

第 5 章 7：可靠度設計 (DFx)

DFx 是「Design for X」：在設計階段就考慮製造、測試、可靠度等因素。

一、DFx 家族

簡稱	全名	重點
DFM	Design for Manufacturing	容易製造
DFA	Design for Assembly	容易組裝
DFT	Design for Testability	容易測試
DFR	Design for Reliability	可靠耐用
DFS	Design for Service	容易維修
DFE	Design for Environment	環保 / 回收
DFC	Design for Cost	控制成本

二、DFM（製造為導向設計）

PCB 規則

- 線寬不要超過工藝極限
- via 不要塞 IC 焊盤（要 tent 或 plug）
- 元件間距足夠 P&P 機放置
- 拼板留工藝邊
- silkscreen 不蓋焊盤

元件選擇

- 標準封裝（不用罕見的）
 - 多源（second source）
 - 避免 obsolete
-

三、DFT（可測試性設計）

測試點

關鍵節點：- 各電源軌 - 時鐘 - 重要訊號 - 介面 (debug、UART)

Boundary Scan (JTAG)

- 連通性測試
- 不需實體探針

Built-In Self-Test (BIST)

IC 內建測試：- LBIST (邏輯) - MBIST (記憶體)

測試夾具

- ICT pogo pin
 - FCT 治具
-

四、DFR（可靠度設計）

環境降額

- 電容耐壓 $\times 2$ 倍工作電壓
- MOSFET $V_{DS} \times 1.5$ 倍工作
- LED 電流 $\times 0.6$
- 電解電容溫度 $\times$ 較低

失效模式分析 (FMEA)

每個元件或子系統：- 可能失效模式 - 失效原因 - 影響 - 偵測方法 - 嚴重度、發生率、偵測度 - RPN
 $= S \times O \times D$ - 改善行動

MTBF 計算

依 IEC 62380 或 MIL-HDBK-217：- 元件級失效率 $\rightarrow$ 系統 MTBF - 高溫、振動會降低

冗餘設計

- N+1 電源

- RAID 儲存
 - 看門狗 (watchdog)
-

五、DFS (服務 / 維修)

模組化

把易壞元件做成可換模組。

升級空間

- BootLoader 支援 OTA
- 預留韌體擴充空間
- 接口可擴充

自我診斷

LED + log 提示問題。

六、DFE (環境)

RoHS

- 不含鉛 (無鉛焊錫)
- 不含鎘、汞、六價鉻、PBB、PBDE

REACH

歐盟化學品法規。

Halogen Free

某些客戶 / 規格要求。

回收性

- 易拆解
 - 標示材質
-

七、DFC（成本）

BOM 成本

- 標準元件
- 大量採購折扣
- 多 source 議價

製造成本

- PCB 層數越少越便宜
- 標準工藝
- 自動化組裝

認證成本

- 提早規劃，避免重做

八、本章總結

✅ 您應該掌握 DFx 概念：

- [x] DFM/DFA：製造組裝順
- [x] DFT：好測試
- [x] DFR：可靠
- [x] DFS：易維修
- [x] DFE：環保
- [x] DFC：低成本

下一章

08-???.md