

# 基于多值逻辑的高速 ECL 模糊控制表查询电路<sup>1</sup>

陈华华 沈继忠

(浙江大学信息与电子工程学系 杭州 310028)

**摘 要** 该文指出了硬件实现模糊控制表查询电路存在结构复杂、用数字式实现时设计困难等问题,提出了将模糊控制表转换为多值 K 图,利用 K 图从开关级设计模糊控制表查询电路的方法,并用此方法具体设计了一个论域元素个数为 5 的 ECL 模糊控制表查询电路。从设计实例看,该文提出的设计方法简单易行,而设计的 ECL 查询电路具有结构简单和高速推理的优点。

**关键词** 模糊控制表,多值逻辑,K 图,ECL 电路

**中图分类号** TN791

## 1 引言

查询表方式的模糊控制器是模糊控制器最基本的形式,这种控制器将模糊控制规则最终转化为一个查询表又叫控制表,由于这种形式的模糊控制器具有结构简单,实施方便,资源开销少,在线运算快的特点,因此得到了广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。

模糊控制表的查询有两种方案来实现,即硬件方式和软件方式。对响应速度要求不高的对象,往往用软件来实现;而对响应速度要求高的对象,往往用硬件来实现<sup>[1,4,5]</sup>。硬件实现由于响应速度快,所以在模糊控制技术中的应用比例逐年在增加,但由于其所需的元件多,结构复杂,而集成电路由于芯片面积的限制,因此硬件实现模糊控制表查询往往需要多组芯片,导致其价格昂贵,抑制了硬件模糊控制器应用的普及推广<sup>[6,7]</sup>。因此,研究结构简单、设计方便、性能优良的控制表查询的硬件实现一直是国际上模糊控制研究的重要领域。

本文将首先提出模糊控制表转换成多值 K 图的方法,进而利用 K 图提出了从开关级设计 ECL<sup>[8,9]</sup>模糊控制表查询电路的方法,并给出了一个论域元素个数为 5 的模糊控制表查询电路的 ECL 设计实例。利用 ECL 电路来实现查询电路,主要是考虑到 ECL 电路是速度最快的实用双极型电路<sup>[10]</sup>,更符合模糊控制实时推理的要求。

## 2 模糊控制查询表与多值 K 图的转换

在模糊控制中,将输入变量进行量化得到其模糊量,并在模糊规则基础上得到对应输出控制量的模糊量,根据输入输出的关系可以建立模糊控制表。采用模糊控制表设计的简单的模糊控制器具有设计相对简单、控制性能好的特点<sup>[4]</sup>。为讨论简单和典型性,下面以简单模糊控制器作为讨论对象。

设简单的模糊控制器的输入变量为误差  $E$  及误差的变化  $E_C$ ,输出变量为控制量  $U$ 。 $E$  的论域为  $\{-m, -(m-1), \dots, 0, \dots, (m-1), m\}$ ,  $E_C$  的论域为  $\{-n, -(n-1), \dots, 0, \dots, (n-1), n\}$ ,  $U$  的论域为  $\{-k, -(k-1), \dots, 0, \dots, (k-1), k\}$ 。由此可得到一个二维的模糊控制器的控制表如表 1 所示,其中  $k_{ij} \in U$ ,  $i \in [0, 2m+1]$ ,  $j \in [0, 2n+1]$ 。

对如表 1 所示的控制表进行分析可发现:

(1) 当  $m = n = k$  时,此时  $E, E_C, U$  的论域的元素个数相等,控制表是一张  $(2n+1) \times (2n+1)$  的表格,这与多值逻辑分析方法中的 K 图极为相似<sup>[11]</sup>,不同在于常用的多值逻辑 K 图中的变量和函数值通常取正数,而控制表中则正负值都有。但是可以看到,尽管控制表中变量  $E, E_C$  和  $U$  的取值有正负之分,但一般控制表的  $E, E_C, U$  的取值都满足全序关系,如果对变量  $E,$

