

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

軸向流壓縮機控制系統之研發—子計畫（三）
信號分析：模式判別、錯誤診斷與可靠度控制
(Signal analysis: system identification,
fault diagnosis and reliable control)

計畫類別： 個別型計畫 C 整合型計畫

計畫編號：NSC 89-2212-E-009-042

NSC 89-2612-E-009-004

執行期間：88年 8月 1日至90年 7月 31日

計畫主持人：吳永春 教授

共同主持人：

本成果報告包括以下應繳交之附件：

赴國外出差或研習心得報告一份

赴大陸地區出差或研習心得報告一份

出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份

國際合作研究計畫國外研究報告書一份

執行單位：國立交通大學電機與控制工程學系

中華民國 90年 10月 31日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

軸向流壓縮機控制系統之研發

子計畫 (三) 信號分析：模式判別、錯誤診斷與可靠度控制

(Signal analysis: system identification,
fault diagnosis and reliable control)

計畫編號：NSC 89-2212-E-009-042

NSC 89-2612-E-009-004

執行期間：88年 8月 1日 至 90年 7月 31日

主持人：吳永春 交通大學電機與控制工程系教授

一、中文摘要

近年來對噴射引擎壓縮機的發展，其工作穩定性問題一直是使效率提昇所欲克服的主要障礙。影響其工作穩定性的兩個主要問題為旋轉失速 (stall) 和激振 (surge)。所謂激振 (surge)，其特性為在壓縮機中出現一維的質量波動，此時壓力差會出現一忽高忽低的週期性振盪現象；而旋轉失速 (stall) 特性則是擾動波沿壓縮機周向傳播的現象。當此兩種非線性氣動現象出現時壓縮機溫度迅速升高，並可能導致嚴重的機械損壞。因此，如何去辨識發生激振 (surge) 與旋轉失速 (stall) 的可能原因，於此類不穩定現象發生的初期即予以偵測出並做適當的處置以防止不穩定現象的發生是極重要的課題。這也是在本子計畫中錯誤偵測與診斷 (fault detection and diagnosis) 子題所處理的議題。在本子計畫中，我們應用信號處理技術及錯誤診斷濾波器 (Fault Identification Filter) 的設計成功的偵測出壓縮機系統即將進入不穩定現象的徵兆，有效的提供給工程師早期的警告訊號。此外，本子計畫也研究如何設計可靠度控制法則 (reliable controllers) 使得系統即使某些零件，如致動器與監測器

(actuators or sensors)，發生故障或退化時也能正常運作免於進入不穩定的現象。由於這些理論分析所依據的數學模式必須源自實際系統才能顯現其真正的價值。因此，本子計畫也透過系統判別中子空間判別法的技巧去估測實際壓縮機系統之系統參數。同時，結合實驗部分之子計畫驗證理論及模擬結果。

關鍵詞：旋轉失速、激振、錯誤偵測與診斷、可靠度控制法則、子空間判別法

Abstract

In developments, the main obstacle for raising the operating efficiency of a compression system is its instability. The related dynamics and control schemes then cause lots of interests among engineers and researchers. Two main phenomenacausing the instabilities are the ``surge'' and ``stall'' behaviors of the compressed gas. The so-called ``surge'' is characterized as a one-dimensional mass wave motion while ``stall'' is a wave-like disturbance propagating along the circumferential direction with a constant rotating speed. 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 distinguish the cause of "surge" and "rotating stall," to detect incipient instability phenomena and take appropriate action to prevent the instability. This is what the main issue of fault detection and isolation in this project. We have used signal processing tools and designed Fault Identification Filter to perform the detection task. It was shown that the instabilities of the compressor can be successfully detected at the onset. In addition, we also have studied the design of reliable controllers to maintain the operation of the system even when some control components, for example actuators, fail. Finally, to highlight the benefits of the proposed design, we also employed the subspace identification method to estimate the parameters of the compressor system and put them in a real compressor.

