

根据 Q_1 与 Q_2 相等,即得到

$$\left(I_0 - \frac{v_1}{R_L}\right)T_1 = \frac{v_1}{R_L}(T - T_1)$$

$$T = \frac{I_0 R_L T_1}{v_1}$$

故电路的振荡周期为

$$f = \frac{1}{T} = \frac{v_1}{I_0 R_L T_1}$$

将 $I_0 = \frac{V_{REF}}{R_S}$ 、 $T_1 = 1.1R_T C_T$ 代入上式而且知道 $V_{REF} = 1.9V$,故得到

$$f = \frac{R_S}{2.09R_T C_T R_L} v_1 \text{ (Hz)} \quad (11.3.11)$$

可见, f 与 v_1 成正比关系。我们将它们之间的比例系数称为电压-频率变换系数(或 $V-F$ 变换系数) K_V , 即

$$K_V = \frac{R_S}{2.09R_T C_T R_L} \quad (11.3.12)$$

LM331 在输入电压的正常变化范围内输出信号频率和输入电压之间保持良好的线性关系,转换误差可减小到 0.01%。输出信号频率的变化范围约为 0 ~ 100kHz。

$V-F$ 变换型 A/D 转换器的主要缺点是转换速度比较低。因为每次转换都需要在 T_C 时间内令计数器计数,而计数脉冲的频率一般不可能很高、计数器的容量又要求足够大,所以计数时间 T_C 势必较长,转换速度必然比较慢。

【例 11.3.2】 在图 11.3.17 所示的电路中,已知 $R_T = 10k\Omega$, $C_T = 0.01\mu F$, $R_L = 47k\Omega$, $R_S = 10k\Omega$, $V_{CC} = 15V$, $V'_{CC} = 5V$ 。试计算当输入控制电压在 0 ~ 5V 范围内变化时输出脉冲频率的变化范围。

解: 由式(11.3.12)求出电压/频率变换系数为

$$K_V = \frac{R_S}{2.09R_T C_T R_L}$$

$$= \frac{10 \times 10^3}{2.09 \times 10 \times 10^3 \times 0.01 \times 10^{-6} \times 47 \times 10^3} \text{ Hz/V}$$

$$= 1.02 \times 10^3 \text{ Hz/V}$$

故 v_1 在 0 ~ 5V 范围变化时输出脉冲频率的变化范围为 0 ~ 5.1kHz。

【例 11.3.3】 在图 11.3.14 所示的 $V-F$ 变换型 A/D 转换器电路中,

若计数器和寄存器均为十位二进制, $V-F$ 变换器与图 11.3.16 中的电路相同, 要求输入模拟电压为 $0 \sim 5\text{ V}$ 时输出显示 $0 \sim 2^{10} - 1$ (10 位二进制数的最大值), 试计算闸门控制信号 T_G 应有的宽度以及完成一次转换所需要的时间。

解 例 11.3.1 中已经求得图 11.3.16 所示 $V-F$ 变换器的输出频率为

$$f_{\text{out}} = 13 v_1 \text{ kHz}, \text{ 所以 } v_1 = 0 \sim 5 \text{ V 时 } f_{\text{out}} = 0 \sim 13 \times 5 \text{ kHz} = 0 \sim 65 \text{ kHz}。$$

若 $f_{\text{out}} = 65 \text{ kHz}$ 时要求计数器计满 $(2^{10} - 1)$ 个脉冲, 则 T_G 的宽度应当等于 $(2^{10} - 1)$ 个计数脉冲周期之和, 即

$$\begin{aligned} T_G &= (2^{10} - 1) (1/f_{\text{out}}) \\ &= (2^{10} - 1) / (65 \times 10^3) \\ &= 15.7 \text{ ms} \end{aligned}$$

考虑到计数器置零还需要一定时间, 所以完成一次转换的时间略大于 15.7 ms 。

复习思考题

R11.3.2 A/D 转换器的电路结构有哪些类型? 它们各有何优缺点?

11.3.7 A/D 转换器的转换精度与转换速度

一、A/D 转换器的转换精度

在单片集成的 A/D 转换器中也采用分辨率 (又称分解度) 和转换误差来描述转换精度。

分辨率以输出二进制数或十进制数的位数表示, 它说明 A/D 转换器对输入信号的分辨能力。从理论上讲, n 位二进制数字输出的 A/D 转换器应能区分输入模拟电压的 2^n 个不同等级大小, 能区分输入电压的最小差异为 $\frac{1}{2^n} \text{FSR}$ (满量程输入的 $1/2^n$), 所以分辨率所表示的是 A/D 转换器在理论上能达到的精度。例如 A/D 转换器的输出为 10 位二进制数, 最大输入信号为 5V , 那么这个转换器的输出应能区分出输入信号的最小差异为 $5\text{V}/2^{10} = 4.88\text{mV}$ 。

转换误差通常以输出误差最大值的形式给出, 它表示实际输出的数字量和理论上应有的输出数字量之间的差别, 一般多以最低有效位的倍数给出。例如

给出转换误差 $< \pm \frac{1}{2} \text{LSB}$, 这就表明实际输出的数字量和理论上应得到的输出数字量之间的误差小于最低有效位的半个字。

有时也用满量程输出的百分数给出转换误差。例如 A/D 转换器的输出为十进制的 $3\frac{1}{2}$ 位 (即所谓三位半), 转换误差为 $\pm 0.005\% \text{FSR}$, 则满量程输出为 1999, 最大输出误差小于最低位的 1。

通常单片集成 A/D 转换器的转换误差已经综合地反映了电路内部各个元、器件及单元电路偏差对转换精度的影响, 所以无需再分别讨论这些因素各自对转换精度的影响了。

还应指出, 手册上给出的转换精度都是在一定的电源电压和环境温度下得到的数据。如果这些条件改变了, 将引起附加的转换误差。例如 10 位二进制输出的 A/D 转换器 AD571 在室温 ($+25^{\circ}\text{C}$) 和标准电源电压 ($V^+ = +5\text{V}$ 、 $V^- = -15\text{V}$) 下转换误差 $\leq \pm \frac{1}{2} \text{LSB}$, 而当环境温度从 0°C 变到 70°C 时, 可能产生 $\pm 1 \text{LSB}$ 的附加误差。如果正电源电压在 $+4.5 \sim +5.5 \text{V}$ 范围内变化, 或者负电源电压在 $-16 \sim -13.5 \text{V}$ 范围内变化时, 最大的转换误差可达 $\pm 2 \text{LSB}$ 。因此, 为获得较高的转换精度, 必须保证供电电源有很好的稳定度, 并限制环境温度的变化。对于那些需要外加参考电压的 A/D 转换器, 尤其需要保证参考电压应有的稳定度。

