

光电子混合模糊逻辑

刘树田 吴 杰 李淳飞

(哈尔滨工业大学应用物理系, 150006)

提要: 本文提出了一种由光电子混合回路构成的简单光学模糊逻辑门设计。演示了补、最大、最小和限界差(相对补)四种最基本的逻辑操作。给出了一个多功能可编程的光电子混合模糊逻辑门,可实现模糊逻辑中七种基本逻辑运算。

关键词: 光计算, 模糊逻辑

Opto-electronic hybrid implementation of fuzzy logic

Liu Shutian, Wu Jie, Li Chunfei

(Department of Applied Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin)

Abstract: A new design of optical fuzzy logic gates using simple optoelectronic hybrid circuits is presented in this paper. Four basic fuzzy logic implementations, such as complement, maximum, minimum and bounded difference are demonstrated experimentally. A multi-functional programmable optoelectronic hybrid fuzzy logic gate is also proposed. Different input assignment can be chosen by employing a multiplex logic circuit, and therefore seven kinds of fundamental fuzzy logic implementation include bounded sum, bounded product and implication can be performed in real time.

Key words: optical computing, fuzzy logic

一、引 言

模糊数学和模糊逻辑理论在人工智能、模式识别以及自动化控制等等许多科学研究领域中都有着广泛的应用。在光学人工智能和光学神经网络的研究中也是不可缺少的理论工具。刘立人提出了利用空间光编码实现光学模糊逻辑的方法^[1]; Mada等人利用液晶空间光调制器实现了多值逻辑和连续值逻辑中几个最基本的逻辑关系^[2]; Caufield^[3]提出了一种基于模糊数学理论的“句法(Syntactical)”模式识别的方案。

本文首次提出一种利用光电子回路构成的简单的光学模糊逻辑设计,并在实验上演示了模糊补、最大、最小和限界差等四种基本逻辑操作。同时本文还给出了一个可编程的模糊逻辑门,它可以实时地实现模糊逻辑中七种基本逻辑运算。

二、基本模糊逻辑门的设计与实验结果

现实世界中,系统的变量的属性常常是含糊定义的,其变量可能取介于“真”与“伪”以外的值。因此必须要用模糊逻辑来描述。

模糊逻辑可以看成是一种特殊的多值逻辑,其逻辑变量和逻辑函数表达式的值在区间 $[0, 1]$ 内连续取值。因而可以认为是无限多值逻辑。模糊逻辑变量(或称元素) x 的逻辑表示用一个隶属函数 $\mu(x)$ 表述, $\mu(x) \in [0, 1]$ 。根据模糊集合运算定义下列模糊逻辑运算:

- (1) 补(Complement): $\mu(\bar{x}) \equiv 1 - \mu(x)$;
- (2) 最小(Minimum): $\mu(x \wedge y) \equiv \text{Min}(\mu(x), \mu(y))$;
- (3) 最大(Maximum): $\mu(x \vee y) \equiv \text{Max}(\mu(x), \mu(y))$;
- (4) 限界差(Bounded-Difference):

$$\mu(x \ominus y) \equiv \begin{cases} 0, & \text{若 } \mu(x) \leq \mu(y), \\ \mu(x) - \mu(y), & \text{其它;} \end{cases}$$

- (5) 限界和(Bounded-Sum):

$$\mu(x \oplus y) \equiv \begin{cases} 1, & \text{若 } \mu(x) + \mu(y) \geq 1; \\ \mu(x) + \mu(y), & \text{其它;} \end{cases}$$

- (6) 限界积(Bounded-Product):

$$\mu(x \odot y) \equiv \begin{cases} 0, & \text{若 } \mu(x) + \mu(y) \leq 1 \\ \mu(x) + \mu(y) - 1, & \text{其它;} \end{cases}$$

- (7) 蕴涵(Implication):

$$\mu(x \rightarrow y) \equiv \begin{cases} 1, & \text{若 } \mu(y) \geq \mu(x); \\ 1 - \mu(x) + \mu(y), & \text{其它;} \end{cases}$$

