

基于 SVR 和 BP 神经网络算法通过 IOL Master 700 测量数据来预测白内障术后 CW 弦

李 晨

引用:李晨. 基于 SVR 和 BP 神经网络算法通过 IOL Master 700 测量数据来预测白内障术后 CW 弦. 国际眼科杂志 2023; 23(12):2081-2086

First Affiliated Hospital of Soochow University, Suzhou 215000, Jiangsu Province, China. lceye0902@126.com
Received:2023-07-19 Accepted:2023-11-02

作者单位:(215000)中国江苏省苏州市,苏州大学附属第一医院眼科

作者简介:李晨,女,博士,副主任医师,研究方向:白内障临床研究。

通讯作者:李晨. lceye0902@126.com

收稿日期:2023-07-19 修回日期:2023-11-02

摘要

目的:通过 IOL Master 700 观察白内障手术前后 Chang-Warning 弦(CW 弦)的变化,并利用术前数据和人工智能预测模型预测术后 CW 弦。

方法:研究对象为 304 例白内障患者,分析其术前及术后的 IOL Master 700 测量数据,包括散光矢量值、角膜平均曲率、眼轴长度、前房深度、晶状体厚度、角膜中央厚度、白到白距离、浦肯野反射 I 像相对于角膜中心的位置和瞳孔中心的位置、CW 弦等。研究建立了基于 SVR 算法和 BP 神经网络算法的预测模型,通过术前 CW 弦及眼部生物参数来预测术后 CW 弦。

结果:相比于白内障手术前,手术后左、右眼 CW 弦 X 分量向颞侧有轻微偏移,Y 分量变化不大。使用术前 CW 弦和其他术前眼部生物参数作为输入数据,相比于 BP 神经网络,SVR 模型能够更准确的对术后 CW 弦的 X 分量和 Y 分量做出预测。

结论:CW 弦可以用各种生物测量仪器、角膜地形图仪器或断层摄像仪器在同轴固定光下直接测量。使用 SVR 算法能够在白内障手术前较精准的对术后 CW 弦进行预测。

关键词:alpha 角;kappa 角;Chang-Waring 弦(CW 弦);深度学习;白内障;SVR 算法;BP 神经网络算法;IOL Master 700

DOI:10.3980/j.issn.1672-5123.2023.12.27

Prediction of CW chord after cataract surgery from IOL Master 700 measurement data based on SVR algorithm and BP neural network

Chen Li

Department of Ophthalmology, the First Affiliated Hospital of Soochow University, Suzhou 215000, Jiangsu Province, China

Correspondence to: Chen Li. Department of Ophthalmology, the

Abstract

• **AIM:** To observe the changes in the Chang-Warning chord (CW chord) before and after cataract surgery using the IOL Master 700 and predict the CW chord using an artificial intelligence prediction model and preoperative measurement data.

• **METHODS:** The analysis was conducted on the preoperative and postoperative IOL Master 700 measurements of 304 cataract patients. This included astigmatism vector value, average keratometry, axial length, anterior chamber depth, lens thickness, corneal central thickness, white-to-white, the position of the Purkinje reflex I image relative to the corneal center and pupil center, and the CW chord. A prediction model based on the SVR algorithm and the BP neural network algorithm was established to predict the postoperative CW chord using the preoperative CW chord and ocular biological parameters.

• **RESULTS:** The X component of the CW chord showed a slight shift in the temporal direction in both the left and right eyes after cataract surgery, while the Y component changed little. The SVR model, using the preoperative CW chord and other preoperative biometric parameters as input data, was able to predict the X and Y components of the CW chord more accurately than the BP neural network.

• **CONCLUSION:** The CW chord can be directly measured with a coaxial fixation light using various biometers, corneal topographers, or tomographers. The use of the SVR algorithm can accurately predict the postoperative CW chord before cataract surgery.

• **KEYWORDS:** alpha angle; kappa angle; Chang-Warning chord (CW chord); deep learning; cataract; SVR algorithm; BP neural network; IOL Master 700

Citation: Li C. Prediction of CW chord after cataract surgery from IOL Master 700 measurement data based on SVR algorithm and BP neural network. *Guoji Yanke Zazhi (Int Eye Sci)* 2023; 23(12): 2081-2086

0 引言

在屈光性白内障手术中,特别是使用焦深延展型(extended depth of focus, EDOF)或多焦点人工晶状体(IOL)时,较大的 alpha 角或 kappa 角都会对完美的视力预

