

核能蒸汽供給系統之混合模型工程師模擬器 A Hybrid-Model Engineer Simulator for Nuclear Steam Supply Systems

陳楷之
Kai-Chih Chen

台灣科技大學電子工程系
Dep. of Electronic Engineering
National Taiwan University of
Science and Technology
kcchen@ailab2.et.ntust.edu.tw

周復華
Hu-Hua Chou

台灣科技大學電子工程系
Dep. of Electronic Engineering
National Taiwan University of
Science and Technology
fhchou@ailab2.et.ntust.edu.tw

何正信
Cheng-Seen Ho

台灣科技大學電子工程系
Dep. of Electronic Engineering
National Taiwan University of
Science and Technology
csho@et.ntust.edu.tw

摘要

本論文提出一個混合定性與定量模型的新推理架構，並用以建構核能蒸汽供給系統的工程師模擬器。利用本方法，可加速系統發展時程；實際使用時，不僅能合理地預期系統狀態的演變趨勢，更能提供特定研究對象的細部行為。

關鍵詞：工程師模擬器、混合模型系統、核能蒸汽供給系統、定性推理、軟體模擬。

Abstract

This paper proposes a new reasoning architecture that hybridizes qualitative and quantitative models for the construction of an engineer simulator for nuclear steam supply systems. This approach features a short-time system design process, reasonable prediction of the system behavior, and a detailed explanation of focused subsystems or components.

Keywords: Engineer Simulators, Hybrid-Model Systems, Nuclear Steam Supply Systems, Qualitative Reasoning, Software Simulation.

一、緒言

由於人為疏忽所造成的核能電廠異常或事故已變成核能安全事件的主要因素，相關的研究類如『智慧型高自主性系統』(Highly Autonomous Systems, 簡名 HASLEARN)[2][17][18]，即在探討如何以漸近的學習方式學習核能電廠在意外或異常事故發生時的回復作業及緊急應變知識，最終目標無非希望取代人類操作員來操控核能電廠之運作。本研究的困難之一在於如何進行其效能的驗證。

文獻上顯示，為了開發核子能源或研究如何更安全地使用核能，有些國家特別設置了可供研究用的小型核子反應爐。但這些小型的反應爐在面對錯誤的操控時仍具有放射性污染的危險，因此以之作教學或研究時，仍存在相當程度的不方便，其安全維護費用更是昂貴。為了避免上述缺點，許多研究

機構紛紛採用“模擬(Simulation)”的方式來達到研究或訓練目的。一般而言，模擬器可分為二類：①使用具類似特性之小型模型來模擬；②使用電腦技術模擬[6]。第一類的模擬器一般使用在局部特性之模擬，以針對某一特定異常現象加以分析，例如蒸汽產生器 U 型管路破裂(Steam Generator Tube Rupture, SGTR)模擬。使用此一方法，必須對所欲研究之各現象各準備一適用之模型，就經濟效益而言，較不實際。第二類模擬器，拜電腦科技所賜，有愈來愈普遍之趨勢。惟目前之相關模擬器大多存在著二個缺點：①這一類的模擬器均牽涉到大量且複雜的運算，因此一般只能在大型電腦上發展，且主要係以離線方式(Off-Line)作業，要在線上對其下指令改變模擬環境殊不可能。②傳統的電腦模擬大多以精確的數值或定量模型來描模對象，惟核能電廠是一個集核工、熱力、流體、機電、自動控制等技術的統合產物，要找出一完整精確的數值模型實非易事。

本論文的主要目的即是引進人工智慧技術來改進目前電腦模擬技術的缺失，建立一個核能蒸汽供給系統(Nuclear Steam Supply Systems, NSSS)的工程師模擬器(Engineer Simulators)，作為 HASLEARN 的測試平台。基本的觀念是混合定量與定性方法來模擬整個系統[8][11]。簡單的說，當某子系統的定量模型無法獲得或其模擬不需很精確時，我們即以定性模型為之。如此一來不僅在缺乏精確的定量模型時，依然可以模擬，更可以透過定性推理(Qualitative Reasoning)方式降低運算的複雜度。總結混合型模擬器的優點有三：①縮短尋找精確定量模型所拖延的發展時程。②可合理地預期系統定性狀態之發展趨勢。③減少複雜運算而達到線上即時模擬的能力。

本論文共分四節。第二節介紹混合模型模擬器的理論架構。第三節介紹核能蒸汽供給系統，其混合模型模擬器，及實驗結果。第四節對本系統做一結論，並討論未來的研究方向。

二、混合模型模擬器之理論架構

圖 2-1 為混合模型模擬器之理論架構圖。主要分為定性推理模組(Qualitative Reasoning Module)、定量推理模組(Quantitative Reasoning Module)和狀態值轉換介面(Value Transformation Interface, VTI)三大