- (8) 对称差(Absolute-Difference):

$$\mu(x \Delta y) \equiv \begin{cases} \mu(x) - \mu(y); & \text{若 } \mu(x) \geq \mu(y); \\ \mu(y) - \mu(x), & \text{其它。} \end{cases}$$

以上八种模糊逻辑运算中补、最大与最小是最基本的三种运算,它们与单位元 $[0, 1]$ 一起可以构成一个模糊代数 $Z \equiv \langle [0, 1], \vee, \wedge, - \rangle$; 其中“ \vee ”、“ \wedge ”和“-”分别表示最大,最小和补运算。利用这一逻辑代数法则可构成任意的模糊逻辑函数。下面我们将给出上述逻辑中前四种逻辑门的设计与实验结果。

图 1~3(a) 给出了实现补、限界差、最小和最大这四种基本逻辑运算的三个简单的光电子回路。图中的光电三极管(PD)、发光二极管(LED)和运算放大器 A 均被选定在线性工作区。一般地这三种元件均存在着截止、线性和饱和三个区域。放大器 A 在放大倍数适中时具有良好的线性。LED 虽不存在明显的阈值特性,但仍需要约为 0.5V 的正向压降。线性区域最小的是光电三极管,它需要有一定的基极偏置以便在线性工作区选择工作点,而且输入光强不能过大。在本实验的条件下,输入光强一般均小于 $50\mu\text{W}$, 远远低于其饱和光强,所以不存在饱和状态。光电三极管的基极偏置可采用基极引线加入一定的偏置电流的方法,这样做还可改

善光电三极管的温度特性并且提高其响应速度。逻辑运算实际上仅由 PD 的不同组合决定。运算放大器与 PD 为同相连接。在没有信号输入时,保持放大器的同相输入端的电位接近于 0(偏置一个大约为 0.5V 的正电位,以便为输出发光二极管提供一个正向导通电压)。运算放大器的放大倍数由 $A=1+(R_2/R_1)$ 决定。为了使输入输出在为 1 时具有相同的幅值,因而要求 PD, LED 和运算放大器 A 满足条件 $\alpha K A=1$; 其中 α 为 LED 电光转换效率, K 为 PD 的光电转换系数,而 A 为放大器的放大倍数。实验中, $\alpha \approx 1 \mu\text{W}/\text{mA}$, $K \approx 10^{-3} \text{mA}/\mu\text{W}$, 意味着 $A \approx 1000$ 。放大器的放大倍数可由调节 R_1 和 R_2 来改变。因而上述条件很容易满足。

图 1(a) 中输入端为两个光电三极管 PD_1 与 PD_2 的串联, 并且对称偏置。输入信号分别为 1 和 $\mu(x)$ 。由于光电流信号是从两个 PD 之间取出的, 因而光电流 I_d 可直接给出其相减的结果:

$$I_d = K(P(1) - P(\mu(x))) \quad (1)$$

$P(1)$ 和 $P(\mu(x))$ 分别为信号 1 和 $\mu(x)$ 的光强。图 1(b) 为补运算的实验结果。输入信号由直接调制的 LED 提供。为了能充分地、动态地描述模糊逻辑操作, 我们用连接变化的正弦光信号作为输入。在演示限界差、最小和最大运算时, 需要两个交错重叠的正弦信号, 因而我们采用了一个相移电路将一个正弦信号分成了两个相位差约为 $\pi/2$ 的正弦信号, 分别表示 $\mu(x)$ 和 $\mu(y)$ 。

