# 三相線性感應馬達之設計與推力分析

黃燕文[1*]、許瑞龍[2]、孔光源[1]、王建智[1]、彭紹瑋[1]

桃園創新技術學院機械與機電工程研究所[1]

吳鳳科技大學電機工程系[2]

## 摘要

本論文提出一種梯型感應體之構造用來改善線性感應馬達之推力，四種可實行之結構被用來分析和比較其差異性，梯型鋁板感應體、平板型鋁板感應體，開口平行槽鐵心與半閉口平行槽鐵心，藉由有限元素分析之方法，分析其在分佈式和集中式兩種繞法下四種結構之推力、推力鏈波的差異性，由模擬結果知本文所提出之半閉口平行槽移動鐵心與梯型鋁板感應體結構可以有效的改善線性感應馬達之推力。將選擇該線性感應馬達之梯型感應體厚度、氣隙與移動子半閉口平行槽鐵心形狀作為實驗設計法之實驗因子，並利用田口法找出該線性感應馬達之推力與推力鏈波之最佳化設計。

關鍵詞：線性感應馬達、有限元素分析、梯型感應體、推力

E-mail:hyw@tiit.edu.tw Tel：03-4361070#6409 Fax：03-4384670

# DESIGN AND THRUST ANALYSIS OF THREE-PHASE LINEAR INDUCTION MOTOR

Yan-Wen Huang[1*]、Ruey-Long Sheu[2]、Kuang-Yuan Kung[1]、

Chien-Chih Wang [1]、Peng-Shao Wei[1]

[1]Department Mechanical Engineering Taoyuan Innovation Institute of Technology Jhongli

[2]Department of Electrical Engineering, WuFeng University

## Abstract

This paper presents a structure of the ladder shape conductors to enhance thrust force of the linear induction motor. In the analysis, Four models may implement to the structure: semiopen parallel slots flats-type aluminum sheet(SPSF), semiopen parallel slots ladder-type aluminum sheet(SPSL), open parallel slots flats-type aluminum sheet(OPSF) and open parallel slots ladder-type aluminum sheet (OPSL). Thrust forces and thrust ripples are calculated under different aluminum sheet and back iron sheet thickness. Simulation results reveal that ladder aluminum sheet add back iron is possible to increase thrust force. Also, as the aluminum sheet get thinner, the effective air-gap will get smaller, and as a result, the thrust force will become bigger. Open parallel slots Ladder-type aluminum sheet has good thrust characteristics. The simulation data can be used as reference basis when estimating real linear motor performances.

Keywords: finite element analysis, linear motor, thrust

E-mail:hyw@tiit.edu.tw Tel：03-4361070#6409 Fax：03-4384670

# 壹、前言

運動控制系統的性能不斷提高之後，傳動元件的非線性效應也成為系統發展的瓶頸，因此排除使用傳動元件，改以直接驅動的方式來解決這些瓶頸，是最近這幾年研究的趨勢。線性馬達是採用直接驅動的方式作直線運動[1,2,3]，可以有效的消除傳動機構間的背隙所造成的問題，因而可提高伺服剛性，獲得高速響應各種類型的線性馬達中，由於線性感應馬達具有構造簡單、容易維修、低價格之優點，因此特別引人注意。各種不同型式的線性感應馬達被提出，有平板型、圓筒型、單側式、雙側式線性感應馬達[4,5,6]，線性感應馬達激磁繞組的配置對推力、磁浮力的影響的研究[7]，由於電磁場分析軟體的訊速發展，使用有限元素分析來分析驗證磁路最佳化之設計也被提出[8,9,10,11]，用來分析討論推力與磁浮力側向力之特性與性能，這些成果使線性感應馬達被運用至線性輸送與磁浮系統[12]。

本論文首先利用電磁場分析軟體建立三相線性感應馬達的 2D 幾何分析模型，定子採用鋁板、鋁板加背鐵兩種型式，藉由改變鋁板厚度、軛鐵厚度兩種參數分析其在分佈式和集中式兩種繞法下之推力、推力鏈波，由模擬結果知鋁板加背鐵可增加線性感應馬達之推力且鋁板愈薄背鐵之有效氣隙小推力變大。此模擬分析數據可作為預估實品線性感應馬達整體效能之重要依據，深具實用價值。