后产生负面影响。许多学者建议在白内障术前测量这些参数,以便评估患者的眼部条件并为植入合适的 IOL 提供参考^[1-3]。在一个具有同轴对齐光学元件的模型眼中,光轴被定义为通过所有光学元件表面曲率中心的轴,它与所有光学元件的表面垂直相交。视轴被定义为当眼睛注视某一点时,光线由该固定点到眼内黄斑中心凹的连线。视轴定义为光线自固定点经瞳孔中心至黄斑中心凹的连线^[4]。alpha 角是指在光轴和视轴之间形成的夹角;kappa 角是指瞳孔轴和视轴之间的夹角。由于眼的光学元件在现实中并不是同轴排列的,且难以测量参考节点,光轴、视轴均无法真实测得,alpha 角和 kappa 角在临床上很难明确。不同设备对 alpha 角和 kappa 角的定义及测量方法也不尽相同。2014 年,Chang 和 Waring^[4]建议提取角膜缘、瞳孔缘和浦肯野反射图像和瞳孔中心这些相对的位置,将受试者注视的同轴光反射作为眼部轴线的临床标记,从而确定了 Chang-Waring 弦(CW 弦)的距离和方向,以此来替代 alpha 角和 kappa 角这两个令人困惑的术语。CW 弦相比于传统的 alpha 角和 kappa 角的优势在于其大小并不受瞳孔直径和眼内晶状体形态的影响,且无需测量眼内参考节点^[5]。目前临床上很多的眼部生物测量仪器或角膜地形图仪可以直接测得 CW 弦的数值^[6-8]。然而,目前对于白内障手术前后 CW 弦的变化情况及如何在术前对术后 CW 弦进行评估的报道较少。本研究的目的在于分析 CW 弦在白内障手术前后的变化情况,通过 IOL Master 700 测量术前 CW 弦及其他眼部生物参数建立基于 SVR 和 BP 神经网络的预测模型,并对术后 CW 弦进行准确预测。为评估患者眼部条件及选择合适的 IOL 提供临床依据。

1 对象和方法

1.1 对象

回顾性研究。连续纳入 2022-01/12 来自苏州大学附属第一医院的白内障患者 304 例 304 眼,其中左眼 159 眼,右眼 145 眼。所有患者如双眼先后手术则只纳入 1 眼。纳入标准:年龄在 50 岁以上的 II~IV 级核的白内障患者,术前及术后都能配合完成光学生物测量并获得研究所需的所有参数。排除标准包括斜视、弱视、眼球震颤等导致固视困难、眼部手术史、角膜异常、既往眼外伤史、青光眼、葡萄膜炎、术前生物测量不可靠或无法检测以及不能及时随访的患者。手术前已获得每位患者的知情同意。所有的研究方法都符合《赫尔辛基宣言》的规定。本研究已在临床试验注册处注册,并已通过苏州大学附属第一医院伦理委员会审核[(2020)伦研批第 038 号]。

1.2 方法

1.2.1 数据的预处理

所有患者的术前及术后 3mo 的测量数据通过 IOL Master 700 软件导出,提取我们分析所需的相关参数,包括:年龄、眼别、眼轴长度(AL)、角膜中央厚度(CCT)、前房深度(ACD)、晶状体厚度(LT)、白到白距离(WTW)、角膜中心相对于浦肯野反射 I 像(PI 像)的位置(Ix/Iy),瞳孔中心相对于 PI 的位置(Px/Py),CW 弦(CWx/CWy),角膜前表面曲率(K1、K2)。当测量质量检查中缺失数据或数据出现“失败”“警告”等,或者在散瞳情况下检测的数据,或者手术前后瞳孔直径变化大于 1.5mm 的数据予以排除。在检查成功测量后,将数据集传输到 Matlab 软件进行进一步处理。

角膜前表面屈光力通过角膜平均曲率(AvgK)(K1 和

K2 的算术平均数)及角膜前表面散光的矢量值(KJ₀和 KJ₄₅)来表示,根据 Thibos 散光向量分析法^[9-10],Thibos 法可将散光的屈光度转换为 M、J₀、J₄₅、B 4 个参数。根据以下公式: $M = S + C/2$; $J_0 = (-C/2) \times \cos 2\alpha$; $J_{45} = (-C/2) \times \sin 2\alpha$; Overall blur vector (B) = $(M^2 + J_0^2 + J_{45}^2)^{1/2}$ 。其中 J₀ 和 J₄₅ 分别代表在轴向 90° 和 180° 以及在轴向 45° 和 135° 的散光值。M 为等效球镜,S 为球镜的屈光度,C 为柱镜的屈光度,α 为柱镜的轴向;B 为估计屈光度异常引起视物模糊的指数。

为了预测右眼术后 CW 弦的 2 个矢量成分 CWx 和 CWy 值,本文分别采用 BP 神经网络和支持向量回归(SVR)两种模型进行预测和误差对比分析。两种模型的训练样本都采用 10 个特征参数:术前 CWx、术前 CWy、术前 AvgK、术前 KJ₀、KJ₄₅、术前 AL、术前 CCT、术前 ACD、术前 LT 和术前 WTW,训练样本数据集 145 个,测试样本数据集 145 个。两种预测模型都先使用训练数据集进行训练,然后使用测试数据集进行验证。

