

双极型电路通用综合方法与电路三要素理论¹

刘莹

(黑龙江大学理学院 哈尔滨 150080)

摘要 该文在电路三要素(信号,网络和负载)理论的基础上提出双极型电路通用综合方法.文中首先引入适用于电压型和电流型电路的广义二值信号,推导出源信号和负载简化定理.由此分析各单元电路结构和推导出相应的元件级电路表达式,进一步找出一种新的电路实现方式.在此基础上设计出新的低压 TTL 和多射型 ECL 元件级电路.最后经过电路实验证明理论的正确性.

关键词 电路三要素理论,双极型电路综合方法,广义二值信号,低压 TTL 和多射型 ECL 电路
中图分类号 TN79

1 基本原理

由于实际信号都是有内阻的信号源,可以用电压源模型,也可以用电流源模型,二者可以相互等价转换,因而对电流控制的双极型开关器件(如 TTL 和 ECL 电路)也可以采用电压源模型^[1].本文引入广义二值信号,设对开关器件作用的物理量(电压或电流)为 f ,若 f 大于(或小于)域值 t ,则取为 1,反之取为 0. TTL 和 ECL 元件级电路内部各个开关器件的域值 t 互不相同,因而高低电平(电流)必然也互不相同,很难统一,但是基于输出效果的广义二值信号是统一的.文献 [2] 已推导出网络转换定理如下:

定理 1 多源信号 x_i 经开关 $\langle F_i \rangle$ 送至输出 $y(i \in K = \{1, 2, \dots, K\})$ 表示为 $y =$

$$\bigvee_{i \in K} x_i \langle F_i \rangle |_{\epsilon} = \sum_{i \in K} x_i F_i + \epsilon \overline{\sum_{i \in K} F_i}, \forall i, j \in K, \text{若 } x_i \neq x_j, \text{则 } F_i \cdot F_j = 0.$$

定理 2 (源信号和负载简化定理) 源信号 $x_i(a_i)$ 和负载 $\epsilon(b)$ 具有相关性的电路可简化为

$$y = \bigvee_{i \in K} x_i(a_i) \langle a_i \rangle |_{\epsilon = \epsilon(b)} = \bigvee_{i \in K} x_i(1) \langle a_i \rangle |_{\epsilon = \epsilon(0)}, \text{其中 } b = \overline{\sum_{i \in K} a_i}.$$

证明 因为 $a_i \cdot x_i(a_i) = a_i \cdot x_i(1), \bar{b} \cdot \epsilon(b) = \bar{b} \cdot \epsilon(0)$, 利用定理 1 得出 $y = \bigvee_{i \in K} x_i(a_i) \langle a_i \rangle$

$$|_{\epsilon = \epsilon(b)} = \sum_{i \in K} a_i x_i(a_i) + \epsilon(b) \overline{\sum_{i \in K} a_i} = \sum_{i \in K} a_i x_i(1) + \epsilon(0) \overline{\sum_{i \in K} a_i} (\text{因 } b = \overline{\sum_{i \in K} a_i}) = \bigvee_{i \in K} x_i(1) \langle a_i \rangle$$

$|_{\epsilon = \epsilon(0)}$ (利用定理 1).

定理 2 表明,与开关有相关性的源信号 $x_i(a_i)$ 和负载 $\epsilon(b)$ 可以用开关 $\langle a_i \rangle$ 导通时的源信号 $x_i(1)$ 和输出开路时的负载 $\epsilon(0)$ 来代替,从而达到简化计算的目的.

2 双极型元件级单元电路表达式

双极型常用的典型电路结构有多集式,多基式和多射式,分别叙述如下:

¹ 2000-05-10 收到, 2000-10-30 定稿
黑龙江省自然科学基金资助项目

$$y_1 = 0 < a >^R |_{\varepsilon=1} = \bar{a}, \quad y'_1 = 1 < a >^R |_{\varepsilon=0} = a \quad (\text{反相器和跟随器}) \quad (1)$$

$$y_2 = 0 (< a > \parallel < b >)^R |_{\varepsilon=1} = \overline{a+b}, \quad y'_2 = 1 (< a > \parallel < b >)^R |_{\varepsilon=0} = a+b \quad (2)$$

