

第 5 章 4：模擬與驗證

「先模擬，再焊接」是現代硬體開發的鐵律。

一、模擬類型

1. SPICE（電路模擬）

- DC 工作點
- AC 頻率響應
- Transient（時域）
- Noise 分析
- Monte Carlo（蒙地卡羅統計）
- Sensitivity 分析

工具： - LTspice（免費，最廣泛） - HSPICE（業界標準，IC 用） - Spectre（Cadence） - PSpice（OrCAD） - TINA-TI（TI 免費） - ngspice（開源）

2. 訊號完整性（SI）

- IBIS 模型 + S 參數
- 眼圖、jitter、串擾
- 工具：HyperLynx、ADS、Sigridy

3. 電源完整性（PI）

- PDN 阻抗
- IR drop
- 暫態
- 工具：HyperLynx PI、PowerSI、ANSYS SIwave

4. 電磁模擬（EM）

- 3D 全波模擬
- 天線、射頻、PCB 板級
- 工具：HFSS、CST、Sonnet、OpenEMS

5. 熱模擬

- 元件溫升
- PCB 散熱路徑
- 工具：FloTHERM、Icepak、QFin

6. 機械模擬

- 振動、衝擊
- 落摔
- 工具：ANSYS Mechanical、SolidWorks Simulation

二、SPICE 模擬技巧

基本指令

```
* [?][?][?]RC [?][?][?][?][?]
V1 in 0 AC 1
R1 in out 1k
C1 out 0 1u
.AC dec 100 1 1Meg
.PROBE
.END
```

常用分析

```
.OP ; DC [?][?][?]
.DC V1 0 5 0.1 ; DC [?][?]
.AC dec 100 1 1Meg ; AC [?][?][?][?]
.TRAN 1ns 10us ; [?][?]
.NOISE V(out) V1 dec 10 1 1G
```

模型來源

- IC 廠商提供 .lib 檔
- 元件 datasheet 通常含 SPICE model

三、驗證階段

1. EVT (Engineering Verification Test)

- 工程樣機
- 驗證設計可行性
- 找出設計缺陷
- 修正後做下一版

2. DVT (Design Verification Test)

- 設計確認
- 全面測試所有規格
- 環境測試（高低溫、濕度）
- 安規預測

3. PVT (Production Verification Test)

- 量產前驗證
- 驗證製程可重複性
- 良率確認

4. 認證測試

- EMC (FCC、CE)
- 安規 (UL、TÜV)
- 環保 (RoHS、REACH)
- 通訊 (FCC、NCC)

四、模擬 vs 量測

模擬與實際結果差異常見來源：

1. 元件模型不準
2. 寄生未模擬：PCB layout、封裝
3. 製程容差： $\pm 10\text{--}20\%$
4. 溫度變化
5. 負載動態變化

→ 永遠以實測為準，模擬只是預測。

五、本章總結

✅ 您應該理解：

- [x] 模擬類型與工具
 - [x] SPICE 基本指令
 - [x] EVT/DVT/PVT 三階段驗證
 - [x] 模擬與實測的差異
-

下一章

05-???.md