<sup>1</sup> 2001-04-13 收到, 2001-09-13 定稿

表 1 二维模糊控制器的控制表

$E_C$	$-n$	$-(n-1)$	$\cdots$	$0$	$\cdots$	$(n-1)$	$n$
$E$	$U$						
$-m$	$k_{00}$	$k_{01}$	$\cdots$	$k_{0(n+1)}$	$\cdots$	$k_{0(2n)}$	$k_{0(2n+1)}$
$-(m-1)$	$k_{10}$	$k_{11}$	$\cdots$	$k_{1(n+1)}$	$\cdots$	$k_{1(2n)}$	$k_{1(2n+1)}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$0$	$k_{(m+1)0}$	$k_{(m+1)1}$	$\cdots$	$k_{(m+1)(n+1)}$	$\cdots$	$k_{(m+1)(2n)}$	$k_{(m+1)(2n+1)}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$(m-1)$	$k_{(2m)0}$	$k_{(2m)1}$	$\cdots$	$k_{(2m)(n+1)}$	$\cdots$	$k_{(2m)(2n)}$	$k_{(2m)(2n+1)}$
$m$	$k_{(2m+1)0}$	$k_{(2m+1)1}$	$\cdots$	$k_{(2m+1)(n+1)}$	$\cdots$	$k_{(2m+1)(2n)}$	$k_{(2m+1)(2n+1)}$

$E_C$  和  $U$  的值取模  $(2n+1)$  加, 并按  $E, E_C$  取值的大小重新排列控制表, 那么得到的控制表和基为  $(2n+1)$  的多值逻辑 K 图完全一致。

(2) 当  $m \neq n \neq k$  时,  $E, E_C, U$  的论域的元素个数不相等, 此时可取  $t = \max(m, n, k)$ , 将各论域拓展为  $\{-t, -(t-1), \dots, 0, \dots, (t-1), t\}$ 。这样误差  $E$  或误差变化量  $E_C$  的扩展部分对应的控制量  $U$  将没有元素值, 以扩展前  $E$  或  $E_C$  的最大值或最小值所对应的  $U$  元素值填上。这就构成了与  $m = n = k$  时一样的控制表, 即可按照情况 (1) 来处理。由于实际控制表中的  $E$  与  $E_C$  不会取到扩展后的值, 因此用扩展后的控制表不会影响实际控制结果。

从上述讨论可知, 模糊控制表可以用多值逻辑函数  $U = f(E, E_C)$  的 K 图来表示。同时, 尽管上述讨论只是对  $E, E_C$  二维展开的, 但这一方法可以推广至多维的模糊控制表, 在 K 图上表现为对行或列上变量数的扩展, 因此就可以利用多值逻辑 K 图设计模糊控制表查询电路, 为模糊控制表查询的硬件实现提供了一种方法。

### 3 设计实例

#### 3.1 适合于多值 ECL 电路设计的差动电流开关理论

开关信号理论可指导数字电路的开关级设计, 它区分了电路中的两类变量: 开关变量 (用  $\alpha, \beta, \gamma, \dots$  表示, 其取值为开关的通、断二个状态, 用  $T, F$  表示) 和信号变量 (用  $x, y, z, \dots$  表示, 对于  $R$  值逻辑, 其取值为  $0, 1, 2, \dots, R-1$ ), 并分别建立了开关代数和信号代数系统<sup>[8]</sup>。这二类代数系统又可用二类联结运算互相联结。

对于适用于多值 ECL 电路开关级设计的差动电流开关理论<sup>[12]</sup>, 它能正确描述多值 ECL 电路中晶体管元件的开关状态及信号形成的联结运算, 定义如下:

##### 联结运算 1

低阈比较运算

$$x^t = \begin{cases} T, & x < t \\ F, & x > t \end{cases} \quad (1)$$

高阈比较运算

$${}^t x = \begin{cases} T, & x > t \\ F, & x < t \end{cases} \quad (2)$$

(1), (2) 式描写了信号对元件开关状态的控制作用, 其中  $x \in \{0, 1, \dots, R-1\}$ , 阈値  $t \in \{0.5, 1.5, \dots, R-1.5\}$ 。

##### 联结运算 2

$$r \nabla \alpha = \begin{cases} r, & \alpha = T \\ 0, & \alpha = F \end{cases} \quad (3)$$

