

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

軸向流壓縮機監控系統之研發：錯誤偵測、診斷與可靠度控制(I)

(Fault detection, diagnosis and reliable control)

計畫編號：NSC 90-2212-E-009-068

執行期限：90年8月1日至91年7月31日

主持人：梁耀文 國立交通大學電機與控制工程學系副教授

一、中文摘要

近年來工業發展一日千里，動力需求日益殷切。軸向流壓縮機在噴射引擎及工業動力上扮演不可或缺的角色。然而，當壓縮機壓力逐漸提升時，系統傾向發生兩種不穩定現象：旋轉失速(stall)和激振(surge)。當此兩種非線性氣動現象出現時，壓縮機溫度會迅速升高，並可能導致嚴重的機械損壞。因此，如何於此類不穩定現象發生的初期即予以偵測出並提供警告訊號(warning signal)俾使工程師或系統本身能及時做出適當的處置以防止不穩定現象的發生是極重要的課題。在本計畫中，我們結合以模式為基礎(model-based)及以訊號為基礎(signal-based)之錯誤偵測與診斷技巧來從事壓縮機系統不穩定現象之偵測與診斷。由模擬結果發現此種結合模式與訊號之診斷技術不但可提高偵測診斷之準確度，同時也可分辨出壓縮機不穩定現象之類型。

關鍵詞：激振，旋轉失速，錯誤偵測與診斷。

Abstract

In the recent years, the demand of power increases rapidly. One of the most popular ways to fulfill the demand is the usage of the asymmetric-axis flow compressor. However, in practical situation, there are two main obstacles for raising the operating efficiency of the compression systems. One is "surge" and the other is "rotating stall." These two kinds of instabilities usually raise the temperature in the compressor abruptly and even cause mechanical damage drastically. Therefore, it is an important issue to detect

the incipient of the instability phenomena and generate a warning signal so that the engineers can take appropriate actions to recovery the system from the instabilities. In this project, we combine the model-based and signal-based fault detection and diagnosis technique to detect the incipient of the instabilities of a compression system. It is verified from simulation that such an approach not only can enhance the accuracy of detection but also can distinguish the type of instability behaviors.

Keywords: Surge, Rotating Stall, Fault detection and diagnosis.

二、緣由與目的

1、背景說明及計畫重要性

現代工業一日千里，工業動力需求日甚一日。而渦輪引擎在各項工業的能源及動力供應上扮演著不可或缺的角色，更是航太工業的關鍵元件。而提升渦輪引擎效率最直接最有效的方法就是提升壓縮機段的壓力昇。然而當壓縮機運轉到接近其所能達到的最大壓力差時，壓縮機內的流場會出現不穩定的現象，即所謂的“surge”或“stall”現象，使得壓力昇反而急遽減少而大幅降低引擎的工作效率。所謂的surge現象是指壓縮機系統中氣體軸向流速產生往復運動使得儲氣室中的壓力呈現週期性振盪的現象。而stall則是擾動波沿壓縮機周向傳播的現象。此兩種不穩定現象明顯限制了噴射引擎所能達到的最大工作效率。因此，近年來探討surge與stall的成因並建立偵測此徵兆之法則以提供給工程師相關之系統警告資訊，幫助工程師做出及時且適當的處理乃成了近年來相關領域的熱門研究課題。

