



Manufacturing Data Science



Manufacturing System Management

(第 2 章 製造系統分析與管理)

Chia-Yen Lee, Ph.D. (李家岩 博士)

Department of Information Management (資訊管理學系)
National Taiwan University (國立台灣大學)

- 第一章 製造數據科學
- 第二章 製造系統分析與管理
- 第三章 數據科學基礎與模型評估
- 第四章 數據科學分析架構與系統運算決策
- 第五章 數據預處理與製造數據特性
- 第六章 線性分類器
- 第七章 無母數迴歸與分類
- 第八章 決策樹與集成學習
- 第九章 特徵挑選與維度縮減
- 第十章 類神經網路與深度學習
- 第十一章 集群分析
- 第十二章 特徵工程、數據增強與數據平衡
- 第十三章 故障預測與健康管理
- 第十四章 可解釋人工智慧
- 第十五章 概念漂移
- 第十六章 元啟發式演算法
- 第十七章 強化學習

藍：老師課堂講授

綠：學生自學

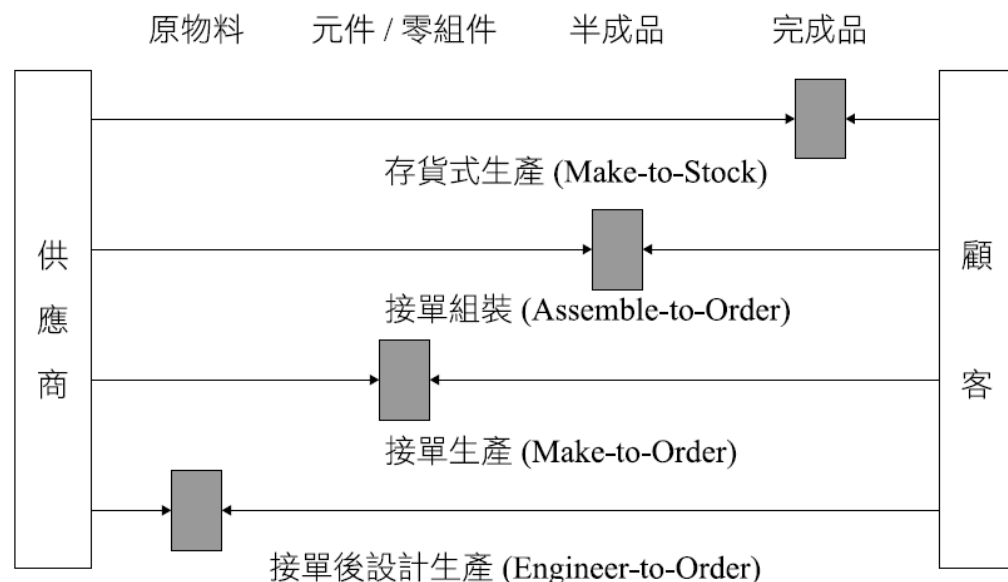
- 附錄A 線性迴歸
- 附錄B 支持向量機
- 附錄C 統計製程管制與先進製程控制
- 附錄D 超參數最佳化

- 應用涵蓋

產能規劃、瑕疵檢測、製程監控與診斷、機台保養、需求預測、生產排程、電腦視覺、自動光學檢測、原料價格預測與採購等

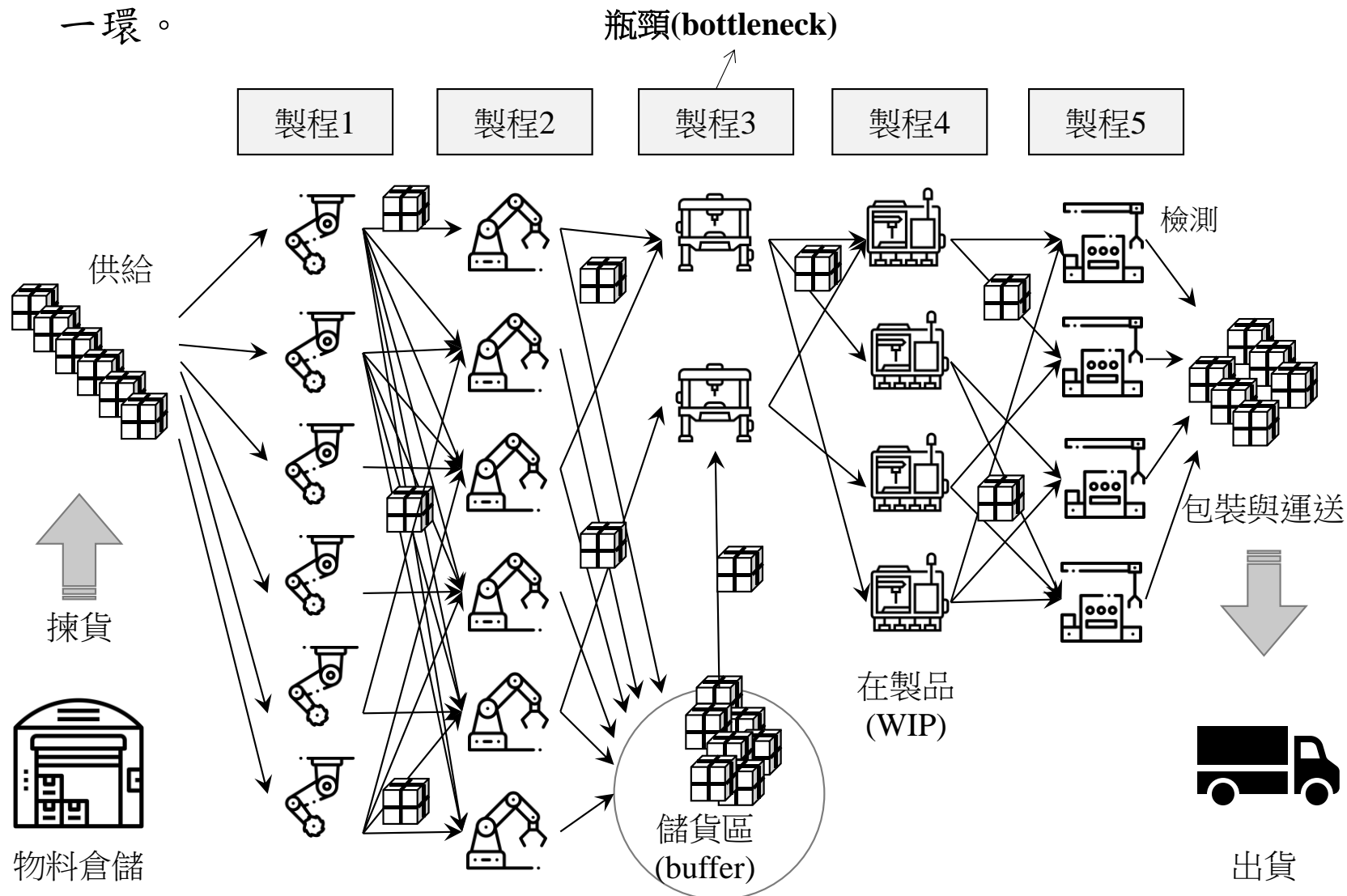
製造系統的定義與模式

- 一個「製造系統」是將設備、人員、資訊、過(製)程與程序集合起來，用以實現企業的營運目標
- 製造系統包括(1)實體設施 (2)製造支援系統 (3)資訊基礎建設與系統
- 製造系統的模式以客製化、反應速度有所不同，包括 (1)接單後設計生產 (2)接單式生產 (3)接單組裝生產 (4)存貨式生產 (5)混合生產



- : 顧客訂單分割點 (Customer Order Decoupling Point, CODP)
- : 根據預測生產
- ← : 根據顧客訂單生產

- 定義生產活動是包含從產品設計、採購、製造、外包、檢測、銷售、通路到最後交送到客戶手上的所有流程；然而「製造活動」為生產活動的一環。



□ 電腦整合製造（computer-integrated manufacturing, CIM）

- 利用電腦及資通訊等技術，整合與管理製造過程中的所有活動的系統。
- 製造系統中，自動化涵蓋的範疇包括自動化產品設計、自動化機器、可換線且執行多項作業的彈性生產線、自動化產能配置與調節、自動化組裝操作、自動化物料搬運系統和倉儲系統、自動化規格檢驗等。

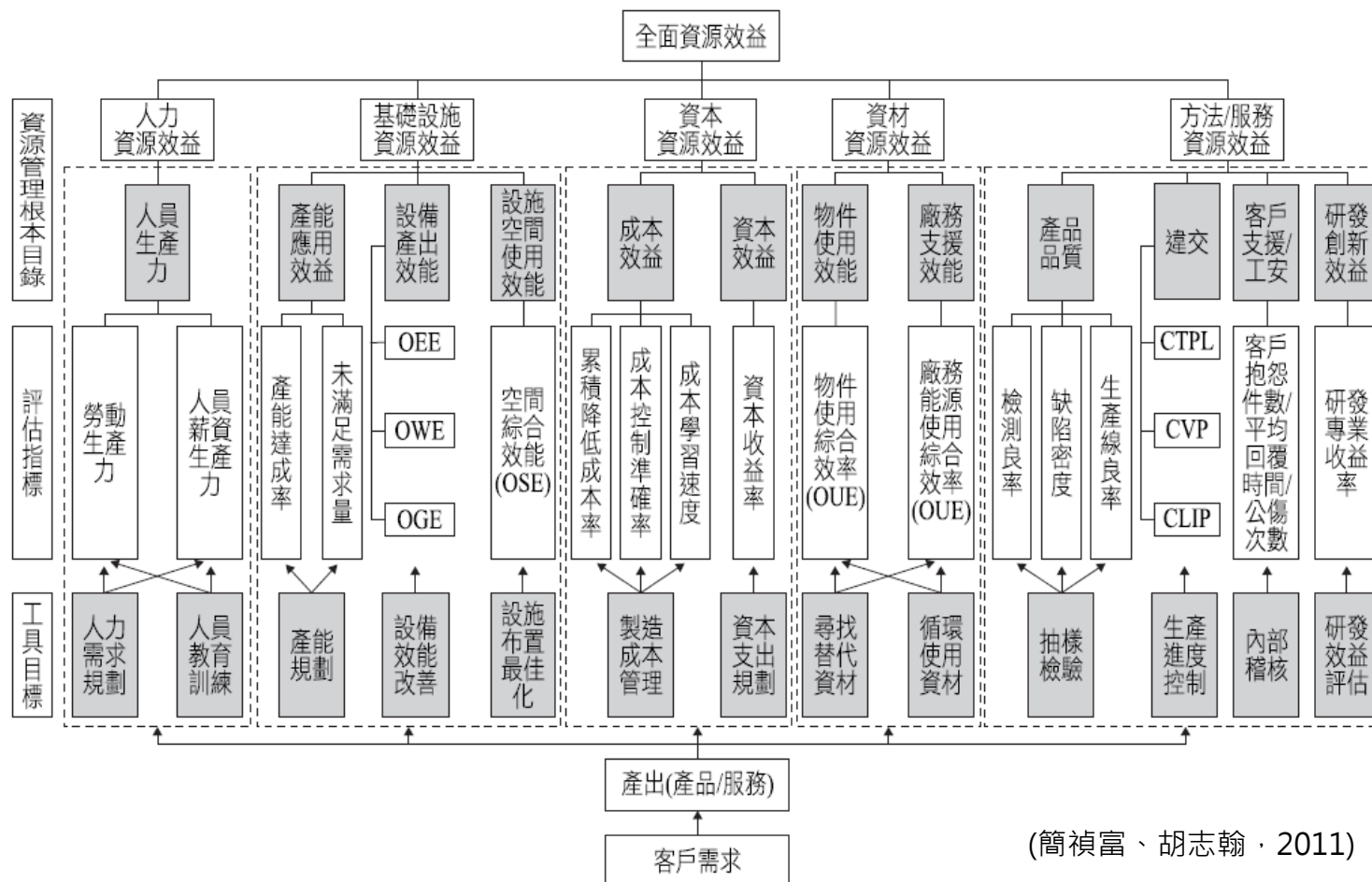
□ 自動化製造系統主要可分為三類（Groover, 2001）

- 固定自動化系統
 - 於高生產率、高產量、產品種類少的情況下（也就是多量少樣），例如用於某類產品進行特定形狀焊接的焊接夾具。在某些特例中，這可視為一種專線（dedicated production line），用於服務某特定顧客或產品類別。
- 可編程自動化系統
 - 用於小批量，多品種的批量生產（也就是少量多樣），透過程式開發不同的模組與子功能，進行多元化的生產，例如機器人焊接單元。
- 彈性自動化系統
 - 「彈性製造系統」（flexible manufacturing system, FMS）接近，生產速率與產品種類介於上述兩種系統之間，可以透過彈性的模具設計或「快速換模技術」（single minutes exchange of die, SMED），以較少產能損失從一種產品類別轉換到另一種產品。

製造系統管理的挑戰

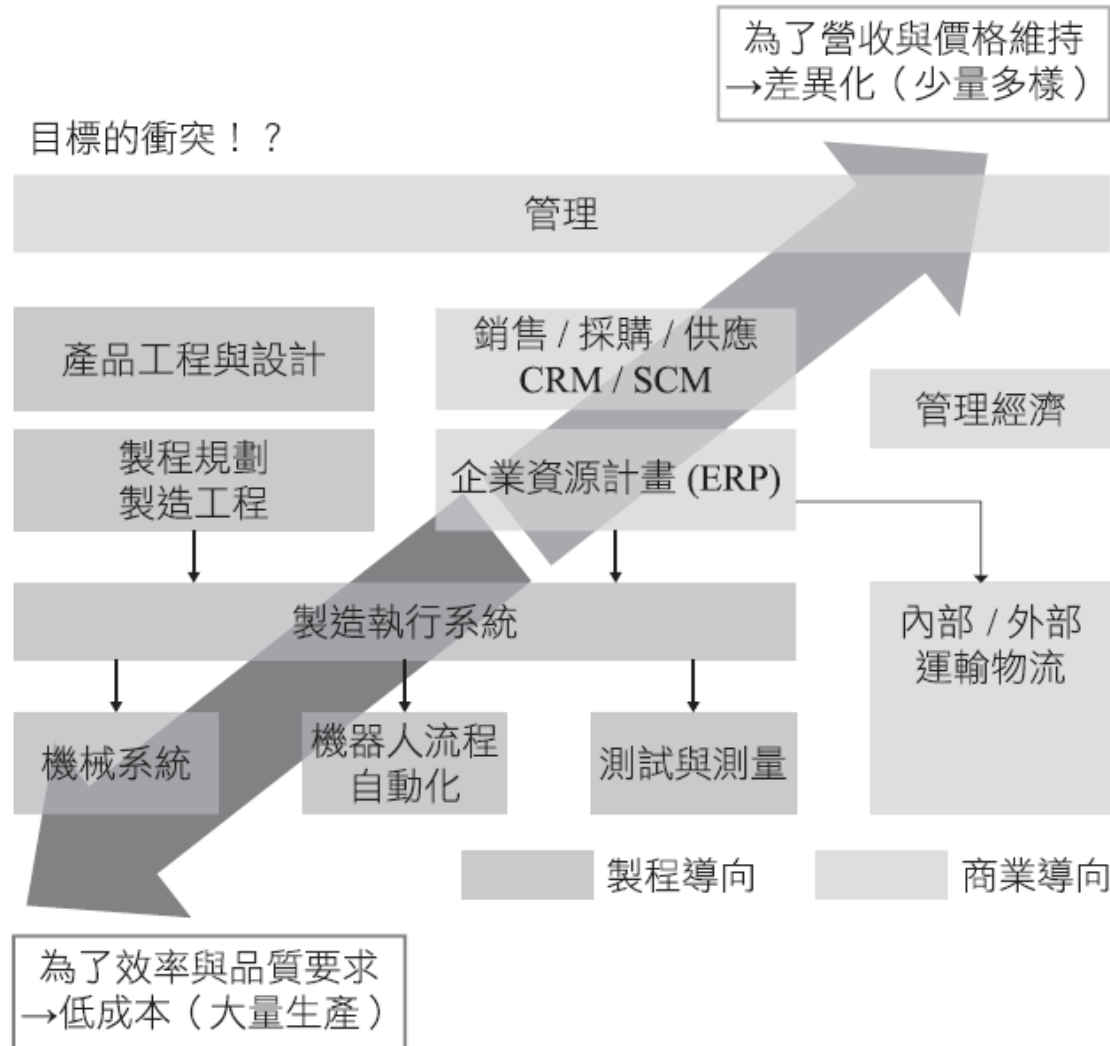
資源與關鍵績效指標的多樣性

- 例如研發部欲借機台來加工試驗性產品以改善品質，對於製造部門就可能發生產能損失(產品生產需求當日沒有達成目標)



製造系統管理的挑戰

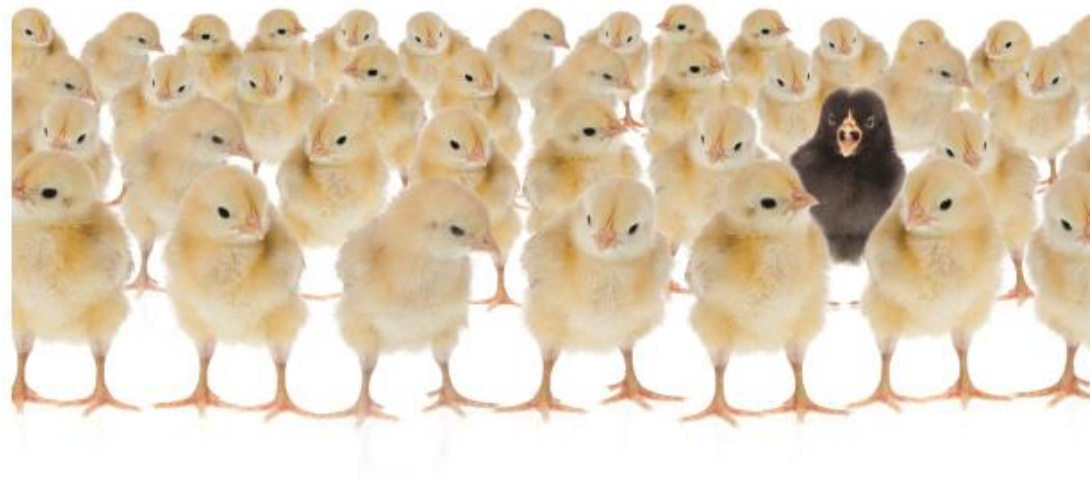
管理階層與製造現場目標間的衝突



□ 製造系統管理的挑戰

● 變異(variability)

- 變異通常意指的是負面的狀態，意味著問題發生(預期狀態與實際狀態有落差)，而造成製造系統的損失
- 變異來源：產品、機台、人、料、工作或任務、管理
- 變異的處理：事前預防、發生中治療、事後檢討
- 變異在資訊理論中代表了「資訊量」，通常可以用變異數(variance)或夏農熵(Shannon entropy)來表示



□ Entropy

- 給定一隨機變數 X 有 L 種可能結果 $\{x_1, \dots, x_L\}$ (例如骰子1到6點)，每一個機率為 $p(x_i)$ ，熵 H 的計算方式： $H(X) = -\sum_{i=1}^L p(x_i) \log_b p(x_i)$
- 案例說明：5位作業員操作兩台機台各別的績效比較，假設在生產品質相同的情況下，此處以產出率(throughput, TH)為比較基準。

表 2.1 作業員操作兩台機台的績效比較

產出率 (個/小時)	機台 A	機台 B
作業員 1	80 (中)	76 (中)
作業員 2	80 (中)	91 (高)
作業員 3	80 (中)	83 (中)
作業員 4	80 (中)	62 (低)
作業員 5	80 (中)	88 (高)
變異數	0	106.8
熵 (離散化計算如表 2.2)	0	1.522

表 2.2 兩台機台產出率類別的機率與熵

	機率			熵
	低	中	高	
機台 A	0/5=0	5/5=1	0/5=0	0
機台 B	1/5=0.2	2/5=0.4	1/5=0.4	1.522

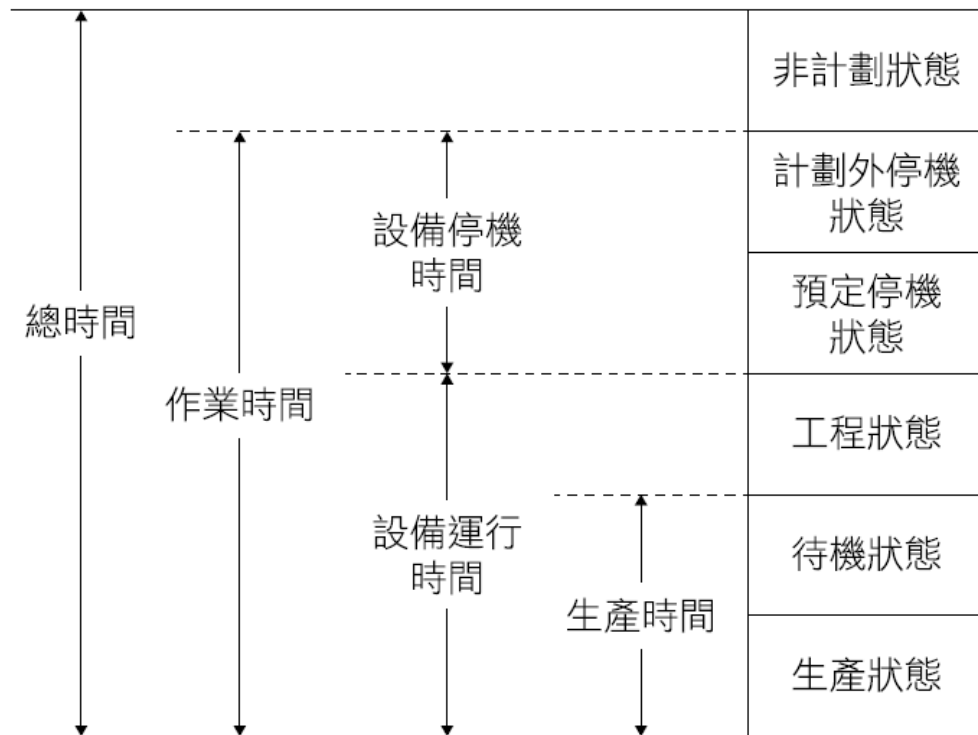
- 然而熵的計算，通常定義在類別變數，對於連續值變數需要先做轉換。例如以裝箱法(binching method)對於產出率低於70以下作為「低」類別
- 變異數與熵呈現出來數據的資訊量，以利改善進行，找出最佳實務(best practice)做標竿學習(benchmarking)

□ 製造系統的績效指標

- 產出率 (throughput, TH)
 - 產出率是每單位時間生產的合格產品的平均數量。對整條產線產出率而言，通常以長期稼動率最高的工作站作為「瓶頸站」(bottleneck)。
- 在製品 (work in process, WIP)
 - 生產途程 (routing) 中起點和終點之間的庫存。
- 原物料存貨 (raw material inventory, RMI)
 - 途程起始點的原物料堆放。
- 存貨週轉率 (inventory turns; turnover ratio)
 - 產出率與平均庫存的比率。
- 製成品存貨 (finished goods inventory, FGI)
 - 是準備要出貨給顧客的完成品庫存；其中完成品存貨 (crib inventory) 是生產途程結束時的存貨點存貨。
- 前置時間 (lead time)
 - 生產所指定花費的時間；或從顧客下單到收到成品的時間。
- 週期時間 (cycle time, CT)
 - 從途程開始發布生產作業到途程結束的存貨點之間的時間。對整條產線而言，通常使用途程經過所有工作站的長期平均加工時間表示，通常為隨機變數。
- 服務水準 (service level)
 - 訂單準時達交的比率； $P\{\text{cycle time} \leq \text{lead time}\}$ for Make-to-Order。
- 稼動率 (utilization)
 - 「到達率」(arrival rate) 除上「有效產出率」；沒有閒置 (idle) 狀況的時間比例。

總體設備效能(Overall Equipment Effectiveness , OEE)

- OEE 可以分解成以下幾項細部指標：「可用效率」 (availability efficiency, AE)、「作業效率」 (operational efficiency, OE)、「產出效率」 (rate efficiency, RE)、「品質效率」 (quality efficiency, QE)
- $OEE = \frac{\text{有效產品的理論生產時間}}{\text{總時間}} = AE \times (OE \times RE) \times QE = \text{可用效率} \times \text{性能} \times \text{品質}$



可用效率 = $AE = \frac{\text{設備運行時間}}{\text{總時間}}$

性能 = $OE \times RE$

作業效率 = $OE = \frac{\text{生產時間}}{\text{設備運行時間}}$

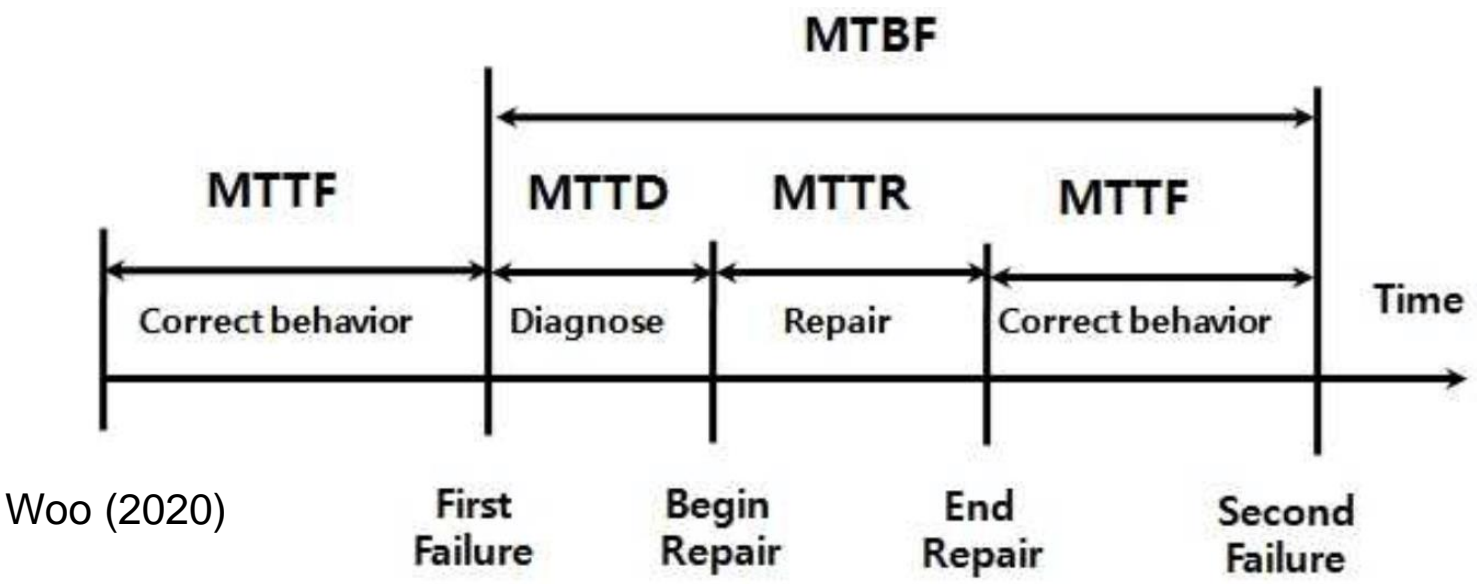
產出效率 = $RE = \frac{\text{實際產品的理論生產時間}}{\text{生產時間}}$

品質 = $QE = \frac{\text{有效產品的理論生產時間}}{\text{實際產品的理論生產時間}}$

■ 總體設備效能(Overall Equipment Effectiveness , OEE)

- OEE架構中可以整合重要指標：平均故障間隔時間(mean time between failure, MTBF)、機器在故障之前平均機台運行時間(mean time to fail, MTTF)以及平均機台維修時間(mean time to repair, MTTR)來協助發生故障的組件並使機器恢復運行

$$AE = \frac{\text{設備運行時間}}{\text{總時間}} = \frac{\text{設備運行時間}}{\text{設備運行時間} \times \frac{(\text{MTTR} + \text{MTTF})}{\text{MTTF}}} = \frac{\text{MTTF}}{\text{MTTR} + \text{MTTF}}$$



Woo (2020)

□ 當代OEE跟傳統上的意涵，也將隨時代有所改變

- 上下游與機台間的OEE彼此關聯
- OEE規則動態更新
 - 過去現場常基於規則(rule-based)以閾值(threshold)定義
 - OEE超過多少算合理？低於多少才算有問題？過去現場常基於規則(rule-based)以閾值(threshold)定義之。然而，由於現場的動態特性，閾值也將動態更新而非固定不變。例如品管圖常用的正負三倍上下管制界限(UCL、LCL)，也將動態調整因時因地適宜，以避免假警報過多。
- 各類資源的OEE監控
 - 早期OEE主要是對機台設備以時間分解，然而現代透過前述感測器與物聯網，人、原料、零件等8M1I資源皆可依OEE的方式剖析
- OEE是協助資源配置最佳化的量測工具
 - 例如預定停機的時間在OEE中比例似乎太少不行(完全不做維修保養PM)、太多也不好(產能損失)，那應該多少才是最佳的比例呢？這好比早期我們說的「三八制」，將一日的生活時間，分配為八小時工作、八小時休閒、八小時睡眠。然而時至今日，三八制對人的生活而言是最佳的時間配置嗎？至於「最佳」的定義，也因人而異有不同的目標式。簡言之，資源8M1I需各別檢視其OEE的最佳配置，又稱資源投資組合(portfolio)。

□ 工廠動態學(Hopp and Spearman, 2011)

- 解析工廠與製造流程的運作原理，探討途程(route)上的生產網路與流動瓶頸站

□ 瓶頸(bottleneck)

- 意指某一個部分單元嚴重地限制與影響系統整體的績效或產能
 - 在生產線上，瓶頸可以是機台、機台群組、工作站、人力、運輸載具或製程
- 通常瓶頸的判斷方法有四：
 - 單位時間產出率速度最慢(或加工時間較長)
 - 根據上述，該機台通常稼動率較高
 - 上游工作站放貨速度相對過快而造成該站來不及處理
 - 該機台或工作站其 WIP 於加工前快速堆貨形成壅塞

