

氣壓節能電磁閥CFD設計

任志強^{1*}、許哲維²

¹ 國立雲林科技大學機械工程研究所 教授

² 國立雲林科技大學機械工程研究所 研究生

*Email: rennjc@yuntech.edu.tw

摘要

本文的主要目的是應用CFD模擬分析技術來設計新一代節能氣壓電磁閥。氣壓電磁閥是一種電磁能轉換為機械能的電磁元件，廣泛應用於自動化設備中，其原理是利用電磁線圈激磁產生電磁力，再藉由電磁力推動閥室內的閥軸，斷電後則利用彈簧將閥軸回復至中立位置，進而完成開（ON）或閉（OFF）的作動。由於目前國內業界所生產的傳統氣壓電磁閥，大多尚未考量高壓氣體流經閥室衍生的流動阻力所造成的能量損耗，故多未具備積極節能特性；然而這即是本文的主要訴求重點：擬應用CFD模擬分析技術重新設計閥軸外型以及閥室內幾何形狀以有效補償流動力來達成節能設計。最後本文利用基於Labview圖控程式所製作的測試實驗平台來進行氣壓電磁閥流動力補償前後之性能測試與比較，具體結果為經過流動力補償後之新型氣壓電磁閥可以達到接近20%的節能比例。

關鍵字：流動力補償，節能，氣壓電磁閥，CFD、引導式

1. 前言

氣壓電磁閥是一種電磁能轉換為機械能的電磁元件，廣泛應用於半導體廠、食品及化學工廠、自動化設備之中，其原理是利用電磁線圈激磁產生電磁力，再藉由電磁力推動閥室內的閥軸，斷電後則利用彈簧將閥軸回復至中立位置，進而完成開（ON）或閉（OFF）的作動。由於目前國內業界所生產的傳統氣壓電磁閥，大多尚未考量高壓氣體流經閥室時衍生的流動力（Flow Force）

所造成的能量損耗，故多未具備節能特性。本案節能氣壓電磁閥設計研發主要的核心技術是計算流體動力分析(CFD)，因此是一種極具前瞻性的設計技術。仔細來說，本文主要利用CFD模擬技術來設計出具備補償流動力之節能電磁閥，根據文獻 [1-9]所揭露的技術資料，流動力可視為一種操控干擾力，以液壓閥為例其值約佔整體操控力之20~25%，因此若能藉由流動力補償設計而去除此一流動干擾力，預期將可有效節省輸入之操控能量。圖1所示即為本案擬研究的傳統5/2氣壓電磁閥示意圖，在線圈未通電產生磁力之前，引導氣流口A處於關閉狀態，此時彈簧力將閥軸推向右邊而導致P->B及A->T；然而當線圈通電產生磁吸力之後，由於引導氣流口A的開啟將導致閥軸向左移動，此時電磁閥將換向成為P->A及B->T。圖2所示則為上述傳統氣壓電磁閥之閥軸幾何形狀示意圖，由於加工成本的考量故多採用90°之最簡單加工方式。然而這種最簡設計的優點雖是加工成本較為低廉，但是缺點則是未考量高壓氣體流經閥室時衍生的流動力所造成的能量損耗，故多未具備節能特性。這即是本文的主要訴求重點：擬應用CFD模擬分析技術以及實測驗證來重新設計閥軸外型以及閥室內流道幾何形狀以有效補償流動力來達成節能設計。

