

体外光学质量测试系统对 IOL 光学质量评估应用的研究进展

潘若琳¹ 综述 廖莹¹ 兰长骏² 审校

¹川北医学院附属医院眼科 川北医学院眼视光医学院,南充 637000; ²成都东区爱尔眼科医院,成都 610056

通信作者:兰长骏,Email:lanchangjun@sina.com

【摘要】 手术是目前白内障唯一有效的治疗方法。随着生活水平的提高,人们对术后视觉质量的要求也越来越高,各种功能性人工晶状体(IOL)不断推出。体外光学质量测试系统用于新型 IOL 的设计和优化、IOL 临床应用的前期研究,评估 IOL 的材料、设计、偏心量、倾斜度、旋转度、入射光波长、瞳孔直径等因素对 IOL 光学质量的影响,有助于医生对 IOL 的充分了解和正确选择。体外光学质量测试系统主要包括光学测试平台和光学设计软件,前者可对 IOL 进行实验测量,而后者可对 IOL 进行光学数值模拟。目前体外光学质量测试系统在国内应用较少,但逐渐受到关注,本文围绕常用的 IOL 体外光学质量测试系统及其临床应用进行综述,包括体外光学质量的测量评估指标、光学测试平台(OptiSpheric[®] IOL PRO、Badal Optometer、PMTF 和 NIMO)的构造和光学设计软件(ZEMAX、OSLO 和 VirtualLab)的测量原理,二者在 IOL 光学质量评估方面的应用,以及体外光学测试的局限性等。

【关键词】 体外测量; 光学平台; 光学设计软件; 人工晶状体; 光学质量

基金项目: 四川省卫计委重点课题(18ZD022); 四川省医学科研课题(S21011); 南充市市校科技战略合作项目(22SXFDF0003)

DOI: 10.3760/cma.j.cn115989-20221107-00521

Research progress in the application of *in vitro* optical quality test system for the assessment of IOL optical quality

Pan Ruolin¹, Liao Xuan¹, Lan Changjun²

¹Department of Ophthalmology, Affiliated Hospital of North Sichuan Medical College, Medical School of Ophthalmology & Optometry, North Sichuan Medical College, Nanchong 637000, China; ²Chengdu Eastern Aier Eye Hospital, Chengdu 610056, China

Corresponding author: Lan Changjun, Email: lanchangjun@sina.com

【Abstract】 Surgery is currently the only effective treatment for cataract. As the standard of living improves, people's demand for postoperative visual quality increases, and a variety of functional artificial lenses (IOL) have been continuously introduced. The *in vitro* optical quality testing system is used for the design and optimization of new IOL and for the preliminary clinical study of IOL to evaluate the effects of influencing factors such as IOL material, design, decentration, tilt, rotation, incident light wavelength and pupil diameter on the optical quality of IOL. It is helpful for doctors to fully understand and correctly select IOL. *In vitro* optical quality test systems mainly include optical testing platform and optical design software. The former can experimentally measure IOL, while the latter can perform optical numerical simulation of IOL. *In vitro* optical quality test systems have received increasing attention in China in recent years. This article reviews the *in vitro* optical quality test system of IOL and its clinical application. This article reviews the commonly used *in vitro* optical quality test systems and their clinical applications, including the measurement and evaluation indicators of *in vitro* optical quality, the construction of optical test platforms (OptiSpheric[®] IOL PRO, Badal Optometer, PMTF, and NIMO) and the measurement principles of optical design software (ZEMAX, OSLO, and VirtualLab), as well as their applications in IOL optical quality evaluation and the limitations of *in vitro* optical testing.

【Key words】 *In vitro* measurements; Optical bench; Optical design software; Intraocular lens; Optical quality

Fund program: Key Project of Sichuan Health and Family Planning Commission (18ZD022); Medical



Research Project of Sichuan Province (S21011); Project of the Strategic Cooperation of City and College (22SXFWD0003)

DOI:10.3760/cma.j.cn115989-20221107-00521

功能性人工晶状体 (intraocular lens, IOL) 的设计较普通 IOL 更为复杂, 体外光学质量测试和体内视觉质量评价有助于加深对其光学参数和性能的认识, 是临床应用前不可或缺的环节。体外光学质量测试系统主要包括光学测试平台和光学设计软件 2 类, 可用于各种 IOL 研究, 探索不同因素对 IOL 光学质量的影响^[1-2]。与体内检测相比, 体外光学质量测试不受患者个体差异、光学介质、主观感受和其他复杂因素的干扰, 测试结果更客观和准确, 获取信息更全面和充分^[3-4]。近年来体外光学质量测试系统不断发展和改进, 在 IOL 方面的研究也越来越广泛, 本文对此进行综述。

1 IOL 光学质量的体外评价指标

IOL 光学质量的体外评价包括定量评价和定性评价。定量评价常用的指标包括点扩散函数、调制传递函数 (modulation transfer function, MTF)、斯特列尔比 (streh ratio, SR)、波前像差等, 其中 MTF 最常用^[1,5-7]。定性评价主要有美国空军分辨率测试图 (又称 USAF 分辨率测试图) 和 Badal 图像, 其中前者由不同大小的横竖线和数字组成, 可反映切向和矢向从低到高空间频率的成像质量, 后者使用的 ETDRS 视力字母表最小一行与 Snellen 视力表的 20/12 行视力相对应^[1,8]。2 种测量指标各有其优点, 定量指标更准确而定性指标更直观, 综合应用这 2 种方法可以更全面地评估 IOL 的光学质量。