# 貳、機構設計

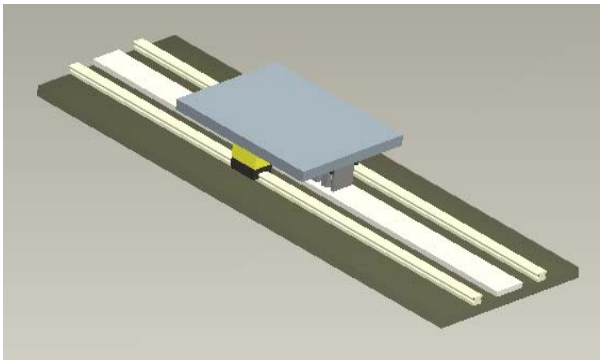
馬達設計的知識領域涵蓋了電磁學、機械、熱力學及材料科學等，首先訂定馬達的電氣如(表一)，根據學理、經驗法則與圖表訂定機械尺寸如(表二)。經由模擬分析或實驗來檢驗、修正所設計之參數，以最低的成本找出最佳之尺寸。本計劃所研製之線性感應馬達馬達其機構示意圖如圖(一)所示，線性感應馬達馬達其機構示意圖如圖(二)所示，機構設計流程圖如圖(三)所示，其構造由分為移動子、定子、基座三部份、其中移動子包含鐵心、線圈、移動鏈條等、定子是由鋁板、滑軌、滑塊、磁性尺等所組成。為了模擬時減少記憶體之使用量，在不影響模擬結果之情形下，線性感應馬達之2D幾何模型簡化為移動子、定子(鋁板)、背鐵、線圈、氣隙。

表一線性感應馬達之電氣規格表

| 名 稱 | 規 格 | 單 位 |
|---|---|---|
| 相數 | 3 | - |
| 極數 | 4 | - |
| 額定電壓 | 220 | V |
| 額定電流 | 6.25 | A |
| 頻率 | 60 | HZ |
| 連接型式 | Y | - |
| 槽數 | 12 | - |
| 極距 | 42 | mm |
| 線徑 | 0.6 | mm |
| 匝數 | 1000 | T |
| 線圈數 | 6 | - |
| 同步速度 | 5.04 | m/s |
| 絕緣等級 | F | - |

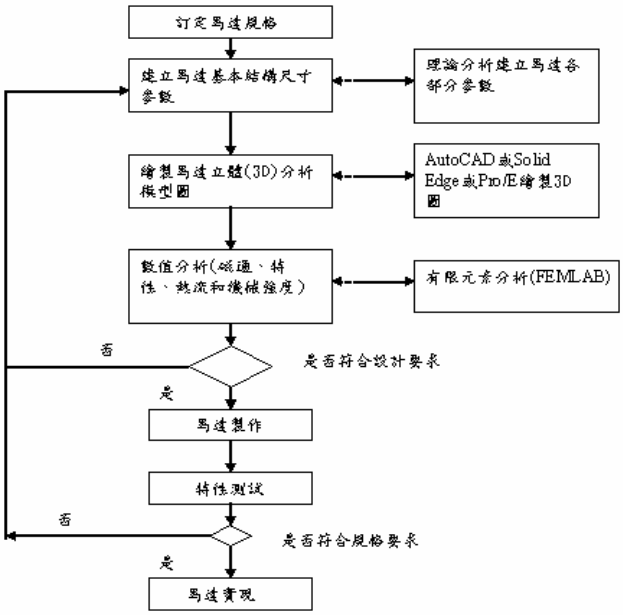
表二 線性感應馬達之尺寸表

| 名 稱 | 尺 寸 | 單 位 |
|---|---|---|
| 移動子長 | 168 | mm |
| 移動子寬 | 100 | mm |
| 移動子高 | 21 | mm |
| 槽深 | 17 | mm |
| 槽寬 | 6 | mm |
| 齒寬 | 8 | mm |
| 齒長 | 100 | mm |
| 感應體長 | 800 | mm |
| 感應體寬 | 104 | mm |
| 感應體厚 | 5 | mm |
| 背鐵長 | 1000 | mm |
| 背鐵寬 | 104 | mm |
| 背鐵厚 | 10 | mm |