1.2.2 建立 SVR 模型

SVR 模型的输入样本维度是 145×10,输出样本维度为 145×1,对训练、测试样本数据分别进行归一化预处理,将数据规整到[-1,1]。使用 SVR 模型分别建模对术后 CWx 和 CWy 的值进行预测。其中,模型的惩罚参数 c、核参数 g 分别取值 200、10,模型容忍误差取值 0.01。

1.2.3 建立 BP 神经网络模型

BP 神经网络的输入样本维度是 145×10,输出样本维度是 145×2,对训练、测试样本数据分别进行归一化预处理,将数据规整到[-1,1],通过 BP 神经网络模型同时对术后 CWx 和 CWy 的值进行预测。BP 神经网络采用输入层、隐含层、输出层三层结构,其中隐含层有 10 个神经元,学习率 0.01,训练目标最小误差 0.01,网络使用 Levenberg-Marquardt 反向传播算法训练。

1.2.4 验证过程

将 BP 神经网络和 SVR 模型预测的术后 CWx 和 CWy 与 IOL Master 700 测量的实际术后 CW 弦值进行比较,并通过均值、标准差、中位数、5%分位数、95%分位数来定量对比 SVR 模型和 BP 神经网络的预测误差。

统计学分析:所有统计分析均采用 SPSS 软件 21.0。为了评估总体的正态性,进行了 Shapiro-Wilk 正态性检验。采用 Bland-Altman 分析进行一致性分析。P<0.05 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 患者概况

本研究纳入白内障患者 304 例 304 眼,其中女 190 例,男 114 例;左眼 159 眼,右眼 145 眼;平均年龄 68.40±10.10 岁。表 1 为所有患者白内障术前眼部参数,包括 AvgK,散光矢量结果(KJ₀,KJ₄₅),AL,ACD,LT,CCT,WTW,瞳孔中心相对于 PI 的位置(Px/Py),角膜中心相对于 PI 的位置(Ix/Iy),以及目标变量 CW 弦(CWx/CWy)。对于这些描述性资料,表 1 提供了算术平均数、标准差、中位数及 5%和 95%可信区间水平。

2.2 SVR 和 BP 神经网络对于术后 CW 弦的预测性能的比较

为了观察 SVR 和 BP 神经网络对于术后 CW 弦的预测性能。我们选择了所有右眼的数据进行进一步分析。表 2 显示了通过 IOL Master 700 测得的所有右眼的术后实际 CW 弦的数据以及由术前测量参数(包括 AL,ACD,LT,

CCT,WTW 及术前 CW 弦)通过 SVR 和 BP 神经网络预测的数值,以及各自的预测误差。SVR 算法对两个 CW 弦分量的预测误差分别为 0.002 和 0.000,BP 神经网络对两个 CW 弦分量的预测误差分别为 0.001 和 0.001,与目标值相比,SVR 和 BP 神经网络的预测结果都表现出良好的性能。其中,SVR 相比于 BP 神经网络有更好的预测性能。

2.3 白内障手术前后 CW 弦的变化 图 1 为所有患者术前及术后 CW 弦的 X 分量和 Y 分量的散点和分布情况。X 分量分布显示,左眼(红色实线:术前;蓝色实线:术后)和右眼(绿色虚线:术前;紫色虚线:术后)之间存在有一些差异;在术前,大多数左眼 CW 弦 X 分量为正值,大多数右眼 CW 弦 X 分量为负值。术后与术前相比,左右眼的数值更接近于 0,表明在术后 PI 更接近于瞳孔中心。且术后 CW 弦 X 分量的分布更集中,说明术后 X 分量的变化较术前更小。Y 分量分布显示,左右眼之间的差异较小,左眼(红色实线:术前;蓝色实线:术后)大多数值为负值,右眼(绿色虚线:术前;紫色虚线:术后)数值更接近于 0,左右眼在术前及术后的变化也相对较小。

为了更好地观察手术前后 CW 弦的变化情况,我们收集了所有右眼的数据进行分析。图 2 显示术后(黄点)的

数值的分布比术前(蓝点)更接近于 0,表明在白内障术后 PI 更接近于瞳孔中心。术前较术后情况下的置信度椭圆的纵横比更小(术前:蓝色椭圆;纵轴 0.57mm,横轴 0.52mm,纵横比:1.10;术后:绿色椭圆;纵轴 0.67mm,横轴 0.48mm,纵横比:1.40)。

2.4 SVR 和 BP 神经网络对 CW 弦预测值与实际值的比较 我们进一步通过术前 CW 弦和其他眼部生物参数,应用 SVR 算法和 BP 神经网络预测术后 CW 弦的结果,不管是 X 分量(图 3A)还是 Y 分量(图 3B),BP 神经网络预测系统低估了 IOL Master 700 术后测量的 CW 弦,蓝色椭圆长轴的方向比紫色参考线更平坦。X 分量和 Y 分量的椭圆分别为:(1)X 分量:BP 神经网络:椭圆纵轴 0.76mm,横轴 0.28mm,纵横比 2.71;SVR 预测模型:椭圆纵轴 0.90mm,横轴 0.09mm,纵横比 10.00。(2)Y 分量:BP 神经网络:椭圆纵轴 0.63mm,横轴 0.17mm,纵横比 3.71;SVR 预测模型:椭圆纵轴 0.70mm,横轴 0.01mm,纵横比 70.00。图 4 通过术后实际 CW 弦的数值与预测值的比较可以看出应用 SVR 算法相比与 BP 神经网络,能够更好的对术后 CW 弦进行预测。图 5 通过 Bland-Altman 分析显示了相较于 BP 神经网络,SVR 算法预测的结果与实际值具有更好的一致性。