◆國科會計畫編號：

1. NSC-83-0408-E-011-013 & NSC-84-0408-E-011-006

2. NSC-85-2213-E-011-058 & NSC-85-2732-E-011-005

部份。爲了有較好之反應效率，我們亦引入排程器 (Scheduler) 依優先權來統轄各類操作之執行。

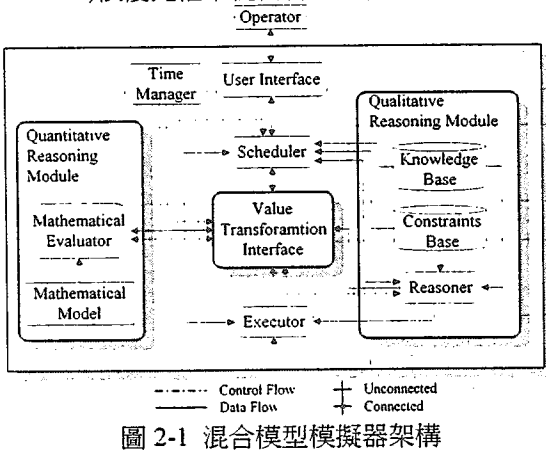


圖 2-1 混合模型模擬器架構

基本上，本架構是混合定量和定性方法，並配合狀態值轉換和同步技術來完成整個運作。主要動作流程依排程器所分派的工作性質可分爲三類：

- (1) 當排程器分派出推理性工作給推理機時，推理機即依任務進行所需之推理。推理過程中，如觸發 (Invoke) 到儲存於知識庫或限制庫中的相關規則或限制時，這些規則或限制即會被送往排程器排程；當推理所得結果需要更新定性變數資料時，該要求即會被送到執行器執行；若推理結果需要更新定量模塊內相關變數資料時，該要求將先被送到狀態值轉換介面進行轉換的工作後，再將其送往定量推理模塊內之數值演算器，以便供定量推理模塊使用。
- (2) 當排程器分派出之工作和使用者介面有關時，該工作即被送往使用者介面進行必要的顯示動作，將訊息傳達給使用者。若使用者對此訊息有所反應並下達命令給系統，使用者介面即將該命令送往排程器中排程。
- (3) 當排程器分派出之工作爲更新變數資料等較低階之動作時，會直接把命令送至執行器或狀態值轉換介面。執行器在執行相對應之動作時，往往會觸發一些規則，該規則即會被送往排程器排程。某些情況下，執行器也須需透過狀態值轉換介面來將某些資料送往定量推理模塊。

A. 定性推理模組

□基本定義

本系統中，在時段 (t_p, t_{p+1}) 內，函數 f 的定性狀態 (Qualitative State) 以下式表之：

$$Q(f, (t_p, t_{p+1})) = \langle Q_p, Q_p \rangle \quad (1)$$

其中 Q_p, Q_{p+1} 均爲定性數 (Qualitative Number)， Q_p 表示 f 目前的值， Q_{p+1} 則表示 f 對時間之改變量。

在定義定性數時，爲了擁有更多之資訊以利和定量模塊間之轉換，我們保留了其在數線上分割的區間大小。換句話說，(1) 式也可表如 (2) 式，其中 l_p 和 l_{p+1} 爲 Q_p 的二個標界值：

同理， Q_{p+1} 亦可表如 (l_{p+1}, l_{p+2}) ，而將 (2) 式變成 (3) 式。

$$Q(f, (t_p, t_{p+1})) = \langle (l_p, l_{p+1}), (l_{p+1}, l_{p+2}) \rangle \quad (3)$$

另外，在定性狀態之分割上，我們考慮本系統所包含之元件爲數不少，且在系統整體精確度和元件各別精確度有可能不同的考量下，我們允許各個元件之變數各自保有不同的區域性分割方法，因此在元件間變數值之傳遞就需要考慮狀態轉換的問題。我們參考 [10] 一文中所提出之方法，再稍加修改以符合本系統之狀態轉換需求，簡述如下：

假設 Q_1 是第一個變數之定性狀態所成之集合， Q_2 是第二個變數定性狀態之集合，則第二個變數收的到第一個變數傳送過來的 S_1 狀態，在第二個變數值將轉爲 S_2 ， S_2 與 S_1 之關係如下：

$$S_2 = \text{Min}(\forall S_x \in Q_2 | d(S_1, S_x)), \text{ 其中}$$

$$d(S_1, S_x) = [(Power(S_1) - Power(S_x))^2 + (Centre(S_1) - Centre(S_x))^2]^{0.5}, \quad S_1 \in Q_1, S_x \in Q_2$$

