

逢甲大學學生報告 ePaper

基於數位孿生的積體電路生產線模擬與智慧控制技術

研究報告

Research Report on Digital Twin-Based Simulation and Intelligent Control Technology for Integrated Circuit Production Lines

作者：李韋宏 吳令堯 林昀儒

系級：自控三乙 自控三乙 自控三乙

學號：D1155099 D1153539 D1170899

開課老師：陳志成

課程名稱：機電元件模擬

開課系所：自動控制工程學系

開課學年：113 學年度 第 1 學期



中文摘要

本研究針對積體電路 (IC) 生產線，結合數位孿生技術與智慧控制策略進行模擬與優化，以應對工業 4.0 與智慧製造快速發展下的挑戰，包括生產流程複雜、設備整合困難、製程控制精度不足，以及產品客製化需求提升等問題。本研究利用 CIROS 軟體與 PLC 梯形圖語言模擬與控制生產線的關鍵製程環節，包括進料分類檢測、翻轉搬運、加工、切割、瑕疵檢測與儲存作業，以期提升生產效率、降低成本並優化資源利用。

研究過程中，設計並建立了包含六個站點的模擬生產線，包括進料分類檢測站、翻轉站、加工站、切割站、瑕疵檢測站與儲料站。透過虛擬生產線的設計，精確模擬實際生產環境，並利用 PLC 程式實現設備協同作業、即時數據監控與製程參數優化，顯著提升產品良率與整體生產效能。模擬結果顯示整體生產線運行流暢，並通過穩定性與負載測試，驗證系統的可靠性與彈性。

實驗結果結果，基於 CIROS 軟體構建的生產線模擬系統在智慧控制策略的輔助下，可實現穩定且高效的運作。數位孿生技術與智慧控制策略的導入，能有效提升生產效率，降低能源消耗與資源浪費，同時具有良好的擴展性與靈活性。本研究不僅驗證了數位孿生技術在積體電路生產線應用中的可行性，亦為智慧製造提供了重要參考。

線模擬中的有效性，亦展示了智慧控制策略對生產流程優化的影響，未來也可擴展應用於其他產業的製造領域。

關鍵字：生產線模擬、數位孿生、積體電路、CIROS

Abstract

This study focuses on the simulation and optimization of integrated circuit (IC) production lines by incorporating digital twin technology and intelligent control strategies. In the context of rapid advancements in Industry 4.0 and smart manufacturing, traditional IC production lines face challenges such as complex production processes, difficulties in equipment integration, insufficient precision in process control, and increasing demand for product customization. Utilizing CIROS software and PLC ladder logic programming, this research simulates and controls key stages of the IC production line, including material classification and inspection, flipping and transportation, processing, cutting, defect detection, and storage operations, with the aim of enhancing production efficiency, reducing costs, and optimizing resource utilization.

A virtual production line comprising six simulation stations—material classification and inspection, flipping, processing, cutting, defect detection, and storage—was designed and implemented to accurately replicate real-world production environments. Intelligent control strategies were programmed using PLCs to enable equipment collaboration, real-time data monitoring, and process parameter optimization, thereby improving product yield and overall production performance. Simulation results demonstrated smooth operation of the production line, with stability and load testing verifying the system's reliability and flexibility.

The experimental results indicate that the production line simulation system developed using CIROS software, supported by intelligent control strategies, can achieve stable and efficient operation. The integration of digital twin technology and intelligent control strategies effectively improves production efficiency, reduces energy consumption and resource waste, and offers excellent scalability and flexibility. This study not only validates the feasibility of applying digital twin technology in IC production lines but also provides valuable insights for advancing smart manufacturing.

Keyword : CIROS, Digital Twin, Integrated Circuit (IC), Production Line Simulation

目錄

中文摘要.....	1
Abstract.....	2
目錄.....	3
第一章 緒論.....	5
1.1 研究背景與動機.....	5
1.1.1 數位孿生技術的發展概述.....	5
1.1.2 積體電路生產線的複雜性與挑戰.....	5
1.1.3 數位孿生在積體電路生產線中的應用前景.....	6
1.2 研究目的與意義.....	7
1.2.1 提升生產線模擬的精確度與效率.....	7
1.2.2 優化智慧控制策略以提高生產品質與降低成本.....	7
1.2.3 為積體電路產業的數位化轉型提供技術支撐.....	7
第二章 文獻回顧與理論基礎.....	8
2.1 數位孿生技術概述.....	8
2.1.1 數位孿生的定義與核心要素.....	8
2.1.2 數位孿生的技術架構與實現機制.....	8
2.2 積體電路生產線模擬技術.....	9
2.2.1 生產線模擬的關鍵技術與方法.....	9
2.2.2 數位孿生在生產線模擬中的應用案例分析.....	9
2.3 智慧控制技術基礎.....	10
2.3.1 智慧控制的理論框架與算法類型.....	10
2.3.2 數位孿生與智慧控制的融合機制.....	11
第三章 研究方法與步驟.....	12
3.1 系統架構.....	12
3.2 軟體與相關技術說明.....	13
3.2.1 CIROS 軟體模擬技術.....	13
3.2.2 GX WORKS2 程式設計.....	14
3.3 生產線模擬環境.....	15
3.3.1 Separating Station.....	15
3.3.2 氣壓迴轉模組.....	16
3.3.3 Processing Station.....	17
3.3.4 蓋印缸鑽孔模組.....	19
3.3.5 Testing Station.....	20

3.3.6 Store Work Cell.....	21
第四章 實驗與結果分析.....	23
4.1 生產線模擬結果.....	23
4.2 生產線穩定性分析.....	23
4.3 綜合結果討論.....	24
第五章 結論與展望.....	25
5.1 研究成果總結.....	25
5.1.1 生產線模擬與智慧控制的技術突破.....	25
5.1.2 研究對積體電路產業的貢獻.....	25
5.2 研究局限與不足.....	25
5.2.1 研究過程中的問題與挑戰.....	25
5.2.2 現有技術與方法的局限性.....	26
5.3 未來研究方向與建議.....	26
5.3.1 結合人工智慧與大數據分析.....	26
5.3.2 強化異常處理與容錯設計.....	26
5.3.3 系統整合與跨領域應用.....	26
參考文獻.....	28



第一章 緒論

1.1 研究背景與動機

1.1.1 數位孿生技術的發展概述

隨著工業 4.0 與智慧製造的快速發展，數位孿生（Digital Twin, DT）技術逐漸成為製造業數位轉型的關鍵技術。數位孿生技術透過虛擬模型與物理設備的即時數據互聯，實現對製造過程的模擬、監控與優化。該技術結合物聯網、人工智慧與大數據分析等先進技術，能有效提升製程靈活性、降低生產成本與提升產品品質。

自 2010 年起，隨著感測技術與運算能力的進步，數位孿生已廣泛應用於航空、汽車、能源等產業，並逐步擴展至高科技製造領域。這些應用不僅提升了生產效率，更強化了企業的市場競爭力，其數位孿生技術的演變如圖 1 所示。

