用于临床, 对 IOL 度数计算公式的精确度要求越来越高。本文将对 IOL 度数计算公式的研究现状做一综述。

## 1 IOL 球镜计算公式

IOL 球镜的计算方法按照公式原理主要分为以下几种: (1) 基于历史经验 (根据 Gullstrand 模型眼假定的光学参数, 植入 IOL 度数统一为 +19.00D) 或者折射原理; (2) 基于线性回归分析研究; (3) 基于回归性研究和理论公式; (4) 基于光线追踪原理; (5) 基于人工智能。

1.1 基于历史经验或折射原理 基于历史经验或折射原理的具有代表性的计算方法主要有标准屈光度法、临床判断法、Binkhorst 公式。

1.1.1 标准屈光度法 标准屈光度法是在 IOL 植入术发展的早期, 根据 Gullstrand 模型眼假定的光学参数, 正常人眼在正视情况下晶状体屈光度数为 +19.11D, 故植入的 IOL 度数统一为 +19.00D。标准屈光度法未考虑术前患者眼部生物学参数的差异, 这便会造成较为明显的屈光误差。Oslen<sup>[4]</sup> 研究表明, 统一植入 +19.00D IOL 后约有 5% 患者产生 >5D 的屈光误差, 降低了部分患者的术后视觉质量, 故目前已不再使用。

1.1.2 临床判断法 临床中发现标准屈光度法造成的屈光误差大, 为了减少这种误差, 早期临床用一个简单的公式计算 IOL 度数, 即  $P = 19 + (R \times 1.25)$ , 其中 P 是植入的 IOL 度数, R 是白内障发生前的屈光状态。有研究运用此公式后发现术后约有 23% 患者屈光误差 >2D<sup>[5]</sup>。因为临床判断法未考虑到患者晶状体的个体差异, 无法准确获得患者术前存在屈光不正的具体参数, 所以术后屈光误差较大, 故目前已弃用。

1.1.3 Binkhorst 公式 Binkhorst<sup>[6]</sup> 在薄透镜成像公式的基础上用几何光学原理进行推导得出  $P = \frac{N(4R-L)}{(L-C)(4R-C)}$ ,

其中  $P$  是植入 IOL 的度数,  $N$  为房水屈光指数的 1000 倍 (即 1336),  $R$  为角膜前表面曲率半径 (mm),  $L$  为眼轴长度 (mm),  $C$  为前房深度 (mm)。研究发现运用 Binkhorst 公式术后约有 8% 患者屈光误差  $>2D$ <sup>[7]</sup>。因此, 该公式依旧存在较大的屈光误差。

**1.2 基于线性回归分析研究** 目前, 仅基于回归性研究的具有代表性的公式主要有 SRK I 公式、SRK II 公式。

**1.2.1 SRK I 公式** Sanders 等<sup>[8]</sup> 研究发现, 眼轴长度是影响 IOL 度数的重要因素, 角膜曲率次之, 在理论公式基础上, 加以回归分析得出 SRK I 公式, 即  $P = A - 2.5L - 0.9K$ , 其中  $P$  是植入 IOL 度数,  $A$  是 IOL 常数,  $L$  为眼轴长度 (mm),  $K$  为角膜曲率 (D)<sup>[9]</sup>。在这个公式中, 前房深度 (ACD) 默认为定值, 但前房深度与眼轴长度具有相关性。研究表明, 使用固定的前房深度计算 IOL 度数会使短眼轴的患者术后前房深度值增大从而导致近视, 使长眼轴的患者术后前房深度值减小从而导致远视<sup>[10]</sup>。