定義 $Power$ 及 $Centre$ 如下：若 S 爲一定性數，且其區間爲 (l_1, l_2) ，則

$$Power(S) = l_2 - l_1, \quad Centre(S) = (l_1 + l_2) / 2$$

最後，本系統爲了得到系統狀態和時間的關係，我們在定性推理方面引入了時間參考資訊，以期在時間方面能得到較佳之精確度。亦即，除了上述的定性狀態和數值型態的標界值外，我們在定性變數的結構中還保留了一個時間戳記，用來記錄此變數到達此定性值 (Q_p) 之時間。

爲了能有效利用時間資訊，我們定義狀態值 $x = (l_1, l_2)$ 之持續時間 t_p (爲一區間) 如下：

$$t_p = \frac{W(x)}{V(dx)} = \frac{(0, l_2 - l_1)}{(dl_1, dl_2)}$$

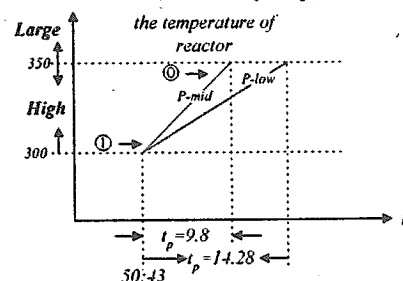


圖 2-2 狀態持續時間

其中， $W(x)$ 表示變數 x 從目前改變到下一定性狀態所需之變化量，而 $V(dx)$ 表示 x 變率之大小。以圖 2-2 爲例，圖中若變數 x 實際的落點在 \odot 所指的地方，則其轉換至下一個狀態所需的時間幾乎等於“0”。反之，當變數 x 實際值落在圖中 \ominus 所指之位置時，則在變率固定之情況下，將需經過某一最大時間 Φ 才能改變至下一狀態，亦即 $t_p = (0, \Phi)$ 。

□定性推理方法

首先，我們稱定性變數值的變化爲狀態轉移，對函數 f 而言，當其定性狀態從 $Q(f, (t_p, t_{p+1})) = \langle v_p, d_p \rangle$ 改變到 $Q(f, (t_{p+1}, t_{p+2})) = \langle v_{p+1}, d_{p+1} \rangle$ 時，表示發生狀態轉移。本系統的狀態轉移情形可分爲四種：

- (1) $v_p = v_{p+1}, d_p = d_{p+1}$ (定性狀態未變)

- (2) $v_j = v_2, d_j \neq d_2$
- (3) $v_j \neq v_2, d_j = d_2$
- (4) $v_j \neq v_2, d_j \neq d_2$

傳統定性推理系統中，並不存在上述式(1)之情形。因本系統屬混合型系統，除了定性模組之推理外，尚需考慮定量模組之系統狀態，因此我們加入如式(1)之狀態轉移情形，用以表示系統內部狀態已發生改變惟定性狀態仍維持不變之情形。

定性推理模組的最主要工作，即是推理出下一個時間的系統狀態。本模組用下列規則來產生所有可能的次時狀態：

- (1) If $d_1 > 0$ then
 If $v_1 \in R$ then $v_2 > v_1$ else $v_2 \geq v_1$
- (2) If $d_1 < 0$ then
 If $v_1 \in R$ then $v_2 < v_1$ else $v_2 \leq v_1$
- (3) If $d_1 = 0$ then $v_2 = v_1$

本模組使用二種不同的限制來輔助推理，分別是：①一般限制②領域限制。除了限制外，時間也可幫忙定性模組作推理。例本系統中存在的導出量變數(水槽內液體之體積是由其水槽流入和流出之流量所導出)，即可採用狀態持續時間來輔助推理得下一個狀態。例如當反應爐溫度在 12 點 50 分 43 秒時轉變為 $\langle High, P-low \rangle$ (圖 2-2)。由持續時間之定義可求出反應爐溫度在 $\langle High, P-low \rangle$ 時之持續時間為 (0, 14.28) 秒，由此可知反應溫度必須在 $\langle High, P-low \rangle$ 狀態停留一不為零之時間，但到底要停留多久，在無外在變化的情況下，就沒有更進一步之資訊可供決定。此時我們可以採用較保守之估計，即停留時間為所求的持續時間之最大值。換句話說，即反應爐之溫度再經過 14.28 秒後才會跳到狀態 $\langle Large, P-low \rangle$ 。