圖一 線性感應馬達設計示意圖

圖 二 線性感應馬達實作成品圖




圖(三) 線性感應馬達設計流程圖

# 參、理論分析

線性感應馬達分析模型如圖四所示，分為移動子、激磁繞組、氣隙、定子、背鐵等五部分，定子激磁繞組採用分佈式與集中式兩種繞法，每相繞組其配置在空間上相差$\frac{\tau}{3}$，阻抗$Z_a$、$Z_b$、$Z_c$分別為

$$Z_a = z_m \cos\omega t \qquad (1)$$

$$Z_b = z_m \cos(\omega t - \frac{\tau}{3}) \qquad (2)$$

$$Z_c = z_m \cos(\omega t + \frac{\tau}{3}) \qquad (3)$$

在三相線性馬達激磁繞組加入三相電源$i_a$、$i_b$、$i_c$

$$i_a = i_m \cos\omega t \qquad (4)$$

$$i_b = i_m \cos(\omega t - 120) \qquad (5)$$

$$i_c = i_m \cos(\omega t + 240) \qquad (6)$$

在氣隙中會產生一移動的磁勢波$B_g$為

$$B_g = \frac{3\mu_0 N I_m}{4g} \cos(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x) \qquad (7)$$

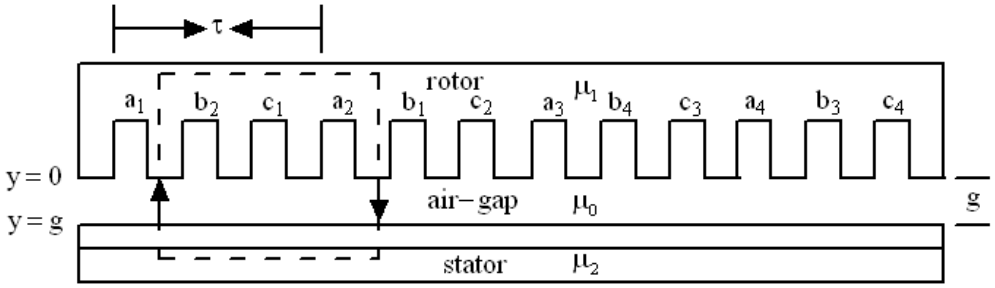
此移動的磁勢波$B_g$分為兩部分，一為時變的磁場$B_{gt}$，另一為移動的磁場$B_{gv}$。時變的磁場會在鋁板上產生感應渦電流，根據勞倫斯定律會產生一正向力$F_n$為

$$F_n = \frac{1}{\mu_0} \nabla (B_{gt} \cdot B_{Se}) \qquad (8)$$

其中$B_{Se}$為鋁板上感應渦電流之磁通密度。

移動的磁場$B_{gv}$會產生一速率電壓e，此速率電壓會在鋁板上產生一電流密度波$J_{Sv}$，根據勞倫斯定律會產生一推力$F_T$為

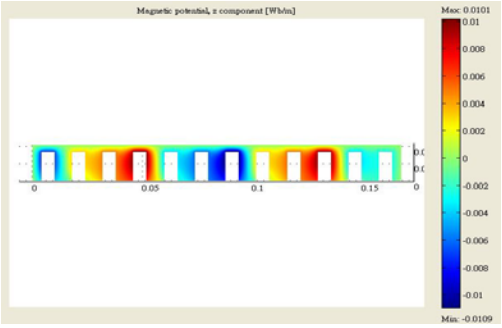
$$F_T = J_{SV} \times B_{gv} \qquad (9)$$



