

氣動馬達建模與低階控制器設計

林柳絮¹ 林憲陽² 王宣勝²

¹ 德霖技術學院機械工程系講師

² 德霖技術學院機械工程系副教授

摘要

本文以實際工業控制應用為考量，嘗試使用低價位之 HT46R24 AD-Type 微控制器設計氣壓馬達轉速低階控制器，發展以微控制器為基礎之氣動馬達轉速伺服控制技術與硬體，進而探討微控制器於各種氣壓系統精密伺服控制應用上之可能性。首先本文分析氣動馬達動態並以實驗數據對氣動馬達進行開路系統鑑別，然後設計氣動馬達轉速低階控制器並安裝於氣動馬達轉速伺服控制系統上，進行性能測試與分析，最後數值模擬與實驗結果顯示本文所提出的控制器的可行性與實用價值。

關鍵詞：氣動馬達，低階控制器，微控制器

Dynamic Modeling and Low Order Controller Design for Air Motor

Liu-Hsu Lin¹, Hsien-Yang Lin² and Shiuan-Sheng Wang²

¹ Instructor, Department of Mechanical Engineering De Lin Institute of Technology

² Associate Professor, Department of Mechanical Engineering De Lin Institute of
Technology

Abstract

The purpose of this paper is to develop a MCU based controller of the air motor for the practical industrial applications. The development of this controller includes firmware and hardware tasks. First, we analyze the dynamics of air motors and the parameters of the system are identified through step responses in this paper. Then we design a suitable low order controller of the air motor. Finally, the proposed controller is applied to the air motor speed control system to test its performance. The results of the simulation and experiment demonstrate the proposed controller to have high feasibility and practical value.

Keywords: air motor, low order controller, MCU

壹、前言

氣壓系統在產業自動化中，屬於低成本自動化的領域，在各製造業中被廣泛應用，如自動進料退料系統、包裝機械、塑膠射出機、IC 插件機、高速研磨機等，對於省力化、少人化的自動生產系統，扮演著極重要且基本的角色，同時氣壓系統若搭配適當的機構、感測器及電動機控制即是機電整合(Mechatronics)。氣壓系統致動器依其運動方式之不同，可分為產生直線運動之氣壓缸、產生旋擺運動之氣壓旋擺器與產生迴轉運動之氣壓馬達。其中氣動馬達(air motor)與電氣馬達相較，氣動馬達有如下特性：

- 可以無限制的反覆正逆轉或停止、起動而不會燒毀。
- 起動或停止時的切換無火花產生，無爆炸之虞。
- 轉速的選擇範圍大。
- 受外界環境如濕氣、氣溫、塵埃等因素的影響少。
- 超負載時馬達停止不會有燒毀之虞。
- 重量、外型均較同馬力之電氣馬達輕巧。

雖然氣動馬達有上述之優點，但是由於氣體具有可壓縮性、高摩擦力、易於洩漏、非線性等問題，所以氣壓馬達的應用多屬簡單的開路控制，無法像電氣馬達進行精密伺服控制。早期關於氣壓系統的研究有 Shearer[1][2]，其嘗試將氣壓系統於操作點作線性化建立數學模式並以傳統控制理論設計控制器，然而，近年來隨著積體電路的快速發展，各種微電腦數位控制器的種類不斷的推陳出新，與功能不斷的增強；此外各種現代控制方法與理論也不斷地提出，諸如模糊控制、類神經網路控制、適應性控制、強健性控制等，使得過去無法與不易進行的氣壓系統精密伺服控制，如今也有學者嘗試以現代控制方法與理論來研究開發[3-10]。國內關於氣動馬達伺服控制的研究較少，其中李[9]使用 DSP based 之模糊控制器進行氣動馬達轉速伺服控制，許[10]採用參考模型適應性控制(model reference adaptive control) 進行氣動馬達轉速伺服控制。

上述研究分別採用價格昂貴之 DSP 與 PC 作為氣動馬達控制器之硬體，同時其控制器法則通常為複雜結構(complex structure)與需複雜演算不易安裝於一般之工業控制器內。所以本文以實際工業控制應用為考量，嘗試使用低價位之 HT46R24 AD-Type 微控制器，並設計氣動馬達轉速低階控制器，發展以微控制器為基礎之氣壓馬達轉速伺服控制技術與硬體，進而探討微控制器於各種氣壓系統精密伺服控制應用上之可能性。