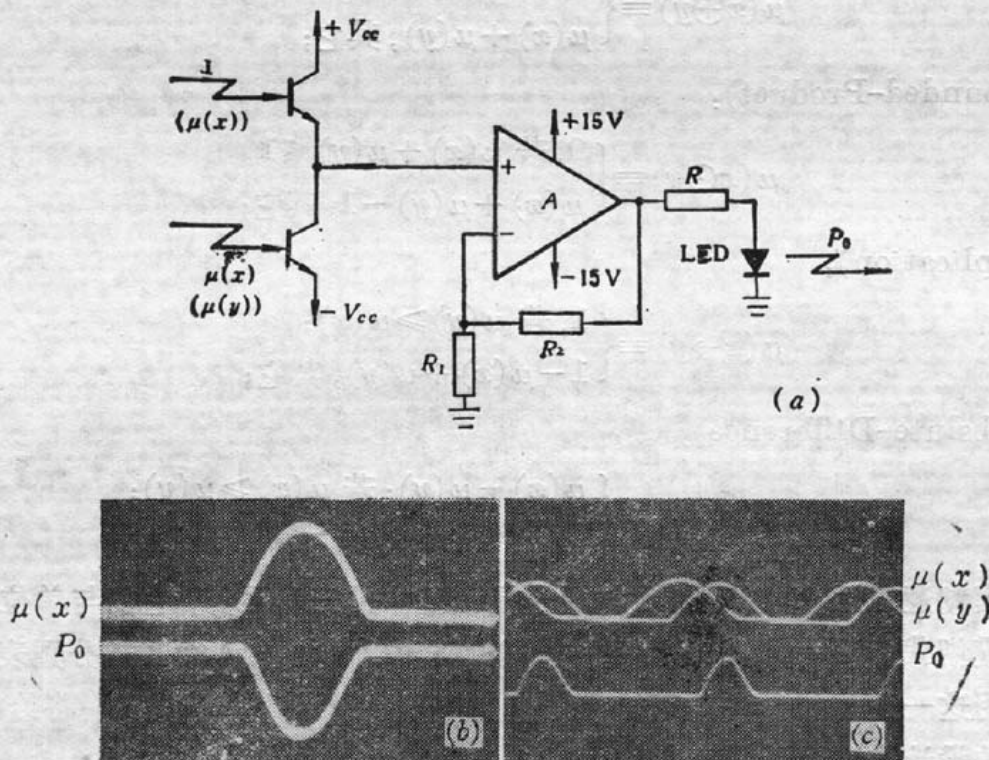


Fig. 1 (a) Circuit diagram of the fuzzy complement and bounded-difference gate; Experimental results; (b) complement; (c) bounded-difference

限界差逻辑运算实现了 $\mu(y)$ 相对于 $\mu(x)$ 的补, 因而可以用 $\mu(x)$ 取代信号 1, 用 $\mu(y)$ 取代 $\mu(x)$, 通过图 1(a) 所示的补门来实现, 因此补门线路也是一个限界差门。图 1(c) 为限界差逻辑运算的实验结果。

图 2(a) 为最小逻辑门的线路图。图中输入端也由两个光电三极管 PD_1 与 PD_2 串联构成。其输入信号分别为 $\mu(x)$ 和 $\mu(y)$, 从文献[4]中的分析可知