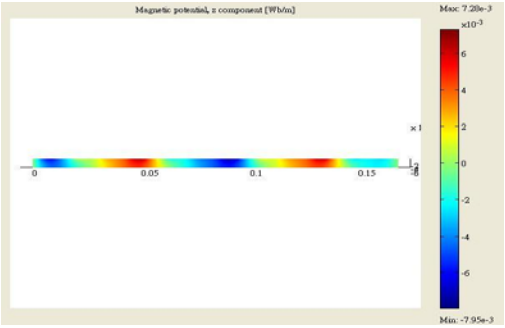

圖四 線性感應馬達分析模型

## 肆、模擬結果

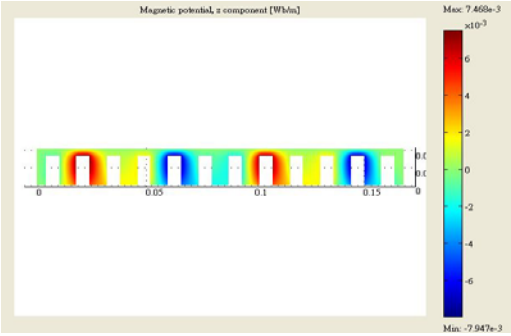
圖五、圖六、圖七、圖八為線性感應馬達的氣隙在 1mm 、背鐵 5mm 之情形下，線性感應馬達的繞線分別使用分佈式與集中式繞法，移動子鐵心與鋁板之磁位圖，由圖中可以清楚看出分佈繞移動子鐵心與鋁板上之磁位比集中繞法大。



