

# 混合電路和模組技術簡史

## 為什麼這一直是高可靠性應用的封裝技術選擇？

■作者：Steve Munns/ADI 軍用航空市場經理

50 多年來，混合電路和模組技術一直維持著持續發展，現在，模組採用了商用現成 (Commercial-Off-The-Shelf : COTS) 形式，為縮短設計週期、減輕過時淘汰的問題，以及因應 SWaP( 尺寸、重量和功率 ) 挑戰做出了重大貢獻。現在就讓我們來回顧一下這種技術的發展歷史，並同時探索對於航空航天和國防產業而言非常重要的一些要素。

### 早期的混合電路

上一個世紀的 50 年代後期，運用分立式電晶體的運算領域取得了重大的進展，但是電路板也相對變得日益複雜了，有時有數千個互連的電晶體、二極體、電阻器和電容器。因此，需要一種解決方案來提高密度和可靠性。政府機構也針對嘗試各種混合電路理念提供了資助。

在此一領域，軍方興趣濃厚，尤其活躍。1958 年，美國軍方資助的 RCA 公司開發 “微型模組” 概念。這種概念採取的方法是，使用從外部配置、統一大小的立方體，以便這些立方體能夠相互固定在一起。在內部，各種分立式元件的小晶片垂直疊置，在其邊沿處互連。從體積上看，元件密度提高了多於雙倍，可靠性則提高了 6 倍，軍方很高興，在接下來的幾年中又進一步投資。根據 Electronic Engineering Times 上的一篇文章所示，在 1962 年，一個 10 元件模組的價錢為 52 美元，大約是常規分立式 PCB 解決方案價錢的 2.5 倍。

儘管價錢很高，但是 RCA 的微型模組非常成功，不過生命很短，積體電路 (IC) 的誕生，無疑促成了這種模組的退位。早期 IC 的價錢是混合

式解決方案的 9 倍，這些 IC 常常是軍方或政府資助項目的受益者，1962 年的一個著名專案，是雷神 (Raytheon) 公司為美國航空航天局 (NASA) 所建造的 “阿波羅制導電腦 (Apollo Guidance Computer)” 。

隨著 IC 的迅速發展，人們不久就體認到 IC 相對於混合電路和模組的優勢。從這方面來看，混合電路技術依然存在似乎令人驚訝。不過，軍方常常有更廣泛的考慮，包括相對於創新和複雜運行要求，考慮產品穩定性和長期可用性、可靠性、實用性等。這些因素與混合電路和模組的特定技術優勢相結合，無疑是混合電路技術在過去 50 年得到持續使用的原因之一。

### 整合

在本文涵蓋的這段時間，ASIC 技術帶來了產業革命。最初，數百個閘極的閘極陣列為軍方提供了一條提高數位化整合度的途徑，隨著閘極密度的迅速提高和開發工具的提升，混合電路的日子似乎屈指可數了。上世紀 80 年代後期，軍用設備設計者了解數位 ASIC 的成功性，嘗試將相同的方法應用到混合訊號電路。他們的動機主要由小型化需求主導，因為軍方需要越來越複雜的系統，那時這樣的系統預算很大。但是，調整為客戶使用而完全定制的設計工具很難，類比設計也很複雜，這種困難和複雜性意味著，對於實際上完全客製的設計而言，混合訊號 ASIC 仍然會非常密集地耗費資源，而且高度依賴半導體製造商的設計團隊。儘管類比 ASIC 設計工具和技術已經取得了巨大進步，但是真實世

界的類比問題範圍寬廣，仍然難以用現成的半客製電路來一一解決。因此，當現成的產品發揮不了作用時，混合電路將為各種採用不同製程的高性能類比和訊號鏈功能整合至單一封裝提供了一條途徑。