表 1 白内障患者术前的眼部参数

参数	AvgK (D)	KJ ₀ (D)	KJ ₄₅ (D)	AL (mm)	ACD (mm)	LT (mm)	CCT (mm)	WTW (mm)	Px (mm)	Py (mm)	Ix (mm)	Iy (mm)	CW _x (mm)	CW _y (mm)
均数	44.21	-0.04	0.00	24.19	3.13	4.34	0.54	11.67	0.034	0.075	0.011	0.033	-0.038	-0.078
标准差	1.46	0.49	0.28	2.20	0.42	0.49	0.03	0.43	0.271	0.233	0.399	0.320	0.267	0.230
中位数	44.05	-0.08	0.01	23.66	3.16	4.33	0.54	11.70	0.000	0.100	0.000	0.100	-0.046	-0.085
5%CI	41.97	-0.80	-0.40	21.99	2.44	3.51	0.49	10.90	-0.400	-0.200	-0.500	-0.600	-0.400	-0.448
95%CI	46.67	0.77	0.47	28.85	3.77	5.12	0.60	12.40	0.400	0.500	0.600	0.400	0.387	0.210

表 2 IOL Master 700 测得的所有右眼的实际 CW 弦和通过 SVR 和 BP 神经网络预测的 CW 弦以及各自的预测误差 mm

参数	IOL Master 700 测得的 实际 CW 弦		预测的 CW 弦 (SVR 算法)		预测误差 (SVR 算法)		预测的 CW 弦 (BP 神经网络)		预测误差 (BP 神经网络)	
	CW _x ^{OD}	CW _y ^{OD}	CW _x ^{OD}	CW _y ^{OD}	CW _x ^{OD}	CW _y ^{OD}	CW _x ^{OD}	CW _y ^{OD}	CW _x ^{OD}	CW _y ^{OD}
均数	-0.033	-0.005	-0.035	-0.006	0.002	0.000	-0.033	-0.006	0.001	0.001
标准差	0.268	0.204	0.257	0.199	0.051	0.007	0.186	0.164	0.185	0.115
中位数	-0.076	0.000	-0.067	-0.006	-0.009	0.006	-0.069	-0.011	-0.026	0.011
5%CI	-0.385	-0.306	-0.376	-0.300	-0.010	-0.006	-0.252	-0.240	-0.239	-0.196
95%CI	0.554	0.383	0.540	0.377	0.009	0.006	0.268	0.268	0.374	0.185

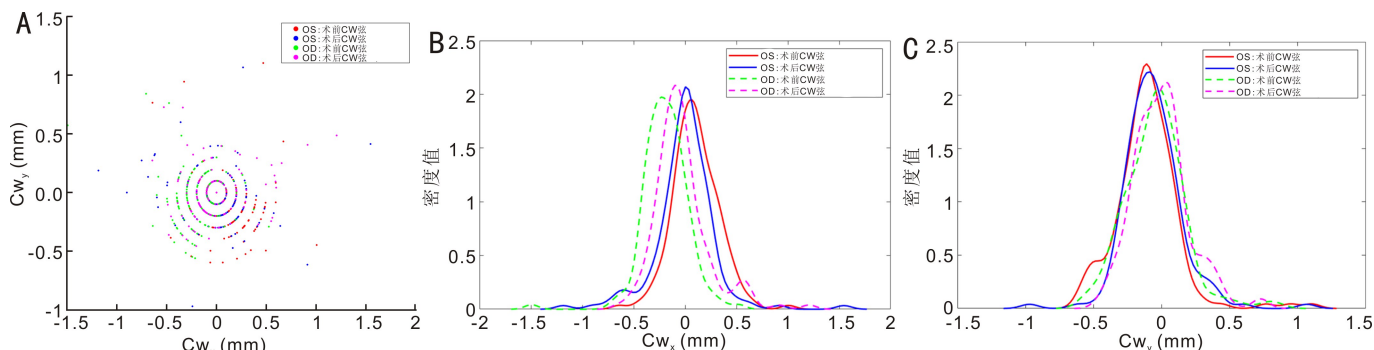


图 1 IOL Master 700 测量的白内障患者左右眼及术前、术后 CW 弦 A:散点图显示了所有患者手术前后 CW 弦的分布情况。红点:左眼术前;蓝点:左眼术后;绿点:右眼术前;紫点:右眼术后;B: CW 弦 X 分量的概率密度图。红实线:左眼术前;蓝实线:左眼术后;绿虚线:右眼术前;紫虚线:右眼术后;C: CW 弦 Y 分量的概率密度图。红实线:左眼术前;蓝实线:左眼术后;绿虚线:右眼术前;紫虚线:右眼术后。

