

# 瞳孔控制系统的动态特性测量与数学模型\*

孙复川 赵信珍 戴树平 刘浩坤 杨润才

(中国科学院上海生理研究所)

## 摘 要

瞳孔对光反应可以看成是一个反馈控制过程,它自动调节投射到视网膜上的光量,对这个较简单的生物闭环系统的研究,有利于进一步探讨各种更复杂的生物控制系统。

本文是应用专用的红外线电视设备,以不同波形的可见光脉冲作为输入信号,对瞳孔控制系统的反应即瞳孔面积的变化进行了多次测量。实验结果表明系统的动态特性是非线性的,它具有正微商检测器特性。且可用一个三阶微分方程来模拟瞳孔控制系统的动态过程,并对此作了初步讨论。

## 一、引 言

瞳孔光反射可以看作是一个伺服控制系统,它自动调节投射到视网膜上的光强,它大致的反馈途径(如图1(a)所示)概述如下:瞳孔是虹彩肌中心的一个小孔,光线通过它射到由光感受细胞组成的视网膜上,然后通过载有光强信息的传入神经,经过顶盖区的中转,通向脑部的动眼神经核。传出的反馈通道分两路,一部分通过付交感神经,在睫状神经节处转换后去控制瞳孔括约肌的收缩,另一部分由交感神经传出,最后在上颈脊神经节转换后去支配瞳孔扩张肌的活动<sup>[1]</sup>。这样输入光信号增强时,就自动地改变了瞳孔面积的大小,调节了落在视网膜上的光量。所以瞳孔光反射系统是一个典型的生物控制系统(见图1(b))。这在光电成象系统中稳定图象信号,具有参考意义。同时,它作为一个较为简单的典型,通过对它的研究有利于进一步探讨各种更复杂的生物调节控制系统。