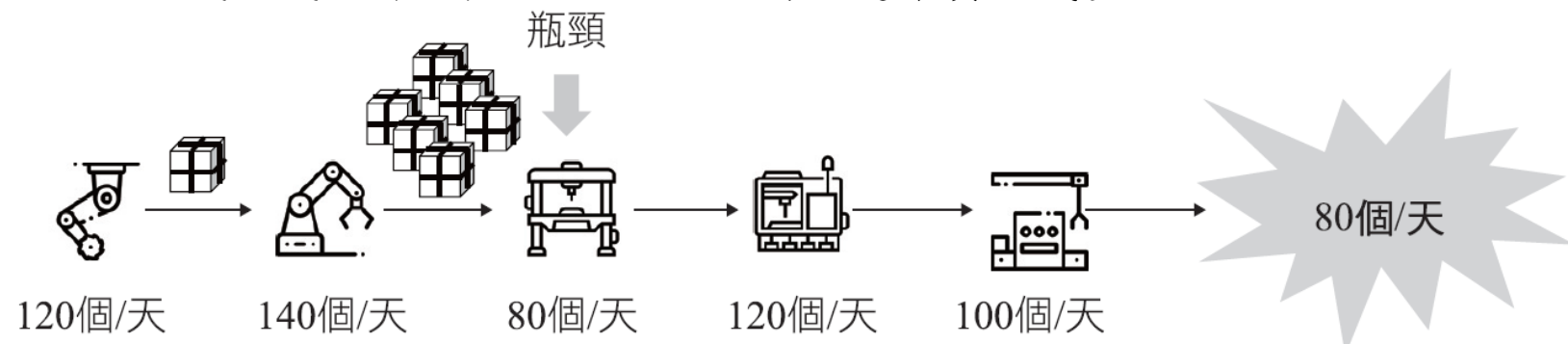
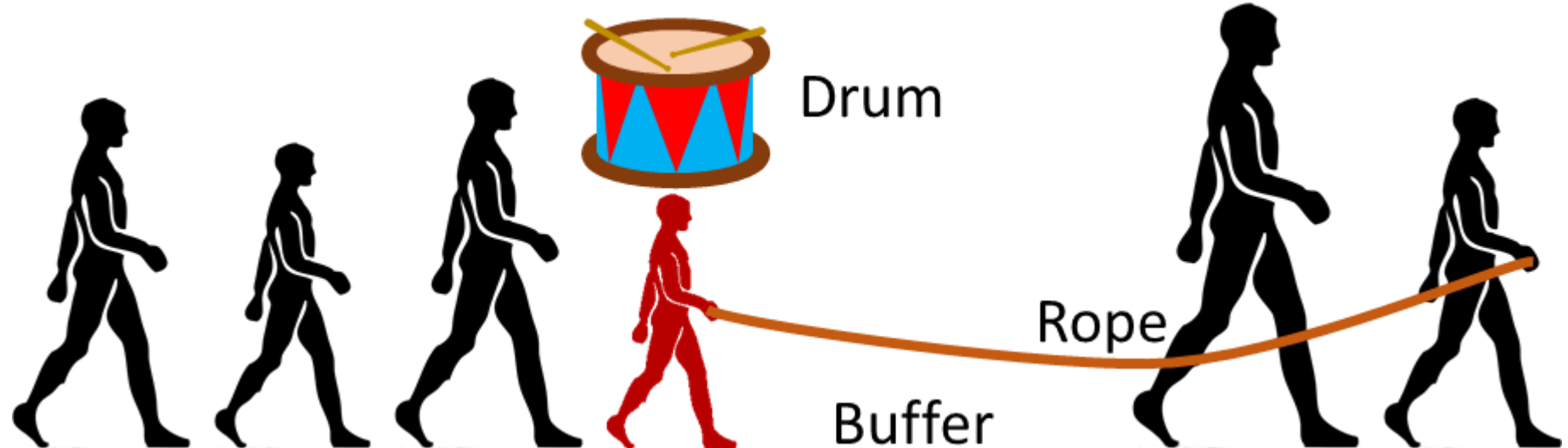


圖 2.8 生產流水線的瓶頸站

□ 瓶頸(bottleneck)

- Goldratt與Cox(1984)曾提出「限制理論」(theory of constraints, TOC)，其明確地指出：一個複雜的系統可能是由許多元素或部分組成，然而在任何時間只有少數的部分或變數，會限制此系統達到更高的目標，其稱之為限制
- “a chain is no stronger than its weakest link”
- 在考量成本與時間效益下，專注於瓶頸站的改善，將有助於提升整體系統的產出。



<https://www.allaboutlean.com/drum-buffer-rope/dbr-for-people/>

□ 生產效率

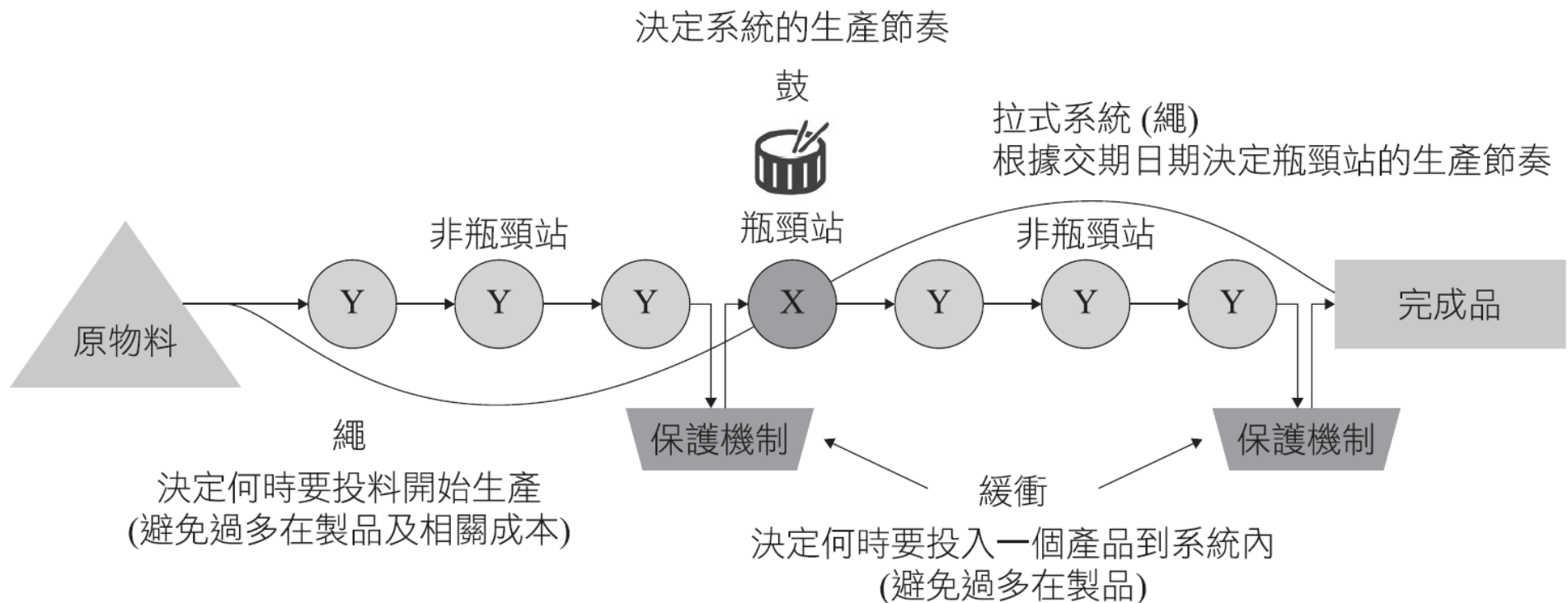
- 鼓-緩衝-繩 (Drum-Buffer-Rope, DBR)
- ECRS分析
 - 取消(Eliminate), 合併(Combine), 調整重排(Rearrange), 簡化(Simplify)
- 快速換模技術(SMED)
- 高稼動率 (OEE)
- 生產線平衡 (Line Balancing)
 - Grouping Task to Workstation
 - Tool Matching
 - Flow Variability

□ 生產成本

- 提高良率、降低耗損
 - FMEA (Failure Mode and Effect Analysis失效模式與影響分析)
 - Troubleshooting
- 產能平準化 (Leveling) (產能規劃)

□ 「鼓-緩衝-繩」 (drum-buffer-rope, DBR)

- 鼓是產線上的稀少資源又或指瓶頸站，會影響與控制整個產線的產出
- 用緩衝來保護這鼓的持續生產以防止中斷
- 繩建立一機制從鼓的節奏來串接其他生產資源



□ Five focusing steps in TOC (Process of ongoing improvement-POOGI)

- Assuming the goal of a system has been articulated and its measurements defined, the steps are:
 - 1. Identify the system's constraint(s).
 - by throughput, WIP, idle time, MTBF, MTTR, etc.
 - 2. Decide how to exploit the system's constraint(s).
 - Fully support by non-bottleneck's resources
 - 3. Subordinate everything else to the above decision(s).
 - Emphasize on Synergy by team work/cooperation/integration
 - Identify the needs from bottleneck and fully support it
 - ECRS analysis rather than just partake (非僅找人來分擔) it.
 - 取消(Eliminate), 合併(Combine), 調整重排(Rearrange), 簡化(Simplify)
 - 4. Alleviate the system's constraint(s).
 - 5. Warning! If in the previous steps a constraint has been broken, go back to step 1, but do not allow inertia to cause a system's constraint.

□ ECRS是常用的一種流程分析的方法

- 消除(Eliminate)、合併(Combine)、重組(Rearrange)、簡化(Simplify)

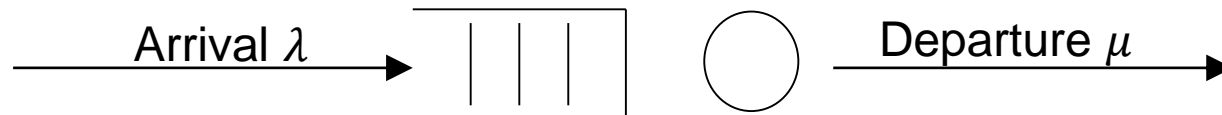
	解釋(Explanation)	案例(Example)
E	消除 (Eliminate): 完成了什麼？是否必要？為什麼	目前：在植物組培操作中，新瓶放置於操作員的左後方地上，操作員需轉身、彎腰取瓶約浪費6秒時間。 建議：直接把瓶架放置於操作員左手桌上位置(因空間限制改成小籃堆疊)，約節省3秒。
C	合併 (Combine): 如果工作或動作不能取消，則考慮能否可與其他工作合併	目前：左手開酒精瓶蓋→左手放置瓶蓋→右手取打火機→右手點火 (約4秒) 建議：左手開酒精瓶蓋、同時右手取打火機點火(約2秒)
R	重組 (Rearrange): 對工作的順序進行重新排列。	目前：組裝後→倉庫貯存→抽檢→出貨 如有缺陷，改為全檢直到不良排除 建議：組裝後→抽檢→倉庫貯存→出貨，缺陷立刻修正
S	簡化 (Simplify): 指工作內容和步驟的簡化，亦指動作的簡化，能量的節省	對正在調查中要完成的操作提出疑問，進行步驟或動作的簡化。例如產品設計、材料、工具設備、加工技術、夾具和固定裝置、速度和進給率、工作條件、操作行為等，加以檢視與確認。

□ 快速換模技術 (Single-Minute Exchange of Die, SMED) (新鄉重夫 Shingo, 1985)

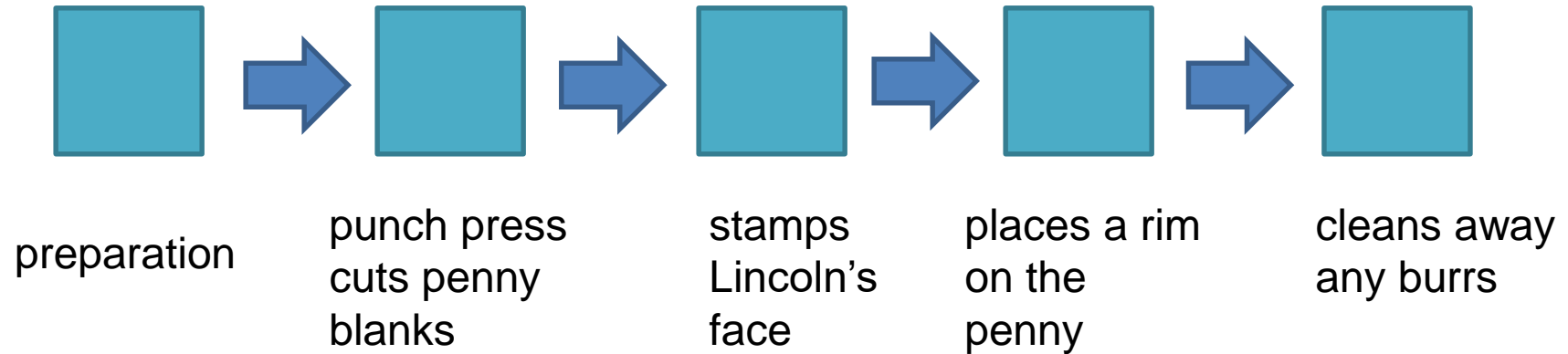
- 1.記錄整個換模(線)現況過程和時間
 - 工作研究：人機程序圖、時間與動作研究(time-motion study)
- 2.區分內部換模與外部換模
 - 內部換模：指必須在機器停止生產狀態下，才能進行的換模動作。
 - 外部換模：指機器在生產運轉中，仍然可以進行的換模動作。
- 3.將內部換模作業儘可能轉到外部換模作業
 - 工具、模具、零組件標準化，不尋找、不移動、不多用
 - 工具預熱、預裝配、預設定、預清潔、預熱等等
- 4.改善內部換模
 - 平行作業
 - 工具放置的方法/位置統一/尺寸統一
- 5.改善外部作業
 - 把工具/規尺存放在機器旁邊
 - 備好工具更換準備的核查清單、提供詳細的工具更換流程記錄單
- 6.標準化新的換模準備作業

□ Little's Law

- 等候線理論(queueing theory)著名的理論之一
- 關鍵在製品水準(critical WIP, W_0)，也就是在沒有壅塞現象發生的情況下，WIP的水準會等同於產線最大的產出率(也就是瓶頸產出率 r_b)，乘上該情況下所呈現的最小生產週期時間(T_0)
- 推導出 $W_0 = r_b \times T_0$
- $WIP = TH \times CT$ or $L = \lambda W$
- $L = \lambda W$ ，其中 λ 是期望顧客來到率(expected arrival rate)； L 是等候線系統中的期望顧客人數(expected number of customers)； W 是等候線系統中的期望等待時間(expected waiting time)



□ The Penny Fab



□ 案例

- 流水線生產系統， N 代表一條產線有多少工作站， t 代表每個工作站的加工時間。一個流水線有五個工作站($N = 5$)，每個工作站花費0.5小時生產一個產品($t = 0.5$ hours)，假設沒有任何製程變異(例如機台當機變異、加工時間變異)。在最佳績效(best case)下，可推得下表

表 2.3 最佳績效 Little's Law 的計算

在製品數 (WIP)	產線產出率 TH (個/小時)	生產週期 CT (小時)	WIP=TH × CT
1	$1/2.5=0.4$	2.5	1
2	$2/2.5=0.8$	2.5	2
3	$3/2.5=1.2$	2.5	3
4	$4/2.5=1.6$	2.5	4
5	$5/2.5=2$ (r_b)	2.5 (T_0)	5 (W_0)
6	$5/2.5=2$	3.0	6
7	$5/2.5=2$	3.5	7
8	$5/2.5=2$	4.0	8
9	$5/2.5=2$	4.5	9

The Penny Fab

□ WIP=1

● T=0



● T=0.5



● T=1.0



● T=1.5



● T=2.0

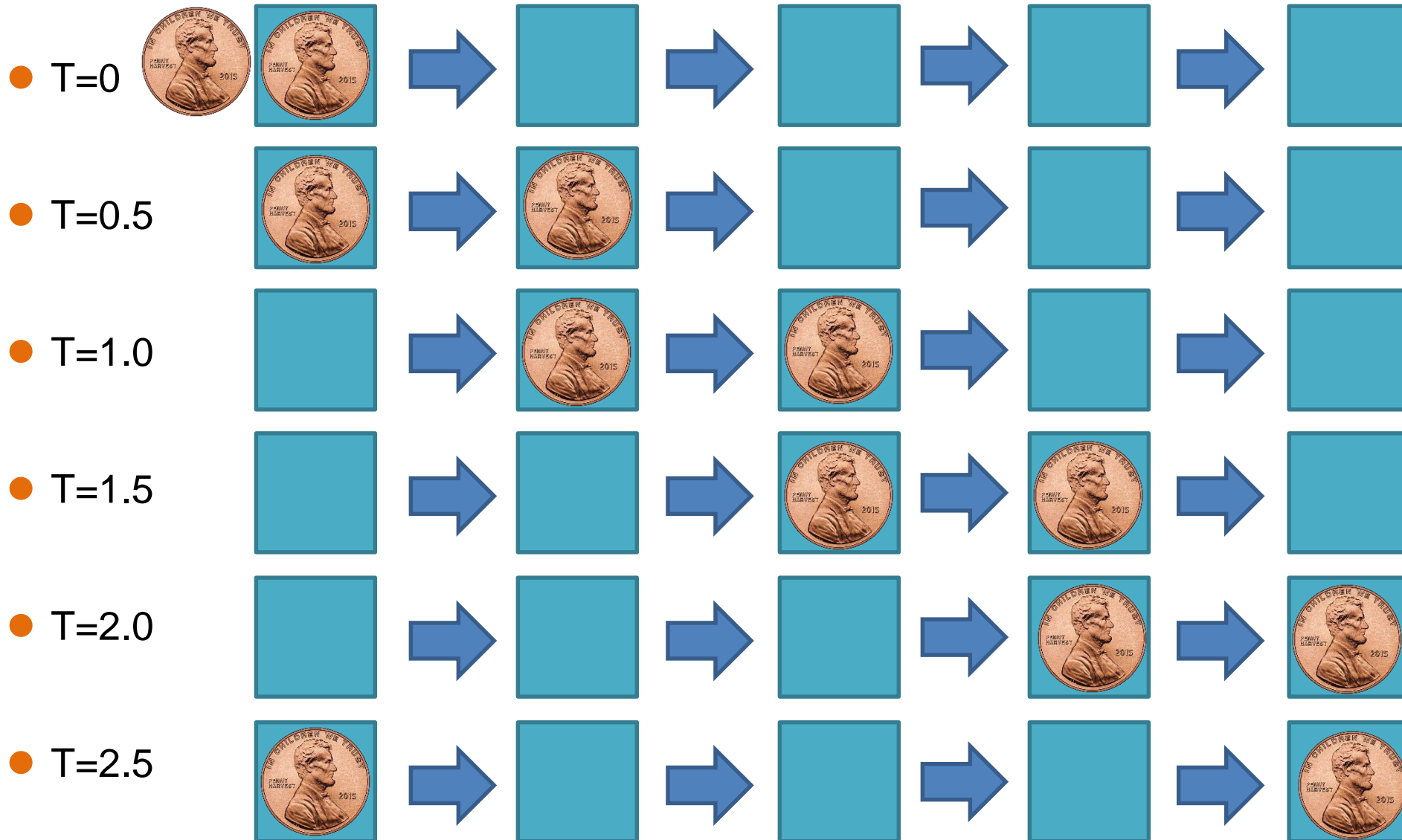


● T=2.5



The Penny Fab

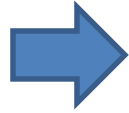
□ WIP=2



The Penny Fab

□ WIP=3

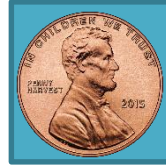
● T=0



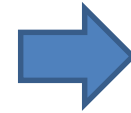
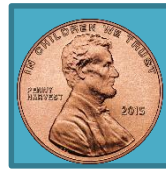
● T=0.5



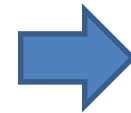
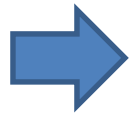
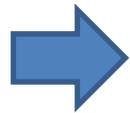
● T=1.0



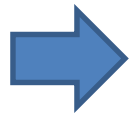
● T=1.5



● T=2.0

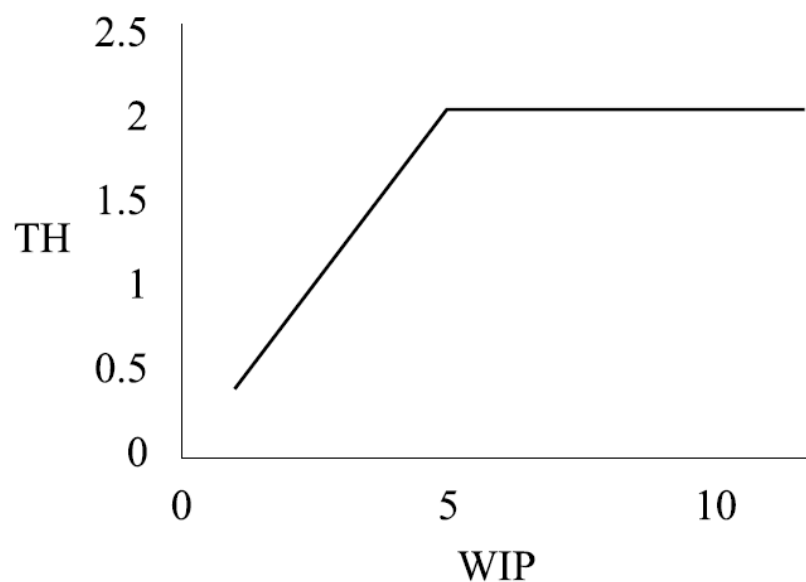


● T=2.5

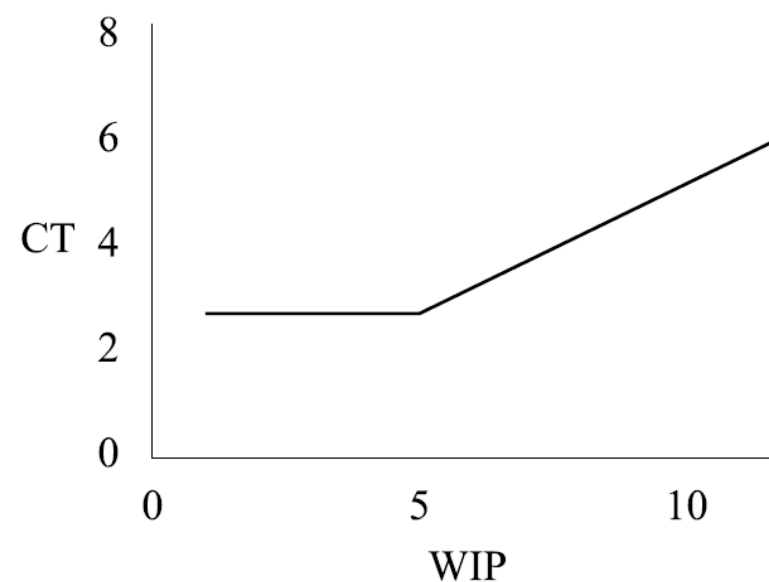


□ 案例

- 當產線投產量從零開始增加，產線產出率TH一開始會增加，到WIP為5個的時候，產出率開始固定持平為2個/小時；另一方面，生產週期CT隨著WIP增加，一開始會持平為2.5小時，到WIP為5個的時候，生產週期開始惡化且增加。在這案例，關鍵在製品水準 $W_0=5$ 個，一旦投產量過了這個門檻，壅塞現象發生而使得WIP開始推積且CT惡化。



(a)WIP 與 TH 的關係

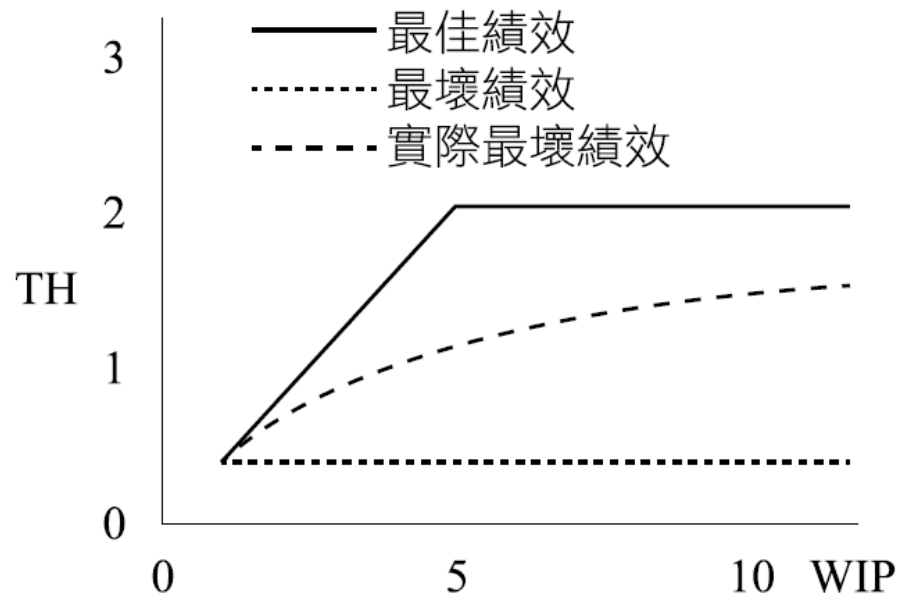


(b)WIP 與 CT 的關係

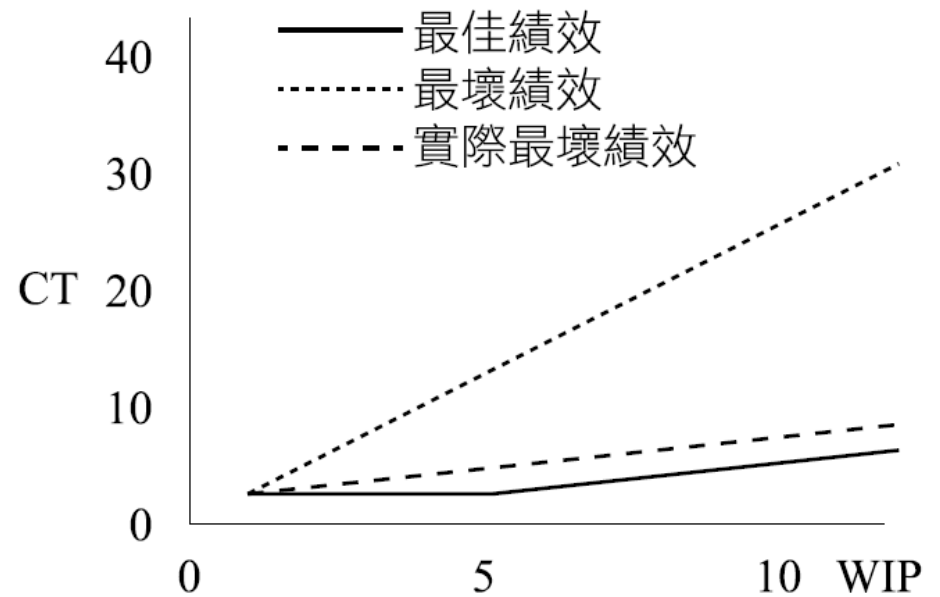
圖 2.10 最佳績效 Little's Law 的示意圖

■ 考慮此流水線最佳績效(best case)、最壞績效(worst case)與實際最壞績效(practical worst case)的比較

表 2.4 最佳績效、最壞績效與實際最壞績效比較			
	最佳績效 (best case)	實際最壞績效 (practical worst case)	最壞績效 (worst case)
一個流水線， 每個工作站只 有一個機台	產線擁有最大的產 出率為瓶頸產出 率，以及最小生產 週期時間	在考慮產線平衡的情 況下，工件平均地分 散在各工作站	產線擁有最小產出 率（ i.e.所有工作站 加工時間加總的倒 數），以及最大生 產週期時間
CT(w)	$\begin{cases} T_0, & \text{if } w \leq W_0 \\ w/r_b, & \text{otherwise.} \end{cases}$	$\begin{aligned} & N \left[1 + \frac{w-1}{N} \right] t \\ &= Nt + (w-1)t \\ &= T_0 + \frac{w-1}{r_b} \end{aligned}$	$\frac{w}{TH(w)} = wT_0$
TH(w)	$\begin{cases} w/T_0, & \text{if } w \leq W_0 \\ r_b, & \text{otherwise.} \end{cases}$	$\frac{w}{CT(w)} = \left[\frac{w}{W_0 + w - 1} \right] r_b$	$1/T_0$
備註		單一工作站 $CT = [1 + \frac{w-1}{N}]t$; 使用 Little's Law 計算 TH	決定好 TH 後，使 用 Little's Law 計 算 CT



(a) WIP 與 TH 的關係



(b) WIP 與 CT 的關係

圖 2.11 最佳績效、最壞績效與實際最壞績效示意圖

□ 最佳績效、最壞績效與實際最壞績效的管理意涵可釐清生產線目前營運的績效狀況是否合理

□ 案例

- 印刷電路板工廠，其所有工作站加工時間加總 $T_0 = 40$ 小時，產線瓶頸站產出率 $r_b = 120$ 個/小時
- 若今天工廠CT為20天(也就是480小時，假設工廠24小時生產)，WIP目前有48,000個，其現在的TH為 $WIP/CT=100$ 個/小時
- 目前工廠的產出率為最佳績效產能的 $100/120=83\%$ ，WIP 為關鍵在製品水準 W_0 的 $48,000/4,800=10$ 倍，生產週期為加工時間的 $480/40=12$ 倍。
- 把目前的工廠績效跟實際最壞績效(PWC)作一比較，我們可以得知：
 $WIP=48,000$ 時，實際最壞績效的 $TH = \left[\frac{w}{W_0 + w - 1} \right] r_b = \left[\frac{48000}{4800 + 48000 - 1} \right] 120 = 109.093$ 會比目前的工廠狀態 $TH=100$ 來的好
- 對於實際最壞績效來說，如果要做到 $TH=100$ ，其所需投入產線的WIP量應為23995個
- 此WIP數量也遠比目前工廠48000來的低許多，約為50%左右。由此可知，目前工廠績效甚至比學理上實際最壞績效來的糟糕許多