Keywords: Surge, Stall, Fault detection and diagnosis, Reliable control, subspace identification

二、計畫緣由與目的

1、背景說明及計畫重要性

為提高噴射引擎效率，利用軸向流壓縮機系統 (axial flow compression system) 提昇除氣室 (plenum) 的壓力為一直接、有效的方法，然而當壓縮機 (compressor) 運轉接近其所能達到最大壓力差時，壓縮機系統會呈現所謂的 "surge" 或 "stall" 等不穩定的現象而大幅降低引擎效率，甚至發生 "失壓" 危險。基本上，所謂的 surge 現象是指壓縮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。此外，由於在高壓時壓縮系統處於一不穩定平衡狀態，此時由於擾動因素使得系統轉至另一穩定但壓力差為遽降的狀態，此即俗稱的 "stall" 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，針對 "surge" 與 "stall" 的成因並建立偵測此徵兆之法則以提供系統資訊，幫助系統做出及時且適當處理的方法乃成了近年來相關領域的熱門研究課題。此外，由於系統可能會有致動器 (actuator) 或監測器 (sensor) 發生故障或退化的現象，如何設計出可信賴的 (reliable) 足以容忍上述現象使系統仍能維持穩定的控制法則也是極重要的課題。

壓縮機系統所呈現的 "surge" 或 "stall" 等現象是實際狀況所不樂於見到的。事實上，一般複雜的高精密系統往往會因無法預期的一些變化，如系統零件損壞，操作點的變動等因素而使系統的整體表現出現退化甚至不穩定的現象。因此，許多學者投注了許多精力在如何及時偵測出錯誤發生前的徵兆，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)。此處所謂的錯誤 (fault) 是指系統產生非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。而一個用來偵測錯誤及診斷錯誤的來源、大小及發生時間的子系統我們稱之為錯誤偵測及診斷系統 (fault detection and diagnosis system)。此系統具有兩個主要任務：錯誤偵測 (fault detection) 及錯誤隔離 (fault isolation)。錯誤偵測決定系統是否出了問題而錯誤隔離則決定錯誤的來源、大小、發生時間及形成原因。總括來說，錯誤偵測與錯誤隔離 (FDI) 的主要目的在於如何偵測系統是否發生異常，而當發現系統有異常現象時，能給予及時且適當的處置以維持系統的正常運作，並維持系統之安全性及可信賴度。也就是它必須要能指出系統是否有非預期 (unexpected) 及不被允許 (unpermitted) 的狀況發生，及採取必要的行動維持系統的正常運作防止系統發生損壞或意外。傳統的 FDI 是檢驗所偵測到的訊號是否超出某一預設的極限值再由操作員做出反應，或是有危險狀態出

現時由系統或操作員直接做出處置（如關機）。近代的 FDI 則是著重在利用輸出輸入得到的訊號關係自動做出決策。譬如停止系統操作、改變系統之操作、重新配置系統致動器輸出法則、啟用備用元件或即時維修等必要措施。

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研究的課題。

2、研究目的

為了提昇噴射引擎壓縮機的工作效率，在實際狀況下常會出現“surge”或“stall”等現象。此兩現象不但影響工作效率，而且可能造成系統的不穩定，甚至使機件受損。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研究的課題。本計畫具體的研究目的有：

- (1) 用子空間判別法估測軸向流壓縮機控制系統的系統參數。
- (2) 針對軸向流壓縮機控制系統進行失壓偵測與診斷的理論分析及模擬。
- (3) 研究壓縮機系統失壓現象發生前的徵兆。
- (4) 失壓偵測與診斷之性能評估。
- (5) 針對軸向流壓縮機控制系統設計可靠度控制法則。

三、結果與討論

我們針對 1986 年 Moore 和 Greitzer 提出之模式[1]進行研究，此模式為提供分析 stall 和 surge 現象及相關控制律設計的有效基礎，其動態行為方程組如下：

$$\begin{aligned} \frac{dA}{dt} &= \frac{r}{fS} \int_0^{2f} c_{ss}(\dot{m}_c + \tilde{S}A \sin_n) \sin_n d_n \\ \frac{d\dot{m}_c}{dt} &= -\Delta p + \frac{1}{2f} \int_0^{2f} c_{ss}(\dot{m}_c + \tilde{S}A \sin_n) d_n \\ \frac{d\Delta p}{dt} &= \frac{1}{4B} \{ \dot{m}_c - F(X, \Delta p) \} \end{aligned}$$