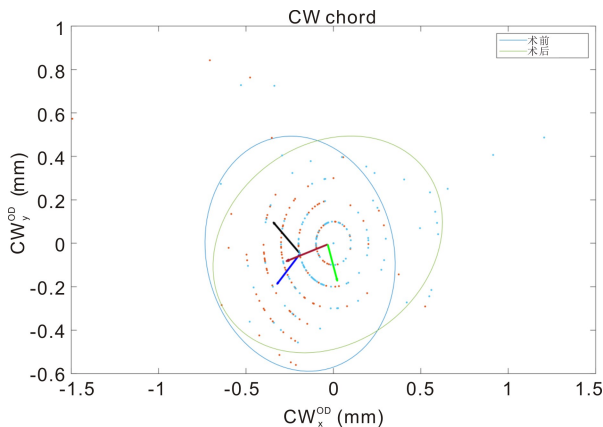


图2 IOL Master 700 测量的白内障患者右眼的术前及术后 CW 弦 CW 弦显示了 PI 像相对于瞳孔中心的位置。蓝色和绿色椭圆指的是术前和术后情况下 95% 的置信度椭圆。黑色和紫色向量表示术前情况下的协方差矩阵的特征值(椭圆的纵轴与横轴的方向);红色和浅绿色向量指的是术后情况下的协方差矩阵的特征值(椭圆的纵轴与横轴的方向)。

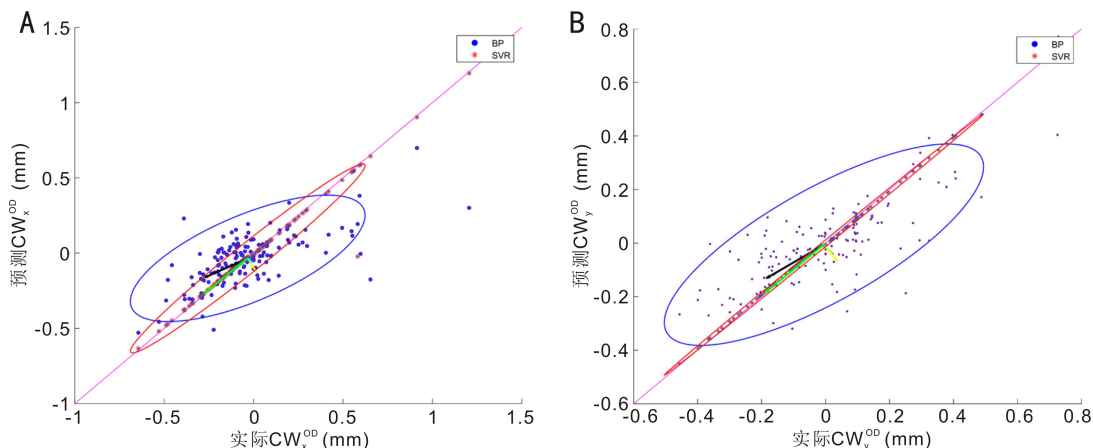


图3 预测的术后 CW 弦与术后实际 CW 弦的 X 分量和 Y 分量的比较 A: X 分量; B: Y 分量。预测采用 BP 神经网络(蓝色圆点)和 SVR 算法(红色星号)。两种预测方法相比,SVR 算法具有更好的预测性能。蓝色和红色椭圆指的是预测采用 BP 神经网络和 SVR 算法情况下 95% 的置信度椭圆。黑色和黄色向量表示采用 BP 神经网络情况下的协方差矩阵的特征值(椭圆的纵轴与横轴的方向);浅绿色和浅蓝色向量指的是采用 SVR 算法情况下的协方差矩阵的特征值(椭圆的纵轴与横轴的方向)。

3 讨论

以往很多文献讨论了关于 alpha 角和 kappa 角对白内障手术预后的影响^[1-2,11-14],但对这些角度的定义常常令人困惑。在非同轴光学系统中,光轴和视轴都很难真实测得,由于没有明确的参考轴,这些角度往往难以评估。且不同的测量仪器测量这些角度原理不一样,正常值范围也往往存在差异。Chang 和 Warring^[4]在 2014 年发表的文章中建议使用距离来反映 PI 相对于瞳孔中心的位置,该距离可以通过基于同轴固定光测量的光学测量仪器直接获得,被命名为 CW 弦。与传统的 alpha 角和 kappa 角相比,CW 弦的优点是只要使用远距离的同轴光源,测量结果与使用何种测量设备并没有太大的关系。且多数的角膜地形图仪、断层摄像设备或光学生物测量设备都可以测量患者固视下的距离和角膜曲率,因此,可以通过处理瞳孔轮廓及源自角膜前表面的 PI 像直接从测量的数据中提取 CW 弦。

