

文章编号: 0253-2239(2006)02-0230-5

潜在视功能检测仪研究及其光学系统设计

方志良¹ 杨胜杰¹ 刘福来¹ 杨 勇¹ 汤 欣² 李跃杰³

1 南开大学现代光学研究所, 天津 300071
2 天津医科大学眼科中心, 天津 300071
3 中国医学科学院生物医学工程研究所, 天津 300071

摘要: 研究一种针对白内障患者的潜在视功能检测仪。采用透射式视力分辨率板并且使进入眼瞳成像光束足够细和有足够的光能量, 以致能够通过白内障患者云雾状晶状体中的微小间隙在视网膜上成像, 移动透射式视力分辨率板调焦可测出患者的视度在 $-7D \sim +12D$ 之间的潜在视力。进行了光学系统结构设计和理论计算, 进行了实验和测试。实验测试结果表明, 该系统出瞳位置光斑直径 $\bar{D}=0.094$ mm, 测得视力与传统测试方法测得视力相一致。通过该仪器对白内障患者手术前检测, 可比较准确预测置换人工晶体手术后达到的视力水平, 这对医生和患者都具有重要参考价值。

关键词: 医用光学; 视功能检测仪; 白内障; 潜在视力; 屈光度

中图分类号: TH773; R770.42 文献标识码: A

Optical System of Potential Vision Meter

Fang Zhiliang¹ Yang Shengjie¹ Liu Fulai¹ Yang Yong¹

Tang Xin² Li Yuejie³

1 *Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071*
2 *Tianjin Medical University, Eye Center, Tianjin 300071*
3 *Institute of Biomedical Engineering, The Chinese Academy of Medical Sciences, Tianjin 300071*

Abstract: An instrument to measure the retinal potential visual acuity (PVA) of the patients, suffering from cataract, is studied. This instrument uses a transparent eye chart. With special optical system, the beam from the exit pupil of the instrument is thin enough to pass through the aperture of the opacity lens of eyes with cataract and forms image on the retina. The move of the eye chart makes it possible to measure the PVA of the patients with diopter $-7 \sim +12$ m⁻¹. The design of the configuration of the instrument and some theoretical calculation are finished, along with experiments and tests. The experiment shows that the diameter of the spot at the exit pupil is 0.094 mm, and the vision measured with potential vision meter (PVM) accords with that measured with traditional method. The PVA of the patients can be accurately measured with the instrument before the operation, which is important to both the doctors and the patients.

Key words: medical optics; diopmeter; cataract; potential visual acuity; diopter

1 引 言

白内障^[1]是严重影响视力的一种常见眼病。据了解每年有数百万白内障眼病患者进行置换人工晶体手术。对于医生和患者都非常关心一个最重要的问题是, 置换人工晶体手术后的视力能达到什么水平, 即排除白内障(晶状体)的影响, 而检测其它因素(包括角膜、视网膜)的潜在视觉能力。通常正常眼

的视力检测系统和方法^[2,3]是, 测试时视力表采用漫反射白底黑标的视力表, 照度应为 200~300 lx, 测试距离为 5 m, 视角为 1' 的字标对应于 5.0 (对数视力表) 的视力。视力表成像光束能够充满被测者的整个眼瞳并在视网膜成像。而对于白内障患者, 眼睛晶体大部分是浑浊体, 不透光, 只有其中的裂隙或小孔能够透光, 有的患者透光裂隙或小孔小于

作者简介: 方志良(1946~), 男, 南开大学教授, 主要从事光学信息处理、应用光学方面的研究。

E-mail: zlfang@nankai.edu.cn

收稿日期: 2005-02-25; 收到修改稿日期: 2005-08-01

0.1 mm。只有这些裂隙或小孔能够有光线通过并在视网膜上成像,不足以引起视觉细胞响应,从而影像模糊。而通常人眼的瞳孔直径为 2~8 mm,测试时整个眼瞳都充满光,参与在视网膜成像的光能是白内障患者的(400~1600)倍,因此常规的视力检测系统无法测出白内障患者的真实的潜在视力。影响视力可能有多种因素,如果不能预测除白内障晶体之外的其它毛病影响视功能,例如视网膜病变,虽然进行了置换人工晶体手术,仍然达不到改善视力效果,甚至会导致患者和医生之间产生纠纷。为了使医生和患者在手术治疗前能比较准确预知手术后患者视力(潜在视力),需要一种针对白内障患者术前的特殊视力(潜在视力)检测系统和检测方法。

