

瞭解安全事項應用筆記——第 1 部分：

失效率

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

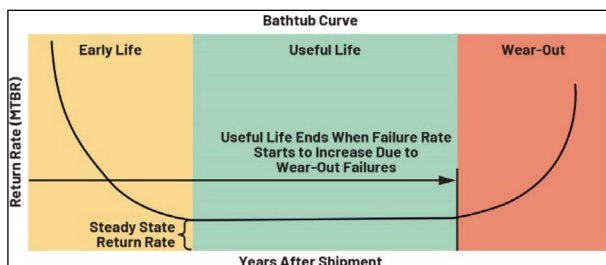
在依據工業功能安全標準進行合規評估時，對安全相關系統的零組件可靠性進行預測非常重要。預測結果通常以「給定時間內的失效次數」(FIT) 表示，FIT 是安全性分析的重要依據，用於評估系統是否達到目標安全完整性等級。業界有多個零組件失效率資料庫，可供系統整合商參考使用。本文討論了預測積體電路 (IC) 失效率的三種常用技術，並介紹 ADI 的安全應用筆記如何提供此類失效率資訊。

為什麼需要可靠性預測？

失效率或基本失效率是指產品在有效壽命期內單位時間的預期失效頻次，通常以 FIT (十億小時內發生一次失效) 為單位。圖 1 顯示了電子零組件失效的可靠性浴盆曲線模型，可分為三個階段：早期失效階段、有效壽命或穩定工作期間隨機失效階段、磨損老化失效階段。本文則是重點關注零組件有效壽命期內的失效率。

瞭解電子系統中零組件的失效率對於開展可靠性預測以評估系統整體的可靠性非常重要。進行可靠性預測時，需要明確可靠性模型、

圖 1：可靠性浴盆曲線¹



失效模式假設、診斷間隔和診斷覆蓋率。預測結果將作為輸入資訊，應用於失效模式和影響分析 (FMEA)、可靠性框圖 (RBD)、失效樹分析 (FTA) 等可靠性建模方法。^{2,3}

根據功能安全的要求，為了實現安全完整性等級 (SIL) 目標，需要對安全相關系統的隨機硬體失效進行定量可靠性預測。這一需求源自基礎功能安全標準 IEC 61508 的第二部分，其中規定了安全相關系統 (SRS) 在硬體方面的具體要求。表 1 顯示了 SIL 目標與 SRS 危險失效概率的對應關係。

表 1：安全完整性等級要求與危險失效概率的對應關係^{2,3}

安全完整性等級	持續性高需求率 (PFH)	低需求率 (PFD)
4	$\geq 10^{-9}$ 至 $< 10^{-8}$	$\geq 10^{-5}$ 至 $< 10^{-4}$
3	$\geq 10^{-8}$ 至 $< 10^{-7}$	$\geq 10^{-4}$ 至 $< 10^{-3}$
2	$\geq 10^{-7}$ 至 $< 10^{-6}$	$\geq 10^{-3}$ 至 $< 10^{-2}$
1	$\geq 10^{-6}$ 至 $< 10^{-5}$	$\geq 10^{-2}$ 至 $< 10^{-1}$

