

# 用激光散斑跨零法监测皮肤血流变化\*

刘 迎 马世宁 杜福礼

(天津大学 物理系)

彭 翔 叶声华

(天津大学 精仪系)

## 提 要

由皮肤散射形成的动态激光散斑携带了皮肤血流的信息。由于来自运动着的红血球的散射光两次经过皮肤表面,因而受到三次随机调制。本文根据串级散斑的快速时间涨落的特点,提出了用激光散斑的跨零率测量皮肤血流的新方法,给出了跨零率与血流速度参数之间的关系式和实验结果。

关键词:跨零法;表皮血流;动态散斑。

## 一、引 言

皮肤血流的测定在病情诊断以及在对诸如腿部溃疡、动脉阻塞、Raynaud氏综合症等疾病患者的监护治疗中具有重要意义。大部分用激光进行的测量要用胶带把探头固定在皮肤表面上,但是皮肤对温度、表面覆盖程度和表面压力很敏感,因此有必要提供一种真正的非接触的测量方法。在临床中这种方法还有很多优点:不需要消毒,而且可以测量人体任何部位的皮肤,尤其适合对外部损伤患者的易感染的部位进行测量而不会产生其它影响。

利用皮肤散射形成的动态激光散斑效应测量皮肤血流近几年受到人们关注。H. Fujii等人<sup>[1,2]</sup>分析了散斑信号的时间频谱,测量了不同血流水平下散斑信号的高低频比。B. Ruth<sup>[3,4]</sup>将皮肤散射的激光散斑看作两个动态激光散斑场的叠加,并试图减小人体无意识运动的影响。散斑方法测量皮肤血流基于下述事实:He-Ne激光(6328Å)透入皮肤的平均深度大约为0.5 mm<sup>[5]</sup>,因此,表皮毛细血管层正好处在激光所能达到的范围之内。皮肤表面、血液及其周围的组织都可以看作是漫散射体。来自皮肤表面及皮肤组织的散射光与来自运动着的红血球的散射光在接收平面相干叠加形成了散斑图样。由于血液流动,散斑场也随时间变化。但是来自红血球的散射光两次经过皮肤表面,因而受到三次随机调制。三次串级散斑已失去了散射粒子的运动方向的信息,呈现复杂的结构,其时间涨落比单次散射情况快得多<sup>[5,6]</sup>。本文根据皮肤散射形成的动态散斑的这些特点用散斑强度涨落的跨零率监测皮肤血流的变化,并推导出跨零率与血流速度参数之间的关系式。

收稿日期:1990年3月29日;收到修改稿日期:1990年5月28日

\* 本研究项目由国家自然科学基金资助。

## 二、理论分析

测量是通过图 1 所示的装置进行的。透镜将 He-Ne 激光聚焦到被测量的手指上, 形成直径大约 1.5 mm 的光斑。时变的激光散斑信号由光电倍增管 (PMT) 通过一个针孔探测。图 2(a) 是正常血流时获得的信号; (b) 是在上肢加一充气套箍以使血流速度减慢时获得的信号。很显然两种情况下跨过零点的次数是不同的。因此, 散斑的跨零率可以给出关于皮肤血流变化的信息。跨零率与测量信号的谱密度函数有关, 并可以由下式估计<sup>[7]</sup>:

$$Z = 2\varphi \left\{ \int \omega^2 P(\omega) d\omega \right\}^{1/2}, \quad (1)$$