有鑑於一般的控制系統往往無法避免會因一些無法預期的變化而使系統的整體表現出現退化甚至不穩定的現象，如系統零件損壞，操作點的變動等等。壓縮機系統亦不例外，其閥門的開啟量及轉速的變化都會造成操作點的變動，這些變動可能引起壓縮機發生 surge 或 stall 現象。由於 surge 與 stall 明顯的限制了渦輪引擎所能達到的最大工作效率，甚至可能造成渦輪機損壞，因此傳統渦輪機所設計之操作點均遠離壓縮機所能承受之最大壓力昇使工作效率無法有效提昇。近年來許多學者專家為提昇壓縮機工作效率，投注了許多精力在如何及時偵測出系統發生不穩定現象前的徵兆，如何予以及時的修正補償，並考慮如何重新配置系統的控制法則使錯誤的效應降至最低。甚至利用錯誤容忍 (fault tolerance) 的概念設計出不需要切換 (switch) 的可信賴可以忍受系統某種程度的錯誤之控制法則 (reliable controllers)。在過去數年間，關於偵測壓縮機系統不穩定現象之研究已有不少文獻發表。然而，由於 surge 及 stall 形成時間極短，如何有效的在 surge 及 stall 形成的初期即予與及時的偵測出並提供警告訊號，目前仍是一個有待更進一步研究的主題。

誠如 1997 年 12 月國科會工程處完成之「航空工程技術研究發展規劃書」所述，“飛機引擎為飛機的心臟；其所涉及的技術層面亦屬最高者。”在規劃書中所提的近期與長期研究發展重點中，包括有壓縮機失速之研究及引擎監控與診斷系統之研發。這些項目正是本計畫所要研究的課題。

2、研究目的

為了提昇壓縮機系統的工作效率，在實際狀況下系統常會出現 “surge” 或 “stall” 等不穩定現象。此兩種不穩定現象不但影響系統之工作效率，而且可能造成機件受損。因此，在 1997 年 12 月國科會工程處完成之「航空工程技術研究發展規劃書」內所提的近期與長期研究發展重點中包含了壓縮機失速之研究及引擎監控與診斷系統之研發。這些項目正是本子計畫所要研究的課題。我們希望藉由本子計畫的執行能對噴射引擎研發之關鍵技術有

進一步的了解與掌控，同時經由研發過程培養壓縮機控制系統的研究人才。相信藉由研發成果技術的累積必能對國內航太工業發展，尤其是引擎技術的提昇有所助益。

三、結果與討論

在本計畫中，我們考慮如下之 Moore and Greitzer 壓縮機模型 [1]:

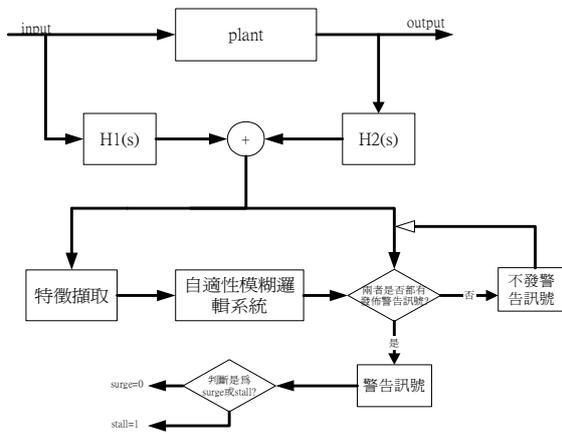
$$\frac{dA_c}{dt} = \frac{r}{fW} \int_0^{2f} C_{ss}(\dot{m}_c + WA_c \sin \alpha) \sin \alpha d\alpha, \quad (1)$$

$$\frac{d\dot{m}_c}{dt} = -\Delta P + \frac{1}{2f} \int_0^{2f} C_{ss}(\dot{m}_c + WA_c \sin \alpha) d\alpha, \quad (2)$$

$$\frac{d\Delta P}{dt} = \frac{1}{4B_c^2} [\dot{m}_c - F(x, \Delta P)]. \quad (3)$$