我们针对白内障类的眼疾病研究设计和研制了潜在视力测试仪的光学系统,该系统采用透射式视力分辨率板,使进入眼瞳成像光束足够细且有足够的光能量,以致能够通过云雾状晶状体中的微小间隙在视网膜上成像,并通过移动透射式视力分辨率板调焦可测出患者的视度在 $-7D\sim+12D$ 之间的

潜在视力,从而使得白内障患者的视力测量成为可能。通过该仪器检测,预测手术后达到的视力水平,也可以确定是单纯的晶体疾病还是有其他眼症,帮助医生正确诊断。

2 潜在视力检测仪光学系统设计及其工作原理

系统设计主要实现两项功能:一是为透过白内障病变晶体的孔隙,射入眼瞳的成像光束孔径要求很小(约 0.1 mm)并有足够光能;二是通过调焦使视力分辨率板在视网膜成像以测出眼睛的潜在视力。

2.1 潜在视力测试仪的光学系统设计

潜在视力测试仪的光学系统结构如图 1 所示。主要由光源 S,聚光透镜 L_1 ,滤波小孔 p,准直透镜 L_2 ,透射式视力板 V,成像透镜 L_3 组成。

具体结构参量为: $f'_1 = 30\text{ mm}$, $f'_2 = 370\text{ mm}$, $f'_3 = 95\text{ mm}$; $l_2 = -165\text{ mm}$, $d_{23} = 215\text{ mm}$; $D_p = 0.2\text{ mm}$ 。

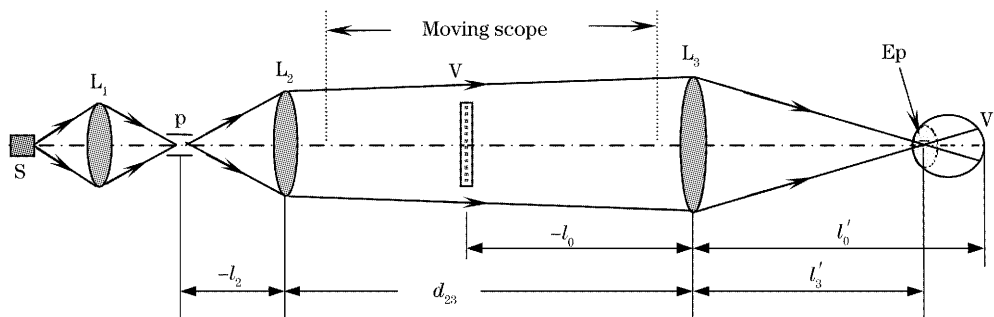


图 1 潜视力测试仪光学原理图

Fig. 1 Optical configuration of a potential vision meter

2.2 潜在视力测试仪工作原理

2.2.1 滤波孔径系统成像

光源经过聚光镜会聚,再经过滤波孔滤波后相当于一个点光源,该点光源通过准直透镜 L_2 及成像透镜 L_3 成像后,在图 1 中 Ep 处会聚一很小的成像光束(约 0.1 mm 光点),使得成像光能够通过眼睛的云雾状白内障晶体透光孔隙在视网膜成像,而该位置也即系统的出瞳位置。在测量病人潜在视力时,让病人眼瞳与该 Ep 点重合,就能够在手术前对病人视力进行检测。

由滤波孔(物点)到会聚于眼瞳细光束(像点)的成像关系式的推导:

光学系统的结构参量如图 1 所示:透镜 $L_1, L_2,$

L_3 的焦距分别是 f'_1, f'_2, f'_3 ; 滤波孔的直径为 D_p , d_{23} 是准直透镜 L_2 与成像透镜 L_3 之间的距离; l_0 是视力板对 L_3 成像的物距, V' 是视力板 V 经过 L_3 所成的像, l'_0 是视力板经成像透镜 L_3 成像的像距。另外,为了便于表示,推导过程中用 l'_2 表示滤波孔 p 经 L_2 成像后的像距, l_3 是以滤波孔 p 经 L_2 所成的像作为物时对透镜 L_3 成像的物距, l'_3 是滤波孔经过透镜 L_2 和 L_3 成像后的像距。