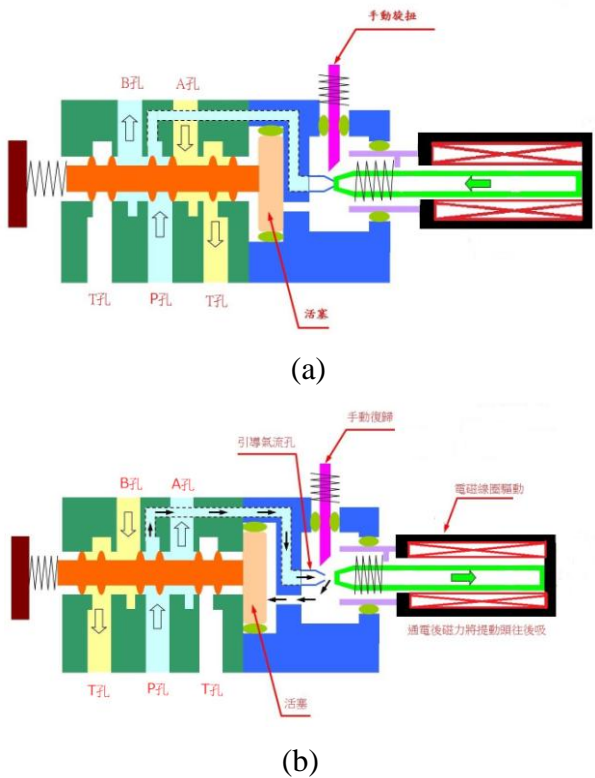


圖 1：傳統 5/2 氣壓電磁閥基本原理示意圖，
(a)通電前；(b)通電後。

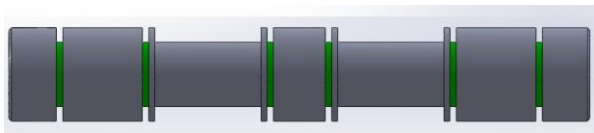


圖 2：傳統氣壓電磁閥閥軸幾何形狀示意圖

2. 流動力分析

氣壓閥內流動力的產生乃是因為高壓氣體流經閥室時所衍生，以控制的觀點來看，若閥是具有閥軸位置反饋裝置之閉迴路控制比例方向閥，則可以藉由適當控制器的補償來抵消此干擾力，但在實際上一般的方向控制閥是屬於開迴路型態，因此，若要進行補償流動力，一般是以設計特殊閥軸外型以及流道等幾何形狀來著手。目前，在各個參考文獻中，以文獻[3]對流動力補償方法有較深入探討。以下將節錄其中較重要的分析及實驗結果並整理如下。方向閥軸流動力之數學分析可概分為 2 大類：

(a) 流入型：圖 3 所示為未進行流動力補償之流入型閥軸示意圖，其中閥軸具備 90° 之最簡單加工方式以節省成本。

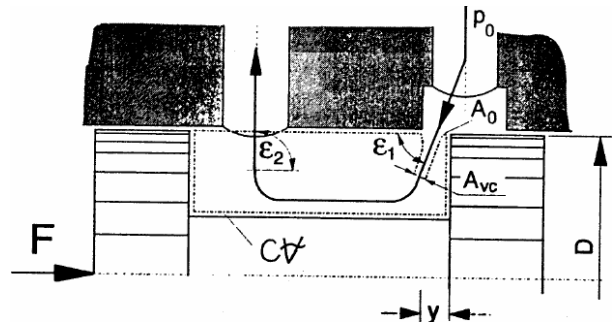


圖 3：未進行流動力補償流入型閥軸示意圖

其中角度數據整理如下：

$$\varepsilon_1 \cong 69^\circ$$

$$\varepsilon_2 \cong 90^\circ$$

此時阻礙閥軸正常移動之阻力值（流動力）可以表示為：

$$F_{str.stat} = -\rho Q (V_2 \cos \varepsilon_2 + V_1 \cos \varepsilon_1) \quad (1)$$

$$F_{str.dyn} = +\rho \lambda \frac{dQ}{dt} \quad (2)$$

其中式(1)為靜態流動力值，負號代表與閥軸運動方向相反；式(2)則為動態流動力值。由於動態流動力值影響時間非常短暫，故一般可予以忽略 [3, 9]。ρ 為氣體密度；Q 為氣體流量；V 為氣體流速。

