

第 9 章 4：公式速查表

電子硬體常用公式整理。

一、基本電學

歐姆定律

$$V = I \cdot R \quad I = \frac{V}{R} \quad R = \frac{V}{I}$$

功率

$$P = V \cdot I = I^2 \cdot R = \frac{V^2}{R}$$

電能

$$W = P \cdot t \quad [\text{J}]$$

Kirchhoff 定律

- KCL : $\sum I_{in} = \sum I_{out}$
- KVL : $\sum V_{loop} = 0$

串並聯

- 串聯電阻 : $R_{total} = R_1 + R_2 + \dots$
- 並聯電阻 : $\frac{1}{R_{total}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots$
- 串聯電容 : $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots$
- 並聯電容 : $C = C_1 + C_2 + \dots$
- 串聯電感 : $L = L_1 + L_2 + \dots$
- 並聯電感 : $\frac{1}{L} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots$

分壓 / 分流

- $V_{R_2} = V_{in} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$
 - $I_{R_1} = I_{total} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ (並聯)
-

二、AC 與相量

角頻率

$$\omega = 2\pi f$$

阻抗

- 電阻： $Z_R = R$
- 電感： $Z_L = j\omega L$
- 電容： $Z_C = \frac{1}{j\omega C} = -\frac{j}{\omega C}$

RMS（正弦）

$$V_{RMS} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} \quad I_{RMS} = \frac{I_p}{\sqrt{2}}$$

平均功率

$$P = V_{RMS} \cdot I_{RMS} \cdot \cos \phi$$

功率因數

$$PF = \cos \phi$$

三、電容 / 電感

電容

- $Q = CV$
- $i = C \frac{dv}{dt}$
- $E = \frac{1}{2} CV^2$

電感

- $v = L \frac{di}{dt}$
- $E = \frac{1}{2} LI^2$

RC 充放電

- 時間常數： $\tau = RC$

- 充電： $v(t) = V_f(1 - e^{-t/\tau})$
- 放電： $v(t) = V_0 e^{-t/\tau}$

RL 暫態

- 時間常數： $\tau = L/R$

LC 諧振

- $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$
- 品質因數： $Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$

四、二極體 / 電晶體

二極體 (Shockley)

$$I = I_S(e^{V/(nV_T)} - 1)$$

熱電壓： $V_T = kT/q \approx 25.85 \text{ mV (at 300K)}$

BJT (主動區)

- $I_C = \beta I_B$
- $I_E = I_C + I_B = (\beta + 1)I_B$
- $V_{BE} \approx 0.7 \text{ V}$
- 跨導： $g_m = I_C/V_T$
- $r_\pi = \beta/g_m$
- $r_o = V_A/I_C$

MOSFET 飽和區

$$I_D = \frac{1}{2} \mu C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2$$

- 跨導： $g_m = \mu C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH}) = \sqrt{2I_D \mu C_{ox} W/L}$ - 線性區： $I_D = \mu C_{ox} \frac{W}{L} [(V_{GS} - V_{TH})V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2}]$

五、放大器 / OPAMP

反相

$$A_v = -\frac{R_f}{R_{in}}$$

非反相

$$A_v = 1 + \frac{R_f}{R_{in}}$$

緩衝器

$$A_v = 1$$

加法器

$$V_o = -R_f \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \cdots \right)$$

差動放大

$$V_o = (V_2 - V_1) \frac{R_f}{R_1} \quad (\text{平衡})$$

微分器

$$V_o = -RC \frac{dV_{in}}{dt}$$

積分器

$$V_o = -\frac{1}{RC} \int V_{in} dt$$

GBW

$$A \cdot BW = GBW = \text{const}$$

轉換速率

$$SR = \left| \frac{dV_o}{dt} \right|_{\max}$$

噪音電壓

$$V_n = \sqrt{4kTR \cdot BW} \quad (\text{熱雜訊})$$

六、濾波器

一階 RC LPF

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

一階 RL LPF

$$f_c = \frac{R}{2\pi L}$$

Sallen-Key 二階

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

七、電源

Buck 工作週期

$$D = \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

Boost

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1-D}$$

Buck-Boost

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{D}{1-D}$$

電感紋波

$$\Delta I_L = \frac{V_L \cdot t_{on}}{L}$$

輸出電容紋波 (Buck)

$$\Delta V_{out} = \frac{\Delta I_L}{8fC}$$

變壓器

- 匝數比： $\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s}$
 - 阻抗變換： $\frac{Z_p}{Z_s} = (\frac{N_p}{N_s})^2$
-

八、訊號完整性

反射係數

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

VSWR

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$$

微帶線阻抗（近似）

$$Z_0 \approx \frac{87}{\sqrt{\epsilon_r + 1.41}} \ln\left(\frac{5.98h}{0.8W + t}\right)$$

傳輸線傳輸延遲

$$t_d = \frac{\sqrt{\epsilon_r}}{c} \text{ [s/m]}$$

FR4： $\epsilon_r \approx 4.5$ ， $t_d \approx 7 \text{ ns/m} \approx 170 \text{ ps/inch}$

上升時間 vs 頻寬

$$BW \approx \frac{0.35}{t_r}$$

九、雜訊與訊號

分貝

$$A_{dB} = 20\log_{10}\left(\frac{V_o}{V_i}\right) = 10\log_{10}\left(\frac{P_o}{P_i}\right)$$

dBm

$$P_{dBm} = 10 \log_{10} \left(\frac{P}{1 \text{ mW}} \right)$$

熱雜訊 (Johnson)

$$v_n = \sqrt{4kTR\Delta f}$$

Friis 雜訊指數

$$NF_{total} = NF_1 + \frac{NF_2 - 1}{G_1} + \frac{NF_3 - 1}{G_1 G_2} + \dots$$

十、ADC / DAC

量化解析度

$$LSB = \frac{V_{ref}}{2^N}$$

理想 SNR (N-bit)

$$SNR = 6.02N + 1.76 \text{ [dB]}$$

ENOB

$$ENOB = \frac{SINAD - 1.76}{6.02}$$

取樣定理

$$f_s \geq 2f_{max}$$

十一、邏輯與時序

工作頻率

$$f_{max} = \frac{1}{T_{clk \rightarrow Q} + T_{logic} + T_{setup} + T_{skew}}$$

CMOS 動態功耗

$$P = CV^2f$$

CMOS 漏電功耗

$$P_{static} = V_{DD} \cdot I_{leak}$$

十二、熱

熱阻計算

$$T_J = T_A + P \cdot \theta_{JA}$$

串聯熱阻

$$\theta_{total} = \theta_{JC} + \theta_{CS} + \theta_{SA}$$

十三、其他常用

串聯電阻校驗（10 mA LED 限流）

$$R = \frac{V_{CC} - V_F}{I_F}$$

MCU 晶振準確度（ppm）

$$\Delta f = f_0 \cdot ppm \cdot 10^{-6}$$

電池容量轉換

$$Wh = Ah \times V$$

電容能量

$$E = \frac{1}{2} CV^2$$

電感能量

$$E = \frac{1}{2} LI^2$$

下一章

05-?????.md