由高斯成像公式及过渡关系式:

$$1/l'_2 - 1/l_2 = 1/f'_2, \quad (1)$$

$$l_3 = l'_2 - d_{23}, \quad (2)$$

$$1/l'_3 - 1/l_3 = 1/f'_3, \quad (3)$$

可以推出:

$$l'_3 = \frac{(l_2 - d_{23})f'_2 f'_3 - d_{23} l_2 f'_3}{(l_2 - d_{23})f'_2 - d_{23} l_2 + (l_2 + f'_2)f'_3}, \quad (4)$$

$$\beta_p = \frac{l'_3}{l_3} \frac{l'_2}{l_2} = \frac{f'_2 f'_3}{(l_2 - d_{23})f'_2 - d_{23} l_2 + (l_2 + f'_2)f'_3}, \quad (5)$$

$$D'_p = \beta_p \cdot D_p, \quad (6)$$

其中 β_p 是滤波孔经系统后的垂轴放大率, D'_p 是系统出瞳的直径, l'_3 也表示出瞳距, 由 D'_p 和 l'_3 即可确定滤波孔通过 L_2 和 L_3 成的像的大小及位置, 把眼睛与该位置重合, 成像细光束即可通过白内障孔隙在视网膜成像。

2.2.2 视力分辨率板经过成像透镜 L_3 成像检测眼视力

由 L_2 准直的光束照射透射式视力分辨率板经过成像透镜 L_3 成像于眼前, 为了保证视力板能够成像于视网膜上, 不同视度的眼睛可以通过调节视力板到成像透镜 L_3 的距离来实现调焦。调节视力板到 L_3 的距离, 使得视力板成像于眼睛的远点(人眼放松时能成像于视网膜上的最远的点^[4]), 这样通过调节视力板位置就实现了调焦(即使被测患者能看清视力板), 同时, 由视力板的位置和眼睛视度关系换算可测得该眼睛的视度。

视力板成像关系式的推导:

$$1/l'_0 - 1/l_0 = 1/f'_3, \quad (7)$$

$$l'_0 = l_0 f'_3 / (l_0 + f'_3). \quad (8)$$

根据设计目的, 当系统确定后, 出瞳的位置即是待测视力眼睛的瞳孔所应放置的位置。在滤波孔通过系统成像的点 E_p 处。故眼睛所观察的物为视力板通过 L_3 成的像 V' , 设该像 V' 相对于眼睛的物距为 l_e , 则有 $l_e = l'_0 - l'_3$ 。此时 l'_3 为透镜 L_3 与眼睛 L_4 (这里把眼睛等效为一个透镜 L_4) 的间距。为了能很好地检测视网膜的视力, 必须使视力板经过 L_3 和眼睛后像面刚好在视网膜上。但是, 实际中, 病人眼睛的视度可能不同, 为了使仪器精确测量不同视度的眼睛视网膜潜视力, 需要通过调整视力板的位置以使视力板能够刚好成像在视网膜上。也就是说, 对于视度不同的眼睛, 为了能够视力板在视网膜上清晰成像, 其物距 l_0 是不同的, 眼睛视度和能够清晰看到视力板时视力板的位置是一一对应的。

考虑这一点, 我们设计了可移动的视力板, 并利用视力板位置对和与之相应的视度进行了标定。因此, 在用该系统对潜视力进行测量时, 也能根据待测患者清晰看到视力板时视力板的位置来判断其眼睛

视度。

视力板位置和眼睛视度关系的推导:

设眼睛的视度为 D , 则当眼睛处于放松状态时, 其远点刚好成像于视网膜上。故当视力板成像清晰时, 有

$$l_e = l'_0 - l'_3 = 1/D, \quad l'_0 = l'_3 + 1/D, \quad (9)$$

由(7)式可得

$$l_0 = \frac{l'_0 f'_3}{f'_3 - l'_0} = \frac{(l'_3 + 1/D) f'_3}{f'_3 - l'_3 - 1/D}, \quad (10)$$

(10)式给出了对于不同眼睛视度时, 对应的视力板的位置, 即通过调节视力板的位置(调焦), 使被测者看清视力板(调焦), 由分辨视力板的位置来确定眼睛的视度。可以看出, 视力板位置的调节, 等效于通常配眼镜时进行视力检测时的选择不同屈光度的“插片”。

由(10)式可得到视力板在允许变化范围内, 视力板位置和对应的眼睛视度的数值关系, 如图2所示。从(10)式和图2很容易看出, 视力板的位置的与眼睛视度的变化不是一个线性关系, 而系统能精确测量其潜视力的眼睛视度范围是由系统参量决定。