(b) 流出型：如圖 4 所示為未進行流動力補償之流出型閥軸示意圖，同樣的，閥軸也是具備 90° 之最簡單加工方式以節省成本。

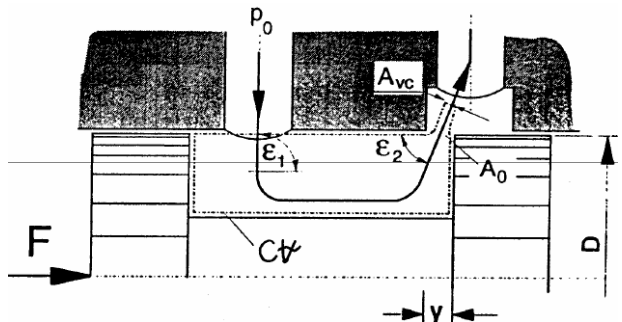


圖 4：未進行流動力補償流出型閥軸示意圖

其流動力表示式如下：

$$F_{str.stat} = -\rho Q(V_2 \cos \varepsilon_2 - V_1 \cos \varepsilon_1) \quad (3)$$

$$F_{str.dyn} = +\rho \lambda \frac{dQ}{dt} \quad (4)$$

其中式(3)為靜態流動力值，負號代表與閥軸運動方向相反。接下來將介紹各種針對流入及流出型流動力補償之技巧。

(a) 流入型流動力補償法：一般採用流速轉向法來流動力補償，如圖 5 所示。

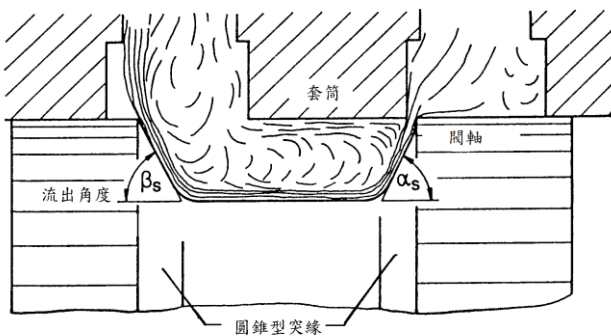


圖 5：具流動力補償之流入型閥軸示意圖

利用流速轉向法座流動力補償的技巧，乃是將閥軸上原來 90° 部分進行導角加工 (α_s , β_s)，亦即利用滑軸上特別加工之圓錐形突緣，導引氣體，使流出角度 $\beta_s < 90^\circ$ ，利用 β_s 角度之調變，可作有效補償流動力，不過其缺點就是閥軸的加工成本將會些許提高。

(b) 流出型流動力補償法：流出型之流動力補償一般較不易達成，故預期所增加之加工成本會比流入型來的高。一般作法乃是在流出孔口之後端加工出一「漩渦氣室」(參考圖 6)，此法又稱為「principle of the recirculation lands」。另一缺點必須注意的是：由於導入「漩渦氣室」，故整個滑軸長度可能變長，乃至於整個閥體之面積都有可能變大。

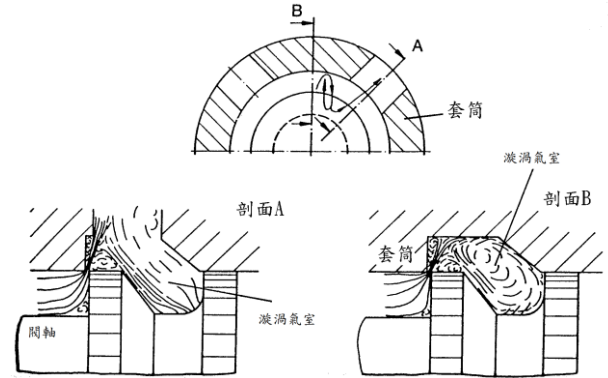


圖 6：具流動力補償之流出型閥軸示意圖

以上所述為簡化公式分析法，本文所採用之另一種方法則為 CFD-RC 計算流體動力模擬分析法。圖 7 所示為本案初步設計全新閥軸幾何形狀構想圖，具備了流速轉向法之流動力補償技巧於閥軸設計上。圖 8 則為利用 CFD-RC 軟體進行 3 個不同導角錐度 (α_s , β_s) 之節能氣壓電磁閥流場分析所得之壓力分佈結果圖，透過壓力分佈結果圖可以估算作用於閥軸上各個面之作用力，藉以了解流動力值於補償前後之差異，如此可以進一步求得節能氣壓電磁閥之節能比例。表 1 所示即為利用 CFD 模擬計算所得到之流動力值，由表中可看出錐度 125° 為最適的設計角度，本文將選用此一角度值作為後續設計實作全新閥軸幾何形狀之依據。

