

D 類音效功率放大器(Class D Audio Power Amplifier)-音質與用電的新妥協方案

老一代的電子電機人，在學校上課時多半只聽過 A 類、B 類、C 類的功率放大電路（常用在音響系統的後級擴大），以及折衷式設計的 AB 類，並對各者的特性優劣、運用時機有所瞭解，但曾幾何時世界上又多出了一種 D 類放大器，此物是從何而來的呢？

事實上，功率放大（簡稱：功放）電路不止 ABC 三類，也不是突然多出個 D 類，D 類早已存在，其他還有 E 類、F 類、G 類、H 類，甚至是跳跨列編的 S 類等，只是這些類型的電路運用機會低，或者與 A、B、AB 類相近再另行變化，所以也就鮮少提及。



▲圖說：美國國家半導體公司（National Semiconductor；NS）的高用電效益 D 類放大器：LM4670、LM4671，採行 Tiny Micro SMD 封裝，使其達到最小的空間精省與電路佈局彈性，另外也具有關閉模式以降低用電，適合用在手機、PDA 等手持裝置。

（圖片來源／National.com）

AB 類放大：音質與用電的妥協設計

為何今日會盛行 D 類放大器呢？在如此問之前其實應當問過去至今為何 AB 類會盛行？

在此我們不再詳述電路的細節運作原理，單就結果特性來說明，A 類放大具有最佳的信號傳真性（電壓波形幾乎無失真），但卻相當耗用電能，一般來說電能利用率只有 20%~30%，舉例而言，倘若供應 100W 電力給 A 類放大機（擴大機），最後真正輸出到喇叭發聲功率的只有 25W，其餘的 75W 統統是放大系統運作過程中的耗用，而且此一高耗能也會產生高廢熱，需要在放大電晶體上配裝厚高的散熱片來幫助散熱。雖然 A 類電能利用率差，但信號完整是其可取之處，所以依然用在高檔專業音響中，發燒友為了享受無失真的完美音質，不會太在乎多耗 3 倍的電能。

至於 B 類放大，其電能利用率較高，理想上可至 75%，但卻有交越失真的問題，上下波形中有一者會遭部分截斷，而無法全波完整放大，如此若用在音響系統就會有明顯的聲音粗糙變質。至於 C 類放大比 B 類更糟，上下兩波形都失真，因此更無法用於傳真性的放大應用中，多半只用在無線通訊的 RF 射頻系統上。

既然 A 類波形佳、用電高，而 B 類卻是用電佳、波形稍差（介於 A 類與 C 類間），因此人們有了截補的想法，同時用上 2 個 B 類放大電路，將兩者所剩的完整半波予以合併，以此達到與 A 類相同的全波效果，此即是所謂的 AB 類放大（運作電路來自 2 個 B 類，呈現效果卻近 A 類），且用電上依然低於 A 類，若要同樣實現一個輸出放大達 25W 的系統，A 類整體需要 100W，AB 類約只要 66W，如此連散熱片的體積也可以因此精簡。今日絕大多數的消費性音響及視聽設備都是用 AB 類。



▲圖說：NS 的 D 類放大器：LM4666、LM4668，LM4666 是專供手持行動用的雙聲道喇叭放大器；LM4668 則是切換式功率放大器，專供平面顯示器、平面電視、音效卡之用。
（圖片來源／National.com）

