



## 化工系程序控制課程實踐問題導向學習 接軌化工廠控制實務

劉佳霖\*

### 摘 要

「程序控制」是化工系畢業生在化工廠最實用的課程之一，旨在訓練學生藉由控制系統具有維持化工廠穩定操作的能力。然而，以往課程設計大多採數學方程式推導控制系統的原理與實作方法，無助於畢業生接軌化工廠控制實務。因此，本研究旨在探討改以製程動態模擬器Aspen HYSYS模擬操作單元與控制器，讓學生理解與應用控制系統經常使用的工具與方法，並結合「問題導向學習」(problem-based learning, PBL)完成製程操作問題，是否有助於接軌化工廠控制實務。本研究採個案研究法，參與者為大四學生A班40人，B班47人。A、B兩班使用相同的教科書，唯授課教師不同；B班教師採取傳統的數學公式推演教學方式，A班教師採用製程動態模擬器Aspen HYSYS引導學生利用程序控制的方法，並完成事先設計的製程操作問題。學習後成效調查顯示，A班學生具有較好的學習成效，較能分辨製程的受控及操作變數，以及測量訊號的傳遞方式。此外，在基於安全操作的考量下，較能具有設定控制閥作動模式能力，並較能理解製程問題且選擇適當的控制策略，也較能正確地配對受控及操作變數。

關鍵詞：問題導向學習 (PBL)、控制系統、程序控制、製程動態模擬器

---

\* 劉佳霖：東海大學化學工程與材料工程學系教授

電子郵件：jialin@thu.edu.tw

投稿收件日期：2019.10.04；接受日期：2020.02.25

## 壹、研究動機與目的

「程序控制」應該是最接近工廠日常生產操作的一門課，然而，大部分化工系畢業的學生，對於程序控制的了解，應該會認為是拉氏轉換（Laplace transform）的升級版，甚至部分的畢業生分辨不清受控變數（controlled variable）和操作變數（manipulated variable）的差異。可能的原因來自於授課內容抽象化，利用拉氏轉換將程序與控制器轉換成方程式，藉此表達控制理論及原理。這雖然有助於邏輯的推演及公式的推導，然而，大部分學生也就迷失在這些方程式中，無法理解程序控制這門課的實用性。

「程序控制」教科書 *Principles and Practice of Automatic Process Control*（以下簡稱教科書）（Smith & Corripio, 2006）在第1章簡介之後，學生可能在期中考前，都在研讀2~4章：程序模式抽象化的技巧。第5章介紹控制系統元件之後，在第6章以方塊流程圖（block diagram）統整控制器與程序模式。終於，在第7章談到控制器參數的調諧方法，此部分往往是化工廠的程序工程師最需具備的能力，可惜學期快要結束。第8章應用複變數探討系統的穩定性，數學能力不是太好的學生，應該在這裡就會放棄這門課程，大概也就是學期結束。反而控制系統經常使用的串級控制（cascade control）、凌駕（override）、比例（ratio）以及選擇控制（selective control）等，列在教科書的9~10章，大學部畢業生可能都沒聽過，形成實務應用與教育目的之間的鴻溝。

本研究的動機與目的在於能大幅降低「程序控制」這門課的數學比重，取而代之，以動態模擬器 Aspen HYSYS 模擬操作單元與控制器，利用實作的方式，讓學生理解程序控制這門課的內容，以期畢業後能具有程控工程師的基本能力。

## 貳、文獻探討

2006年美國化工程控學者與業界資深工程師Edgar、Ogunnaike、Downs、Muske與Bequett（2006）合著一文“Renovating the Undergraduate Process Control Course”，探討當時美國化工系在程序控制教育所遭遇的窘境，以及業界對於大學部程序控制訓練的建言。文中提及當化工系課程涉獵愈廣，加入材料與生化相關課程，勢必減少現有化工的核心課程，而「程序控制」這門課，往往被點名應減少授課時數，甚至是刪除的課程。

此現象與國內化工系的發展不謀而合，大約10年前開始，許多化工系陸續更名為化材系，為了增加材料相關的課程時數，在維持畢業學分不變的情況下，減少「程序控制」課程時數成為部分化材系的因應方法。Edgar等人（2006）提出當時美國程序控制教育與業界認知的落差：「當學校程控課程要求大學部的畢業生了解拉氏轉換、頻譜分析（frequency domain analysis）和相對增益矩陣（relative gain arrays），畢業生進入職場控制室後才發現，上述所學的方法對於日常工作的幫助其實非常有限。程控課程應該讓學生了解控制迴路的目的，不外乎是維持質能平衡的動態延伸，以及利用何種控制策略能達到這項目的，進而了解製程變數之間的動態交互影響，才能達到製程故障排除和穩定操作的目的。令人不安的事實是，這些日常工作需要的知識卻是大多數的畢業生進入職場後才開始學習，在學校程控課程能學習到的實務能力往往有限」。此項建言似乎也與國內的現況類似。

時隔11年，國立臺灣大學化學工程學系教授撰文呼籲：「程序控制教育應回歸製程本身，減少數學的推導過程」（Lee & Chen, 2017）。文章中建議程序控制課程學習目標如下：

一、了解基本控制元件運作的原理，包括：程序、控制器、測量儀器和閥件。

二、發展程序動態模式，藉以協助分析、設計與操作控制系統。

三、熟練PID（proportional-integral-derivative）控制器的設計、參數調諧和障礙排除。

四、建置強化控制策略，包括：串級、凌駕、前饋和比例控制。

五、利用MATLAB/Simulink駕馭控制系統的動態模擬。

六、熟悉一般單元操作元件的基本控制。

七、了解全廠製程動態與控制。

本研究基於上述課程目標設計學習主題，採用製程動態模擬器 Aspen HYSYS建置單元操作元件，搭配強化控制策略設計學習主題，其研究方法於下一節詳述。

「問題導向學習」（problem-based learning, PBL）主要是讓學生面對需要解決的問題時，藉由理解問題的本質，以及提出解決問題的方案，達到課程學習的目的。Barrows（1986）提出PBL可訓練學生具有以下能力：

一、分析和解決真實世界的問題。

二、搜尋及評估適當的學習資源。

三、小組成員的團隊合作。

四、展現多樣性及精準的口頭及書面報告表達能力。

五、利用在校所學的知識及技能，成為終生的持續學習者。

Duch、Grog與Allen（2001）認為PBL過程中，必須具有以下的學習主軸：

一、確保學生理解需要解決的問題，學生分組蒐集資料，以及彙整以前學過的專業知識，重新定義問題的本質。

二、在與學生討論的過程中，由學生對於學習主題尚未釐清的部分提出問題，而這些學習主題能協助學生進一步地了解問題。

三、依照學習主題的重要性排序，與教師討論之後指定工作小組，開始蒐集資料，以及可以運用的學習資源。

四、學生對於問題的本質展開，探索每個重要的學習主題，重新彙整之前所學與問題之間的連結，重新定義更為精準的問題，以及可能的最終解決方案。

Duch等人（2001）更進一步地定義設計一個有效的PBL問題所需要具備的特性：

一、PBL問題能有效地啟發學生進一步地理解他們所提出的概念，問題的本質盡可能與真實世界的問題相關，且以學生熟悉的內容陳述問題。

二、設計的問題需要學生依據所學的資訊與事實加以判斷及決策，且可將問題拆解成多個小問題，讓學生逐步解決每個小問題，最終完成整個問題的解決方案。

三、問題必須具有一定的複雜程度，確保小組中每位成員理解唯有透過團隊合作，才能獲得最終的解決方案。每位成員的單打獨鬥對於最終的解決方案並不是一個好策略。

四、問題的最初階段應該基於學生已經學習過的知識，並具有相當的挑戰性，才能激發學生相互討論，維持團隊的默契。

五、學習的主題和概念必須包含在PBL的問題之內，且與之前學習過的知識相關，能夠加強學生各方面的能力，如計畫進程的規劃與時間的管理，以及問題的分析與解決能力。

Cline與Powers（1997）將PBL應用於化工系大學部的實驗課程，要求學生依照實驗目的，利用現有的設備零件，自行組裝實驗設備，並以理論基礎驗證實驗的結果。學生對於實驗課程的學習態度，由之前的閱讀實驗手冊，依照手冊的步驟進行實驗，改變成思考開放式的問題，事先理解需要驗證的理論基礎，再依照現有的設備零件設計實驗步驟，並計算驗證可能的實驗結果。Gomez-Ruiz、Perez-Quintanilla與Sierra（2009）分別對普通化學和儀器分析兩門課程導入PBL，前者要求學生探討利用高分子材料，製作嬰幼兒容器，對於健康的風險評估。後者為

分析不同採樣來源的廢水，例如：湖泊、河流、水庫、工廠排放水，以及家庭廢水，探討檢測水質中污染物的方法，並判斷可能的汙染來源。Ballesteros、Daza、Valdés、Ratkovich與Reyes（2019）利用PBL整合單元操作與程序模擬課程，學生從理解問題開始，例如：泵的揚程與負載量的關係，接著學生利用腦力激盪的方式，討論如何測量及實現概念。之後，利用模擬流體動態軟體（computational fluid dynamics）設計各種可能泵的幾何形狀，挑選適當的設計方式，利用3D列印實現成品，最後以成品的實際操作結果，驗證模擬的結果。有超過85%的學生肯定PBL能深化學習的知識，且在實作的過程中，理解團隊合作的重要性。

Haugen與Wolden（2013）及Alnaizy、Abdel-Jabbar、Ibrahim與Husseini（2014）發表利用MATLAB/Simulink和Aspen HYSYS作為改良程序控制教育的工具。教學內容由原先控制理論的數學推演，改變為解決真實的製程問題，教學方法改為PBL。Haugen與Wolden的文獻報導該校化工系學生對於程序控制課程的教學評量，由原先的艱澀難以理解，轉變成實務可解決真實問題，對於課程的評價由負面轉換成正面評價。可見利用動態模擬器視覺化數學方程式，有助於學生理解原先艱澀難懂的教學內容。本研究基於此概念，以及Lee與Chen（2017）所建議的程序控制課程學習目標，利用製程動態模擬器Aspen HYSYS設計教學內容，期望能對程序控制教育接軌化工廠控制室略盡棉薄之力。

## 參、研究方法與步驟

### 一、研究方法

本研究採個案研究，對象為化材系大四學生，分別為實驗組A班40人、對照組B班47人。兩班學生的入學總級分平均值分別為48和49分，標準差為4.3和5.5，雙側 $t$ 檢定的 $p$ 值為.45，顯示兩班學生的入學成績相近。

A、B兩班使用相同的教科書（Smith & Corripio, 2006），唯授課教師不同，教學方式也不盡相同。B班為對照組，教師採傳統教學方式，依照教科書編排方式，主要以數學公式推演為主，期中考前應用拉氏轉換描述製程模型，即教科書2~4章，著重於程序模式抽象化的技巧。期中考之後，講解PID控制器的數學形式，探討程序控制系統的穩定性。A班為實驗組，教師採用製程動態模擬器Aspen HYSYS，實踐教科書（Smith & Corripio, 2006）的範例，設計的教學內容可使得學生在製程動態模擬器的平臺上，藉由調整操作變數，觀察受控變數隨之變化的趨勢，經由圖像的方式，理解教科書所想傳達的概念。其教學方式詳如下節所述。

## 二、PBL的教學設計

本教學實踐研究計畫配合學校高教深耕的創新學習模式，採取PBL，針對每一個學習主題設計相對應的製程問題，在學校電算中心的行動學習平臺，利用化工製程動態模擬器Aspen HYSYS，從建置單一操作元件，逐漸擴充至整廠製程。學生在實作之前，研究者先在課堂講解每個作業的主題，包括預計解決的製程問題，以及可能的解決方案。每位學生的題目一樣，但數字和控制設定都不同，學生必須依照自己題目的數字和設定，在製程動態模擬器的平臺上，實作自己的作業。

由於製程動態模擬器Aspen HYSYS是全校授權軟體，學生可利用自己的筆電連上校園網路即可使用，或是到系上的電腦教室，有15部桌上型電腦可供使用。在實作的過程中，學生可學習如何面對實際問題，構想解決方案，於動態模擬器中實踐構想，並驗證能否解決製程操作的問題，而非僅是單一面向的變數控制問題，因為在解決單一變數控制問題的同時，反而可能造成整體製程的操作不穩定性。使用動態模擬器，可以設想各種的操作狀況，訓練學生透過控制的方法解決製程的問題，而非單純的控制理論探討。基於此構想，調整教科書的授課順序，學生應學習的主題如表1所列。

表1

因應學習主題所規劃的授課計畫

Week	Chapter	Title
1	C	Sensors, Transmitters, and Control Valves
2-3	3	First-Order Dynamic Systems
4-5	5	Basic Components of Control Systems
6-7	7	Tuning of Feedback Controllers (HW1)
8	9 & 2	Cascade Control (HW2), Mathematical Tools
9		Midterm Exam
10	10 & 2	Ratio Control (HW3), Mathematical Tools
11	10 & 4	Selective Control (HW4), Higher-Order Dynamic Systems
12	10 & 4	Split Range Control (HW5), Higher-Order Dynamic Systems
13	11	Feedforward Control (HW6)
14-17	12	Distillation Column Control (HW7), Multivariable Process Control
18		Final Exam

首先介紹教科書 (Smith & Corripio, 2006) 的附錄C, 如何測量製程變數, 如: 流量、壓力、液位、溫度……等。測量的物理量轉換成電流後, 經控制器計算閥開度的電流訊號, 經過電流/壓力轉換器 (current-to-pressure transducer, I/P) 計算推動控制閥所需的壓力。

之後, 講解第3章一階動態的系統, 利用學生學過的基本一階常微分方程式, 說明程序增益 (process gain)、時間常數 (time constant) 和時滯 (dead time) 的概念, 避免繁複的公式推導。

接著, 介紹第5章解釋PID控制器的組成元件, 以及運作原理。並介紹工廠常用的控制閥, 以及基於製程安全的考量, 挑選適當作動模式的控制閥, 例如: Fail-closed (air-to-open) 或Fail-open (air-to-close) 的概念。

學生有了程序 (第3章) 和控制器 (第5章) 的概念後, 藉由第1個實作案例 (HW1), 實現第7章調諧回饋控制器參數的方法, 實作的內容於下一節詳述。



如表1所列，進行實作案例的同時，除了講解實作案例的方法與原理，每週仍有1~2小時的時間，講解教科書第2和第4章，說明高階動態系統的行為，以及相關的數學工具。

案例2~6 (HW2~HW6) 於教科書的第9、10和11章，分別演練實際工廠常用的串級控制、比例、選擇控制、分程控制 (split range control) 和前饋控制 (feedforward control)。

最後，利用教科書第12章蒸餾塔的控制範例 (HW7)，實際演練基礎控制 (basic control) 的受控及操作變數的配對，進一步實作品質控制 (quality control) 的PID參數調諧。

另外，由於工廠的控制迴路記載於管線和儀表配置圖 (piping and instrumentation diagram, P&ID)，學生需要具有閱讀P&ID的基本能力，利用教科書的附錄A介紹P&ID的符號，以及常用的操作單元，控制迴路的表示方法。

原先教科書中的第6章介紹控制迴路的特徵方程式，以及第8章利用頻率響應分析控制迴路的穩定特性，由於牽涉過多數學公式推導，且在實務應用上有限。略過這兩章的內容，並不影響學生日後駕馭控制系統，解決製程操作所面臨的問題。反之，加入這兩章的內容，只會增加學生學習的挫折感，以及放棄學習的意願。

### 三、PBL實作案例分析

以下對A班實驗組學生實施PBL實作案例之學習內容進行分析：

#### (一) 調諧控制器參數

第一個實作案例以熱交換器闡述程序一階動態的行為，讓學生探討蒸汽閥開度流量問題，學生經由開環測試計算PID控制器的參數，找出適當的控制效能。圖1 (a) 為教科書利用熱交換器闡述程序一階動態的行為，藉由改變蒸汽閥開度，觀察製程流體出口溫度的變化。圖1 (b) 為製程動態模擬器HYSYS的流程圖，製程流體流量控制器FIC-100，藉

由調整VLV-100的閥開度，控制製程流體（Cool\_In）的流量。溫度控制器TIC-100調整VLV-101的閥開度，控制製程流體的出口溫度。圖2為TIC-100的開環測試結果，圖中VLV-101的閥開度由50%增加至70%，觀察製程流體的出口溫度到達新的穩態，藉此計算描述一階動態行為的參數，如：程序增益（ $K_p$ ）、時間常數（ $\tau$ ）和時滯（ $t_0$ ）。藉由理論所推導的PI控制參數： $K_c = \tau/[K_p(\tau + t_0)]$ 、 $\tau_I = \tau$ ，以及教科書（Smith & Corripio, 2006）所提供的經驗式（Table 7-2.2和7-2.3），分別計算PID控制器的參數（ $K_c$ 、 $\tau_I$ 和 $\tau_D$ ），並藉由設定點追蹤（製程流體出口溫度調降1°C），以及干擾排除（製程流體流量減少10%），比較每一組PID參數的控制效能，如圖3所示。藉此範例學生可理解如何藉由開環測試得知PID控制器參數，以及評估PID參數的控制效能。

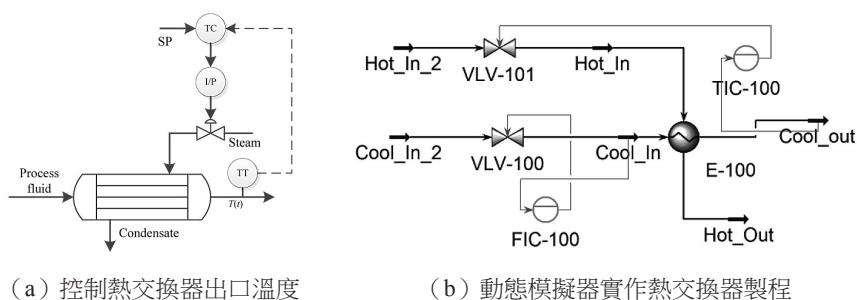


圖1 HW1實作調諧PID控制器

## （二）串級控制

第二個實作案例為工廠常用的串級控制，以上述熱交換器為例說明，即便固定蒸汽閥開度的條件下，蒸汽壓力的改變依舊影響蒸汽的流量，進一步影響受控變數（製程流體出口溫度）。因此，讓學生思考如何藉由實踐串級控制，排除蒸汽壓力對於受控變數的干擾。延續第一個案例，降低蒸汽（Hot\_In\_2）的入口壓力10%，降低壓差等同於減少蒸汽的入口流量，然而溫度控制器TIC-100需等到出口溫度下降，才能改

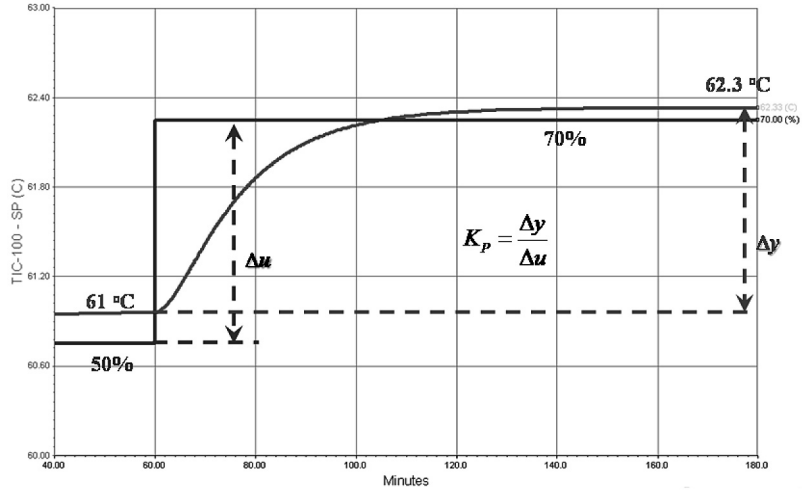
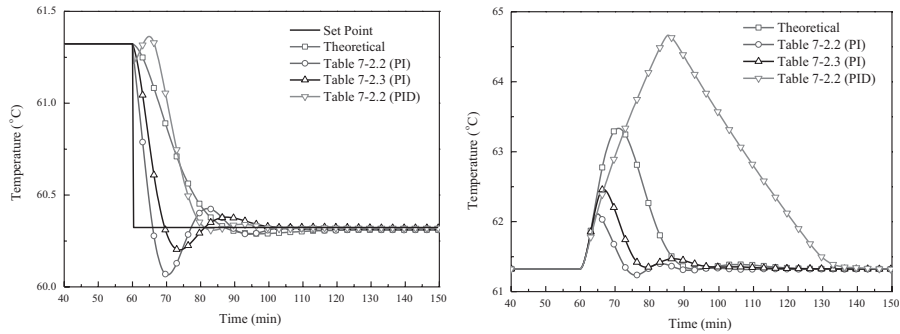


圖2 開環測試的結果



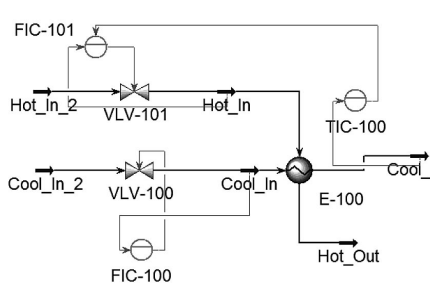
(a) 設定點追蹤

(b) 干擾排除

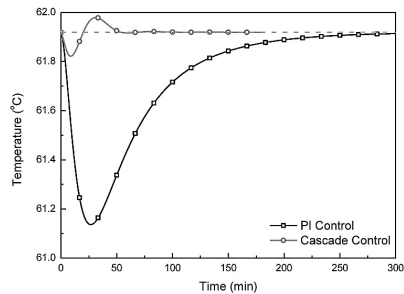
圖3 評估控制器參數的效能

變VLV\_101閥開度修正溫度的偏差，如圖4 (b) 所示。如在蒸汽閥增設流量控制器，如圖4 (a) 中FIC-101控制蒸汽流量，而流量的設定值由溫度控制器TIC-100提供。此時若蒸汽入口壓力下降，導致的蒸汽流量降低，FIC-101可直接調整閥開度修正流量，無需等到出口溫度的改變

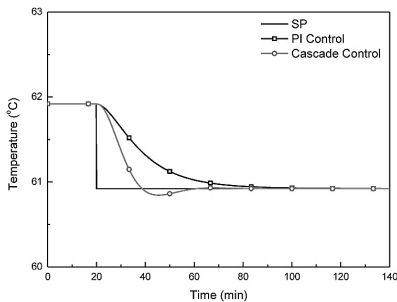
才回饋修正，圖4 (b) 比較一般PI控制器與串級控制器，在相同控制器參數的條件下，對於蒸汽入口壓力下降導致出口溫度變化的影響，圖中顯示串級控制相較於一般PI控制器，能快速地修正製程流體出口溫度。圖4 (c) 和4 (d) 比較一般PI控制器及串級控制器的效能，無論是設定點追蹤或是干擾排除，在相同控制參數的條件下，串級控制都有較好的控制成效，學生能藉此範例理解串級控制的原理，以及實作的方法。



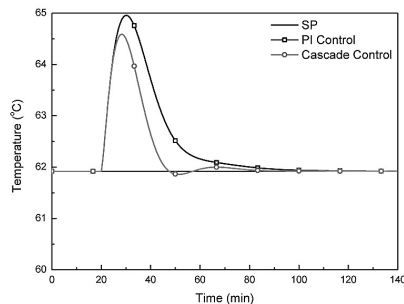
(a) 串級控制蒸汽流量



(b) 比較串級控制對於蒸汽入口壓力下降的影響，比較PI控制器與串級控制器



(c) 設定點追蹤的效能



(d) 干擾排除的效能

圖4 HW2實作串級控制

### (三) 比例控制和選擇控制

第三個實作案例在於維持操作變數之間的特定比例，如：反應器不同的進料流量之間，必須維持特定的反應計量比 (stoichiometry)。

學生藉由比例控制器，探討調整不同原物料進料流量之間閥開度的特定比值關係，當製程升降載時，依舊維持這個反應計量比的限制條件。比例控制器常見於調整反應器不同的進料流量，或是維持燃料流量與空氣流量必須符合特定的燃燒比值。圖5 (a) 為第三個實作範例示意圖，藉由物流A的流量 ( $F_A$ )，以及特定的比值 $R$ 計算物流B的流量設定值 ( $F_B^{set}$ )。圖5 (b) 為動態模擬器的實作圖，藉由試算表 (SPRDSHT-1) 匯入Aout的流量，乘上特定比值 $R$ ，作為物流B的流量控制器FIC-101的設定值。延伸比例控制器的實作範例，作為第四個實作範例 (選擇控制)，燃料與空氣流量在穩定操作時，必須維持特定的燃燒比值 $R$ ，然而，在升降載的過程中，為了確保不會出現燃燒不完全的現象，空氣流量必須略高於燃料所需的流量。因此，在升載過程中，空氣流量必須先於燃料流量增加。反之降載時，燃料流量需先於空氣流量減少。圖6 (a) 為選擇控制的示意圖，燃料流量的設定值分別藉由燃料需求量和空氣流量除上燃燒比值 $R$ 計算，兩者取較小值作為燃料流量設定值 (low selector, LS)。

此外，利用燃料需求量和燃料流量測量值，分別乘上燃燒比值 $R$ ，兩者取較大值作為空氣流量設定值 (high selector, HS)，圖6 (b) 為動

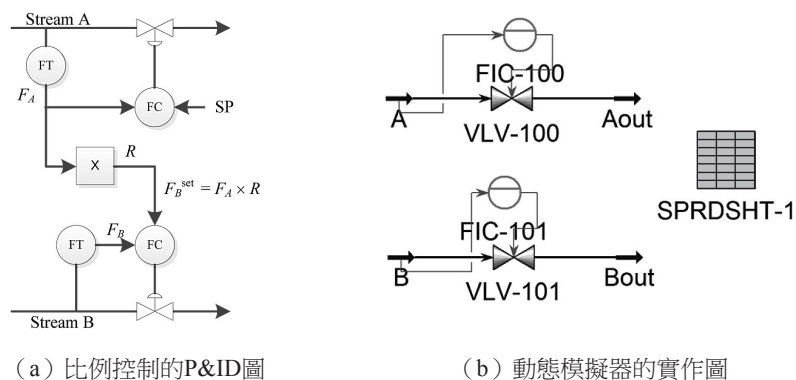


圖5 HW3實作比例控制

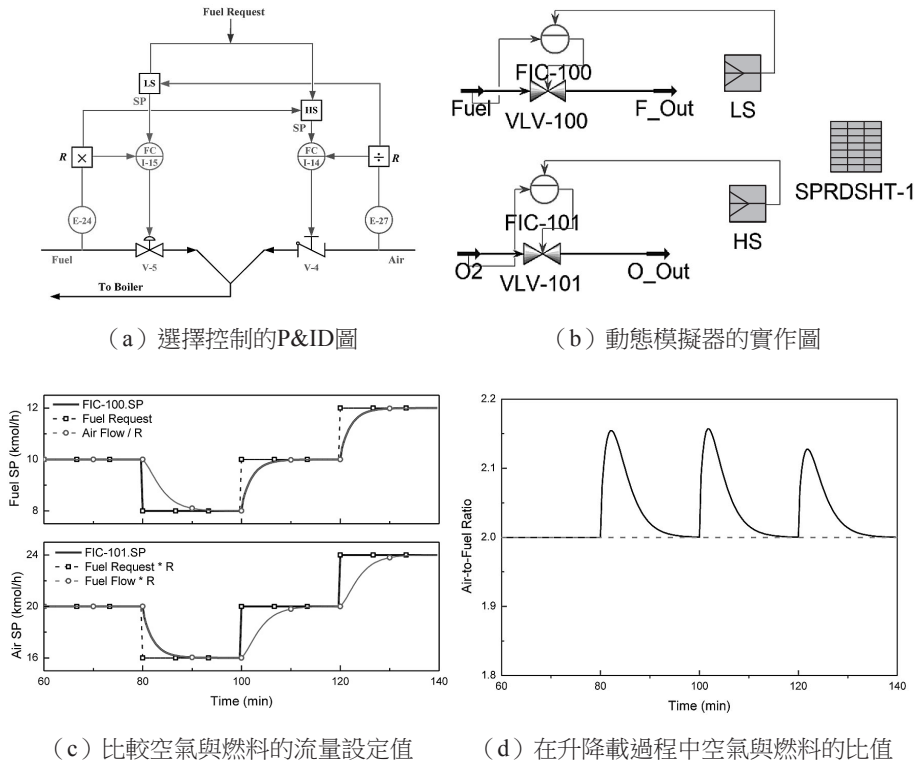


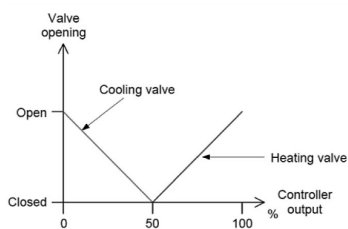
圖6 HW4實作選擇控制

態模擬器的實作圖。降載時，燃料需求量的設定值瞬間下降，然而實際的燃料測量值需要時間降低，此時燃料測量值高於設定值，燃料流量設定值依較小者設定。同時，空氣流量設定值依照較大空氣需求量設定，如圖6 (c) 在時間80 min的變化。升載時，燃料需求量的設定值瞬間上升，實際的燃料測量值會低於設定值，燃料流量設定值依較小者設定，空氣流量設定值依照較大空氣需求量設定，如圖6 (c) 在時間100和120 min的變化。圖6 (d) 顯示在升降載的過程中，空氣對於燃料的比值，約略高於燃燒比值 ( $R = 2$ ) 的設定值，確保不會發生燃燒不完全的現象。

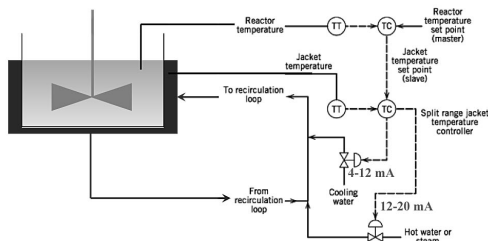
#### (四) 分程控制

第四個案例思考兩個操作變數（控制閥）協同維持單一受控變數的問題，例如：增加反應器夾套的熱水閥開度，可提高反應器內的溫度，反之，增加冷卻水的閥開度，加速移除反應生成熱，可降低反應器的溫度。然而，實際工廠的日常操作，不應出現冷、熱水閥同時開啟的操作行為，學生思考如何藉由分程控制的策略解決這種類型的問題。分程控制是第五和第六個實作範例，圖7（a）顯示控制器的輸出訊號小於50%時，驅動冷卻水的閥開度，相對而言，輸出訊號大於50%時，驅動熱水的閥開度。這種控制策略常用於放熱反應的反應器溫度控制，反應初期為了促使反應發生，需要開啟熱水閥，加熱反應器。反應發生後，需要利用冷卻水的循環帶走反應熱，此時需要調整冷水閥維持反應器的溫度，如圖7（b）所示。圖7（c）為動態模擬器的實作圖，在節能的考量下，溫度控制器不應同時開啟熱水閥與冷水閥，所以溫度控制器的輸出訊號採取分程控制的策略。圖7（d）為動態模擬器的實作結果，圖中顯示當反應器溫度（PV）低於設定值（SP），控制器輸出訊號（OP1）大於50%，開啟熱水閥開度（OP2），溫度愈接近設定值，熱水閥開度愈小。直到溫度到達設定值，控制器輸出訊號等於50%，關閉熱水閥。反之，當反應器溫度高於設定值，控制器輸出訊號小於50%，開啟冷水閥開度（OP3），反應器溫度愈高，控制器輸出訊號遠小於50%，冷水閥開度愈大，增加冷水循環量帶走反應熱。

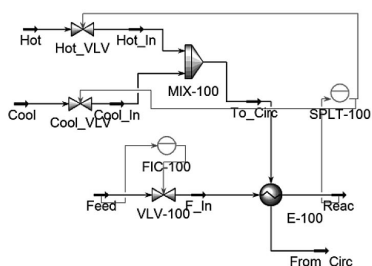
圖8（a）顯示另一種分程控制的應用，控制器的輸出訊號同時驅動兩個閥，但是兩個閥的作動模式正好相反。這種控制方法適用於調整不同物流混合之後的濃度，圖8（b）為利用分程控制調整水與甲醇混合之後的濃度，同時調整水（H2O\_VLV）和甲醇（MeOH\_VLV）的流量，藉此維持混合後（Mix）甲醇的濃度。圖8（c）比較分程控制與串級控制（僅調整水的流量，H2O\_VLV）設定點追蹤的成效，圖中顯示混合後甲醇的濃度設定點調低，無論分程或串級控制都能在相當的時間內，



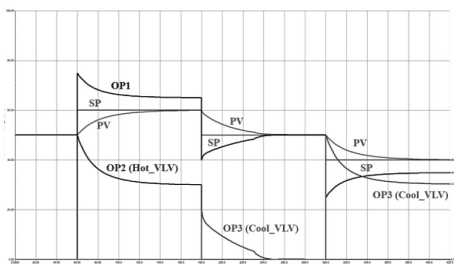
(a) 控制器輸出訊號與閥開度的關係



(b) 冷水與熱水閥共用一個分程控制器



(c) 動態模擬器的實作圖



(d) 反應器溫度的設定點追蹤

圖7 HW5實作分程控制 (I)

追蹤到設定點。然而，由於串級控制僅調整水的流量，甲醇流量不變，為了降低混合後的甲醇濃度，唯有增加水的流量，混合後的流量大幅度增加，造成後端製程的干擾，如圖8 (d) 所示，相對而言，分程控制對於整體流量的影響顯著較低，利用這個範例向學生說明適當的控制策略，必須一併考量降低對於後端製程的不必要干擾。

### (五) 品質控制

最後一個實作案例，思考維持蒸餾塔產品品質的穩定問題。首先，學生需思考如何利用操作變數的閥開度，穩定蒸餾塔的受控變數。如：塔壓、板溫和液位，維持安全的製程操作。其次，挑選適當的操作變數控制產品品質，挑選操作變數的原則為：能有效且快速地影響特定的品質變數及對於其他品質變數的影響降到最低。圖9 (a) 為分離苯與甲苯的典型蒸餾塔，學生需先完成基礎控制，如：進料流量 (FIC-



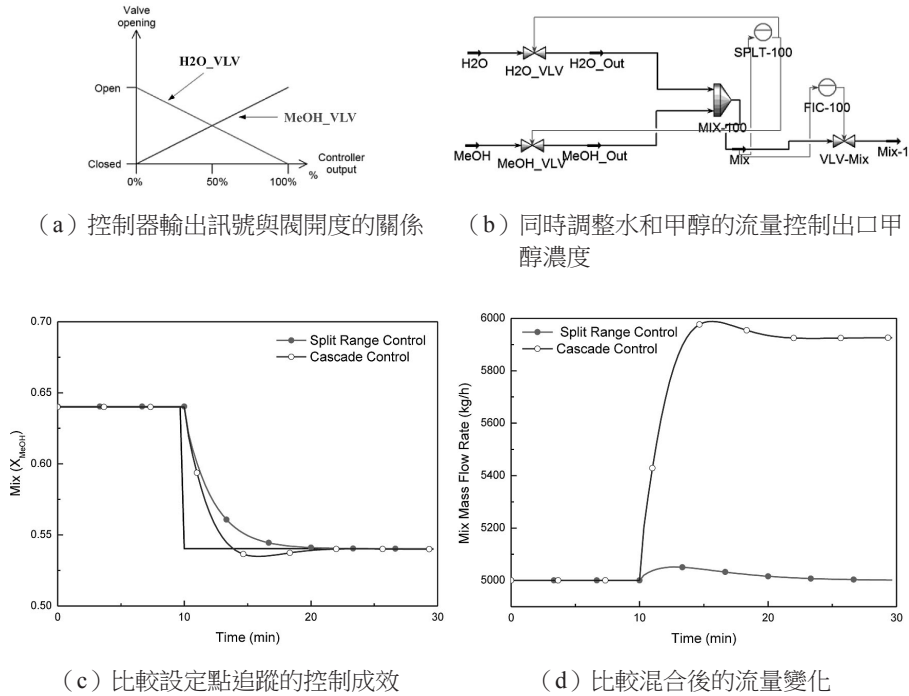


圖8 HW6實作分程控制 (II)

100)、塔頂壓力 (PIC-100)、冷凝器與再沸器液位 (LIC-100和LIC-101) 和溫度控制 (TIC-100), 如圖9 (b) 所示。在設定基礎控制的過程中, 訓練學生理解受控與操作變數的配對原則, 以及控制器作動模式的選擇。之後, 加入兩個品質控制迴路, 分別為塔頂甲苯的純度控制 (AIC-100), 以及塔底苯的純度控制 (AIC-101)。經由開環測試決定這兩個品質控制器的PID參數之後, 進行閉環應答的測試。圖10 (a) 為塔底苯的重量分率由0.05降低至0.01, 圖10 (b) 為同時塔頂甲苯純度的變化, 為了降低塔底苯的濃度, 再沸器需提高加熱量, 同時間甲苯也被加熱至塔頂, 讓學生理解多變數控制之間的干擾效應。圖10 (c) 和10 (d) 為進料流量增加20%的干擾排除測試, 分別為塔底苯的純度變化, 以及塔頂甲苯純度的變化。

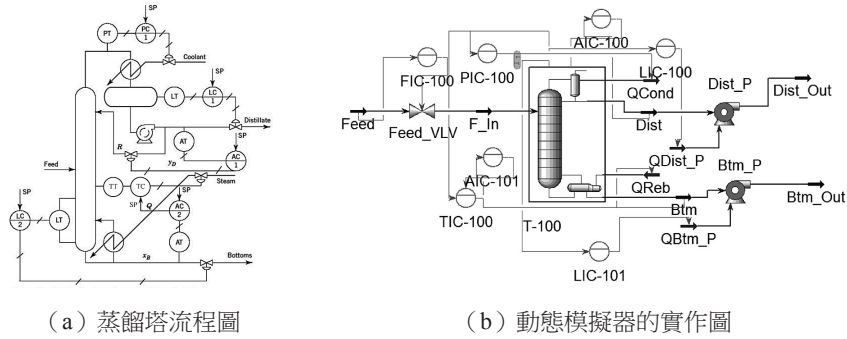


圖9 HW7實作蒸餾塔控制

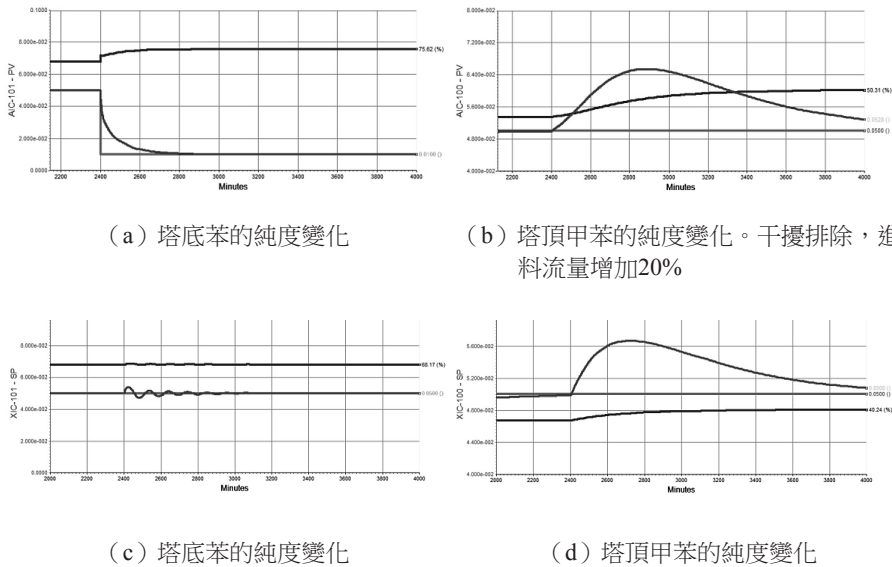


圖10 實作蒸餾塔控制的閉環應答，設定點追蹤

### (六) 凌駕控制

在2018年程序控制相關的學術研討會中，研究者分享此次教學實踐的經驗，有位化工系資深教授建議實作範例中應納入凌駕與前饋控制。因此，本研究執行年度（108學年度）的課程增加進料緩衝槽的凌駕控

制實作案例。學生思考當製程發生異常狀態時，如何藉由凌駕控制的策略，取代正常操作的控制策略以保護製程設備維持安全的操作。圖11 (a) 為凌駕控制的示意圖，圖中上游飽和液體進入緩衝槽，為了避免馬達抽到氣體，緩衝槽的液位必須維持在最低液位 (set point) 之上，當槽內液位低於最低液位，由液位控制器 (LC) 主導降低馬達轉速。反之，在正常操作下，儲槽液位高於最低液位，由流量控制器 (FC) 主導馬達轉速。圖11 (b) 為實作流程圖，藉由低選擇器挑選LC和FC的較低輸出值，作為馬達轉速的設定值。圖11 (c) 在維持進料流量不變，出口流量設定值 (SP) 增加20%，FC所輸出的馬達轉速 (OP) 隨之提高，流量測量值 (PV) 可追蹤到設定值。由於儲槽進料流量不變，增加出料流量，儲槽液位下降，如圖11 (d) 所示，當液位測量值 (PV) 低於設定值 (SP)，液位控制器的輸出值 (OP) 開始小於流量控制器的輸出值，此時馬達轉速採用液位控制器的輸出值，如圖11 (c) 和 (d) 顯示在160分鐘之後，流量測量值開始偏離設定值，而液位測量值維持在最低液位 (SP)。

### (七) 前饋控制

本研究執行年度 (108學年度) 的課程增加前饋控制的實作案例。學生思考在外界干擾變數影響受控變數之前，如何事先調整操作變數補償干擾變數，降低干擾變數對於受控變數的影響。前饋控制以混合槽製程為實作範例，如圖12 (a) 所示，混合後的產品濃度  $x_6$  為受控變數，操作變數為純水的流量  $f_1$ ，干擾變數為高濃度 (99%) 的甲醇流量  $f_2$ 。圖12 (b) 為回饋控制的方塊示意圖，圖中顯示受控變數  $C(s)$  在頻率空間 ( $s$ -Domain) 可寫成公式 (1) 所示：

$$C(s) = M(s)G_p(s) + D(s)G_D(s) \quad (1)$$

其中  $M(s)$  和  $D(s)$  分別為操作變數和干擾變數在頻率空間的函數， $G_p(s)$  和  $G_D(s)$  分別為操作變數和干擾變數對於受控變數的轉換函數 (transfer

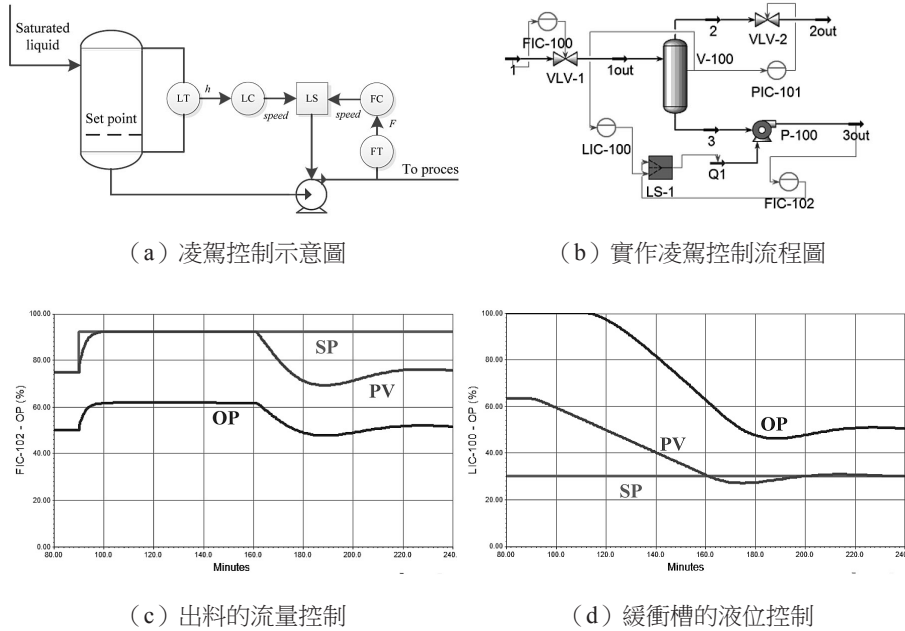


圖11 實作進料緩衝槽的凌駕控制

function)。圖12 (c) 為前饋控制的方塊示意圖，當干擾變數可測量，且前饋控制到達完美控制，即 $C(s) = 0$ ，公式 (1) 可改寫成：

$$C(s) = D(s)FFC(s)G_p(s) + D(s)G_D(s) = 0 \quad (2)$$

其中 $FFC(s)$ 為前饋控制的轉換函數，可寫成： $FFC(s) = -G_D(s)/G_p(s)$ ，因此，學生僅需分別實作操作變數和干擾變數的開環測試，得知 $G_p(s)$ 和 $G_D(s)$ 的轉換函數，即可在動態模擬器中實作前饋控制器。圖12 (c) 比較高濃度甲醇流量 $f_2$ 突增為正常流量的兩倍，回饋控制 (FB) 和整合前饋控制 (FF和FB) 對於干擾排除的效果，圖中顯示整合前饋控制能有效地降低產品濃度偏移設定值。然而，圖12 (e) 比較前饋控制對於設定點追蹤的影響，圖中顯示前饋控制並不會影響設定點

追蹤的控制效能，主要是讓學生理解前饋控制的目的是在於協助回饋控制器排除已知的干擾，無法取代回饋控制器的功能。

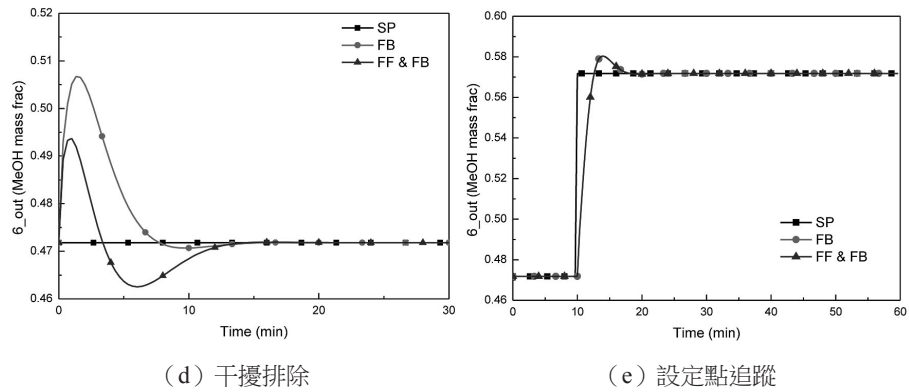
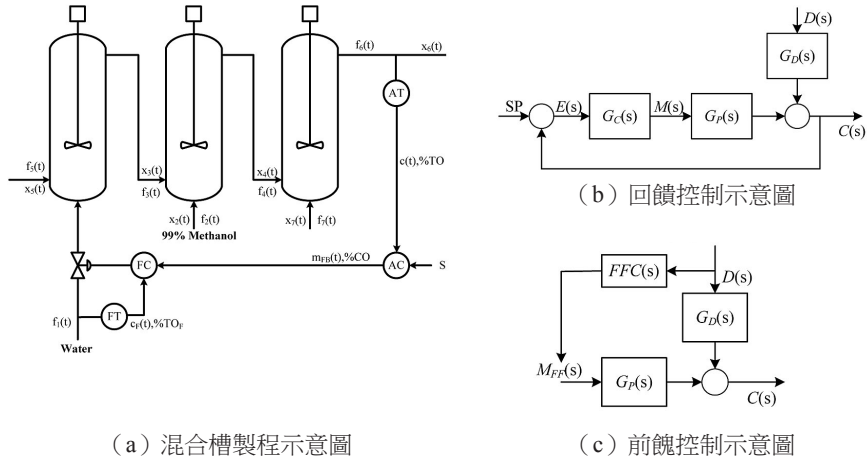


圖12 實作混合槽前饋與回饋控制

#### 四、學習成效評量

學習成效調查是在下學期開學後第二週以考試形式執行。A、B兩班同時進行，由於兩班授課教師不同，業界實務經驗也不相同，對於這

門課程（程序控制）的授課內容與理解也不盡相同。因此，學習成效評量的題目及成績，僅能反映該班學生的學習成效，無法反映學生畢業後對於這門課程內容的駕馭能力。

此外，當學期期末考結束後，學生大多返鄉，只能在下學期開學後擇期召集學生進行學習成效調查。為了避免學生亂猜答案，採取單複選混合，每題全對5%，答錯扣1%，放棄作答不予計分，答題時間30分鐘，學習成效調查的題目列述如附錄所示。

## 肆、研究結果與討論

A、B兩班學生在學習成效測驗的平均分數分別為50和30分，標準差分別為18.8和12.4， $t$ 檢定的統計量為5.7，因統計量遠高於檢定值，顯示兩班成績達顯著差異，並以A班實驗組顯著高於B班對照組，表2列出兩班學習成效測驗的 $t$ 檢定表。

表2

學習成效測驗 $t$ 檢定表

	平均分數	標準差	學生人數	$t$ 統計量
A班	50	18.8	40	5.7***
B班	30	12.4	47	

\*\*\* $p < .001$

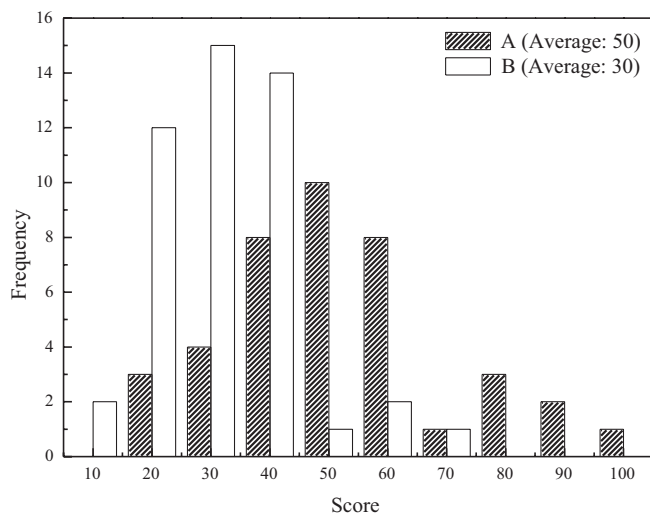
圖13 (a) 為分數分布圖，A班最高分100一位，B班最高分70一位，A班70分以上有7位。此外，問卷共有五個題組20個題目：題組1（1~4題）：辨識受控及操作變數，以及控制訊號的傳遞方式。題組2（5~10題）：基於考量安全操作的前提下，設定控制閥的作動模式。題組3（11~13題）：拉氏轉換在這門課程的功用。題組4（14~15題）：選擇適當的控制策略。題組5（16~20題）：配對受控及操作變數。圖13 (b) 比較兩班每題答對率的分布圖，整體而言，A班學生

的答對率相對高於B班，尤其對於題組2（5~10題）的答對率相對高出許多，可能是在實作的過程中，實際設定過每一個控制器的作動模式有關。其次，A班學生在題組5（受控及操作變數配對）有較高的答對率，可能也是與實作的經驗有關。雖然B班學生沒有實作課程，然而，製程動態模擬器Aspen HYSYS為全校授權使用的軟體，B班學生仍可以自學使用。值得說明的是，第15題的平均答對率，B班為29.8%，略高於A班的22.5%，其答對率的標準差分別為0.46和0.42，計算獨立樣本 $t$ 檢定的統計量為-0.77（A班答對率較低）， $p$ 值為.44，因此，第15題的兩班答對率並不具有顯著的不同。

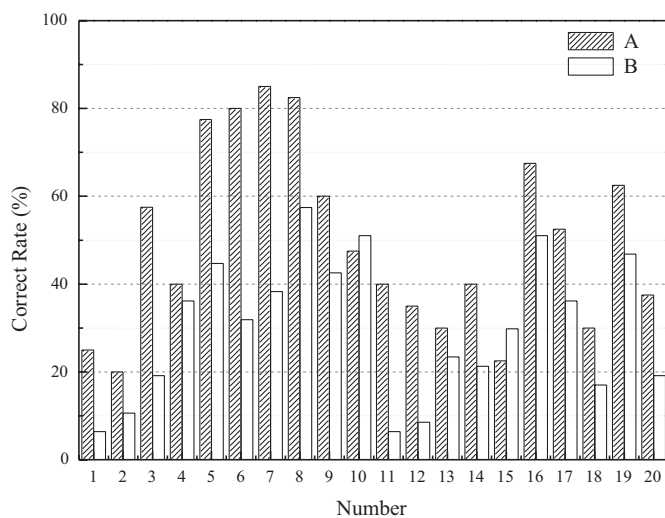
整體而言，由學生期末的教學評量結果，絕大多數的A班學生認同實作範例的教學方式。經私下訪談學生的意見，多數認為自第7週後，每週繳交一個上機作業，時間壓力有點沉重。尤其是前一、兩個作業，對於新接觸的軟體，熟悉度不足，需要多一點的時間做作業。但熟悉軟體之後，作業的複雜程度增加，時間的壓力並沒有減輕。整體而言，還是有學到每種控制策略在實際工廠的應用時機，以及可以解決的製程問題。

## 伍、教學省思

由於私立大學化材系所收的學生，大多屬於中後段班的學生，其專注力與理解力遠不及於前段班的學生。對於工學院的學生而言，職場的競爭力在於解決問題的能力，如果課程內容過於著重邏輯推演或理論陳述而忽略訓練學生解決問題的能力，將使得學生無法轉換所學成為競爭力。授課教師應嘗試調整教學方式，協助學生理解並掌握該門課程的核心目標。然而，Edgar等人（2006）為文指出，當時美國大學程控教育的隱憂，超過一半的程序控制授課教師並非專職從事程序相關研究領域，大多是由數值分析相關領域的教師兼職擔任。如果授課教師沒有工廠控制室的實務經驗，又如何能期待學生理解並掌握程序控制課程的目



(a) 試卷答題得分人數分布



(b) 每題答對率的分布

圖13 學習成效調查

標。同樣的隱憂在現今國內大學的程序控制教育似乎也是有跡可尋。經過1年的研究與實踐過程，研究者的感想如下：



一、對於私校化材系的學生而言，「程序控制」這門課經由視覺化學習，遠比抽象化的理論學習來得有效。

二、對於私校化材系的學生而言，華麗的數學技巧，也許不會幫助學生理解發生了什麼事。

三、唯一可以確定的事，是工廠控制室裡沒有拉氏轉換。

這學期的實踐課程著重於單元操作的控制器設計，以及實作各種常用的控制策略。然而，化工廠的製程是由多個操作單元組合而成，一個異常事件的干擾，可能經由控制器傳遞至不同的操作單元。因此，需以全廠控制的角度，設計適當的控制系統，符合工廠實際操作的需求。目前正在規劃下一階段的程序控制教學實踐課程，預期以典型的「反應一分離一回流」化工製程，實作全廠控制的深碗型課程，學生經由分組討論，利用製程動態模擬器實作全廠控制，其控制架構必須符合工廠調整負載、修改產品規格的需求，以及排除各種可能的外界干擾，避免干擾透過回流逐漸放大，造成不可收拾的後果。期望能透過下一期的教學實踐研究案，再次深化大學部程序控制教育，訓練學生具有解決化工廠日常操作問題（troubleshooting）和製程去瓶頸（debottlenecking）的能力。

## 陸、結論與建議

### 一、結論

本研究的目的為培養製程工程師對於工廠的重要性，在於確保安全的製程操作，以及穩定的產品品質。為了達到這兩項目的，化工系大學部的程序控制教育，培養學生具備以下的能力：（一）辨識受控及操作變數，以及控制訊號的傳遞方式；（二）基於考量安全操作的前提下，設定控制閥的作動模式；（三）選擇適當的控制策略解決特定的程序問

題，如：串級控制、凌駕控制、比例控制、分程控制等；（四）正確地配對受控及操作變數。

研究結果顯示，參與教學實踐研究的A班學生較能分辨製程的受控及操作變數，以及測量訊號的傳遞方式。此外，經過第一期的教學實踐計畫，A班學生於期末教學評量普遍認同實作的教學方式，能清楚地了解「程序控制」這門課程的教學目的。分析實作案例結果顯示，A班學生在控制器的設定方面，具有基於安全操作的考量之下，設定控制閥作動模式的能力，以及理解製程問題，能針對問題選擇適當的控制策略，並正確地配對受控及操作變數。藉由範例實作的方式，相較於傳統的教學方式，學生更能具備這門課程的核心能力。

綜上所述，本研究結果亦顯示採用製程動態模擬器輔助教學，能大幅提升學生對於這門課程的接受與理解程度，相較於傳統的公式推導，以及利用黑板闡述控制理論的枯燥內容，本研究提出的PBL創新教學方式，的確能拯救被數學耽誤的「程序控制」課程。

## 二、建議

然而，一學期三學分的課程，僅足以簡化的操作單元，演練工廠控制室常用的控制策略。雖然蒸餾塔的品質控制範例涵蓋基礎控制和品質控制的實作演練，卻沒有探討操作單元之間的交互影響。由於實際化工廠的製程是由各個操作單元組合而成，每個獨立操作單元的理想控制策略並不能確保整合之後的整廠控制策略會是個理想的組合。因此，建議未來可再進行課堂教學實踐研究，延續採用製程動態模擬器Aspen HYSYS作為實作的平臺，以化工製程典型的「反應—分離—回流」架構，經由專題實作的方式，訓練學生思考實際工廠操作的問題，包括：反應物回流的效應、能量整合的效應，以及製程內每一個反應物的質量守恆定律，也就是排放（purge or blowdown）和補充（makeup）的控制策略，讓學生具有化工廠程序控制工程師的競爭能力。

課程內容的設計，建議採取3~5位學生分組，以專題實作的方式，引導學生思考全廠控制需要解決的問題，包括：如何控制產品品質、如何調整製程產量、如何整合使用的能量，以及如何管理新鮮反應物的進料量，以期達到全廠控制的目的，包括：安全及平穩的製程操作、排除各種外界干擾以精準地控制產品品質、避免不安全的操作條件、控制系統自動運轉以盡量減少操作人員的人為干預、能快速地改變產品品質規格，以及對於環境影響的非預期排放零容忍。

### 誌謝

感謝教育部教學實踐研究計畫的經費支持，才能完成本研究。

## 參考文獻

- Alnaizy, R., Abdel-Jabbar, N., Ibrahim, T. H., & Husseini, G. A. (2014). Incorporating computer-aided software in the undergraduate chemical engineering core courses. *Chemical Engineering Education*, 48(1), 17-24.
- Ballesteros, M. A., Daza, M. A., Valdés, J. P., Ratkovich, N., & Reyes, L. H. (2019). Applying PBL methodologies to the chemical engineering courses: Unit operations and modeling and simulation, using a joint course project. *Education for Chemical Engineers*, 27, 35-42. doi:10.1016/j.ece.2019.01.005
- Barrows, H. S. (1986). A taxonomy of problem-based learning methods. *Medical Education*, 20(6), 481-486.
- Cline, M., & Powers, G. J. (1997, November). Problem based learning via open ended projects in Carnegie Mellon University's chemical engineering undergraduate laboratory. *Proceedings of Frontiers in Education 1997 27th Annual Conference, USA*.
- Duch, B. J., Grog, S. E., & Allen, D. E. (2001). *The power of problem-based learning*. Sterling, VA: Stylus.
- Edgar, T. F., Ogunnaike, A. B., Downs, J. J., Muske, K. R., & Bequett, B. W. (2006). Renovating the undergraduate process control course. *Computers and Chemical Engineering*, 30(10), 1749-1762. doi:10.1016/j.compchemeng.2006.05.012
- Gomez-Ruiz, S., Perez-Quintanilla, D., & Sierra I., (2009). *Problem-based learning: An approach to chemical engineering education within the EHEA*. Retrieved from <https://www.intechopen.com/books/technology-education-and-development/problem-based-learning-an-approach-to-chemical-engineering-education-within-the-ehea>
- Haugen, F., & Wolden, K. E. (2013, August). A revised view on teaching basic process control. *Proceedings of the 10th IFAC Symposium Advances in Control Education, UK*. doi:10.3182/20130828-3-UK-2039.00069

- Lee, J.-Y., & Chen, C.-L. (2017). A proposal for charting the undergraduate process control course for the 21st century. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 73, 154-165. doi:10.1016/j.jtic.2016.10.044
- Smith, C. A., & Corripio, A. (2006). *Principles and practice of automatic process control* (3rd ed.). New York, NY: John Wiley & Sons.

