

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

動態系統分析與失速控制

(I)

Development of Axial Flow Compression Systems with Monitoring Control : Analysis of System Dynamics and Stall Control

計畫編號：NSC 90-2212-E-009-067

執行期限：90年8月1日至91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壓縮機系統相關研究上，已累積了相當經驗與基礎。在這些基礎上，我們規劃在90年8月至93年7月之三年間結合國內相關學者、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。本計劃即為此架構下從事系統動態特性分析及失速控制律設計的一個子計劃。在原規劃中此子計劃將結合實驗部份與系統分析之另一子計劃，在軸向壓縮機系統控制上，依據實驗數據，修正成實際可用之控制器設計。在致動器方面，將分別考慮壓縮機轉速及出口調氣閥(Throttle)等兩種型式的致動器及其組合。此外，由於有關壓縮機轉速控制之系統模式，目前並不完備，在本計劃中，我們將分別從理論分析與配合實驗及模式判別等子計劃所獲得之資料兩方面著手使該系統模式完備，以提供其它子計劃分析之所需。在控制律分析設計上，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。期望在三年計畫中，建構出實際有效之控制器，以提昇壓機系統工作性能。

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 for dynamical analysis robustness control, and stall control designs. In the first year, we propose to establish an experimental verification of a throttle control based compression system. In addition, we will also devote to theoretical analysis of compressor speed control laws for system dynamics, and development of control software. In the second year, not only to do experiments for the verification of the compressor speed control laws designed in the tasks of the first year, but also to assist the preliminary design of system safety monitoring. In the third year, all the efforts will be devoted to the experimental verification of compressor system via both compressor speed and throttle control as well as the development of system monitoring control.

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。

由於 surge 與 rotating stall 明顯的限制了渦輪引擎所能達到的最大工作效率，探討 surge 與 stall 的成因並研究以不同的控制方法避免此種不穩定現象乃成為近年來相關領域的熱門研究課題。在過去數年間，有關噴射引擎系統效率的提升與動態分析等研究已有不少文獻發表。然而，由於系統具有高度的非線性特性，以及目前對系統特性的不全然了解，例如，軸流式壓縮系統的特徵曲線在不穩定區段內不容易量測，其特性會隨旋轉速度的不同而有所差異。且 3D 的特性也不容易分析等，都有待進一步的探討。大多數已發表文獻都是由機械設計的觀點，經由數值分析或實驗驗證而成。由系統理論觀點探討申數值分析或實驗驗證而成。由系統理論觀點探討相關問題的文獻並不多見。一般而言，系統理論分析所獲得的分析法則較不受系統結構的影響，而其所獲得之控制法則能提供較可信賴的設計。由於渦輪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的結果只能了解系統的部份特性，因此，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，是目前

有關渦輪引擎的重要研究課題。

本計畫針對過去我們在這方面的研究作一整合及改進。更重要的，我們在實驗驗證上嘗試建立一可準確量測、驗證的軸向壓縮機系統，希望對國內航太工業人才培育及相關問題之研究提供一定的貢獻。

具體的研究目的有：

- (1) 壓縮機特徵曲線 C_{ss} 估測。
- (2) 建立實驗壓縮機系統相對之 Moore-Greitzer 系統模式。
- (3) Throttle 控制 Moore-Greitzer 系統模式之動態實驗驗證。
- (4) 壓縮機系統靜態實驗數據與系統動態數值模擬成果之評比。
- (5) 壓縮機系統之動態控制 (dynamic control) 法則實驗驗證。
- (6) 壓縮機系統可量測輸出信號回授 throttle 控制法則實驗驗證。
- (7) 壓縮機系統之擴大 DOA throttle 控制法則設計。
- (8) 壓縮機系統之完全穩定及大域控制之 throttle 控制法則設計。

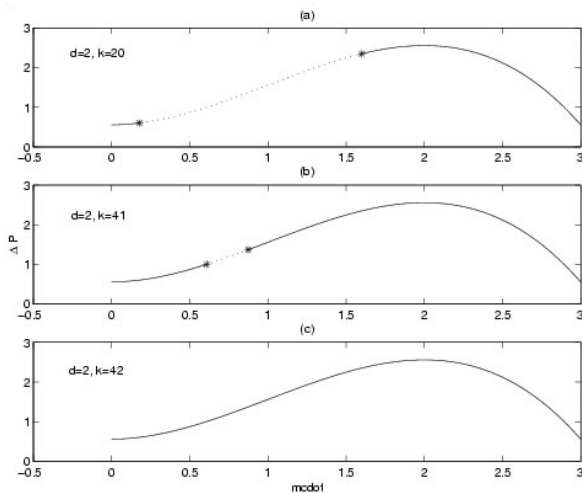
三、結果與討論

由於整個整合型計畫因為一些子計畫未獲國科會補助而無法確實整合。因此，本計畫在缺乏相關子計畫，提供足夠實際整合量測數據下，本計畫主要從事規劃中之控制法則設計。整體而言，在過去一年中，我們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：