2 IOL 体外光学质量测试系统

光学测试平台和光学设计软件可分别对 IOL 的光学质量进行实验测量和数值模拟。

2.1 光学测试平台

2.1.1 OptiSpheric® IOL PRO OptiSpheric® IOL PRO (德国 TRIOPTICS GmbH 公司) 是目前国际上认可度较高的一款体外光学质量测量设备, 该设备包括由多色光源和光谱滤波器组成的照明系统、准直器、测试靶标 (包括十字线和 USAF 分辨率测试图等)、模型眼 (包括不同球差设计的模型角膜和放置待测 IOL 的湿房), 以及显微镜物镜和电荷耦合器件 (charge coupled device, CCD) 相机等组件构成的成像系统^[9-10]。测量 IOL 光学质量时, 准直器将出射光转换为平行光, 经由光阑 (包括以 0.5 mm 为间隔的从 1~5 mm 的多种直径, 以模拟不同瞳孔直径) 到达模型眼, 经显微镜在 CCD 相机上成像^[11], 如图 1 所示。其中, 为保证 IOL 无倾斜, 在放置 IOL 的湿房设置有一直径为 11~13 mm 的 IOL 支架。该设备可测量 MTF 值、USAF 分辨率测试图等, 在一定瞳孔直径大小和焦平面条件下, 检测 IOL 经十字线成像的线扩散函数, 通过傅里叶变换得到 MTF 值, MTF 的测量精度为 $\pm 2\%$; USAF 分辨率测试图的测量条件与 MTF 相同, 只是将测试靶标由十字线换成了 USAF 分辨率测试图。

利用该设备可以分析和比较不同 IOL 的光学性能, 并探索

影响 IOL 光学性能的因素, 有助于了解瞳孔大小、偏心量和倾斜度等因素对不同 IOL 光学质量的影响^[1,9-15]。Tandogan 等^[10] 利用该设备进行了一系列体外光学实验, 首先测量了非球面 IOL C-flex 970 C (英国 Rayner 公司) 和球面 IOL C-flex 570 C (英国 Rayner 公司) 的 MTF 曲线, 显示非球面 IOL 的光学质量优于球面 IOL, 并且在较大瞳孔直径时这种优势更为明显。这与以往的临床研究结论一致, 验证了利用 OptiSpheric® IOL PRO 进行 IOL 体外研究结果的可靠性, 也为 IOL 设计的改进提供了思路^[16]。随后, 他们又比较了德国 Carl Zeiss Meditec AG 公司的单焦点 IOL CT ASPHINA 409 M、双焦点 IOL AT LISA 809 M 和三焦点 IOL AT LISA Tri 839MP 的体外光学质量, 发现单焦点 IOL 在远焦点处的光学质量最好, 双焦点和三焦点 IOL 分别在近焦点和中焦点处表现更佳。另外, 瞳孔大小会影响 IOL 的光能利用, 当瞳孔直径为 3.0 mm 时, 三焦点 IOL 的光损失少于双焦点 IOL, 直径为 4.5 mm 时, 则情况相反, 但无论瞳孔大小, 单焦点 IOL 的光损失在 3 种焦点设计的 IOL 中均最小^[14]。了解不同焦点设计的 IOL 远、中、近焦点光学特性, 有助于医生根据患者的生活需求个性化选择 IOL。

该设备还可与含有荧光素和绿色激光的实验装置联用, 在测量 IOL 的光学质量时实现射线可视化。Son 等^[17] 利用这种联合装置比较了 2 种连续视程型 IOL AT LARA 829MP (德国 Carl Zeiss Meditec 公司) 和 AM2UX (中国 Eyebright 公司) 的光学性能, 结果表明在单色光照射且模型角膜零球差的测试条件下, AM2UX 表现为低附加度的双焦透镜; 在低离焦度 (2 D 以下) 时, AT LARA 829MP 的图像质量优于 AM2UX, 而当离焦度为 2~3 D 时, AM2UX 的图像质量更好。射线可视化技术的应用使体外光学测试的结果更加直观, 便于比较不同类型 IOL 的光学质量, 也为体外研究方法的改进提供了新思路。

另外, Liu 等^[18] 利用该设备测量不同方向的偏心和倾斜对旋转非对称区域多焦点 IOL SBL-3 (美国 Lenstec 公司) 光学性能的影响, 研究结果表明偏心和倾斜的方向、大小以及瞳孔直径都会影响旋转非对称多焦点 IOL 的光学质量。当 SBL-3 居中时, 大瞳孔直径 (4.5 mm) 下的光学质量更好; 向视近区偏心时, 近焦点处的光学质量提高, 但远焦点处光学质量下降, 而向视远区偏心时, 则结果相反。这种影响在小瞳孔直径 (3.0 mm) 状态比大瞳孔直径 (4.5 mm) 时更明显。当 SBL-3 向

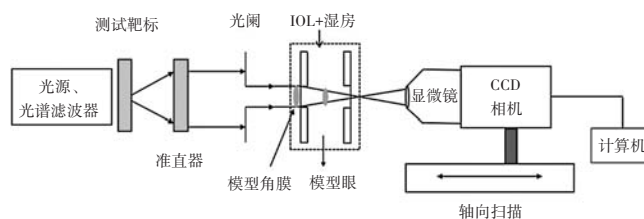


图 1 OptiSpheric® IOL PRO 光学台示意图 IOL: 人工晶状体



视近区倾斜时,近焦点处光学质量较远焦点处下降更明显;而向视远区倾斜时,则结果相反。这种影响在大瞳孔直径(4.5 mm)状态比小瞳孔直径(3.0 mm)状态更明显。研究提示,非对称设计的区域多焦 IOL 偏心和倾斜对光学质量的影响更为复杂,此类 IOL 植入后居中性倾斜度控制更为重要。

2.1.2 Badal Optometer Badal Optometer(英国 Image Science 公司)是一个含模型眼的 MTF 工作台。该光学测试平台包括光纤照明器、滤光片和扩散器组成的照明系统、投射透镜、靶标(十字线和 ETDRS 视力字母表等)、Badal 透镜(焦距 100 mm)、模型眼(模型角膜和放置待测 IOL 的湿房)和 CCD 相机等^[19],光路图如图 2 所示。该平台可测量 MTF 值等定量指标,靶标为十字线,算法与傅里叶变换相关;其测量的定性指标为 Badal 图像,测量条件同 MTF,只是通过将靶标转换为 ETDRS 视力字母表^[20-21]。

