

# 邁向高速資料傳輸介面之路

■文：徐俊毅

電子行業技術的發展，IEEE1284 被 USB 介面取代，PATA 被 SATA 取代，SATA 又被 NVME 取代，SCSI 變成了 SAS、PCI 變成了 PCI-Express，傳統平行介面的速度已經達到瓶頸，取而代之的是速度更快的序列介面。於是原本用於光纖通信的 SERDES (是 SERializer (串列器)/DESerializer (解串器)的簡稱) 技術成為了為高速序列介面的主流。我們所熟知的各種介面或者傳輸方式基本都是序列介面，像筆電、PC 這樣的設備上已經找不到任何平行介面，取而代之的是實體層採用 SERDES 的各種

序列介面，如大家熟知的 USB、PCIe、HDMI、DisplayPort 等等。這些介面的傳輸能力也十分驚人，如：PCIe 6.0 的傳輸速率達到了驚人的 256GB/s，Thunderbolt 4 達到 40Gbps，USB4 Gen 4 為 40Gbps，eDP(DisplayPort) 1.4b HBR3 8.1 Gbit/s 每 lane，共 32.4 Gbit/s 頻寬，HDMI 2.0b 頻寬 18 Gbit/s。

## PCIe 6.0 切換到 PAM4 信令

比原定時間稍晚一點，2021 年 7 月初，PCI-SIG 公佈的 PCIe

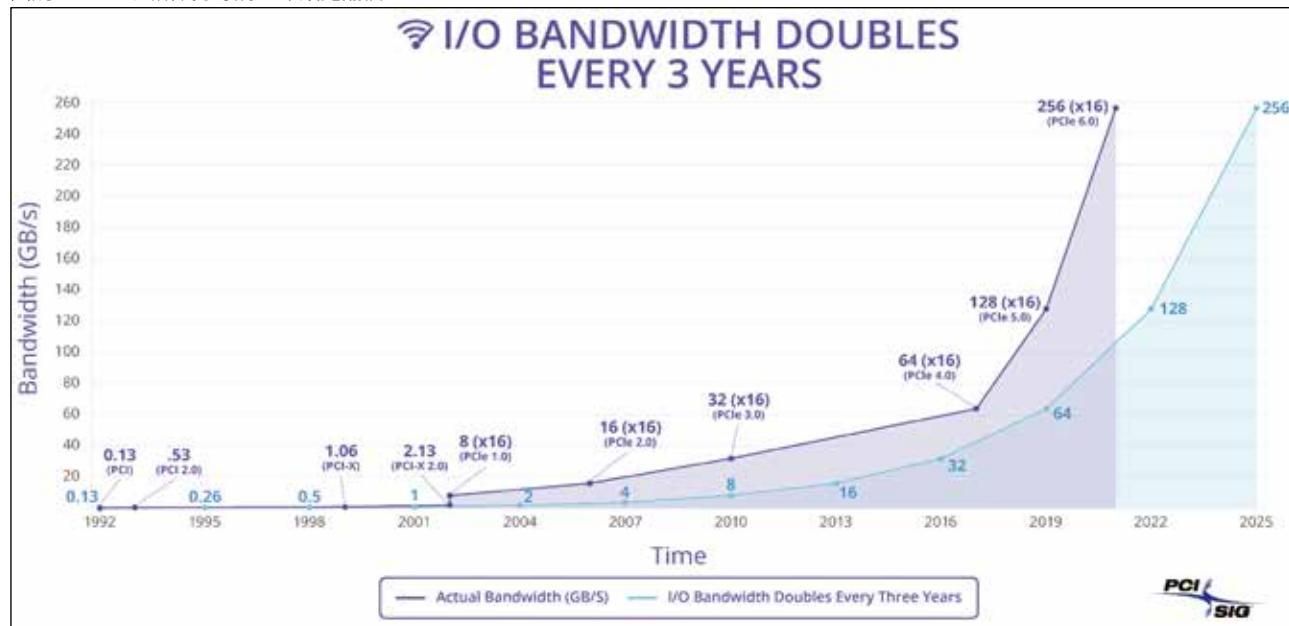
6.0, 0.71 版的規格供會員審查。

PCI-SIG 總裁兼董事會主席 Al Yanes 表示：在工作小組辛勤的工作下，0.71 版本規格終於發佈。我們知道開發人員和媒體都在急切地等待最終規範推出，這個時間不會晚於今年年底。

### PCIe 6.0 規格特點：

- 64 GT/s 資料速率和高達 256 GB/s x16 通道配置，相比 PCIe 5.0 規範頻寬再次翻倍
- PAM4(脈衝振幅調製 4 級)信號，充分利用現有的 56G PAM4 資料速率
- 低延遲前向糾錯 (FEC) 具有額外的機制，提高頻寬效率

圖說：PCIe 規格保持每隔 3 年頻寬翻倍



圖片來源：[pcisig.com](http://pcisig.com)

表：歷代 PCIe 規格

PCIe Specification	Data Rate(Gb/s) (Encoding)	x16 B/W per dirn**	Year
1.0	2.5 (8b/10b)	32 Gb/s	2003
2.0	5.0 (8b/10b)	64 Gb/s	2007
3.0	8.0 (128b/130b)	126 Gb/s	2010
4.0	16.0 (128b/130b)	252 Gb/s	2017
5.0	32.0 (128b/130b)	504 Gb/s	2019
6.0 (WIP)	64.0 (PAM-4, FLIT)	1024 Gb/s (~1Tb/s)	2021*

資料來源：[pcisig.com](http://pcisig.com)

■基於流量控制單元的編碼 FLIT

■向下相容 PCIe 前代規格

單通道 PCIe 6.0 單向頻寬 8GB/s，雙向 16GB/s，因此採用

16 通道時，將達到驚人 256GB/s，

這一傳輸速率與資料中心以及光傳輸正在升級的 400GB 相匹配。因此，5G、人工智慧、汽車、雲端

圖說：PCIe 6.0 為 AI、汽車、雲端預留更大頻寬

圖片來源：[pcisig.com](http://pcisig.com)

圖說：PCIe 主要應用

圖片來源：[pcisig.com](http://pcisig.com)

大資料、企業服務等需要高輸送量的應用場景將是 PCIe 6.0 的市場重點，當然在 PC、行動端以及高速存儲市場 PCIe 6.0 的傳統市場也在升級範圍內。

汽車的智慧化技術演技，讓 ADAS 和自動駕駛技術快速發展，AI 和機器學習在這一領域被廣泛使用。大量的感測器資料，如雷射雷達、圖像感測器，將汽車周邊的資訊不斷回傳，如天氣、光線、周邊建築、運動物體，整個系統都需要高速處理時時收到的大量資料，並作出決策，這是汽車應用需要 PCIe 6.0 的主要原因。

在消費端，AMD 顯示卡、處理器，晶片組已開始全面支持 PCIe 4.0。或許是感受到來自競爭 Intel 在今年 3 月發售的第 11 代 Rocket Lake-S 系列處理器中也終於支持到了 PCIe 4.0，此前 Intel 總是強調遊戲應用其實 PCIe 3.0 已經足夠用了。不過消費端目前的主流應用仍然是大量的 PCIe 2.0 或者 PCIe 3.0，其中 PCIe 2.0 仍然佔有大量的市場份額。

在伺服器端，Intel 的 Agilex FPGA 已經支持到了 PCIe 5.0，而作為資料中心應用的主力，Intel 下一代伺服器平臺 Sapphire Rapids 會提供 PCIe 5.0 支援。

PCIe 6.0 在技術的一個重要特點就是將此前沿用 NRZ 128b/130b 傳輸編碼方案，遷移到了 PAM4 脈衝調製傳輸編碼，這樣可以在充分利用現有條件實現傳輸速率翻倍（不必增加傳輸頻率就能增加資料傳輸量），同時信號

損失保持與 PCIe 5.0 相同的 36dB 水準。翻倍的資料輸送量和頻寬，可以減少設備佔用的 PCIe 通道數量，達到有效增加設備數量的目的，讓系統變得更為經濟。

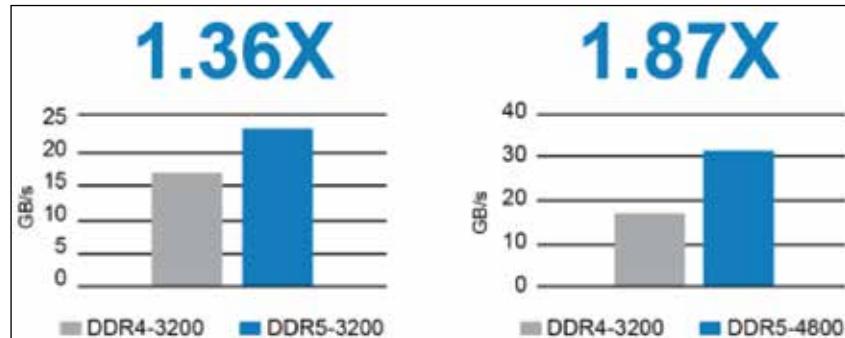
由於 PAM4 設計比 NRZ 設計更容易受到雜訊干擾，它把四個級別的信號整合到了兩個幅度當中。設計測試時必須執行發射機 (Tx) 測量，比如測量信噪失真比 (SNDR) 和輸出抖動，以便表徵 PAM4 發射器件。前向糾錯 (FEC) 主要用於在 PAM4 鏈路中糾正通道誤差，同樣 PAM4 Rx 測試中必不可少。這些問題對工程師和系統設計人員來說將是新的挑戰。

## DDR5 性能翻倍普及加速

CPU 核心計數的增長速度超過了系統記憶體頻寬。信號完整性、電源傳遞、佈局複雜性和其他系統級挑戰正在限制每個核心記憶體頻寬的進步。需要新的記憶體架構來滿足下一代每核頻寬的要求。DDR5 是 DDR4 的繼任者，在計算系統感受到不斷增大的壓力之際，它的出現是一次巨大的進步。

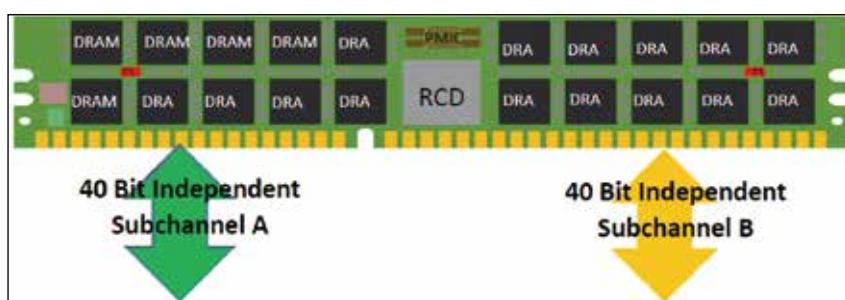
2020 年 7 月 14 日，電子器件工程聯合會 (JEDEC) 正式發佈了 DDR5 SDRAM 的最終規範 ---- JESD79-5 DDR5 SDRAM 標準。DDR 記憶體頻寬再次翻倍，DDR5 旨在滿足密集雲和企業資料中心應用驅動的需求，為開發人員提供了兩倍的性能並顯著提升記憶體的效率，vdd 電壓從 1.2v 下降到 1.1v，

圖說：DDR5 輸送量大幅度提升



圖片來源：micron.com

圖說：DDR5 記憶體使用兩個獨立的子通道且配備獨立的 PMIC 調節電壓



圖片來源：micron.com

進一步降低功耗。

最大的改動是 DDR5 單個 DIMM 被分解為 2 個通道，不再是每個 DIMM 提供一個 64 位元資料通道，而改為每 DIMM 提供兩個獨立的 32 位元資料通道 (ECC 規格 DDR5，則多出 8 位，為每通道 40 位)。同時，每個通道的突

發長度從 8 個 byte(BL8) 翻倍到 16 個 byte(BL16)，這一提升使得 DDR5 記憶體每通道每次操作 64 個 byte。與 DDR4 DIMM 相比，DDR5 DIMM 以兩倍的額定記憶體速度 (核心速度相同) 運行，將在 DDR4 DIMM 提供的操作時間內提供兩個 64 位元組的操作，使

表：DDR5 與主流規格對比

規格參數	DDR5	LPDDR5	DDR4	DDR3
Max Die Density	64 Gbit	32 Gbit	16 Gbit	4 Gbit
Max UDIMM Size	128 GB	N/A	32 GB	8 GB
Max Data Rate	6.4Gbps	6.4 Gbps	3.2 Gbps	1.6Gbps
Channels	2	1	1	1
Width(Non-ECC)	64 bits (2 x 32)	16 bits	64 bits	64 bits
Banks (Per Group)	4	16	4	8
Bank Groups	8/4	4	4/2	1
Burst Length	BL16	BL16	BL8	BL8
Voltage (Vdd)	1.2v	1.05v	1.2v	1.5v
Vddq	1.1v	0.5v	1.2v	1.5v

資料來源：COMPOTECHAsia 整理

理論有效頻寬增加一倍，輕易達到 6.4Gbps，達到 DDR4 的整整一倍。Micron 系統類比的資料顯示，在 3200MT/s 規格時，DDR5 的有效頻寬增加了 1.36 倍，而到了 4800MT/s 的傳送速率時，DDR5 的有效頻寬可以提升 1.87 倍。

為提升性能，DDR5 標準規定了 Bank 數量達到 8 個，比 DDR4 多了一倍，這將在 Bank interleave 條件下進一步挖掘記憶體的訪問效率。

DDR5 記憶體在容量和顆粒密度上也進行大幅提升，DDR5 標準支持單顆 64Gbit 的 DRAM 存儲晶片，是 DDR4 最大允許容量 (16Gbit) 的四倍，可以輕易實現雙面 128GB 容量的單條記憶體，從而進一步提升資料中心和伺服器的記憶體效能。

另一項重大改變是 On-DIMM 電壓調節。

JEDEC 在 DDR5 記憶體標準中，規定了全新的 DIMM 的電壓調節方式。DIMM 的電壓調節將從主機板轉移到單個 DIMM 上，讓 DIMM 負責自己的電壓調節需求。這意味著每一條 DDR5 記憶體將多出一顆 PMIC，用來微調記憶體電壓，這一規範適用於從 UDIMMs 到 LRDIMMs 的所有產品。這樣做的好處，簡化了主機板廠商的一些工作，讓很多主機板不再像以前那麼“挑剔”記憶體，JEDEC 的說法是提高 DRAM 的良品率。

JC-42 記憶體委員會主席兼執行副總裁 Desi Rhoden 表示：“隨著設計中採用了幾種新的性能、可靠

性和節電模式，DDR5 已準備好支援和啓用下一代技術。全球 150 多家 JEDEC 成員公司付出的巨大努力和努力，形成了一個針對行業各個方面的標準，包括系統要求、製造流程、電路設計以及模擬工具和測試，極大地增強了開發人員的創新能力，並推進了廣泛的技術應用。

## USB4 與 Thunderbolt 4 快變一家了

### USB 4

與每一代 USB 介面一樣，新規格繼續翻倍。USB4 是 2019 年 3 月由 USB-IF 發佈的新一代 USB 規格，最高具備了 40Gbps 的資料傳輸能力。有意思的地方是，USB-IF 在發佈 USB4 之前還發佈了 USB 3 的兩個小版本，USB3.2 Gen1 和 USB3.2 Gen2，分別對應 10Gbps 和 20Gbps 的傳輸速率。線上纜標識上增更加混亂，由於 USB3 開始提供 DisplayPort 傳輸，為了體現不同，要在不同功能線纜上做不同標識，最後的結果是……乾脆直接過渡到 USB4。

USB4 還首次相容了 Thunderbolt3 介面，並且提供了 USB PD(Power Delivery 電力傳輸)功能，最新的 USB PD 3.1 規範將傳輸功率提升到了 240W！

視頻傳輸方面，USB 可以外接兩台 4K 顯示器或一台 5K 顯示器。吸取了此前 USB 3 系列命名混亂的教訓，USB-IF 表示不會再有 4.1、4.2 這樣的小版本標識，做到盡可能簡化，讓大家都方便。

介面方面 USB4 也統一採用 Type-C 介面，不再像過去那樣有 A、B、Mini、Micro 等多個樣式。

### Thunderbolt 4

Thunderbolt 介面的發展並非一番風順，2011 年 2 月推出的 Thunderbolt 介面，最初只是出現在蘋果的 MAC 電腦上，儘管它的規格很吸引人。直到 2015 年，Intel 將介面改為了 Type-C，讓 Thunderbolt 一下子連接到了 USB

圖說：Thunderbolt 擴展埠



圖片來源：Intel 網站

的世界，Thunderbolt 才開始迅速成長起來。

在 USB4 規格公佈一年之後，2020 年 7 月，Thunderbolt 4 規格發佈。但從其規格上來看，並沒有比前一代有太多改進之處，只是在視頻傳輸和 PCIe 資料傳輸能力上翻倍，說是上一代的加強版也不為過。