**1.2.2 SRK II 公式** SRK II 公式被证实可以在短眼轴 ( $<22mm$ ) 和长眼轴 ( $>24.5mm$ ) 眼中减少 SRK I 公式的屈光预测误差<sup>[11]</sup>, 根据不同患者眼轴的个性化  $A$  常数, 即  $P = A1 - 2.5L - 0.9K$ , 将眼轴分为 5 个区间:  $L < 20.0mm$ ,  $A1 = A + 3$ ;  $20mm \leq L < 21mm$ ,  $A1 = A + 2$ ;  $21mm \leq L < 22mm$ ,  $A1 = A + 1$ ;  $22mm \leq L < 24.5mm$ ,  $A1 = A$ ;  $L \geq 24.5mm$ ,  $A1 = A - 0.5$ 。Sanders 等<sup>[12]</sup> 研究发现, 当眼轴长度  $>28mm$  时, 该公式预测的术后屈光误差  $>2.0D$  的患者约有 28%。Dang 等<sup>[13]</sup> 对  $A$  常数进行了修订, 将眼轴分为 6 个区间:  $L < 20.0mm$ ,  $A1 = A + 1.5$ ;  $20mm \leq L < 21mm$ ,  $A1 = A + 1.0$ ;  $21mm \leq L < 22mm$ ,  $A1 = A + 0.5$ ;  $22mm \leq L < 24.5mm$ ,  $A1 = A$ ;  $24.5mm \leq L < 26mm$ ,  $A1 = A - 1.0$ ;  $L \geq 26mm$ ,  $A1 = A - 1.5$ , 该研究运用了新的个性化 SRK II 公式后发现 20% 患者屈光误差  $>1.0D$ 。

**1.3 基于回归性研究和理论公式** 目前, 基于回归性研究和理论公式的计算公式, 根据所需变量的个数可以分为 2 变量公式、3 变量公式、5 变量公式、7 变量公式。

**1.3.1 2 变量公式** 2 变量公式主要包括 Holladay I 公式、SRK/T 公式、Hoffer Q 公式。这些公式结合了由术后资料回归性研究所得的经验数据, 将 IOL 的  $A$  常数应用到公式中, 可以更准确地预测植入的 IOL 的有效位置。Holladay I 公式<sup>[14]</sup> 使用眼轴长度和角膜曲率来计算角膜内皮到虹膜平面的距离 (该数值定义为角膜高度), 前房深度是角膜高度、角膜厚度 (0.56mm) 以及从虹膜平面到 IOL 平面的距离之和, 此值被称为外科医生因素 (surgeon factor, SF)。SRK/T 公式<sup>[15]</sup> 旨在改进回归公式, 使用了 Fedorov 等<sup>[16]</sup> 提出的角膜高度方程, 但它提出支距补偿 (offset), 即虹膜平面至 IOL 距离是一个相对恒定值, 进一步优化了术后前房深度的预测来代替 SF 的数值。Hoffer Q 公式<sup>[17]</sup> 中术后前房深度则是通过独立公式并利用眼轴长度和角膜曲率正切值得出。Olsen<sup>[10]</sup> 通过对 IOL 植入前后眼部生物参数测量得出屈光误差的来源, 其中有 42% 归因于眼轴测量, 有 36% 归因于术后前房深度的预测, 有 22% 归因于角膜曲率的测量。上述三种公式中均需要用到预测术后前房深度, 所以对术后前房深度的准确预测在

很大程度上影响 IOL 度数的计算。Hoffer<sup>[18]</sup> 使用浸没式超声测量眼轴并分析研究发现, 在短眼轴 ( $<22.0mm$ ) 中 Hoffer Q 公式屈光误差最小, 在长眼轴 ( $>26.0mm$ ) 中 SRK/T 公式更为可靠。考虑到 Hoffer 的研究中眼轴在极端范围内的眼睛数量有限, Aristodemou 等<sup>[19]</sup> 通过对 8108 眼进行研究发现, 当眼轴为 20.00~21.00mm 时, Hoffer Q 公式最可靠; 当眼轴为 21.00~21.50mm 时, Holladay I 公式和 Hoffer Q 公式比 SRK/T 公式精确; 当眼轴为 23.50~26.00mm 时, Holladay I 公式的屈光误差最小; 当眼轴  $>26mm$  时, SRK/T 公式最佳。Olsen 等<sup>[20]</sup> 通过对 2043 眼进行比较发现 SRK/T 公式最适用于眼轴  $>27.0mm$  的眼睛。