D 類放大：爭取更高的體積與用電效益

很明顯的，AB 類是兼顧用電（也包含散熱、體積）要求及音質要求的妥協性設計，而本文所要談論的 D 類也是如此，只是這次更加偏重在電路體積與電能利用率。

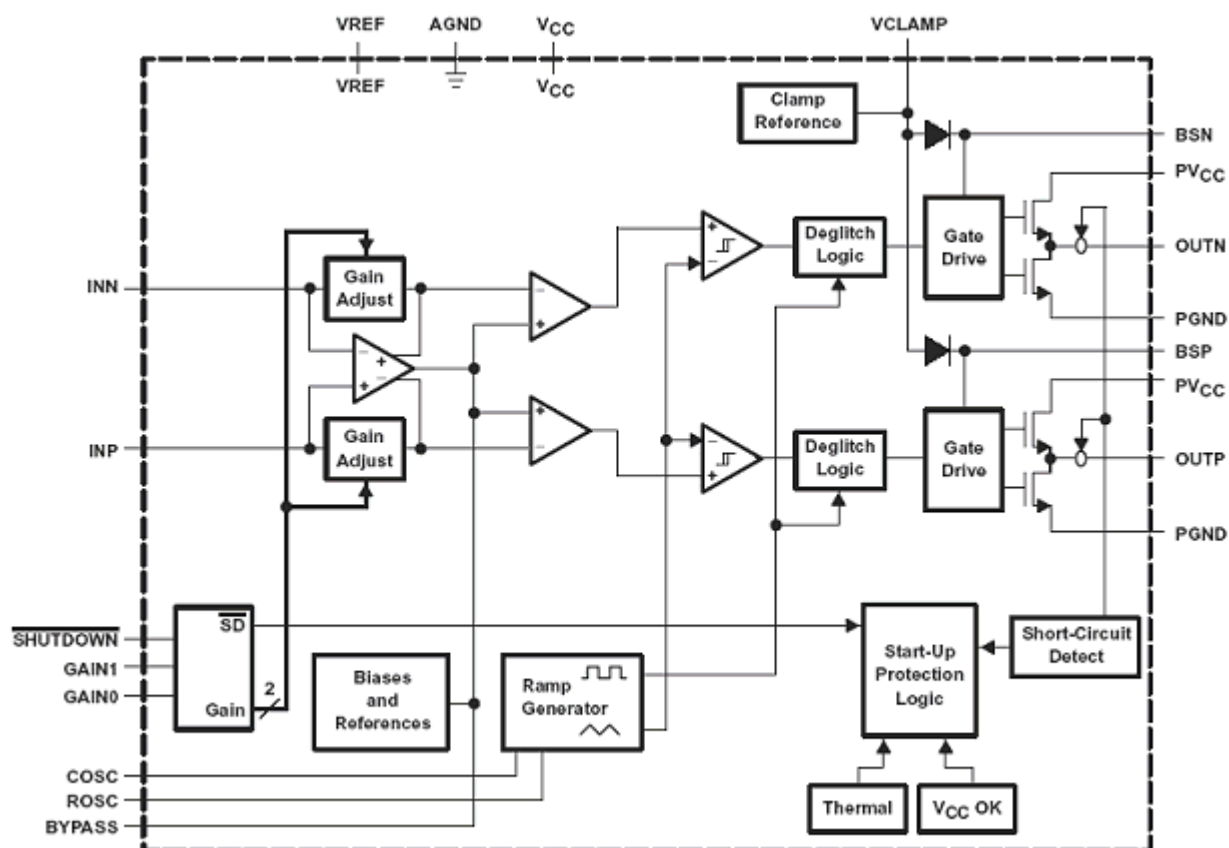
在此我們要稍微詳細地說明 D 類放大的原理，與 ABC 三類不同的，D 類不是利用功率電晶體的線性工作區間特性來放大，不是用類比原理來放大，而是用上電壓比較、脈寬調變等技術來放大，也因此有人稱 D 類放大為數位式功率放大或數位功放。

首先，D 類放大會將原始的類比信號波形，與比它更高頻率的三角波（或鋸齒波）進行電壓比較（透過電壓比較器），如此便可將以振幅高低性表示的信號調變成以脈波寬窄性表示的信號，此即是脈寬調變（Pulse Width Modulation；PWM），之後將 PWM 信號輸出到 MOSFET 場效電晶體上的閘極，以控制電晶體的導通、關閉，同時也在這個階段進行信號功率放大，最後 MOSFET 的輸出端連接 LC（電感、電容）低通濾波電路，將 PWM 的載波濾除，使原始信號波形重新呈現。