这个系统的输入信号是光,它是一个容易控制的物理量,系统的反应是瞳孔面积的变化。

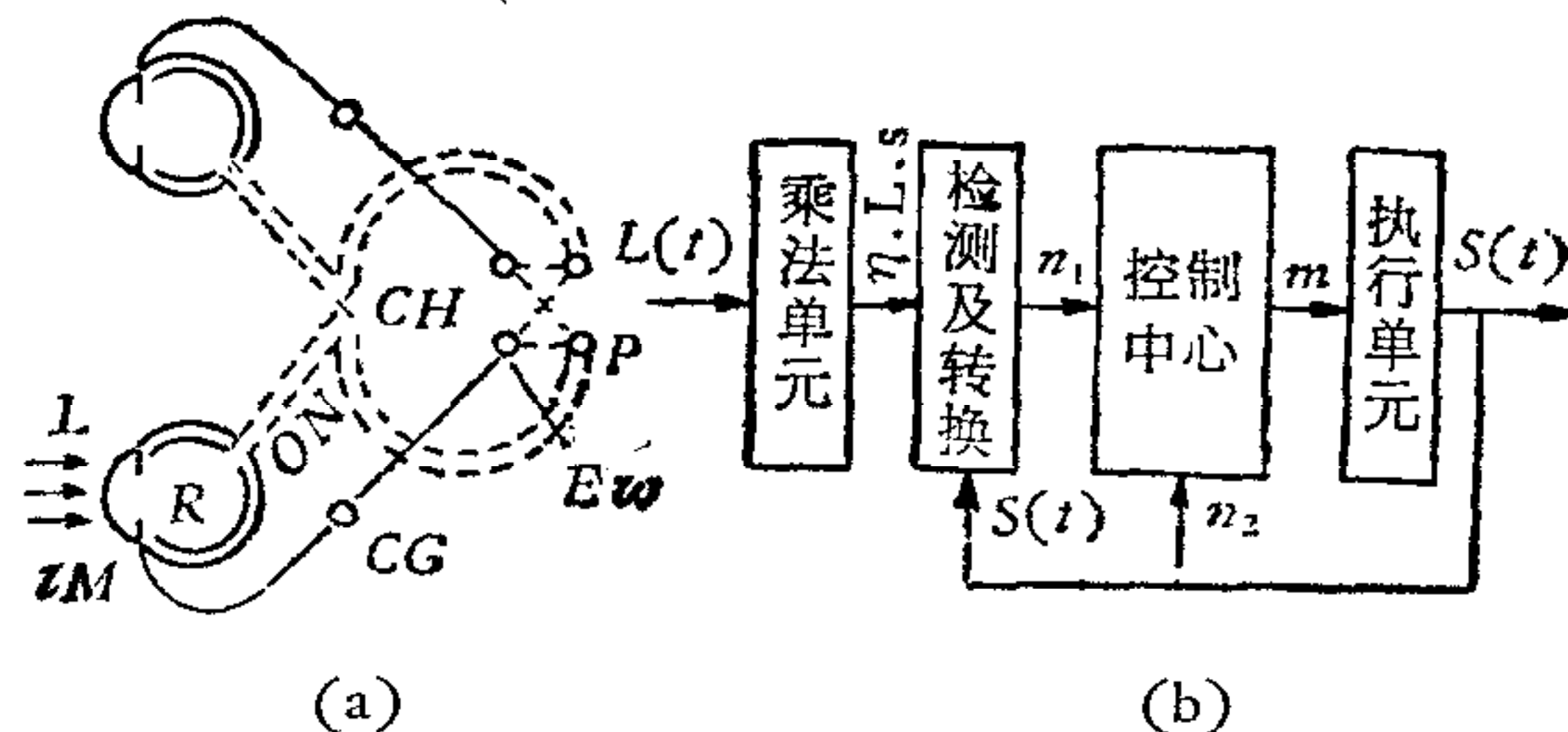


图1(a) 瞳孔调节反馈通路示意图。其中: *IM*——虹彩; *R*——视网膜; *ON*——视神经; *CH*——视交叉; *P*——顶盖区; *Ew*——Edinger-westphal核; *CG*——睫状神经节。(b) 瞳孔调节控制功能框图。 *L*——输入光强; *S*——瞳孔面积;  $\eta$ ——传递衰减

\* 本文曾在中国自动化学会1978年年会上宣读。本课题的科研工作是在秦诒纯同志及刘育民同志指导下完成的。



化。它正好在透明的角膜后面,可用光学方法无接触地进行测量,而且它是一维变量,数学上描述方便。Stark 与 Sherman<sup>[2]</sup> 首先用控制论方法研究了瞳孔光反射系统的机制,他们用小信号输入测定了这个系统的稳态频率特性及相位特性,并用 Nyquist 原理分析了系统的稳定性。此后有不少人都很重视对瞳孔调节控制系统的研究<sup>[3-12]</sup>,但是至今对瞳孔面积动态特性的定量实验测量还是较少,特别是用不同调制度及不同波宽的信号,来确定系统的动态非线性特性更少见到报道。本工作正是应用红外成象方法,测量了系统的非线性动态特性,并探讨了模拟系统的数学方程。

## 二、实验方法

### 1. 调制的可见光作为输入信号

如图(2)所示,用辉光调制管<sup>[13]</sup>,通过透镜产生平行光束,经过隔热玻璃,再投射到半镀膜铝玻片,一部分透射到受试者眼睛;另一部分反射到光检测器,变成电信号反馈到光调制电路,这样用强负反馈的方法可以保证输入调制光较严格地与给定的电信号波形一致。