**1.3.2 3 变量公式** 3 变量公式主要代表是 Haigis 公式。Haigis 公式是基于术前测量的前房深度 (ACD) 和眼轴 (AL), 通过线性回归的方法来预测 IOL 的有效晶状体位置 (ELP),  $ELP = a_0 + a_1 \times ACD + a_2 \times AL$ , 其中  $a_0$  可以看作  $A$  常数,  $a_1$  是前房深度的常数,  $a_2$  是眼轴的常数, 这 3 个常数来自大量临床资料, 所以需要不断优化<sup>[21-22]</sup>。Bang 等<sup>[23]</sup> 通过在长眼轴中比较 Holladay I、Holladay II、SRK/T、Hoffer Q 和 Haigis 公式的准确性得出, Haigis 公式对术后屈光误差的预测最准确。在此基础上, Eom 等<sup>[24]</sup> 证明 Hoffer Q 公式和 Haigis 公式在短眼轴中预测的术后屈光误差均随着前房深度的减小而增加, 但在前房深度  $<2.40mm$  的眼睛中, Haigis 公式预测的屈光误差明显小于 Hoffer Q 公式, 而在前房深度  $\geq 2.40mm$  时两个公式预测的屈光误差无明显差异。

**1.3.3 5 变量公式** 5 变量公式主要是以 Barrett Universal II 公式为代表。尽管理论公式和经验所得公式可以准确计算平均眼轴长度的眼睛所需 IOL 度数, 但对于极短眼轴和极长眼轴的眼睛, 这两种公式均存在缺陷。Barrett<sup>[25]</sup> 在理想的模型眼中开发了 Barrett Universal II 公式, 其中前房深度的计算不仅与眼轴长度和角膜曲率有关, 也与  $A$  常数和透镜因子 (lens factor, LF) 有关, 该公式可以适用于不同的 IOL 类型以及短、中和长眼轴的眼睛。Melles 等<sup>[26]</sup> 在 18501 眼中比较了 Barrett Universal II、Haigis、Hoffer Q、Holladay I、Holladay II、Olsen 和 SRK/T 公式在两种 IOL 度数计算中的屈光误差, 该研究表明 Barrett Universal II 公式预测的屈光误差最低。Kane 等<sup>[27]</sup> 使用 IOL Master 评估 7 种不同公式的准确性, 发现对于眼轴  $>22.0mm$  的眼睛, Barrett Universal II 公式比其他公式更能准确预测实际的术后屈光度。近年研究显示, 该公式适用性和准确性很强, 已在临床上被广泛运用。

**1.3.4 7 变量公式** 7 变量公式的主要代表是 Holladay II 公式。1996 年 Holladay 在美国眼科学院年会上提出 Holladay II 公式, 该公式除了通常使用的眼轴长度和角膜曲率测量法外, 还使用前房深度、晶状体厚度、水平位上角膜直径、术前屈光状态及患者年龄。Cordelette 等<sup>[28]</sup> 在非正常眼轴或角膜曲率的眼睛中运用 SRK/T、Hoffer Q、Holladay I、Holladay II 公式, 结果显示对于陡峭角膜组, 4 个公式无差异, Holladay I 和 Holladay II 公式在扁平角膜组中的效果更好。Darcy 等<sup>[29]</sup> 在 10930 眼中应用 8 种 IOL

度数计算公式发现 Holladay II 公式准确性更高。Holladay II 公式曾被广泛运用,但近年研究发现 Barrett Universal II 公式屈光误差更小。

**1.4 基于光线追踪原理** 光线追踪原理主要以 Oslen 公式为代表。IOL 位置可理解为公式得出的 IOL 常数,如果该公式是薄透镜公式,则根据定义,ELP 不是 IOL 的解剖学位置,因为薄透镜公式未考虑 IOL 厚度和光学结构,真实角膜屈光力的计算存在的误差会导致 ELP 有所偏离,为了使 IOL 能够植入于更准确的位置,消除 ELP 的误差,Oslen 等<sup>[10,20]</sup>提出 C 常数的概念,采用 C 常数来预测术后 ELP,使用光线跟踪以校正角膜和 IOL 的球差,研究表明使用 C 常数对 IOL 的真实位置进行了无偏预测,与 SRK/T 公式相比,Olsen 公式将预测的平均绝对误差降低了 15%,术后屈光误差>1.0D 的患者占比下降了 39%,分析主要原因是由于在正常眼睛的眼轴范围内预测 IOL 位置的准确性提高。2020 年,Chang 等<sup>[30]</sup>在研究正常眼轴中使用光线追踪原理辅助 IOL 度数计算中发现,与传统公式相比,光线追踪原理中所运用的 C 常数对于不同角膜屈光力的患者在计算 IOL 度数上具有更高的准确性,光线追踪可以为 IOL 选择提供更好的指导。

