

OmniXRI TinyML 小學堂 2025



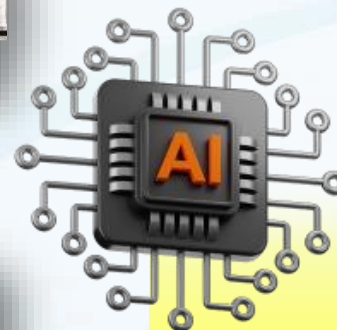
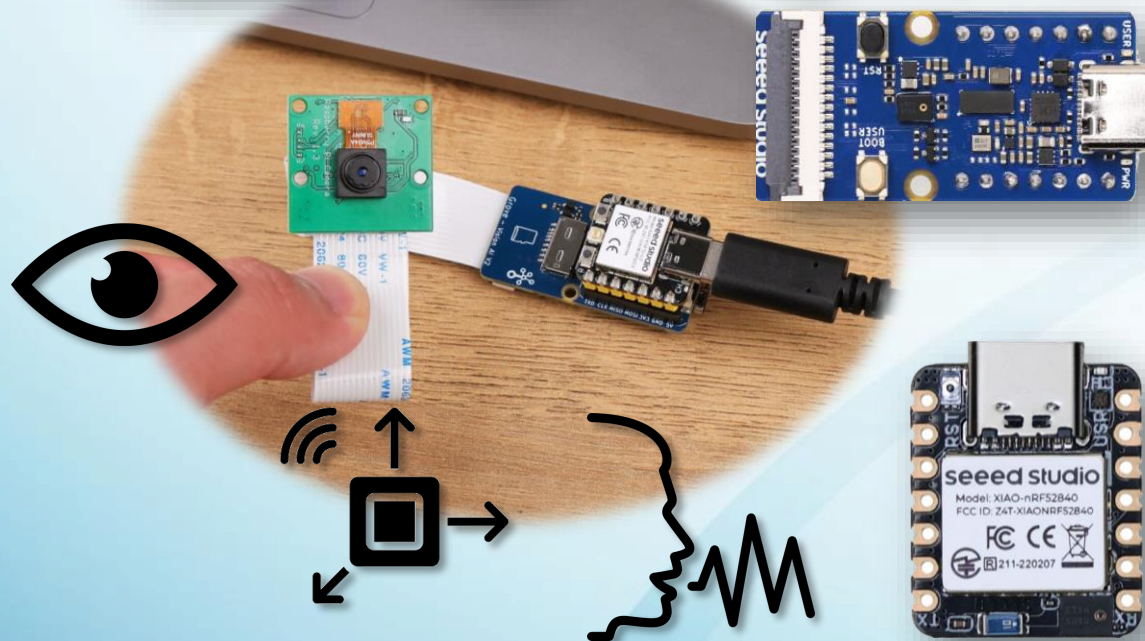
歡迎加入
邊緣人俱樂部



沒有最邊



只有更邊



Cortex-M
Processor

Ethos-U
MicroNPU

【第 2 講】
單晶片基礎



歐尼克斯實境互動工作室 (OmniXRI Studio)
許哲豪 (Jack Hsu)

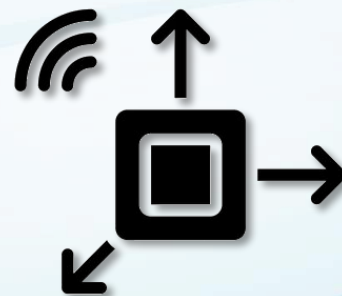
簡報大綱



- 2.1. 硬體架構與分類
- 2.2. arm Cortex-M演進
- 2.3. 基本週邊控制
- 2.4. 即時作業系統

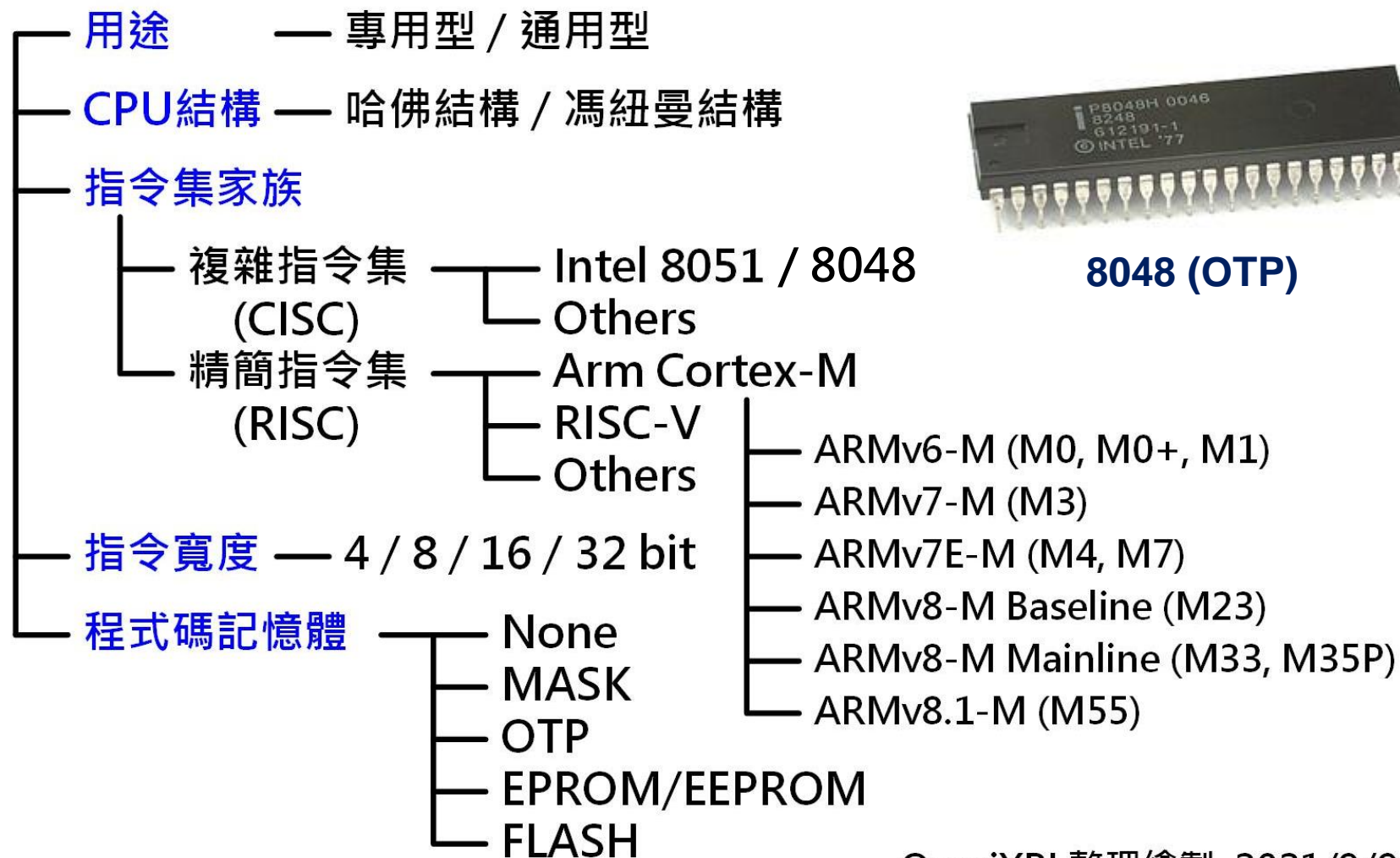
本課程完全免費，請勿移作商業用途！
歡迎留言、訂閱、點讚、轉發，讓更多需要的朋友也能一起學習。

完整課程大綱：<https://omnixri.blogspot.com/2025/03/omnixri-tinyml-2025-0.html>
課程直播清單：<https://www.youtube.com/@omnixri1784/streams>



2.1.硬體架構與分類

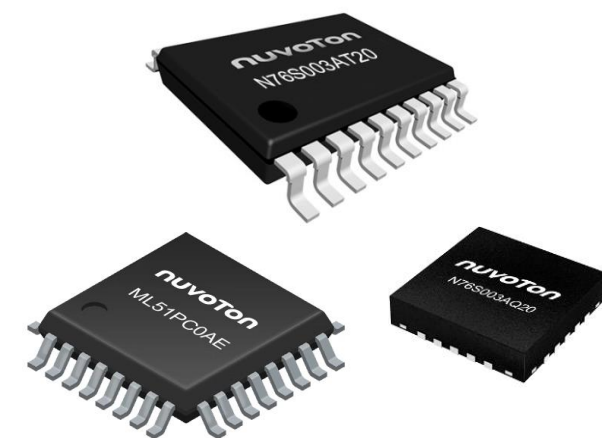
MCU 主要分類方式



8048 (OTP)



8048 (EPROM)



新唐8051系列
(Flash)

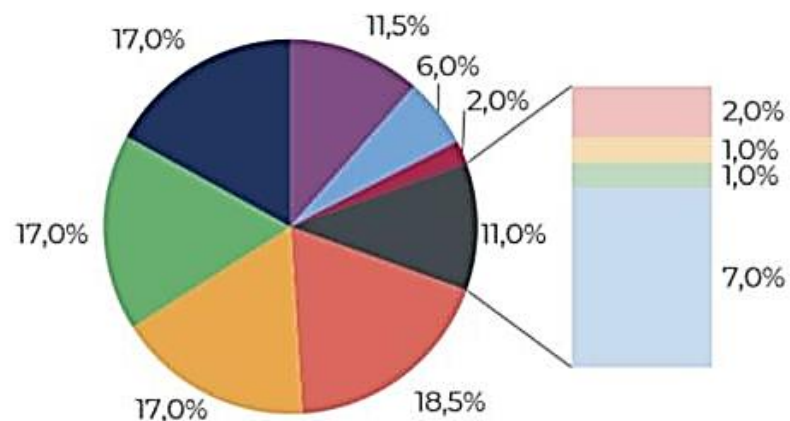
OmniXRI 整理繪製, 2021/9/9

資料來源：<https://omnixri.blogspot.com/2021/09/aiottinymcui.html>

全球通用型 MCU 主要供應商

2022 top ten overall MCU revenue share

(Source: Microcontroller (MCU) Market Monitor Q3 2023, Yole Intelligence, September 2023)



- STMicroelectronics NV
- NXP Semiconductors
- Samsung Semiconductor Inc
- CEC Huada
- Infineon Technologies AG
- Microchip Technology
- Nuvoton Technology Corp
- Rest of Market
- Renesas Electronics Corp
- Texas Instruments
- Silicon Laboratories Inc

半导体行业观察

2023 MICROCONTROLLER (MCU) DESIGNER RANKING

Source: Status of the Microcontroller Industry report, Yole Intelligence, 2024



資料來源：<https://www.yolegroup.com/strategy-insights/regional-dynamics-of-the-global-microcontroller-market/>