浦肯野光反射 PI 像并不是在角膜的前表面形成的,而是在无限远的同轴光源与角膜交点处及角膜前表面曲率中心之间的距离的一半(大约是角膜前表面后 3.85mm)处形成的。因此,CW 弦不能直接转换为 alpha 角或 kappa 角。根据以往研究报道,1mm CW 弦长约为 7.5°的 kappa

角^[15]。CW 弦的标准值为 $0.34 \pm 0.16\text{mm}$,我们观察到的术前平均 CW 弦为 $0.32 \pm 0.21\text{mm}$,术后平均 CW 弦为 $0.29 \pm 0.21\text{mm}$ 。术前 CW 弦与以往报道差别不大,术后 CW 弦较术前相对减小,提示手术可能对 CW 弦的数值产生影响。

在之前的研究中发现,多焦点 IOL 术后满意度差的原因之一与 kappa 角有关。2011 年 Prakash 等发现较大的 kappa 角会增加多焦点 IOL 植入后的光干扰的程度^[11]。大角度的 kappa 角可能与彗差相关,彗差本身会加重光干扰的程度^[16]。目前推荐在植入多焦点 IOL 之前对 kappa 角进行评估,一些较大 kappa 角($>0.6\text{mm}$ 或大于 IOL 中央衍射部分半径)应谨慎植入多焦点 IOL^[17]。目前尚不清楚是什么原因导致 kappa 角的变化。可能的原因包括:手术本身(超声能量或药物毒性)可能会对虹膜造成一定损伤,从而导致瞳孔的形状、位置和直径发生变化;术前白内障为皮质型或局部后囊下型时,由于晶状体的不均匀混浊,术前和术后的视轴发生较明显的改变,从而引起 kappa 角的变化。然而,目前对于 CW 弦在白内障术前术后变化的报道较少,Langenbucher 等^[18]报道白内障术后与术前相比,CW 弦显示出向上和向鼻侧的位移变化。在本文中,我们采集了白内障患者术前、术后的生物参数及 CW 弦,