貳、氣壓馬達之動態模式

2.1 氣動馬達動態模式

氣動馬達依設計形式可分為活塞式(Piston type)、輪葉式(Vane type)、齒輪式(Gear type)與渦輪式(Turbine type)，在工業應用中以輪葉式氣動馬達為最常被使用，所以本研究採用輪葉式氣動馬達進行其動態模式分析與轉速控制測試。

輪葉式氣動馬達動態模式[3-5]整理分析如下，在氣動馬達控制系統中主要由電磁閥與氣動馬達本體構成，由於電磁閥的電磁響應遠快於氣動馬達氣體響應，於此將忽略電磁閥的電磁響應，僅考慮氣動馬達氣體響應。首先考慮氣動馬達入口處壓力變化方程式為

$$\dot{P}_i = \frac{f_i e_i}{V_i h_i} u_i - k \frac{P_i}{V_i} \frac{dV_i}{dt} \quad (1)$$

其中， P_i 為入口處壓力， V_i 為入口處氣室體積， e_i 與 h_i 為正值常數， u_i 為電磁閥輸入電壓值， f_i 為一非線性不連續函數，如下方程式所示：

$$f_i = k C_{di} T_i \sqrt{2R/T_i} R_u Y \left(\frac{P_d}{P_u} \right) \quad (2)$$

$$k = \frac{C_p}{C_v}, \quad R = C_p - C_v$$

其中， C_p 為定壓比熱， C_v 為定容比熱， T_i 為氣室溫度， Y 為 k 之非線性函數。相同地，氣動馬達出口處壓力變化方程式為：

$$\dot{P}_o = \frac{f_o e_o}{V_o h_o} u_i - k \frac{P_o}{V_o} \frac{dV_o}{dt} \quad (3)$$

由於氣動馬達出入口處之壓力變化，產生氣動馬轉軸旋轉運動，忽略氣壓洩漏因素，氣動馬達轉動動態模式可以推導如下列方程式：

$$J\ddot{\theta} + B\dot{\theta} + d = (P_i - P_a)V_i - (P_o - P_a)V_o \quad (4)$$

$$J = J_l + J_r, \quad B = B_l + B_m, \quad d = d_l + d_m$$

其中， J_l 、 J_r 分別為負載與轉子轉動慣量， B_l 、 B_m 分別為負載與馬達阻尼， d_l 、 d_m 分別為轉子與空氣摩擦阻力， P_a 為大氣壓力，由以上的分析得知氣動馬達轉動動態模式為一非線性時變函式。

2.2 氣動馬達系統鑑別

本節中，本文以實際實驗數據對氣動馬達進行開路系統鑑別，首先將氣動馬達系統鑑別的實驗數據於操作點進行曲線揉合與線性化，並獲得一具線性函式之SISO回授控制系統，如圖1所示，以便後續控制分析與設計。本文選擇比例閥開度60%(8V)之氣動馬達動態進行系統鑑別，獲得系統一階轉移函式如Eq.(5)所示，其時域響應圖，如圖2所示