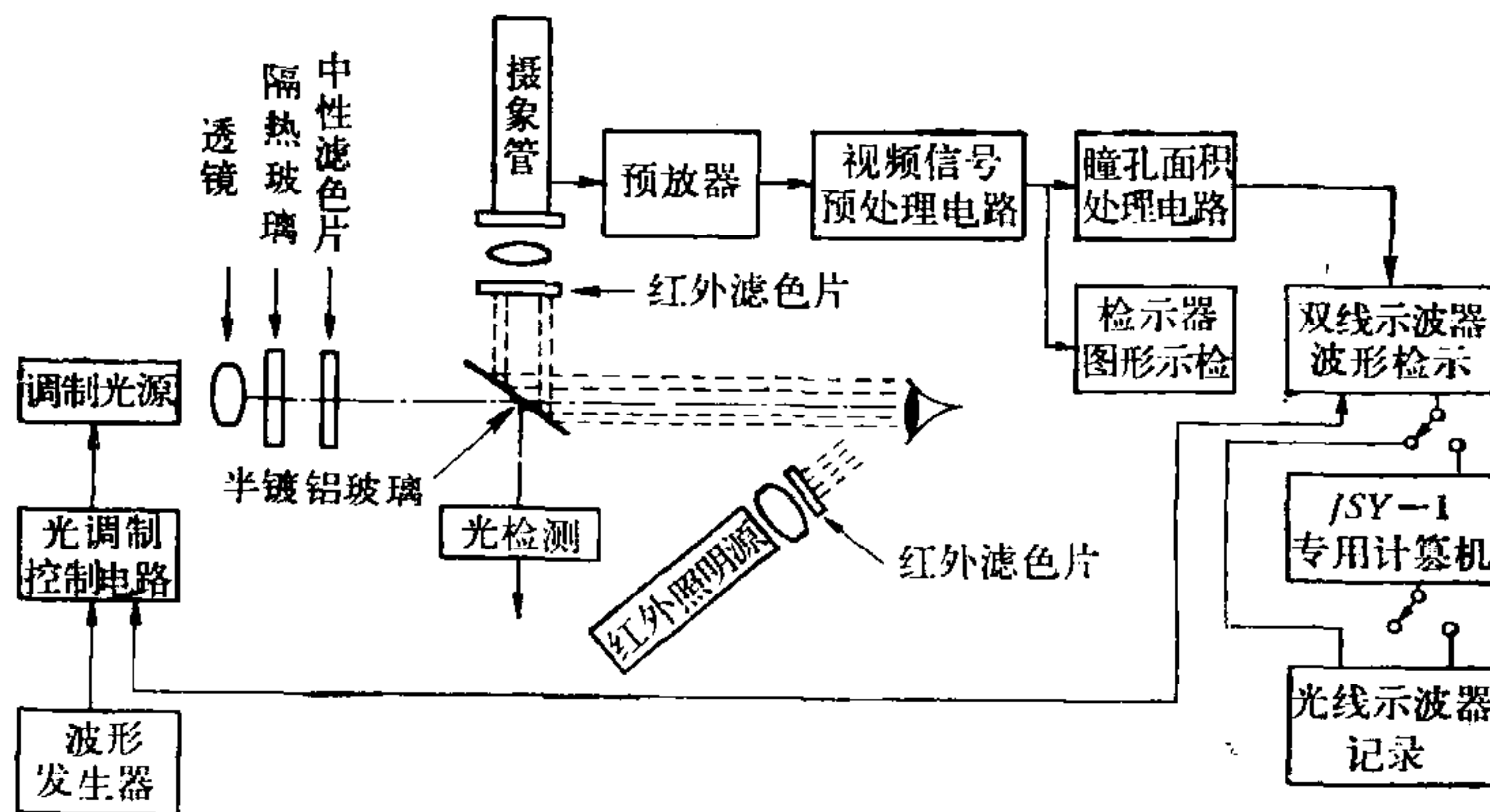


图2 瞳孔动态测量实验示意图

### 2. 红外成象方法测量瞳孔反应

用溴钨灯经红外滤色片,产生红外照明光,投射到受试者眼睛上,它的漫反射经半镀膜铝玻片,在硅靶摄像管上成象。并形成图象视频信号(见图2),视频信号先经过预处理,增强了虹彩与瞳孔的对比度,并单独地突出瞳孔(见预处理后图形监视照片图3),然后用隔行保持及场间清洗的二次积分方法,同时改善了测量信噪比及快速测量的能力(详见文献[14])。并可在测量过程中同时监视瞳孔图象与面积变化波形,便于发现和排除各种干扰。受试者头部固定在一个可调节支架上,并注视远方小红灯,这样眼睛就可以保持基



图3 (a) 监视器瞳孔原象 (b) 视频信号处理后图象 (c) 视频信号处理后图象



本不动。实验情况证明,用成象测量方法对瞳孔测量较方便。

### 3. 记录系统

在图象及波形监视下,调试好后,即可用光线示波器把输入的调制光信号与瞳孔反应的面积变化,同时记录在紫外线记录纸上,实时地看到结果。也可以由 JSy-1 生物专用计算机<sup>[5]</sup>,经过 32 次或 64 次叠加,将结果输出给光线示波器记录,以减小无规起伏的影响。

## 三、结果与初步分析

我们采用不同输入信号波形(脉冲波、正弦波、锯齿波等),不同的宽度(从 2 毫秒到 5 秒),和不同的调制度(10% 到 80%)及不同的直流电平重复进行了实验。现着重把脉冲动态特性结果分析如下。

### 1. 正微商检测器特性

如图 4 记录纸图片所表示,瞳孔调节系统的动态特性是对正负脉冲信号都是收缩反应,对正脉冲是前沿,对负脉冲是后沿,所以实质上是对光的正微商部分有收缩反应,在一定范围内,脉冲极性、宽度、调制度影响不显著。

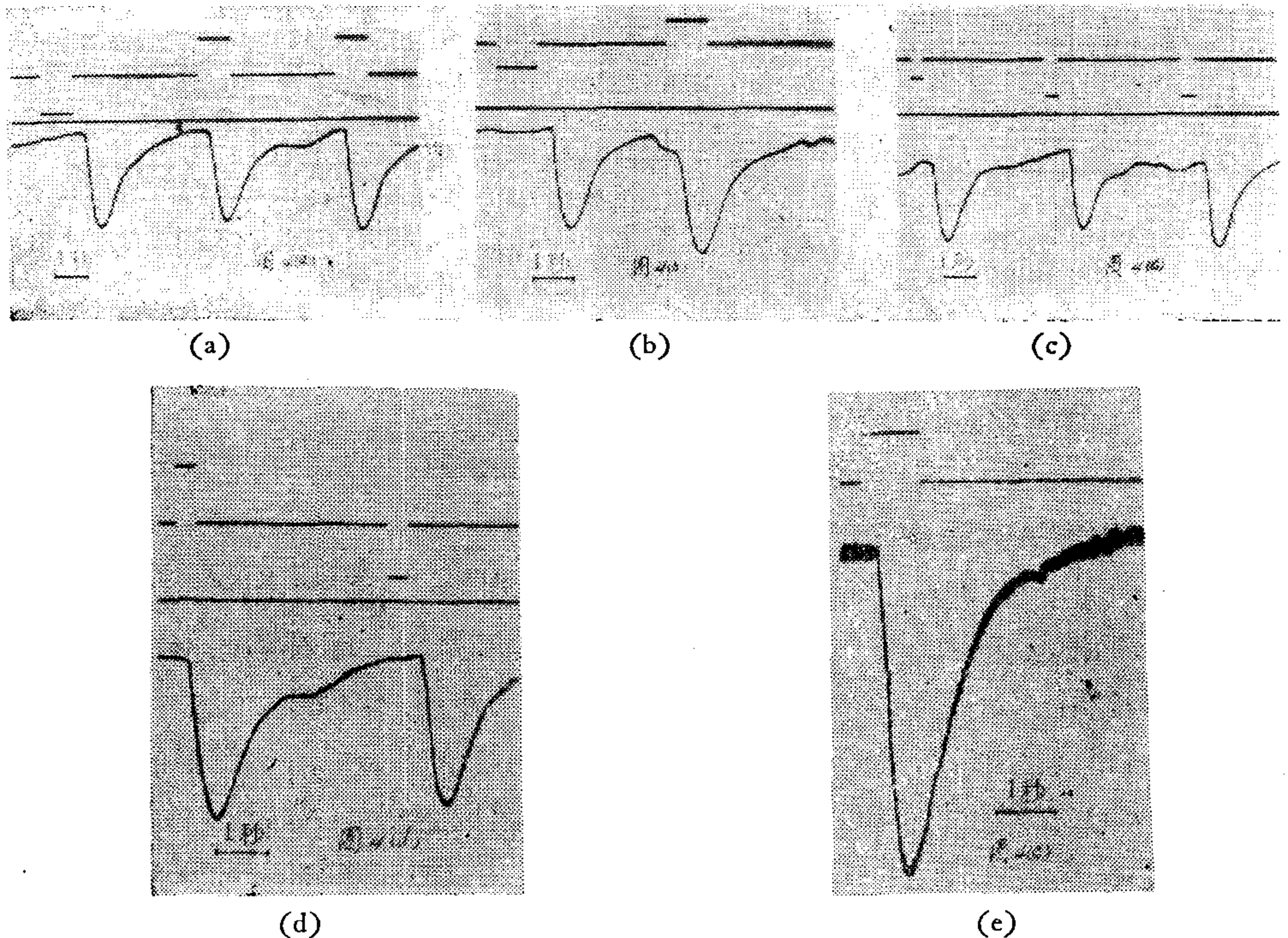


图 4 对几种不同输入光强,瞳孔反应的面积变化曲线记录图。上部为输入光强变化,下部为瞳孔面积变化 (a) 输入光脉冲宽度为 1 秒,调制度为  $\pm 80\%$  时,瞳孔反应的面积变化曲线 (b) 输入光脉冲宽度为 1 秒,调制度为  $\pm 40\%$  时,瞳孔反应的面积变化曲线 (c) 输入光脉冲宽度为 0.4 秒,调制度为  $-40\%$  及  $-80\%$  时瞳孔反应的面积变化曲线 (d) 输入光脉冲宽度为 0.4 秒,调制度为  $\pm 80\%$  时,瞳孔反应的面积变化曲线 (e) 输入光脉冲宽度为 1 秒,调制度为  $+80\%$  时,瞳孔反应由 JSy-1 叠加 32 次后记录的面积变化曲线

### 2. 瞳孔反应波形参数

由于瞳孔本身在恒定光输入下就有自发波动 (unrest) 在实验过程中,图形监视器上

就可明显见到其大小变化。所以瞳孔反应的波形中, 包含有这部分成份在内, 但是大致参数是基本恒定, 这在应用专用计算机叠加后的结果中(图 4(e)) 更可明显看出, 并与一些特别清晰的单次波形相一致。延迟时间 0.3—0.4 秒, 达到极值时间 0.4—0.5 秒。反应幅度: 在一定光强及宽度以上, 反应幅度主要决定于眼睛的适应情况, 多次叠加后的波形与某些无规起伏较小的单次波进行比较, 发现它们都是相当相似的, 波形的上升、下降速率都是由大到小变化的一个单极值负峰波形(图 5 所示)。

### 3. 瞳孔反应的相对增益

相对增益

$$G = \frac{\Delta s}{s} / \frac{\Delta l}{l}$$

在小信号静态测量中(适应时间 > 120 秒) 它为 -0.17—-0.18, 与 Stark 的静态测量 -0.16 基本一致<sup>[3]</sup>。但是对于动态特性, 我们可用反应峰值的相对变化来描述:

$$G = \frac{|\Delta s_{\max}|}{s} / \frac{|\Delta l|}{l}$$

我们的计算可达 0.4 到 0.7 以上。远大于静态增益, 而且是单向的。

## 四、数学模拟方程

根据上述系统动态特性反应的波形测量结果, 在我们实验范围内, 可由它的多次叠加平均波形曲线来近似地建立系统动态微分方程<sup>[16]</sup>。结果如下:

$$\begin{aligned} \frac{d^3 s}{d(t+\delta)^3} + 3 \frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_1 \tau_2} \cdot \frac{d^2 s}{d(t+\delta)^2} + \left[ \frac{2(\tau_1 + \tau_2)^2}{\tau_1^2 \tau_2^2} + 4 \frac{1}{\tau_1 \tau_2} \right] \frac{ds}{d(t+\delta)} \\ + \frac{4(\tau_1 + \tau_2)}{\tau_1^2 \tau_2^2} s = -a^2 \frac{(\tau_1 - \tau_2)^2}{\tau_1 \tau_2} \left\{ \frac{dl}{dt} \right\}^+ \end{aligned} \quad (4.1)$$

$s$  为瞳孔面积。

$L$  为输入不同调制度脉冲光强。

$$\left\{ \frac{dl}{dt} \right\}^+ = \begin{cases} \frac{dl}{dt}, & \text{当 } \frac{dl}{dt} \geq 0 \\ 0, & \text{当 } \frac{dl}{dt} < 0 \end{cases}$$

$\delta$  为延迟时间, 一般在 0.3—0.4 秒之间。

$\tau_1, \tau_2$  为时间常数,  $\tau_1$  在 0.3—0.5 秒之间, 大多数  $\tau_2 \approx 2\tau_1$ 。

$a$  为受试者状态(包括适应状态)有关的一个常数。在  $\tau_2 \approx 2\tau_1$  时, 代入方程, 则简化为:

$$\frac{d^3 s}{d(t+\delta)^3} + \frac{9}{2\tau_1} \cdot \frac{d^2 s}{d(t+\delta)^2} + \frac{13}{2\tau_1^2} \cdot \frac{ds}{d(t+\delta)} + \frac{3}{\tau_1^3} s = -\frac{a^2}{2} \left\{ \frac{dl}{dt} \right\}^+ \quad (4.2)$$

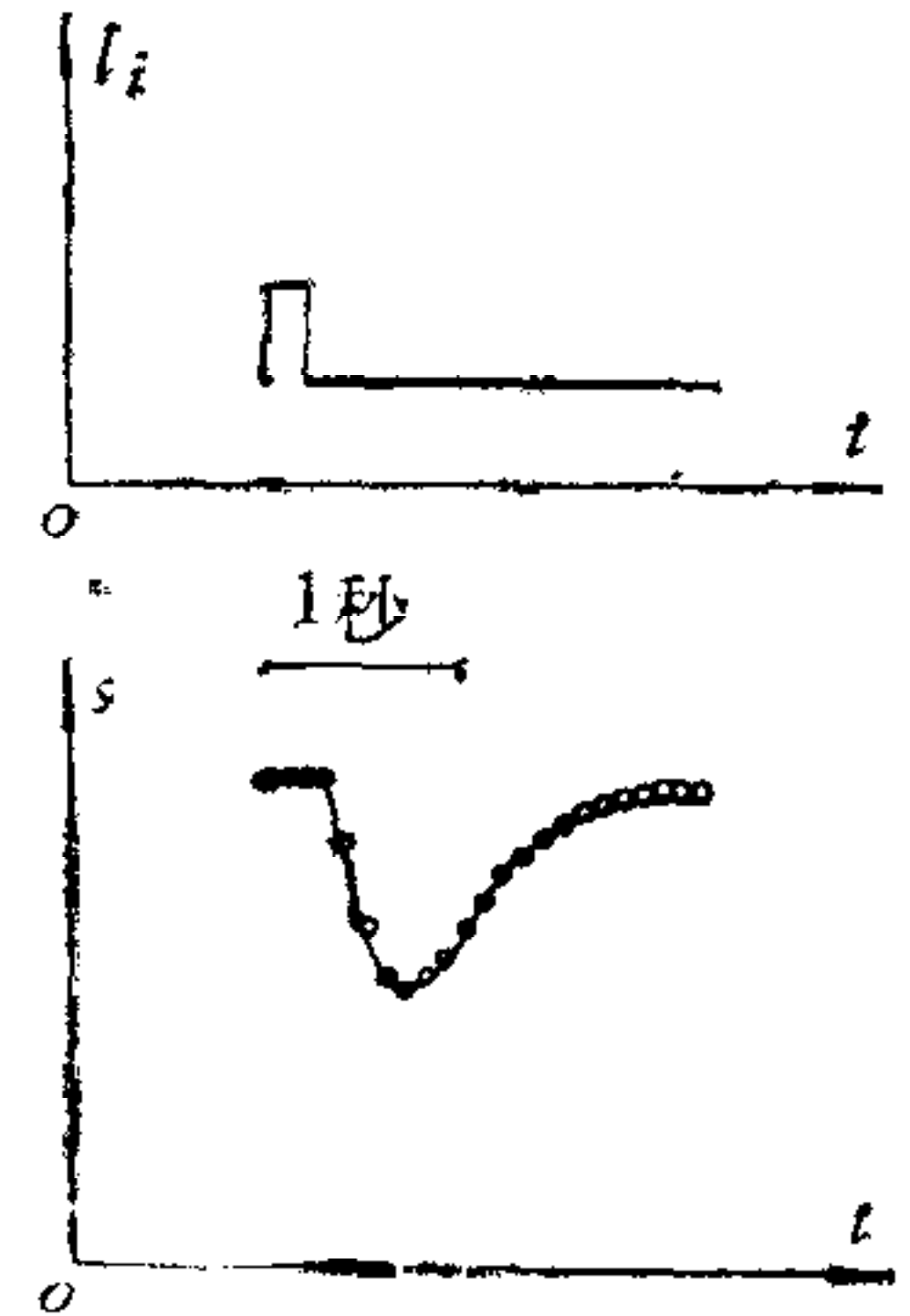


图5 瞳孔反应实验测量波形与(4.2)式方程计算值比较, 上图为输入光强, 下图为瞳孔反应曲线, 其中实线为实验曲线, 圆圈表示(4.2)式计算的数值



它的计算数值与实验波形(如图 5 所示)相当符合。

另外,从(4.2)式可以看出在  $L$  为单位脉冲函数时,可得到的三阶系统脉冲响应函数为<sup>[17]</sup>:

$$s(P) \doteq \frac{-a^2/2e^{-\delta P}}{\left(P^2 + \frac{3}{\tau_1}P + \frac{2}{\tau_1^2}\right)\left(P + \frac{3}{2\tau_1}\right)} \quad (4.3)$$

其中  $P$  代表拉氏变量。

这样从(4.3)式可见,除延迟  $\delta$  时间外,对于标准三阶系统它相当于

$$\omega_n = \frac{\sqrt{2}}{\tau_1}, \quad \zeta = \frac{3}{2\sqrt{2}}, \quad p = \frac{3}{2\tau_1}$$

所以

$$\beta = \frac{p}{\zeta\omega_n} \doteq 1$$

故(4.2)式所示的瞳孔调节系统,正好是接近临界阻尼情况的三阶控制系统<sup>[18]</sup>。

### 参 考 文 献

- [1] H. Davson, "The Eye", 3 P231—267. Academic Press (1962).
- [2] L. Stark and P. M. Sherman, *J. Neurophysiol.*, 20 (1957), 17—26.
- [3] L. Stark and F. Baker, *J. Neurophysiol.*, 22 (1959), 156—164.
- [4] L. Stark, *Proc. I. R. E.*, 47 (1959), 1925—1939.
- [5] M. Clynes, *Proc. 3rd, Intl. Conf. on Medical Electronics* 356—358, (1960).
- [6] 汪云九、陈传涓、郑竺英,第一届全国生物物理学学术会议汇刊 p 92—100, 科学出版社, (1965).
- [7] A. Sandberg and L. Stark, *Brain Research*, 11 (1968), 194—211.
- [8] A. Troelstra, *J. Opt. Soc. Amer.*, 58 (1968), 685—690.
- [9] J. G. Nebster, *J. Opt. Soc. Amer.*, 59 (1969), 1473—1478.
- [10] J. Terdrman. et al., *Brain Research*, 16 (1969), 288—292.
- [11] J. G. Webster, *IEEE Trans*, 18 (1971), 187—194.
- [12] D. R. Hansman, L. Stark, 26th. Ann. Conf. on Engng in Med. and Bio. P394, (1973).
- [13] B. B. Olser und and A. M. Rosenfalck, *J. Opt. Soc. Amer.*, 47 (1957), 30—34.
- [14] "测定动态瞳孔面积的红外成象系统"(待发表).
- [15] 复旦大学计算机教研组、生理所电子室协作组: JSY-1 生物医用计算机. 生物化学与生物物理进展. 1975 年第一期, 4—10.
- [16] 潘裕焕: "生产过程自动化中的数学模型", 185—235, 科学出版社 (1977).
- [17] 钱学森: "工程控制论", 11—31, 科学出版社(1958).
- [18] 绪方胜彦: "现代控制工程", 卢伯英、佟明安、罗维名等译, 170—191, 科学出版社(1976).

## DYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE PUPILLARY CONTROL SYSTEM: MEASUREMENT AND MATHEMATICAL MODEL

SUN FU-CHUAN, ZHAO XIN-ZHEN, DAI SHU-PING,

LIU HAO-KUN, YANG RUN-CAI

*(Shanghai Institute of Physiology, Academia Sinica)*

### ABSTRACT

The pupil reflex to light may be treated as a feedback process to control the light impinging upon the retina. By means of an infrared TV equipment, the pupil area changes were measured as system response to the input of light pulses with various waveforms. The results showed that the dynamic characteristics of pupillary system is quite nonlinear, the pupil system behaves like a positive differential detector. A third order differential equation can be formulated to simulate this dynamic characteristic. The meaning of the model was discussed briefly.