

# 隔離式閘極驅動器揭秘

■作者：Sanket Sapre/ ADI 應用工程師

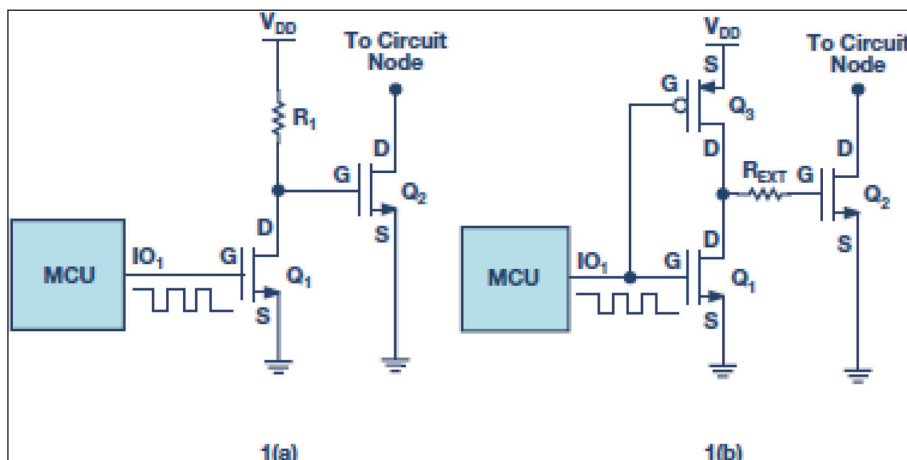
## 摘要

IGBT/ 功率 MOSFET 是一種電壓控制型元件，可用來作為電源電路、電機驅動器和其它系統中的切換開關元件。閘極是每個元件的電氣隔離控制端。MOSFET 的另外兩端是源極和漏極，而對於 IGBT，它們被稱為集電極和發射極。為了操作 MOSFET/IGBT，通常須將一個電壓施加於閘極（相對於參考元件的源極 / 發射極而言）。使用專門驅動器向功率元件的閘極施加電壓並提供驅動電流。本文討論閘極驅動器是什麼，以及為何需要閘極驅動器，另外也將探討如何定義其基本參數，如時序、驅動強度和隔離度。

## 需要閘極驅動器

IGBT/ 功率 MOSFET 的結構使得閘極和源極 / 發射極之間形成一個非線性電容。為閘極電容充電會使功率元件導通，並允許電流在其漏極和源極接腳之間流動，而放電則會使元件關斷，漏極和源極接腳上就可以阻斷大電壓。當閘極電容充電且元件剛好可以導通時的最小電壓就是閾值電壓 ( $V_{TH}$ )。為

圖 1：以反相邏輯驅動功率 MOSFET。



將 IGBT/ 功率 MOSFET 用作開關，應在閘極和源極 / 發射極接腳之間施加一個充分大於  $V_{TH}$  的電壓。

在此考量一個具有微控制器的數位邏輯系統，其 I/O 接腳之一上可以輸出一個 0 V 至 5 V 的 PWM 訊號。這種 PWM 將不足以使電源系統中使用的功率元件完全導通，因為其功率元件的驅動電壓一般超過標準 CMOS/TTL 邏輯電壓。因此，邏輯 / 控制電路和高功率元件之間需要一個介面。這可以透過驅動一個邏輯位準 n 通道 MOSFET，其進而驅動一個功率 MOSFET 來實現，如圖 1a 所示。

如圖 1a 所示，當  $IO_1$  發出一個低位準訊號時， $V_{GSQ1} < V_{THQ1}$ ，因此 MOSFET  $Q_1$  保持關斷。結果，一個正電壓施加於功率 MOSFET  $Q_2$  的閘極。 $Q_2$  的閘極電容 ( $C_{GQ2}$ ) 透過上拉電阻  $R_1$  充電，閘極電壓被拉至  $V_{DD}$  的軌電壓。

如果  $V_{DD} > V_{THQ2}$ ，則  $Q_2$  導通，可以傳導電流。當  $IO_1$  輸出高位準時， $Q_1$  導通， $C_{GQ2}$  通過  $Q_1$  放電。 $V_{DSQ1} \sim 0$  V，使得  $V_{GSQ2} < V_{THQ2}$ ，因此  $Q_2$  關斷。這種設定的一個問題是  $Q_1$  導通狀態下  $R_1$  的功耗。為了解決此問題，pMOSFET  $Q_3$  可以作為上拉元件，