Badal Optometer 可用于评估 IOL 的光学质量^[8,19-21]。Carson^[8]等利用该仪器测量了 Acrysof IQ Panoptix TFNT00(美国 Alcon 公司)、AT LISA Tri 839MP(德国 Carl Zeiss Meditec AG 公司)和 Finevision Micro F(比利时 PhysIOL 公司)3 种三焦点 IOL 的体外光学质量,发现 AT LISA Tri 839MP 和 Finevision Micro F 的最佳中视力焦点在 80 cm 处,而 Acrysof IQ Panoptix TFNT00 在 60 cm 处。该研究提示,不同三焦点 IOL 的最佳中视力焦点位置不同,医生需根据患者的中距用眼习惯选择合适的 IOL,大部分亚洲人可能更适合 Panoptix。该团队还比较了三焦点 IOL AcrySof IQ PanOptix TFNT00(美国 Alcon 公司)和近附加为+3.0 D 的双焦点 IOL AcrySof IQ ReSTOR SN6AD1(美国 Alcon 公司)的光学质量,发现在远、近焦点处,二者光学质量相当;而在最佳中视力焦点处,PanOptix 的光学性能则要优于后者^[21]。由此可见相比于双焦点 IOL,三焦点 IOL 提供的清晰视程更广,也更适合日常生活中有读书写字、电脑办公以及开车等中距离视物需要的患者。另外,该仪器与全角度散射仪联合应用时,可用于评估离体 IOL 的前散射、杂散光和其他光学质量指标,有助于了解不同材质 IOL 植入人眼一定时间后视觉质量的变化^[20,22]。

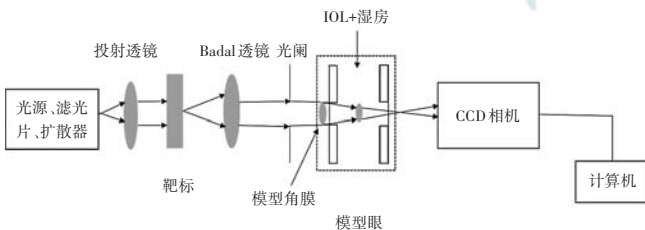


图 2 Badal Optometer 示意图 IOL:人工晶状体

2.1.3 PMTF PMTF 光学测试平台(比利时 Lambda-X 公司)使用基于相移原理的专利定量偏转技术测量,能够根据光束的偏差值精确测量波前像差,从而评估 IOL 的光学质量^[23]。其构成与上述光学平台类似,尤其是 OptiSpheric[®] IOL PRO,包括照明系统、测试靶标(十字线和 USAF 分辨率测试图等)、准直透镜(由 L1、L2 和 L3 组成)、光阑、放置待测 IOL 的模型眼,以

及成像系统(由显微镜物镜和 CCD 相机组成)等。其中照明系统配备了 480 nm、546 nm 和 650 nm 这 3 种不同波长的单色光源^[24],光路图如图 3 所示。该平台可测量 MTF 值、MTF 曲线、SR 值和 USAF 分辨率测试图等指标^[23,25]。MTF 值的测量在一定瞳孔大小和焦平面下进行,测量靶标是十字线,允差范围小于 5%,测量 USAF 时的设置与测量 MTF 时相同,只是将十字线替换为 USAF 分辨率测试图^[26-27]。

该光学测试平台可用于探索不同因素对 IOL 光学质量的影响^[25-26],Can 等^[25]利用该设备证实,IOL 的折射和衍射光学元件产生了相反的色差效应,并且二者产生的色差效应可以部分或完全补偿。另外,该设备还可与光学设计软件联合应用,评估偏心和倾斜对所设计的各 IOL 光学质量的影响,Perez-Gracia 等^[28]利用商业光学设计软件 OSLO 和 PMTF 光学测试平台分别对 IOL 偏心和倾斜时的光学质量进行数值模拟和实验测量。先由光学设计软件 OSLO 设计 4 种 IOL:球面 IOL 和非球面 IOL A、B、C,其中球面 IOL 为正球差,非球面 IOL A 和 C 为负球差,A 的负球差值高于 C,B 为零球差。经数值模拟发现,非球面 IOL 对偏心和倾斜的敏感性高于球面 IOL,偏心引起的光学质量下降对具有较高负球差设计的 IOL 影响更大,而不同球差值的 IOL 倾斜时光学质量下降差异不明显,较大负球差且较低度数的 IOL 对倾斜的耐受更好。实验测量仅比较了+20 D 的各 IOL 的光学质量,结果与数值模拟相似。该研究表明,相比于较小负球差设计的 IOL,较大负球差设计的 IOL 抗偏心能力更差,IOL 复杂的光学特性提示,在研究其光学性能时应进行多方面综合分析,也为 IOL 的球差设计提供了参考。综上,PMTF 光学测试平台不仅可用于比较各种 IOL 的光学性能,还可用于研究 IOL 的偏心量和倾斜度等对光学质量的影响。

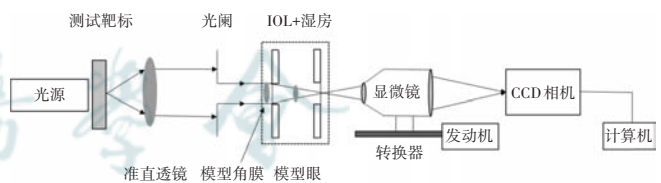


图 3 PMTF 光学工作台示意图 IOL:人工晶状体

2.1.4 NIMO NIMO 光学测试平台(比利时 Lambda-X 公司)采用相移纹影技术,该技术也是通过测量光束偏差值得到波前像差数据,以分析 IOL 等的光学特性^[29-30]。该光学测试平台包括由光源、扩散器和±10 nm 带宽的滤光片组成的照明系统、准直透镜 L1、放置待测 IOL 的湿房、透镜 L2 和 L3、光阑、CCD 相机等^[6,31],如图 4 所示。其中,出射光波长为 546 nm,瞳孔直径大小由计算机输入控制,最大至 8 mm。该设备无法测量定性指标,但可测量定量指标 MTF 值等,MTF 值由基于 Matlab 的定制应用程序(美国 Mathworks 公司)从实验波前数据中计算得到^[5]。