二、A/D 转换器的转换速度

A/D 转换器的转换速度主要取决于转换电路的类型, 不同类型 A/D 转换器的转换速度相差甚为悬殊。

并联比较型 A/D 转换器的转换速度最快。例如, 8 位二进制输出的单片集成 A/D 转换器转换时间可以缩短至 50ns 以内。

逐次渐近型 A/D 转换器的转换速度次之。多数产品的转换时间都在 $10 \sim 100\mu\text{s}$ 之间。个别速度较快的 8 位 A/D 转换器转换时间可以不超过 $1\mu\text{s}$ 。

相比之下间接 A/D 转换器的转换速度要低得多了。目前使用的双积分型 A/D 转换器转换时间多在数十毫秒至数百毫秒之间。

此外, 在组成高速 A/D 转换器时还应将取样-保持电路的获取时间 (即取样信号稳定地建立起来所需要的时间) 计入转换时间之内。一般单片集成取样-保持电路的获取时间在几微秒的数量级, 和所选定的保持电容的电容量大小很有关系。

复习思考题

R11.3.3 在要求 A/D 转换器的转换时间小于 $1\ \mu\text{s}$ 、小于 $100\ \mu\text{s}$ 和小于 $0.1\ \text{s}$ 三种情况下,应各选择哪种类型的 A/D 转换器?

本章小结

由于微处理器和微型计算机在各种检测、控制和信号处理系统中的广泛应用,也促进了 A/D、D/A 转换技术的迅速发展。而且,随着计算机计算精度和计算速度的不断提高,对 A/D、D/A 转换器的转换精度和转换速度也提出了更高的要求。正是这种要求有力地推动了 A/D、D/A 转换技术的不断进步。事实上在许多使用计算机的检测、控制或信号处理系统中,系统所能达到的精度和速度最终是由 A/D、D/A 转换器的转换精度和转换速度所决定的。因此,转换精度和转换速度是 A/D、D/A 转换器最重要的两个指标,也是我们讨论的重点。

A/D、D/A 转换器的种类十分繁杂,不可能逐一列举。因此,首先应着重理解和掌握 A/D、D/A 转换的基本思想、共同性的问题以及对它们进行归纳和分类的原则。

在 D/A 转换器中我们分别介绍了权电阻网络型、权电流型、倒 T 形电阻网络型、权电容网络型以及开关树型的 D/A 转换器。这几种电路在集成 D/A 转换器产品中都有应用。目前在双极型的 D/A 转换器产品中权电流型电路用得比较多;在 CMOS 集成 D/A 转换器中则以倒 T 形电阻网络和开关树型电路较为常见。

本章中把 A/D 转换器归纳为直接 A/D 转换器和间接 A/D 转换器两大类。在直接 A/D 转换器中讲了并联比较型和反馈比较型两种电路。在反馈比较型中又介绍了计数型和逐次渐近型两种方案。并联比较型 A/D 转换器是目前所有 A/D 转换器中转换速度最快的一种,故又有快闪(Flash) A/D 转换器之称。由于所用的电路规模庞大,所以并联比较型电路只用在超高速的 A/D 转换器当中。而逐次渐近型 A/D 转换器虽然速度不及并联比较型快,但较之其他类型电路的转换速度又快得多,同时电路规模比并联比较型电路小得多,因此逐次渐近型电路在集成 A/D 转换器产品中用得最多。

在间接 A/D 转换器中,重点介绍了双积分型(属 $V-T$ 变换型)和 $V-F$ 变换型两种电路。虽然双积分型 A/D 转换器的转换速度很低,但由于它的电路结构简单,性能稳定可靠,抗干扰能力较强,所以在各种低速系统(例如数字式万用电表)中得到了广泛的应用。 $V-F$ 变换型也是一种低速的 A/D 转换器,由于调频信号具有很强的抗干扰能力,所以 $V-F$ 变换型 A/D 转换器多用在遥测、遥

控系统中。

为了得到较高的转换精度,除了选用分辨率较高的 A/D、D/A 转换器以外,还必须保证参考电源和供电电源有足够的稳定度,并减小环境温度的变化。否则,即使选用了高分辨率的芯片,也难于得到应有的转换精度。

习 题

[题 11.1] 在图 11.2.1 所示的权电阻网络 D/A 转换器中,若取 $V_{REF} = 5V$,试求当输入数字量为 $d_3d_2d_1d_0 = 0101$ 时输出电压的大小。

[题 11.2] 在图 11.2.3 给出的倒 T 形电阻网络 D/A 转换器中,已知 $V_{REF} = -8V$,试计算当 d_3 、 d_2 、 d_1 、 d_0 每一位输入代码分别为 1 时在输出端所产生的模拟电压值。

[题 11.3] 在图 11.2.5 所示的 D/A 转换电路中,给定 $V_{REF} = 5V$,试计算

(1) 输入数字量的 $d_9 \sim d_0$ 每一位为 1 时在输出端产生的电压值。

(2) 输入为全 1、全 0 和 1000000000 时对应的输出电压值。

[题 11.4] 在图 11.2.5 由 CB7520 所组成的 D/A 转换器中,已知 $V_{REF} = -10V$,试计算当输入数字量从全 0 变到全 1 时输出电压的变化范围。如果想把输出电压的变化范围缩小一半,可以采取哪些方法?

[题 11.5] 图 P11.5 所示电路是用 CB7520 和同步十六进制计数器 74LS161 组成的波形发生器电路。已知 CB7520 的 $V_{REF} = -10V$,试画出输出电压 v_o 的波形,并标出波形图上各点电压的幅度。CB7520 的电路结构见图 11.2.5,74LS161 的功能表与表 6.3.4 相同。

