

第9章 数模与模数转换

9.1 D/A 转换有哪几种基本类型，各自的特点是什么？

解：D/A 转换主要包括：权电阻网络 DAC，梯形电阻网络 DAC，倒梯形电阻网络 DAC，权电流 DAC。

权电阻型 DAC：结构简单；电阻取值范围过大。

梯形电阻网络 DAC：仅用 R 、 $2R$ 两种阻值；转换速率较慢。

倒梯形电阻网络 DAC：转换速率快。

权电流 DAC：恒流源取代电阻网络，避免了模拟开关压降引起的转换误差，提高了转换精度。

9.2 有一理想指标的 5 位 D/A 转换器，满刻度模拟输出为 12 V，若数字量为 11001，采用下列编码方式时，其归一化表示法的 DAC 输出电压 V_o 分别为多少？

(1) 自然加权码；

(2) 原码；

(3) 反码；

(4) 补码；

(5) 偏移码。

解：(1) $\because FSR=12\text{ V}$ $X_1 \sim X_5 = 11001$ $(25)_{10}$

$$\therefore V_o = \frac{25}{2^5} FSR = \frac{25}{32} \times 12 = 9.375\text{ V}$$

(2) $X_1 \sim X_5 = 11001$ 为原码， (-9)

$$V_o = -\frac{9}{2^4} \frac{FSR}{2} = -\frac{9}{16} \times \frac{12}{2} = -3.375\text{ V}$$

(3) $X_1 \sim X_5 = 11001$ 为反码

\therefore 原码 = 10110 (-6)

$$\therefore V_o = -\frac{6}{2^4} \frac{FSR}{2} = -\frac{6}{16} \times \frac{12}{2} = -2.25\text{ V}$$

(4) $X_1 \sim X_5 = 11001$ 为补码

\therefore 原码 = 10111 (-7)

$$\therefore V_o = -\frac{7}{2^4} \frac{FSR}{2} = -\frac{7}{16} \times \frac{12}{2} = -2.625\text{ V}$$

(5) $X_1 \sim X_5 = 11001$ 为偏移码

\therefore 原码 = 补码 = 01001 $(+9)$

$$\therefore V_o = \frac{9}{2^4} \frac{FSR}{2} = \frac{9}{16} \times \frac{12}{2} = 3.375\text{ V}$$

9.3 图 9.2 中，若 $V_{\text{ref}} = 8\text{ V}$ ， $R = 1\text{ k}\Omega$ ， $R_f = 1\text{ k}\Omega$ ，求：

(1) 数字量 $X_1 X_2 X_3 = 010$ 和 100 时， V_o 分别为多少？

(2) 分辨率 $|V_{\text{omin}}|$ 等于多少？

(3) 最大值 V_{omax} 等于多少？

(4) 满刻度值 FSR 等于多少？

解：图 9.2 的 3 位权电阻 DAC 电路中

$$(1) \quad X_1X_2X_3 = 010 \text{ 时, } V_o = -\frac{2V_{ref}R_f}{R} \frac{X_12^2 + X_22^1 + X_32^0}{2^3} = -\frac{2 \times 8 \times 2}{8} = -4 \text{ V}$$

$$X_1X_2X_3 = 100 \text{ 时, } V_o = -\frac{2 \times 8 \times 4}{2^3} = -8 \text{ V}$$

$$(2) \quad \text{分辨率 } |V_{Omin}| = \frac{2V_{ref}R_f}{R} \frac{1}{2^3} = 2 \text{ V}$$

$$(3) \quad \text{最大值 } V_{Omax} = -\frac{2V_{ref}R_f}{R} \frac{2^3 - 1}{2^3} = -14 \text{ V}$$

$$(4) \quad \text{满刻度值 } FSR = \frac{2V_{ref}R_f}{R} = 8 \text{ V}$$

9.4 5位R-2R梯形电阻DAC电路中, $V_{ref} = 20 \text{ V}$, $R = R_f = 2 \text{ k}\Omega$, 当数字量 $X_1X_2X_3X_4X_5 = 10101$ 时, 输出电压 V_o 为多少? FSR 等于多少?