資料來源：<https://36kr.com/p/2528780809938432>

台灣通用型 MCU 主要供應商

公司名稱	產品系列	工作時脈	程式碼區	隨機記憶體
Intel 8051 家族 (8bit) [1T, 6T 指令週期]				
義隆 Elan	EM85	16K ~ 20MHz	16KB ~ 18KB	768B ~ 1024B
迅杰 ENE	TK18	28MHz	32KB	1280B
凌通 Generalplus	GPM831/8F37	48M ~ 64MHz	32KB	256B ~ 1KB
	GPM82(EEPROM)	4M ~ 16MHz	2KB	128B
笙泉 Megawin	MG82/89/87/84	24M ~ 48MHz	8K ~ 64KB	256B ~5KB
世紀 Myson	CS89	16M ~ 25MHz	16K ~ 128KB	1K ~6KB
新唐 NuvoTon	N78, W78, N76E, N79E, W79E, MS51, ML51, ML54, N76E, ML56	10K ~ 24MHz	0K ~ 128KB (0K 表外掛)	256B ~ 4KB
陸達 Sentelic	STL5000	51.2MHz	8KB	8KB
松翰 Sonix	SN8F5	16K ~ 48MHz	16KB	512B
太欣 Syntek	STK60	2M ~ 32MHz	16K ~ 64KB	256B ~ 2304B
偉詮 Weltrend	WT51F/56F	12M ~ 24MHz	4K ~ 48KB	256B ~ 1KB
	WT61	12MHz	64K ~ 128KB	1K ~ 4KB
Arm Cortex M0 家族 (32bit) [ArmV6-M 指令集]				
凌通 Generalplus	GPM32F0	80M ~ 92MHz	32K ~ 64KB	2K ~8KB
笙泉 Megawin	MG32F02	48MHz	32K ~ 132KB	4K ~ 16KB
新唐 NuvoTon	M03x/M0Ax/ Nano1xx/M05x NUC02x/1xx/2xx/	24M ~ 72MHz	16K ~ 512KB	2K ~ 96KB
松翰 Sonix	SN32F	16K ~ 72MHz	32K ~ 256KB	2K ~ 32KB
偉詮 Weltrend	WT32L	4M ~ 32MHz	32K ~ 64KB	8KB
Arm Cortex M0+家族 (32bit) [ArmV6-M 指令集]				
盛群 Holtek	HT32F0x/F5x/F6x	20M ~ 60MHz	16K ~ 256KB	4K ~ 32KB
九齊 Nyquest	NX1 (OTP)	32MHz	32K~96KB	4K ~ 12KB
	NX1 (Flash)		2M~32MB	
Arm Cortex M3 家族 (32bit) [ArmV7-M 指令集]				
盛群 Holtek	HT32F1x	72M ~ 96MHz	32K ~ 256KB	8K ~128KB
Arm Cortex M4 家族 (32bit) [ArmV7E-M 指令集]				
新唐 NuvoTon	M48x/M45x/M4TK/ NUC4xx/NUC5xx	72M ~192MHz	40K ~ 2MB	16K ~ 128KB
Arm Cortex M7 家族 (32bit) [ArmV7E-M 指令集]				
新唐 NuvoTon	KM1M7	160MHz	512KB	128KB
Arm Cortex M23 家族 (32bit) [ArmV8-M Baseline 指令集]				
新唐 NuvoTon	M25x/ M261x/ M235x	32K ~ 32MHz	64K ~256KB	8K ~32KB

公司名稱	產品系列	工作時脈	程式碼區	隨機記憶體
晶心 (Andes) RISC-V 家庭 (32bit)				
紘康 Hycon	HY16F18/19/39	2MHz	64KB	8KB
偉詮 Weltrend	WT58/59	1M ~ 25MHz	64K ~ 192KB	8K ~ 12KB
其它家族 (4bit)				
通泰 Tontek	TTR/TTU/TTT	910K ~ 4MHz	1K ~ 4KB	54B ~ 384B
其它家族 (8bit)				
祐華 Alpha	AM8EC (OPT)	14K ~ 16MHz	1K ~ 4KB	64B ~ 256B
義隆 Elan	EM78 (OTP)	16K ~ 4MHz	1.6K ~ 15KB	32B ~ 656B
	EM88	16K ~ 32MHz	2K ~ 24KB	112B ~ 1072B
凌通 Generalplus	GPM61 (MASK/OTP)	4M ~ 8MHz	16K ~ 128KB	64B ~ 512B
	GPM81	16MHz	18K ~ 128KB	256B
盛群 Holtek	HT46R (OTP)	8M ~ 12MHz	1KB ~ 8KB	32B ~ 384B
	HT48F	400K ~ 12MHz	1K ~ 4KB	64B ~ 160B
	HT66F/68F	4M ~ 16MHz	0.5K ~ 64KB	16B ~ 4KB
紘康 Hycon	HY1x	12K ~ 16MHz	2K ~ 8KB	128B ~ 640B
新唐 NuvoTon	KM101E	20MHz	32K ~ 928KB	1K ~ 10KB
	KM101L	10MHz	64KB	2K ~ 16KB
九齊 Nyquest	NY8A/B (OTP)	20MHz	1K ~ 2KB	96B ~ 128B
	NY8L (65C02)		4K ~ 128KB	64B ~ 128B
應廣 Padauk	PMS/PMC (OTP)	32K ~ 8MHz	0.5K ~ 4KB	64B ~ 256B
	PFS/PFC	32K ~ 4MHz	2K ~ 3KB	128B ~ 256B
松翰 Sonix	SN8F2	16K ~ 16MHz	4K ~ 64KB	128B ~ 6KB
	SN8Px (OTP)	32K ~ 16MHz	1K ~ 24KB	48B ~ 512B
其它家族 (16bit)				
金麗科 RDC	R88/R11 (80C186)	25M ~ 80MHz	512KB	?
其它家族 (32bit)				
祐華 Alpha	AM32A0 (OTP)	14MHz	32K ~ 2MB	4K ~ 8KB
	AM32A1/B2	32K ~ 54MHz	32K ~ 64KB	4K ~ 16KB
新唐 NuvoTon	KM103	10MHz	64K ~ 512KB	4K ~ 64KB
金麗科 RDC	HB301/R86	100M ~ 300MHz	4M ~ 16MB	128M ~ 256MB (DDR2 外掛)
混合型 MCU				
凌陽 Sunplus	SP7021 (Arm Cortex-A7*4 + Arm 926 + 8051)	1 GHz (CA7) 202MHz(926) 202MHz(8051)	0KB (NOR, NAND Flash 外掛)	512KB(SRAM)+ 128MB/512MB (DDR3)

指令位元數：
4/8/16/32 bit

MCU 家族：

8051

Arm Cortex-M

- ◆ Cortex-M0
- ◆ Cortex-M0+
- ◆ Cortex-M3
- ◆ Cortex-M4
- ◆ Cortex-M7
- ◆ Cortex-M23
- ◆ Cortex-M55
- ◆ Cortex-M33

RISC-V

Others.

資料來源：<https://omnixri.blogspot.com/2021/09/aiottinymcui.html>

arm Cortex-M 以STM32為例

MCU選用

- 用途
- 電壓
- 功耗
- 引腳數
- 算力
- 程式碼
- 記憶體
- 無線能力

High Performance	STM32F0			STM32F7	STM32H7	STM32N6
	398 CoreMark 120 MHz Cortex-M3	608 CoreMark 180 MHz Cortex-M4	Up to 1023 CoreMark 250 MHz Cortex-M33	1082 CoreMark 216 MHz Cortex-M7	Up to 3224 CoreMark Up to 600 MHz Cortex-M7 240 MHz Cortex-M4	3360 CoreMark 800 MHz Cortex-M55
Mainstream	STM32C0	STM32G0	STM32G4			Optimized for mixed-signal applications
	114 CoreMark 48 MHz Cortex-M0+	142 CoreMark 64 MHz Cortex-M0+	106 CoreMark 48 MHz Cortex-M0	177 CoreMark 72 MHz Cortex-M3	245 CoreMark 72 MHz Cortex-M4	
Ultra-low-power	STM32L0	STM32U0	STM32L4	STM32L4+	STM32U5	STM32U3
	75 CoreMark 32 MHz Cortex-M0+	140 CoreMark 56 MHz Cortex-M0+	273 CoreMark 80 MHz Cortex-M4	409 CoreMark 120 MHz Cortex-M4	651 CoreMark 160 MHz Cortex-M33	393 CoreMark 96 MHz Cortex-M33
Wireless	STM32WL			STM32WB	STM32WBA	
	162 CoreMark 48 MHz Cortex-M4 48 MHz Cortex-M0+	156 CoreMark 64 MHz Cortex-M0+	219 CoreMark 64 MHz Cortex-M4 32 MHz Cortex-M0+	407 CoreMark 100 MHz Cortex-M33		

Cortex-M0

48MHz

Cortex-M0+

32MHz ~ 64MHz

Cortex-M3

72MHz ~ 120MHz

Cortex-M4/M4F

48MHz ~ 240MHz

Cortex-M7

216MHz ~ 600MHz

Cortex-M55

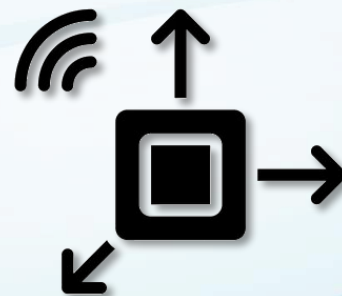
800MHz

Cortex-M33

96MHz ~ 250MHz

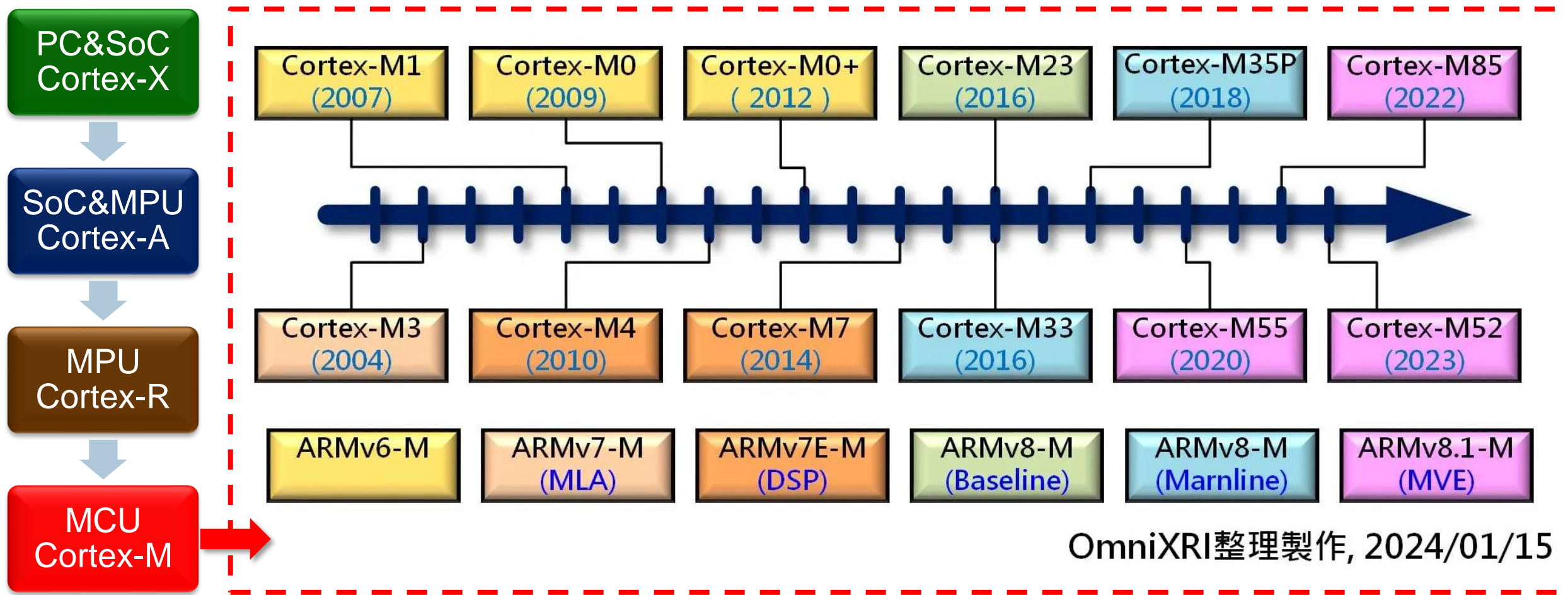
75~3360 CoreMark/MHz

資料來源：<https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus.html>



2.2. arm Cortex-M演進

常見 Arm 晶片CPU等級及指令集



資料來源：<https://omnixri.blogspot.com/2024/01/vmaker-edge-ai-13-npuai.html>

arm Cortex-M 指令比較表 (1/2)