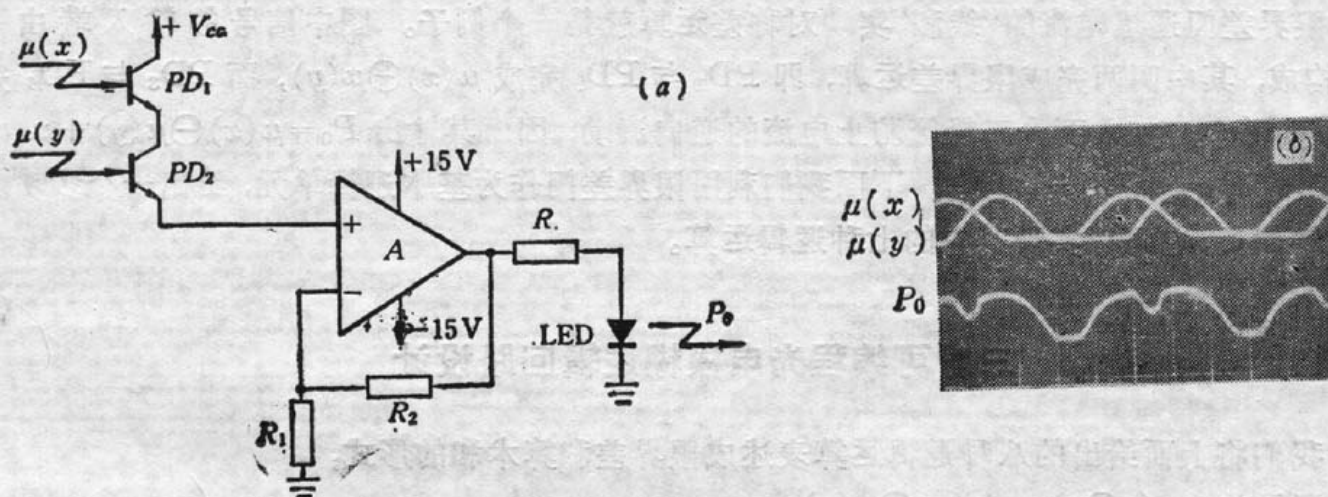


Fig. 2 (a) Circuit diagram of the fuzzy minimum gate; (b) Experimental result

$$I_a = K \text{Min}[P(\mu(x)), P(\mu(y))] \quad (2)$$

因而其输出 P_0 直接给出 $\mu(x)$ 和 $\mu(y)$ 的最小值运算。图 2(b) 为模糊最小运算的实验结果。

图 3(a) 为模糊最大门的线路图。其输入端由 4 个 PD 构成，其中 PD_1 与 PD_2 并联而 PD_3 与 PD_4 串联在一起。两个输入信号 $\mu(x)$ 和 $\mu(y)$ 分别同时输入到 PD_1 与 PD_2 和 PD_3 与 PD_4 上。 PD_1 与 PD_2 给出的光电流为这两个信号的代数和，即

$$I_{a1} = KP(\mu(x)) + KP(\mu(y)); \quad (3)$$

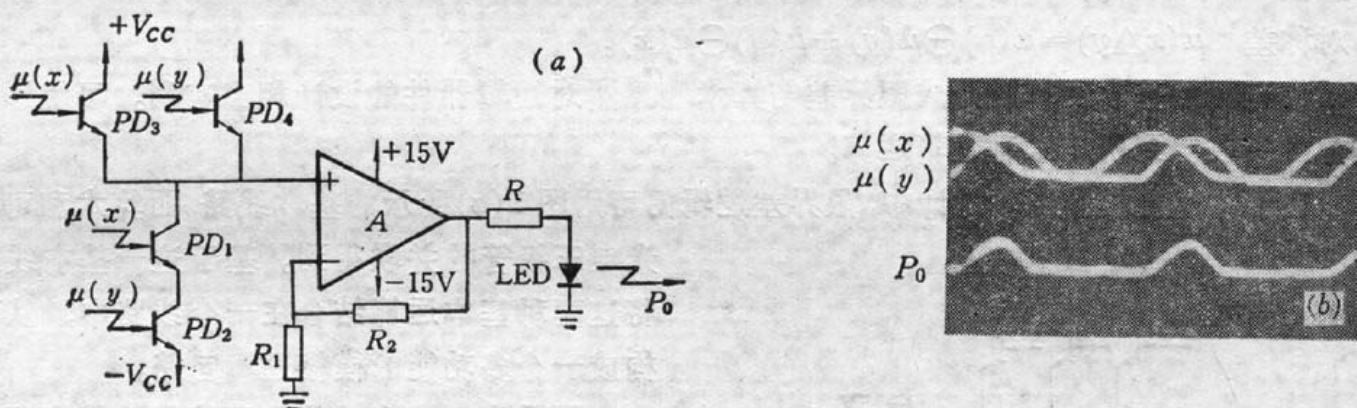


Fig. 3 (a) Circuit diagram of the maximum gate; (b) Experimental result

而 PD_3 与 PD_4 给出的光电流为两个信号的最小值运算：

$$I_{a2} = K \text{Min}[P(\mu(x)), P(\mu(y))], \quad (4)$$

因而净电流为

$$I_a = I_{a1} - I_{a2} = K \text{Max}[P(\mu(x)), P(\mu(y))], \quad (5)$$

即输出 P_0 为 $\mu(x)$ 和 $\mu(y)$ 的最大值。图 3(b) 为模糊逻辑最大的实验结果。

Yamakawa 等人曾证明^[5]，利用限界差和代数和运算作为基本运算可实现其它的逻辑运算。代数和可以通过电流的“线和”(Wired-Sum)得到。因而用限界差来构成其它运算是相当方便的，因为这样可将基本的逻辑单元减少到一个。图 4 给出的用