**1.5 基于人工智能** 基于人工智能原理的计算公式则是需要运用大量的数据库,主要代表是 Hill-RBF 公式。Hill-RBF 公式是基于来自世界各地的白内障外科医师收集的 IOL 数据,使用人工智能和模式识别对大数据进行分析,并通过独特的可靠性检验,从而进行 IOL 度数的计算。Hill-RBF 算法中需要眼轴长度、中央角膜屈光度、前房深度和期望屈光度四个参数来预测所需的 IOL 屈光度<sup>[31]</sup>。新的 Hill-RBF 2.0 版本则是基于更大的数据库,它所包含的数据量是 Hill-RBF 1.0 版本的 3 倍以上,同时考虑了眼部解剖结构和 IOL 功能,来实现高度准确的 IOL 预测。Wan 等<sup>[32]</sup>在高度近视眼中将新的 Hill-RBF 2.0 公式与其他公式(Barrett Universal II、Haigis、Hoffer Q、Holladay I 和 SRK/T 公式)的准确性和精确度进行比较,得出 Hill-RBF 2.0 公式的精确度与 Barret Universal II 和 Haigis 公式相当,但与其他 5 个公式不同,Hill-RBF 2.0 公式屈光预测的准确性与眼轴长度无关。Roberts 等<sup>[33]</sup>研究中使用 Hill-RBF 2.0 公式计算 IOL 度数,术后 95% 患眼屈光误差 <0.5D。

## 2 IOL 柱镜计算公式

散光(astigmatism)是与角膜弧度有关的一种屈光不正常表现,当平行光线进入眼内后,由于眼球在不同子午线上屈光力不等,不能聚集于一点。人眼散光可能是由晶状体或角膜的不规则曲率造成的,对于存在  $\geq 0.75D$  规则性散光的白内障患者,使用散光矫正型人工晶状体(Toric intraocular lens, Toric IOL)具有良好的稳定性及可预测性,可以降低白内障术后患者对眼镜的依赖程度,故在临床上被广泛应用<sup>[34]</sup>。

Toric IOL 柱镜计算公式主要为各种在线公式,如 Original Alcon calculator、New Alcon calculator、Holladay Toric 在线计算器、Barrett Toric 在线计算器、Oslen Toric 在线计算器等。其中 Original Alcon calculator 使用模拟 K 值

(simK)来计算 IOL 度数,假设角膜厚度为  $500\mu m$ ,角膜前后表面曲率半径比固定值为 0.82,不能完全反映出整个角膜散光,这会导致长眼轴患眼欠矫以及短眼轴患眼过矫<sup>[35]</sup>。Holladay Toric 在线计算器使用术前预测的 ELP 来计算角膜平面上的实际 Toric IOL 屈光度,根据 Holladay II 公式调整柱镜度数和角膜平面之间的比值<sup>[36]</sup>。研究发现,Original Alcon calculator 和 Holladay Toric 在线计算器的术后平均绝对误差和质心误差相近,两种计算器均会导致一定残余的顺规散光<sup>[37-38]</sup>。Barrett Toric 在线计算器运用 Barrett Universal II 公式中 ELP 并根据后角膜散光模型来计算所需的柱镜度数和轴位<sup>[39]</sup>。Barrett Toric 在线计算器 1.0 版本是基于预测的后角膜曲率而产生的最佳结果,而 Barrett Toric 计算器 2.0 版本旨在通过输入测量的后角膜曲率来微调其屈光预测,研究对比两种版本术后残余散光误差和质心误差没有显著差异<sup>[40]</sup>。New Alcon calculator 根据患者的手术期望为外科医生提供准确预测,结合了 Barrett Toric 计算器的算法,选择最合适的 Toric IOL 类型和度数<sup>[41]</sup>。Yang 等<sup>[42]</sup>比较 Barrett Toric 计算器与 New Alcon calculator 之间的预测误差发现,在术后 1mo 和 3mo,Barrett Toric 计算器组中分别有 88.57% 和 88.57% 的患者屈光误差 <0.5D,New Alcon calculator 组中分别有 76.47% 和 82.35% 的患者屈光误差 <0.5D,而之前有文献测得使用 Original Alcon calculator 术后 1mo 和 3mo 屈光误差 <0.5D 的患者占 31.3%~35.3%<sup>[43]</sup>,可以看出 Barrett Toric 计算器和 New Alcon calculator 比 Original Alcon calculator 准确性更高。近年来,Ray-tracing software(光线追踪原理)被运用到 IOL 柱镜度数计算中,Oslen Toric 在线计算器通过光线追踪原理测得角膜散光,避免了以往使用 1.3375 这一固定角膜屈光度产生的误差,也避免了不同角膜散光测量设备产生的误差,既往研究表明使用光线追踪原理计算 IOL 球镜和柱镜度数计算具有高度可预测性<sup>[20,44]</sup>,但 Barrett Toric 计算器是否优于光线跟踪测量仍需要进一步研究。

