瞭解安全事項應用筆記——第 3 部分：

接腳 FMEDA

本文目的在深入探討 IC 接腳失效模式和影響分析 (FMEA) 的重要性，並結合 ADI 的安全事項應用筆記，說明 FMEA 在功能安全標準（如 IEC 61508 和 ISO 13849）合規過程中的實踐意義。功能安全標準包含規範性和參考性兩類條款，其規定了系統整合業者在進行技術安全分析時需考慮的積體電路 (IC) 和印刷電路板 (PCB) 潛在失效情況。

■作者：Bryan Angelo Borres / ADI 資深產品應用工程師

引言

ADI 透過系列文章，來介紹安全事項應用筆記如何為設計安全相關系統 (SRS) 的系統整合業者提供技術安全分析所需的關鍵資訊，本文是系列文章的最後一部分。先前的第 1 部分介紹了此類應用筆記如何依據 Arrhenius 高溫工作壽命 (HTOL)、SN 29500 和 IEC 62380，確定 IC 的失效率，而第 2 部分則闡述如何透過失效模式分佈 (FMD) 識別相關失效模式。

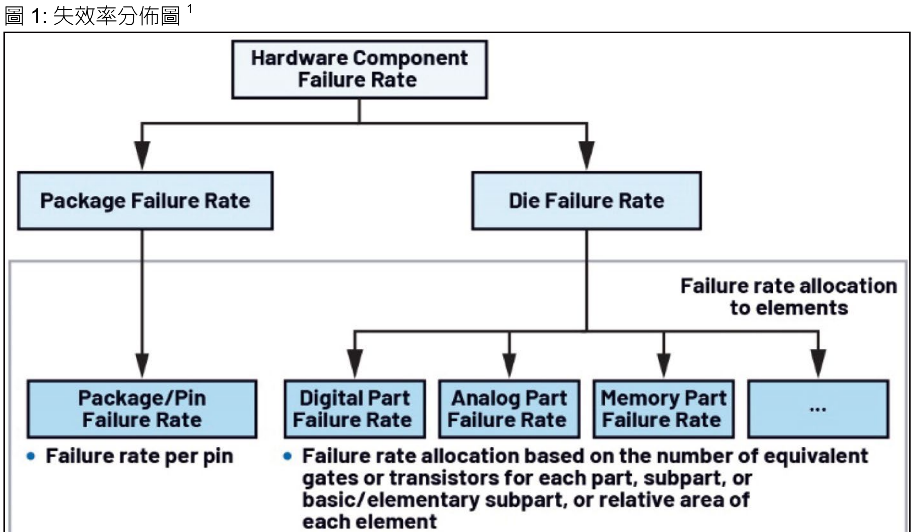
本為所提供的最後一部分說明內容，目的在深入探討設計安全相關系統時瞭解 IC 接腳失效模式和影響分析 (FMEA) 的重要性，並說明 ADI 的安全事項應用筆記如何提供此類接腳 FMEA 資訊。

什麼是接腳 FMEA ？

接腳 FMEA 是 FMEA 的一種，主要專注於分析 IC 封裝的潛在失效模式及其對系統功能的影響。接腳 FMEA 可以與計算出的封裝失效率 (例如通過 IEC 62380) 配合使用，以確定 IC 的失效率分佈，如圖 1 所示。失效率可以進一步分為四種情況：安全、危險、無影響或無元件 (即不涉及具體元件)。這種失效率認定對於推導安全失效比率 (SFF) 和 SRS 危險失效概率十分重要。

IC 的接腳 FMEA 是 ADI 安全事項應用筆記中提供的另一項安全資訊，目的在協助系統整合業者進行技術安全分析。圖 2 顯示了 LTC2933 的接腳 FMEA，可在其安全事項應用筆記中找到。藉由此類應用筆記，可以得知接腳故障是否會造成損壞，還是僅僅導致系統運行問題。