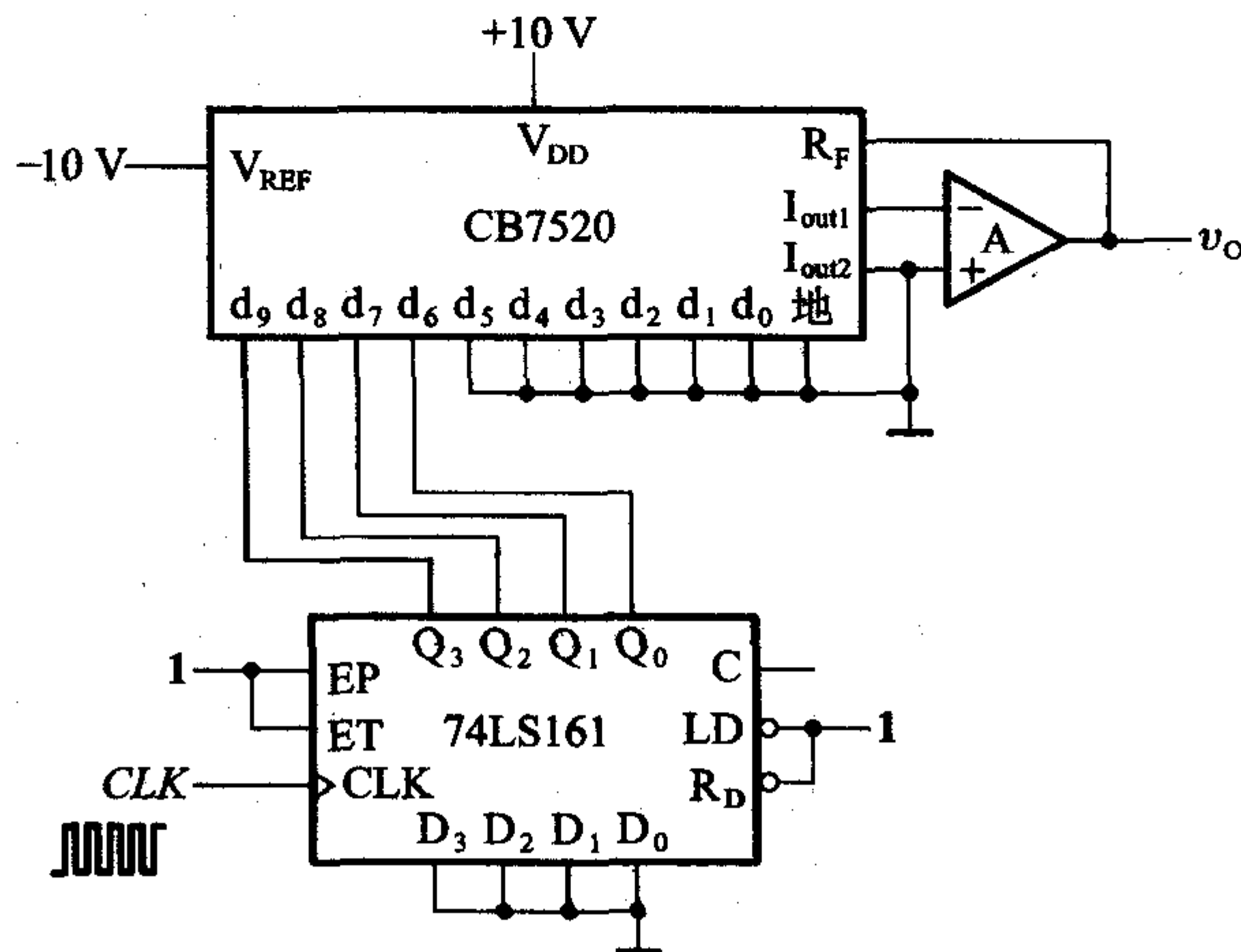


图 P11.5

[题 11.6] 图 P11.6 所示电路是用 CB7520 组成的双极性输出 D/A 转换器。CB7520 的电路结构见图 11.2.5,其倒 T 形电阻网络中的电阻 $R = 10k\Omega$ 。为了得到 $\pm 5V$ 的最大输出

模拟电压,在选定 $R_B = 20\text{k}\Omega$ 的条件下, V_{REF} 、 V_B 应各取何值?

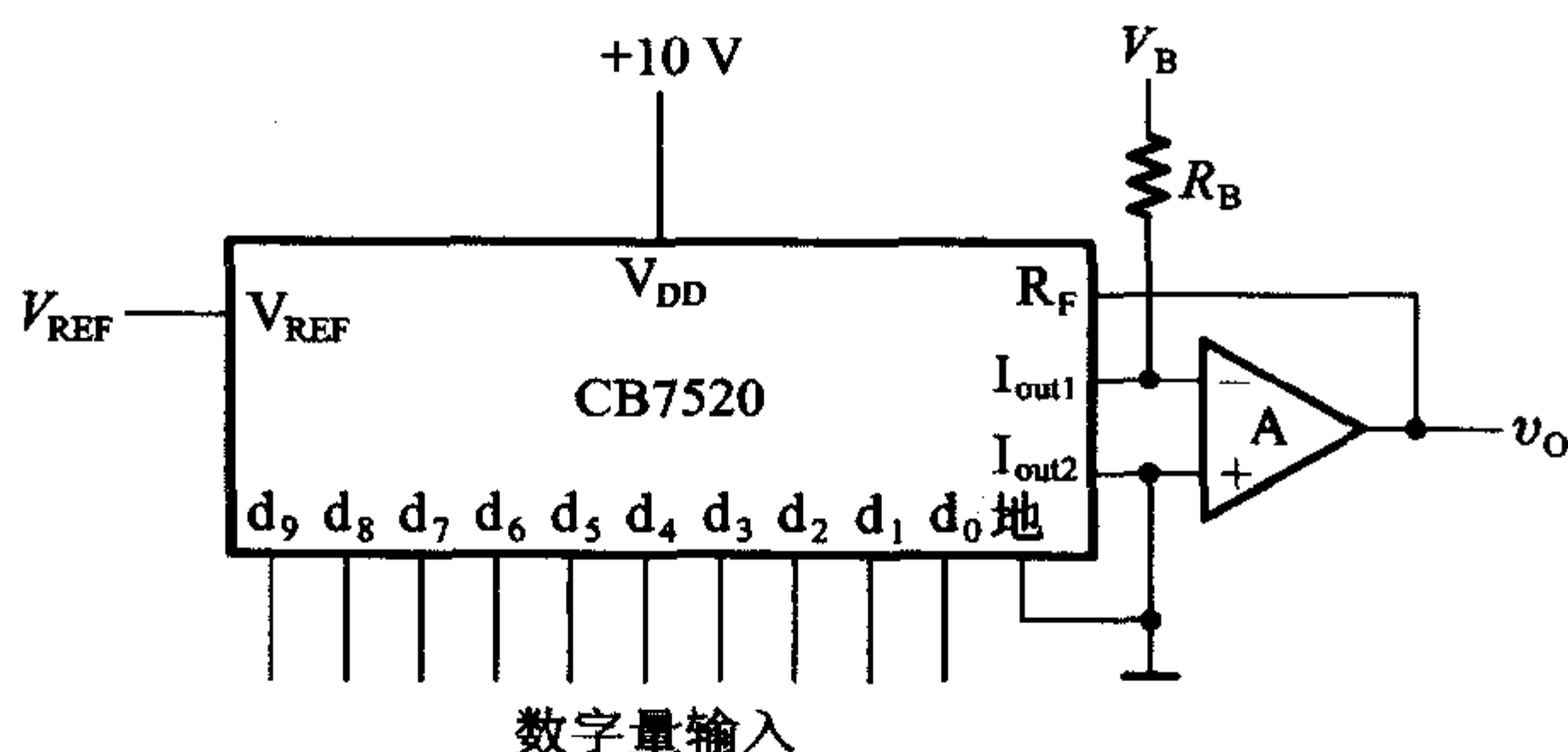


图 P11.6

[题 11.7] 在图 P11.7 给出的 D/A 转换器中,试求:

- (1) 1LSB 产生的输出电压增量是多少?
- (2) 输入为 $d_9 \sim d_0 = 1000000000$ 时的输出电压是多少?
- (3) 若输入以二进制补码给出,则最大的正数和绝对值最大的负数各为多少? 它们对应的输出电压各为多少?