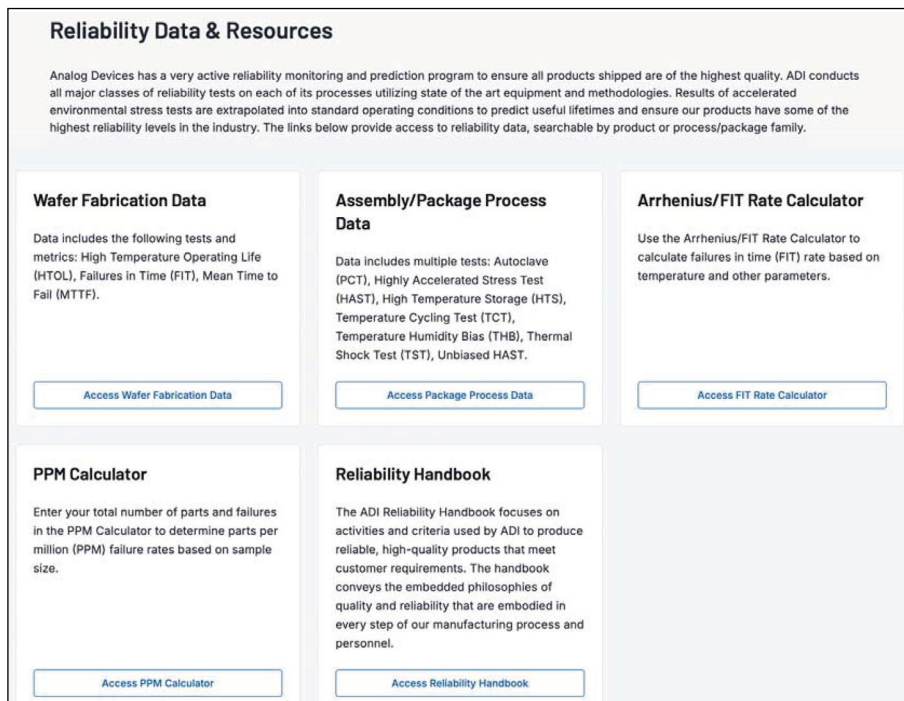
註：當需求率為每年一次時，PFD 指標和 PFH 指標等效。

此外，這些失效率針對的是安全功能整體，而具體到單一積體電路 (IC)，其分配到的失效率限值僅為總指標的很小一部分，例如 1%。

如何預測系統可靠性

業界有多個失效率資料庫，可供系統整合商在設計系統時參考使用。電子和非電子零組件的失效率資料來源包括：《IEC 技術報告 62380:2004》(IEC Technical Report 62380:

圖 2: ADI 可靠性資料和資源



壽命測試之一，用於評估零組件失效率。HTOL 測試目的在使元件在高溫下運行，以加速其老化進程，進而等效地類比其在常溫 (如 55°C) 下長時間運行的效果。因此，HTOL 是一種在加速應力條件下評估半導體零組件長期可靠性的方法，例如評估零組件的平均無失效時間 (MTTF)。這種測試透過加熱零組件並保持正常工作電壓，在較短時間內模擬零組件的整個壽命週期。

在可靠性計算的詳細分析中，HTOL 加速測試

2004)、西門子標準 SN 29500(Siemens Standard SN 29500)、ADI 零組件平均無失效時間 (ADI component mean time to fail, MTTF) 資料、現場退貨情況和專家判斷。⁴

ADI 零組件的 MTTF 資料可在 analog.com 上的可靠性部分中找到。在「可靠性資料和資源」下方有晶圓製造資料、組裝 / 封裝製程資料、Arrhenius/FIT 率計算器、百萬分率計算器和可靠性手冊。圖 2 顯示了每個資源子部分包含的內容。

為了協助讀者理解前述三個半導體失效率資料來源 (側重於 Arrhenius 高溫工作壽命 (HTOL) 的 ADI 零組件 MTTF 資料、西門子標準 SN 29500 和 IEC TR 62380:2004) 之間的區別，接下來的章節將解析每種方法和相關的資料庫。^{5,6}

什麼是 Arrhenius HTOL ?

HTOL 是 JEDEC 標準中定義的常用加速

(125°C 下 1,000 小時或等效條件) 產生的資料需透過 Arrhenius 方程式和 0.7 eV 的活化能為進行換算，得到在最終用戶使用條件下的預期壽命 (例如 55°C 下 10 年)。採用卡方統計分佈，基於 HTOL 測試的樣本數量，計算失效率的 60% 和 90% 置信區間。

$$\text{Failure Rate } (\lambda) = \frac{x^2}{2 \times N \times H \times At} \times 10^9, FIT \quad (1)$$

