

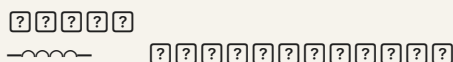
第 1 章 4：電感 (Inductor)

電感是儲存磁場能量的元件，是電容的「對偶」。在電源、濾波、射頻電路中扮演關鍵角色。

一、電感的物理本質

結構

最簡單的電感是「繞在磁芯上的線圈」（或空心線圈）：



工作原理：法拉第與楞次定律

當電流通過線圈時，會產生磁場（安培定律）。當電流變化時，磁通變化感應出反向電壓（法拉第定律），方向「反抗電流變化」（楞次定律）。

電感本質：電感的存在「抗拒」電流的變化。

電感值 (Inductance, L)

定義：

$$V = L \frac{di}{dt}$$

- 單位：亨利 (Henry, H) = V · s/A
- 1 H 是大電感，常見用 μH , mH

電感值取決於物理結構：

$$L = \frac{\mu_r \mu_0 N^2 A}{l}$$

- μ_0 ：真空磁導率 $4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$
- μ_r ：相對磁導率（鐵芯材料而定）
- N：匝數
- A：截面積
- l：磁路長度

重點：- 匝數 N 平方倍影響 (10 倍匝數 $\rightarrow$ 100 倍電感) - 加磁芯 (μ_r 大) 大幅提升電感 - 但磁芯有「飽和」問題

儲存能量

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

1 mH 電感通過 1A 電流儲存： $0.5 \times 10^{-3} \times 1 = 0.5 \text{ mJ}$

二、電感與電容的對偶性

電感與電容是「對偶元件」：

屬性	電容 C	電感 L
儲存	電場能	磁場能
即時量	v 不能突變	i 不能突變
公式	$i = C dv/dt$	$v = L di/dt$
阻抗	$Z = 1/(j\omega C)$	$Z = j\omega L$
DC	開路	短路
高頻	短路	開路
諧振能量	$E = \frac{1}{2}CV^2$	$E = \frac{1}{2}LI^2$
串聯	$1/\Sigma(1/C_i)$	ΣL_i
並聯	ΣC_i	$1/\Sigma(1/L_i)$

串聯電感像串聯電阻；並聯電感像並聯電阻。記住即可。

三、電感的核心特性

1. 阻抗

$$\boxed{Z_L = j\omega L = 2\pi f L \angle +90^\circ}$$

- 直流 (f=0)：阻抗 0 (短路)
- 高頻：阻抗很大 (開路)

電感「讓 DC 通過、阻擋 AC」，與電容相反。

例：1 mH 電感的阻抗

頻率	Z_L
60 Hz	0.377 Ω
1 kHz	6.28 Ω
10 kHz	62.8 Ω
100 kHz	628 Ω
1 MHz	6.28 k Ω

2. RL 暫態

電感與電阻串聯接電源 V_0 ：

$$i(t) = \frac{V_0}{R}(1 - e^{-Rt/L})$$

時間常數：

$$\tau = \frac{L}{R}$$

3. 電感的「儲存與釋放」行為

當電流通過電感然後突然中斷 (如開關打開)：

電感會「努力維持電流」，造成端電壓飆高 (理論上無窮大)。

這就是：- 馬達或繼電器斷電產生火花、損壞 IC - 必須加「飛輪二極體」 (freewheel diode) 保護 - 開關電源設計利用這個特性升壓

四、電感的功能應用

功能	應用
濾波	LC、 π 濾波器，整流後濾雜訊
儲能	開關電源 (buck, boost, flyback)
諧振	LC 諧振、振盪器、收音機選台
變壓器	隔離與電壓變換
扼流圈 (Choke)	阻擋高頻雜訊
能量轉換	馬達、發電機
天線	部分天線結構
EMI 抑制	共模扼流圈、磁珠 (ferrite bead)

五、電感的種類

1. 空心電感 (Air Core)

- 沒有磁芯，純線圈
- 電感值小 (nH- μ H)
- 線性、無飽和問題
- Q 值高
- 用於：高頻、射頻、AM/FM、振盪器

2. 鐵氧體電感 (Ferrite Core)

- 鐵氧體（陶瓷狀磁性材料）磁芯
- 中等磁導率
- 適合中高頻 (kHz-MHz)
- 用於：開關電源、濾波

3. 鐵粉芯 (Iron Powder)