解: 5位梯形电阻DAC:

$$V_o = -\frac{V_{ref}R_f}{R} \frac{X_12^4 + X_22^3 + X_32^2 + X_42^1 + X_52^0}{2^5}$$

$$= -\frac{20 \times 21}{2^5} = -13.125 \text{ V}$$

$$FSR = \frac{V_{ref}R_f}{R} = 20 \text{ V}$$

9.5 10位R-2R倒梯形电阻DAC电路中, $V_{ref} = 18 \text{ V}$, $R = 2 \text{ k}\Omega$, $R_f = 1 \text{ k}\Omega$, 求:

(1) 输出电压 V_o 的变化范围;

(2) 若10位数字量 $X_1 \sim X_{10} = 0001011010$ 时, 输出电压 V_o 的值。

解: (1) 输出电压 V_o 的变化范围为 $V_{Omin} \sim V_{Omax}$

$$V_o = -\frac{V_{ref}R_f}{R} \frac{X_12^9 + X_22^8 \cdots + X_{10}2^0}{2^{10}}$$

$$V_{Omin} = -\frac{18 \times 1 \times 10^3}{2 \times 10^3} \times \frac{0}{2^{10}} = 0 \text{ V}$$

$$LSB = \left| -\frac{18 \times 1 \times 10^3}{2 \times 10^3} \times \frac{1}{2^{10}} \right| = 0.009 \text{ V}$$

$$V_{Omax} = -\frac{18 \times 1 \times 10^3}{2 \times 10^3} \times \frac{2^{10} - 1}{2^{10}} = -8.991 \text{ V}$$

\therefore 电压的变化范围为 $0 \text{ V} \sim -8.991 \text{ V}$

$$(2) \quad X_1 \sim X_{10} = 0001011010 \text{ 时, } V_o = -\frac{18 \times 1 \times 10^3}{2 \times 10^3} \times \frac{90}{2^{10}} = -0.79 \text{ V}$$

9.6 图 9.5 中三位R-2R倒梯形电阻DAC电路中, 已知 $V_{ref} = 6 \text{ V}$, $R = 20 \text{ k}\Omega$, $X_1X_2X_3 = 110$, 求当 $V_o = -1.5 \text{ V}$ 时反馈电阻 R_f 的值。

解: $V_o = -\frac{V_{ref}R_f}{R} \frac{X_12^2 + X_22^1 + X_32^0}{2^3} = -\frac{6R_f}{20 \times 10^3} \times \frac{6}{2^3} = -1.5 \text{ V}$

$\therefore R_f = 6.67 \text{ k}\Omega$

9.7 图 9.6 电流激励DAC电路中，若 $I = 24 \text{ mA}$ ， $R_f = 1 \text{ k}\Omega$ ，求：

- (1) V_o 的有效值变化范围；
- (2) 满刻度值 FSR 的值；
- (3) 写出 n 位电流激励DAC电路的输出电压 V_o 和最大值 $V_{o\max}$ 的表达式。

解： (1) V_o 的有效值变化范围是 $V_{O\min} \sim V_{O\max}$

$$V_{O\min} = -IR \frac{X_1 2^2 + X_2 2^1 + X_3 2^0}{2^3} = -24 \times 10^{-3} \times 1 \times 10^3 \times \frac{1}{8} = -3 \text{ V}$$

$$V_{O\max} = -24 \times 10^{-3} \times 1 \times 10^3 \times \frac{7}{8} = -21 \text{ V}$$

$$(2) FSR = IR_f = 24 \times 10^{-3} \times 1 \times 10^3 = 24 \text{ V}$$

$$(3) V_o = -IR \times \frac{X_1 2^{n-1} + X_2 2^{n-2} \dots X_n 2^0}{2^n}$$

$$V_{O\max} = -IR \times \frac{2^{n-1} - 1}{2^n}$$

9.8 AD7533 接收单极性码的电路（见图 9.8）中，若 $V_{\text{ref}} = 20 \text{ V}$ ，数字量 $X_1 \sim X_{10}$ 分别为下列各组值时，求输出电压 V_o 的值。

- (1) 1111111111
- (2) 0000000000
- (3) 0111111111
- (4) 1000000000
- (5) 0000010111

解： $V_o = V_{\text{ref}} \times \frac{X_1 2^9 + X_2 2^8 \dots + X_{10} 2^0}{2^{10}}$

$$(1) V_o = 20 \times \frac{2^{10} - 1}{2^{10}} = 19.98 \text{ V}$$

$$(2) V_o = 0 \text{ V}$$

$$(3) V_o = 20 \times \frac{2^9 - 1}{2^{10}} = 9.98 \text{ V}$$

$$(4) V_o = 20 \times \frac{2^9}{2^{10}} = 10 \text{ V}$$

$$(5) V_o = 20 \times \frac{23}{2^{10}} = 0.45 \text{ V}$$

9.9 AD7533 接收偏移码的电路（见图 9.9）中， $V_{\text{ref}} = 15 \text{ V}$ ，数字量 $X_1 \sim X_{10}$ 分别为下列各组值时，求输出电压 V_o 的值。

- (1) 1000001101
- (2) 0000000000
- (3) 0111111111
- (4) 1111111111
- (5) 1000000000