Thunderbolt 4 埠具有 40 Gbps 的雙向頻寬。這意味著可

圖說：USB4 與 Thunderbolt 4 規格比較

		Thunderbolt™ 4	Thunderbolt™ 3	USB4	USB3/DP
Unrivaled Simplicity	One universal computer port	•	•		
	Universal 40Gb/s cables up to 2 meters in length	•			
	Accessories with four Thunderbolt ports	•			
Maximum Performance	Minimum PC speed requirements	40Gb/s	40Gb/s	20Gb/s	10Gb/s
	Minimum PC video requirements	Two 4K displays	One 4K display	One display (No Minimum)	One display (No Minimum)
	Minimum PC data requirements	PCIe 32 Gb/s USB 3.2 - 10Gb/s	PCIe 16 Gb/s USB 3.2 - 10Gb/s	USB 3.2 - 10Gb/s	USB 3.2 - 5Gb/s
	Required PC charging on at least one computer port <sup>1</sup>	•			
	Required PC wake from sleep when computer is connected to a Thunderbolt dock	•			
	Minimum PC port power for accessories	15W	15W	7.5W	4.5W
Reliable Connectivity	Thunderbolt Networking	•	•		
	Mandatory certification for all shipping computers, accessories and cables	•	•		
	Cable testing and cable quality audits for Thunderbolt cable manufacturers	•	•		
	Required Intel VT-d based DMA protection	•			
USB4 Specification	Compliant	Compatible	Compliant	Compatible	

圖片來源：[intel.com](http://intel.com)

以將資料快速移入或移出外部存儲，並且可以連接多達 5 個 Thunderbolt 設備來進行靈活的設備配置。所有這些功能均由 1 個埠來實現。Thunderbolt 4 埠與許多連接標準相容，包括 Thunderbolt、USB、DisplayPort 和 PCIe 的早期版本。這些埠可相容標準的 USB-C 型連接器。基於

圖說：USB4 40Gbps 與 Thunderbolt4 只能通過標識來區分



圖片來源：[intel.com](http://intel.com)

VT-d 的 DMA 保護可通過重新映射來自外部設備的請求並檢查適當的許可權來幫助防止安全威脅。

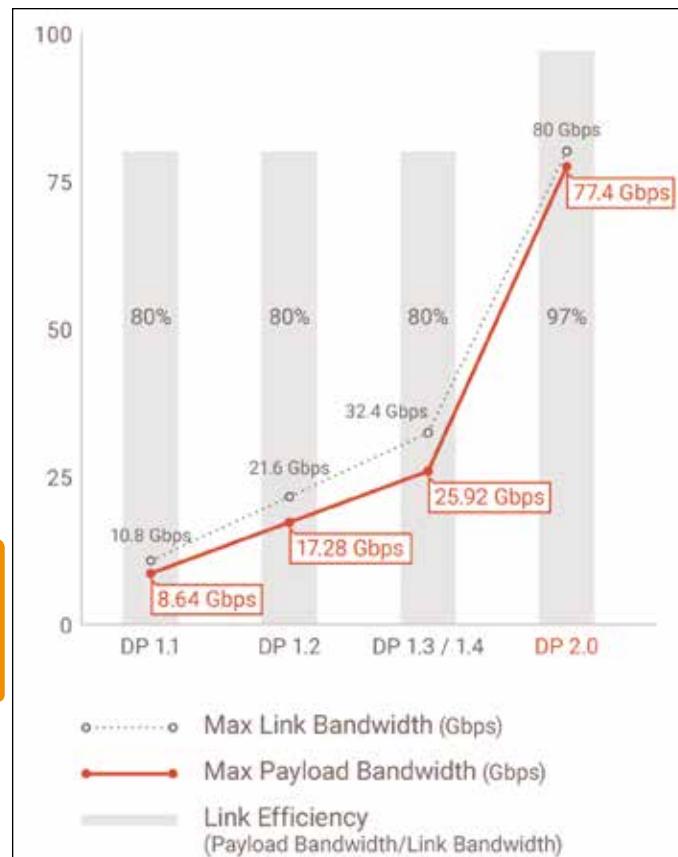
從規格對比來看，Thunderbolt 4 幾乎完全相容了 USB 4 的資料傳輸內容，而反過來卻不行。從目前情況來看，對消費者而言，直接購買 Thunderbolt 4 的線纜是最省事的辦法。除非，你需要超過 15W 的供電能力。