$$G(s) = \frac{3.85}{s + 3.5} \quad (5)$$

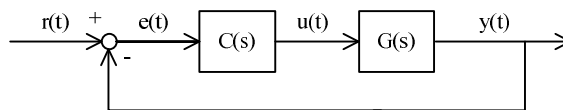


圖1 線性SISO回授控制系統

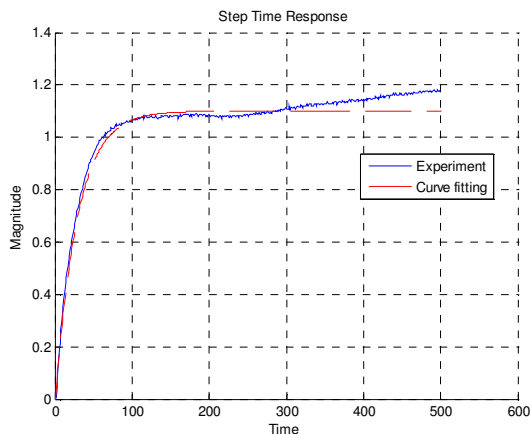


圖 2 氣動馬達開路系統時域響應圖

參、系統架構與控制器電路

3.1 氣動馬達控制系統架構

本文之氣壓馬達轉速控制系統，主要是由氣壓源、空氣調理組、5 口 3 位比例閥(FESTO MPYE-5-1/8)、快速排氣閥(FESTO)、輪葉式氣壓馬達(TONSON V1-L)、旋轉光學編碼器、控制器(內建 HT46R24 MCU 與轉速轉換電路)、個人電腦及相關運動控制卡(ADLINK 9112)所構成。其系統架構圖，如圖 3 所示。

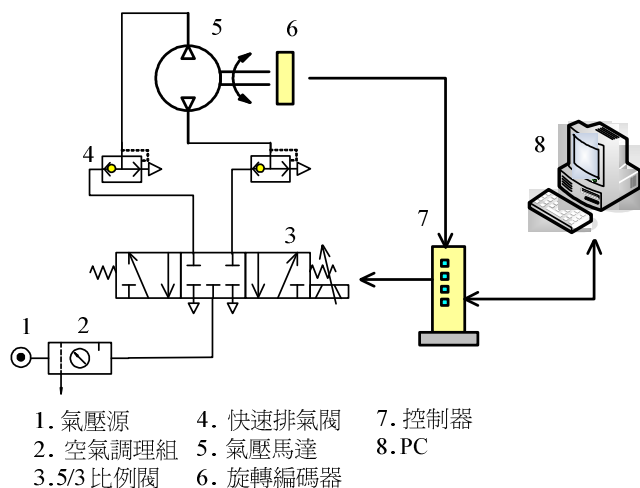


圖 3 氣動馬達控制系統架構圖

『氣壓馬達控制系統』工作原理詳述如下：個人電腦為系統人機界面，使用者輸入預設定之氣壓馬達轉速值，個人電腦計算相對應之控制量，再經由運動控制卡 DAC 轉換成 0~5V 類比電壓訊號送至控制器，經控制器內運算放大電路送出 0~10V 電壓至比例閥，比例閥依輸入電壓大小控制高壓空氣進入氣壓馬達之流量與方向，使氣壓馬達按照期望之轉速與方向運轉，最後經由光學編碼器的量測，送出方波訊號至速度轉換電路經由 HT46R24 MCU 計時/計數器計算出氣

壓馬達轉速並轉換為類比電壓訊號傳輸至控制器，控制器根據此回授轉速值與內建控制法則 (control law)，調整輸出類比電壓訊號進而達到氣壓馬達轉速閉迴路控制。其中位於氣動馬達出入口之 2 只快速排氣閥，其功能是使氣動馬達排氣不再經由 5/3 氣壓比例閥排氣，而是經由快速排氣閥較大口徑排氣口排氣，由於氣動馬達排氣是經由最短路徑排放，阻力最小，氣動馬達背壓減小，因此氣動馬達轉速大幅增加。氣動馬達轉速閉迴路控制方塊圖，如圖 4 所示。

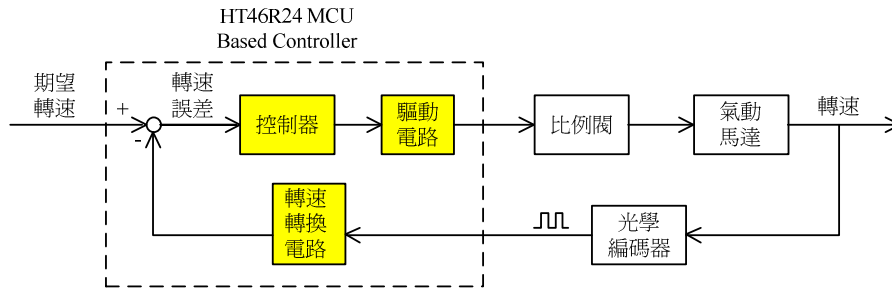


圖 4 氣動馬達轉速閉迴路控制方塊圖

3.2 HT46R24 Based 控制器電路圖

本文之氣壓馬達伺服控制用控制器硬體，主要是由控制驅動電路與速度轉換電路所構成，分述如下：

3.2.1 控制驅動電路

控制驅動電路是由 HT46R24 MCU、數位轉類比電路與運算放大電路所構成，方塊圖如圖 5 所示，電路圖如圖 6 所示。功能分述如下：

- HT46R24 MCU：擔任主控制器的任務，判斷手動/自動控制，讀取輸入電壓值，計算轉速並輸出(8 bits)訊號。
- DAC 電路：採用 R-2R Ladder DAC 電路，簡單、穩定，不怕干擾。
- 放大電路：使用 741 運算放大器將 0~5V 電壓放大 0~10V，送至比例閥。

