

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(五)動態特性分析與失速控制 (2/3,3/3)

Dynamical Characteristic and Control of Rotating Stall

計畫類別： 個別型計畫 C 整合型計畫

計畫編號：NSC 89 - 2212 - E - 009 - 043

NSC 89 - 2612 - E - 009 - 002

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

子計畫 (五) 動態特性分析與失速控制 (2/3, 3/3)

Dynamical Characteristic and Control of Rotating Stall

計畫編號：NSC 89-2212-E-009-043

NSC 89-2612-E-009-002

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

過去數年在國科會經費補助下，我們在噴射引擎之軸向流壓縮機系統的相關研究上，已累積了相當經驗與基礎。在這些基礎上，我們結合國內相關學者、專家共同在電腦模擬、控制律分析設計及實際系統建立、量測上共同努力執行一整合型計畫。本子計畫即在此架構下從事系統動態特性分析及失速控制律設計。除了從理論的探討之外，此子計畫結合實驗部份之子計畫，在軸向流壓縮機系統失速波的控制上，依據實驗數據，修正成實際可用之控制器設計。在制動器方面，分別考慮入口導流葉片(inlet guide vane)角度及出口調氣閥(throttle)等不同形式的制動器及其組合。在控制律分析上，考慮的控制設計有：分叉控制設計(bifurcation control design)、模糊控制設計(fuzzy control design)、滑模控制設計(sliding-mode control design)及李亞夫諾全域控制設計(Lyapunov-based global design)等。期望在此計畫中，建構出實際有效的控制器，以提升壓縮機系統的工作性能。

主要的研究工作內容為實驗壓縮機系統模式的建立與其動態特性分析，進而發展系統模式失速控制法則與相關之控制軟體。對於不同形式的制動器，如閘門控制等之控制法則的設計與系統動態特性分析也是研究的重點。另外，也針對子計畫三所獲得的判別模式進行數值模擬，再與Moore-Greitzer系統模式作比較，最後整合

不同的制動器之失速控制，並在實驗壓縮機系統上驗證及修正控制軟體。

關鍵詞：軸向壓縮機系統、系統動態特性、穩定區間、失速控制

Abstract

In the past several years, we have devoted ourselves to the study of the dynamics and the stabilization of the axial flow compression systems. In this project, we have extended our previous research to an integrated work for covering various directions including computer simulation, controller designs, and experimental verifications. The major efforts of this sub-project are to build practical control laws for stall control, and to study the nonlinear dynamics of the test-bed compression system, which were carried out from both theoretical point of view and experimental design.

Keywords: compression systems, nonlinear dynamics, domain of attraction, stall 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，也節省相當可觀的能源損耗，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，即所謂的激喘(surge)或旋轉失速(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，甚至發生失速並造成渦輪機損毀，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。

所執行之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，並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。期望藉由整合計畫的執行，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，由其是引擎技術的提升有所助益。

本計畫為整合型計畫之一子計畫，在總計畫的目標下，將針對系統的動態分析及控制器驗證、重新設計上，完成預定的目標。具體的研究目的有：

- (1) 測試系統模式的建立與動態特性分析。
- (2) 穩定區間的估測。
- (3) 控制用的制動器形式評估。
- (4) 失速控制法則的設計
- (5) 控制器的設計與驗證。
- (6) 控制軟體的研發。

三、結果與討論

在本研究計畫裡，除了依據 Moore-Greitzer 所提出的系統模式進行系統動態特性分析及失速控制法則之改造外，也以實際系統實驗量測所建立之系統

模型及數據做為反復改善的依據。主要的研究工作包括下列幾個主題：

1. 軸向流壓縮機系統動態特性分析
2. 失速控制法則的改善與設計
3. 壓縮機加壓曲線控制設計

各相關主題詳述如下：

3.1 軸向流壓縮機系統動態特性分析

(1) 系統分析模式建立

依據實驗數據來決定不同轉速下相對之壓縮機特徵函數。由於壓縮機特徵函數在不穩定區域內不易直接量測，所以利用外差法、最小平方法等系統鑑別技巧加以估測。另外，利用數值模擬為工具，配合實驗所得的系統特徵曲線，建立實際系統等效之 Moore-Greitzer 數學模式。此部份研究所得之系統數學模式提供子計畫三、四作為設計之依據。此外也與子計畫三所獲得之參數式系統判別模式相比較，以獲得較精確的系統分析模式。

(2) 非線性動態特性分析

除了以分叉理論為工具，結合實驗數據以得到實際系統的分叉特性外，並建立實際系統參數的表示式以研究參數改變對實際系統分叉特性的影響。此外，應用分叉理論來估測實際壓縮系統 post-stall 之靜態壓縮機工作解，以探討另一失速控制法則的可行性，同時研究在舊有控制設計下，實際系統的閉迴路分叉特性。最後分析量測所得的失速波高諧波成份對系統動力行為的影響，以評估三階常微分模式之準確度及適用範圍。