## 附錄：學習成效調查題目

右圖出自教科書Figure 3-1.1a，製程流體（process fluid）經熱交換器，利用蒸汽（steam）預熱至設計的進料溫度。

1. ( ) 控制變數（controlled variable）是指：（a）製程流體的流量 （b）蒸汽的流量  
（c）製程流體進入熱交換器的溫度 （d）製程流體離開熱交換器的溫度  
（e）蒸汽進入熱交換器的溫度 （f）蒸汽流體離開熱交換器的溫度。

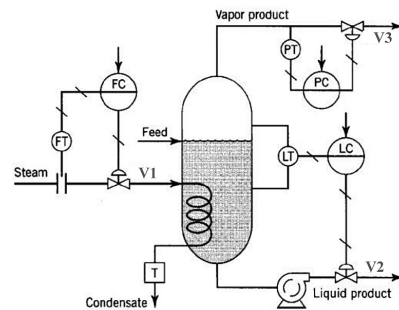
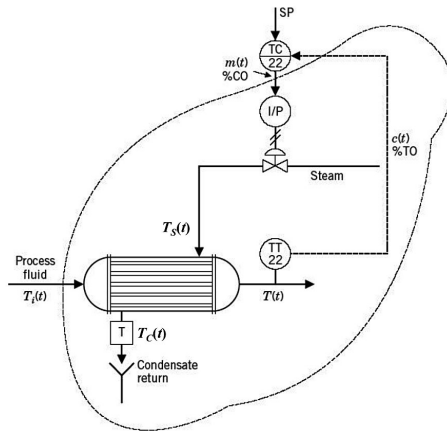
2. ( ) 操作變數（manipulated variable）是指：（a）製程流體的流量  
（b）蒸汽的流量 （c）製程流體進入熱交換器的溫度 （d）製程流體離開熱交換器的溫度  
（e）蒸汽進入熱交換器的溫度 （f）蒸汽流體離開熱交換器的溫度。

3. ( ) Transmitter（TT 22）以何種形式傳遞訊號  $c(t)$ （%TO）：（a）0-100% （b）4-20 mA （c）3-15 psig （d）4-20 mV。

4. ( ) Transducer（I/P）以何種形式傳遞訊號  $m(t)$ （%CO）：（a）0-100% （b）4-20 mA （c）3-15 psig （d）4-20 mV。

右圖出自教科書Figure 5-2.2，基於製程安全考量，設定下列三個閥件作動器（actuator）的模式：

5. ( ) V1：（a）Fail-closed （b）Fail-open  
（c）Air-to-open （d）Air-to-close。



6. ( ) V2 : (a) Fail-closed (b) Fail-open (c) Air-to-open  
(d) Air-to-close。
7. ( ) V3 : (a) Fail-closed (b) Fail-open (c) Air-to-open  
(d) Air-to-close。

考量上述作動器的模式，設定下列三個控制器的作動模式（controller action）：

8. ( ) 流量控制器（FC）：(a) Reverse (b) Direct。
9. ( ) 液位控制器（LC）：(a) Reverse (b) Direct。
10. ( ) 壓力控制器（PC）：(a) Reverse (b) Direct。

若  $c(t)$  和  $m(t)$  分別為標準化成 0-100% 的控制和操縱變數， $e(t)$  為控制器設定值與控制變數值的誤差，上述三個變數經 Laplace transform 之後，在  $s$ -Domain 分別為  $C(s)$ 、 $M(s)$  和  $E(s)$ 。

11. ( ) 下列何者為一階動態模式（First Order Dynamic Model）：

$$(a) m(t) - \bar{m} = K_c \left[ e(t) + \frac{1}{\tau_1} \int_0^t e(t^*) dt^* + \tau_D \frac{de(t)}{dt} \right]$$

$$(b) \tau \frac{dc(t)}{dt} + [c(t) - \bar{y}] = K_p [m(t) - \bar{m}]$$

$$(c) \frac{M(s)}{E(s)} = K_c \left( 1 + \frac{1}{\tau_1 s} + \tau_D s \right)$$

$$(d) \frac{C(s)}{M(s)} = \frac{K_p}{\tau s + 1}。$$

12. ( ) 下列何者為 PID 控制器的模式：

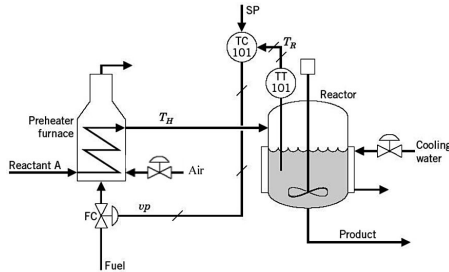
$$(a) m(t) - \bar{m} = K_c \left[ e(t) + \frac{1}{\tau_1} \int_0^t e(t^*) dt^* + \tau_D \frac{de(t)}{dt} \right]$$

$$(b) \tau \frac{dc(t)}{dt} + [c(t) - \bar{y}] = K_p [m(t) - \bar{m}]$$

$$(c) \frac{M(s)}{E(s)} = K_c \left( 1 + \frac{1}{\tau_1 s} + \tau_D s \right) \quad (d) \frac{C(s)}{M(s)} = \frac{K_p}{\tau s + 1}。$$

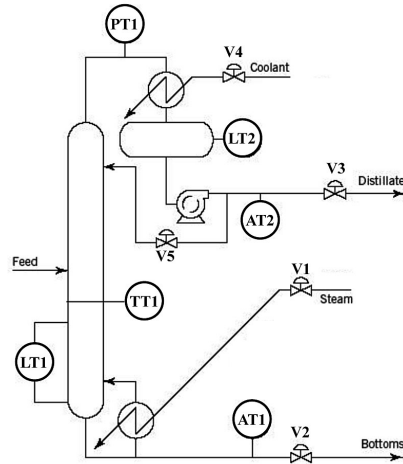
13. ( ) 程序控制這門課程為何需要Laplace transform這項數學工具：  
 (a) 尋找微分方程式的解析解 (b) 尋找程序模式與控制器模式之間的關連性 (c) 尋找程序模式的發散條件 (d) 尋找穩定程序模式的操作條件。

14. ( ) 右圖出自教科書Figure 9-1.1，藉由調整燃料 (fuel) 的流量，維持反應器 (reactor) 的溫度 ( $T_R$ )，然而Reactant A的進料量多寡，足以影響進入反應器的溫度 ( $T_H$ )，進而干擾反應器的溫度，下列哪一種控制策略可以改善這個問題：



- (a) Cascade control (b) Override control (c) Ratio control (d) Split-range control。

15. ( ) 假設上述燃料為丙烷 (propane)，燃料的燃燒反應為：  
 $C_3H_8 + 5O_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O$ ，為了維持完全燃燒，調整Air的閥開度，為了不使用過量空氣導致燃燒效率降低，下列哪一種控制策略可以達到這個目的，暫不考慮升降載的過渡時期：



- (a) Cascade control (b) Override control (c) Ratio control (d) Split-range control。  
 右圖出自教科書Figure 12-1.1，進料 (feed) 為苯和甲苯混和物，蒸餾塔塔底出料 (bottoms) 的甲苯必須高於95%，由分析儀AT1測量。塔頂出料 (distillate) 的苯必須高於95%，由分析儀AT2測量。塔頂壓力由PT1測量，塔底液位由LT1測量，進料板以下選擇一個塔板測量板溫



(TT1)，冷凝器液位由LT2測量。分別有V1-V5五個閥件維持蒸餾塔的穩定操作及產品品質。

16. ( ) PT1應該由哪一個閥件控制：(a) V1 (b) V2 (c) V3  
(d) V4 (e) V5。
17. ( ) LT1應該由哪一個閥件控制：(a) V1 (b) V2 (c) V3  
(d) V4 (e) V5。
18. ( ) LT2應該由哪一個閥件控制：(a) V1 (b) V2 (c) V3  
(d) V4 (e) V5。
19. ( ) TT1應該由哪一個閥件控制：(a) V1 (b) V2 (c) V3  
(d) V4 (e) V5。
20. ( ) AT2應該由哪一個閥件控制：(a) V1 (b) V2 (c) V3  
(d) V4 (e) V5。

## **Applying Problem-Based Learning in Process Control Courses in Departments of Chemical Engineering: Bridging the Gap Between Academia and Industry**

Jia-Lin Liu\*

### **Abstract**

Process Control is a practical course that prepares chemical engineering graduates for work in chemical plants; the objective is to equip students with the ability to maintain stable chemical plant operations by using control systems. However, most Process Control courses have been designed as such that students deduce mathematical equations to learn the principles and implementation of the control systems, which fail to prepare chemical engineering graduates for real-life chemical plant control-related operations. Therefore, this study used Aspen HYSYS, a dynamic process simulator, to simulate operating units and controllers. This teaching method facilitated students' understanding and enabled them to apply the tools and methods commonly used in control systems. The proposed Process Control course also incorporated problem-based learning to design process operation problems, thereby assessing the course's effectiveness in preparing students for chemical plant control. This study employed case study research. The participants were 40 and 47 seniors from Classes A and B of the Chemical Engineering Department, respectively. Classes A and B were taught by different teachers using the same textbook. Teacher of Class B applied the conventional teaching method of deducing mathematical equations, whereas

---

\* Jia-Lin Liu: Professor, Department of Chemical and Materials Engineering, Tunghai University  
E-mail: jialin@thu.edu.tw

Manuscript received: 2019.10.04; Accept: 2020.02.25

teacher of Class A imparted process control methods to students using a dynamic process simulator, Aspen HYSYS, and had students solve the predesigned process operation problems. According to the learning outcome assessment, students in Class A achieved superior learning outcomes and were capable of differentiating controlled and manipulated variables of the process and understanding methods of measuring signal transmission. Abiding by the principle of safe operations, students in Class A were able to properly adjust the settings of control valves. Moreover, they were competent enough to identify process operation problems and resolve them with the appropriate control strategies, and correctly matched the controlled and manipulated variables as well.

Keywords: problem-based learning (PBL), control systems, process control, process dynamic simulator