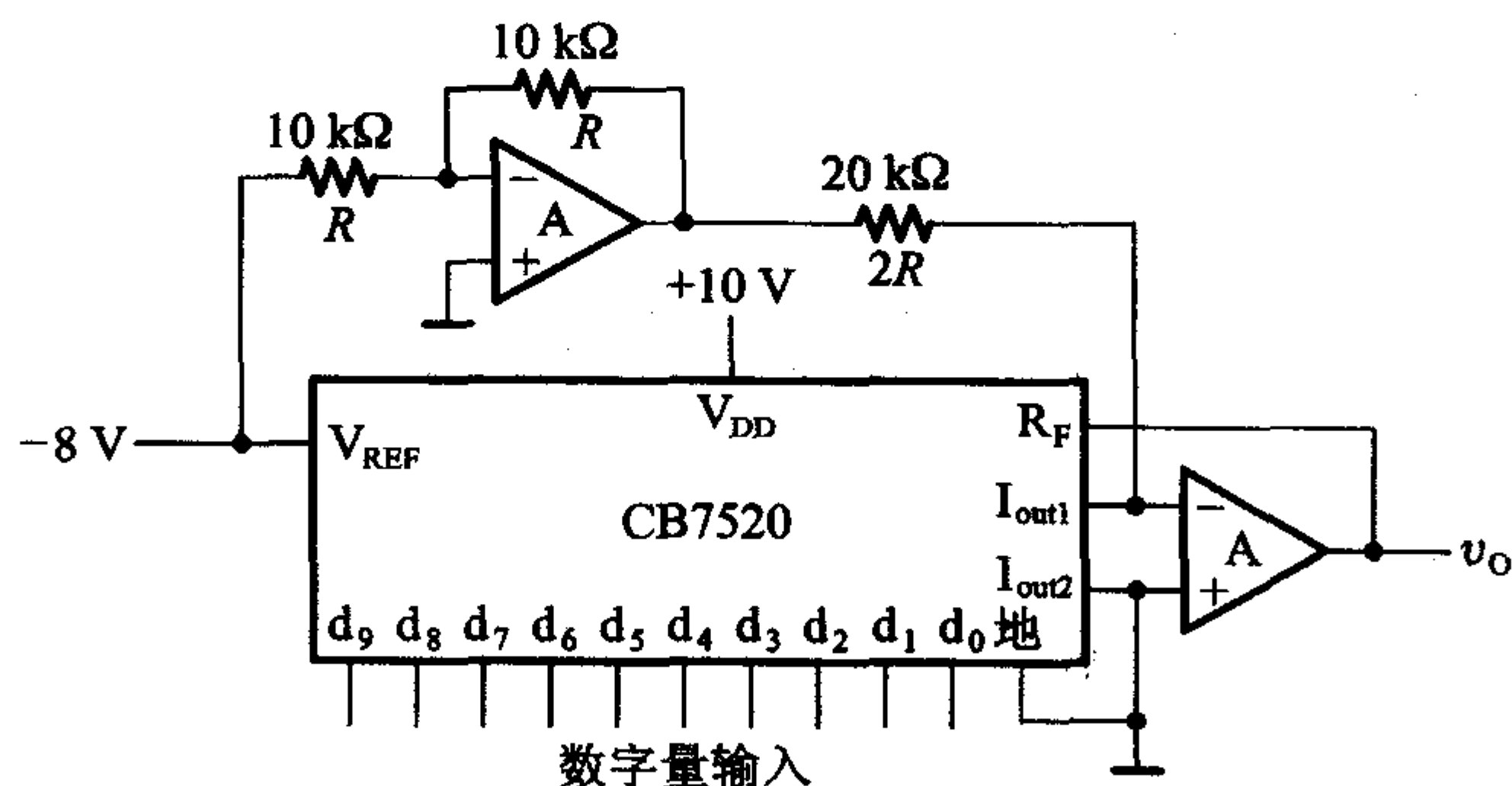


图 P11.7

[题 11.8] 试分析图 P11.8 电路的工作原理,画出输出电压 v_O 的波形图。CB7520 的电路图见图 11.2.5。同步十进制计数器 74LS160 的功能表见表 6.3.4。表 P11.8 给出了 RAM 的 16 个地址单元中所存的数据。高 6 位地址 $A_9 \sim A_4$ 始终为 0,在表中没有列出。RAM 的输出数据只用了低 4 位,作为 CB7520 的输入。因 RAM 的高 4 位数据没有使用,故表中也未列出。

表 P11.8 图 P11.8 中 RAM 的数据表

A_3	A_2	A_1	A_0	D_3	D_2	D_1	D_0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	1
0	0	1	0	0	0	1	1
0	0	1	1	0	1	1	1
0	1	0	0	1	1	1	1
0	1	0	1	1	1	1	1
0	1	1	0	0	1	1	1
0	1	1	1	0	0	1	1
1	0	0	0	0	0	0	1
1	0	0	1	0	0	0	0
1	0	1	0	0	0	0	1
1	0	1	1	0	0	1	1
1	1	0	0	0	1	0	1
1	1	0	1	0	1	1	1
1	1	1	0	1	0	0	1
1	1	1	1	1	0	1	1