该设备可对不同光学设计的 IOL 和角膜接触镜的 Zernike 系数进行精确测量,评估其是否符合设计规范等^[5,29,32]。

Madrid-Costa 等^[6]利用该设备比较了新型零球差设计 IOL EnVista(美国 Bausch&Lomb 公司)和负球差设计 IOL AcrySof IQ SN60WF(美国 Alcon 公司)的光学质量,发现当存在角膜像差时,后者的光学性能更佳。该研究提示,为使更广泛患者群体获得更好的术后视觉质量,可考虑开发不同球差设计的 EnVista,也为其他 IOL 的球差设计提供了参考。Ferrer-Blasco 等^[29]利用该设备探讨单焦点非球面散光矫正型 IOL 的体外光学质量随散光度数变化的规律,通过测量 AcrySof IQ Toric IOL SN6A T2、SN6A T3、SN6A T4、SN6A T5 和 SN6A T6(美国 Alcon 公司)的光学质量,发现 AcrySof IQ Toric 的光学性能不受柱镜度数大小的影响。Perez-Vives 等^[33]的实验利用该设备首次测量了球面散光矫正型 IOL AcrySof Toric(美国 Alcon 公司)和非球面散光矫正型 IOL IQ Toric(美国 Alcon 公司)的光学质量,发现当应用零球差的模型角膜测量 IOL 光学质量时,在小瞳孔直径(3 mm)下,2 种设计的 IOL 光学质量相当,而在大瞳孔直径(5 mm)下,球面散光矫正型 IOL 的光学质量优于非球面散光矫正型 IOL;然而,当应用有正球差的模型角膜测量 IOL 的光学质量时,由于非球面散光矫正型 IOL 具有的负球面像差可以补偿一部分角膜的正球面像差,其光学质量优于球面散光矫正型 IOL。综上所述,该设备测量光学质量的重复性高、稳定性良好,不仅可以测量 IOL 的光学质量,还可以测量角膜接触镜的光学质量,相比于其他光学测试平台应用面更为广泛。

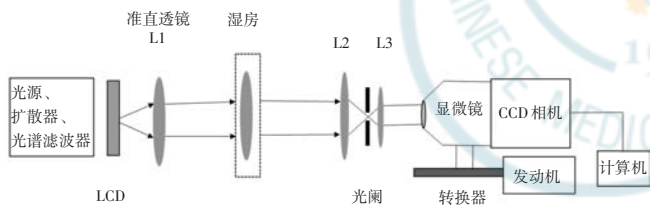


图 4 NIMO 光路示意图

以上是几种较为常用的光学测试平台,从测量的定性指标看,OptiSpheric[®] IOL PRO、PMTF 光学测试平台可测量 USAF 分辨率测试图,便于直接观察各种因素对 IOL 整体空间频率的切向和矢向成像质量的影响。其中,OptiSpheric[®] IOL PRO 测量 MTF 值时精度优于 PMTF 光学测试平台。Badal Optometer 可

测量 Badal 图像,便于观察研究因素对视力的影响。NIMO 无法测量定性指标,是该设备的一个缺陷,但它能够测量轴截面屈光度,除用于研究 IOL 外,还可以用于测量角膜接触镜的光学质量,同时还可以调控瞳孔直径大小,相比于其他光学台更便于探索瞳孔直径对 IOL 和角膜接触镜的光学质量影响。以上各种光学平台各有优点,研究者可根据需要选择合适的光学测试平台(表 1)。新的平台也在不断的研发和探索,如 Calatayud 等^[34]设计了一种精确、稳定的 IOL 体外光学质量测试系统,通过多焦点 IOL 测试其性能和灵敏度,并与 OSLO 光学设计软件的数值模拟结果进行比较,发现该自制光学台对 IOL 评价过程更加灵活、高效和可靠。

2.2 光学设计软件

光学设计软件的测量原理可分为基于几何光学的光线追迹法和基于波动光学的场追迹法。

2.2.1 运用光线追迹技术的光学设计软件

此类光学设计软件利用光线追迹技术通过计算机建立模型眼,以 IOL 具体参数替代模型眼中晶状体的相关数据,模拟不同设置的光线通过模型眼在视网膜的成像过程。可对 IOL 在不同瞳孔直径大小、偏心量、倾斜度和旋转度等状态下进行数值模拟,以评估其光学质量、优化 IOL 的光学设计,以及探索可能的的新设计等^[35-37]。

2.2.1.1 ZEMAX

ZEMAX 光学设计软件(美国 ZEMAX Development Corporation 公司)运用光线追迹技术构建模型眼,可对 IOL 进行上述研究,还可用于探索阿贝数、散光对 IOL 的纵向色差的影响^[7,38]。张斌团队运用该光学设计软件进行了一系列体外光学实验,探索了旋转对不同散光度数的 Toric IOL 成像质量、波前像差的影响,发现旋转会导致 Toric IOL 的成像质量下降,并且散光度数越高影响越明显,而 Toric IOL 的旋转主要造成了柱镜和正球镜度数的增加,高阶像差不受影响^[7]。该团队还研究了旋转和偏心对 Toric IOL 的成像质量和波前像差的影响,发现 Toric IOL 对偏心的耐受性与球面 IOL 非常接近,其在偏心时的成像质量只受偏心量的影响,偏心主要造成了彗差的增加,散光和三叶草像差增加较少,并且与先前的研究一致,Toric IOL 旋转主要引起散光的增加,高阶像差并未发生改变^[39]。这些 IOL 位置的体外研究,解释了 Toric IOL 偏心和旋转后成像质量下降的光学原理,为临床中这些问题的改善