## 性能

軍用和航空航天系統一般是以模組化子系統為基礎設計的。例如，現場可更換單元 (LRU) 簡化了服務和操作支援。LRU 互連依靠 MIL-STD-1553 匯流排界面等標準。透過混合電路、模組、ASIC 巨集或在標準格式的電路板上實現這些功能已經成為首選的方式，實際上，它們就是專用標準產品 (ASSP) 和基本構件。

這凸顯出兩個重要因素。首先，無謂的重新發明是沒有什麼可取之處，而且讓設計者專注於系統的核心智慧財產權才是更有效的用人方式。其次，按照如今的標準，軍事和航空航天業是半導體的小用戶，相較於開發單晶 IC 級 ASSP，開發模組或電路板級解決方案是更加現實的主張。

傳統上，電源模組的性能要求也良好地與混合模組技術保持了一致，這種技術所使用的密封金屬罐封裝滿足高溫、高可靠性軍事應用的功率密度和熱量管理需求。隨著大型 FPGA 和微處理器的電源要求越來越高，對更高效的電源架構和負載點 (POL) 調節的追求已經導致了新模組解決方案的出現。

長久以來，雷達等應用也一直依靠混合電路和模組實現 RF 和微波解決方案。只是近年來，才出現了開始滿足這類需求的單晶 IC 產品，但是現在，新式高度平行的相控陣雷達再次使人們將注意力集中到模組解決方案上。

## 安全性

產品過時淘汰對軍用工業而言是個非常嚴重的問題。30 到 50 年的專案壽命很常見，因此軍事和航空航天設備供應商不斷尋求降低風險的方式。混合電路和模組一直是一種嘗試隔離國防產業與半導體產業快速變化的方法。記憶體模組是一個引起興

趣的特定領域，因為 DRAM 和 SRAM 技術的壽命尤其短。可以保持標準外形尺寸和接腳佈局的概念，同時可以更新模組內的記憶體晶片。這件事寫起來比實際做起來容易得多，部分是因為，在存取時間、架構和電源電壓方面不斷取得進展。另一方面，如果空間允許，使用標準格式的嵌入式處理器板卡可提供一種更高級的方法。不過標準外形尺寸的概念是很多過時淘汰管理策略的核心，無疑也是影響混合電路和模組解決方案壽命長短的一個主要因素。

混合電路和模組也有優勢，因為全客製化模組可用來隱藏與硬體設計有關的寶貴的智慧財產權，使逆向工程更加難以實現。僅查看封裝上的元件數量並不足以對硬體設計解碼。此外，有些半導體晶片也不容易在公開市場上能夠買到。

## 從全客製化到如今的 COTS

之前關於在軍用系統中繼續使用混合電路和模組的觀點仍然有效。不過，重要的是，要認識到，軍用設備製造商面臨的商用壓力比以往任何時候都大，尤其是成本和上市時間。

全客製化混合設計價錢昂貴，要用相對較長的時間開發。可替代的單晶 IC 解決方案正在逐年增加。儘管大型國防公司仍然開發新的混合設計，但是隨著產量下降，可察覺到出現了製造外包趨勢。

COTS 模組的情形則完全不同。在技術和商用因素的驅動下，基於模組的解決方案出現了明顯的態勢。切換開關電源和訊號鏈是尤其適合用模組實現的兩類應用，因為高效率設計需要專門知識，這在今日的軍用設計團隊中可說是相當寶貴的。

## μModule 產品

μModule 產品是如今的 COTS 模組的一個例子。凌力爾特 (現隸屬 Analog Devices 公司) 在 2005 年推出此種產品，首批產品之一是一個完整的 12A DC/DC 穩壓器，採用  $15\text{mm}^2$  表面黏著封裝 (圖 1)。