式中  $\varphi$  是一常数, 与分布函数  $P(\omega)$  的类型有关。对于平稳的高斯型谱密度函数,  $\varphi=1$ 。

下面我们研究血流速度的变化对谱密度函数  $P(\omega)$  的影响, 以便得到跨零率与血流速度参数之间的关系。

激光被皮肤表面和组织散射形成散斑场 1, 被红血球散射形成散斑场 2。在针孔处, 散斑场的振幅  $A_j(t)$  可以表示为

$$A_j(t) = \bar{A}_j a_j(t), \quad (j=1, 2). \quad (2)$$

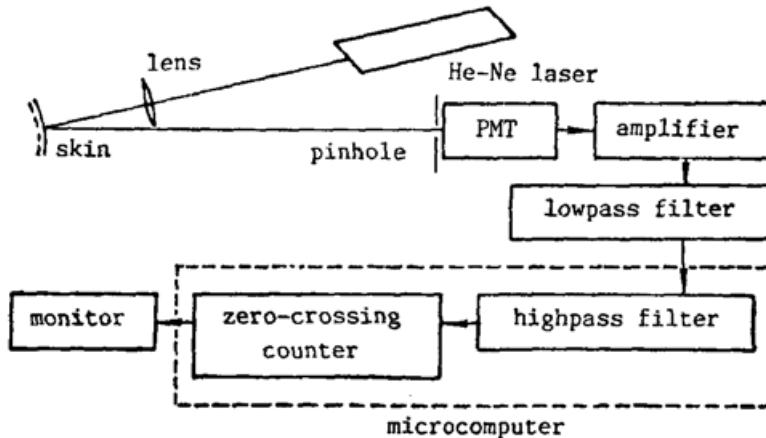


Fig. 1 Block diagram of experiment setup

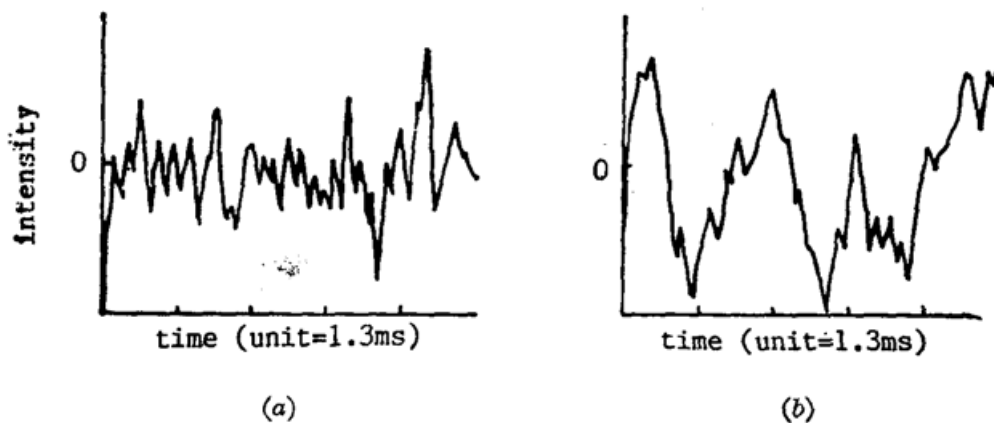


Fig. 2 Speckle intensity fluctuations

(a) For normal skin blood flow; (b) For suppressed skin blood flow

其中  $\bar{A}_j$  是平均振幅,  $a_j(t)$  是归一化了的时变部分。合成场的振幅是

$$A(t) = \bar{A}_1 a_1(t) + \bar{A}_2 a_2(t)。 \quad (3)$$

因此总强度  $I(t)$  可以写作

$$I(t) = A^*(t) A(t) = \bar{A}_1^2 a_1^*(t) a_1(t) + \bar{A}_1 \bar{A}_2 [a_1^*(t) a_2(t) + a_2^*(t) a_1(t)] + \bar{A}_2^2 a_2^*(t) a_2(t), \quad (4)$$

式中“\*”号表示复共轭。根据 Wiener-Kichin 定理,  $I(t)$  的功率谱密度  $P(\omega)$  是  $I(t)$  的自相关函数的傅里叶变换

$$P(\omega) = \mathcal{F}\{I(t) \star I(t)\}, \quad (5)$$

式中“ $\star$ ”表示作相关运算。利用(3)式及卷积运算的对易性质, 可以从上式得到

$$P(\omega) = \bar{I}_1^2 p_1(\omega) + \bar{I}_2^2 p_2(\omega) + \bar{I}_1 \bar{I}_2 p_{1,2}(\omega), \quad (6)$$

式中  $\bar{I}_j = \bar{A}_j^2$ ,  $p_j(\omega)$  是  $I_j(t)$  的归一化频谱:

$$p_j(\omega) = \mathcal{F}\{a_j^*(t) a_j(t) \star a_j^*(t) a_j(t)\}, \quad (j=1, 2)。 \quad (7)$$

$p_{1,2}(\omega)$  比较复杂, 与  $a_1(t)$  和  $a_2(t)$  有关:

$$p_{1,2}(\omega) = \mathcal{F}\{2a_1^*(t) a_1(t) \star a_2^*(t) a_2(t) + [a_1^*(t) a_2(t) + a_2^*(t) a_1(t)] \star [a_1^*(t) a_2(t) + a_2^*(t) a_1(t)]\}。 \quad (8)$$