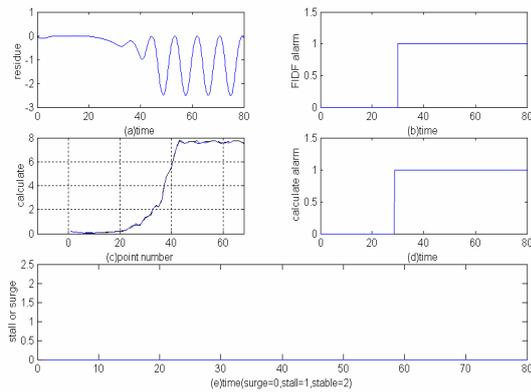
其中 A_c 為橫向失壓波之波幅的第一項諧和函數， \dot{m}_c 為無因次化壓縮機之氣流質量流， ΔP 為無因次化集氣室內壓力與環境壓力之差。此外，我們假設 ΔP 為可以量測到的系統狀態。本計畫針對此一模式進行壓縮機發生不穩定現象之偵測與診斷工作。

一般而言，以模式為基礎之偵測與診斷方法由於使用了系統之結構資訊，因此所獲得的結果較能反映系統之實際情況，然而此方法需要較精確的數學模型，在使用時比較容易受 model uncertainty 及雜訊的影響；而以訊號為基礎之偵測方法則直接對量測之訊號作處理，如使用專家系統、相關函數、高階統計量、頻譜及小波分析技術等，由於此方法迴避了數學模型是其優點，相對的也是它的缺點，因為它通常會遺漏系統之動態特性。在本計畫中，我們將結合以模式及以訊號為基礎之偵測方法來進行壓縮機系統發生不穩定現象之偵測與診斷工作。在以模式為基礎之偵測方法中我們採用 Fault Identification Filter (FIDF) 方法，此方法已被驗證為相當有效的一種偵測方法 [2, 4-6, 8-9]。然而 FIDF 法在實際應用上較難診斷不穩定現象之類型。因此，我們將其與 signal-based 的方法結合，以提升偵測與診斷之效率。在 signal-based 部分，我們選用模糊邏輯系統診斷法，因為模糊邏輯系統具有綜合應用數據訊息及智能專家訊息的特性。結合後的偵測與診斷系統表示如圖一。在圖一中我們首先將量

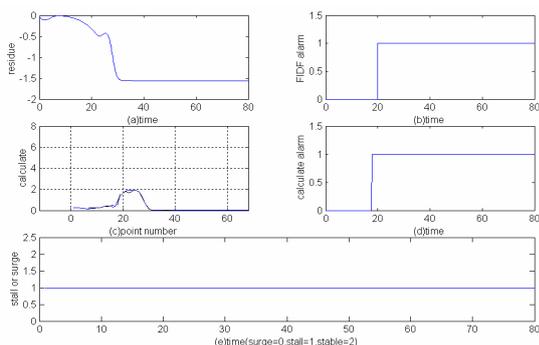


圖一：錯誤偵測與診斷系統

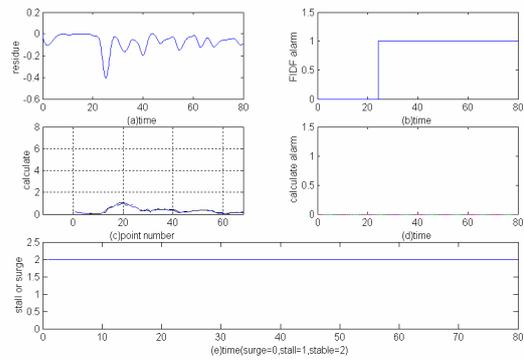
測到的輸出入訊號經由 FIDF 之濾波器 $H1(s)$ 及 $H2(s)$ 之處理 [2] 獲得殘量訊號 (Residual) 後，再經由特徵提取由自適應模糊邏輯系統 (Adaptive Fuzzy System, AFS) [7] 再次確認是否即將發生不穩定現象並診斷不穩定現象之類型。在特徵提取方面，我們是利用殘量訊號依時間區段之順序進行 STFT，並監測 surge 及 stall 發生之特定頻率的振幅變化資訊提供 AFS 當訓練樣本以訓練並更新規則庫。經由此資料庫之建立，AFS 能依當時的系統資訊來推測往後的系統狀態以決定是否發佈警告訊號。圖二-圖四為三個典型的偵測結果：