精确计算 Toric IOL 度数必不可少的条件之一是对角膜总散光的测量<sup>[45]</sup>,为了克服角膜散光测量的局限性,研究者开发出不同的回归公式及诺模图(nomogram)来获得更准确的全角膜散光。Koch 等<sup>[37]</sup>考虑到后角膜散光的平均值从而衍生出 Baylor 诺模图,它可以选择最佳矫正散光度数的 Toric IOL。Goggin 等<sup>[46]</sup>开发了 Goggin 诺模图,其中系数考虑了 IOL 的球镜度数对柱镜度数的影响。此外,Abulafia 等<sup>[47]</sup>制定了 Abulafia-Koch 公式,该回归公式根据标准角膜曲率的测量值估算总角膜散光。

## 3 其他 IOL 度数计算公式

随着屈光手术的发展,最早用于矫正屈光不正的方法有准分子激光屈光性角膜切削术(photorefractive keratectomy, PRK),随后在此基础上发展了准分子激光原位角膜磨镶术(laser in situ keratomileusis, LASIK)及准分子激光上皮下角膜磨镶术(laser-assisted subepithelial keratomileusis, LASEK)等。虽然准分子激光术后白内障患者角膜前后表面曲率比值、屈光指数、前房深度均有所改变,但晶状体的屈光度并不受手术的影响,理论上角膜

屈光手术前后 IOL 度数的计算结果应该是一样的,二者之间存在的差异说明了各种 IOL 计算公式准确性存在差异<sup>[48]</sup>。针对这类患者,研究者开发了 Barratt True-K 公式、Shammas-PL 公式及 Haigis-L 公式等。这些公式在计算 IOL 度数时,不需要患者之前屈光手术的相关数据即可进行运算。Kang 等<sup>[49]</sup>发现上述公式的准确性均很好,Shammas-PL 公式和 Barrett True-K 公式之间的准确性在统计学上没有显著差异,使用 Haigis-L 公式术后有近视漂移的倾向。也有学者比较术后屈光误差在  $\pm 0.50D$  和  $\pm 1.00D$  范围内眼数,发现几种针对 LASIK 或 PRK 术后的 IOL 度数计算公式之间没有显著差异<sup>[50]</sup>。

#### 4 小结

随着白内障手术技术的不断发展,IOL 度数计算公式的不断更新,更加精准地计算 IOL 度数成为人们追求的目标,个性化选择 IOL 度数计算公式可以改善患者术后视觉质量,减少患者对眼镜的依赖。因此,我们应不断总结并改进 IOL 度数计算方式,从而使 IOL 度数的计算更加精准。