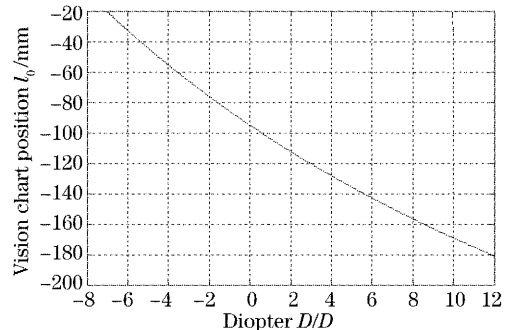


图2 视力板物距与视度关系

Fig. 2 Relationship of dioptric and vision chart position

3 视力板的设计和制备

透射视力板的设计是以对数视力表^[2,3]为基础的。就是以 $1'$ 视角标定为 1.0, 然后按照对数视力表字标的公比值进行缩放, 字标每放大(或缩小) $\sqrt[10]{10} \approx 1.2589$ 倍, 对应视力记录就减小(或增大) 0.1。在设计视力板时, 只要确定了 $1'$ 视角所对应的笔画宽度, 整个视力表的字母尺寸就可以确定了。

相对常规视力表而言, 本系统中所用的视力板, 在设计时需要考虑位置和系统对视力板的放大率的影响。由于是靠移动视力板来实现调焦的, 不同的视力板位置会使得视力板经过放大镜 L_3 的成像位置不同, 并且有不同的放大率, 从而视力板上同样大小的字母, 对人眼的张角也是不同的。

在所设计的系统中,只能使用一个视力板,因此选择正常视度的眼睛做标准。即在确定该视力板的 $1'$ 视角对应的视力板上字母笔画宽度时,调整视力板使之位于成像透镜 L_3 的前焦面上。此时,视力板经 L_3 成的像位于无穷远处,恰恰对应于正常人眼的远点在无穷远,也即视力板在正常人眼放松时能在视网膜上清晰成像。

当视力板在放大镜焦点上时,由于此时成像在无穷远处,故不能由通常的公式来计算视力板上 $1'$ 视角对应的笔画宽度,此时的计算公式为

$$w = f'_3 \cdot \tan \theta, \quad (13)$$

式中的 w 为 $1'$ 视角对应的笔画宽度, θ 为宽为 w 的笔画经 L_3 后对眼睛的张角。

根据(13)式求出的 $1'$ 视角对应的笔画宽度,设计了适合于本系统的视力板。按设计图纸通过缩微技术和光刻技术在光学玻璃上制造,整个透射视力分辨率板直径为15 mm,如图3所示。在该视力板上,左边三行分别对应眼睛视力0.1,0.2和0.3;右边九行分别对应眼睛视力0.4~1.2。通过调焦后对被测者对视力板上各行字母的分辨,就能够在治疗前测出患者的潜在视力。

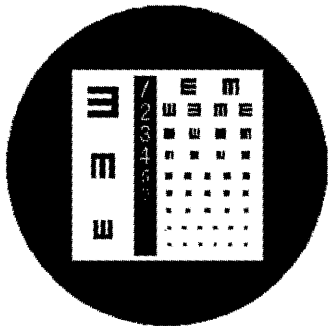


图3 视力板

Fig.3 Vision chart

4 实验及测试结果

利用所设计的潜在视力测试仪结构参量和系统参量,计算出了理论上系统的出瞳位置、出瞳直径和系统对滤波小孔的放大率。具体参量为 $f'_1 = 30 \text{ mm}$, $f'_2 = 370 \text{ mm}$, $f'_3 = 95 \text{ mm}$; $l_2 = -165 \text{ mm}$, $d_{23} = 215 \text{ mm}$; $D_p = 0.2 \text{ mm}$ 。由(4)式可得 $l'_3 = 117 \text{ mm}$; l'_3 由(5)式可得 $\beta_p = -0.41$,由(6)式可得 $D'_p = |\beta_p| D_p = 0.082 \text{ mm}$;显然,理论上该出瞳是满足设计要求的。

为了检测所设计的潜在视力测试仪是否符合设计要求,利用一个面阵 CCD 来测量系统的出瞳位置

的光斑直径^[5]。实验测到光斑如图4所示,直径 $\bar{D} = 0.094 \text{ mm}$,也满足不大于 0.1 mm 的设计要求,能够使用该仪器对白内障患者潜在视力进行测量。另外,还利用所研制潜在视力测试仪(PVM)进行了视力测试,并与标准的测试方法进行对比。测试对比结果如表1所示。从表1中可以看出,所研制的潜在视功能测试仪能够准确测出眼睛的视力。