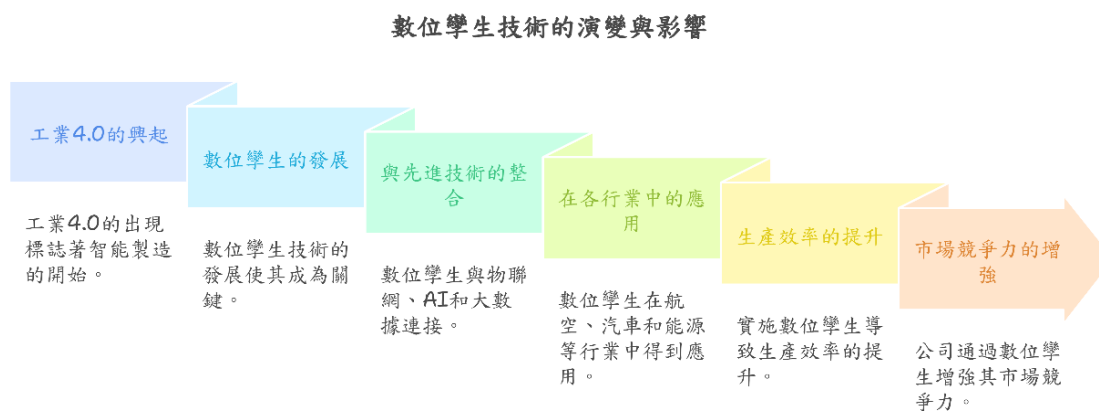


圖 1. 數位孿生技術的演變圖

1.1.2 積體電路生產線的複雜性與挑戰

積體電路（Integrated Circuit, IC）產業是高技術密集與資本密集的產業，涵蓋設計、製造、封裝與測試等多個複雜環節。隨著製程技術邁向更小的製程節點，製造過程中的設備整合、製程控制與品質管理的挑戰日益增加。

IC 生產線需整合大量精密設備與自動化系統，涉及數以千計的製程參數調整與即時數據監控。任何微小的設備異常或製程偏差，都可能對產品良率與生產效率造成嚴重影響。此外，產品生命周期縮短與客製化需求增加，亦使得 IC 生產線需具備更高的柔性與應變能力，如圖 2 所示。

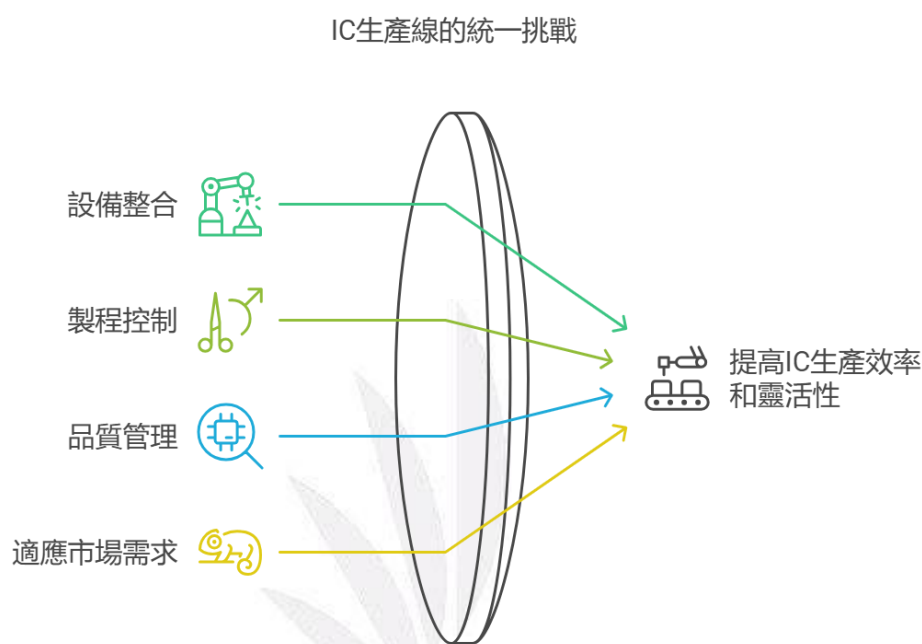


圖 2. IC 生產線的統一挑戰圖

1.1.3 數位孿生在積體電路生產線中的應用前景

將數位孿生技術應用於積體電路生產線，可透過虛擬模型即時反映實際生產狀況，達到製程優化與設備預測維護的目的，並且可在設計階段進行製程模擬與驗證，降低試產成本與風險；在生產階段，透過即時監控與數據分析，提前預測並解決潛在設備故障與製程異常，進一步提升生產效率與良率。

此外，數位孿生技術亦可支援生產線的快速重構與彈性製造，滿足市場對於多樣化與小量多樣生產的需求。未來，隨著 AI 與 IoT 技術的進一步融合，數位孿生將在積體電路生產線中發揮更大潛力，成為驅動半導體產業持續創新的重要引擎。

1.2 研究目的與意義

1.2.1 提升生產線模擬的精確度與效率

本研究旨在透過數位孿生技術與 CIROS 軟體模擬積體電路生產線，精確還原生產過程，並結合 PLC 程式進行動態控制。藉由虛擬環境進行製程模擬與驗證，有效降低試產成本與風險，同時提升模擬結果的可靠性與準確性，確保生產線運作的最佳化。

1.2.2 優化智慧控制策略以提高生產品質與降低成本

本研究將針對積體電路生產線的檢測、翻轉搬運、成品分揀與儲存等關鍵環節，運用 PLC 梯形圖語言設計智慧控制策略，實現設備協同作業與製程自動化。透過即時數據監控與優化控制邏輯，可提升生產品質、降低製造成本，並減少能源消耗與資源浪費，進一步提升生產效能。

1.2.3 為積體電路產業的數位化轉型提供技術支撐

隨著全球製造業數位化轉型趨勢，積體電路產業面臨更高的自動化與智慧化需求。本研究結合數位孿生技術與智慧控制系統，將提供積體電路生產線更靈活且高效的解決方案。透過建立虛擬生產線，支援生產規劃與流程優化，協助產業在生產效率、品質管理與能源資源運用上達成最佳化，推動整體產業升級。

第二章 文獻回顧與理論基礎

2.1 數位孿生技術概述

2.1.1 數位孿生的定義與核心要素

數位孿生 (Digital Twin, DT) 技術作為智慧製造與工業 4.0 領域中的關鍵創新，旨在透過虛擬模型全面描繪和模擬真實物體的行為與狀態。此技術整合智慧演算法與大數據分析，能有效預測並優化設備與系統運作，以增進製造效率與穩定性。Zhang 等人[1]對數位孿生技術的定義與核心要素進行了深入探討，數位孿生是一種將真實物理系統與其虛擬模型相互連結，透過即時數據交換與分析，實現雙向互動與動態優化的技術。該技術結合感測器、物聯網 (IoT) 與數據分析，能夠精準模擬與預測設備或系統的行為與狀態。其研究針對該流程中具備非線性行為、大時間延遲及多變數強耦合等特性，提出利用軟測量、流程模擬與控制優化策略，提升生產效率與智慧化水平。研究證實，透過虛擬車間與最佳化調度，能顯著降低生產中斷風險，並提升系統整體效能。Liu 與 Wang[2]針對數位孿生技術在智慧製造中的應用進行了深入研究，指出該技術透過高效數據整合與即時監控，能促進製程優化與降低營運成本。其技術能快速測試與模擬多元設計參數與變體，成功應用於智慧物流與供應鏈管理領域，並有效提升生產靈活性與資源利用效率。Chen 等人[3]則深入探討了數位孿生技術在資料整合、虛擬模型建構、網路架構設計與應用實現方面的理論基礎與發展趨勢，並指出該技術在虛擬與物理空間整合下，對工業數位轉型與智慧升級具有關鍵價值。

2.1.2 數位孿生的技術架構與實現機制

數位孿生技術的落實有賴於多層次技術架構與跨領域整合。Kim 與 Lee[4]針對數位孿生的技術架構進行了研究，提出整合虛擬與物理世界的監控系統，透過邊緣運算、數據分析與三維視覺化等技術，成功應用於韓國汽車零件製造業，並有效提升生產現場之運營效率與跨部門協作能力。Zhao 等人[5]聚焦於數位孿