哈佛 /
馮紐曼
架構

Arm Core	Cortex M0 ^[17]	Cortex M0+ ^[18]	Cortex M1 ^[19]	Cortex M3 ^[20]	Cortex M4 ^[21]	Cortex M7 ^[22]	Cortex M23 ^[23]	Cortex M33 ^[24]	Cortex M35P	Cortex M52 ^[25]	Cortex M55 ^[26]	Cortex M85 ^[27]
ARM architecture	ARMv6-M ^[14]	ARMv6-M ^[14]	ARMv6-M ^[14]	ARMv7-M ^[15]	ARMv7E-M ^[15]	ARMv7E-M ^[15]	ARMv8-M Baseline ^[30]	ARMv8-M Mainline ^[30]	ARMv8-M Mainline ^[30]	Arm v8.1-M Mainline ^[30]	Arm v8.1-M Mainline ^[30]	Arm v8.1-M Mainline ^[30]
Computer architecture	Von Neumann	Von Neumann	Von Neumann	Harvard	Harvard	Harvard	Von Neumann	Harvard	Harvard	Harvard	Harvard	Harvard
Instruction pipeline	3 stages	2 stages	3 stages	3 stages	3 stages	6 stages	2 stages	3 stages	3 stages	4 stages	4-5 stages	7 stages
Interrupt latency (zero wait state memory)	16 cycles	15 cycles	23 for NMI, 26 for IRQ	12 cycles	12 cycles	12 cycles, 14 worst case	15 cycles, 24 secure to NS IRQ	12 cycles, 21 secure to NS IRQ	TBD	TBD	TBD	TBD
Thumb-1 instructions	Most	Most	Most	Entire	Entire	Entire	Most	Entire	Entire	Entire	Entire	Entire
Thumb-2 instructions	Some	Some	Some	Entire	Entire	Entire	Some	Entire	Entire	Entire	Entire	Entire
Multiply instructions 32×32 = 32-bit result	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes

資料來源：https://en.wikipedia.org/wiki/ARM_Cortex-M

arm Cortex-M 指令比較表 (2/2)

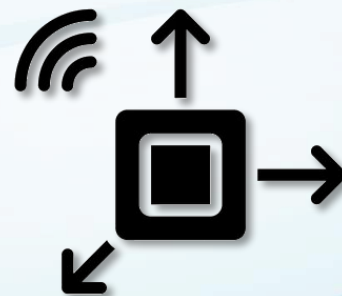
Arm Core	Cortex M0 ^[17]	Cortex M0+ ^[18]	Cortex M1 ^[19]	Cortex M3 ^[20]	Cortex M4 ^[21]	Cortex M7 ^[22]	Cortex M23 ^[23]	Cortex M33 ^[24]	Cortex M35P	Cortex M52 ^[25]	Cortex M55 ^[26]	Cortex M85 ^[27]
Divide instructions 32/32 = 32-bit quotient	No	No	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Saturated math instructions	No	No	No	Some	Yes	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
DSP instructions	No	No	No	No	Yes	Yes	No	Optional	Optional	Yes	Yes	Yes
Half-Precision (HP) floating-point instructions	No	No	No	No	No	No	No	No	No	Optional	Optional	Optional
Single-Precision (SP) floating-point instructions	No	No	No	No	Optional	Optional	No	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional
Double-Precision (DP) floating-point instructions	No	No	No	No	No	Optional	No	No	No	Optional	Optional	Optional
Helium vector instructions	No	No	No	No	No	No	No	No	No	Optional	Optional	Optional
TrustZone security	No	No	No	No	No	No	Optional	Optional	Optional	Optional	Optional	Yes

DSP

浮點計算

Helium (MVE)

資料來源：https://en.wikipedia.org/wiki/ARM_Cortex-M



2.3. 基本週邊控制

RP2040 資料手冊



手冊內容 (共642頁)

1. Introduction
2. System Description
3. PIO
4. Peripherals
5. Electrical and Mechanical

RP 2 0 4 0

樹莓派簡稱, **2**核心. **M0+**
2⁴x16 KB SRAM, **0**KB
Flash

主要功能

- 雙核心 Cortex-M0+ @133MHz
- 264KB SRAM (64Kx4 + 4Kx2)
- 無 Flash, 可支援最大16MB QSPI 外部 Flash
- 30 GPIO, 其中包含類比輸入 x4, PWM x16
- 周邊設備可支援 UART x2, SPI x2, I2C x2, USB 1.1 x1, PIO x8

資料來源 : <https://datasheets.raspberrypi.com/rp2040/rp2040-datasheet.pdf>



工作電壓及電壓轉換 (Level Shift)

單晶片常見工作電壓

Ex. 5V, 3.3V, 1.8V

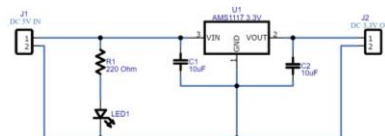
電壓調節 (降壓、升壓)

Ex. 9V → 3.3V, 3.7 → 5V

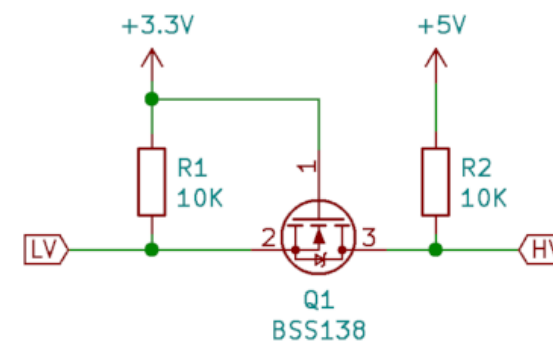
數位邏輯高低電位定義

TTL		CMOS
$V_{OH} = 2.4V$		$V_{OH} = 0.95V_{DD}$
$V_{IH} = 2.0V$	V_{NH}	$V_{IH} = 0.7V_{DD}$
$V_{IL} = 0.8V$		$V_{IL} = 0.3V_{DD}$
$V_{OL} = 0.4V$	V_{NL}	$V_{OL} = 0.1V_{DD}$

AMS1117 Voltage Regulator 5V to 3.3V



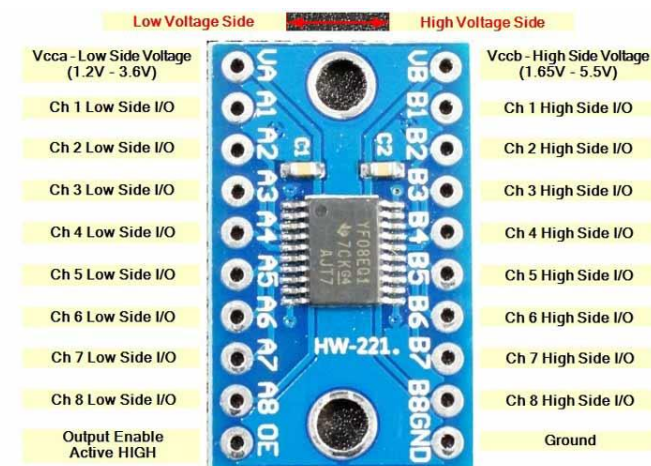
電壓調節器 (Regulator / LDO)