□ 案例：工廠績效定位

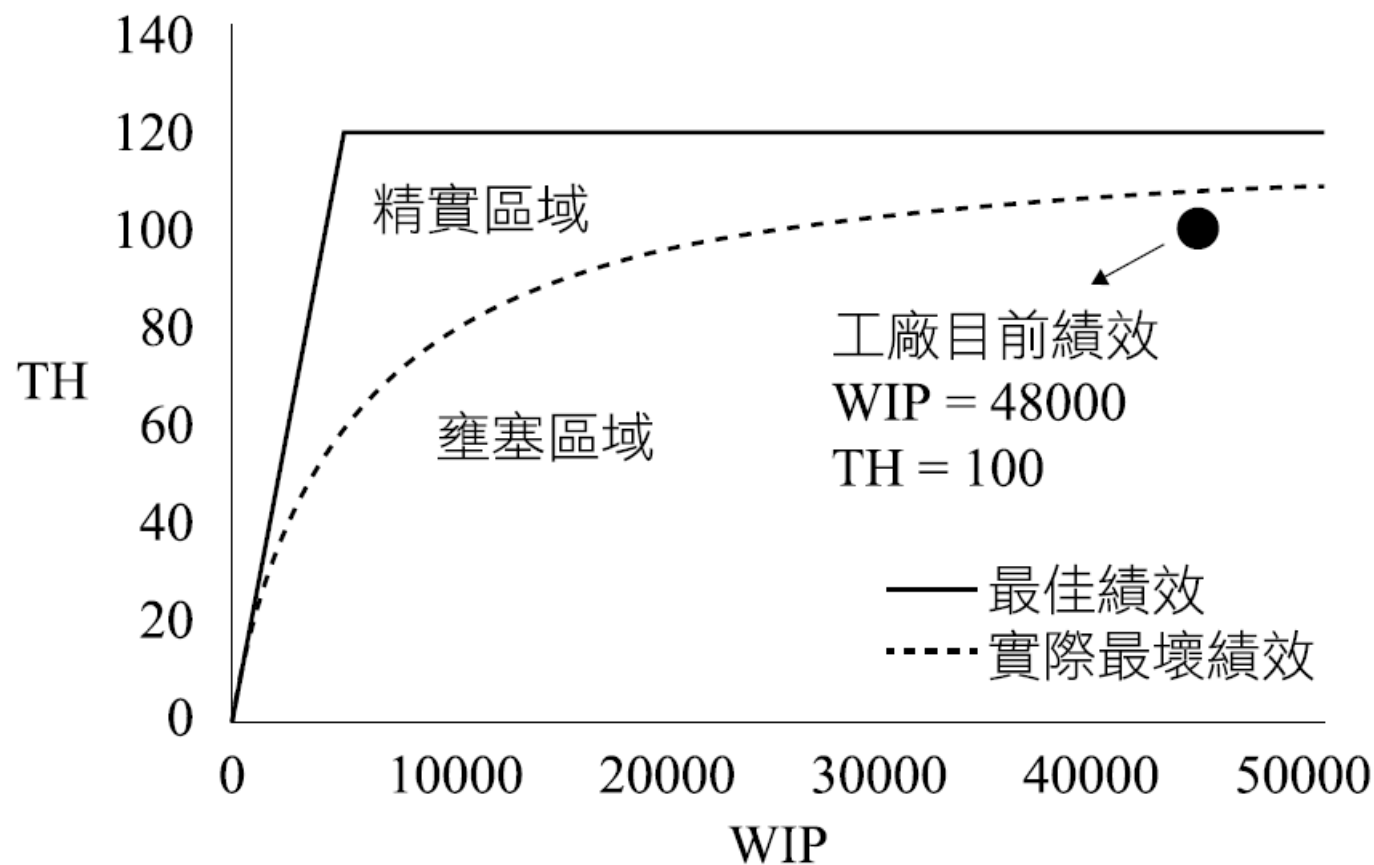


圖 2.12 工廠績效定位

品質與良率

品質與良率(yield)也是製造管理的重點之一

- 若一流水線有五個工作站(s)，每個工作站有一個機台，其加工時間小時服從常態分配 $T_s \sim \text{Normal}(0.5, \sigma^2)$ ，上一個生產完成品到下一個生產完成品的時間間隔為 $T = \max\{T_1, T_2, T_3, T_4, T_5\}$ ，也就是以瓶頸站為主要限制。
- 若為了產出率，每工作站生產時間限制 L ，生產完成品的時間間隔為 $T_L = \min\{T, L\}$ 。當生產時間不夠($T > L$)，則工件加工不完全產生不良品。
- 在給定要求產出率的情況下，加工100個產品(樣本大小100)，重複100次(replications=100)的模擬實驗所得出的平均品質結果如下圖，其中 $TH_L = 1/L$ 為給定生產時間限制下的產出率。

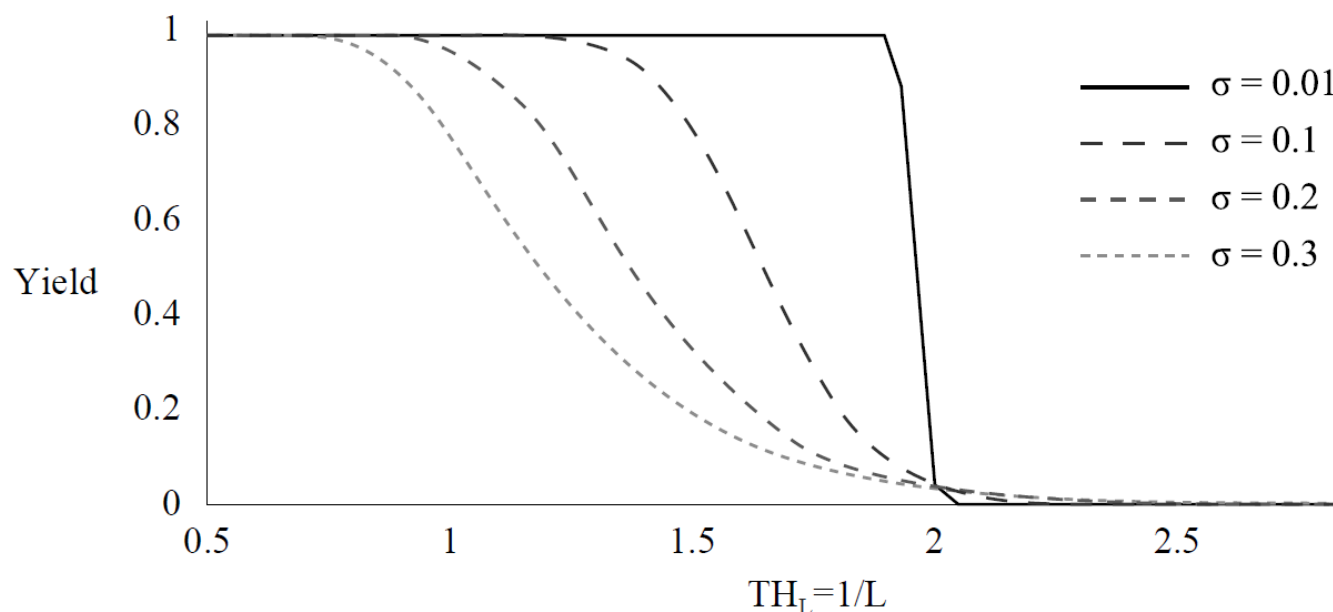


圖 2.13 產出率、良率與加工時間變異間的關係

□ 兩個結論

- 給定同樣的加工時間變異(例如 $\sigma = 0.1$)，產出率要求愈高，在過了某個門檻(threshold)後良率會急速惡化。
- 各工作站生產加工時間變異愈大，在要求一定的生產率下(例如 $TH_L=1.5$)，良率會顯著惡化(例如加工時間標準差0.1時良率約為0.8，但標準差0.3時良率已降為約略0.2)。如果從另一視角，在要求一定的良率(e.g. 0.8)情況下，製程工時間變異大，產出率要求會急速地放慢。

□ 由此可知，變異對於產出率或良率，皆有著至關重要的影響。

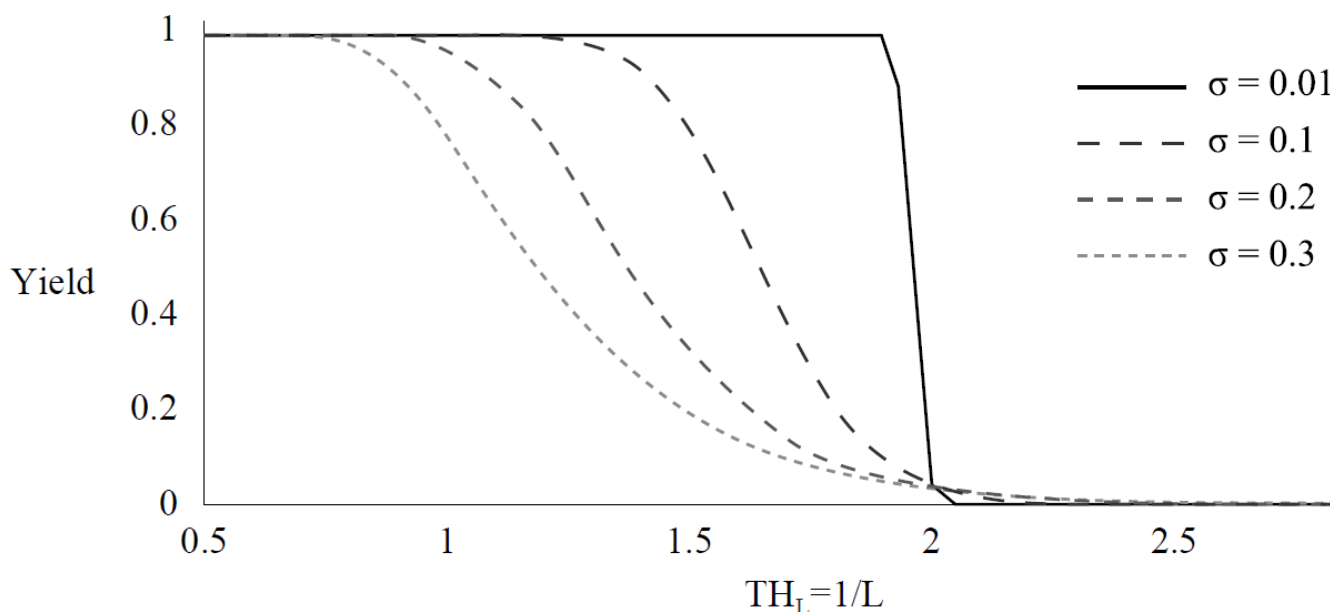


圖 2.13 產出率、良率與加工時間變異間的關係

製造系統的變異

製造系統的變異

- 研究工人加工時間變異，大部分發現分布呈現右(正)偏態(right-skewed distribution)，大多時候工作加工時間正常，然而極少數的工作造成加工時間過長而有長尾的現象。此加工時間變異，也造成了產出量的變化。
- 「製程變異性」(process variability)
 - 機台加工時間變異性 (process time variability)
 - 機台故障變異性 (outage variability) : MTTF、MTTR、MTBF
- 「流動變異性」(flow variability)
 - 來自於前製程的狀態，其主要為流動變異性(inflow variability)
- 「變異係數」(coefficient of variation, CV)

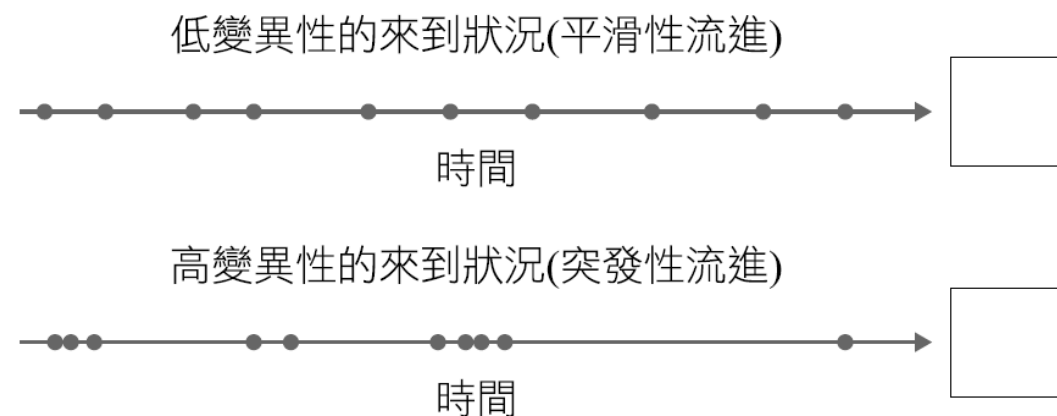


圖 2.15 流進變異性

製造系統的變異

□ 機台故障變異性

- 假設有機台A與機台B，兩機台有相等的產出率(throughput)與可用率(availability)，分別為每小時產出5個工件(5 jobs/hr)與可用率80%。然而機台A與機台B呈現不同的機況：機台A不常「當機」(breakdown)、但一當機維修時間較長；另一方面，機台B常當機、但當機可在短時間內修復。
- 請問哪一種機台對於生產線的影響較大？有效的加工時間變異如何？
- 符號： \bar{t}_0 工件平均加工時間、 σ_0 加工時間標準差、 \bar{t}_f 平均機台運行時間(MTTF)、 \bar{t}_r 平均機台維修時間(MTTR)、 σ_r 維修時間標準差、 $\bar{t}_f + \bar{t}_r$ 為平均兩次當機的時間間隔(MTBF)

— 加工時間變異係數 $CV_0 = \frac{\sigma_0}{\bar{t}_0}$

— 維修時間變異係數 $CV_r = \frac{\sigma_r}{\bar{t}_r}$

— 機台可用率 $Avail = \frac{\bar{t}_f}{\bar{t}_f + \bar{t}_r}$

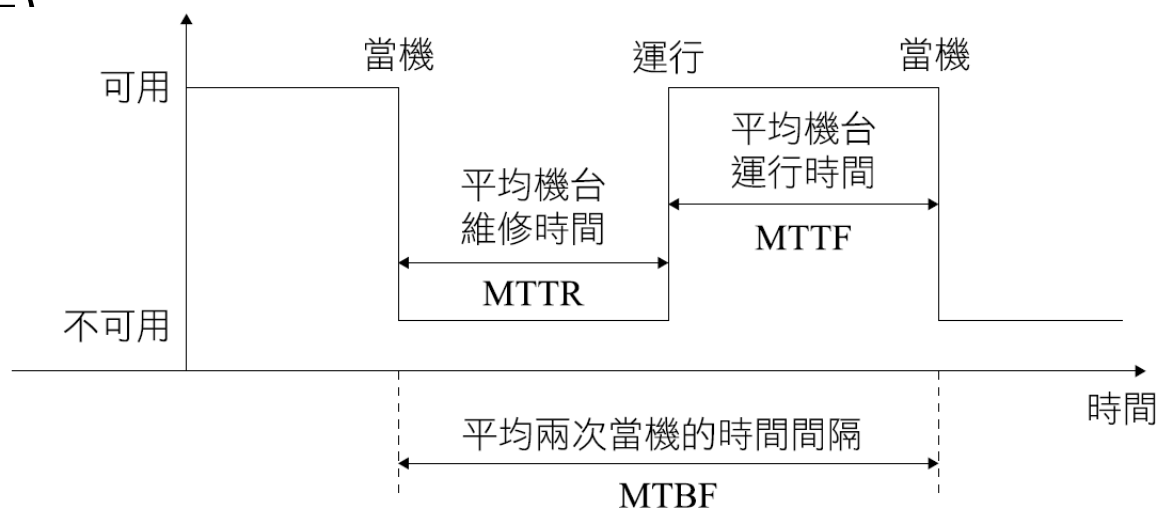


圖 2.14 MTTR、MTTF 與 MTBF

□ 機台故障變異性

- 若兩機台 $\bar{t}_0 = 12$ 分鐘、 $\sigma_0 = 3$ 分鐘、 $CV_0 = 3/12 = 0.25$ ，比較兩機台的可用率，結果是一樣的。
 - 機台A： $\bar{t}_f = 800$ 分鐘、 $\bar{t}_r = 200$ 分鐘， $Avail_A = 800/(800 + 200) = 0.8$
 - 機台B： $\bar{t}_f = 100$ 分鐘、 $\bar{t}_r = 25$ 分鐘， $Avail_B = 100/(100 + 25) = 0.8$
- 考慮「有效加工時間」(effective process time)，其考慮了隨機「當機時間」(downtime)、「整備時間」(setup time)、以及外部影響
 - 有效平均加工時間 $\bar{t}_e = \frac{\bar{t}_0}{Avail}$
 - 有效加工時間標準差 $\sigma_e^2 = \left(\frac{\sigma_0}{Avail}\right)^2 + \frac{(\bar{t}_r^2 + \sigma_r^2)(1 - Avail)\bar{t}_0}{Avail \times \bar{t}_r}$
 - 有效加工時間變異係數 $CV_e = \frac{\sigma_e}{\bar{t}_e}$