生技術在可重構製造系統 (RMS) 中的架構設計，提出具體的整合框架以強化系統靈活性與效能透過系統性回顧 76 篇期刊文獻，研究證明數位孿生技術能提升 RMS 系統性能與生產效率，並建議未來研究應深化此技術整合與應用。Park[6] 深入分析了數位孿生技術於工業元宇宙中的應用，強調其在虛實整合與即時互動方面的關鍵作用，強調該技術與雲端渲染、虛擬實境互動、大數據視覺化及物聯網 (IoT) 技術的結合，能有效推動傳統製造業向智慧製造轉型，並強化工廠即時監控與營運管理效能。

2.2 積體電路生產線模擬技術

2.2.1 生產線模擬的關鍵技術與方法

Wang 等人[7]探討了基於數位孿生的智慧型絕緣閘雙極電晶體 (IGBT) 生產線之模擬與控制技術。研究中提出模組化智慧 IGBT 生產線，透過即時數據互聯降低生產成本並提升效率，並建立虛擬模型解決封裝過程中的品質問題，有效提升產量與靈活性。Lee 等人[8]提出數位孿生驅動的變體生產線設計方法，針對大規模客製化的需求，透過虛實聯動與多項關鍵技術，實現快速生產線設計與優化。實驗結果證實該方法有效提升生產效率。Chen 等人[9]設計並實施了通用型網路物理模型 (CPS)，用於優化生產線物流系統。該模型可完整模擬真實生產條件，並以數位孿生驗證優化效果，有效降低生產成本與提高效率。

Zhou 等人[10]進一步提出將人工智慧 (AI) 結合數位孿生技術來預測生產瓶頸與設備故障，透過預測性維護 (Predictive Maintenance) 有效降低停機風險並延長設備壽命。

2.2.2 數位孿生在生產線模擬中的應用案例分析

Kim 與 Lee 等人[11]探討了基於數位孿生概念的虛擬工廠 (VF) 在晶片生產線模擬與智慧控制技術中的應用。研究強調，隨著第四次工業革命的推動，製造

企業面臨產品、程序與生產系統的同步演進，需因應不斷變動的環境。數位孿生虛擬工廠作為一種整合的模擬模型，可協助製造組織在動態且複雜的環境中保持彈性。研究透過兩個不同風力發電機製造案例（包含風葉製造廠與機艙組裝線）進行展示與評估。由13位業界專家參與討論並評估數位孿生虛擬工廠的潛力，認為其在動態性、開放性、認知性與整體系統四大面向皆有顯著表現。結果顯示，數位孿生虛擬工廠可透過虛擬協作方式支援並行工程，並在虛擬原型製作上展現減少實際構建與省時的潛力。Park 等人[12]則探討數位孿生在製造系統中的應用，特別著重於晶片生產線的模擬與智慧控制技術。文章指出，工業4.0旨在提升工廠競爭力，需要具備創新的顛覆性技術來全方位改進生產流程，而非只進行局部優化。數位孿生作為一種先進的虛擬模型，能即時運行，並預測、偵測與分類工廠中正常及異常的操作條件。文章提出，自動化金字塔(Automation Pyramid, AP)是一個概念要素，可有效分配與串聯企業內的不同執行元件，從車間層到決策層。若要達到製造系統的整體進步，需使數位孿生的概念涵蓋所有自動化金字塔層級。此外，文章也介紹了一個案例研究，展示了在教學製造系統中落實數位孿生概念的過程，強調其在模組化工作站技術發展中的重要性。透過人工智慧管理系統，可在各層級間建立資訊管理的互聯互通，進一步提升工業流程的整體效率。

2.3 智慧控制技術基礎

2.3.1 智慧控制的理論框架與算法類型

Liu 與 Wang[13]探討了離散模擬、人工智慧方法與機率理論的整合，以實現生產系統的高度彈性。文章提出了智慧工廠操作的概念，包括資料交換架構、模擬建立、效能優化以及生產過程條件的預測分析。透過汽車產業中的混流車間案例，展示了數位孿生的應用。研究中開發了蟻群演算法 (ACO)，用於多標準排程問題，以實現無延遲的生產計畫並達成最大資源利用率。ACO 與免疫演算法

及遺傳演算法進行比較，結果顯示在數位孿生中實現了低計算時間的最佳排程。透過預測數位孿生中有限資源的可靠度參數，確保生產任務具備穩定的截止期限。Chen 等人[14]回顧了基於數位孿生的晶片生產線模擬與智慧控制技術，探討數位孿生與人工智慧技術在工業 4.0 中的快速發展，強調其在智慧製造與先進機器人領域的關鍵作用。總結過去五年內超過 300 篇關於 AI 驅動的數位孿生技術文獻，詳述了 AI 驅動的數位孿生在永續背景下的優勢，並討論其未來發展前景。Zhou 等人[15]探討了數位孿生基礎的遠端半實體調試方法在流程型智慧製造系統中的應用。研究開發了一個數位孿生系統以支援遠端半實體調試，並透過智慧型手機組裝線的案例進行測試與驗證。結果顯示結合開放式架構設計理念與數位孿生方法，可使新的流程型智慧製造系統調試過程更具永續性。

2.3.2 數位孿生與智慧控制的融合機制

Park 等人[16]探討了數位孿生在工業生產過程中的應用，目的在為工業企業提供可視化、分析與模擬生產過程的介面，以提升整體效能。提出了一種擴充現有數位孿生的方法論，使其可應用於過程監控。為了實施該方法論，提出了一個新框架，用於識別、收集與分析生產系統中的數據，進而增強數位孿生的功能。在案例研究中，在沉浸式環境中實作了關鍵績效指標（KPI），並透過網路呈現來監控物理過程。文章首先回顧了數位孿生的研究現況，探討近年來在數據情境化方面的議題。基於此回顧，在網路物理系統（CPS）中辨識、定位並處理效能數據，進而生成用於監控機器和生產線效能的指標。最後討論了整合上的困難以及在預測性維護等其他主要工業挑戰中的應用前景。Lee 等人[17]描述了一種基於數位孿生的工業網路物理平台，應用於小批量生產。該平台採用了組技術、自適應及選擇性組裝，以及生產系統與過程的數位孿生等手段。文章介紹了構建統一製造過程的機制，並展示了射出成型過程之多尺度整合模擬成果。文中討論了在工業網路物理平台中，確保對象識別與監控的問題，以及落實智慧產品概念所需的特定服務應用。

第三章 研究方法與步驟

3.1 系統架構

生產線的模擬環境我們採用 CIROS 內建的模組進行模擬。並使用 GX Works2 進行階梯圖形程式的編寫，搭配 MX OPC 進行 I/O 腳位的設定以達到 CIORS 模組的操作。本研究將積體電路生產線模擬分為六個主要部分進行模擬與設計，如圖 3 所示，其流程步驟與系統流程圖如圖 4 所示：

1. **進料分類檢測站(Seperating Station)**: 負責篩選良好的原料進入生產線。若原料有瑕疵，將透過分類桿導向至另一條輸送帶。
2. **翻轉站(氣壓迴轉模組)**: 對原料進行翻轉，未經翻轉的原料會被送回第一站進行反面檢測，已翻轉過的原料則送至下一站。
3. **加工站(Processing Station)**: 利用轉盤方式，將原料在不同加工工具間移動，完成多階段加工程序。
4. **切割站(蓋印缸鑽孔模組)**: 模擬晶圓切割過程，使用輪轉方式輸送原料。
5. **瑕疵檢測站(Testing Station)**: 篩選加工後的良品與不良品，良品由上方軌道輸出，不良品由下方軌道送出以供再次處理或廢棄。
6. **儲料站(Store Work Cell)**: 將第五站送出的晶圓良品分類為七個一組，進行儲存，等待後續取用。

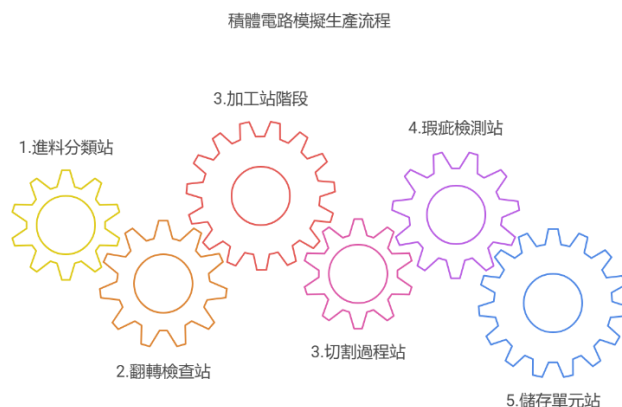


圖 3. 積體電路生產線模擬系統流程圖

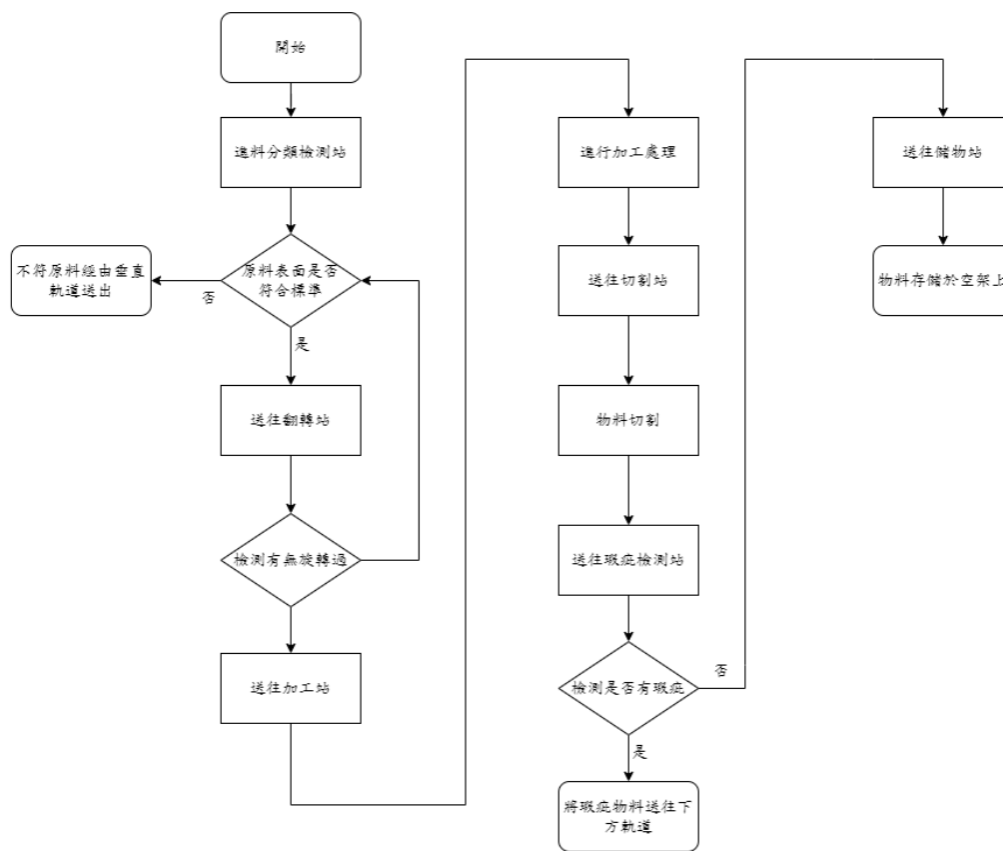


圖 4. 積體電路生產線模擬細部流程圖

3.2 軟體與相關技術說明

3.2.1 CIROS 軟體模擬技術

CIROS 是一款專為工業自動化設計的先進仿真軟體，用於模擬和優化各種自動化系統，例如生產線和機器人應用。它為工程師和技術人員提供了一個實驗與測試的平台，結合 mx-OPC 可直觀地規劃 I/O，並與 PLC 程式編輯整合，實現虛擬機電系統的模擬運行。相比於實機運行，模擬運行更為方便，並支援遠程教學。這不僅提高了安全性，還能大幅節省研發、人員及設備維護成本，進一步提升效率，在業界應用廣泛。

3.2.2 GX WORKS2 程式設計

GX Works2 是三菱電機推出的一款綜合 FA（工廠自動化）軟體，用於編輯和管理三菱 PLC（可編程邏輯控制器）的程式。它支援多種程式設計語言，包括梯形圖、SFC（順控功能圖）和結構化文本（ST）語言，並結合結構化工程功能，方便進行複雜程式的分層設計與管理。

主要特點包括：

1. 結構化工程設計

GX Works2 的結構化工程方法採用模組化設計理念，將整體控制系統拆分為功能明確的模組與任務，實現程式的高效管理與重用。每個模組（程式部件，POU）均可單獨編寫、調試與測試，減少了錯誤的傳播範圍，並提高了系統維護效率。

2. 多語言支持與集成化開發環境

該軟體支援梯形圖（Ladder Diagram）、SFC（順控功能圖）、ST（結構化文本語言）等多種程式語言。這使得用戶可以根據工程需求選擇適合的編程語言，並將不同語言結合使用，滿足複雜系統開發需求。

3. I/O 設置與標籤管理

GX Works2 提供直觀的 I/O 設置工具，允許用戶直接定義全局與局部標籤，並與物理設備地址相連接。標籤的使用不僅簡化了變量的管理，還避免了傳統位址操作中的混亂與錯誤。

4. 編譯與模擬運行

通過內置的編譯器，GX Works2 將使用者編寫的程式轉換為可執行的順控指令碼，並支援模擬運行，讓開發者能夠在實際硬體部署之前測試程式的邏輯正確性與功能可靠性。

5. 與硬體的整合能力

GX Works2 可以直接連接三菱 PLC 系列（如 Q 系列、L 系列、FX 系列等），提供程式的寫入、監控和故障診斷功能。此外，還支援與智慧模組（Smart Module）進行參數設置和通信協議測試。

3.3 生產線模擬環境

因實驗模擬環境由多個模組所組成，接下來的小節將敘述所使用的 CIROS 模組、I/O 腳位設定及相關功能。

3.3.1 Separating Station

此站點為進料分類檢測站，模擬所使用的模組為 Separating Station，當原料進入此模組輸送帶左方，將會有物料感測器偵測進料，並同時擋料方便進行瑕疵檢測，完成瑕疵檢測後若無問題則繼續將物料留在生產線，若有問題則開啟分類桿將物料送到另一輸送帶，如圖 5 所示。