下面我们考察血流速度变化对功率谱的影响。在任一时刻  $t$ , 所有红血球的位置决定了散斑图样及振幅  $a_2(t)$ 。当所有红血球的速度按同一常数  $\kappa$  倍增大时, 同样的位置和振幅则在  $t/\kappa$  时刻达到。因此, 速度变化后的散斑场的振幅  $a_{2,\kappa}(t)$  可以写为:

$$a_{2,\kappa}(t) = a_2(\kappa t)。 \quad (9)$$

将(7)、(8)式中的  $a_2(t)$  用  $a_{2,\kappa}(\kappa t)$  代替, 并代入(6)式, 可以得到:

$$P_\kappa(\omega) = \bar{I}_1^2 p_1(\omega) + \bar{I}_2^2 p_2(\kappa, \omega) + \bar{I}_1 \bar{I}_2 p_{1,2}(\kappa, \omega)。 \quad (10)$$

实际情况中,  $a_2(t)$  的涨落比  $a_1(t)$  快得多, 即与红血球运动相比, 周围的组织可以看作是静止的, 在初步分析中可以将  $a_1(t)$  视为常数,

$$a_1(t) = a_1, \quad (11)$$

并由(7)式得到

$$p_1(\omega) = \delta(\omega)。 \quad (12)$$

因此

$$P_\kappa(\omega) = \bar{I}_1^2 \delta(\omega) + \bar{I}_2^2 p_2(\kappa, \omega) + \bar{I}_1 \bar{I}_2 p_{1,2}(\kappa, \omega)。 \quad (13)$$

将上式代入(1)式, 得到跨零率:

$$Z = 2\varphi \left\{ \int \omega^2 P_\kappa(\omega) d\omega \right\}^{1/2} = 2\varphi \left\{ \bar{I}_2^2 \int \omega^2 p_2(\kappa, \omega) d\omega + \bar{I}_1 \bar{I}_2 \int \omega^2 p_{1,2}(\kappa, \omega) d\omega \right\}^{1/2}。 \quad (14)$$

利用(7)、(8)、(9)、(11)式, 经计算可得到:

$$Z = 2\varphi \kappa \left\{ \bar{I}_2^2 \int \omega^2 p_2(\omega) d\omega + \bar{I}_1 \bar{I}_2 \int \omega^2 \bar{p}(\omega) d\omega \right\}^{1/2}。 \quad (15)$$

式中

$$\bar{p}(\omega) = \mathcal{F}\{[a_1^* a_2(t) + a_2^*(t) a_1] \star [a_1^* a_2(t) + a_2^*(t) a_1]\}, \quad (16)$$

令  $K_2 = \int \omega^2 p_2(\omega) d\omega$ ,  $K_3 = \int \omega^2 \bar{p}(\omega) d\omega$ , 可以得到跨零率与血流速度参数  $\kappa$  之间的关系:

$$Z = 2\varphi \kappa \{ \bar{I}_2 K_2 + \bar{I}_1 \bar{I}_2 K_3 \}^{1/2}。 \quad (17)$$

(17)式表明, 跨零率与血流速度参数  $\kappa$  成正比, 比例系数与空间血流分布( $K_2$ ,  $K_3$ )及激光

照射范围内的血流量积( $\bar{I}_2$ )有关。

### 三、实验结果

上述分析结果(见(17)式)表明,在空间血流分布和激光照射范围内的血流体积的影响可以忽略的条件下,我们可以通过测量散斑强度信号的跨零率来监测皮肤血流的变化。为了显示跨零率随血流速度的变化,我们测量了充血反应过程。充血反应是这样实现的:先在上肢用充气套箍将血流抑制住一定的时间,然后突然放开。放开后血流速度会突然增加,然后恢复到正常水平。为了便于和其它方法进行比较,实验中散斑强度信号经量化后存入计算机,由计算机完成跨零计数以及其它运算。从PMT输出的信号经过放大和低通滤波( $f_c=500$  Hz)后,模数转换接口以1525 Hz速率将其量化并送入计算机。高通数字滤波器( $f_c=5$  Hz)先将数据中的直流成分去掉,然后计算机比较相邻两个数据的符号,如果符号相同,认为没有跨过零点;如果符号相反则跨过一次零点,计数器增一。采样数据被分成56段,每段由512个数据组成,计数器记录下每段的跨零次数。测量结果如图3(a)所示。从图中可以看出,开始时跨零率比较低,当中断对血流的抑制时,跨零率突然增大,然后逐渐降低。可见,跨零率对皮肤血流变化是灵敏的。