B. 定量推理模組

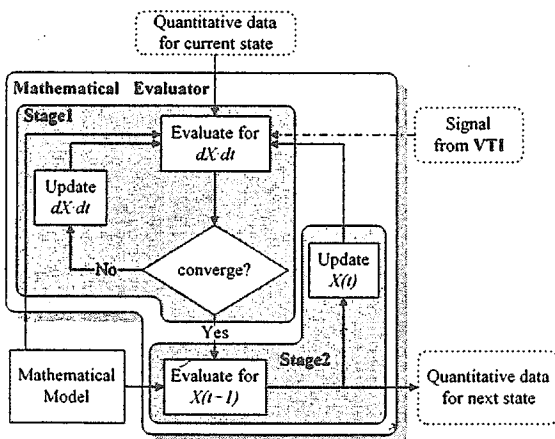


圖 2-3 數值演算器之系統流程圖

本模組分二個部份，一是數值演算器，二是數值模型。一般實際系統之數值模型均非常複雜，往往需由很多非線性方程組才能描繪其特性，因此本模組之演算能力勢需能應付複雜的數值模型，我們在演算器部份係利用最常被使用來求解非線性方程組的“反覆計算求解法 (Iterative Computational

Method)”[9]的觀念設計而成。本方法主要是分成二個階段求解，第一個階段先求變數之變率，第二個階段再求下一個狀態之數值，如此重覆循環求值。

圖 2-3 是本數值演算器之系統流程圖。一開始本演算器的第一階段會先求得每一個變數之變率 $dx/dt(new)$ ，再將此新求出之變率 $dx/dt(new)$ 和本來的變率 $dx/dt(old)$ 作比較，若二者之差異未在容許範圍內時，我們即將演算式中所有 dx/dt 以剛剛求出之 $dx/dt(new)$ 值取代，再重覆第一階段之演算計算出新的 dx/dt ，重覆此步驟直到誤差在容許範圍內為止。當第一階段收斂後，才進行第二階段之演算。

第二階段主要是求下一個時間之定量值。為了使求值過程能更快速收斂，我們採用 DuFort-Frankel Method[1]。舉例說明其方法如下：

假設方程組中有三個變數 x, y, z ，利用第一階段我們可求出每個變數之變率值 $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$ ，且變數 \dot{x} 型式如式(1)所示，

$$\dot{x}^{(t)} = c_1 y^{(t)} + c_2 z^{(t)} + c_3 x^{(t)} \quad \text{----- (1)}$$

再以下二式來代入式(1)可得式(2)

$$\begin{aligned} x^{(t)} &\rightarrow \frac{x^{(t+1)} - x^{(t)}}{\tau} \\ x^{(t)} &\rightarrow \frac{x^{(t+1)} + x^{(t)}}{2} \\ \frac{x^{(t+1)} - x^{(t)}}{\tau} &= c_1 y^{(t)} + c_2 z^{(t)} + c_3 \frac{x^{(t+1)} + x^{(t)}}{2} \quad \text{-- (2)} \end{aligned}$$

經整理後可得式(3)，即是供本階段用以求下一個時間之定量值的方程式。

$$x^{(t+1)} = \frac{\tau(c_1 y^{(t)} + c_2 z^{(t)}) + (1 + \frac{c_3 \tau}{2})x^{(t)}}{(1 - \frac{c_3 \tau}{2})} \quad \text{----- (3)}$$

C. 定性與定量值之轉換

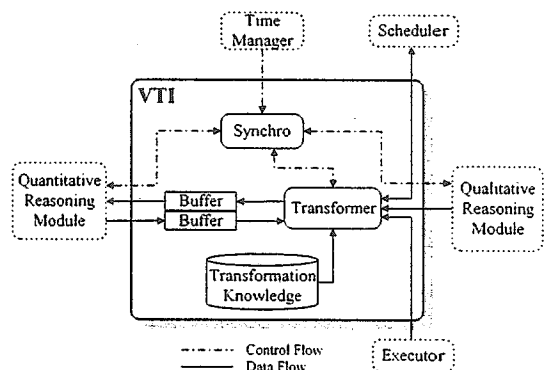


圖 2-4 狀態值轉換介面架構

圖 2-4 為定性推理模組和定量推理模組間轉換介面之主要架構。本介面除轉換狀態值外，另一重要工作就是負責二個模組之間的同步。簡述本模組的工作原理如下：

- (1) 當定性推理模組推得下一狀態後，便會將其結果送給本模組，經過轉換器轉換成定量值後，會先將結果暫存在緩衝區內，等待定量模組進行下一階段之演算時使用。

- (2) 當定量推理模組推得下一狀態後，會將此結果送給本模組內之緩衝區，並從另一緩衝區取出已經轉換之定性狀態值，供下階段演算所需。
- (3) 同步器(Synchro)主要負責協調兩模組之同步運作，並在模組發生不同步時儲存所需之資訊，以供系統調整同步使用。