其中：

- x^2 為逆卡方分佈，其值取決於失效次數和置信區間
- N 為 HTOL 測試的樣本數量
- H 為 HTOL 測試的持續時間
- At 為根據 Arrhenius 方程式計算的測試條件到使用條件的加速因數

晶圓製造資料是 analog.com 上提供的可靠性資料和資源之一。點擊它就會呈現包括產品整體壽命測試資料摘要在內的資料。其由總樣本數量、失效數量、55°C 下等效元件小時數、FIT 值 (基於 HTOL 資料) 及 MTTF 資料 (60%

圖 3: 來自 analog.com 的晶圓製造資料

Product Part Number Search

● Enter a Product Part Number to view specific Process Technology data

Disclaimer: This Data is provided "As Is" with no representation of warranty, whether express or implied, of any kind, including warranties of merchantability, noninfringement of Intellectual Property, or fitness for any particular purpose. In no event shall Analog Devices or its supplier be liable for any damages whatsoever (including without limitation, damages for loss of profits, business interruption, loss of information) arising out of the use or inability to use the information, even if Analog Devices has been advised of the possibility of such damages. Your use of this data is solely your responsibility.

ADI Overall Life-Test Data Summary	
Overall Sample Size	445576
Qty. Fail	0
Equivalent Device Hrs. @ 55 deg C	72503111445
FIT Rate (60% CL, 55 deg C)	0.01
MTTF (60% CL, 55 deg C) in Hrs in Hrs	079126817323
FIT Rate (90% CL, 55 deg C)	0.03
MTTF (90% CL, 55 deg C) in Hrs	31487770868
Calculations assumes 0.7 eV Activation Energy	

Please note: Where a device of interest is not sampled, it is valid to use the reliability data of the particular process technology to which the part belongs, since all parts within the same family are designed to the same rules and manufacturing as controlled by SPC.

The data provided in this calculation is generic data that reflects the overall reliability of the Wafer Fabrication Technology grouping for the selected product. The data may have been collected on the product selected or other Analog Devices products manufactured using the same technology grouping.

The data is intended to provide a high-level assessment of the reliability of the fabrication process used to manufacture a given product or products. Analog Devices products should never be operated outside the specified datasheet limits and this data should never be used as an indication of the Reliability of a product outside of those specified data sheet limits.

和 90% 置信度) 組成。示例如圖 3 所示。

功能安全通常需要 70% 的置信度，因此 90% 的置信度可以作為一種更保守的選擇直接使用，或者可以利用某種方法 (例如「如何改變可靠性預測的置信度」中介紹的方法) 進行轉換。⁵

西門子標準 29500

SN 29500 標準是一種基於查詢表的可靠性預測標準，最初由西門子公司 (Siemens) 提出，現已被廣泛用於 ISO 13849 標準的可靠性預測依據。其透過失效率來計算可靠性，其中失效率定義為在特定的環境和功能運行條件下，零組件在一定時間內平均預期發生的失效比例。該標準代表了一種保守的零組件失效率確定方法。每類零組件的參考 FIT 值基本上是根據特定類型零組件的現場退貨情況確定的。因此，參考值會包括應用中遇到的任何類型失效，而

不僅是上一節所述 HTOL 方法引起的內在失效。其中包括電氣超載 (EOS) 所導致的失效，此失效不會在 HTOL 測試中使用的受控實驗室環境下發生。⁵⁻⁸

公式 2 說明了 SN 29500-2 如何得出積體電路的失效率。首先，其提供了參考失效率，也就是標準所定義的參考條件下的零組件失效率。由於參考條件並不總是相同，因此該標準還提供了轉換模型，支援根據電壓、溫度和漂移靈敏度等應力工作條件來計算失效率，如公式 2 所示。

$$Failure Rate (\lambda) = \lambda_{ref} \pi_U \pi_T \pi_D, FIT \quad (2)$$

其中：

- λ_{ref} 是參考條件下的失效率，與電晶體的數量成比例
- π_U 是電壓依賴因數
- π_T 是溫度依賴因數
- π_D 是漂移靈敏度因數

根據 IC 的特性，公式 2 可能有所不同。例如，當其是具有擴展工作電壓範圍的類比 IC 時，可以使用公式 2。對於所有其他具有固定工作電壓的類比 IC，電壓依賴因數將設定為 1。對於數位 CMOS-B 系列，漂移靈敏度因數將設定為 1。最後，對於所有其他 IC，電壓依賴因數和漂移靈敏度因數都將設定為 1。