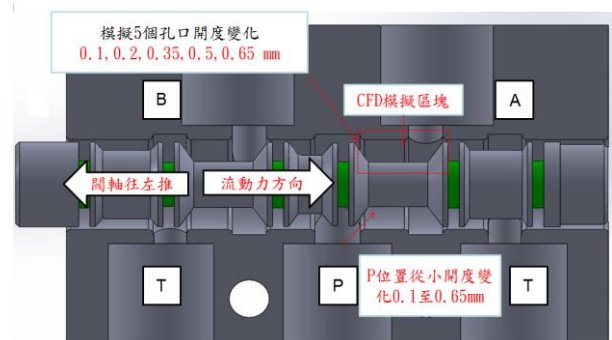


圖 7：本文設計之全新閥軸幾何形狀構想圖

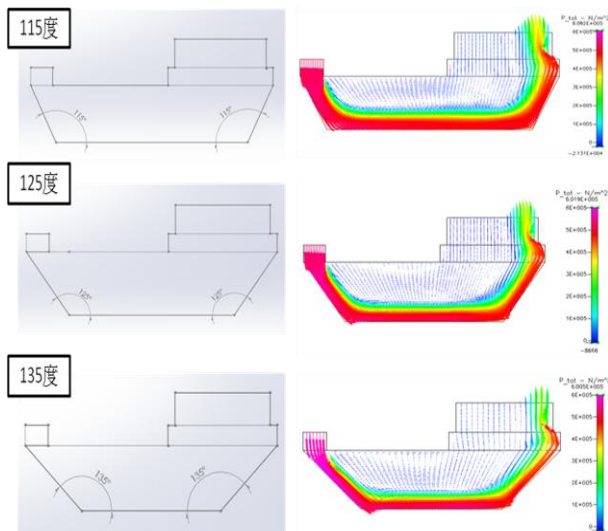


圖 8：利用 CFD-RC 軟體進行節能氣壓電磁閥流場分析所得之壓力分佈結果圖

表 1：CFD 模擬流動力數據

流入流出型錐度 (deg,度)	流動力 (N)
115	1.62
125	1.485
135	1.56

3. 實驗測試與結果

圖9所示為本文所設計之新型氣壓節能電磁閥閥軸加工實體圖，具備導角錐度125°之最適流出及流入角度設計。另外，本文所探討之氣壓電磁閥的節能比例不易採取直接驗證方式，這是因為所探討的對象是前導式氣壓電磁閥，驅動閥軸移動的不是電磁力而是氣壓衍生的力量。解決的方法是驗證電磁閥節能比例時將捨棄一般採用節省電磁力方式來進行直接驗證 [3, 9]，而是採用圖10所示以LABVIEW圖控程式為基礎之實驗測試設備示意圖，利用比例壓力閥精密調控輸入壓力，藉由量測驅動閥軸移動之最低輸入壓力值所減少的比例，此即可間接視為流動力補償之比例，亦即為氣壓電磁閥之節能比例，這是因為在計算節能比例時所應用的基本公式 $P(\text{power})=P(\text{N/m}^2)*Q(\text{l/min})$ 中，由於測試時之操作壓力變化量並不大而可將流量Q值視為常數，故最後可以直接簡化為以壓力變化量來計算節能比例。表2所示為驅動閥軸移動之最低輸入壓力值實驗結

