

# 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—總計畫

### The Development of Axial Flow Compression Systems

計畫編號：NSC 88-2212-E-009-020

執行期間：87年 8月 1日 至 88年 7月 31日

主持人：廖德誠教授 交通大學電機與控制工程系

#### 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，並於此類不穩定現象發生的初期即予以偵測出並做適當的控制以防止不穩定現象的發生是極重要的課題。本計畫分三年進行，目的在建立一軸向流壓縮機控制系統，為了能建立一有效可靠的控制系統，將由理論分析與實驗驗證雙方面同時進行。由實際低速軸向流壓縮機控制系統的建立與實驗數據的量測，將建立 1986 年 Moore 和 Greitzer 所提之相關壓縮機系統數學模式與經由系統判別軟體所獲得之參數式系統模式等兩種不同分析模式。由實驗的驗證與電腦系統模擬探討兩種分析模式的準確性以獲得較合理之壓縮

機系統動態模式。根據所獲得之動態模式設計錯誤診斷，可靠度控制，失速控制與強健控制等控制法則及經由實際系統驗證以期提升壓縮機系統的工作性能與達成計畫整合之目的。本計畫共分為五個子計畫，分別為：旋轉失速實驗量測與控制；量測與控制介面研製；信號分析、模式判別、錯誤診斷與可靠度分析；強健特性分析與控制及動態特性分析與失速控制。

關鍵詞：軸向流壓縮機系統、旋轉失速、非線性控制

#### 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 control to prevent the instability. The main goal of this three-year research project is to establish a real axial flow compression control system. In this Project, we consider to fulfill the research tasks via theoretical analysis and experimental verification. From the experimental data, the mathematical model of the test-bed system will be established for the dynamical analysis and the design of control laws for stall prevention, fault detection, reliable control and robust control. The theoretical designs will then be implemented for the built test-bed compression system for verification. This project is consisted of five sub-projects: measurement and control of rotating stall; development of measurement and control of interface; signal analysis; system identification, fault detection and reliable control; robustness analysis and robust control, dynamical analysis of system, and stall control.

**Keywords:** Axial flow compression systems, Rotating stall, Nonlinear 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 “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。過去數年間，有關噴射引擎系統效率的提升與動態特性分析等研究已有不少文獻發表。然而，大多數都是從機械設計的關觀點經由數值分析或實驗驗證而得。而由系統理論觀點探討相關問題的文獻並不多見。一般而言，藉由系統理論分析所獲得的分析法則較不受系統結構的影響。且其所獲得的控制法則較能提供可信賴的設計。由於噴射引擎系統是一個高度非線性系統，藉由數值分析或實驗數據所獲得之結果只能了解系統部分特性。因此，如何藉由系統理論分析的輔助，以有效掌握及控制系統動態特性，乃成為目前有關噴射引擎的重要研究課題。

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

本整合型計畫是配合國科會航空學門對於未來航空工程技術研究發展之規劃。總目標在於結合學術單位具不同專長的人力資源與研究經驗，見建立一軸向流壓縮機控制系統之實驗平台與從事壓縮機失速控制、壓縮機測試技術、壓縮機 FADEC 系統之研發及監控與診斷系統之研發。期能藉由本計畫的執行，對噴射引擎研發之關鍵技術有進一步的了解與掌控，並藉由研發過程對於壓縮機控制系統研究人才的培養及研發成果技術的累積，能對國內航太工業發展，尤其是引擎技術的提升有所助益。其具體的研究

目的包括(1)提高壓力差；(2)加壓曲線的探討；(3)失壓信號的偵測；(4)適時的警告，以避免失壓現象發生；(5)當有失壓現象發生時，研究如何失壓回復；(6)提供系統可靠度控制；(7)研究穩健控制(robust control)，提高對干擾的忍受程度；(8)壓縮機監控系統研製。