單MOSFET電壓位準轉換

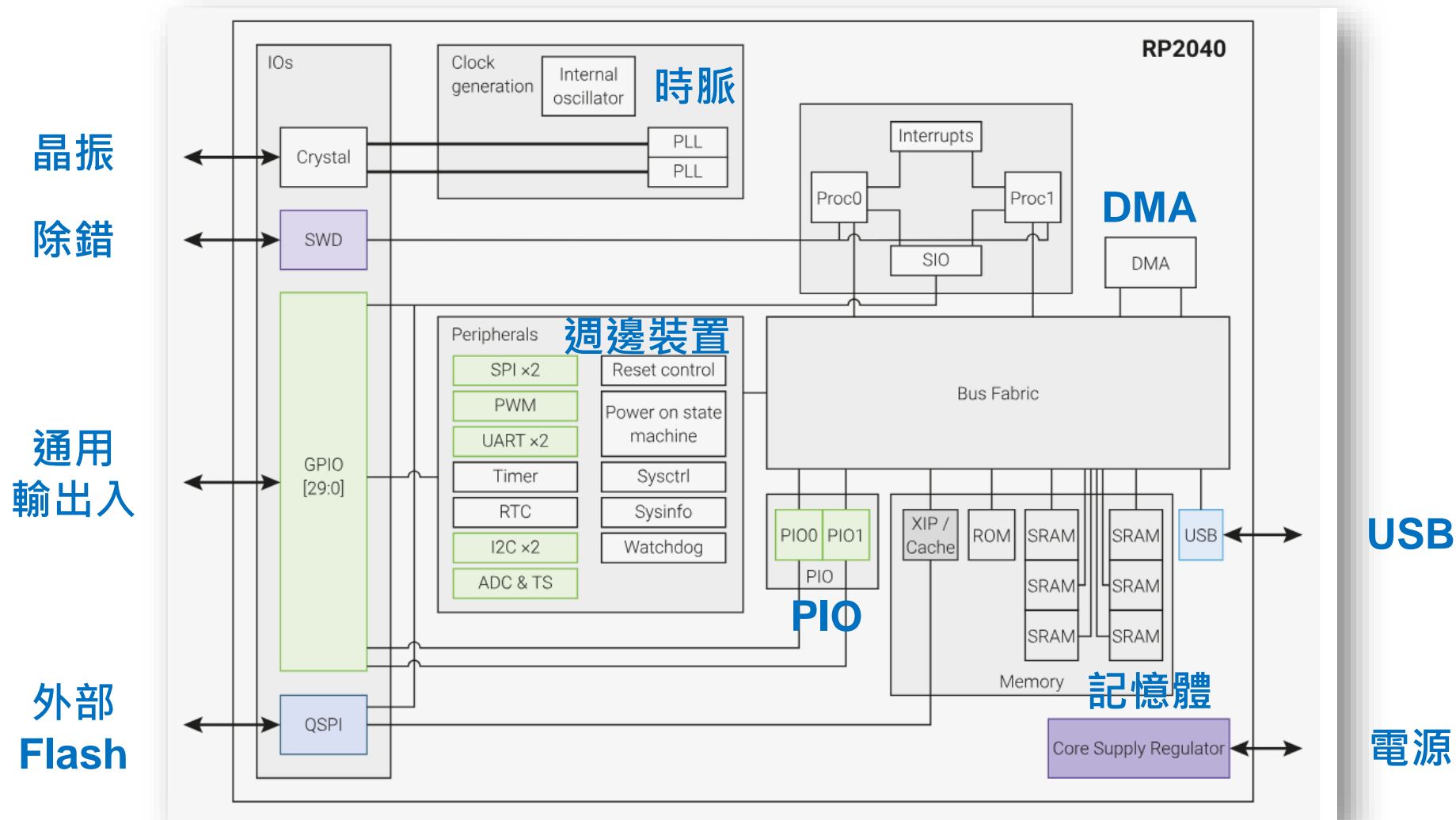
使用電壓調節器要注意輸出電流能力以免不正常重置

不同裝置連結要注意邏輯電壓以免誤動作或電路損毀



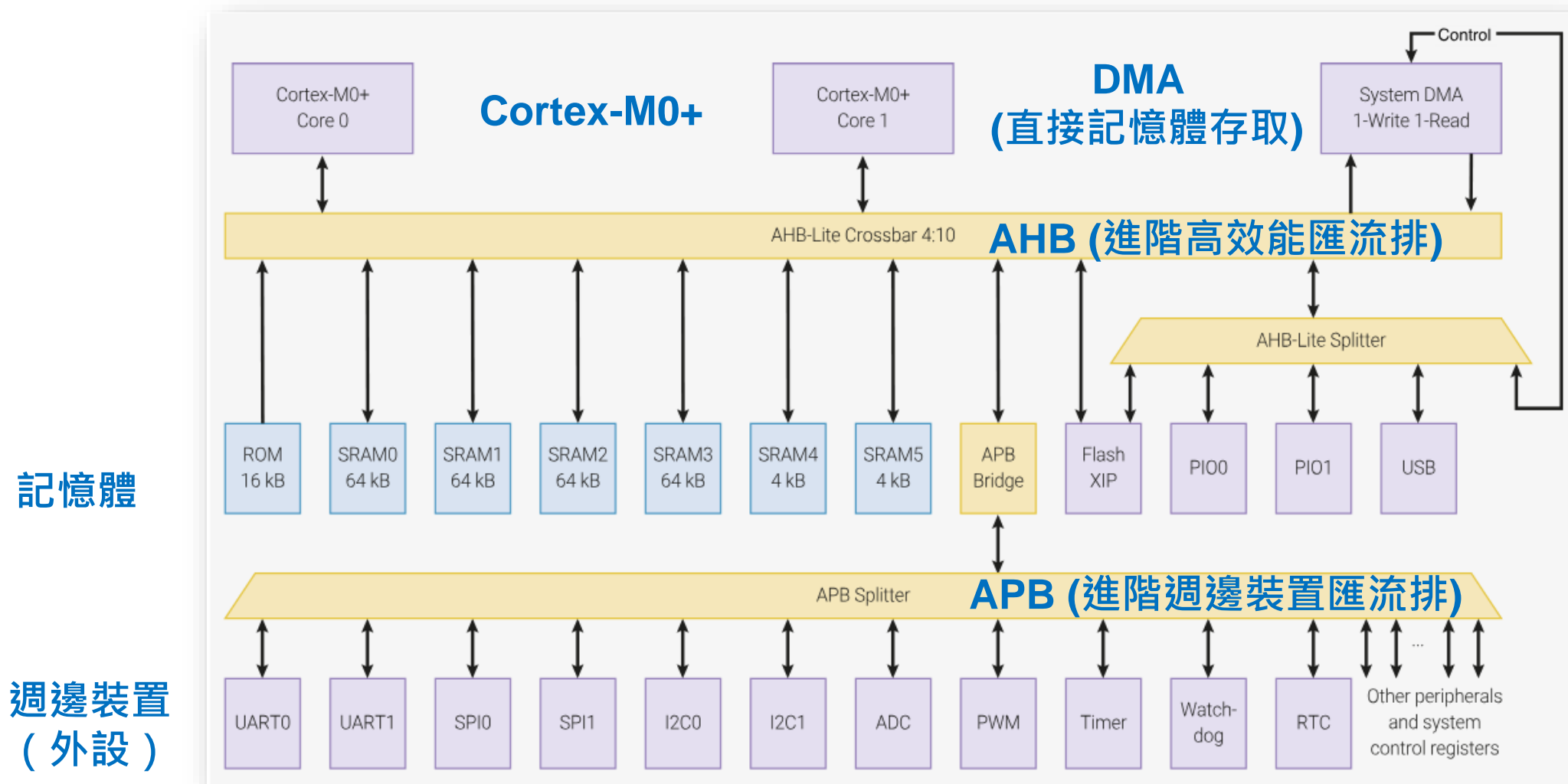
八通道電壓位準轉換IC

RP2040 方塊圖



資料來源：<https://datasheets.raspberrypi.com/rp2040/rp2040-datasheet.pdf>

RP2040 匯流排及週邊



資料來源：<https://datasheets.raspberrypi.com/rp2040/rp2040-datasheet.pdf>

RP2040 位址配置

ROM	唯讀記憶體	0x00000000
XIP	晶片內執行	0x10000000
SRAM	靜態記憶體	0x20000000
APB Peripherals		0x40000000
AHB-Lite Peripherals		0x50000000
IOPORT Registers		0xd0000000
Cortex-M0+ internal registers		0xe0000000

APB Peripherals (週邊裝置)

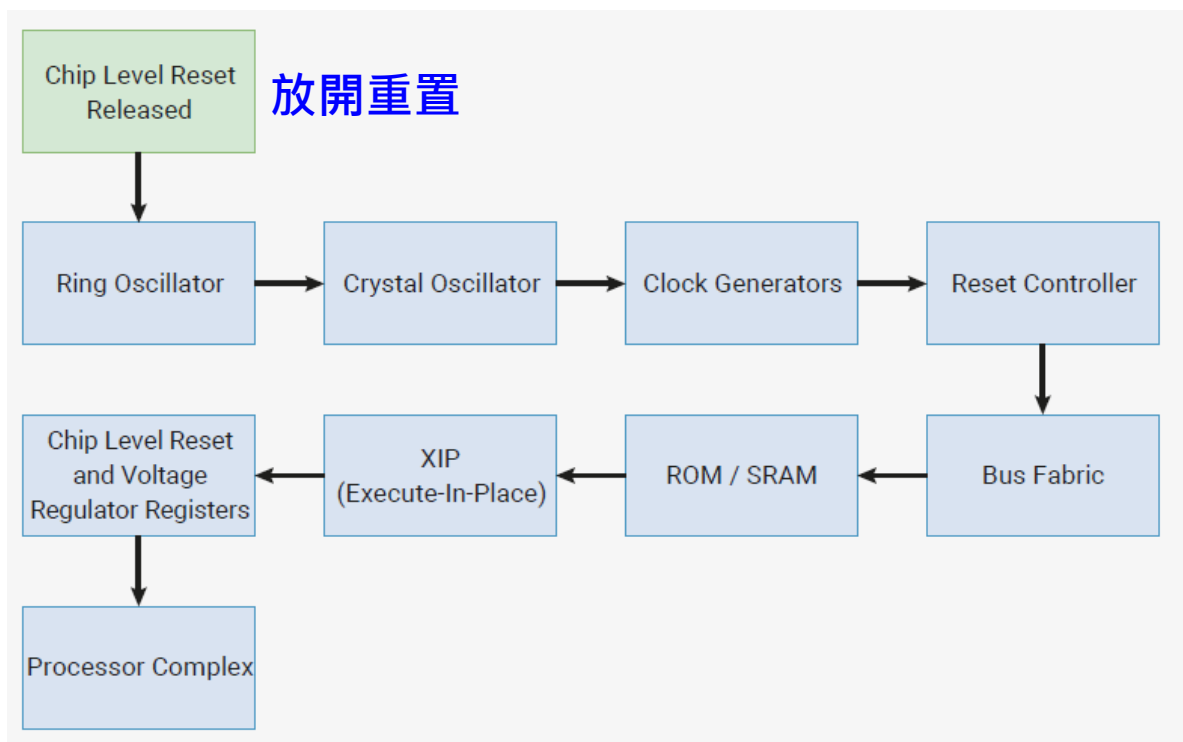
SYSINFO_BASE	0x40000000	BUSCTRL_BASE	0x40030000
SYSCFG_BASE	0x40004000	UART0_BASE	0x40034000
CLOCKS_BASE	0x40008000	UART1_BASE	0x40038000
RESETS_BASE	0x4000c000	SPI0_BASE	0x4003c000
PSM_BASE	0x40010000	SPI1_BASE	0x40040000
IO_BANK0_BASE	0x40014000	I2C0_BASE	0x40044000
IO_QSPI_BASE	0x40018000	I2C1_BASE	0x40048000
PADS_BANK0_BASE	0x4001c000	ADC_BASE	0x4004c000
PADS_QSPI_BASE	0x40020000	PWM_BASE	0x40050000
XOSC_BASE	0x40024000	TIMER_BASE	0x40054000
PLL_SYS_BASE	0x40028000	WATCHDOG_BASE	0x40058000
PLL_USB_BASE	0x4002c000	RTC_BASE	0x4005c000

Cortex-M0+ 採馮紐曼 (馮諾依曼) 架構
優點是程式和數據匯流排共用電路較簡單，
缺點是無法同時存取指令和讀寫數據。

資料來源：<https://datasheets.raspberrypi.com/rp2040/rp2040-datasheet.pdf>

系統啟動及工作模式

系統啟動流程



工作（睡眠）模式

- **正常模式：（全速工作）**
約數十 mA（取決於時脈和工作負載）。
- **低頻模式：（不需喚醒直接升頻）**
數 mA（取決於頻率）。
- **待機模式：（事件觸發喚醒）**
低至數百 μA （時脈仍在運行）。
- **休眠模式：（外部喚醒）**
低至數十 μA （僅 XOSC 或漏電流）。