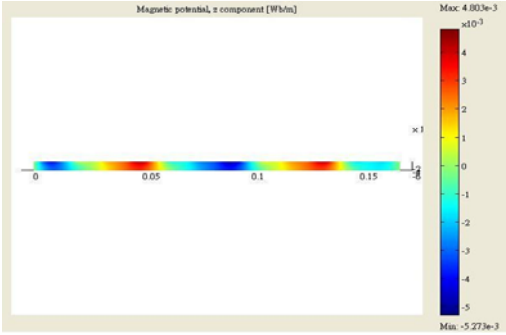
圖五 分佈繞移動子鐵心磁位勢圖



圖六 分佈繞鋁板磁位勢圖

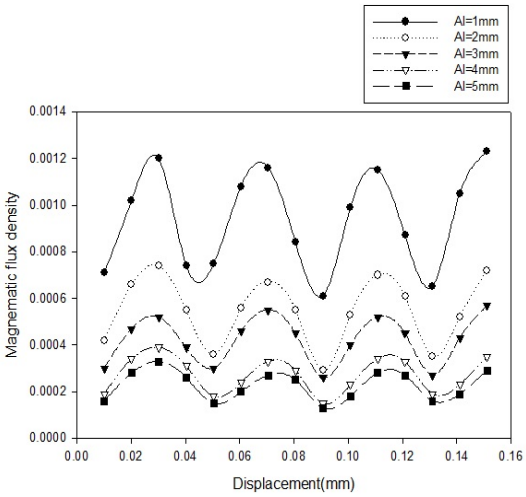



圖七 集中繞移動子鐵心磁位勢圖

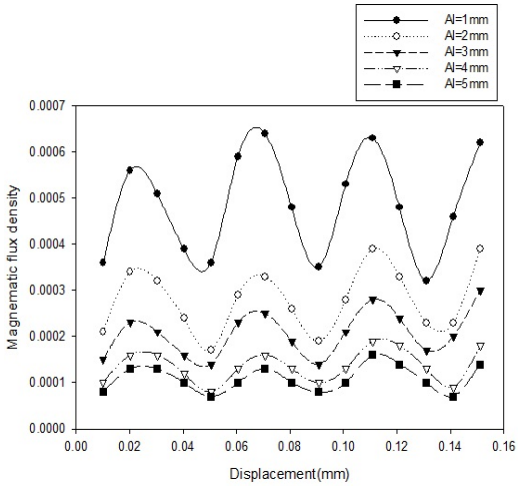



圖八 集中繞鋁板磁位勢圖

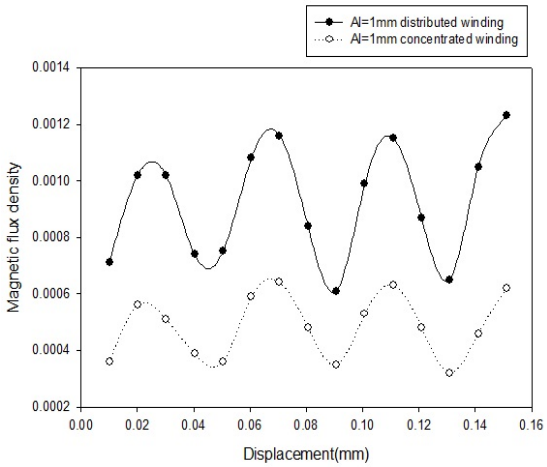
圖九、圖十、圖十一鋁板厚度由 1mm 改變至 5mm，分佈繞法與集中繞法之磁通密度變化的情形。由圖中可以看出隨著鋁板厚度增加，氣隙的有效長度變大，因此磁通變小而且分佈繞之磁通比集中繞大。




圖九 分佈繞磁通-位移曲線圖

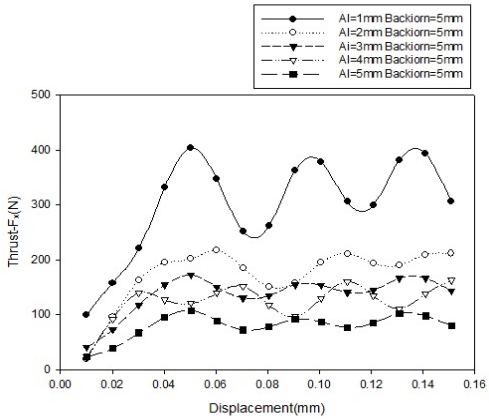



圖十 集中繞磁通-位移曲線

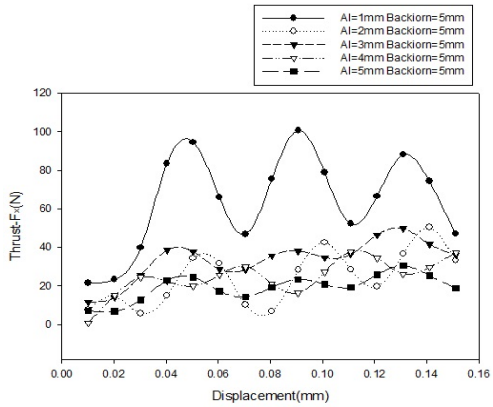



圖十一分佈繞與集中繞磁通-位移曲線

圖十二、圖十三為線性感應馬達的氣隙在 1mm 、背鐵 5mm、10mm 之情行下，線性感應馬達的繞線分別使用分佈式與集中式繞法，將鋁板之厚度由 1mm 增加至 5mm，在一個極距推力隨位移變化之情形。由模擬結果知鋁板的厚度增加，氣隙的有效長度變大，在低頻時因感應電流大部份在鋁板表面，因此推力變小，而且在相同的條件下分佈式繞法有較大的推力，但集中式繞法有較大的推力鏈波。