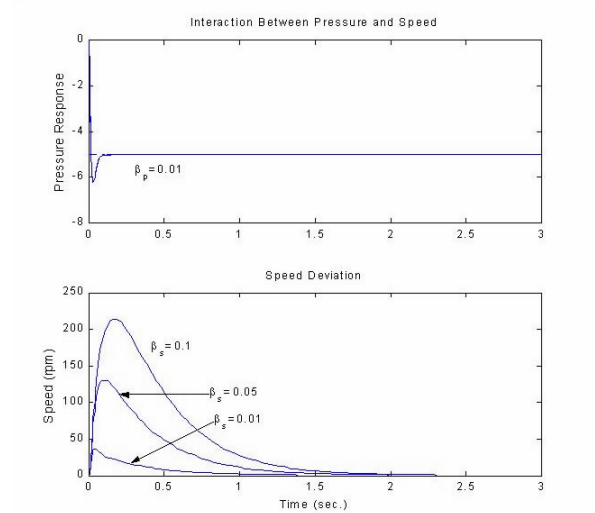
1. 軸向流壓縮機系統特性曲線 C_{ss} 之估測：
依據實驗數據在不同轉速下獲得相對之壓縮機特性函數，並以外插法及最小平方法等技巧加以估測。
2. 依估測之特徵曲線 $C_{ss}(\cdot)$ 建立等效之三

階壓縮機系統方程式。

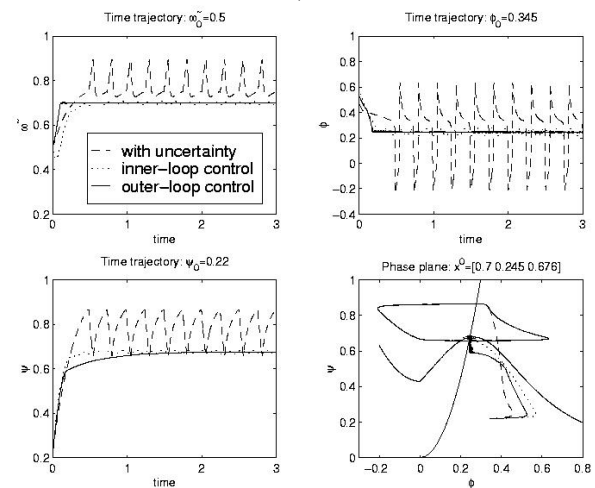
3. 研究以 washout filter 為主之動態控制法則對於喘振及失壓現象消除之可行性，由理論推導確認此一作法可改善喘振之發生，如圖一所示。
4. 研究以 internal mode control 法則應用在喘振現象消除之可行性及成效，如圖二所示。
5. 研究壓縮機系統因量測不準確性所衍生之強健控制法則設計。其設計主要以可變結構控制法則作為系統不準確性之補償，如圖三所示。
6. 改進模糊控制法則在壓縮機系統控制的應用。
7. 研究擴大穩定工作點對干擾信號之忍受範圍(domain of attraction)之控制法則及提出相對改進之 Lyapunov 函數。



圖一



圖二



圖三

四、計畫成果自評

本計畫之原規劃目標在於建立適切之實驗量測平台，並透過實驗數據驗證控制法則及理論的可行性。由於整個整合型計畫因為一些子計畫未獲國科會補助而無法確實整合。因此，本計畫在缺乏相關子計畫，提供足夠實際整合量測數據下，主要從事規劃中之控制法則設計。在理論上，我們已經有不錯的成果，且部份研究成果已有多篇學術論文發表（詳見參考文獻）。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。

五、參考文獻

- [1] 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.
- [2] D.-C. Liaw and C.-C. Song, "A Lyapunov function for axial flow compressor dynamics," to be *submitted to IEEE Trans. Automatic Control*, Nov. 2002.
- [3] D.-C..Liaw and J.-T. Huang, "Fuzzy control of compressor dynamics via fuzzy logic approach," to be submitted to *J. Intelligent & Robotic Systems*, Nov. 2002
- [4] D.-C. Liaw, C.-C. Song and W.-C. Chung, "Robust Stabilization of a Centrifugal Compressor via Sliding Mode Control," 2002「民航學會/航太學會/燃料學會」學術聯合會議, 高雄, Taiwan, R.O.C., March 23, 2002, pp.445-452.
- [5] D.-C.Liaw, S.-M. Ren and W.-C. Chung, "Washout-Filter Based Control for Axial Flow Compression Systems," 2002「民航學會/航太學會/燃料學會」學術聯合會議, 高雄, Taiwan, R.O.C., March 23, 2002, pp.573-580.
- [6] D.-C. Liaw, S.-M. Ren, W.-C. Chung and Eyad H. Abed, "Surge Control of Axial Flow Compression Systems via Linear and Nonlinear Designs," *Proc. 2002 American Control Conference*, Anchorage, Alaska, USA, May 8-10, 2002, pp.4347-4352.
- [7]D.-C. Liaw, J.-T. Huang and C.-C. Song, "Robust stabilization of a centrifugal compressor with spool dynamics", *Proc. 2002 American Control Conference*, Anchorage, Alaska, USA, May 8-10, 2002, pp.3301-3306.
- [8]D.-C. Liaw, S.-M. Ren and W.-C. Chung, "Input-Output feedback linearization scheme to surge control, " *The 2001 Seminar and symposium on Applied Power Electronics Technology*, Hsinchu, Taiwan, R.O.C., November 23, 2001.