表 1 各光学测试平台对比

	OptiSpheric [®] IOL PRO	Badal Optometer	PMTF	NIMO
优点	MTF 测量精度高。可测定量和定性指标,便于观察研究因素对不同方向图像质量的影响	可测定量和定性指标,便于直接观察研究因素对视力影响	同 OptiSpheric [®] IOL PRO	可测定量指标、轴截面屈光度。可计算机输入控制瞳孔直径。适用范围广,可测量 IOL 和角膜接触镜
缺点	-	-	MTF 测量精度低于 OptiSpheric [®] IOL PRO	无法测量定性指标
适用范围	探索各种因素对 IOL 光学质量的影响	同 OptiSpheric [®] IOL PRO	同 OptiSpheric [®] IOL PRO	同 OptiSpheric [®] IOL PRO,还可评估角膜接触镜的光学性能

带来启示。此外,他们还探索了不同球差设计的 Toric IOL 对旋转、偏心的耐受性及成像规律,发现 $-0.26\ \mu\text{m}$ 球差的 Toric IOL 居中时成像质量良好,但对偏心的耐受性较差。利用 ZEMAX 光学设计软件对其球差进行适量优化,可以在保持对偏心和旋转的耐受性的同时提高 Toric IOL 的成像质量,使其光学性能更佳^[38]。利用该光学设计软件可设计新型 IOL 并检测其光学性能^[40-41]。如周晓红^[41]等利用 ZEMAX 软件设计了一种新的双元件可调节 IOL,并对其成像结果进行数值模拟评估,发现本研究设计的双元件可调节 IOL 仿真结果,可以满足 IOL 植入光学特性和测试标准要求。综上所述,ZEMAX 光学设计软件可以快速、方便地测量 IOL 的光学质量,相比于光学测试平台其可应用范围更广,如可用于设计新型 IOL、优化 IOL 设计等,而与其他光学设计软件相比,其在国内的应用相对较多。

2.2.1.2 OSLO OSLO 光学设计软件(美国 Lambda Research 公司)可用于测量 IOL 的光学质量、探索各种客观因素对 IOL 成像质量的影响^[28,42],还能用于验证设计 IOL 的光学性能。Alareon 等^[43]利用 OSLO 光学设计软件和光学测试平台对基于高阶非球面设计的新型单焦点 IOL 进行光学数值模拟和实验测量,发现新型 IOL 不仅可以提供与传统单焦点 IOL 相当的远距离图像质量,还可带来更好的中距离视力,该实验提供了可供参考的临床前数据。

此外,还有光学设计软件 Code V(美国 Synopsis 公司)和 Lighttools(美国 Synopsis 公司)也是通过光线追迹法构建模型眼对 IOL 进行体外光学研究^[44-45]。

2.2.2 运用场追迹技术的光学设计软件 基于场追迹技术的光学设计软件包括光学波动模拟软件场追迹程序 VirtualLab(德国 Wyrowski Photonics GmbH 公司)等。该软件建模灵活,可以更精确地描述各种光学效应,如可对具有小的衍射结构的 IOL 进行准确建模,同时考虑到光的波动性和干涉性,从而提供更真实的视网膜图像质量^[46-47]。Song 等^[46]运用该光学模拟软件对 IOL 成像质量进行评价,并与传统的光追迹模拟技术进行比较,发现场追迹光学模拟技术是评估 IOL 在偏心 and 倾斜情况下视觉质量的可靠方法。

2.2.3 光线追迹技术和场追迹技术光学设计软件的对比 相比于运用光线追迹技术的光学设计软件,运用场追迹技术的光学设计软件进行模型眼和 IOL 建模时更加灵活、精确,尤其在对复杂光学设计的 IOL 进行建模时优点更为突出。另外,运用光线追迹技术的光学设计软件测量速度更快,且对计算能力要求不高,场追迹技术则对于 CPU 和内存的要求较高,而随着近年来强大运算能力计算机的普及,运用场追迹技术的光学设计软件应用越来越多^[47-50](表 2)。

2.3 光学测试平台和光学设计软件的应用

近年来,光学测试平台的研究和应用备受关注,其中以光学台 OptiSpheric[®] IOL PRO 较为广泛。在光学设计软件方面,虽然 ZEMAX 被广泛使用,但在对设计复杂的 IOL 进行光学质量测量时,VirtualLab 的结果更贴近真实。此外,光学设计软件无需真实的 IOL,仅需其光学数据就可进行相关研究,相比于光学测试平台,其更加方便、经济,并且模拟得到的 MTF 数值一般略高于光学测试平台实际测量所得的 MTF 值,这可能是因为它排除了更多的客观因素干扰^[28]。

表 2 各光学设计软件对比

	ZEMAX	OSAL	VirtualLab
优点	测量快	同 ZEMAX	建模灵活且准确
缺点	对复杂光学设计的 IOL 建模不够准确	同 ZEMAX	对计算机运算能力要求高
适用范围	可进行与光学测试平台相同的体外研究,还可设计、优化 IOL	同 ZEMAX	同 ZEMAX,且可准确模拟评估复杂光学设计 IOL 的光学性能

3 体外光学测试的局限性

虽然体外测试具有众多优点,但也有一定的局限性,不同测试平台运用的光学测量原理不同,可能导致测试同一 IOL 时得出不同的结果。与体内测试相比,体外测试的结果可能存在某些差异,如 Barbero 等^[37]的研究表明,除球差外,大多数情况下体内研究中 IOL 的像差(尤其是三阶像差)高于体外研究。另外,体内外光学介质的不同也可能造成结果的差异。但体内外测试的结论往往具有一致性,如球面 IOL 与非球面 IOL 的体内外研究,以及 IOL 偏心方面的研究等^[10,16,51-52]。另外,模型眼各项参数与人眼存在差异,光学测试平台接收的图像以及光学设计软件模拟的视网膜图像与被检者所感知的图像并不完全相同,例如 Badal Optometer 图像没有考虑到双眼的影响^[19]。

4 小结

IOL 的体外光学研究有助于医生深入了解各种 IOL 的光学性能,明确各种因素对 IOL 光学质量的影响,为解决临床相关问题提供启示,推动精准医疗的实现。与体内实验相比,体外光学质量测试系统具有功能多样、测试结果客观性强等优点。虽然其本身存在一定的局限性,但也为其改进提供了思路。例如,通过改进模型眼的设计,使其更加接近人眼生理状态,包括人工角膜的设计等。此外,设备中的其他参数设置也应更加接近人眼,以缩小体外实验装置的测试环境与体内环境的差异。同时,还可以改进测量技术以保证测量不同设计的 IOL 时结果的准确性、改进光学测试平台的设计使得在测量时考虑双眼的影响等。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