### 三、結果與討論

本計畫為三年期之整合計畫，已執行之第一年計畫所獲得之研究成果如下：

#### 子計畫一：

在計畫原定大尺寸之單級軸向流壓縮機進行了多次實驗，使用熱線(Hot-wire)置於氣流入口處量測流場的速度，並進一步探討流場中的rotating stall的現象。由實驗數據顯示，流場在發生stall前，其不穩定性會明顯的增加，而後發展成為完全的rotating stall現象，所產生的stall cell頻率達到軸頻率的0.93，同時，熱線的訊號顯示stall cell的體積相當小。

由實驗得知rotating stall的頻率很高，而壓縮系統中的調氣閥的速度則很慢，無法勝任未來的控制任務，且此系統結構不易改裝，為使往後計畫順利進行，建議重新建立一較小型的軸向流壓縮系統。

#### 子計畫二：

雖未獲第一年經費補助，經總計畫主持人向交大研發處申請到設備經費補助，已進行氣流流速量測之先期研究工作。

#### 子計畫三：

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現象及相關控制法則

設計的有效基礎，其動態行為方程組如下：

$$\frac{dA}{dt} = \frac{\alpha}{\pi\omega} \int_0^{2\pi} C_{ss}(\dot{m}_c + \omega A \sin \theta) \sin \theta d\theta \quad (1)$$

$$\frac{d\dot{m}_c}{dt} = -\Delta p + \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} C_{ss}(\dot{m}_c + \omega A \sin \theta) d\theta \quad (2)$$

$$\frac{d\Delta p}{dt} = \frac{1}{4B^2} [\dot{m}_c - F(\gamma, \Delta p)] \quad (3)$$

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， $\Delta p$  為集氣室相對大氣之壓力差， $\omega$ ， $\alpha > 0$  為常數， $\gamma$  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，假設壓縮機的特徵曲線為如下的三次函數[4]：

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

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模式在操作點求得其線性化模式，並假設可觀測到的輸出為 $\dot{m}_c$ 及 $\Delta p$ 。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，當residue達到臨界值時，即stall即將發生時，放寬控制閥門的確可避免stall現象的發生。

#### 子計畫四：

在本研究計畫裡，我們應用非線性控制理論及數值模擬方式深入探討軸向流壓縮系統的強健性控制。一般而言，軸向流壓縮系統的特性曲線不易由實驗精確求得，只能近似得到，

因此，考慮特性曲線未知下的強健性控制就非常重要。我們提出了一個非線性的控制器，可以在未知特性曲線下使系統仍保持局部穩定。所提出之控制器結構簡單，易於實現，應具有相當的實用性。研究仍以 1986 年 Moore 和 Greitzer 提出之模式為基礎，成果如下：

### 1. 系統特性分析

式(1)在特性曲線的峰值右邊為一穩定子系統，若可將狀態變數拉至此一區域即可使狀態變數  $A$  穩定，則 surge 現象可消除之。再觀察式(2)，若可使氣流質量流速  $\dot{m}_c$  拉至局部極大(峰值發生處)右邊，即可滿足上述要求。若以  $\Delta P$  視為虛擬控制器，則可使用類似 High-gain 之手法，將  $\dot{m}_c$  在短時間內拉至右邊。然而  $\Delta p$  不是真正的控制器，故仍需修正以得到真正的控制器。再觀察式(3)，真正的控制器為  $\gamma$ ，粗略的說  $\Delta p$  為  $\gamma$  之積分，故有延遲及累積效應。控制的策略為使用 High-gain 使  $\Delta P$  瞬間到達應有的值，則就有可能使  $\dot{m}_c$  維持在峰值發生處右邊。此時，穩定性控制器不難設計，Stall 現象可消除之。

### 2 強健控制器設計

設平衡點為  $(0, \dot{m}_c^0, \Delta P^0)$ ，並定義誤差變數如下：

$$x_1 = A, \quad x_2 = \dot{m}_c - \dot{m}_c^0, \quad x_3 = \Delta p - \Delta p^0$$