解： $V_o = V_{\text{ref}} \times \frac{(X_1 2^9 + X_2 2^8 \dots + X_{10} 2^0) - 2^9}{2^{10}}$

$$(1) \quad V_o = 15 \times \frac{(2^9 + 13) - 2^9}{2^{10}} = 0.19 \text{ V}$$

$$(2) \quad V_o = 15 \times \frac{0 - 2^9}{2^{10}} = -7.5 \text{ V}$$

$$(3) \quad V_o = 15 \times \frac{2^9 - 1 - 2^9}{2^{10}} = -0.015 \text{ V}$$

$$(4) \quad V_o = 15 \times \frac{2^{10} - 1 - 2^9}{2^{10}} = 7.5 \text{ V}$$

$$(5) \quad V_o = 15 \times \frac{2^9 - 2^9}{2^{10}} = -0 \text{ V}$$

9.10 将图 9.9 改接成接收补码的电路, $V_{\text{ref}} = 10 \text{ V}$, 当数字量 $X_1 \sim X_{10}$ 分别为下列各组值时, 求输出电压 V_o 的值。

(1) 0000010110

(2) 1111111111

(3) 0000000000

(4) 0111111111

(5) 1000000000

解: $V_o = V_{\text{ref}} \left[\frac{(\overline{X_1} 2^9 + X_2 2^8 \cdots + X_{10} 2^0) - 2^9}{2^{10}} \right]$

$$(1) \quad V_o = 10 \times \frac{2^9 + 22 - 2^9}{2^{10}} = 0.215 \text{ V}$$

$$(2) \quad V_o = 10 \times \frac{2^9 - 1 - 2^9}{2^{10}} = -0.01 \text{ V}$$

$$(3) \quad V_o = 10 \times \frac{2^9 - 2^9}{2^{10}} = 0 \text{ V}$$

$$(4) \quad V_o = 10 \times \frac{2^{10} - 1 - 2^9}{2^{10}} = 4.99 \text{ V}$$

$$(5) \quad V_o = 10 \times \frac{0 - 2^9}{2^{10}} = -5 \text{ V}$$

9.11 有一个 D/A 转换器, 最小分辨电压为 5 mV , 满刻度电压为 10 V , 试求该电路输入数字量应是多少?

解: 由分辨率: $LSB = \frac{1}{2^n - 1} FSR$ $2^n = \frac{FSR}{LSB} + 1 = 2001$
 $n = 11 \text{ 位}$

9.12 梯形电阻 DAC 电路中, $n = 10$, 满刻度电压 $FSR = V_{\text{ref}} = 5 \text{ V}$, 要求输出电压 $V_o = 4 \text{ V}$, 试问输入的二进制数 N 是多少? 若其他条件不变, 只增加 DAC 的位数, 是否可以获得 20 V 输出电压, 为什么?

解: $V_o = -FSR \times \frac{N}{2^{10}}$ $N = -\frac{2^{10} V_o}{FSR} = -\frac{1024 \times 4}{5} = -(819.2)_{10}$

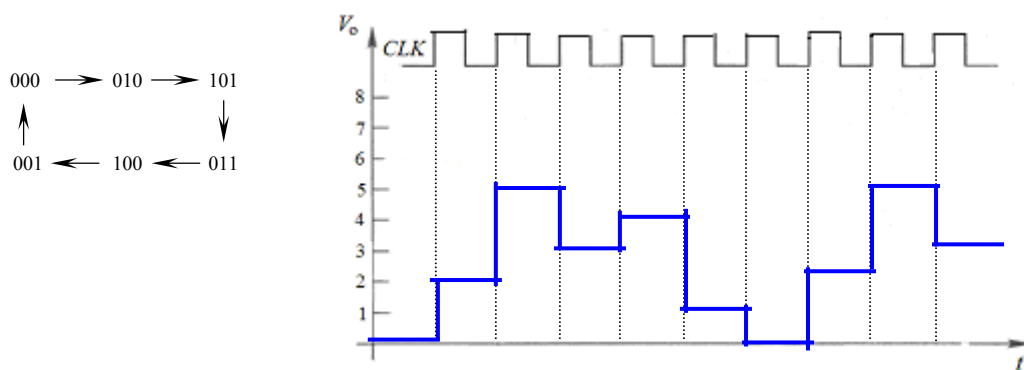
不考虑倒向, $N \approx (819)_{10} = (1100110011)_2$