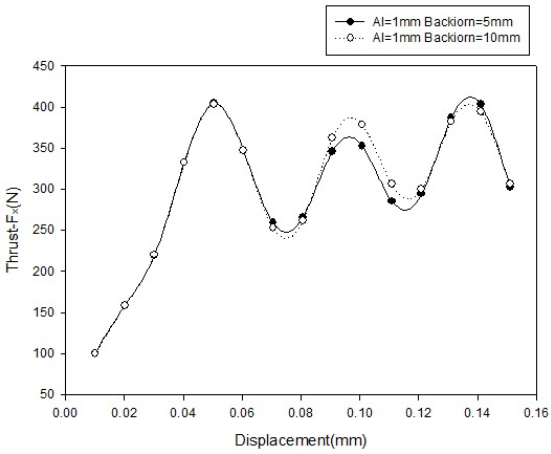



圖十二 分佈繞推力-位移曲線圖

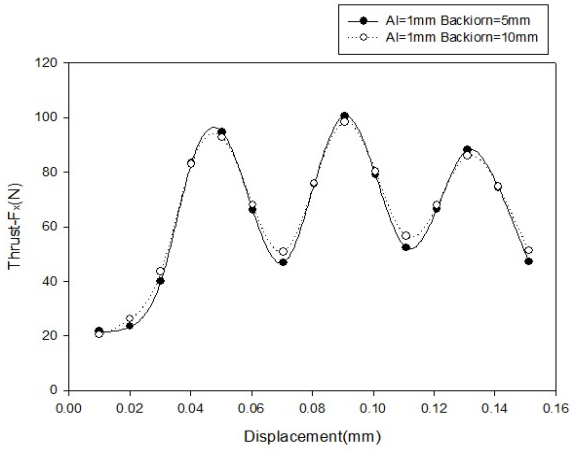



圖十三 集中繞推力-位移曲線

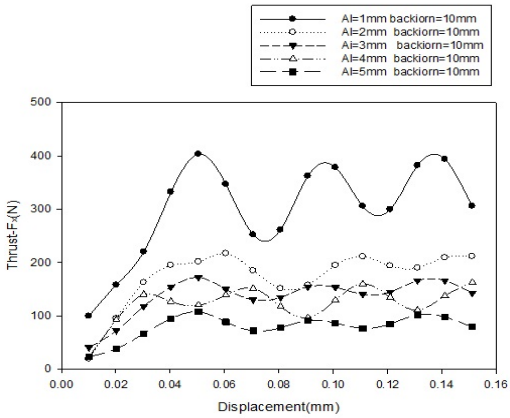
圖十四、圖十五、圖十六、圖十七為線性感應馬達的氣隙在 1mm、鋁板厚度固定在 1mm 之條件下，將背鐵採用 5mm、10mm 兩種尺寸來模擬分析推力之變化。由模擬結果知背鐵的厚度增加，但對線性感應馬達的推力影響甚小。