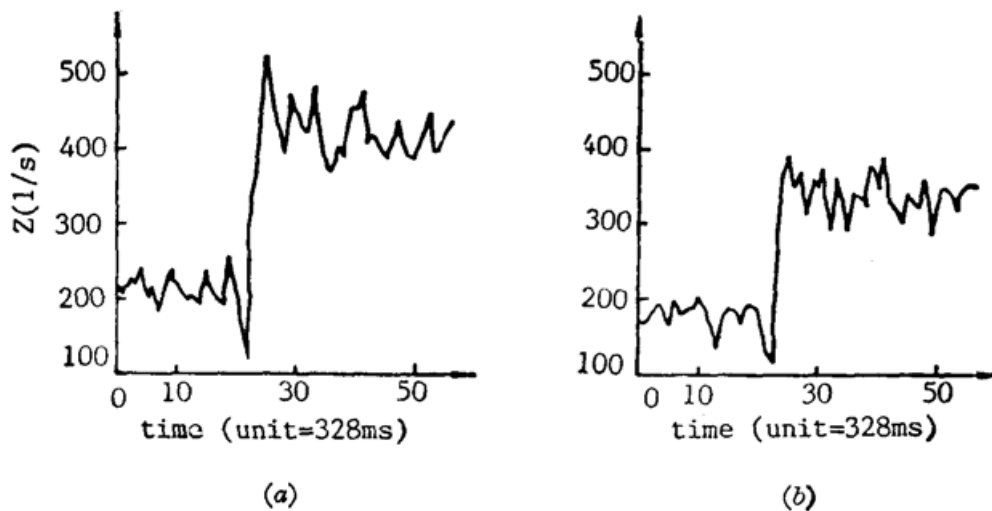


Fig 3

(a) counted zero-crossing rate; (b) calculated zero-crossing rate

我们可以将上述结果与根据公式(1)计算的结果进行比较。用最大熵谱估计法计算出每段的谱密度 $P(\omega)$ ,得到谱密度的100个分立值: $P_1, P_2, \dots, P_{100}$ ;  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{100}$ 。计算结果表明谱密度分布具有高斯函数的形式,所以(1)式中的 $\varphi$ 值可以取1。将(1)式的积分形式写成离散的形式,则第 $j$ 段的计算的跨零率为

$$Z_j = 2 \left\{ \sum_{i=1}^{100} \omega_i P_{ji} \right\}^{1/2} \quad (18)$$

图3(b)是利用上式得到的结果。比较图3(a)可见,计算的跨零率除了比测量的跨零率略低以外,两者非常相似,其差异是由于计算跨零率时,我们假设了谱密度函数是高斯型的(取 $\varphi=1$ ),并用了非线性的估计方法。

## 四、结 论

通过记录皮肤散射形成的动态激光散斑的跨零率可以监测皮肤血流的变化。这种方法对血流的变化是灵敏的,在实际应用中,可以通过非常简单的电信号处理单元实现对皮肤血流的实时监测。

### 参 考 文 献

- [1] H. Fujii *et al.*; *Opt. Lett.*, 1985, **10**, No. 3 (Mar), 104~106.
- [2] H. Fujii *et al.*; *Appl. Opt.*, 1987, **26**, No. 21 (Dec), 5321~5325.
- [3] B. Ruth; *J. Mod. Opt.*, 1987, **34**, No. 2 (Feb), 257~273.
- [4] B. Ruth; *Optics & Laser Technology*, 1988, **20**, No. 6 (Dec), 309~316.
- [5] T. Iwai, T. Asakura; *Optics & Laser Technology*, 1989, **21**, No. 1 (Feb), 31~35.
- [6] X. Peng *et al.*; *Optik*, 1989, **82**, No. 1 (Apr), 19~21.
- [7] J. S. Bendat, *Principles and Applications of Random Noise Theory*, (John Wiley & Sons. Inc., 1958), 370~414.

## Skin blood flow measurement using laser speckle Zero-crossing counting method\*

LIU YING, MA SHINING AND DU FULI  
(Department of Physics, Tianjin University)

PENG XIANG AND YIE SHENGHUA  
(Department of Precision Instrument Engineering, Tianjin University)

(Received 22 March 1990; revised 28 May 1990)

### Abstracts

The dynamic laser speckle from a skin surface provides the information about skin blood flow. The scattered light from moving red cells is transmitted twice through the skin surface, so that random-modulated triply. In this paper, a new method is proposed to monitor skin blood flow changes based on the properties of cascade-scattered dynamic speckle. A relation between zero-crossing rate and the blood flow changes is derived. Analysis and experimental results on this method are given.

**Key words:** Zero-crossing counting method; skin blood; dynamic speckle.

\* This work is supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC).