

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

總計畫 (2/3, 3/3)

The Development of Axial Flow Compression System

計畫類別： 個別型計畫 C 整合型計畫

計畫編號：NSC 89 - 2212 - E - 009 - 041

NSC 89 - 2612 - E - 009 - 003

執行期間： 88 年 8 月 1 日至 90 年 7 月 31 日

計畫主持人：廖德誠 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

總計畫 (2/3, 3/3)

The Development of Axial Flow Compression System

計畫編號：NSC 89-2212-E-009-041

NSC 89-2612-E-009-003

執行期限：88年8月1日至90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

本整合型計畫之研究目的在於建立一噴射引擎軸向流壓縮機控制系統。此計畫共有五個子計畫：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、錯誤診斷與可靠度控制、強健特性分析與控制及動態特性分析與失速控制等分三年進行。第一年進行閥門控制式壓縮機實驗系統的建立及各控制法則之理論分析與控制軟體之初步研製。第二年除了進行第一年理論分析所得之控制法則在實際驗證以外，同時進行壓縮機轉速控制系統的建立及相關失速控制理論的分析與設計。第三年之工作重點則在於整個壓縮機轉速與門閥整合之實驗控制系統的驗證。本報告為第二年和第三年之計畫成果報告。

為了能多了解噴射引擎軸向流壓縮系統的動態特性及提升其工作性能，本計畫希望能從理論分析與實驗驗證兩方面同時進行。藉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(子計畫一、二)，本計畫將建立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(子計畫三、五)。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(子計畫一、二、三、五)。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

工作性能與計畫整合之目的(子計畫一、二、三、四、五)。

關鍵詞：軸向流壓縮機系統、旋轉失速、非線性控制

Abstract

The main goal of this three-year research project is to establish a real axial flow compression system, which 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. In the first year, we have established a throttle control based compression system. The tasks include theoretical analysis of control laws, and development of control software. In the second year, preliminary experimental study for the verification of the control laws were obtained in the first year was carried out. Moreover, we also developed compressor velocity based stall control laws and fault detection schemes for the mathematical model of compression system. In the third year, most of the efforts were devoted to the experimental verification of compression system and the improvement of control laws.

Keywords: Axial flow compression system, rotating stall, nonlinear control.

二、計畫緣由與目的

渦輪引擎在各項工業的能源及動力供應上有著不可或缺的地位，在航太工業中更是關鍵的元件，因此相關的研究一直是產學界的重要課題。提升渦輪引擎的效率不僅增加其工作能量，也節省相當可關的能源損失，而提升渦輪引擎效率最直接有效的方法是提升壓縮機段的壓力昇，然而當壓縮機運轉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，即所謂的激喘(surge)或旋轉失壓(rotating stall)，使得壓力昇反而急遽減少而大幅降低引擎的效率，情況嚴重的，甚至發生失壓及造成渦輪機損毀，因此渦輪引擎所設計之操作點均遠離此一最大壓力昇，以避免危險，傳統的渦輪機改善是從流體力學及機械結構的研究，直接提升壓縮機的性能，這樣的研究不僅費時費事，所得到的成果也極為有限。

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，建立一軸向流壓縮機控制系統的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。期望藉由本計畫的執行，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員技術的累積，能對國內航空工業發展，尤其是引擎技術的提升有所助益。

具體的研究目的有：

- (1) 提高壓縮機系統的壓力差。
- (2) 加壓曲線的探討。
- (3) 失壓訊號的偵破。
- (4) 適時提供警告，並採取行動避免失壓現象發生。
- (5) 發生失壓現象時，研究如何排除失壓現象。
- (6) 提供系統可靠度控制(reliable control)。
- (7) 研究強健控制(robust control)，提高對

干擾的忍受程度。

(8) 壓縮系統監控系統研製。

此計畫結合不同領域的學者專家分工合作，包括電子、機械、控制及信號分析等人才從事實驗量測、實際操作、信號分析、系統判別、控制與降低干擾的敏感度等方面的研究。

三、結果與討論

整體而言，在過去三年的整合型計畫執行期間各子計畫在總計畫的統合之下，分別完成了一些階段性的目標，其成果除了在期刊及研討會的論文發表上獲得肯定(詳見參考文獻)，也使得計畫朝預期的目標邁進了一大步，其具體成果分別簡述如下：

A. 實驗與介面部分：

- (1) 設計並建立實驗壓縮機系統之基本架構。
- (2) 完成壓縮機特徵曲線的量測。
- (3) 完成實驗壓縮機系統的規劃。
- (4) 完成量測儀器的測試。
- (5) 完成量測儀器的校正。
- (6) 初步建立介面控制系統。
- (7) 完成部份數據整理的軟體撰寫。
- (8) 完成初步制動器如壓縮機馬達驅動器及調氣閥控制之改裝。

B. 系統模式判別與失速信號偵測：

- (1) 建立錯誤偵測理論，偵測失速現象。
- (2) 成功進行電腦模擬，證實理論有效的偵測出失速現象並發出警告。
- (3) 建立壓縮機模式判別之理論推導並經模擬驗證其可行性。