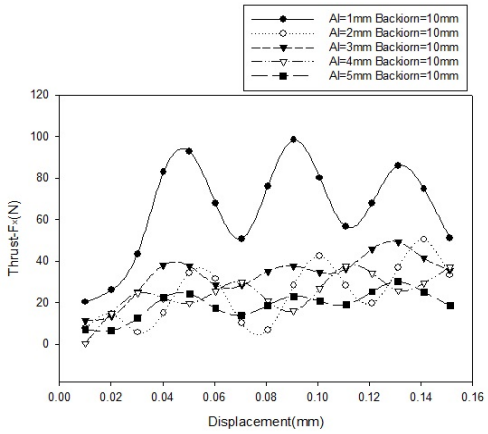

圖十四 分佈繞推力-位移曲線圖




圖十五 集中繞推力-位移曲線

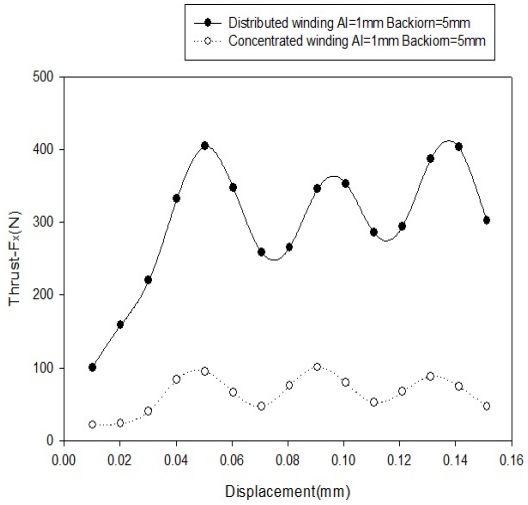



圖十六分佈繞推力-位移曲線

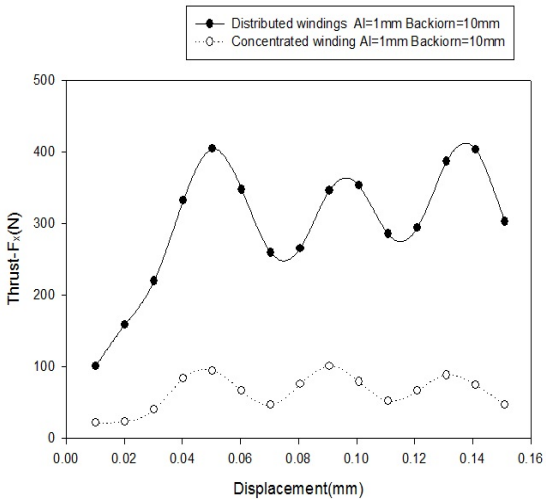



圖十七集中繞推力-位移曲線

圖十八、圖十九線性感應馬達的氣隙在 1mm、鋁板厚度 1mm，背鐵厚度為 5mm、10mm 之條件下，激磁繞組分別使用分佈式與集中式兩種繞法，來模擬分析其對推力之影響。由模擬結果知在相同之條件下分佈式繞法有較大的推力，但集中式繞法有較大的推力鏈波。




圖十八 分佈繞與集中繞推力-位移曲線圖




圖十九佈繞與集中繞推力-位移曲線圖

## 伍、結論

本論文利用電磁場分析軟體建立三相線性感應馬達的 2D 幾何分析模型，定子採用平板型鋁板加背鐵、梯型鋁板加背鐵兩種型式，分析其在分佈式和集中式兩種繞法下之推力、推力鏈波，由模擬結果知梯型鋁板加背鐵可增加線性感應馬達之推力，且鋁板愈薄、背鐵之有效氣隙小可得較大的推力。此模擬分析使用有限元素分析來獲得磁路之最佳化設計，數據可作為預估實品線性感應馬達整體效能之重要依據，並驗証馬達之性能，以減少研發之成本，深具實用價值。

## 陸、參考文獻

[1] I. Boldea and S. A. Nasar, Linear Electromagnetic Device. New York: Taylor & Francis, 2001.

[2] R. E. Laithwaite, Induction Machines for Special Purposes London: Newnes, 1966

[3] S.A.Nasar and I. Boldea, Linear Electric Machines. New York: Wiely.1976

[4] D.-H. Im *et al*., “Design of single-sided linear induction motor using the finite element method and SUMT” , IEEE Trans. Magn., vol. 29, no. 2, pp. 1762–1766, 1993.

[5] C. M. Neto, G. M. Jacinto, and C. B. Cabrita,“Optimised design aided by computer of single-sided, three-phase, linear induction actuators” , in MELECON ’98. 9th Mediterranean Electrotechnical Conf. Proc., Tel-Aviv, Israel, vol. 2, pp. 1157–1160, 1998.

[6] B.Ooi and D.C.White”Traction and normal force in the linea induction motor”IEEE.Trans Power App.S yst.vol.PAS-89, no.4.pp.638,1970

[7] T. Mishima, M. Hiraoka, and T. Nomura, “A study of the optimum stator winding arrangement of LIM in maglev systems,” in Proc. IEEE Int. Conf. Electr. Machines Drives, IEMDC, pp.1231–1242, 2005.

[8] B. K. Mukherjee, M. Sengupta, S. Das, and A. Sengupta, “Design, fabrication,testing and finite element analysis of a lab-scale LIM,”in Proc.IEEE Indian Annu. Conf., India, pp. 586–589, 2004.

[9] T. Yamaguchi, Y. Kawase, M. Yoshida, Y. Saito, and Y. Ohdachi, “3D finite element analysis of a linear induction motor,” IEEE Trans. Magn.,vol. 37, no. 5, pp. 3668–3671, 2001.

[10] Y. Kamiya and T. Onuki, “3D eddy current analysis by the finite element method using double nodes technique,” IEEE Trans. Magn.,vol. 32, no.3, pp. 741–744, 1996.

[11] P. Blanc, T. T. Xuan, and R. Deshais, “Design calculations for annular induction electromagnetic pumps based on the finite element method,” IEEE Trans. Magn., vol. MAG-18, no. 2, pp. 650–654, Mar. 1982.

[12] R.G. Rule and R. G. Gilliand. “Combined magnetic levitation and propulision”:The mag-transit concept,”IEEE Trans. Vehicular Technol.vol. VT-29.no.1.p.41,1980.