至於定性資料與定量資料的轉換，我們採用類似模糊理論中的模糊化與反模糊化(Fuzzify and Defuzzify)之方法。當狀態值轉換介面收到一個定性變數輸入時，即會利用變數內部所存之標界值求出其重心點，當成此定性變數之定量型態輸出。當狀態值轉換介面收到一個定量資料輸入時，即利用相對應變數之分割表，找出其對應的定性狀態值作為輸出。

為了能在定性與定量間轉換時能有更好的精確度，我們亦引進時間觀念來幫助轉換。以圖 2-5 為例，假設其中虛線為第一個水槽內液體體積的實際變化。由圖中可知，在時間為⊙或⊙時，若以中點值(325)作為其所對應之定量值時，雖誤差頗大，但在沒有更多的資訊可供利用時只好接受。但若此變數係“導出量”時，則我們可以利用其時間資訊來得到更合理之定量值。我們的方法是將此狀態之變化量對狀態持續時間作內插法。因此當定性變數 v 到達 $(l_{v1}, l_{v2}]$ 之狀態後，再經過 x 秒($x \leq t_p$) 時的定量值應為：

$$T(v) = l_{v1} + \frac{(l_{v2} - l_{v1}) \times x}{t_p}$$

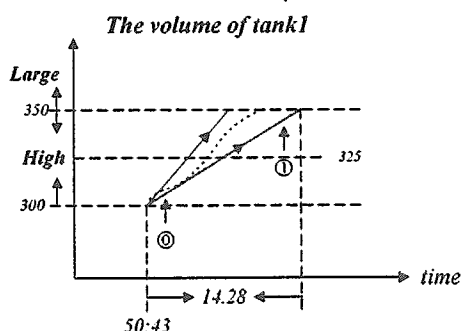


圖 2-5 時間輔助定性狀態值之轉換

由圖 2-5 得到，當時間分別為經過 2 秒和 10 秒時，其定量值分別為 307 及 335 單位體積，如此一來，在這段時間內雖然在定性推理模組內其體積變數仍在同一個狀態，但在定量推理模組內其定量值會隨著時間而漸漸增加，更能反映實際之情況。

同步是維持系統正常運作的一個必要條件，若系統無法同步運作，會導致各模組間資料不一致的情形發生。由前述可知，本系統中定量模組之時間是由數值模型中 τ 所決定，而此時間解析度 τ 又由狀態值轉換介面所決定，故若當定量模組未能在時間 τ 內完成所需演算時，模組間就會發生不同步之現象。例圖 2-8 表示狀態值轉換介面在系統啓始運作時($t=0$)，指定時間 τ 為 5 秒給定量模組，並期望在 5 秒後收到定量模組演算之結果，但實際卻在 7 秒後才收到結果，則表示模組間已發生不同步情形。

當同步器發現定量模組已超過期望回應時間時，即會記錄此時定性模組之狀態，並參考各模

組內的時間記錄來完成兩模組間的同步協調。例圖 2-9 為圖 2-8 之後續處理情形，假設當定量模擬模組在定性模擬模組內部時間 7 秒時才回報演算所得之結果，但此時定量模擬模組之內部時間僅為 5 秒，故同步器會參考二模組目前之時間差(2 秒)設定定量模擬模組下次演算之時間解析度($5+2=7$ 秒)，以期能補償模組間的時間差，達到同步之目的。此外，若二模組之時間差長時間維持在一固定值時，也會動態調整預設的時間解析度(如圖 2-9 中狀態值轉換介面之 $time\ interval$ 值)，以期使同步任務更為順利。

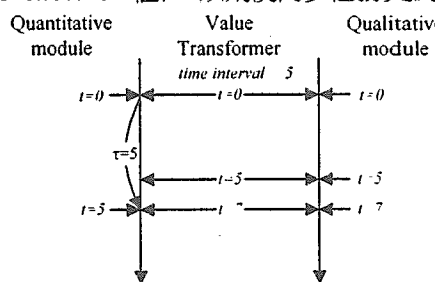


圖 2-8 模組間發生不同步情形

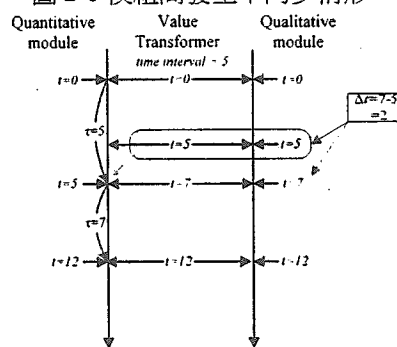


圖 2-9 模組間之同步協調

三、實作與實驗結果

A. 核能蒸汽供給系統簡介

圖 3-1 是壓水式核能蒸汽供給系統的簡圖。我國核能三廠共包含三個一次側(Primary)的循環迴路和三個蒸汽產生器及其各自的二次側迴路(Secondary) [14][15]，圖 3-1 只是其中的一個循環迴路，包含一次側的反應爐冷卻水系統和二次側的蒸汽產生器飼水系統，其主要工作流程亦可分二部份討論如下。

