

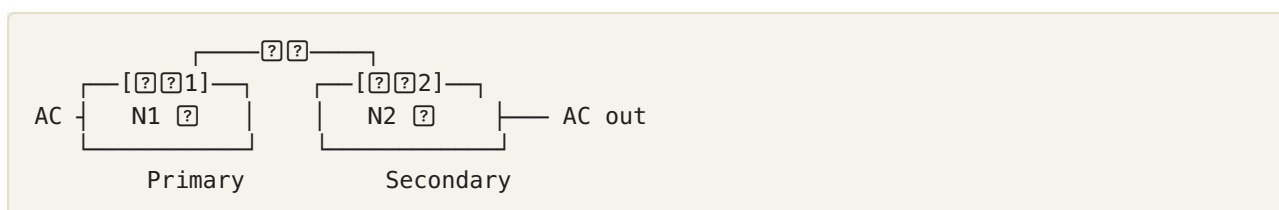
第 1 章 8：變壓器 (Transformer)

變壓器是電力電子的「主角」之一，也是電源供應器、隔離設計的核心。

一、變壓器的物理原理

結構

兩組線圈（初級 primary、次級 secondary）繞在共同磁芯上：



兩組線圈不電氣連接，但由「磁通」耦合。

工作原理（電磁感應）

1. 初級線圈通過交流電流 → 產生交變磁通
2. 磁通經磁芯傳導到次級線圈
3. 變化磁通在次級感應電壓（法拉第定律）

關鍵公式：

$$\boxed{\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s}}$$

電壓與「匝數比」成正比。

電流相反：

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{N_s}{N_p}$$

變壓器「保持功率」（不考慮損耗）： $V_p \times I_p \approx V_s \times I_s$

二、變壓器的功能

1. 電壓變換

最直觀用途：升壓或降壓。 - 110V AC → 12V AC（消費電子內部） - 11kV → 220V（市電變電所）

2. 電氣隔離

初級與次級沒有電氣連接，只透過磁場耦合 → 安全隔離。 - 安規必要：人體可能接觸的設備一定要有隔離 - 醫療設備：保護病人不接觸電網

3. 阻抗變換

阻抗反射：

$$Z_p = \left(\frac{N_p}{N_s}\right)^2 Z_s$$

用於：音響功率放大器到喇叭、射頻的阻抗匹配。

4. 電流隔離量測 (CT, Current Transformer)

把大電流（如 100A）轉成小電流（5A）方便量測。

5. 訊號耦合（在脈衝、音訊應用）

- 脈衝變壓器：傳遞高速訊號（如 PoE）
- 音訊變壓器：阻抗匹配麥克風到擴大器

三、變壓器的種類

1. 依頻率分類

工頻變壓器 (50/60 Hz)

- 矽鋼片 (Si Steel) EI 型、UI 型
- 體積大、重
- 用於：傳統電源變壓器、變電所

高頻變壓器 (kHz–MHz)

- 鐵氧體 (Ferrite) 磁芯
- 體積小、輕
- 用於：開關電源、無線充電

射頻變壓器

- 鐵粉芯、空心
- 用於：RF 阻抗匹配、Balun

2. 依結構分類

隔離變壓器

1:1 變壓器，純粹電氣隔離。

自耦變壓器 (Autotransformer)

單一線圈中間抽頭，沒有完全隔離但效率高、便宜。

中心抽頭變壓器 (Center Tapped)

次級中間引出，常用於全波整流或對稱輸出。

三相變壓器

三相電力系統用，星形/三角形連接。

3. 特殊變壓器

共模扼流圈 (Common Mode Choke)

雖然形式像變壓器，主要用於濾除共模雜訊（前章已介紹）。

Balun (Balanced-Unbalanced)

平衡↔非平衡訊號轉換，常用於射頻、乙太網。

電流互感器 (CT)

量測大電流。

電壓互感器 (PT)

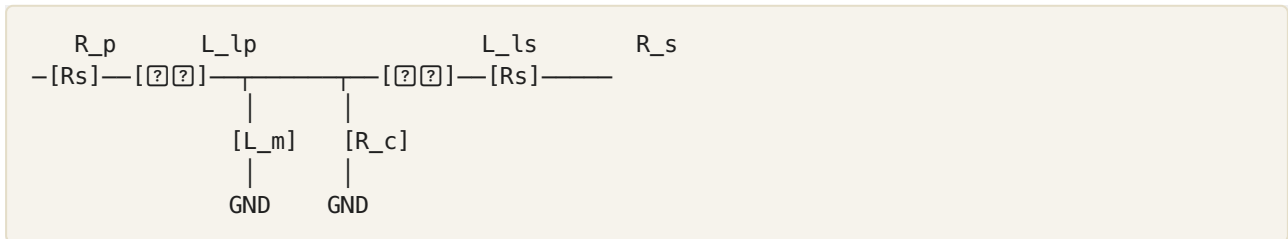
量測高電壓。

四、變壓器的電路模型

理想變壓器

僅有匝數比 $N_p:N_s$ ，無損耗、無漏感。

實際變壓器 (T 模型)



包含：- R_p, R_s ：銅損（線圈電阻） - L_{lp}, L_{ls} ：漏感（leakage inductance，未耦合的磁通）
- L_m ：勵磁電感（magnetizing inductance） - R_c ：鐵損等效電阻

耦合係數 k

理想 $k = 1$ ，實際 0.95–0.99。漏感 = 總電感 $\times (1 - k^2)$ 。

五、變壓器的關鍵規格

1. 額定容量 (VA)

最大可傳輸功率，通常 $V \times I$ 表示。

2. 初級/次級電壓

標稱輸入/輸出電壓。

3. 工作頻率

工頻、開關頻率（高頻型）。

4. 隔離耐壓 (Isolation Voltage)

初次級間最大耐壓，依安規要求：- 一般電源：1500–3000 V_{AC} - 醫療設備：4000+ V

5. 效率

$\eta = P_{out} / P_{in}$ ，工頻型 80–95%，高頻 92–98%。

6. 漏感 (Leakage Inductance)

影響開關電源的尖峰電壓、效率。

7. 飽和磁通密度 (B_{max})

磁芯飽和的閾值，常見：- 矽鋼：1.5–2.0 T - 鐵氧體：0.3–0.5 T - 非晶：1.5 T

8. 工作溫度範圍

與磁芯居禮溫度與絕緣等級相關。

六、開關電源變壓器（重點）

現代電子設備幾乎都用「開關電源」而非工頻變壓器：

為什麼？

工頻變壓器在 50/60 Hz 工作，要降壓 110V→12V：- 體積大（鐵芯需要大磁通容量）- 重（鐵心 + 銅）- 效率較差

開關電源在 100 kHz–1 MHz 工作：- 體積大幅縮小（高頻磁芯小很多）- 輕、效率高 - 但設計複雜

經典拓撲

拓撲	功率範圍	特點
Flyback	0–100W	簡單、單個變壓器、輸出多組容易
Forward	100–500W	連續導通，效率高
Push-Pull	100–500W	雙極性磁通，磁芯利用好
Half-Bridge	200–1000W	
Full-Bridge	500W–10kW	大功率主流
LLC Resonant	100W–數kW	軟切換、高效率
PFC + LLC	大功率	高功率因數電源

(詳見 03-中級篇/05-電源供應器設計.md)