其以與  $Q_1$  互補的方式工作，如圖 1b 所示。PMOS 具有較低導通電阻和非常高的關斷電阻，驅動電路中的功耗大大降低。為在閘極轉換期間控制邊沿速率， $Q_1$  的漏極和  $Q_2$  的閘極之間外加一個小電阻。使用 MOSFET 的另一個優點是其易於在裸片上製作，而製作電阻則相對較難。這種驅動功率開關閘極的獨特介面可以單片 IC

的形式創建，該 IC 接受邏輯位準電壓並產生更高的功率輸出。此閘極驅動器 IC 幾乎總是會有其他內部電路來實現更多功能，但它主要用作功率放大器和位準轉換器。

## 閘極驅動器的關鍵參數

驅動強度：

提供適當閘極電壓的問題透過閘極驅動器來解決，閘極驅動器執行位準轉換任務。不過，閘極電容無法瞬間改變其電壓。因此，功率 FET 或 IGBT 具有非零的有限切換間隔時間。在切換期間，元件

圖 2：無閘極驅動器的 MOSFET 導通轉換

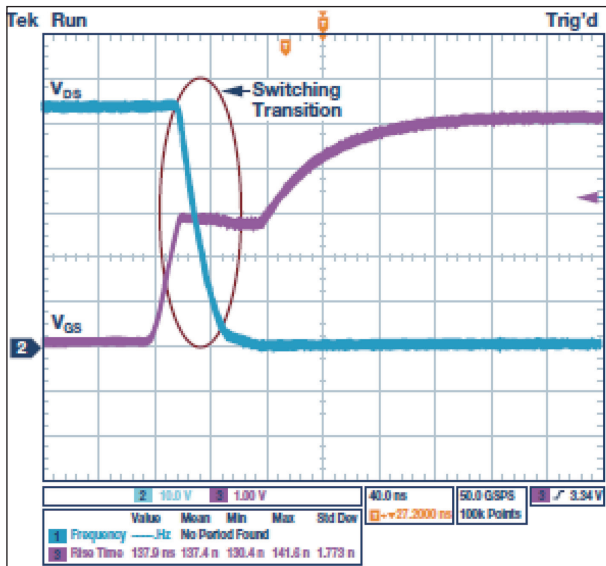
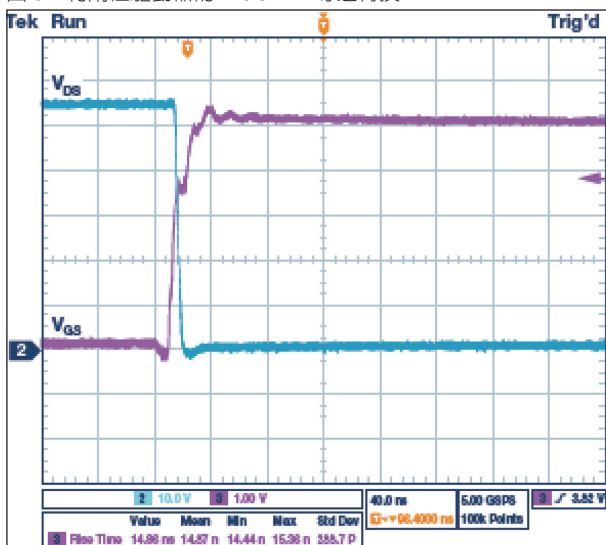


圖 3：有閘極驅動器的 MOSFET 導通轉換



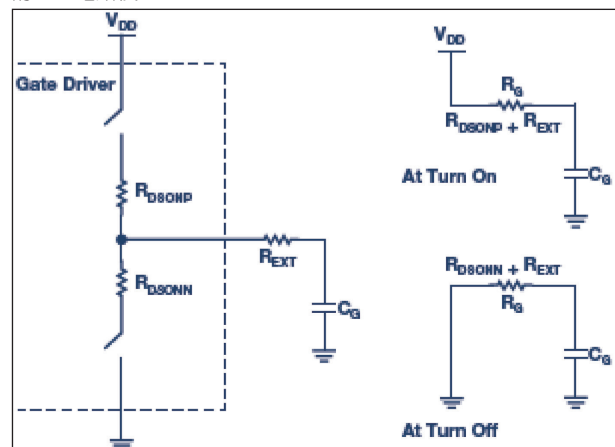
可能處於高電流和高電壓狀態，這會產生功耗並轉化為熱量。因此，從一個狀態到另一個狀態的轉換需要很快，以盡可能縮短切換時間。為了實現這一點，需要高瞬變電流來使閘極電容快速充電和放電。