- 壓鑄鐵粉
- 磁飽和點高
- 損耗較鐵氧體大

- 用於：電源、儲能

4. 矽鋼/鐵芯 (Silicon Steel / Iron)

- 高磁導率
- 用於低頻：50/60 Hz 電源變壓器
- 高頻損耗大

5. 非晶/奈米晶 (Amorphous / Nanocrystalline)

- 高效能、低損耗
- 用於高效電源、無線充電

6. 環形電感 (Toroid)

- 環形磁芯
- 磁通封閉於磁芯內，EMI 低
- 用於：精密濾波、變壓器

7. 屏蔽電感 (Shielded Inductor)

- 在表面加屏蔽層
- 降低電磁輻射
- 適合擁擠的 PCB 高密度設計

8. SMD 電感

類型	容量範圍	應用
繞線型 (Wirewound)	1 nH–10 mH	通用
多層型 (Multilayer)	1 nH–10 μ H	高頻訊號、小尺寸
薄膜型 (Thin Film)	0.1 nH–100 nH	高頻
模製型 (Molded)	μ H–mH 級大電流	電源

9. 磁珠 (Ferrite Bead)

特殊「電感」，只在高頻表現像電阻。

- 低頻 (DC、kHz)：阻抗低

- 中頻 (MHz)：阻抗高 (吸收能量為熱)
- 用於：抑制高頻雜訊、EMI 濾波、信號完整性

datasheet 主要看「在某頻率下的阻抗」，如 $600\Omega @ 100\text{ MHz}$ 。

⚠ 不要把 ferrite bead 當一般電感用，它的高頻是「電阻性」而非「電感性」。

10. 共模扼流圈 (Common Mode Choke)

- 兩線繞在同一磁芯
- 對差模訊號 (normal mode)：磁通抵消，呈現低阻抗
- 對共模訊號 (common mode noise)：磁通相加，呈現高阻抗
- 用於：USB、HDMI、乙太網、AC 電源輸入

六、電感的關鍵規格

1. 電感值 (Inductance)

datasheet 標稱值，常以 μH 或 nH 表示。

2. 容差

- 一般電感： $\pm 10\text{--}20\%$
- 精密電感： $\pm 1\text{--}5\%$
- 射頻 chip 電感：可達 $\pm 1\%$

3. 額定電流 (Saturation Current, I_{sat})

電感最容易被忽略的關鍵規格！

當電流超過 I_{sat} ，磁芯會「飽和」：- 電感值急劇下降 - 開關電源失效、效率劇降 - 嚴重時 IC 燒毀
datasheet 通常列：- I_{sat} ：使電感值下降 30% (或 10%) 的電流 - I_{rms} ：使溫升達 $\Delta T (40^\circ\text{C})$ 的電流

選用時：取 I_{sat} 與 I_{rms} 較小者，且要包含 buck 電流的最高 peak (不是平均)。

4. 直流電阻 (DCR, DC Resistance)

線圈的銅損電阻。影響：- 電源效率 (I^2R 損耗) - 暫態響應

低 DCR → 高效率，但通常意味更大尺寸。

5. 自諧振頻率 (SRF)

電感與寄生電容形成 LC 諧振。超過 SRF 後，電感變成電容性。

6. 品質因數 (Q-Factor)

$$Q = \frac{\omega L}{R_{dc} + R_{ac}}$$

- Q 高：低損耗，適合諧振、選頻
- Q 低：寬頻，適合濾波、扼流

7. 磁芯材料 (Core Material)

材料	適用頻率	損耗	飽和點
空芯	任意	0	不飽和
鐵氧體	kHz–GHz	中	低
鐵粉	kHz–MHz	高	中
鐵	DC–kHz	高	高
非晶/奈米晶	kHz–MHz	低	中-高

8. 工作溫度範圍

磁芯材料的「居禮溫度」 (Curie Temperature) 超過後磁性消失。鐵氧體典型：120–250° C。

七、實務應用範例

例 1：Buck 開關電源輸出電感

5V → 3.3V，輸出 1A，開關頻率 1 MHz：

電感計算（連續導通模式 CCM）：

$$L = \frac{(V_{in} - V_{out})D}{f \times \Delta I_L}$$

其中：- D = V_out / V_in = 0.66 - ΔI_L = 30% × I_out = 0.3 A（典型）

$$L = \frac{(5 - 3.3) \times 0.66}{10^6 \times 0.3} \approx 3.74 \mu\text{H}$$

選 $4.7\ \mu\text{H}$, $I_{\text{sat}} \geq 1.5\ \text{A}$ 的功率電感。

例 2：LC 低通濾波器

濾除 100 kHz 以上雜訊，匹配 $50\ \Omega$ 系統：

$$f_c = 1/(2\pi\sqrt{LC}) = 100\text{k} \rightarrow LC = 2.53\text{e-}12$$

選 $L = 10\ \mu\text{H}$, $C = 0.25\ \mu\text{F}$ (取 250 nF)

例 3：開關電源輸入磁珠

抑制流回電源的高頻雜訊：

選 $600\ \Omega @ 100\ \text{MHz}$ 的 0805 ferrite bead，DC 電阻 $< 50\ \text{m}\Omega$ ，額定電流 $>$ 工作電流 1.5 倍。

例 4：USB 共模扼流圈

USB 2.0/3.0 的 D+/D- 差動對，在電纜傳輸後會有共模雜訊：

選 $90\ \Omega @ 100\ \text{MHz}$ 的差動 / 共模兼用扼流圈，差模阻抗低（不影響訊號），共模阻抗高（吸收雜訊）。

八、電感設計常見錯誤

1. 飽和電流選太小

最常見：依平均電流選，但開關電源 peak 電流可能是平均的 2 倍。飽和後電感值下降 → 紋波激增 → IC 過流保護觸發或燒毀。

2. DCR 太大

電源用電感 DCR 太大 → 效率低、發熱嚴重。但 DCR 太小通常意味體積大。

3. SRF 比工作頻率低

開關電源 1 MHz，但選了 $\text{SRF} = 800\ \text{kHz}$ 的電感 → 電感性早已失效。

4. 磁芯材料錯誤

50/60 Hz 變壓器用鐵氧體 → 飽和、效率差 1 MHz 用矽鋼 → 損耗極大、發熱

5. 忽略 EMI

非屏蔽電感放在敏感訊號旁邊 → 磁場耦合干擾。

6. ferrite bead 當扼流圈

工程師常用 ferrite bead 旁路高頻，但若放錯位置可能與電容形成共振，反而放大 EMI。

7. 共模扼流圈的「魔法」誤解

共模扼流圈不是「萬能消雜訊」，要選對阻抗特性，並理解差模/共模的差異。

九、電感與 EMI

電感是 EMI 設計的關鍵元件：

抑制 EMI 三大武器

1. 磁珠 (ferrite bead)：吸收高頻雜訊
2. 共模扼流圈：消除共模雜訊
3. LC 濾波器：限制特定頻段

電感本身的 EMI 風險

- 開放磁路（線圈）會輻射磁場
- 影響附近敏感元件
- 解方：屏蔽電感、環形電感、加遮蔽罩

十、本章總結

✅ 您應該掌握：

- [x] 電感的物理本質： $v = L \, di/dt$
- [x] 電容與電感的對偶性
- [x] 阻抗 $Z_L = j\omega L$ ，DC 短路、高頻開路
- [x] 各種電感類型與磁芯材料
- [x] 飽和電流、DCR、SRF、Q 等關鍵規格
- [x] ferrite bead 與共模扼流圈的特殊用途
- [x] 開關電源中電感的選用
- [x] EMI 抑制中電感的角色

自我檢測

1. 1 mH 電感在 60 Hz 的阻抗多少？在 1 MHz 多少？
2. 開關電源中電感「飽和」會發生什麼？
3. 為什麼電容濾低頻雜訊用、電感濾高頻雜訊用？（陷阱題）
4. ferrite bead 與一般電感差別？
5. 共模扼流圈為什麼能消共模雜訊但不影響差模訊號？

解答

1. 60 Hz: $0.377\ \Omega$; 1 MHz: $6.28\ \text{k}\Omega$
2. 電感值急劇下降，紋波電流激增，可能燒毀 IC、效率掉、發熱嚴重
3. 陷阱：實際上電容旁路高頻（接地），電感阻擋高頻（串聯）。要看怎麼接
4. ferrite bead 在高頻是電阻性（吸收能量為熱），一般電感是電抗性（儲能）
5. 兩線繞在同一磁芯，差模時磁通抵消，共模時磁通相加，因此對共模呈現高阻抗

下一章

05-????.md 一開始進入主動元件的世界。