

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 88-2212-E-009-022

執行期間：87年 8月 1日 至 88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，噴射引擎壓縮機工作穩定性問題一直是其效率提昇所欲克服的障礙。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）子題所要處理的目標。同時，本子計畫也將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。此外，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，本子計畫也將透過系統判別的技巧去估測實際壓縮機系統之系統參數。

關鍵詞：旋轉失速、激振、錯誤偵測與診斷、可靠度控制法則

Abstract

In the recent years, the main obstacles for raising the operating efficiency are instabilities of the compressor system. The related dynamics and control schemes then cause lots of interests among engineers and researchers. Two main phenomena which caused the instabilities are the “surge” and the “stall” behavior of the compressed gas. The so-called “surge” is characterized as a one-dimensional mass wave motion while “stall” is 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 goal of fault detection and isolation. In addition, in this project, we would like to study the design of reliable controllers to maintain the operation of the system even when some control components, for example, actuators and sensors, fail. Finally, system parameters of the compressor system will be estimated by the use of system identification technique.

Keywords: Surge, Stall, Fault detection and diagonalization, Reliable control

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，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系統資訊，幫助系統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。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(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 detect 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利用因果推理 (cause-effect relations) 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、啟用備用元件或及時維修等必要措施。

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所要研究的課題。

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

我們針對 1986 年 Moore 和

Greitzer 提出之模式[1]進行研究，此模式提供分析 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：

$$\begin{aligned}\frac{dA}{dt} &= \frac{\alpha}{\pi\omega} \int_0^{2\pi} c_{ss}(\dot{m}_c + \omega A \sin \theta) \sin \theta d\theta \\ \frac{d\dot{m}_c}{dt} &= -\Delta p + \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} c_{ss}(\dot{m}_c + \omega A \sin \theta) d\theta \\ \frac{d\Delta p}{dt} &= \frac{1}{4B^2} \{\dot{m}_c - F(\gamma, \Delta p)\}\end{aligned}$$

其中狀態變數 A 為橫向失壓波之波幅 (stall wave amplitude)，為氣流質量流速， Δp 為集氣室相對大氣之壓力差， ω ， $\alpha > 0$ 為常數， γ 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。

我們利用錯誤偵測與診斷的處理方式，藉由 FIDF[2, 3] 的設計能成功的偵測到 stall 的發生。首先，我們假設壓縮機的特性曲線為如下的三次函數[5]：

$$C_{ss}(\dot{m}_c) = 1.56 + 1.5(\dot{m}_c - 1) - 0.5(\dot{m}_c - 1)^3$$

由於用於錯誤偵測的 FIDF 適用於線性系統，因此我們先對 G-M 模式在操作點 $x=(0, 2.28, 2.43)$ 及 $u=1.463$ 求得其線性化模式並假設可觀測到的輸出為 \dot{m}_c 及 ΔP 。透過 FIDF 的設計程序我們獲得產生差量的濾波器。整個設計的概念是將壓縮機的輸出與其線性化模式的輸出的差量當成是 fault，由於 stall 產生前後系統的狀態值會有明顯的變化而線性化模式則否，因此由設定 residue 的 threshold 可有效的偵測出 stall 的產生。

模擬結果顯示在圖一、圖二及圖三中。在這些模擬中我們取 $B=0.5$, $W=1$, $\alpha=0.4114$ 。在圖二中，圖一(a)顯示閥門的開啟量，圖一(b)顯示三個狀態變數的響應情況，圖一(c)顯示 residue 值，圖一(d)為警報圖(當 residue < 0.3)。在此例中閥門的開啟量先維持在 1.5 再由 1.5 降至 1.1 然