RAM 和暫存器狀態在休眠模式下可能不保留，需額外處理數據保存。
喚醒後可能需要重新初始化部分外設。

資料來源：<https://datasheets.raspberrypi.com/rp2040/rp2040-datasheet.pdf>

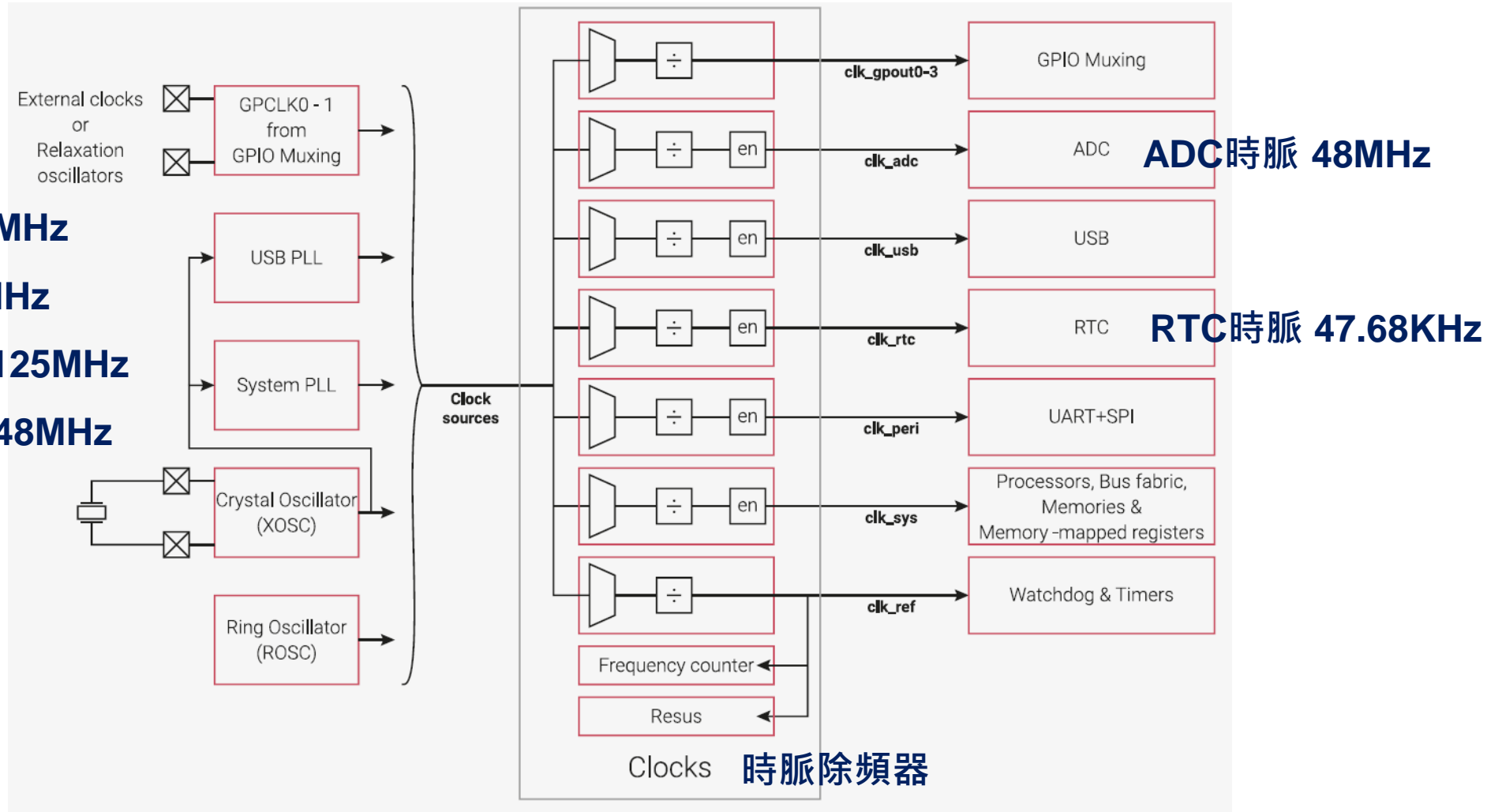
工作時脈 (Clock)

外部晶振 XOSC 12MHz

內部晶振 ROSC 6MHz

系統鎖相迴路 PLL 125MHz

USB鎖相迴路 PLL 48MHz



資料來源：<https://datasheets.raspberrypi.com/rp2040/rp2040-datasheet.pdf>

計時器 (Timer) 與實時時鐘(RTC)

計時器 (Timer)

- 一組基於clk_sys(125MHz)除頻的64位元計數器，可達微秒級。
- 四組32位元警報暫存器產生中斷
- 用途：
 - 精準延遲
 - 執行週期性任務
 - 記錄時間戳記
- 限制：
 - 無法停止或重置，警報僅限低32位元，需軟體處理高位，休眠模式禁用。

實時時鐘(Real Time Clock)

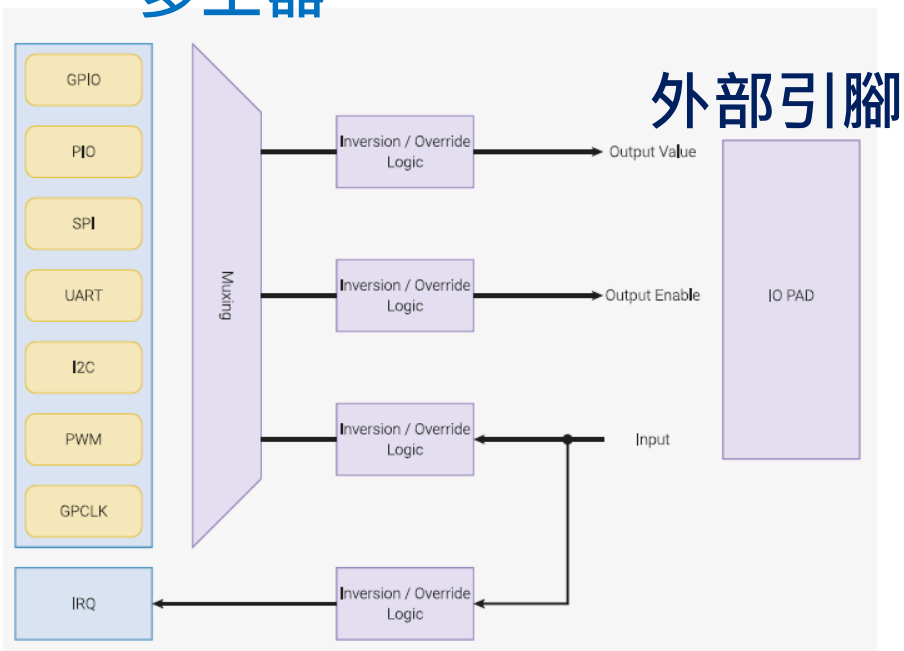
- 一組基於XOSC除頻而得的RTC，預設為clk_rtc(47.68 kHz)，以秒為單位。
- 功能：
 - 提供年、月、日、時、分、秒的計時。
 - 支持警報功能（匹配特定日期時間觸發中斷）。
 - 可在低功耗模式下運行。
- 限制：
 - 會受晶片溫度影響漂移。
 - 斷電後需重新設定時間。

資料來源：<https://datasheets.raspberrypi.com/rp2040/rp2040-datasheet.pdf>

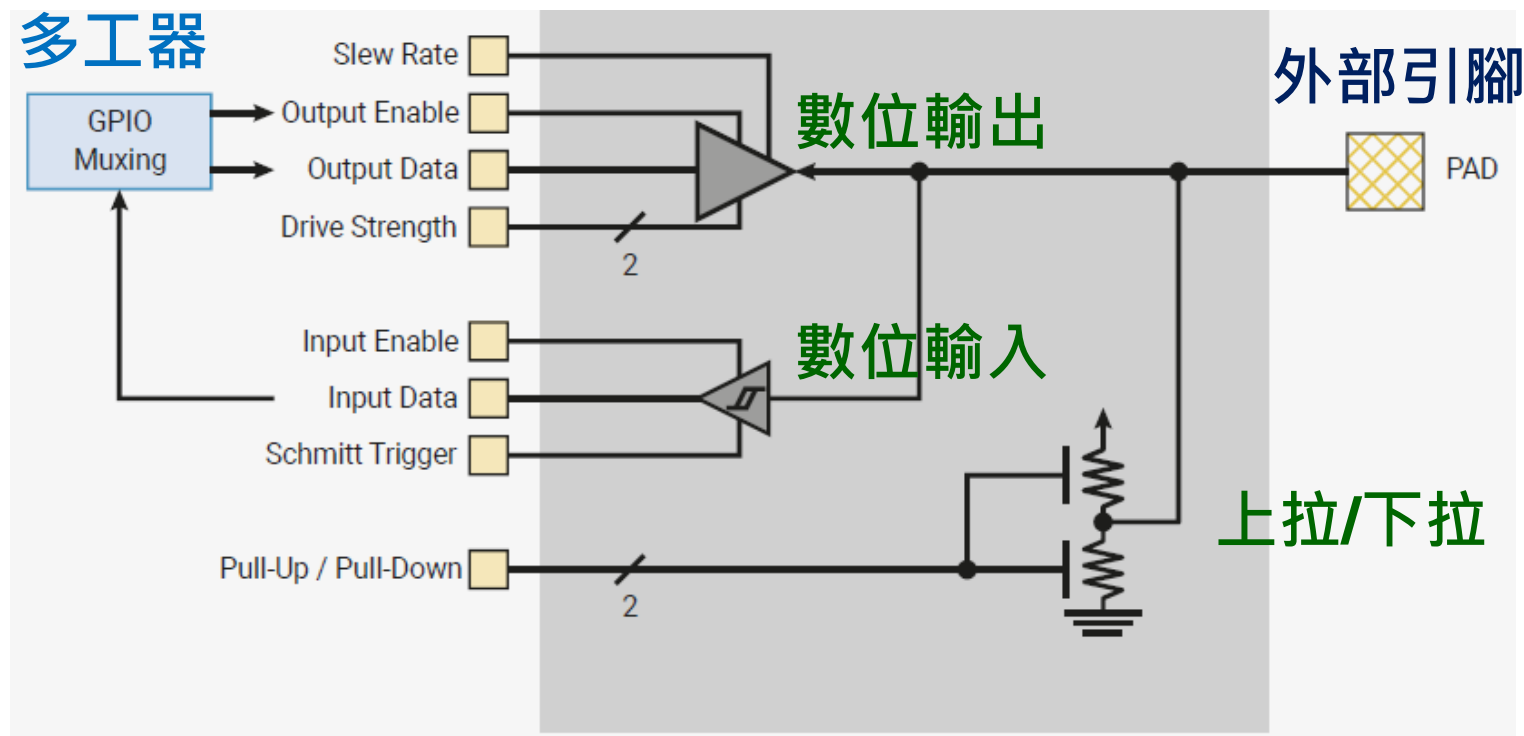
基本輸出入 (GPIO) — 數位輸出入 (DIO)

外部引腳大多共用使用**多工器**進行切切換，包含**GPIO**, PIO, SPI, UART, I2C, PWM, GPCLK等週邊裝置。

多工器



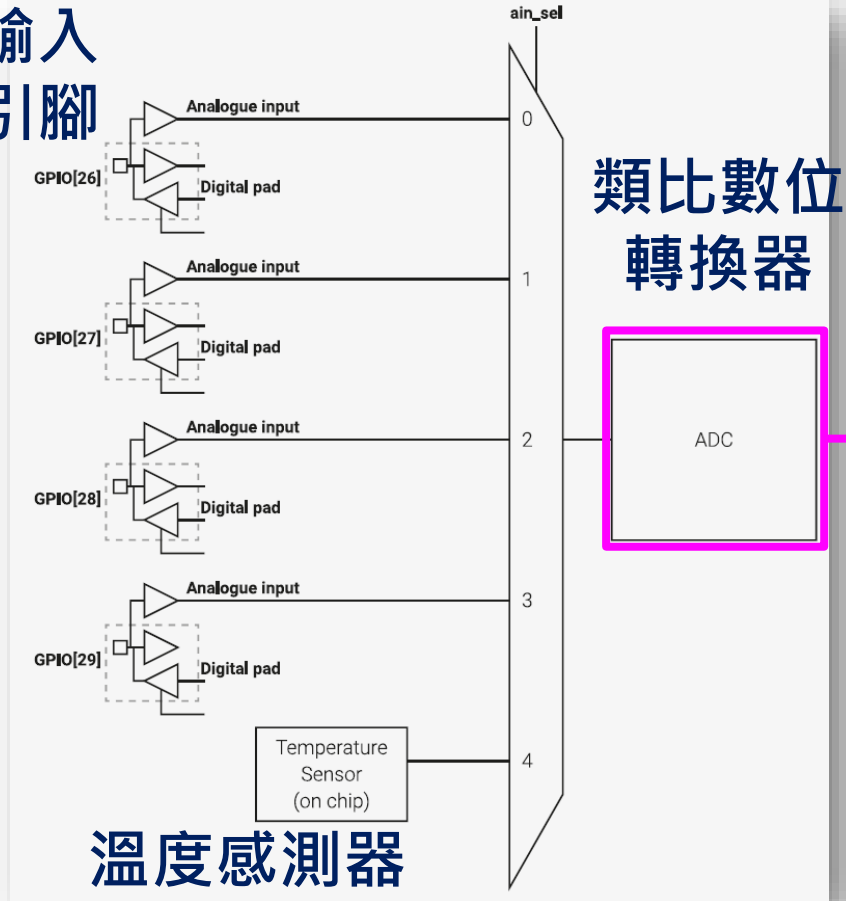
多工器



資料來源：<https://datasheets.raspberrypi.com/rp2040/rp2040-datasheet.pdf>

基本輸出入 (GPIO) — 類比輸入 (ADC)