注意: 负载电阻 R 必接至输出端, 而源内阻 R 必对源信号, 按 (1) 式和 (2) 式画出电路, 如图 1(a) 所示。图中 y_1, y'_1 和 y_2, y'_2 二对互反输出是由两式联立方程描述, 即 (1) 式或 (2) 式。图 1(a) 右部为共发射极和共集电极, 称为多基式电路, 但不能制成一管。图 1(b) 所示的多射管称为多射式电路, 通常采用集电极输出, 显然集电结等效一个常通开关 $< 1 >$, $\varepsilon = 0$ 负载常常是下级输入电阻, 由此实现与功能, 得出,

$$y_3 = abc p < 1 > |_{\varepsilon=0} = abc p \cdot 1 + \varepsilon \bar{1} = abc p \quad (\text{多射管 1}) \quad (3)$$

图 1(c) 电路选取一发射极 p 作为输出, 接负载电阻 R 。该发射结有截止和导通二个状态, 且受输入 abc 的控制, 即源信号和控制信号都是 abc , 再利用定理 2 简化源信号, 于是得出 (该多射管仍实现与功能, 但结构与上不同),

$$y_4 = abc < abc > |_{\varepsilon=0} = 1 < abc > |_{\varepsilon=0} = abc \cdot 1 + \varepsilon \cdot \overline{abc} = abc \quad (\text{多射管 2}) \quad (4)$$

文献 [3] 将 R 看作为输入端负载, 而本文将 R 作为 $\varepsilon = 0$ 负载, p 作为输出端。前者考虑的是输入端负载特性, 后者考虑的是输出端负载特性, 特性很相似², 二者效果大不一样。根据 (4) 式和定理 2, 立即得出一种新的与或功能 (常规 TTL 工艺) 实现方式^[4], 示于如图 1(d) 左部 (二多射管射极输出并接, 实现与或功能), 由此得出

$$y_5 = abc < abc > |_{\varepsilon=0} = 1 < abc > |_{\varepsilon=0} = abc + def \quad (5)$$

常规 TTL 不能仿照上法将二多射管集电极并接。利用此特性本文设计出简单的低压 TTL 与或非门电路, 示于如图 1(d)。常规 ECL 或 / 或非门示图 1(e), 有互反输出 y_2 和 y_6 , 其中 y_2 取自图 1(e) 左部 T_1 和 T_2 二管; 最右管 T_3 的射极接 y'_2 作为源信号, 基极接 V_r (代表 1 电平), 开关控制信号是 $1 \cdot \bar{y}'_2$ (基射相对电位), 由此得出

$$y_6 = y'_2 < 1 \cdot \bar{y}'_2 > |_{\varepsilon=1} = 0 < \bar{y}'_2 > |_{\varepsilon=1} = 0 \cdot \bar{y}'_2 + \varepsilon y'_2 = y'_2 = a+b \quad (6)$$

除常规 ECL 或 / 或非门外, 文献 [5] 提出一个 ECL 与非门的电路实现, 尚无 ECL 与或门。本文根据 (5) 式设计出 ECL 与或门, 示如图 1(f)。对照图 1(e) 和图 1(f) 看出, 将图 1(e) 的 T_1, T_2 和 T_3 用相应的多射管代替, 即得出图 1(f)。图中 T_1 和 T_2 的结构与图 1(c) 电路完全一样, 满足 (5) 式; $y_5 = abc + def$; 而 T_3 的集电极输出 y_7 类似 (6) 式推出: $y_7 = y_5$, T_3 射极电阻 R_{e2} 的作用是调整输出高低电平 (此法比常规电平移位法的优点是可连续调整); 图中最右侧二管为射极跟随器, 最后形成输出为

$$y_8 = y_7 = abc + def \quad (\text{与 (5) 式联立形成 ECL 与或门}) \quad (7)$$

图 1(g) 所示为非门电路, $y_{10} = \bar{a}$ 。

²文献 [3]p130 题 1-12 中用万用表测量 TTL 与非门一个悬空输入端, 万用表等效于 $\varepsilon = 0$ 负载 R , 习题中的 5 个小问题, 在一定程度上体现了“与关系”, 当时本文作者也进行了测量, 结论一致, 然而文献 [3] 仅作为输入端负载特性考虑。