能夠在更長時間內提供 / 吸收更高閘極電流的驅動器，切換時間會更短，因而其驅動的電晶體內的切換開關功耗也更低。

微控制器 I/O 接腳的拉電流和灌電流額定值通常可達數十毫安培，而閘極驅動器可以提供高得多的電流。圖 2 中，當功率 MOSFET 由微控制器 I/O 接腳以最大額定拉電流驅動時，觀察到切換時間間隔較長。如圖 3 所示，採用 ADuM4121 隔離式閘極驅動器時，轉換時間大大縮短；當驅動同一功率 MOSFET 時，該驅動器相較於微控制器 I/O 接腳能夠提供高得多的驅動電流。很多情況下，由於數位電路可能會透支電流，直接用微控制器驅動較大功率 MOSFET/IGBT 可能會使控制器過熱，進而受損。閘極驅動器具有更高驅動能力，支援快速切換，上升和下降時間只有幾奈秒。這可以減少開關功率損耗，提高系統效率。因此，驅動電流通常被認為是選擇閘極驅動器的重要指標。

與驅動電流額定值相對應的是閘極驅動器的漏源導通電阻 ( $R_{DS(ON)}$ )。在理想的情況下，MOSFET 完全導通時的  $R_{DS(ON)}$  值應為零，但由於其物理結構，該阻值一般在幾歐姆範圍內。這考慮了從漏極到源極的電流路徑中的總串聯電阻。

圖 4：具有 MOSFET 輸出級和功率元件作為電容的閘極驅動器的 RC 電路模型



$R_{DS(ON)}$  是開極驅動器最大驅動強度額定值的真正基礎，因為它限制了驅動器可以提供的開極電流。內部開關的  $R_{DS(ON)}$  決定灌電流和拉電流，但外部串聯電阻用於降低驅動電流，因此會影響邊沿速率。如圖 4 所示，高端導通電阻和外部串聯電阻  $R_{EXT}$  構成充電路徑中的開極電阻，低端導通電阻和  $R_{EXT}$  構成放電路徑中的開極電阻。

$R_{DS(ON)}$  也會直接影響驅動器內部的功耗，對於特定驅動電流， $R_{DS(ON)}$  值越低，則可以使用的  $R_{EXT}$  值越高。功耗分佈在  $R_{EXT}$  和  $R_{DS(ON)}$  上，因此  $R_{EXT}$  值越高，意味著驅動器外部的功耗越多。所以，對於給定晶片面積和尺寸的 IC，為了提高系統效率並放寬驅動器內的熱調節要求， $R_{DS(ON)}$  值越低越好。