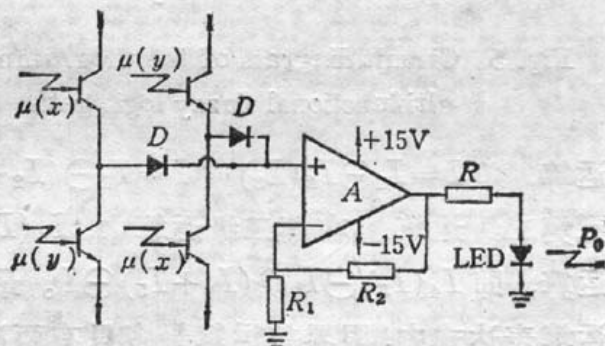


Fig. 4 Diagram of the absolute-difference gate using two bounded-difference gate

两个限界差门通过电流的“线和”实现对称差运算就是一个例子。图中信号的输入端由4个PD构成,其中两两完成限界差运算,即 PD_1 与 PD_2 完成 $\mu(x)\ominus\mu(y)$,而 PD_3 与 PD_4 完成 $\mu(y)\ominus\mu(x)$ 。加入两个二极管防止电流的逆向流动,因而其输出 $P_0=\mu(x)\ominus\mu(y)+\mu(y)\ominus\mu(x)$,即 $P_0=|\mu(x)-\mu(y)|$ 。下面我们利用限界差门作为基本逻辑单元,给出一个多功能的模糊逻辑门,它可以实现其它的七种逻辑运算。

三、可编程光电模糊逻辑回路设计

我们将上面给出的八种逻辑运算表述成限界差和算术和的形式:

- (1) 限界差 $\mu(x\ominus y) = \mu(x)\ominus\mu(y)$;
- (2) 补 $\mu(\bar{x}) = 1\ominus\mu(x)$;
- (3) 最大 $\mu(x\vee y) = \mu(x)\ominus\mu(y) + \mu(y)$; 或
 $= \mu(y)\ominus\mu(x) + \mu(x)$
- (4) 最小 $\mu(x\wedge y) = \mu(x)\ominus[\mu(x)\ominus\mu(y)]$; 或
 $= \mu(y)\ominus[\mu(y)\ominus\mu(x)]$;
- (5) 限界和 $\mu(x\oplus y) = 1\ominus(1\ominus(\mu(x)+\mu(y)))$;
- (6) 限界积 $\mu(x\odot y) = (\mu(x)+\mu(y))\ominus 1$;
- (7) 蕴涵 $\mu(x\rightarrow y) = 1\ominus(\mu(x)\ominus\mu(y))$;
- (8) 对称差 $\mu(x\triangle y) = \mu(x)\ominus\mu(y) + \mu(y)\ominus\mu(x)$ 。