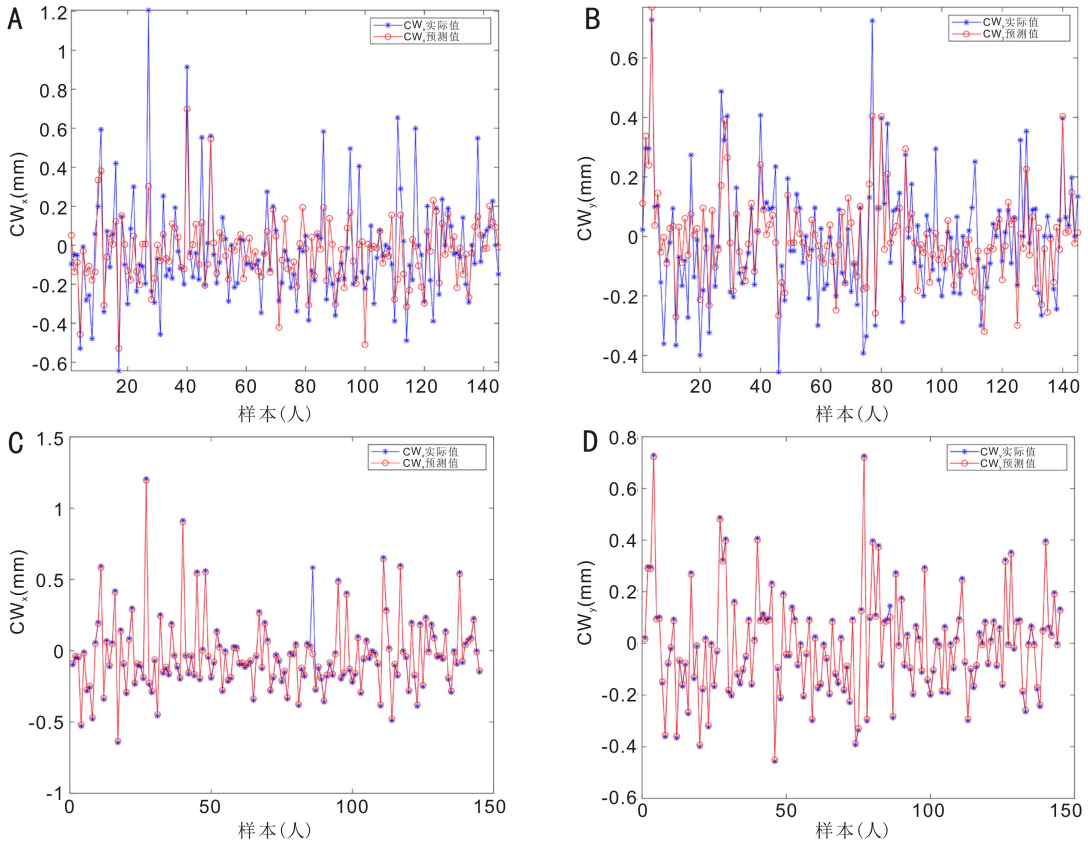


图4 预测的CW弦与术后实际CW弦的比较 A:采用BP神经网络预测的X分量与术后实际X分量的比较(蓝色星号: CW弦X分量的实际值;红色圆圈: CW弦X分量的预测值); B:采用BP神经网络预测的Y分量与术后实际Y分量的比较(蓝色星号: CW弦Y分量的实际值;红色圆圈: CW弦Y分量的预测值); C:采用SVR算法预测的X分量与术后实际X分量的比较(蓝色星号: CW弦X分量的实际值;红色圆圈: CW弦X分量的预测值); D:采用SVR算法预测的Y分量与术后实际Y分量的比较(蓝色星号: CW弦Y分量的实际值;红色圆圈: CW弦Y分量的预测值)。

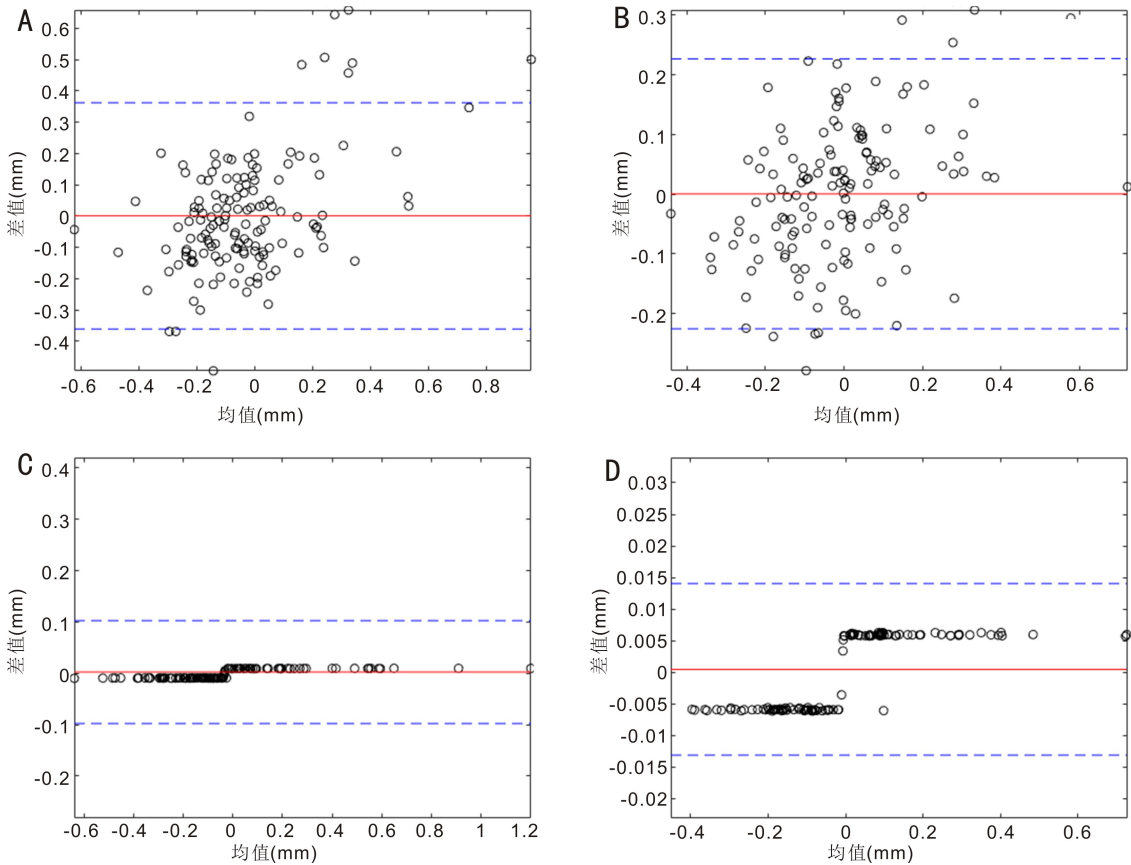


图5 采用BP神经网络和SVR算法预测的CW弦与术后实际CW弦一致性的比较 A:采用BP神经网络预测的X分量与术后实际X分量的一致性分析; B:采用BP神经网络预测的Y分量与术后实际Y分量的一致性分析; C:采用SVR算法预测的X分量与术后实际X分量的一致性分析; D:采用SVR算法预测的Y分量与术后实际Y分量的一致性分析。