### 時序：

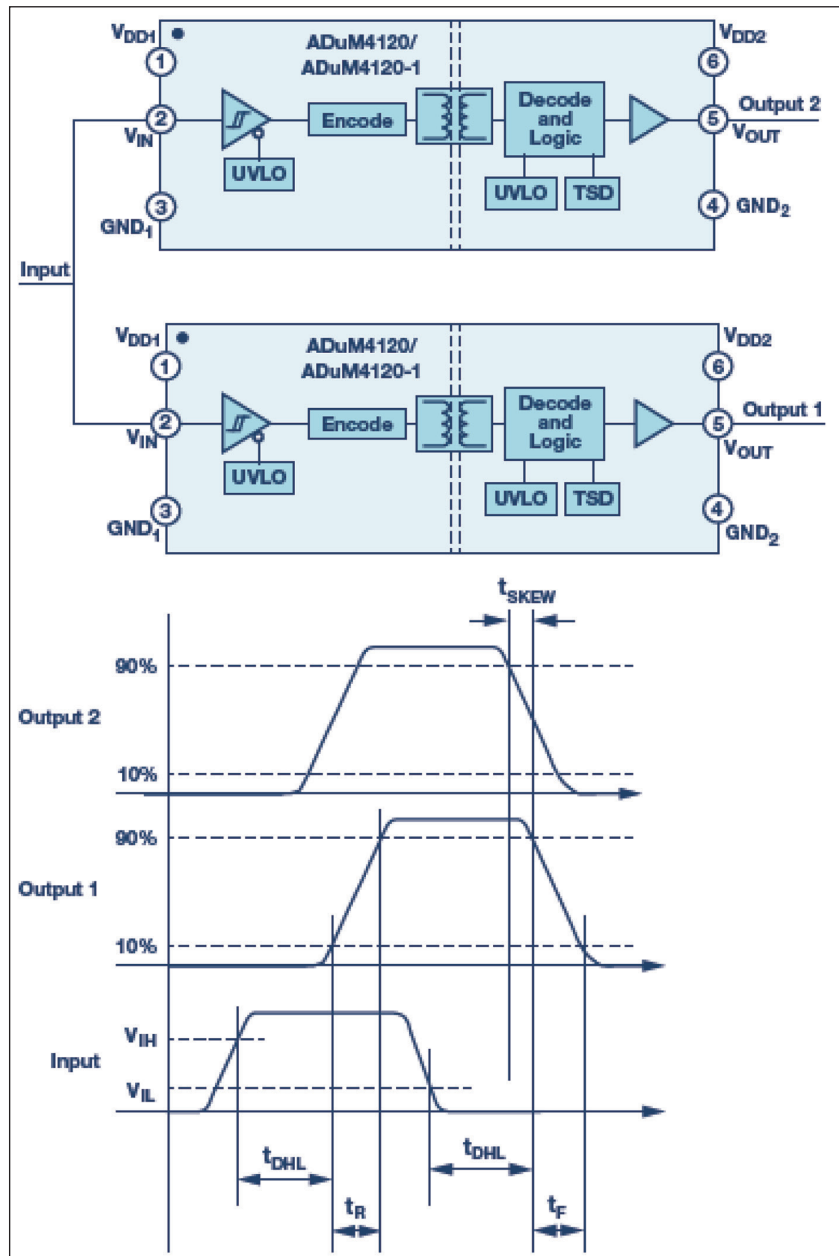
開極驅動器時序參數對評估其性能至關重要。包括 ADuM4120 在內的所有開極驅動器的一個常見時序規格（如圖 5 所示）是驅動器的傳播延遲（ $t_D$ ），其定義為輸入邊沿傳播到輸出所需的時間。如圖 5 所示，上升傳播延遲（ $t_{DLH}$ ）可以定義為輸入邊緣升至輸入高閾值（ $V_{IH}$ ）以上到輸出升至最終值 10% 以上的時間。類似地，下降傳播延遲（ $t_{DHL}$ ）可以表述為從輸入邊緣降至輸入低閾值  $V_{IL}$  以下到輸出降至其高位準 90% 以下的時間。輸出轉換的傳播延遲對於上升緣和下降沿可能不同。

圖 5 還顯示了訊號的上升和下降時間。這些邊緣速率受到元件可提供的驅動電流的影響，但它們也取決於所驅動的負載，這在傳播延遲計算中並未考慮。另一個時序參數是脈寬失真，其為同一元件的上升和下降傳

播延遲之差。因此，脈寬失真 (PWD) =  $|t_{DLH} - t_{DHL}|$ 。

由於不同元件內的電晶體不匹配，兩個元件的傳播延遲不會完全相同。這會導致傳播延遲偏斜（ $t_{SKEW}$ ），其定義為兩個不同元件在相同工作條件下對同一輸入作出回應時，輸出轉換之間的時間差。如圖 5 所示，傳播延遲偏斜被定義為元件間偏差。對於具有多個輸出通道的元件，此規格的表述方式相同，但被稱為通道間偏斜。傳播延遲偏斜通常不能

圖 5：ADuM4120 開極驅動器和時序波形



在控制電路中予以補償。

圖 6 顯示了 ADuM4121 閘極驅動器的典型設定，其結合功率 MOSFET 使用，採用半橋配置，適合電源和電機驅動應用。在這種設定中，如果  $Q_1$  和  $Q_2$  同時導通，有可能因為電源和接地接腳短路而發生直通。這可能會永久損壞開關甚至驅動電路。為避免直通，必須在系統中插入一個死區時間，從而大大降低兩個開關同時導通的可能性。在死區時間間隔內，兩個開關的閘極訊號為低位準，因此理想情況下，開關處於關斷狀態。如果傳播延遲偏斜較低，則所需的死區時間較短，控制變得更加可預測。偏斜越低且死區時間越短，系統運行會更平穩、更高效。

