



EtherCAT 步進/伺服驅動器基礎原理與應用評估

一、基本概念

1.1 定義與起源

EtherCAT (Ethernet for Control Automation Technology) 是由德國 Beckhoff 自動化公司於 2003 年開發，並已成為 IEC 61158 國際標準的工業乙太網通訊協定。其核心設計目標是在標準乙太網實體層上，實現極高速度、極低延遲與精確同步的即時控制。

1.2 核心運作原理：飛讀飛寫 (Processing on the Fly)

與傳統乙太網「每個節點接收完整封包後再轉發」不同，EtherCAT 採用獨特的「**飛讀飛寫**」機制：

- **主站 (Master)** 發出一個包含所有從站資料的標準乙太網幀
- **主站/從站架構**：網路中僅有一個主站 (Master)，通常為工業電腦或 PLC；其餘皆為從站 (Slave)，如驅動器、I/O 模組。
- **全雙工通訊**：資料框通過最末端節點後，會透過物理層的回環 (Loop-back) 返回主站。主站收到後即可獲得所有從站的回應。
- 資料幀依序通過每個**從站 (Slave)**時，從站內的專用晶片 (ESC, EtherCAT Slave Controller) 在**硬體層級**即時提取 (讀取) 或嵌入 (寫入) 屬於自己的資料，延遲僅約 $1 \mu s$
- 資料幀繼續流向下一個節點，最終返回主站

這種機制使得 100 Mbps 的頻寬有效利用率超過 90%，遠高於傳統 TCP/IP 網路。

1.3 網路架構特點

特性	說明
拓樸彈性	支援線型、樹型、星型、混合型，甚至環型 (邏輯環)
單主架構	一個網段僅允許一個主站，從站不主動發送資料
分散式時脈 (DC)	所有從站可透過硬體時脈同步，抖動 (Jitter) $< 1 \mu s$
協定整合	內建 CoE (CANopen over EtherCAT)、FoE (檔案傳輸)、EoE (標準乙太網通道) 等

1.4 資料傳輸模式

- PDO (Process Data Object)：週期性即時資料，用於控制命令與狀態回饋
- SDO (Service Data Object)：非週期性參數配置，用於參數讀寫與診斷

二、主要評估：步進驅動與伺服驅動器應用

EtherCAT 在運動控制領域最廣泛的應用即為**步進驅動器**與**伺服驅動器**，
兩者在應用特性上有所差異。

2.1 步進驅動器 (Stepper Drive) 應用

應用特性

- 步進系統多為**開環或簡易閉環**控制，對即時性的絕對要求低於伺服系統
- 通常用於中低速、中低精度、力矩要求較小的場合（如點膠、送料、定位平台）

EtherCAT 帶來的價值

面向	效益
多軸協調	透過 EtherCAT 可輕鬆實現數十軸的同步啟停與插補運動
佈線簡化	傳統脈衝/方向 (Pulse/Direction) 需大量配線，EtherCAT 僅需一條網路線串接
參數化管理	可透過 SDO 遠端修改電流、細分、加減速曲線等參數
狀態監測	可回報過熱、過載、失步等狀態至主站

評估注意事項:

- 成本考量：步進驅動器本身價格低廉，加入 EtherCAT 通訊介面 (ESC 晶片 + 連接器) 會顯著提高單軸成本。因此 EtherCAT 步進驅動器較適合軸數多、佈線困難的場合，而非單軸簡易應用。
- 效能天花板：步進馬達的機械特性限制了其動態響應，無法完全發揮 EtherCAT 的微秒級同步優勢。

2.2 伺服驅動器（Servo Drive）應用

- 伺服系統為高性能閉環控制，需要高頻寬、低延遲、低抖動的命令更新
- 廣泛應用於 CNC、機械手臂、電子凸輪、飛剪追剪等高動態場合

EtherCAT 帶來的價值：

面向	效益
高頻寬控制	控制週期可達 $125\ \mu\text{s} \sim 1\ \text{ms}$ ，滿足高響應伺服環路需求
精確同步	分散式時脈（DC）可確保所有軸在同一時刻取樣與輸出，多軸同步誤差 $< 100\ \text{ns}$
標準化行規	普遍遵循 CiA 402 行規，提供 CSP（週期同步位置）、CSV（週期同步速度）、CST（週期同步轉矩）等標準模式，不同廠牌驅動器可互換
整合診斷	可即時回傳位置、速度、轉矩、負載率、警報代碼，甚至支援驅動器內建示波器功能

評估注意事項

- **主站效能要求：**高動態多軸伺服應用需要高性能 EtherCAT 主站（如工業 PC + 專用網卡，或專用運動控制器），主站運算負擔較大。
- **電纜品質：**雖然使用標準乙太網線，但工業環境需使用遮蔽式工業級跳線（Cat5e/Cat6），並注意接地與彎折半徑。