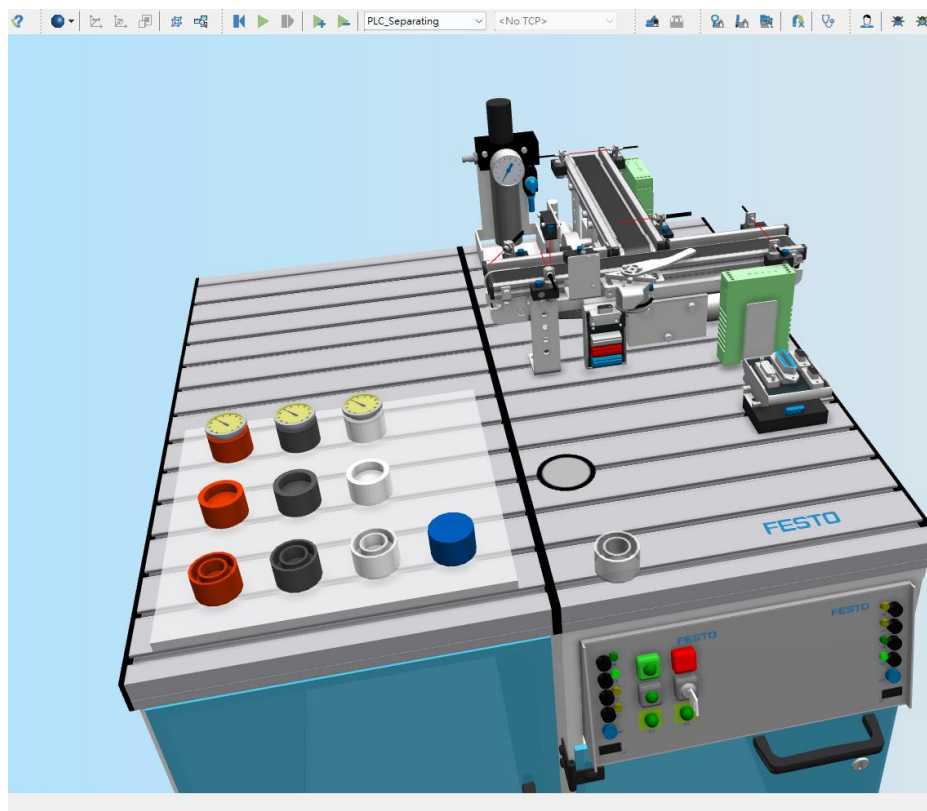


圖 5. Separating Station 模組

表 1 Separating Station 模組 I/O 與功能對應表

CIROS I/O	MX OPC I/O	功能
Input i0	X0	啟動按鈕
part av	X1	偵測進料

Input 3b2	X3	出料偵測
Station 2m1	Y3	分類桿
Station k1	Y1	平行輸送帶
Station k2	Y2	垂直輸送帶

3.3.2 氣壓迴轉模組

此站點為翻轉站，模擬所使用的模組為氣壓迴轉模組。首先檢測物料是否已經經過此站翻轉過，若無經過此站則翻轉物料，將此物料送回第一站進行再次(反面)檢測，若有經過翻轉了就不再動作送往下一站進行加工，如圖 6 所示。

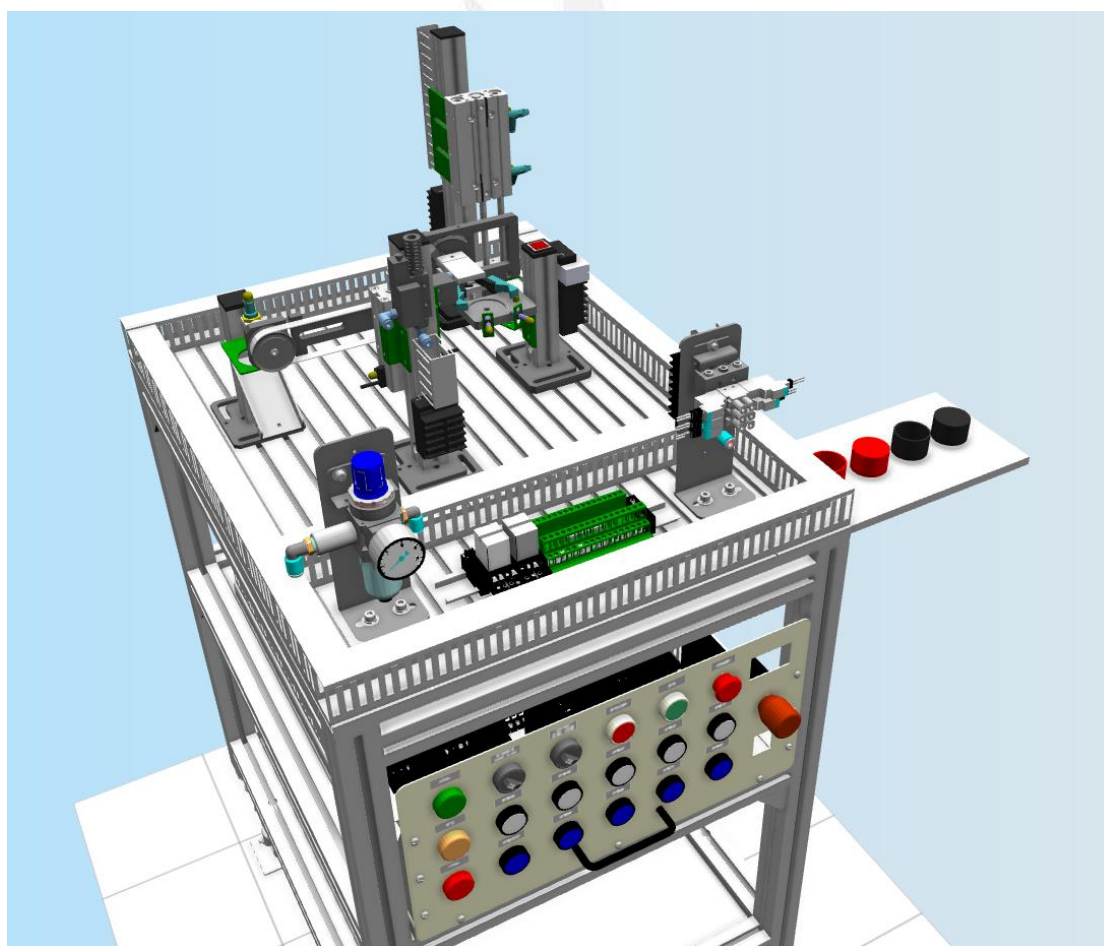


圖 6. 氣壓迴轉模組

表 2 氣壓迴轉模組 I/O 與功能對應表

PLC-IN00	PLC-IN01	PLC-IN04	PLC-IN06	PLC-IN07	PLC-IN10	PLC-IN11	PLC-IN12	PLC-IN13	PLC-IN14	PLC-IN15	PLC-IN16	PLC-IN17
X0	X1	X4	X6	X7	X10	X11	X12	X13	X14	X15	X16	X17
垂直缸上端點 a1	垂直缸下端點 a0	氣壓夾爪開極限點 c0	迴轉馬達正轉端點 e1	迴轉馬達反轉端點 e0	圓料進料感測器 S0	圓料開口正反面感測器 S1	圓料顏色感測器 S2	兩段式選擇開關 COS1 (左切 b接點 右切 a接點)	三段式選擇開關 COS2 (左切)	三段式選擇開關 COS2 (右切)	啟動按鈕/復歸按鈕 (ST/RS T)	緊急停止按鈕 EMS

PLC-OUT00	PLC-OUT01	PLC-OUT03	PLC-OUT04	PLC-OUT06	PLC-OUT07	PLC-OUT15	PLC-OUT16	PLC-OUT17
Y0	Y1	Y3	Y4	Y6	Y7	Y15	Y16	Y17
垂直氣壓缸上升 A+	垂直氣壓缸下降 A-	氣壓夾爪夾起 C+	氣壓夾爪打開 C-	迴轉馬達正轉 M+	迴轉馬達反轉 M-	紅燈	黃燈	綠燈