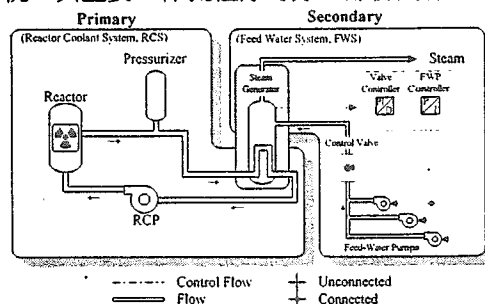


圖 3-1 壓水式核能蒸汽供給系統簡圖

一次側部份，主要由反應爐冷卻水循環系統構

成，將反應爐之熱量移到蒸汽產生器中，降低反應爐之溫度，以防止反應爐因溫度太高而導致爐心結構變形受損事故。由反應爐熱端出口流出之高壓高溫冷卻水，先經過負責調節一次側壓力的調壓槽 (Pressurizer) 元件，再流入蒸汽產生器內，藉由 5624 根的 U 型管將熱量傳到二次側。流出蒸汽產生器的較低溫冷卻水則由反應爐冷卻水泵 (Reactor Coolant Pump, RCP) 送回去反應爐，重覆循環使用。

二次側部份，主要由蒸汽產生器二次側和飼水系統組成。利用回授控制信號控制飼水泵和飼水閥的開度，使蒸汽產生器二次側能維持一穩定的水位，並透過 U 型管吸收來自一次側的熱，產生乾淨蒸汽供發電使用。

由上敘述可知，在蒸汽產生器內二次側之飼水狀態是兩相並存的，自最底部之液態到中間部份的汽水混合體至最上層的汽態。故若欲以數學模型來描模時，其複雜度可想而知。

B. 混合模型模擬器之實作與實驗結果

實作方面，我們使用二部個人電腦，第一部在 G2[7] 環境下，執行本模擬器之定性及狀態值轉換二個模組。另一部執行定量模擬模組，並透過乙太網路 (Ethernet) 連接。我們模擬實驗的主題為，當核能蒸汽供給系統中某一個蒸汽產生器發生 U 型管破裂意外，即 SGTR 事件後，在系統中其它蒸汽產生器受此事件影響所引發的二次側壓力變化情形。在本模擬器中，我們以定量模型來模擬蒸汽產生器，以定性模型模擬系統其它部份[19]。

本模擬器使用的定性模型，主要係參考“壓水式反應器系統介紹”[14][15] 書中的系統說明資料。在定量模型方面，基本上是使用[5]一文中之模型，惟因該模型僅能描述蒸汽產生器的一般常態行為，對研究主題—蒸汽產生器 U 型管破裂事故，無法表現出細部反應，故本實驗室將之修改成爲一包含 28 個方程式及約 100 個參數之偏微分方程組[18]，再配合[3]一書中之系統設計資料，求出蒸汽產生器數值模型。在實際實驗過程中，由於我們僅能參考少量的公開資料，且因蒸汽產生器之數值模型過於複雜，實驗結果難免有些許歧異。但整體而言，整個系統狀態的演變趨勢，仍能合乎理論及我們所預期的行為。

爲了以較短時間得到模擬結果，我們以五倍於正常時間的速率來進行模擬，共模擬了事件發生後 2000 秒內之系統行為。圖 3-2 及圖 3-3 爲 SGTR 事故發生後一次側冷卻水系統壓力及溫度變化之定性模型，作爲本實驗的輸入數據。

實驗結果如圖 3-4 所示，圖中較平滑(上方)之曲線爲定量模擬模組所模擬出之結果 (參考右邊座標軸，單位爲 psi)，圖中的下方由線段所構成之曲線則爲所對應之定性狀態值(參考左邊座標軸)。由本實驗結果可看出，當核能蒸汽供給系統中某一個蒸汽產生器發生 SGTR 事故約 1200 秒後，系統內其它蒸汽產生器會因此而導致二次側壓力快速下降。另，圖 3-5 爲同一實驗在 1400 秒內之結果，提供我們觀察實際系統的細部行為。