請注意，IEC 617099 標準說明了如何根據不同使用條件調整可靠性預測，此項標準似乎是 SN 29500 所依據的理論基礎。

《IEC 技術報告 62380: 2004》

IEC 62380 是另一個常用的 IC 失效率評估標準。其於 2004 年發佈，隨後被 IEC 61709 取代。儘管如此，IEC 62380 標準仍被汽車功能安全標準 ISO 26262:2018 引用，在其第 11 部分中繼續用於電子零組件可靠性預測的參考模型。該標準將 IC 的失效率計算為晶片、封

裝和 EOS 失效率之和。根據 IEC TR 62380 和 ISO 26262-11:2018，FIT 計算的運算式如公式 3 所示。¹⁰⁻¹²

$$\text{Failure Rate } (\lambda) = \lambda_{\text{die}} + \lambda_{\text{package}} + \lambda_{\text{overstress, FIT}} \quad (3)$$

其中：

■ λ_{die} 是晶片失效率，包含與電晶體數量、IC 系列及所用技術、溫度、工作時間、年週期影響因數等任務曲線資料相關的參數

■ λ_{package} 是封裝失效率，包含與熱因素、熱膨脹、任務曲線的溫度迴圈因素及 IC 封裝相關的參數

■ $\lambda_{\text{overstress}}$ 是超載失效率；針對不同的外部介面，其有相應的術語定義

ADI 安全應用筆記中的失效率

除了 analog.com 上提供的可靠性資料之外，ADI 零組件的可靠性預測還可以在 IC 的安全應用筆記中找到。標記為支援 FS 的 IC 通常有相應的安全應用筆記。例如，LTC2933 的安全應用筆記提供了根據 HTOL、SN 29500 和 IEC 62380 可靠性預測方法得出的元件 FIT 值，如圖 4、圖 5 和圖 6 所示。圖中的表格顯

圖 4: 根據 LTC2933 安全應用筆記，基於 Arrhenius HTOL 的 FIT

The FIT of the LTC2933 based on accelerated testing conditions of HTOL is detailed below:

Table 2-3 Functional Safety Component FIT According to HTOL Testing

Confidence Level	FIT (Failures Per 10 ⁹ Hours)
70%	0.12
90%	0.23
95%	0.30
99%	0.46

Note 3: The FIT for various confidence levels were determined through HTOL reliability studies, utilizing the Arrhenius equation for acceleration assuming a chi-square distribution using the following test parameters:

- Sample size: 56686
- Number of Failures: 0
- Activation Energy: 0.7eV
- Accelerated Temperature: 55degC
- Equivalent Accelerated Device Hours: 10,078,622,220

圖 5: 根據 LTC2933 安全應用筆記，基於 SN 29500 的 FIT

The FIT of the LTC2933 based on SN 29500 for a specific industrial mission profile is detailed below:

Table 2-1 Functional Safety Component FIT According to SN 29500

SN 29500 Industrial Mission Profile	FIT (Failures Per 10 ⁹ Hours)
Predicted Component FIT	85.28

- Mission Profile: 20 years constant operation at 55°C temperature
- Operating Voltage (max): 13.9V (based on product datasheet)
- Power Dissipation: 20mW
- Theta-JA: 110 °C/W

Note 1: For applications requiring a different mission profile, the following information can be used to calculate the base FIT based on SN 29500.