果。相較於驅動原始閥軸所需的0.55 bar，驅動導角125°之新型閥軸只需0.45 bar，節能比例高達18.2 %。



圖 9：全新閥軸加工實體圖

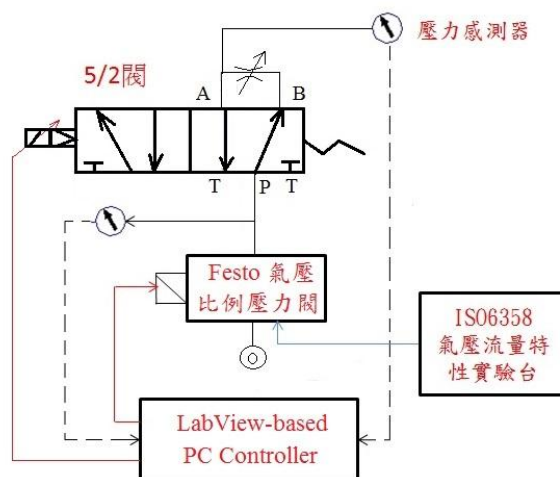


圖10：本文採用之實驗測試設備示意圖

表 2：實測之驅動閥軸移動之最低輸入壓力以及節能比例

流入流出型-錐度 (α_s, β_s)	最低操作壓力 (bar)	節能比例 (%)
錐度 115°	0.50	9.1
錐度 125°	0.45	18.2
錐度 135°	0.48	12.7
原始無錐度	0.55	-

4. 結論

由以上實驗結果以及討論中可知：未進行任何流動力補償設計之原始閥軸與同時具備流入和流出型補償設計之全新設計閥軸之間，存在著18.2 %之耗能差異。近年來，節能減碳為一全球重要議題且在政府積極倡導綠色節能之時代下，國內產官學界莫不積極地投入大量的人力與物力於綠色節能的研發上。而氣壓電磁閥大量應用在許多機

電與自動化設備等場合，因此，本文在不增加太多額外成本情況下，僅改變閥軸外觀而能達到預期可觀之節能目標，勢必可為國內積極推動的節能減碳政策產生具體貢獻。最後，若能進一步改變閥體內部形狀，或許可得更好之結果，然而隨著設計改變越大所衍生的加工成本也勢必越高，在成本及效益之間如何取得平衡，則是另外的課題。

5. 參考文獻

1. Renn, J. C., Wu, J. M., 2000, "Analysis and Compensation of the flowforce in a 4/3 Oil Hydraulic Directional Solenoid Valve," J. of the CSME, Vol. 21, No.2, pp.209-215.
2. Renn, J. C., 2003, "Application of CED to Design a Power-Saving Hydraulic Directional Two-Land-Four-Way Valve," Proc. of 1st Int. Conf. on Computational Methods in Fluid Power Technology, pp. 83-94, Melbourne, Australia.
3. Feigel, H. -J., 1992 "Stroemungskraft Kompensation im direktgesteuerten elektro-hydraulischen Stetigventilen," Dissertation, RWTH Aachen, Germany.
4. Latour, C., 1994, "Stroemungskraftkompensation in 2-Wege-Einbauventilen-eine Moeglichkeit zru direkten Ansteuerung", RWTH Aachen, Germany
5. Paoluzzi R., Sedoni E., 2003, "CFD Analysis of the Intake Manifold of a Hydraulic Circuit" , Proc. of the first International Conference on Computational Method in Fluid Power Technology, Melbourne Australia., PP.29-38.
6. Rinkinen J., Ahlsedt H., Nurminen T., 2003, "Experiencies of Fluid Flow Modeling in the Design of Mobile Hydraulic Oil Tanks". Proc. of the first International Conference on Computational Method in Fluid Power Technology, Melbourne Australia., PP.123-136.
7. Huguet D., Codina E., 2003, "CFD Analysis of Flow Forces on Direct Acting Relief Minivalves". Proc. of the first International Conference on Computational Method in Fluid Power Technology,

Melbourne Australia., PP.201-210.

8. Grauer, TH., Nguyen, T.H., 1990, "Numerische Stroemungs-dynamik fuer Ventilentwicklung", Proc. of 9th AFK, Band 2, PP.65~78, RWTH Aachen ,Germany.
9. 任志強，蔡名軒，2010, "節能液壓 4/3 方向電磁閥設計研究"，機械月刊，第 36 卷，第 7 期，pp.32-38.