接下來，該公司開發了一個完整的 μModule 產品系列，包括多種電源、介面和訊號鏈產品，例如

圖 1 : LTM4601AHV 12A μModule DC/DC 穩壓器

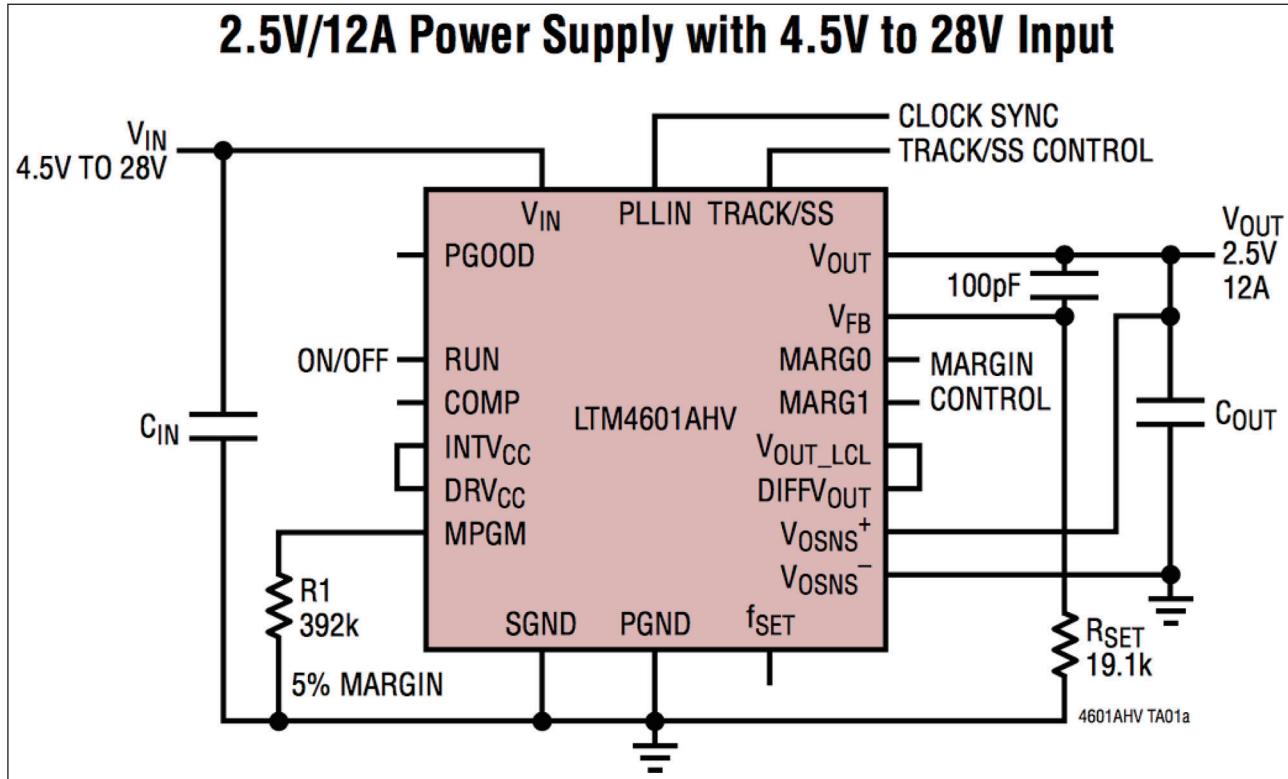