提高位数只能提高精度和分辨率。要获得 20 V 输出电压，只能提高满刻度电压（参考电压）。

此题中 $V_o = -V_{ref} \times \frac{N}{2^n}$

可知， $N < 2^n$ ， V_o 最大只能接近 V_{ref} 值，不能超过它。

- 9.13 已知某DAC转换电路，输入三位数字量，参考电压 $V_{ref} = 8 \text{ V}$ ，当输入数字量 $D_2 D_1 D_0$ 如题图 9.13 顺序变化时，求相应的模拟量的绝对值 $|V_o|$ ，并对应时钟脉冲 CLK （上升沿）画出 $|V_o|$ 的波形。



题图 9.13

解： $|V_o| = V_{ref} \times \frac{X_1 2^2 + X_2 2^1 + X_3 2^0}{2^3}$

$D_2 D_1 D_0 = 000, V_o = 0 \text{ V}$

$010, V_o = 2 \text{ V}$

$101, V_o = 5 \text{ V}$

$011, V_o = 3 \text{ V}$

$100, V_o = 4 \text{ V}$

$001, V_o = 1 \text{ V}$

$|V_o|$ 波形如题图中所示。

- 9.14 某D/A 转换器， $n = 9$ ，最大输出为 5V，试求最小分辨电压 V_{omin} 、分辨率和参考电压 V_{ref} 。

解： $V_{o\max} = \frac{2^n - 1}{2^n} FSR$ $5\text{V} = \frac{2^9 - 1}{2^9} FSR$ $FSR \approx 5 \text{ V}$

$V_{omin} = \frac{1}{2^n} FSR = \frac{1}{2^9} \times 5 = 0.01 \text{ V}$

$LSB = |V_{omin}| = 0.01 \text{ V}$

$V_{ref} = FSR = 5 \text{ V}$

- 9.15 已知某R-2R梯形D/A 转换器，最小分辨率电压为 $V_{omin} = 5 \text{ mV}$ ，最大（满刻度）输出电压 $V_{omax} = 10 \text{ V}$ ， $R = R_f$ ，试问此电路输入数字量的位数 n 应为多大？参考电压 V_{ref} 应为多大？

解： $FSR = V_{omax} = 10 \text{ V}$

$V_{omin} = FSR / 2^n$, $0.005 = 10 / 2^n$, $n = 11$

$$V_{\text{ref}} = FSR = 10 \text{ V}。$$

9.16 将模拟信号转换为数字信号，应选用（ B ）。

A. DAC 电路； B. ADC 电路； C. 译码器； D. 多路选择器。

9.17 ADC 的功能是（ A ）。

A. 把模拟信号转换成数字信号； B. 把数字信号转换成模拟信号；
C. 把二进制转换成十进制； D. 把 BCD 码转换成二进制数。

9.18 图 9.15 所示的三位有舍有入并行比较 ADC 电路中，若 $V_{\text{ref}} = 7.7 \text{ V}$ ， $R = 1 \text{ k}\Omega$ ，求：

(1) 当输入电压 $V_{\text{in}} = 5.27 \text{ V}$ 时，输出数字量 $X_1X_2X_3$ 等于多少？

(2) 若已知数字量 $X_1X_2X_3 = 011$ ，求此时的 V_{in} 。

解：(1) $s = \frac{V_{\text{ref}}}{2^3 - 1} = \frac{7.7}{7} = 1.1 \text{ V}$

$$\frac{V_{\text{in}}}{s} = \frac{5.27}{1.1} = 4.79 \rightarrow 5$$

$$\therefore X_1X_2X_3 = 101$$

(2) 若 $X_1X_2X_3 = 011$ 则 V_{in} 在 3 s 内 $2.5 \text{ s} < V_{\text{in}} < 3.5 \text{ s}$

$$\therefore V_{\text{in}} = 2.75 \text{ V} \sim 3.85 \text{ V}$$

9.19 5 位有舍有入并行比较 ADC 电路中，若 $V_{\text{ref}} = 31 \text{ V}$ ， $R = 1 \text{ k}\Omega$ ，求：