類比輸入 外部引腳

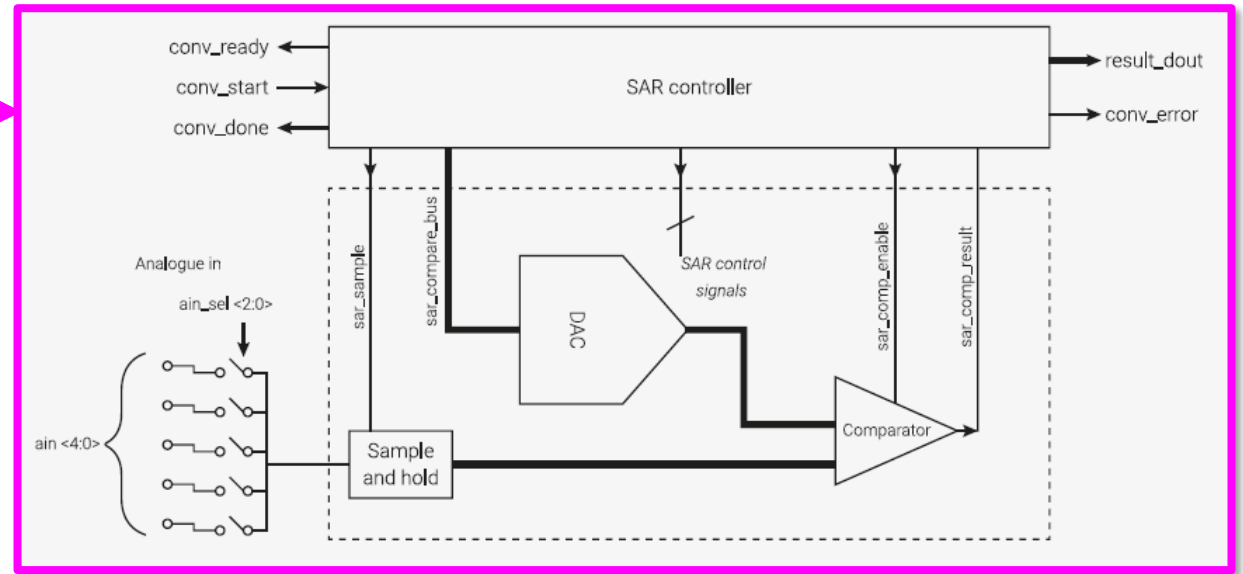


溫度感測器

可依不同解析度(Bit) 來決定類比電壓分辨率。如設為10bit 即將類比參考電壓分割為1024階 (2的10次方)。

循續漸近式類比數位轉換器 SAR ADC

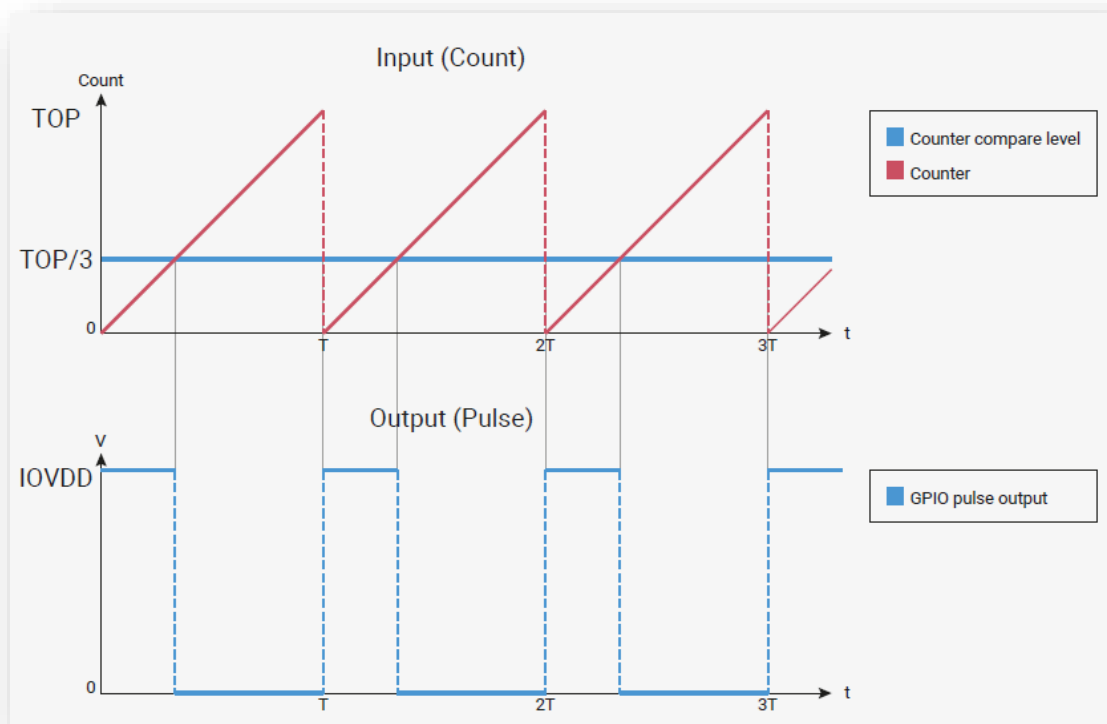
(Successive Approximation Register Analogue to Digital Converter)



資料來源：<https://datasheets.raspberrypi.com/rp2040/rp2040-datasheet.pdf>

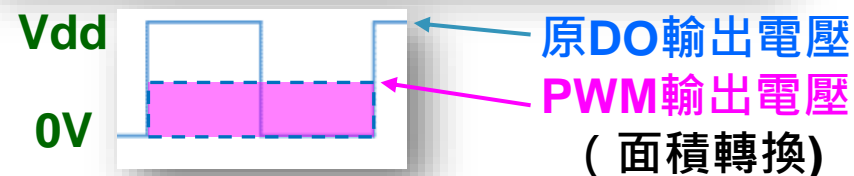
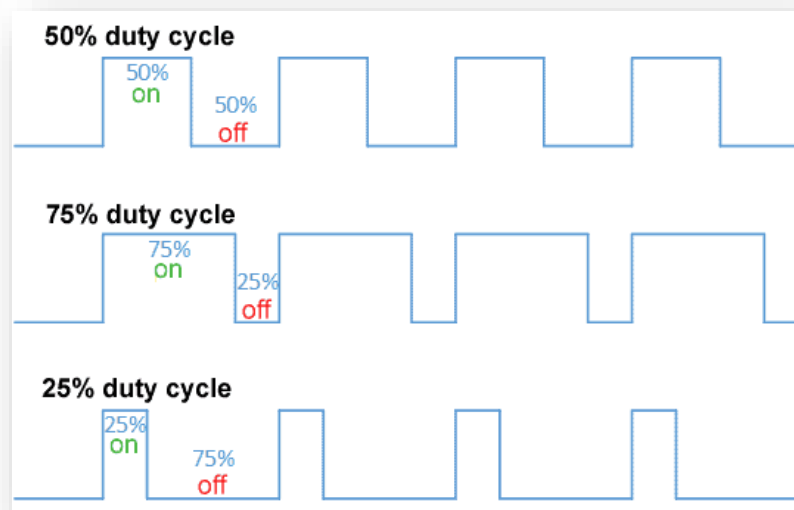
基本輸出入 (GPIO) — 類比輸出 (PWM)

通常MCU沒有數位類比轉換器(Digital to Analog Converter, DAC)，通常會使用數位數出腳位加上脈波寬度調變(Pulse Width Modulation, PWM)來代替類比輸出腳位，相當於用計數器加指定觸發值來完成。



資料來源：<https://datasheets.raspberrypi.com/rp2040/rp2040-datasheet.pdf>

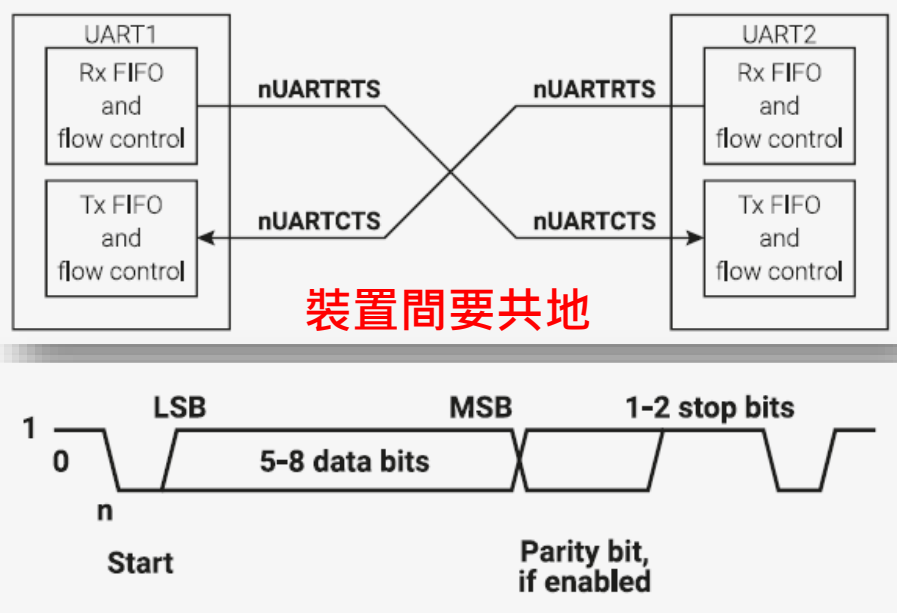
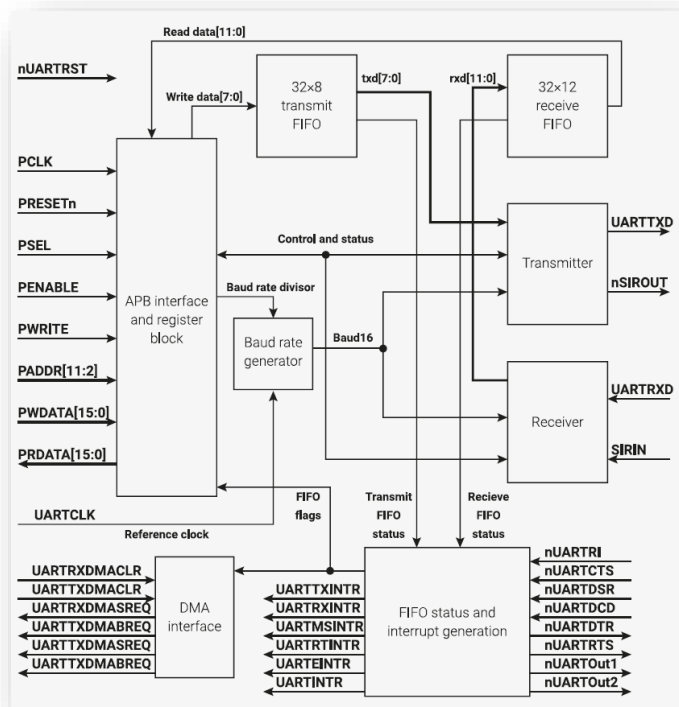
設定工作週期及頻率



