

## JSB-I型激光散斑电脑验光仪

史家启 龙长应 丁华成 王宝成 姚焜  
(安徽大学) (中国科技大学)

### JSB-I laser speckle computer refractometer

*Shi Jiaqi, Long Changying, Ding Huacheng*  
(Anhui University, Hefei)

*Wang Baocheng, Yao Kun*  
(University of Science and Technology of China, Hefei)

**提要:** 介绍利用动态激光散斑矫正屈光不正眼的基本原理、仪器光路设计及其功能, 以及临床应用的结果。

**关键词:** 散斑, 验光仪

### 引言

早在六十年代 Knoll 首先提出利用激光散斑可测定屈光不正眼<sup>[1]</sup>, 史家启利用傅里叶光学方法对其验光机理作了理论解释<sup>[2]</sup>, 随后, 陈国鉴做了类似工作报道<sup>[3]</sup>。这些工作基本上是类似于插片验光法装置, 且占空间过大(5m), 不能形成紧凑的仪器; 另外, 颗粒状散斑在判别上不如条纹状精确<sup>[4]</sup>。本文介绍的光、机、电、算四者结合的现代化验光仪<sup>[5]</sup>, 它不仅解决了上面存在的问题, 且与 ohzu 的相比, 在设计上有创新, 并初步开发出一些潜在的功能。

### 动态激光散斑验光原理

当漫射体以速度  $v$  在其自身平面内运

动, 这时观察面上的散斑图样不仅发生移动且散斑结构也要变化。这种动态散斑的统计性质, 常以场的空-时相关函数或光强度空-时相关函数表示。

下面我们特别关注并将加以论证的是, 观察面上除了一个特殊位置可看到静止的散斑外, 其它位置散斑都运动。这个特殊位置就是照明的点光源成像的位置。利用这一现象, 根据当人眼向点光源聚焦时其像是否严格地位于视网膜上, 便可达到矫正视力的目的。

为了使问题论述使用数学简化, 对物面、透镜面、观察面分别以矢量坐标  $r = (x_0, y_0)$ ,  $\xi = (x, y)$ ,  $q = (x_i, y_i)$  表示, 毛玻璃  $G$  以速度  $v = (v_x, 0, 0)$  表示(见图1)。为了使下面的数学运算简单, 假设图1的光路系统为空间不变线性成像系统。采用惠更斯-菲涅耳

收稿日期: 1987年10月15日。

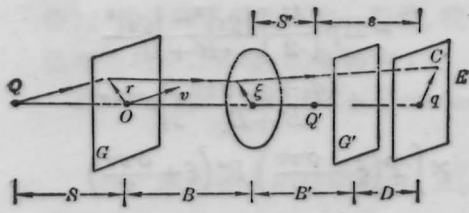


图 1

近似, 观察区处于菲涅耳衍射区。因此, 位于光轴上的单色点光源  $Q$  (光频率为  $\nu$ ), 照明以速度  $v = (v_x, 0, 0)$  运动的相位漫射体  $G$  (毛玻璃), 在其上产生的光扰动为:

$$E_0(r, t) \approx \frac{1}{\lambda i S} \exp\left(ikS + \frac{ik}{2S} |r|^2\right) e^{-i2\pi\nu t} \quad (1)$$

透过相位漫射体  $G$  的光扰动是:

$$E'(r, t) = E_0(r, t) \exp[i\phi(r - vt)] \quad (2)$$

透过光学系统在观察面  $E$  上  $C$  点的光扰动 ( $G'$  是  $G$  的像):

$$E(q, t) = \int E'_0(r, t) k(q, r) dr$$

式中  $k(q, r)$  是光学系统的点脉冲响应函数。

因此, 观察面上空-时互相关函数:

$$\begin{aligned} \langle E(q_1, t_1) E^*(q_2, t_2) \rangle &= \iint E_0(r_1, t_1) E_0^*(r_2, t_2) \\ &\quad \times \exp\{i[\phi(r_1 - vt_1) - \phi(r_2 - vt_2)]\} \\ &\quad \times k(q_1, r_1) k^*(q_2, r_2) dr_1 dr_2 \quad (3) \end{aligned}$$