圖 1: 失效率分佈圖 [1]



IEC 61508 的規定

基本功能安全 (FS) 標準 [2] 的表 A.1 中，展示了在量化隨機硬體失效的影響時

圖 2:LTC2933 接腳 FMEA

Table 4-1 Application Circuit 1 Pin FMEA for the LTC2933 Pins Short-Circuited to Supply

Pin no.	Pin Name	Effect of Failure Mode
1	V4	OV detected. Both GPIO1 and GPIO2 are always LOW. GPIO3 always HIGH.
2	V3	OV detected. Both GPIO1 and GPIO2 are always LOW. GPIO3 always HIGH.
3	V2	OV detected. Both GPIO1 and GPIO2 are always LOW. GPIO3 always HIGH.
4	V1	No effect. V1 is the chip supply.
5	VDD33	Internal regulator shorted to supply. Part damaged.
6	GND	Part not functional.
7	GPIO3	GPIO3 always HIGH.
8	ASEL	Part will not respond to I2C but can still monitor voltages. No effect to supply monitoring.
9	GPIO2	Only GPIO2 always HIGH.
10	GPIO1	Only GPIO1 always HIGH.
11	SDA	Cannot configure device but part can still monitor voltages. No effect to supply monitoring.
12	SCL	Cannot configure device but part can still monitor voltages. No effect to supply monitoring.
13	GPI2	Manual reset will not be detected. No effect in supply monitoring.
14	GPI1	Manual reset will not be detected. No effect in supply monitoring.
15	V6	OV detected. Both GPIO1 and GPIO2 are always LOW. GPIO3 always HIGH.
16	V5	OV detected. Both GPIO1 and GPIO2 are always LOW. GPIO3 always HIGH.

Table 4-3 Application Circuit 1 Pin FMEA for the LTC2933 Pins Short-Circuited to GND

Pin no.	Pin Name	Effect of Failure Mode
1	V4	UV detected. Both GPIO1 and GPIO2 are always LOW. GPIO3 always HIGH.
2	V3	UV detected. Both GPIO1 and GPIO2 are always LOW. GPIO3 always HIGH.
3	V2	UV detected. Both GPIO1 and GPIO2 are always LOW. GPIO3 always HIGH.
4	V1	No power for internal circuit. Part not functional.
5	VDD33	Internal regulator shorted to ground. Part not functional.
6	GND	No effect. Pin is GND.
7	GPIO3	GPIO3 always LOW.
8	ASEL	No effect. Pin is connected to GND.
9	GPIO2	Only GPIO2 always LOW.
10	GPIO1	Only GPIO1 always LOW.
11	SDA	Cannot configure device but part can still monitor voltages. No effect to supply monitoring.
12	SCL	Cannot configure device but part can still monitor voltages. No effect to supply monitoring.
13	GPI2	Forced reset. Both GPIO1 and GPIO2 are always LOW. GPIO3 always HIGH.
14	GPI1	Forced reset. Both GPIO1 and GPIO2 are always LOW. GPIO3 always HIGH.
15	V6	UV detected. Both GPIO1 and GPIO2 are always LOW. GPIO3 always HIGH.
16	V5	UV detected. Both GPIO1 and GPIO2 are always LOW. GPIO3 always HIGH.