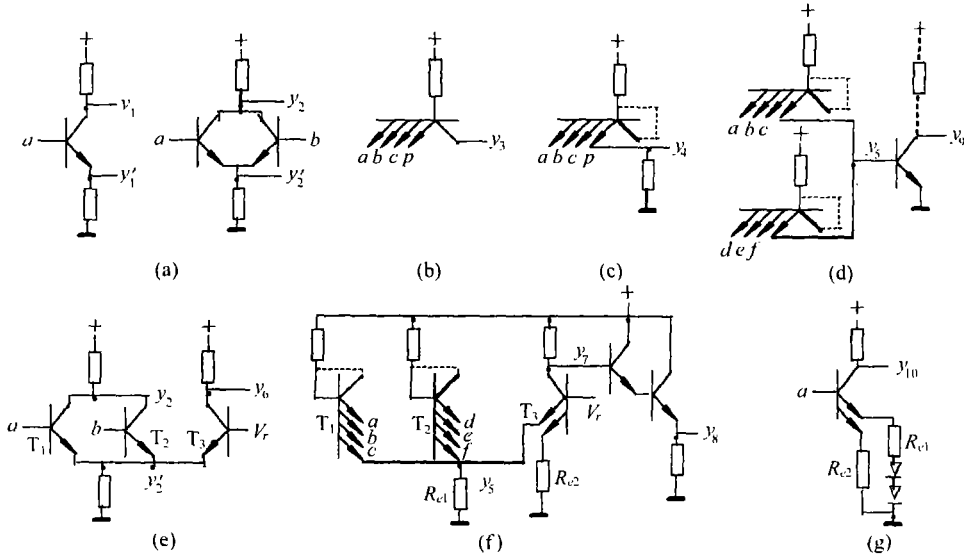


图 1 各型单元电路

3 双极型电路通用综合方法

双极型元件级电路设计需要考虑: (1) 各型电路的特点 (TTL, ECL, I²L), 包括输入级和输出级, (2) 源信号和控制信号都是广义二值信号。双极型电路通用综合步骤如下: (1) 根据设计要求找出函数表达式, 包括三态函数 (三态函数有真开路的 ϵ 项)。 (2) 依据电路特点, 化简和变换函数表达式, 使其与元件级单元电路表达式一致 (包括输入级和输出级)。 (3) 按上述变换后的元件级表达式画出电路图。

TTL 电路设计举例: 利用 (7) 式, 消除竞争冒险的触发器 D 电路方程表示为

$$Q^+ = Q\phi + Q_2\bar{\phi} + QQ_2 = Q\phi < Q\phi > | Q_2\bar{\phi} < Q_2\bar{\phi} > | QQ_2 < QQ_2 > |_{\epsilon=0} \quad (8a)$$

$$Q_2^+ = D\phi + Q_2\bar{\phi} + DQ_2 = D\phi < D\phi > | Q_2\bar{\phi} < Q_2\bar{\phi} > | DQ_2 < DQ_2 > |_{\epsilon=0} \quad (8b)$$

根据 (8) 式, 参照低压 TTL 与非门电路图 1(d), 画出低压 D 触发器元件级电路图, 示如图 2(a)。同样方法可以设计常规 TTL 电路, 但注意输出级推拉式, 即利用

$$Q^+ = F' = 1 \cdot F' + 0 \cdot F = {}_1 < F' > | {}_0 < F > \quad (F' = \bar{F}, \text{略去真开路 } \epsilon \text{ 标记}) \quad (9)$$

上式对应推拉式输出级, 其中 F' 和 F 取自对称输入级; 对称输入级是由两式联立方程描述, 如 (1) 式或 (2) 式为两式联立; 除输出级外的其余部分则利用 (1)~(5) 式, 形成单级或多级与非, 或非, 与或非结构。级间常可直接相连, 无需推拉式, 易于简化电路。根据 (10) 式, 很容易从输出开始设计常规 TTL 元件级电路结构的 D 触发器, 与已有文献一致 (从略)。对于任意三态函数传统方法失效, 可用本文方法设计, 例如,

$$y = 0 \cdot (\bar{a}\bar{b} + \bar{a}b)cd + 1 \cdot (\bar{d} + ab) + \epsilon \cdot (\bar{a}\bar{b}d + \bar{a}cd + \bar{b}cd) \quad (\epsilon = \text{真开路}) \quad (10)$$