時序特性很重要，因為它們會影響功率切換開關的操作速度。理解這些參數可以使控制電路設計更加簡單和準確。

隔離：

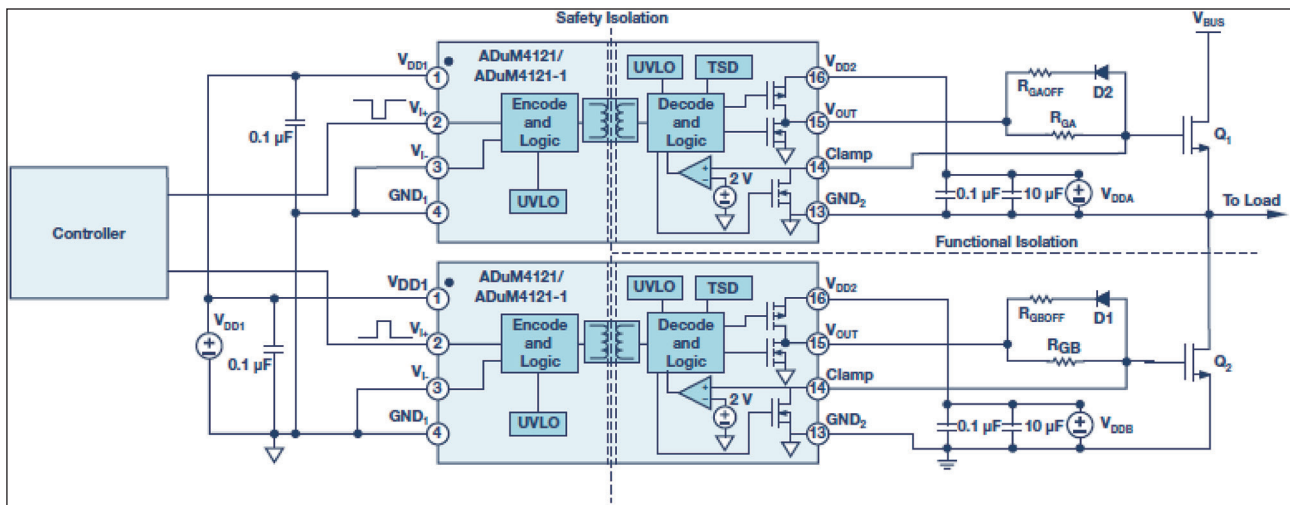
隔離是指系統中各種功能電路之間的電氣分離，使得它們之間不存在直接導通路徑。這樣，不同電路可以擁有不同的地電位。利用電感、電容或光學方法，仍可讓訊號和 / 或電源在隔離電路之間通過。對於採用閘極驅動器的系統，隔離對功能的執行可能是必要的，並且也可能是安全要求。圖 6 中， $V_{BUS}$  可能有幾百伏，在給定時間可能有數十安

培的電流通過  $Q_1$  或  $Q_2$ 。萬一此系統出現故障時，如果損壞僅限於電子元件，則安全隔離可能是不必要的，但如果控制側涉及到人的活動，那麼高功率側和低電壓控制電路之間需要電流隔離。它能防範高壓側的任何故障，因為儘管有元件損壞或失效，隔離閘仍會阻止電力到達用戶。

為防止觸電危險，隔離是監管機構和安全認證機構的強制要求。它還能保護低壓電子元件免受高功率側故障引起的任何損害的影響。有多種方法可以描述安全隔離，但在基本層面上，它們都與隔離閘的擊穿電壓有關。此電壓額定值一般針對驅動器的使用壽命以及特定期間和情況的電壓瞬變而給出。這些電壓位準還與驅動器 IC 的物理尺寸以及隔離閘上接腳之間的最小距離有關。