圖 3-6 爲核能研究所利用 RELAP5/MOD3 模擬

系統在 SGI 工作站上所模擬之結果[16]，從兩實驗結果的比較中可以發現，無論是整體變化趨勢或細部之變化曲線，本模擬器均能合理地模擬其結果。

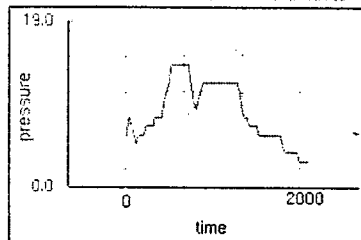


圖 3-2 冷卻水系統壓力定性模型

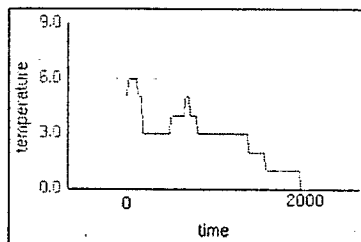


圖 3-3 冷卻水系統溫度定性模型

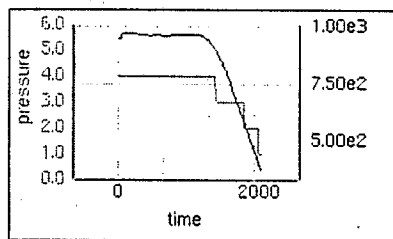


圖 3-4 蒸汽產生器二次側壓力變化情形(一)

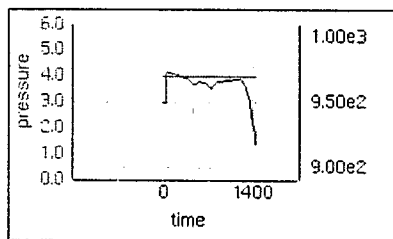


圖 3-5 蒸汽產生器二次側壓力變化情形(二)

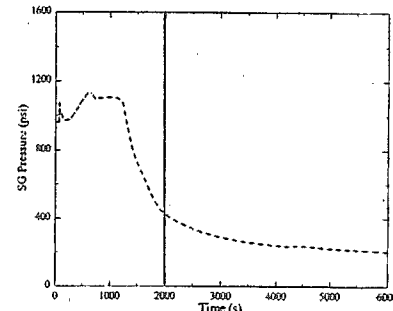


圖 3-6 RELAP5/MOD3 之實驗結果

四、結論與討論

在本論文中我們提出一個混合定性與定量模型的新推理架構，並實際建構一個核能蒸汽供給系統的混合模型工程師模擬器。由 SGTR 實驗結果可看出，對一個如核能電廠般複雜的系統，本混合模型工程師模擬器仍可藉由定性推理技術，快速地提供整個系統狀態的變化情形，以掌握其演變趨勢。對於欲進一步觀察的組件，如蒸汽產生器，本模擬器也可輸出精確的數值以解說其行為。

本混合模型工程師模擬器最大的優點，在微觀角度看，具有數值模擬器精確的優點，在宏觀角度看，則又可提供整個系統整體變化的趨勢。這個特點，使我們不致因太注意某個元件的行為而忽略元件和整個系統間相互影響的巨大關係，致使模擬結果不甚如意。最後，因本模擬器採用混合模型所組成，故不僅在建構模擬器時，可以節省尋找數值模型的大量時間，加速發展時程；在實際使用時，不只能更快速地、合理地預期系統狀態的演變趨勢，而且能提供特定研究對象的細部行為，這是一般模擬器所無法同時達到的。

事實上本混合模型架構，並不僅適用於建構模擬器，其它複雜的控制系統，亦可使用本架構來化簡系統的複雜度，加速發展時程。複雜的回授控制系統，可採用本架構來建構，利用較粗略的方式完成其控制部份，以較精確的方法計算其回授信號，而完成整個回授控制系統，即是一例。

因本系統採用的是模組化的設計，未來可再將核能電廠的其它部份整合進來，如核心緊急冷卻系統，輔助飼水系統等，使之成為“整個核能電廠”的混合模型模擬器，提供 HASLEARN 一個更完整的測試環境。此外，對於核能電廠操作人員的訓練上，本模擬器更可以提供一個較好的方案，只需利用價格低廉的個人電腦，就可以完成整個核能電廠的模擬工作，並可供線上即時操作訓練使用。