3.3.3 Processing Station

此站點為加工站，模擬所使用的模組為 Processing Station。原料將通過轉盤的方式在不同加工工具間移轉，加工後將推往下一站，如圖 7 所示。

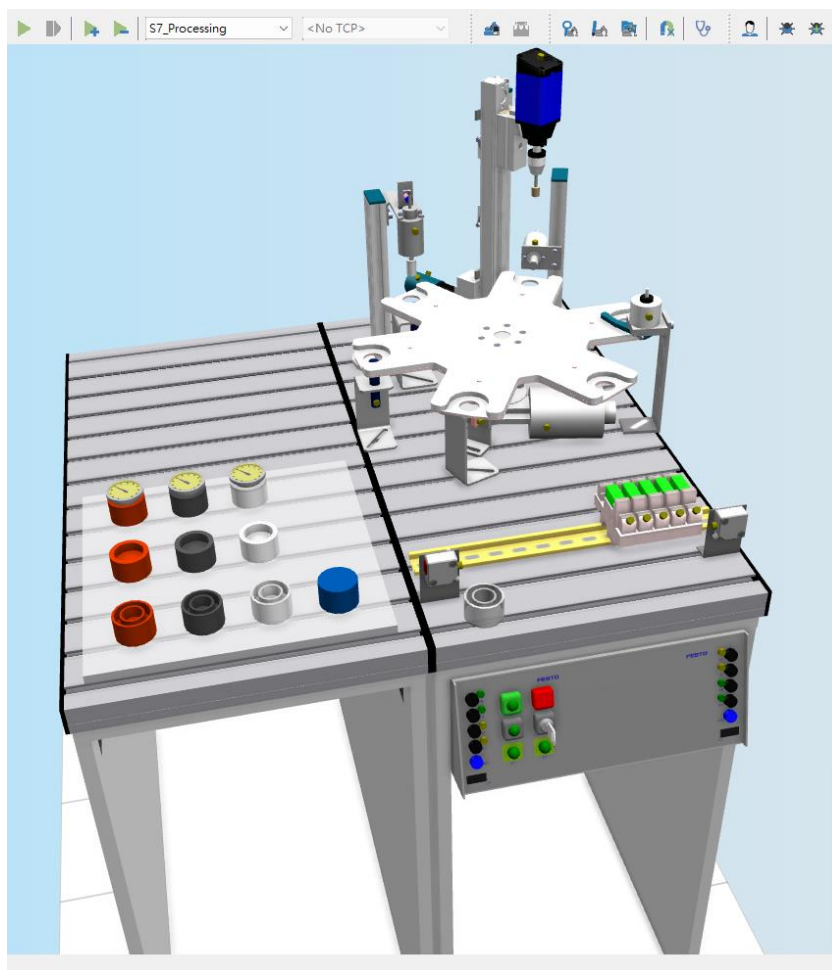


圖 7. Processing Station 模組

表 3 Processing Station 模組 I/O 與功能對應表

CIROS I/O	MX OPC I/O	功能
part av	X0	檢測進料
b3 plc input	X1	圓盤定位
b1 plc input	X2	加工第一站檢測進料
b2 plc input	X3	加工第二站檢測進料
input b4	X4	第一站加工感測器
input 1b1	X5	第二站上頂點(m3)
input 1b2	X6	第二站下頂點(m3)

station k2	Y0	圓盤旋轉
station m6	Y1	加工後推出至下一站
station m5	Y2	第一站加工裝置
station m4	Y3	第二站固定
station m3	Y4	第二站加工
station k3	Y5	第二站往下
station k4	Y6	第二站往上

3.3.4 蓋印缸鑽孔模組

此站點為切割站，模擬所使用的模組為蓋印缸鑽孔模組，用於模擬晶圓切割 (僅為模擬，與現實有所不同)，與加工站一樣使用輪轉的方式輸送，模擬如圖 8 所示。

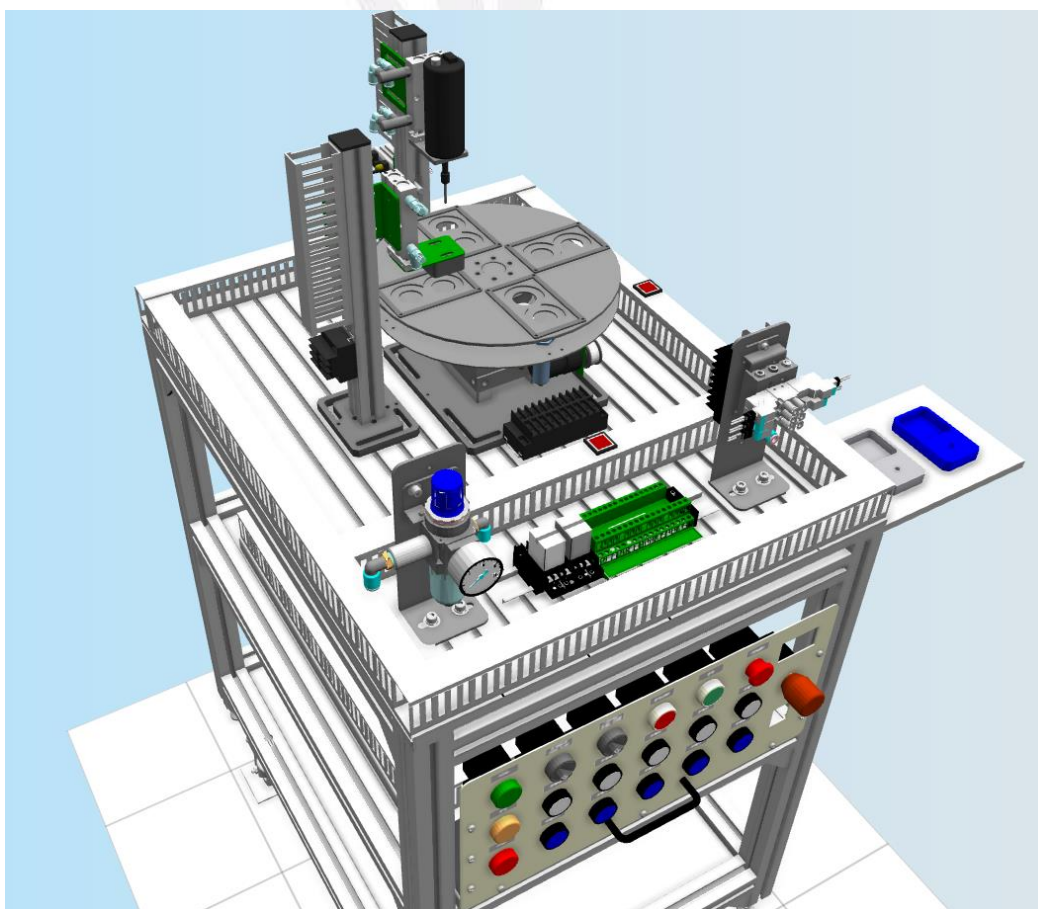


圖 8. 蓋印缸鑽孔模組

表 4 蓋印缸鑽孔模組 I/O 與功能對應表

PLC-IN00	PLC-IN01	PLC-IN02	PLC-IN03	PLC-IN04	PLC-IN05	PLC-IN06	PLC-IN07
X0	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7
蓋印缸下端點a1	蓋印缸上端點a0	鑽孔缸下端點b1	鑽孔缸上端點b0	夾料缸後端點c0	夾料缸前端點c1	分度盤定位感測器S0	材質感測器S1
PLC-IN10	PLC-IN11	PLC-IN12	PLC-IN13	PLC-IN14	PLC-IN15	PLC-IN16	PLC-IN17
X10	X11	X12	X13	X14	X15	X16	X17
進料點感測器P0	出料點感測器P1	停止按鈕STOP	兩段式選擇開關COS1(左切b接點右切a接點)	三段式選擇開關COS2(左切)	三段式選擇開關COS2(右切)	啟動按鈕/復歸按鈕(ST/RST)	緊急停止按鈕EMS
PLC-OUT00	PLC-OUT02	PLC-OUT03	PLC-OUT04	PLC-OUT05			
Y0	Y2	Y3	Y4	Y5			
蓋印缸下降 A	鑽孔缸下降B+	鑽孔缸上升B-	夾料缸縮回C-	夾料缸伸出C+			
PLC-OUT06	PLC-OUT07	PLC-OUT15	PLC-OUT16	PLC-OUT17			
Y6	Y7	Y15	Y16	Y17			
轉盤馬達旋轉M1	鑽孔馬達旋轉M2	紅燈	黃燈	綠燈			