- SN 29500 part: Part 2 Table 5 under ASICs
- Sub-category: CMOS, BiCMOS
- Integration Density: 5k-50k
- Part is sensitive to drift

圖 6: 根據 LTC2933 安全應用筆記，基於 IEC 62380 的 FIT

The FIT of the LTC2933 based on IEC 62380 for a specific industrial mission profile is detailed below:

Table 2-2 Functional Safety Component FIT According to IEC 62380

IEC 62380 Industrial Mission Profile	FIT (Failures Per 10 ⁹ Hours)
Total Component FIT	37.69
Die FIT	37.11
Package FIT	0.58

Note 2: For applications requiring a different mission profile, the following information can be used to calculate the base FIT based on IEC 62380.

- FIT calculation model: Section 7.3.1, refer to Mathematical Model
- IEC 62380 part and section for die FIT: Table 16, MOS ASIC circuits, Full Custom
- Production year for die FIT: 2017
- Integration Density: 5k-50k
- Climate type: World-wide (Table 8)
- IEC 62380 part and section for package FIT: Table 17b, Two Rows Connection Packages
- Package type: SSOP 16 pins, length: 4.89mm, width: 3.89mm, pitch: 0.64mm
- Technology Structure: MOS BiCMOS (Low Voltage)
- Substrate Material: Epoxy Glass (FR4, G-10)
- EOS FIT rate assumed: 0 FIT

示了 FIT 值及所考慮的條件。如果具體條件不同，系統整合商可以利用表格下方的資訊自行計算 FIT。

結語

本文概述了三種常見的積體電路可靠性預測技術，即 Arrhenius HTOL、SN 29500 和 IEC 62380。利用 HTOL 測試資料，根據 Arrhenius 公式進行計算，可以得出以 FIT 為單位的失效率。SN 29500 提供了參考失效率及針對不同應力工作條件的轉換模型。IEC 62380 規定電子零組件的失效率為晶片失效率、封裝失效率和超載失效率之和。

ADI 零組件的失效率可以在 analog.com 上或相應的安全應用筆記中找到。安全應用筆記的優點在於，其提供了依據上述三種方法得出的零組件可靠性預測。除此之外，它還提供了計算此類 FIT 值所需的資訊，以便系統集成商針對不同的工作條件自行重新計算。

參考文獻

- 1 可靠性手冊，ADI。
- 2 David J. Smith, “The Safety Critical Systems Handbook: A Straightforward Guide to Functional Safety: IEC 61508 (2010 Edition), IEC 61511 (2015 Edition) and Related Guidance”, Butterworth-Heinemann, 2020 年。
- 3 “IEC 61508 All Parts, Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-Related Systems”, 國際電子電機委員會，2010 年。
- 4 “IEC 61800-5-2 Annex C, Adjustable Speed Electrical Power Drive Systems—Safety Requirements—Functional: Available Failure

Rate Databases”, 國際電子電機委員會，2016 年。

- 5 Tom Meany, 「積體電路可靠性預測」，ADI，2021 年。
- 6 S. Singh、S. Masade, “FIT Rate Calculations for FMEDA in ISO 26262”, ACL Digital。
- 7 “SN 29500 Part 2, Expected Values for Integrated Circuits”, Siemens Norm, 2010 年。
- 8 Jesus Fco.Ortiz-Ya?ez、Manuel Roman Pina-Monarez、Osvaldo Monclova-Quintana, “Reliability Prediction for Automotive Electronics”, DYNA, 第 91 卷，2024 年。
- 9 “IEC 61709, Electric Components—Reliability—Reference Conditions for Failure Rates and Stress Models for Conversion”, 國際電子電機委員會，2017 年。
- 10 “IEC Technical Report 62380: Reliability Data Handbook—Universal Model for Reliability Prediction of Electronics Components, PCBs and Equipment”, 國際電子電機委員會，2004 年。
- 11 “ISO 26262 Part 11, Road Vehicles—Functional Safety: Guidelines on Application of ISO 26262 to Semiconductors”, 國際標準組織，2018 年。
- 12 Dan Butnicu, “A Review of Failure Rate Calculation’s Differences Due to Package for IEC-TR-62380 vs. Other Prediction Standards”, IEEE, 2021 年。CTA