瞭解原理後，再進一步去瞭解 D 類方式所呈現的優缺點，缺點是以調變程序所形成的放大必然與原始信號有些出入，但在一般消費性的音樂播放上依然可被接受，相對的 D 類放大提供了更多的益處，主要是極高的電能利用率，純理論上是 100% 運用，實務上也經常在 80%、90% 的層級，比 AB 類更佳，也因此可再降低散熱片的倚賴性，甚至

在低功率時可完全將散熱片捨棄。此外連同其相關組件所需佔用的電路面積、體積，以及電路簡易性等，亦都是 D 類較優異。

更簡單說，D 類與 AB 類一樣是妥協性的設計，在仍不錯的音質下進行大幅的用電、體積精省，這正是今日掌上型、行動式、手持式裝置所最鍾意的特質，現在絕大多數的手機、數位隨身聽、口袋電視、PDA、PMP 等，其音效部分都採行 D 類放大器。



▲圖說：德州儀器 (Texas Instruments; TI) 的 20W 單聲道 D 類放大器：TPA3001D1 之內部功能方塊圖，原始類比音訊波形在與三角波進行電壓比較前，會先進行振幅微增的前置預先放大，再用積分器進行低通濾波，以消除疊頻 (aliasing) 影響。(圖片來源／TI.com)

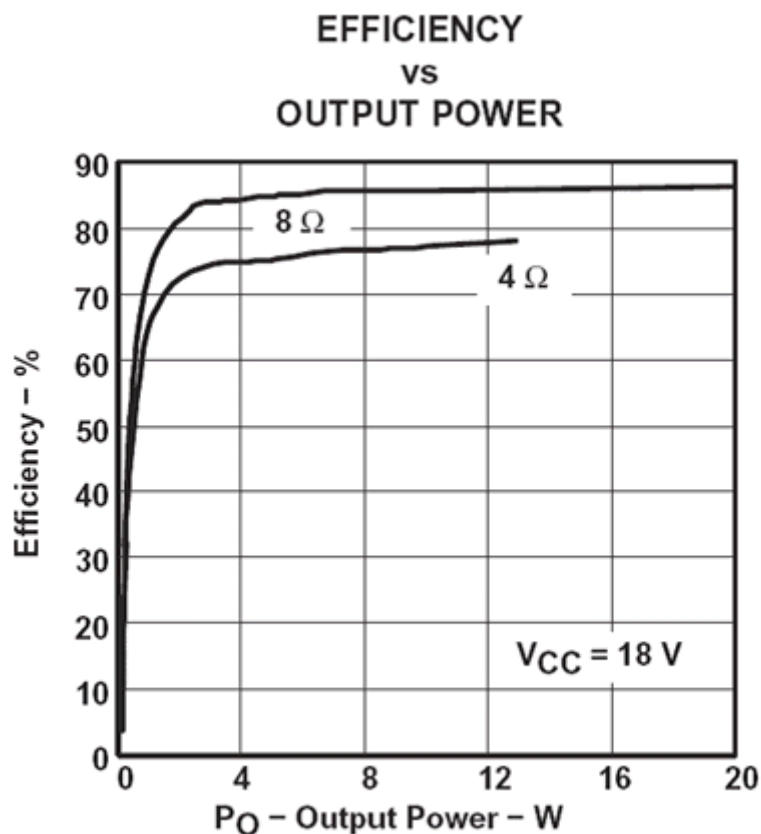
您必然要面對 D 類放大器！

至此各位可能會說：我沒有設計手持裝置，不需要講究用電及電路體積，所以依然可用 AB 類放大器。但其實非行動運用也逐漸有採行 D 類放大器的趨勢，過去傳統類比映像管電視有很大的體積，其機內仍有寬裕空間可設計音效電路，散熱及用電也與映像管系統一併考慮，然而如今數位平面液晶電視、平面喇叭盛行，力求短小輕薄與低用電，這時就難以堅持續用 AB 類放大器，一樣需要考慮用 D 類放大器。