(1) 当输入电压 $V_{\text{in}} = 18.89 \text{ V}$ 时，输出数字量 $X_1 \sim X_5$ 等于多少？

(2) 若已知 5 位数字量 $X_1 \sim X_5 = 11000$ ，此时的 V_{in} 和等效模拟输入 \bar{V}_{in} 分别为多少？

(3) 若已知等效输入 $\bar{V}_{\text{in}} = 15 \text{ V}$ ，求此时的 V_{in} 及 $X_1 \sim X_5$ 的值。

解：(1) $s = \frac{V_{\text{ref}}}{2^5 - 1} = \frac{31}{31} = 1 \text{ V}$

$$V_{\text{in}} = 18.89 \text{ V}, \quad \frac{V_{\text{in}}}{s} = \frac{18.9}{1} = 18.9 \rightarrow 19$$

$$\therefore X_1 \sim X_5 = 10011$$

(2) 若已知 $X_1 \sim X_5 = 11000$ 24

V_{in} 在 24 s 内， $23.5 \text{ s} < V_{\text{in}} < 24.5 \text{ s}$

$$V_{\text{in}} = 23.5 \text{ V} \sim 24.5 \text{ V}, \quad \bar{V}_{\text{in}} = 24 \text{ V}$$

(3) 若 $\bar{V}_{\text{in}} = 15 \text{ V}$ ， $V_{\text{in}} = 14.5 \text{ V} \sim 15.5 \text{ V}$

$14.5 \text{ s} < V_{\text{in}} < 15.5 \text{ s}$ ， V_{in} 在 15 s 内

$$\therefore X_1 \sim X_5 = 01111$$

9.20 只舍不入 4 位并行比较 ADC 中，若 $V_{\text{ref}} = 16 \text{ V}$ ， $R = 2 \text{ k}\Omega$ ，求：

(1) 当 $V_{\text{in}} = 12.85 \text{ V}$ 时，输出数字量 $X_1X_2X_3X_4$ 的值。

(2) 若已知输出数字量 $X_1X_2X_3X_4 = 1001$ ，此时输入模拟电压 V_{in} 和等效模拟输入 \bar{V}_{in} 分别等于多少？

解: (1) $s = \frac{V_{ref}}{2^4} = \frac{16}{16} = 1 \text{ V}$
 $\frac{V_{in}}{s} = \frac{12.85}{1} = 12.85 \rightarrow 12$
 $\therefore X_1 X_2 X_3 X_4 = 1100$
 (2) $X_1 X_2 X_3 X_4 = 1001 \quad \therefore 9 \text{ s} < V_{in} < 10 \text{ s}$
 $\therefore V_{in} = 9 \text{ V} \sim 10 \text{ V} \quad \bar{V}_{in} = 9 \text{ V}$

9.21 图 9.16 所示的 8 位并/串型 ADC 中, 若取样保持后的输入电压变化范围为 0~3.78 V, 输入电压 $V_{in} = 850 \text{ mV}$, 求经过并/串型 ADC 后输出的 8 位二进制数 $X_1 \sim X_8$ 的值。每步计算保留三位小数。

解: 高四位:

输入电压变化范围为 0~3.78 V, $\therefore V_{ref} = 3.78 \text{ V}$

$$s_1 = \frac{V_{ref}}{2^4} = \frac{3.78}{16} = 0.236 \text{ V} = 236 \text{ mV}$$

$$V_{in} = 850 \text{ mV}, \quad \frac{V_{in}}{s_1} = \frac{850 \text{ mV}}{236 \text{ mV}} = 3.60, \rightarrow 3$$

$$X_1 X_2 X_3 X_4 = 0011$$

$$\text{低四位: } V_{ref}' = s_1 = 236 \text{ mV}$$

$$\text{输入电压 } V_{in}' = V_{in} - 3s_1 = 850 - 3 \times 236 = 142 \text{ mV}$$

$$s_2 = \frac{V_{ref}'}{2^4 - 1} = \frac{236}{15} = 15.7 \text{ mV}$$

$$\frac{V_{in}'}{s_2} = \frac{142}{15.7} = 9.04 \rightarrow 9$$

$$X_5 X_6 X_7 X_8 = 1001$$

$$\therefore X_1 \sim X_8 = 00111001$$

9.22 6 位并/串型 ADC 电路, 高三位用只舍不入量化方法, 低三位用有舍有入量化方法, 若 $V_{ref} = 5.42 \text{ V}$, $V_{in} = 3.26 \text{ V}$, 求输出的 6 位二进制数 $X_1 \sim X_6$ 的值。