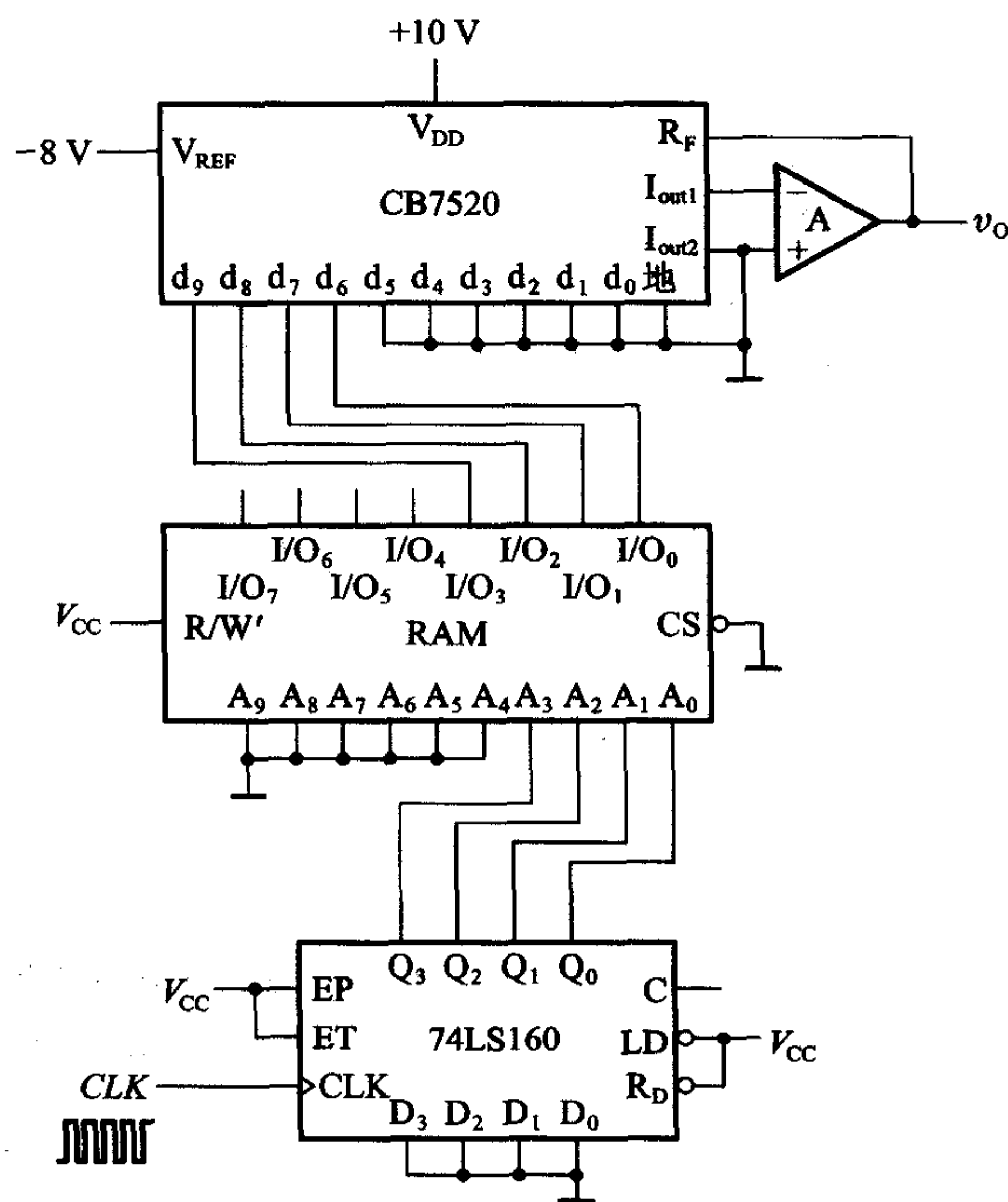


图 P11.8

[题 11.9] 如果用图 P11.8 的电路产生图 P11.9 的输出电压波形,应如何修改 RAM 中的数据? 请列出修改以后的 RAM 数据表,并计算时钟信号 CLK 应有的频率。