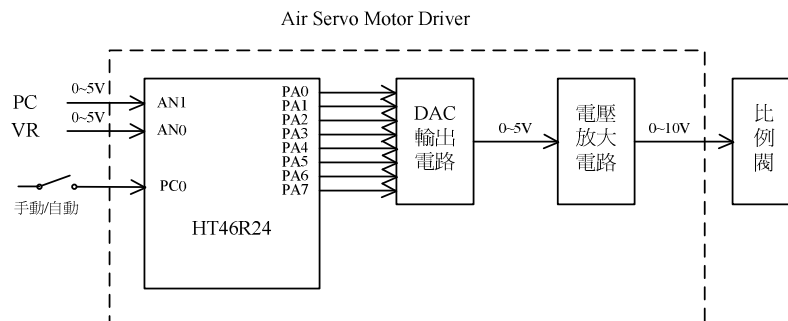


圖 5 控制驅動電路方塊圖

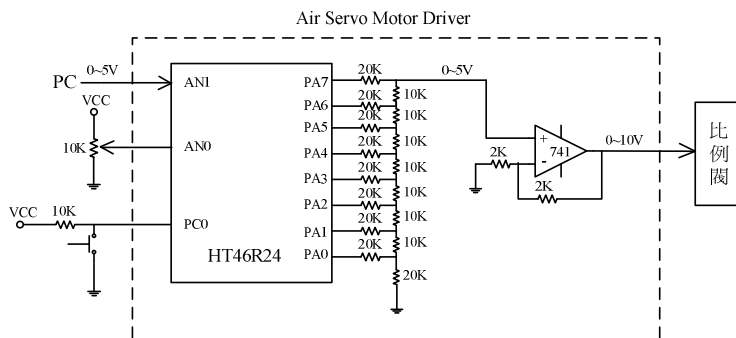


圖 6 控制驅動電路圖

3.2.2 速度轉換電路

速度轉換電路，主要是由 HT46R24 MCU、數位轉類比電路與脈波計數電路所構成，方塊圖如圖 7 所示，電路圖如圖 8 所示。功能分述如下：

- 脈波計數電路：使用 2 個串接 74193 計數 IC 電路，來讀取光學旋轉編碼器脈波。
- HT46R24 MCU：讀取脈波計數電路送來之計數值，使用 HT46R24 MCU 之 Timer0 以中斷方式產生計數所需之取樣時間(Sampling time)，計算轉速值並輸出對應轉速之電壓值(8 bits)。
- DAC 電路：採用 R-2R Ladder DAC 電路，簡單、穩定，不怕干擾。