C. 動態特性分析與控制：

- (1) 應用非線性控制理論及數值模擬方式深入探討壓縮機系統的強健性控制。
- (2) 提出一個非線性控制器，可在特徵曲線不明下仍使系統保持局部穩定。

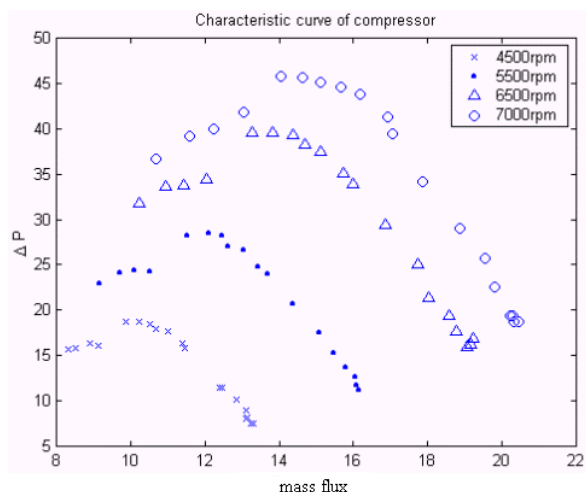
- (3)應用漸步法設計，得到一有效的全域穩定控制律。
- (4)應用模糊控制設計消除失壓波的控制器。
- (5)有效利用 Lyapunov direct method 判斷系統的穩定性。
- (6)應用穩定條件估測系統的穩定區間，可適用於所有形式的壓縮機特徵曲線。
- (7)有效應用可變結構控制(VSC)法則，於其模式不確定性之壓縮機的失速控制，而提供全域穩定之調氣法則。使用電腦模擬成功的驗證理論。

在過去三年中，我們獲得國科會航太學門整合型計畫經費補助，雖然研究成果豐碩，共發表多篇研討會論文及國際性期刊論文，也自己設計並建立一套小型軸流式壓縮機控制系統，其壓縮機特徵曲線如圖一所示，調氣閥特徵曲線如圖二所示。然而，仍有很多問題有待我們作進一步探討。茲簡述如下：

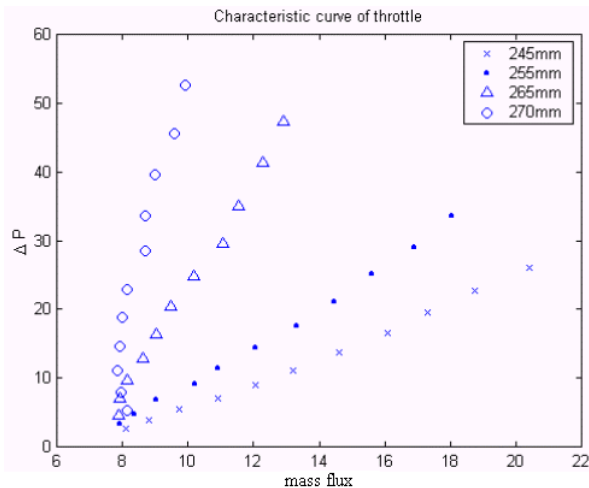
- A.在實驗過程中，我們碰到所採購之氣流流量及壓力量測器誤差度過高且雜訊干擾頗大。因此，在量測信號處理上須作進一步的改進，才能較適合迴授控制之需。
- B.在系統實驗過程中，所採購之氣閥控制平台之移動速度不夠快，且目前市面上並無適用之快速平台。
- C.在研究過程中，我們嘗試 IGV 的架構設計，然而碰到不好組裝及不好控制及實用價值仍有待商榷等問題，因此，為了讓控制效果更好，在未來的研究上，我們需考慮加入其他可行的制動器。
- D.由於為了讓所設計組裝之壓縮機系統能夠發生 stall 或 surge 等不穩定現象，控制壓縮機氣流之馬達轉速必須很高，第二年時，我們採用拆船所得之 AC 馬達，其轉速可達 10000rpm，

但是在控制上為手動，且與扇葉葉片耦合部分常出狀況，另外維修不易。在第三年執行計畫時，我們採購一新的日製高速 AC 馬達，使得實驗工作效率提高不少。但是，其控制方式為透過 RS232，頻寬不適用於迴授控制之用。

- E.總計畫主持人於 88 年 9 月至 89 年 12 月參與工研院航太中心之氣源車(LGC)研發計畫，經與該計畫之美籍顧問討論，以壓縮機轉速作為壓縮機系統控制為商業引擎控制上的一種方式，其方法為藉由轉速不同改變壓縮機之壓力 map 而達到系統穩定之目的。他們的作法大都以經驗為主，而較無學理之推導。就我們的了解，目前國內外有關之學術研究論文也不多見。
- F.在本整合型計畫中，我們在監控部分之軟硬體設計著墨並不多，這一部份之研究仍有待進一步探討。
- G.除了由系統的觀念從事壓縮機系統特性分析之外，我們認為加入由統計的觀點來探討系統的特性，當有助於對系統的深一層了解及提供維修檢測之重要依據。