圖二：錯誤偵測與診斷結果



圖三：錯誤偵測與診斷結果



圖四：錯誤偵測與診斷結果

圖二-圖四中 (a) 為 FIDF 所產生的殘量訊號；(b) 為 FIDF 方法所得到的警告訊號；(c) 為將殘量訊號作 FFT 在頻率 0.117Hz 所得的振幅 (虛線為利用自適應模糊邏輯系統所預測的值) (d) 為 AFS 產生的警告訊號 (e) 為 AFS 診斷結果，其中 AFS 之診斷值為 0 時表示系統產生 surge，1 為 stall，2 表示沒有發生不穩定狀況。

由模擬的結果可以看出本計畫所提出之 model-based 和 signal-based 結合的偵測系統可以成功的偵測出不穩定現象的發生及其類型，並提高整個偵測結果之可靠度及降低誤報率。同時，AFS 只需利用 FIDF 所產生的殘量訊號，不必運算大量的訊號資料，因此可節省大量的運算時間。此外，由於 AFS 具有預測的功能，此功能可提升即時性偵測應用的可行性。在實際應用上，此研究可以提供早期警告訊號，使工程師可以根據診斷出的不穩定現象，建構出適當的控制法則來防止系統發生不穩定現象。

四、計畫成果自評

本計畫為一延續型計畫，計畫目的在於建立壓縮機系統不穩定現象的偵測與診斷機制，並提高其可靠度減少誤報的情況。就計畫而言，我們已達到預期的成果。這些成果即將整理於國內自動控制研討會中發表。累積已發表的研究成果包括：

1. 國際知名期刊 2 篇 (*IEEE Transaction on Automatic Control*)；
2. 國際研討會 3 篇 (*IEEE Conf. on Decision and Control* 1 篇及 *4th Pacific International Conference on Aerospace Science and Technology* 2 篇)；

3. 國內控制研討會 1 篇(中華民國自動控制研討會)。

五、參考文獻

- [1] M. K. Moore and E. M. Greitzer, A theory of post stall transient in axial compression systems: Part I-Development of equations, *ASME J. Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 108, 1986, pp. 68-76.
- [2] Y. -W. Liang and D. -C. Liaw, Detection of surge and stall in compression systems: an example study, *IEEE Trans. Automatic Control*, Vol. 46, No. 10, 2001, pp. 1609-1613.
- [3] Y. -W. Liang, D. -C. Liaw and T. -C. Lee, Reliable control of nonlinear systems, *IEEE Trans. Automatic Control*, Vol. 45, No. 4, 2000, pp. 706-710.
- [4] Y. -W. Liang, D. -C. Liaw, Y. -C. Wu and W. -Y. Huang, On detection of surge and stall in compression systems, *2000 中華民國自動控制研討會*, held at Hsinchu, Taiwan, pp. 102-107, March 17-18, 2000.
- [5] Y. -W. Liang and D. -C. Liaw, Application of FIDF to the detection of instability behavior in compression systems, *Proc. 39th IEEE Conf. on Decision and Control*, held at Sidney, Australia, pp. 1347-1352, December 12-15, 2000.
- [6] Y. -W. Liang, D. -C. Liaw and Y. -C. Wu, Detection of the instability behaviors in compression systems, *4th Pacific International Conference on Aerospace Science and Technology*, held at Kaohsiung, Taiwan, May 21-23, 2001, pp. 411-416.
- [7] L. -X. Wang, *Adaptive Fuzzy Systems and Control*, Prentice-Hall Inc., 1994.
- [8] 劉百恩, 壓縮機系統不穩定現象之偵測, 國立交通大學, 碩士論文, 2001.
- [9] 顏志霖, 壓縮機系統不穩定現象之偵測: 結合模型與信號為基礎之技術, 碩士論文, 2002.