串列通訊 (UART / COM)

通用非同步收發傳輸器 (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter · UART)

傳統電腦RS232接口俗稱**COM Port**，即使用UART規格進行通訊，+12V為高電位，-12V為低電位。一般MCU使用5V或3.3V為高電位，0V為低電位。不同裝置通訊要注意電壓規格以免燒毀電路。



使用前雙方要定好通訊速度，**鮑率(Baud Rate)**，否則無法正確收發資料。常見速度 9600, 19200, 38400, 115200 bps

啟始位元(1位元),
資料位元(5~8位元),
同位元(0~1位元),
停止位(1 / 1.5 / 2 位元)

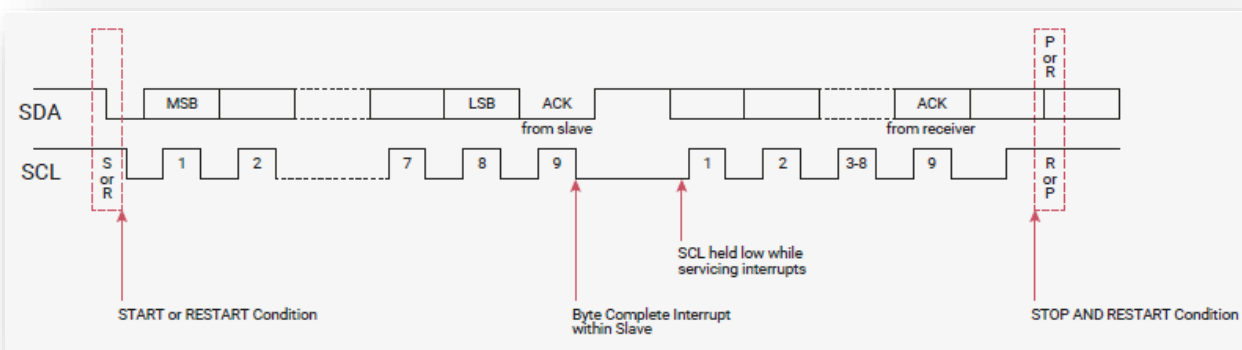
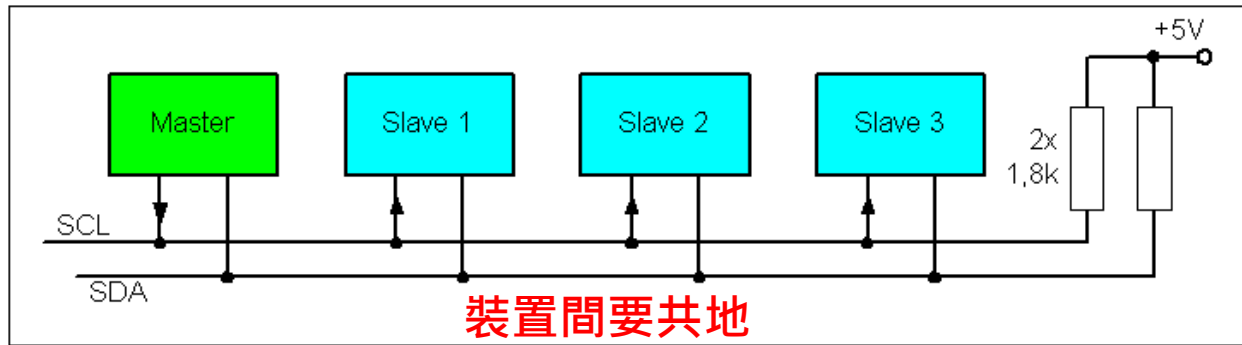
常見設定 N,8,1 即為無同位元, 8位元資料, 1位元停止位元。

資料來源：<https://datasheets.raspberrypi.com/rp2040/rp2040-datasheet.pdf>

匯流排通訊 (IIC / I²C / I2C)

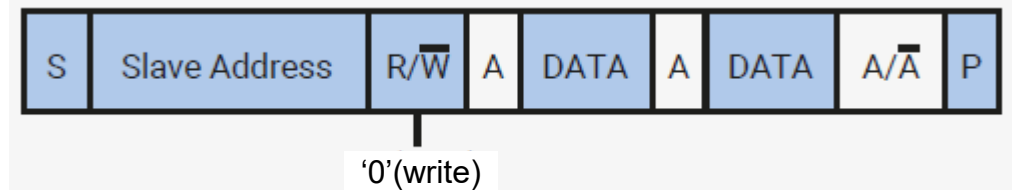
積體匯流排 (Inter-Integrated Circuit) 可稱為 IIC / I2C / I2C

透過時脈(SCL)及資料(SDA)兩條線即可將多個裝置並聯在一起進行控制。在最末端要加上拉電阻。通常MCU為主，裝置為從，常見裝置如感測器、小尺寸顯示器等。

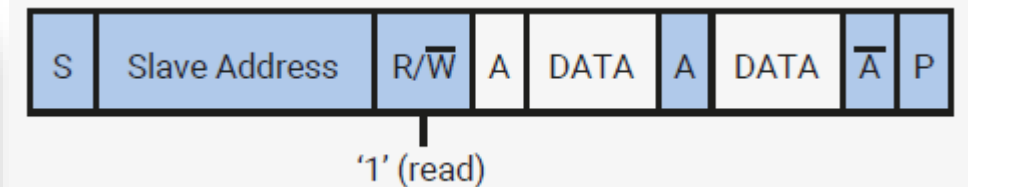


資料來源：<https://datasheets.raspberrypi.com/rp2040/rp2040-datasheet.pdf>

主發送，從接收 (7bit 位址)



主接收，從發送 (7bit 位址)



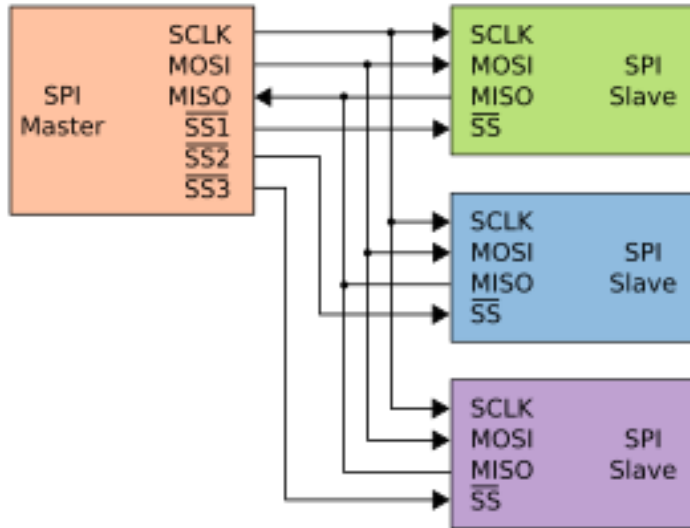
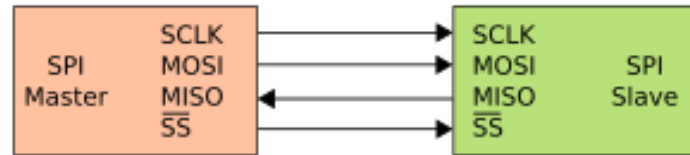
- From Master to Slave
- From Slave to Master
- A = Acknowledge (SDA low)
- \bar{A} = No Acknowledge (SDA high)
- S = START Condition
- P = STOP Condition

I2C 時脈頻率，標準模式 $\leq 100\text{KHz}$ ，
快速模式 $\leq 400\text{KHz}$ ，增強模式 $\leq 1\text{MHz}$ 。

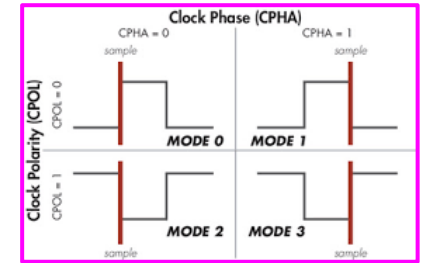
串列週邊介面 (SPI)

串列週邊(外設)介面 (Serial Peripheral Interface Bus, SPI)

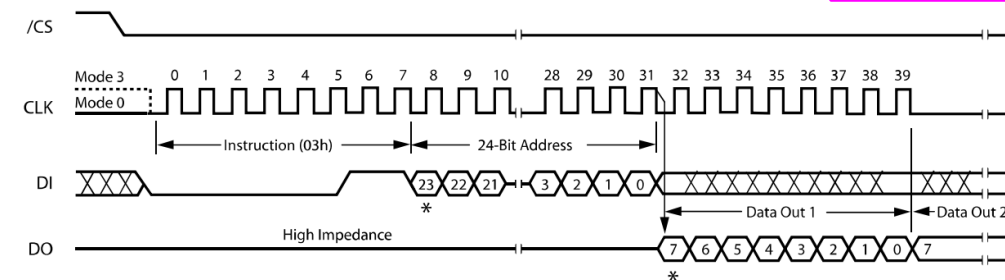
可於不同裝置間傳送資料，多個裝置時要安排多個選擇線(SS)來決定資料流向，MOSI 及 MISO 相當於 UART Tx & Rx。搭配不同的時脈邊緣設定可增加傳送方式彈性。



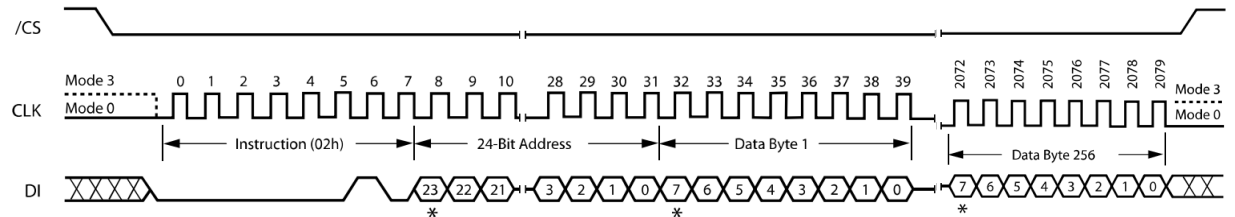
Winbond W25Q32
Serial Flash
SPI 80MHz, DSPI 160MHz, QSPI 320MHz



Read Data (03h)



Page Program (02h)



資料來源：<https://datasheets.raspberrypi.com/rp2040/rp2040-datasheet.pdf>

直接記憶體存取 (DMA)

直接記憶體存取 (Direct Memory Access)

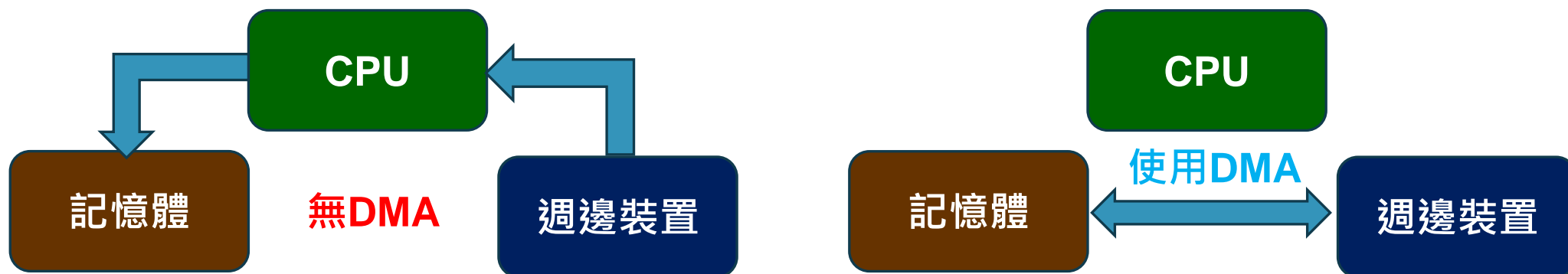
1. 高效數據傳輸
2. 周邊數據採集及數據輸出
4. 週期性任務觸發
5. 雙緩衝與連續傳輸
6. 記憶體初始化