在未來研究方面，我們希望能更強化系統的推理機制，讓系統運作時能更有彈性。一般而言，一個定性推理系統往往會因為可使用的“限制”不夠強烈，而造成系統無法完美地推理出“唯一”一個可能的後續狀態，造成系統演變狀態成一樹狀結構發展。但本系統在實作時利用加入較強的限制來避免此問題之發生，使定性推理模組能找出“唯一”的後續狀態。但我們希望未來能再加強定性推理機制，使本混合模型系統能有更通用的架構。

另一方面，我們也希望能更進一步將學習能力整合到我們的系統中，使系統各部份均能從平時的運作中學習系統不同精確度的模型，成為混合模型結合多重模型[4][20]的新系統架構。這種新架構，再配合隨時演算法(Anytime Algorithms)的相關技術[12][13]，來動態妥善組合各不同模組，不僅可以使系統作出即時回應，更可達到任意時間回應的能力。

參考文獻

- [1] F. C. Chou, and G. J. Hwang, "Vorticity-Velocity Method for Graetz Problem with the Effect of Natural Convection in a Horizontal Rectangular Channel with Uniform Wall Heat Flux." *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 109, pp. 704~710, 1987.
- [2] F. H. Chou, and C. S. Ho, "HASLEARN: A Highly Autonomous System with Learning Behavior." *Proc. IEEE International Conference on Syst., Man & Cybe.*, pp. 108~113, 1994.
- [3] M. Cumo, and A. Naviglio. *Thermal Hydraulic Design of Components for Steam Generation Plants*. CRC Press, Florida, U.S.A., 1991.
- [4] P. A. Fishwick, N. H. Narayanan, J. Sticklen, and A. Bonarini, "A Multimodel Approach to Reasoning and Simulation," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 24, No. 10, pp. 1433~1449, Oct. 1994.
- [5] D. Gal, D. Saphier, and E. Elias. "A DSNP Movable Boundary U-tube Steam Generator Model." *Nuclear Technology*, Vol. 95, pp. 64~76, 1991.
- [6] G. Guzik, D. A. Johnson, H. S. Y. Kwok, and P. E. Meyer, "SIMARC and the Real-time Simulation of Pressurized Water Reactors." *Proc. Third European Nuclear Simulation Symposium*, Schliersee, Germany, pp. 16~26, 1993.
- [7] Gensym Corporation, *G2 Reference Manual Version 4.0*, 1995.
- [8] I. Hulthage, "Quantitative and Qualitative Models in Artificial Intelligence." *Coupling Symbolic and Numerical Computing in Expert Systems*, Vol. II, J. S. Kowalik, and C. T. Kitzmiller (Eds.), pp. 39~46, 1988.
- [9] S. L. S. Jacoby, J. S. Kowalik, and J. T. Pizzo, *Iterative Methods for Nonlinear Optimization Problems*. Prentice-Hall, New Jersey, U.S.A., 1972.
- [10] Q. Shen and R. Leitch, "Fuzzy Qualitative Simulation," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 23, No. 4, pp.1038~1061, Aug. 1993.
- [11] U. Söderman and J. E. Strömberg, "Combining Qualitative and Quantitative Knowledge to Generate Models of Physical Systems," *Proc. International Joint Conferences on Artificial Intelligence (IJCAI-91)*, pp. 1158~1163, Aug. 1991.
- [12] S. Zilberstein, "Using Anytime Algorithms in Intelligent Systems," *Proc. National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-96)*, pp.73~83, Fall 1996.
- [13] S. Zilberstein, and S. Russel, "Optimal Composition of Real-Time Systems," *Artificial Intelligence*, Vol. 82, pp. 181~213, 1996.
- [14] 台灣電力公司, *壓水式反應器系統介紹 (I)*, 1993.
- [15] 台灣電力公司, *壓水式反應器系統介紹 (II)*, 1993.
- [16] 林巧馨, 梁國興, "SGTR Analyses and Related EOP Verifications of Maanshan Nuclear Power Station." 核能研究所核子工程組研究報告, 1997.
- [17] 何正信, 周復華, *整合學習行為於智慧型自主性系統之研究發展 - (I)*, 國科會專題研究報告, NSC83-0408-E-011-013 & NSC84-0408-E-011-006, 1996.
- [18] 何正信, 周復華, 陳楷之, 許世杰, 邱變成, *整合學習行為於智慧型自主性系統之研究發展 - (II)*, 國科會專題研究報告, NSC85-2213-E-011-058 & NSC85-2732-E-011-005, 1997.
- [19] 陳楷之, *核能蒸汽供給系統之混合模型工程師模擬器*, 國立臺灣科技大學電子所碩士論文, 1997.
- [20] 邱變成, *以多模型系統模擬蒸汽產生器的 U 型管*, 國立臺灣科技大學電子所碩士論文, 1997.