圖 2 : 具遙測功能的高壓隔離式開關控制器 LTM9100

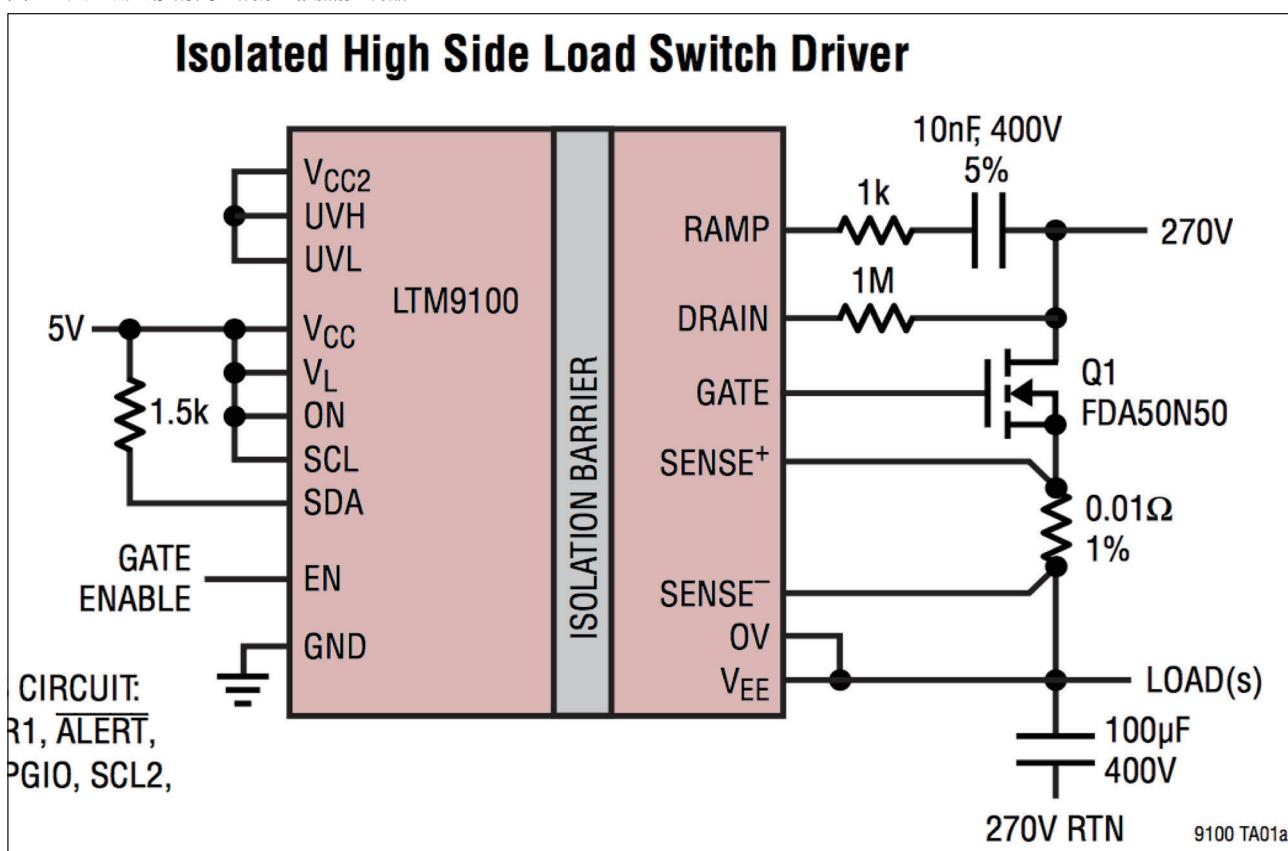
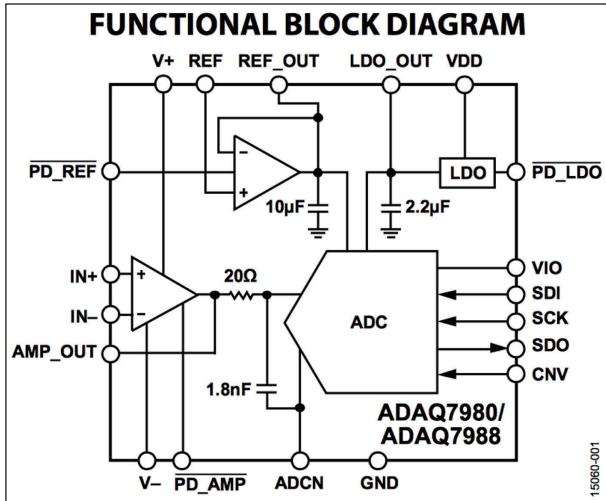