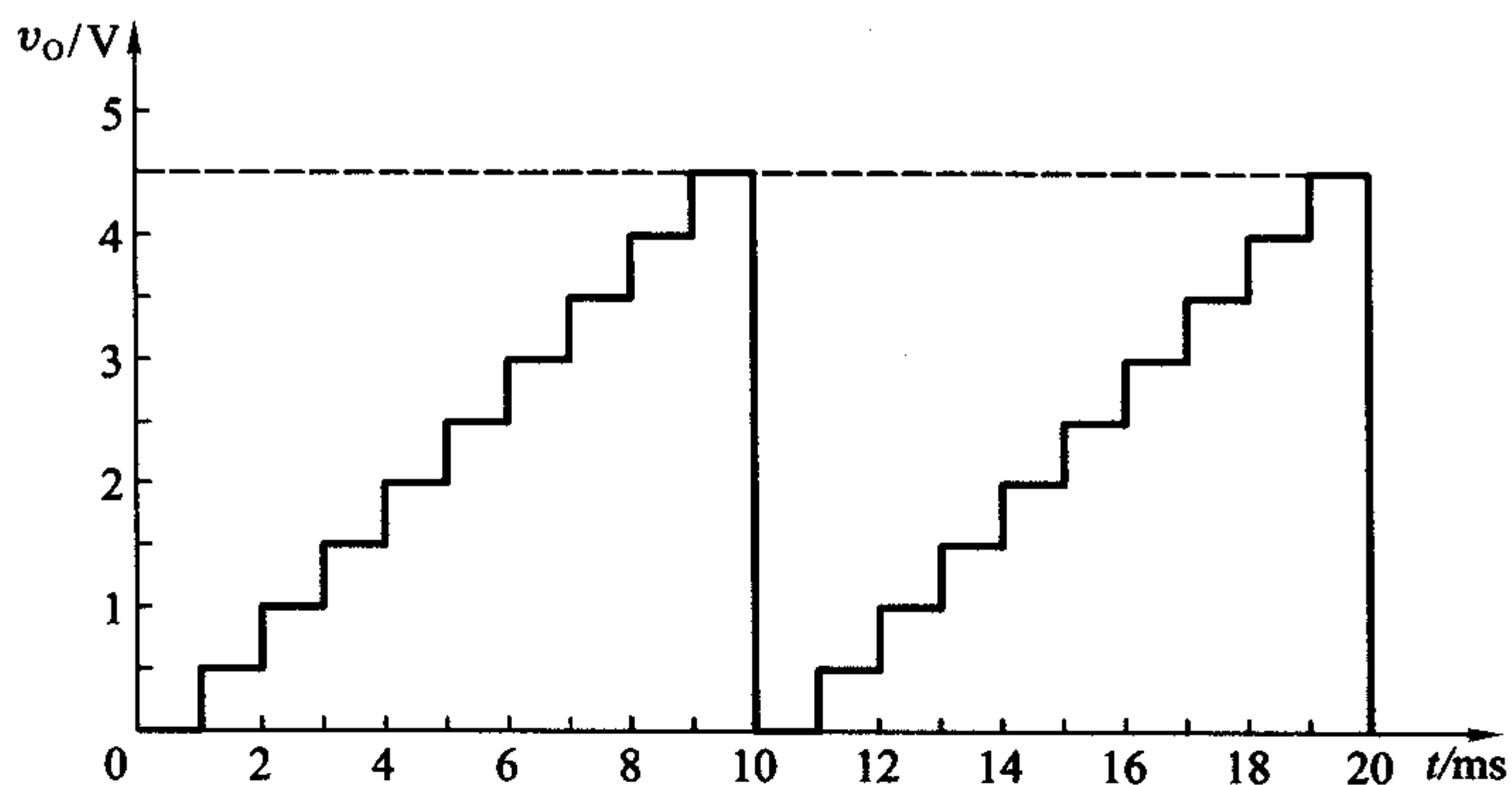


图 P11.9

[题 11.10] 设计一个波形发生器电路,要求产生图 P11.10 所给定的电压波形。

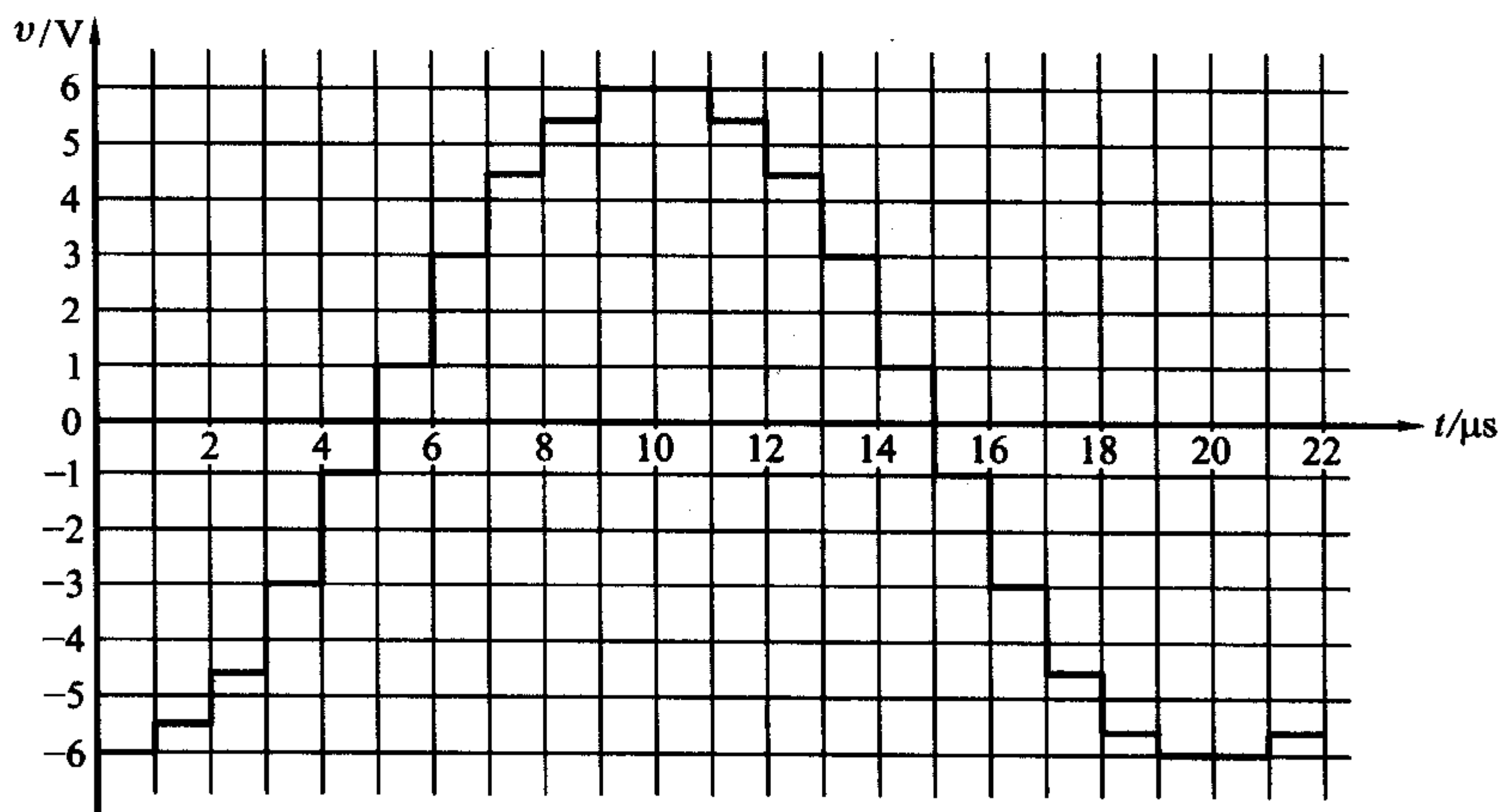


图 P11.10

[题 11.11] 图 P11.11 所示电路是用 D/A 转换器 CB7520 和运算放大器构成的增益可编程放大器,它的电压放大倍数 $A_v = \frac{v_o}{v_i}$ 由输入的数字量 $D(d_7 \sim d_0)$ 来设定。试写出 A_v 的计算公式,并说明 A_v 的取值范围。