式中已假设了, 毛玻璃  $G$  与照明光波长相比是极其粗糙的相位屏, 其相关区尺寸远小于透镜在物面上的分辨尺寸。并设相位相关函数近似地以下列形式表示<sup>[6,7]</sup>:

$$\langle \exp\{i[\phi(r_1 - vt_1) - \phi(r_2 - vt_2)]\} \rangle = \begin{cases} 1, & |(r_1 - vt_1) - (r_2 - vt_2)| \leq \rho \\ 0, & |(r_1 - vt_1) - (r_2 - vt_2)| > \rho \end{cases}$$

设相关半径  $\rho$  极其小, 以  $\delta$  函数表示, 则(3)式变成:

$$\begin{aligned} \langle E(q_1, t_1) E^*(q_2, t_2) \rangle &= \int E_0(r_1, t_1) E_0^*(r_1 + \tau v, t_1 + \tau) \\ &\quad \times k(q_1, r_1) k^*(q_2, r_1 + \tau v) dr_1 \end{aligned}$$

上式已运用  $\delta$  筛选性质, 且令  $t_2 - t_1 = \tau$ , 作变量变换, 令  $r_1 + \frac{\tau v}{2} = r$ , 则  $r_1 = r - \frac{\tau v}{2}$ , 则上式成对称形式:

$$\begin{aligned} \langle E(q_1, t) E^*(q_2, t + \tau) \rangle &= \int E_0\left(r - \frac{\tau}{2} v, t\right) E_0^*\left(r + \frac{\tau}{2} v, t + \tau\right) \\ &\quad \times k\left(q_1, r - \frac{\tau}{2} v\right) k^*\left(q_2, r + \frac{\tau}{2} v\right) dr \quad (4) \end{aligned}$$

另外, 因

$$\begin{aligned} k\left(q_1, r - \frac{\tau}{2} v\right) &= \frac{-1}{\lambda^2 B(B' + D)} \int P(\xi_1) \exp\left(\frac{-ik}{2F} |\xi_1|^2\right) \\ &\quad \times \exp\left[ik\left(B + B' + D + \frac{|\xi_1 - (r - \frac{\tau v}{2})|^2}{2B}\right.\right. \\ &\quad \left.\left. + \frac{|q_1 - \xi_1|^2}{2(B' + D)}\right)\right] d\xi_1 \end{aligned}$$

所以,

$$\begin{aligned} k\left(q_1, r - \frac{\tau}{2} v\right) k^*\left(q_2, r + \frac{\tau}{2} v\right) &= \exp\left[ik\left(\frac{-r\tau v}{B} + \frac{|q_1|^2 - |q_2|^2}{2(B' + D)}\right)\right] \\ &\quad \times \iint P(\xi_1) P^*(\xi_2) \exp\left[\frac{ik}{2}\left(\frac{1}{B} + \frac{1}{B' + D}\right.\right. \\ &\quad \left.\left. - \frac{1}{F}\right)(|\xi_1|^2 - |\xi_2|^2)\right] \\ &\quad \times \exp\left[ik\left(\frac{q_2 \xi_2 - q_1 \xi_1}{B' + D}\right.\right. \\ &\quad \left.\left. + \frac{\xi_2\left(r + \frac{\tau}{2} v\right) - \xi_1\left(r - \frac{\tau}{2} v\right)}{B}\right)\right] d\xi_1 d\xi_2 \quad (5) \end{aligned}$$

式中已略去常量因子。  $P(\xi)$  是焦距为  $F$  透镜的光瞳函数。由(1)式知(4)中的:

$$\begin{aligned} E_0\left(r - \frac{\tau}{2} v, t\right) E_0^*\left(r + \frac{\tau}{2} v, t + \tau\right) &= \frac{-1}{\lambda^2 S^2} \exp\left(\frac{-ik}{S} r\tau v\right) e^{2\pi i\nu\tau} \quad (6) \end{aligned}$$

(5)、(6)代入(4), 经整理, 并略去常量因子:

$$\begin{aligned} \langle E(q_1, t) E^*(q_2, t + \tau) \rangle &= \exp\left[ik \frac{|q_1|^2 - |q_2|^2}{2(B' + D)}\right] e^{2\pi i\nu\tau} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \times \exp \left\{ -\frac{i k r}{B} \left[ (\xi_1 - \xi_2) \right. \right. \\
& \quad \left. \left. + \left( 1 + \frac{B}{S} \right) \tau v \right] \right\} d r \\
& \times \iint P(\xi_1) P^*(\xi_2) \exp \left[ \frac{i k}{2} \left( \frac{1}{B} + \frac{1}{B'+D} \right. \right. \\
& \quad \left. \left. - \frac{1}{F} \right) (|\xi_1|^2 - |\xi_2|^2) \right] \\
& \quad \times \exp \left[ i k \left( \frac{q_2 \xi_2 - q_1 \xi_1}{B'+D} \right. \right. \\
& \quad \left. \left. + \frac{(\xi_1 + \xi_2) \tau v}{2B} \right) \right] d \xi_1 d \xi_2 \\
& \quad - \exp \left\{ \frac{i k}{2} \left[ \frac{|q_1|^2 - |q_2|^2}{B'+D} \right. \right. \\
& \quad \left. \left. + \frac{(q_1 + q_2) \sigma \tau v}{B'+D} \right] \right\} e^{2 \pi i v \tau} \\
& \quad \times \int P \left( \xi - \frac{\sigma \tau v}{2} \right) P^* \left( \xi + \frac{\sigma \tau v}{2} \right) \\
& \quad \times \exp \left\{ \frac{-i k}{B'+D} \left[ (q_1 - q_2) \right. \right. \\
& \quad \left. \left. - \left( \frac{B'+D}{B} + \frac{D \sigma}{B'} \right) \tau v \right] \cdot \xi \right\} d \xi \\
& \quad \times \left[ \int |P(\xi)|^2 d \xi \right]^{-1} \quad (7)
\end{aligned}$$

假设照明漫射体  $G$  的光斑尺寸较大, 且均匀, 则上式中一重积分值看成  $\delta$  函数。这意味着入射到透镜光瞳上散斑颗粒尺寸为无限小, 且以  $\left( 1 + \frac{B}{S} \right) v$  的速度移动。这一假设使得数学运算简化, 但对我们最关心的动态散斑在观察面上运动速度不产生影响。利用  $\delta$  函数筛选性质对二重积分运算后, 再经简单的变数变换, 并令  $\xi = \xi_1 + \frac{\sigma \tau v}{2}$ , 式中  $\sigma = 1 + \frac{B}{S}$ , 最后得对称形式:

$$\begin{aligned}
& \langle E(q_1, t) E^*(q_2, t + \tau) \rangle \\
& = \exp \left\{ \frac{i k}{2} \left[ \frac{|q_1|^2 - |q_2|^2}{B'+D} \right. \right. \\
& \quad \left. \left. + \frac{(q_1 + q_2) \sigma v \tau}{B'+D} \right] \right\} e^{2 \pi i v \tau} \\
& \times \int P \left( \xi - \frac{\sigma \tau v}{2} \right) P^* \left( \xi + \frac{\sigma \tau v}{2} \right) \\
& \quad \times \exp \left[ \frac{i k}{2} \left( \frac{1}{B} + \frac{1}{B'+D} - \frac{1}{F} \right) (-2 \sigma \tau v \xi) \right] \\
& \quad \times \exp \left[ i k \left( \frac{(q_2 - q_1) \xi}{B'+D} + \frac{\xi \tau v}{B} \right) \right] d \xi
\end{aligned}$$

由于  $G'$  是  $G$  的像, 所以

$$\frac{1}{B} - \frac{1}{F} = -\frac{1}{B'}$$

因而,

$$\begin{aligned}
\frac{1}{B} + \frac{1}{B'+D} - \frac{1}{F} &= -\frac{1}{B'} + \frac{1}{B'+D} \\
&= \frac{-D}{B'(B'+D)}
\end{aligned}$$

代入、整理、归一化后场的互相关函数为:

$$C_v(q_1, q_2; \tau)$$

若以  $\tau=0$  代入(7), 是我们熟知的关于观察面上  $q_1 q_2$  两点的静态散斑的二级统计。若  $\tau \neq 0$ , 则(7)显示出两种性质, 其一是散斑以下列速度在观察面内移动:

$$V_s = -\left( \frac{B'+D}{B} + \frac{D \sigma}{B'} \right) v$$

其二是散斑的中心峰值随着移动而逐渐减弱。但我们最关注的是  $V_s$ , 为了方便讨论把它写成如下形式:

$$V_s = -M \left\{ 1 + \frac{D}{M^2} \left[ (1+M) \frac{1}{B} + \frac{1}{S} \right] \right\} v \quad (8)$$