我们发现相比于白内障手术前,手术后左、右眼 CW 弦 X 分量向颞侧有轻微偏移;Y 分量变化不大。PI 在术后与术前相比更靠近瞳孔中心。

鉴于 CW 弦在白内障手术尤其是植入高端 IOL 时的重要性,我们试图从白内障术前测量获得的一些常规生物参数(角膜曲率、散光值、AL、ACD、LT、CCT 和 WTW)和术前 CW 弦预测出白内障术后 CW 弦的数值。2021 年 Langenbucher 等^[18]采用多元线性回归法和前馈神经网络的方法通过术前 CW 弦及眼部生物参数对术后 CW 弦进行预测,但并没有获得满意的预测结果。本文中,我们采用了 SVR 算法和 BP 神经网络,其预测精度较既往文献大大提高,两者均显示了较好的预测结果,相比于 BP 神经网络,SVR 算法显示出更好的预测精度。CW 弦 X 分量的预测误差值 SVR 算法为 $0.002 \pm 0.051 \text{ mm}$;BP 神经网络为 $0.001 \pm 0.185 \text{ mm}$,Y 分量的预测误差的方差值 SVR 算法为 $0.000 \pm 0.007 \text{ mm}$;BP 神经网络为 $0.001 \pm 0.115 \text{ mm}$ 。

总之,CW 弦的数值可以通过在同轴固定光源的光学生物测量仪、角膜地形图仪或断层摄像仪获取。在白内障术后 CW 弦会发生变化。在白内障术前,我们可以通过测量术前 CW 弦和其他生物学参数,应用人工智能的方法如 SVR 算法来预测术后 CW 弦的大小。

参考文献

- 1 Mahr MA, Simpson MJ, Erie JC. Angle alpha orientation and magnitude distribution in a cataract surgery population. *J Cataract Refract Surg* 2020;46(3):372-377
- 2 Wang R, Long T, Gu X, et al. Changes in angle kappa and angle alpha before and after cataract surgery. *J Cataract Refract Surg* 2020;46(3):365-371
- 3 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. *国际眼科杂志* 2023;23(5):778-782
- 4 Chang DH, Waring GO. The subject-fixated coaxially sighted corneal light reflex; a clinical marker for centration of refractive treatments and devices. *Am J Ophthalmol* 2014;158(5):863-874. e2
- 5 Barragán-Garza E, Koch DD, Vargas LG, et al. The sensitivity of clinical outcomes to centration on the light-constricted pupil for a shape-changing corneal inlay. *J Refract Surg* 2018;34(3):164-170
- 6 Fişuş AD, Hirschschall ND, Findl O. Comparison of 2 swept-source

- optical coherence tomography-based biometry devices. *J Cataract Refract Surg* 2021;47(1):87-92
- 7 Fişuş AD, Hirschschall ND, Ruiss M, et al. Repeatability of 2 swept-source OCT biometers and 1 optical low-coherence reflectometry biometer. *J Cataract Refract Surg* 2021;47(10):1302-1307
- 8 Chen YN, Hirschschall N, Findl O. Evaluation of 2 new optical biometry devices and comparison with the current gold standard biometer. *J Cataract Refract Surg* 2011;37(3):513-517
- 9 Thibos LN, Horner D. Power vector analysis of the optical outcome of refractive surgery. *J Cataract Refract Surg* 2001;27(1):80-85
- 10 Read SA, Collins MJ. Diurnal variation of corneal shape and thickness. *Optom Vis Sci* 2009;86(3):170-180
- 11 Cervantes-Coste G, Tapia A, Corredor-Ortega C, et al. The influence of angle alpha, angle kappa, and optical aberrations on visual outcomes after the implantation of a high-addition trifocal IOL. *J Clin Med* 2022;11(3):896
- 12 Montrimas A, Žemaitienė R, Yao K, et al. Chord mu and chord alpha as postoperative predictors in multifocal intraocular lens implantation. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* 2023[Online ahead of print]
- 13 刘帅帅,丁蕾,张霜,等. 三种仪器测量年龄相关性白内障患者术前 Kappa 角和 Alpha 角的对比. *国际眼科杂志* 2022;22(3):490-494
- 14 de Vries NE, Webers CA, Touwslager WR, et al. Dissatisfaction after implantation of multifocal intraocular lenses. *J Cataract Refract Surg* 2011;37(5):859-865
- 15 Erdem U, Muftuoğlu O, Gundogan FC, et al. Pupil center shift relative to the coaxially sighted corneal light reflex under natural and pharmacologically dilated conditions. *J Refract Surg* 2008;24(5):530-538
- 16 Braga-Mele R, Chang D, Dewey S, et al. Multifocal intraocular lenses: relative indications and contraindications for implantation. *J Cataract Refract Surg* 2014;40(2):313-322
- 17 Espaillet A, Coelho C, Medrano Batista MJ, et al. Predictors of photic phenomena with a trifocal IOL. *Clin Ophthalmol* 2021;15:495-503
- 18 Langenbucher A, Szentmáry N, Cayless A, et al. Prediction of CW chord as a measure for the eye's orientation axis after cataract surgery from preoperative IOLMaster 700 measurement data. *Acta Ophthalmol* 2022;100(6):e1232-e1239