同樣的，車內音響及車用娛樂系統也是如此，車用電瓶的電力雖多於掌上型裝置的電池，但畢竟少於家用供電插座，加上車體與內裝空間的限制，一樣有用電與體積的精省

壓力，這時也會考慮用 D 類放大器。

事實上市場也是如此發展，最迫切需要 D 類放大器的是手持裝置，因此初期的 D 類放大器皆屬低功率，即 1W~3W 的數瓦層級，之後開始有中功率（10W~30W 的數十瓦層級）的出現，而今更是達 100W~200W 的高功率，D 類放大器正日漸普遍，不再只是行動設計需要，日益講究省電、短小輕薄的消費性產品都有需求。



▲圖說：TI TPA3001D1 的電能利用率（縱軸）、輸出功率（橫軸）對應圖，使用 18V 的工作電壓，以及在 4ohm、8ohm 兩種不同輸出阻抗下的表現曲線。（圖片來源／TI.com）

D 類放大器的一致性新追求

接下來我們將討論如何挑選與要求 D 類放大器，依據筆者的探尋，目前提供 D 類放大器的常見業者有 ADI、Cirrus Logic、MAXIM、Motorola、NS、Philips、Sanyo（與 Bang & Olufsen 合作）、ST（與 Apogee 合作）、TI、TriPath 等，多是有多年深厚類比技術的歐美業者，而各業者的發展亦各有異，有的強調精巧體積，有的強調高電能利用率，不過大體上也有許多一致的強化與精進目標。

首先是供電抑制率（Power Supply Rejection Rate；PSRR）與總諧波失真＋噪訊（Total Harmonic Distortion Plus Noise；THD+N）等的要求，前者以分貝（dB）為單位，後者以百分比（%）為單位，PSRR 必須盡可能高，THD+N 則是盡量低，一般不超過 10%，高標要求上還要低於 0.1%、0.01%。

值得注意的是，各 Data Sheet 上的 THD+N 標示多半有附加說明，即是與之相關的

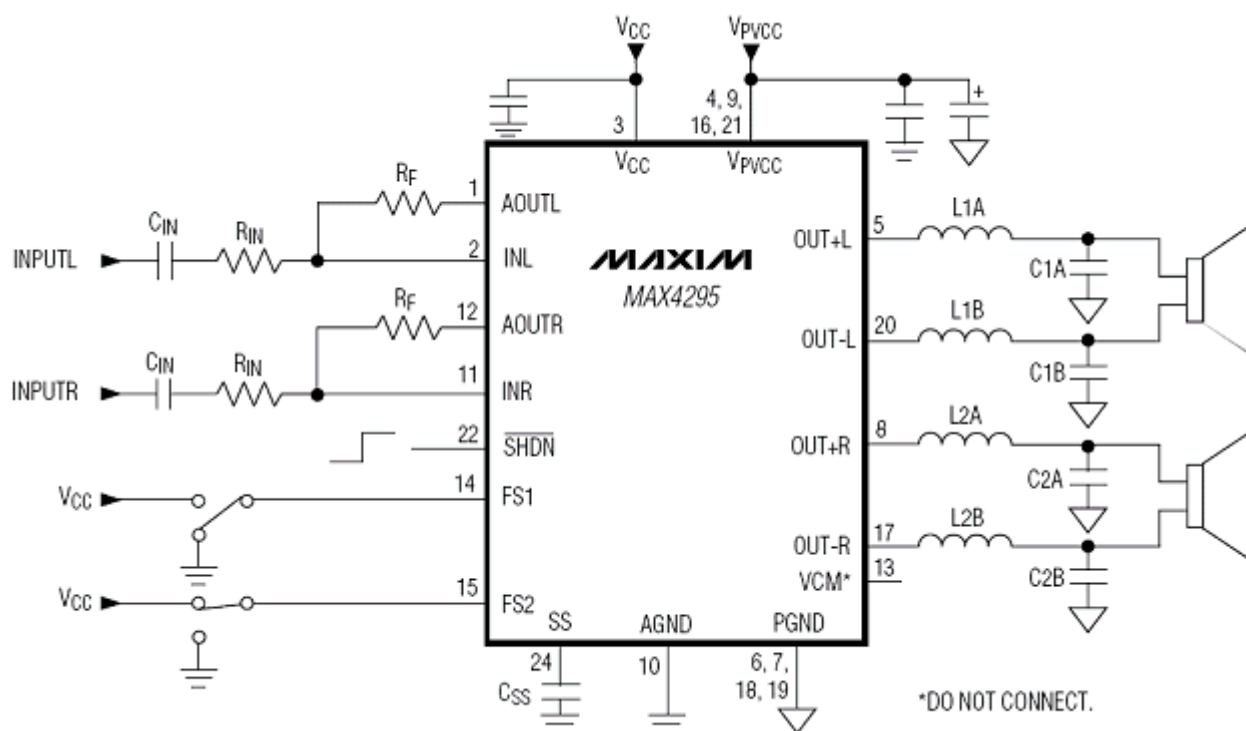
參數，包括負載阻抗 R_L ($l=Load$)、輸出功率 (Output Power, P_{out} 或 P_o)、PWM 的調變頻率 f ，四者必須同時齊頭比較才能瞭解各業者的 D 類放大器是優是劣，而其中 R_L 多半是 4ohm (歐姆) 或 8ohm，即是指喇叭或耳機的阻抗值，PWM 頻率則須在原始音聲頻率的 12 倍~24 倍以上，透過更高頻率以求後續調變、還原後的信號仍足夠細膩、清晰。而人耳所能聆聽的範疇在 20Hz~20kHz，20kHz 的 12 倍即是 240kHz，實際上多數 D 類放大器的 PWM 頻率多可達 250kHz，甚至更高。