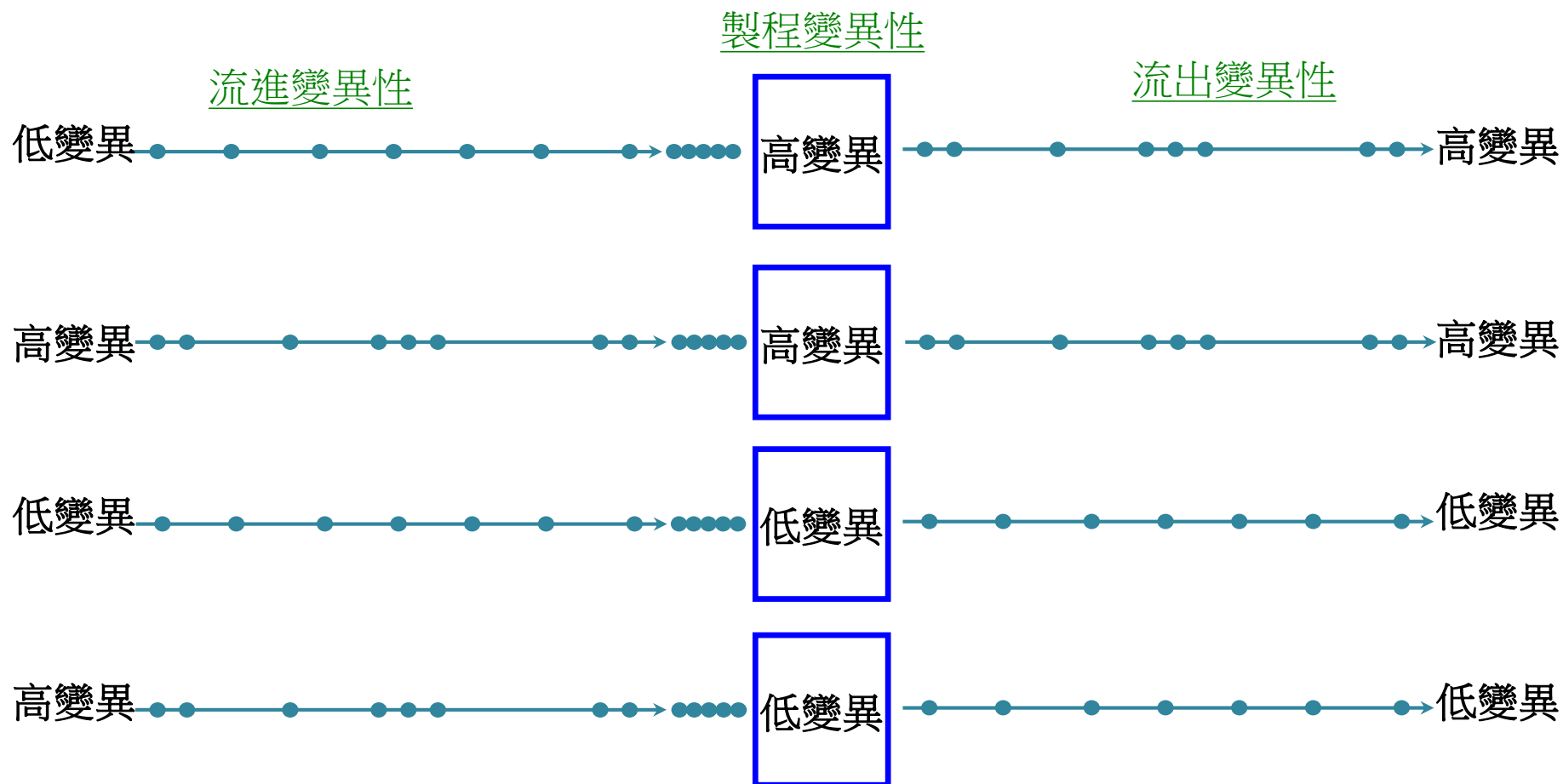
□ 機台故障變異性

- 由以上資訊，可得知兩機台 $\bar{t}_e = 12/0.8 = 15$ 分鐘、 $CV_r = 1$ 。
 - 若機台A的 $\sigma_r = 200$ 分鐘，
 - $\sigma_e^2 = \left(\frac{\sigma_0}{Avail}\right)^2 + \frac{(\bar{t}_r^2 + \sigma_r^2)(1-Avail)\bar{t}_0}{Avail \times \bar{t}_r} = \left(\frac{3}{0.8}\right)^2 + \frac{(200^2 + 200^2)(1-0.8)3}{0.8 \times 200} = 314.0625$
 - $CV_e = \sigma_e / \bar{t}_e = 17.722/15 = 1.181$
 - 若機台B的 $\sigma_r = 25$ 分鐘，
 - $\sigma_e^2 = \left(\frac{\sigma_0}{Avail}\right)^2 + \frac{(\bar{t}_r^2 + \sigma_r^2)(1-Avail)\bar{t}_0}{Avail \times \bar{t}_r} = \left(\frac{3}{0.8}\right)^2 + \frac{(25^2 + 25^2)(1-0.8)3}{0.8 \times 25} = 51.5625$
 - $CV_e = \sigma_e / \bar{t}_e = 7.181/15 = 0.479$
- 因此，比較兩機台的有效加工時間變異係數，機台A的變異遠大於機台B。換言之，當兩機台有一樣的可用率時，我們傾向選擇雖常當機但能快速修好的機台B，此時機台變異較小，進而對產線整體績效變異影響較小。

製造系統的變異

□ 流動變異性

- 瓶頸站(high utilization station)的重要性

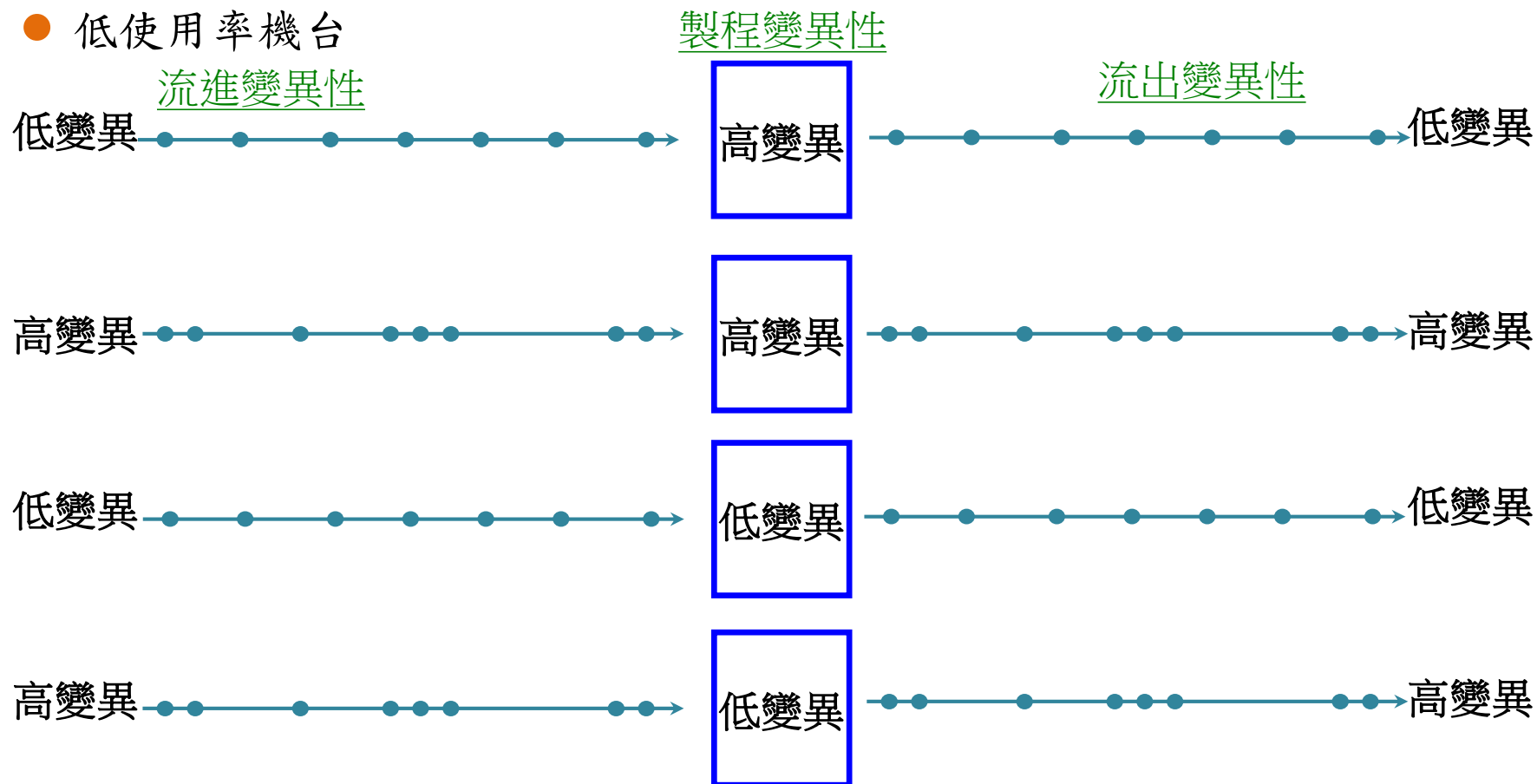


Check the **process variability** of (1) processing time (product); (2) MTTR & MTBF (equipment).

製造系統的變異

□ 流動變異性

- 低使用率機台



Check the **flow variability** out of a low utilization station is determined primarily by flow variability into that station.

□ 處理變異

- 找出變異的來源，加以一一排除
- 變異性共擔(variability pooling)
 - 批量處理(batch processing)
 - 獨立的變異性來源傾於相互抵消，從而降低了總變異性
 - 安全存貨累積(safety stock aggregation)
 - 一般來說，根據常用的存貨模型，考慮補貨前置時間、需求不確定以及顧客服務水準的情況下，製造商完成品的現有存貨總成本會大於只備該完成品其零組件(根據「物料清單」表展開)的現有存貨總成本，然後進行訂單組裝。
 - 等候線分享(queue sharing)
 - 在量販商場通常可以看到結帳時收銀台有多個通道可以個別排隊結帳，形成多條等候線；然而，在銀行或郵局經常在大門入口會需要先抽號碼牌使得顧客形成單一條等候線(single queue)。透過「等候線理論」可以證明，理論上來說抽號碼牌的單一等候線將在等候線上中會有較少「期望顧客人數」以及顧客會有較短的「期望等候時間」。有興趣的讀者可參閱相關<作業研究>的教科書。
 - 「長鞭效應」(Bullwhip Effect)
 - 由於工廠存在著上下游之間的相依關係，流動變異性在工作站之間環環相扣，甚至從產線末端顧客需求變異，進而造成產線往上游變異被逐步放大的影響，常藉由上下游工作站之間的資訊透明化(information transparency)來協助改善。

▣ 價值與價值流圖

▣ 原則、方法與效益

- (1) 消除浪費(waste)：八種浪費(8 muda) (Womack and Jones, 2003)
 - 運輸(transportation)：原物料、在製品、產品等在各工作站、供應商、客戶之間的搬運作業
 - 存貨(inventory)：擁有過多的原物料、在製品、成品存貨
 - 動作(motion)：作業員或器材操作過程中產生的不必要的動作，例如在組裝、檢驗、撿料(picking)、排序、堆疊、貯存等作業中
 - 等待(waiting)：等待搬運或等待到來的工具、原料、零組件來
 - 生產過剩(overproduction)：生產產品數量超過需求量
 - 過度處理(overprocessing)：過多不必要的處理或製程加工作業
 - 瑕疵(defects)：品質狀況所造成的成本，例如重工、報廢、檢查、維修等。
 - 無適才適所(eschewed talents)：員工的技能與所進行的工作事項並不匹配
- (2) 鑑別內外部產生變異並使用緩衝
- (3) 連續流(continuous flow)
- (4) 拉式生產系統(pull production system)
- (5) 持續改善

價值流圖(value stream mapping, VSM)

- 「價值」：以特定的價格在特定的時間能滿足顧客需求的特定商品。
- VSM 主要將價值流分解成可管理的部分，透過在圖（map）上的流動（flow）來驅動溝通討論（communicate）與尋求改善契機。

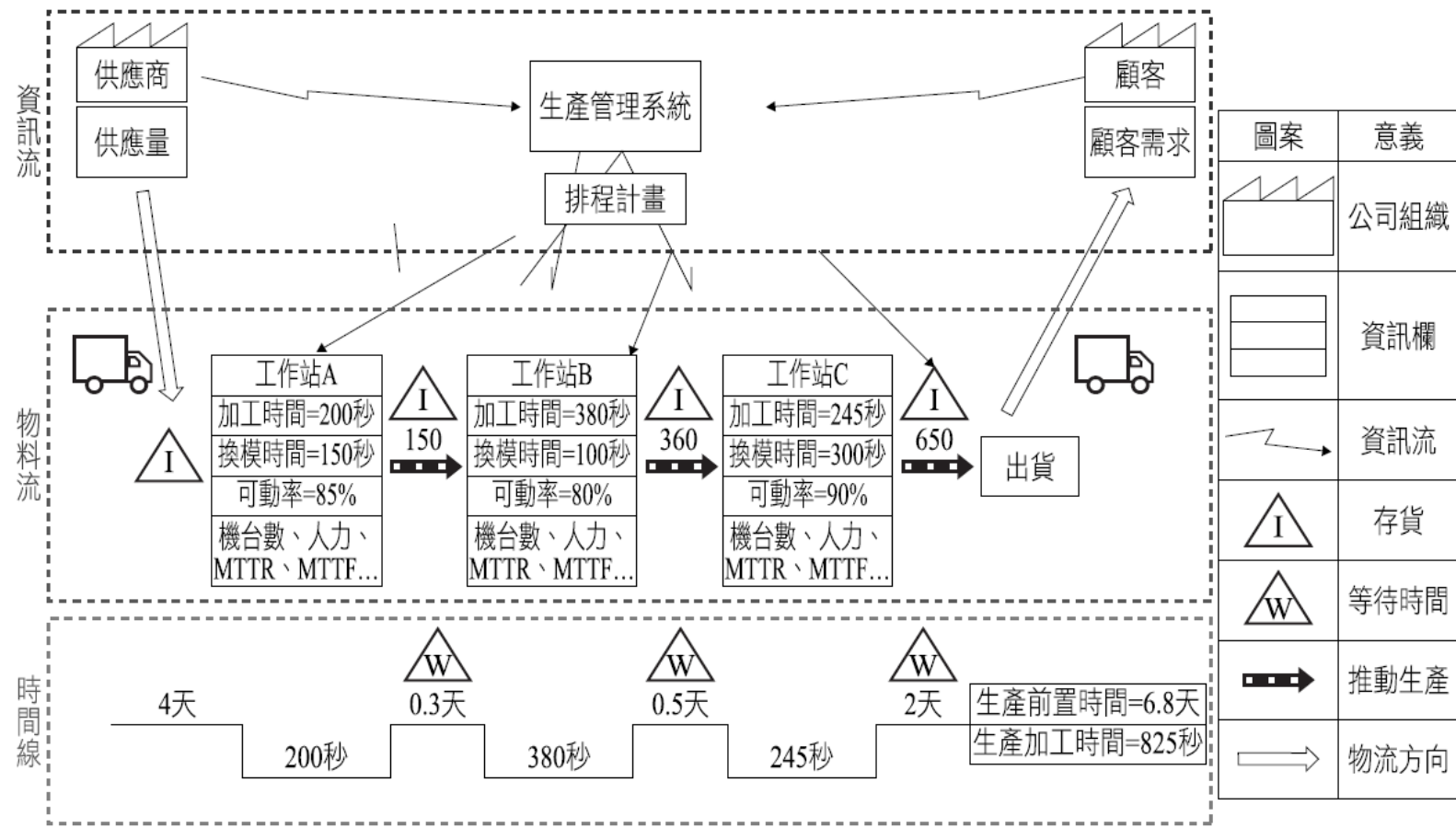


圖 2.19 價值流圖示意圖

拉式生產系統(pull production system)