#### 参考文献

- 1 Bamdad S, Bolkheir A, Sedaghat MR, et al. Changes in corneal thickness and corneal endothelial cell density after phacoemulsification cataract surgery: a double-blind randomized trial. *Electron Physician* 2018; 10(4):6616-6623
- 2 中华医学会眼科学分会白内障及人工晶状体学组. 我国飞秒激光辅助白内障摘除手术规范专家共识(2018年). *中华眼科杂志* 2018; 54(5):328-333
- 3 Lee TH, Sung MS, Cui L, et al. Factors Affecting the Accuracy of Intraocular Lens Power Calculation with Lenstar. *Chonnam Med J* 2015; 51(2):91-96
- 4 Olsen T. Pre- and postoperative refraction after cataract extraction with implantation of standard power IOL. *Br J Ophthalmol* 1988; 72(3):231-235
- 5 Clevenger CE. Clinical prediction versus ultrasound measurement of IOL power. *J Am Intraocul Implant Soc* 1978; 4(4):222-224
- 6 Binkhorst RD. The optical design of intraocular lens implants. *Ophthalmic Surg* 1975; 6(3):17-31
- 7 Hillman JS. Intraocular lens power calculation for emmetropia: a clinical study. *Br J Ophthalmol* 1982; 66(1):53-56
- 8 Sanders DR, Kraff MC. Improvement of intraocular lens power calculation using empirical data. *J Am Intraocul Implant Soc* 1980; 6(3):263-267
- 9 Retzlaff J. A new intraocular lens calculation formula. *J Am Intraocul Implant Soc* 1980; 6(2):148-152
- 10 Olsen T. Calculation of intraocular lens power: a review. *Acta Ophthalmol Scand* 2007; 85(5):472-485
- 11 Sanders DR, Retzlaff J, Kraff MC. Comparison of the SRK II formula and other second generation formulas. *J Cataract Refract Surg* 1988; 14(2):136-141
- 12 Sanders DR, Retzlaff JA, Kraff MC, et al. Comparison of the SRK/T formula and other theoretical and regression formulas. *J Cataract Refract Surg* 1990; 16(3):341-346
- 13 Dang MS, Raj PP. SRK II formula in the calculation of intraocular lens power. *Br J Ophthalmol* 1989; 73(10):823-826
- 14 Holladay JT, Prager TC, Chandler TY, et al. A three-part system for

- refining intraocular lens power calculations. *J Cataract Refract Surg* 1988; 14(1):17-24
- 15 Retzlaff JA, Sanders DR, Kraff MC. Development of the SRK/T intraocular lens implant power calculation formula. *J Cataract Refract Surg* 1990; 16(3):333-340
- 16 Fedorov SN, Kolinko AI, Kolinko AI. A method of calculating the optical power of the intraocular lens. *Vestn Oftalmol* 1967; 80(4):27-31
- 17 Hoffer KJ. The Hoffer Q formula: a comparison of theoretic and regression formulas. *J Cataract Refract Surg* 1993; 19(6):700-712
- 18 Hoffer KJ. Clinical results using the Holladay 2 intraocular lens power formula. *J Cataract Refract Surg* 2000; 26(8):1233-1237
- 19 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 Cataract Refract Surg* 2011; 37(1):63-71
- 20 Olsen T, Hoffmann P. C constant: new concept for ray tracing-assisted intraocular lens power calculation. *J Cataract Refract Surg* 2014; 40(5):764-773
- 21 Schröder S, Wagenpfeil S, Leydolt C, et al. Interpretation of the Intraocular Lens Constants for the Haigis Formula. *Klin Monbl Augenheilkd* 2017; 234(8):975-978
- 22 Schröder S, Leydolt C, Menapace R, et al. Determination of Personalized IOL-Constants for the Haigis Formula under Consideration of Measurement Precision. *PLoS One* 2016; 11(7):e0158988
- 23 Bang S, Edell E, Yu Q, et al. Accuracy of intraocular lens calculations using the IOLMaster in eyes with long axial length and a comparison of various formulas. *Ophthalmology* 2011; 118(3):503-506
- 24 Eom Y, Kang SY, Song JS, et al. Comparison of Hoffer Q and Haigis formulae for intraocular lens power calculation according to the anterior chamber depth in short eyes. *Am J Ophthalmol* 2014; 157(4):818-824
- 25 Barrett GD. An improved universal theoretical formula for intraocular lens power prediction. *J Cataract Refract Surg* 1993; 19(6):713-720
- 26 Melles RB, Holladay JT, Chang WJ. Accuracy of Intraocular Lens Calculation Formulas. *Ophthalmology* 2018; 125(2):169-178
- 27 Kane JX, Van Heerden A, Atik A, et al. Intraocular lens power formula accuracy: Comparison of 7 formulas. *J Cataract Refract Surg* 2016; 42(10):1490-1500
- 28 Cordelette C, Arndt C, Vidal J, et al. Is Holladay 2 formula accurate enough for calculating intraocular lens power in non-standard eyes? *J Fr Ophthalmol* 2018; 41(4):308-314
- 29 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
- 30 Chang P, Zhang F, Wang J, et al. Accuracy of constant C for ray tracing-assisted intraocular lens power calculation in normal ocular axial eyes. *Ophthalmic Res* 2020[Online ahead of print]
- 31 Kane JX, Van Heerden A, Atik A, et al. Accuracy of 3 new methods for intraocular lens power selection. *J Cataract Refract Surg* 2017; 43(3):333-339
- 32 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
- 33 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