附註：有些資料將 PWM Frequency (PWM 調變頻率) 稱為 Audio Modulator Clock。

至於輸出瓦數，除配合設計情境及運用場合外，一般來說也是盡可能高要求，希望有較大、較寬裕的放大輸出功率，而輸出功率的指數也與 THD、 R_L 等一併連動，除標示瓦數外，也會順帶標註 R_L 阻抗值及 THD 百分比。此外，D 類的優點在於高電能利用率，利用率其實也與輸出阻抗及輸出功率息息相關，阻抗高利用率也高，輸出功率高利用率也會高。

更進一步的，還要注意佔用體積與 EMI 電磁干擾，體積上不僅力求放大器的封裝精小，也希望盡可能不要用上散熱片，以及外部搭配電路及組件（或電容、電感，有時也包含 MOSFET 電晶體）也必須要精小或盡可能省略，至於電磁干擾是 D 類放大器特有的問題，ABC 與 AB 類放大器沒有此種問題，因為 D 類放大器會持續頻繁地進行電晶體的導通、關閉操作，所以容易產生電磁干擾的問題，有時甚至要用上金屬外覆來屏蔽，當然！最好是不需用上，且不用上時也要盡量降低電磁干擾的發散度。

而在放大功效的本務之外，也會強調額外的保護電路及控制電路，但各家重視的環節與實現作法都不一，此方面我們將在下一部分說明。



▲圖說：MAXIM 的切換式 D 類音訊功率放大器：MAX4295，該晶片的第 14、15 接腳為 FS1、FS2 輸入腳，可由外部給予 Hi、Lo 邏輯訊號，以決定 D 類放大器的 PWM 調變頻率，共有 4 種可變換的頻率：125kHz、250kHz、500kHz、1MHz。（圖片來源／MAXIM-IC.com）

各業者對 D 類放大器施展看家本領

最後讓我們來看看各業者在 D 類放大器上的特有用心及努力，筆者歸納整理的結果，大致可從數個方面來談，即省電、控制、體積、彈性、保護。

在省電上，除了前述的電能利用率外，還會有 Power Down、Shutdown 等省電模式，例如 MAXIM、TI 的 D 類放大器都提供了 #SHUTDOWN、#SHDN 接腳，可由放大器以外的輸入來控制其動作、關閉、休眠。