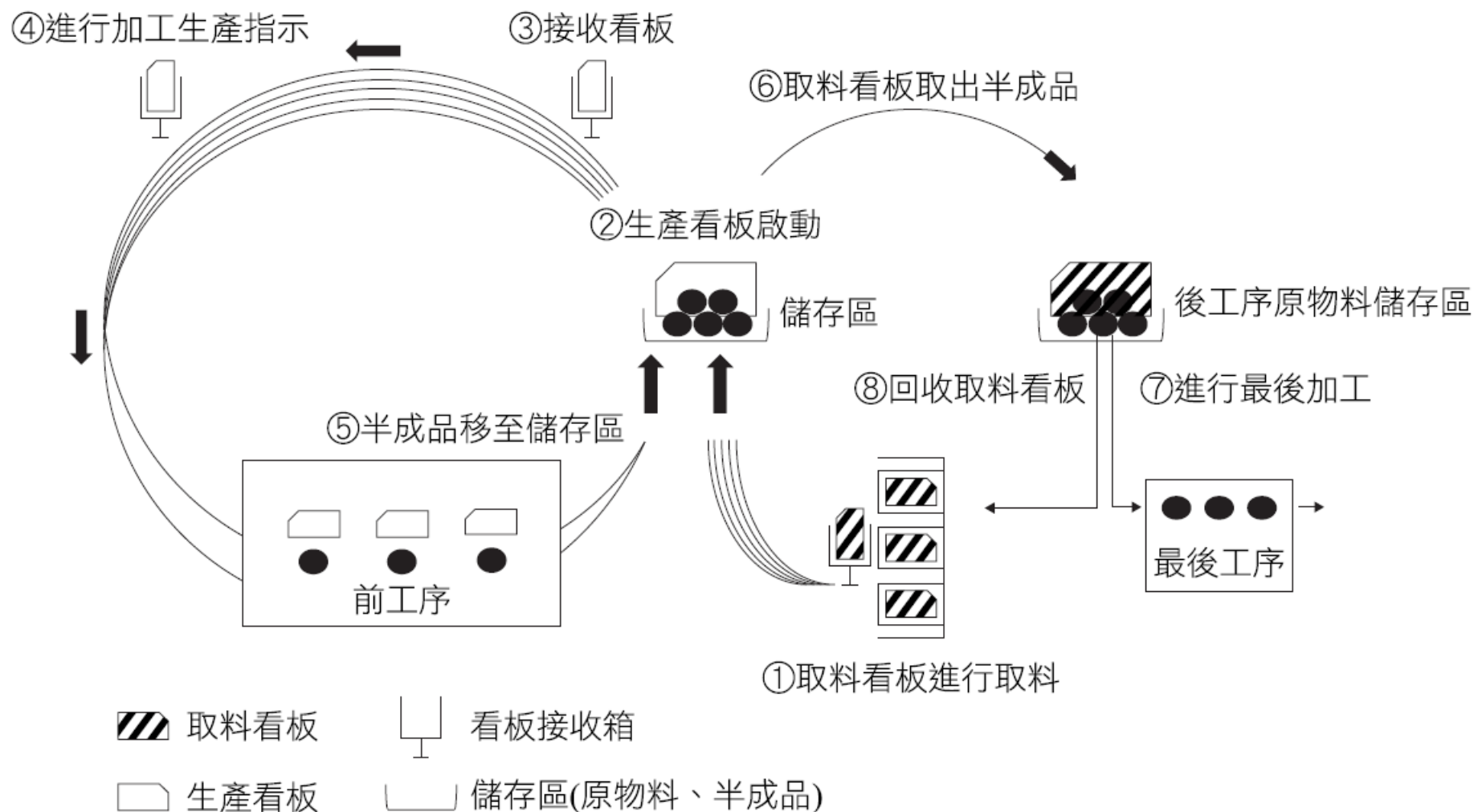


圖 2.20 看板式生產流程

Production System Simulation

生產系統模擬

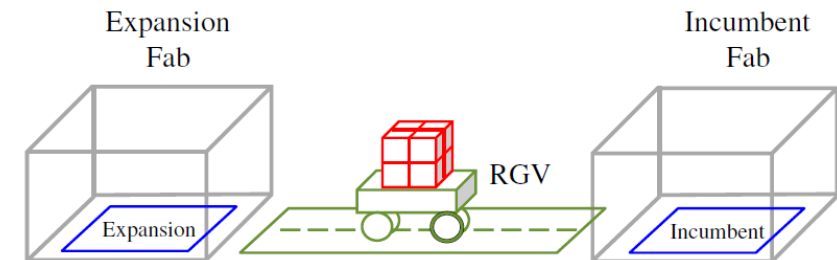
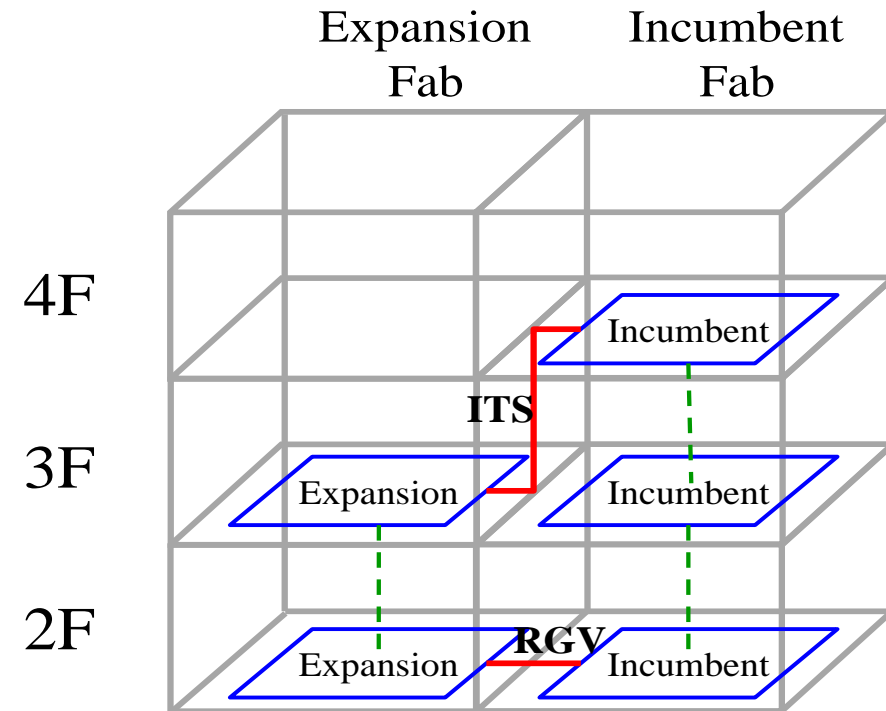
Lee, C.-Y., Chen, C.-H., and Chien, C.-F., 2014. A simulation analysis for evaluating TFT-LCD fab capacity expansion with a distant transportation problem. International Journal of Production Research, 52 (6), 1868–1885.

□ TFT-LCD Capacity Expansion

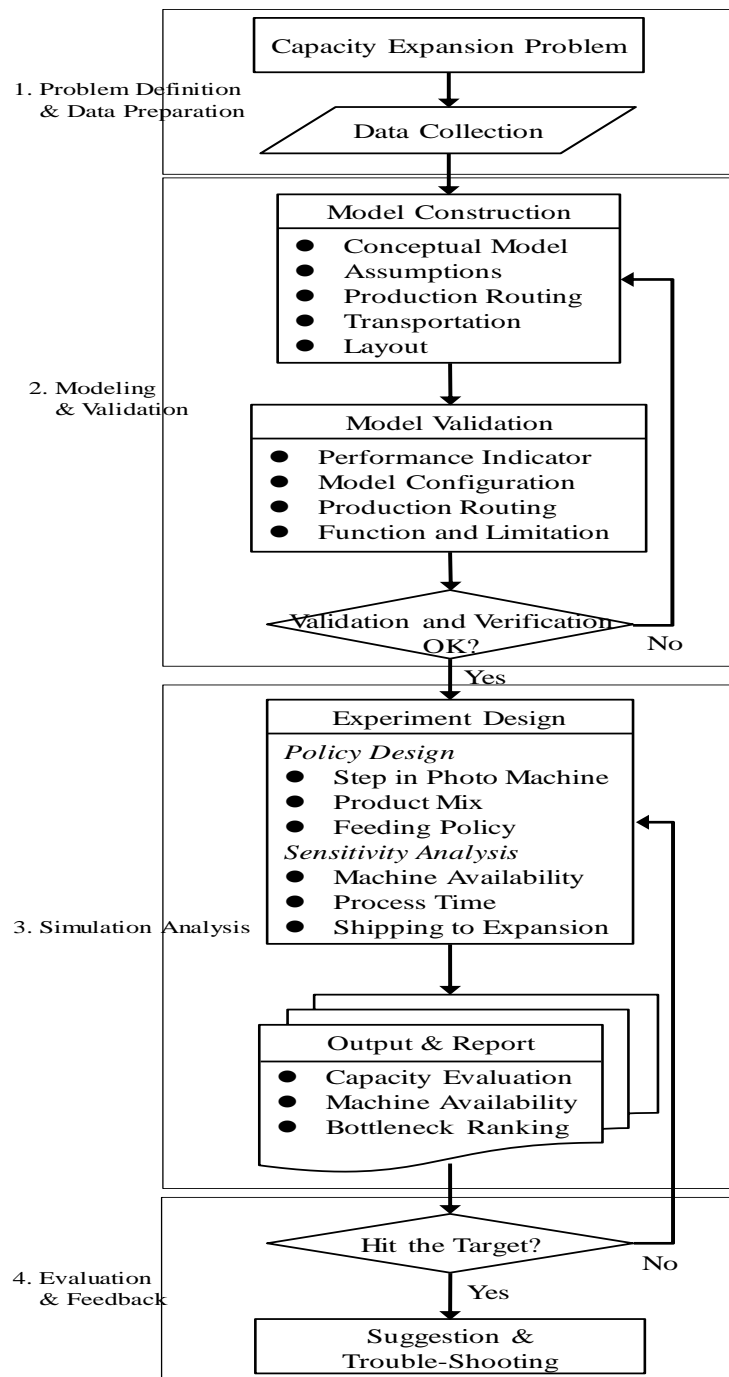
- evaluate the **capacity expansion** (3120 pieces per day) between a real incumbent fab and a planned expansion fab, assuming an increased possibility of a bottleneck shift due to the **long transport distance**.

□ Question

- (1) What is the **maximum capacity** the integrated fab can support?
- (2) Where are the **bottlenecks** and how do they shift?
- (3) What is the effect on productivity by **adding one photo layer** of photo machine in the expansion fab?
- (4) Can we find the best **product-mix, feeding policy, and WIP level**?
- (5) Which **production factors** are important and how to control them?



Lee, C.-Y., C.-H. Chen, and C.-F. Chien, 2014. A Simulation Analysis for Evaluating TFT-LCD Fab Capacity Expansion with a Distant Transportation Problem. International Journal of Production Research, 52 (6), 1868–1885.



- (1) Routing table (RouteID, OperationID, PrecedingOperationID, etc.).
- (2) Machine data (Set-upTime, SetupFrequency, etc.).
- (3) Batch data (BatchID, RouteID, BatchCurrentOperationID, etc.).
- (4) Process time (RouteID, OperationID, MachineID, ProcessTime, etc.).
- (5) Wafer per Hour (WPH) data.
- (6) Layout.
- (7) Parallel-machine data.
- (8) Product mix data.
- (9) WIP status data.
- (10) Mean time to repair (MTTR), mean time between failure (MTBF).
- (11) AMHS transportation table.
- (12) Rework routing and rework rate, etc.

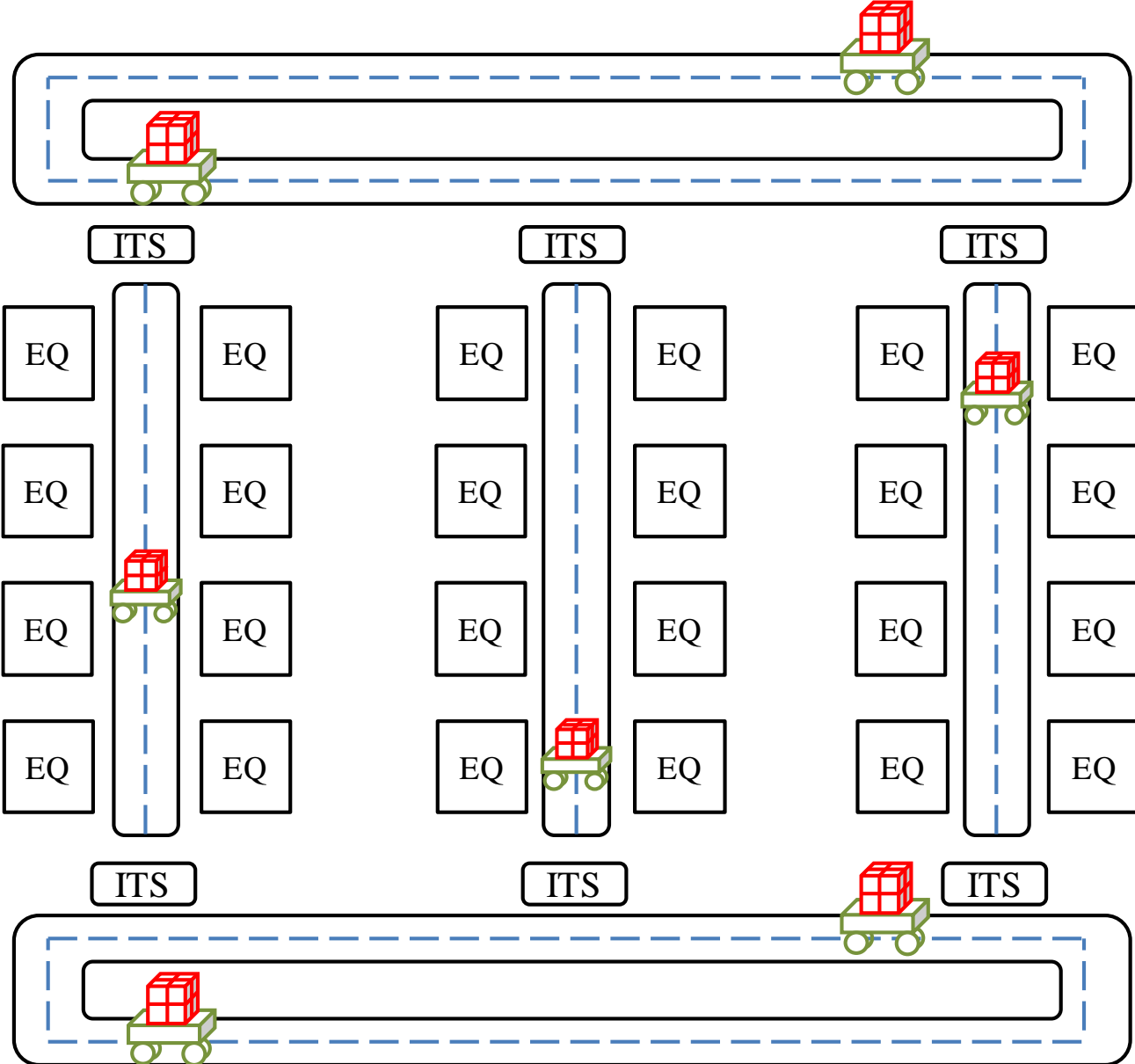
□ KPI

KPI	Definition
Throughput	Number of finished goods produced per day
Cycle time	Average process time for product from the beginning of process until leaving the production system
WIP level	Average number of work-in-process per day
Availability	Utilization of the machine considering downtime

$$\text{Availability} = \frac{\text{production time}}{\text{total time}} = \frac{\text{production time}}{\text{equipment uptime} \times \frac{(\text{MTTR} + \text{MTBF})}{\text{MTBF}}} = \text{Utilisation} \times \frac{(\text{MTBF})}{(\text{MTTR} + \text{MTBF})}$$