- 34 Rubenstein JB, Raciti M. Approaches to corneal astigmatism in cataract surgery. *Curr Opin Ophthalmol* 2013; 24(1):30-34
- 35 Savini G, Hoffer KJ, Carbonelli M, et al. Influence of axial length and corneal power on the astigmatic power of toric intraocular lenses. *J Cataract Refract Surg* 2013; 39(12):1900-1903
- 36 Holladay JT. <http://www.healio.com/ophthalmology/refractive-surgery/news/print/ocular-surgery-news/%7Ba8a94136-740c-4efd-8e5f-7ec59e2c0ad0%7D/improving-toric-iol-outcomes-part-1>
- 37 Koch DD, Jenkins RB, Weikert MP, et al. Correcting astigmatism with toric intraocular lenses; effect of posterior corneal astigmatism. *J Cataract Refract Surg* 2013; 39(12):1803-1809
- 38 Abulafia A, Barrett GD, Kleinmann G, et al. Prediction of refractive outcomes with toric intraocular lens implantation. *J Cataract Refract Surg* 2015; 41(5):936-944
- 39 Barrett toric calculator. <http://www.ascrs.org/barrett-toric-calculator> and [http://www.apacrs.org/toric\\_calculator/Toric%20Calculator.aspx](http://www.apacrs.org/toric_calculator/Toric%20Calculator.aspx)
- 40 Skrzypecki J, Sanghvi Patel M, Suh LH. Performance of the Barrett Toric Calculator with and without measurements of posterior corneal curvature. *Eye(Lond)* 2019; 33(11):1762-1767
- 41 Alcon LaboratoriesInc. The new ALCON online toric IOL calculator incorporating the Barrett toric algorithm. <https://www.acrysoftoriccalculator.com/features.htm>
- 42 Yang J, Zhang H, Yang XT, et al. Accuracy of corneal astigmatism correction with two Barrett Toric calculation methods. *Int J Ophthalmol* 2019; 12(10):1561-1566
- 43 Abulafia A, Hill WE, Franchina M, et al. Comparison of Methods to Predict Residual Astigmatism After Intraocular Lens Implantation. *J Refract Surg* 2015; 31(10):699-707
- 44 Hoffmann PC, Wahl J, Hutz WW, et al. A ray tracing approach to calculate toric intraocular lenses. *J Refract Surg* 2013; 29(6):402-408
- 45 邓嘉进, 张劲松. 白内障患者角膜前表面散光轴位和全角膜散光轴位差异的相关因素分析. *国际眼科杂志* 2018; 18(2):245-247
- 46 Goggin M, Zamora-Alejo K, Esterman A, et al. Adjustment of anterior corneal astigmatism values to incorporate the likely effect of posterior corneal curvature for toric intraocular lens calculation. *J Refract Surg* 2015; 31(2):98-102
- 47 Abulafia A, Koch DD, Wang L, et al. New regression formula for toric intraocular lens calculations. *J Cataract Refract Surg* 2016; 42(5):663-671
- 48 李鸿钰, 李军, 宋慧. LASIK/PRK 术后人工晶状体度数计算的研究进展. *国际眼科杂志* 2019; 19(10):1704-1708
- 49 Kang BS, Han JM, Oh JY, et al. Intraocular Lens Power Calculation after Refractive Surgery: A Comparative Analysis of Accuracy and Predictability. *Korean J Ophthalmol* 2017; 31(6):479-488
- 50 Hamill EB, Wang L, Chopra HK, et al. Intraocular lens power calculations in eyes with previous hyperopic laser *in situ* keratomileusis or photorefractive keratectomy. *J Cataract Refract Surg* 2017; 43(2):189-194