## Displayport 2.0 與 HDMI 2.1 不分伯仲

Displayport (以下簡稱為 DP) 主要在 PC 端，2019 年 6 月 VESA 正式公佈了 DP 2.0 的

規範，進行了一次較大規模升級。提供 10Gbps (UHBR10)、

圖說：DP2.0 將頻寬提升至前所未有的 80Gbps



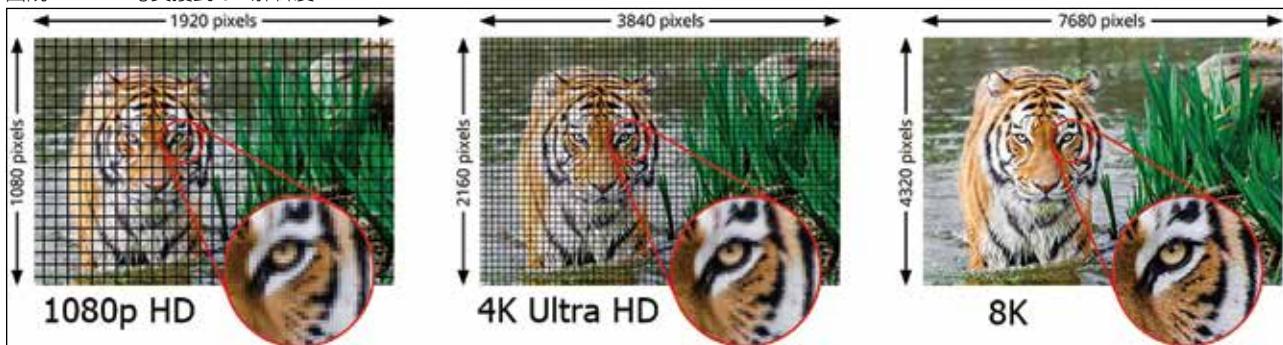
圖片來源：[vesa.org](http://vesa.org)

圖說：DP Alt Mode Spec 2.0

	Pin Assignment D 模式 (Video + USB Data)	USB4 模式 (Video + USB Data)
最大頻寬	Video: 40Gbps (2-Lanes UHBR20) USB Data: 10Gbps	Video + USB: 40Gbps
總頻寬	50Gbps	40Gbps
差別	有各別的獨立頻寬	混合型頻寬，Video用完後的頻寬，再分給USB傳輸使用

圖片來源 :allion.com

圖說：HDMI 可支援到 8K 解析度



圖片來源 :hdmi.org

13.5Gbps (UHBR13.5) 和 20Gbps (UHBR20)，三種資料傳輸率。配合不同的通道數量，可支援雙路 8K (7680x4320@30fps 30bpp) 解析度的顯示輸出，或者經過壓縮 (DSC) 的單路 16K (15360\*8460@60fps 30bpp) 視頻。

頻寬方面，DP2.0 借鑒了 Intel 的 Thunderbolt 3 的技術規格，提供了 4 個資料傳輸通道，將理論頻寬提升到 80Gbps，有效頻寬提升到 77.4Gbps。

其次是編碼效率提升，在 DP2.0 之前，採用的是 8b/10b 編碼方式，而 DP2.0 採用 128b/132b 編碼方式，編碼效率從 80% 提升到 97%。這是其有效頻寬改善的主要原因。

在處理視頻流資料時，DP2.0 引入了 Display Stream

Compression (簡稱 DSC) 資料壓縮技術與 Pane Replay 技術，不僅可以節約頻寬，還能有效控制功耗。不過，DSC 並不強制。

同時 DP2.0 也提供了相容 USB 的模式，2020 年 3 月 VESA 放出了 DP Alt Mode Spec 2.0。增加 DP 2.0 Spec 中三個 Data Rates (UHBR10/13.5/20Gbps)，明確 Pin Assignment D (2-Lane DP 和 2-Lane USB 的通道) 不支援 USB4 模式，USB Data 傳輸最高只支援到 USB3.2 (10Gbps)。

HDMI 則是應用更加廣泛的視頻界面，不僅在家電中，PC、手機也有它的身影。HDMI 2.1 是 HDMI 規範的最新更新，支援一系列更高的視頻解析度和刷新速率，包括 8K60 和 4K120，以及高達 10K 的解析度。還支援動

態 HDR 格式，頻寬功能將增加到 48Gbps。

支援 48Gbps 頻寬的需要新的超高速 HDMI 電纜，可確保提供超高頻寬依賴功能，包括帶 HDR 的未壓縮 8K 視頻。它具有極低的 EMI (電磁干擾)，可減少對附近無線設備的干擾。電纜向後相容，可與 HDMI 設備的現有安裝基座配合使用。

#### HDMI2.1 特點概述

- 連接器向下相容。
- 具備良好的抗電磁干擾能力更好的線纜。
- 頻寬提高到 48 Gbps，是 HDMI 2.0(18 Gbps) 的 2.67 倍。
- 可以傳輸高達 10K@120fps 的視訊訊號。 CTA