[1] Borkenstein AF, Borkenstein EM, Luedtke H, et al. Optical bench

- analysis of 2 depth of focus intraocular lenses[J]. Biomed Hub, 2021, 6(3): 77-85. DOI: 10. 1159/000519139.
- [2] Tandogan T, Auffarth GU, Son HS, et al. *In-vitro* glistening formation in six different foldable hydrophobic intraocular lenses [J/OL]. BMC Ophthalmol, 2021, 21(1): 126 [2023-06-06]. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/33685428>. DOI: 10. 1186/s12886-021-01879-6.
- [3] McKelvie J, McArdle B, McGhee C. The influence of tilt, decentration, and pupil size on the higher-order aberration profile of aspheric intraocular lenses [J]. Ophthalmology, 2011, 118(9): 1724-1731. DOI: 10. 1016/j. ophtha. 2011. 02. 025.
- [4] Vega F, Alba-Bueno F, Millán MS, et al. Halo and through-focus performance of four diffractive multifocal intraocular lenses [J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2015, 56(6): 3967-3975. DOI: 10. 1167/iops. 15-16600.
- [5] Ferrer-Blasco T, Domínguez-Vicent A, García-Lázaro S, et al. Repeatability of *in-vitro* optical quality measurements of intraocular lenses with a deflectometry technique effect of the toricity [J]. Int J Ophthalmol, 2018, 11(7): 1139-1144. DOI: 10. 18240/ijo. 2018. 07. 11.
- [6] Madrid-Costa D, Ruiz-Alcocer J, Ferrer-Blasco T, et al. *In vitro* optical performance of a new aberration-free intraocular lens [J]. Eye (Lond), 2014, 28(5): 614-620. DOI: 10. 1038/eye. 2014. 25.
- [7] 张斌, 马景学, 刘丹岩, 等. Hwey-Lan Liou 模型眼中 Toric 人工晶状体旋转对成像质量的影响 [J]. 中华实验眼科杂志, 2017, 35(3): 239-242. DOI: 10. 3760/cma. j. issn. 2095-0160. 2017. 03. 011. Zhang B, Ma JX, Liu DY, et al. Optical performance of Toric intraocular lens rotation in Hwey-Lan Liou model eye [J]. Chin J Exp Ophthalmol, 2017, 35(3): 239-242. DOI: 10. 3760/cma. j. issn. 2095-0160. 2017. 03. 011.
- [8] Carson D, Xu Z, Alexander E, et al. Optical bench performance of 3 trifocal intraocular lenses [J]. J Cataract Refract Surg, 2016, 42(9): 1361-1367. DOI: 10. 1016/j. jcrs. 2016. 06. 036.
- [9] Łabuz G, Auffarth GU, Knorz MC, et al. Trifocality achieved through polypseudophakia: optical quality and light loss compared with a single trifocal intraocular lens [J]. J Refract Surg, 2020, 36(9): 570-577. DOI: 10. 3928/1081597X-20200715-01.
- [10] Tandogan T, Auffarth GU, Choi CY, et al. *In vitro* comparative optical bench analysis of a spherical and aspheric optic design of the same IOL model [J/OL]. BMC Ophthalmol, 2017, 17(1): 9 [2023-06-06]. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28178942>. DOI: 10. 1186/s12886-017-0407-5.
- [11] Mayer C, Son HS, Łabuz G, et al. *In vitro* optical quality assessment of a monofocal IOL sutured to an artificial iris [J]. J Cataract Refract Surg, 2020, 46(8): 1184-1188. DOI: 10. 1097/j. jcrs. 0000000000000287.
- [12] Lee Y, Łabuz G, Son HS, et al. Assessment of the image quality of extended depth-of-focus intraocular lens models in polychromatic light [J]. J Cataract Refract Surg, 2020, 46(1): 108-115. DOI: 10. 1097/j. jcrs. 0000000000000037.
- [13] Yildirim TM, Auffarth GU, Łabuz G, et al. Material analysis and optical quality assessment of opacified hydrophilic acrylic intraocular lenses after pars plana vitrectomy [J]. Am J Ophthalmol, 2018, 193: 10-19. DOI: 10. 1016/j. ajo. 2018. 06. 002.
- [14] Son HS, Tandogan T, Liebing S, et al. *In vitro* optical quality measurements of three intraocular lens models having identical platform [J/OL]. BMC Ophthalmol, 2017, 17(1): 108 [2023-06-10]. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28662629>. DOI: 10. 1186/s12886-017-0460-0.
- [15] Son HS, Łabuz G, Khoramnia R, et al. Ray propagation imaging and optical quality evaluation of different intraocular lens models [J/OL]. PLoS One, 2020, 15(2): e0228342 [2023-06-10]. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/32017784>. DOI: 10. 1371/journal. pone. 0228342.
- [16] Kohnen T, Klaproth OK, Bühren J. Effect of intraocular lens asphericity on quality of vision after cataract removal; an intraindividual comparison [J]. Ophthalmology, 2009, 116(9): 1697-1706. DOI: 10. 1016/j. ophtha. 2009. 03. 052.