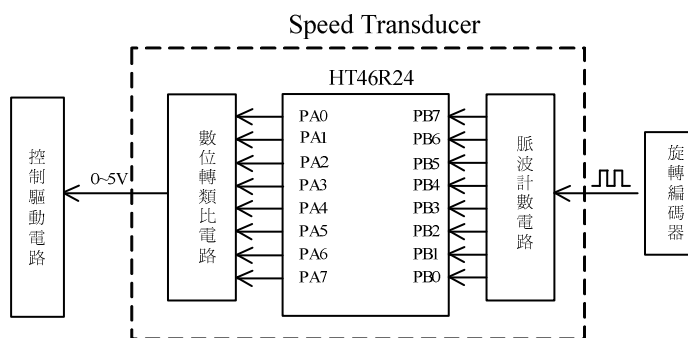


圖 7 速度轉換電路方塊圖

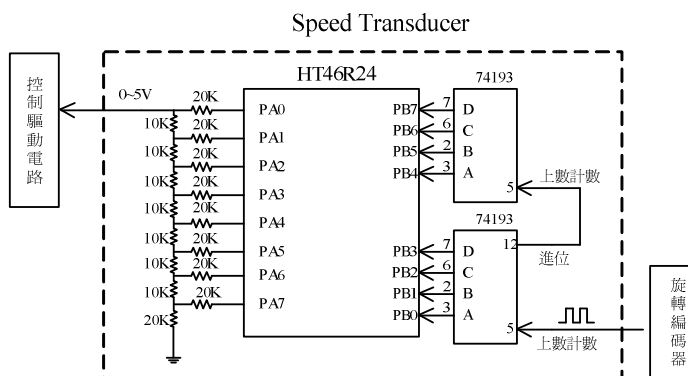


圖 8 速度轉換電路圖

肆、氣壓馬達低階控制器設計

本文的主要目的是設計一以八位元微控制器為基礎的氣動馬達轉速控制器，所以本文首先對氣動馬達時域暫態與穩態性能進行測試分析，進而設計一能安裝於八位元微控制器之低階控制器。其分析設計過程分述如下：

4.1 氣動馬達步階時域響應

本文選定比例閥開度60%(8V)之氣動馬達動態為系統動態，其一階轉移函式如Eq.(5)所示，其開路步階時域響應圖，如圖2所示。由圖2顯示，系統有一明顯約10%之穩態誤差。

$$G(s) = \frac{3.85}{s + 3.5} \quad (5)$$

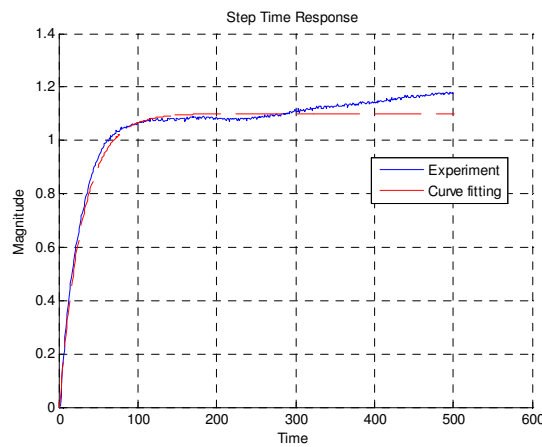


圖 2 氣動馬達開路系統時域響應圖

4.2 閉路比例控制模擬

隨後，本文採用比例控制器進行氣動馬達轉速伺服控制數值模擬。比例控制器數學型式為 $u(t) = k_p * e(t)$ ，圖 9 顯示不同 K_p 值之氣動馬達轉速閉路步階時域響應，隨著 K_p 值增加，系統反應加速上升時間縮短，此外系統穩態誤差也隨著 K_p 值增加而減少，但是不會為零。

證明: 令設備轉移方程式為 $G(s) = \frac{B}{s + A}$ ，A、B 為正常數，控制器轉移方程式為 $C(s) = K_p$ ， K_p

為正常數，輸入訊號為 $R(s) = \frac{1}{s}$ ，則閉路系統穩態誤差為

$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{sR(s)}{1 + C(s)G(s)}$$

將上列 $G(s) = \frac{B}{s + A}$ 、 $C(s) = K_p$ 、 $R(s) = \frac{1}{s}$ 三式代入 e_{ss} 中，

$$\text{得 } e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s + A}{s + A + k_p * B} = \frac{A}{A + k_p * B}，$$