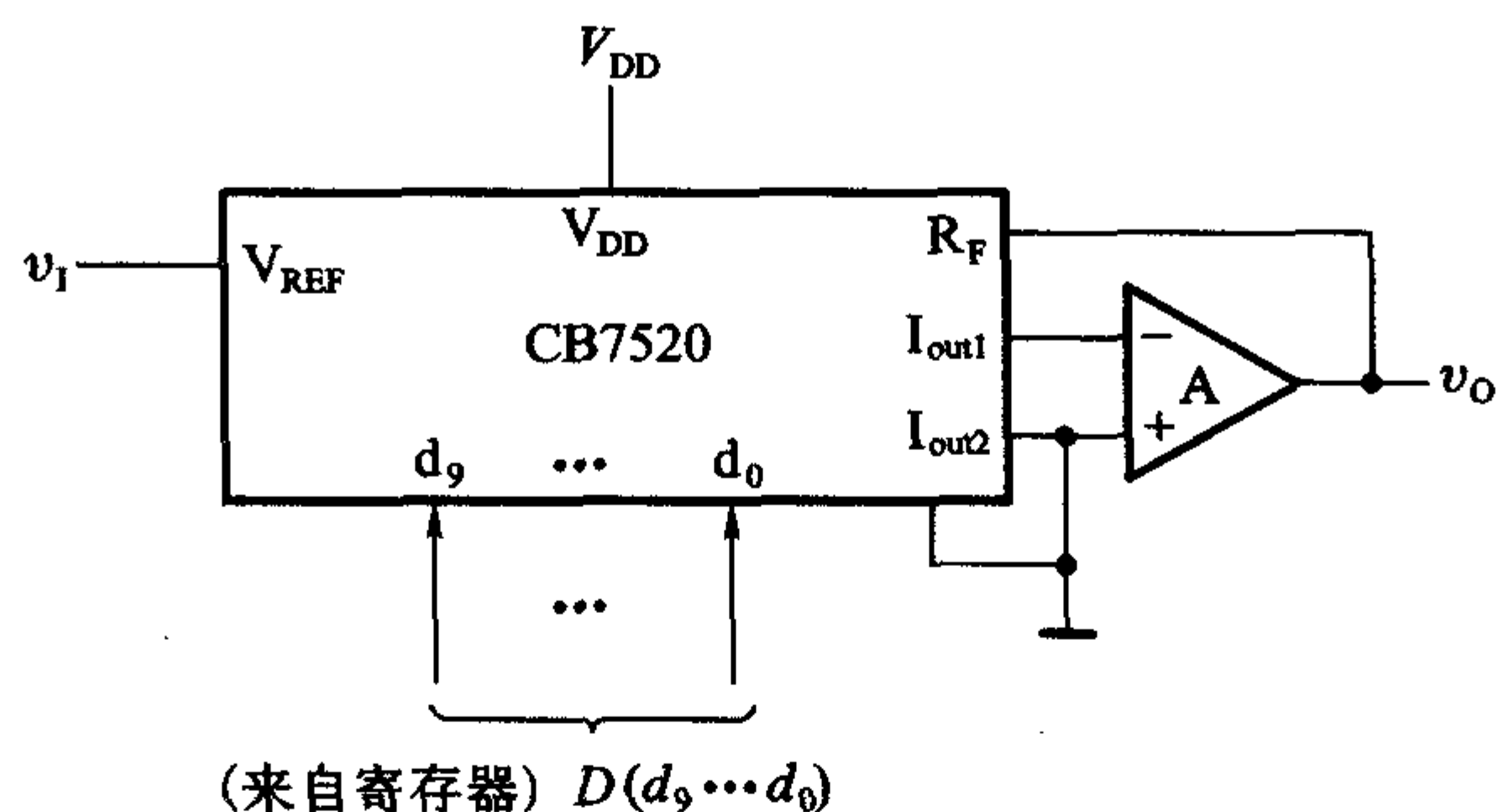


图 P11.11

[题 11.12] 图 P11.12 电路是用 D/A 转换器 CB7520 和运算放大器组成的增益可编程放大器, 它的电压放大倍数 $A_v = \frac{v_O}{v_I}$ 由输入的数字量 $D(d_9 \sim d_0)$ 来设定。试写出 A_v 的计算公式, 并说明 A_v 取值的范围是多少。

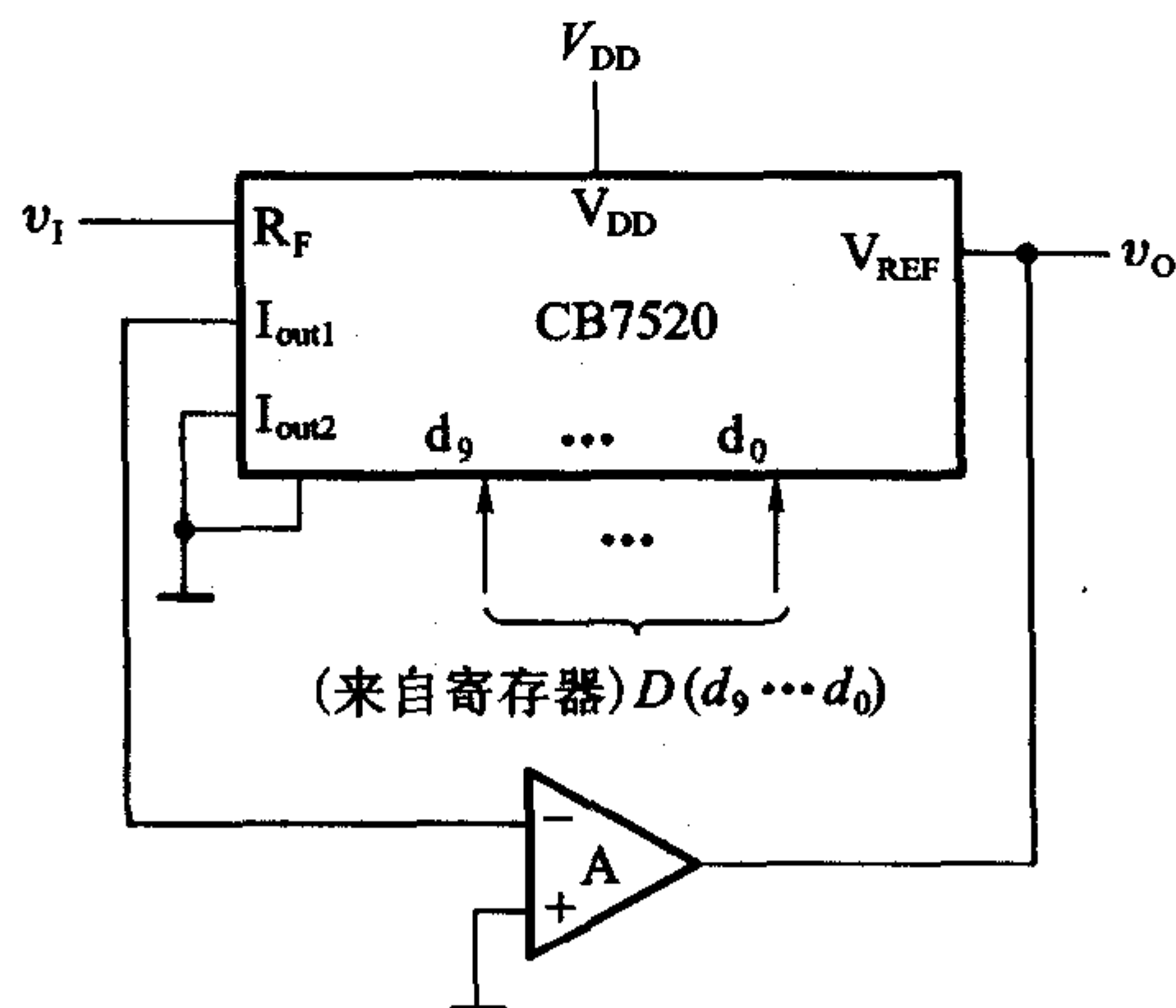


图 P11.12

[题 11.13] 在图 P11.13 所示的 D/A 转换器中, 已知输入为 8 位二进制数码, 接在 CB7520 的高 8 位输入端上, $V_{REF} = 10V$ 。为保证 V_{REF} 偏离标准值所引起的误差 $\leq \frac{1}{2} \text{LSB}$ (现在的 LSB 应为 d_2), 允许 V_{REF} 的最大变化 ΔV_{REF} 是多少? V_{REF} 的相对稳定度 $\left(\frac{\Delta V_{REF}}{V_{REF}}\right)$ 应为多少? CB7520 的电路见图 11.2.5。