圖一 壓縮機特徵曲線



圖二 調氣閥特徵曲線

五、計畫成果自評

實驗的目的在於驗證控制法則及理論的可行性，在理論上，我們已經有不錯的成果，因此，藉由經費的補助，我們自己建構了一套小型壓縮機系統來驗證我們的控制法則之可行性，且部份研究成果已有多篇學術論文發表（詳見參考文獻），就總計畫而言，各子計畫都有不錯的研究成果，且各子計畫都互相依存。在計畫執行期間，藉由經常性的討論，各子計畫都能適時提出需求與交換看法，進而達成研究整合的目標。就整體表現而言，雖然仍有很多實驗相關的實際操作與設計問題有待未來後續進一步研究解決，本計畫的研究成果表現大致上達成預期的工作目標，也完全符合整合型計畫分工與整合的規劃。

六、參考文獻

- [1] D. -C. Liaw and Y. W. Liang, "Asymptotic stabilization of driftless systems," Int. J. Control, Vol. 72, No. 3, 1999, pp. 206-214.
- [2] D. -C. Liaw, Y. W. Liang and T. C. Lee, "Reliable control of nonlinear systems," IEEE Trans. Automatic Control, Vol. 45, No.4, 2000, pp. 706-710.
- [3] Y. -W. Liang and D. -C. Liaw, "Detection of surge and stall in compression systems: an example study," IEEE Trans. Automatic Control, accepted for publication Feb. 2001.
- [4] D. -C. Liaw and J. -T. Huang, "Robust stabilization of axial flow compressor dynamics via sliding mode designs," ASME J. Dynamic System, Measurement

and Control, (regular paper) accepted for publication, Feb. 2001.

- [5] 廖德誠, "軸向流壓縮機控制系統之研發(2/3)" 工程科技通訊, 第 55 期, 第 147-148 頁, 西元 2001 年四月。
- [6] D. -C. Liaw, J. -T. Huang and C. -C. Song, "Robust stabilization of a centrifugal compressor with spool dynamics," submitted to IEEE Trans. Automatic Control, December 2000.
- [7] D. -C. Liaw and C.-C. Song, "A Lyapunov function for axial flow compressor dynamics," to be submitted to IEEE Trans. Automatic Control, Feb. 2001.
- [8] D. -C. Liaw and J.-T. Huang, "Fuzzy control of compressor dynamics via fuzzy logic approach," to be submitted to J. Intelligent & Robotic Systems.
- [9] D. -C. Liaw, C.-C. Song, Y.-W. Liang and W.-G. Chung, "Two-Parameter bifurcation analysis of longitudinal flight dynamics," to be submitted to Nonlinear Dynamics.
- [10] T. -C. Lee and D. -C. Liaw, "Robust throttle control for axial compressors using backstepping design," Proc. 2000 National Symposium on Automatic Control, Hsinchu, Taiwan, R.O.C., March 9-10, 2000, pp.108-113.
- [11] Y.-W. Liang, D. -C. Liaw, Y.-C. Wu and W.-Y. Huang, "On detection of surge and stall in compression systems," Proc. 2000 National Symposium on Automatic Control, Hsinchu, Taiwan, R.O.C., March 9-10, 2000, pp.102-107.
- [12] D. -C. Liaw, J.-T. Huang and C.-C. Song, "Robust stabilization of a centrifugal compressor with spool dynamics," Proc. 2000 National Symposium on Automatic Control, Hsinchu, Taiwan, R.O.C., March 9-10, 2000, pp.348-353.
- [13] 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, at Sidney, Australia, 2000.
- [14] D. -C. Liaw, "噴射引擎控制之展望," 89 年國科會工程處航太學門產業研討會論文集, 淡水, Taiwan, R.O.C., December 16, 2000, pp172-174.
- [15] D. -C. Liaw and C. - C. Song, "A lyapunov functions for axial flow compressor dynamics," PICAST 4, Tainan, Taiwan, R.O.C., May 21-23, 2001.
- [16] D. -C. Liaw, W. -C. Lee, S. -M. Ren, and Y. -Y. Tsay, "A parametric study of axial flow compressor dynamics," PICAST 4, Tainan, Taiwan, R.O.C., May 21-23, 2001.
- [17] Y. -C. Wu, K. -S. Kou, D. -C. Liaw and Y. -W. Liang, "Using subspace method to identify the compression system parameters," PICAST 4, Tainan, Taiwan, R.O.C., May 21-23, 2001.
- [18] Y. -W. Liang, D. -C. Liaw and Y. -C. Wu, "Detection of instability behaviors in compression systems," PICAST 4, Tainan, Taiwan, R.O.C., May 21-23, 2001.
- [19] Andrew M. Wo, W. -Y. Huang, W. -C. Chung,

- J. -M. Liao, Y. -W. Liang and D. -C. Liaw, " A test-bed for experimental study of axial flow compressor," PICAST 4, Tainan, Taiwan, R.O.C., May 21-23, 2001.
- [20]任星明, "軸流壓縮機不穩定現象之控制", 國立交通大學電機與控制工程學系碩士論文, June 2001.
- [21]宋朝宗, "Bifurcation Analysis and Control of Nonlinear System", 國立交通大學電機與控制工程學系博士論文, June 2001.