七、變壓器設計入門（簡介）

不需現在就會設計變壓器，但要知道概念：

1. 選磁芯材料與大小

由功率與頻率決定。AP (Area Product) 法：

$$AP = A_e \times A_w$$

A_e ：磁芯有效截面積 A_w ：繞線窗口面積

2. 計算初級匝數 N_p

$$N_p = \frac{V_p \times t_{on}}{B_{max} \times A_e}$$

3. 匝數比決定 N_s

$$N_s = N_p \times \frac{V_s}{V_p}$$

4. 線徑選擇

依電流密度（一般 4 A/mm²，散熱差時 2.5 A/mm²）。

5. 繞線排列

影響漏感、寄生電容、絕緣與安規。- 三明治式繞法：減少漏感 - 分層繞線：大電流分層

八、實務應用範例

例 1：手機充電器內部

110V AC → 5V DC：

1. 整流橋：AC → 脈動 DC (~ 156V peak)
2. 高壓濾波電容：156V DC
3. 開關電晶體 (MOSFET) 以 100 kHz 切換
4. 高頻變壓器：156V → 約 5V × 匝數比的脈衝
5. 次級整流二極體（蕭基）
6. 輸出濾波電容
7. 反饋（光耦合器或 primary side 感測）

例 2：USB-PD 充電器

支援 5V/9V/12V/15V/20V 多檔輸出：

通常使用 Flyback 拓撲，控制器透過反饋調整匝數比的「等效輸出」。

例 3：乙太網路 PHY

每對差分對都接一顆「Magnetics」（網路變壓器）：

- 阻抗匹配：100 Ω 雙絞線
- 電氣隔離：保護晶片不被線路雷擊損壞
- 共模雜訊抑制

例 4：音響功率放大器

晶體管放大後接喇叭（4–8 Ω 低阻抗）：- 真空管時代：必用變壓器（管子內阻數 k Ω ）- 電晶體時代：直接耦合，但仍見到「輸出變壓器」的真空管復古設計

九、變壓器的常見錯誤

1. 忽略漏感

開關電源中漏感引起 spike，可能擊穿 MOSFET。解方：snubber 電路、RCD 緩衝、優化繞線。

2. 飽和

設計時磁通計算錯誤，B 超過 B_{max} → 磁芯飽和 → 電感劇降 → 開關電晶體燒毀。

3. 工頻變壓器接到不對的頻率

110V 60Hz 變壓器接 110V 50Hz：磁通密度增加 20%，可能飽和。

4. 隔離耐壓不足

過了安規但實際應用瞬間電壓尖峰超過。

5. EMI 設計不良

變壓器是 EMI 的主要源，需要：- 屏蔽銅箔 - Y 電容跨初次級 - 共模扼流圈

6. 散熱不足

繞線銅損 + 鐵損都會發熱。高頻變壓器容易燒毀。

十、本章總結

✔ 您應該掌握：

- [x] 變壓器的電磁感應原理
- [x] 匝數比 = 電壓比、電流反比
- [x] 三大用途：變壓、隔離、阻抗變換
- [x] 工頻 vs 高頻變壓器
- [x] 隔離變壓器、自耦、中心抽頭、三相
- [x] 開關電源變壓器的重要性
- [x] 變壓器電路模型（漏感、勵磁電感、銅損、鐵損）

自我檢測

1. 110V 初級 / 12V 次級的變壓器，匝數比多少？
2. 1A 的初級電流，次級電流大約多少？
3. 為什麼開關電源比工頻電源體積小？
4. 漏感對 Flyback 電源有什麼影響？
5. 為什麼乙太網路要用網路變壓器？

解答

1. $N_p:N_s = 110:12 \approx 9.17:1$
2. $I_s = I_p \times N_p/N_s = 1 \times 9.17 \approx 9.17 \text{ A}$
3. 高頻工作 (kHz-MHz)，磁芯需要的 $V \cdot t$ 積（即 $B \times A$ ）小，因此可用更小的磁芯
4. 漏感儲存的能量在 MOSFET 關閉時釋放，產生高壓 spike，可能擊穿 MOSFET。需 snubber 緩衝
5. 1) 阻抗匹配 100Ω 雙絞線；2) 電氣隔離（防雷擊、共模浪湧）；3) 抑制共模雜訊

下一章

09-?????.md 一 機電元件。