所以 $K_p \uparrow$ ， $e_{ss} = \frac{A}{A + k_p * B} \downarrow \neq 0$ 。

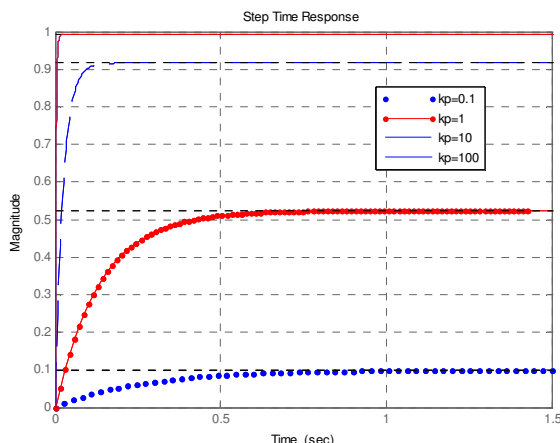


圖 9 不同 Kp 值之氣動馬達轉速閉路步階時域響應

4.3 閉路積分控制模擬

由上節模擬與推導得知，比例控制器能夠增進反應速度，改善穩態誤差但不能消除穩態誤差。所以本文於系統前向迴路中加入積分器， $U(s) = (\frac{ki}{s})E(s)$ ，提升系統之型態以消除穩態誤差，圖 10 顯示不同 Ki 值之氣動馬達轉速閉路步階時域響應，加入不同值之積分器後，系統之穩態誤差均可收斂為零，但同時系統反應速度變慢相對於比例控制，此外隨著 Ki 值增加，系統產生震盪與超越量。

證明：令設備轉移方程式為 $G(s) = \frac{B}{s + A}$ ，A、B 為正常數，控制器轉移方程式為 $C(s) = \frac{Ki}{s}$ ，Ki

為正常數，輸入訊號為 $R(s) = \frac{1}{s}$ ，則閉路系統穩態誤差為

$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{sR(s)}{1 + C(s)G(s)}$$

將上列 $G(s) = \frac{B}{s + A}$ 、 $C(s) = \frac{Ki}{s}$ 、 $R(s) = \frac{1}{s}$ 三式代入 e_{ss} 中，

$$\text{得 } e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{1 + \frac{ki * A}{s(s + B)}} = \frac{1}{1 + \infty} = 0$$

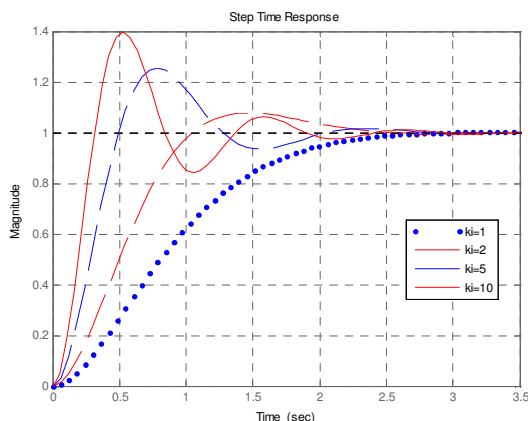


圖10 不同Ki值之氣動馬達轉速閉路步階時域響應

伍、實驗結果

最後本文採用比例積分控制器，安裝於氣壓馬達轉速控制系統上，並使用四種不同之時域規範進行實際測試，以探究氣壓馬達轉速控制的動態響應。

氣動馬達系統轉移方程式為 $G(s) = \frac{3.85}{s+3.5}$ ，比例積分控制器為 $C(s) = Kp + (\frac{Ki}{s})$ 。

測試一：系統性能規範為，時間常數(time constant) $\tau = 0.1$ 秒，阻尼比(damping ratio) $\zeta = 0.5$ ，比例積分控制器為 $C(s) = 4.2857 + (\frac{103.8961}{s})$ ，閉路系統 $Gc(s) = \frac{16.5(s + 24.24)}{s^2 + 20s + 400}$ ，圖11顯示模擬與實驗結果。

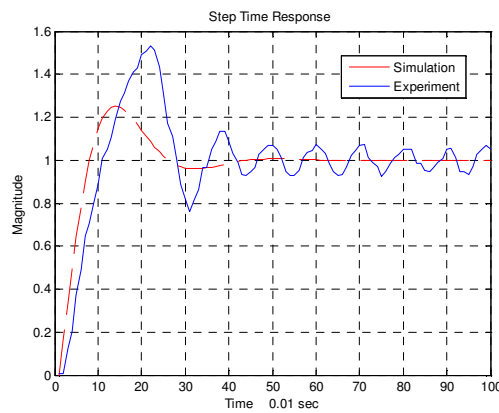


圖11 氣壓馬達轉速控制的動態響應, $\zeta = 0.5$

測試二：系統性能規範為，時間常數(time constant) $\tau = 0.1$ 秒，阻尼比(damping ratio) $\zeta = 0.707$ ，比例積分控制器為 $C(s) = 4.2857 + (\frac{12.12}{s})$ ，閉路系統 $Gc(s) = \frac{16.5(s + 12.12)}{s^2 + 20s + 200.1}$ ，圖12顯示模擬與實驗結果。