(3) 式描写了元件的开关状态对信号形成的控制作用, 其中  $r \in \{0, 1, \dots, R-1\}$ 。

与上述运算有关的主要性质有

$$\left. \begin{aligned} x^t &= \tilde{x} \\ {}^t x &= \tilde{x} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$(x \triangleright \alpha) \cap (y \nabla \beta) = (x \cap y) \triangleright (\alpha \cdot \beta) \quad (5)$$

$$(x \triangleright \alpha) \triangleright \beta = x \triangleright (\alpha \cdot \beta) \quad (6)$$

$$(x \triangleright \alpha) \cup (x \triangleright \beta) = x \triangleright (\alpha + \beta) \quad (7)$$

上述式中符号“ $\sim$ ”, “ $\cap$ ”, “ $+$ ”分别表示求反、取小、或运算。

### 3.2 用 ECL 电路实现模糊控制表实例

例 设计某一模糊控制表如表 2 所示的模糊控制器。

由表可知该控制表各变量和值的论域元素个数为 5, 利用上节提出的方法对控制表中的变量  $E$ ,  $E_C$  和  $U$  的值进行模 5 加, 得到基为 5 的 5 值逻辑 K 图, 如图 1(a) 所示。由图 1(a) 可写出控制量  $U$  的 5 值逻辑函数表达式为

$$\begin{aligned} U &= (1 \triangleright^{0.5} E \cdot E^{1.5} \cdot E_C^{0.5}) \cup (1 \triangleright^{0.5} E^{0.5} \cdot {}^{0.5} E_C \cdot E_C^{1.5}) \cup (1 \triangleright^{3.5} E \cdot {}^{1.5} E_C \cdot E_C^{2.5}) \\ &\cup (1 \triangleright^{1.5} E \cdot E^{2.5} \cdot {}^{2.5} E_C) \\ &\cup (2 \triangleright^{0.5} E \cdot E^{2.5} \cdot {}^{0.5} E_C \cdot E_C^{2.5}) \cup (2 \triangleright^{1.5} E \cdot E^{2.5} \cdot E_C^{0.5}) \cup (2 \triangleright^{0.5} E \cdot {}^{1.5} E_C \cdot E_C^{2.5}) \\ &\cup (3 \triangleright^{2.5} E \cdot {}^{2.5} E_C) \cup (3 \triangleright^{0.5} E \cdot {}^{2.5} E_C \cdot E_C^{3.5}) \cup (3 \triangleright^{2.5} E \cdot E \cdot E_C^{0.5}) \\ &\cup (4 \triangleright^{3.5} E \cdot E_C^{0.5}) \cup (4 \triangleright^{0.5} E \cdot {}^{3.5} E_C) \cup (4 \triangleright^{0.5} E \cdot E^{1.5} \cdot {}^{2.5} E_C \cdot E_C^{3.5}) \\ &\cup (4 \triangleright^{2.5} E \cdot E \cdot E_C^{3.5} \cdot {}^{0.5} E_C \cdot E_C^{1.5}) \end{aligned} \quad (8)$$

由 (8) 式可得其 ECL 实现的电路, 如图 1(b) 所示。

对图中的晶体管采用文献 [13] 的参数, 电源电压取值为  $-15V$ ,  $I_0$  取值为  $1mA$ , 所有电阻取值为  $800\Omega$ 。对图 1(b) 所示电路用 PSPICE 进行了模拟, 模拟结果表明电路完成了正确的逻辑功能, 即得到了正确的查表结果, 其平均延时为  $1.1ns$ , 即电路工作速度相当于  $10^9$  FIPS(每秒钟推理次数)<sup>[14]</sup>。图 1(c) 是查询电路工作时的 PSPICE 模拟曲线。