式中  $M = \frac{B'}{B}$  是  $G$  的放大率。若观察面位于  $G$  的成像面上,  $D=0$ , 则  $V_s = -Mv$ , 即  $V_s$  与  $v$  的方向相反。在  $v \neq 0$  条件下, 使  $V_s = 0$ , 则必须:

$$1 + \frac{D}{M^2} \left[ (1+M) \frac{1}{B} + \frac{1}{S} \right] = 0$$

由此得观察面应放于:

$$D = D_0 = \frac{-M^2}{\frac{1}{S} + (1+M) \frac{1}{B}} \quad (9)$$

这个位置正是照明点光源  $Q$  的成像位置, 即

$$\frac{1}{B'+D_0} + \frac{1}{B+S} = \frac{1}{B'} + \frac{1}{B} = \frac{1}{F} \quad (9)'$$

(9)代入(8):

$$\begin{aligned}
V_s &= -Mv \left[ 1 + \frac{1}{M^2} \right. \\
& \quad \left. \frac{1}{\frac{1}{S} + (1+M) \frac{1}{B}} \right] \\
&= -Mv \left( 1 - \frac{D}{D_0} \right)
\end{aligned}$$

上式中  $D$  与  $D_0$  都是从  $G$  的像  $G'$  度量的距离, 现在将其改成从点光源的像  $Q'$  来度量其距离。由图 1 知,  $D = S' + \varepsilon - B'$ ,  $D_0 = S' - B'$  将其代入上式得:

$$V_q = -Mv \frac{\varepsilon}{B' - S'} \quad (10)$$

$\varepsilon$  的符号这样决定, 凡观察面位于  $Q'$  后方, 则  $\varepsilon > 0$ , 凡在  $Q'$  前方, 则  $\varepsilon < 0$ 。至此, 若把图 1 的成像系统看作眼睛, 观察面看作视网膜, 视网膜虽不能移动, 由于人眼有调节力作用, 若能使  $Q'$  形成于视网膜上,  $\varepsilon = 0$ ,  $V_q = 0$ , 即眼能看到散斑图样静止, 则判断该眼为正常眼; 若使用调节力后, 无法把  $Q'$  成在视网膜上而在视网膜前方 (相当于观察面在  $Q'$  后方) (近视眼), 眼看到的散斑图样移动方向与  $v$  相同; 若  $Q'$  经眼的调节力作用后,  $Q'$  始终位于视网膜后 (相当于观察面在  $Q'$  前方) (远视眼), 这时人眼看到的散斑图样移动方向与  $v$  相反 (人眼倒向作用)。利用动态散斑运动性质, 不仅能判别正常眼与非正常眼, 而且给屈光不正眼配戴各种屈光度镜片, 直至眼看到散斑静止为止, 从而达到矫正视力的目的。

### 光路原理

图 2 是依据上述理论研制的激光散斑电脑验光仪光路系统。  $L_1$  为输入物镜, 由单模激光器 (输出功率  $0.5 \sim 1 \text{ mW}$ ) 输出光束经 40 倍扩束镜  $L$  扩束, 照明转速为  $1 \sim 2$  转/分

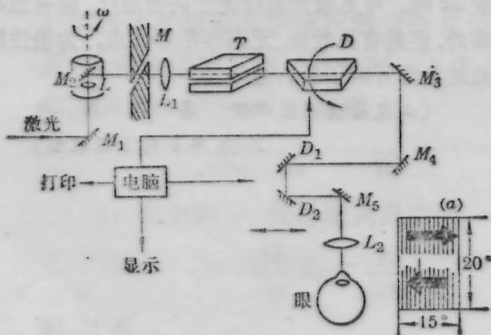


图 2 光路系统

的毛玻璃圆筒 (高  $60 \text{ mm}$  直径  $80 \text{ mm}$ ) 所产生的动态散斑场, 于像空间形成散斑图样。  $L_2$  为输出目镜, 人眼通过它观察动态散斑图样。为了描述上的方便, 先假定元件  $M$  与  $T$  不存在。这时眼看到的散斑图样如图 3(a) 所示, 是许多颗粒状斑点, 以相同速率沿同一方向移动。当眼使用调节力后若能使所看到的散斑图样静止 (严格讲应是 pure-boiling), 则眼为正常眼; 若不能使散斑图样静止 (屈光不正眼), 则电脑驱动  $D_1D_2$  系统 (该系统能平移距离  $400 \text{ mm}$ ), 直至验光者看到散斑静止为止。与此同时, 电脑即时显示并打印出配镜处方。  $D_1D_2$  系统是由两块平面反射镜构成, 它取代了 ohzu 用杜威 (Dove) 棱镜构成的系统。我们这种改进不仅制作简单, 造价低廉, 且效果相同。  $M_3, M_4, M_5$  是平面反射镜, 目的是缩小仪器体积。  $D$  是 Dove 棱镜组成的图像旋转器, 用于散光眼矫正视力。通过它可使散斑点速度沿着眼中的任意一条经线运动。我们运用最小二乘法算得的最佳矫正散光眼公式, 可用于正轴散光、斜轴散光及混合散光, 且误差为最小。并可在任意经线上采集数据。现设在眼上取三条经线, 分别与水平线夹角为  $0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$ , 由仪器测得三条经线上屈光度分别为  $P_0, P_{60}, P_{120}$ , 则矫正散光眼的三个参量  $P_s$  (球镜),  $P_c$  (柱镜),  $\phi$  (柱镜轴线与水平线夹角) 计算公式为:

$$P_s = \frac{1}{3} (P_0 + P_{60} + P_{120}) - \frac{1}{2} P_0$$

$$P_c = [(\Sigma_s)^2 + (\Sigma_c)^2]^{\frac{1}{2}}$$

$$\phi = \frac{1}{2} \text{tg}^{-1} (\Sigma_s / \Sigma_c)$$



图 3



$$\Sigma_s = 0.866(P_{60} - P_{120}), \Sigma_o = P_0 - \frac{P_{60} + P_{120}}{2}$$

这些公式输入计算机,由计算机运算,显示并打印配镜处方。

验光者在判别精度方面,颗粒状散斑远不如线条状散斑图样好。把颗粒状变为线条状,ohzu 采用办法是,颗粒状散斑场照射在以马达驱动其旋转的长方形棱镜上,使颗粒扫描成线条状。我们则采用缝宽为 1~1.5 mm 的单狭缝  $M$ ,颗粒状散斑场透过它以后,则变为单向平移的条纹状散斑图样。为了更进一步提高判别精度,在  $L_1$  后面放置了分割倒向装置  $T$ ,使单向平移的条纹状散斑图样(图 3(b))透过它以后变为双向平移的上、下两个视场(图 3(c))。分割倒向装置为两块棱镜组合而成。ohzu 把  $T$  放于透镜  $L_2$  前方,我们把它放于  $L_1$  后方,这样可提高视场角。采用以上两项装置将大大提高测量精度。输出激光剂量小于  $1 \mu\text{W}$ ,符合安全标准。仪器的技术指标如表 1。

表 1

	测量范围	精度	最小分辨精度
球镜	-20D~+20D	±0.25	0.0213D
柱镜	-8D~+8D	±0.25	0.0213D
轴	0°~180°	5°	1°

本仪器存在的主要缺点是,该仪器属主观验光法,即由病人判别,这在一定程度上会影响准确度。因此,把它改进成客观法,应是今后努力探索的目标。

### 参 考 文 献

- 1 H. A. Knoll, *Amer. J. Optom.*, **43**, 532(1966)
- 2 史家启,应用激光, **4**, 87 (1984)
- 3 陈国鉴,中国激光, **13**, 373 (1986)
- 4 H. Ohzu, *Opt. Acta*, **26**, 1089 (1979)
- 5 王宝成,中国激光, **12**, 491 (1985)
- 6 ICHIROU YamaGuchi *et al.*, *Opt Acta*, **24**, 705 (1977)
- 7 Takeaki Yoshimura, *J. Opt. Soc. Am.*, **3**, 1032 (1986)

### 简 讯

## 激光治疗慢性胆囊炎

山东省滨州医学院使用输出功率 25 mW、耦合光纤端功率 10 mW 的 632.8 nm He-Ne 激光对 50 例胆囊炎患者作了治疗,并与用药物治疗的另 50 例进行了比较。激光照射功率密度为  $7.96 \text{ mW}/\text{cm}^2$ ,照射穴位为期门、日月和胆俞,每穴照射 5 分钟,每天 1 次,10 次为一疗程。平均治疗一个疗程。药物治疗口服消炎利胆片、胆石通等药物,两个月为一疗程,平均治疗两个疗程。激光治疗组总有效率

80%,其中治愈 16 例,有效 24 例,无效 10 例。药物治疗组总有效率 56%,其中治愈 7 例,有效 21 例,无效 22 例。可见激光治疗优于药物治疗,除有效率较高外,还具有见效快、无副作用等优点,为慢性胆囊炎的治疗开辟了新的途径。

(山东省滨州医学院 梁 勋 郭 伟  
1988 年 8 月 3 日收稿)