□ Function

Functions	Explanation
Performance index	Includes throughput, cycle time, WIP level, machine utilization, etc., supporting scenario analysis
WIP visualization	Show WIP level by each EQgroup
Daily report	Show daily status of fab operation
Flexible design	Easy to change configuration and structure
Rework analysis	Control rework flow and quantity
Machine failure and repair	Consider MTTR and MTBF factors
Entity process flow	Understand operation behavior and quickly find the bottleneck
Product mix analysis	Change the percentage of product combination
CONWIP	Set CONWIP level to maintain fab operation



Plant Simulation

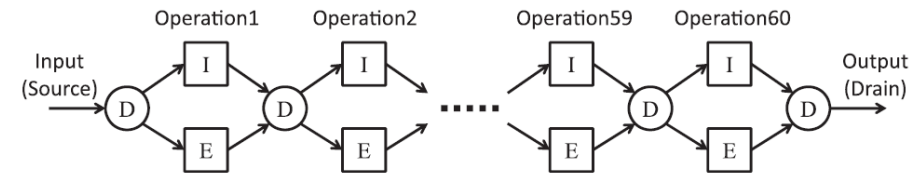


Figure 2a "Unfolding"- a serial model

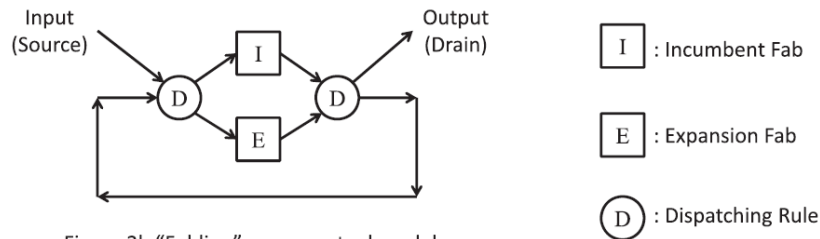
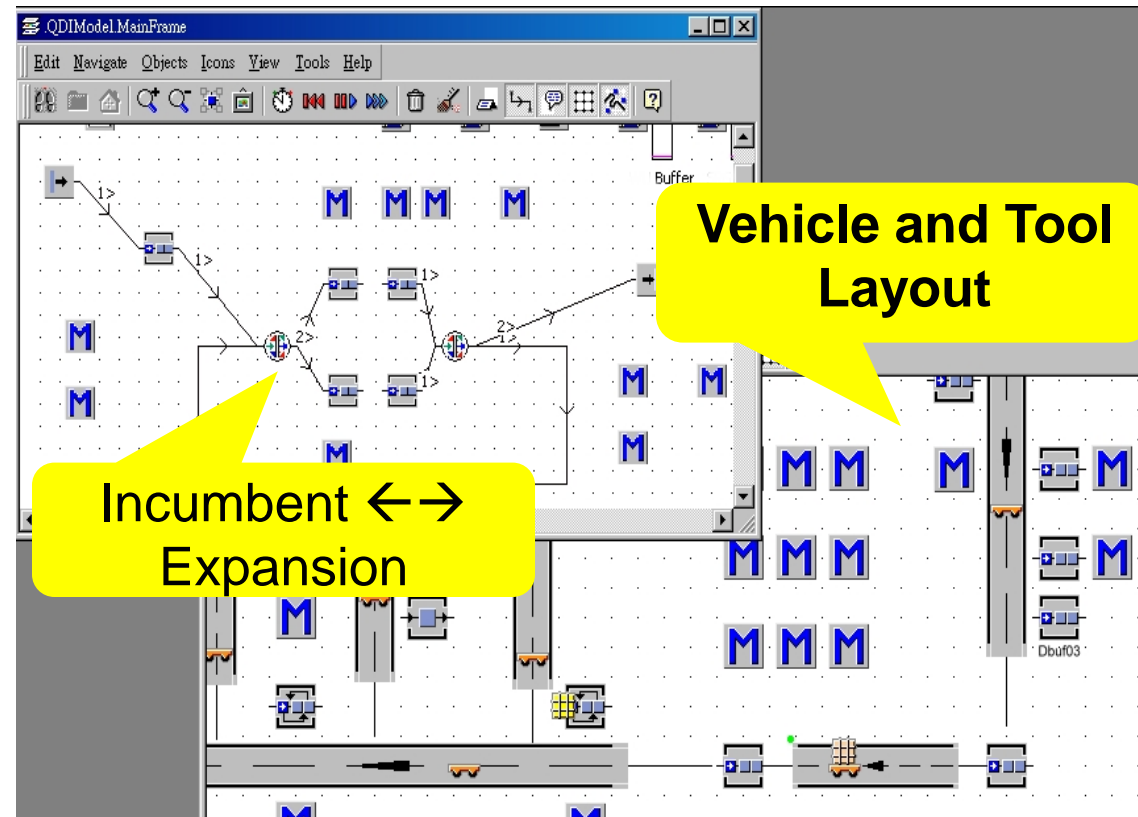


Figure 2b "Folding"- a conceptual model



Validation and Verification

- **信度檢驗(Verification)**：模擬模式是否與定義的問題結構相符，即檢視模擬式中邏輯或程原始碼是否正確。
- **效度實證(Validation)**：模擬模式之概念是否與真實系統相符，驗證模擬輸出值的正確性。並回顧模擬實驗目的，觀察此模型是否能正確描述真實系統運作情形，即將模擬模型輸出值與真實系統所蒐集到資料比對。

□ Design of Experiments

- Policy Design
- Sensitivity Analysis

Category	Case	Item	Level 1	Level 2	Level 3
Policy design	1	One step in E_PH01_01*	On	Off	
	2	Product mix	Origin	F↑ and B↓	F↑ and C↓
	3	Feeding policy	All per 24 h	Half series per 12 h	Half product per 12 h
	4	WIP level	1140 lots	1080 lots	
Sensitivity analysis	5	Availability of I_PH01	87%	90%	
	6	Process time	Origin	I_PH01 – 3 min	I_PH01 & I_DRY04 – 3 min
	7	Shipping to expansion fab	360	288	431

*To describe the simulation result, the machine code is: first digit: incumbent fab (I) or expansion fab (E); middle 4 digits: EQgroup e.g. PH01, DRY02, CVD01, etc.; last 2 digits: serial number/numerical order. E.g.: E_PH01_01 represents the 1st photo machine at 1st photo EQgroup of the expansion fab.

Capacity analysis of **turning off** one specific step in E_PH01_01.

Fab	Capacity expansion (piece per day)						
	2200	2300	2400	2500	2600	2700	2800
Incumbent Bottleneck	OK	OK	OK	NO I_PH01			
I + E fab Bottleneck				OK	OK	OK	NO E_PH01_02

Capacity analysis of **turning on** one specific step in E_PH01_01.

Fab	Capacity expansion								
	2200	2300	2400	2500	2600	2700	2800	2900	3000
Incumbent Bottleneck	OK	OK	OK	NO I_PH01					
I + E fab Bottleneck				OK	OK	OK	OK	OK	NO E_PH01_01

□ Bottleneck analysis of **expansion** fab (ranked by availability)

Ranking	Machine	Avg. Avail.
1	E_PH01_01	0.8718
2	E_PH01_02	0.6605
3	E_PH03_01	0.5618
4	E_WET01_01	0.5056
5	E_DRY03_01	0.4932

□ Bottleneck analysis of **incumbent** fab (ranked by availability)

Ranking	EQgroup	Avg. Avail.	Avg. WIP (lots)
1	I_WET02	0.9591	7.48
2	I_DRY02	0.9370	18.52
3	I_IN03	0.9064	3.54
4	I_CVD01	0.9021	13.63
5	I_IN04	0.8688	3.88
6	I_PH01	0.8681	132.12
7	I_DRY03	0.8679	2.00
8	I_IN05	0.8665	3.00
9	I_DRT03	0.8640	3.20
10	I_PVD03	0.8639	1.99

□ Product mix analysis

- with turning on the specific step in E_PH01_01
- The first alternative is default product combination.
- The second alternative is increasing 10% (the percentage of whole capacity) in product F, yet decreasing 10% in product B.
- The third alternative is increasing 10% in product F, yet decreasing 10% in product C.

	Original	F↑, B↓	F↑, C↓
Throughput (pieces per day)	2958	2985	2970
Cycle time	8.04	7.68	8.39
WIP (lots)	1140	1140	1140
Bottleneck	E_PH01_01	E_PH01_01	E_PH01_01

□ Feeding policy analysis

- A **poor** feeding policy can create **WIP 'bubbles'** and lead to an **unbalanced** production line.
- The first feed entities into the system **once a day** (24 h) with 3120 pieces
- The second is **twice a day** (12 h) and each time **feeding a half of the product series** (1560 pieces). (eg. if rank order is A, B, C and D, then a half of the product series is to feed product A and B)
- The third alternative is twice a day and each time **feeding a half of each product type** (1560 pieces). For instance, a half of each product type is to feed a half of product A, B, C and D, respectively.

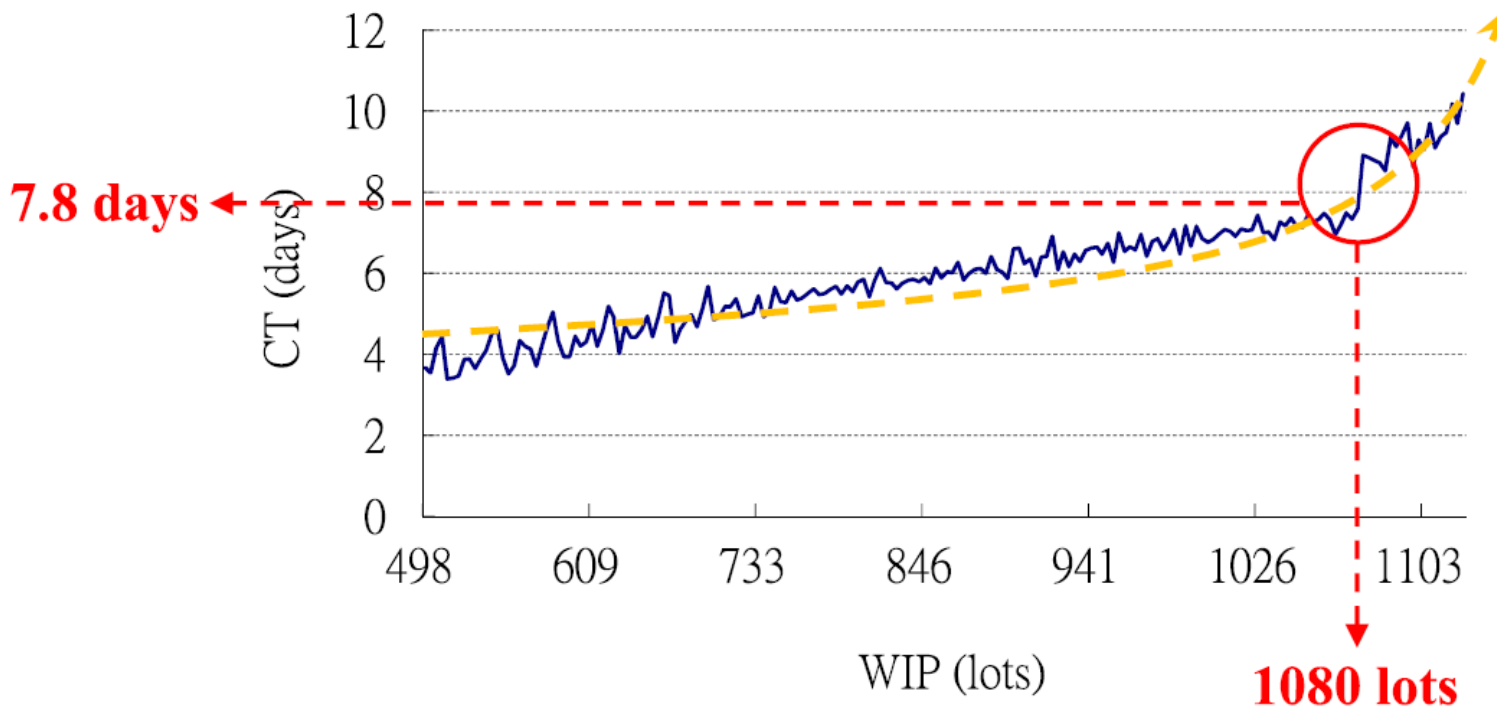
Alternative	Alternative 1	Alternative 2	Alternative 3
Name	All products per 24hr	Half of product series per 12hr	Half of each product type per 12hr
Throughput (pieces)	2958	3012	2985
Cycle time	8.04	8.10	8.59
WIP (lots)	1140	1140	1140
Bottleneck	E_PH01_01	E_PH01_01	E_PH01_01

□ WIP level decision

- Critical WIP: WIP level in which a line having **no congestion** would achieve maximum throughput (i.e. bottleneck) with minimum cycle time.

□ Little's Law (Little, 1961; 2011)

- $WIP = CT \times \text{Throughput}$ (in a long run)



Lee, Chia-Yen, C.-H. Chen, and C.-F. Chien, 2014. A Simulation Analysis for Evaluating TFT-LCD Fab Capacity Expansion with a Distant Transportation Problem. *International Journal of Production Research*, 52 (6), 1868–1885.

□ Sensitivity Analysis

- I_PH01 availability analysis
- Default: availability 90%

Alternatives	Availability: 87%	Availability: 90%	Availability: 93%
Throughput (pieces)	2958	2996	3005
Cycle Time	8.04	7.86	7.81
Bottleneck	E_PH01_01 (Step042) <u>Availability</u> E_PH01_01: 0.87 E_PH01_02: 0.66 I_DRY02: 0.937	I_DRY02 (Step170) <u>Availability</u> E_PH01_01: 0.72 E_PH01_02: 0.60 I_DRY02: 0.945	I_DRY02 (Step170) <u>Availability</u> E_PH01_01: 0.68 E_PH01_02: 0.55 I_DRY02: 0.951

□ 製造系統分析的方法

- 需要花更多時間去瞭解分析的方法論與製造現場的「**領域知識**」(domain knowledge)與使用模型來改善製造系統
- 製造管理需要一個「**科學**」的思維與方法來透過「**數據**」解析
- 「**系統**」的方法(含系統思維、系統工程、系統分析與設計)對於製造系統分析與管理是有價值的工具
- 一個好的「**敘述性分析**」能產生一個好的「**處方性分析**」結果
- 模型是必要的，雖並不完整，但是為製造經理必要的技能之一
- 大多時候領域知識與經驗(也就是工人智慧)，As-Is 已經是很接近最佳解的作業模式，因此如果能把As-Is流程做一部分地自動化，便改善了效率
- 新科技的導入過程需要確認**潛在風險**：若改善了效率但卻失去了原本工人智慧的有效性，不一定值得
- As-Is是長期工人智慧協調的結果，可能與學理想法有矛盾之處，但應相互尊重。
 - 舉例來說，現場時常是希望產線不平衡的，由於產能成本在每個工作站不一定是相等的，這時候分析焦點集中(也就是瓶頸站)並可用80/20法則進行資源配置易於管理

- How Things Are Made | An Animated Introduction to Manufacturing Processes
 - https://www.youtube.com/watch?v=Um_g8sQ_p3Y



Thanks for your attention



NTU Dept. of Information Management
name: 李家岩 (FB: Chia-Yen Lee)
phone: 886-2-33661206
email: chiayenlee@ntu.edu.tw
web: <https://polab.im.ntu.edu.tw/>