3.3.5 Testing Station

此站點為瑕疵檢測站，模擬所使用的模組為 testing station。經過進料檢測後，若物件沒問題物件將由上方送出，若有問題則推置下方軌道，模擬如圖 9 所示。

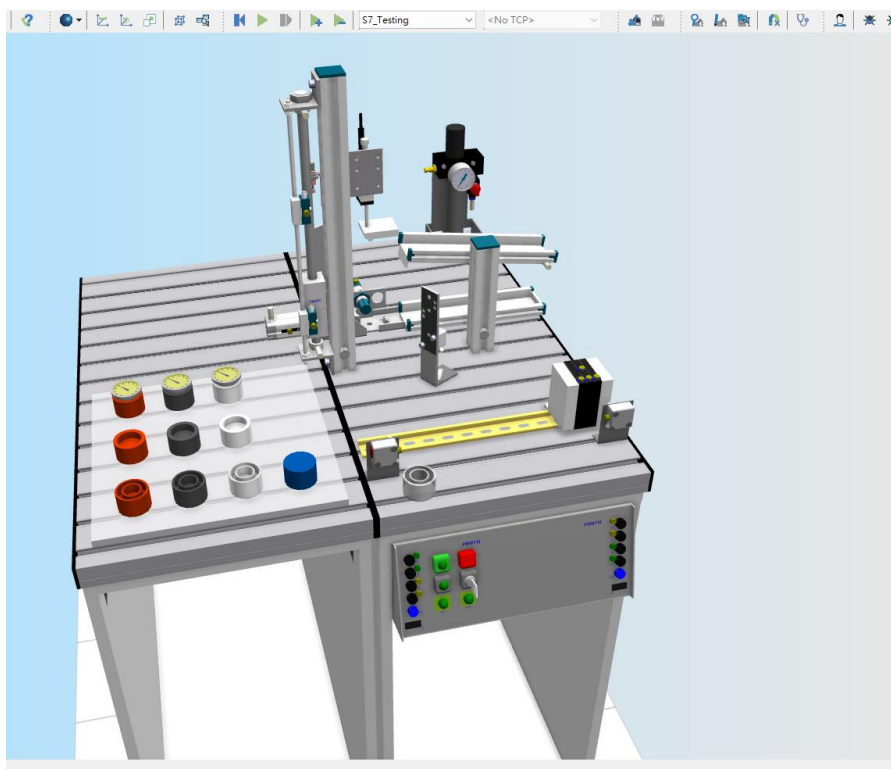


圖 9. Testing Station 模組

表 5 Testing Station 模組 I/O 與功能對應表

CIROS I/O	MX OPC I/O	功能
part av	X1	檢測進料
input 1b1	X3	上頂點
input 1b2	X4	下頂點
panel s3	X2	鑰匙旋轉開關
output 2m1	Y3	推料
output 1m2	Y1	推料往上
output 1m1	Y2	推料往下

3.3.6 Store Work Cell

此站點為儲料站，模擬所使用的模組為 store work cell。此站將第五站送出的晶圓良品分類為七個一組存放等待之後取用，模擬如圖 10 所示。

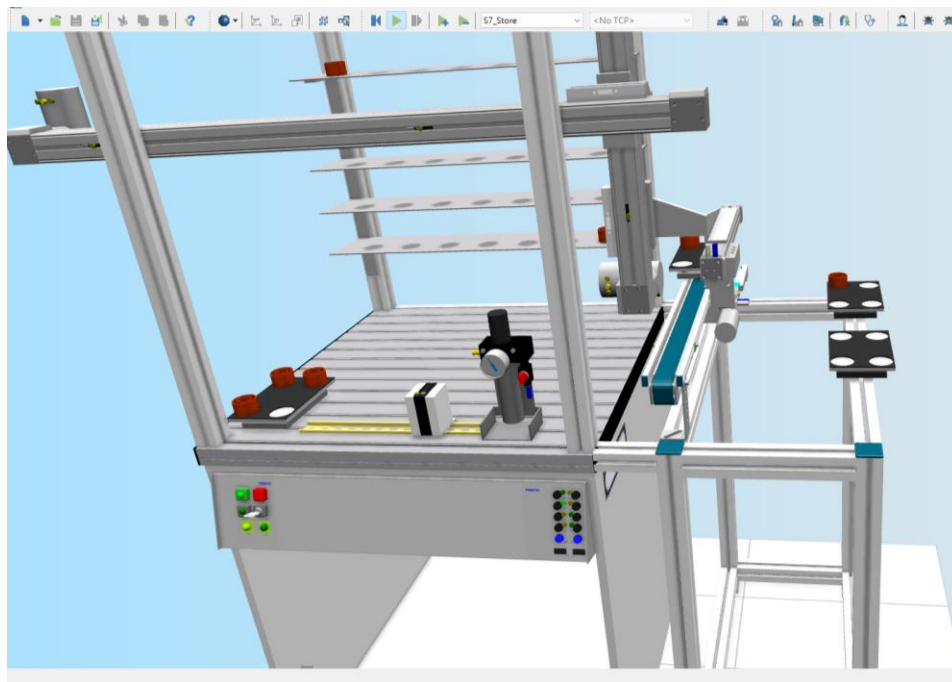


圖 10. Store Work Cell 模組

表 6 store work cell 模組 I/O 與功能對應表

CIROS I/O	MX OPC I/O	功能
X_L	Y1	往左移
X_R	Y4	往右移
output m2	Y0	夾取
output m1	Y3	夾爪前伸
output q slowX	Y2	打開變慢(x,z 軸)
Input start	X0	開始按鈕

第四章 實驗與結果分析

4.1 生產線模擬結果

在本研究中，積體電路生產線被劃分為六個主要作業站，分別為進料分類檢測站、翻轉站、加工站、切割站、瑕疵檢測站以及儲料站。這些站點相互串聯，形成一條完整且高度自動化的生產線。透過 CIROS 軟體進行模擬操作，並結合 PLC 程式設計進行控制，各作業站的運作流程得以精準模擬。

首先，進料分類檢測站成功地執行了對原料的檢測與分類功能，能夠即時辨識並排除不符合規範的原料，確保進入生產線的物料皆為合格品。接著，翻轉站負責對原料進行翻轉操作，讓物料能夠接受全方位的檢測與加工。加工站則透過轉盤設計，將物料依序送至各加工單元，並經過多次輪轉與加工，模擬實際生產中的加工流程。切割站以精確的動作完成晶圓切割程序，準確地將材料分割成規定尺寸。隨後，瑕疵檢測站針對加工完成的產品進行品管檢測，確保良品進入儲料站。不良品則會被分流處理或報廢，以維護整體產品品質。最後，儲料站將良品依規定分組並儲存，為後續的生產與出貨作準備。

模擬結果顯示整條生產線在智慧控制策略的協助下運作順暢，從原料檢測到成品儲存的每個環節都能精確執行，不僅達成了高效的生產目標，也展現了系統穩定與可靠的特性。

4.2 生產線穩定性分析

為了驗證系統在長時間運行下的穩定性與可靠性，進行了一系列的模擬測試。生產線各模組被持續運行總時長長達 6 小時，各模組在此期間均能穩定運作，無任何異常停機或故障情形發生，證明系統具備良好的穩定性。此外，透過模擬輸送帶停擺與感測器誤判等異常情況，進行了故障容錯測試，結果顯示系統能夠即時偵測異常並啟動保護機制，有效避免設備損壞與生產中斷。