- [17] Son HS, Łabuz G, Khoramnia R, et al. Laboratory analysis and ray visualization of diffractive optics with enhanced intermediate vision [J/OL]. BMC Ophthalmol, 2021, 21(1): 197 [2023-06-12]. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/33941125>. DOI: 10. 1186/s12886-021-01958-8.
- [18] Liu X, Xie L, Huang Y. Effects of decentration and tilt at different orientations on the optical performance of a rotationally asymmetric multifocal intraocular lens [J]. J Cataract Refract Surg, 2019, 45(4): 507-514. DOI: 10. 1016/j. jcrs. 2018. 10. 045.
- [19] Carson D, Hill WE, Hong X, et al. Optical bench performance of AcrySof® IQ ReSTOR®, AT LISA® tri, and FineVision® intraocular lenses [J]. Clin Ophthalmol, 2014, 8: 2105-2113. DOI: 10. 2147/OPHT. S66760.
- [20] Werner L, Stover JC, Schwiegerling J, et al. Effects of intraocular lens opacification on light scatter, stray light, and overall optical quality/performance [J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2016, 57(7): 3239-3247. DOI: 10. 1167/iops. 16-19514.
- [21] Lee S, Choi M, Xu Z, et al. Optical bench performance of a novel trifocal intraocular lens compared with a multifocal intraocular lens [J]. Clin Ophthalmol, 2016, 10: 1031-1038. DOI: 10. 2147/OPHT. S106646.
- [22] Werner L, Stover JC, Schwiegerling J, et al. Light scattering, straylight, and optical quality in hydrophobic acrylic intraocular lenses with subsurface nanoglistenings [J]. J Cataract Refract Surg, 2016, 42(1): 148-156. DOI: 10. 1016/j. jcrs. 2015. 07. 043.
- [23] Gatinel D, Houbrechts Y. Comparison of bifocal and trifocal diffractive and refractive intraocular lenses using an optical bench [J]. J Cataract Refract Surg, 2013, 39(7): 1093-1099. DOI: 10. 1016/j. jcrs. 2013. 01. 048.
- [24] Loicq J, Willet N, Gatinel D. Topography and longitudinal chromatic aberration characterizations of refractive-diffractive multifocal intraocular lenses [J]. J Cataract Refract Surg, 2019, 45(11): 1650-1659. DOI: 10. 1016/j. jcrs. 2019. 06. 002.
- [25] Can E, Senel EC, Holmström S, et al. Comparison of the optical behaviour of five different multifocal diffractive intraocular lenses in a model eye [J/OL]. Sci Rep, 2023, 13(1): 19646 [2024-02-20]. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/37950090>. DOI: 10. 1038/s41598-023-47102-y.
- [26] Domínguez-Vicent A, Esteve-Taboada JJ, Del Águila-Carrasco AJ, et al. *In vitro* optical quality comparison of 2 trifocal intraocular lenses and 1 progressive multifocal intraocular lens [J]. J Cataract Refract Surg, 2016, 42(1): 138-147. DOI: 10. 1016/j. jcrs. 2015. 06. 040.
- [27] Montés-Micó R, Madrid-Costa D, Ruiz-Alcocer J, et al. *In vitro* optical quality differences between multifocal apodized diffractive intraocular lenses [J]. J Cataract Refract Surg, 2013, 39(6): 928-936. DOI: 10. 1016/j. jcrs. 2012. 12. 038.
- [28] Pérez-Gracia J, Varea A, Ares J, et al. Evaluation of the optical performance for aspheric intraocular lenses in relation with tilt and decenter errors [J/OL]. PLoS One, 2020, 15(5): e0232546 [2023-06-14]. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/32365135>. DOI: 10. 1371/journal. pone. 0232546.
- [29] Ferrer-Blasco T, Domínguez-Vicent A, García-Lázaro S, et al. *In vitro* optical quality of monofocal aspheric toric intraocular lenses; effect of cylindrical power [J]. Int Ophthalmol, 2018, 38(3): 933-941. DOI: 10. 1007/s10792-017-0537-z.
- [30] Pérez-Vives C, Ferrer-Blasco T, Madrid-Costa D, et al. Optical quality of aspheric toric intraocular lenses at different degrees of decentring [J]. Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol, 2014, 252(6): 969-975. DOI: 10. 1007/s00417-014-2629-z.
- [31] Joannes L, Hough T, Hutsebaut X, et al. The reproducibility of a new power mapping instrument based on the phase shifting schlieren method for the measurement of spherical and toric contact lenses [J]. Cont Lens Anterior Eye, 2010, 33(1): 3-8. DOI: 10. 1016/j. clae. 2009. 11. 001.
- [32] Domínguez-Vicent A, Marín-Franch I, Esteve-Taboada JJ, et al. Repeatability of *in vitro* power profile measurements for multifocal contact lenses [J]. Cont Lens Anterior Eye, 2015, 38(3): 168-172.