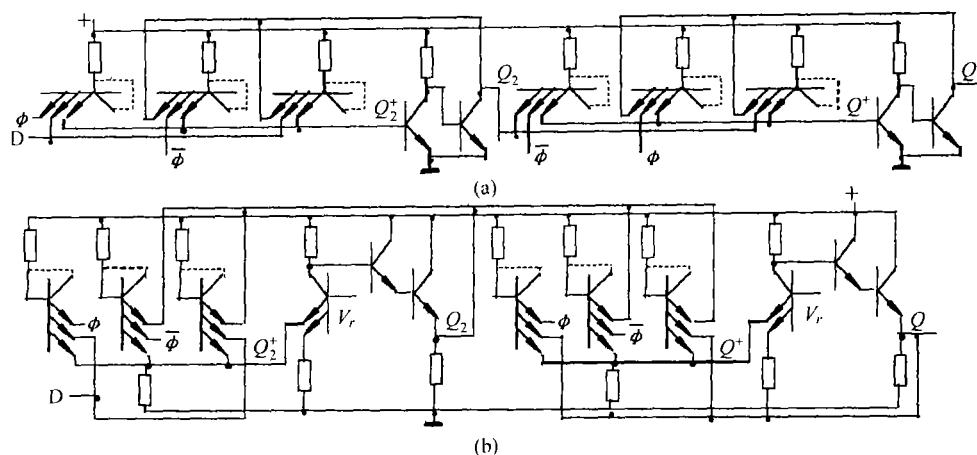


图2 D触发器

ECL 电路设计举例：仍根据 (8) 式，注意：图 2(a)TTL 电路中 $\varepsilon = 0$ 负载未画出，它借用下级输入电阻；而 ECL 电路中必画出 $\varepsilon = 0$ 负载 R_{e1} 。参照图 1(f)，画出 ECL 元件级电路结构的 D 触发器，示如图 2(b)。因与或结构包含有与结构和或结构，加上图 1(g) 所示的非结构，即可实现任意 ECL 电路。在图 1(g) 中 T_1 射极电阻 R_{e1} 和 R_{e2} 的作用是：在实现输出反相的前提下可连续调整输出高低电平，而常规方法则是不连续的。

I²L 电路：利用运算转换定理消去 \uparrow 运算，保留 \parallel 运算 (例子见文献 [2]，从略)。

4 电路实验和分析计算

多射管测试：(1) 测图 1(c) 中的 y_4 ，分别选取 $\varepsilon = 0$ 的负载 $R = 50\text{k}\Omega$ 和 $1.2\text{k}\Omega$ ，对 a, b, c 输入各种不同电压，测得 y_4 的电压值接近 a, b, c 三个中的最低值，略偏高 Δv ，表明满足 (4) 式。测试 Δv ：改变 I_e 由 0.25 到 2.25mA，当 $R = 1.2\text{k}\Omega$ 时，测得 $\Delta v = 0.05 \sim 0.10\text{V}$ ，当 $R = 50\text{k}\Omega$ 时，测得 $\Delta v = 0.15 \sim 0.30\text{V}$ ³。(2) 测图 1(c) 中的 y_4 ，改为 $\varepsilon = 1$ 负载 (或接 V_{cc})，测得 y_4 恒为高电平，与输入无关。用微安表测得输出电流约为 $1\mu\text{A}$ ，且与低电平的输入个数无关。若 (4) 式改为 $\varepsilon = 1$ ，则理论值 $y_4 = 1$ ，与测试结果一致。此测试结果表明：可以用输出并接的方式实现与或功能。(3) 测图 1(d) y_5 ，先按上述方法选取 $\varepsilon = 0$ 负载测试表明，测试结果与 (5) 式符合 (实现与或功能)；再改为 $\varepsilon = 1$ 负载，测得输出电流约为 $2\mu\text{A}$ ，输出恒为高电平，即还可以再次作输出并接。

低压 TTL 与或非门测试：按照图 1(d) 测试，(1) 选取输出负载电阻 $R_L = 1.2\text{k}\Omega$ ， $V_{cc} = 1.5\text{V}$ (或 1.35V)，测试表明输出满足： $y_9 = \overline{abc + def}$ ，输出高低电平为 $V_{OH} = 1.5\text{V}$ (或 1.35V)， $V_{OL} = 0.15\text{V}$ (或 0.3V)。(2) 选取 $R_L = 10\text{k}\Omega$ ， $V_{cc} = 1.5\text{V}$ 和 1.35V ，测试表明输出仍满足与或非关系。