2.3 兩者比較總結

比較項目	步進驅動器	伺服驅動器
控制模式	開環 / 簡易閉環	高性能全閉環
即時性需求	中等（ms 級可接受）	極高（ μs 級同步）
多軸同步效益	中（簡化佈線為主）	極高（精密插補必須）
成本敏感度	高（EtherCAT 介面佔比大）	中（EtherCAT 介面佔比相對低）
CiA 402 支援	基本模式（PP, PV）	完整模式（CSP, CSV, CST, HM 等）
適用場景	輸送、定位、簡易龍門	CNC、機器人、電子齒輪、飛剪

- 結論：伺服驅動器更能充分發揮 EtherCAT 的極限性能；

步進驅動器則在「多軸簡易運動 + 佈線簡化」場景下具有導入價值。

三、優缺點分析

3.1 EtherCAT 核心優勢

優勢	說明
極高傳輸效率	有效資料率 > 90%，遠勝傳統乙太網的 ~30-40%
極低通訊延遲	100 個節點的網路掃描週期可低於 100 μ s
硬體級同步	分散式時脈無需主站介入即可達次微秒級同步
拓樸自由	不受傳統乙太網星型拓樸限制，可任意串接分支
開放標準	協定規格公開，多家晶片商提供 ESC（如 Beckhoff、瑞薩、TI、Microchip）
協定整合度高	單一網路可同時傳輸即時控制資料、參數配置、甚至標準 IP 流量（EoE）

3.2 EtherCAT 主要限制

限制	說明
單主架構	一個網段僅能有一個主站，主站故障則整個網段癱瘓，無法像 PROFINET 實現控制器冗餘
主站複雜度高	主站需精確管理通訊週期與分散式時脈，通常需要專用軟體（如 TwinCAT、SOEM、IGH EtherLab）或硬體加速
從站硬體成本	每個從站必須內建 ESC 晶片，無法像 Modbus TCP 直接使用標準乙太網晶片
配置複雜	需使用 ESI（EtherCAT Slave Information）XML 檔案描述從站，初始配置門檻較高
診斷工具依賴	網路問題診斷常需專用工具（如 EtherCAT 網路分析儀），一般乙太網 Sniffer 難以解析

3.3 與其它工業 Bus 比較

BUS 類型	通訊速度	即時性	同步精度	拓樸彈性	開放性	適用評估
EtherCAT	100 Mbps	極高	$< 1 \mu s$	極高 (任意)	高	高性能多軸運動控制首選
Modbus RTU	115.2 kbps	低	無	線型	極高	簡易監控，已逐漸淘汰於運動控制
Modbus TCP	100 Mbps	低	無	星型	極高	設備監控、I/O 讀寫，不適合伺服閉環
CANopen	1 Mbps	中	$\sim 1 ms$	線型	高	中低速運動控制， 成本敏感場合仍常用
PROFIBUS DP	12 Mbps	高	$\sim 1 ms$	線型	中 (西門子 主導)	傳統工廠自動化，新專案逐漸被乙太網取代
PROFINET IRT	100 Mbps	極高	$< 1 \mu s$	中	中	與 EtherCAT 性能相當 但較封閉，常見於西門子生態系
SERCOS III	100 Mbps	極高	$< 1 \mu s$	環型	高	運動控制專用， 性能與 EtherCAT 相當， 但市佔率較低
Mechatrolink-III	100 Mbps	極高	$< 1 \mu s$	線型	低 (安川主 導)	安川伺服專用 BUS， 封閉性高

3.4 選型建議

- 若為全新高階運動控制專案（CNC、機器人）：EtherCAT 是性價比最高的開放式選擇，生態系完整，驅動器選擇多元。
- 若現場已為西門子 S7-1500 且大量使用 PROFINET 設備：可考慮 PROFINET IRT 以維持一致性，避免混用BUS。
- 若為極低成本、低速簡易應用：CANopen 或脈衝控制仍具成本優勢。
- 若為安川伺服單一品牌系統：Mechatrolink-III 可達到最佳整合度，但犧牲開放性。

四、總結

EtherCAT 憑藉其「飛讀飛寫」的獨特架構，在工業乙太網領域建立了**高速度、低延遲、精同步**的技術標竿。在運動控制應用中：

- **伺服驅動器**是 EtherCAT 最能發揮價值的戰場，透過 CiA 402 行規與分散式時脈，可實現真正的分散式高精度多軸控制。
- **步進驅動器**導入 EtherCAT 的主要價值在於**簡化佈線與多軸管理**，而非追求極致動態性能，需權衡通訊介面帶來的成本增幅。

相較於其它BUS，EtherCAT 的優勢在於**開放性與極致性能的平衡**，缺點則是**單主架構的可靠性限制與相對複雜的初始配置**。對於追求高性能且希望避免單一廠商綁定的自動化專案，EtherCAT 仍是當前最具競爭力的選擇之一。