- DOI:10.1016/j.clae.2015.01.013.
- [33] Pérez-Vives C, Ferrer-Blasco T, García-Lázaro S, et al. Optical quality comparison between spherical and aspheric toric intraocular lenses[J]. Eur J Ophthalmol, 2014, 24(5): 699-706. DOI: 10.5301/ejo.5000440.
- [34] Calatayud A, Remón L, Martos J, et al. Imaging quality of multifocal intraocular lenses: automated assessment setup[J]. Ophthalmic Physiol Opt, 2013, 33(4): 420-426. DOI: 10.1111/opo.12063.
- [35] 杨欣, 张斌, 刘丹岩, 等. 利用 Hwey-Lan Liou 模型眼研究的复曲面人工晶状体焦深的变化[J]. 中华实验眼科杂志, 2015, 33(4): 347-350. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2015.04.012.
- Yang X, Zhang B, Liu DY, et al. Change of the focused depth of biconvex Toric intraocular lens in Hwey-Lan Liou schematic eye[J]. Chin J Exp Ophthalmol, 2015, 33(4): 347-350. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2015.04.012.
- [36] 杨欣, 刘丹岩, 张斌, 等. 基于模型眼复曲面 IOL 纵向色差的评价[J]. 中华眼视光学与视觉科学杂志, 2015, 17(5): 288-291. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1674-845X.2015.05.008.
- Yang X, Liu DY, Zhang B, et al. Optical performance of the toric intraocular lens based on a schematic eye[J]. Chin J Optom Ophthalmol Vis Sci, 2015, 17(5): 288-291. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1674-845X.2015.05.008.
- [37] Barbero S, Marcos S, Jiménez-Alfaro I. Optical aberrations of intraocular lenses measured *in vivo* and *in vitro*[J]. J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis, 2003, 20(10): 1841-1851. DOI: 10.1364/josaa.20.001841.
- [38] 张斌, 刘丹岩, 柴茜楠, 等. 偏心 and 旋转对非球面 Toric 人工晶状体成像质量影响的实验研究[J]. 中华眼视光学与视觉科学杂志, 2018, 20(1): 19-25. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1674-845X.2018.01.004.
- Zhang B, Liu DY, Chai QN, et al. The optical performance parameters for rotation and decentration of the aspherical biconvex toric intraocular lens[J]. Chin J Optom Ophthalmol Vis Sci, 2018, 20(1): 19-25. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1674-845X.2018.01.004.
- [39] 柴茜楠, 张斌, 耿玉欣, 等. Hwey-Lan Liou 模型眼复曲面人工晶状体偏心及旋转对成像质量的影响[J]. 中华实验眼科杂志, 2017, 35(11): 1003-1008. DOI: 10.3710/cma.j.issn.2095-0160.2017.11.010.
- Chai QN, Zhang B, Geng YX, et al. Optical performance of rotation and decentration of Toric intraocular lens implant in Hwey-Lan Liou model eye[J]. Chin J Exp Ophthalmol, 2017, 35(11): 1003-1008. DOI: 10.3710/cma.j.issn.2095-0160.2017.11.010.
- [40] 李季, 薛常喜. 面向中距衍射多焦点人工晶状体设计[J]. 光子学报, 2018, 47(9): 122-127. DOI: 10.3788/gzxb20184709.0922001.
- Li J, Xue CX. Design for mid-range diffraction multifocal intraocular lens[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(9): 122-127. DOI: 10.3788/gzxb20184709.0922001.
- [41] 周晓红, 王良玉, 杨朋千. 双元件可调节人工晶状体设计[J]. 中华眼视光学与视觉科学杂志, 2022, 24(6): 464-471. DOI: 10.3760/cma.j.cn115909-20211112-00445.
- Zhou XH, Wang LY, Yang PQ. Design of dual element accommodative intraocular lens[J]. Chin J Optom Ophthalmol Vis Sci, 2022, 24(6): 464-471. DOI: 10.3760/cma.j.cn115909-20211112-00445.
- [42] Eppig T, Scholz K, Löffler A, et al. Effect of decentration and tilt on the image quality of aspheric intraocular lens designs in a model eye[J]. J Cataract Refract Surg, 2009, 35(6): 1091-1100. DOI: 10.1016/j.jcrs.2009.01.034.
- [43] Alarcon A, Cánovas C, Koopman B, et al. Enhancing the intermediate vision of monofocal intraocular lenses using a higher order aspheric optic[J]. J Refract Surg, 2020, 36(8): 520-527. DOI: 10.3928/1081597X-20200612-01.
- [44] Ho A, Manns F, Therese, et al. Predicting the performance of accommodating intraocular lenses using ray tracing[J]. J Cataract Refract Surg, 2006, 32(1): 129-136. DOI: 10.1016/j.jcrs.2005.07.047.
- [45] Takahashi Y, Kawamorita T, Mita N, et al. Optical simulation for subsurface nanoglistening[J]. J Cataract Refract Surg, 2015, 41(1): 193-198. DOI: 10.1016/j.jcrs.2014.10.021.
- [46] Song SH, Song IS, Oh SJ, et al. Optical bench simulation for intraocular lenses using field-tracing technology[J/OL]. PLoS One, 2021, 16(12): e0250543[2023-06-16]. http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/34910725. DOI: 10.1371/journal.pone.0250543.
- [47] Asoubar D, Zhang S, Wyrowski F, et al. Paraxial field decomposition and its application to non-paraxial propagation[J/OL]. Opt Express, 2012, 20(21): 23502-23517[2023-06-16]. http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23188313. DOI: 10.1364/OE.20.023502.
- [48] Dragostinoff N, Brezna W, Lux K, et al. Increased quality of vision by innovative intraocular lens and human eye modeling[J]. Biomed Signal Process Control, 2014, 12: 62-68. DOI: 10.1016/j.bspc.2013.09.004.
- [49] Ling J, Zhang D, Huang Y, et al. Fabrication of holographic blazed grating with Fourier synthesis exposure[J]. J Mod Opt, 2014, 61(2): 132-137. DOI: 10.1080/09500340.2013.871362.
- [50] Stefan R, Johannes B, Ralf H. Characterization of laser beam shaping optics based on their ablation geometry of thin films[J]. Micromachines, 2014, 5(4): 943-953. DOI: 10.3390/mi5040943.
- [51] Baumeister M, Bühren J, Kohnen T. Tilt and decentration of spherical and aspheric intraocular lenses: effect on higher-order aberrations[J]. J Cataract Refract Surg, 2009, 35(6): 1006-1012. DOI: 10.1016/j.jcrs.2009.01.023.
- [52] Tandogan T, Son HS, Choi CY, et al. Laboratory evaluation of the influence of decentration and pupil size on the optical performance of a monofocal, bifocal, and trifocal intraocular lens[J]. J Refract Surg, 2017, 33(12): 808-812. DOI: 10.3928/1081597X-20171004-02.

(收稿日期:2023-08-17 修回日期:2024-02-21)

(本文编辑:张宇 骆世平)

读者·作者·编者

本刊征稿启事

《中华实验眼科杂志》是由中国科学技术协会主管、中华医学会主办、河南省立眼科医院承办的眼科专业学术期刊,月刊,每月10日出版。本刊的报道范围主要为眼科基础和临床研究领域领先的科研成果,主要栏目设有专家述评、实验研究、临床研究、调查研究、综述、病例报告等,学术内容涉及眼科疾病的基因学研究、基因诊断和基因靶向治疗、眼科遗传学研究、分子生物学研究、眼科微生物学研究、眼科药物学研究、眼科生物材料研究、眼科表观遗传研究、眼科疾病的动物模型、眼科疾病的流行病学研究、眼科疾病的多中心或单中心随机对照临床试验、循证医学临床实践及眼科疾病的临床研究等。本刊拟刊出海外学者的中文或英文原创性论文或评述类文章,欢迎国内外眼科研究人员踊跃投稿。

(本刊编辑部)