在控制上，有 PWM 頻率的調整、聲道操控等，多數的 D 類放大器其 PWM 頻率是固定的，或者透過外接電阻來微幅調整，而 MAXIM 的方案是可分段式調整，透過 FS1、FS2 接腳可選擇 4 種 PWM 頻率，如 125kHz、250kHz、500kHz、1MHz。此外有 Mono（單聲道）或 Stereo（雙聲道）的放大器，業者多會提供聲道啓用、關閉的功能，更理想者可個別開關某一聲道，或者還額外提供 MUTE 的靜音控制功能。

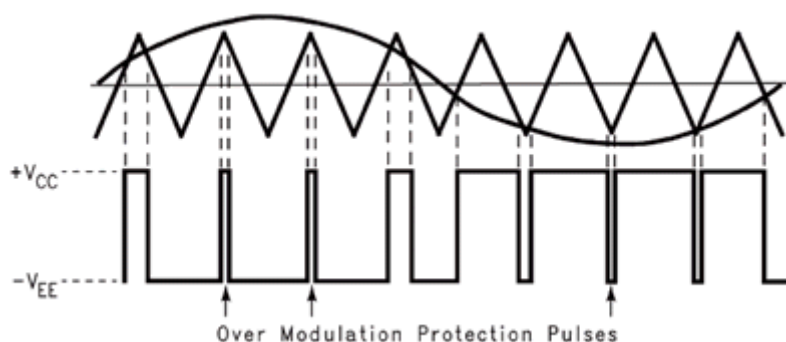
在體積上，多數的 D 類放大器已內建輸出放大所需的 MOSFET 電晶體，但也有業者是採分離設計，如 Cirrus Logic 的 TrueDigital CS44210 或 CS44L10（耳機用），需搭配 IR（International Rectifier）的 HEXFET IRCS8101 或 IRCS8102 MOSFET 電晶體，或如 NS 的 Overture LM4651 搭配 LM4652，如此才算是完整的 D 類放大電路。

已內建 MOSFET 電晶體的好處是體積更小，然有得即有失，失去的即是搭配彈性，事實上 D 類放大至 MOSFET 段時還可選擇全橋或半橋的接法，若採內建便無再選擇性。

不單是內建 MOSFET，業者也盡力縮減更後段的 LC 低通濾波電路，力求使用更小的電容，或根本省去電容（Cap-Free），甚至 TI 還提出連外接電感都一併省去（LC-Free、Filter-Free），直接將揚聲器的音圈之漏電感來充當 L 效用，此種 D 類放大器整合密度最高，其輸出接腳可與喇叭、耳機直接相連，雖然此方式可將體積縮至極小，但也有些許疑慮，因為高頻部分未經過濾就直接輸出，雖然喇叭不易將 20kHz 以上的頻率發聲，即便發出人耳也聽不到 20kHz 以上的頻率，但精省 LC 電路也會使電能利用率降低。

最後就是各種保護措施，首重的是過熱保護（功率晶體過熱）、過電流保護（輸出功率過高），例如超過攝氏 135 度會透過輸出接腳警告，超過 150 度時不僅輸出警告同時也自動關閉該聲道，此稱為過熱關閉（Thermal Shutdown），並在低於 135 度自動恢復工作。

另外還有短路保護（Short Circuit Protection）或過調變保護（Over Modulation Protection），如 NS 的方案中即有過調變保護，由於原始類比音訊的波幅可能未與三角波的波幅完全對齊，一旦原始音訊的波幅超過或低於三角波，則電壓比較器的 Hi、Lo 脈寬輸出便會失序，而過調變保護則可防止此種失序。



▲圖說：NS 為其 D 類放大器提出過調變保護的功能，由於原始類比音訊的上下波幅不見得能全然與三角波的波幅對齊，若音訊波形過高或過低會導致調變失序，而過調變保護可忽略失序的電壓比較結果，保持 PWM 調變的正確性。（圖片來源／National.com）