優勢：

降低 CPU 負載，提高吞吐量及靈活性。

限制：

配置複雜，資源競爭，無內建錯誤檢測。



看門狗 (Watchdog)

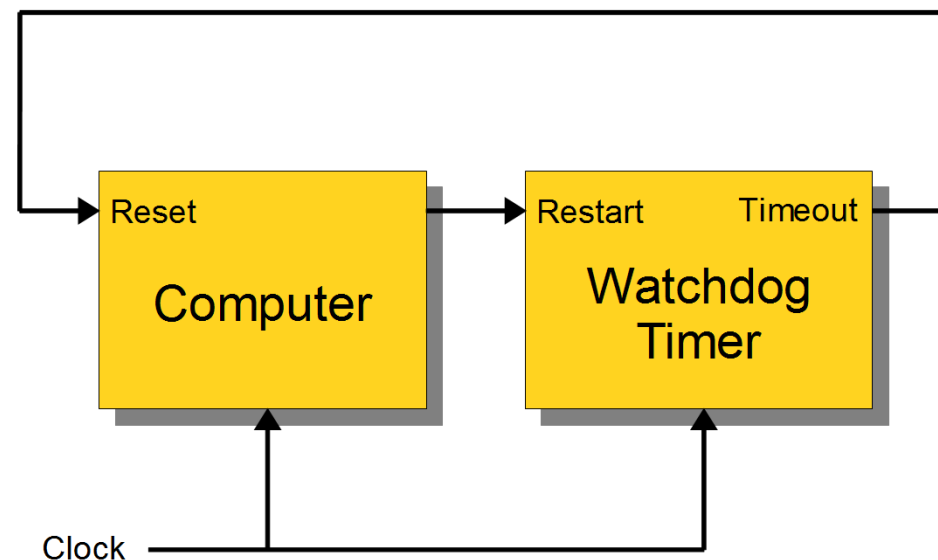
看門狗 (Watchdog) 計時器

主要功能：

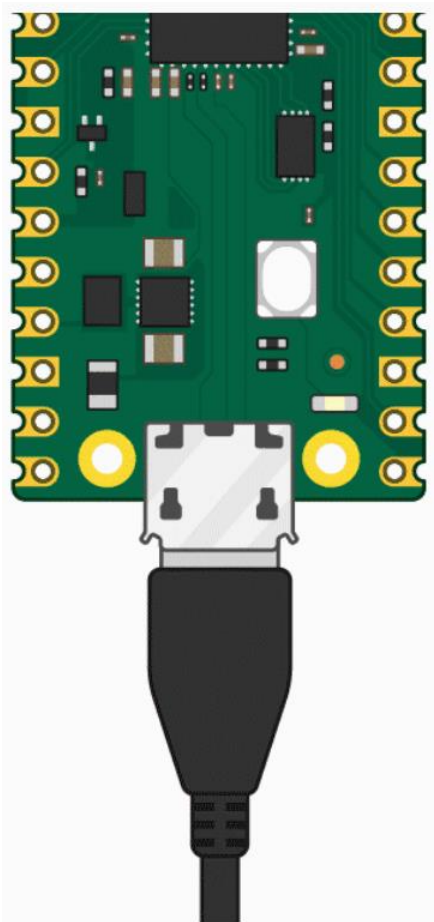
1. 系統異常恢復
2. 防止程式卡死
3. 定時重啟

工作方式：

1. 啟動看門狗（設定計時器）
2. 定時餵狗（重置計時器）
3. 檢查重啟原因



USB & Virtual COM

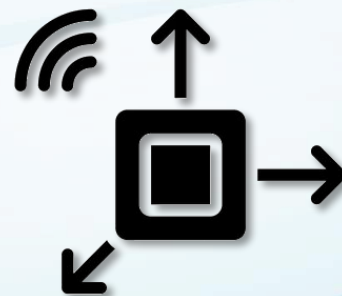


當插入USB時提供

- 開發板工作電源 +5V
- 虛擬通訊埠(COM)
 - 上傳已編譯程式
 - 收發資料

Windows COM埠監視器

- PuTTY
- AccessPort
- 串口調試助手
- Arduino IDE
- VSCode IDE



2.4. 即時作業系統


MCU 即時作業系統

為什麼需要？

- 任務管理與多工處理
- 資源管理
 - 處理RAM, Flash, 週邊裝置的分配、中斷避免衝突。
- 即時性需求
- 開發效率及移植性
- 模組化與維護

Real Time Operation System
RTOS 即時作業系統

常見即時作業系統

- **Bare-metal (裸機, 無作業系統)**
- FreeRTOS 
- MBED OS
(2024被arm放生) 
- Zephyr 
- uC/OS, Azure RTOS, micro-ROS ...

FreeRTOS



(2003 首次發佈)

arm

MIPS

RISC-V

intel

<https://www.freertos.org/>

支援多種MCU包括：
arm, Atmel, PIC, NXP, TI, Freescale, Cypress, STM, Renesas, Xilinx ...

- **特點**：開源、輕量級、即時作業系統，廣泛應用於嵌入式開發。
- **優勢**：佔用資源少（幾 KB 的 Flash 和 RAM），
支持優先級搶占調度，社群活躍且有豐富的文件。
- **應用**：物聯網設備、消費性電子、感測器節點。
- **支援**：幾乎所有 Cortex-M 系列（M0、M3、M4、M7 等）。

Mbed OS



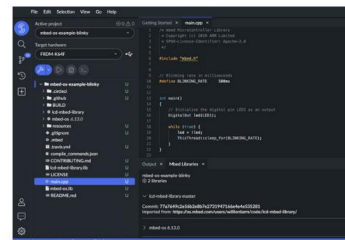
(2009/9 首次發佈)

**2024年7月 arm 放生 Mbed
改由開源社群維護，2026年
7月後不再提供線上服務。**

<https://os.mbed.com/>

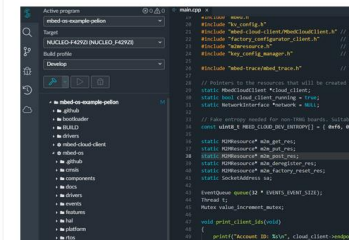
Keil Studio Cloud

The easiest way to get started.



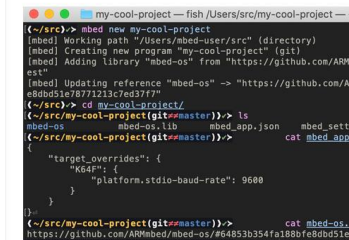
Mbed Studio

The desktop IDE for Mbed OS.



Mbed CLI

The command line tool for Mbed OS.



- **特點**：ARM 官方開發的開源 RTOS，專為 IoT 設備設計。
- **優勢**：整合了豐富的庫（如網路、安全功能），開發工具友好，適合快速原型設計。
- **應用**：智慧設備、IoT 節點。
- **支援**：Cortex-M 系列，特別針對 ARM 生態優化。

Zephyr



2024年7月 arm 放生 Mbed
改支持Zephyr , Arduino 隨
之跟進。

<https://www.zephyrproject.org/>

支援超過750種開發板



- 特點：開源 RTOS，由 Linux 基金會支持，專為資源受限設備設計。
- 優勢：模組化設計，支持多種通訊協定（如 Bluetooth、Thread），適合現代聯網設備。
- 應用：穿戴式設備、智慧家居、工業 IoT。
- 支援：arm Cortex M / R / A (部份)，並有良好的工具鏈整合。

參考文獻

- 許哲豪，臺灣科技大學資訊工程系「人工智慧與邊緣運算實務」（2021~2023）

<https://omnixri.blogspot.com/p/ntust-edge-ai.html>

- 許哲豪，OmniXRI's Edge AI & TinyML 小學堂 Youtube 直播課程總結

<https://omnixri.blogspot.com/2024/06/omnixris-edge-ai-tinyml-youtube.html>

- WIKI, ARM Cortex-M（中文）

https://zh.wikipedia.org/zh-tw/ARM_Cortex-M

- Raspberry Pi, RP2040 Datasheet

<https://datasheets.raspberrypi.com/rp2040/rp2040-datasheet.pdf>

延伸閱讀

- arm, Cortex-M & Ethos-U55 ML開發者指南

<https://omnixri.blogspot.com/2025/02/arm-cortex-m-ethos-u55-ml.html>

- 許哲豪，【vMaker Edge AI專欄 #13】誰說單晶片沒有神經網路加速器NPU就不能玩微型AI應用？

<https://omnixri.blogspot.com/2024/01/vmaker-edge-ai-13-npuai.html>

- 許哲豪，MCU攜手NPU讓tinyML邁向新里程碑

<https://omnixri.blogspot.com/2022/10/mcunputinyml.html>

- 許哲豪，當智慧物聯網(AIoT)遇上微型機器學習(tinyML)是否會成為台灣單晶片(MCU)供應鏈下一個新商機！？

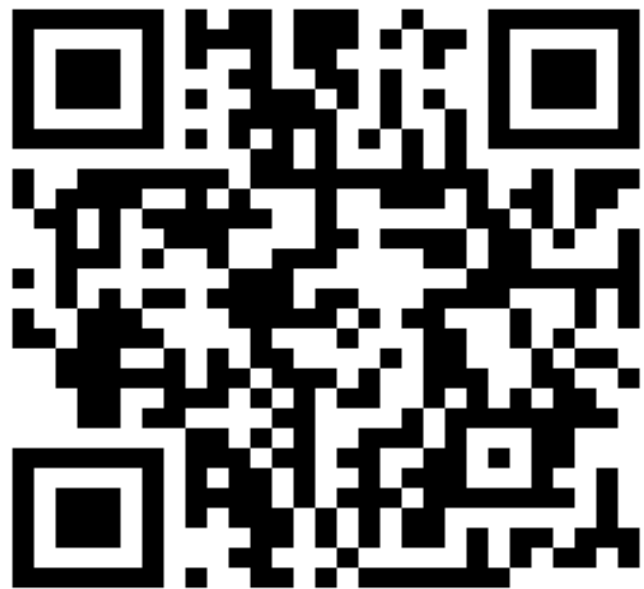
<https://omnixri.blogspot.com/2021/09/aiottinymlmcu.html>

沒有最邊



只有更邊

歡迎加入
邊緣人俱樂部



歐尼克斯實境互動工作室
(OmniXRI Studio)

許哲豪 (Jack Hsu)

Facebook : Jack Omnixri

FB社團 : Edge AI Taiwan邊緣智能交流區

電子信箱 : omnixri@gmail.com

部落格 : <https://omnixri.blogspot.tw>

開 源 : <https://github.com/OmniXRI>

YOUTUBE 直播 : <https://www.youtube.com/@omnixri1784/streams>