圖 3：16 位 1Msps 資料擷取子系統 ADAQ7980

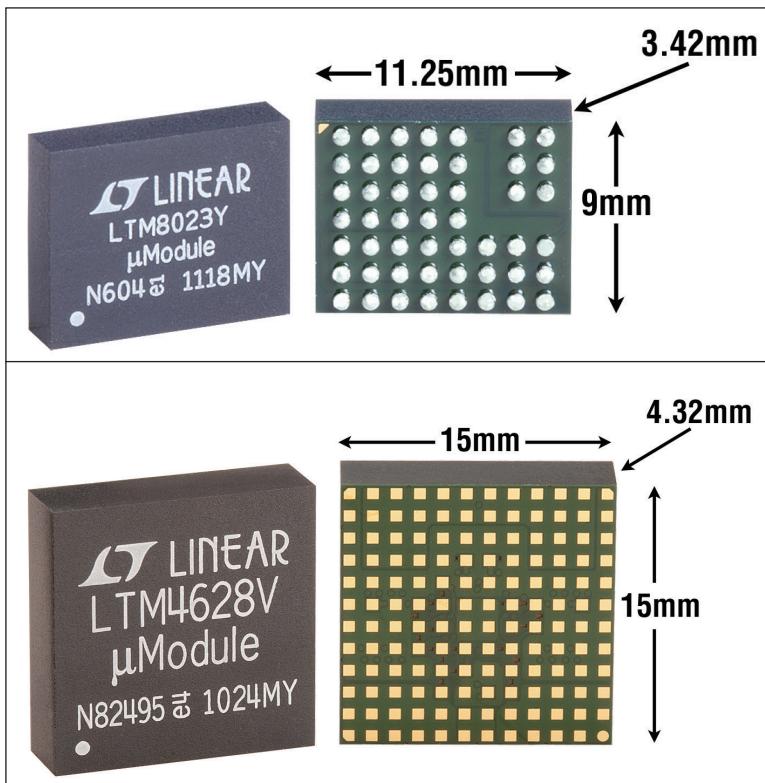


最近推出的 LTM9100( 圖 2) 和 ADAQ7980( 圖 3)。

## COTS 模組封裝類型

與表面黏著 IC 類似，每個 μModule 穩壓器都包括一個完整的系統級封裝解決方案，可簡化設計，並最大限度減少外部零組件的數量。從內部來看，

圖 4：採用 LGA ( 上 ) 和 BGA ( 下 ) 封裝的兩種 μModule 穩壓器



其佈局和設計都針對提高電氣性能和熱效率而進行了優化。這些 μModule 產品按照業界最高標準開發，提供卓越的可靠性，並接近標準 IC。提供具金塗層焊墊的 LGA ( 焊墊網格陣列 ) 封裝和具 SAC305 或 SnPb 焊料的 BGA ( 球珊瑚陣列 ) 封裝，並且有各種溫度級版本。

如果需要，軍用溫度級版本 μModule 產品在 55°C 和 +125°C 時透過 100% 的電氣測試，可提供有保證的資料表性能。

## 結論

50 年前，混合電路和模組是電子電路小型化和改善電子電路可靠性的首選技術。隨著半導體產業日益商品化，產品生命週期與國防產業設備生命週期的差異越來越大，混合電路和模組在減輕過時淘汰問題方面找到了新的用武之地。儘管 ASIC 成為數位電子電路整合的首選方法，但混合模組可以在解決類比難題這一小型專業化市場發揮作用。

同時，COTS 模組以專用標準產品 (Application Specific Standard Products) 形式出現了，

尤其是針對電源、處理器、訊號練和介面的模組。隨著軍用設備提供商爭取新的競爭優勢、認識到讓珍貴設計資源集中於增強核心能力的重要性，這些專用標準產品也得到了廣泛採用。

如今，國防預算壓力和更短的設計週期可能使完全客製化的混合電路日益成為一種遺留解決方案，但是毫無疑問，COTS 模組將越來越成為軍工和航空航天行業的首選技術。 CTA