Table 4-5 Application Circuit 1 Pin FMEA for the LTC2933 Pins Open-Circuited

Pin no.	Pin Name	Effect of Failure Mode
1	V4	Internal UV detected. Both GPIO1 and GPIO2 are always LOW. GPIO3 always HIGH.
2	V3	Internal UV. Both GPIO1 and GPIO2 are always LOW. GPIO3 always HIGH.
3	V2	Internal UV detected. Both GPIO1 and GPIO2 are always LOW. GPIO3 always HIGH.
4	V1	IC supply. No power for internal circuit. Part not functional.
5	VDD33	Damage to internal circuit. Part not functional.
6	GND	Part not functional.
7	GPIO3	GPIO3 pin unconnected to external pull-down. Can't pull HIGH. Always LOW.
8	ASEL	Part will not respond to I2C but can still monitor voltages. No effect to supply monitoring.
9	GPIO2	GPIO2 pin unconnected to external pull-up. Can't pull LOW. Always HIGH.
10	GPIO1	GPIO1 pin unconnected to external pull-up. Can't pull LOW. Always HIGH.
11	SDA	Cannot configure device but part can still monitor voltages. No effect to supply monitoring.
12	SCL	Cannot configure device but part can still monitor voltages. No effect to supply monitoring.
13	GPI2	Manual reset will not be detected. No effect in supply monitoring.
14	GPI1	Manual reset will not be detected. No effect in supply monitoring.
15	V6	Internal UV detected. Both GPIO1 and GPIO2 are always LOW. GPIO3 always HIGH.
16	V5	Internal UV detected. Both GPIO1 and GPIO2 are always LOW. GPIO3 always HIGH.

Table 4-7 Application Circuit 1 Pin FMEA for the LTC2933 Pins Short-Circuited to Adjacent Pins

Pin no.	Pin Name	Shorted to	Effect of Failure Mode
1	V4	V3	Inputs shorted together. OV/UV detected. Both GPIO1 and GPIO2 are always LOW. GPIO3 always HIGH.
2	V3	V2	Inputs shorted together. OV/UV detected. Both GPIO1 and GPIO2 are always LOW. GPIO3 always HIGH.
3	V2	V1	Inputs shorted together. OV/UV detected. Both GPIO1 and GPIO2 are always LOW. GPIO3 always HIGH.
4	V1	VDD33	Internal regulator shorted to supply. Part damaged.
5	VDD33	GND	Internal regulator shorted to ground. Part not functional.
6	GND	GPIO3	Only GPIO3 always LOW.
7	GPIO3	ASEL	GPIO3 always LOW.
8	ASEL	GPIO2	Only GPIO2 always LOW.
9	GPIO2	GPIO1	Outputs shorted together. GPIO1 and GPIO2 OR-ed together. No effect to supply monitoring.
10	GPIO1	SDA	GPIO1 may trigger I2C communication. No effect to supply monitoring.
11	SDA	SCL	Cannot configure device but part can still monitor voltages. No effect to supply monitoring.
12	SCL	GPI2	GPIO2 is triggered when SCL pulls LOW. No effect to supply monitoring.
13	GPI2	GPI1	Reset inputs shorted. Reset LOW in GPI2 will also trigger GPI1. No effect to supply monitoring.
14	GPI1	V6	Shorted to input. OV detected at V6. Both GPIO1 and GPIO2 are always LOW. GPIO3 always HIGH.
15	V6	V5	Inputs shorted together. OV/UV detected. Both GPIO1 and GPIO2 are always LOW. GPIO3 always HIGH.
16	V5	V4	Inputs shorted together. OV/UV detected. Both GPIO1 and GPIO2 are always LOW. GPIO3 always HIGH.

要假設的失效情況，或在推導 SFF 時要考慮的失效情況。值得注意的是，對於直流故障模型假設，需要考慮如下之類的失效模式：固定位準故障、固定開路故障、開路或高阻抗輸出、訊號線之間短路、任意兩個連接 (接腳) 之間短路 (針對 IC)。

接腳 FMEA 顯示了這些假設的失效情況：固定位準故障 (短接電源和短接到地)、開路或高阻抗、任意兩個相鄰連接之間短路 (短接到相鄰接腳)。

其他標準的規定

為了實現功能安全，通常需要符合多個標準。除了 IEC 61508 之外，設計 SRS 的系統整合業者還必須遵守其他適用的標準，例如國家法律和指令，或是特定產業、產品或應用的具體標準。標準通常包含規範性 (強制性) 和參考性 (非強制性) 兩類條款。