(3) 實際系統驗證

除了上述理論分析工作外，利用實際系統實驗量測之數據來評估理論分析之成果，並藉以修正理論分析的模式，進而達成理論與實驗相結合之目標。

3.2 失速控制法則的改善與設計

(1)研究動態控制法則對於激喘及失速現象消除之可行性：

一般的迴授控制器會改變系統的靜態工作曲線(equilibrium branch)，而系統的靜態工作曲線大多由系統設計觀點所決定之最佳工作點集合。因此，如何設計迴授控制器使系統工作點穩定且不改變系統隨參數所決定之設計工作點集是控制器設計的一個重要考量。雖然以往設計的控制法則能達到上述目的，但對於壓縮機運轉在高速的工作點無法保證穩定。因此在計畫中我們應用 washout filter 的觀念，針對不同轉速工作下高速系統的區域利用全域穩定控制法則來設計。

(2)研究以漸步法應用在實際系統全域穩定控制：

應用漸步法在 Moore-Greitzer 的三階常微分系統模式上，以獲得全域穩定控制律，考慮採用的制動器有氣流注射、出口調氣閥及轉速控制等，並在實際系統應用時作適當的修正。

(3)研究壓縮機因量測不準確性所衍生之強健控制法則設計：

考慮在應用制動器如調氣閥、轉速控制等時，以滑模控制(sliding mode)設計處理非匹配(unmatched)不確定性問題，並在實際系統應用時作適當修正。此部份主要考量壓縮機特徵曲線函數因量測不準確性所衍生的控制問題。

(4)研究類神經、模糊控制等應用在壓縮機系統的可行性：

以模糊控制設計消除失速波控制器，並考慮結合類神經等人工智慧設計應用在實際系統。

(5)研究擴大穩定工作點對干擾信號之忍受

範圍(domain of attraction)之控制法則：

應用李亞諾夫(Lyapunov)函數估測系統穩定工作點對於干擾信號之忍受範圍，在應用於實際系統時，結合數值分析技巧作適當的修正，並將成果推廣到受控李亞諾夫(control Lyapunov)函數之建立及探討控制器對不同轉速之效應。

3.3 壓縮機加壓曲線控制設計

考慮壓縮機系統如何能較有效或在較短時間需求下由低壓差運轉到高壓差輸出，其中牽涉到最佳化設計與加壓曲線規劃等相關研究課題。主要的工作內容有：

- (1) 壓縮機特徵曲線估測。
- (2) 建立實驗用壓縮機系統相對之 Moore-Greitzer 系統模式。
- (3) 制動器控制之 Moore-Greitzer 系統模式動態數值模擬。
- (4) 系統靜態之實驗數據與系統動態數值模擬成果之評比。
- (5) 研究實驗壓縮機系統之動態控制法則。
- (6) 研究擴大實驗壓縮機系統 DOA 之控制法則。
- (7) 研究實驗壓縮機系統可量測輸出訊號回授之控制法則。
- (8) 整合不同制動器之控制法則，並嘗試以實驗驗證。
- (9) 控制軟體修正。

在控制法則的設計上，我們已成功應用漸步法 (Back-stepping) 設計在 Moore 和 Greitzer 的三階常微系統模式上，以得到一有效的全域(global)穩定控制律。其採用的致動器有氣流注射及出口調氣閥等。未來，將應用在實際系統上，作適當修正；在實際應用上，所可能碰上的不確定性問題及其他可用致動器如進氣口葉片等，亦將一併考量。另外，我們也應用模糊控制(fuzzy control)來設計消除失壓波控制器；未來，將考慮結合類神經等人工智慧設計應用在實際系統上。

在穩定區域估測上，本計畫有效地利用 Lyapunov direct method，判斷系統的穩定性，並進一步應用穩定條件來估測系統的穩定區間（DOA），得到相當具體地估測條件，這些條件為一般的解析形式，可適用於所有形式的壓縮機特性 C_{ss} 。對於全域穩定控制律及非線性控制器的設計具有相當地實用性，利用實例的驗證，證明這些估測條件可以有效地求得實際的穩定區間。此外，我們已設計相關可行的控制法則，以擴大系統的穩定區間及控制失速現象，並結合相關的子計畫作實驗的驗證，評估其實用性，以期增進引擎的工作效率。

就本計畫的工作項目而言，所獲得的理論研究成果相當符合本計畫預期的研究成果，相信可以為以後的研究計畫奠定良好的基礎。本計畫的部分成果已發表於相關的專業期刊及學術研討會上，請參閱附錄。

四、計畫成果自評

誠如前面所述，本計畫已完成 Moore-Greitzer 三階系統模式的動態特性分析，利用 Lyapunov direct method 瞭解系統的穩定性及估測區域與全域的穩定區間，就不同的特性曲線 C_{ss} ，估測其相對的穩定區間，並已完成擴大穩定區間及失速現象的控制法則。就本計畫的工作項目而言，目前所獲得的理論研究成果符合本計畫預期的研究成果，相信可以為以後的研究奠定良好的基礎。然而，在實際系統驗證上仍略顯不足，由於目前的量測元件所得之流場訊號誤差及雜訊頗大，再加上目前調氣閥的反應速度與旋轉失速的頻率仍有差距，故我們也要改進調氣閥的反應速度，以達到有效控制的目的。這些都是我們將來後續研究努力的重點。

五、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.