ECL 与或门测试：按照图 1(f) 测试，设 $V_{cc} = 5\text{V}$ ， $V_r = 2.5\text{V}$ ， $V_{iH} = 2.3\text{V}$ ， $V_{iL} = 1.47\text{V}$ ，先进行理论计算，再作实验调整得出， $R_{e1} = 1.5\text{k}\Omega$ ， $R_b = 2\text{k}\Omega$ ， $R_c = 730\Omega$ ， $R_{e2} = 800\Omega$ ，测试表明输出满足与或关系 (7) 式，即 $y_8 = abc + def$ 。当 abc 和 def 的每组输入至少有一个为

³电阻负载 $\varepsilon = 0$ 与 $\varepsilon = 1$ 和电容负载 $\varepsilon = Q$ 必须标出，而真开路为空负载，常略去不标出，开路输出取决于假想负载，设计时只需要考虑 F 和 G 二式的简化 (一般为多级形式)，而 ε 项 (对应真开路) 的繁简与结构简化程度无关。

V_{iL} 时, 测得 $V_{OL} = 1.47\text{V}$, $V_e = 1.78\text{V}$, $V_c = 2.7\text{V}$, $V_{e2} = 1.82\text{V}$, 当每组输入全为高电平 V_{iH} 时, 测得 $V_{OH} = 2.3\text{V}$, $V_e = 2.12\text{V}$, $V_c = 3.5\text{V}$, $V_{e2} = 1.82\text{V}$ 。

ECL 与或门分析计算: 图 1(f) 中 T_1, T_2 各发射结 (共发射结为 be_1, be_2) 和 T_3 左边的一发射结 be_3 皆有导通和截止二状态, 设 $V_{cc} = 5\text{V}$, $V_r = 2.5\text{V}$, 则 $V_{e1} = V_r = 2.5 - 0.7\text{V} = 1.8\text{V}$ 。

(1) 由逻辑摆幅 ΔV_o 计算 R_c 。 $\Delta V_o = V_{iH} - V_{iL} = 0.83\text{V}$ 。若每组输入皆有一为低电平, 则 be_1, be_2 截止, be_3 导通, 共射极电流 $I_e = V_r/R_c = 1.8/1.5 = 1.2\text{mA}$ (由此形成 T_3 集电极电压增量 ΔV_c), 所以 $R_c = \Delta V_c/I_c = \Delta V_o/I_e = 0.83/1.2 = 692\Omega$ 。(2) 类似方法计算 R_{e2} 和 R_b 。若所有输入皆为高电平, 一方面 be_3 截止, 计算得出 $R_{e2} = 890\Omega$; 另一方面 be_1 和 be_2 导通, 计算得出 $R_b = 2\text{k}\Omega$ (选取 $R_e = 1.5\text{k}\Omega$)。理论计算与实验结果接近。

参 考 文 献

- [1] 李翰荪, 电路分析基础, 上册, 人民教育出版社, 1978, 3, 70-85.
- [2] 方振贤, 刘莹, 电路三要素理论和布尔代数失效原因分析, 电子科学学刊, 1999, 21(6), 806-813.
- [3] 阎石, 数字电子技术基础, 北京, 高等教育出版社, 1981, 9, 54-230.
- [4] 吴训威, 杭国强, 基于比较运算与多 β 晶体管的开关电路, 中国科学 (E 辑), 1997, 27(5), 444-452.
- [5] 吴训威, 基于电压-电流的电路综合方法, 电子科学学刊, 1999, 21(3), 384-390.

UNIVERSAL SYNTHESIS OF BIPOLAR CIRCUITS AND THEORY OF THREE ESSENTIAL CIRCUIT ELEMENTS

Liu Ying

(College of Science, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

Abstract On the basis of theory of three essential circuits elements, this paper presents a universal synthesis of bipolar circuits. The generalized binary signal to be applicable to voltage-mode and current-mode circuits is introduced first. Then the simplified theorem on origin signal and load is proved, which is used for analyzing the structure of any unit circuits, for deducing the relevant expression in component stage and for finding out a new manner to realize TTL and ECL circuits. In accordance with the above theory a new low voltage TTL circuit and multiemitter ECL circuit in component stage are found out. The above theory is proved to be correct through experiments on circuits.

Key words Theory of three essential circuit elements, Universal synthesis of bipolar circuits, Generalized binary signal, Low voltage TTL and multiemitter ECL circuits

刘 莹: 女, 1948 年生, 高级实验师, 从事近代物理实验和电子技术的教学和科学研究工作。