除安全原因外，隔離對於系統正常運行也可能是必不可少的。圖 6 顯示了電機驅動電路中常用的半橋拓撲結構，給定時間只有一個開關導通。在高功率側，低端電晶體  $Q_2$  的源極接地。 $Q_2$  的閘源電壓 ( $V_{GSQ2}$ ) 因此直接以地為基準，驅動電路的設計相對簡單。高端電晶體  $Q_1$  的情況則不同，因為其源極是開關節點，取決於哪個開關導通，開關節點將被拉至匯流排電壓或地。要使  $Q_1$  導通，應施加一個超過其閾值電壓的正閘源電壓 ( $V_{GSQ1}$ )。因此，當源極連接到  $V_{BUS}$ ， $Q_1$  處於導通狀態時，其閘極電壓將高於  $V_{BUS}$ 。如果驅動電路沒有用於接地參考的隔離，

圖 6：採用 ADuM4121 隔離式閘極驅動器的半橋設定中的隔離閘



則將需要大於  $V_{BUS}$  的電壓來驅動  $Q_1$ 。這是一個繁瑣的解決方案，對於高效系統來說並不實用。因此，人們需要經過位準轉換並以高端電晶體源極為基準的控制訊號。這被稱為功能隔離，可以利用隔離式閘極驅動器 (如 ADuM4223) 來實現。

### 抗擾度：

閘極驅動器用在有大量噪音源的工業環境中。雜訊會破壞資料，使系統不可靠，導致性能下降。因此，閘極驅動器必須具有良好的抗雜訊能力，以確保資料的完整性。抗擾度與驅動器抑制電磁干擾 (EMI) 或 RF 雜訊及共模瞬變的程度有關。

EMI 是指任何破壞電子元件預期操作的電氣雜訊或磁干擾。EMI (其會影響閘極驅動器) 是高頻開關電路的結果，主要由大型工業電機的磁場造成。EMI 可以輻射或傳導，並且可能耦合到附近的其他電路中。因此，EMI 或 RF 抗擾度是衡量閘極驅動器抑制電磁干擾並保持穩健運行而無差錯的能力的指標。若具有高抗擾度，驅動器便可在大型電機附近使用，而不會引起資料傳輸故障。

如圖 6 所示，隔離閘極可在不同電位的接地點提供高電壓隔離。但是，高頻切換導致次級端電

壓轉換的邊沿較短。由於隔離邊界之間的寄生電容，這些快速瞬變而從一側耦合到另一側，這可能導致資料損壞。其表現可能是在閘極驅動訊號中引入抖動，或者將訊號完全反轉，導致效率低下，甚至在某些情況下發生直通。因此，閘極驅動器的一個決定性指標是共模瞬變抗擾度 (CMTI)，其定量描述隔離式閘極驅動器抑制輸入和輸出間大共模瞬變的能力。如果系統中的壓擺率很高，則驅動器需要有很高的抗擾度。因此，當在高頻和大匯流排電壓下工作時，CMTI 數值特別重要。

### 結論

本文旨在簡單介紹閘極驅動器，因此，到目前為止討論的參數並未全面詳盡地反映隔離式閘極驅動器特性。驅動器還有其他指標，如電源電壓、容許溫度、接腳排列等，這些是每個電子元件的共同考慮因素。一些驅動器，如 ADuM4135 和 ADuM4136，也包含保護功能或先進的檢測或控制機制。市場上的隔離式閘極驅動器種類眾多，系統設計人員必須瞭解所有這些規格和特性，以便在相關應用中就使用適當的驅動器作出明智的決定。CTA

## 高通與愛立信率先進行符合 3GPP 規範的 5G NR 毫米波 OTA 通話

高通技術公司與愛立信宣佈，成功在智慧型手機尺寸的行動測試裝置上完成符合 3GPP Rel-15 規範的 5G 新空中介面 (NR) 通話。此次 OTA (over-the-air) 通話展示使用非獨立式 (NSA) 的 39GHz 頻譜毫米波 (mmWave)，並於愛立信位於瑞典 Kista 的實驗室進行，運用愛立信的商用 5G 新空中介面無線電 AIR 5331 和基頻產品，以及整合高通 Snapdragon X50 5G 數據機與 RF 子系統的行動測試裝置。

此次實驗室數據通話是 2017 年宣佈的互通性開發測試 (IODT) 之延續，當時測試運用愛立信的 5G 新空中介面預商用基地台以及高通技術公司的 5G 新空中介面 UE 原型，該測試展現兩家公司達成推出符合 5G 新空中介面標準的基礎設施、智慧型手機與其他行動裝置此重要里程碑的承諾與能力。此外，這些早期測試與里程碑將協助全球營運商與 OEM 廠商使用他們自己的網路與裝置進行實地測試。