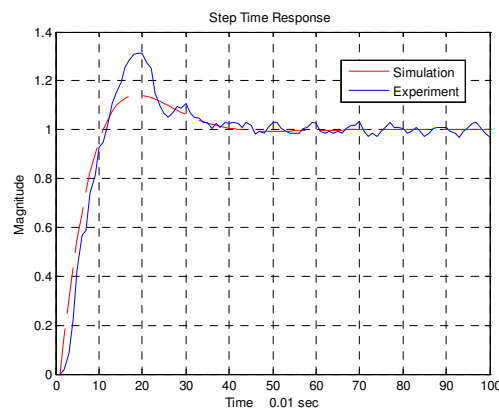


圖12 氣壓馬達轉速控制的動態響應, $\zeta = 0.707$

測試三：系統性能規範為，時間常數(time constant) $\tau = 0.1$ 秒，阻尼比(damping ratio) $\zeta = 0.9$ ，比例積分控制器為 $C(s) = 4.2857 + \left(\frac{32.0667}{s}\right)$ ，閉路系統 $Gc(s) = \frac{16.5(s + 7.482)}{s^2 + 20s + 123.5}$ ，圖顯示模擬與實驗結果。

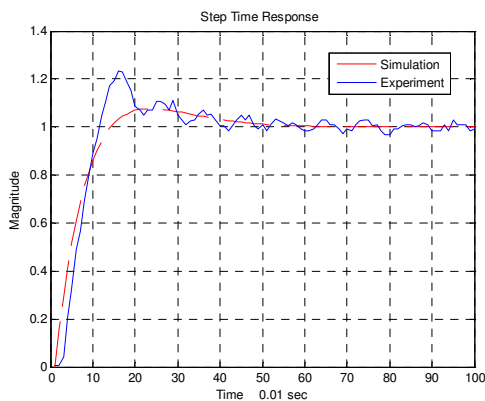


圖13 氣壓馬達轉速控制的動態響應, $\zeta = 0.9$

測試四：系統性能規範為，時間常數(time constant) $\tau = 0.1$ 秒，阻尼比(damping ratio) $\zeta = 1.2$ ，比例積分控制器為 $C(s) = 4.2857 + \left(\frac{18.0375}{s}\right)$ ，閉路系統 $Gc(s) = \frac{16.5(s + 7.482)}{s^2 + 20s + 69.45}$ ，圖14顯示模擬與實驗結果。

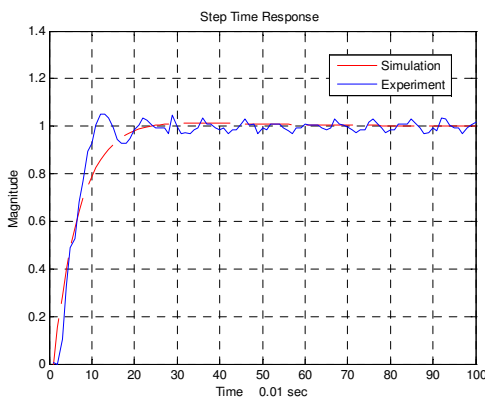


圖14 氣壓馬達轉速控制的動態響應, $\zeta = 1.2$

分析上述四種不同氣壓馬達轉速控制的動態響應，較小之阻尼比的系統會產生較大之震盪與安定時間，較大之阻尼比的系統則會產生較小之震盪與安定時間，且與所建立之系統模型較吻合。所以本文選定系統性能規範為，時間常數(time constant) $\tau = 0.1$ 秒，阻尼比(damping ratio)

$\zeta = 1.2$ ，比例積分控制器為 $C(s) = 4.2857 + \left(\frac{18.0375}{s}\right)$ ，閉路系統 $Gc(s) = \frac{16.5(s + 7.482)}{s^2 + 20s + 69.45}$ ，進一步作輸出線性測試。

測試五：輸出線性測試，分別於不同操作點，輸入訊號1V(1200rpm)、1.5V(1800rpm)、2V(2400rpm)與2.5V(3000rpm)，測試結果顯示穩態性能呈線性輸出關係並且穩態誤差均小於2%允許範圍內，如圖15所示，相較於圖2，系統未受控制前開路動態響應，本文所提出之低階PI控制器確實可以有效控制氣壓馬達轉速並滿足性能規範，此外本文所提出之低階PI控制器的結構簡單、係數小非常容易安裝於一般微控制器內。