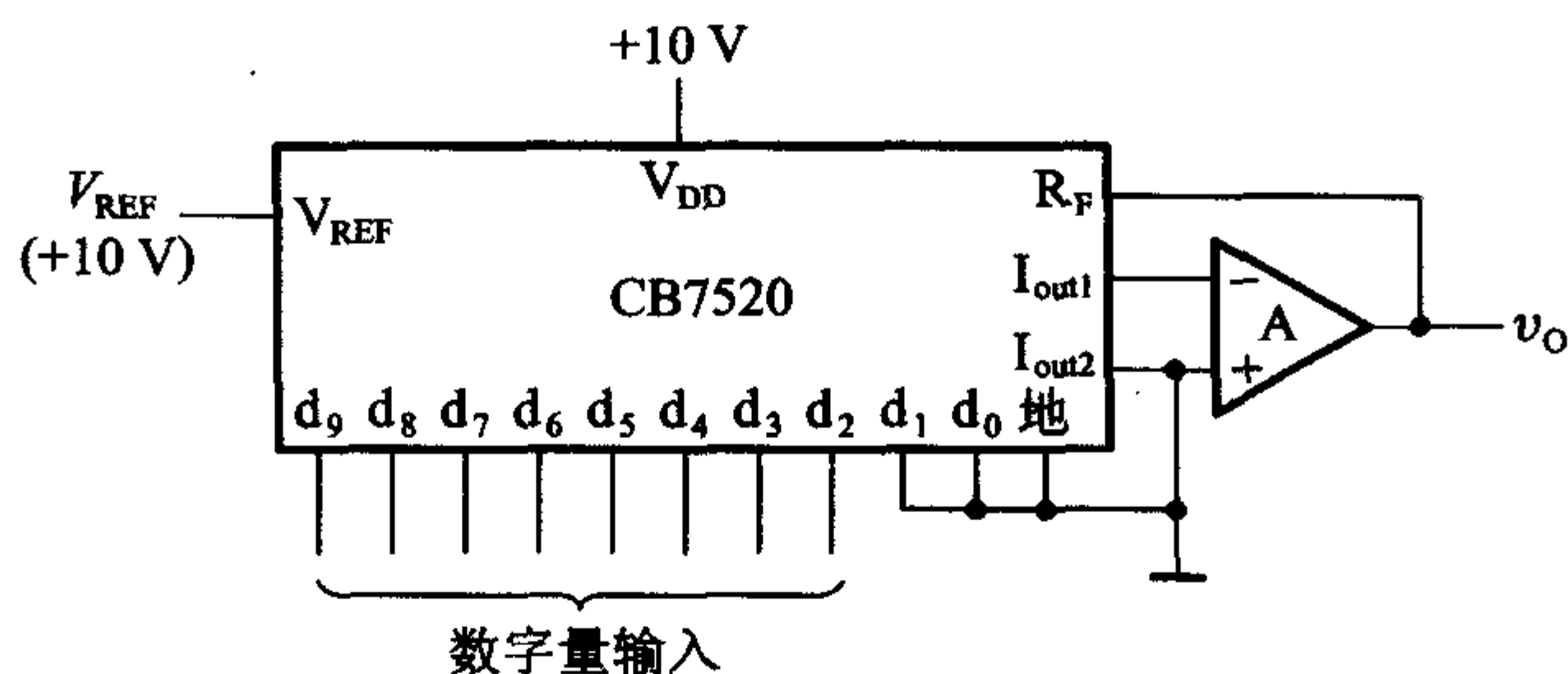


图 P11.13

[题 11.14] 若将图 11.3.7 并联比较型 A/D 转换器输出数字量增加至 8 位,并采用图 11.3.3(b)所示的量化电平划分方法,试问最大的量化误差是多少?在保证 V_{REF} 变化时引起的误差 $\leq \frac{1}{2}\text{LSB}$ 的条件下, V_{REF} 的相对稳定度 $\left(\frac{\Delta V_{REF}}{V_{REF}}\right)$ 应为多少?

[题 11.15] 在图 11.3.8 给出的计数式 A/D 转换器中,若输出的数字量为 10 位二进制数,时钟信号频率为 1MHz,则完成一次转换的最长时间是多少?如果要求转换时间不得大于 $100\mu\text{s}$,那么时钟信号频率应选多少?

[题 11.16] 如果将图 11.3.10 所示逐次渐近型 A/D 转换器的输出扩展到 10 位,取时钟信号频率为 1MHz,试计算完成一次转换操作所需要的时间。

[题 11.17] 在图 11.3.13 所示的双积分型 A/D 转换器中,若计数器为 10 位二进制,时钟信号频率为 1MHz,试计算转换器的最大转换时间是多少?

[题 11.18] 在图 11.3.16 所示的 A/D 转换器电路中,若要求单稳态触发器输出脉冲的宽度为 $t_w = 2.5\mu\text{s}$,输入电压为 $0 \sim 5\text{V}$ 时,输出脉冲的频率为 $0 \sim 200\text{kHz}$,电路参数应做何修改?

[题 11.19] 在图 11.3.14 所示的 $V-F$ 变换型 A/D 转换器电路中,如果要求将输入 $0 \sim 5\text{V}$ 的模拟电压转换为 3 位十进制数字量输出,输入为 5V 时输出应显示 500。闸门脉冲 v_G 的宽度为 5ms 。试求 $V-F$ 变换器输出频率与输入模拟电压之间的转换比例系数。

[题 11.20] 试分析图 P11.20(a)电路的工作原理,画出输出电压 v_O 的波形图。其中 74HC151 是 8 选 1 数据选择器,它的电路结构图和输出逻辑式见图 4.3.24 和式 (4.3.22)。74LS161 为同步十六进制加法计数器,它的功能表与表 6.3.4 相同。假定 74LS161 和反相器 G_1 的输出电阻阻值远远小于 R 的阻值。74HC151 各输入端的电压波形如图 P11.20(b) 所示。