表 2 模糊控制表

$E_C$	-2	-1	0	1	2
$E$					
-2	-2	-2	-2	-1	0
-1	-2	-2	-1	0	1
0	-2	-1	0	1	2
1	-1	0	1	2	2
2	0	1	2	2	2

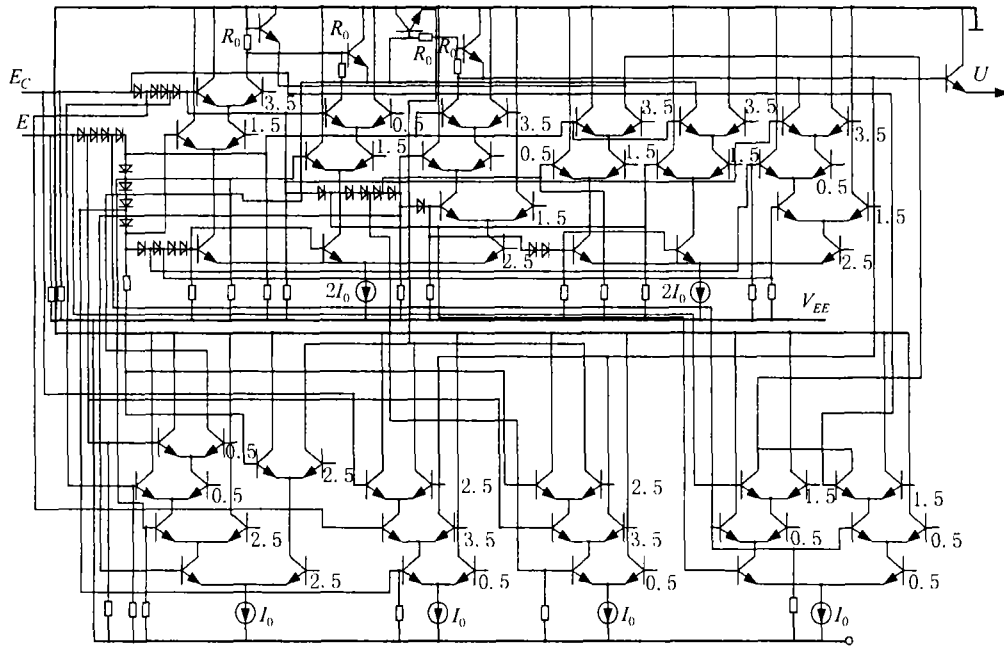
在电路实现过程中, 采用了多个开关的串联, 为保证各晶体管导通时工作在放大区, 电源电压取作  $-15V$ , 这可能使电路的功耗比较大, 可用文献 [15, 16] 提出的方法将开关串联方式转化为并联方式, 并降低工作电压, 从而使电路的功耗下降。

## 4 结 论

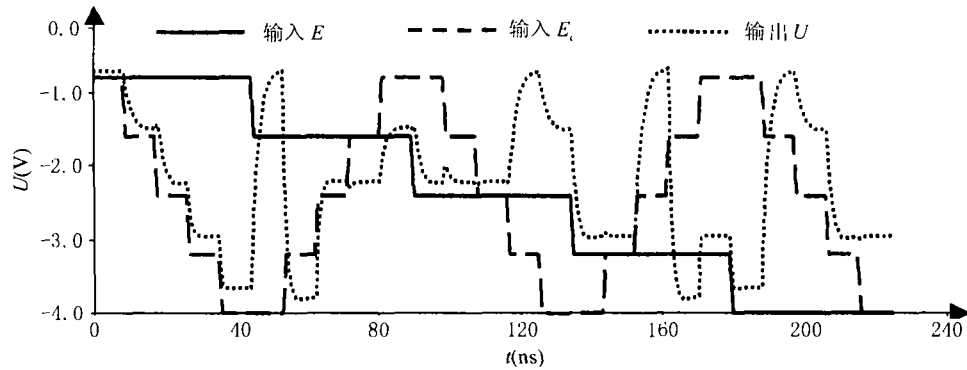
本文首先提出了模糊控制表硬件实现方式中存在电路结构复杂、设计困难的问题, 进而提出了将模糊控制表转化为多值逻辑 K 图的方法, 并从开关级出发给出了论域元素个数为 5 的

$E_c$	0	1	2	3	4
0	0	1	2	3	4
1	1	2	2	4	0
2	2	2	2	0	1
3	3	4	0	3	3
4	4	0	1	3	3

(a) 模糊控制表的 5 值逻辑 K 图表示



(b) 模糊控制表查询的 ECL 电路



(c) 模糊控制表查询的 ECL 电路的 PSPICE 模拟曲线

图 1

ECL 模糊控制表查询电路。设计实例表明,用多值逻辑 K 图方法设计模糊控制表查询电路简单易行,且设计的电路不仅结构简单,而且具有高速推理的优点。因此,本文提出的模糊控制表查询的实现方式是一种有效的硬件实现方式。