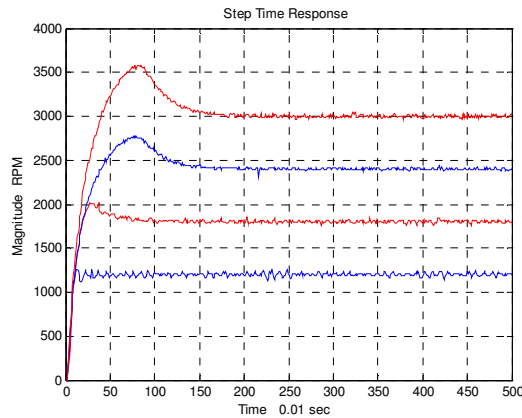


圖 15 不同操作點之步階響應， $\zeta = 1.2$

陸、結論

本文以實際工業控制應用為考量，嘗試使用低價位之 HT46R24 AD-Type 微控制器，並設計氣壓馬達轉速低階控制器，發展以微控制器為基礎之氣壓馬達轉速伺服控制技術與硬體，從實驗的結果與過程中，可得下列結論：

- (1) 本文所使用的控制方法，在控制精度上，皆可以控制在5%之內，在暫態反應上，大約0.3秒即達安定時間，故具很高控制性能。
- (2) 本文所提出之低階PI控制器的結構簡單、係數小，非常容易安裝於一般微控制器內。
- (3) 本文在氣壓馬達轉速系統上，使用快速排氣閥，增加氣壓馬達轉速，改善氣壓馬達動態性能；此外使用數位壓力錶來監控與調整壓力，避免實驗的誤差，增加實驗的可信度。
- (4) 使用高性能低價的微控制器構成感測與驅動電路，檢修容易具成本優勢，符合工業需求。

綜合以上所述，證明本文所提之控制方法與硬體之可行性與優越性。

參考文獻

1. J. J. Shearer, Continuous Control of Motion with Compressed Air, Scd, Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1954.
2. J. J. Shearer, The Study of Pneumatic Process in the Continuous Control of Motion with Compressed Air-I", ASME Trans., pp.233-242, 1965.

3. S. R. Pandian and M. Hanmandlu, Modeling and Control of a Pneumatic Rotary Actuator, Proceeding of Int. Workshop on Power Transmission and Motion Control, PTMC' 98, Bath, pp. 363-377, 1998.
4. S. R. Pandian and F. Takemura, Control Performance of an Air Motor, Proceeding of the IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, Michigan, pp. 518-524, May 1999.
5. F. Takemura, S. R. Pandian and Y. Nagase, Control of a Hybrid Pneumatic /Electric Motor, Proceeding of the IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and System, pp. 209-214, 2000.
6. J. Wang, J. Pu, C. B. Wong and P. R. Moore, Robust Servo Motion Control of Air Motor Systems, Proceeding of UKACC Int. Conference on Control, pp.90-95, 1996.
7. R. Marumo, M. O. Tokhi, Neural-Model Reference Control of an air Motor, IEEE AFRICON, pp.467-472, 2004.
8. R. Marumo, M. O. Tokhi, Intelligent Modeling and control of a Pneumatic Motor, IEEE CCECE, pp.1163-1166, 2004.
9. 李仁森，氣動馬達定速控制，碩士論文，中央大學機械系，2005。
10. 許雲峰，氣動馬達的適應性控制，碩士論文，台灣大學機械系，2006。
11. J. C. Doyle, B. A. Francis, and A. R. Tannenbaum, Feedback Control Theory, Macmillan Publishing Company, New York, 1992.
12. Kemin. Zho, Essential of Robust Control, Prentice Hall Publishing Company, New York, 1998.
13. 鍾啓仁，“HT46XX 微控制器理論與實務寶典”，全華圖書。
14. 林宗賢，“氣壓工程學”，文京圖書。
15. “HT-IDE3000 使用手冊”，盛群半導體公司。
16. “HT46R24 Handbook”，盛群半導體公司。