則強健控制器可根據 1. 之分析而得，詳細的設計與推導將發表在自動控制研討會上。在推導的過程中，我們亦考慮到物理上的限制，例如  $\gamma$  及  $\Delta P$  皆應為正，不應在某些時間變為負，否則方程式(1)到(3)將無法成立，系統可能轉變成另一個方程式，將使整個推導的理論基礎出現漏洞，本計畫所設計的控制器除了不需知道特性曲線  $C_{ss}$  以外，並考慮物理的自然限制，即  $\gamma$  及  $\Delta P$  皆應為正之下，來設計一簡單易實現的控制器。

子計畫五：

我們以 Moore-Greitzer 所提出之系統模式，進行系統動態特性分析，再依據 Lyapunov method，建立適當的 Lyapunov 函數，以分析系統的穩定性，並用以估測系統區域(local)及全域(global)的穩定區間(DOA)，對不同的壓縮機特性函數，估測系統的穩定區間，進而研究擴大全域穩定區間的控制法則與失速控制法則之設計。

在理論推導上，利用 Lyapuniv direct method，確定若 Lyapunov 函數為正定函數，則系統具有漸進式穩定性，進一步應用穩定條件來估測條件，可適用於所有形式的壓縮機特徵函數特性，對於全域穩定控制律及非線性控制器的設計，具有實用性，並以實例驗證這些估測條件可以有效地用來估測實際的穩定區間。

我們也成功的應用漸步法(Back-stepping)設計在 Moore 和 Greitzer 的三階常微分系統模式上，以得到一有效的全域穩定控制律。其採用的制動器有氣流注射及出口調氣閥等，另外，也應用模糊控制(fuzzy control)來設計消除失壓波控制器。

我們所設計相關可行的控制法則，可以用來擴大系統的穩定區間及控制失速現象，並將結合相關的子計畫作實驗的驗證，評估其實用性，期能增加引擎的工作效率。

### 四、計畫成果自評

原計畫中實驗用的壓縮機系統是由台大應力所現有之軸流壓縮機進行改裝，在經過審慎地針對其體積及慣量評估後，確定該壓縮機系統結構無法符合本計畫實驗的要求，且其結構修改不易，而在本計畫中，需要改變 throttle 結構及增加 IGV，因此在子計畫主持人建議下，決定改採結構較小的軸流式壓縮系統，使用大型搖控模型飛機之導風扇為壓縮機本體，建立新的軸流壓縮控制系統。此外，由

於主要研究人力在新竹交通大學及明新技術學院，為便於實際系統之設計與實驗，此一系統將改於交通大學建立，目前已完成設計，仍在加工中。

本計畫中除子計畫一因實驗系統建立之計畫改變而造成進度延遲及子計畫二未獲第一年補助外，其他各子計畫均達到預期的目標。子計畫一之軸向流壓縮機系統的建立雖有延遲，但由於整個實驗系統改在交通大學，有助於未來研究期間之討論與修改，加速研究之進行，可望在未來趕上預定之研究進度。部份成果已投稿或發表於國際著名期刊，及投稿 2000 年自動控制研討會，如參考文獻[5]-[10]。

##### 五、參考文獻

- [1] F. 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] 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] D. -C. Liaw and E. H. Abed, "Active control of compressor stall inception: a bifurcation-theoretic approach," *Automatica*, Vol. 32, pp. 109-115, 1996.
- [5] D.-C. Liaw and J.-T. Huang, "Fuzzy control for stall recovery of axial-flow compressor dynamics," *Journal of Control Systems and Technology*, Vol. 4, No. 3, 1998.
- [6] D.-C. Liaw and J.-T. Huang, "Global stabilization of axial compressors using nonlinear cancellation and backstepping designs," *International Journal of Systems Science*, Vol. 29, No. 12, 1998, pp. 1345-1361.
- [7] D.-C. Liaw and J.-T. Huang, "Robust stabilization of axial-flow dynamics via Sliding-Mode Designs," submitted to *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, July, 1998.
- [8] D.-C. Liaw and C.-C. Song, "A Lyapunov function for axial flow compressor dynamics," submitted to 2000 年自動控制研討會, 1999
- [9] 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 年自動控制研討會, 1999.
- [10] T.-C. Lee, "Robust Throttle Control for Axial Compressors Using Backstepping Design," submitted to 2000 年自動控制研討會, 1999.