解: 高三位: $s_1 = \frac{V_{ref}}{2^3} = \frac{5.42}{8} = 0.68 \text{ V}$

$$\frac{V_{in}}{s_1} = \frac{3.26}{0.68} = 4.8 \rightarrow 4$$

$$X_1 X_2 X_3 = 100$$

$$\text{低三位: } V_{ref}' = s_1 = 0.68 \text{ V} = 680 \text{ mV}$$

$$V_{in}' = V_{in} - 4s_1 = 3.26 - 4 \times 0.68 = 0.54 \text{ V} = 540 \text{ mV}$$

$$s_2 = \frac{V_{ref}'}{2^3 - 1} = \frac{680}{7} = 97 \text{ mV}$$

$$\frac{V_{in}'}{s_2} = \frac{540 \text{ mV}}{97 \text{ mV}} = 5.56 \rightarrow 6$$

$$X_4X_5X_6=110$$

$$\therefore X_1\sim X_6=100110$$

9.23 三位逐次比较A/D转换器中,若三位梯形电阻DAC中 $V_{\text{ref}}=10\text{ V}$, $V_{\text{in}}=8.26\text{ V}$,求(1)输出数字量 $X_1X_2X_3$; (2)转换时间。

解: (1) \because 3位T型电阻DAC的 $V_{\text{ref}}=10\text{ V}$
 \therefore A/D的一个阶梯 $s=10/2^3=1.25\text{ V}$
 $V_{\text{in}}/s=8.26/1.25=6.6 \rightarrow 6$
 $\therefore X_1X_2X_3=110$

$$(2) t=(n+2)T_{\text{CLK}}=5T_{\text{CLK}}$$

9.24 在图 9.19 所示的双积分ADC中,输入电压 V_{in} 和参考电压 V_{ref} 在极性和数值上应满足什么要求?为什么?

解: 输入电压 V_{i} 和参考电压 V_{ref} 必须极性相反,否则积分电容只能单方向充电,积分曲线 $V_{01}(t)$ 向单方向变化, $V_{02}(t)$ 不能回到0,计数器计数不足,得不到正确的数字量输出即:

$$-V_{\text{in}}\text{对应}V_{\text{ref}} \quad \text{或} \quad V_{\text{in}}\text{不对应}V_{\text{ref}}$$

$$\text{数值方面: } \because N=(V_{\text{in}}/V_{\text{ref}})2^n$$

$$\text{若要保证 } N<2^n, \text{ 必须使 } |V_{\text{in}}|<|V_{\text{ref}}|$$

9.25 在图 9.19 所示的双积分ADC中,若计数器为10位二进制计数器,时钟频率 $f_{\text{CLK}}=1\text{ MHz}$,试计算A/D转换器的最大转换时间 T 。

$$\text{解: } T_c=1/f=1/10^6\text{ Hz}=1\text{ }\mu\text{s}$$

$$T=2\times 2^n T_c=2048\times 10^{-6}\text{ s}=2.048\text{ ms}$$

9.26 某双积分ADC电路中,计数器为4位十进制计数,其最大计数值为 $(3000)_{10}$,已知计数时钟频率 $f_{\text{CLK}}=30\text{ kHz}$,积分器中 $R=100\text{ k}\Omega$, $C=5\text{ }\mu\text{F}$,输入电压 V_{in} 的变化范围为0~5V,试求:

- (1) 第一次最大积分时间 t_1 。
- (2) 积分器的最大输出电压 $|V_{\text{omax}}|$ 。
- (3) 若 $V_{\text{ref}}=10\text{ V}$,第二次积分计数器计数值 $N=(1500)_{10}$ 时,输入电压 V_{in} 的平均值 $\overline{V_{\text{in}}}$ 等于多少?

$$\text{解: (1) } t_1=3000T_c=300\times\frac{1}{30\times 10^3}=100\text{ ms}$$

$$(2) |V_{\text{omax}}|=\frac{V_{\text{inmax}}}{RC}t_1=\frac{5\times 100\times 10^{-3}}{100\times 10^3\times 5\times 10^{-6}}=1\text{ V}$$

$$(3) N=\frac{\overline{V_{\text{in}}}}{V_{\text{ref}}}\times 3000$$

$$\overline{V_{\text{in}}}=\frac{N\cdot V_{\text{ref}}}{3000}=\frac{1500\times 10}{3000}=5\text{ V}$$