後維持在此一開啟量。由此圖可以很明顯的看出在 $t=30$ (residue=-0.3)附近系統有 surge 的現象發生。在圖一(c)中的 residue 值也在此時急速增大明顯的反應出 surge 的產生。在圖二中，閥門的開啟量直接由 1.5 降至 1.1 然後維持在此一開啟量。由此圖可以很明顯的看出在 $t=20$ (residue=-0.3)附近 A 已經有明顯的上升趨勢，系統有 stall 的現象發生。在圖二(c)中的 residue 值也在此時急速增大明顯的反應出 stall 的產生。如果我們設定 residue 臨界值為 -0.3，則當 residue 達到此一臨界值時我們放寬控制閥門如圖三(a)，模擬結果顯示在圖三中，由模擬圖顯示的確可避免不穩定現象的發生。

四、計畫成果自評

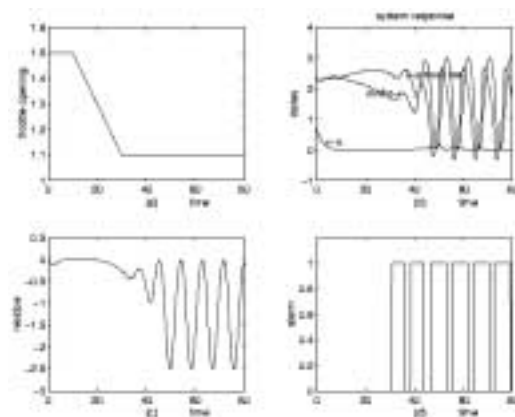
本計畫的主要目的是在判別壓縮機系統之特性曲線及偵測壓縮機不穩定現象是否發生。就計畫而言，我們已達到預期的成果。部份成果將發表於 2000 自動控制研討會[4]。

四、參考文獻

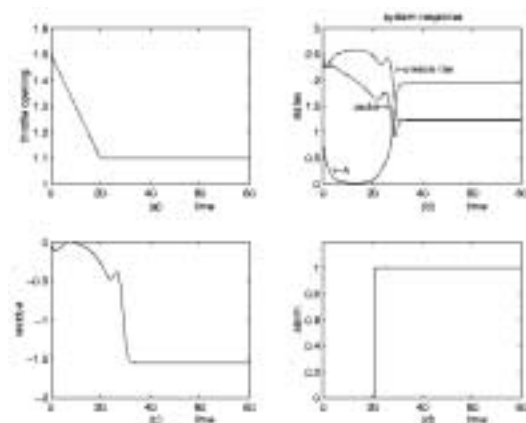
- [1] F.K. Moore and E. M. Greitzer, "A theory of post stall transient in axialcompression systems: Part I-Development of equations," ASME J. Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 108, 1986, pp. 68-76.
- [2] S.-K. Chang and Pau-Lo Hsu, "A Transfer Matrix Approach for Designing the Fault Identification/Detection Filter," 11th IASTED Symposium on Modeling, Identification and Control, Innsbruck, Austria, Feb., 1992, pp. 375-377.
- [3] S.-K. Chang and Pau-Lo Hsu, "Design the Fault Identification/Detection via a simplified Transfer Matrix

Approach," 1992 ACC, Chicago, June, 1992, pp. 2119-2120.

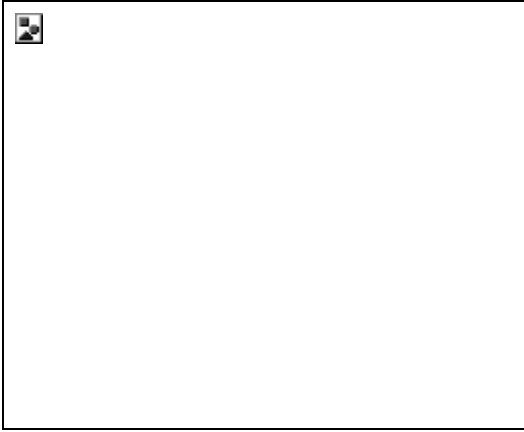
- [4] Y.-W. Liang, D.-C. Liaw, Y.-C. Wu and W.-Y. Huang, "On detection of surge and stall in compressor systems," submitted to 2000 自動控制研討會, 1999.
- [5] D.-C. Liaw and E.H. Abed, "Active control of compressor stall inception: a bifurcation-theoretic approach," *Automatica*, Vol. 32, pp. 109-115, 1996.



圖一



圖二



圖三