模糊逻辑的基本运算展开成限界差与算术和显然对逻辑器件的设计相当有利。可使用限界差门的级联得到所有八种逻辑运算。

在我们的光电模糊逻辑设计中,限界差逻辑门可用图1(a)所示的基本线路,而算术和可由

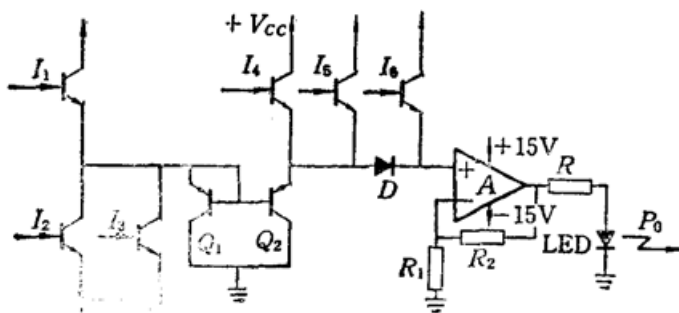


Fig. 5 Circuit diagram of the programmable multifunctional fuzzy logic gate

光电三极管的并联得到。基于这一基本线路将这两种基本运算结合在一个线路中,从而构成一个多功能的模糊逻辑回路。

图5为一个多功能的可编程的模糊逻辑门的线路图。该回路有六个光电三极管作为输入信号 $I_1\sim I_6$ 的输入端。由两个P-N-P三极管构成的电流镜作为电流的复制和隔离元件。二极管D作为逆流阻止元件。由图

可看出, I_1 与 I_2 , I_3 可以实现第一级限界差运算,即 $I=I_1\ominus I_2(I_3)$ 或 $I=I_1\ominus(I_2+I_3)$ 。第一级的限界差运算的结果由电流镜复制并送到第二级运算。在第二级运算中, $I_4(I_5)$ 或 I_4+I_5 与前一级的结果I可以进行第二级限界差运算,即 $I_4(I_5)\ominus I$ 或 $(I_4+I_5)\ominus I$ 。最后, I_6 可以与第二级的运算结果相加。在上述的逻辑运算表达式中,限界差运算最多只有两次,因而适当地选择信号 1 、 $\mu(x)$ 和 $\mu(y)$ 在 $I_1\sim I_6$ 不同输入端输入,则该回路可实现除对称差以外的七种逻辑运算。如在完成限界和时,可以选择 $I_1=1$, $I_2=\mu(x)$, $I_3=\mu(y)$, I_5 或 $I_4=1$, $I_6=0$,则可得到 $P_0=I_5\ominus(I\ominus(I_2+I_3))=1\ominus(1\ominus(\mu(x)+\mu(y)))=\mu(x\oplus y)$ 。表1给出了该逻辑回路在完成不同的逻辑运算时的输入分配。

Table 1 Input assignment of the multi-functional programmable fuzzy logic gate for different logic implementations

Name of the implementation	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6
Bounded-difference	$\mu(y)$	—	—	—	$\mu(x)$	—
Complement	$\mu(x)$	—	—	—	1	—
Maximum	$\mu(y)$	—	—	—	$\mu(x)$	$\mu(y)$
Minimum	$\mu(x)$	$\mu(y)$	—	—	$\mu(x)$	—
Bounded-sum	1	$\mu(x)$	$\mu(y)$	—	1	—
Bounded-product	1	—	—	$\mu(x)$	$\mu(y)$	—
Implication	$\mu(x)$	$\mu(y)$	—	1	—	—

这七种基本逻辑运算可通过编程实时地由该回路完成。我们可由每个输入端都加上 1、 $\mu(x)$ 和 $\mu(y)$ 这三个输入信号,用开关来实时地选择 $I_1 \sim I_6$ 的输入分配。我们在光电子多值逻辑设计中给出的多路选择开关回路^[6]可用来作为该逻辑回路的输入程控。只需将三值的最小逻辑门换成图 2(a)所示的模糊最小门即可。选择控制信号 $K_i=0, 1, 2$; 其中 $i=1, 2, \dots, 6$, 可以得到 1, $\mu(x)$ 和 $\mu(y)$ 这三个输入信号。

参 考 文 献

- 1 L. Liu, *Opt, Commun.*, **73**, 183(1989)
- 2 H. Mada, in Technical Digest of the 1990 International Topical Meeting on Optical Computing, paper 10 P4, Japan, 1990
- 3 H. J. Caufield, *Appl, Opt.*, **29**, 2600(1990)
- 4 S. Liu, J. Wu, C. Li., *Opt, Lett.*, **15**, 691(1990)
- 5 T. Yamakawa *et al.*, The Transactions of the IECE of Japan, 64C, 147(1981)
- 6 刘树田 *et al.*, 中国激光, **18**, 691 (1991)