進一步進行負載測試，在模擬生產量大幅增加的情境下，系統能夠靈活地調整運作速度與節奏，避免生產過程出現瓶頸。整體來看，系統在長時間運作、異常情況與高負載運行下皆能維持穩定性，顯示本研究所設計的生產線模擬系統具備高度的可靠性與彈性。

4.3 綜合結果討論

數位孿生與模擬技術的導入，對整體生產流程帶來了顯著的改善與效益。透過 PLC 程式設計與 CIROS 軟體模擬的結合，生產線能夠實現設備協同作業與製程參數的即時調整，進一步提升生產效率與產品品質。

在設備協同作業方面，各模組間的連動與資訊傳遞更加流暢，有效降低了物料轉運與加工過程中的等待時間，進而提升生產效率。自動化控制取代了傳統人工操作，使得生產流程更為穩定且一致。智慧控制策略不僅簡化了生產操作，也提升了整體設備的使用效率，並降低了生產成本。

在製程參數自動調整方面，系統能夠根據即時回饋數據，自動優化製程參數，以確保每道工序皆能維持在最佳狀態。當感測器偵測到製程異常或設備偏差時，系統能迅速進行調整，減少不良品產生，進一步提升產品良率。同時，透過即時監測與數據分析，系統能有效降低能源消耗，達成節能減碳的目標。

智慧控制策略的導入，使得生產流程更加順暢且高效，不僅提升了生產效能，也降低了營運成本，展現了智慧製造在積體電路生產線中的應用潛力。

第五章 結論與展望

5.1 研究成果總結

本研究以數位孿生技術為核心，成功模擬並優化了積體電路生產線的作業流程。透過 CIROS 軟體搭配 PLC 程式設計，構建了涵蓋進料分類檢測、翻轉搬運、加工、切割、瑕疵檢測與儲存等六大模組的生產線系統。實驗結果顯示，系統能夠在穩定運行下有效執行各項作業，提升生產效率與良率，並確保製程精準度與設備協同作業的穩定性。

5.1.1 生產線模擬與智慧控制的技術突破

本研究運用數位孿生技術模擬積體電路生產流程，並透過 PLC 梯形圖程式設計智慧控制策略，成功實現了生產線的自動化與智慧化管理。系統具備即時監控與動態調整能力，能有效提升生產效率、降低生產成本，並減少資源浪費與能源消耗。

5.1.2 研究對積體電路產業的貢獻

本研究不僅提供了一個高擬真的積體電路生產線模擬平台，也驗證了數位孿生技術在製造業的應用潛力。研究結果對積體電路產業的生產自動化、品質控管及生產效率優化具有重要貢獻，並為產業數位化轉型提供了技術支撐。

5.2 研究局限與不足

5.2.1 研究過程中的問題與挑戰

由於 CIROS 軟體與實際設備存在差異，模擬環境無法完全反映現場生產情境，可能導致部分控制邏輯無法直接應用於實際生產。此外，模擬過程中的異常情境設計較為單一，對複雜製程異常的應變處理仍有不足。

5.2.2 現有技術與方法的局限性

在數據分析與智慧決策方面，本研究主要依賴 PLC 程式設計，對於大數據分析與人工智慧的整合應用尚未深入探討。此限制使得系統在處理大量複雜數據時，無法即時進行更高階的預測與決策。

5.3 未來研究方向與建議

為了進一步優化本研究成果並拓展其應用範圍，未來可從以下幾個方向進行深入探討與研究：

5.3.1 結合人工智慧與大數據分析

未來研究可將人工智慧（AI）與大數據分析（Big Data Analytics）技術導入至生產流程中，提升系統的智慧決策與異常預測能力。透過蒐集與分析大量生產數據，可針對生產過程中可能發生的異常狀況進行預測，並自動調整製程參數，以進一步提升生產效率與產品品質。此外，AI 演算法亦可應用於製程優化、設備維護與資源分配等領域，全面提升生產線的智慧化程度。

5.3.2 強化異常處理與容錯設計

針對生產過程中可能發生的複雜異常狀況，未來可進一步強化異常處理與容錯設計。透過模擬多重異常情境，設計更完整的應變機制與安全防護措施，提升系統的穩定性與可靠性。並可導入預測性維護（Predictive Maintenance）技術，透過即時監測設備運作狀況，提前預測並處理潛在故障，避免生產中斷與設備損壞。

5.3.3 系統整合與跨領域應用

本研究的技術成果可延伸至其他製造業領域，未來可針對不同產業特性進行系統整合與客製化開發。透過跨領域技術整合，將數位孿生技術與智慧製造理念

應用於半導體產業、精密機械產業或智慧物流等領域，進一步推動產業升級與數位轉型。



參考文獻

- [1] Z. Zhang et al., "Digital Twin Key Technology on Rare Earth Process," *Journal of Industrial Engineering*, vol. 38, no. 8, Aug. 2022.
- [2] Y. Liu and X. Wang, "The Impact of Digital Twins on the Evolution of Intelligent Manufacturing and Industry 4.0," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 19, no. 4, Jun. 2023.
- [3] M. Chen, "A Comprehensive Review of Digital Twin from the Perspective of Total Process: Data, Models, Networks and Applications," *Industrial Systems Review*, vol. 29, no. 10, Oct. 2023.
- [4] J. Kim and S. Lee, "Digital Twin-Based Integrated Monitoring System: Korean Application Cases," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 56, no. 5, Jul. 2022.
- [5] L. Zhao et al., "Integrating the Digital Twin Concept into the Evaluation of Reconfigurable Manufacturing Systems (RMS): Literature Review and Research Trend," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 174, no. 1, Mar. 2023.
- [6] K. Park, "Digital Twins for Building Industrial Metaverse," *IEEE Access*, vol. 11, Nov. 2023.
- [7] B. Wang et al., "Digital-Twin-Driven Intelligent Insulated-Gate Bipolar Transistor Production Lines," *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, vol. 40, no. 1, Jan. 2024.
- [8] J. Lee et al., "Digital Twin-Driven Variant Design of a 3C Electronic Product Assembly Line," *International Journal of Production Research*, vol. 60, no. 5, Mar. 2022.
- [9] M. Chen et al., "Design and Implementation of Universal Cyber-Physical Model for Testing Logistic Control Algorithms of Production Line's Digital Twin by Using Color Sensor," *IEEE Access*, vol. 37, no. 3, Mar. 2021.
- [10] H. Zhou et al., "AI-Driven Predictive Maintenance for Smart Manufacturing Using Digital Twins," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 12, Dec. 2023.
- [11] J. Kim and S. Lee, "Educational Case Studies: Creating a Digital Twin of the Production Line in TIA Portal, Unity, and Game4Automation Framework," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 56, no. 5, May 2023.
- [12] K. Park et al., "Demonstration and Evaluation of a Digital Twin-Based Virtual Factory," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 67, no. 6, Jun. 2021.
- [13] Y. Liu and X. Wang, "Integration of Discrete Simulation, Prediction, and Optimization Methods for a Production Line Digital Twin Design," *IEEE*

Transactions on Industrial Informatics, vol. 19, no. 4, Mar. 2023.

[14] M. Chen et al., "A Survey on AI-Driven Digital Twins in Industry 4.0: Smart Manufacturing and Advanced Robotics," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 68, no. 12, Sep. 2021.

[15] H. Zhou et al., "Digital Twins-Based Remote Semi-Physical Commissioning of Flow-Type Smart Manufacturing Systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 12, Apr. 2021.

[16] K. Park, "Towards the Augmentation of Digital Twin Performance," *IEEE Access*, vol. 11, Nov. 2023.

[17] J. Lee et al., "Development of an Industrial Cyber-Physical Platform for Small Series Production Using Digital Twins," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 67, no. 6, Aug. 2021.

