

噴射引擎動態特性分析與控制

Dynamical Analysis and Control of Jet Engine Systems

計劃編號：NSC 87-2212-E-009-040

執行時間：86/8/1 – 87/7/31

計劃主持人：廖德誠 (交通大學電機與控制工程所副教授)

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昇高，並可能導致嚴重的機械損壞。

在此計劃中，我們除了繼續在 single-stage 壓縮機系統之特性與控制作更進一步研究之外，我們也針對 multi-stage 壓縮機系統與整體引擎系統之分析模型與特性作初步研究。

英文摘要

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 cause the instabilities, are the “surge” and the “stall” behaviors 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.

In this project, we not only continue our previous study on the single stage compressor, but also extend the research work to the preliminary study of modeling and dynamical analysis of both multi-stage compressors and the whole jet engine system.

二、計劃緣由與目的

為提昇噴射引擎的運轉效率，如何克

服軸向壓縮機在高壓、高速時產生的不穩定現象如：失壓運轉(stall)及激振(surge)，已成為近年來相關研究的一個重點。

為達上述目的，本計劃主要朝下列幾個主題研究：

1. 研究擴大穩定工作點對干擾信號之忍受範圍之控制法則。
2. 研究壓縮機完全穩定與大域穩定控制之可行性。
3. 研究壓縮機系統參數可能發生擾動之因素。
4. 研究壓縮機系統之強健控制性。

三、執行方法及成果

3.1 系統動態分析與控制

我們的研究主要針對 Greitzer 和 Moore 常微方程模型[6]，其數學式如下所述：

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

$$\frac{d\dot{m}_c}{dt} = -\Delta P + \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} C_{ss}(\dot{m}_c + WA \sin \theta) d\theta + u_1, \quad (2)$$

$$\frac{d\Delta P}{dt} = \frac{1}{4B^2} \{\dot{m}_c - F(\gamma^0 + u_2, \Delta P)\}, \quad (3)$$

其中 u_1 代表耦合閥控制輸入； u_2 代表調氣閥控制輸入；其餘的狀態變數及參數，詳見[6]。針對此模型，我們在動態分析及控制設計上，獲得研究成果如下：

1. 我們成功的建立系統 Lyapunov 函數估算出穩定平衡點的穩定區間大小。未來，計畫推廣至相關穩定控制設計。
2. 在系統動態分析上，我們首先針對

$C_{ss}(\cdot)$ 函數提出了一些主要稱為”左傾”的假設，並針對其合理性提出說明，詳例可參考[1]。我們發現，這類的壓縮機系統的動力行為有一重要的特性如以下定理所述：

定理 3.1：對於滿足”左傾”假設的壓縮機系統而言，其系統狀態 $A(t)$ 在

$\dot{m}(t) \geq \dot{m}_c^p$ 時，具有 $A(t)\dot{A}(t) \leq 0$ 的

特性。

3. 根據定理 3.1，我們應用

Back-stepping 設計法則提出使壓縮機系統全域穩定之控制方式如以下定理所述：

定理 3.2：給定系統(1)-(3)。且 $C_{ss}(\cdot)$ 滿足”左傾”相關假設。則系統工作平衡

點 $x^0 \cong (0, \dot{m}_c^0, \Delta P^0)^T$ 可由單一控制輸

入 u_1 或 u_2 達到全域穩定的目的[1]。

4. 壓縮機特徵函數 $C_{ss}(\cdot)$ 其不穩定工作範圍實際上不可量測，故其不確定性無法避免。在”左傾”條件的限制下，我們估測其可能之最大不確定性，並提供強健控制設計的基礎。

5. 在壓縮系統的強健控制研究方面，我們提出以滑模(Sliding mode)控制法則設計全域穩定強健控制器，在上述所界定之 $C_{ss}(\cdot)$ 函數最大不確定性下，系統之全域穩定性仍能確保。

3.2 模擬結果

上述以耦合閥及調氣閥為致動器所得到的全域控制設計，適用於任何”左傾”壓縮機系統。在本節中，我們針對一特殊立方 $C_{ss}(\cdot)$ 函數加以討論。此一立方 $C_{ss}(\cdot)$ 函數可描述如下：

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

在此特徵函數下，依 Back-stepping 法所計算出的控制輸入；亦或將此函數當作標準值，允許上述第 4 項的不確定性下，所計算出的強健控制，皆由模擬得到適當驗證。相關模擬結果詳見[1,3,5]。

四、結論

在此計劃中，我們針對具“左傾”壓縮機特徵函數的系統動力特性加以明確界定。並針對此系統在耦合閥及調氣閥致動下提出全域穩定控制設計。在系統強健控制設計方面，我們以滑模(Sliding mode)控制設計全域穩定強健控制器，電腦模擬顯示，上述控制設計皆能有效達成目的。其中，以 Back stepping 所作的設計成果，已為國外知名期刊接受發表[1]；而強健控制設計的成果，亦已發表於國外知名會議[5]及整理投稿於國外知名期刊[2]。此外，我們亦將智慧型控制應用於此系統，得到相當不錯的結果[2,4]。最後，我們亦嘗試將此結果推廣至整體引擎系統，然因現有的模型皆為線性模型，所得結果只能算是初步結果，未來有賴更進一步的分析與研究。

五、參考文獻

- [1] D.-C Liaw and J.-T Huang, “Global stabilization of axial compressors using nonlinear cancellation and backstepping designs,” accepted for publication in *International Journal of System Science*, 1998.
- [2] D.-C Liaw and J.-T Huang, “Control of stall behavior via fuzzy logic approach,” to be submitted to *J. Intelligent & Robotic Systems*, November, 1998.
- [3] D.-C Liaw and J.-T Huang, “Robust stabilization of axial compressor dynamics via sliding mode designs,” submitted to *ASME J. Dynamic Systems, Measurement, and Control*, August, 1998.
- [4] D.-C Liaw and J.-T Huang, “Fuzzy control for stall recovery of compressor dynamics,” *J. Control Systems and Technology*, accepted for publication, 1998.
- [5] D.-C Liaw and J.-T Huang, “Robust stabilization of axial flow compressor dynamics,” presented at Fourth SIAM Conference on Control & Its Applications, Jacksonville, FL, USA, May 7-9, 1998.
- [6] 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 Turbine and Power*, vol. 108, 1986, pp. 68-76.
- [7] F. C. McCaughan, “Application of bifurcation theory to axial flow compressor instability,” *ASME J. Turbomachinery*, vol. 111, 1989, pp. 426-433.
- [8] G. J. Hendricks, and D. L. Gysling, “Theoretical study of sensor-actuator schemes for rotating stall control,” *J. Propulsion and Power*, vol.10(1), 1994, pp.101-109.
- [9] M. Krstic', J.M.Protz, J.D. Paduano and Kokotovic', P. V.,

"Backstepping designs for jet engine stall and surge control," *Proceedings of the 34th IEEE Conference on Decision and Control*, New Orleans, LA, 1995, pp. 3049-3055.

- [10] D.-C Liaw and E.H. Abed, "Active control of compressor stall inception: a bifurcation-theoretic approach," *Automatica*, vol. 32, 1996, pp. 109-115