例如，ISO 13849-2 附錄 D 中的參考性要求涉及不同元件的失效假設。表 1 展示了可編程和 / 或複雜 IC 的失效假設，而非可編程或非複雜 IC 不考慮第一個和最後一個失效假設。系統整合業者如果負責執行 IC 分析以推導 FMD，可以利用此類資訊。

否則，可以使用元件製造商提供的資訊，

表 1: 可編程和 / 或複雜 IC 的失效情況 [3]

事項	考慮的故障
1	全部或部分功能故障，包括軟體故障
2	每個連接都發生開路
3	任意兩個連接之間短路
4	固定位準故障
5	輸出發生寄生振盪
6	值不斷變化
7	由於 IC 的複雜性而未檢測出的硬體故障

表 2:PCB 故障 [3]

考慮的故障	排除的故障	備註
兩個相鄰佈線 / 焊墊之間短路	遵照相關備註，相鄰導線之間發生短路	基材至少使用符合 IEC 60893-1 標準的環氧樹脂 (EP) 玻璃布增強材料 (GC)。 電氣間隙和爬電距離的設計，至少符合 IEC 60664-5 標準 (距離大於 2 mm 時符合 IEC 60664-1 標準)，並適用污染等級 2/ 過壓類別 III 要求； 如果兩個電源軌均由安全特低電壓 / 保護特低電壓 (SELV/PELV) 電源供電，則適用污染等級 2/ 過壓類別 II 要求，最小電氣間隙為 0.1mm。 裝配完成的電路板安裝在一個能防止導電污染的外殼中，例如防護等級至少為 IP54 的外殼，並且印刷面塗有耐老化漆或保護層，覆蓋所有導電路徑。 註 1：經驗顯示，阻焊層能夠有效發揮保護層的作用。 註 2：根據 IEC 60664-3，額外的保護層可以降低爬電距離和電氣間隙要求。
任何佈線發生開路	無	

例如 ADI 的安全事項應用筆記 (請參見本系列第 1 部分和第 2 部分的討論)。

印刷電路板 (PCB) 也包括在技術安全分析中。ISO 13849-2:2012 針對 PCB 的故障 (失效模式) 及其排除項提供了建議。根據該標準，在某些特定考量 (如表 2「備註」欄中所列) 下，可以排除部分假設的失效模式。

對於 PCB 的這些失效假設，特別是對於安裝在其上的元件，系統整合業者需要獲得相關資訊，以判斷此類 PCB 失效對 IC 運行的影響，進而判斷是否會影響安全功能。請注意，兩個相鄰佈線 / 焊墊之間的短路可能表現為接腳與電源之間、接腳與地之間或相鄰接腳之間的短路，而佈線開路可能轉化為 IC 開路。所有這些都已納入 ADI 安全事項應用筆記的接腳 FMEA 分析，對於支援功能安全的元件，系統整合業者可以在產品網頁中輕鬆找到這些資訊。

結語

本系列文章的主要目的，是指導讀者學會使用 ADI 安全事項應用筆記中包含的資訊。前兩部分討論了失效率和失效模式分佈。本文作為最後一部分，主要圍繞 IEC 61508 和 ISO 13849 討論了接腳 FMEA。此外，本系列文章也有助於提升業界對 ADI 元件相關應用筆記的認知，特別是支援功能安全的元件。針對支援功能安全的元件屬於標準 IC 而言，儘管並非按照功能安全標準開發，但仍可用於安全關鍵型應用。

參考文獻

[1] “ISO 26262.Road Vehicles—Functional Safety, Part 11: Guidelines on Application of ISO 26262 to Semiconductors”，國際標準組織，2018 年。

[2] “IEC 61508.All Parts.Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-Related Systems”，國際電子電機委員會 (IEC)，2010 年。

[3] “ISO 13849.Safety of Machinery—Safety-Related Parts of Control Systems, Part 2: Validation”，國際標準組織，2012 年。 CTA