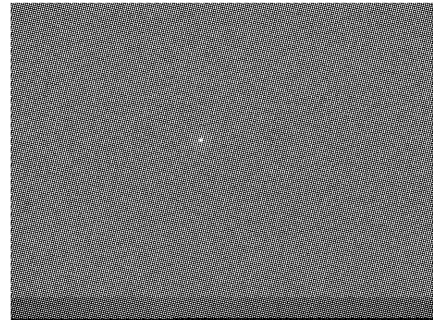


图4 成像光束在出瞳位置会聚光斑

Fig.4 Converging spot of imaging beam at exit pupil

表1 潜在视力测试仪与常规方法对10只抽样眼视力测试结果

Table 1 Vision of 10 sample eyes measured with PVM vs with traditional method

Sample eyes	Standard method	PVM	Sample eyes	Standard method	PVM
1	0.3	0.3	6	0.7	0.7
2	0.4	0.4	7	0.7	0.7
3	0.6	0.6	8	0.9	0.9
4	0.6	0.6	9	1.0	1.0
5	0.7	0.7	10	1.1	1.1

通过对潜视力测试仪光学系统实验可知,该系统能够产生小于 0.1 mm 成像光束通过白内障病变晶体在视网膜上成像。由透射式视力板移动(调焦)测得眼睛视力也与采用常规测试的结果基本一致,理论设计与实验相符。此外,实验系统的光源强度也可以在一定范围内进行调节,使得感光能力不同的患者都能在合适的强度下进行测试。所设计的潜在视力测试仪能够实现预定的治疗前测试患者潜在视力的功能。

5 结 论

本文设计的潜在视力测试仪光学系统,通过实验验证能够满足对白内障病人视网膜潜在视力的测量。通过本系统可得到系统出瞳光点直径小于 0.1 mm 。能够通过视力板的移动来测量眼睛的视度在 $-7D \sim +12D$ 之间的病人眼睛视网膜的潜在视力。该系统

不仅能够从病人对视力板上字母的分辨来测出其潜在视力,还能通过患者眼睛放松状态下看清视力板的位置来测出病人眼睛的视度(即近视远视)情况。能够很好地指导医生作出正确的诊断。值得指出的是,该仪器并不是仅仅局限在对白内障病人潜视力的测量,也适用于其它由于眼睛某些部分病变造成的部分通光受阻引起的无法用正常方法测试的视网膜潜在视力的检测。

参 考 文 献

- 1 Sun Yat-Sen College of Medical Science. *Ophthalmology*. Beijing: People's Medical Publishing House, 1980. 90~103 (in Chinese)
中山医学院 主编. 眼科学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 1980. 90~103
- 2 National Standard of Eye Chart. *Standard Logarithmic Eye Chart* [S]. GB 11533-1989 (in Chinese)
视力表. 国家标准-标准对数视力表[S]. GB 11533-1989
- 3 Sun Guiyu. *Utility of Eye Dioptrics* [M]. Jinan: Shandong Science & Technology Press, 1988. 82~90 (in Chinese)
孙桂毓. 实用眼屈光学[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1988. 82~90
- 4 Yu Daoyin, Tan Hengying. *Engineering Optics* [M]. Beijing: China Machine Industry Press, 1999. 114~118 (in Chinese)
郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999. 114~118
- 5 Kenneth R. Castleman. *Digital Image Processing* [M]. transl. Zhu Zhigang *et al.*, Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 409~429 (in Chinese)
Kenneth R. Castleman. 数字图像处理[M]. 朱志刚等译, 北京: 电子工业出版社, 2002. 409~429

《大气与环境光学学报》征稿启事

经国家新闻出版总署批准,《光电子技术与信息》自 2006 年 7 月起改名为《大气与环境光学学报》。《大气与环境光学学报》主要报道国内外大气光学和环境光学领域基础研究和应用基础研究方面的最新进展与成果,重点栏目为进展与综述、大气光学、海洋光学、空间光学、环境光学与环境光谱学、环境监测技术、遥感等。欢迎广大科技工作者投稿、订阅。投稿可通过电子邮件(gk@aiofm. ac. cn)或网上投稿系统(<http://202.127.207.62:83>)。

联系地址:安徽省合肥市 1125 信箱《大气与环境光学学报》编辑部
 邮政编码:230031
 电 话:0551-5591563
 传 真:0551-5591572