其中狀態變數 A 為橫向失壓波之波幅 (stall wave amplitude)， m_c 為氣流質量流速， p 為集氣室相對大氣之壓力差， $r, \tilde{S} > 0$ 為常數， B 為調氣閥壓力控制參數，而 B 值為一正比於壓縮機轉速的系統參數[1]。另外，函數 F 決定於 throttle 的形式及 nozzle 的面積。

在本計畫中，我們針對 Moore 和 Greitzer 提出之軸向流壓縮機系統進行系統參數之模式判別、不穩定現象之錯誤偵測與診斷及控制系統之可靠度控制研究。茲分述如下：

在壓縮機系統之特性曲線估測方面，我們採用子空間判別法針對固定超作點及變動操作點兩種情況進行估測。採用此判別法之好處在於它並不要求系統必須在最少狀態變數表示出之標準形式 (canonical form) 下，但要求量測到的輸出入數據要有較高的準確度。由於系統模式之高度非線性，我們首先對系統進行線性化處理並應用子空間判別技巧估測系統之特性曲線。在離線 (off-line) 的情況下，我們獲得相當不錯的結果。但在在線 (on-line) 情況時，估測的結果有待更進一步的分析與測試 (詳見 [7, 8, 10])。

在壓縮機系統不穩定現象之錯誤偵測與診斷方面，我們已獲得如下成果：由於我們觀察到當壓縮機系統 surge 及 stall 發生時，系統之狀態（如壓力差及流速）會產生急遽的變化。然而，其線性化模式之狀態則與閥門開啟量呈現線性的關係。因此，我們利用輸入訊號及非線性與其線性化模型輸出量之差，透過設計所謂的錯誤偵測與診斷濾波器來產生殘量 (residual)。我們在理論分析及模擬上已能成功的早期偵測到 surge 及 stall 的現象，經由適當調整濾波器之判斷門檻 (threshold)，濾波器的敏感度 (sensitivity) 也可相對獲得調整 (詳見 [2, 4, 5])。另外，我們也觀察到當量測到的狀態訊號經過簡單的處理後，訊號在不穩定現象發生的初期會出現某一特定頻率的震盪。因此，我們也應用了信號分析之技巧對於量測處理後的訊號從事分析與判別。這些信號分析之技巧包括 Short-time Fourier Transform, Wigner-Ville Distribution 及 M-channel Filter Bank。從所

獲得的結果中我們發現經由適度的調整門檻值，系統不穩定現象發生時所出現的特殊頻率都可以由這些方法偵測出來。其結果及性能表現請詳見[9]。這些結果將可用來提供給操作工程師警告訊號以採取適當的控制策略防止不穩定現象之發生。

在可靠度控制方面，我們獲得特定致動器失效時系統仍能穩定運作的條件及其對應之性能表現。由於所獲得的可靠度控制器取決於對應系統動態之Hamilton-Jacobi 不等式，我們也就某些特殊情況尋求此不等式之解（詳見[3]）。

四、計畫成果自評

本計畫的主要目的是在判別壓縮機系統之特性曲線及偵測壓縮機不穩定現象是否發生。就計畫而言，我們已達到預期的成果。這些研究成果相信可以為以後的研究奠定

良好的基礎。所獲得的具體成果包括：

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 axialcompression 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 Yung-Chun 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] Y.-C. Wu, K.-S. Kou, D.-C. Liaw, Y.-W. Liang, Using Subspace Method to Identify the Compression System Parameters, *4th Pacific International Conference on Aerospace Science and Technology*, held at Kaohsiung, Taiwan, May 21-23, 2001, pp. 567-572.
- [8] 郭國勝, *用子空間法判別壓縮機系統參數*, 國立交通大學, 碩士論文, 2000.
- [9] 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.
- [10] 孫明德, *以子空間判別法估測壓縮機系統之參數*, 國立交通大學, 碩士論文, 2001.