### 参 考 文 献

- [1] 王守臣, 诸静等, 基于多值逻辑电路和二值 PLA 的硬件模糊控制器, 电子学报, 1998, 26(8), 86-88.
- [2] G. M. Abdelnour, C. H. Chang, F. H. Huang, J. Y. Cheung, Design of a fuzzy controller using input and output mapping factors, IEEE Trans. on Syst., Man and Cyber., 1991, SMC-21(5), 952-960.
- [3] ChengMing Liaw, JinBian Wang, Design and implementation of a fuzzy controller for a high performance induction motor drive, IEEE Trans. on Syst., Man and Cyber., 1991, SMC-21(4), 921-929.
- [4] 李士勇, 模糊控制, 神经控制和智能控制论, 哈尔滨, 哈尔滨工业大学出版社, 1996, 276-282.
- [5] 王磊, 王为民, 模糊控制理论及应用, 北京, 国防工业出版社, 1997, 32-52.
- [6] J. W. Fattaruso, S. S. M. Shetti, J. B. Barton, A fuzzy logic inference processor, IEEE J. of Solid-State Circuits., 1994, JSSC-29(4), 397-402.
- [7] 张曾科, 模糊数学在自动化技术中的应用, 北京, 清华大学出版社, 1997, 141-143.
- [8] 吴训威, F. Prosser, 数字电路的开关级设计理论, 中国科学 (E 辑), 1996, 26(3), 257-265.
- [9] M. Muroga, VLSI System Design, New York, John Wiley & Sons Inc, 1982, 113-129.
- [10] M. I. Elmasry, Digital Bipolar Integrated Circuits, New York, John Wiley & Sons, 1983, 103-117.
- [11] 吴训威, 多值逻辑电路设计原理, 杭州, 杭州大学出版社, 1994, 315-358.
- [12] X. Wu, Z. Zhang, Theory of differential current switches and design of ternary ECL circuits at switch level, Int. J. of Electronics, 1991, 71(6), 1023-1035.
- [13] R. X. Gu, M. I. Elmasry, Novel high speed circuit structure for BiCMOS environment, IEEE J. of Solid-State Circuits, 1995, JSSC-30(5), 563-570.
- [14] 郑启伦, 兰斌, 赵明, 黄贯光, 一种高速模糊控制器的硬件设计, 电子学报, 1996, 24(2), 106-108.
- [15] 姚茂群, 陈华华, 沈继忠, 基于并联开关技术的 ECL 电路设计, 浙江大学学报 (理学版), 2001, 28(2), 144-148.
- [16] 陈华华, 黄志存, 沈继忠, 基于低电压的低功耗二值 ECL 电路开关级设计, 中国电路与系统 2001 年会议论文集, 宁波, 2001.5, 299-304.

## HIGH-SPEED ECL CIRCUIT FOR LOOKING UP FUZZY CONTROL TABLE BASED ON MULTIVALUED LOGIC

Chen Huahua      Shen Jizhong

(Dept. of Info. Sci. and Electron. Eng., Zhejiang Univ., Hangzhou 310028, China)

**Abstract** Starting from the problem of complicated structure and difficult design using digital circuits in hardware implementation of fuzzy control table, a method for converting the fuzzy control table to K-map of multivalued logic and designing fuzzy control table look-up circuit at switch-level using the K-map is proposed. Using the method, the ECL circuit for implementing the table of the universe composed of five elements is designed. The example shows that the method has the characteristics of simple and feasible, and the designed ECL circuit has simple structure and high-speed inference ability.

**Key words** Fuzzy control table, Multivalued logic, K-map, ECL circuits

陈华华: 男, 1975 年生, 硕士生, 主要研究方向为数字电子学与模糊控制.

沈继忠: 男, 1965 年生, 教授, 主要研究方向为数字电子学, 集成电路设计.